



مجموعه مقالات

یازدهمین کنفرانس ملی خلأ ایران

دانشگاه خاتم

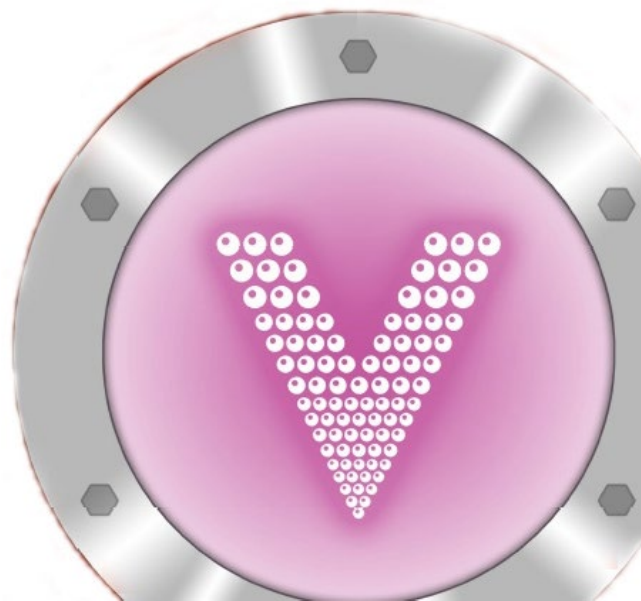
۲۲ آذر ماه ۱۴۰۲

دبیر کمیته علمی :

دکتر محمدرضا فتح‌اللهی

دبیر کمیته اجرایی :

دکتر عبدالله شمیسا



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مجموعه مقالات

یازدهمین کنفرانس ملی خلأ ایران

دبیر کمیته علمی کنفرانس

دکتر محمدرضا فتح‌اللهی

دبیر کمیته اجرایی کنفرانس

دکتر عبدالله شمیسا

انجمن خلأ ایران

دانشگاه خاتم

۲۲ آذرماه ۱۴۰۲



کمیته علمی کنفرانس:

دبیر کمیته:

دکتر محمدرضا فتح اللهی - دانشگاه صنعتی قم

اعضای کمیته:

دانشگاه یزد	دکتر عباس بهجت
دانشگاه شهید بهشتی	دکتر سیده مهری حمیدی
دانشگاه سیستان و بلوچستان	دکتر عبدالمحمود داوریناه
دانشگاه صنعتی اصفهان	دکتر مهدی رنجبر
دانشگاه گیلان	دکتر سید محمد روضاتی
دانشگاه صنعتی قم	دکتر مهدی سلیمانی
دانشگاه شهید بهشتی	دکتر محمدجواد شریفی
دانشگاه خاتم	دکتر عبدالله شمیسا
دانشگاه فردوسی مشهد	دکتر هادی عربی
دانشگاه کاشان	دکتر سید محمدباقر قریشی
دانشگاه شهید چمران اهواز	دکتر عبدالمحمد قلمبر دزفولی
دانشگاه علم و فناوری مازندران	دکتر محبوبه قلندری
دانشگاه شهید بهشتی	دکتر مجید قناعت شعار
دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکتر فرزاد محبوبی
دانشگاه صنعتی شریف	دکتر راحله محمدپور
دانشگاه الزهراء	دکتر عبدالله مرتضی علی
دانشگاه صنعتی شریف	دکتر علیرضا مشفق
صنعت	مهندس فرهاد معصومیان
سازمان انرژی اتمی	دکتر محمد هادی ملکی
دانشگاه شهید بهشتی	دکتر عزالدین مهاجرانی
دانشگاه تهران	دکتر مسعود مهجورشفیعی
دانشگاه سیستان و بلوچستان	دکتر علی اکبر مهماندوست
دانشگاه تبریز	دکتر حمید نقش آرا



یازدهمین کنفرانس ملی خا ایران



کمیته اجرائی کنفرانس:

دبیر کمیته:

دکتر عبدالله شمیسا

اعضای کمیته:

دکتر معصومه آزادگان

دکتر مرضیه شیرازی

دکتر داوود نصراصفهانی

تیم دانشجویی کمیته اجرائی:

امیرحسین جوانمردی

علیرضا رهبر

ابوالفضل صادقیان

سپهر کریمی نژاد

ریحانه ناصری

زهرا یعقوبی

فاطمه یعقوبی

مجری کنفرانس:

داود وفائی سیاوشانی



پیام دبیر علمی کنفرانس

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب نعمت است و به شکر اندرش مزید نعمت (حضرت سعدی) و تشکر فراوان تقدیم می‌کنم به تمامی شرکت کنندگان و دست اندرکاران محترم و گرامی که با علاقه و تلاش همیشگی، امکان دوباره باشکوه برگزاری همایش ملی خلأ ایران را فراهم آوردند. امسال یازدهمین کنفرانس ملی خلأ ایران در روز چهارشنبه ۲۲ آذرماه ۱۴۰۲ به میزبانی دانشگاه خاتم برگزار گردید که بدین وسیله، مراتب تشکر و قدرانی از اعضای کمیته اجرایی به پاس همراهی و زحمات ایشان، تقدیم عزیزان می‌گردد.

شروع اجرای کنفرانس، با جلب مشارکت اساتید و صاحب نظران از اقصی نقاط کشور، به منظور پر رنگ شدن جنبه ملی کنفرانس، با دعوت از ایشان جهت همکاری و ارائه نظر در کمیته علمی مورد توجه قرار گرفت. سپس با اعلام برگزاری کنفرانس یازدهم، از طریق دبیرخانه انجمن، وبگاه کنفرانس و همچنین بر روی بستر پیام رسانها، دریافت مقالات در سایت کنفرانس آغاز شد. پس از بررسی‌های اولیه، مقالات دریافت شده جهت ارزیابی علمی- تخصصی، برای یک یا دو داور صاحب نظر از اعضای کمیته علمی ارسال گردید و نظرات اندیشمندانه داوران محترم به نویسندگان انعکاس داده شد. در ادامه، به منظور بررسی مقایسه‌ای مجموع مقالات و جمع‌بندی نظرات داوران گرامی، جلسات فشرده متشکل از سه تن از اعضای کمیته علمی برگزار گردید. به جهت کاهش هزینه‌های برگزاری و شرکت در کنفرانس، همایش امسال بصورت فشرده و یک روزه برنامه‌ریزی گردید، لذا به ناچار، تعداد ۱۶ مقاله جهت ارائه شفاهی، در دو سالن همزمان (سالن اوک ادوات، لایه‌نشانی و لایه نازک‌ها و سالن دوم فناوری) و در دو نوبت صبح و بعدازظهر مورد پذیرش نهایی قرار گرفت و ناگزیر مابقی مقالات بر ارزش پذیرفته شده عزیزان، بصورت پوستر در کنفرانس ارائه شدند. این دوره نیز، مانند دوره‌های گذشته، علاوه بر مقالات تخصصی، آقایان اساتید و فناوران ممتاز، پروفیسور علیرضا مشفق (دستاوردهای دانشگاهی)، مهندس کوروس حمزه (تعامل صنعت و دانشگاه) و مهندس فرهاد معصومیان (دستاوردهای صنعتی) به عنوان سخنرانان کلیدی، به بیان نمونه دستاوردهای جالب توجه در حوزه فناوری خلأ پرداختند. همچنین مطابق رسم هر دوره کنفرانس، حسن ختام برنامه‌های تخصصی کنفرانس امسال نیز، با برگزاری یک دوره کارگاه آموزشی کاربردی، جهت بهره‌مندی شرکت کنندگان و علاقه‌مندان فناوری خلأ همراه بود.

در پایان مجدداً از لطف و زحمات همگی شرکت کنندگان و دست اندرکاران کنفرانس از جمله، مسئولین محترم دانشگاه خاتم، اعضای کمیته و تیم اجرایی و دبیر محترم کمیته اجرایی آقای دکتر عبدالله شمیسا، اساتید صاحب نظر و اندیشمند و همکاران گرامی در کمیته علمی، همکاران دلسوز در هیأت مدیره انجمن خلأ ایران و بالاخص مسئول محترم دبیرخانه انجمن سرکار خانم سیفی تشکر و قدرانی می‌کنم. حمایت برخی از دوستان و همکاران در خور ستایش است که علی‌رغم درگیر بودن در شرایط پیچیده و دشوار یا کسالت در زمان منتهی به کنفرانس لطف خود را نسبت به دست اندرکاران برگزاری کنفرانس هرچه تمام‌تر گذاشتند، جناب آقایان دکتر مهجور شفیع، دکتر بهجت، دکتر قناعت شعار، دکتر شریفی و دکتر قریشی.

با آرزوی سلامتی و موفقیت برای همه عزیزان

دبیر کمیته علمی یازدهمین کنفرانس ملی خلأ ایران

محمد رضا فتح الهی، آذر ۱۴۰۲، تهران



پیام دبیر اجرایی کنفرانس

از این که توفیق الهی شامل حال اینجانب و همکاران پرتلاشم شده و توانستیم در یازدهمین کنفرانس ملی خلأ در خدمت فرهیختگان جامعه علمی کشور عزیزمان باشیم، خداوند متعال را شکرگزاریم. حضور تک تک سروران را خیرمقدم گفته و امیدواریم که در حد توان و شایسته جایگاه ویژه آن عزیزان، وظیفه میزبانی را به درستی ادا کرده باشیم.

دانشگاه خاتم به عنوان یک دانشگاه غیردولتی - غیرانتفاعی، همواره پشتیبان مجامع علمی کشور بوده و با تلاش مدیران و اساتید لایق خود توانسته است در زمره دانشگاه‌های پیشرو در فناوری‌های جدید و حامی علوم پایه قرار بگیرد. توجه به حوزه‌های بین‌رشته‌ای، از رویکردهای جدی دانشگاه خاتم بوده و در سال‌های گذشته دستاوردهای مهمی در این رویکرد بدست آورده است.

کنفرانس‌های علمی محیطی پویا برای ارائه دستاوردهای جدید و برقراری ارتباط بین پژوهشگران و فعالین صنعت و دانشگاه در حوزه‌های مختلف تخصصی هستند. لذا این رویداد می‌تواند در حرکت پرشتاب کشورمان به سوی مرزهای دانش و رسیدن به جایگاه مناسب بین‌المللی کمک شایانی داشته باشد. امیدوارم حضور شما فرهیختگان در دانشگاه خاتم که سبب تبادلات علمی و دیدار همکاران می‌گردد، با خاطرات خوشی نیز همراه باشد. در پایان ضمن سپاسگزاری از همه افرادی که ما را در اجرای کنفرانس یاری نمودند، امیدواریم که شاهد تداوم برگزاری این رویداد و پیشرفت‌های بیشتر در حوزه علم و فناوری خلأ باشیم.

با سپاس

دبیر کمیته‌ی اجرایی

عبداله شمیسا، آذرماه ۱۴۰۲



فهرست مطالب

- ۱۰..... سخنرانی های کلیدی
- ۱۱..... دستاوردهای دانشگاهی : ساخت مواد دو بعدی بر پایه علوم و فناوری خلأ: اصول، خواص و کاربردها
- ۱۲..... تعامل صنعت و دانشگاه: کاربرد استانداردها برای فعالان عرصه فناوری خلأ
- ۱۳..... دستاوردهای صنعتی : گزارشی از طراحی و ساخت دستگاه لایه نشانی آینه رصدخانه ملی ایران
- ۱۴..... مقالات
- کد مقاله ۳۶۷ : شبیه سازی مونت کارلو برای محاسبه قطبش اسپینی و تخمین زمان اقامت الکترون در حالت های اتمی فلزات قلیایی با در نظرگیری طول عمر حالت های برانگیخته ۱۵
- کد مقاله ۳۶۸ : طراحی و ساخت الکتروود شفاف رسانا بر پایه ساختار دی الکترونیک /فلز/دی الکترونیک به منظور استفاده در کاتد سلول های خورشیدی پروسکایتی ۲۲
- کد مقاله ۳۶۹ : آشکارسازی آفلاتوکسین $G1$ با استفاده از بیضی سنجی پلاسمونی ۲۷
- کد مقاله ۳۷۰ : شبیه سازی و ساخت تراشه های میکروفلوئیدیکی پیشنهادی با استفاده از شیشه ۳۲
- کد مقاله ۳۷۲ : بررسی اثر پارامتر فشار در پلاسمای تخلیه الکترونیک تابان بر چگالی الکترونی پلازما ۳۷
- کد مقاله ۳۷۳ : شبیه سازی تخلیه تشدید سیکلوترونی الکترون تولید شده توسط آهنرباهای دائمی ۴۲
- کد مقاله ۳۷۴ : اندازه گیری رسانش نانو ساختارهای دوبعدی سیلیکونی با روش دو پروب اهمی در یک میکروسکوپ تونل زنی روبشی چند پروبی ۴۷
- کد مقاله ۳۷۵ : ساخت و مشخصه یابی لایه نازک اکسید دلافوسیت $CuGaO_2$ به روش کندوپاش ۵۲
- کد مقاله ۳۷۶ : شبیه سازی برهمکنش باریکه یونی دستگاه پلازما کانونی با سطح داخلی فنجان فارادی ۵۷
- کد مقاله ۳۷۹ : مشخصه یابی گسیل پرتو ایکس سخت و نرم دستگاه پلازما کانونی مدر 10 kJ ۶۲
- کد مقاله ۳۸۱ : طراحی و ساخت دستگاه لایه نشان چند منظوره جهت ارتقاء کیفیت لایه نازک در فرآیند لایه نشانی دورانی ۶۷
- کد مقاله ۳۸۴ : مشخصه یابی اپتیکی و بهینه سازی لایه نازک نانو ساختار FTO به روش اسپری التراسونیک ۷۱
- کد مقاله ۳۸۵ : تأثیر پارامترهای روش لایه نشانی با زاویه خراشان ($GLAD$) در عملکرد کلیدهای مقاومتی ۷۵
- کد مقاله ۳۸۶ : تأثیر تعداد پره ها و زوایای آنها بر عملکرد یک پمپ توربومولکولی تک مرحله ای به روش ذره آزمایشی مونت کارلو ۸۰



- کد مقاله ۳۹۱: بررسی اثر شدت میدان مغناطیسی بر رسوب انرژی حاصل از برخورد الکترون‌های گریزان با لیمتر توکامک دماوند ۸۶
- کد مقاله ۳۹۲: بررسی و شبیه‌سازی عملکرد سلول‌های خورشیدی پروسکایتی کاند پایین و کاند بالا با در نظر گرفتن تحرک حامل‌های بار سنگین ۹۰
- کد مقاله ۳۹۳: استحصال لایه اکسید گرافین از ماده گرافیت با لایه‌نشانی لیزر پالسی و بازپخت در شرایط خلأ: بررسی اثر حرارت‌دهی با استفاده از طیف‌سنجی رامان ۹۵
- کد مقاله ۳۹۴: کندوپاش مغناطیسی: مروری بر پیشرفت‌های اخیر ۱۰۰
- کد مقاله ۳۹۵: مروری بر بررسی پارامترهای مؤثر بر پوشش‌های پایه تانتالم تشکیل شده به روش کندوپاش مغناطیسی ۱۰۴
- کد مقاله ۳۹۶: جریان پایا در حلقه‌های کوآتومی مندلیبرات ۱۰۹
- کد مقاله ۳۹۷: تأثیر دمای بازپخت در خلأ و پهنای نوار بر امیدانس مغناطیسی در آلیاژ آمورف $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ ۱۱۴
- کد مقاله ۳۹۸: طراحی و پیاده‌سازی سیستم کنترل اتوماتیک فشار محفظه خلأ توکامک دماوند با استفاده از کنترل مدل چندگانه ۱۱۹
- کد مقاله ۳۹۹: کاهش زاویه تماس سطح $PMMA$ با محلول ژلاتین در اثر پلاسمای آرگون و ماندگاری آن ۱۲۴
- کد مقاله ۴۰۰: بررسی اثر خودکانونی تناوبی کر بر شدت سالیتون فضایی، روش وردشی ۱۲۸
- کد مقاله ۴۰۱: نشانیدن پوشش‌های الکترولس انتخابی نیکل بر روی ITO به منظور کاربردهای پلاسمونیک و مگنتوپلاسمونیک ۱۳۲
- کد مقاله ۴۰۳: تجزیه و تحلیل عملکرد مقایسه‌ای سلول‌های خورشیدی پروسکایت مبتنی بر $FAB(Pb, Sn)X(Cl, Br, I)_3$ ۱۳۶
- کد مقاله ۴۰۴: طراحی یک دستگاه لایه‌نشانی فیزیکی بخار ابعاد کوچک برای کاربردهای آزمایشگاهی ۱۴۱
- کد مقاله ۴۰۵: آنتن میکرواستریپ چهار باندها تراهرتز برای کاربردهای ارتباط بی سیم ۱۴۶
- کد مقاله ۴۰۶: تأثیر غلظت محلول پروسکایت متیل آمونیوم سرب بر مایند بر عملکرد دیود نورگسیل پروسکایتی ۱۵۲
- کد مقاله ۴۱۵: مطالعه تجربی گسیل یون در دستگاه پلاسمای کانونی مدر 20 kJ ۱۵۶



سخنرانی‌های کلیدی



ساخت مواد دو بعدی بر پایه علوم و فناوری خلا: اصول، خواص و کاربردها

دکتر علیرضا مشفق

استاد ممتاز دانشگاه صنعتی شریف

moshfegh@sharif.edu

چکیده

بر اساس نتایج تحقیقات نظری و تجربی منتشر شده، بعد مواد نقش بسزایی در چگونگی خواص، ویژه گی ها و کاربرد های مواد دارد. مواد دو بعدی به موادی اطلاق می شود که یک بعد آنها در مقیاس نانو (به ضخامت کمتر از ۱۰۰ نانومتر) است و دو بعد دیگر در مقایسه با ضخامت این مواد خیلی بیشتر می باشند. این مواد به دلیل داشتن خواص فوق العاده و منحصر بفرد آنها شامل خواص الکتریکی، اپتیکی، مغناطیسی، حرارتی و مکانیکی در سال های اخیر توجه بسیار زیادی از محققین را به خود جلب نموده است. برای مثال، از نقطه نظر خواص الکتریکی، مواد دو بعدی می توانند رفتاری متفاوت بصورت عایق، نیمه رسانا و یا فلزی از خود بروز دهند. در این گزارش، ابتدا انواع دسته بندی مواد دو بعدی شامل اکسید ها، سولفید ها، نیتريد بورهگزاگونال (hBN)، مکسین ها، هیدروکسیدهای دو لایه ای (LDH) و مواد تک عنصری نظیر گرافن، سیلیسین و فسفر سیاه (BP) و غیره ارایه خواهد شد. اما وجود ناخالصی و نقص های کریستالی در اینگونه مواد، خواص و لذا کاربرد آنها را محدود می نماید. بنابراین، با توجه به اهمیت کیفیت لایه ها از نقطه نظر کاربردی، اصول و روش های ساخت مواد دو بعدی در یک محیط کنترل شده بویژه روش های مبتنی بر علوم و فناوری خلا شامل PVD، CVD، MBE و PLD تشریح خواهد شد. در ادامه، برخی از تکنیک های مشخصه یابی و تعیین خواص مواد دو بعدی شامل AFM، XPS، Raman و HRTEM ارایه می شود. همچنین برخی از چالش های ساخت و اندازه گیری خواص این مواد، اشاره خواهد شد. در پایان، برخی از کاربرد های گسترده انواع مواد دو بعدی در زمینه های الکترونیک، اپتوالکترونیک، فوتوکاتالیست ها، الکتروکاتالیست ها، سنسورهای اپتیکی پوشیدنی، آشکارسازهای نوری، سلول های خورشیدی، باتری و میکروابرخازن ها، ذکر می گردد.



کاربرد استانداردها برای فعالان عرصه فناوری خلاء

مهندس کوروس حمزه

سازمان جهاد دانشگاهی صنعتی شریف

چکیده

بکارگیری فناوری خلاء بالا، به عنوان یک فناوری پایه و توانمندساز، از ابتدای انقلاب اسلامی تاکنون در کشور رشد فزاینده‌ای داشته است. در دو دهه اخیر، در کشور ترجمه اکثر استانداردهای بین‌المللی ایزو مربوط به فناوری خلاء و تصویب آنها به عنوان استانداردهای ملی انجام شده است. در این سخنرانی ابتدا بطور فشرده درباره ابعاد مختلف مقوله استاندارد و وضعیت جهانی و محلی تدوین استاندارد توضیحاتی داده خواهد شد. سپس به روند تدوین استانداردهای مربوط به فناوری خلاء توسط سازمان بین‌المللی استانداردسازی (ایزو) و سازمان ملی استاندارد پرداخته می‌شود. دولت ایران از یک قرن پیش فعالیت در زمینه بکارگیری استانداردها را آغاز و سازمان ملی استاندارد را در سال ۱۳۳۹ تاسیس نمود. در همین سال ایران به عضویت سازمان جهانی استانداردسازی (ایزو) درآمد. در سازمان جهانی ایزو کمیته TC112 در زمینه فناوری خلاء فعالیت می‌کند و کشور ما با تشکیل کمیته متناظر فناوری خلاء با کمک سازمان جهاد دانشگاهی صنعتی شریف در دهه ۱۳۹۰ و مشارکت فعال در تدوین استانداردهای بین‌المللی، به عضویت دائم TC112 درآمد. در ادامه سخنرانی، به ارائه اطلاعات کاربردی درباره استفاده از استانداردها توسط مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان عرصه فناوری خلاء پرداخته تا هر چه بیشتر از این منبع دانش بهره برده شود. انتظار می‌رود این سخنرانی موجب جلب همکاری بیشتر متخصصین با کمیته استاندارد انجمن خلاء ایران در تدوین، به‌روزرسانی و بکارگیری استانداردهای فناوری خلاء گردد.



گزارشی از طراحی و ساخت دستگاه لایه نشانی آینه رصدخانه ملی ایران

مهندس فرهاد معصومیان

انجمن خلأ ایران

چکیده

رصدخانه ملی ایران یکی از بزرگترین پروژه‌های علمی کشور می‌باشد. این تلسکوپ در قله گرگش در ارتفاع تقریبی ۳۳۰۰ متر از سطح دریا نصب شده است. در این تلسکوپ که در مقیاس جهانی سایز متوسط محسوب می‌شود، آینه اصلی قطری در حدود ۴/۰ متر دارد. جنس زیرلایه از نوعی سرامیک با نام ZERODUR با وزن تقریبی چهار تن است که با لایه‌ای از آلومینیم خالص و به ضخامت یکصد نانومتر پوشش دهی شده است. در این سخنرانی مراحل مختلف بررسی مفهومی، انتخاب بخش‌های عملیاتی دستگاه و تجهیزات لازم، طراحی و ساخت دستگاه لایه‌نشانی به روش اسپاترینگ جهت پوشش دهی دقیق آینه‌های اولیه و ثانویه تلسکوپ مورد بررسی قرار می‌گیرد.



مقالات



شبیه سازی مونت کارلو برای محاسبه قطبش اسپینی و تخمین زمان اقامت الکترون در حالت های اتمی فلزات قلیایی با در نظرگیری طول عمر حالت های برانگیخته

قمصری یزدل، فاطمه؛ شریفی، محمدجواد

آزمایشگاه افزاره های نانومتری، دانشکده برق، دانشگاه شهید بهشتی

M.J.Sharifi@sbu.ac.ir and f_ghamsariyazdel@sbu.ac.ir

چکیده

دینامیک فرآیندهای پمپ نوری یک سلول بخار قلیایی به روش آماری مونت کارلو شبیه سازی شده است. تاکنون با صرف نظر از طول عمر حالت های برانگیخته، حل معادله بلاخ روشی ساده و کارآمد برای تحلیل یک سیستم تک حالتی بوده است که منجر به یک معادله بلاخ تک المانی شده و به سادگی به کمک آن میزان مغناطش در عبور نور از محیط قطبیده بخار قلیایی قابل محاسبه بود. اما در این مقاله برای اولین بار به تحلیل و بررسی دینامیک مسئله با در نظرگیری طول عمر حالت های برانگیخته پرداخته می شود. طول عمر حالت های برانگیخته منجر به دشواری دینامیک مسئله شده و حل معادله بلاخ برای تک تک حالت ها را بسیار دشوار می کند. به همین منظور، الگوریتم مونت کارلو به نحوی ارائه شده است که قابلیت توصیف دقیق و کامل قطبش اسپینی و چگالی حالت ها و زمان اقامت الکترون ها در هر حالت به منظور تحلیل و پیش بینی پاسخ حسگرهای اتمی را دارد.

Monte Carlo simulation for calculation of spin polarization and estimation of electron residence time in atomic states of alkali metals considering the lifetime of excited states

Ghamsari, Fatemeh; Sharifi, Mohammad Javad

Laboratory of Nanometric Devices, Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University

Abstract

The dynamics of optical pumping processes of an alkaline vapor cell are simulated by the Monte Carlo statistical method. Decision By ignoring the lifetime of the excited states, solving the Bloch equation has been a simple and efficient method to analyze a single-state system, which is reduced to a single-element equation, and with its help, the degree of magnetization in the passage of light through the polarized medium of alkaline vapor is easily determined. But in this article, for the first time, the dynamics of the subject will be analyzed and examined by considering the lifetime of excited states. The lifetime of the excited states leads to the difficulty of the dynamics of the problem and makes it very difficult to solve the Bloch equation for individual states. For this purpose, the Monte Carlo algorithm has been presented in a way that has the ability to accurately and completely describe the spin polarization and the density of states and the residence time of electrons in each state in order to analyze and predict the response of atomic sensors.



مقدمه

جهت تولید قطبش اسپینی دو روش استفاده از میدان مغناطیسی و تابش اتم‌ها با نور تشدیدی قطبیده وجود دارد [۱]. برای دستیابی به درجه بالایی از قطبش در روش اول، نیاز به اعمال میدان مغناطیسی خیلی قوی است که استفاده از چنین میدان‌هایی نیاز به ابررساناها و دمای نزدیک به صفر کلونین دارد [۲]. اما روش دوم، که پمپ نوری یا دمش اپتیکی نامیده می‌شود، به دلیل نرخ قطبش بسیار بالا در کاربردهای زیادی مورد استفاده قرار گرفته است.

فرآیند پمپ نوری در سال ۱۹۴۹ توسط کستلر و بروسل کشف شد [۳]. در واقع، پمپ نوری فرآیند القای تکانه زاویه‌ای از نور به الکترون است که خواص مغناطیسی یک محیط اتمی را تغییر می‌دهد و روشی مهم برای بدست آوردن اتم‌های قلیایی (سدیم، پتاسیم، روبیدیوم، و سزیم) در حالت‌های کوانتومی معین است [۴ و ۵]. از کاربردهای مهم پمپ نوری برای قطبش اسپینی در الکترون فلزات قلیایی، حسگرهای اتمی می‌باشد. همه حسگرهای اتمی به منبع نوری متکی هستند که فرآیند پمپ نوری بهینه را ایجاد می‌کند. حسگرهای اتمی شامل سه دسته اصلی، ساعت اتمی، مغناطیس‌سنج اتمی، و ژيروسکوپ اتمی می‌باشند که همگی به علت سادگی ساختار انرژی فلزات قلیایی متکی بر آنها هستند. از این رو در این مقاله به مدل‌سازی پمپ نوری یک سلول بخار قلیایی که مهم‌ترین المان حسگرها است، پرداخته شده است. در بین فلزات قلیایی، پمپ نوری سدیم به دلیل کاربردهای فراوان مانند مغناطیس‌سنجی از راه دور از اهمیت بالایی برخوردار بوده است [۶ و ۷]. مغناطیس‌سنجی از راه دور متکی به مزوسفری در جو زمین است که در آن اتم‌های سدیم وجود دارند.

معادلات حاکم بر دینامیک فرآیند عبور نور از محیط قطبیده بخار قلیایی، همان معادلات حاکم بر تصویر کلاسیکی اسپین‌ها است که معادلات بلاخ نامیده می‌شود [۲]. در سال ۱۹۴۶ فلیکس بلاخ این معادلات را ارائه کرد که رفتار اسپین هسته را در میدان مغناطیسی ثابت تحت تأثیر پالس‌های فرکانس رادیویی و عوامل واهلش اسپین تشریح می‌کردند [۸].

معذک مقالاتی که تا به امروز بر روی پمپ نوری سلول بخار قلیایی کار کرده‌اند و از معادلات بلاخ برای تحلیل دینامیک مسئله بهره برده‌اند، همگی از طول عمر حالت‌ها و میزان اشغال حالت‌های تحریکی صرف‌نظر کرده‌اند که این فرض براساس طول عمر کم حالت‌های تحریکی در مقابل طول عمر زیاد حالت‌های پایه بوده است. در واقع در مقالات فرض می‌شود که الکترون‌ها به محض آن‌که وارد حالت‌های تحریکی می‌شوند، از آن حالت‌ها خارج شده و زمان اقامتی برای الکترون در این حالت‌ها در نظر نمی‌گیرند. در نتیجه فقط حالت پایه را در نظر گرفته و با حل معادله بلاخ تک المانی مغناطش را بدست می‌آورند. در این مقاله برخلاف دیگر مقالات، طول عمر حالت‌های تحریکی نیز در نظر گرفته شده است و تمام حالت‌های پایه و تحریکی و احتمال گذارهای موجود بین حالت‌ها لحاظ شده است، تا با تحلیل و بررسی دینامیک کامل فرآیند عبور نور از محیط قطبیده بخار قلیایی، میزان مغناطش و تعداد فتون‌های مصرفی و چگالی ترازها و زمان اقامت الکترون در هریک ترازها اعم از ترازهای پایه و ترازهای تحریکی محاسبه گردد. برای این منظور می‌توان از حل معادلات بلاخ استفاده کرد اما در این صورت معادله بلاخ باید به - طور جداگانه برای تک تک حالت‌ها نوشته و حل کرد که این امر مسئله را دشوار می‌کند. بنابراین برای اجرای این محاسبات، شبیه‌سازی با استفاده از روش مونت کارلو پیشنهاد شده است. مونت کارلو نام منطقه‌ای از کشور موناکو که در اروپای غربی واقع شده است، می‌باشد. روش مونت کارلو در حوزه‌های علوم پایه و مهندسی، پنجره محاسباتی جدیدی در کنار روش‌های قطعی، گشوده است [۹]. روش‌های مونت کارلو در حقیقت جنبه‌ی کاربردی شبیه‌سازی تصادفی با توجه به گسترش و پیشرفت رایانه‌هاست. این روش‌ها مجموعه‌ای از الگوریتم‌های محاسباتی هستند که بر اساس نمونه‌گیری‌های تکرار شونده‌ی تصادفی، محاسبه‌هایشان را انجام می‌دهند.

با توجه به ماهیت تصادفی حرکت الکترون‌ها در حالت‌های اتمی و توانایی الگوریتم مونت کارلو در مدل‌سازی پدیده‌های تصادفی، استفاده از این روش اطلاعات دقیق‌تری از مشخصه‌های دینامیک



فرآیند پمپ نوری

فلزات قلیایی به علت آن که یک الکترون جفت نشده در خارجی-ترین لایه خود دارند، انتخاب مناسبی برای پمپ نوری محسوب می‌شوند. در این حالت با تقریب بسیار خوبی می‌توان انرژی یک اتم را انرژی تک الکترون ظرفیت و هسته در نظر گرفت و از ترازهای انرژی داخلی صرف نظر کرد. در شکل ۱ (قسمت الف) فرآیند پمپ نوری نشان داده شده است. پرتو نور که در تشدید با گذار D_1 است، از منبع لامپ، بعد از عبور از عدسی و فیلتر، به وسیله قطبش‌گر و تیغه ربع موج، قطبیده‌ی دایره‌ای راستگرد می‌شود و به سلول حاوی بخار سدیم می‌تابد. فتون‌های موجود در پرتو پمپ دارای تصویر اسپینی یکسان در راستای انتشار نور می‌باشند. ساختار ریز و فوق ریز و زیمن اتم سدیم در شکل ۱ (قسمت ب) نشان داده شده است. ساختار ریز با در نظر گرفتن برهمکنش اسپین مدار شکل می‌گیرد و برهمکنش فوق ریز حاصل برهمکنش بین اسپین‌های هسته و الکترون است که موجب شکافتگی بیشتر ترازهای انرژی می‌شود. در نهایت، در میدان مغناطیسی خارجی ترازهای فوق ریز اتم‌ها تحت شکافتگی به تعداد زیادی زیرترازهای زیمن تقسیم می‌شوند. بدین صورت که، گشتاورهای مغناطیسی هسته‌ای و الکترونی با میدان خارجی برهمکنش می‌کنند، در نتیجه میدان مغناطیسی هر تراز فوق ریز F را به $2F+1$ زیر تراز تقسیم می‌شوند. با این همه از آنجا که فاصله انرژی خطوط فوق ریز در حد مگاهرتز و خطوط زیمن در حد کیلوهرتز است و برخوردهای مختلف و مکانیزم‌های واهلش باعث می‌شوند که خطوط طیف در سلول بخار تا حدود گیگاهرتز پهن شود در عمل ما فقط ساختار ریز را در نظر می‌گیریم و معادلات حاکم بر ممان‌های قطبش معادلات بلاخ هستند. بلاخ فرض کرد که اسپین‌ها در راستای طولی و عرضی با نرخ متفاوتی واهلش می‌یابند. این نرخ‌ها به صورت I/T_1 و I/T_2 در راستای محور Z و صفحه $X-Y$ در نظر گرفته شدند که T_1 زمان واهلش طولی و T_2 زمان واهلش عرضی مغناطش نامیده می‌شوند. با اعمال میدان مغناطیسی ثابت B_0 در راستای Z و میدان مغناطیسی نوسانی با فرکانس ω_{rf} عمود بر آن، معادلات به صورت

موردنظر نسبت به روش‌های دیگر فراهم خواهد نمود. رویکرد در نظرگیری طول عمر حالت‌های برانگیخته و محاسبه زمان اقامت الکترون در هریک ترازها از ویژگی‌های منحصر به فردی است که در این مقاله برای اولین بار توسط روش مونت کارلو ارائه شده است. زمان اقامت هر حالت رابطه معکوس با مجموع پهن‌شدگی‌های مرتبط با آن حالت دارد. رابطه پهن‌شدگی و طول عمر را بر اساس زیر داریم:

برای مثال ترازهای $P_{\frac{1}{2}}^2$ و $P_{\frac{3}{2}}^2$ دارای طول عمر طبیعی، τ_{nat} ، حدود ۲۵ الی ۳۵ نانو ثانیه می‌باشند. بنابر اصل عدم قطعیت:

$$\Delta t \Delta E \geq h \quad (1)$$

عدم قطعیت در زمان برابر با طول عمر طبیعی است، $\Delta t = \tau_{nat}$.
عدم قطعیت در فرکانس که برابر با

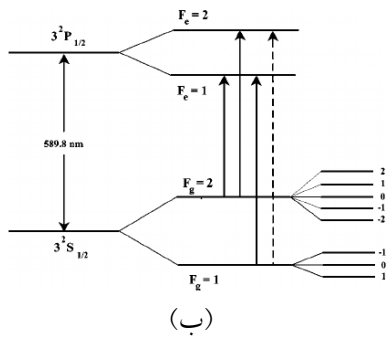
$$\Delta \nu = \frac{\Delta E}{2\pi h} \quad (2)$$

است، پهنای خط طبیعی را به صورت

$$\Gamma_{nat} = \Delta \nu = \frac{1}{2\pi \tau_{nat}} \quad (3)$$

بدست می‌دهد. برای گذارهای D_1 و D_2 در فلزات قلیایی، پهنای خط طبیعی حدود ۶-۸ مگاهرتز است.

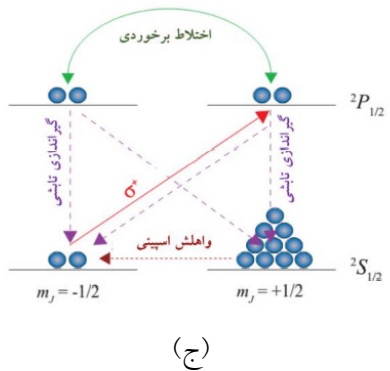
مقاله بدین گونه تنظیم گردیده است: در بخش دوم فرآیند تئوری عبور نور از محیط قطبیده بخار قلیایی مرور می‌شود. در بخش سوم با استفاده از روش مونت کارلو فرآیند کاملی از پمپ نوری مدل می‌شود و میزان قطبش و زمان اقامت الکترون‌ها در هر تراز و تعداد فتون‌های مصرفی و چگالی ترازها محاسبه و بررسی می‌گردد. بخش چهارم به ارائه نتیجه‌گیری مقاله اختصاص دارد.



$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{pmatrix} = -\gamma \begin{pmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} B_{rf} \cos(\omega_{rf}) \\ B_{rf} \sin(\omega_{rf}) \\ B_0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} S_x \\ T_2 \\ S_y \\ T_2 \\ S_z \\ T_1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

در می آیند [۱۰].

شکل ۱ قسمت (ج)، فرآیند انتقال تکانه‌ی زاویه‌ای از نور تشدیدی به اتم‌ها را با این فرض نشان می‌دهد. در فرآیند جذب اگر نور دارای قطبش دایره‌ای راستگرد باشد، فتون‌ها دارای تکانه‌ی زاویه‌ای +۱ در راستای محور انتشار نور هستند. یک اتم در زیر تراز حالت پایه با $m_j = -1/2$ با جذب یک فتون، طبق قانون پایستگی تکانه‌ی زاویه‌ای، به حالت برانگیخته‌ی $m_j = +1/2$ زیر تراز حالت $2P_{1/2}$ برانگیخته می‌شود. یک اتم در $m_j = +1/2$ حالت پایه، قادر به جذب فتون نمی‌باشد، چرا که هیچ تراز برانگیخته‌ای با تکانه‌ی زاویه‌ای اضافی +۱ در p موجود نمی‌باشد؛ بنابراین اتم‌ها با $m_j = +1/2$ در حالت پایه باقی می‌مانند تا زمانی که دستخوش فرآیندهای واهلشی شوند. در کاربردهای حسگر اتمی، معمولاً علاوه بر گاز فلز قلیایی، از گاز نجیب (معمولاً He یا Xe) به عنوان گاز بافر برای جلوگیری از برخورد با دیواره استفاده می‌شود. اتم‌هایی که به تراز پایه برمی‌گردند، فتونی تشدیدی با قطبش تصادفی گسیل می‌کنند که می‌تواند یک اتم دیگر را واقتبیده کند. برای جلوگیری از این پدیده که گیراندازی تابشی نامیده می‌شود، یک گاز خاموش کننده به سلول اضافه می‌شود که معمولاً یک مولکول دو اتمی مانند N_2 می‌باشد.

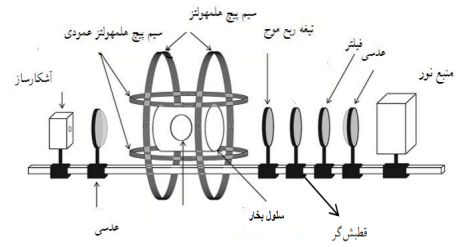


(ج)

شکل ۱: الف) شماتیکی از آزمایش پمپ نوری، ب) شماتیک تراز سدیم، ج) پمپ نوری اتم سدیم [۲-۱۲].

شبیه‌سازی فرآیندهای پمپ نوری با استفاده از الگوریتم مونت کارلو

احتمالات گذار متفاوت و زمان اقامت متفاوت برای الکترون در حالت‌های مختلف انرژی وجود دارد. معمولاً حالت‌های پایه، حالت‌هایی پایدارند، یعنی طول عمر بالایی دارند و حالت‌های برانگیخته حالت‌هایی ناپایدارند و طول عمر کمتری دارند. بنابراین با توجه به حرکت احتمالی الکترون‌ها و طول عمر متفاوت‌ها حالت‌ها، در این بخش به شبیه‌سازی فرآیندهای پمپ نوری توسط الگوریتم مونت کارلو پرداخته شده است. نقل و انتقالات الکترون و زمان اقامت آن در هر یک از حالت‌ها، به ترتیب در شکل ۲ و جدول ۱ نشان داده شده است. حالت‌ها با شماره‌های ۱ تا ۴ در شکل ۲ نام‌گذاری شده‌اند. در ابتدا الکترون را در یکی از حالت‌ها در نظر گرفته و امکان گذار به حالت‌های دیگر را دارد. مکان اولیه آن می‌تواند به دلخواه هر یک از چهار حالت پایه و برانگیخته

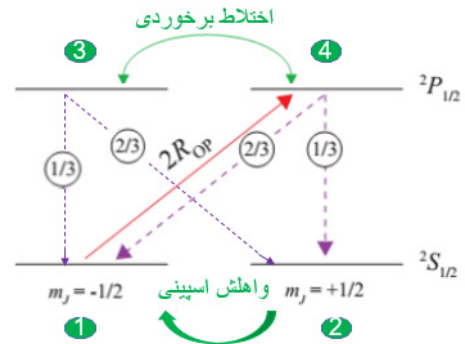


(الف)



در ادامه احتمال گذارها را بررسی می‌کنیم. جدول ۲ احتمال‌های گذار P_{ij} زمانی که الکترون از حالت i به j می‌رود را نشان می‌دهد. همانطور که در قبل اشاره شد، الکترون از حالت ۱ تنها به حالت ۲ و ۴ گذار دارد و این احتمالات بر اساس t_a و t_b مطرح می‌شوند که مجموع این دو احتمال برابر یک می‌باشد. با توجه به آنکه الکترون از حالت ۲ فقط می‌تواند به حالت ۱ گذار داشته باشد، با احتمال یک به حالت ۱ رفته و احتمال رفتن به باقی حالت‌ها صفر می‌باشد. با توجه به نرخ احتمال $2/3$ و $1/3$ در گذار حالت‌های برانگیخته به حالت‌های پایه، احتمالات گذار را طبق جدول ۲ برای حالت‌های ۳ و ۴ داریم.

باشد. برای مثال اگر در حالت ۱ باشد، تحت فرآیند جذب فتون از نور به حالت برانگیخته ۴ و تحت فرآیند واهلش به حالت ۲ رود.



شکل ۲: پمپ نوری $D1$ و بازگشت آنها با احتمال متفاوت به حالت‌های پایه

جدول ۱- زمان اقامت الکترون در هر حالت

شماره حالت‌ها	زمان اقامت در هر حالت
1	$\frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{t_a} + \frac{1}{t_b}$
2	$\tau_2 = t_b$
3	$\frac{1}{\tau_3} = \frac{1}{\tau_c} + \frac{1}{\tau_n}$
4	$\tau_3 = \tau_4$

جدول ۲- احتمال گذار از هر حالت به هر حالت دیگر

j \ i	1	2	3	4
1	0	$\frac{t_a}{t_a + t_b}$	0	$\frac{t_b}{t_a + t_b}$
2	1	0	0	0
3	$\frac{\tau_c}{3(\tau_c + \tau_n)}$	$\frac{2\tau_c}{3(\tau_c + \tau_n)}$	0	$\frac{\tau_c}{(\tau_c + \tau_n)}$
4	$\frac{2\tau_c}{3(\tau_c + \tau_n)}$	$\frac{\tau_c}{3(\tau_c + \tau_n)}$	$\frac{\tau_c}{(\tau_c + \tau_n)}$	0

طرحی از الگوریتم مونت کارلو مورد استفاده در این پژوهش، در شکل ۳ نشان داده شده است، تا با استفاده از احتمالات فوق میزان چگالی الکترون در هر حالت محاسبه شود. در ابتدا الکترون در

با توجه به این دو گذار خروجی از حالت ۱، زمان اقامت الکترون در حالت ۱ به شدت نور (t_a) و نرخ واهلش بین ترازهای پایه (t_b) وابسته است، که این وابستگی در جدول ۱ ارائه شده است. زمانی که الکترون در حالت ۲ باشد، فقط می‌تواند به حالت ۱ گذار داشته باشد. بنابراین زمان اقامت الکترون در حالت ۲ فقط به t_b بستگی دارد. زمانی که الکترون در حالت ۳ باشد، می‌تواند به سه حالت دیگر ۱، ۲ و ۴ گذار داشته باشد. مجموع گذار به حالت‌های ۱ و ۲، به نیمه عمر ذاتی حالت‌ها (τ_n) مربوط می‌باشد و گذار به حالت ۴ به فشار گاز بافر (τ_c) وابسته است. بنابراین طبق جدول ۱، زمان اقامت الکترون در حالت ۳ به دو پارامتر τ_c و τ_n وابسته است. با توجه به برابری احتمالات گذار در حالت ۳ و ۴، این دو حالت زمان اقامت یکسانی دارند. به عنوان مثال می‌توان اعداد نمونه‌ای زیر را در نظر گرفت: برای شدت تابش نور معمولی، t_a را ۱۰۰ میکروثانیه، t_b را ۱ میلی‌ثانیه و τ_c را ۱ نانوثانیه و τ_n را برابر ۲۰ نانو ثانیه می‌توان در نظر گرفت. در این صورت زمان‌های هر حالت ۱ تا ۴ به ترتیب برابر ۹۰.۹ میکروثانیه، ۱ میلی‌ثانیه، ۰.۹۵ نانوثانیه و ۰.۹۵ نانوثانیه خواهد شد. البته همانطور که بیان کردیم، این اعداد صرفاً اعداد نمونه‌ای هستند و اعداد واقعی در هر مورد به پارامترهای متعددی نظیر درجه حرارت و فشار گازهای موجود در سلول و جنس آنها و غیره بستگی دارد.



خروجی محاسبات فوق برای اعداد نمونه‌ای، در جدول ۳ ارائه شده است که شامل تعداد کل گذارهای شبیه‌سازی شده (N_i)، تعداد اقامت الکترون در هر کدام از چهار حالت (N_1 و N_2 و N_3 و N_4)

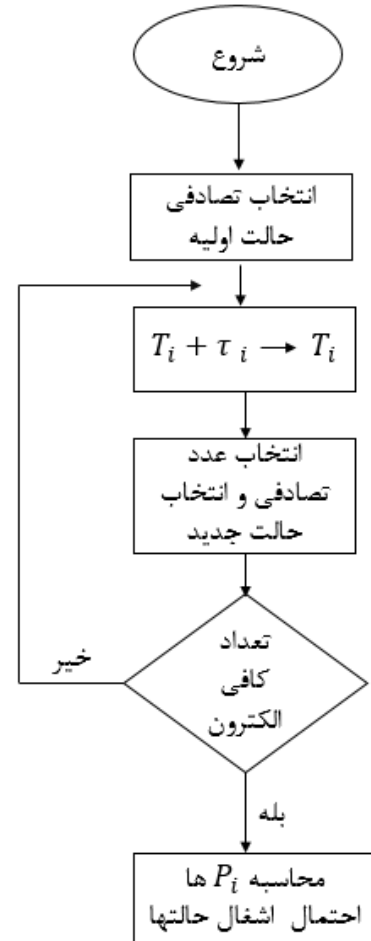
جدول ۳: خروجی الگوریتم مونت کارلو

N_i	1e8
N_1	4844774
N_2	2623836
N_3	45137603
N_4	47393787
T_i	3064 (s)
P_1	0.1437
P_2	0.8562
P_3	1.40e-5
P_4	1.47e-5
$P(\text{polarization})$	0.7125
N_{ph}	1437 (s ⁻¹)

N_4 ، زمان کل اقامت در حالت‌های مختلف (T_i)، احتمال قرار گرفتن الکترون در هر حالت (P_1 و P_2 و P_3 و P_4)، قطبش بدست آمده از تابش نور به اتم و نهایتاً تعداد فوتون جذب شده توسط اتم مورد بحث در هر ثانیه می‌باشد.

نگاهی به اعداد جدول به ما می‌گوید که از بین 10^8 گذار که شبیه‌سازی شده است بخش عمده آن گذارهایی بوده است که مقصد آنها حالت‌های p بوده‌اند. در عین حال الکترون خیلی بسرعت آن حالت‌ها را ترک می‌کرده است، بطوریکه احتمال حضور الکترون در این دو حالت خیلی کوچک است و الکترون بیشتر وقت خود را در حالت‌های s گذرانده است و البته در بیشتر زمان‌ها در حالت ۲ بوده است (حدود ۸۵٪). نهایتاً میزان قطبش بدست آمده در این شرایط حدود ۷۱٪ بوده است. بعلاوه جدول نشان می‌دهد که در طول کل زمان بیش از ۳۰۰۰ ثانیه که اتم را تحت نظر گرفته بوده‌ایم، این اتم در هر ثانیه ۱۴۳۷ فوتون جذب می‌نموده است. ضرب این عدد در تعداد کل اتم‌های موجود در سلول و ضرب در انرژی هر فوتون، توان لیزر مورد استفاده را می‌دهد.

حالت اولیه i قرار دارد و زمان اقامت آن τ_i است که در جدول ۱ آمده بود. بعد از آن به کمک اعداد تصادفی و وزنی که در جدول ۲



شکل ۳: الگوریتم مونت کارلو برای احتمالات اشغال حالت‌ها

داده شده است تصمیم بر آن می‌شود که به حالت تصادفی و جدید T_i برود. زمان کل اقامت الکترون در هر حالت (T_i) برابر با جمع تمام τ_i ها است که الکترون در حالت i قرار گرفته است. نهایتاً اگر تعداد کافی از الکترون شبیه‌سازی شده باشد، طوری که بدانیم همه حالت‌ها به یک حالت تعادل رسیده‌اند، P_i احتمال اشغال هر حالت است که با کمک T_i ها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$p_i = \frac{T_i}{\sum_{i=1}^4 T_i}$$



نتیجه گیری

در این مقاله برای اولین بار به منظور داشتن یک دینامیک کامل از فرآیندهای عبور نور از محیط قطبیده بخار قلیایی، طول عمر حالت‌های برانگیخته هم در نظر گرفته شده است. در این صورت در ساده‌ترین مدل که فقط دو حالت از s و دو حالت از p را در نظر بگیریم یک سامانه چهارحالتی ایجاد می‌شود که حل آن به روش بلاخ بسیار دشوار است. در نتیجه استفاده از روش مونت کارلو پیشنهاد شده است و یک الگوریتم مونت کارلو برای آن طراحی شده است. نهایتاً به کمک این الگوریتم و برای اعداد نمونه‌ای زمان اقامت در هر حالت، الگوریتم اجرا شده و با محاسبه زمان اقامت الکترون متوسط در هر حالت، مقدار قطبش الکترون و تعداد فتون‌های مصرفی و چگالی حالت‌ها محاسبه گردیده است.

مرجع ها

- [1] W. Happer and W. v. Wijngaarden, "An optical pumping primer", *Hyperfine Interact*, vol. 38, no. 1, p. 435-470, 1987.
- [۲] م. رنجبران؛ «بهبود حساسیت مغناطومتر اتمی M_x با تکیه بر خواص غیرخطی دینامیک اسپین»؛ پایان‌نامه دکتری، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۶.
- [3] A. Kastler, *Physika, Journ. Phys. Rad*, 11 (1950) 255.
- [4] X. X. Zhang, H. Q. Zheng, L. L. Ge et al, "Theoretical and experimental results of optically pumped sodium atoms", *Optics Communications*, Vol. 470, No. 125793, 2020.
- [5] W. Happer, "Optical pumping", *Rev. Modern Phys.* Vol. 44, pp.169-249, 1972.
- [6] Y. Hoshina, et al., "Electromagnetically induced transparency in a V-type multilevel system of Na vapor", *J. Opt. Soc. Amer. B* Vol. 31, No. 1808, 2014.
- [7] N. Ding, et al., "Magnetometry based on the effect of laser-induced plasmas in a sodium-containing environment", *Optics Letters*, <https://doi.org/10.1364/OL.468358>.
- [8] F. Bloch, "Nuclear Induction", *Phys. Rev.*, vol. 70, p. 460-474, 1946.
- [۹] وثوقی و همکاران؛ «کاربرد روش مونت کارلو در محاسبات هسته ای»؛ تهران: انتشارات صناعی شه‌میرزادی.
- [10] S. Groeger, G. Bison, J. L. Schenker, R. Wynands and A. Weis, "A high-sensitivity laser pumped M_x magnetometer", *Eur. Phys. J. D*, vol. 38, no. 2, pp. 239-247, 2006
- [11] S. J. Seltzer, PhD thesis, Princeton University, November.
- [۱۲] ف. پیرمردیان؛ «قطبش اپتیکی در فلز قلیایی روبیدیوم»؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۱.



طراحی و ساخت الکتروود شفاف رسانا بر پایه ساختار دی الکترونیک/فلز/دی الکترونیک به منظور

استفاده در کاتد سلول‌های خورشیدی پروسکایتی

یزدی، ابراهیم؛ قریشی، سید محمد باقر؛ شریفی، نفیسه

گروه فوتونیک پلاسما، دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان.

Ebrahim.yazdi70@gmail.com

چکیده

در این پژوهش با استفاده از مبانی ماتریس انتقال و برنامه *MathCad* ابتدا مقادیر بهینه ضخامت برای لایه‌های $MoO_3/Ag/MoO_3$ بدست‌آمد نتایج با نرم افزار لومریکال و ساخت نمونه تجربی با استفاده از روش تبخیر فیزیکی بررسی شد. ضخامت بهینه برای لایه های $MoO_3/Ag/MoO_3$ به ترتیب بصورت $32/15-35.7$ نانومتر بدست آمد و نمونه تجربی با این مقادیر ساخته شد. نمونه ساخته شده عبور بالای 70% در 550 nm و رسانندگی 3.94 اهم برمربع را نشان می‌دهد. همچنین نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی شده با لومریکال همخوانی خوبی دارد.

Design and fabrication of transparent conductive electrode based on dielectric-metal-dielectric structure for use as perovskite solar cells cathode

Yazdi, Ebrahim; Ghorraishi, S.Mohamad Bagher; Sharifi, Nafiseh

Department of Photonics and Plasma, Faculty of Physics, University of Kashan, Kashan

Abstract

In this research, it has been tried to obtain optimal thickness values for $MoO_3/Ag/MoO_3$ layers by using the basics of transfer matrix and *MathCad* program, and the results have been checked with *Lumerical* software and test sample construction by physical evaporation method. The optimal thickness for $MoO_3/Ag/MoO_3$ layers was obtained as $32/15/35.7$ and the test sample was made with these values. The produced sample shows a transmittance of over 70% at 550 nm and a conductivity of 3.94 ohms/square . The experimental results are consistent with the simulated results with *Lumerical*.

PACS No.



مقدمه

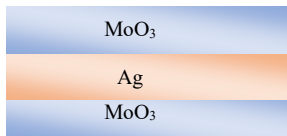
ابتدا با استفاده از مبانی ماتریس انتقال ضخامت بهینه برای هر کدام از لایه‌ها بدست آمده است. سپس نمونه تجربی با استفاده از نتایج شبیه‌سازی ساخته شده و آنالیزهای مربوطه از نمونه ساخته شده گرفته شده است. همچنین نمونه‌ای با استفاده از گزارشات پیشین [۴] ساخته و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است.

مبانی نظری و روش ساخت

برای شبیه‌سازی از نظریه ماتریس انتقال لایه نازک که در آن زیر لایه از یک طرف نامحدود است استفاده شده است [۵]. بر اساس این نظریه شدت عبور نور از یک محیط به محیط دیگر با ضخامت مشخص را می‌توان با استفاده از ماتریس انتقال زیر بدست آورد:

$$M_1 = \begin{bmatrix} \cos(\delta_1) & i i \cdot \frac{\sin(\delta_1)}{\eta p_1} \\ i i \cdot \eta p_1 \cdot \sin(\delta_1) & \cos(\delta_1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در این رابطه δ فاز ضخامت و $\eta\rho$ هدایت ظاهری نوری می‌باشد. حال اگر سه لایه بصورت زیر داشته باشیم ماتریس انتقال کل از حاصل ضرب ماتریس تمام لایه‌ها بصورت $M=M_1M_2M_3$ بدست خواهد آمد.



شکل ۱: ساختار DMD

برای بهینه سازی ضخامت در شبیه سازی، روابط بطور متغییر با ضخامت تعریف شد و سپس با استفاده از نمودارهای کانتوری دوبعدی ضخامت بهینه محاسبه شد. برای انتخاب ضخامت بهینه دو موضوع مد نظر قرار گرفت: (۱) عبور بالا (۲) مصر ماده کمتر. ضخامت بهینه بصورت ۳۵/۷-۱۵-۳۲ (نانومتر) بدست آمد.

در روابط مورد استفاده برای بهینه سازی فرض بر این است که نور از هوا وارد ساختار و در سمت دیگر شیشه نیمه بی‌نهایت قرار دارد. در ادامه ضخامت‌های بهینه شده با MathCad در برنامه lumarical هم شبیه‌سازی شد تا نتایج با یکدیگر مقایسه شود. در گزارشی یانگ و همکاران با استفاده از ضخامت ۲۲-۹-۶ (نانومتر) اقدام به ساخت سه لایه $MoO_3/Ag/MoO_3$ نموده و در

یکی از قسمت‌های مهم ابزارهای الکترو-اپتیکی بخش مربوط به اتصالات الکتریکی این ابزارها می‌باشد. این اتصالات علاوه بر رسانایی، باید از خواص نوری مناسبی برخوردار باشند. بطورمثال در هنگام ساخت سلول خورشیدی، اتصالات (کاتد یا آند) باید بگونه‌ای باشند که علاوه بر جذب و انتقال حامل‌های بار در مدار خارجی، مانعی برای عبور نور ایجاد ننمایند. بر این اساس در ساخت سلول‌های خورشیدی یکی از اتصالات فلز (کدر) و یکی از اتصالات اکسیدهای شفاف رسانا (ITO, FTO و...) می‌باشد. در سلول‌های خورشیدی متوالی هر دو اتصال باید از شفافیت خوبی برخوردار باشند لذا برای این امر محققان از راهکارهایی نظیر استفاده از نانو سیم‌های فلز، لایه‌های فوق نازک فلزی، لایه نازک گرافن، اکسیدهای شفاف رسانا و ساختارهای دی‌الکتریک-فلز دی‌الکتریک سخن به میان آورده‌اند [۱-۳].

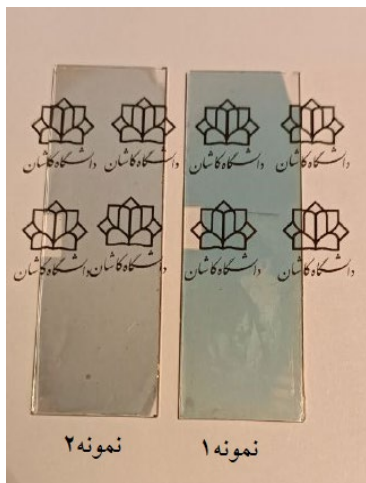
امروزه اکسیدهای شفاف رسانا (TCO) بیشترین کاربرد را دارند اما این اکسیدها از مشکلاتی نظیر کمبود منابع (ایندینوم)، فرایند ساخت پرهزینه، عدم ساخت بصورت منعطف و... رنج می‌برند. با توجه به اینکه ساختار دی‌الکتریک- فلز-دی‌الکتریک از فرآیند ساخت راحت‌تری برخوردار است و می‌توان خواص اپتیکی و الکتریکی آن را با تغییر ضخامت لایه‌های سازنده آن تغییر داد این ساختار می‌تواند نامزد مناسبی برای استفاده در کاتد یا آند سلول خورشیدی باشد. در این ساختار لایه‌های دی‌الکتریک باعث تطابق اپتیکی و لایه فلز با نفوذ در ساختار بلوری نیمه‌رسانا باعث افزایش رسانندگی می‌شود. اگر از سلول خورشیدی پروسکایتی با ساختار متوالی بخواهیم بهره‌برداری نماییم هر دو اتصال سلول باید دارای خواص نوری و الکتریکی مناسبی باشند. در حالت عادی یکی از اتصالات از FTO یا ITO بهره خواهد برد و یکی از اتصالات از فلزاتی همچون طلا و غیره. از دیگر کاربردهای این ساختار میتوان به پنجره‌های هوشمند، صفحات لمسی اشاره کرد. در این پژوهش ساختار $MoO_3/Ag/MoO_3$ به عنوان جایگزین طلا در سلول های خورشیدی با ساختار متوالی مورد بررسی قرار گرفته است.



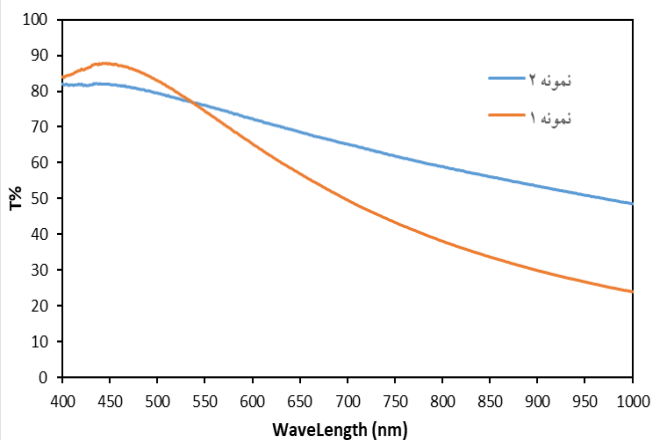
بحث و نتایج

شفافیت ظاهری DMD ساخته شده در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود نمونه ۲ شفافیت ظاهری بیشتری را نشان می‌دهد. با توجه به این که در نمونه ۲ ضخامت‌های مورد استفاده کمتر از نمونه ۱ است این شفافیت منطقی به نظر می‌رسد.

برای بررسی دقیق‌تر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر دو پرتویی مقدار تراگسیل نمونه‌ها و با استفاده از دستگاه پروب چهارنقطه‌ای مقدار مقاومت سطحی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد که نتایج در شکل ۳ جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: شفافیت ظاهری DMD های ساخته شده



شکل ۳: طیف عبور دو نمونه ساخته شده

این گزارش تأکید شده است که آهنگ لایه نشانی نقره بصورت ۵ آنگستروم برثانیه بهینه‌ترین حالت می‌باشد [۴]. لذا در این پژوهش پس از شستشوی زیرلایه نمونه ۱ با استفاده از ضخامت‌های بهینه شده توسط Madcat و نمونه ۲ مشابه مقاله یانگ ساخته شد. برای شستشو ابتدا زیرلایه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در محلول آب و صابون در حمام اولتراسونیک قرار داده شد و سپس با اتانول، استون و ایزوپروپانول فرآیند قبل تکرار و در نهایت در دمای ۱۲۰ درجه، به مدت ۲۰ دقیقه قرار داده شد؛ تا زیرلایه‌ها خشک شود. قبل از لایه نشانی زیرلایه‌ها به مدت ۵ دقیقه تحت تابش UV قرار گرفتند. در ادامه با استفاده از دستگاه تبخیر فیزیکی به روش حرارتی ضخامت‌های مطرح شده به ترتیب لایه‌نشانی شد.

جدول ۱: مشخصات انباشت لایه‌ها

ضخامت (nm)	فشار (۱۰ ^{-۳})	آهنگ انباشت (Å)	سپس برتبه	لایه	ماده	تعداد
۳۵/۷	۳/۱	۱	W	۱	MoO ₃	۱
						۲
						۳
۲۲	۳/۱	۱	W	۱	MoO ₃	۱
						۲
						۳

پس از ساخت کاتدهای DMD از آن‌ها آنالیز عبور و رسانندگی سطحی گرفته شد. یکی از فاکتورهایی که برای بررسی لایه‌های شفاف رسانا معرفی شده است فاکتور شایستگی می‌باشد که رابطه بین شفافیت و رسانندگی را بیان می‌کند. این پارامتر بصورت زیر حساب می‌شود:

$$\phi_m = \frac{T_{550}^{10}}{R_s} \quad (2)$$

در این رابطه عبور نور در ۵۵۰ نانومتر و R_s مقامت سطحی می‌باشد. هرچه این عامل مقدار بزرگتری داشته باشد بیانگر عملکرد خوب ساختار از لحاظ اپتیکی و الکتریکی می‌باشد.



جدول ۲: مشخصات الکتریکی و اپتیکی دو الکتروود ساخته شده

فاکتور شایستگی	مقاومت سطحی (Ω/\square)	عبور در ۵۵۰nm	نمونه ۱
۰/۰۱۸۰	۳/۹۸	٪۷۴/۶۴	نمونه ۱
۰/۰۰۸۵۰	۷/۵۱	٪ ۷۶/۰۳	نمونه ۲

در شبیه‌سازی با لومریکال به راحتی می‌توان لحاظ کرد. دواماً توابعی که لومریکال از آن پیروی می‌کند (روش دامنه زمانی تفاضل محدود) می‌باشد و واضح است که هنگامی که روش حل مسئله و معادلات آن تفاوت باشد به طبع نتایج متفاوت حاصل خواهد شد.

از طرفی در نظریه ماتریس انتقال لایه فلزی را یک لایه کاملاً جداگانه در نظر گرفتیم (مرز مشخص با لایه دی‌الکتریک). در حالی که در واقعیت می‌دانیم که بخشی از فلز به دور لایه دی‌الکتریک نفوذ کرده و این خود باعث تغییر ضرایب شکست و خاموشی در مرز دو لایه می‌شود. لذا فرضی که در نظریه ماتریس انتقال مفروض شده است (تفکیک کامل هر لایه) در حالت تجربی صحیح نمی‌باشد و این خود می‌تواند توجیه‌گر این اختلاف نتایج تجربی و شبیه‌سازی باشد.

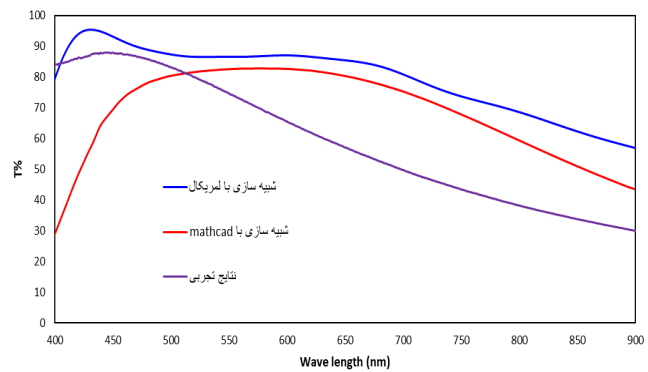
نتیجه‌گیری

در این پژوهش فیلم نازک سه لایه $MoO_3/Ag/MoO_3$ به عنوان کاتد در سلول خورشیدی پروسکاتی ابتدا با Mathcad و با استفاده از مبانی ماتریس انتقال، بهینه‌سازی شد و ضخامت‌های MoO_3 (35.7 nm) / Ag (15 nm) / MoO_3 (32.1nm) بدست آمد. نتایج بدست آمده در برنامه لومریکال و با ماژول FDTD شبیه‌سازی شد که نتایج با نتایج تجربی هم‌خوانی بهتری از خود نشان داد.

همچنین در مقایسه نمونه بهینه‌سازی شده با گزارشات قبلی، مشاهده شد که هرچند ضخامت بهینه‌شده در گزارشات قبلی از شفافیت بهتری برخوردار است اما در مجموع رسانندگی و فاکتور شایستگی کاتد بهینه‌شده، نتایج بهتری را از خود نشان می‌دهد. همچنین عبور نور در فرسرخ به شدت افت کرده است که با توجه به اینکه حضور امواج IR در ماده جاذب باعث افزایش دما و افت بازدهی می‌شود می‌توان از این ساختار بهینه‌شده به عنوان کاتد جایگزین طلا در سلول‌های خورشیدی پروسکاتی با ساختار متوالی استفاده نمود.

همانطور که از نتایج فوق مشخص می‌باشد نمونه ۱ که توسط شبیه‌سازی بهینه شده است از عبور کم‌تری نسبت به نمونه ۲ برخوردار است که علت این امر ضخامت لایه دوم و سوم می‌باشد زیرا در نمونه‌ی ۱ ضخامت‌ها بیشتر می‌باشد. اما ضخامت بیشتر نقره در نمونه اول منجر به کاهش مقاومت سطحی شده است. لذا مشاهده می‌شود که با وجود کاهش تراگسیلی، در مجموع فاکتور شایستگی برای نمونه ۱ مقدار بیشتری را نشان می‌دهد.

شکل ۳ مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای نمونه ۱ را نشان می‌دهد.



شکل ۳: مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی

همانطور که مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی با استفاده از دو برنامه lumerical و Matcad بایکدیگر متفاوت می‌باشد و این تفاوت در تطابق با نتایج تجربی هم خود را نشان می‌دهد. علت اینکه نتایج تجربی با روش مورد استفاده در Mathcad نسبت به لومریکال از هم‌خوانی کم‌تری برخوردار می‌باشد، می‌تواند به دو نکته مرتبط باشد. اولاً در روش ماتریس انتقال یک سمت شیشه نیمه بی‌نهایت فرض شده است حال آنکه در هنگام آزمون تجربی شیشه به عنوان خط مرجع از آنالیز حذف شده و فقط عبور DMD اندازه‌گیری شده است و این مورد (حذف شیشه نیمه بی‌نهایت) را



- مرجع ها
- [۳] J. C. Fan, F. J. Bachner, G. H. Foley, and P. M. Zavracky, "Transparent heat-mirror films of TiO₂/Ag/TiO₂ for solar energy collection and radiation insulation," *Applied Physics Letters*, vol. 25, pp. 693-695, 1974.
- [۴] Y. Li, H. Hu, B. Chen, T. Salim, J. Zhang, J. Ding, *et al.*, "Reflective perovskite solar cells for efficient tandem applications," *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 5, pp. 134-139, 2017.
- [۵] H. A. Macleod and H. A. Macleod, *Thin-film optical filters*: CRC press, 2010.
- [۱] D. Langley, G. Giusti, C. Mayousse, C. Celle, D. Bellet, and J.-P. Simonato, "Flexible transparent conductive materials based on silver nanowire networks: a review," *Nanotechnology*, vol. 24, p. 452001, 2013.
- [۲] R. Garg, S. Elmas, T. Nann, and M. R. Andersson, "Deposition methods of graphene as electrode material for organic solar cells," *Advanced Energy Materials*, vol. 7, p. 1601393, 2017.



آشکارسازی آفلاتوکسین G1 با استفاده از بیضی سنجی پلاسمونی

موسایی، بابک^۱؛ فرزین آقامیر، سید مجتبی^۱؛ حمیدی، سیده مهری^۲

^۱ دانشکده فیزیک دانشگاه تهران، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران

^۲ پژوهشگاه لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

B.mousaei@ut.ac.ir

چکیده

آفلاتوکسین ها سموم قارچی هستند که توسط کپک های موجود در غذاهای آلوده و مشتقات آنها تولید می شوند. روش های تحلیلی برای تشخیص و تعیین کمیت آفلاتوکسین ها باید خاص، حساس، قابل اعتماد و ساده باشد. با توجه به خطرات بسیار زیاد آفلاتوکسین ها برای سلامتی انسان ها، دسترسی به اندازه گیری با دقت و سرعت بالا، هزینه کم و برخط این نوع از سموم یکی از الزامات به نظر می رسد. برای نیل به این هدف، در این تحقیق روش بیضی سنجی پلاسمونیک برای آشکارسازی و اندازه گیری آفلاتوکسین G1 به کار گرفته شد. کمترین حد تشخیص در این روش برای آفلاتوکسین G1 نزدیک به 10ppb گزارش شد.

Aflatoxin G1 Detection by Plasmonic Ellipsometry

Mousaei, Babak¹; Farzin Aghamir, Seyyed Mojtaba¹; Hamidi, Seydeh Mehri²

¹ Department of Physics, University of Tehran, Tehran

² Laser and Plasma Institute, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract

Aflatoxins are fungal toxins produced by molds in contaminated foods and their derivatives. Analytical methods for the detection and quantification of aflatoxins should be specific, sensitive, reliable and simple. Considering the high risks of aflatoxins for human health, access to precise and high-speed, low-cost and online measurement of this type of poisons seems to be one of the requirements. To achieve this goal, in this research, plasmonic ellipsometry was used to detect and measure aflatoxin G1. The lowest detection limit in this method for aflatoxin G1 was reported to be close to 10 ppb.



مقدمه

تشخیص و ... دسته بندی کرد. روش های متداول برای اندازه گیری آفلاتوکسین ها استفاده از کروماتوگرافی مایع به کارایی بالا (HPLC) و استفاده از کیت های ¹ELISA است. این روش ها در نوع خود دارای مزایا و معایبی هستند. استفاده از کروماتوگرافی مایع به کارایی بالا باعث اندازه گیری های بسیار دقیقی می شود اما شاید به توان گفت بزرگترین عیب آن لزوم صرف مدت زمان زیاد آماده سازی نمونه و گران بودن آن است. از طرفی روش ELISA ارزان تر و سریع تر است اما احتمال تشخیص ها نادرست به دلیل اتصالات ناخواسته آنزیم ها در طول اندازه گیری وجود دارد. به همین دلیل نیاز به روشی سریع، کم هزینه، با قابلیت اندازه گیری در محل و برخط بود بسیار مهم به نظر می آید. روش های اپتیکی به دلیل استفاده از نور در قالب چیدمان ها و روش های اندازه گیری مختلف دارای سرعت بالایی برای اندازه گیری هستند. برای اندازه گیری آفلاتوکسین ها روش های اپتیکی متفاوتی همچون رامان تقویت شده، فلئورسانس و اخیراً روش های پلاسمونیک پیشنهاد شده اند. روش های پلاسمونی به دلیل اینکه در فرایند تحریک آن ها ضریب شکست محیط نقش به سزایی دارد به شدت به تغییرات ضریب شکست حساس هستند. در روش پلاسمونیک برای آشکارسازی آفلاتوکسین ها مدولاسیون های مختلفی همچون مدولاسیون زاویه ای، مدولاسیون شدت، مدولاسیون فاز و مدولاسیون طول موج مورد استفاده قرار می گیرند.

در این مقاله برای آشکارسازی و اندازه گیری مقادیر آفلاتوکسین G1 روش های مدولاسیون زاویه ای و مدولاسیون طول موج در چیدمان پلاسمونیک مورد استفاده قرار دادیم.

مواد و روش

در راستای استفاده از پلاسمون در حسگری آفلاتوکسین، نیاز به لایه نازکی از فلز طلا داریم. برای ایجاد این لایه نازک بر روی شیشه روش های مختلفی وجود دارد. در این مقاله، لایه های طلا با استفاده از لایه نشانی کند و پاش بر روی شیشه ایجاد شدند. در این روش با استفاده از پلاسمای آرگون ایجاد شده در محفظه خلا،

آفلاتوکسین ها نتیجه متابولیت های ثانویه قارچ ها هستند که با درجه بالایی از سمیت مشخص می شوند، به همین دلیل به عنوان میکوتوکسین های سمی طبقه بندی می شوند [1]. در نام آن ها: آ نشان دهنده جنس اسپروزیلوس، فلا به گونه فلاویوس و توکسین به سم اشاره دارد. آفلاتوکسین ها بر سلامت انسان و حیوانات تأثیر منفی می گذارند. بیست نوع متابولیت قارچی، دسته آفلاتوکسین ها را تشکیل می دهند که از نظر ساختاری از دیفورانوکومارین مشتق می شوند. شش مورد از ۱۸ آفلاتوکسین مختلف، یعنی B1، B2، G1، G2، M1 و M2 مرتبط ترین در نظر گرفته می شوند [2]. اسپروزیلوس فلاویوس و اسپروزیلوس پاراستیکوس گونه های اصلی تولید کننده متابولیت های قارچی در غلات، دانه های ذرت، بادام زمینی و خوراک دام هستند، اما گونه های تولیدکننده آفلاتوکسین دیگری نیز وجود دارند. با توجه تحقیقات انجام شده متابولیت نوع اسپروزیلوس پاراستیکوس عمدتاً آفلاتوکسین های نوع G1 و G2 را تولید می کند.

هنگامی که آفلاتوکسین ها بلعیده، استنشاق یا از طریق پوست جذب می شوند، اثرات سرطان زا، کبدی، تراورژنیک و جهش زایی در انسان و حیوانات دارند [3]. حتی در غلظت های بسیار کم و بنابراین در گروه اول سرطان زا توسط سازمان جهانی بهداشت طبقه بندی شدند. آژانس تحقیقات سرطان سازمان جهانی بهداشت در سال ۱۹۹۳ اعلام کرد آفلاتوکسین ممکن است در ۴/۶ تا ۲۸/۲ درصد از کل موارد سرطان کبدی نقش مسببی داشته باشد [4][5]. قوانین مرتبط با آفلاتوکسین ها در بسیاری از کشورها تنظیم می شوند و بطور کلی می توان گفت محدودیت های قانونی آن از ۰ تا ۵۰ نانوگرم در گرم است [6]. به منظور اعمال این محدودیت ها و به حداقل رساندن بیماری های مرتبط با آفلاتوکسین، روش های تشخیص باید خاص، حساس و مقرون به صرفه باشند.

روش های بسیار مختلف و متفاوتی برای اندازه گیری مقدار آفلاتوکسین های مختلف در مواد و محیط ها وجود دارند. این روش ها را به شیوه های مختلف اتم از کاربری، تکنولوژی

¹ enzyme-linked immunosorbent assay



همانگونه که قابل مشاهده است، نور پهن باند لامپ زنون (۴۰۰ نانومتر الی ۹۰۰ نانومتر) از داخل منشور گلن تیلور عبور می‌کند. منشور گلن تیلور به گونه‌ای طراحی و ساخته شده است که قطبش های S و P را با زاویه ۹۰ درجه از هم جدا می‌کند یعنی این دو قطبش بعد از خروج از منشور بر هم عمود خارج می‌شوند. هر دو قطبش را به ترتیب و بصورت جداگانه به سطح منشوری که لایه طلا در پشت آن چسبانده شده است، می‌تابانیم و مقدار شدت نور بازتاب شده از سطح را با استفاده از یک طیف سنج ثبت می‌کنیم.

بعد از ثبت داده‌ها برای استخراج مقادیر بیضی‌سنجی Δ و Ψ نیاز داریم تا از روابط کرامرز کرونیگ این مقادیر را محاسبه کنیم. برای درک بهتر این مقادیر نیاز است آنها را بصورت مختصر تعریف و توصیف کنیم.

هنگام فرود باریکه نور به سطحی مقادیر عبور و بازتاب را می‌توان از ضرایب فرنل به دست آورد. بعد از محاسبه ضرایب فرنل که بصورت

$$r_{s,p} = \left| \frac{n_1 \cos(\theta_1) - n_{s,p}^2 n_2 \cos(\theta_2)}{n_1 \cos(\theta_1) + n_{s,p}^2 n_2 \cos(\theta_2)} \right|^2$$

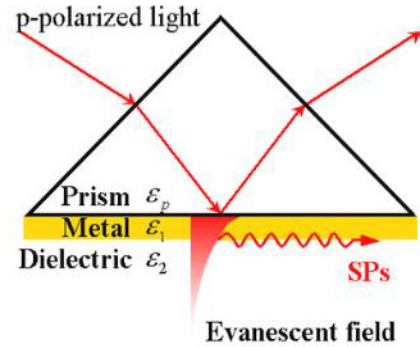
مقادیر Δ و Ψ را بصورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\tan \psi = \left| \frac{r_p}{r_s} \right|$$

$$\Delta \theta_0 = -\frac{2\omega}{\pi} \ln \left(\sqrt{\frac{R_p(\omega')}{R_s(\omega')}} \right) \int_0^\infty \frac{1}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

نتایج

همانطور که در بالا گفته شد در اولین گام، غلظت‌های مختلف آفلاتوکسین G1 در مقابل لیزری با طول موج ۴۰۵ نانومتر قرار گرفت تا میزان گسیل فلئوئورسانس هر کدام از نمونه‌ها بررسی شود.



شکل ۱: شماتیکی از چیدمان کرشمن به نمایش درآمده است. نور قطبیده p بعد از عبور از منشور از سطح لایه طلا بازتاب یافته و باعث تحریک پلاسمون‌ها در مرز طلا می‌شود.

لایه‌های طلا با ضخامت ۳۵ نانومتر لایه نشانی شدند. در ادامه برای بررسی و آشکارسازی غلظت‌های مختلف از سم آفلاتوکسین G1، ابتدا غلظت‌های مختلفی شامل 0.1ppm, 0.5ppm, 0.01ppm و 0.001ppm با استفاده از حلال متانول از سم آفلاتوکسین G1 با غلظت 1ppm محصول شرکت سیگما آلدریج تهیه شد. با توجه به این که سم آفلاتوکسین G1 در ناحیه سبز داری خاصیت فلئوئورسانسی است در اولین گام طیف فتولومینسانس آن در غلظت‌های متفاوت را ثبت کردیم که در بخش نتایج نمودار مربوطه قید شده است. در مرحله بعد، به میزان 1 μ l از غلظت‌های تهیه شده روی لایه‌های طلا ای که قبلاً لایه نشانی شده بود چکانده شد. بعد از تبخیر شدن حلال متانول از روی لایه طلا تنها آفلاتوکسین با غلظت‌های متفاوت روی سطح حضور داشت. برای اندازه‌گیری میزان سم موجود در سطح لایه طلا، از چیدمان اپتیکی کرشمن استفاده شد.

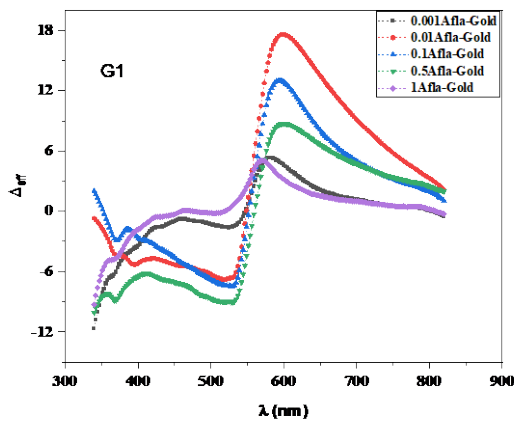
شماتیک چیدمان کرشمن در شکل ۱ به نمایش درآمده است. در این چیدمان نور قطبیده P به منشوری که لایه طلا در پشت آن قرار دارد تابانده می‌شود. نور بعد از برخورد با لایه طلا بازتابیده می‌شود. در سطح لایه طلا برای یک زاویه و طول موج خاص نور توسط الکترون‌های آزاد طلا جذب می‌شود و میزان بازتاب به میزان بسیار قابل توجهی کاسته می‌شود. این پدیده به عنوان تشدید پلاسمون سطحی شناخته می‌شود.



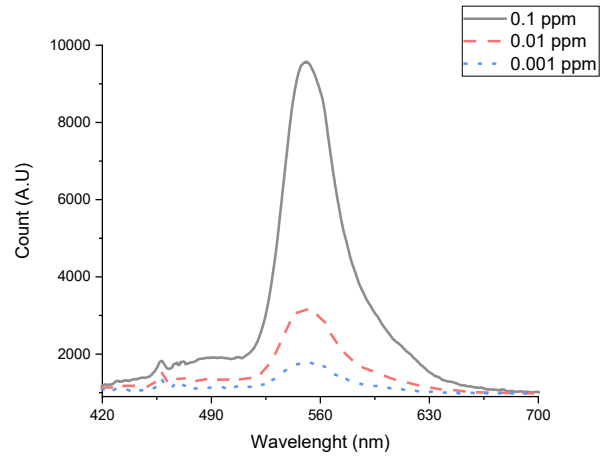
بعد از اندازه گیری های طیف نوری پلاسمون ها با استفاده از قطبش های P و S و انجام محاسبات برای بدست آوردن مقادیر Δ و ψ ، مقادیر حاصل شده را بصورت نمودار رسم شدند.

شکل ۳ نحوه تغییرات مقادیر ψ به ازای طول موج های مختلف در زاویه ۴۳ درجه را نشان می دهد. با توجه به شکل می توان در یافت کمترین مقدار ψ برای غلظت 1ppm در حوالی ۵۵۰ نانومتر ثبت شده است. با کاهش غلظت آفلاتوکسین G1 علاوه بر افزایش تغییرات ψ شاهد جابجایی طول موجی به سمت طول موج های بلندتر نیز می باشیم. دلیل افزایش تغییرات ψ به این برمیگردد که هر چه غلظت کمتر می شود میزان بازتاب از سطح نیز بیشتر می شود و دامنه قطبش های فرودی S و P به سمت برابری حرکت می کند. با توجه به نمودار می توان دریافت که اندازه گیری های برای آشکار سازی غلظت 0.001ppm دقت کافی را نداشته و نمی تواند به خوبی این غلظت را از سایر غلظت ها تفکیک کند.

در کنار محاسبه مقادیر ψ ، مقادیر Δ را نیز محاسبه شد. اما برای تفسیر بهتر و راحت تر مقادیر این کمیت را قبل از رسم نمودن از مقادیر محاسبه شده برای لایه طلا از مقادیر Δ کم شد. به عبارت دیگر مقادیر تفاضلی Δ و زمینه در شکل ۴ رسم شده است. این مقدار تفاضلی را Δ موثر نام گذاری شده است.



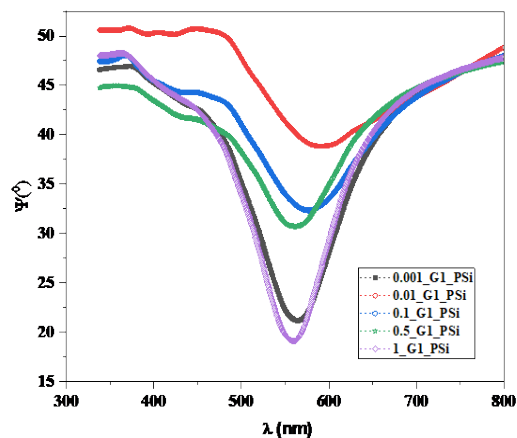
شکل ۴: مقادیر دلتای موثر به ازای غلظت های مختلف آفلاتوکسین با توجه به شکل ۴ می توان دریافت که با کاهش غلظت آفلاتوکسین G1 مقادیر متناظر Δ موثر افزایش می یابند.



شکل ۲: مقادیر فلئورسانس آفلاتوکسین G1 به ازای غلظت های 0.1ppm و 0.01ppm و 0.001ppm

با توجه به شکل ۲ مشخص است طول موج گسیلی آفلاتوکسین G1 در ناحیه سبز می باشد. علاوه بر آن همانگونه که از قبل نیز پیش بینی می شد میزان شدت نور گسیلی نسبت مستقیمی با غلظت محلول ها دارد. با توجه به کاهش میزان فلئورفورها در غلظت های کمتر میزان شدت فلئورسانسی آفلاتوکسین نیز رفته رفته کاسته می شود.

در مرحله بعد، برای هر کدام از غلظت های آفلاتوکسین G1 طیف بازتاب قطبش های P و S به ازای زوایا ۲۰ الی ۶۰ درجه و طول موج ۳۰۰ نانومتر الی ۷۰۰ نانومتر ثبت شد.



شکل ۳: مقادیر ψ استخراج شده برای آفلاتوکسین G1



مرجع ها

- [1]. G. Carla et al., 'Aflatoxins: Contamination, Analysis and Control', *Aflatoxins - Biochemistry and Molecular Biology. InTech*, Oct. 03, 2011. doi: 10.5772/24902.
- [2]. Dors, G.C., et al., 2011. Aflatoxins: contamination, analysis and control in *Aflatoxins-Biochemistry and Molecular Biology, InTech: Shanghai, China*, 415–438.
- [3]. Stroka, J., Van Otterdijk, R., and Anklam, E., 2000. Immunoaffinity column clean-up prior to thin-layer chromatography for the determination of aflatoxins in various food matrices. *Journal of chromatography A*, 904 (2), 251–256.
- [4]. Li, P., Zhang, Q., and Zhang, W., 2009. Immunoassays for aflatoxins. *TrAC: trends in analytical chemistry*, 28 (9), 1115–1126
- [5]. Liu, Y. and Wu, F., 2010. Global burden of aflatoxin-induced hepatocellular carcinoma: a risk assessment. *Environmental health perspectives*, 118 (6), 818.
- [6]. Kolosova, A.Y., et al., 2006. Direct competitive ELISA based on a monoclonal antibody for detection of aflatoxin B1. Stabilization of ELISA kit components and application to grain samples. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 384 (1), 286–294.

این افزایش همراه با جابجایی طول موجی پاسخ ها به سمت طول موج های بلندتر نیز هست. بهترین دقت اندازه گیری این چیدمان برای غلظت های بیشتر از 0.01ppm است.

نتیجه گیری

با توجه به اهمیت آفلاتوکسین ها و دقت و سرعت اندازه گیری آنها روش های اپتیکی روش های بسیار مناسبی هستند. در این تحقیق نشان داده شد که از روش اپتیکی بیضی سنجی پلاسمونیک برای اندازه گیری و آشکار سازی مقادیر مختلف آفلاتوکسین G1 می توان استفاده کرد. کمترین غلظت اندازه گیری شده برابر 0.01ppm گزارش شد. برای بهبود کمترین مقدار تشخیص می توان از تثبیت کننده های زیستی استفاده کرد.



شبیه سازی و ساخت تراشه های میکروفلوئیدیکی پیشنهادی با استفاده از شیشه

میرچی، آرمان؛ کاظمینی، محمد؛ حسین پور، وحید

دانشکده مهندسی شیمی و نفت دانشگاه صنعتی شریف، خیابان آزادی، تهران

armanmirchi@gmail.com

چکیده

میکروفلوئیدیک کاربردهای متعددی در حوزه های مختلف به ویژه در علوم تجربی، زیست پزشکی و داروسازی دارد. با توجه به مزایا و کاربردهای فراوان شیمی جریان، استفاده از رویکردهای پیوسته با استفاده از میکروراکتورها و دیگر تجهیزات میکروسیالی، در سال های اخیر شدیداً مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش شبیه سازی میکرومیکسرها و میکروراکتورهای پیشنهادی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و نرم افزار کامسول مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی عملکرد آنها نیز از فاکتور شاخص اختلاط بعنوان تابع هدف استفاده شده است. در ادامه روش ساخت تراشه های بهینه مورد بررسی قرار گرفت و آزمایش بررسی نشتی به منظور اطمینان از مناسب بودن روش ساخت، برای تراشه ها انجام شد. در نهایت نیز آزمایش اختلاط تجربی در میکرومیکسر ساخته شده به منظور مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی صورت گرفت.

Simulation and fabrication of proposed microfluidic chips using glass

Mirchi, Arman; Kazemeini, Mohammad; Hosseinpour, Vahid

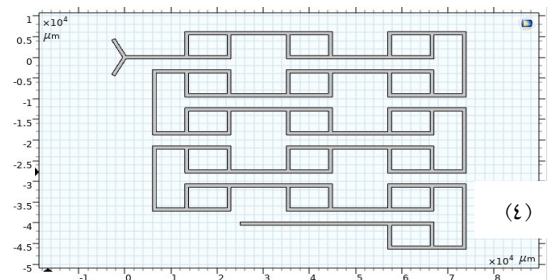
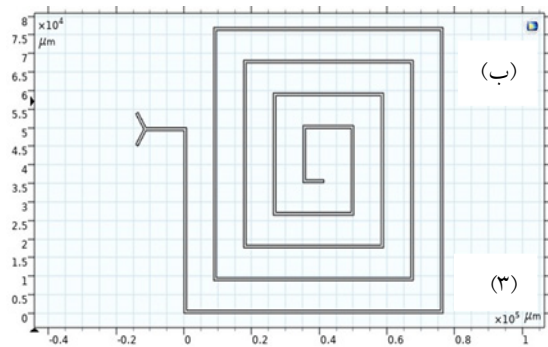
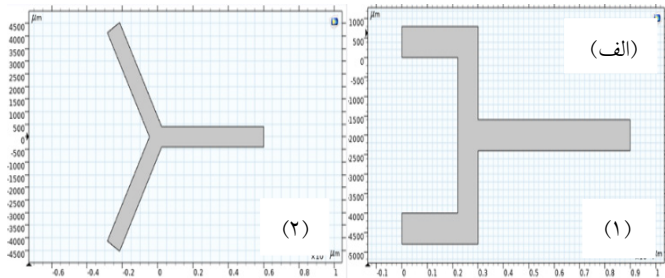
Department of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology

Abstract

Microfluidics has many applications, especially in experimental sciences, biomedicine, and pharmaceuticals. Due to the many advantages and applications of flow chemistry, continuous approaches using microreactors and other microfluidic equipment have been strongly considered in recent years. In this research, the simulation of proposed micromixers and microreactors has been investigated using computational fluid dynamics and COMSOL software. To evaluate their performance, the mixing index factor has been used as the objective function. Next, the optimal chip manufacturing method was investigated and the leakage test was performed for the chips to ensure the suitability of the manufacturing method. Finally, the experimental mixing test was done in the built micromixer to compare the experimental and simulation results.



مقدمه



شکل ۱: هندسه الف) میکرومیکسرها و ب) میکروراکتورهای پیشنهادی

و ۸۰۰ میکرومتر می باشد.

میکروفلوئیدیک دانش تقریباً جدیدی است و نشان دهنده فناوری سیستم هایی است که شامل کانال هایی با ابعاد چند ده تا چند صد میکرومتری می شود. این دانش کاربرد های گسترده ای در داروسازی، زیست شناسی و شیمی دارد. دستگاه های میکروسیالی، ابزار مفیدی برای انجام عملیاتی مانند واکنش ها، جداسازی ها یا تشخیص ترکیبات مختلف هستند. تراشه های میکروسیالی می توانند با توجه به کاربرد خود از طیف گسترده ای از مواد، با استفاده از روش های ساخت مختلف تولید شوند [۱]، [۲]. درآمد فروش دستگاه های میکروسیالی در سال ۲۰۱۴ به میزان ۱.۸ میلیارد دلار بوده است که تا سال ۲۰۲۰ به حدود ۷.۷ میلیارد دلار افزایش یافته است [۳]. میکرومیکسرها اجزاء مهمی از سیستم های میکروسیالی هستند که دو و یا تعدادی بیشتری از گونه های سیال را با هم مخلوط می کنند. مکانیسم اختلاط در میکرومیکسرها به دو بخش اصلی نفوذ مولکولی و فرارفت آشفته تقسیم می شود [۴]. میکروراکتورها دستگاه های کوچکی برای انجام واکنش های شیمیایی بصورت پیوسته هستند که در آن ها واکنش دهنده ها از داخل کانال هایی دارای حداقل یک بعد کوچکتر از ۱ میلی متر عبور می کنند [۵]. از مزایای عملیاتی میکروراکتورها نسبت به راکتورهای ناپیوسته، می توان به انتقال جرم و حرارت عالی، زمان واکنش کوتاه تر، امکان استفاده از حداقل مقادیر واکنش دهنده تحت شرایط کنترل شده، اتوماسیون، افزایش ایمنی و غیره اشاره کرد [۶].

شبیه سازی با استفاده از نرم افزار کامسول

برای شبیه سازی تراشه ها در نرم افزار کامسول، از آنجا که پدیده های انتقال مومنتوم و انتقال جرم در شبیه سازی دخیل هستند، از فیزیک های جریان آرام و انتقال گونه های رقیق استفاده می شود. در این پژوهش سیال مورد استفاده دارای خصوصیات مشابه آب و دارای

طراحی تراشه های پیشنهادی

هندسه میکرومیکسرها و میکروراکتورهای پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور مقایسه عملکرد تحت شرایط مشابه، طول و عرض میکروکانال ها برای میکرومیکسرها به ترتیب برابر ۱۶ میلی متر و ۸۰۰ میکرومتر و برای میکروراکتورها به ترتیب برابر ۸۰۰ میلی متر



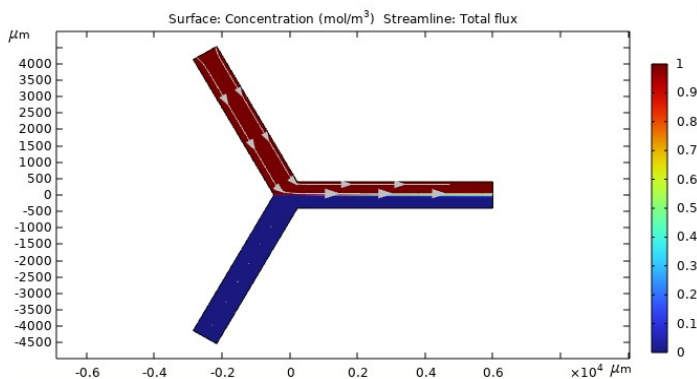
نتایج شبیه سازی

شاخص اختلاط به دست آمده برای میکرومیکسرها و میکروراکتورها در زمان اقامت های مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: شاخص اختلاط (%) طرح های متفاوت، در زمان اقامت های مختلف

طرح ۴	طرح ۳	طرح ۲	طرح ۱	
۴۹.۵۷	۷۲.۹۹	۴.۲	۱.۳۹	۲۰ دقیقه
۶۴.۱۱	۸۵.۹۳	۵.۱۶	۱.۶۹	۳۰ دقیقه
۷۴.۳۸	۹۲.۶۷	۶.۰۱	۱.۹۴	۴۰ دقیقه
۹۶.۴۸	۹۹.۸۵	۹.۷۸	۳.۰۳	۱۰۰ دقیقه

با توجه به جدول ۱، از میان میکرومیکسرها، طرح ۲ و از میان میکروراکتورها، طرح ۳ از نظر شاخص اختلاط عملکرد بهتری دارند. شاخص اختلاط برای میکرومیکسرها در زمان اقامت های مختلف، به دلیل طول کم میکروکانال ها و زمان تماس کوتاه، دارای مقادیر پایینی می باشد. همچنین در تمامی طرح ها شاخص اختلاط با افزایش زمان اقامت افزایش می یابد. پروفایل غلظت طرح های منتخب، بعنوان مثال در زمان اقامت ۴۰ دقیقه در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است.



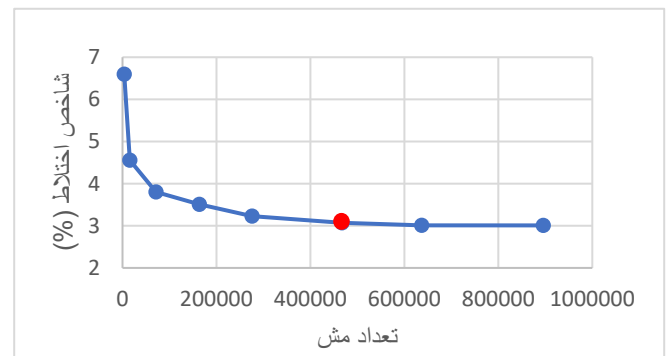
شکل ۳: پروفایل غلظت میکرومیکسر منتخب با زمان اقامت ۴۰ دقیقه

ضریب نفوذ $D = 10^{-10} \frac{m^2}{s}$ می باشد. سیال با غلظت یک مول بر متر مکعب از بالا و با غلظت صفر مول بر متر مکعب از پایین وارد میکروکانال ها می شود. شرایط مرزی نیز بصورت یکنواختی سرعت در ورودی ها و فشار استاتیک صفر در خروجی در نظر گرفته می شود. همچنین برای دیواره ها شرط مرزی عدم لغزش در نظر گرفته می شود. جریان هر دو سیال نیز بصورت پایا، نیوتنی و غیر قابل تراکم فرض می شود. به منظور مقایسه عملکرد طرح های مختلف از شاخص اختلاط استفاده شده است. شاخص اختلاط (MI) و زمان اقامت (τ) نیز بصورت زیر تعریف می شوند:

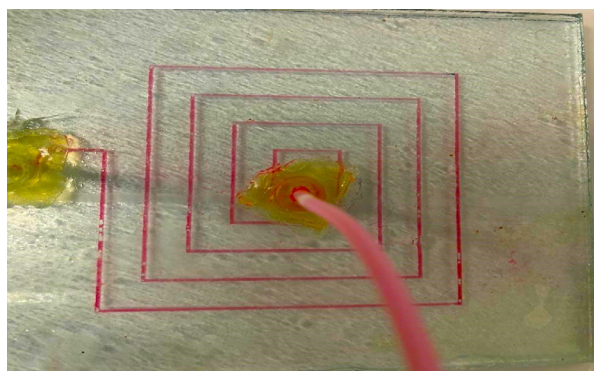
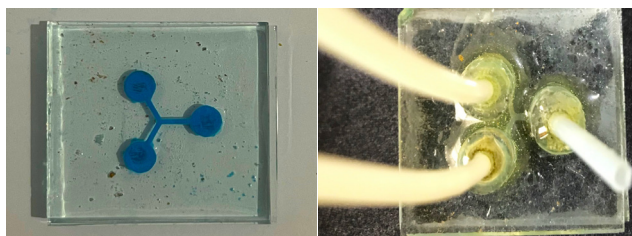
$$MI = 1 - \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i - \bar{C}}{\bar{C}}\right)^2} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{V}{\vartheta} \quad (2)$$

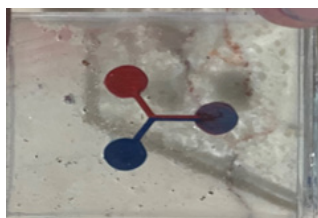
شاخص اختلاط برابر صفر، به معنای عدم اختلاط و و شاخص اختلاط برابر یک، به معنای اختلاط کامل می باشد. مش بندی یا شبکه بندی نیز از مهم ترین مسایل در حل مسائل عددی می باشد. نحوه به دست آوردن تعداد مش بهینه، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: نمودار استقلال از مش برای میکرومیکسر ۲ در زمان اقامت ۴۰ دقیقه



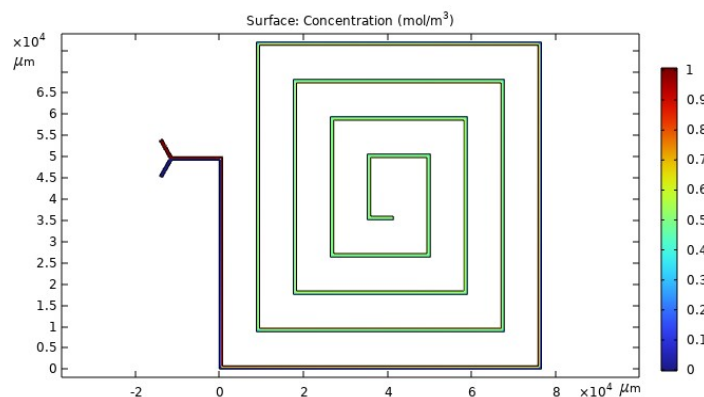
شکل ۵: ساخت تراشه های میکروفلوئیدیکی شیشه ای و آزمایش بررسی نشتی



شکل ۶: آزمایش اختلاط تجربی بر روی میکرومیکسر ساخته شده

نتیجه گیری

با توجه به کاربردهای متعدد میکروفلوئیدیک در زمینه های مختلف، در این مقاله به شبیه سازی و ساخت تراشه های میکروفلوئیدیکی پرداخته شد. بدین منظور ابتدا شبیه سازی میکرومیکسرها و میکروراکتورهای پیشنهادی با استفاده از نرم افزار کامسول انجام شد.



شکل ۴: پروفایل غلظت میکروراکتور منتخب با زمان اقامت ۴۰ دقیقه

روش ساخت و بخش تجربی

فرایند ساخت میکرومیکسر و میکروراکتور بهینه، به دلایلی از جمله سهولت ساخت و مقرون به صرفه بودن، با استفاده از شیشه و روش حکاکی با لیزر CO₂ صورت گرفته است. به این منظور ابتدا دو قطعه شیشه ای با ضخامت ۴ میلی متر و با ابعاد مشابه برش داده می شود. سپس بر روی یکی از قطعات شیشه ای، میکروکانال ها با استفاده از لیزر حکاکی شده و بر روی قطعه شیشه ای دیگر محل های ورودی و خروجی سیال سوراخکاری می شود. در نهایت دو قطعه بر روی یکدیگر قرار گرفته و به منظور اتصال به روش حرارتی درون کوره قرار می گیرند. پس از ساخت میکرومیکسر و میکروراکتور، به منظور اطمینان از مناسب بودن کیفیت ساخت و روش اتصال حرارتی، آزمایش بررسی نشتی بر روی آنها انجام می شود (شکل ۵). همچنین برای میکرومیکسر ساخته شده، آزمایش اختلاط تجربی با استفاده از تزریق دو ماده رنگی آبی و قرمز، به منظور بررسی میزان اختلاط حاصل شده و مقایسه آن با نتایج شبیه سازی شده (شکل ۳) انجام شده است.



مرجع ها

- [1] Zhang, J., Yan, S., Yuan, D., Alici, G., Nguyen, N. T., Warkiani, M. E., & Li, W. (2016). Fundamentals and applications of inertial microfluidics: A review. *Lab on a Chip*, 16(1), 10-34.
- [2] Niculescu, A. G., Chircov, C., Bîrcă, A. C., & Grumezescu, A. M. (2021). Fabrication and applications of microfluidic devices: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(4), 2011.
- [3] Bojang, A. A., & Wu, H. S. (2020). Design, fundamental principles of fabrication and applications of microreactors. *Processes*, 8(8), 891.
- [4] Ehrfeld, W., Hessel, V., & Lower, H. (2000). New technology for modern chemistry. *Microreactors: New Technology for Modern Chemistry*. Chapter 3: Micromixers.
- [5] Domínguez, M. I., Centeno, M. A., Martínez, M., Bobadilla, L. F., Laguna, Ó. H., & Odriozola, J. A. (2021). Current scenario and prospects in manufacture strategies for glass, quartz, polymers and metallic microreactors: A comprehensive review. *Chemical Engineering Research and Design*, 171, 13-35.
- [6] Šalić, A., Tušek, A., & Zelić, B. (2012). Application of microreactors in medicine and biomedicine. *Journal of Applied Biomedicine*, 10(3), 137-153.

سپس جهت ارزیابی عملکرد تراشه ها، از شاخص اختلاط بعنوان تابع هدف استفاده شد. در ادامه میکرومیکسر و میکروراکتور بهینه با استفاده از شیشه و روش ساخت حکاکی با لیزر ساخته شد. سپس آزمایش بررسی نشتی به منظور اطمینان از مناسب بودن کیفیت روش ساخت برای تراشه های ساخته شده انجام شد که عدم وجود هرگونه نشتی بعد از تزریق پیوسته ماده رنگی، نشان از روش ساخت مطلوب آنها داشت. در نهایت نیز برای میکرومیکسر ساخته شده آزمایش اختلاط تجربی با استفاده از تزریق دو ماده قرمز و آبی صورت گرفت که نتیجه حاصل شده مطابقت کامل نتایج تجربی و شبیه سازی عددی را نشان داد.



بررسی اثر پارامتر فشار در پلاسمای تخلیه الکتریکی تابان بر چگالی الکترونی پلاسما

جمالی، سولماز؛ رضوی نیا، سیده نرگس؛ مهدی بخشزاد محمودی

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

s.jamali62@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش از روش طیفسنجی نشر نوری برای تعیین چگالی الکترونی پلاسمای تخلیه الکتریکی تابان استفاده شد. به این منظور، روش پهن شدن استارک خط بالمر هیدروژن طیف به دست آمده از پلاسما به کار گرفته شد. با محاسبه مقادیر چگالی الکترونی به دست آمده در فشارهای مختلف پلاسما، مشخص شد که رابطه معناداری بین فشار پلاسمای تخلیه الکتریکی تابان و چگالی الکترونی آن وجود دارد. بررسی و تحلیل نتایج نشان داد با افزایش فشار پلاسما، چگالی الکترونی آن نیز افزایش می یابد.

Investigation of the effect of pressure parameter in glow discharge plasma on electron density of plasma

Jamali, Soolmaz; Razavinia, Seydeh Narges; Bakhshzad Mahmoodi, Mehdi

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technologies Institute (NSTIR), Tehran, Iran

Abstract

In this research, optical emission spectrometry was used to determine the electron density of glow discharge plasma. For this purpose, the Stark broadening of Balmer line of hydrogen spectrum obtained from plasma was used. By calculating the electron density values obtained at different plasma pressures, it was found that there is a significant relationship between the plasma pressure and its electron density. The results showed that with the increase in plasma pressure, its electron density also increases.



مقدمه

لورنتزی و گاوسی که به نام شکل‌های خط وویت^۱، شناخته می‌شوند، می‌توان پهنای در نصف مقدار بیشینه FWHM پهن‌شدگی استارک را تعیین کرد. سپس، می‌توان با استفاده از جداول پهن‌شدگی استارک، چگالی الکترون را تخمین زد [۶ و ۷]. پهنای در نصف مقدار بیشینه پهن‌شدگی استارک از طریق رابطه زیر به چگالی الکترونی مرتبط است:

$$\Delta\lambda_{stark} = 2 \times 10^{-11} (n_e)^{2/3} \quad (1)$$

واحد چگالی الکترونی به دست آمده از این رابطه cm^{-3} می‌باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد، پهن‌شدگی استارک خط طیفی $H\beta$ در طول موج ۴۸۶۱۳ نانومتر، تقریباً قابل قبولی از چگالی الکترونی را ارائه می‌دهد. بنابراین با رسم طیف حاصل از طیف-سنجی نشری پلاسمای حاصل از گاز آرگون و برازش آن با منحنی وویت و اندازه‌گیری می‌توان چگالی الکترونی را بدست آورد [۸ و ۹].

در این مطالعه، از روش پهن‌شدگی استارک برای تعیین چگالی الکترون و بررسی تغییرات چگالی الکترون نسبت به فشار پلازما به‌کار گرفته شد. در این روش از پارامتر پهنای در نصف مقدار بیشینه برای توصیف شکل گسترده‌شده خط استفاده شد.

بحث

سیستم پلاسمای تخلیه الکتریکی تابان استفاده شده در این پژوهش موجود در پژوهشکده پلازما، شامل یک محفظه استوانه-ای بزرگ ساخته شده از جنس استیل است که قطر و ارتفاع آن ۵۰ سانتی‌متر است. با استفاده از پمپ خلا، فشار اولیه محفظه تخلیه الکتریکی بر روی مقدار ۰/۰۱ ثابت می‌شود. شارش گاز آرگون توسط یک کنترلر شارش گاز کنترل می‌شود. پس از تزریق گاز در فشارهای مورد دلخواه به داخل محفظه تخلیه الکتریکی، در داخل محفظه، ولتاژ ۳۰۰ ولت اعمال می‌شود و تخلیه الکتریکی اتفاق افتاده و پلاسمای تابان آرگون ایجاد می‌شود. پلازما بین یک کاتد

هم‌زمان با تشکیل پلازما، پلازما شروع به گسیل طیف‌های مشخصه مربوط به گاز مورد استفاده می‌کند. در سامانه‌های اتمی شامل اتم، یون، مولکول و پلاسمای الکترون و یون به واسطه گذارهای الکترونیکی از یک حالت انرژی به حالت انرژی دیگر، فوتون‌ها جذب یا گسیل می‌شوند. شکل خطوط طیفی گسیلی شدیداً وابسته به محیط پلازما است. بنابراین تشخیص سازوکارهایی که باعث ایجاد پهن‌شدگی در خطوط طیفی می‌شوند و حامل اطلاعات مهمی درباره پلازما هستند بسیار ضروری می‌باشد. انواع پهن‌شدگی‌های اصلی موجود در طیف یک پلازما شامل پهن‌شدگی طبیعی، پهن‌شدگی دوپلر و پهن‌شدگی استارک است [۱]. مطالعه پهن‌شدگی‌های پلازما اطلاعات فراوانی را درباره پلازما ارائه می‌کند.

روش‌های مختلفی برای محاسبه چگالی الکترونی در پلازما استفاده می‌شود، که شامل استفاده از پروب لانگمویر، پراکندگی تامسون، طیف سنجی تابش پلازما و روش پهن‌شدگی استارک می‌شود. روش پهن‌شدگی استارک به دلیل سادگی و دقت قابل قبول آن بسیار مورد توجه می‌باشد. پایه اصلی این روش [۲ و ۳] تاکنون به خوبی مطالعه و بررسی شده است؛ این پدیده به دلیل اندرکنش کولونی بین اتم‌های تابش‌دهنده و یون‌ها و الکترون‌های آزاد داخل پلازما از طریق یک میدان الکتریکی رخ می‌دهد، که به عنوان اثر استارک شناخته می‌شود. در مطالعات گوناگون، پهن‌شدگی استارک خط بالمر هیدروژن $H\beta$ به طور گسترده‌ای برای محاسبه چگالی الکترون در پلازما به‌کار گرفته شده است. اگر پهن‌شدگی استارک علت اصلی پهن‌شدگی طیف در سیستم باشد و سهم ناشی از پهن‌شدگی دوپلر و دیگر مکانیزم‌های پهن‌شدگی از قبیل پهن‌شدگی فشاری که به دلیل برخورد با اتم‌های خنثی اتفاق می‌افتد، نادیده گرفته شوند اندازه‌گیری چگالی الکترونی n_e با استفاده از پهن‌شدگی استارک روشی نسبتاً آسان است [۴ و ۵]. با برازش دقیق شکل خط‌های اندازه‌گیری شده توسط سیستم طیف-سنجی نشری مورد استفاده به صورت ترکیب‌های شکل‌های خطی

^۱ Voigt



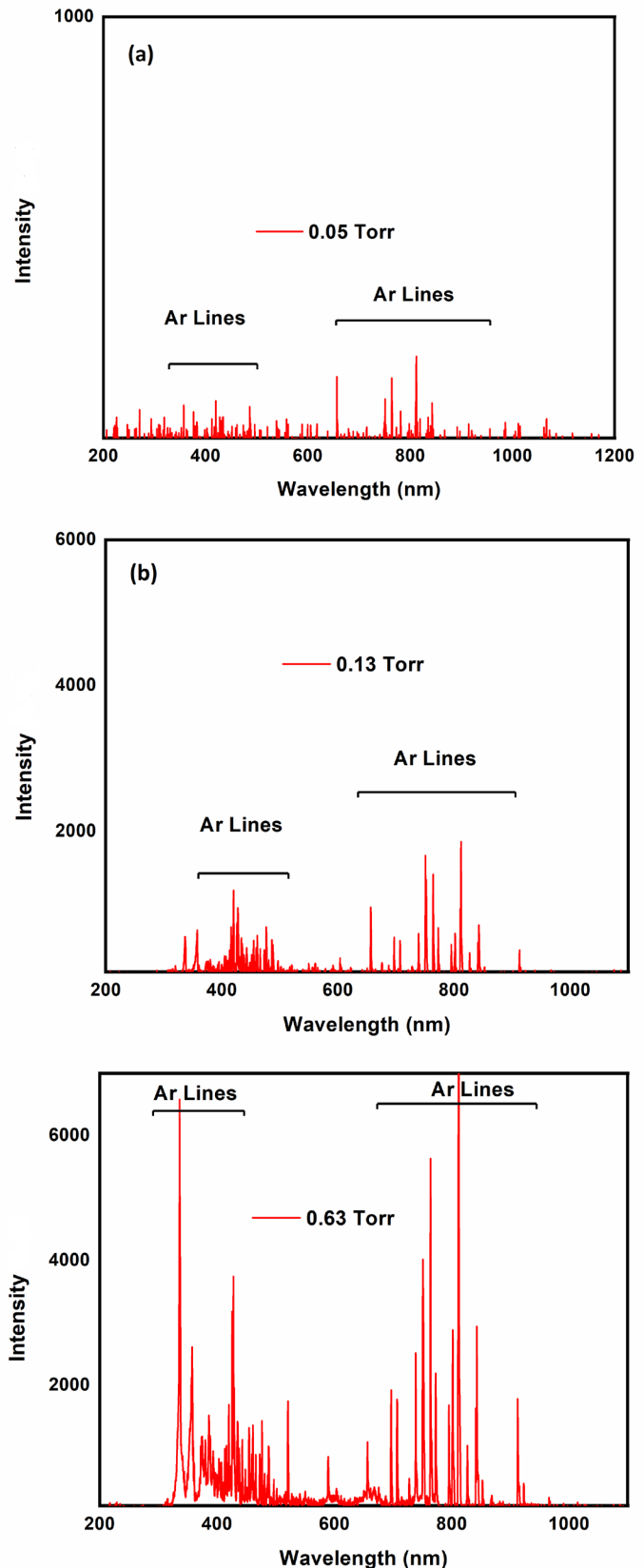
به شکل دیسک به قطر ۱۰ سانتی متر و یک آند زمین شده‌ی به شکل دیسک تشکیل می‌شود. پلاسمای تشکیل شده با استفاده از طیف‌سنجی نشر نوری OES مورد بررسی قرار می‌گیرد. سیستم طیف‌سنجی مورد استفاده در این پژوهش، طیف سنج فیبرنوری مدل V900 با محدوده طول موجی ۲۰۰-۱۰۵۸ نانومتر و بزرگنمایی طیفی ۱ نانومتر می‌باشد. به منظور استفاده از روش پهن‌شدگی استارک بالمر هیدروژن به مقدار ۰/۵ درصد هیدروژن در ترکیب گاز مورد استفاده قرار گرفت.

در ابتدا طیف نشر نوری پلاسما در شرایط فشاری مختلف اندازه‌گیری شد. طیف سنجی نشر نوری در پلاسمای تخلیه نورانی آرگون در فشارهای ۰/۰۵، ۰/۱۳ و ۰/۶۵ تور اندازه‌گیری شد. نتایج در نمودار شکل ۱ نشان داده شده است. پهن‌شدگی طیفی مربوط به خط بالمر هیدروژن در طول موج ۴۸۶/۱۳ نانومتر به همراه منحنی وویت برازش شده مربوط به هر خط طیفی در فشارهای مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است.

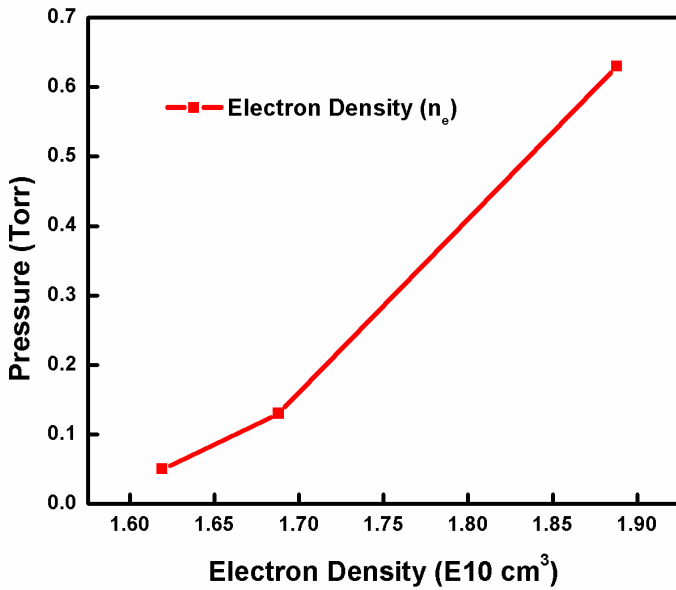
با اندازه‌گیری پارامتر پهن‌شدگی در نصف مقدار بیشینه شکل خط وویت برازش شده به نتایج طیف حاصل از نمودار ۲ و با جاگذاری آن در رابطه ۱ و انجام محاسبات لازم، مقدار چگالی الکترونی در فشارهای مختلف به دست می‌آید. نتایج حاصل از محاسبات در جدول ۱ آمده است. نمودار ۳ رابطه بین چگالی الکترونی و فشار پلاسما را نشان می‌دهد. بررسی نمودار ۳ نشان می‌دهد با افزایش فشار درون محفظه تولید پلاسما، چگالی الکترونی پلاسمای مورد نظر افزایش می‌یابد. بنابراین برای استفاده از پلاسما در کاربردهای مختلفی که در آن نیاز به چگالی الکترونی بالاتری است، لازم است که پلاسما در فشار بالاتری تشکیل شود

جدول ۱: مقادیر چگالی الکترونی در فشارهای مختلف

چگالی الکترونی	$\Delta\lambda_{stark}$	فشار (تور)
$1/619 \times 10^{19}$	۰/۴۷۱۷	۰/۰۵
$1/688 \times 10^{19}$	۰/۴۸۴۸	۰/۱۳
$1/888 \times 10^{19}$	۰/۵۲۲۶	۰/۶۳



شکل ۱: طیف نشر نوری حاصل از پلاسمای آرگون در فشارهای مختلف



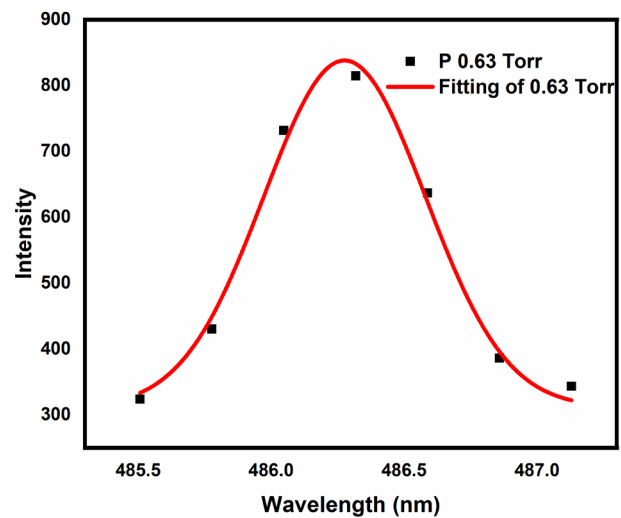
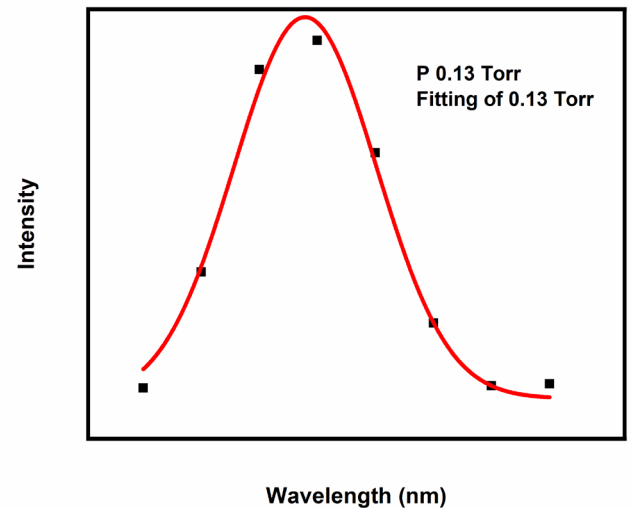
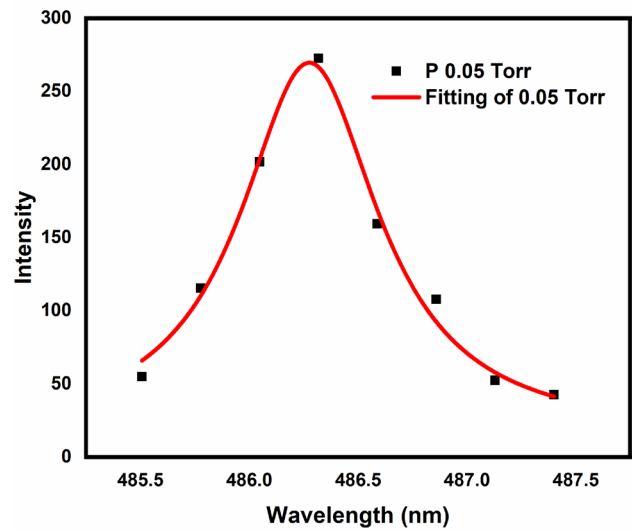
شکل ۳: چگالی اکترونی به ازای فشارهای مختلف پلاسما

نتیجه گیری

در این مطالعه اثر فشارهای مختلف پلاسما بر روی مقدار چگالی اکترونی پلاسما، تخلیه الکتریکی تابان مورد بررسی و بحث قرار گرفت. برای محاسبه چگالی اکترونی پلاسما از روش پهن شدگی استارک خط بالمر هیدروژن استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد با افزایش فشار محفظه‌ی تولید پلاسما، چگالی اکترونی به دست آمده افزایش می‌یابد.

مرجع‌ها

- [1] M. Qian, Ren, C., Wang, D., Zhang, J. & Wei, G. "Stark broadening measurement of the electron density in an atmospheric pressure argon plasma jet with double-power electrodes" *Journal of Applied Physics* **107** (6) (2010) 063303.
- [2] Z. Qiuping, C. Cheng, M. Yuedong, "Electron Density and Temperature Measurement by Stark Broadening in a Cold Argon Arc-Plasma Jet at Atmospheric Pressure", *Plasma Sci. Technol.*, **11** (2009) 560.
- [3] M. Burger, J. Hermann, "Stark broadening measurements in plasmas produced by laser ablation of hydrogen containing compounds", *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **122** (2016) 118-126.
- [4] Marco A Gigosoy and Valentín Cardenoso, "New plasma diagnosis tables of hydrogen Stark broadening including ion dynamics", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **29** (1996) 4795-4838
- [5] A. Boogaard, A. Y. Kovalgin, A. A. I. Aarnink, R. A. M. Wolters, J. Holleman, I. Brunets, J. Schmitz, "Measurement of electron temperatures of Argon Plasmas in a High-Density Inductively-Coupled Remote Plasma System by Langmuir Probe and Optical-Emission Spectroscopy", Dutch Technology Foundation (STW), under project STW-TEL **6358**.



شکل ۲: برازش شکل خط وویت بر پهن شدگی خط طیفی در فشارهای مختلف



- [8] N Balcon, A Aanesland and R Boswel, "Pulsed RF discharges, glow and filamentary mode at atmospheric pressure in argon", *Plasma Sources Sci. Technol.* **16** (2007) 217–225.
- [9] O. Galmiz, Plasma treatment of polyethylene tubes in continuous regime using surface dielectric barrier discharge with water electrodes, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** (2018) 195201.
- [6] John B. Boffard, Garrett A. Piech, Mark F. Gehrke, L. W. Anderson, and Chun C. Lin, "Measurement of electron-impact excitation cross sections out of metastable levels of argon and comparison with ground-state excitation", *PHYSICAL REVIEW A VOLUME 59*, (1999) 4
- [7] P. Saadat Esbah Tabaei, R. Ghobeira, P. Cools, F. Rezaei, A. Nikiforov, R. Morent, N. De Geyter, Comparative study between in-plasma and post-plasma chemical processes occurring at the surface of UHMWPE subjected to medium pressure Ar and N₂ plasma activation, *Polymer* **193** (2020) 122383



شبیه سازی تخلیه تشدید سیکلوترونی الکترون تولید شده توسط آهنرباهای دائمی

رضوی نیا، سیده نرگس؛ چخماچی، امیر؛ جمالی، سولماز؛ فاضل پور، سمانه؛ خلیل زاده، الناز؛ دهقانی، زهره

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

nrazavinia@aeoi.org.ir

چکیده

طی سالهای گذشته فناوری پردازش پلاسمایی و لایه‌نشانی توسط پلاسمای تشدید سیکلوترونی الکترونی (ECR) به علت بازدهی یونیزاسیون بالاتر در مقایسه با منابع پلاسمای DC و RF و نیز پتانسیل غلاف پایینتر توسعه یافته و به صورت گسترده در پردازش پلاسمایی در فشارهای پایین مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از مشکلات سیستم‌های پردازش پلاسمایی ECR الزامات مربوط به نصب سیستم‌های گران قیمت جهت تولید میدان‌های مغناطیسی است. این مشکل را می‌توان با استفاده از آهنرباهای دائمی برای تولید میدان مغناطیسی به جای استفاده از سیم‌پیچ مرتفع نمود. در این مقاله، تخلیه ECR در حضور آهنرباهای دائمی NdFeB گرید ۴۲ با استفاده از نرم افزار Comsol شبیه سازی شده و آرایش بهینه آهنرباها به گونه‌ای که سطوح تشدید درون محفظه تخلیه قرار گیرند به دست آمده است. علاوه بر این مشخصه‌های تخلیه مانند، چگالی و جذب توان میکروموج در پلاسما محاسبه شده‌اند.

Simulation of electron cyclotron resonance discharge produced by permanent magnets

Razavinia, Seyede Narges; Chakhmachi, Amir; Jamali, Solmaz; Fazelpour, Samane; Khalilzade, Elnaz; Dehghani, Zohre

Plasma Physics and Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Abstract

During the past years, technology of plasma processing and thin film deposition by electron cyclotron resonance plasma (ECR) has been developed and widely used in plasma processing at low pressures, due to the higher ionization rate compared to DC and RF plasma sources as well as the lower sheath potential. One of the difficulties of ECR plasma processing systems is requirement for installation of expensive systems for generation of magnetic fields. This problem can be solved by using permanent magnets instead of magnetic coils for production of magnetic fields. In this article, ECR discharge in the presence of NdFeB grade 42 permanent magnets is simulated using Comsol software and the optimal arrangement of magnets, for which resonant surfaces placed inside the discharge chamber is obtained. Moreover, characteristics of discharge such as plasma density and microwave power absorption in plasma have been calculated.

PACS No



مقدمه

معمولاً برای تولید میدان مغناطیسی مورد نیاز جهت برقراری شرط ECR از سیم‌پیچ الکتریکی استفاده می‌شود. با این وجود، در پردازش یکنواخت در مقیاس بزرگ، نیاز به سیم‌پیچ با قطر بزرگ است در نتیجه توان الکتریکی مورد نیاز سیم‌پیچ‌ها و همچنین وزن و حجم دستگاه افزایش می‌یابد. علاوه بر این حتی اگر زیرلایه خیلی دورتر از سیم‌پیچ قرار گرفته باشد، میدان مغناطیسی قوی جلوی زیرلایه وجود خواهد داشت. این مشکل را می‌توان با استفاده از آهنرباهای دائمی برای تولید میدان مغناطیسی به جای استفاده از سیم‌پیچ مرتفع نمود. آهنرباهای دائمی قادر به فراهم نمودن میدان مغناطیسی کافی جهت برقراری شرط ECR در نواحی باریک هستند و در نتیجه می‌توان در مقابل زیرلایه، به ناحیه‌ای عاری از میدان مغناطیسی دست یافت. از این نظر دستگاه‌های ECR که از آهنرباهای دائمی بهره می‌گیرند، جهت پردازش پلاسمایی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۵]. آرایش میدان‌های مغناطیسی و طراحی آنها به گونه‌ای که سطوح تشدید درون محفظه تخلیه و در نزدیکی پنجره ورود میکرو موج قرار گیرند، در جفت شدگی میکرو موج با پلاسما و گرمایش تشدید آن تأثیر گذار است. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار کامسول^۲ فرآیند تشکیل پلاسمای ECR در سه بعد و شکل بهینه قرارگیری آهنرباهای دائمی به گونه‌ای که سطوح تشدید درون محفظه قرار گیرند را شبیه سازی نموده‌ایم. نتایج حاصل نشانگر مقدار میدان‌های مغناطیسی و پارامترهای پلاسمای تشکیل شده در اثر برهم‌کنش با میکرو موج هستند، که چگالی نسبتاً بالای پلاسمای حاصل، این منبع را مناسب کاربردهای مربوط به لایه نشانی پلاسما می‌سازد.

مدل‌سازی عددی

در منبع پلاسمای ECR شبیه‌سازی شده در این مقاله فرض می‌کنیم میکرو موج با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز از طریق موجبر مستطیلی WR340 وارد محفظه استوانه‌ای پلاسما خواهد شد. میدان الکتریکی میکرو موج را می‌توان به صورت

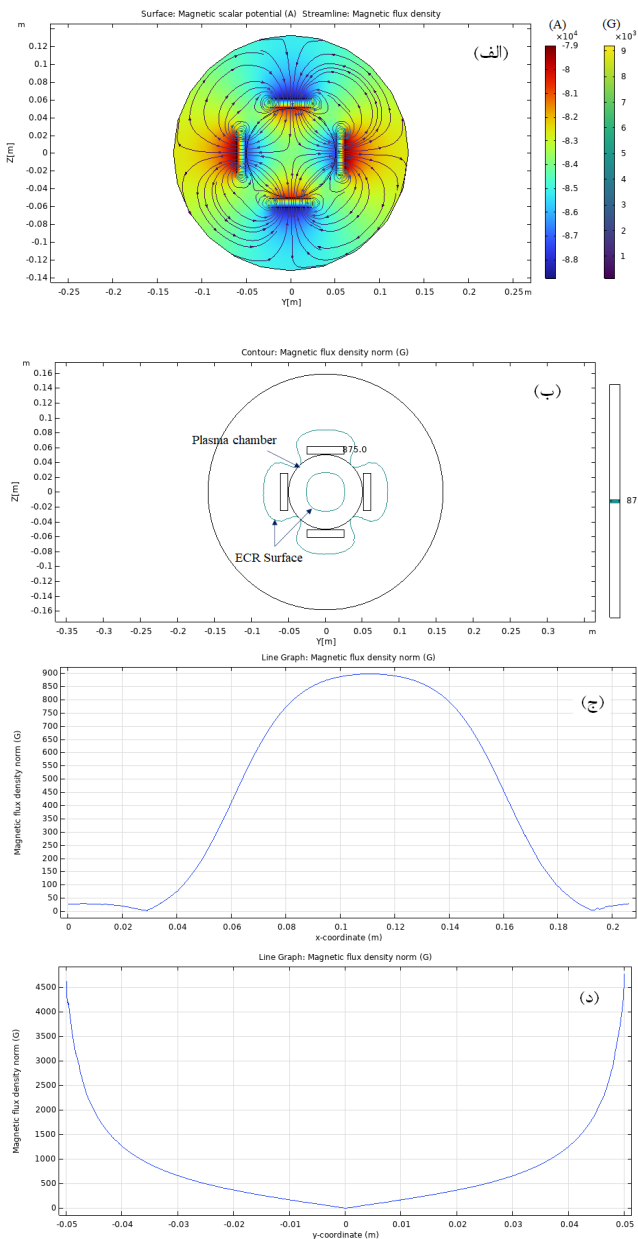
تخلیه‌های میکرو موج که دارای ناحیه تشدید سیکلوترونی الکترون در حجم تخلیه هستند، تخلیه ECR نامیده می‌شوند. وجود چنین ناحیه جفت شدگی الکترومغناطیسی در فشارهای پایین، صرف نظر از شکل یا حجم آن، جفت شدگی میکرو موج به پلاسما را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. بازدهی کلی بهبود یافته در این نوع تخلیه تا حدودی مربوط به توانایی میدان مغناطیسی استاتیک در کاهش اتلاف پخشی ذرات باردار است. پلاسمای ECR یکی از انواع پلاسماهای مغناطیسه است، که فرکانس چشمه‌ی ایجاد کننده آن در محدوده میکرو موج (2.45GHz) است. با تنظیم فرکانس میکرو موج و همگام سازی با فرکانس چرخش الکترون در میدان مغناطیسی شرط تشدید برای الکترون‌ها برقرار خواهد شد. اواخر دهه ۷۰ میلادی، suzuki و همکارانش [۱] نشان دادند که می‌توان با استفاده از پلاسمای ECR با ساختار میدان واگرا، حکاکی در ابعاد کمتر از میکرومتر انجام داد. آزمایش‌های اولیه بیانگر آن بودند که با وجود پایین بودن پتانسیل پلاسما، تخلیه ECR می‌تواند در فشارهای نسبتاً کم $5 \times 10^{-5} - 10^{-4} \text{ torr}$ و چگالی‌های پلاسمای بالا $10^{11} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ کار کند. تحت این شرایط یونها کسر قابل توجهی از گونه‌های فعال شیمیایی در تخلیه را شکل می‌دهند. می‌توان مقدار و جهت سرعت یونها، که به سمت زیرلایه شتاب می‌گیرند، را با اعمال بایاس RF به الکتروود زیرلایه کنترل کرد. نتایج مربوط به اکسیداسیون سیلیکون [۲]، حکاکی پلاسما [۱]، کاشت یونی و لایه نشانی مواد دی‌الکتریک [۳] توسط پلاسمای ECR منتشر شده است. از پلاسمای ECR برای انجام فرآیندهای گوناگون لایه نشانی بخار شیمیایی تقویت شده توسط پلاسما^۱ PECVD مانند، لایه نشانی سیلیکون، پوشش دهی کربن و اکسیدهای فلزی استفاده شده است [۴]. با وجود مزایای متعدد، این روش لایه نشانی پر هزینه و دارای پیچیدگی‌های متعددی از جهت اعمال موج به پلاسما و تولید میدان‌های مغناطیسی است.

^۲ Comsol

^۱ Plasma Enhanced chemical vapor deposition



توسط مگنترون تولید شده و با عبور از موجبر به میدان مغناطیسی تعبیه شده داخل محفظه می‌رسند. میدان مغناطیسی در امتداد محور محفظه پلاسما الکترون‌ها را مجبور به گردش در اطراف خطوط میدان می‌کند و احتمال یونیزاسیون را افزایش می‌دهد. در



شکل ۱: (الف) پتانسیل اسکالر مغناطیسی و نحوه قرار دادن قطب‌های آهنرباها و شکل سطوح شار مغناطیسی، (ب) سطح تشدید با میدان مغناطیسی ۸۷۵ گاوس در صفحه $Y-Z$ ، (ج) سطح تشدید با میدان تقریبی ۸۷۵ گاوس در امتداد محور محفظه پلاسما، (د) میدان مغناطیسی در امتداد شعاع محفظه پلاسما.

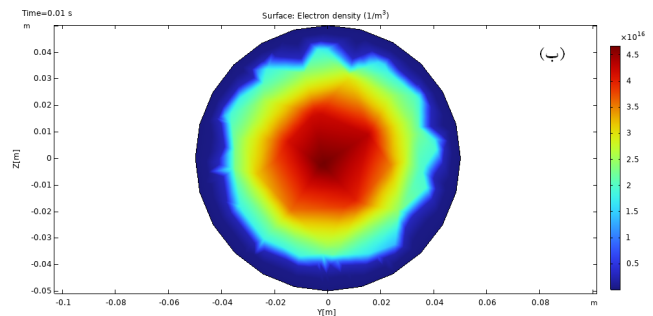
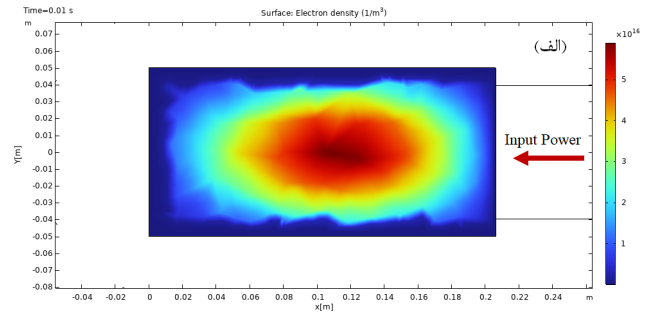
$E = E_0 \cos(\omega t)$ بازنویسی کرد، که ω فرکانس میکرو موج است. الکترونها در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت و استاتیک در اثر نیروی لورنتس حرکت دایروی یا مارپیچی در امتداد میدان مغناطیسی خواهند داشت. حرکت دایروی الکترون دارای شعاع لارمور $r_e = mv/qB$ و فرکانس زاویه‌ای سیکلوترونی $\omega_c = qB/m$ است. که v سرعت الکترون در جهت عمود بر میدان مغناطیسی است. این حرکت دایروی در خلا و بدون برخوردها به الکترون انرژی نخواهد داد. زمانی که میدان الکتريکی میکرو موج با فرکانس زاویه‌ای ω به مسأله افزوده شود، مسیر حرکت الکترون تغییر خواهد کرد. اگر شرط $\omega = \omega_c$ برقرار باشد، اثر تشدید رخ می‌دهد. در نتیجه الکترونها هم فاز با میدان الکتريکی حرکت کرده و به صورت پیوسته شتاب می‌گیرند، که اثر ECR نامیده می‌شود. برای فرکانس میکرو موج ۲/۴۵ گیگاهرتز، اثر تشدید زمانی رخ می‌دهد که میدان مغناطیسی برابر با ۸۷۵ گاوس باشد. در اینجا برای ایجاد سطوح میدان تشدید از چهار عدد آهنربای بلوک نئودیمیوم گرید ۴۲ با ابعاد $100 \times 50 \times 10 \text{ mm}$ در اطراف محفظه استوانه‌ای از جنس stainless steel 304 به قطر ده سانتی‌متر استفاده می‌کنیم. پس از محاسبه میدان‌های مغناطیسی حاصل از آهنرباها بهترین آرایش برای قرار دادن آهنرباها حول محفظه قرار دادن قطب‌های مخالف در برابر هم و با فاصله برابر در چهار سوی محفظه است. برای محاسبه میدان‌های مغناطیسی از ماژول mfnc نرم‌افزار کامسول استفاده می‌نماییم. در شکل ۱ میدان‌های مغناطیسی محاسبه شده درون محفظه و نیز سطح تشدید با میدان مغناطیسی ۸۷۵ گاوس نشان داده شده‌اند. پس از محاسبه میدان‌های مغناطیسی از ماژول Plasma و emw برای محاسبه تحول پلاسما استفاده می‌نماییم. توان ورودی را ۱۰۰ وات، دمای اولیه ۳۰۰ کلوین و فشار پس-زمینه را $7 \times 10^{-4} \text{ torr}$ در نظر می‌گیریم. امواج الکترومغناطیسی



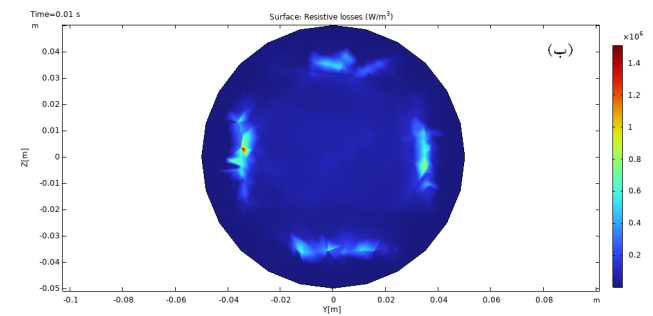
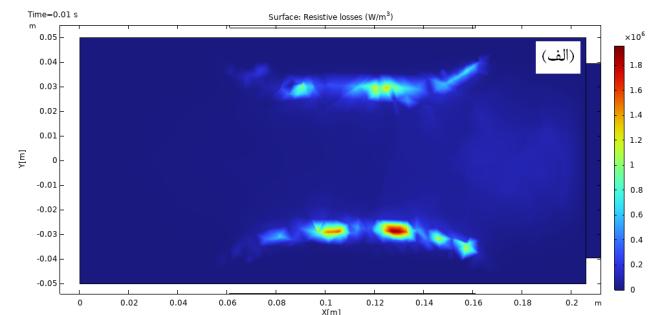
برخوردها افزایش می‌یابد و یونیزاسیون صورت می‌گیرد. محل قرارگیری و چگالی پلاسمای تشکیل شده توسط آرایش میدان مغناطیسی، فشار ذرات ختشی و توان ورودی به محفظه کنترل می‌شود. در محلی که فرکانس منبع موج با فرکانس سیکلوترونی ذرات برابری باشد تشدید اتفاق می‌افتد، این منطقه "ناحیه‌ی جذب ECR" نامیده می‌شود. در شکل ۲ چگالی الکترون‌های پلازما نشان داده شده است. با توجه به شکل ۳ الکترون‌ها تحت شرایط تشدید و روی سطوح تشدید از توان میکرو موج تزریقی انرژی جذب می‌کنند. تمام جذب توان از میدان موج الکترومغناطیسی در پلازما روی سطوح تشدید ECR اتفاق می‌افتد. الکترون‌ها به صورت پیوسته در ناحیه جذب ECR شتاب می‌گیرند. این الکترون‌های پر انرژی از طریق برخورد با ذرات ختشی انرژی‌شان را از دست می‌دهند و سبب یونیزاسیون و ترابرد اندازه حرکت می‌شوند. به دلیل آنکه اساساً پلاسمای ECR در فشارهای پایین (کمتر از ۱۰ میلی‌تور) کار می‌کند، فاصله آزاد میانگین زیاد است و این امکان را فراهم می‌سازد که الکترون‌ها به سرعت انرژی جنبشی کافی برای رسیدن به راندمان یونیزاسیون و چگالی پلاسمای بالا را به دست آورند.

نتیجه گیری

برخی از مزایای منابع پلاسمای ECR عبارتند از: (۱) جذب تشدید میکرو موج که عملکرد این منابع را در محدوده وسیعی از فشار گاز امکان‌پذیر می‌سازد. (۲) درجه بالای یونیزاسیون در مقایسه با منابع پلاسمای RF و DC (۳) عملکرد بدون الکتروود این منابع پیکربندی ساده و امکان دست‌یابی به عمر عملیاتی طولانی‌تر را فراهم می‌آورد. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار کامسول آرایش مغناطیسی مناسب جهت ایجاد سطوح تشدید ECR را محاسبه کرده‌ایم و سپس از میدان‌های مغناطیسی محاسبه شده جهت محاسبه چگالی پلازما استفاده کرده‌ایم. چگالی الکترونی محاسبه شده در فشار ۰/۷ میلی



شکل ۲: چگالی الکترون‌ها (الف) در صفحه X-Y و در $z=0$ (ب) در صفحه Y-Z و در $x=0.155$ متر، در زمان ۰.۰۱ ثانیه از آغاز شبیه سازی.



شکل ۳: توان جذب شده (الف) در صفحه X-Y و در $z=0$ (ب) در صفحه Y-Z و در $x=0.155$ متر، در زمان ۰.۰۱ ثانیه از آغاز شبیه سازی.

جایی که فرکانس منبع موج با فرکانس چرخشی ذرات برابر باشد تشدید اتفاق افتاده، انرژی ذرات برابری و در نتیجه تعداد



[۳] N. Sakudo, et al., “Microwave ion source”, Rev. Sci. Instrum., 48: 762 (1977).

[۴] Junkang Wang. “Novel Concepts in the PECVD Deposition of Silicon Thin Films: from Plasma Chemistry to Photovoltaic Device Applications”. Plasma Physics [physics. plasm-ph]. Université Paris Saclay (COMUE), 2017. English. ffnNT: 2017SACLX079ff. ffile-01688695ff.

[۵] S. Iizuka and N. Sato, “Electron cyclotron resonance devices with permanent magnets for production of large-diameter uniform plasmas”, Jpn. J. Appl.Phys. Vol.33 (1994) pp. 4221-422.

تور از مرتبه $10^{16} m^{-3}$ است و در صورتیکه که از آن برای انجام لایه نشانی استفاده شود، دستیابی به نرخ لایه‌نشانی بالا را امکان‌پذیر می‌سازد.

مرجع‌ها

[۱] K. Suzuki, S. Okudaira, N. Sakudo, and I. Kenomato, “Microwave plasma etching,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 16, no. 11, pp. 1979–1984, Nov. 1977.

[۲] L. Bardos, et al., “A method of formation of thin oxide films on silicon in a microwave magnetoactive oxygen plasma”, J. Phys. D: Appl. Phys., vol 8: L195 (1975).



اندازه‌گیری رسانش نانوساختارهای دوبعدی سیلیکونی با روش دو پروب اهمی در یک

میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی چند پروبی

خادمی، علی^{۱*}؛ اونودا، جو^۲؛ ولکو، رابرت^۳؛ پیترز، جیسون^۴

^۱دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، خیابان آزادی، تهران

^۲واحد پژوهشی آموزش دانش، دانشکده آموزش، دانشگاه تربیت معلم فوکوئوکا، فوکوئوکا، ژاپن

^۳دانشکده فیزیک، دانشگاه آلبرتا، ادمونتون، ایالت آلبرتا، کانادا

^۴مرکز پژوهشی نانوتکنولوژی، شورای ملی تحقیقات کانادا، ادمونتون، ایالت آلبرتا، کانادا

* khademi@sharif.edu

چکیده

نانوساختارهای سیلیکونی با اندازه ویژگی ۱۰ نانومتر بر روی سطح $Si(111)-(7 \times 7)$ با استفاده از گودال‌های عایق ساخته شده توسط سوزن پروب میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی ساخته شدند. رسانش سطحی این نانوساختارها توسط میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی دو پروبی اندازه‌گیری شد و عدد $(4.4 \pm 0.4) \times 10^{-6} S/\square$ برای رسانایی سطحی $Si(111)-(7 \times 7)$ بدست آمد. برای غلبه بر مشکل مقاومت تماس بزرگ در پیکربندی دو پروبی، روش جدیدی پیشنهاد شد. در این روش جدید، نوک سوزن‌های میکروسکوپ با استفاده از تبخیر میدانی به منظور ایجاد تماس اهمی با سطح سیلیکون تمیز شد.

Ohmic Two-probe Conductivity Measurement of 2D Si Nanostructures in a Multi-probe Scanning Tunneling Microscope

Khademi, Ali¹; Onoda, Jo²; Wolkow, Robert³; Pitters, Jason⁴

¹ Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

² Science Education Research Unit, Faculty of Education, University of Teacher Education Fukuoka, Fukuoka, Japan

³ Department of Physics, University of Alberta, Edmonton, Alberta T6G 2J1, Canada

⁴ Nanotechnology Research Centre, National Research Council Canada, Edmonton, Alberta T6G 2M9, Canada

Abstract

Si nanostructures with a feature size of 10 nm were fabricated on the $Si(111)-(7 \times 7)$ surface using insulating trenches made by scanning tunneling microscope's tip. The surface conduction of these nanostructures was measured by a 2-probe scanning tunneling microscope, and $(4.4 \pm 0.4) \times 10^{-6} S/\square$ was obtained for the surface conductivity of the $Si(111)-(7 \times 7)$. A new method was proposed to overcome the considerable contact resistance issue with the 2-probe configuration. In this method, tip apexes were cleaned using field evaporation in order to create Ohmic contact with the Si surface.

PACS No. 73.25.+i



مقدمه

روش‌های آزمایشی

دستگاه اندازه‌گیری: برای آزمایش‌ها از سیستم 4P-STM دمای پایین (Scienta Omicron LT-Nanoprobe) استفاده شد (شکل ۱). اندازه‌گیری‌ها در دمای اتاق و تحت خلأ فوق‌العاده بالا (2×10^{-10} Torr) انجام شد.

آماده کردن نمونه: از ویفرهای Si(111) نوع n دارای آلودگی سبک ($As, \sim 1 \times 10^{15} \text{ atom/cm}^3$) با مقاومت ویژه 5 $\Omega \cdot \text{cm}$ استفاده شد. سطوح تمیز (7×7)-Si(111) با گرم کردن‌های کوتاه مدت مکرر نمونه‌های Si(111) تا دمای 1250°C پس از گاززدایی در دمای 650°C در طول شب آماده شدند.

دقت اندازه‌گیری طول: در حالی که دقت اندازه‌گیری طول توسط پروب‌های STM به اندازه $2 \text{ nm} \pm$ بود، دقت اندازه‌گیری ارتفاع این پروب‌ها نسبت به سطح در حد $0.1 \text{ nm} \pm$ بود.



شکل ۱: عکس سیستم اندازه‌گیری 4P-STM

بهبود روش‌های مشخصه‌یابی خصوصیات الکترونیکی سطوح میکروسکوپی برای کوچک سازی افزاره‌های الکترونیکی ضروری است. به طور خاص، دستیابی به هدف نهایی کوچک‌سازی، که شامل افزاره‌هایی در مقیاس اتمی مانند گیت‌های منطقی در مقیاس اتمی [۱] و حافظه‌های متشکل از پیوندهای آویزان بر روی سطوح سیلیکونی منتهی‌شده به هیدروژن است [۲]، نیاز به مشخصه‌یابی ساختارهای یک و دوبعدی بسیار کوچک دارد.

در حالی که تصویربرداری، ساخت و اندازه‌گیری خواص الکترونیکی جایگزیده این ساختارهای بسیار کوچک را می‌توان با یک میکروسکوپ تونلی روبشی تک پروبی (IP-STM) انجام داد، ارزیابی خواص رسانش الکتریکی سطح نیاز به میکروسکوپ تونلی روبشی دو پروبی (2P-STM) [۳-۵] و چهار پروبی (4P-STM) [۶-۸] دارد. مزیت اندازه‌گیری رسانایی به روش 4P-STM نسبت به روش 2P-STM این است که می‌تواند مقاومت پروب نسبت به سطح تماس و سد شاتکی را در نمونه‌های نیمه رسانا از بین ببرد. با این حال، قرار دادن چهار پروب در یک منطقه در مقیاس نانو کاری دشوار است. در اینجا، ما روشی را برای حل مسئله مقاومت تماسی بزرگ در پیکربندی دو پروب پیشنهاد می‌کنیم [۹]. در این روش، تمیز کردن نوک سوزن‌های (پروب‌های) STM توسط تبخیر میدانی، ساخت پروب‌های فلزی را تضمین کرد که منحنی‌های خطی I-V را روی سطوح شبه فلزی (7×7)-Si(111) ایجاد کردند و مشکل سد شاتکی را از بین بردند. با استفاده از این روش اهمی در 2P-STM، ما رسانایی سطحی روی سطح (7×7)-Si(111) را در ولتاژهای بایاس کم که رسانایی را از طریق حالت‌های سه بعدی توده‌ای محدود می‌کند، اندازه‌گیری کردیم. علاوه بر این، با استفاده از لیتوگرافی STM، ما نواحی نانومقیاس را بر روی سطوح (7×7)-Si(111) ایجاد کردیم و خواص رسانایی آن‌ها را با استفاده از روش اهمی 2P-STM اندازه‌گیری کردیم.

نتایج و بحث

شکل ۲(a) نمودار شماتیک روش 2P-STM ما را نشان می‌دهد. شکل ۲(b) یک منحنی I-V معمول را نشان می‌دهد که توسط IP-STM با یک پروب فشرده شده به اندازه 1 nm به سطح سیلیکون از ارتفاع نقطه تنظیم تصویر STM ($V_{IP} = -2 \text{ V}$)، به دست آمده است. $I = 20 \text{ pA}$ به ترتیب ولتاژهای بایاس برای اندازه‌گیری‌های IP-STM و 2P-STM هستند. گرچه منحنی I-V برای این سطح قرار است رسانایی در مرتبه 10^{-6} S ($=\Omega^{-1}$) در $V_{IP} = 0 \text{ V}$ صرف نظر از چگالی و نوع ناخالصی

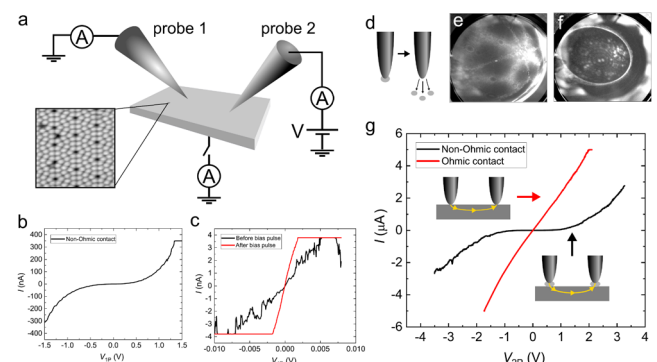


پس از نصب مجدد پروب روی روبشگر STM بعد از این تمیز کردن، دوباره منحنی I-V آن را با 1P-STM بررسی کردیم و متوجه شدیم که پروب نسبت به قبل (شکل ۲(b)) رسانایی بیش‌تری دارد (منحنی سیاه در شکل ۲(c)). اگرچه منحنی همچنان احتمالاً به دلیل مواد جذب شده در طول انتقال پروب از محفظه FIM به محفظه STM دارای نویزهای ارتعاشی بود. با اعمال چندین پالس ولتاژ بایاس کنترل شده در STM (در حالتی که ولتاژ -10 V بر روی نمونه اعمال می‌شد، ولتاژ پالسی $+5$ تا $+10\text{ V}$ به پروب‌ها اعمال شد. ارتفاع پروب از نمونه با نقطه تنظیم STM تنظیم شده بود ($V_s = -10\text{ V}$, $I_t = 0.1-1\text{ nA}$)). در نهایت، یک منحنی اهمی I-V روی سطح $\text{Si}(111)-(7 \times 7)$ با رسانایی در مرتبه 10^{-6} S در $V_{IP} = 0\text{ V}$ به دست آمد (منحنی قرمز در شکل ۲(c)). پس از تهیه یک پروب دیگر که تماس اهمی با سطح ایجاد می‌کند، دوباره یک منحنی I-V را با 2P-STM اندازه‌گیری کردیم و در نهایت، همان‌طور که در منحنی قرمز در شکل ۲(g) آشکار است منحنی I-V خطی را برای سطح $\text{Si}(111)-(7 \times 7)$ مشاهده کردیم. رسانایی سطحی بدست آمده در این ستاپ 2P-STM عدد $(4.4 \pm 0.4) \times 10^{-6}\text{ S}/\square$ را نشان می‌داد، که در مرتبه رساناهایی است که با 4P-STM از این سطح به دست آمده است [۶ و ۱۳].

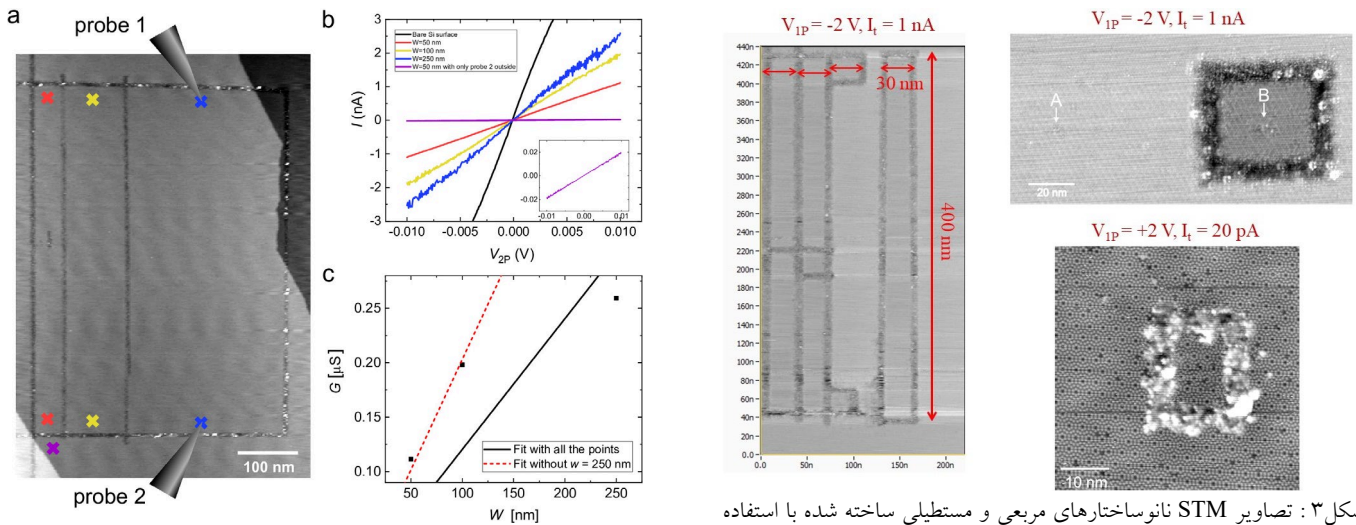
شکل ۳ نواحی مربع یا مستطیل شکل احاطه شده توسط خطوط گودال را نشان می‌دهد که در آن گودال‌ها با $V_{IP} = -3\text{ V}$ و جریان نقطه تنظیم $I_t = 300\text{ nA}$ ساخته شده است [۹]. خطوط گودال مقاومت بیش‌تری نسبت به سطح خالی و ساده سیلیکون دارد و بنابراین باعث می‌شود که ناحیه داخلی به صورت الکترونیکی از منطقه خارج از آن جدا شود [۱۴].

با استفاده از خاصیت عایق بودن خطوط گودال [۱۴]، می‌توانیم مناطق محدود مختلفی را بر روی سطح $\text{Si}(111)-(7 \times 7)$ بسازیم. شکل ۴(a) مناطق مستطیلی سیلیکونی را نشان می‌دهد که توسط خطوط گودال با طول یکسان 500 nm اما عرض‌های متفاوت (W) احاطه شده‌اند (به ترتیب ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ نانومتر). در داخل مناطق مستطیلی منفرد، دو پروب را در اطراف پایانه‌های

نشان دهد [۱۰ و ۱۱]، نمودار شکل ۲(b) رفتاری غیر اهمی و رسانایی کوچک‌تر در مرتبه 10^{-9} S در $V_{IP} = 0\text{ V}$ نشان می‌دهد. مقاومت تماسی معمول بین پروب‌های غیر اهمی و سطح در مرتبه $10^9\ \Omega$ است. همان‌طور که از منحنی سیاه رنگ در شکل ۲(g) آشکار است، این رفتار غیر اهمی در اندازه‌گیری رسانایی با دو پروب هم خود را نشان می‌دهد. محتمل‌ترین دلیل برای این رفتار غیر اهمی، آلایندگی‌هایی است که نوک پروب‌های STM را می‌پوشانند، مانند اکسیدهای بومی، ترکیبات با ناخالصی‌های دیگر، یا مواد نمونه کم‌تر رسانا (در این مورد Si) که در حین روبش به نوک پروب متصل شده‌اند [۱۲]. به منظور اطمینان از تمیزی نوک پروب، آلایندگی‌ها را با تبخیر میدانی حذف کردیم (شکل ۲(d)) در حالی که ساختار اتمی نوک را با میکروسکوپ یونی میدانی (FIM) بررسی کردیم (شکل ۲(e)). در صورت لزوم، می‌توانیم به صورت اختیاری نوک پروب را با زدایش گاز نیتروژن یا اکسیژن به کمک میدان الکتریکی در FIM تیز کنیم (شکل ۲(f)).



شکل ۲: (a) ستاپ آزمایشگاهی اندازه‌گیری‌های رسانایی 2P-STM. تصویر STM نوعی از سطح $\text{Si}(111)-(7 \times 7)$ نیز نشان داده شده است. (b) منحنی I-V بدست آمده توسط 1P-STM با تماس غیر اهمی. (c) منحنی‌های I-V اندازه‌گیری شده توسط 1P-STM با تماس اهمی قبل و بعد از اعمال پالس‌های ولتاژ بایاس کنترل‌شده. (d) تمیز کردن نوک پروب توسط تبخیر میدانی. (e) تصویر FIM (با ولتاژ بایاس 17 kV) از سوزن/پروب تنگستنی بعد از تمیز شدن با تبخیر میدانی. (f) تصویر FIM (با ولتاژ بایاس 7.8 kV) از پروب تنگستنی تیز شده توسط زدایش اکسیژن با کمک اعمال میدان الکتریکی. (g) منحنی‌های I-V اندازه‌گیری شده توسط 2P-STM با تماس‌های اهمی و غیر اهمی. فاصله بین دو پروب در حدود $3.5\ \mu\text{m}$ بود. این شکل با اجازه از منبع [۹] آورده شده است. Copyright Reprinted with permission from [9].



شکل ۳: تصاویر STM نانو ساختارهای مربعی و مستطیلی ساخته شده با استفاده از خطوط گودال بر روی سطح $\text{Si}(111)-(7 \times 7)$. پاره‌هایی از این شکل با اجازه از منبع [۹] آورده شده است. Adapted with permission from [9]. Copyright © 2021, American Chemical Society.

شکل ۴: (a) تصویر STM نانو ساختارهای مستطیلی ساخته شده بر روی سطح $\text{Si}(111)-(7 \times 7)$ ($I_t = 1 \text{ nA}$ و $V_{IP} = -2 \text{ V}$). (b) منحنی‌های I-V اندازه‌گیری شده توسط 2P-STM برای سطح خالی Si و نانو ساختارهای مستطیلی با عرض‌های متفاوت. (c) رسانش کل اندازه‌گیری شده توسط 2P-STM برای عرض‌های متفاوت. این شکل با اجازه از منبع [۹] آورده شده است. Reprinted with permission from [9]. Copyright © 2021, American Chemical Society.

S/\square را به ما می‌دهد، که تطابق خوبی با عدد بدست آمده برای سطح خالی Si نشان می‌دهد. علت انحراف برای $W = 250 \text{ nm}$ می‌تواند به دلیل تغییر جزئی مقاومت تماس در طول اندازه‌گیری باشد [۹].

نتیجه‌گیری

در این مقاله، اندازه‌گیری‌های رسانایی 2P-STM با تماس اهمی روی سطوح Si در دمای اتاق گزارش می‌شود. ما دریافتیم که تمیز کردن نوک STM با تبخیر میدانی روشی تکرارپذیر برای برقراری تماس اهمی با حالت‌های سطحی فلزی روی بستر Si است. رسانایی سطحی سطح $\text{Si}(111)-(7 \times 7)$ برابر $(4.4 \pm 0.4) \times 10^{-6} \text{ S}/\square$ تخمین زده می‌شود که قابل مقایسه با اعدادی است که قبلاً توسط 4P-STM بدست آمده بود. ما همچنین نانو ساختارهای مختلف Si را ساختیم و خواص رسانایی آنها را با استفاده از روش 2P-STM اهمی اندازه‌گیری کردیم.

شکل ۳: تصاویر STM نانو ساختارهای مربعی و مستطیلی ساخته شده با استفاده از خطوط گودال بر روی سطح $\text{Si}(111)-(7 \times 7)$. پاره‌هایی از این شکل با اجازه از منبع [۹] آورده شده است. Adapted with permission from [9]. Copyright © 2021, American Chemical Society.

هر مستطیل قرار دادیم و رسانایی را با روش 2P-STM اهمی اندازه‌گیری کردیم (شکل ۴(b)). نمودار نتیجه شده نشان می‌دهد که شیب منحنی I-V (رسانایی) با افزایش عرض ناحیه مستطیلی افزایش می‌یابد. توجه داشته باشید که منحنی I-V برای سطح خالی Si در شکل ۴(b) در 150 nm دورتر از لبه سمت راست ناحیه مستطیلی به دست آمده است و رسانایی سطح آن $(9.92 \pm 0.03) \times 10^{-7} \text{ S}/\square$ است که تقریباً یک چهارم مقداری است که قبلاً ذکر کردیم زیرا تقریباً یک روز از زمان آماده‌سازی نمونه گذشته بود. شکل ۴(c) نشان می‌دهد که چگونه رسانایی به عنوان تابعی از عرض ناحیه مستطیلی (W) تغییر می‌کند.

معادله رسانش صفحه که تابعی از رسانایی سطحی σ_s ، عرض صفحه W و طول آن L (تقریباً برابر فاصله دو پروب) است، را می‌توان به صورت $G = 1/R = \sigma_s W/L$ نوشت. با برازش داده‌ها با این معادله، رسانایی سطحی $(6 \pm 1) \times 10^{-7} \text{ S}/\square$ بدست آمد (خط توپر سیاه در شکل ۴(c)) که کوچک‌تر از عددی است که برای سطح خالی Si بدست آوردیم. این به دلیل نقطه $W = 250 \text{ nm}$ در شکل ۴(c) است که به نظر می‌رسد از روند مورد انتظار منحرف می‌شود. برازش فقط برای نقاط 50 nm و $W = 100 \text{ nm}$ (خط نقطه چین قرمز در شکل ۴(c)) عدد $(1.02 \pm 0.05) \times 10^{-7}$



(۸) B. Voigtländer et al.; Invited Review Article: Multi-Tip Scanning Tunneling Microscopy: Experimental Techniques and Data Analysis. *Rev. Sci. Instrum.* **89**, 101101 (2018).

(۹) J. Onada et al.; Ohmic Contact to Two-Dimensional Nanofabricated Silicon Structures with a Two-Probe Scanning Tunneling Microscope. *ACS Nano* **15**, 19377-19386 (2021).

(۱۰) P. Avouris et al.; Scanning Tunneling Microscope Tip-Sample Interactions: Atomic Modification of Si and Nanometer Si Schottky Diodes. *J. Vac. Sci. Technol. A* **11**, 1725-1732 (1993).

(۱۱) Y Hasegawa et al.; Measurement of Surface State Conductance Using STM Point Contacts. *Surf. Sci.* **357**, 32-37 (1996).

(۱۲) J. Aproz et al.; 1D Ballistic Transport Channel Probed by Invasive and Non-Invasive Contacts. *Appl. Phys. Lett.* **113**, 1-5 (2018).

(۱۳) M. D'Angelo et al.; Conductivity of the Si (111) 7×7 Dangling-Bond State. *Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys.* **79**, 1-6 (2009).

(۱۴) S. Heike et al.; Electron Conduction through Surface States of the Si(111)-(7×7) Surface. *Phys. Rev. Lett.* **81**, 890-893 (1998).

مرجع ها

(۱) T. Huff et al.; Binary Atomic Silicon Logic. *Nat. Electron.* **1**, 636-643 (2018).

(۲) R. Achal et al.; Lithography for Robust and Editable Atomic-Scale Silicon Devices and Memories. *Nat. Commun.* **9**, 1-8 (2018).

(۳) J. Baringhaus et al.; Exceptional Ballistic Transport in Epitaxial Graphene Nanoribbons. *Nature* **506**, 349-354 (2014).

(۴) J. Baringhaus et al.; Electron Interference in Ballistic Graphene Nanoconstrictions. *Phys. Rev. Lett.* **116**, 1-5 (2016).

(۵) M. Kolmer et al.; Electronic Transport in Planar Atomic-Scale Structures Measured by Two-Probe Scanning Tunneling Spectroscopy. *Nat. Commun.* **10**, 1573 (2019).

(۶) S. Just et al.; B. Surface and Step Conductivities on Si (111) Surfaces. *Phys. Rev. Lett.* **115**, 066801 (2015).

(۷) C. Durand et al.; Differentiation of Surface and Bulk Conductivities in Topological Insulators via Four-Probe Spectroscopy. *Nano Lett.* **16**, 2213-2220 (2016).



ساخت و مشخصه‌یابی لایه نازک اکسید دلافوسیت CuGaO_2 به روش کندوپاش

ابرازی، مسعود؛ غلامحسینی، صائب؛ قناعت‌شعار، مجید

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

m-ghanaat@sbu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش به سنتز و مشخصه‌یابی لایه‌های نازک CuGaO_2 (CGO) به روش کندوپاش پرداخته‌ایم. لایه‌های نازک CGO نیم‌رسانای نوع p هستند که می‌توانند آینده‌ای امیدوارکننده برای اکسیدهای رسانای شفاف (TCO) نوع p تصویر کنند. تلاش کردیم با استفاده از روش برهمکنش حالت جامد ترکیبی از عناصر Cu، Ga و O را از پیش ماده‌های CuO و Ga_2O_3 تهیه کنیم و آن را به شکل قرص هدف بسازیم. با لایه‌نشانی توسط روش کندوپاش و سپس یک عملیات حرارتی تحت شرایط جوی خلا، نیتروژن و اکسیژن سعی کردیم لایه‌های نازک را سنتز کنیم و خصوصیات ساختاری، نوری و الکتریکی آن‌ها را برآورد کنیم. الگوهای پراش XRD نمایان ساخت که فاز خالص دلافوسیت لایه CGO تنها در نمونه عملیات حرارتی شده تحت خلا قابل دستیابی است. همچنین نتایج آزمون کاوشگر 4 نقطه‌ای تایید می‌کند لایه‌های نازک تهیه شده تحت شرایط خلا از رسانندگی ویژه بیشتری نسبت به سایر لایه‌ها برخوردار هستند و از این لحاظ می‌توانند برای کاربری‌های الکترونیکی و اپتوالکترونیکی مفید باشند.

Synthesis and characterization of delafossite oxide of CuGaO_2 by sputtering method

Abrari, Masoud; Gholamhosseini, Saeb; Ghanaatshoar, Majid

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, 1983969411, Tehran, Iran

Abstract

In this research, we have synthesized and characterized CuGaO_2 (CGO) thin films created by sputtering method. CGO thin film is a p-type semiconductors that can depict a promising future for p-type transparent conducting oxides (TCOs). We used the solid-state interaction method to prepare a combination of Cu, Ga and O elements from CuO and Ga_2O_3 precursors and then formed it as a target tablet. We tried to synthesize thin films by sputtering method and a heat treatment under vacuum, nitrogen and oxygen atmospheres and estimate their structural, optical and electrical properties by various analyses. XRD diffraction patterns revealed that the pure delafossite phase of the CGO layer can only be obtained by the vacuum heat treatment. Moreover, the results of the 4-point probe test confirm that the electrical specific conductivity of the thin films prepared under vacuum condition is higher than that of the other samples, and in this sense, they can be more effective for electronic and optoelectronic applications.



مقدمه

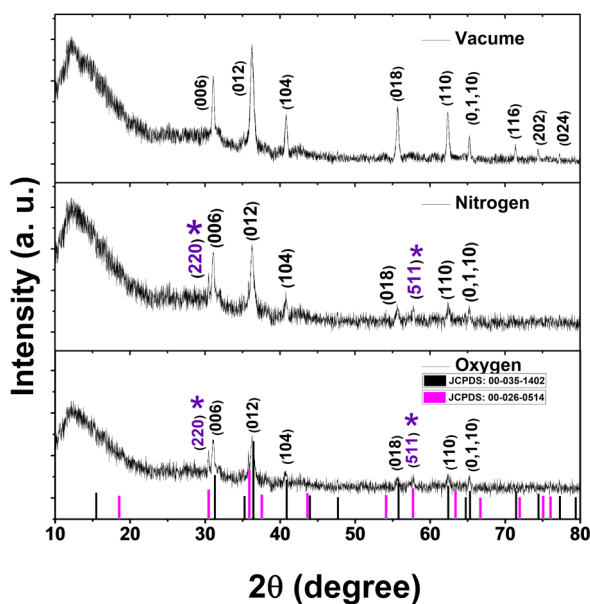
لایه‌های نازک امروزه بخش جدا نشدنی در فناوری‌های نوین هستند. صنایع الکترونیک، اپتوالکترونیک، فوتونیک و ... از لایه‌های نازک به منظور مینیاتورسازی ادوات خود بهره برده است. از جمله کاربری‌های این لایه‌ها، استفاده از اکسیدهای رسانای شفاف (TCO) در قطعات فوتونیک و اپتوالکترونیک است [۱]. به صورت کلی اکسیدهای رسانای شفاف امروزه در ادوات بسیاری از قبیل سلول‌های خورشیدی، آشکارسازهای نوری، دیودهای نور گسیل، ادوات بلور مایع، حسگرهای اثر انگشت و صفحات لمسی به کار می‌روند. پرکاربردترین اکسیدهای رسانای شفاف را می‌توان Zn_2SnO_4 , $ZnO:Al$ (AZO), ZnO , ITO , $SnO_2:F$ (FTO) دانست که همگی به طور ذاتی نیمرساناهای نوع n هستند [۲]. برای ساخت ادوات نوین که در صنایع اپتوالکترونیک و فوتونیک کاربری‌های امروزی داشته باشند، نیاز به نیمرساناهای نوع p به شدت احساس می‌شود. اتصال الکتریکی لایه‌های نوع p می‌تواند با اکسید رسانای شفافی تامین شود که خود نوع p است. در واقع دست یابی به اکسیدهای نوع p می‌تواند راهگشای آینده صنایع فوتونیک و اپتوالکترونیک باشد.

اکسید مس گالیوم ($CuGaO_2$) در فاز دلافوسیت یک نیمرسانای نوع p است که با داشتن گاف بزرگ 3.6 eV و چگالی حفره‌های بالا می‌تواند نوید بخش دستیابی به اکسید رسانای شفاف نوع p باشد. این ماده به صورت معمول در سه فاز مختلف وورتزایت، اسپینل و دلافوسیت ساخته می‌شود. با این حال فاز وورتزایت و اسپینل دارای گاف انرژی بین $1/5$ تا $1/7$ الکترون ولت هستند که مناسب کاربری برای اکسیدهای رسانای شفاف نیستند. فاز دلافوسیت دارای چیدمان خاصی از اتم‌های Cu در کنار اتم‌های اکسیژن است که باعث می‌شود نوار ظرفیت ($CuGaO_2$ (CGO)) ترکیبی از اوربیتال‌های $4d \text{ Cu}$ و $2p \text{ O}$ باشد و گاف انرژی بزرگتر شود. در فازهای وورتزایت و اسپینل، اتم‌های Cu و Ga به هم نزدیک‌تر هستند که باعث آمیخته شدن نوار ظرفیت آن‌ها و در نتیجه کاهش گاف انرژی می‌شود [۳].

در این تحقیق به ساخت لایه نازک اکسید دلافوسیت CGO پرداخته‌ایم. رهیافتی که در نظر گرفتیم در میان سایر رهیافت‌ها تازگی دارد. با استفاده از روش واکنش حالت جامد، مواد اکسید گالیوم و اکسید مس را به گونه‌ای در هم آمیختیم که ترکیبی یکنواخت را تشکیل دهد. این ترکیب به قرصی از هدف تبدیل شد و آن را به وسیله روش کندوپاش لایه‌نشانی کردیم. برای دستیابی به فاز مطلوب دلافوسیت یک عملیات حرارتی تحت شرایط جوی مختلف انجام دادیم تا به لایه‌های مورد نظر خود دست یابیم.

روش‌های تجربی

نانو پودرهای Ga_2O_3 و CuO را با نسبت‌های استکیومتری مناسب با یکدیگر مخلوط کردیم. علاوه بر آن برای افزایش رسانندگی از ترکیب MgO ۲/۵٪ نیز بهره بردیم. پودرهای آماده شده با وزن ۲۴ گرم به درون جام‌های زیرکونیا منتقل شدند و با افزودن ۶۰ میلی لیتر اتانول و گوی‌های زیرکونیا به جام‌ها، درون دستگاه آسیاب گلوله‌ای قرار گرفتند. پس از ۴۸ ساعت دوران دستگاه با سرعت 440 دور بر دقیقه نمونه‌ها از درون جام‌ها بیرون آورده شدند و به مدت ۱۲ ساعت روی هیتر در دمای 500 درجه خشک سازی شدند. پس از خشک سازی کامل نمونه‌ها، پودرهای به دست آمده تحت فشار 25 MPa به قرص تبدیل شدند. این قرص به داخل کوره با جو هوا انتقال داده شد و به مدت ۸ ساعت در دمای 950 درجه سانتی‌گراد بازپخت شد. قرص حاصل دارای یکنواختی مطلوبی نبود، به این دلیل بار دیگر شکسته شد و در دستگاه آسیاب گلوله‌ای با مشخصاتی که ذکر آن رفت بار دیگر کوبیده شد. سپس به قرص تبدیل و بار دیگر در دمای 950 درجه سانتی‌گراد مورد عملیات حرارتی قرار گرفت. برای دستیابی به یک قرص هدف درخورد، این عملیات را ۳ بار تکرار کردیم تا در نهایت یک هدف از ترکیب عناصر Cu , Ga و O داشته باشیم. پس از تهیه قرص هدف اقدام به لایه‌نشانی کردیم. لایه‌نشانی توسط کندوپاش تواتر رادیویی به مدت ۱ ساعت در دمای 360 درجه سانتی‌گراد انجام شد. توان دستگاه در این مدت 150 وات بود و زیر لایه‌های کوارتز به منظور تحمل دمای بالا انتخاب شدند. برای یک لایه‌نشانی خوب ابتدا نیاز بود فشار محفظه تا 10^{-5} mbar کاهش پیدا کند. سپس با



شکل ۱: الگوهای پراش لایه‌های نازک CGO سنتز شده در شرایط جوی مختلف.

را جدا کند. به این ترتیب می‌تواند ساختار بلوری در سطح را نیز دچار تغییر کند.

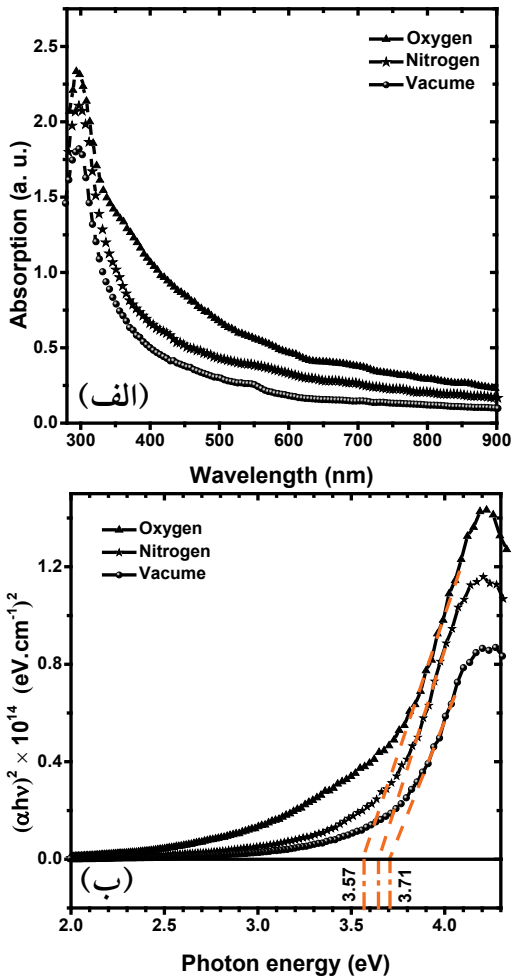
به منظور بررسی ریخت شناسی لایه‌های سنتز شده و اندازه‌گیری ضخامت لایه‌ها از تصاویر میکروسکوپ الکترونی اثر میدانی FESEM استفاده کردیم. شکل ۲ تصاویر FESEM سطح مقطع و نمای روپین لایه‌های سنتز شده CGO را برای نمونه تحت خلا به نمایش می‌گذارد. همانطور که مشخص است لایه از یکنواختی مناسب و خوبی برخوردار است. ضخامت لایه را با تقریب خوبی می‌توان ۶۰۰ nm یافت. برخی منافذ روی سطح رویی دیده می‌شود که ممکن است به دلیل فرار اکسیژن اضافی در نمونه‌ها به وجود آمده باشد.

برای بررسی ویژگی‌های نوری لایه‌های نازک دلافوسیت CGO از آنالیز جذب در ناحیه مرئی و فرابنفش بهره بردیم. شکل ۳ منحنی‌های جذب لایه‌های نازک را برای نمونه‌های تحت خلا، جریان نیتروژن و جریان اکسیژن به تصویر می‌کشد. علاوه بر آن با استفاده از رابطه تاک می‌توان گاف انرژی نمونه‌ها را اندازه‌گیری کرد. شکل ۳ همچنین شامل نمودار تاک برای نمونه‌های سنتز شده مختلف است. در منحنی جذب می‌توان متوجه شد که لایه‌ها دارای

اعمال گاز آرگون، فشار محفظه به 5×10^{-2} mbar افزایش پیدا کرد تا تشکیل پلاسمای کندوپاش ساده‌تر شود. با تولید پلاسمای تابان، فشار محفظه تا جای امکان کاهش پیدا کرد تا مخمل عملیات لایه‌نشانی نباشد. در فشارهای بالاتر طول پویش آزاد اتم‌های ساعت شده از قرص هدف کاهش می‌یابد. به این منظور فشار محفظه تا 10^{-3} mbar کاهش یافت. پس از عملیات لایه‌نشانی، نمونه‌های تهیه شده به داخل کوره در خلا منتقل شدند. کوره خلا دارای ۱ پمپ پشتیبان مکانیکی (روتاری) و یک پمپ پخششی روغنی (دیفیوژن) بود که فشار اولیه محفظه را تا 10^{-5} mbar کاهش می‌داد. در این مرحله لایه‌های به دست آمده را در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت خلا، جریان نیتروژن (۰/۵ sccm)، و جریان اکسیژن (۰/۵ sccm) به مدت ۲ ساعت بازپخت کردیم.

نتایج و بحث

به منظور بررسی ویژگی‌های بلوری لایه‌های نازک CuGaO_2 سنتز شده از نمونه‌ها، الگوی XRD تهیه کردیم. شکل ۱ نمودار طرح پراش را برای نمونه‌های ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت شرایط جوی مختلف خلا، نیتروژن و اکسیژن نشان می‌دهد. نمونه لایه نازک تحت نیتروژن دارای قله‌هایی در زوایای مختلف است که می‌توان آن‌ها را به فاز دلافوسیت CGO مطابق با شماره کارت استاندارد ۱۴۰۲-۳۵ مرتبط دانست. با این حال در این نمونه قله‌هایی در زوایای ۳۰/۴۸ و ۵۷/۷۷ درجه دیده می‌شوند که نمی‌توان آن‌ها را به فاز دلافوسیت منتسب دانست. در واقع این قله‌ها را می‌توان به فاز اسپینل ماده CGO مرتبط دانست که تطابق خوبی با شمار کارت استاندارد ۰۵۱۴-۲۶ دارند. همچنین برای نمونه تحت اکسیژن نیز قله‌های اضافی وجود دارند که علاوه بر فاز دلافوسیت، فاز اسپینل را تداعی می‌کنند. با استفاده از عملیات حرارتی تحت خلا، چنانچه در شکل ۱ مشاهده می‌شود قله‌های مربوط به فاز اسپینل از بین رفته و تنها قله‌های مرتبط با فاز دلافوسیت CGO باقی می‌مانند. می‌توان تایید کرد که فاز دلافوسیت مورد نظر در دماهای بالا و تحت خلا شکل می‌گیرد. جریان اکسیژن و یا نیتروژن می‌تواند با سطح لایه نازک واکنش انجام داده و برخی اتم‌های آن

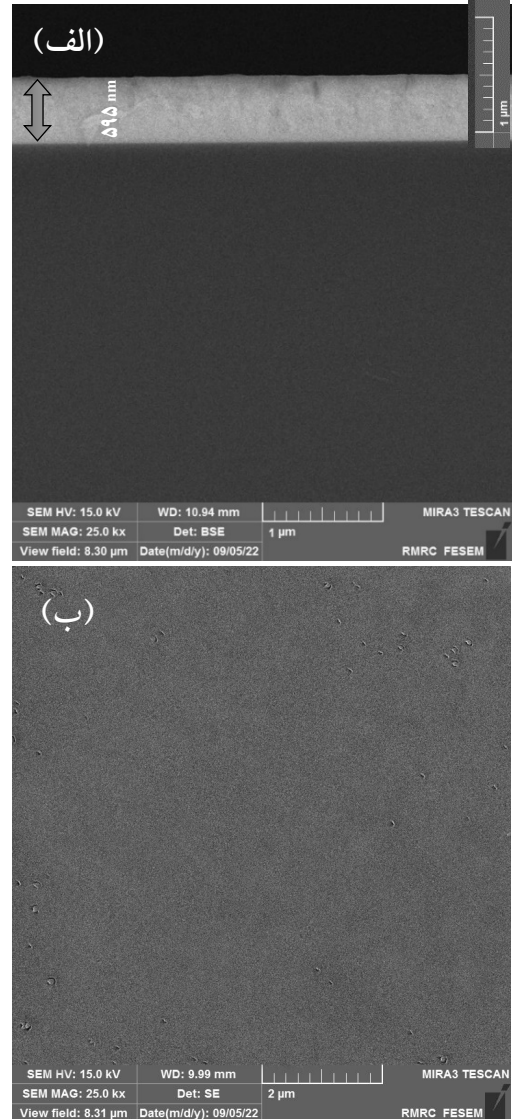


شکل ۳: (الف) منحنی جذب در ناحیه مرئی-فرابنفش و (ب) نمودار تاک برای لایه‌های نازک سنتز شده در شرایط جوی مختلف.

جدول ۱: رسانندگی ویژه نمونه‌های سنتز شده در شرایط مختلف.

رسانندگی ویژه (S/cm)	نمونه لایه نازک
$2/4 \times 10^{-3}$	تحت خلا
-	جریان نیتروژن
-	جریان اکسیژن

رسانندگی ویژه نمونه‌ها در جدول ۱ خلاصه شده‌اند. می‌توان شاهد این بود که رسانندگی ویژه نمونه تحت خلا برابر $2/4 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ است که قابل مقایسه با سایر تحقیقات است [۴]. با این حال رسانندگی ویژه برای نمونه‌های تحت جریان اکسیژن و نیتروژن نتایج



شکل ۲: (الف) تصویر FESEM سطح مقطع و (ب) نمای رویی لایه نازک سنتز شده با عملیات حرارتی تحت خلا.

به

یک قله در محدوده ۳۰۰ nm هستند. با برازش در ناحیه خطی نمودار تاک می‌توان گاف انرژی را به دست آورد که برابر با طول از مبدا این برازش خطی است. گاف انرژی را برای نمونه‌های مختلف تحت خلا، جریان نیتروژن و اکسیژن می‌توان به ترتیب ۳/۵۳، ۳/۷۱ و ۳/۵۷ eV برآورد کرد. برای بررسی خواص الکتریکی لایه‌های نازک CGO از کاوشگر ۴ نقطه‌ای بهره بردیم. در این تحلیل رسانندگی ویژه لایه‌های نازک را برآورد کردیم تا مقایسه‌ای بین لایه‌های تهیه شده داشته باشیم.



مطلوبی به همراه نداشت و نمونه‌ها از خود مقاومت بالایی نشان دادند به گونه‌ای که دستگاه کاوشگر ۴ نقطه‌ای که در محدوده زیر $1\text{ M}\Omega$ عمل می‌کند توانایی تشخیص رسانندگی لایه‌ها را نداشت.

مرجع‌ها

- [1] A. Guha, T. K. Paira, and S. Sarkar, "Transparent Conducting Oxide Nanocrystals: Synthesis, Challenges, and Future Prospects for Optoelectronic Devices," *Phys. status solidi*, vol. **220**, no. 17, p. 2300351, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/pssa.202300351>.
- [2] M. Abrari *et al.*, "Investigating various metal contacts for p-type delafossite α -CuGaO₂ to fabricate ultraviolet photodetector," *Sci. Rep.*, vol. **13**, no. 1, p. 8259, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-35458-0.
- [3] I. Suzuki *et al.*, "First-principles study of CuGaO₂ polymorphs: delafossite α -CuGaO₂ and wurtzite β -CuGaO₂," *Inorg. Chem.*, vol. **55**, no. 15, pp. 7610–7616, 2016.
- [4] C. Esthan *et al.*, "Transparent heterojunctions of Cu-based delafossites n-CuInO₂/p-CuGaO₂ by reactive evaporation method for transparent electronic applications," *Vacuum*, vol. **197**, p. 110808, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110808>.

نتیجه گیری

لایه‌های سنتز شده در شرایط جوی مختلف ویژگی‌های متفاوتی از خود نشان دادند. فاز دلافوسیت در همه نمونه‌ها مشاهده شد، با این حال فاز خالص دلافوسیت تنها در نمونه تحت خلا به دست آمد و علاوه بر آن از رسانندگی بهتری برخوردار بود. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که لایه‌های سنتز شده در شرایط خلا از کیفیت نوری و الکتریکی بهتری نسبت به شرایط جوی نیتروژن و اکسیژن برخوردار هستند.



شبیه سازی برهمکنش باریکه یونی دستگاه پلازما کانونی با سطح داخلی فنجان فارادی

اکبری نساجی، مریم^۱؛ پیش بین، نوشین*^۱؛ معصوم زاده، امین^۲؛ نصیری، علی^۱؛ رستمی فرد، داریوش^۱

^۱ پژوهشکده پلازما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران صندوق پستی ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران، ایران

^۲ دانشکده فیزیک و مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران، ایران

Npishbin1985@gmail.com

چکیده

یکی از مباحث مهم در بکارگیری فنجان فارادی در دستگاه‌های پلازما کانونی، تولید الکترون ثانویه ناشی از برخورد ذرات باریکه با سطح داخلی فنجان فارادی و گیراندازی آن‌ها در اندازه‌گیری جریان باریکه ذرات توسط فنجان است. لذا در این مطالعه، به شبیه سازی اثرات هندسی نظیر عمق و ساختار داخلی فنجان بر تولید الکترون‌های ثانویه و جریان خروجی فنجان فارادی پرداخته شده است. ابزار شبیه سازی بکار رفته CST STUDIO SUITE می‌باشد. براساس نتایج شبیه‌سازی کاهش نسبت منظر منجر به افزایش توانایی گیراندازی ذرات می‌گردد و در نتیجه جریان اندازه‌گیری توسط فنجان فارادای به جریان واقعی نزدیک‌تر می‌شود. علاوه‌براین، جریان فنجان فارادی برای هندسه استوانه‌ای از میزان واقعی جریان بیشتر است و در هندسه سطح شیبدار، جریان فنجان فارادی به مقدار واقعی نزدیک‌تر است.

Simulation of ion beam interaction of plasma focus device with the inner surface of Faraday cup

Akbari Nasaji¹, Maryam; Pishbin, Noushin¹; Masoomzadeh, Amin²; Nasiri, Ali¹; Rostami Fard, Daryoosh¹

¹ Plasma Physics and Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran

² Department of Physics and Energy Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran

Abstract

One of the important topics in the use of Faraday cup in plasma focus devices is the production of secondary electrons due to the collision of beam particles with the inner surface of the Faraday cup and their trapping in the measurement of particle beam flow by the cup. Therefore, in this study, the simulation of the geometrical effects such as the depth and Internal structure of the cup on the production of secondary electrons and the output current of the Faraday cup has been done. The used simulation tool is CST STUDIO SUITE. Based on the simulation results, reducing the aspect ratio leads to an increase in the particle trapping ability, and as a result, the flow measured by the Faraday cup is closer to the real flow. Furthermore, The Faraday cup current for a cylindrical sample is greater than the actual current and in the ramp example, the Faraday cup current is closer to the actual value.



مقدمه

منتقل شده متناسب با جریان باریکه است که می‌توانیم با سری کردن یک آمپر متر در امتداد کابل حامل جریان، آن را اندازه‌گیری کنیم. به این صفحه فلزی که منجر به توقف باریکه در خود می‌گردد، صفحه فارادی می‌گویند. ابزار دیگری که برای متوقف کردن کامل باریکه استفاده می‌گردد، فنجان فارادی است. همان طور که از اسم آن پیداست، این ابزار که از یک فلز رسانا مثل مس یا آلومینیوم ساخته می‌شود به شکل فنجان است و با متوقف کردن کامل باریکه و جلوگیری از فرار ذرات منجر به اندازه‌گیری دقیق جریان می‌گردد [۴]. در برخورد یون‌های پر انرژی به سطح فلز فنجان فارادی، الکترون‌های ثانویه‌ای تولید می‌شوند که منجر به جریان ثانویه می‌شود. اگر این الکترون‌ها در همان فنجان جمع‌آوری نشوند یا اثر آن‌ها را اصلاح نکنیم، باعث ایجاد بار خالص مثبت و در نتیجه افزایش جریان فارادی می‌شوند. هدف از این مقاله شبیه سازی جریان ثانویه فنجان فارادی و بررسی اثر عمق فنجان در اندازه‌گیری جریان است.

تئوری مسئله

به طور کلی، فنجان فارادی (FC) یک متوقف کننده باریکه است، که از نظر الکتریکی از محفظه دستگاه جدا و به یک جریان سنج متصل است. این دستگاه به طور عمده برای اندازه‌گیری شدت باریکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار جریان ایجاد شده در فنجان فارادی به عوامل مختلفی بستگی دارد که مهم‌ترین آنها عبارتند از: تعداد ذرات برخوردی، درجه یونیزاسیون ذرات برخوردی و بازده الکترون ثانویه [۵]. یک رابطه ساده بین جریان الکتریکی ذرات و تعداد ذرات وجود دارد که در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$I_{par} = \frac{N}{t} = \frac{I}{e \cdot Z_{eff}} \quad (1)$$

که در آن، Z_{eff} درجه یونیزاسیون موثر، N تعداد ذرات، t زمان، I_{par} شار ذرات، I جریان الکتریکی ذرات و e بار الکتریکی است. اما به سبب وجود الکترون‌های ثانویه، جریان اندازه‌گیری شده توسط فنجان فارادی، متفاوت از جریان واقعی ذرات است. زمانی

دستگاه‌های پلاسمای کانونی^۱ با انرژی‌های ورودی مختلف بعنوان منبعی از انواع تابش‌ها مانند ذرات باردار، پرتوهای ایکس نرم و سخت و نوترون‌ها کاربردهای بالقوه‌ای در بسیاری از زمینه‌ها دارند. از جمله کاربردهای این دستگاه‌ها می‌توان تحقیقات فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای را نام برد. فنجان فارادی یکی از ابزارهای تشخیصی مهم در پلاسماهای کانونی برای اندازه‌گیری جریان یون‌های پر انرژی است. مهم‌ترین چالش در اندازه‌گیری جریان باریکه ذرات توسط فنجان فارادی، پس پراکندگی ذرات باریکه از سطح داخلی فنجان و همچنین تولید الکترون ثانویه ناشی از برخورد ذرات باریکه با سطح داخلی فنجان است. یون‌ها دارای محدوده انرژی و چگالی متفاوت در زاویه و موقعیت مختلف نسبت به نوک آند هستند. توزیع زاویه‌ای شار یون‌ها در دستگاه‌های پلاسمای کانونی به نوع گاز کاری بستگی دارد. موهانتی^۲ و همکارانش نشان دادند که شار یون‌ها در زاویه صفر درجه روی آند نسبت به دیگر زوایا بیشتر است [۱]. مشخص بودن انرژی یون‌ها و توزیع چگالی آن‌ها برای درک فیزیک تولید و شتاب یون‌های دستگاه پلاسمای کانونی ضروری است. علاوه بر این، بررسی توزیع چگالی انرژی به منظور استفاده بهینه از دستگاه پلاسمای کانونی در کاربردهایی مانند پردازش مواد و رسوب لایه نازک تأثیر مهمی بر این فرایندها دارد [۲و۳]. یکی از مهم‌ترین پارامترهای باریکه، شار یونی است. برای شار ذرات کم، می‌توان به طور مستقیم تعداد آنها را توسط دستگاه‌های شمارنده ذرات بدست آورد. اما برای شار ذرات زیاد، شمارش مستقیم آن‌ها با خطای زیادی همراه است. برای اندازه‌گیری شار زیاد یون‌ها که دارای بار الکتریکی هستند، ساده‌ترین و دقیق‌ترین روش، اندازه‌گیری جریان آن‌ها توسط ابزارهای اندازه‌گیری جریان الکتریکی از قبیل آمپر متر است. قرار دادن یک صفحه فلزی در مسیر باریکه و اتصال آن توسط کابل به یک منبع تامین ولتاژ و یا ساده‌تر از آن اتصال به زمین منجر به انتقال جریان باریکه به منبع یا زمین می‌گردد. جریان

¹ Plasma Focus (PF)

² S.R. Mohanty



تشکیل شده است، مقاومت آن را می توان از رابطه ی زیر که برای کابل هم محور می باشد، محاسبه کرد:

$$z = \frac{138.2}{\sqrt{K}} \log \frac{D}{d} \quad (2)$$

که در آن:

D: قطر داخلی فنجان بیرونی d: قطر بیرونی فنجان داخلی و K: ثابت دی الکتریک عایق بکار رفته بین دو فنجان می باشد که برای پلی اتیلن $K = 2/2$ است.

در شکل ۱، محل قرارگیری فنجان فارادی در پلاسمای کانونی نشان داده شده است.



شکل ۱: محل قرار گیری فنجان فارادی در بالای پلاسمای کانونی و تشکیل پینچ

برای تحلیل سیگنال فارادی بر اساس شکل ۱ تقریب های زیر را در نظر می گیریم:

- چشمه ی نقطه ای: یعنی تمام یونها از یک نقطه از بالای آند گسیل می شوند. در واقع از ابعاد پلاسمای تنگش در برابر فاصله ی فارادی از آن صرف نظر می کنیم.
- غیر وابسته به زمان: یعنی تمام یونها در یک زمان گسیل می شوند. زیرا طول عمر پلاسمای تنگش (حدود ۱۰۰ ns) در برابر زمان پرواز یونها تا آشکارساز فارادی (حدود ۱ μs) قابل صرف نظر کردن است.

شبیه سازی

برای شبیه سازی فنجان فارادی برای دستگاه پلاسمای کانونی ۲/۵ کیلوژول، باید مشخصات باریکه و دستگاه را بدانیم. در جدول ۱ مشخصات فنی دستگاه و باریکه ارائه گردیده است. با توجه به این پارامترها، طراحی انجام می گیرد. شبیه سازی ها با استفاده از نرم

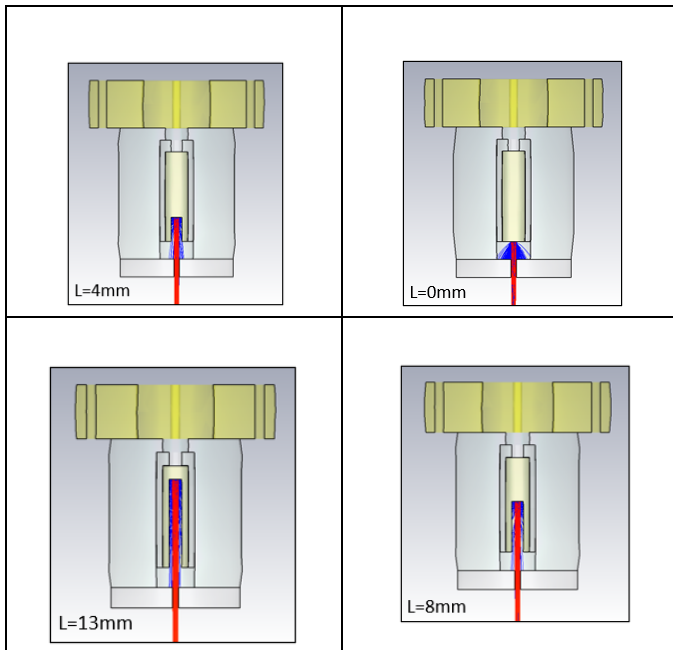
که یک ذره انرژی دار با سطح یک ماده برخورد می کند، با انتقال انرژی به اتم های سطح ماده، باعث می شود الکترون های مدار اتم، آزاد شده و در صورت نزدیک بودن به سطح از ماده فرار می کنند. تعداد الکترون های تولید شده (الکترون های ثانویه) بستگی به عوامل مختلفی از قبیل جرم و بار الکتریکی ذره برخوردی، انرژی و زاویه برخورد ذره، جنس ماده هدف، آلودگی های سطحی و... دارد.

بازده کلی الکترون های ثانویه

بازده کلی الکترون (γ) تعداد الکترون های منتشر شده از سطح در اثر برخورد یک ذره است. زاویه برخورد ذره با توجه به بردار نرمال سطح بیان می شود و در اکثر آزمایشات برخورد به صورت عمود بر سطح در نظر گرفته می شود (زاویه برخورد صفر). عوامل موثر بر بازده الکترون های منتشر شده از سطح هدف عبارتند از: شرایط سطح هدف - دمای سطح - وابستگی بازده الکترون به انرژی ذره - عدد اتمی سطح هدف و ارتباط تولید الکترون ثانویه و زاویه برخورد ذره.

میزان الکترون های ثانویه با اندازه گیری جریان محاسبه می شود. برای این کار مانیتورهای فرضی در نقاط مختلف بین چشمه یونی و فنجان فارادی قرار داده شده و جریان یونها محاسبه می شود. از اختلاف جریان واقعی و جریان اندازه گرفته شده، میزان تولید الکترون های ثانویه به دست می آید.

در طراحی فنجان فارادی باید نکاتی در نظر گرفته شود از جمله اینکه امپدانس فنجان مورد نظر با امپدانس خط انتقال بار یکسان باشد تا از این طریق ماکزیمم توان از فنجان به خط انتقال یابد [۶]. لازم به ذکر است که تطبیق امپدانس تنها باعث عدم اتلاف توان می گردد و در سایر پارامترهای اندازه گیری بی تأثیر است. تطبیق امپدانس باید به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی و سنگ بنای طراحی فنجان در نظر گرفته شود. با در نظر گرفتن این نکته که امپدانس کابل های انتقال معمولاً ۵۰ اهم است لذا تلاش داریم امپدانس فنجان نیز تا حد امکان در این حدود باشد. با توجه به این که فنجان فارادی از دو استوانه ی هم محور با عایق میانی



جدول ۱: مشخصات فنی دستگاه پلاسمای کانونی و باریکه یونی

بیشینه انرژی دستگاه	۲/۵ کیلوژول
اندوکتانس کل	۱۱۰ نانوهارتری
ظرفیت بانک خازنی	۲۲ میکروفاراد
بیشینه ولتاژ شارژ خازنها	۳۰ کیلو ولت
بیشینه جریان پلاسما	۸۰ کیلو امپر
محدوده فشار	۳-۱ تور
قطر ورودی فنجان	۱ میلی متر
عمق فنجان	۱۳ میلی متر
جنس فنجان	برنج-گرافیت
انرژی یون ها	۴۰-۱۵۰ کیلو الکترون ولت

افزار CST STUDIO SUITE انجام شده است و نتایج در ادامه نشان داده می شود. هدف از این شبیه سازی تعیین مقدار الکترون ثانویه با استفاده از کد CST بوده است. برای این کار ابتدا یک چشمه با ابعاد ۱ میلی متر در فاصله نزدیک از پینچ در نظر گرفته شده و تعداد کل یون های ایجاد شده توسط این چشمه محاسبه شده است.

بررسی اثر عمق و هندسه داخلی فنجان فارادی

در این مطالعه یک چشمه یونی با انرژی ۱۴keV تعریف گردید. برای هندسه داخلی فنجان یک قطر داخلی ۱mm به صورت ثابت و عمق آن از صفر تا ۱۳mm قابل تغییر در نظر گرفته شد. نسبت قطر ورودی فنجان به عمق آن با پارامتر نسبت منظر تعریف می شود. بنابراین، تغییر نسبت منظر تنها از تغییر عمق فنجان نتیجه می شود. نتایج نشان می دهد که هر چه عمق فنجان زیادتر باشد تعداد ذرات ثانویه افزایش می یابد (شکل ۲) ولی به سبب نسبت منظر کوچکتر، فرار ذرات ثانویه سخت تر می گردد و این به سبب افزایش احتمال برخورد و جذب این ذرات درون دیواره است [۷].

در شکل ۳ اثر عمق فنجان گرافیتی بر جریان فنجان فارادی و همچنین جریان الکترون ثانویه خروجی از فنجان نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، در عمق های کم که الکترون های ثانویه خروجی بیشتری داریم جریان فنجان فارادی هم از مقدار واقعی خود بسیار بزرگتر است و خطای بیشتری را نشان

شکل ۲: بررسی اثر عمق فنجان در تولید الکترون های ثانویه. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش عمق فنجان، تعداد الکترون های ثانویه افزایش می یابد.

می دهد. در شکل ۴ تولید الکترون های ثانویه برای دو نمونه از هندسه فنجان فارادی نشان داده شده است. همانطور که در شکل هم نشان داده شده است میزان جریان ثانویه خارج شده از نمونه استوانه ای نسبت به نمونه سطح شیب دار بیشتر است. جریان حاصل شده از فنجان فارادی از این دو هندسه در شکل ۵ با هم مقایسه شده اند. همان طور که در شکل نشان داده شده است جریان فنجان فارادی برای نمونه استوانه ای از میزان واقعی جریان بیشتر است زیرا جریان خروجی ثانویه در این هندسه باعث ایجاد خطای بیشتر می شود و در نمونه سطح شیب دار، جریان فنجان فارادی به مقدار واقعی نزدیکتر است.

نتیجه گیری

در این پژوهش، با شبیه سازی ساختار داخلی فنجان فارادی، اثر عمق و نوع هندسه داخل فنجان بر تولید الکترون ثانویه مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور، شبیه سازی های مختلفی توسط نرم افزار CST STUDIO SUITE انجام گرفت. ابتدا، اثر نسبت منظر مورد بررسی قرار گرفت که براساس شبیه سازی، کاهش نسبت منظر منجر به افزایش توانایی گیراندازی ذرات می



گردد و در نتیجه جریان اندازه‌گیری توسط فنجان فارادی به جریان واقعی نزدیک‌تر می‌شود. اما به دلیل محدودیت در ابعاد فنجان فارادی نمی‌توان عمق فنجان را به مقدار دلخواه بزرگ انتخاب کرد و کاهش نسبت منظر نیز تا مقدار معینی امکان پذیر است.

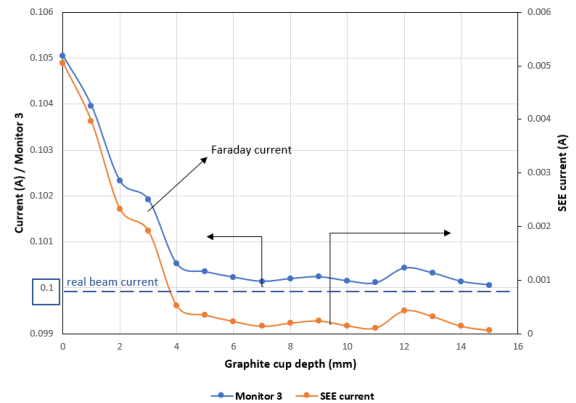
علاوه بر این، بازده الکترون ثانویه مستقیماً به زاویه برخورد باریکه بستگی دارد که به همین علت در فنجان‌های مخروطی و سطح شیبدار بیشترین بازده الکترون ثانویه را داریم. اما توانایی جذب الکترون ثانویه منجر می‌شود که پارامتر بازده الکترون ثانویه نادیده گرفته شود و برای انتخاب هندسه مناسب تنها به توانایی جذب الکترون توسط آن تمرکز کنیم. هر چه میزان جریان اندازه‌گیری شده توسط فنجان فارادی به جریان واقعی باریکه نزدیک‌تر باشد، توانایی جذب توسط آن هندسه بیشتر است. بنابراین، هندسه شیبدار می‌تواند به عنوان هندسه مطلوب انتخاب گردد و شبیه-سازی‌های بعدی براساس آن انجام گیرد.

مرجع‌ها

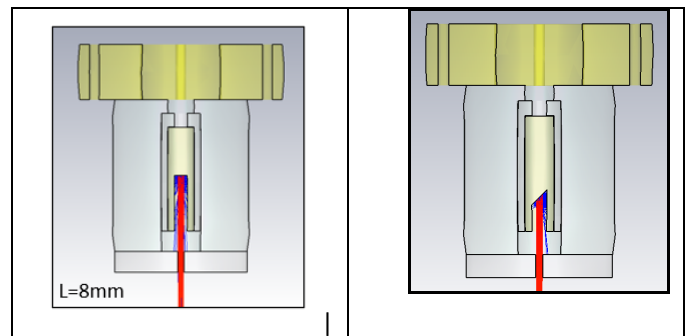
- [1] S.R. Mohanty, H. Bhuyan, N.K. Neog, R.K. Rout, E. Hotta, Development of multi Faraday cup assembly for ion beam measurements from a low energy plasma focus device, *Jpn. J. Appl. Phys.* 44 (7R) (2005) 5199.
- [2] F.M. Aghamir, A.R. Momen-Baghdadabad, M. Etmianan, Effects of deposition angle on synthesis of amorphous carbon nitride thin films prepared by plasma focus device, *Appl. Surf. Sci.* 463 (2019) 141–149.
- [3] F.M. Aghamir, A.R. Momen-Baghdadabad, Characteristics of tungsten layer deposited on graphite substrate by a low energy plasma focus device at different angular position, *Thin Solid Films* 685 (2019) 108–116.

[۴] معصوم زاده، امین؛ « طراحی و ساخت فنجان فارادی برای اندازه‌گیری شدت جریان چشمه یون هلیکن امیرکبیر»؛ پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، بهمن ۹۶

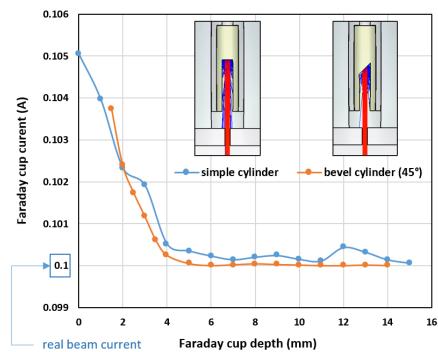
- [5] Lee, S., Rawat, R. S., Lee, P., & Saw, S. H. (2009). Soft X-ray yield from NX2 plasma focus. *Journal of Applied Physics*, 106(2).
- [6] Koohestani, S., Habibi, M., & Dehkordi, A. N. (2021). Investigation of the effect of insulator sleeves on the ion emission in a 4kJ Plasma focus device. *Radiation Physics and Engineering*, 2(3), 17-23.
- [7] Furmn, M and Pivi, M. Probabilistics model for the simulation of secondary electron emission. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beam*, 2002. 5(12):P.124404.



شکل ۳: بررسی اثر عمق فنجان بر جریان خروجی. در این شکل جریان اندازه‌گیری شده در داخل فنجان فارادی و جریان واقعی بیم نشان داده شده است. نمودار آبی رنگ جریان اندازه‌گیری شده ی فنجان فارادی است که همان طور که مشاهده می‌شود، هر چه عمق فنجان بیشتر باشد به مقدار واقعی نزدیکتر می‌شود. نمودار نارنجی مربوط به بازده اندازه‌گیری الکترون‌های ثانویه است که مطابق شکل هر چه عمق فنجان بیشتر باشد این مقدار به صفر نزدیکتر می‌شود و جریان فنجان فارادی به مقدار واقعی خود با خطای کمتری نزدیک می‌شود.



شکل ۴: دو نمونه هندسه فنجان فارادی الف: سطح شیبدار ب: استوانه‌ای



شکل ۵: جریان فنجان فارادی برای دو هندسه استوانه‌ای و سطح شیبدار



مشخصه یابی گسیل پرتو ایکس سخت و نرم دستگاه پلازما کانونی مدر 10 kJ

نوشین پیش بین*، علی نصیری، سیدرضا شفاعی، نیکو دارستانی، امیر چخماچی، مهگام قیدی، پروین یورتچی

پژوهشکده پلازما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

Npishbin1985@gmail.com

چکیده

در این پژوهش به مطالعه تجربی گسیل پرتو ایکس سخت و نرم دستگاه پلازما کانونی 10kJ پرداخته شده است. با توجه به اهمیت پارامترهای عملکردی فشار، ولتاژ و ترکیب گاز مورد استفاده، ابتدا تأثیر این پارامترها بر جریان و رخداد تنگش در دستگاه مذکور را بررسی نموده‌ایم. در ادامه با انجام آزمایشات متعدد، فشار و ولتاژ بهینه دستگاه تعیین شده و سپس در آن شرایط بهینه، گسیل پرتو ایکس سخت و نرم دستگاه اندازه‌گیری شده است. به منظور ثبت سیگنال جریان و مشتق جریان از آشکارساز پیچه روگوفسکی و ثبت سیگنال ایکس سخت و نرم به ترتیب از سوسوزن پلاستیک و پین دیود استفاده شده است. بررسی نمودارها و تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که قویترین تنگش، سیگنال ایکس سخت و نرم با گاز آرگون، در ولتاژ 10kV و فشار 2/5 تور حاصل شده است.

کلیدواژه‌ها: دستگاه پلازما کانونی، ایکس سخت و نرم، سوسوزن پلاستیک، پین دیود

Characterization of hard and soft X-ray emission of Mather plasma focus device 10 kJ

Noushin Pishbin*, Ali Nasiri, Seyed Reza Shafaie, Nikoo Darestani, Amir Chakhmachi, Mahgam Gheidi, Parvin Yourtchi

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Abstract

In this research, the experimental study of hard and soft X-ray radiation of 10kJ plasma focus device has been investigated. Considering the importance of the functional parameters of pressure, voltage and the composition of the gas used, we have first checked the effect of these parameters on the flow and the occurrence of pinch in the mentioned device. Further, by performing numerous tests, the optimal pressure and voltage of the device were determined, and then, in those optimal conditions, the emission of hard and soft X-rays of the device was measured. In order to record the current and derivative of the current signal a Rogowski coil detector and for recording the hard and soft x-ray signals, a plastic scintillator and PIN diode were used, respectively. Examining the graphs and analyzing the data shows that the strongest Pinch, hard and soft X-ray signal with argon gas, was obtained at a voltage of 10 kV and a pressure of 2.5 Torr.



مقدمه

$$Y_x = \frac{I_{\max}^4}{r^2} \quad (1)$$

با این حال بیشینه بهره ایکس تنها با بررسی‌های تجربی و آزمایشگاهی مشخص می‌شود. مهمترین پارامترهای قابل اندازه‌گیری در دستگاه پلاسمای کانونی جریان و ولتاژ سیستم هستند. بررسی این سیگنال‌ها اطلاعات مفیدی در رابطه با دینامیک و عملکرد سیستم می‌دهد.

کیفیت کانونی شدن در دستگاه پلاسمای کانونی را می‌توان با توجه به عمق (میزان فرورفتگی) تنگش و شیب منفی آن در سیگنال مشتق جریان مشخص کرد. سیگنال مشتق می‌تواند اطلاعات مفیدی در خصوص سرعت تراکم ستون پلازما، دما و شعاع نهایی ستون پلازما را تعیین کند [۴]. لذا اغلب نتیجه‌گیری‌ها در زمینه کیفیت و چگونگی رخداد تنگش بر پایه بررسی سیگنال جریان و مشتق آن انجام می‌پذیرد.

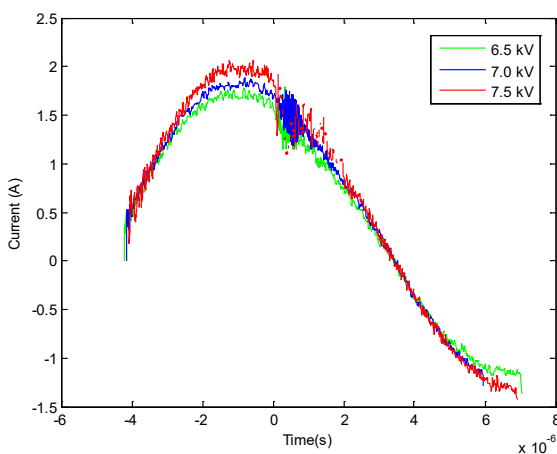
از پارامترهای عملکردی مهم و تأثیرگذار بر تنگش، ولتاژ کاری دستگاه می‌باشد. پارامتر محدود کننده انتخاب ولتاژ کاری، ساختار خازن بکار رفته است. اثر ولتاژ بر پالس جریان در دستگاه پلاسمای کانونی 10 kJ در شکل ۱ نمایش داده شده است. سیگنال‌های رسم شده با ثابت نگه داشتن تمامی پارامترها بجز ولتاژ سیستم حاصل شده است.

از جمله عوامل دیگر در بهینه سازی مشخصه‌های ایکس گسیلی از دستگاه پلازما کانونی، فشار گاز است. شکل ۲ تغییرات پالس

تکنولوژی پلاسمای کانونی نسبت به سایر مولدهای توان پالسی ارزانتر و از پیچیدگی کمتری برخوردار است. این دستگاه‌ها به صورت پالسی کار می‌کنند و در زمان تنگش پلازما انرژی مغناطیسی پلازما را به انرژی گرمایی پلازما تبدیل می‌کنند. از مهمترین اهداف پیشرفت دستگاه پلاسمای کانونی، بهبود عملکرد آن در کاربردهایی است که از آن به عنوان چشمه پالسی استفاده می‌شود. این دستگاه به دلیل تولید پرتوهای نوترون پالسی با شار بالا، پرتو ایکس نرم و سخت و پرتوهای الکترونی و یونی امکان انجام پروژه‌های تحقیقاتی زیادی را فراهم می‌آورد. از کاربردهای مهم تابش ایکس پالسی دستگاه پلاسمای کانونی، رادیوگرافی، لیتوگرافی، پزشکی، انجام آزمایش‌های غیر مخرب است. تا کنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه دستگاه‌های پلازما کانونی با انرژی‌های متفاوت انجام شده است. راسپا و همکارانش [۱] در سال ۲۰۱۸ دزیمتری اشعه ایکس سخت گسیل شده از دستگاه پلازما کانونی 4 mJ نوع مدر را به منظور کاربردهای رادیوگرافی صنعتی اندازه‌گیری کردند. صبری و همکارانش [۲] در سال ۲۰۱۶، یک دستگاه پلازما کانونی $3/375 \text{ kJ}$ با ولتاژ کاری $13/5 \text{ kV}$ را مورد بررسی قرار داده و طیف حاصل را مشخصه‌یابی کردند. علاوه بر این، مطالعات دیگری نیز در زمینه گسیل پرتو ایکس دستگاه پلازما کانونی انجام شده است که در مراجع آورده شده است [۳-۵].

مفاهیم فیزیکی

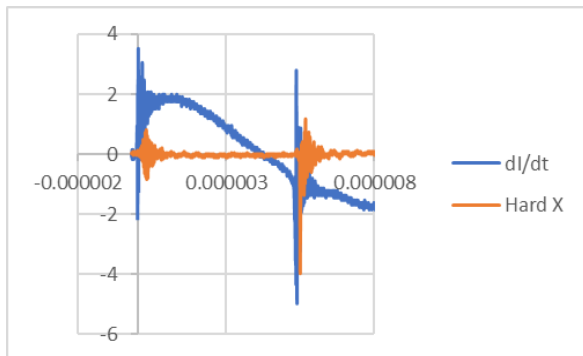
مشخصه‌های گسیل پرتو ایکس در دستگاه پلاسمای کانونی به شدت به پارامترهای رژیم آزمایش دستگاه (فشار، ولتاژ، ترکیب گاز، انرژی تخلیه شده و جریان آن، امپدانس، جنس و شکل الکترودها، ساختار و پروفیل آن، پلاریته الکتروود داخلی و ...) بستگی دارد. برای مثال تغییر در فشار و ولتاژ گاز مورد آزمایش، قویترین نوسانات را به دنبال دارد. برای دستگاه پلاسمای کانونی با فشار بهینه تولید پرتو ایکس، بهره خروجی پرتو ایکس (Y_x) را می‌توان بصورت تابعی از بیشینه جریان تخلیه I_{\max} و شعاع تنگش r با رابطه تجربی زیر بیان کرد [۶].



شکل ۱: اثر ولتاژ بر سیگنال جریان در دستگاه پلازما کانونی 10 kJ با گاز آرگون در فشار 0.13 mbar .



با توجه به اینکه، بازه زمانی تولید پرتو ایکس سخت در دستگاه پلاسما کانونی از مرتبه چند صد نانو ثانیه است؛ لذا برای تعیین توزیع زمانی گسیل پرتو ایکس سخت و مشاهده تغییرات گسیل پرتو ایکس در این بازه زمانی باید از آشکارسازی استفاده کرد که پاسخ زمانی سریع داشته باشد. پاسخ سریع آشکارسازهای سوسوزن پلاستیک باعث شده است که از آنها در آشکارسازی پرتوهای ایکس گسیل شده از دستگاه پلاسما کانونی استفاده شود. لذا در این پژوهش از آشکارساز سوسوزن پلاستیک NE-102 برای اندازه گیری ایکس سخت استفاده شده است. علاوه براین، از سیستم تشخیصی الکتریکی پیچه روگوفسکی برای اندازه گیری جریان و نیز مشتق جریان و مشاهده زمان و کیفیت رویداد تنگش، استفاده شده است. نمونه ای از سیگنال ایکس سخت و مشتق جریان و نیز نتایج پردازش و تحلیل سیگنالها نیز در ادامه آورده شده است.

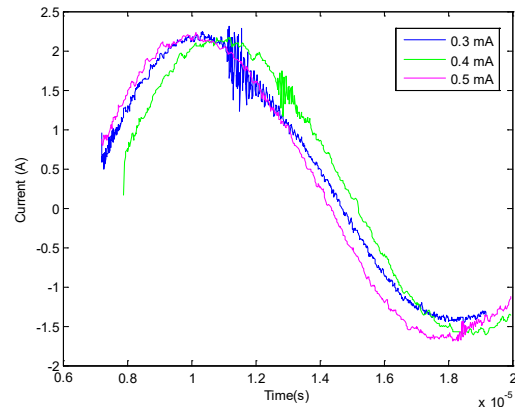


شکل ۳: سیگنال ایکس سخت و مشتق جریان دستگاه پلاسما کانونی ۱۰ kJ با گاز آرگون.

جدول ۱: نتایج پردازش سیگنال ایکس سخت پلاسما کانونی ۱۰ kJ با گاز آرگون در ولتاژ ۱۰ kV.

فشار (تور)	۲	۲/۵	۳	۳/۵
میانگین (FWHM)	10^{-6}	0.2966×10^{-6}	0.3187×10^{-6}	0.8439×10^{-6}
میانگین ^{1}Hp	۱۲/۲۸	۱۶/۵۷	۱۴/۶۸	۱۰/۰۶
میانگین ^{2}Ap	10^{-6}	0.7321×10^{-6}	3.4124×10^{-6}	8.4697×10^{-6}

۱ عمق سیگنال روگوفسکی
۲ مساحت زیر سیگنال روگوفسکی

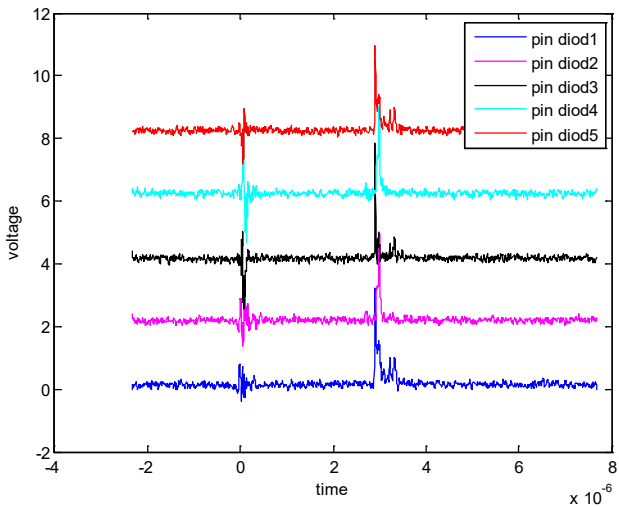


شکل ۲: تغییرات سیگنال جریان ناشی از تغییر فشار در دستگاه پلاسما کانونی ۱۰ kJ با گاز نئون در ولتاژ ۸ kV.

جریان برای دستگاه پلاسما کانونی ۱۰ kJ در ولتاژ ۱۰ kV را نشان می دهد. نتایج حاصل از آزمایشات نشان می دهد که در صورت افزایش فشار، جریان سریعتر افزایش پیدا می کند. در یک انرژی خاص افزایش فشار سبب افزایش اینرسی ناشی از جرم می شود. با افزایش لختی جرمی، سرعت حرکت لایه پلاسما کاهش پیدا می کند. کاهش سرعت لایه پلاسما موجب کاهش آهنگ افزایش اندوکتانس خواهد شد. در نتیجه اندوکتانس سیستم نسبت به فشارهای پایین تر، کمتر خواهد بود. لذا جریان سریعتر افزایش می یابد.

اندازه گیری پرتو ایکس سخت و نرم گسیلی دستگاه پلاسما کانونی

چگالی و دمای نسبتاً زیاد پلاسما در دستگاه پلاسما کانونی باعث گسیل پرتوهای پرانرژی می شود که مهمترین آنها عبارتند از پرتو ایکس نرم (با انرژی کمتر از ۱۰ keV)، پرتو ایکس سخت (با انرژی بیشتر از ۱۰ keV) و نیز نوترون های پر انرژی که تحت شرایط مناسب تولید می شوند. گسیل پرتو ایکس نرم عمدتاً به علت برانگیختگی و به دنبال آن واکنجختگی اتم های گاز و یا اتم های آند انجام می پذیرد. گسیل پرتو ایکس سخت نیز به علت برخورد ذرات پرانرژی پلاسما و تحت تاثیر پدیده تابش ترمزی انجام می شود.



شکل ۴: سیگنال‌های حاصل شده از ۵ پین دیود در حضور فیلتر در دستگاه پلاسما کانونی ۱۰ kJ.

می‌باشد. قابل ذکر است که مقادیر موجود در جداول بالا حاصل میانگین گیری از حداقل سه تخلیه در شرایط مشابه می‌باشد. به منظور تحلیل سیگنال‌های بدست آمده، به تمام سیگنال‌ها در بازه زمانی رویداد تنگش و گسیل ایکس و یون، با استفاده از نرم افزار متلب منحنی گاوسی برازش شده است.

جدول ۲: نتایج تحلیل سیگنال ایکس نرم پلاسما کانونی ۱۰ kJ با گاز آرگون در ولتاژ اعمالی ۱۰ kV و فشار ۲/۴torr.

شماره پین دیود	۱	۲	۳	۴	۵
میانگین (FWHM)	۸- ۲۶۴۵×۱۰ ۷/	۷- ۱۶۹۸×۱۰ ۴/	۷- ۸۵۶۲×۱۰ ۴/	۹- ۷۵۶۳×۱۰ ۶/	۸- ۳۲۴۹×۱۰ ۵/
میانگین Hp	۹/۴۵۶۲	۷/۱۴۸۶	۱۵/۲۳۶۴	۳/۵۴۲۶	۱۰/۱۲۳۶
میانگین Ap	۶- ۸۵۶۴×۱۰ ۲/	۷- ۳۲۸۷×۱۰ ۵/	۶- ۱۲۳۶×۱۰ ۹/	۸- ۴۱۰۲×۱۰ ۸/	۶- ۲۱۵۶×۱۰ ۳/

پرتوی ایکس نرم گسیل شده از پلاسما حاوی اطلاعات ارزشمندی از ناپایداری پلاسما، نوسانات، توان اتلافی و غیره می‌باشد. دو روش متداول اندازه‌گیری پرتو ایکس نرم عبارتند از: ۱- استفاده از آشکارسازهای نیمه‌رسانا و ۲- استفاده از بیناب‌سنج‌های بلوری. از آنجا که در آشکارساز نیمه‌رسانای سیلیسیمی، برای تولید هر زوج الکترون-حفره فقط انرژی متوسطی در حدود ۳/۵ eV مورد نیاز است، بنابراین این نوع نیمه‌رسانا قادر به آشکارسازی در محدوده پرتو ایکس نرم می‌باشد. اساس کار آشکارسازهای نیمه‌رسانا، تابیدن پرتو ایکس به ناحیه حساس (ناحیه تهی) نیمه‌رسانا و تولید زوج‌های الکترون-حفره است. در این پژوهش، به منظور آشکارسازی پرتو ایکس نرم دستگاه پلاسما کانونی از آشکارساز نیمه‌رسانا از نوع پین‌دیود با شماره BPX65، که یک نیمه‌رسانای سیلیسیمی است، استفاده شده است. این پین دیود در ناحیه پرتو ایکس نرم کارائی و بازده مناسبی داشته و در بازار نیز با قیمت مناسب وجود دارد. ولتاژ تغذیه مورد نیاز برای این پین دیود در حدود ۴۵ ولت DC و به صورت معکوس بایاس می‌گردد. در این پژوهش، از یک آرایه ۸ تایی پین دیود موجود در پژوهشکده، استفاده شد. در مطالعه حاضر از ۵ عدد پین دیود به طور همزمان استفاده شده است. بر اساس آزمایشات انجام شده، بهترین سیگنال خروجی ایکس نرم از پین دیود مرکزی حاصل شده است. این آرایه طوری طراحی شده است که قابلیت گذاشتن فیلترهای مختلف در مقابل هر پین دیود را دارد. در اینجا به منظور دستیابی به پرتو ایکس نرم، از فیلترهای تضعیف کننده برلیوم ۱۰ میکرون و برلیوم ۲۳۰ میکرون و آلومینیوم - مایلار ۱۲ میکرون استفاده کرده‌ایم. در شکل ۴ سیگنال‌های مربوط به ایکس نرم پین دیود مرکزی با فیلترهای مذکور نشان داده شده است. FWHM پهنای کامل در عمق نیم بیشینه و معیاری از طول عمر ستون پلاسما است. H(P, s, i) ارتفاع نمودار برازش شده و A(P, s, i) نشانگر سطح زیر نمودار سیگنال مشتق جریان و است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در فشار ۲/۴torr و ولتاژ ۱۰ kV، قویترین سیگنال ایکس نرم مربوط به پین دیود مرکزی (شماره ۳)



نتیجه گیری

با بررسی نمودارهای حاصل شده و پارامترهای محاسبه شده می-توان مشاهده کرد که با گاز آرگون و در ولتاژ 10 kV ، بیشترین عمق تنگش و قویترین سیگنال ایکس سخت و یون در فشار $2/5$ تور حاصل شده است که در بازه فشار بهینه دستگاه نیز می باشد. بالا بودن عمق تنگش نشان از رخداد تنگش قویتر است. علاوه براین، بهترین بهره ایکس زمانی رخ می دهد که کانونی شدن در بیشینه جریان رخ دهد. در بیشینه جریان، ستون پلاسما متراکم تر خواهد بود.

مرجع ها

- [1] P. Knoblauch., V. Raspa, F. Lorenzo, .A. Clause and C. Moreno; "Hard X-ray dosimetry of a plasma focus suitable for industrial radiography"; *Radiation Physics and Chemistry*, **145**, (2018) 39-42.
- [2] R. M. Sabri, A. H. Bajjan; "Plasma Focus Device As A X Ray Source For Radiography Applications In Nuclear Malaysia"; *Journal Sains Nuclear Malaysia*, **28**, No.1 (2016) 30-33.
- [3] F. Diab, and G. M. El-Kashef; "Emission of X-ray from 1kJ Plasma Focus Device and its Preliminary Applications"; *Int. J. New. Hor. Phys* **3**, No. 2 (2016) 39-47.
- [4] N. Darestani Farahani; Ms.Thesis, *Measurement and optimization of X-ray emission from plasma focus device and its application in lithography and fast imaging*, (2010).
- [5] N. Darestani Farahani, F. Abbasi Davani, Z. Shahbazi; "X-Ray Measurement and Enhancement of SBUPF1 Plasma 0 Focus Device in Different Ar Pressures and Operating Voltages"; *Journal of Fusion Energy*, **30** No 6 (2011) 466-472.



طراحی و ساخت دستگاه لایه نشان چند منظوره جهت ارتقاء کیفیت لایه نازک در فرآیند لایه نشانی دورانی

لاچین، محمد حسین؛ بهمنی، کارا*

گروه مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

kara_bahmani@energy.sharif.edu and kara.bahmani1998@gmail.com

چکیده

در این مقاله دستگاه MPCM طراحی شده است که قادر به ترکیب دو روش لایه نشانی دورانی و رسوبدهی شیمیایی بخار را جهت افزایش کیفیت لایه است و با کنترل پارامترهای سرعت چرخش دیسک، فشار، دما، رطوبت و نوع گاز محفظه کیفیت لایه را به حد مطلوب برساند و همچنین از یک موتور جاروبرقی کلکتوری دو پروانه‌ای، یک پروانه ثابت و یک پروانه متحرک با توان بالا (۱۸۰۰ وات) برای مهار نمونه و همچنین ایجاد خلا و تعویض گاز محفظه استفاده شده است.

Design and fabrication of a multi-purpose thin-film deposition apparatus for enhancing the quality of thin-film in the spin coating process

Lachin, Mohammad Hosein; Bahmani, Kara*

Department of Nuclear Engineering, Sharif University of Technology, Tehran

Abstract

In this article, a device called MPCM has been designed to combine two methods of rotary deposition and chemical vapor deposition for enhancing the quality of layers. By controlling parameters such as disk rotation speed, pressure, temperature, humidity, and the type of gas in the chamber, the device is capable of achieving the desired layer quality. Additionally, a dual-blade collector vacuum cleaner motor, consisting of a stationary and a moving blade with high power (1800 watts), has been utilized to control the sample, create a vacuum, and replace the chamber gas.



مقدمه

روش های گوناگونی برای ساخت لایه های نازک وجود دارد که اساس کار آن ها بر مبنای یکی از دو روش فیزیکی و شیمیایی (و یا هر دو) استوار است و روش های اصلی لایه نشانی بر این اساس دسته بندی می شوند. در واقع بسته به کیفیت مورد نظر و شرایط لایه نازک از روش های مختلفی استفاده می شود [۱].

از کاربردهای مهم لایه های نازک می توان به نانوساختارها در ساخت ترانزیستورهای لایه نازک، تولید حسگرهای مختلف و سلول های خورشیدی اشاره کرد [۲]. یکی از اصلی ترین روش های ساخت لایه نازک، روش لایه نشانی دورانی است. این روش برای نشان دادن یک لایه نازک روی یک زیرلایه مسطح استفاده می شود و روش کار معمولاً بدین صورت است که مقدار کمی از ماده مورد نظر که در فاز مایع قرار دارد، بر روی مرکز زیرلایه ریخته می شود و با چرخش زیرلایه ماده مورد نظر با توجه به چگالی مشخصی که دارد، به وسیله نیروی گریز از مرکز بر روی زیرلایه پخش شود. معمولاً برای مهار نمونه مورد استفاده، پمپ خلا به کار می رود و در شرایطی که امکان ایجاد شرایط خلا در اطراف نمونه وجود داشته باشد [و یا اگر امکان تعویض هوای اطراف نمونه با ماده ای بی اثر وجود داشته باشد] لایه نشانی در شرایط ایده آلی انجام خواهد شد [۳]. بعد از انجام عمل لایه نشانی دورانی، معمولاً نمونه را در معرض حرارت قرار می دهند تا حلال ماده لایه نشانی شده تبخیر گردد. منبع این حرارت می تواند بسته به کاربرد از طریق المنت های حرارتی یا تابش فرابنفش تامین شود [۴]. یکی روش های مهم ساخت لایه نازک از طریق فرآیند شیمیایی، رسوب دهی شیمیایی بخار یا CVD است که در این روش سطح مورد لایه نشانی در معرض بخار مواد شیمیایی قرار می گیرد. در برخی موارد، در صورتی که روش های لایه نشانی دورانی و رسوب دهی شیمیایی بخار به صورت همزمان صورت گیرند، کیفیت لایه نازک بهبود می یابد [۵]. در این پژوهش، طراحی و ساخت دستگاه MPCM¹، صورت گرفته که با ترکیب دو روش لایه نشانی دورانی و

رسوب دهی شیمیایی بخار [و امکان تغییر در فشار و دمای گاز داخل محفظه نمونه] قادر به بهبود کیفیت لایه نازک است. همچنین در روش ایجاد شرایط خلا و مهار زیر لایه در هنگام دوران، نوآوری صورت گرفته است.

بدنه دستگاه

بدنه دستگاه MPCM از دو لایه پلیمری و فولادی تشکیل شده است که پلتفرم دستگاه بر روی لایه پلیمری سوار گردیده است. از فواید پلیمر در این دستگاه میتوان به نقش آن در دفع و استعلاک ارتعاش [و خصوصاً عایق صوتی] و تمایل محدود آن به واکنش پذیری با مواد مورد استفاده در امر لایه نشانی اشاره کرد.

محفظه ها

دو محفظه برای دستگاه MPCM طراحی شده است که هر کدام کاربرد بخصوص خود را دارد و نحوه قرار گرفتن آن ها به این صورت است که یک محفظه استوانه ای با جنس پلکسی گلاس به عنوان محفظه خلا یا محفظه گازی به کار می رود و مجموعه در محفظه ای بزرگتر با همان جنس قرار گرفته که محفظه دوم نقش جدا کننده سیستم از محیط اطراف ایفا می کند. در محفظه دوم سیستم های حرارتی و تابشی و همچنین سیستم قطره چکان، به روی ریل هایی سوار شده اند که هر مازول قابلیت جابه جایی در سه راستا را دارا می باشد.

سیستم وکیوم و انتقال گاز

در نمونه دستگاه های لایه نشانی طراحی شده، برای ایجاد خلا و مهار کردن نمونه هنگام لایه نشانی دورانی از پمپ های خلا که توسط شلنگ و شیر به دستگاه متصل می شوند بهره می گرفتند که معایبی از جمله هزینه های دستگاه وکیوم و استهلاک دستگاه را در پی دارند؛ اما در پژوهش حاضر از یک موتور جاروبرقی کلکتوری دو پروانه ای [یک پروانه ثابت و یک پروانه متحرک] با توان ۱۸۰۰ وات برای مهار نمونه و همچنین ایجاد شرایط خلا و تعویض گاز محفظه استفاده شده است. در واقع این طراحی به سبب استفاده چندگانه از یک سیستم مکش به مراتب ارزان قیمت تر از پمپ های وکیوم است و صرفه اقتصادی بیشتری در مقایسه با طرح موجود در بازار دارد. موتور مورد استفاده توانایی این را

¹ Multipurpose coating machine



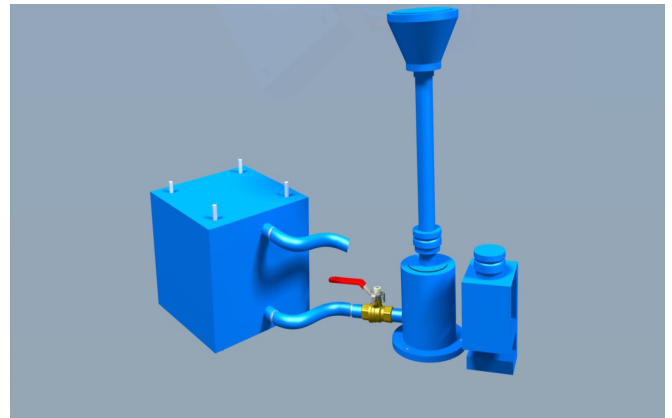
طراحی دیسک چرخان به شکلی صورت گرفته که با تاثیر بر روی رژیم جریان هوا، نیروی مکش را در مرکز دیسک به صورت بیشینه انتقال دهد؛ و از پلی اتیلن برای ساخت استفاده شده که در کنار چگالی نسبتاً پائین، واکنش پذیری ناچیزی با نمونه های مورد استفاده در لایه نشانی دارد. هندسه و ابعاد سیستم در شکل شماره (۱) آورده شده است [سیستم جریان گاز در این شکل نشان داده نشده است].

سیستم انتقال گشتاور

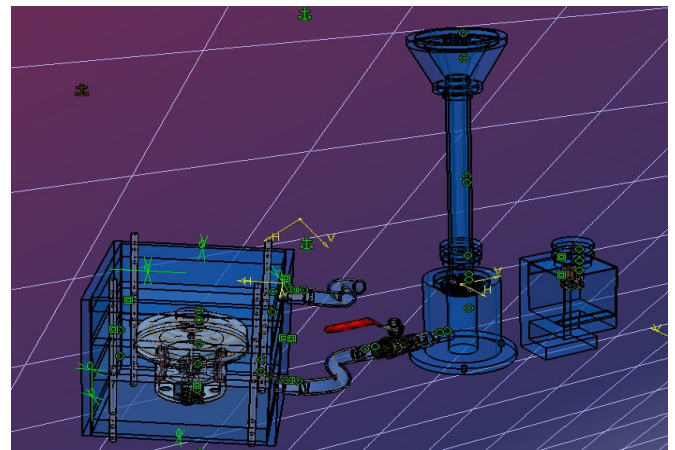
گشتاور مورد نیاز برای چرخش دیسک از یک موتور ۲۲۰ ولت

دارد که فشار محفظه را تا ۷۰۰ میلی متر جیوه کاهش داده که این شرایط برای مهار نمونه و همچنین ایجاد خلأ نسبی جوابگو می باشد. برای مهار موتور و ارتعاش ایجاد شده از یک محفظه پلیمری استفاده شده است که ارتعاش را تا حد زیادی دفع کرده و همچنین مانع انتقال هر گونه لرزش به محفظه و محیط بیرون می گردد.

یکی از چالش هایی که در سیستم های لایه نشانی گریز از مرکز وجود دارد، انتقال مکش هوا به دیسک چرخان است. یه این منظور برای انتقال فشار از یک محور توخالی که بر ۳ بلبرینگ سوار شده اند استفاده گردیده است. این بلبرینگ ها وظیفه مهار دیسک، محور و کاهش لنگی را برعهده دارند.



شکل ۲: تصاویری از نمونه ساخته شده از دستگاه MPCM.



شکل ۱: در شکل دیسک چرخان، محور، پولی ها، بلبرینگ، محفظه متصل به محور، موتور، نگهدارنده موتور، مغذی ها، شلنگ، شیر گازی، موتور جاروبرقی و محفظه نگهدارنده موتور جاروبرقی را مشاهده می کنید.



شیمیایی بخار را با یکدیگر ترکیب نموده و با کنترل پارامترهای سرعت چرخش دیسک، فشار، دما، رطوبت و نوع گاز محفظه کیفیت لایه را به حد مطلوب برساند. در شکل شماره (۲) تصویری از نمونه ساخته شده توسط نویسندگان مقاله حاضر را مشاهده می‌کنید.

مرجع‌ها

- [1] Kaiser, N., Review of the fundamentals of thin-film growth. Applied optics, 2002. 41(16): p. 3053-3060.
- [2] Seshan, K., Handbook of Thin Film Deposition. 2001: William Andrew.
- [3] Mustafa, H.A.M. and D.A. Jameel, Modeling and the main stages of spin coating process: A review. Journal of Applied Science and Technology Trends, 2021. 2(03): p. 91-95.
- [4] Yadav, J., et al., Studies on spin coated PANI/PMMA composite thin film: Effect of post-deposition heating. Applied Surface Science, 2008. 255(5): p. 2825-2829.
- [5] Siddheswaran, R., et al., Formation of carbon nanotube forest over spin-coated Fe₂O₃ reduced thin-film by chemical vapor deposition. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 2015. 23(5): p. 392-398.

DC با توان ۳۰۰ وات با دور موتور ۱۰.۰۰۰ دور بر دقیقه تامین می‌شود و این گشتاور به وسیله یک تسمه با جنس پلی اورتان به محور دیسک منتقل می‌شود.

سیستم حرارتی و تابشی

برای حرارت دادن نمونه در هنگام لایه نشانی و یا بعد از آن از یک المنت سرمایی ۱۲ ولت DC استفاده می‌شود که دما را حداکثر تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بالا می‌برد. به جهت تسهیل تبخیر حلال موجود در نمونه، می‌توان فشار داخل محفظه را کاهش داده و به طور هم زمان از المنت حرارتی جهت افزایش دما استفاده کرد؛ این عمل باعث کاهش زمان انتقال حرارت و عدم تخریب سطح ماده لایه نشانی شده می‌شود. در روش دیگر از لامپ UV جهت تابش دهی نمونه استفاده می‌شود که بسته به کاربرد، امکان ایجاد تغییرات گوناگونی بر روی لایه نشانداده شده را دارد.

حسگرها

برای کنترل دما و تشخیص میزان رطوبت محیط عوامل تاثیر گذار بر روی لایه نشانداده شده هستند از حسگر دمای DHT22 و از حسگر رطوبت DHT11 استفاده می‌شود. همچنین برای تشخیص میزان فشار محفظه از یک فشارسنج آنالوگ استفاده می‌شود که در بالای محفظه اولیه نصب شده است.

سیستم کنترلی

جهت کنترل سیستم های دستگاه، نظیر کنترل سرعت دیسک، ایجاد تغییرات دمایی، تنظیم میزان تابش اشعه فرابنفش و تنظیم میزان مکش از یک پردازشگر آردوینو مگا^۱ و یک صفحه نمایش رابط کاربری HMI جهت ارتباط کاربر با سیستم (دریافت فرمان و نمایش خروجی های سیستم نظیر دور موتور، دما و غیره) بهره گرفته شده است.

نتیجه گیری

دستگاه چند منظوره لایه نشانی طراحی شده (MPCM) در این پژوهش قادر است دو روش لایه نشانی دورانی و رسوبدهی

^۱ Arduino MEGA



مشخصه یابی اپتیکی و بهینه سازی لایه نازک نانوساختار FTO به روش

اسپری التراسونیک

داوری دولت آبادی، علیرضا؛ قریشی، سید محمد باقر؛ بهپور، محسن

پژوهشکده علوم و فناوری نانو دانشگاه کاشان

Alireza.davari1396@gmail.com

چکیده

امروزه به دلیل کاربردهای گسترده ای که لایه های شفاف و رسانا در زمینه های اپتوالکترونیک دارند، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته اند. در این پژوهش تلاش شده تا با استفاده از دستگاه اسپری التراسونیک و با چیدمان مناسب، پاشش یکنواخت به دست آید. ابتدا مقادیر بهینه حجم محلول، برای نمونه ای با ابعاد 7.5×2.5 میلی متر به دست آمد و سپس بهینه سازی غلظت محلول انجام شد. مقدار بهینه حجم محلول 6 الی 5 میلی لیتر برای نمونه هایی با ابعاد 15×15 میلی متر بدست آمد که نمونه تجربی با این مقدار ساخته شد. غلظت بهینه برای این نمونه 15٪ اسمی بدست آمد که شفافیت بالای 80٪ در طول موج 550 نانومتر و مقاومت سطحی $10 \Omega/\text{sq.}$ را از خود نشان داد. فاکتور شایستگی 0.043/٪ محاسبه شده است.

Optical characterization and optimization of FTO nanostructure thin layer by Ultrasonic spray method

Alireza, Davari Dolat Abadi; Ghorraishi, S. Mohamad Bagher; Behpour, Mohsen

Nano Science and Technology Research Institute, University of Kashan, kashan

Abstract

Nowadays, due to the wide applications that transparent and conductive layers have in optoelectric fields, they have attracted the attention of many researchers. In this research, an attempt has been made to achieve uniform spraying by using an ultrasonic spray device with a suitable arrangement. First, the optimal values of the volume of the solution were obtained for a sample with dimensions of 2.5×7.5 mm, and then the optimization of the solution concentration was done. The optimal value of the solution volume was 6 to 5 ml for samples with dimensions of 15×15 mm, and the experimental sample was made with this amount. The optimal concentration for this sample was 15% nominal, which showed transparency above 80% at a wavelength of 550 nm and a surface resistance of $10 \Omega/\text{sq.}$. The merit factor of 0.043 has been calculated.



مقدمه

اکسیدهای رسانای شفاف (TCOs) ترکیبات ویژه‌ای هستند که همزمان دو ویژگی منحصر به فرد الکتریکی و اپتیکی مناسب را در کنار یکدیگر از خود نشان می‌دهند. امروزه یک عنصر کلیدی و مهم برای سلول‌های خورشیدی و صفحات نمایش تخت، TCOها هستند [۱، ۲]. در دهه‌های گذشته کاربردی‌ترین و شناخته شده‌ترین TCOها عمدتاً از لایه‌های بر پایه ZnO ، SnO_2 و In_2O_3 ساخته شده‌اند. لایه‌های بر پایه اکسید قلع به علت رسانندگی مناسب، شفافیت بالا، سختی و پایداری شیمیایی خوب، گزینه مناسبی برای استفاده در الکترونیک نوری [۳] و پنجره‌های شفاف [۴] هستند. با وجود اینکه اکسید قلع یک منبع غنی قلع است، با توجه به نظریه نواری، نیم رسانای طبیعی SnO_2 رسانای الکتریکی نمی‌باشد اما با آلیاژ توسط موادی نظیر منگنز (Mn) [۵] تانتالیم (Ta) [۶] آنتیموان (Sb) [۷] و فلورین (F) [۸] می‌توان رسانندگی آن را بهبود داد.

در صنعت این لایه‌ها عمدتاً با روش‌های مبتنی بر خلا ساخته و تولید می‌شوند. لذا هزینه ساخت این لایه‌ها در ابعاد بزرگ بسیار زیاد می‌باشد. محققان برای حل این مشکل ساخت این لایه‌ها با استفاده از روش‌های مبتنی بر محلول را پیشنهاد داده‌اند. در این پژوهش ساخت اکسید قلع آلیاژ شده با فلورین ($SnO_2:F$) با روش اسپری التراسونیک مورد بررسی قرار گرفته است و ابتدا سعی شده تا چینه‌های مناسبی برای اجزای اسپری بدست آید. همچنین با تغییر متغیرهای محلول سازی غلظت آلیاژ شده مناسب بدست آمده است. همچنین با استفاده از گزارشات پیشین [۹] نمونه‌ای ساخته و نتایج با یکدیگر مقایسه شده است.

مبانی نظری و روش ساخت

ساخت نمونه‌های FTO در ابعاد ۱.۵ در ۱.۵ سانتی متر با استفاده از روش اسپری التراسونیک به عنوان زیرلایه انجام شد. برای لایه نشانی ابتدا بسترهای شیشه‌ای به ترتیب با آب و صابون، آب دیونیزه، استون و پروپانول هرکدام به مدت ۲۰

دقیقه در حمام فراصوت شستشو داده و سپس به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد در آون قرار داده شده تا کاملاً خشک شود. قبل از لایه نشانی زیرلایه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه تحت تابش UV قرار گرفتند.

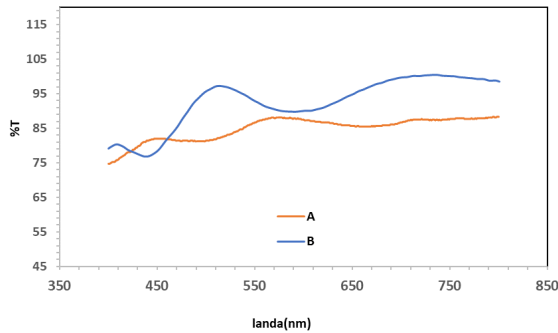
برای تهیه محلول SnO_2 از دونمک $SnCl_4 \cdot 5H_2O$ و $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ به عنوان منبع قلع می‌توان استفاده کرد. $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ به دلیل کدر و تیرگی و اینکه حلالیت کم در آب، مناسب نمی‌باشد. لذا در این پژوهش از نمک $SnCl_4 \cdot 5H_2O$ به عنوان پیش ماده Sn استفاده گردید. فلوراید آمونیوم (NH_4F) [۱۰] و هیدروفلوئوریک اسید (HF) [۱۱] می‌توانند به عنوان منابع فلئور مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به اینکه HF یک ماده سمی و خطرناک است و از طرفی NH_4F زیست سازگارتر و قابلیت حل شوندگی خوبی در اتانول دارد این ماده به عنوان پیش ماده تولید فلئور استفاده شده است؛ همچنین با افزودن مقداری آب می‌توان نرخ انحلال NH_4F را افزایش داد [۱۲].

ابتدا با استفاده از اتانول و نمک $SnCl_4 \cdot 5H_2O$ ۵۰ میلی لیتر محلول ۰/۱۶ مولار ساخته شد. سپس با توجه به توضیحات فوق فلوراید آمونیوم با غلظت ۰/۰۴ مولار (۱۵٪ اسمی) تهیه شد محلول‌های فوق در ویال پلاستیکی درب دار با استفاده از استیرر به مدت نیم ساعت همزده شد تا محلولی همگن به دست آید. سپس یک ساعت به محلول استراحت داده شد. صفحه داغ را بر روی ۴۴۰ درجه سانتیگراد تنظیم نموده و پس از بستن چیدمان دستگاه لایه نشانی انجام شد. ابتدا فاصله نازل با سطح مورد بررسی قرار گرفت و از ارتفاع ۳۲ سانتی متری تا ۵ سانتی متری بررسی شد و ارتفاع بهینه ۱۰ سانتی متر بدست آمد.

در روش اسپری فشار هوای خروجی یکی دیگر از متغیرهای مهم و تاثیر گذار می‌باشد. لذا در مرحله بعد با تغییر فشار هوای خروجی بهترین فشار ۰/۵ تا ۱ bar بدست آمد.

در هنگام ساخت لایه مطابق توضیحات فوق دو چالش کدر شدن زیر لایه و رنگین کمانی شدن لایه (که به ترتیب ناشی انباشت بیش از حد و عدم یکنواختی انباشت) وجود داشت که

$$X = \frac{n_f}{n_f + n_{sn}} \times 100 (X = 0-40\%)$$



شکل ۱: طیف عبور دو نمونه ساخته شده

برای مقایسه دو نمونه در شاخص های اپتیکی و الکتریکی بر اساس غلظت های مختلف و همچنین شاخص فاکتور شایستگی مشاهده می شود. مقاومت سطحی برای دو نمونه لایه نشانی شده به ترتیب ۱۷ و ۱۰ Ω/square است. همچنین مقاومت سطحی برای نمونه صنعتی ۱۰ Ω/square است. در ادامه جدول زیر را برای مقایسه دو نمونه در شاخص های اپتیکی و الکتریکی بر اساس غلظت های مختلف و مقایسه با نمونه صنعتی C و همچنین شاخص فاکتور شایستگی مشاهده می شود.

در ادامه تصاویری از سطح نمونه با میکروسکوپ نوری برای بررسی یکنواختی سطح با بزرگنمایی با مقیاس به ترتیب ۴۰،۴۰۰ و ۱۰۰۰ مشاهده می شود.

جدول ۱ شاخص های اپتیکی و الکتریکی بر اساس غلظت های مختلف

نمونه ها	غلظت محلول (درصد اسمی)	حجم محلول لایه نشانی (ml)	درصد عبور (در ۵۵۰ nm)	مقاومت سطحی (اهم بر مربع)	فاکتور شایستگی (اهم/۱)
A	۲۰	۲۰	۸۶	۱۷	۰/۰۱۳
B	15	۱۵	۹۲	۱۰	۰/۰۴۳
C	۲۰	۲۰	۸۶	۱۰	۰/۰۲۲

برای رفع آن از راهکار کاهش حجم محلول مورد استفاده و محرک کردن نازل استفاده شد.

در نهایت مقدار بهینه حجم محلول ۱۰ میلی لیتر مشخص شد با غلظت های مختلف فرایند انباشت و لایه نشانی انجام شد.

نمونه های ساخته شده از آنها آنالیز اپتیکی و الکتریکی گرفته شد. باتوجه به نوع نیاز دستگاه، رسانندگی الکتریکی و عبور اپتیکی الکترودهای شفاف به طور همزمان باید از یک مقدار حداقل بیشتر باشد. برای بررسی و مقایسه عملکرد رسانای شفاف یک فاکتور شایستگی تعریف می شود. هم اکنون، فاکتور شایستگی ϕ_{TC} که توسط هاکی تعریف شده به عنوان یک ابزار علمی مفید برای مقایسه عملکرد پوشش های رسانای شفاف، به صورت زیر تعریف می شود:

$$\phi_{TC} = \frac{T_{550}^{10}}{R_s} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن T_{550} عبور در طول موج $\lambda = 550 \text{ nm}$ و R_s مقاومت سطحی است.

بحث و نتایج

پس از آزمایش های متعدد به غلظت بهینه آلایش ۱۵ درصد اسمی نمونه مطلوب از نظر شفافیت با عبور بالای ۸۵٪ در طول موج ۵۵۰ nm حاصل شد و همچنین مقاومت سطحی $10 \Omega/\text{square}$ می باشد.

مقدار فاکتور شایستگی بهترین نمونه ۰/۰۴۳ می باشد.

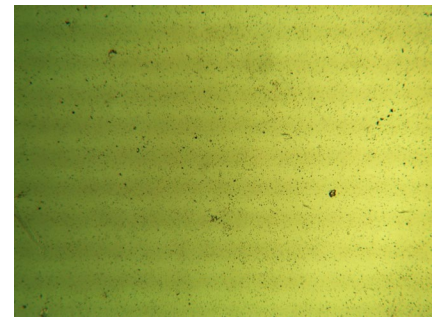
در ادامه با استفاده از دستگاه اسپری التراسونیک لایه نشانی با غلظت های مختلف به ترتیب لایه نشانی شد. نتایج الکتریکی و اپتیکی به شرح زیر است. همانطور که از شکل بالا مشاهده می شود درصد عبور در طول موج ۵۵۰ نانومتر به ترتیب برای لایه ها A, B و ۸۶ و ۹۲ درصد شد. همچنین عبور از یک نمونه صنعتی (C) بیشتر از ۸۶٪ را نشان می داد. در ادامه جدول زیر را



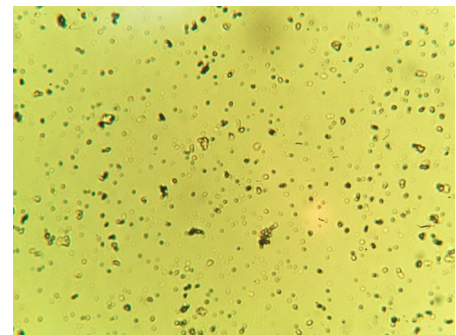
مشاهده شد که هرچند غلظت بهینه شده در گزارشات قبلی از شفافیت بهتری برخوردار است اما در مجموع رسانندگی و فاکتور شایستگی نتایج بهتری را از خود نشان می‌دهند. همچنین با نمونه صنعتی مطابقت خوبی دارد.

مرجع‌ها

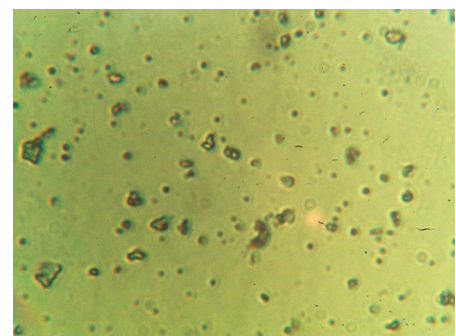
- [1] E. U. M. a. A.A. Yadav a, A.V. Moholkar b, K.Y. Rajpure b, C.H. Bhosale "Effect of quantity of spraying solution on the properties of spray deposited fluorine doped tin oxide thin films," *Physica B: Condensed Matter*, 2009, doi: 10.1016/j.physb.2009.03.006.
- [2] "Nanostructured transparent conducting oxides for advanced photovoltaic applications," 2014. [Online]. Available: <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/92884>.
- [3] D.-W. K. a. Amartya Chowdhury a, Masanobu Isshiki b, Takuji Oyama b, Hidefumi Odaka b, Porponth Sichanugrist a, Makoto Konagai "Effect of textured glass substrates coated with LPCVD-deposited SnO₂:F on amorphous silicon solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, doi: 10.1016/j.solmat.2015.04.003.
- [4] M. L. a. Q. Gao a, X. Li a, Y. Liu a, C.L. Song a, J.X. Wang a, Q.Y. Liu b, J.B. Liu b, G.R. Han, "Microstructural and functional stability of large-scale SnO₂:F thin film with micro-nano structure," *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, doi: 10.1016/j.jallcom.2012.09.116.
- [5] V. R. K. Anandan, "Influence of dopant concentrations (Mn = 1, 2 and 3 mol %) on the structural, magnetic and optical properties and photocatalytic activities of SnO₂ nanoparticles synthesized via the simple precipitation process," 2015, doi: 10.1016/j.spmi.2015.05.031.
- [6] G. Turgut, "Effect of Ta doping on the characteristic features of spray-coated SnO₂," 2015, doi: 10.1016/j.tsf.2015.10.011.
- [7] S. Y. Wenhao Yang, Yang Zhang, Weifeng Zhang, "Properties of Sb-doped SnO₂ transparent conductive thin films deposited by radio-frequency magnetron sputtering," 2013, doi: 10.1016/j.tsf.2013.06.077.
- [8] S. K. H. b. Adel H. Omran Alkhayatt a, "Fluorine highly doped nanocrystalline SnO₂ thin films prepared by SPD technique," *Materials Letters*, 2015, doi: 10.1016/j.matlet.2015.04.130.
- [9] Y. Li *et al.*, "Reflective perovskite solar cells for efficient tandem applications," *Journal of Materials Chemistry C*, 10.1039/C6TC04510C vol. 5, no. 1, pp. 134-139, 2017, doi: 10.1039/C6TC04510C.
- [10] Hossein Sojoudi, † Srinivasa Kartik Nemani, † Kaitlyn M. Mullin, ‡ Matthew G. Wilson, ‡ and H. L. Hamad Aladwani, § and Karen K. Gleason, "Micro-/Nanoscale Approach for Studying Scale Formation and Developing Scale-Resistant Surfaces," 2019, doi: 10.1021/acsami.8b18523.
- [11] L. C. M. G. Gordillo, W. de la Cruz, P. Teheran, "Preparation and characterization of SnO₂ thin films deposited by spray pyrolysis from SnCl₂ and SnCl₄ precursors," 1994, doi: 10.1016/0040-6090(94)90826-5.
- [12] A. T. A. Mashreghi, "Dependence of Photovoltaic Properties of Spray-Pyrolyzed F-Doped SnO₂ Thin Film on Spray Solution Preparation Method," 2019, doi: 10.1007/s11664-019-07622-8.



بزرگنمایی ۴۰X



بزرگنمایی ۴۰۰X



بزرگنمایی ۱۰۰۰X

شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ نوری در مقیاس‌های متفاوت

همانطور که مشاهده شد نتایج نمونه B از نمونه A بهتر است و دلایل آن هم برطرف شدن مشکلات در پاشش یکنواخت و یکنواختی سطح و رفع تیرگی و کدر شدن و حالت رنگین کمان شدن و در نتیجه غلظت مناسب و بهینه است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش حجم محلول و فاصله پاشش بهینه سازی شد و غلظت‌های مختلف لایه نشانی شد و نتایج بدست آمده برای ابعاد کوچک ۱.۵ در ۱.۵ سانتی متر مقادیر بهتری از خود نشان داد. همچنین در مقایسه نمونه بهینه سازی شده با گزارشات قبلی



تأثیر پارامترهای روش لایه‌نشانی با زاویه خراشان (GLAD) در عملکرد کلیدهای مقاومتی

رسولی اردلانی، ابوالفضل؛ خادمی، علی، مشفق، علیرضا

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، خیابان آزادی، تهران

moshfegh@sharif.edu

چکیده

کلیدهای مقاومتی به سبب پیشرفت‌های چشمگیر خود به عنوان حافظه‌های نوظهور برای عملیاتی نمودن معماری‌های غیر ون نویمن یا همان ذخیره‌سازی و محاسبات روی داده‌ها در یک مکان در سال‌های اخیر به میزان قابل توجهی نظر محققین را به خود جلب نموده‌اند. علی‌رغم این پیشرفت‌ها همچنان چالش‌هایی با برجا مانده است و راهکارهای متعددی نیز مرتباً در حال توسعه یافتن هستند. یکی از چنین تلاش‌های نوین، استفاده از روش لایه‌نشانی با جهت‌گیری زاویه‌ای خاص بستر لایه‌نشانی نسبت به شار بخار ماده هدف لایه‌نشانی در محفظه‌های خلأ است که موسوم به لایه‌نشانی با زاویه خراشان است. این روش ساخت که قادر است تنوع گسترده‌ای از نانوساختارها از نظر هندسه و تخلخل ایجاد نماید، توانسته است بخشی از محققین حوزه کلیدهای مقاومتی را به استفاده از این قابلیت‌ها در جهت رفع موانع در سر راه صنعتی‌سازی نهایی و گسترده حافظه‌های مقاومتی ترغیب نماید. در این مقاله، سعی می‌شود به چگونگی اثرگذاری پارامترهای روش GLAD روی شاخص‌های عملکردی مختلف کلیدهای مقاومتی از جمله ولتاژ (و انرژی) کلیدزنی، دوام کلیدزنی، ماندگاری حالت‌های مقاومتی، امکان کلیدزنی تدریجی چندترازی (آنولوگ)، خطی بودن پاسخ الکتریکی نسبت به پالس ولتاژ خارجی مثبت و منفی، میزان تصادفی بودن کلیدزنی، چگالی و پنجره حافظه و همچنین نسبت جریان روشن به خاموش پرداخته شود.

Effect of Glancing Angle Deposition Parameters in Performance of Resistive Switches

Rasouli Ardalani, Abolfazl; Khademi, Ali; Moshfegh, Alireza

Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran

Abstract

Resistive switches have drawn markable attention to themselves owing to their striking advances as emerging memories capable of realizing non-von Neumann architectures, i.e. carrying out data storage and processing within the same element. Notwithstanding the advancements, some challenges have still persisted and numerous attempts to propose viable solutions are continually being developed. One such new effort is to utilize the vacuum-based deposition method, known as Glancing Angle Deposition (GLAD), in which the substrate is tilted with respect to the incident vapor flux of the target material. Being a formidable method of producing a broad diversity of nanostructures from the viewpoint of morphology and porosity, GLAD has convinced part of the resistive switch community to employ the mentioned capabilities towards removing obstacles to the ultimate widespread industrialization of resistive switches. In this paper, we try to elucidate how GLAD can affect the performance metrics of resistive switches, for instance switching voltage (and energy), endurance, state retention, multilevel analog switching, linearity, stochasticity, memory density, memory window and I_{on}/I_{off} ratio.

PACS No 07.30.-t



مقدمه

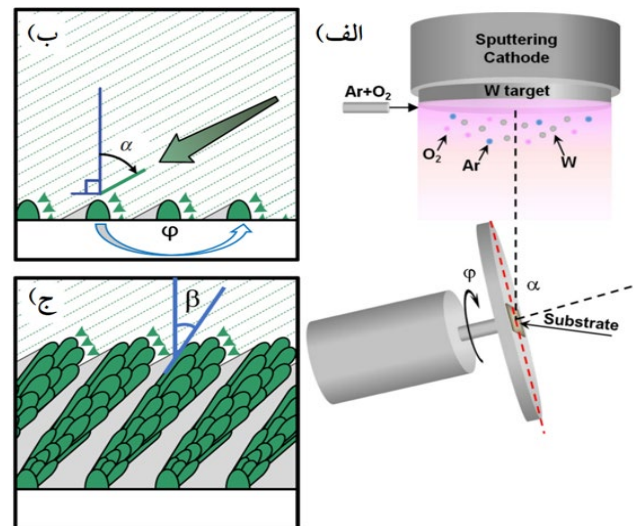
(مثلاً ولتاژ الکتریکی) به صورت برگشت پذیر گذار نمایند. این ادوات بر حسب سازوکار کلیدزنی دارای دسته بندی مشخص هستند که برای آشنایی خواننده به مرجع [۶] ارجاع داده می شود.

تأثیر پارامترهای GLAD در عملکرد کلیدهای

مقاومتی

براساس بررسی های انجام شده، ورود لایه نشانی با زاویه خراشان در زمینه کلیدهای مقاومتی از سال ۲۰۱۳ میلادی آغاز شده است و تاکنون تنها ۱۴ عدد مقاله را به ثبت رسانده است (شکل ۲ الف). اثرات مثبتی که با این روش به سود عملکرد کلید مقاومتی به ارمغان آمده است، در نمودار شکل ۲ ب به طور خلاصه درج شده است. بر طبق نتایج تحقیقات گزارش شده مشخص گردید که بزرگی زاویه خراشان و سرعت دوران بستر تأثیر بسزایی در عملکرد کلیدهای مقاومتی دارند. جزئیات برخی از مقالات منتشر شده سال های اخیر در جدول ۱ ارائه شده است که در ادامه نتایج آن ها مرور می شود. پژوهشگرانی با ایجاد پوشش به روش لایه نشانی با زاویه خراشان روی نانومیمه های از قبل تهیه شده سبب افزایش ابعاد نانومیمه نوعی بکاهند و در پی آن کاهش ولتاژ کلیدزنی رخ دهد [۷]. پژوهشگران دیگر لایه نشانی با زاویه خراشان را به عنوان روش جایگزین برای لیتوگرافی جهت ایجاد ابعاد عرضی به کوچکی nm ۱۰۰ پیشنهاد داده اند. این در حالی است که با روش لیتوگرافی نوری کوچکترین ابعاد عرضی محقق شده $1 \mu\text{m}$ بوده است [۸]. بدین ترتیب دست کم روی کاغذ می توان با این روش جایگزین چگالی حافظه 1 GB/cm^2 را متصور شد [۹]. در راستای کاهش ابعاد، سایر پژوهشگران رشد به روش لایه نشانی با زاویه خراشان نانوذرات با ابعاد در بازه تنها ۸ nm را به عنوان جزئی از لایه کلیدزن گزارش داده اند [۱۰]. محققین دیگری از لایه نشانی با زاویه خراشان برای ساخت پشته عمودی نانوسیم های از جنس دو اکسید متفاوت استفاده نموده اند تا بتوانند افزون بر محدود سازی ابعاد کانال های رسانا در حین کلیدزنی، از آثار مثبت پشته مواد با جنس مختلف نیز بهره گیرند [۱۱]. محققانی با لایه نشانی لایه نازک یا نانوستون-

در ابتدا لایه نشانی با زاویه خراشان مبتنی بر خلاء برای رشد نانوساختارها معرفی می شود. پس از ایجاد شار بخار ماده هدف لایه نشانی مثلاً به روش کندوپاش از نوع واکنشی (به مانند شکل ۱ الف [۱]) یا غیرواکنشی [۲] می توان با تنظیم سمت گیری زاویه ای بستر لایه نشانی نسبت به راستای فرود شار بخار (α) و همچنین زاویه سمتی بستر (ϕ)، امکان تنظیم سمت گیری زاویه ای نانوساختارهای شکل گرفته نسبت به راستای عمود بر بستر (β) را مهیا نمود [۳] (بر طبق شکل ۱ ب، ج [۴]). وقتی زاویه سمتی تندتر با زمان تغییر نماید، شار بخار از تمام زوایا روی بستر فرود می آید و نانوساختار ساختاری شبیه تر به لایه نازک پیدا می کند [۵]. یکی از کاربردهای روش لایه نشانی با زاویه خراشان، کلیدهای مقاومتی هستند. این کلیدها ادواتی هستند که منحنی جریان بر حسب ولتاژ آنها دارای رفتار پسماند است و می توانند دست کم بین دو حالت کم-مقاومت و زیاد-مقاومت با اعمال تحریک خارجی



شکل ۱: الف) هندسه روش لایه نشانی کندوپاش واکنشی در روش GLAD برای یک مثال نوعی از ماده هدف تنگستن در حضور گاز آرگون جهت تشکیل پلازما و گاز اکسیژن در جهت لایه نشانی تنگستن اکسید [۱]. ب) و ج) به ترتیب نشانگر تحول زمانی مراحل لایه نشانی یعنی هسته زایی و رشد به همراه زاویه میل بستر نسبت به شار بخار (α)، زاویه سمتی بستر (ϕ) و نهایتاً زاویه راستای رشد نانوساختارها نسبت به راستای عمود بر سطح بستر (β) است [۴].



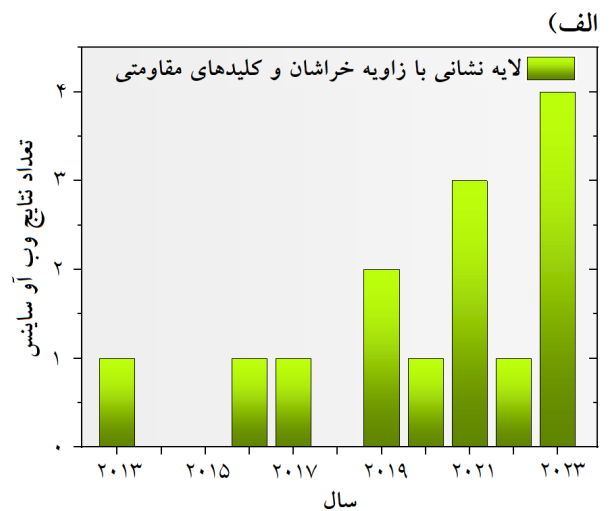
لایه‌نشانی زاویه خراشان آرایه نانوغنبد در نقش لایه سدکننده به تسهیل در تقلید عملکرد سیناپس مغزی دست یافته‌اند. دلیل اصلی این دستاورد محدود شدن محل تشکیل کانال‌های رسانا به ابعاد ۱۰-۱۲ nm و در نتیجه جلوگیری از رشد بیش از اندازه آن‌ها و هم‌چنین تقویت میدان الکتریکی اعمالی در نوک آن‌ها است [۱۴]. دیگر محققین، با لایه‌نشانی با زاویه خراشان نانومیله سیلیکون اکسید روی بسترهای به ابعاد "۴، تقلید عملکرد عصب مغزی را تسهیل داده‌اند.

علت آن است که در طی عملیات الکترومهاجرت الکتروودبالا نانوشکاف‌هایی دارای توزیع ابعاد تصادفی ایجاد می‌گردد که این خود ریشه در توزیع قطر تصادفی نانومیله‌ها دارد و منجر به تصادفی تر شدن کلیدزنی می‌شود. هرچه زاویه خراشان بیشتر شود، مقدار الکتروود میان هر دو نانومیله نوعی به خاطر تخلخل بیشتر، افزایش می‌یابد (شکل ۳ الف و ب [۱۵]) و در نتیجه الکترومهاجرت الکتروود و تبدیل فاز سیلیکون اکسید به سیلیکون در لبه نانوشکاف‌ها سخت‌تر می‌شود (شکل ۳ ج [۱۵]).

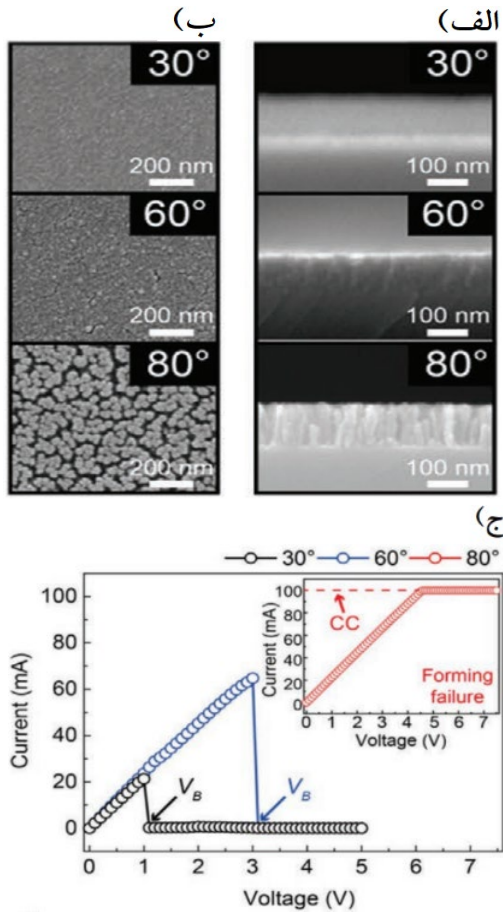
نتیجه‌گیری

بر طبق پژوهش‌های انجام گرفته تا به اکنون، عمده‌ترین فوایدی که روش لایه‌نشانی با زاویه خراشان می‌تواند برای عملکرد کلیدهای مقاومتی داشته باشد عبارت‌اند از: ۱- دستیابی به ابعاد عرضی پایین برای افزایش چگالی حافظه ۲- جلوگیری از رشد مازاد کانال‌های رسانا برای ممانعت از گیرافتادن در حالت روشن ۳- کمک به تقویت میدان الکتریکی اعمالی جهت کاهش مصرف انرژی کلیدزنی ۴- افزایش کارآمدی عملیات‌های مختلف پس از لایه‌نشانی اصلی (از جمله گرمایی، الکترومهاجرت و غیره) به سبب افزایش سطح مؤثر در راستای بهبود شاخص‌های عملکردی.

های وانادیوم اکسید به روش زاویه خراشان نشان داده‌اند به سبب افزایش سطح مؤثر و تخلخل، می‌توان عملیات پخت در جو هوا را در راستای کاهش دمای گذار فلز-عایق بهینه نمود. این موضوع نشانگر انرژی کلیدزنی پایین‌تر است [۱۲]. سایر پژوهشگران از لایه‌نشانی نانوستون‌های لایه کلیدزن با زاویه خراشان برای افزایش جذر میانگین مربعی زبری سطحی و رشد ابعاد بلورک‌ها در راستای بهبود عملکرد کلید مقاومتی بهره گرفته‌اند [۱۳]. محققین دیگر، با



شکل ۲: الف) نتایج جست و جوی مقالات انجام شده بر اساس پایگاه مقاله‌یاب Web of Science در تاریخ ۱۸ آبان ۱۴۰۲ با درج کلیدواژه‌های مربوط به کلیدهای مقاومتی و روش GLAD در بخش Topic. ب) منافع مستقیم و/یا غیرمستقیم روش GLAD برای کلیدهای مقاومتی.



شکل ۳: الف) و ب) به ترتیب تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمای جانبی و از بالای نانومیل‌های سیلیکون اکسید تهیه شده با زاویه میل بستر 30° ، 60° و 80° (ج) نمودار عملیات الکترومهاجرت برای الکتروودبالای این نانومیل‌ها [۱۵].

جدول ۱: مشخصات ساختار کلید مقاومتی، لایه ساخته شده با روش GLAD، نقش آن، روش ایجاد بخار ماده هدف و مراجع مربوطه.

مرجع	لایه ساخته شده با روش GLAD، نقش آن و روش تولید بخار ماده هدف لایه‌نشانی	ساختار کلید مقاومتی (از راست به چپ الکتروودپایین/لایه کلیدزن (و لایه سد)/الکتروودبالا)
[۷]	آرایه نانومیله Au-Cr یا Au-Au لایه کلیدزن تبخیر گرمایی	Ag/Au-Cr or Au-Au@PDMS/PDMS
[۹]	آرایه نانوستون α -NPD لایه کلیدزن تصعید	Au/ α -NPD/Ag α -NPD; 4,4-bis[N-(1-naphthyl)-N-phenyl-amino]diphenyl
[۱۰]	نانوذرات Gd: HfO ₂ لایه کلیدزن (به همراه SiO _x) تبخیر گرمایی	Ag/Gd: HfO ₂ /SiO _x / Cu
[۱۱]	نانوسیم In ₂ O ₃ /نانوسیم TiO ₂ لایه کلیدزن دو جزئی تبخیر پرتو الکترونی	Ag/In ₂ O ₃ /TiO ₂ /TiO ₂ TF/p-Si TF; Thin Film
[۱۲]	نانوستون‌ها یا لایه نازک VO ₂ لایه کلیدزن کندوپاش مغناطیسی با جریان مستقیم	---/VO ₂ /Glass
[۱۳]	نانوستون‌های WO ₃ لایه کلیدزن کندوپاش مغناطیسی با بسامد رادیویی	Au/WO ₃ /ITO
[۱۴]	آرایه نانوکند Al ₂ O ₃ لایه سد تبخیر گرمایی	Pt/HfO ₂ /Al ₂ O ₃ /TiN
[۱۵]	نانومیل‌های SiO _x لایه کلیدزن تبخیر پرتو الکترونی	Au/SiO _x /Pt

مرجع‌ها

- [۳] A. Barranco, A. Borrás, A. R. Gonzalez-Elipe, and A. Palmero; "Perspectives on oblique angle deposition of thin films: From fundamentals to devices"; *Progress in Materials Science* **76**, (2016) 59-153.
- [۴] Matthew M. Hawkeye, Michael T. Taschuk and Michael J. Brett; "Glancing Angle Deposition of Thin Films Engineering the Nanoscale"; 1st edition, John Wiley & Sons, Ltd. (2014) 1-2
- [۵] A. Bayat, M. Ebrahimi, and A. Z. Moshfegh; "Correlation between surface roughness and hydrophobicity of GLAD RF sputtered PTFE/W/Glass nanorod thin films"; *Vacuum* **101**, (2014) 279-282.
- [۶] Z. R. Wang *et al.*; "Resistive switching materials for information processing"; *Nature Reviews Materials* **5**, No. 3 (2020) 173-195.
- [۷] P. P. Pillai, K. Paclawski, J. Kim, and B. A. Grzybowski; "Nanostructural Anisotropy Underlies Anisotropic Electrical Bistability"; *Advanced Materials* **25**, No. 11 (2013) 1623-1628.

- [۱] M. Horprathum *et al.*; "NO₂-sensing properties of WO₃ nanorods prepared by glancing angle DC magnetron sputtering"; *Sensors and Actuators B: Chemical* **176**, (2013) 685-691.
- [۲] A. Z. Moshfegh and O. Akhavan; "Retardation of Ta silicidation by bias sputtering in Cu/Ta/Si(111) thin films"; *Journal of Physics D: Applied Physics* **34**, No. 14 (2001) 2103.



- fabrication of energy-efficient VO₂-based smart coatings”; *Solar Energy Materials and Solar Cells* **254**, (2023) 112253.
- [۱۳] S. Lamichhane, S. Sharma, M. Tomar, and A. Chowdhuri; “Effect of variation in glancing angle deposition on resistive switching property of WO₃ thin films for RRAM devices”; *Journal of Applied Physics* **132**, No. 13 (2022) 134102.
- [۱۴] Y. C. Shen *et al.*; “Geometric Design of Confined Conducting Filaments in Resistive Random Access Memory by Al₂O₃ Nanodome-Shaped Arrays (NDSAs) via Glancing-Angle Deposition Technology Toward Neuromorphic Computing”; *ACS Materials Letters* **3**, No. 12 (2021) 1757-1766.
- [۱۵] S. Choi, G. S. Kim, J. Yang, H. E. Cho, C. Y. Kang, and G. N. Wang; “Controllable SiO_x Nanorod Memristive Neuron for Probabilistic Bayesian Inference”; *Advanced Materials* **34**, No. 1 (2022) 2104598.
- [۸] S. Park *et al.*; “RRAM-based synapse for neuromorphic system with pattern recognition function”; *2012 International Electron Devices Meeting*, (2012) 10.2.1-10.2.4.
- [۹] G. Ligorio, M. V. Nardi, and N. Koch; “Lithography-Free Miniaturization of Resistive Nonvolatile Memory Devices to the 100 nm Scale by Glancing Angle Deposition”; *Nano Letters* **17**, No. 2 (2017) 1149-1153.
- [۱۰] S. Chakrabarty, S. Acharjee, A. Al-Shidaifat, M. Biswas, and H. Song; “Gd-Doped HfO₂ Memristor Device, Evaluation Robustness by Image Noise Cancellation and Edge Detection Filter for Neuromorphic Computing”; *IEEE Access* **7**, (2019) 157922-157932.
- [۱۱] P. Pooja and P. Chinnamuthu; “Improved Capacitive Memory in Glancing Angle Electron-Beam Synthesized Isotropic Bilayer n-TiO₂/In₂O₃ Nanowires Array”; *IEEE Transactions on Nanotechnology* **22**, (2023) 70-75.
- [۱۲] A. J. Santos, N. Martin, J. Outón, E. Blanco, R. García, and F. M. Morales; “Towards the optimization of a simple route for the



تأثیر تعداد پره ها و زوایای آنها بر عملکرد یک پمپ توربومولکولی تک مرحله ای به روش ذره آزمایشی مونت کارلو

حسین زاده سرشگی، مریم؛ ابراهیمی، رضا

دانشگاه هوافضا دانشگاه خواجه نصیرطوسی، انتهای بزرگراه زین الدین، تهران

m.hosseinzadeh@kntu.ac.ir and rebrahimi@kntu.ac.ir

چکیده

پمپ های توربومولکولی برای دستیابی و حفظ محیط های خلا بالا استفاده می شوند که برای پمپاژ طیف گسترده ای از گازهای سبک مانند هیدروژن تا گازهای سنگین تر مانند آرگون طراحی شده اند. سرعت پمپاژ بستگی به وزن مولکولی گاز پمپاژ شده دارد. بنابراین عملکرد این پمپ ها در گازهای سنگین بهتر از گازهای سبک می باشد. بنابراین بهینه سازی هندسه پره پمپ می تواند به بهبود عملکرد پمپاژ به ویژه برای گازهای سبک کمک کند. استراتژی های پیشنهادی شامل تنظیم زاویه پره، تعداد پره ها و غیره است. زاویه پره باید برای انتقال مومنتوم کارآمد بین گازهای سبک به سنگین بهینه شود. بنابراین در این مطالعه تاثیر زاویه پره و تعداد پره بر عملکرد پمپ توربومولکولار که با گاز هیدروژن کار می کند مورد بررسی قرار گرفته است.

Effect of the number of blades and their angles on the performance of a Single-stage Turbomolecular Pump by the test-particle Monte Carlo method

Hosseinzadeh Sereshgi, Maryam; Ebrahimi, Reza

Department of aerospace, University of K. N. Toosi University of Technology, Tehran,

Abstract

Turbomolecular pumps are used to achieve and maintain high vacuum environments. They are designed to pump gases ranging from light gases such as hydrogen to heavier gases such as argon. The pumping speed is related to the molecular weight of the pumped gas. Therefore, the performance of these pumps is better for heavy gases than for light gases. Optimizing the vane geometry can help improve pumping performance, especially for light gases. Suggested strategies include adjusting blade location, number of blades, etc. The blade angle must be optimized for efficient momentum transfer between light and heavy gases. In this study, the effects of blade angle and number of blades on the performance of a turbomolecular pump operating with hydrogen gas have been investigated.



مقدمه

میدان جریان و حرکت مولکول‌های گاز در داخل پمپ تقسیم کردند. آنها شبیه‌سازی را به روش ذره آزمون مونت کارلو انجام دادند. چن و همکارانش [۱۳] از یک روش بهینه‌سازی ترکیبی مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان (SVR) و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای به دست آوردن پارامترهای ساختاری پره روتور برای بالاترین سرعت پمپاژ و حداکثر نسبت تراکم استفاده کردند. پمپ‌های توربومولکولی برای پمپاژ طیف گسترده‌ای از گازهای سبک مانند هیدروژن تا گازهای سنگین تر مانند آرگون طراحی شده‌اند. سرعت پمپاژ بستگی به وزن مولکولی گاز پمپاژ شده دارد. این به این دلیل است که پمپ‌های توربومولکولی بر انتقال تکانه از پره‌های روتور که به سرعت در حال چرخش هستند به مولکول‌های گاز متکی هستند. این انتقال تکانه برای گازهای با وزن مولکولی بالاتر موثرتر است. بنابراین بهینه‌سازی هندسه پره پمپ می‌تواند به بهبود عملکرد پمپاژ به ویژه برای گازهای سبک کمک کند. استراتژی‌های پیشنهادی شامل تنظیم زاویه پره، تعداد پره‌ها و غیره است. زاویه پره باید برای انتقال مومنتوم کارآمد گازهای سبک بهینه شود. پره‌های استاتور نیز در عکس با پره‌های روتور زاویه دارند. زوایای بهینه پره استاتور به هدایت مجدد مولکول‌های منعکس شده و حفظ جهت پمپاژ مطلوب کمک می‌کند. در نظر گرفتن عملکرد گاز سبک در کاربردهایی مانند پوشش خلاء، ساخت نیمه هادی، طیف سنجی جرمی و غیره که شامل پمپاژ مخلوط گسترده‌ای از گازها است، مهم است. هندسه پره‌های بهینه برای طیف وسیعی از گازها به پمپ توربومولکولی اجازه می‌دهد تا به عملکرد و تطبیق پذیری بالا در کاربردهای مختلف شامل گونه‌های مختلف گاز دست یابد. بنابراین در این مطالعه، برای بررسی تاثیر هندسه بر عملکرد گاز هیدروژن با ثابت قرار دادن طول پره، در تعداد پره ۲۴ زوایای ۲۰ تا ۶۰ درجه بررسی شده است و در زاویه ۴۵ درجه تعداد پره ۱۲، ۲۴، ۳۶ و ۴۸ با هم مقایسه شده‌اند. همانطور که می‌دانید افزایش سرعت نیز بر افزایش عملکرد گازهای سبک موثر است اما بدلیل محدودیت‌های سازه‌ای سرعت بحرانی برای پمپ تعیین می‌شود تا از خرابی زود هنگام یاتاق‌ها و افزایش ارتعاشات سازه پمپ

پمپ‌های توربومولکولی در رژیم جریان مولکولی کار می‌کنند و به طور گسترده برای دستیابی و حفظ محیط‌های خلاء بالا استفاده می‌شوند [۱]. آنها با انتقال تکانه به مولکول‌های گاز از طریق پره‌های روتور دوار با سرعت بالا، ذرات را از محفظه خلاء دور می‌کنند [۲]. عملکرد به عوامل طراحی و خواص گاز بستگی دارد. گازهای سبک تر مانند هیدروژن و هلیوم در مقایسه با گازهای سنگین تر مانند آرگون عملکرد پایین تری دارند [۳]. در پمپ‌های توربومولکولی نسبت تراکم و سرعت پمپاژ به مقادیر پارامترهای هندسی به ویژه زاویه پره بستگی دارد [۴]. آملی و همکاران [۵]، توپولوژی واقعی سه بعدی طبقات، از جمله ضخامت پره، فاصله بین نوک پره و دیوار، فاصله بین روتور و استاتور را در نظر گرفته و عملکرد پمپ توربومولکولار خاصی را در قالب نسبت فشار حداکثر و بیشترین سرعت پمپاژ با روش تست ذرات مونت کارلو ارائه نمودند. شمس و همکارانش [۶]، شبیه‌سازی سه بعدی جریان مولکولی داخل یک ردیف از پره پمپ توربومولکولار با استفاده از روش ذره آزمون مونت کارلو برای مقایسه عملکرد پمپاژ پره‌های گوه‌شکل و پره‌های موازی انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که روش دقت بالایی دارد. روش تست ذرات مونت کارلو برخوردهای بین مولکولی را در نظر نمی‌گیرد بنابراین موجب می‌شود که جریان را با یک تلاش محاسباتی متوسط شبیه‌سازی کنیم. این روش علاوه بر دو منبع بالا در منابع [۷]، [۸]، [۹]، [۱۰] و [۱۱] مورد استفاده قرار گرفته است. شپیرو [۱۲] چندین طبقه پمپ توربومولکولار (دوبعدی) را در طیف وسیعی از گازهای سبک که رژیم‌های مولکولی آزاد، انتقالی و هیدرودینامیکی را پوشش می‌دهد، شبیه‌سازی کرده است. او با استفاده از شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو عملکرد را در این سه رژیم بررسی کرده است. لی و همکارانش [۹] سه مدل محاسباتی مختلف (دوبعدی، سه بعدی ایده آل، سه بعدی واقعی) در ناحیه جریان مولکولی به کمک روش مونت کارلو و ذره آزمون مونت کارلو شبیه‌سازی کردند. سان و همکارانش [۱۱] یک ردیف روتور و استاتور را به شش ناحیه برای مطالعه ویژگی‌های



گاز حرکت می کنند، این نیاز برآورده نمی شود. برای غلبه بر این محدودیت، از رویکرد مونت کارلو یا ذره آزمایشی مونت کارلو در شبیه سازی استفاده شده است. روش سنتی مونت کارلو در شبیه سازی پمپ توربومولکولی معمولاً شامل ردیابی تک تک مولکول های گاز و برخورد آنها با پره های روتور است. با این حال، ذرات آزمایشی مونت کارلو را می توان به عنوان یک رویکرد جایگزین استفاده کرد. به جای شبیه سازی مولکول های گاز منفرد، ذرات آزمایشی گروه هایی از مولکول ها را با ویژگی های آماری معادل نشان می دهند. این ذرات آزمایشی برای تخمین رفتار کلی جریان گاز بدون ردیابی صریح مسیر مولکول های منفرد استفاده می شوند. استفاده از ذرات آزمایشی مونت کارلو می تواند از نظر محاسباتی در مقایسه با شبیه سازی مولکول های فردی کارآمدتر باشد، به ویژه برای سیستم های در مقیاس بزرگ. این امکان شبیه سازی تعداد بیشتری از ذرات با کاهش منابع محاسباتی را فراهم می کند. بنابراین از حلگر ردیابی ذرات ریاضی استفاده شده است.

شبیه سازی ذره آزمون مونت کارلو

شاخص های اصلی ارزیابی عملکرد یک پمپ توربومولکولار، سرعت پمپاژ و نسبت فشار است. معادله ۱ حداکثر نسبت فشار را نشان می دهد. (این مقدار زمانی بدست می آید که خالص جریان عبوری از پمپ صفر باشد)

$$(K_{\max})_{w=0} = \frac{M_{12}}{M_{21}} \quad (1)$$

روش شبیه سازی ذره آزمون مونت کارلو بر خلاف فرمولاسیون جریان پیوسته، رفتار سیال را در سطوح میکروسکوپی مورد بررسی قرار می دهد. در این روش، فرض بر این است که هر دو طرف ورودی و خروجی یک ردیف روتور و استاتور دارای فضاهای بسیار بزرگ هستند و در این فضاها مولکول ها دارای توزیع سرعت ماکسولی هستند. در این شبیه سازی، ابتدا گروهی از مولکول ها انتخاب شده، سپس مسیر حرکت هر کدام از آن ها در

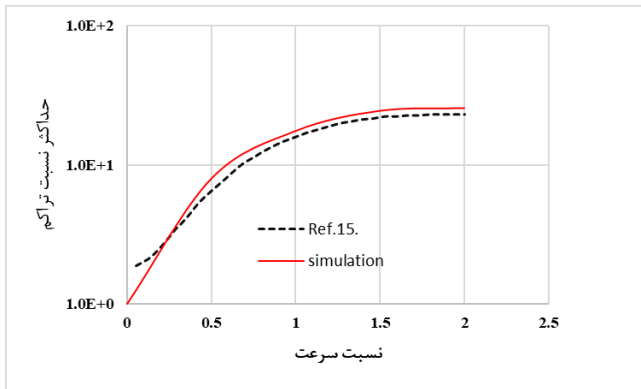
جلوگیری به عمل بیاد در این شبیه سازی سرعت دورانی را ده هزار رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

تئوری مدل

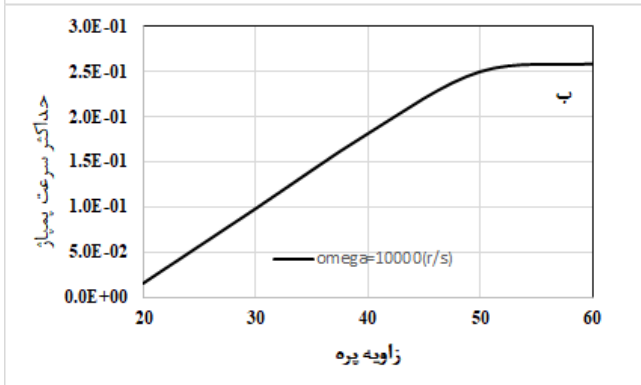
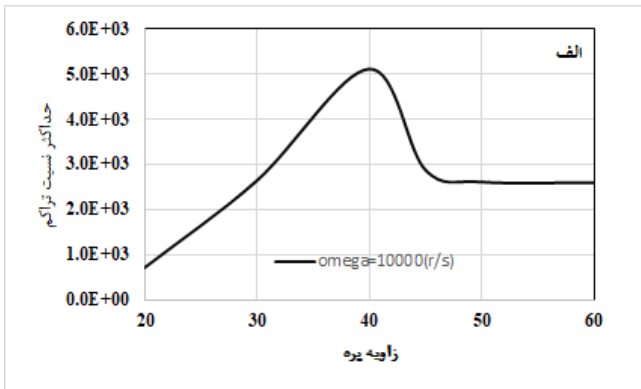
پمپ های توربومولکولی از پره های روتور با چرخش سریع برای انتقال حرکت به مولکول های گاز استفاده می کنند. با ورود گاز به داخل ورودی، روتور که تعدادی پره زاویه دار دارد به مولکول ها برخورد کرده و انرژی مکانیکی به مولکول های گازی منتقل خواهد شد و این انرژی مولکول های گازی وارد سوراخ های انتقال گاز در استاتور می شوند. این فرآیند باعث می شود که مولکول های گاز مجدداً با سطح روتور برخورد کرده و با ادامه این روند در نهایت از طریق خروجی پمپ توربومولکولار به بیرون هدایت می شوند. در هر مرحله یک فشرده سازی بر روی گاز انجام می شود و در انتها فشار به محدوده ای می رسد (خلأ متوسط و پایین) که توسط پمپ پشتیبان قابل تخلیه باشد. در این شبیه سازی جریان مولکولی آزاد حاکم است، جایی که برخوردهای بین مولکولی در مقایسه با برخورد مولکول-دیوار ناچیز است. این چندین فرض ساده را امکان پذیر می کند:

- برخوردهای بین مولکولی ناچیز است، بنابراین مولکول های گاز به طور مستقل حرکت می کنند.
- توزیع سرعت گاز از توزیع ماکسول برای گاز ایده آل در دمای ثابت پیروی می کند.
- مولکول های گاز در اثر برخورد با پره های روتور، به دنبال توزیع کسینوس (قانون لامبرت)، تحت پراکندگی دیفیوژن قرار می گیرند.

در زمینه ارزیابی عملکرد پمپ توربومولکولی از نرم افزار کامسول استفاده شده است، برای حل مولکولی در این نرم افزار معمولاً از ماژول جریان مولکولی استفاده می شود. با این حال، باید توجه داشت که این ماژول بر روش ضریب زاویه ای متکی است، که تنها زمانی قابل اجرا است که مولکول ها یا اتم ها بسیار سریعتر از هر جسمی در هندسه مدل حرکت کنند. برای توربومولکول ها، که در آن پره ها در مقیاس های زمانی مشابه خود مولکول های



شکل 2: نمودار اعتبارسنجی



شکل 3: تغییرات الف) حداکثر نسبت تراکم، ب) حداکثر سرعت پمپاژ، برحسب تغییرات زاویه پره های روتور و استاتور

نتایج

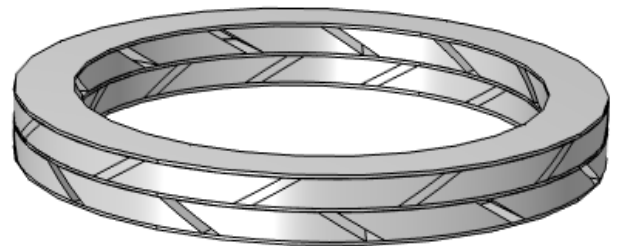
یک ردیف روتور و استاتور که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است، با تعداد پره ۲۴ عدد در زوایایی ۲۰ تا ۶۰ درجه شبیه سازی شده است. در شکل ۳ نمودار حداکثر نسبت تراکم و حداکثر سرعت پمپاژ نشان داده شده است.

دامنه محاسباتی تعقیب می شود. همچنین، تعداد مولکول هایی که از فضای ۱ (ورودی روتور) به فضای ۲ (خروجی استاتور) می روند شمارش می شود. در واقع، نسبت این مولکول ها به تعداد کل مولکول های ورودی، بیانگر احتمال انتقال اتم های گاز از ورودی به خروجی خواهد بود (پارامتر M_{12} در معادله ۱). افزون بر آن، تعداد مولکول هایی که از فضای ۲ به ۱ می روند شمارش می شوند. نسبت این مولکول ها به کل مولکول هایی که از خروجی وارد شدند، را احتمال انتقال گاز از خروجی به ورودی می نامند (پارامتر M_{21} در معادله ۱). همچنین، W سرعت پمپاژ بی بعد است، که تعداد خالص مولکول های عبوری از فضای ۱ به فضای ۲ را نشان می دهد. این سرعت از رابطه ۲ بدست می آید [14]:

$$(W_{\max})_{p_1=p_2} = M_{12} - M_{21} \quad (2)$$

اعتبارسنجی

پمپ توربومولکولار مورد بررسی شامل یک ردیف روتور و استاتور است. که در شکل ۱ مشاهده می کنید. اعتبارسنجی با هندسه مرجع [15] انجام شده است که اطلاعات هندسه آن در جدول ۱ آورده شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود، نتایج تطابق خوبی با داده های مقاله مرجع [15] نشان می دهد. گاز مورد بررسی در این اعتبارسنجی نیتروژن است.



شکل 1: یک ردیف روتور و یک ردیف استاتور از پمپ توربومولکولار



جدول ۱: هندسه مسئله

پارامترهای هندسه	ذره آزمون مونت کارلو (میلیمتر)
شعاع نوک پره (r_{tip})	۹۰ میلیمتر
شعاع ریشه پره (r_{root})	۷۲ میلیمتر
تعداد پره	۳۶
زاویه پره	۲۰
لقی	۰.۳ میلیمتر
ضخامت پره	۳.۱ میلیمتر
طول پره	۸ میلیمتر

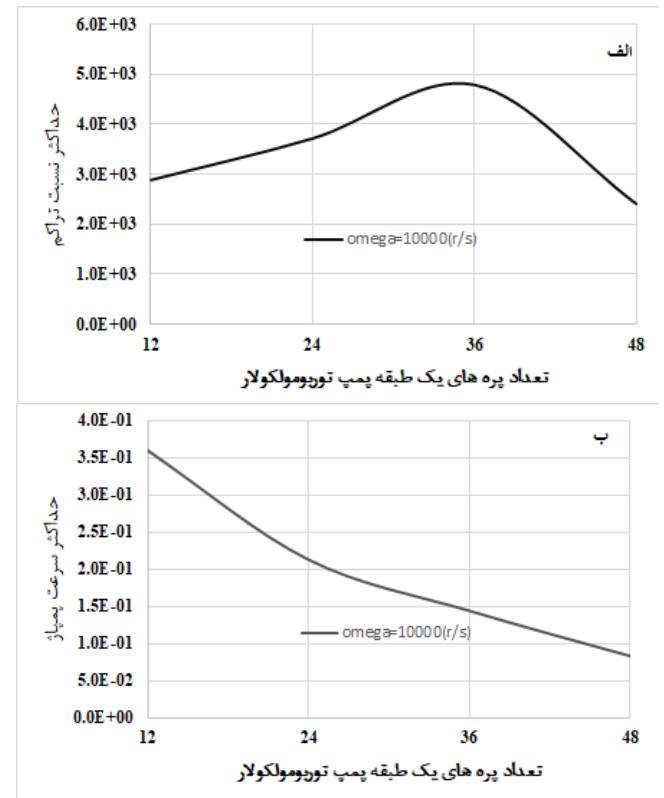
بیشترین حداکثر نسبت تراکم را یک طبقه پمپ در ۳۶ پره مشاهده شده است و بیشترین حداکثر سرعت پمپاژ در یک طبقه ۱۲ پره مشاهده می شود.

نتیجه گیری

عملکرد پمپ توربومولکولار یک طبقه، احتمال انتقال مولکول‌هایی که از کانال پره در دو جهت جریان مخالف عبور می کنند با روش ذره آزمون مونت کارلو محاسبه شد. شبیه سازی در یک قاب اینرسی انجام شده است. نتایج محاسبات به خوبی با داده های مرجع ۱۵ در جریان مولکولی مطابقت دارد. همانطور که از شکل های ۳ و ۴ مشاهده می کنید تغییرات هندسه پمپ تاثیر زیادی بر روی عملکرد پمپ توربومولکولار دارد و با یکسری تغییرات می توان عملکرد گاز سبک را نیز افزایش داد. البته بهترین عملکرد حداکثر سرعت پمپاژ و حداکثر نسبت تراکم در یک زاویه و تعداد پره رخ نمی دهد. بنابراین طراح یک پمپ می تواند با توجه به نیاز پمپ (سرعت پمپاژ بالا، نسبت تراکم بالا یا اینکه هر دو عملکرد بالا باشد و در نظر گرفتند محدودیت های سازه و بلبرینگ پمپ) سرعت دورانی مناسب را انتخاب کند.

مرجع ها

- [1] J. Heo and Y. Hwang, "DSMC calculations of blade rows of a turbomolecular pump in the molecular and transition flow regions," Vacuum, vol. 56, pp. 133–142, 2000.
- [2] H. W. . Ninokata, "Numerical Simulation of 3D Flow in Turbomolecular Pump by Direct Simulation Monte Carlo Method," FEDSM2005 2005 ASME Fluids Eng. Div. Summer Meet. Houston, TX, USA, pp. 19–23.
- [3] A. Chew, B. Brewster, I. Olsen, and S. Ormrod, "Improvements in the performance of turbomolecular pumps: Beyond the molecular range," Vak. Forsch. und Prax., vol. 23, no. 3, pp. 14–18, 2011, doi: 10.1002/vipr.201100458.
- [4] A. G. Antoniou, C. N. Panos, E. S. Valamontes, and S. E. Valamontes, "The turbomolecular pump in molecular state," Vacuum, vol. 46, no. 7, pp. 709–715, 1995.
- [5] S. M. H. A. Amoli, R. Ebrahimi, "Some features of molecular flow in a rotor–stator row with real topology," Vacuum, pp. 427–438, 2003.
- [6] M. Shams, H. Sheykhzadeh, and M. Taghavi, "Mathematical simulation of free molecular flow in a three-dimensional turbomolecular pump with nonparallel blades," J. Dispers. Sci. Technol., vol. 31, no. 3, pp. 299–306, 2010.
- [7] Y. Li, X. Chen, Y. Jia, M. Liu, and Z. Wang, "A New Modeling Method to Reveal Pumping Mechanism of Turbomolecular Pump," J. Vac. Sci. Technol. A, vol. 101, pp. 337–344, 2014.
- [8] Y. K. Hwang, "A numerical study of the performance of a turbomolecular pump," KSME Int. J., vol. 11, no. 1, pp. 77–87, 1997, doi: 10.1007/BF02945228.



شکل ۴: تغییرات الف) حداکثر نسبت تراکم، ب) حداکثر سرعت پمپاژ، برحسب تغییرات تعداد پره های روتور و استاتور

همانطور که از شکل ۳ مشاهده می کنید بیشترین حداکثر نسبت تراکم در زاویه ۴۰ درجه وجود دارد اما زاویه های ۵۰ تا ۶۰ درجه در حداکثر سرعت پمپاژ بهترین عملکرد را دارند. در شکل ۴ در زاویه پره ۴۵ درجه و طول پره ۸ میلیمتر تعداد پره های از ۱۲ تا ۴۸ پره تغییر داده شده است.



- [12] F. Sharipov, "Numerical simulation of turbomolecular pump over a wide range of gas rarefaction," *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 1312, 2010..
- [13] Z. Chen, W. Wang, Z. Li, and H. Yan, "Modeling and Optimization of the Blade Structural Parameters for a Turbomolecular Pump," 2023.
- [14] T. Tuer, G. Springer, "A Test Particle Monte Carlo Method," 1973.
- [15] K. Sun, S. Zhang, F. Han, et al. "A New Modeling Method to Reveal Pumping Mechanism of Turbomolecular Pump," *Journal of Applied Fluid Mechanics*. vol.165, 2021.
- [9] Y. Li, X. Chen, Y. Jia, M. Liu, and Z. Wang, "Numerical investigation of three turbomolecular pump models in the free molecular flow range," *Vacuum*, vol. 101, pp. 337–344, 2014, doi: 10.1016/j.vacuum.2013.10.002.
- [10] S. M. Hosseinalipour, R. Ebrahimi, and A. Amoli, "A New Procedure for Designing Blade Arrangements of a Turbomolecular Pump," *Rarefied gas Dyn. 24 Int.*, pp. 186–192, 2005.
- [11] K. Sun, S. W. Zhang, F. Han, F. Zhao, Z. J. Zhang, and J. Han, "A New Modeling Method to Reveal Pumping Mechanism of Turbomolecular Pump," vol. 14, no. 1, pp. 165–173, 2021.



بررسی اثر شدت میدان مغناطیسی بر رسوب انرژی حاصل از برخورد الکترون‌های گریزان با لیمیتور توکامک دماوند

عطایی سرشت، لاله^۱؛ عبدی، محمد رضا^۱؛ پورشهاب، بنفشه^۲؛ رسولی، چاپار^۲

^۱ دانشکده فیزیک دانشگاه اصفهان، خیابان هزار جریب، اصفهان

^۲ پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران

lataei@aeoi.org.ir

چکیده

یکی از مهمترین چالش‌هایی که توکامک‌ها خصوصاً توکامک‌های کان‌یدای راکتور مانند ایت‌ر و دمو با آن مواجه هستند، برهم‌کنش پلاسما با دیواره توکامک است. یکی از مواردی که سبب نگرانی عمده در مورد عملکرد درست و ایمن توکامک به عنوان راکتور می‌گردد الکترون‌های گریزان هستند. الکترون‌های گریزان می‌توانند در طی فاز شروع، در تخلیه‌های اهمیت در چگالی‌های پایین و در فاز فرونشانی جریان در گسیختگی‌ها تولید گردند اما خطرناک‌ترین حالت مربوط به حالتی است که الکترون‌های گریزان در گسیختگی تولید می‌شوند. در این تحقیق، اثر تغییر شدت میدان مغناطیسی بر روی رسوب انرژی ناشی از الکترون‌های گریزان روی لیمیتور استیل ضد زنگ توکامک دماوند مورد بررسی قرار گرفته است. طی شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، طیف الکترون تابشی با انرژی متوسط MeV $1/666$ ، با میدان‌های مغناطیسی مختلف به هدف از جنس فولاد ضد زنگ برخورد کرده و رسوب انرژی در هدف به ازای هر ذره بدست آمد. مشخص گردید میزان رسوب انرژی حاصل از هر الکترون در دیواره لیمیتور توکامک دماوند، با افزایش میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. واژه‌های کلیدی: الکترون‌های گریزان، رسوب انرژی، میدان مغناطیسی، لیمیتور توکامک، استیل ضد زنگ

Investigating the effect of magnetic field intensity on the energy deposition resulting from collision of runaway electrons with Damavand tokamak limiter

Ataeiseresht, Laleh^{1,2}; Abdi, Mohamadreza¹; Pourshahab Banafsheh²; Rasuli, Chapar²

¹ Department of Physics, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran

Abstract

One of the most important challenges faced by tokamaks, especially reactor candidate tokamaks such as ITER and DEMO, is the interaction of plasma with the tokamak wall. One of the issues that causes a major concern about the correct and safe operation of a tokamak as a reactor is the runaway electrons. Runaway electrons could be produced during the start phase, in Ohmic discharges at low densities and in the phase of current quench in disruptions, but the most dangerous state is related to the disruptions. In this research, the effect of variation of magnetic field intensity on the energy deposition caused by runaway electrons on the stainless-steel limiter of Damavand tokamak is investigated. During the simulations, the electron radiation spectrum with an average energy of 1.666 MeV hit the stainless-steel target with different magnetic fields and the energy deposition in the target is obtained for each particle. It finds that the amount of energy deposited from each electron in the limiter of Damavand tokamak, increases with the increase of the magnetic field.

Keywords: runaway electrons, energy deposition, magnetic field, Tokamak limiter, stainless steel



مقدمه

یکی از مهمترین چالش‌هایی که توکامک‌ها خصوصاً توکامک‌های کاندیدای راکتور مانند ایترو و دمو با آن مواجه هستند، برهم‌کنش پلاسما با دیواره توکامک است. یکی از مواردی که سبب نگرانی عمده در مورد عملکرد درست و ایمن توکامک به عنوان راکتور می‌گردد الکترون‌های گریزان هستند [۲۱].

در پلاسماهای توکامک، الکترون‌های گریزان می‌تواند در طی فاز شروع^۱، در تخلیه‌های اهمیت در چگالی‌های پایین و در فاز فرونشانی جریان^۲ در گسیختگی‌ها تولید گردد اما خطرناک‌ترین حالت مربوط به حالتی است که الکترون‌های گریزان در گسیختگی تولید می‌شود [۳ و ۴]. در گسیختگی در فاز فرونشانی جریان، یک میدان الکتریکی حلقوی بسیار قوی تولید می‌شود و این میدان به الکترون‌ها نیرو وارد می‌کند. در این حالت الکترون‌های زمینه پلاسما در اثر نیروی وارد از طرف میدان شتاب گرفته و به انرژی‌های بالا و به سرعت‌هایی در حد سرعت‌های نسبی می‌رسند در این حالت الکترون‌ها تابع توزیع را ترک کرده و از این رو به الکترون‌های گریزان نامیده می‌گردند. این مکانیسم تحت عنوان مکانیسم دریسر معروف است [۵ و ۶]. الکترون‌های گریزان تولید شده به دیواره پلاسما برخورد کرده و انرژی خود را به صورت جایگزیده تخلیه می‌نمایند و به دنبال آن سبب آسیب دیدگی دیواره می‌گردند که عموماً با توجه به موارد مشاهده شده سبب ذوب شدگی، خوردگی، ایجاد نقص‌ها و حفره‌ها در دیواره و شکست اجزای مجاور با پلاسما می‌گردند [۷ و ۸]. این پدیده در توکامک‌های بزرگ که کاندید انجام واکنش‌های گداخت هستند مانند ایترو و دمو خطرناک‌تر است زیرا در این توکامک‌ها دلیل جریان بالای پلاسما، حجم جریان الکترون‌های گریزان تولید شده نیز بالا خواهد بود و بالطبع، آثار تخریبی حاصل از آن نیز به همان نسبت بر روی اجزای مجاور با پلاسما بیشتر خواهد بود [۹].

همچنین در اثر برهم‌کنش این الکترون‌ها با دیواره اجزای مجاور با پلاسما، فوتون‌های بسیار پرانرژی تولید شده که سبب ایجاد پدیده

فوتون‌های نوترون از طریق واکنش‌های مستقیم گاما و هسته می‌گردد و تولید نوترون می‌کند و این نوترون‌ها می‌تواند باعث فعال سازی اجزای مجاور به پلاسما و قطعات دیواره گردند [۱۰].

بنابراین لزوم مطالعه آثار تخریب الکترون‌های گریزان بر روی اجزای مجاور به پلاسما شامل دیواره اول و دایورتور از جمله مهمترین مسائلی است که در رابطه با طراحی توکامک‌های بزرگی مانند ایترو مطرح است. یکی از مهمترین اجزایی که در معرض این برخوردها قرار دارد محدودکننده است که به منظور برش لبه پلاسما و حفظ فاصله آن از دیواره و در نتیجه کنترل ناخالصی‌ها، در داخل محفظه خلأ توکامک‌ها نصب می‌گردد. در این مقاله ما اثر میدان الکتریکی بر روی طیف رسوب انرژی ناشی از الکترون‌های گریزان و انرژی ناشی از هر ذره الکترون در یک هدف که نمونه ای از اجزای مجاور با پلاسما است را در توکامک دماوند، با استفاده از شبیه سازی با کد مونت کارلوی جینت^۳، مورد بررسی و تحلیل قرار داده‌ایم.

روش کار

به منظور بررسی اثر میدان الکتریکی بر رسوب الکترون‌های گریزان در هدف با استفاده از شبیه‌سازی، فرض نموده‌ایم که یک باریکه متشکل از طیف الکترون که در واقع همان طیف الکترون‌های گریزان توکامک دماوند است به یک هدف برخورد می‌کند. توکامک دماوند یک توکامک در رده توکامک‌های کوچک سایز با سطح مقطع D شکل است که به دلیل عملکرد ایمن در رژیم الکترون‌های گریزان می‌تواند به خوبی برای بررسی آثار این الکترون‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۱۱]. برای بدست آوردن طیف الکترون‌های گریزان متعلق به توکامک دماوند با استفاده از روشی که در منبع [۱۲] ذکر شده با استفاده از طیف تابش ایکس سخت ساطع شده از توکامک دماوند، طیف الکترون‌های گریزان تخمین زده شده است که متوسط انرژی الکترون $1/666$ مگا الکترون ولت در نظر گرفته شده است. این طیف الکترونی در شکل ۱ نشان داده شده است. جنس هدف از فولاد ضد زنگ انتخاب شده است که با جنس لیمپتر توکامک دماوند مطابقت دارد. فرض شده است که

- 1 . Start-up phase
- 2 . Current quench phase

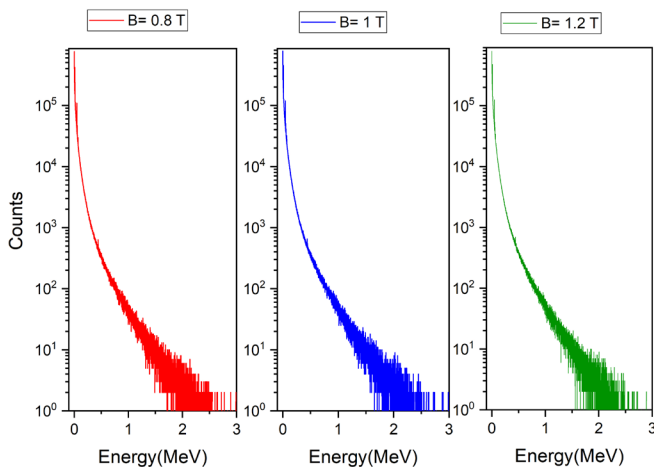


نتایج و بحث

با انجام شبیه‌سازی با استفاده از کد مونت کارلو، با تغییر میدان مغناطیسی به مقادیر 0.8 T ، 1 T و 1.2 T ، طیف رسوب انرژی و همچنین انرژی رسوب یافته به ازای هر ذره در تارگت از جنس فولاد ضدزنگ را بدست آوردیم. طیف رسوب انرژی در واقع میزان انرژی‌های رسوب یافته در هدف از لحظه شروع برخورد الکترون با هدف تا لحظه سکون آن، به ازای یک میلیون الکترون برخوردی را شمارش کرده و این فراوانی را نشان می‌دهد. طیف رسوب انرژی برای این سه حالت میدان مغناطیسی در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، طیف رسوب انرژی، یک طیف پیوسته است.

می‌توان از شکل ۲ مشاهده کرد که فراوانی رسوب انرژی‌های کمتر از یک مگا الکترون ولت بسیار بیشتر از فراوانی انرژی‌های بیش از این مقدار است. در واقع فراوانی مقادیر انرژی بین ۲ تا ۳ مگا الکترون ولت در تمام طول واکنش برخورد، بین ۱ تا ۱۰ است.

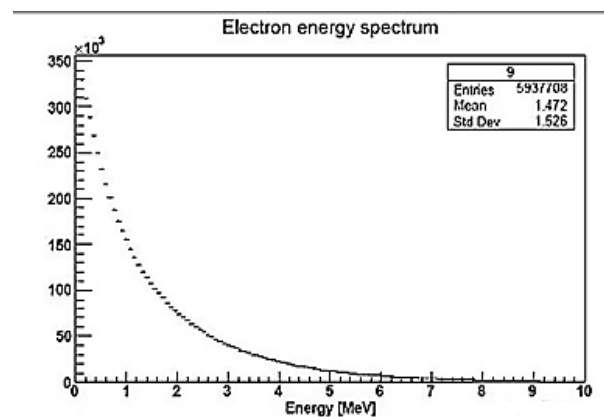
به منظور مشاهده بهتر اثر میدان مغناطیسی روی میزان رسوب انرژی ذره الکترون، انرژی رسوب یافته در هدف از جنس فولاد ضدزنگ به ازای هر الکترون در جدول ۱ برای سه حالت میدان مغناطیسی اعمال شده نشان داده شده است. همچنین برای درک بهتر، این مقادیر به صورت نمودار در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۲. طیف رسوب انرژی الکترون با انرژی متوسط 1.666 MeV در هدف از جنس استیل ضد زنگ به ازای یک میلیون ذره برای سه مقدار میدان مغناطیسی 0.8 T ، 1 T و 1.2 T .

باریکه طیف تابشی الکترون با زاویه 90° درجه نسبت به سطح هدف یا به صورت مماس بر سطح هدف (زاویه دو درجه نسبت به سطح) برخورد می‌کند. ابعاد هدف از جنس فولاد ضد زنگ با طول و عرض 4 سانتی‌متر و ضخامت 2 میلی‌متر انتخاب شده است. برای انجام این شبیه‌سازی از کد مونت کارلوی جینت ۴ استفاده گردیده است. جینت ۴ یک برنامه مونت کارلو است که برای شبیه‌سازی ردیاب‌های فیزیک با انرژی بالا در سرن ۴ استفاده می‌شود. بسته به رژیم انرژی که در آن شبیه‌سازی‌ها انجام می‌شود، جینت ۴ چندین مدل را در قالب فهرست فیزیک ارائه می‌دهد که شامل فرآیندهای فیزیکی مورد نیاز است. در این شبیه‌سازی فرآیندهای تبدیل گاما، پراکندگی چندگانه، تابش ترمزی، یونیزاسیون، پراکندگی کامپتون و فوتوالکتریک در نظر گرفته شده‌اند زیرا در برهم کنش الکترون در این محدوده انرژی با فلز فولاد ضد زنگ، واکنش‌های اساسی که سبب رسوب انرژی می‌گردند این واکنش‌ها هستند.

همچنین تعداد ذرات برخوردی یک میلیون ذره در نظر گرفته شده است. محاسبات رسوب انرژی برای میدان‌های 0.8 T ، 1 T و 1.2 T انجام گردیده است تا بتوان اثر میدان مغناطیسی را بر میزان رسوب انرژی الکترون در تارگت بررسی نمود. همچنین زاویه میدان مغناطیسی نسبت به سطح به صورت مماس (2° درجه نسبت به سطح) در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. طیف تابشی الکترون‌های گریزان در توکامک دماوند.



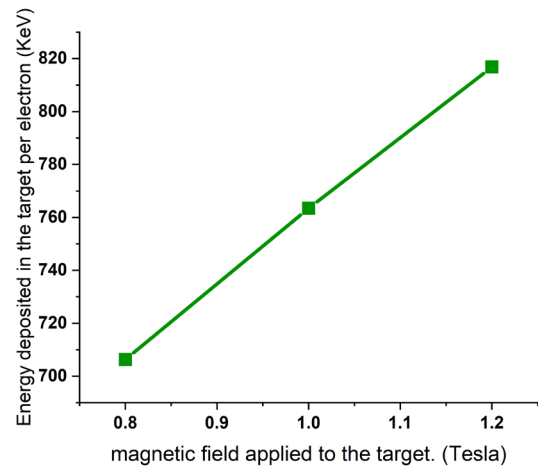
جدول ۱: انرژی رسوب یافته از هر ذره با انرژی متوسط $1/666 \text{ MeV}$ که تحت میدان های مغناطیسی مختلف به هدف از جنس استیل ضدزنگ برخورد می کند.

انرژی رسوب یافته در هدف به ازای هر الکترون (keV)	میدان مغناطیسی اعمال شده هدف (T تسلا)
۷۰۶/۳۴	۰/۸
۷۶۳/۴۵۸	۱
۸۱۰/۸۱۶	۱/۲

همچنین با توجه به شکل ۳ و جدول ۱، میزان رسوب انرژی ناشی از هر الکترون گریزان در هدف از جنس فولاد ضد زنگ که نمونه ای از دیواره لیمیت توکامک دماوند است، با افزایش میدان مغناطیسی افزایش خواهد یافت.

مرجع ها

- [1]. Genco, F., Hassanein, A., Simulation of damage to tokamaks plasma facing components during intense abnormal power deposition, *Fusion Engineering and Design*, 89, 335-341, (2014).
- [2]. V. Sizyuk, A. Hassanein, New proposed ITER divertor design using carbon insert on tungsten to mitigate ELMs and secondary radiation effects on nearby components, *Scientific Reports*, 12, 4698 (2022).
- [3]. Ansh, P., Santosh P., "Simulation of runaway electron generation in fusion grade tokamak and suppression by impurity injection", *PSSI-Plasma Scholars Colloquium*, 8, 1-5, (2021).
- [4]. Pourshahab, B., Sadighzadeh, A., Abdi, M. R., Rasouli, C., "Study of Runaway Electrons Using the Conditional Average Sampling Method in the Damavand Tokamak", *Plasma Physics Report*, Volume. 43, Pages 280-288, (2017).
- [5]. Pustovitov V. D., Rubinacci G., and Villone F. "On the computation of the disruption forces in tokamaks". *Nuclear Fusion*, Volume. 57, Page 126038, (2017).
- [6]. R. J. E. Jaspers, "Relativistic runaway electrons in tokamak plasmas", *Ph.D. thesis*, Department of Applied Physics, Eindhoven University of Technology, Germany, (1995).
- [7]. Bolt, H., Miyahara, A., Miyake, M., & Yamamoto, T., "Simulation of tokamak runaway electron events. *Journal of Nuclear Materials*", 151(1), 48-54, (1987).
- [8]. H. Bolt, et al., "Analysis of interaction of disruption induced Runaway Electrons with Plasma Facing Components components in next generation tokamaks", *J. Nucl. Sci. Technol.* 28, No. 9, 806-813, (1991).
- [9]. Hassanein, A., Sizyuk, T., Ulrickson, M., Vertical displacement events: A serious concern in future ITER operation, *Fusion Engineering and Design* 83, 1020-1024, (2008).
- [10]. Bartels H.-W. "Impact of runaway electrons "; *Fusion Engineering and Design*, volume 23, pages 323-328, (1993).
- [11]. Pourshahab, B., Sadighzadeh, A., Abdi, M. R., Rasouli, C., "Study of Runaway Electrons Using the Conditional Average Sampling Method in the Damavand Tokamak", *Plasma Physics Report*, Volume. 43, Pages 280-288, (2017).
- [12]. C. Rasouli, D. Iraj, A. H. Farahbod, K. Akhtari, H. Rasouli, H. Modarresi, and M. Lamehi, "Runaway electron energy measurement using hard x-ray spectroscopy in "Damavand" tokamak", *Review of Scientific Instruments*, Volume 80, 013503 (2009).
- [13]. 31. Kunugi, T., Effects of runaway electrons on plasma facing components, *Fusion Engineering and Design*, Volume 23, 329-339, (1993).



شکل ۳: نمودار انرژی رسوب یافته ناشی از هر ذره الکترون در طیف تابشی با متوسط انرژی $1/666 \text{ MeV}$ در هدف استیل ضد زنگ بر حسب میدان مغناطیسی، (خطای محاسبه انرژی به ازای هر ذره کمتر از ۰.۰۱ است و از نظر محاسباتی مقدار بسیار قابل قبولی است که مقدار آن در این نمودار آورده نشده است).

همانطور که از جدول ۱ و شکل ۳ مشاهده می گردد، با افزایش میدان مغناطیسی اعمال شده روی هدف، میزان رسوب انرژی حاصل از هر الکترون در هدف فولاد ضد زنگ افزایش می یابد. با توجه به مرجع ۱۳، این پدیده را می توان این گونه توجیه نمود که در واقع در برخورد طیف الکترونی با متوسط انرژی $1/666 \text{ MeV}$ با هدف فولاد ضد زنگ، تعداد بسیار زیادی از این الکترون ها از سطح هدف منعکس می گردند. اعمال میدان مغناطیسی سبب می شود بسیاری از این الکترون های منعکس شده با حرکت چرخشی در اثر میدان مغناطیسی مجدداً داخل هدف بازگشته و این عامل سبب افزایش برهم کنش الکترون ها و در نتیجه افزایش رسوب انرژی آنها داخل هدف می گردد.

نتیجه گیری

همانطور که از شکل ۲ مشاهده گردید، فراوانی انرژی های رسوب یافته در حین انجام برهم کنش الکترون از لحظه برخورد با هدف از جنس فولاد ضد زنگ تا لحظه سکون و یا خروج آن از هدف، به ازای انرژی های کمتر از یک مگا الکترون ولت در حدود 10^2 تا 10^5 است و فراوانی انرژی های رسوب یافته بیشتر از این مقدار به شدت کاهش می یابد.



بررسی و شبیه‌سازی عملکرد سلول‌های خورشیدی پروسکایتی کاتد پایین و کاتد بالا با در نظر - گرفتن تحرک حامل‌های بار سنگین

عسگری، بهنام^۱؛ فتح‌اللهی، محمدرضا^۱؛ زارع، محمدحسین^۲؛ عامری، محسن^۳

^۱ دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم، قم

^۲ دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم

^۳ دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه آلاباما، آلاباما، ایالات متحده

asgari.b@gut.ac.ir and behnamasgari93.ac@gmail.com

چکیده

در این مقاله، شبیه‌سازی عملکرد دو نوع ساختار سلول خورشیدی پروسکایتی کاتد پایین و کاتد بالا برحسب تغییرات سرعت رویش ولتاژ بر شاخص پسماند با استفاده از یک مدل رانش-انتشار وابسته به زمان یک بعدی مطالعه شده است. در این پژوهش ما تأثیر تغییرات تحرک پذیری کاتیون و آنیون بر مشخصه $J-V$ و شاخص پسماند نسبت به رویش ولتاژ را بررسی کرده‌ایم. نتایج در این تحقیق نشان می‌دهد رفتار پسماندی در مشخصه‌ای شروع به ظاهر شدن می‌کند که تحرک-پذیری یون‌ها به اندازه کافی کوچک باشد. به عبارت دیگر پسماند با کاهش تحرک یونی افزایش می‌یابد.

Investigating and simulating the performance of bottom cathode and top cathode perovskite solar cells considering the mobility of heavy charge carriers

Asgari, Behnam¹; Fathollahi, Mohammad Reza¹; Zare, Mohammad Hossein²; Ameri, Mohsen³

¹ Department of Electrical and Computer, Qom University of Technology, Qom

² Department of Mechanics, Qom University of Technology, Qom

³ Department of Electrical and Computer, University of Alabama, Alabama, United States

Abstract

In this paper, the performance simulation of two types of bottom cathode and Top cathode perovskite solar cell structures has been studied in terms of scan rate changes on the hysteresis index using a one-dimensional time-dependent drift-diffusion model. In this research, we have investigated the effect of cation and anion mobility changes on the $J-V$ characteristic and the hysteresis index in relation to the scan rate. The results in this research show that the hysteresis behavior begins to appear in a feature where the mobility of ions is small enough. In other words, hysteresis index increases with decreasing ion mobility.

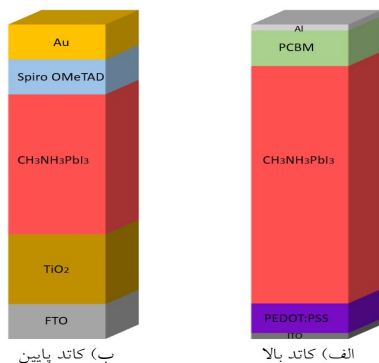


مقدمه

مختلف پردازش و روش‌های آزمایش قرار می‌گیرد [۷]. آلومرا و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی رانش- انتشار^۱ نشان داده‌اند که چگونه سوئیچینگ توزیع یون بسته به شرایط پیش‌بایاس، جمع‌آوری و بازترکیب بار را تغییر می‌دهد [۸]. سینگ و همکاران همچنین از مدل رانش- انتشار استفاده کرده و نشان داده‌اند، بازترکیب به واسطه کاتیون منجر به پسماند قابل توجهی در J-V می‌شود [۹]. در مقاله حاضر، وقوع پسماند در مقابل سرعت رویش ولتاژ براساس تحرک‌پذیری^۲ یون‌ها به‌عنوان حامل‌های بار سنگین (در مقابل حفره‌ها و الکترون‌ها) در لایه پروسکایت مورد بررسی قرار گرفته است. به‌خصوص اثر تغییرات تحرک‌پذیری مد نظر بوده است.

ساختار قطعه سلول خورشیدی پروسکایتی و روش شبیه‌سازی

مطابق شکل ۱ سلول خورشیدی $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ را با دو ساختار قطعه کاتد پایین Spiro/MAPI/TiO₂ با پسماند قابل توجه و معرفی بازترکیب SRH^۳ در مواد تماسی برای شبیه‌سازی بازترکیب در این مناطق و قطعه کاتد بالا PEDOT/MAPI/PCBM با پسماند محدود و بدون هیچ بازترکیبی در مناطق اتصالات پروسکایت/ تماس مورد بررسی قرار داده‌ایم. قطعه را به صورت ساختارهای n-i-p و p-i-n با لایه ذاتی پروسکایت شبیه‌سازی کردیم.



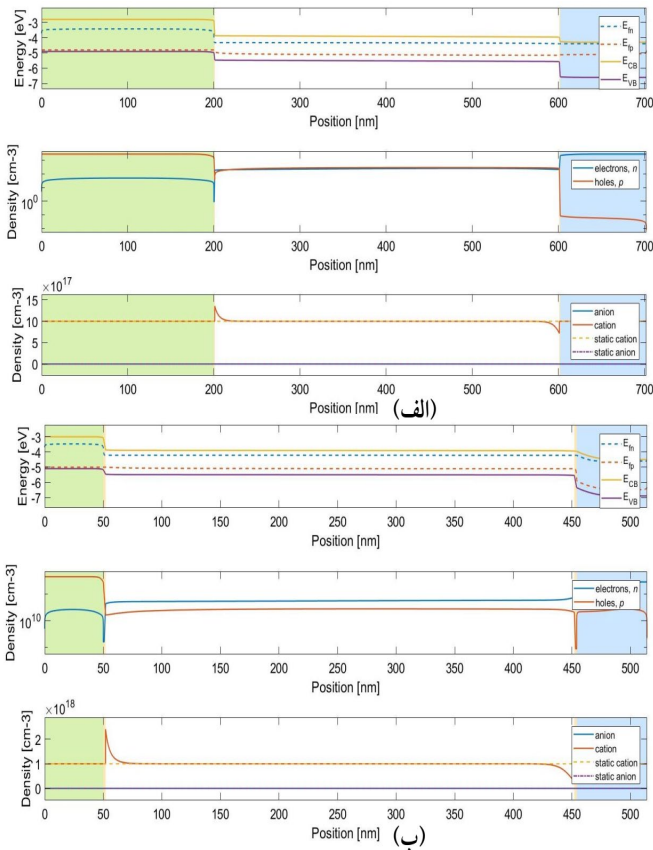
شکل ۱: ساختار قطعه سلول خورشیدی پروسکایتی

سلول‌های خورشیدی پروسکایت در سال‌های اخیر به دلیل عملکرد فوق‌العاده فتوولتائیک خود توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۱]. ساختار قطعه از لایه‌های مختلفی تشکیل شده است، از جمله می‌توان به لایه جاذب که به کمک تبخیر همزمان چند ماده از دو یا چند بوته و یا لایه‌های تراپرنده که بعضاً با روش‌های تخصصی لایه‌نشانی مانند کندوپاش نرم آماده می‌شوند نام برد. به هر جهت، نتایج بسیاری از پژوهش‌های منتشر شده نشان می‌دهد که پارامترها و دستورات انتخاب شده در هنگام اندازه‌گیری نقش مهمی در تکرارپذیری داده‌ها دارد [۲]. تنوع بسیاری در مواد مورد استفاده، ساختار قطعه معرفی شده و روش‌های لایه‌نشانی مواد وجود دارد. از سوی دیگر حتی مشخص کردن مشخصه‌های الکترونیکی و گاه‌آپتیکی برخی مواد به‌خصوص لایه پروسکایت وابستگی زیادی به نوع و فرآیند لایه‌نشانی آن دارد و لذا تعیین مشخصه‌های قطعه نهایی به آسانی امکان‌پذیر نیست و منجر به سردرگمی و اختلاف نظر در مورد عملکرد سلول‌های گزارش شده معمولاً به شکل پسماند جریان-ولتاژ می‌شود. دلایل متنوعی توسط مطالعات مختلف برای توضیح رفتار پسماندی سلول‌های خورشیدی پروسکایت ارائه شده است، مانند: انتقال حامل بار نامتعادل، که در آن لایه‌های انتقال‌دهنده حفره و لایه‌های انتقال-دهنده الکترون نقش مهمی در بروز این رفتار دارند، به دام‌افتادن و از دام خارج شدن حامل‌های بار، خاصیت فروالکتریک مرتبط با مواد پروسکایت فوتوکتیو و در نهایت مهاجرت یون [۳]. گزارش‌ها نشان می‌دهد که پروسکایت ممکن است عاری از فروالکتریک باشد [۴، ۵]. همچنین، در مبحث به دام‌افتادن بار، مقیاس زمانی حدود میلی ثانیه است که متناسب با مقیاس زمانی پسماند در اندازه‌گیری‌های J-V نمی‌باشد [۵، ۶]. در سوی مقابل، ماده پروسکایت MAPbI_3 می‌تواند به سادگی به یون متیل‌آمین (MA^+) و یدید (I^-) تجزیه شود، در حضور میدان الکتریکی می‌تواند منجر به مهاجرت یونی شود. لذا، پسماند J-V در سلول-های خورشیدی پروسکایت بیشتر به مهاجرت یون نسبت داده شده است. قبلاً مشخص شده است که پسماند تحت تأثیر شرایط

¹ Drift-diffusion

² Mobility

³ Shockley Read Hall



شکل ۲: نمودار تراز انرژی و چگالی حامل برای قطعه الف) کاتد پایین و ب) کاتد بالا

جدول ۲: پارامترهای اصلی سلول خورشیدی کاتد پایین و کاتد بالا در روشنایی و تاریکی در جهت جلو

	$J_{sc_forward}$	$V_{oc_forward}$	FF forward	efficiency forward
کاتد پایین، تاریک	4.98×10^{-9}	۰	-	-
کاتد پایین، روشن	-۰.۰۲۱	۰.۸۷	۰.۶۰	۱۰.۹۶
کاتد بالا، تاریک	3.32×10^{-9}	۰	-	-
کاتد بالا، روشن	-۰.۰۱۷	۱.۰۱	۰.۷۵	۱۳.۰۵

جدول ۳: پارامترهای اصلی سلول خورشیدی کاتد پایین و کاتد بالا در روشنایی و تاریکی در جهت معکوس

	$J_{sc_forward}$	$V_{oc_forward}$	FF forward	efficiency forward
کاتد پایین، تاریک	-8.83×10^{-9}	۰.۴۷	۰.۷۵	3.13×10^{-6}
کاتد پایین، روشن	-۰.۰۲۱۲	۰.۹۶	۰.۸۳	۱۶.۹۰
کاتد بالا، تاریک	6.33×10^{-9}	۰.۴۰	۰.۹۱	2.34×10^{-6}
کاتد بالا، روشن	-۰.۰۱۷	۱.۰۴	۰.۸۰	۱۴.۴

نقص‌های یونی متحرک ذاتاً در $CH_3NH_3PbI_3$ وجود دارد که تجمع آن‌ها در اتصال قطعه‌ها به دلیل میدان الکتریکی داخلی در لایه پروسکایت به عنوان مدلی برای درک بعضی از رفتارهای پسماند، استفاده شده است. برای آزمایش اینکه آیا تحرک یونی می‌تواند نتایج گذرا غیرعادی مشاهده شده اینجا را توضیح دهد، از یک مدل رانش-انتشار وابسته به زمان یک بعدی با استفاده از شبیه‌ساز MATLAB استفاده کرده‌ایم. [۵, ۱۰].

نتایج و بحث

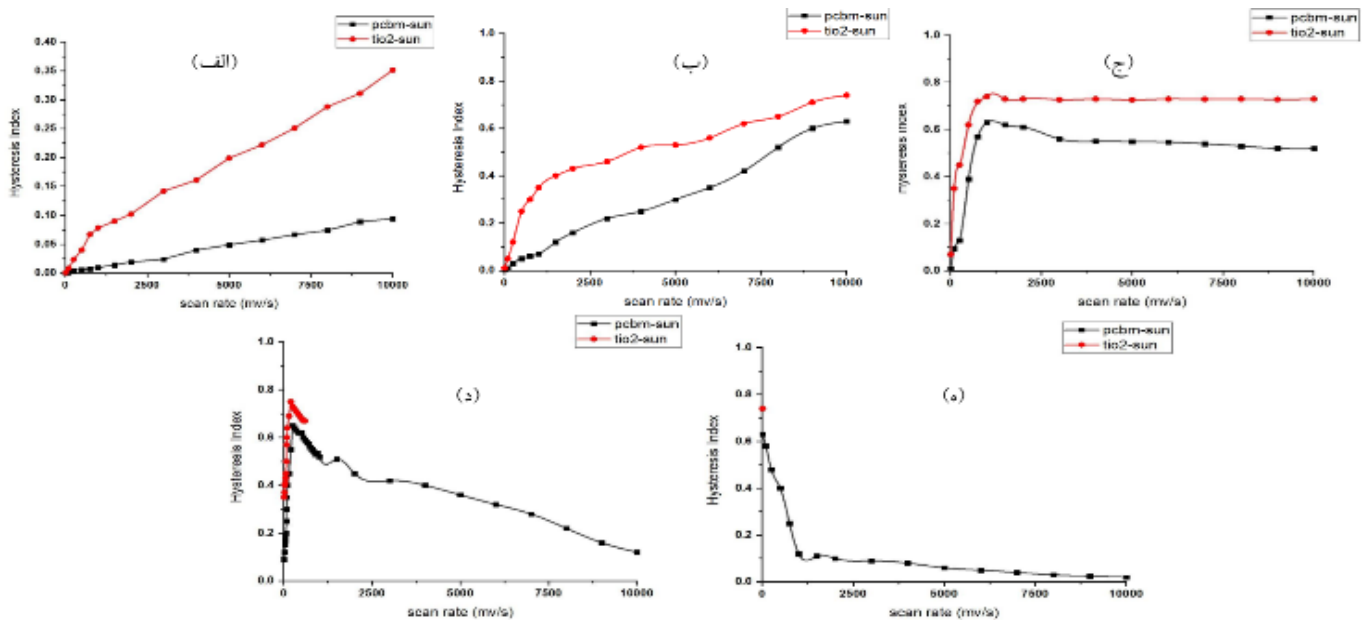
همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود؛ مشخصات لایه‌های ساختار را برای دو قطعه سلول خورشیدی کاتد پایین و کاتد بالا براساس مقادیر نوعی تعریف می‌کنیم. سپس با حل عددی معادلات مشخصه‌های دو ساختار را بدست می‌آوریم. به خصوص با اجرای شبیه‌سازی تابع حلقه ولتاموگرام^۴ (CV) روش جریان-ولتاژ را بدست می‌آوریم.

شکل ۲ نمودار تراز انرژی و چگالی حامل‌ها شامل چگالی الکترون و حفره و چگالی آنیون و کاتیون را برای قطعه کاتد پایین و بالا در ولتاژ ۱۷ و زمان ۲۰s در روبش جهت جلو روشن نشان

جدول ۱: برخی پارامترهای ورودی ساختار کاتد پایین و کاتد بالا

ماده	ضخامت (cm)	Φ_{FA} (ev)	Φ_{IP} (ev)	μ_c (cm^2v^{-1})	μ_a (cm^2v^{-1})
spiro	2×10^{-6}	-۲.۸	-۴.۹	۰	۰
Interface 1	1×10^{-7}	-۳.۸	-۵.۴	۰	۰
MAPIC1	4×10^{-6}	-۳.۸	-۵.۴	1×10^{-10}	1×10^{-10}
Interface 2	1×10^{-7}	-۳.۸	-۵.۴	۰	۰
TiO ₂	1×10^{-6}	-۴.۱	-۶.۴	۰	۰
ماده	ضخامت (cm)	Φ_{FA} (ev)	Φ_{IP} (ev)	μ_c (cm^2v^{-1})	μ_a (cm^2v^{-1})
PEDOT	5×10^{-6}	-۳	-۵.۱	۰	۰
Interface 1	1×10^{-7}	-۳.۸	-۵.۴	۰	۰
MAPIC1	4×10^{-6}	-۳.۸	-۵.۴	1×10^{-10}	1×10^{-10}
Interface 2	1×10^{-7}	-۳.۸	-۵.۴	۰	۰
PCBM	6×10^{-6}	-۳.۸	-۶.۲	۰	۰

⁴ Cyclic Voltammogram



شکل ۳: نمودار تغییرات سرعت روبش ولتاژ بر شاخص پسماند برای دو ساختار کاتد پایین و کاتد بالا در حالت روشنایی با تحرک پذیری کاتیون و آنیون (الف) 10^{-12} و 10^{-11} (ب) 10^{-9} ، 10^{-10} (ج) 10^{-11} (د) 10^{-11} و 10^{-12} (ه) 10^{-12} و 10^{-11} $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$

شاخص پسماند برای ساختار کاتد بالا کمتر از کاتد پایین می- باشد. تحرک پذیری یونهای متحرک نقش مهمی در مشخصه J-V یک سلول خورشیدی پروسکایت ایفا می کند. در ادامه شبیه سازی هدف بر آن است که با تغییر تحرک پذیری کاتیونها و آنیونها وابستگی نمودار شاخص پسماند به سرعت روبش ولتاژ را بررسی می کنیم. مطابق جدول ۱ مقدار اولیه تحرک پذیری کاتیون و آنیون برابر با

$10^{-10} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ انتخاب شده است. با تغییر μ_c و μ_a برابر با مقادیر 10^{-8} ، 10^{-9} و 10^{-11} و 10^{-12} نمودار سرعت روبش ولتاژ مطابق شکل ۳ برای هر کدام بدست می آید.

نتیجه گیری

ملاحظه گردید شاخص پسماند برای ساختار کاتد بالا کمتر از کاتد پایین می باشد، که ناشی از باز ترکیب در اتصالات و مهاجرت های یونی است. همچنین مقدار تحرک پذیری یونها نقش مهمی در مشخصه J-V یک سلول خورشیدی پروسکایت ایفا می کند. در این مقاله تأثیر تحرک پذیری کاتیون و آنیون بر

می دهد. جدول ۲ و ۳ به ترتیب برای حالت کاتد پایین و کاتد بالا در حالت تاریکی و روشنایی در جهت جلو^۵ (بایاس معکوس به جلو) و جهت معکوس^۶ (بایاس جلو به معکوس) نتایج را خلاصه می نمایند. با توجه به دستورات در شبیه سازی، سرعت روبش ولتاژ^۷ را در آن تغییر داده، سپس با بدست آوردن بازده در حالت بایاس مستقیم و معکوس با رابطه ۱ شاخص پسماند^۸ را بدست می آوریم [۹].

$$\text{Hysteresis Index (HI)} = \frac{\text{PCE reverse} - \text{PCE forward}}{\text{PCE reverse}} \quad (1)$$

در ادامه با بدست آوردن شاخص پسماند برای سرعت روبش ولتاژهای متفاوت برای دو ساختار کاتد پایین و کاتد بالا در حالت روشنایی نمودار شاخص پسماند بر حسب سرعت روبش ولتاژ شکل ۳ را بدست می آوریم. همانطور که مشاهده می کنید همواره

⁵ Forward
⁶ Reverse
⁷ Scan rate
⁸ Hysteresis Index



- [۳] J. Ren and Z. Kan, "Chapter 1: origin of hysteresis in perovskite solar cells," *Melville, NY: AIP Publishing LLC.[Google Scholar]*, (2020).
- [۴] A. Gómez, Q. Wang, A. R. Goñi, M. Campoy-Quiles, and A. Abate, "Ferroelectricity-free lead halide perovskites," *Energy & environmental science*, vol. 12, No. 8, (2019), pp. 2537-2547.
- [۵] P. Calado *et al.*, "Evidence for ion migration in hybrid perovskite solar cells with minimal hysteresis," *Nature communications*, vol. 7, No. 1, (2016), p. 13831.
- [۶] E.-W. Chang, J.-Y. Huang, and Y.-R. Wu, "Analysis of the hysteresis effect in Perovskite solar cells for the traditional and inverted architectures," in *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, (2020): IEEE, pp. 0897-0901.
- [۷] F. Wu *et al.*, "Inverted current-voltage hysteresis in perovskite solar cells," *ACS Energy Letters*, vol. 3, No. 10, (2018), pp. 2457-2460.
- [۸] J. Wei *et al.*, "Mechanisms and suppression of photoinduced degradation in perovskite solar cells," *Advanced Energy Materials*, vol. 11, No. 3, (2021), p. 2002326.
- [۹] A. Singh, W. Kaiser, and A. Gagliardi, "Role of cation-mediated recombination in perovskite solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 221, (2021), p. 110912.
- [۱۰] P. Calado, I. Gelmetti, B. Hilton, M. Azzouzi, J. Nelson, and P. R. Barnes, "Driftfusion: an open source code for simulating ordered semiconductor devices with mixed ionic-electronic conducting materials in one dimension," *Journal of Computational Electronics*, vol. 21, No. 4, (2022), pp.960-991

مشخصات J-V و پسماند آن مورد بررسی قرار گرفت و به این نتیجه رسیدیم که پسماند، زمانی شروع به ظاهر شدن می‌کند که تحرک پذیری یون‌ها کاهش می‌یابد به عبارت دیگر پسماند با کاهش تحرک یونی افزایش می‌یابد. مشخصات J-V به سرعت روبش ولتاژ بسیار حساس است به طوری که در سرعت‌های روبش ولتاژ کم یون‌ها اجازه می‌یابند تا تغییرات پتانسیل را دنبال کنند، که منجر به پسماند J-V کمتری می‌شود. در سرعت‌های روبش ولتاژ بالاتر، ولتاژ اعمال شده می‌تواند تجمع بارهای موضعی را در نزدیکی اتصال لایه پروسکایت/انتقال‌دهنده افزایش دهد و در نتیجه پسماند بیشتری ایجاد کند.

مرجع‌ها

- [۱] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (accessed 2023).
- [۲] S. Wang *et al.*, "A general method for growth of perovskite single-crystal arrays for high performance photodetectors," *Nano Research*, vol. 15, No. 7, (2022), pp. 6568-6573.



استحصال لایه اکسید گرافین از ماده گرافیت با لایه‌نشانی لیزر پالسی و بازپخت در شرایط خلا: بررسی اثر حرارت‌دهی با استفاده از طیف‌سنجی رامان

مسرور، اسماعیل^۱؛ قناعت‌شعار، مجید^۲

^۱ دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

m-ghanaat@sbu.ac.ir

چکیده

این پژوهش به استخراج لایه اکسید گرافین به روش لایه‌نشانی لیزر پالسی (PLD) و بازپخت در خلا پرداخته است. برای تولید این لایه، ابتدا گرافیت به صورت قرص در آمده و سپس این قرص در فشار 10^{-2} پاسکال به وسیله فرآیند PLD بر روی بستر سیلیکونی لایه‌نشانی شده است. در مرحله بعد لایه‌های حاصل تحت بازپخت در فشار ۴ پاسکال قرار گرفته‌اند تا لایه اکسید گرافین تشکیل گردد. در نهایت برای بررسی کیفیت لایه طیف‌های رامان از لایه را فراهم و بررسی نمودیم. مطالعه طیف‌ها حاکی از آن بود که لایه‌نشانی همراه با بازپخت در شرایط خلا پایین منجر به تشکیل اکسید گرافین می‌شود.

Exploitation of graphene oxide film with pulse laser deposition and annealing in vacuum: investigation of annealing effects by using Raman Spectroscopy

Masrour, Esmail¹; Ghanaatshoar, Majid²

¹ Department of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

In this research we investigated the graphene oxide layer produced by the pulsed laser deposition (PLD) method, followed by annealing in a vacuum furnace. To produce this layer, graphite was firstly made into a tablet and then, this tablet was deposited on a silicon substrate in 10^{-2} pascal vacuum using the PLD process. In the next step, the produced layer was annealed in the 4 pascal vacuum to form the graphene oxide layer. Finally, we carried out Raman characterization in order to examine the quality of the oxidized graphene layer. The analysis of the Raman spectra showed that deposition and annealing under certain low pressure vacuum conditions will lead to the formation of graphene oxide.

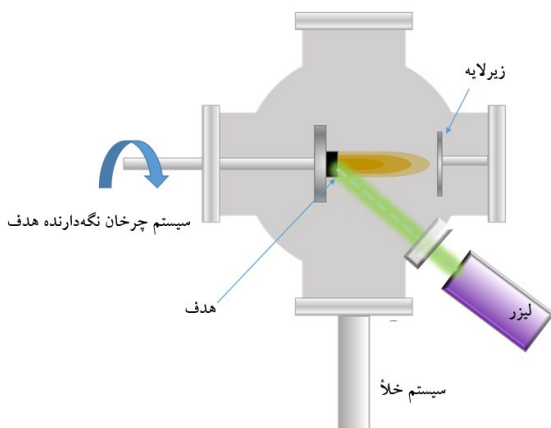


مقدمه

در این پژوهش قصد داریم ابتدا ماده گرافیت را به روش لایه‌نشانی لیزر پالسی تحت خلاء بر روی سطح سیلیکون بنشانیم. سپس با انجام بازپخت در دماهای ۶۰۰، ۷۵۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره خلاء، خواص لایه تشکیل شده را به وسیله طیف‌سنجی رامان بررسی کنیم.

روش تجربی

برای تولید لایه اکسید گرافین به روش لایه‌نشانی لیزر پالسی، ابتدا گرافیت را به عنوان ماده هدف از شرکت آریا متال خریداری کردیم. سپس آن را به شکل قرصهای هم اندازه در آوردیم. در فرآیند (PLD) این قرص‌ها را در مقابل باریکه هارمونیک دوم لیزر Nd:YAG ($\lambda=532 \text{ nm}$) با پهنای پالس ۸/۵ نانوثانیه و نرخ تکرار ۱۰ HZ قرار دادیم. انرژی پالس را برابر ۱۵۰ میلی‌ژول در نظر گرفتیم و از یک تیغه سیلیکونی به عنوان زیرلایه استفاده کردیم. انتخاب سیلیکون به عنوان زیرلایه بدین منظور انجام گرفت که پس از لایه‌نشانی به صورت موفقیت‌آمیز، گرافین اکسید شده در لایه‌ی بالایی وضوح لازم را داشته باشد. به منظور جلوگیری از مزاحمت زیرلایه برای رسیدن باریکه لیزر به ماده هدف، راستای باریکه لیزر با گرافیت قرص شده را در زاویه ۴۵ درجه قرار دادیم و زیرلایه در فاصله ۵ سانتی‌متری و بالای ماده هدف قرار گرفت. همچنین برای اینکه باریکه لیزر بتواند به طور یکنواخت قرص‌های هدف را مورد اصابت قرار دهد، به وسیله



شکل ۱: طرح‌واره‌ای از چیدمان لایه‌نشانی با روش لیزر پالسی.

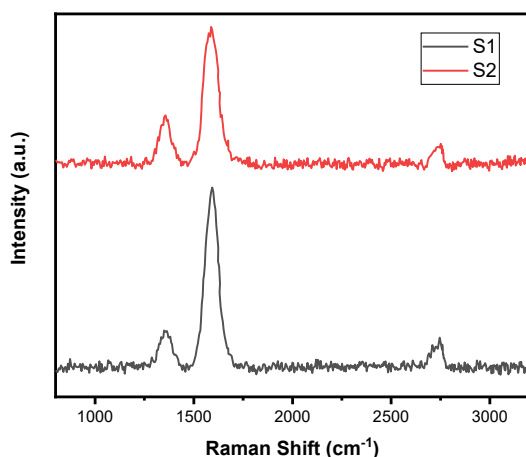
گرافین یکی از بدیع‌ترین و پرکاربردترین آلوتروپ‌های کربن بوده که با دارا بودن خواص منحصر به فردی چون هدایت الکتریکی بالا، انعطاف‌پذیری مناسب، و پایداری فیزیکی و شیمیایی قابل قبول، توجه ویژه‌ای را در عرصه‌های مختلف تحقیقاتی و صنعتی به خود جلب کرده است. در سال‌های اخیر، به سبب رفتار و عملکرد خازنی فوق‌العاده، گرافین در دستگاههای ذخیره انرژی همچون ابرخازن‌ها و باتری‌ها مورد توجه گسترده قرار گرفته است. محاسبات نظری، ظرفیت خازنی این ماده را نزدیک به ۵۵۰ فاراد بر گرم پیش‌بینی کرده است که نسبت به همه آلوتروپ‌های کربن بیشترین میزان ظرفیت را دارد. در حالت استاندارد، کربن اتمی چهار ظرفیتی است. از آنجایی که در ساختار گرافین تنها سه پیوند کووالانسی برقرار شده است، تک الکترونی به صورت آزاد روی صفحه گرافین باقی می‌ماند. این الکترون آزاد عامل القای خواص الکتریکی و حرارتی ویژه به این ماده است. این ساختار یک لایه مسطح از اتم‌های کربن بوده که اتم‌های آن در یک شبکه دو بعدی لانه زنبوری چیده شده‌اند و ساختاری پایه برای دیگر مواد گرافیتی به حساب می‌آید. خواص الکتریکی ویژه این ساختار کربنی، محققین را مجاب کرده است تا در ساخت انواع ترانزیستورها، دیودهای نوری و نمایش‌گرها، کامپوزیت‌های مستحکم، باتری‌ها و الکترودها از آن نهایت بهره‌برداری را داشته باشند [۱].

اکسید گرافین از صفحات دو بعدی گرافینی تشکیل شده است که روی این صفحات گروه‌های اکسیژنی وجود دارد. به دلیل وجود گروه‌های اکسیژنی، توانایی برهم‌کنش بهتری با مواد گوناگون در کاربردهای مختلف ایجاد می‌شود. معمولاً گروه‌های متصل به گرافین اکسید شده، هیدروکسیل و اپوکسید هستند. این گروه‌ها به ماده اکسیدی مذکور این امکان را می‌دهند که با پیوندهای کووالانسی این صفحات را به بسیاری از مواد و بویژه پلیمرها متصل کند. این ماده نسبت به گرافین از زیست‌سازگاری بهتری برخوردار است و می‌تواند در کاربردهای پزشکی نیز مورد استفاده قرار گیرد [۲].



می‌شود با حرف G نام‌گذاری شده است. با توجه به کوچک بودن ابعاد بلور مد دیگری در سمت چپ قله G در 1373 cm^{-1} پدیدار شده است که این قله با حرف D (حرف اول کلمه Defect به معنای نقض) نمایش داده می‌شود. در 2703 cm^{-1} نیز مد 2D ظاهر شده است که دومین باند مهم بعد از G بوده و به طور معمول در طیف رامان گرافیت مشاهده می‌شود. انرژی این فونون دقیقاً دو برابر مد D است و در موقعیتی که دو برابر موقعیت مد D است در طیف رامان ظاهر می‌شود.

پس از لایه‌نشانی ماده هدف با لیزر پالسی بر روی زیرلایه سیلیکونی، از لایه حاصل طیف رامان گرفته شد. همان‌طور که در طیف S2 مشاهده می‌شود تغییرات قابل توجهی در قله‌های شکل گرفته حاصل نشده است. تنها تفاوت جزئی که می‌توان از مقایسه S1 و S2 برداشت نمود، پهنای کمتر قله G در طیف S1



شکل ۲: طیف رامان گرافیت قبل از لایه‌نشانی (S1) و بعد از لایه‌نشانی (S2).

جدول ۱: پارامترهای مربوط به کوره خلا

فشار	زمان بازپخت	دمای بازپخت	طیف رامان
۴ Pa	۱ ساعت	۶۰۰ °C	S3
۴ Pa	۱ ساعت	۷۵۰ °C	S4
۴ Pa	۱ ساعت	۹۰۰ °C	S5

یک موتور (۶۰ rpm) گرافیت قرص شده را حین فرآیند لایه‌نشانی چرخاندیم (شکل ۱).

با توجه به اینکه فشار محفظه، تاثیر به سزایی در فرآیند (PLD) دارد، فشار هوا را در حین لایه‌نشانی 10^{-2} پاسکال ثابت نگه داشتیم. مدت زمان لایه‌نشانی را برای هر لایه ۵ دقیقه در نظر گرفتیم. پس از اتمام فرآیند لایه‌نشانی، لایه‌های حاصل را هر کدام به مدت ۶۰ دقیقه درون کوره خلا با فشار ۴ پاسکال، تحت دماهای ۶۰۰، ۷۵۰، و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار دادیم تا فرآیند بازپخت انجام پذیرد.

پس از عملیات بازپخت، لایه‌های ایجاد شده را با استفاده از طیف‌سنجی رامان مورد مطالعه قرار دادیم. طیف‌سنجی بر پایه پراکندگی نوری، روشی سریع، حساس و غیر مخرب است. در این میان، طیف‌سنجی رامان یک روش آشکارسازی نوری بر پایه پراکندگی غیر الاستیک نور با ماده است. در این فرآیند، نور با اتم‌ها برهم‌کنش می‌کند که منجر به تغییر انرژی نور در طی پراکندگی می‌شود. اطلاعات ساختار ماده را می‌توان از طریق تحلیل و بررسی اختلاف نور فرودی و انرژی نور پراکنده شده استخراج کرد. برای استخراج طیف رامان ماده از دستگاه تکسان استفاده کردیم.

نتایج و بحث

فرآیند پراکندگی رامان در مورد اکسید گرافین به ساختار الکترونی حساس است زیرا علاوه بر حضور الکترون‌ها، جفت شدگی الکترون-فونون منجر به شکل‌گیری ویژگی‌های منحصر به فرد در پراکندگی فونونی می‌شود. این موضوع از طیف سنجی رامان یک ابزار موثر و کارآمد برای بررسی اکسید گرافین ساخته است [۳].

طیف S1 در شکل ۲ مربوط به نمونه گرافیت است. گرافیت انباشت تعداد زیادی صفحات گرافین روی هم می‌باشد. طیف رامان حاصل گرافیت غیرایده‌آل شامل مدهای D، G و 2D است. در این طیف یک قله در 1604 cm^{-1} آشکار شده است. این مد مشخصه که در همه ساختارهای مبتنی بر گرافین ظاهر



لانه زنبوری گرافین، شبکه کربنی گرافین ساختار منظم تری نسبت به دو نمونه S4 و S5 نشان می‌دهد.

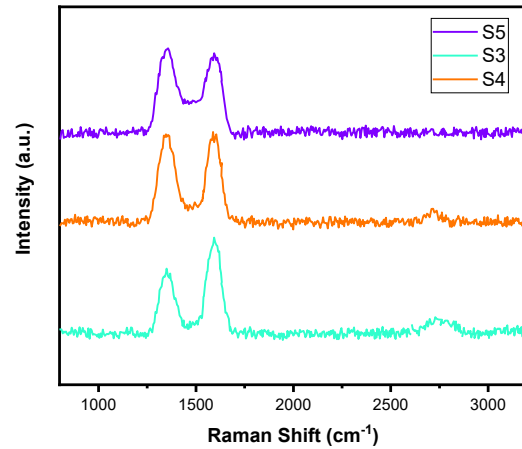
تحت بازپخت در دمای 750°C ، نمونه S4 نسبت به S3 ناحیه‌ای ضعیف‌تر از باند 2D آشکار کرده است. علاوه بر این، ارتفاع قله باند D در S4 نسبت به S3 به دلیل افزایش دمای بازپخت که منجر به نقص‌های متعدد در ساختار شبکه‌ای می‌شود افزایش یافته است [6]. در نهایت S5 نمایانگر طیف نمونه تحت بازپخت در دمای 900°C است که نسبت به دو طیف S3 و S4 قله مرتفع‌تری در باند D دارد که نشان دهنده شکل‌گیری بی‌نظمی بیشتر در ساختار شبکه گرافین به دلیل افزایش برهم‌نهی نقص‌ها می‌باشد. در این دمای بازپخت، قله 2D آشکار نشده است [7].

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثرات بازپخت تحت خلا، در دماهای مختلف بر گرافیت لایه‌نشانی شده توسط لیزر پالسی پرداختیم. نتایج مشخصه‌یابی لایه‌ها به وسیله آنالیز طیف‌های رامان دلیلی متقن بر ساخت موفقیت‌آمیز لایه اکسید گرافین می‌باشد. تحلیل این طیف‌ها حاکی از آن بود که بازپخت لایه-ها در دماهای مختلف به سبب شرکت اکسیژن در این عملیات منجر به تشکیل لایه اکسید گرافین شده و هر چه دمای بازپخت افزایش یابد، به دلیل مشارکت بیشتر ساختار در تشکیل پیوند با اکسیژن، لایه کیفیت بهتری را از گرافین اکسیدی نشان می‌دهد.

مرجع‌ها

- [1] Abergel, D. S. L., V. Apalkov, J. Berashevich, Klaus Ziegler, and Tapash Chakraborty. "Properties of graphene: a theoretical perspective." *Advances in Physics* 59, no. 4 (2010): 261-482.
- [2] Jurabaev, Tursunpulat, Utkir Uljayev, and Umedjon Khalilov. "HIGH-INDEX NICKEL SURFACE FOR GRAPHENE SYNTHESIS." *MMIT* (2023): 198-202.
- [3] Mulvaney, Shawn P., and Christine D. Keating. "Raman spectroscopy." *Analytical Chemistry* 72, no. 12 (2000): 145-158.
- [4] Yang, Dongxing, Aruna Velamakanni, Gülay Bozoklu, Sungjin Park, Meryl Stoller, Richard D. Piner,



شکل ۳: طیف‌های رامان لایه‌ها پس از بازپخت.

نسبت به طیف S2 است که می‌تواند به دلیل انرژی بالای وارد شده توسط لیزر پالسی و در نتیجه آشفته‌گی و تنش بیشتر در ساختار باشد [4].

در مرحله بعد، لایه‌های گرافیت نشانده شده بر سیلیکون را به مدت یک ساعت در فشار ۴ پاسکال تحت فرآیند بازپخت در دماهای 600°C ، 750°C و 900°C درجه سانتی‌گراد، درون کوره خلا قرار دادیم. جدول ۱ شرایط بازپخت هر نمونه را نشان می‌دهد. طیف رامان نمونه‌ها پس از بازپخت نیز در شکل ۳ آمده است. شرکت اکسیژن در عملیات بازپخت با توجه به عدم خلا کامل، نتیجتاً منجر به تشکیل پیوند با ساختار نامنظم کربنی گرافین می‌شود. قله‌های شکل گرفته در S3، S4 و S5 ویژگی‌های گرافین اکسید شده را آشکار کرده‌اند. در طیف رامان اکسید گرافین، ارتفاع و پهنای قله D شدت بیشتری نسبت به گرافیت دارد. همچنین در اکسید گرافین صرفاً ناحیه‌ای ضعیف از باند 2D ظاهر شده است.

S3 طیف حاصل از نمونه تحت بازپخت در دمای 600°C است. همانطور که مشاهده می‌شود قله D در 1375 cm^{-1} شدت کمتری نسبت به قله G در 1605 cm^{-1} دارد [5]. بعلاوه قله‌ای از باند 2D نیز آشکار شده است. در این نمونه، با توجه به شدت بیشتر قله G نسبت به D، علی‌رغم ایجاد نقص و تغییر در شبکه



[6] Kostiuk, Dmytro, Michal Bodik, Peter Siffalovic, Matej Jergel, Yuriy Halahovets, Martin Hodas, Marco Pelletta et al. "Reliable determination of the few-layer graphene oxide thickness using Raman spectroscopy." *Journal of Raman Spectroscopy* 47, no. 4 (2016): 391-394.

[7] Krishnamoorthy, Karthikeyan, Murugan Veerapandian, Kyusik Yun, and S-J. Kim. "The chemical and structural analysis of graphene oxide with different degrees of oxidation." *Carbon* 53 (2013): 38-49.

Sasha Stankovich et al. "Chemical analysis of graphene oxide films after heat and chemical treatments by X-ray photoelectron and Micro-Raman spectroscopy." *Carbon* 47, no. 1 (2009): 145-152.

[5] Malard, Leandro M., Marcos Assunção Pimenta, Gene Dresselhaus, and Mildred Spiewak Dresselhaus. "Raman spectroscopy in graphene." *Physics reports* 473, no. 5-6 (2009): 51-87.



کندوپاش مغناطیسی: مروری بر پیشرفت‌های اخیر

سلطانعلی پور، مهدیه^۱؛ بدر، میلاد^۱؛ خلیل علافی، جعفر^۱؛ نقش آرا، حمید^۲

^۱ دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، شهر جدید سهند، تبریز

^۲ دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

M_badr99@sut.ac.ir and Milad_badr@ymail.com

چکیده

کندوپاش مغناطیسی، در واقع یکی از متداول‌ترین روش‌های لایه‌نشانی در خلأ است که به طور گسترده برای لایه‌نشانی پوشش‌های مهم زیست‌پزشکی و صنعتی به کار می‌رود. به عنوان مثال، می‌توان به پوشش‌های زیستی مقاوم در برابر خوردگی و پوشش‌هایی با خواص نوری و الکتریکی خاص اشاره نمود. کندوپاش مغناطیسی به دلیل دمای لایه‌نشانی نسبتاً پایین، سهولت تشکیل پوشش بر روی انواع بسترها با شکل‌های پیچیده، چسبندگی عالی، مقرون‌به‌صرفه بودن و توانایی پوشش‌دهی یکنواخت و متراکم مورد توجه محققین قرار گرفته است. همچنین، این روش پراکنش مواد با نقطه ذوب بالا نظیر تانتالم را امکان‌پذیر می‌کند. اگرچه فرایند کندوپاش به خوبی شناخته شده و به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است با این حال توسعه‌ی کندوپاش مغناطیسی غیرتعادلی بر اهمیت این شیوه افزوده است در نتیجه این تکنیک در سال‌های اخیر، توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. در این بررسی، پیشرفت‌ها، اصول اساسی و کاربردهای کندوپاش مغناطیسی غیرتعادلی به تفصیل مورد بحث قرار می‌دهیم.

Magnetron sputtering: A review of current progresses

Soltanalipour, Mahdih¹; Badr, Milad¹; Khalil-Allafi, Jafar¹; Naghsara, Hamid²

¹ Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz

² Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz

Abstract

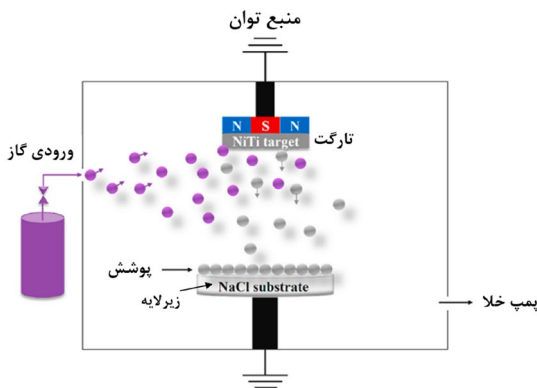
Magnetron sputtering is indeed one of the most commonly used vacuum deposition techniques, particularly when it comes to depositing crucial biomedical and industrial coatings. For instance, it is capable of producing biological coatings that are corrosion-resistant, as well as coatings that have special optical and electrical properties. Magnetron sputtering has been a subject of great interest among researchers due to its relatively low deposition temperature, ease of coating formation on all types of substrates with complex shapes, excellent adhesion, cost-effectiveness, and the ability to cover uniformly and densely. It also enables the dispersion of materials with high melting points, such as tantalum. While the sputtering process has been well-established and widely used, the development of non-equilibrium magnetic sputtering has significantly increased the importance of this method. As a result, this technique has attracted a lot of attention from researchers in recent years. In this review, we discuss the advances, basic principles, and applications of non-equilibrium magnetic sputtering in detail.



مقدمه

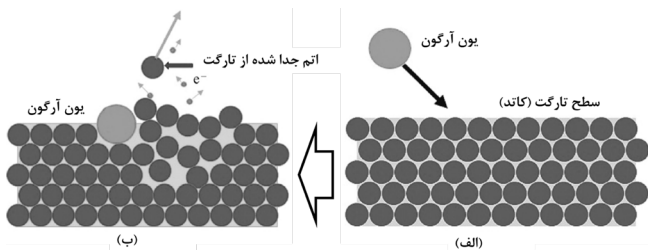
کندوپاش مغناطیسی یکی از محبوب‌ترین روش‌های رسوب‌دهی بخار فیزیکی است که به سرعت در جهان توسعه یافته است. با کندوپاش مغناطیسی (کندوپاش کاتدی از ماده‌ی هدف در پلاسمای تخلیه‌ی مغناطیسی)، می‌توان پوسته‌ها و پوشش‌های ظریف را ایجاد کرد [۱]. اف. پنینگ، فیزیک‌دان هلندی، اولین فردی بود که در اوایل سال ۱۹۳۵، روش کندوپاش مغناطیسی را برای پوشش‌دهی مطرح کرد. در آزمایشگاه‌های متعدد، کندوپاش مغناطیسی مواد در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ با پیکربندی‌های مختلف مطالعه و بررسی شده است. کاربردهای صنعتی این فناوری در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰ شروع شد. کندوپاش مغناطیسی نه تنها برای کاربردهای صنعتی بلکه برای تحقیقات علمی و فناوری مهم است. این شیوه از اواسط دهه‌ی ۱۹۸۰، در موسسه‌ی کورچاتوف، مرکز تحقیقات ملی آمریکا برای لایه‌نشانی با خواص حفاظتی و عملکردی لازم به کاربرده شد [۲].

به‌طور خلاصه در فرایند کندوپاش مغناطیسی، با اعمال توان در محفظه‌ی خلاء، بین دو صفحه (الکترودها)، میدان الکتریکی تشکیل می‌شود [۳]. این میدان الکتریکی، بین هدف و نگه‌دارنده‌ی زیرلایه، پلاسمای را تشکیل می‌دهد [۴]. گاز غیر واکنشی (معمولاً آرگون) به درون محفظه تزریق شده و در اثر میدان الکتریکی به‌صورت بار مثبت یونیزه می‌شود، به این ترتیب که در پلاسمای الکترون‌های آزاد به اتم‌های گاز برخورد می‌کنند و یون‌های گازی با بار مثبت و الکترون‌های ثانویه تولید می‌شود. از آنجایی که الکترون‌ها جرم کوچکی دارند، انرژی لازم برای کندن اتم‌های هدف را نخواهند داشت. در مقابل یون‌های گاز آرگون با بار مثبت جرم زیادی دارند، این یون‌ها قطب منفی میدان الکتریکی یعنی کاتد (هدف) را بمباران می‌کنند. برخورد یون‌های Ar^+ با کاتد، اتم‌های آن را به بیرون می‌کشد. تحت یک میدان الکتریکی، اتم‌های خارج شده از هدف با گازهای واکنشی نظیر اکسیژن یا نیتروژن (در صورت وجود) واکنش می‌دهند، سپس روی سطح زیرلایه متراکم شده و در نهایت هم‌چنان که در شکل ۱ نشان داده شده است، لایه‌ی نازکی از پوشش را تشکیل می‌دهند [۵].



شکل ۱: طرحواره‌ی کندوپاش مغناطیسی و طریقه‌ی ایجاد لایه‌ی نازک در سطح

زیرلایه [۶].



شکل ۲: طرحواره‌ی کندوپاش کاتدی: (الف) قبل از کندوپاش، (ب) در حین

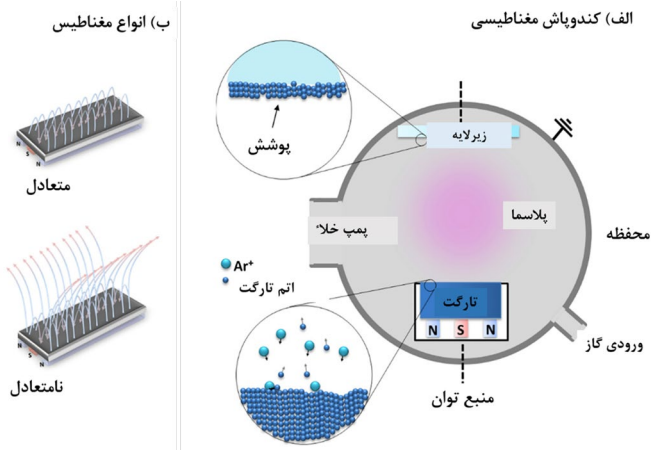
کندوپاش [۹].

اصول کندوپاش کاتدی

اتم‌های هدف توسط نیروی واندروالسی به شدت به یکدیگر اتصال دارند. بنابراین در طی فرایند کندوپاش کاتدی، برای جدا شدن اتم‌های هدف مقدار معینی انرژی باید فراهم شود. در طی فرایند کندوپاش، یون‌های پرانرژی آرگون به سمت هدف (کاتد) شتاب می‌گیرند و تبادل انرژی بین یون‌های پرانرژی آرگون و اتم‌های هدف صورت می‌گیرد. اتم‌های لایه‌ی سطحی هدف، انرژی کافی برای جدا شدن از سطح را دریافت می‌کنند. در نهایت به سمت زیرلایه منتقل شده و لایه‌ی نازک را در سطح آن تشکیل می‌دهند [۷،۸]. این فرایند کندوپاش کاتدی نامیده می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است.

انواع پیکربندی کندوپاش مغناطیسی

آهنگ یونیزاسیون و برخورد آرگون در دستگاه‌های کندوپاش معمولاً آهسته است، لذا آهنگ رسوب‌دهی و ضخامت پوسته‌ی تشکیل‌شده نیز کم است. در سال ۱۹۳۰ تغییر در شیوه‌های کندوپاش، به‌منظور افزایش آهنگ یونیزاسیون در مجاورت هدف و افزایش آهنگ رسوب‌دهی مطرح شد. این اصلاح شامل قرار دادن



شکل ۳: (الف) طرحواره‌ی روش کندوپاش مغناطیسی و (ب) انواع مختلف پیکربندی مغناطیس تعادلی و غیرتعادلی به کار برده شده در کندوپاش مغناطیسی [۳].

سرعت یک بار سطحی در مخالفت با پتانسیل اعمالی ایجاد می‌شود. دما در روش کندوپاش مغناطیسی، انرژی جنبشی برای گونه‌های ترسیب یافته را فراهم می‌کند و تحرک آن‌ها را افزایش داده و در نتیجه مورفولوژی و ساختار پوسته را تغییر می‌دهد [۳].

مزایا و معایب روش کندوپاش مغناطیسی

روش کندوپاش مغناطیسی از مزایای زیادی برای ایجاد پوشش‌های زیستی برخوردار است از جمله:

- ۱) فرایند تکرارپذیر است.
- ۲) فرایند شیمیایی وجود ندارد.
- ۳) پراکنش مواد با نقطه‌ی ذوب بالا امکان‌پذیر است.
- ۴) پوسته‌های کندوپاش شده، چسبندگی بالاتری نسبت به پوشش‌های تبخیری دارند.
- ۵) لایه‌نشانی آسان‌تر و کنترل بهتر ضخامت لایه‌ی تشکیل شده را به همراه دارد.
- ۶) پوسته‌های تشکیل شده حتی در طراحی کاشتنی‌های پیچیده، یکنواخت و متراکم هستند.
- ۷) امکان پوشش‌دهی سطوح با مساحت بالا امکان‌پذیر است و این فناوری می‌تواند برای مقیاس‌های بزرگ صنعتی به کار رود [۴, ۱۰].

این ویژگی‌ها سبب شده که این روش، یکی از روش‌های صنعتی بسیار قدرتمند و رقابتی به شمار رود. عدم کنترل دقیق

تعدادی آهنربای دائمی در زیر هدف (کاتد) است، به این ترتیب میدان مغناطیسی برای به دام انداختن الکترون‌های ثانویه ساعت شده فراهم شده و یونیزاسیون آرگون در اطراف هدف افزایش یافته و در نتیجه بمباران هدف افزایش می‌یابد. طرحواره‌ی این اجزا در شکل ۳ قسمت (الف) نشان داده شده است. همچنان که در قسمت (ب) این شکل نشان داده شده است، کندوپاش مغناطیسی می‌تواند به صورت تعادلی و غیرتعادلی باشد که به اندازه‌ی میدان مغناطیسی بین قطب‌های آهنربا (تشکیل‌دهنده‌ی مغناطیس)، ارجاع داده می‌شود.

مغناطیس‌های تعادلی استحکام یکسانی دارند (میدان مغناطیسی بین قطب‌های جنوبی و شمالی آهنربا یکسان است) و خطوط میدانی بسته‌ای بین این دو قطب ایجاد می‌شود. در کندوپاش غیرتعادلی، میدان مغناطیسی تقویت شده بین قطب‌ها و قسمت خارجی آهنربا اجازه می‌دهد که خطوط میدان مغناطیسی به سمت زیرلایه هدایت شود. در حالت غیرتعادلی، مشخصه‌های پوشش را می‌توان با تغییر پارامترهای متعدد در فرایند تولید نظیر تعداد آهنربا، توان، چگالی جریان، فاصله‌ی بین آهنربا و زیرلایه، فشار محفظه و دمای محفظه/زیرلایه بهبود داد.

پارامترهای ذکر شده، این روش را بسیار متنوع کرده است. علاوه بر این، مشارکت گازهای واکنشی در درون محفظه نظیر اکسیژن، نیتروژن، متان و استیلن سبب می‌شود که احتمال تشکیل ترکیبات مختلف بین هدف و گازها افزایش یابد، بنابراین خواص شیمیایی، ساختاری و مورفولوژی پوسته‌های تشکیل یافته را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تخلیه‌ی میدان الکتریکی توسط انواع مختلفی از منابع توان از جمله فرکانس رادیویی (RF)، جریان مستقیم (DC) یا پالسی (P) انجام می‌شود که نوع این منابع برحسب رسانایی هدف یا تمایل هدف به واکنش با گازهای تزریق شده به محفظه انتخاب می‌شود. جریان مستقیم برای کندوپاش هدف‌های رسانای الکتریسیته استفاده می‌شود که می‌توانند بار سطحی ناشی از یون‌های بمباران کننده را پراکنده کنند. فرکانس رادیویی برای هدف‌هایی با هدایت الکتریکی ضعیفی یا عایق استفاده می‌شود، زیرا در صورت کندوپاش هدف‌های عایق با جریان مستقیم، به



مرجع ها

- [1] M.S. Safavi, M.A. Surmeneva, R.A. Surmenev, J. Khalil-Allafi, RF-magnetron sputter deposited hydroxyapatite-based composite & multilayer coatings: A systematic review from mechanical, corrosion, and biological points of view, *Ceram. Int.* 47 (2021) 3031–3053. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.274>.
- [2] O.K. Alexeeva, V.N. Fateev, Application of the magnetron sputtering for nanostructured electrocatalysts synthesis *, *Int. J. Hydrogen Energy.* 41 (2016) 3373–3386. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.147>.
- [3] S.C. Velasco, A. Cavaleiro, S. Carvalho, Functional properties of ceramic-Ag nanocomposite coatings produced by magnetron sputtering, *Prog. Mater. Sci.* 84 (2016) 158–191. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.09.005>.
- [4] J.Z. Shi, C.Z. Chen, H.J. Yu, S.J. Zhang, The effect of process conditions on the properties of bioactive films prepared by magnetron sputtering, *Vacuum.* 83 (2009) 249–256. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2008.05.019>.
- [5] R. Alias, R. Mahmoodian, K. Genasan, K.M. Vellamy, M. Hamdi Abd Shukur, T. Kamarul, Mechanical, antibacterial, and biocompatibility mechanism of PVD grown silver–tantalum-oxide-based nanostructured thin film on stainless steel 316L for surgical applications, *Mater. Sci. Eng. C.* 107 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110304>.
- [6] J. Khalil-Allafi, H. Daneshvar, M.S. Safavi, V. Khalili, A survey on crystallization kinetic behavior of direct current magnetron sputter deposited NiTi thin films, *Phys. B Condens. Matter.* 615 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.413086>.
- [7] K. Babaei, A. Fattah-alhosseini, H. Elmkhah, H. Ghomi, Surface characterization and electrochemical properties of tantalum nitride (TaN) nanostructured coatings produced by reactive DC magnetron sputtering, *Surfaces and Interfaces.* 21 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100685>.
- [8] A.H. Simon, *Sputter Processing*, Elsevier Inc., 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812311-9.00007-4>.
- [9] F. Wang, J. Wu, *Magnetron sputtering*, 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90833-7.00008-5>.
- [10] L. Fialho, L. Grenho, M.H. Fernandes, S. Carvalho, Porous tantalum oxide with osteoconductive elements and antibacterial core-shell nanoparticles: A new generation of materials for dental implants, *Mater. Sci. Eng. C.* 120 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111761>.
- [11] M. Alishahi, F. Mahboubi, S.M. Mousavi Khoie, M. Aparicio, E. Lopez-Elvira, J. Méndez, R. Gago, Structural properties and corrosion resistance of tantalum nitride coatings produced by reactive DC magnetron sputtering, *RSC Adv.* 6 (2016) 89061–89072. <https://doi.org/10.1039/c6ra17869c>.
- [12] M. Soltanalipour, J. Khalil-Allafi, Superior in vitro corrosion resistance of the novel amorphous Ta/TaxOy multilayer coatings on self-expanding nitinol stents, *Surf. Coatings Technol.* 446 (2022) 128767. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128767>.
- [13] J. Jenis Samuel, P. Krishna Kumar, D. Dinesh Kumar, A.M. Kamalan Kirubakaran, T. Arjun Raj, P. Aravind, Effect of substrate temperature and preferred orientation on the tribological properties of Tantalum nitride coatings, *Mater. Today Proc.* 44 (2020) 4404–4408. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.576>.
- [14] M.M. Rodrigues, C.P. Fontoura, A.E. Dotta Maddalozzo, L.M. Leidens, H.G. Quevedo, K. dos S. Souza, J. da Silva Crespo, A.F. Michels, C.A. Figueroa, C. Aguzzoli, Ti, Zr and Ta coated UHMWPE aiming surface improvement for biomedical purposes, *Compos. Part B Eng.* 189 (2020) 107909. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107909>.

میزان تانتالم و دیگر عناصر مثل اکسیژن و نیتروژن ناشی از محدودیت واکنش پذیری آن‌ها از جمله معایب کندوپاش مغناطیسی است [۱۱].

کاربرد کندوپاش مغناطیسی در زمینه‌ی زیست پزشکی

پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی استفاده از فرایند کندوپاش مغناطیسی در زمینه‌ی زیست پزشکی انجام شده است. در ادامه به توصیف مختصری از کارهای محققین و نتایج حاصل در زمینه‌ی پوشش‌های زیستی پایه تانتالم پرداخته شده است.

ام. سلطانی پور و جی. خلیل‌علافی [۱۲]، با اعمال پوشش‌های اکسید تانتالم، مقاومت خوردگی به طور قابل توجهی افزایش یافته و عملکرد زیستی نمونه‌ها از نقطه نظر سمیت ارتقاء یافته است. جی. جنیس ساموئل و همکارانش [۱۳]، تاثیر دمای زیرلایه و جهت‌گیری صفحه‌ها را در رفتار سایشی پوشش‌های نیتريد تانتالم روی سطح فولاد زنگ‌نزن 316L بررسی کرده و نشان دادند با افزایش دمای زیرلایه به 400°C بیشینه مقاومت سایشی با تراکم بیشتر پوشش حاصل شد. ام. ام. رودریگس و همکارانش [۱۴]، نشان دادند با اعمال پوشش پنتاکسید تانتالم روی زیرلایه‌ی تیتانیوم چسبندگی و تکثیر سلول‌های استئوبلاست افزایش یافته است.

نتیجه گیری

این بررسی تلاش‌هایی برای نشان دادن اصول اساسی، پیشرفت‌ها و کاربردهای کندوپاش مغناطیسی در زمینه‌ی زیست پزشکی در نظر می‌گیرد. رویکردهای عملی به کار برده شده و نیز مزایا و محدودیت‌های این روش آشکار می‌شود. بر اساس مرور کلی، عدم کنترل دقیق میزان عناصر موجود در پوشش، از محدودیت‌های کندوپاش مغناطیسی محسوب می‌شود. واضح است که تکرار پذیر بودن فرایند و چسبندگی بالای پوشش به زیرلایه از جمله مهم‌ترین مزیت‌های این روش است.



مروری بر بررسی پارامترهای مؤثر بر پوشش‌های پایه تانتالم تشکیل شده به روش کندوپاش مغناطیسی

بدر، میلاد^۱؛ سلطانعلی پور، مهدیه^۱؛ خلیل علافی، جعفر^۱؛ نقش آرا، حمید^۲

^۱ دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، شهر جدید سهند، تبریز

^۲ دانشکده مهندسی فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

M_badr99@sut.ac.ir and milad_badr@ymail.com

چکیده

در این تحقیق، پارامترهای مؤثر بر ساختار، مورفولوژی و سایر خواص پوشش‌های پایه تانتالم لایه‌نشانی شده در خلأ، مطالعه شده است. روش کندوپاش مغناطیسی به دلیل مزایایی که دارد، در بین سایر روش‌های لایه‌نشانی همچون رسوب‌دهی بخار شیمیایی، رسوب‌دهی الکتروشیمیایی و پلاسمایی محبوبیت بیشتری دارد، بنابراین برای ایجاد پوشش‌های پایه تانتالم غالباً این روش به کار گرفته شده است. در پژوهش حاضر نیز تأثیر هر یک از پارامترهای فرایند لایه‌نشانی همچون شرایط خلأ، نوع زیرلایه، لایه‌های میانی، ترکیب گاز ورودی، ولتاژ بایاس و دمای زیرلایه بر ساختار پوشش‌های پایه تانتالم لایه‌نشانی شده بررسی شده است.

A review of investigation of effective parameters on the Ta-based coatings deposited by magnetron sputtering method

Badr, Milad¹; Soltanalipour, Mahdiyeh¹; Khalil-Allafi, Jafar¹; Naghsara, Hamid²

¹ Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz

² Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz

Abstract

In this research, parameters affecting the structure, morphology and other properties of Ta-based coatings deposited in vacuum have been studied. Since the magnetron sputtering method is more popular among other deposition methods such as chemical vapor deposition, electrochemical and plasma deposition due to its advantages, this method is often used to produce Ta-based coatings. The present study investigates the effect of deposition process parameters such as vacuum conditions, substrate type, intermediate layers, input gas composition, bias voltage, and substrate temperature on the structure of Ta-based coatings.



مقدمه

تانتالم یکی از فلزات دیرگداز با دمای ذوب 3017°C است که برای ساخت اجزای کارخانه‌های شیمیایی، نیروگاه‌های هسته‌ای، هواپیماها، موشک‌ها و مواد پزشکی استفاده می‌شود [۱]. در بین بسیاری از انواع فلزات، فلز تانتالم به دلیل اینکه در داخل بدن نسبتاً بی‌اثر است، اخیراً به‌عنوان یک زیست‌ماده فلزی جدید توجه بیشتری را به خود جلب کرده است، چرا که این عنصر با مایعات بدن واکنش نشان نمی‌دهد و برای ساخت تجهیزات جراحی نیز استفاده می‌شود. این فلز خواص شیمیایی و مقاومت خوردگی عالی دارد و سریعاً با استخوان ادغام می‌شود و تحت شرایط خاص، حتی ممکن است پیوندهای بسیار نزدیکی نه تنها با استخوان، بلکه با تاندون‌ها، رباط‌ها و سایر بافت‌های نرم ایجاد کند [۲،۱]. تانتالم دو ساختار بلوری مشخص دارد. فاز پایدار α که ساختار BCC دارد و فاز نیمه‌پایدار β که ساختار کریستالوگرافی آن تراگونال است [۳]. تانتالم α خواص شیمیایی، حرارتی و مکانیکی خوبی نظیر مدول الاستیک بالا، نقطه ذوب بالا، شکل‌پذیری خوب و همچنین مقاومت شیمیایی عالی در برابر اسیدها و گازهای خورنده دارد، در حالی که ساختار β فازی ترد و شکننده است که در دمای بالاتر از 750°C به فاز α تبدیل می‌شود [۴،۳]. یکی از مواد با ساختار کریستالی BCC که در سال‌های اخیر بیشتر مطالعه شده است، لایه‌های نازک Ta هستند که معمولاً با روش کندوپاش مغناطیسی تهیه می‌شوند. کندوپاش مغناطیسی، یکی از محبوب‌ترین روش‌های لایه‌نشانی است که به‌طور گسترده در پوشش‌دهی ترکیبات پایه تانتالم استفاده می‌شود [۵]. این روش به‌طور گسترده‌ای برای رسوب‌دهی فلزات نسوز مانند تانتالم، تیتانیم و نیوبیم استفاده می‌شود چراکه برای رسوب‌دهی این فلزات به روش تبخیری به دمای بسیار بالایی نیاز است. [۶-۸].

پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی بررسی پارامترهای فرایند کندوپاش مغناطیسی جهت ایجاد پوشش‌های پایه تانتالم انجام شده است که در این مقاله، مروری بر برخی از پارامترهای مؤثر بر خواص پوشش‌های پایه تانتالم انجام شده است.

پارامترهای فرایند کندوپاش مغناطیسی

پارامترهای خارجی نظیر شرایط خلأ، توان ورودی، ترکیب و میزان گاز ورودی، فشار کاری، فشار پایه، دما و نوع زیرلایه، ولتاژ بایاس، لایه‌های میانی و فاصله‌ی زیرلایه تا تارگت، به شدت پارامترهای ذاتی و در نتیجه ساختار و خواص پوشش‌های تشکیل یافته را تحت تأثیر قرار می‌دهند. با تنظیم این پارامترهای خارجی می‌توان لایه‌های یکنواخت و متراکم ایجاد کرد [۹]. از بین پارامترهای مذکور شرایط خلأ، نوع زیرلایه، لایه‌های میانی، ترکیب گاز ورودی، ولتاژ بایاس زیرلایه و دمای زیرلایه به‌طور خلاصه مرور می‌شود:

۱- شرایط خلأ

شاوور و همکاران [۳]، براساس آزمایش‌های خود نتیجه گرفتند که فاز β به صورت یک فاز نیمه پایدار با مقدار نسبتاً کمی از اتم‌های خارجی به‌عنوان ناخالصی در فیلم تانتالم تشکیل شده است. آن‌ها خاطر نشان کردند که زیرلایه‌های بدون آلودگی و شرایط خلأ کامل با توجه به گازهای خنثی حفظ شده در حین کندوپاش، فاز α را ایجاد می‌کنند.

۲- نوع زیرلایه

فانستین و همکاران [۱۰]، اثر زیرلایه را روی تشکیل فازهای تانتالم مطالعه کردند. تانتالم بر روی بیست ماده زیرلایه‌ی مختلف کندوپاش شد که شامل مواد تک‌کریستال، پلی‌کریستال و آمورف بود. زیرلایه‌ها براساس تأثیر آن‌ها روی ساختار تانتالم تقسیم‌بندی شدند. زیرلایه‌هایی که به‌راحتی اکسید می‌شوند یا در هوا و در دمای اتاق اکسیدهای سطحی تشکیل می‌دهند (مانند SiO_2 ، مس، نیکل، شیشه آمورف) فاز β را جوانه‌زنی می‌کنند. زیرلایه‌هایی که اکسید سطحی تشکیل نمی‌دهند (مانند طلا، رودیم، پلاتین و تنگستن) حتی در اتمسفرهای اکسیداسیون همیشه فاز α را جوانه‌زنی می‌کنند. در نهایت زیرلایه‌هایی که در هوا در دمای اتاق اکسیدهای سطحی تشکیل نمی‌دهند اما می‌توانند در دماهای بالا اکسید شوند، همواره فاز α را زمانی که هنوز زیرلایه اکسید نشده است و تانتالم بلافاصله روی زیرلایه رسوب‌دهی شده، جوانه‌زنی می‌کنند. لوییکا و همکاران [۱۱]، اثر نوع زیرلایه بر ساختار لایه



چگونگی فرایند لایه‌نشانی نانوکامپوزیت Ag/Ta_xO_x بر روی لایه میانی Ag را نشان می‌دهد.

۴- ترکیب گاز ورودی

سلطانعلی‌پور و همکاران [۱۶]، اثر گازهای ورودی مختلف بر زبری پوشش‌های پایه تانتالم تشکیل شده را بررسی کردند. مشاهدات آن‌ها نشان داد که از بین گازهای آرگون، نیتروژن و اکسیژن پوشش‌های تشکیل در اتمسفر آرگون مقادیر زبری کمتری داشته‌اند. اثرات شرایط کندوپاش روی خواص کریستالینه توسط راترسمن و همکاران [۱۷]، بررسی شده است. لایه‌های نازک تانتالم روی شیشه و آلومینا (Al_2O_3) تحت شرایط مخلوط گازهای نیتروژن و آرگون رسوب‌دهی شده بودند. فیلم‌های رسوب‌دهی شده بدون نیتروژن، فاز β و ساختار بلوری دارند. یک تغییر در ساختار فیلم از β تانتالم به α تانتالم در حدود ۵٪ اتمی نیتروژن مشاهده شده بود.

۵- ولتاژ بایاس زیرلایه

پارامتر دیگری که مشخص شده روی ساختار تانتالم تاثیر می‌گذارد، ولتاژ بایاس زیرلایه است. بایاس زیرلایه، پارامتر مهمی برای زیرلایه‌های متخلخل است. این پارامتر، انرژی اتم‌های موجود در زیرلایه را در حین فرایند رسوب‌دهی کنترل می‌کند [۱۸]. کاتانیا و همکاران [۱۹]، گزارش کردند که بیشترین بایاس زیرلایه (V) ۱۰۰- باعث تشکیل فاز β می‌شود. اما نتایج متفاوتی برای شرایط مختلف فرایندی توسط محققین دیگر مشاهده شده است. به‌طور مثال ماتسون و همکاران [۲۰]، گزارش کردند که بیشترین بایاس زیرلایه V ۱۱۰- دلیل تشکیل فاز α است. این مشاهدات با گزارش‌های سایر محققین مطابقت دارد، که ولتاژ بایاس بسیار بالا منجر به تشکیل فاز α می‌شود.

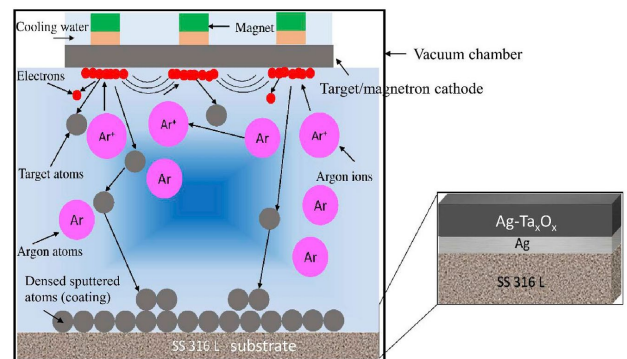
۶- دمای زیرلایه

ماتسون و همکاران [۲۱]، مشاهده کردند که دمای زیرلایه بر مشخصات رشد فیلم تاثیر می‌گذارد. در دماهای زیرلایه پایین‌تر از $350^\circ C$ ، مخلوطی از فاز β و α تانتالم تشکیل شده است. در مطالعه‌ی آن‌ها، زیرلایه فولاد AISI ۴۳۴۰ حرارت داده شده با استفاده از گسیل گرمایونی بود که در مدت ۳۰ دقیقه با اعمال

نازک تانتالم تشکیل را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که زیرلایه $Co-Cr-Mo$ رشد فاز بتا را تقویت می‌کند در حالی که زیرلایه $Ti-Al-Nb$ به تشکیل فاز آلفا کمک می‌کند.

۳- اثر لایه‌های میانی

وستوود [۱۲]، اثر لایه‌های رسوب‌دهی شده‌ی تانتالم را روی لایه‌های زیرین از طلا و طلا روی شیشه و زیرلایه‌های آلومینای پلی‌کریستال را مطالعه کرد. مشاهده شد که درصد فاز BCC تانتالم در فیلم‌های رسوب‌دهی شده روی زیرلایه پوشش‌دهی شده با این زیرلایه‌ها نسبت به فیلم‌های رسوب‌دهی شده روی زیرلایه‌های بدون پوشش بیشتر بود. هوگووین و همکاران [۱۳]، مشاهده کردند که فاز β همواره روی SiO_2 و مس (۱۱۱)، با جهت‌گیری دانه‌های Ta که به ضخامت لایه Ta بستگی دارد تشکیل شده است، درحالی‌که فاز α تانتالم روی لایه‌ی زیرین آلومینیم (۱۱۱) تشکیل شده است. تاناکا و همکاران [۱۴]، دریافتند که فاز تشکیل شده از تانتالم کندوپاش شده روی لایه‌ی زیرین مولیبدن به ضخامت آن بستگی دارد. زمانی که ضخامت مولیبدن افزایش یافته بود، درصد فاز α تشکیل شده بیشتر شده بود. الیاس و همکاران [۱۵]، لایه‌های نازک نانوکامپوزیتی TaO و Ag را بر روی لایه میانی Ag به روش کندوپاش مغناطیسی، پوشش‌دهی کردند. آن‌ها برای افزایش استحکام چسبندگی و کریستالینه، نمونه‌های لایه‌نشانی شده را تحت عملیات حرارتی قرار دادند. مشاهده کردند که لایه میانی Ag به‌طور کامل بلوری شده اما فاز Ta_xO_x ذات آمورف خود را حفظ کرده است. شکل ۱ نیز طحوراه‌ای از



شکل ۱: طحوراه‌ای از نحوه لایه‌نشانی نانوکامپوزیت Ag/Ta_xO_x بر روی لایه میانی Ag که بر روی زیرلایه فولاد زنگ نزن ۳۱۶ رسوب‌دهی شده است [۱۷].



نتیجه گیری

براساس مرور کلی که در این تحقیق انجام شد، تاثیر پارامترهای فرایند لایه‌نشانی در خلأ بر خواص پوشش‌های پایه تانتالم مطالعه شده است. از بین پارامترهای مختلف فرایند کندوپاش مغناطیسی، شرایط خلأ، نوع زیرلایه، لایه‌های میانی، ترکیب گاز ورودی، ولتاژ بایاس و دمای زیرلایه بررسی شده‌اند که نتایج نشان می‌دهند خواص، ساختار و فازهای متفاوتی برای لایه‌های نازک تانتالم حاصل شده است.

مرجع‌ها

[۱] سلطانه‌لی پور، مهدیه؛ خلیل‌علافی، جعفر؛ «زیست‌مواد فلزی و پوشش‌های زیستی»، چاپ اول؛ انتشارات فروزش؛ سال ۱۳۹۸.

[۲] C. K. Drummond, A. Hdeib and F. R. Khan; “Applications of Medical Implant Materials, ASM Handbook”; Volume 23, (2012), 278.

[۳] A. Yohannan; “Characterisation of alpha and beta phases of Tantalum Coatings”; *Public Health*, (2001) 125.

[۴] L.A. Clevenger, A. Mutscheller, J.M.E. Harper, C. Cabral, K. Barnak; “The relationship between deposition conditions, the beta to alpha phase transformation, and stress relaxation in tantalum thin films”, *J. Appl. Phys.* **72** (1992) 4918–4924.

[۵] M. Soltanalipour, J. Khalil-Allafi; “Superior in vitro corrosion resistance of the novel amorphous TaTaxOy multilayer coatings on self-expanding nitinol stents”, *J. Surface & Coatings Technology* **446** (2022) 128767.

[۶] J. Khalil-Allafi, H. Daneshvar, M.S. Safavi, V. Khalili; “A survey on crystallization kinetic behavior of direct current magnetron sputter deposited NiTi thin films”, *J. Phys. B Condens. Matter.* **615** (2021).

[۷] M.S. Safavi, M.A. Surmeneva, R.A. Surmenev, J. Khalil-Allafi; “RF magnetron sputter deposited hydroxyapatite-based composite & multilayer coatings: A systematic review from mechanical, corrosion, and biological points of view”, *J. Ceram. Int.* **47** (2021) 3031–3053.

[۸] M. Sarraf, A. Dabbagh, B. Abdul Razak, B. Nasiri-Tabrizi, H.R.M. Hosseini, S. Saber-Samandari, N.H. Abu Kasim, L.K. Yean, N.L. Sukiman; “Silver oxide nanoparticles-decorated tantalum nanotubes for enhanced antibacterial activity and osseointegration of Ti6Al4V”, *J. Mater. Des.* **154** (2018) 28–40.

[۹] J.Z. Shi, C.Z. Chen, H.J. Yu, S.J. Zhang; “The effect of process conditions on the properties of bioactive films prepared by magnetron sputtering”, *J. Vacuum.* **83** (2009) 249–256.

[۱۰] L.G. Feinstein, R.D. Huttemann; “Factors controlling the structure of sputtered Ta films”, *J. Thin Solid Films.* **16** (1973) 129–145.

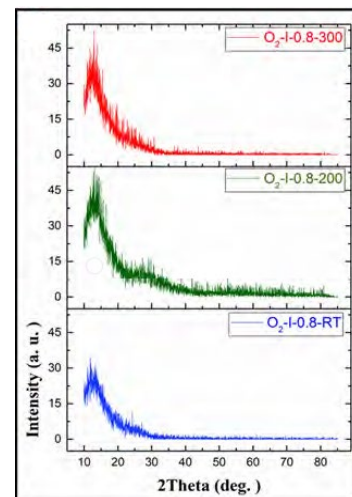
[۱۱] L. Hallman, P. Ulmer; “Effect of sputtering parameters and substrate composition on the structure of tantalum thin films”, *J. Applied Surface Science*, **282** (2013) 1–6.

[۱۲] W.D. Westwood; “The influence of conducting underlays on the properties of sputtered tantalum films”, *J. Thin Solid Films.* **6** (1970) 307–320.

[۱۳] R. Hoogeveen, M. Moske, H. Geisler, K. Samwer; “Texture and phase transformation of sputter-deposited metastable Ta films and Ta/Cu multilayers”, *J. Thin Solid Films.* **275** (1996) 203–206.

[۱۴] K.W. Kwon, C. Ryu, R. Sinclair, S.S. Wong; “Evidence of heteroepitaxial growth of copper on beta-tantalum”, *J. Appl. Phys. Lett.* **71** (1997) 3069–3071.

پتانسیل $V = 60$ بین رشته تانتالم گرم شده و آند بود. مشاهده شده که در دماهای زیرلایه $50^\circ C$ ، 72% تانتالم رسوب‌دهی شده ساختار BCC دارد. فیشر و همکاران [۲۲]، فیلم‌های Ta را در دماهای زیرلایه $400^\circ C$ رسوب‌دهی کردند. در مطالعه‌ی آنها مشخص شد که در دماهای زیرلایه زیر $400^\circ C$ ، فاز β تشکیل شده بود درحالی‌که در بالای این دما فاز BCC تانتالم تشکیل شده بود. این آزمایش‌ها با استفاده از گاز آرگون به عنوان گاز کندوپاش روی زیرلایه سیلیکونی انجام شده بود. سلطانه‌لی پور و خلیل‌علافی [۵]، تاثیر دماهای زیرلایه بر ساختار تانتالم لایه‌نشانی شده روی آلیاژ NiTi را بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که در دماهای زیرلایه 25 ، 200 و $300^\circ C$ در هر سه حالت، صرفاً فاز آمورف تانتالم تشکیل شده است. شکل ۲ نیز الگوی پراش اشعه ایکس لایه نازک (GI-XRD) را نشان می‌دهد. از آنجایی که در هیچ یک از نمونه‌ها پیک شارپی مشاهده نمی‌شود، اشاره به آمورف بودن پوشش‌ها دارد. علت این است که حتی دمای $300^\circ C$ در مقایسه با دمای ذوب تانتالم یعنی $3017^\circ C$ بسیار پایین است ($T_s/T_m=0.17$). لذا، آنها حرکت کمی دارند و برای آنها غیرممکن است که بتوانند موقعیت خود را برای تشکیل یک ساختار بلوری آراسته کنند. بنابراین تمامی پوشش‌های لایه‌نشانی شده، غیربلورین یا آمورف هستند.



شکل ۲: الگوهای پراش اشعه ایکس لایه نازک برای پوشش‌های تانتالم لایه‌نشانی شده به روش کندوپاش مغناطیسی که در هر سه نمونه تنها فاز آمورف تانتالم تشکیل شده است [۵].



- [۱۹] P. Catania, R.A. Roy, J.J. Cuomo, P. Catania, R.A. Roy, J.J. Cuomo; “Phase formation and microstructure induced by bias sputtering changes in tantalum thin films”, **1008** (2014).
- [۲۰] D.W. Matson, E.D. McClanahan, J.P. Rice, S.L. Lee, D. Windover; “Effect of sputtering parameters on Ta coatings for gun bore applications”, *J. Surf. Coatings Technol.* **133–134** (2000) 411–416.
- [۲۱] D.W. Matson, M.D. Merz, E.D. McClanahan, D.W. Matson, M.D. Merz, E.D. McClanahan; “High rate sputter deposition of wear resistant tantalum coatings”, **1791** (2014).
- [۲۲] D. Fischer, O. Meissner, B. Bendjus, J. Schreiber, M. Stavrev, C. Wenzel; “AFM Characterization of Ta-based Di-usion Barriers for Use in Future Semiconductor Metallization”, **25** (1997) 522–528.
- [۱۵] R. Alias, R. Mahmoodian, M.H. Abd Shukor; “Development and characterization of a multilayer silver/silver-tantalum oxide thin film coating on stainless steel for biomedical applications”, *Int. J. Adhes. Adhes.* **92** (2019) 89–98.
- [۱۶] M. Soltanalipour, J. Khalil-Allafi, A. Mehrvarz, “Study of tantalum-based coatings magnetron sputtered on NiTi alloy in argon and argon/nitrogen atmosphere”, *J. Ceramics International*, (2023).
- [۱۷] M.H. Rottersman, M.J. Bill, B.T. Laboratories, I. Introduction; “The effects of sputter conditions on the physical properties of tantalum films deposited from a planar magnetron cathode were investigated using voltages between 250 and 600 V.”, *J. The films were deposi.* **61** (2000) 281–288.
- [۱۸] O.K. Alexeeva, V.N. Fateev, “Application of the magnetron sputtering for nanostructured electrocatalysts synthesis”, *Int. J. Hydrogen Energy.* **41** (2016) 3373–3386.



جریان پایا در حلقه های کوانتومی مندلیبرات

سلیمانی، مهدی^۱؛ حاجی تقی طهرانی، داوود^۲

^۱ دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم

^۲ دانشگاه کلن، آلمان

solamani.mehdi@gmail.com

چکیده

در این کار در حلقه های کوانتومی دوبعدی مختلف شکل بیرونی حلقه کوانتومی مندلیبرات با مرتبه های مختلف و شکل داخلی حلقه بصورت تراپیکورن یا پایین برفدانه کنخ فرض شده است. اثر مراتب مختلف این فراکتال ها روی ترازهای انرژی، توابع موج و جریان پایا بررسی شده است. برای این کار از حل عددی معادله شرودینگر حاکم بر مساله استفاده شده است.

Persistent current in Mandelbrot quantum rings

Solaimani, Mehdi¹; HajitaghiTehrani, Davood²

¹ Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom

² University of Cologne, Cologne, Germany

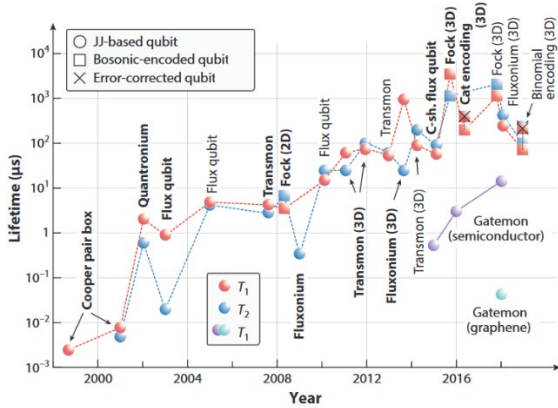
Abstract

In this work, in different two-dimensional quantum rings, the outer shape of the Mandelbrot quantum ring with different orders and the inner shape of the ring is assumed as a tricorn or Koch snowflake. The effect of different orders of these fractals on energy levels, wave functions and persistent current has been investigated. For this purpose, the numerical solution of the Schrödinger equation governing the problem has been used.

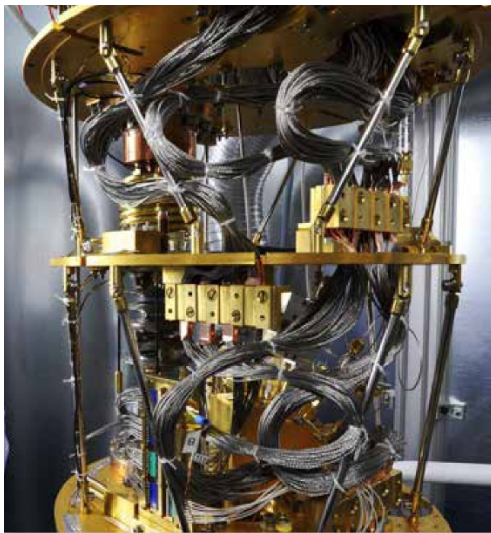
PACS No. 72



مقدمه



شکل ۱



شکل ۲

بر اساس نمودار ۱، عملکرد ادوات qubit ابررسانا در سالهای اخیر، مطابق قانونی مشابه با قانون مور در حال پیشرفت بوده است [۱].

از جنبه تحقق مفهوم محاسبات کوانتومی، هم در فرآیند ساخت و هم در فرآیند بکارگیری و عملکرد کامپیوترهای کوانتومی، فناوری خلا نقشی اساسی در هر دو مورد ایفا می نماید. از جنبه ساخت، تجهیزات و دستگاههای خلا ابرزهای اصلی ساخت افزاره های ابررسانا قلمداد می شوند. فرآیند ساخت ادوات ابررسانا بر اساس چند مرحله رشد/لایه نشانی و همچنین چند مرحله ایجاد الگو در لایه های مختلف انجام می گردد که اغلب شامل بر الگوسازی از طریق لیتوگرافی، رسوب فلز، زدایش و اکسیداسیون کنترل شده لایه های نازک و دو بعدی مواد با قابلیت ابررسانایی مانند آلومینیوم یا نیوبیم می باشد که معمولا فرآیند ساخت بر روی زیرلایه هایی از جنس سیلیکون یا یاقوت کبود انجام میشود [۱]. همچنین از جنبه بکارگیری لایه های ابررسانا ها (-ی نوع یک)، کاهش دما در دستگاه یا آزمایش مربوطه تا حدود چند ده میلی کلون ضرورت دارد، که لذا اصولا مدارات کامپیوترهای کوانتومی مطابق شکل ۲، در محفظه های یخچال رقیق سازی هلیوم-۳/هلیوم-۴ پیاده سازی و بکارگرفته می شوند، که در این گونه یخچال ها، خلا سازی سیستم نقشی اساسی در عملکرد سیستم از جنبه ایزولاسیون حرارتی ایفا می کند [۲].

تصادفی، یک آنسابل از سیستم های کوانتومی دو ترازی مانند اتمهای نیتروژن یا بیسوت آرایش شده در بدنه یک زیرلایه مناسب، که در مجاورت یک حلقه رزونانسی بکار گرفته شده، مورد مطالعه واقع شده است (شکل ۳ ب) [۴]. تنوع رهیافت های توسعه مدارات کوانتومی نسبتا زیاد است، با این حال، بکارگیری حلقه های مداری و رزوناتورها در عموم طرح های پیشنهادی مورد توجه و استفاده بوده است. در مقاله حاضر، ما توجه مان را بر روی بکارگیری ساختارهای فراکتالی در تحقق و پیاده سازی حلقه های مداری و رزوناتور ها معطوف می نماییم. بخصوص با توجه به آنکه، در سالهای اخیر، با توجه به چگالی پرشدگی بالا در یک

جنبه دیگری که در توسعه کامپیوترهای کوانتومی حائز اهمیت است، رهیافت ها و مدارات پایه برای تحقق این گونه سیستم های محاسباتی است. در توسعه کامپیوترهای کوانتومی چندین رهیافت مختلف توسط محققان معرفی و در دست مطالعه است. بعنوان مثال، در یک سیستم محاسباتی کوانتومی ابررسانا توسط شرکت آی بی ام، مطابق شکل ۳ (الف) ادوات کوانتومی شامل بر qubit، readout resonators، quantum bus، و readout resonators مورد استفاده قرار گرفته است که این مدار به منظور پیاده سازی یک quantum memory با قابلیت اعتماد بالا مورد مطالعه بوده است [۳]. بعنوان یک مثال دیگر، اخیرا برای پیاده سازی یک حافظه با دسترسی



ناحیه محدود (close-packed) که به کمک ساختارهای فراکتالی حاصل می گردد و در نتیجه تضمین ضریب کیفیت بالای مدار، ساخت و مطالعه رزوناتور و حلقه های ابرسانا با ساختار فراکتالی مورد توجه قرار گرفته است شکل ۴ (الف) [۵]. همچنین در یک مطالعه دیگر، تشدید کننده قابل تنظیم کم تلفات با طیف فرکانس بالا چند خطی برای محدوده مایکروویو با لحاظ کردن ساختار فراکتالی توسعه داده شده است شکل ۴ (ب) [۶]. در اینجا، برای اولین بار با کمک هندسه مندلبرات اثر این شکل فراکتالی برای شبیه سازی بی نظمی در شکل حلقه های کوانتومی استفاده است. ادامه، اثر این شکل فراکتالی روی جریان پایا در نانوبلورهای دوبعدی نیم رسانای AlGaAs بررسی شده است.

فرمالیزم

در اینجا حلقه کوانتومی مندلبرات در صفحه xy را فرض کرده ایم. معادله شرودینگر دوبعدی برای الکترونها را به شکل زیر می نویسیم:

$$H = \frac{\left(\hat{p} - \frac{e}{c}\hat{A}\right)^2}{2m^*} + V(x, y) \quad (1)$$

که در آن e , c , A , p , V , m^* و H به ترتیب بار الکترون، سرعت نور، پتانسیل الکتریکی، تکانه خطی، انرژی پتانسیل، جرم موثر و هامیلتونی سیستم است. با قطری سازی هامیلتونی (۱)، ویژه انرژی های و ویژه توابع بدست آمدند. در دمای صفر، جریان پایا می شود [۷]:

$$I(\varphi) = -\frac{\partial E_0(\varphi)}{\partial \varphi} \quad (2)$$

که $E_0(f)$ انرژی حالت پایه به ازای شار f می باشد. پتانسیل $V(x,y)$ از ترکیب مندل برات Z با تراپیکورن یا برفدانه k_n حاصل شده است.

اگر داخل مندل برات باشد، $V(x,y) = 0$

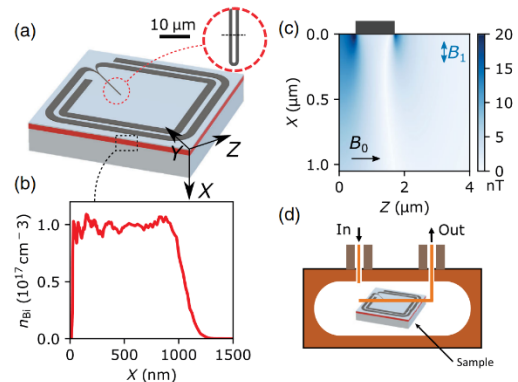
اگر داخل تراپیکورن یا برفدانه k_n باشد، $V(x,y) = dE_c$

هرجای دیگر، $V(x,y) = \text{inf}$

(الف)

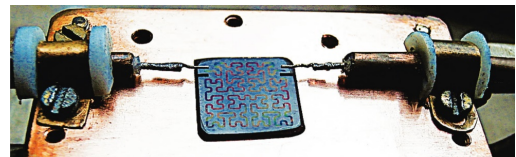


(ب)

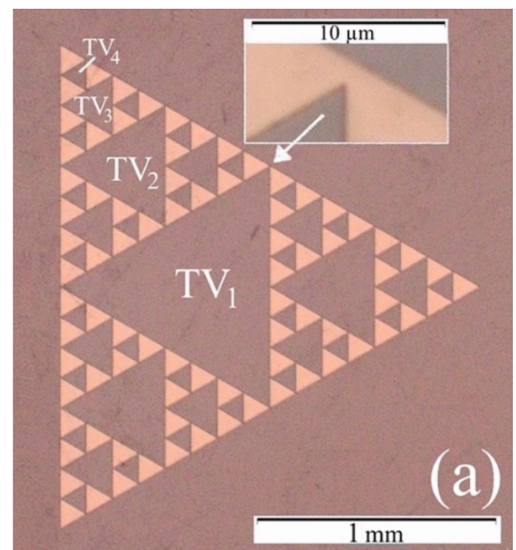


شکل ۳

(الف)



(ب)

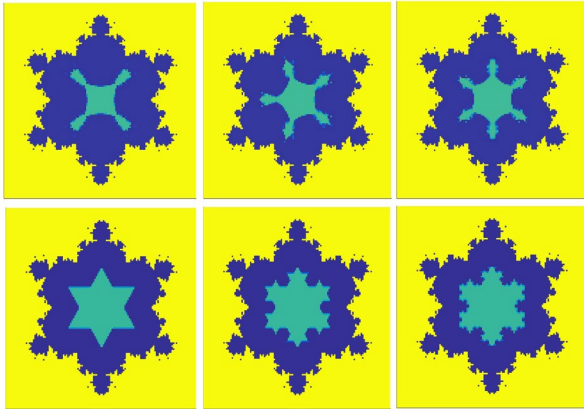


(a)

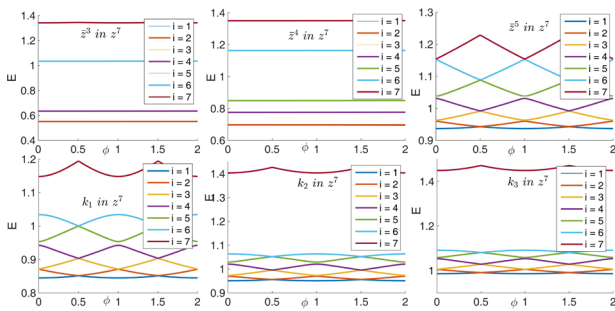
شکل ۴



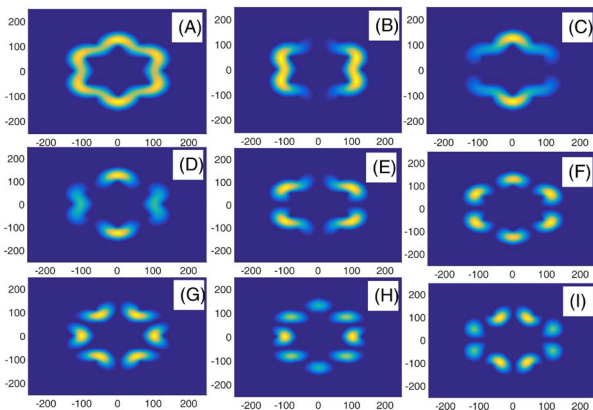
شکل (۸): نمودار جریان بر اساس پتانسیل و شارهای مختلف و تعداد تکرار برفدانه کخ را نشان می دهد. در نمودار بالا، حالت $m=5$ با دو حالت دیگر فرق دارد و تنها در این حالت جریان پایا در این بازه شار دیده می شود. در شکل پایین هم می توان شدت جریان را تغییر n تنظیم کرد.



شکل ۵: در ردیف بالا تراپکون، و در ردیف پایین برفدانه کخ داخل مندل برات قرار گرفته است. از سمت چپ به راست $n=1,2,3$ و $q=3,4,5$



شکل ۶: نمودار جریان بر اساس پتانسیل، و شارهای مختلف. i اشاره به ویژه مقدار انرژی دارد، به عنوان مثال $i=1$ حالت پایه است.



شکل ۷: قدر مطلق تابع موج برای برفدانه کخ $n=1$ داخل مندل برات.

در این مقاله $dE_c = 0.65dE_g$ و $dE_g = 1.247x$ و $x=0.7$ و جرم $m^* = (0.067 + 0.083x)m_e$ است.

در حالت کلی مندل برات با F بار تکرار (در این مقاله $F=100000$) رابطه زیر حاصل می شود

$$z = z^m + c$$

که در رابطه بالا، $c = x + iy$ و y و x دو نقطه دلخواه در دستگاه مختصات هستند. m عدد صحیح و اختیاری می باشد. در این مقاله $m=7$ انتخاب شده است. اگر بعد از F بار تکرار $|z| \leq 2$ آنگاه نقطه c (یا جفت (x,y) داخل مندل برات است، در غیر این صورت به خارج از آن تعلق دارد. در این ناحیه پتانسیل صفر است.

نتایج و بحث

در شکل (۵) طرح‌واره هایی از یک حلقه کوانتومی دوبعدی مندلبرات با مرتبه های مختلف رسم شده است. در ردیف بالا تراپکون، و در ردیف پایین برفدانه کخ داخل مندل برات قرار گرفته است.

شکل (۶) نمودار جریان بر اساس پتانسیل، و شارهای مختلف را نشان می دهد. با افزایش مرتبه q در \bar{z}^q در ردیف اول شکل (۶) ترازهای انرژی در بازه بزرگتری از انرژی توزیع می شوند. در حالیه برای ردیف دوم با افزایش n در k_n انرژیها در بازه انرژی کمتری توزیع می شوند. شکل (۷) قدر مطلق تابع موج برای برفدانه کخ $n=1$ داخل مندل برات را نشان می دهد. در توابع موج در قسمت چاه متمرکز شده اند و با افزایش درجه برانگیختگی تعداد قله های تابع موج بیشتر می شود.

نتیجه گیری

در این کار نشان داده شد که با افزایش مرتبه q در حلقه های کوانتومی مندلبرات- تراپکون، ترازهای انرژی در بازه بزرگتری از انرژی توزیع می شوند، در حالیه برای با افزایش n در حلقه های کوانتومی مندلبرات- کوخ، انرژی ها در بازه انرژی کمتری توزیع می شوند. تنظیم شدت جریان پایا و یا امکان برقراری جریان پایا در این حلقه ها بررسی شد.



مرجع ها

[1] Kjaergaard, Morten, Mollie E. Schwartz, Jochen Braumüller, Philip Krantz, Joel I-J. Wang, Simon Gustavsson, and William D. Oliver. "Superconducting qubits: Current state of play." Annual Review of Condensed Matter Physics 11 (2020): 369-395.

[2] Oxford Instruments, Brochures, Principles of dilution refrigeration, Sep 15th 2023, https://nanoscience.oxinst.com/assets/uploads/NanoScience/Brochures/Principles%20of%20dilution%20refrigeration_Sept15.pdf.

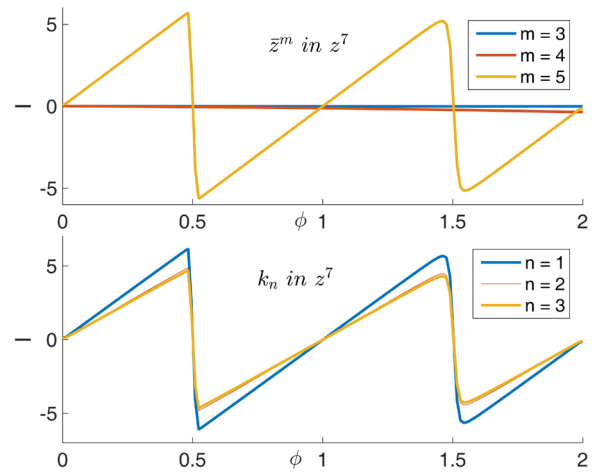
[3] Gambetta, Jay M., Jerry M. Chow, and Matthias Steffen. "Building logical qubits in a superconducting quantum computing system, npj Quantum Information 3, 2." arXiv preprint arXiv:1510.04375 (2017).

[4] O'Sullivan, James, Oscar W. Kennedy, Kamanasish Debnath, Joseph Alexander, Christoph W. Zollitsch, Mantas Šimėnas, Akel Hashim et al. "Random-access quantum memory using chirped pulse phase encoding." Physical Review X 12, no. 4 (2022): 041014.

[5] Kalenyuk, A. A., and S. I. Futimsky. "Miniature Meander-and Fractal-Shaped Microstrip Resonators." *Металлофизика и новейшие технологии* (2018).

[6] Vlasko-Vlasov, Vitalii K., Ralu Divan, Daniel Rosenmann, Ulrich Welp, Andreas Glatz, and Wai-Kwong Kwok. "Multiqanta flux jumps in superconducting fractal." Scientific Reports 13, no. 1 (2023): 12601.

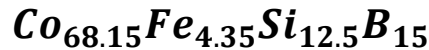
[7] Y. Hancock, J. Suorsa, E. Töölö, and A. Harju, "Fractional periodicity and magnetism of extended quantum rings", Phys. Rev. B 77, 155103 (2008).



شکل ۸: نمودار جریان بر اساس پتانسیل، و شارهای مختلف. n تعداد تکرار برفدانه کنج.



تأثیر دمای بازپخت در خلأ و پهنای نوار بر امپدانس مغناطیسی در آلیاژ آمورف



مرادی، مهرداد؛ نوه حاج حسینی، فاطمه

پژوهشکده نانو دانشگاه کاشان، کیلومتر ۶ بلوار قطب راوندی، کاشان

f.n.h.hoseini1998@gmail.com and m.moradi@kashanu.ac.ir

چکیده

در این مقاله، اثر بازپخت کوره‌ای تحت خلأ بر امپدانس مغناطیسی بر روی نوارهای آلیاژ $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ با پهنای متفاوت در دماهای مختلف بررسی شد. نوارهای مغناطیسی در یک محفظه‌ی خلأ با فشار 4×10^{-3} میلی‌بار به مدت ۶۰ دقیقه بازپخت شدند. مشاهدات نشان داد که مقدار امپدانس مغناطیسی در تمام فرایندهای بازپخت افزایش پیدا کرده است و بیشترین درصد امپدانس مغناطیسی بزرگ برای نوار با پهنای ۰/۸ میلی‌متر در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد به مقدار ۱۶۷ درصد و برای نوار با پهنای ۲ میلی‌متر در همان دما به مقدار ۱۱۳ درصد اندازه‌گیری شد. بازپخت در دماهای بالاتر به طور مشهود کاهش امپدانس مغناطیسی را در پی داشت. افزایش در اثر امپدانس مغناطیسی بزرگ نشانگر تأثیر مثبت کاهش پهنای نمونه بر این اثر است و بازپخت در دمای مناسب باعث کاهش تنش‌های داخلی شده و افزایش امپدانس مغناطیسی بزرگ را به همراه خواهد داشت.

Influence of Annealing in vacuum Conditions on the Giant Magneto Impedance in Co-base Ribbons

Moradi, Mehrdad; Naveh hajhoseini, Fatemeh

Institute of Nanoscience and Nanotechnology, University of kashan, kashan, Iran

Abstract

In this paper, the effect of annealing in vacuum on giant magneto impedance (GMI) in $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ amorphous alloys ribbons by various widths in different temperatures has been investigated. Magnetic ribbons in the vacuum chamber with pressure of 4×10^{-3} mbar were annealed. The GMI values were increased for all the samples. The maximum of GMI ratio was about 167 % for 0.81 mm sample width and 113 % for 2 mm sample width were obtained, in 500°C for both ribbons and then they decreased obviously. Positive impact of decreasing width of ribbons, indicator of increasing of GMI valve. Decreasing of internal stresses because of annealing in appropriate temperature also due to increasing the GMI valve.



مقدمه

بازپخت این نوارها به منظور حذف نواقص ساخت، افزایش نفوذپذیری مغناطیسی، کاهش تنگش مغناطیسی و وامغناطیدگی در جهت بهبود عملکرد آنها در کاربردهای حسگری همواره مورد علاقه پژوهشگران بوده است [4-5]. بازپخت‌هایی از قبیل، عبور جریان مستقیم و متناوب از نوار، گرم کردن نمونه درون کوره و تاباندن لیزر به نوار، همگی تنش‌های داخلی را آزاد می‌کنند و یک محور ناهمسانگردی القا می‌کنند می‌تواند باعث بهبود پاسخ امپدانس نمونه شود [5]. یکی از متداول‌ترین روش‌های بازپخت، گرما دادن به نمونه در کوره‌های خلأ و یا در حضور گازهای بی‌اثر است که به پخت کوره‌های معروف است. در این روش زمان پخت، دمای پخت، سرعت گرمادهی و پارامترهایی این چنین در بهینه کردن شرایط بازپخت قابل کنترل است. در این مقاله اثر بازپخت کوره‌های را بر روی نوارهای آلایژ آمورف کبالت پایه تحت خلأ با فشار 4×10^{-3} میلی‌بار مورد بررسی قرار گرفته است.

روش آزمایش

در این بررسی از نوارهای بی‌شکل کبالت پایه $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ که به روش انجماد سریع (مذاب چرخان) آماده شده اند و به ابعاد (طول ۵ سانتی متر و پهنای مختلف ۰/۸ میلی‌متر (نمونه A) و ۲ میلی‌متر (نمونه B) و ضخامت نمونه ۲۸/۸ میکرومتر می‌باشد. در فرایند بازپخت گرمایی نوارهای آمورف کبالت پایه در دماهای ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت در درون کوره با شرایط ذکر شده قرار داده شدند. به منظور ایجاد خلأ، لوله کوارتز استوانه‌ای شکل کوره از یک طرف به پمپ روتاری مکانیکی و از طرف دیگر به یک ترموکوپل و دماسنج که دمای مرکز کوره را اندازه‌گیری کند، وصل شده است. به منظور اندازه‌گیری امپدانس مغناطیسی، بهینه مقادیر جریان و فرکانس برای نمونه‌های مورد نظر در آزمایش جداگانه ای بررسی شد که در نهایت جریان ۷ میلی‌آمپر و فرکانس ۴ مگا هرتز انتخاب شد. برای اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت در راستای طول نوار، نمونه درون یک سیم‌پیچ استوانه‌ای که میدانی در بازه ی صفر تا ۱۰۰ اورستد ایجاد می‌کرد قرار داده شد. اندازه گیری مغناطیسی

امروزه حسگرهای مغناطیسی نقش مهمی در تجهیزات صنعتی و پزشکی پیدا کرده‌اند. انواع مختلفی از این حسگرها مانند حسگرهای القایی، اثر هال، مگنتوآپتیک، مقاومت مغناطیسی وجود دارند که در بین آنها حسگرهای مبتنی بر امپدانس مغناطیسی بر اثر امپدانس مغناطیسی به خاطر داشتن مزایایی از قبیل اندازه‌ی کوچک، حساسیت بالا، مصرف کم انرژی، دقت بالا و قیمت ارزان مورد توجه بیشتری قرار گرفته است [1]. حسگرهای مغناطیسی دقیق که بر پایه‌ی اثر امپدانس مغناطیسی بزرگ (GMI) کار می‌کنند را می‌توان از جمله حسگرهای نسل جدید نامید که همواره بهبود عملکرد و افزایش دقت این حسگرها مورد توجه محققان بوده است. اثر امپدانس مغناطیسی بزرگ را به زبان ساده می‌توان تغییرات امپدانس یک ماده رسانای مغناطیسی تحت اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی تعریف کرد که همزمان یک جریان متناوب $I = I_0 e^{i\omega t}$ با دامنه I_0 و با فرکانس $\omega = 2\pi f$ از نمونه عبور می‌کند. بنابراین امپدانس مغناطیسی نسبی با رابطه زیر تعریف می‌شود:

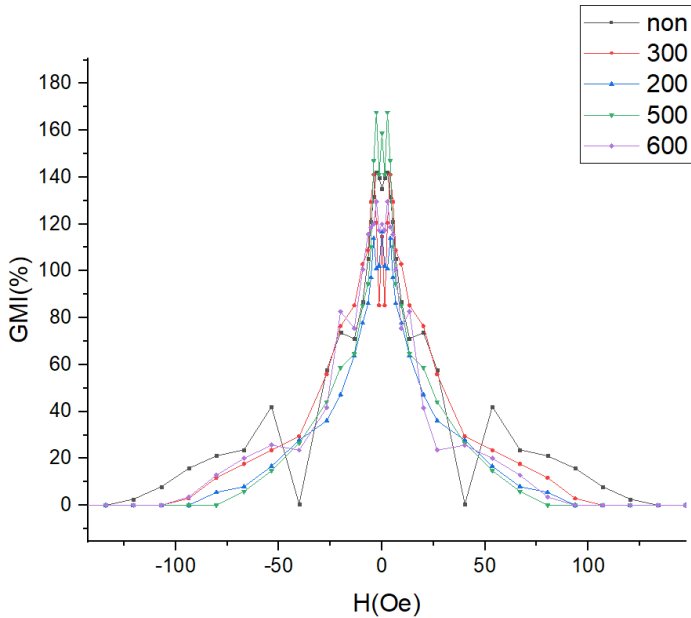
$$\text{GMI}(\%) = \frac{\Delta Z}{Z} = \left\{ \frac{Z(H) - Z(H_{max})}{Z(H_{max})} \right\} \quad (1)$$

که در آن $Z(H)$ امپدانس اندازه‌گیری شده در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت H و $Z(H_{max})$ امپدانس اندازه‌گیری شده در میدان مغناطیسی اشباع H_{max} است. حد اشباع به معنای آن است که تمام دوقطبی‌های مغناطیسی ماده با میدان خارجی هم راستا شوند.

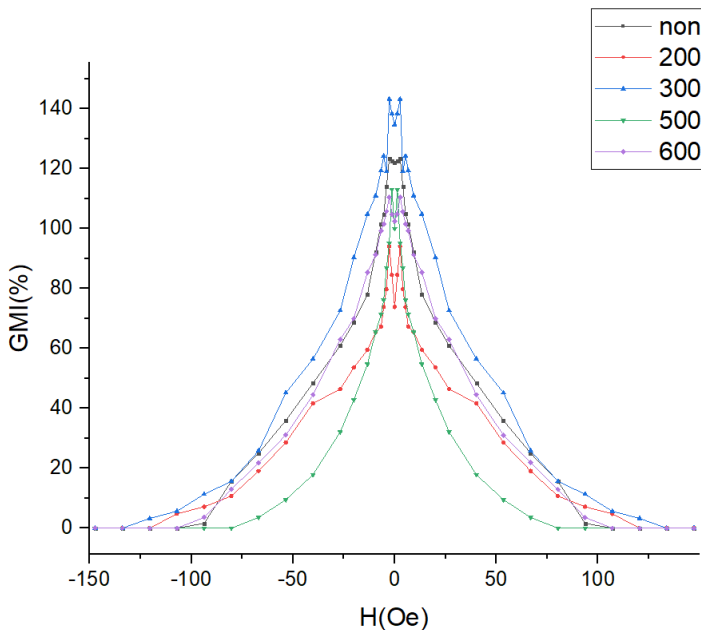
نوارهای مغناطیسی آمورف کبالت پایه به عنوان یکی از نوارهای پر کاربرد مورد استفاده در این نوع حسگرها به حساب می‌آیند. وجود خاصیت نظم کوتاه برد، شکل‌های مختلف هندسی مانند نوار، سیم، پودر و بلوک در ابعاد میلی‌متر و میکرومتر، نفوذپذیری مغناطیسی بالا، آماده‌سازی آسان آلایژهایی با تنگش مغناطیسی کوچک و مقاومت الکتریکی کم، آنها را برای این منظور ایده آل می‌کند [2,3]. اما مشکل عمده این نوارها این است که در حالت خام یعنی دقیقاً بعد از فرایند ساخت اثر GMI کمی از خود نشان می‌دهند. بنابراین



در شکل ۳ نمودار امپدانس مغناطیسی بزرگ برای نمونه A (خام و بازپخت شده) در دماهای مختلف و در فشار 4×10^{-3} میلی بار بازپخت شده اند. نسبت به میدان مغناطیسی اعمالی رسم شده است. نمودار نشان می دهد بیشترین تغییرات امپدانس مغناطیسی برای نمونه



شکل ۳: منحنی درصد امپدانس مغناطیسی بزرگ نمونه A خام و بازپخت شده در دماهای مختلف.

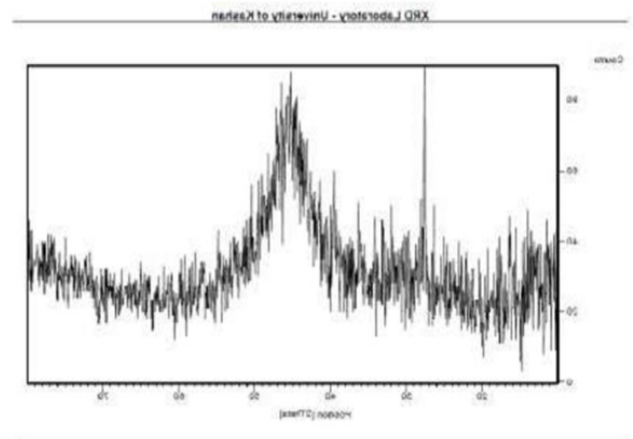


شکل ۴: منحنی درصد امپدانس مغناطیسی بزرگ نمونه B خام و بازپخت شده در دماهای مختلف.

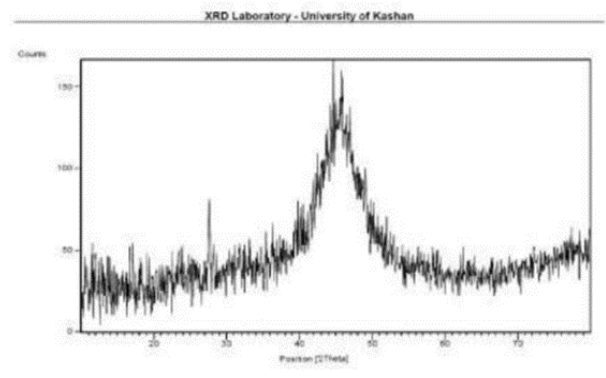
از طریق اندازه گیری دو ولتاژ به وسیله ی اسپلوسکوپ انجام شد که جزییات چیدمان اندازه گیری در مرجع ۳ ذکر شده است. با توجه به رابطه ی (۱) امپدانس مغناطیسی بزرگ بر حسب میدان مغناطیس اعمالی اندازه گیری می شود.

نتایج و بحث

در گام اول طیف پراش پرتو X که قبلا از نمونه ها گرفته شده را بررسی می کنیم تا از آمورف بودن نوارها اطمینان پیدا کرده باشیم. طیف پراش پرتو X نمونه ها به وسیله پرتو $Cu-K\alpha$ با طول موج 0.154 نانومتر انجام شد. البته لازم به ذکر است که پیک مشاهده شده در زاویه 28 درجه سانتی گراد در شکل ۱ و ۲ به علت تک بودن و شدت کم آن نمی تواند دلیلی بر بلوری شدن نمونه باشد.



شکل ۱: طیف پراش پرتو X نمونه A



شکل ۲: طیف پراش پرتو X نمونه B



GMI می شود روند بهبود خواص مغناطیسی و ساختاری با افزایش بیشتر دما متوقف شده و نمونه از نظر مغناطیسی سخت شده و نفوذپذیری مغناطیسی و در نتیجه درصد GMI آن کاهش می یابد. پس همان طوری که نفوذپذیری ماده به نظم داخلی مغناطش وابسته است، به هندسه ی نمونه، طبیعت القا، میدان، دما، فرکانس و توزیع تنش در ماده نیز بستگی دارد. تغییر در خواص مغناطیسی می تواند ناشی از جابجایی دیواره حوزه و یا چرخش گشتاورهای مغناطیسی در حوزه ها باشد. حال بررسی این دو نوار با پهنای متفاوت و پاسخ امپدانس مغناطیسی متفاوت نشان می دهند که نمونه B به دلیل پهنای بیشتر در اثر گرم شدن بیشتر حرکت دیواره حوزه های مغناطیسی آن کمتر از نظر مغناطیسی سخت می شود و در حقیقت حوزه ها در کناره ی نوار ثابت می شود و نتیجه نرمی مغناطیسی کمتری پیدا کرده و کاهش درصد GMI را در پی دارد.

نتیجه گیری

بازپخت کوره ای نوار های آمورف کبالت پایه با پهنای متفاوت می تواند درصد GMI آنها را افزایش دهد. بیشترین درصد GMI در دمای بهینه ۵۰۰ درجه سانتی گراد به ترتیب برای نوار های با پهنای ۰/۸ میلی متر و دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد برای نوارهای با پهنای ۲ میلی متر مقادیر ۱۶۷٪ و ۱۴۳٪ مشاهده شد. بازپخت در دمای بیشتر از ۵۰۰ درجه باعث کاهش شدید درصد GMI می شود. مقایسه نتایج آزمایش مبنی بر آن است که نمونه با پهنای کمتر با گرم شدن به نرمی مغناطیسی بالاتر و نفوذپذیری بیشتری رسیده است و در نتیجه درصد امپدانس بیشتر و حساسیت میدان بالاتری از خود نشان می دهد. تک قله ای بودن نمودارها نیز دلیل بر نداشتن ناهمسانگردی خالص بوده بدین معنا که با افزایش میدان اعمالی خارجی، امپدانس مغناطیسی شروع به کاهش می کند.

مرجع ها

- [1] C. Wu, J. Deng, J. Sun and Y. Yang; "A Design of Linear AGMI Sensor and Its Application for Tank Target Detection"; ICEMI (2009), pp. 21021-21026
- [2] M. Knobel, M. Vázquez, L. Kraus, "Giant magneto impedance", in: K.H. Buschow. (Ed.), Hand book of Magnetic Materials, vol. 15 (2003) .

بازپخت شده در دما ۵۰۰ درجه سانتی گراد به میزان ۱۶۷ درصد می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که بهترین شرایط برای تشخیص حساسیت مغناطیسی نمونه در نواحی نقطه شروع بلوری شدن نمونه است. همین طور در شکل ۴ نمودار امپدانس مغناطیسی بزرگ برای نمونه B (خام و بازپخت شده) در همان شرایط قبل بازپخت شده است، نسبت به میدان مغناطیسی اعمالی رسم شده است. برای این نمونه نمودار نشان می دهد که بیشترین تغییرات امپدانس مغناطیسی برای نمونه بازپخت شده در دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد به میزان ۱۴۳ درصد می باشد که البته همین موضوع نشان دهنده تاثیر پهنای نوار در بازپخت می باشد. البته همانطور که از شکل ها پیداست نوار آمورف با پهنای ۲ میلی متر (نمونه B) در حالت خام درصد GMI خیلی کمتری از خود نشان می دهند ولی در حالت بازپخت تاثیرات آن را مشاهده می کنیم که گاهی دمای بیشتر باعث بازپخت کمتر می شود. ولی در نوار آمورف با پهنای ۰.۸ میکرومتر (نمونه A) باز هم درصد امپدانس مغناطیسی نسبتاً قابل قبولی از خود نشان می دهد که این نشان دهنده تاثیر زیاد پهنای نوار در بازپخت دارد. عموماً، نسبت امپدانس مغناطیسی با میدان مغناطیسی تا یک بیشینه افزایش یافته و سپس کاهش می یابد که نشان از القا ناهمسانگردی در نمونه دارد. نسبت امپدانس مغناطیسی برای نمونه خام هر دو را نشان می دهد که نشان از $H = 0$ نوار تک قله ای متمرکز در ناهمسانگردی صفر نمونه دارد. نمونه های پخت شده دارای نمودار دو قله ای در امپدانس مغناطیسی هستند به آن معنی که با افزایش میدان اعمالی خارجی، امپدانس مغناطیسی در ابتدا افزایش یافته تا به بیشینه ای در میدان ناهمسانگردی رسیده و سپس کاهش می یابد. همانطور که در شکل های ۴ و ۳ دیده می شود، نمودارها تک قله ای می باشد که می توان دلیل آن را نداشتن ناهمسانگردی خالص دانست به آن معنا که با افزایش میدان اعمالی خارجی، امپدانس مغناطیسی شروع به کاهش می کند. بازپخت نمونه ها در دماهای پایین ابتدا باعث آزاد شدن آن از تنش های داخلی می شود. با افزایش دمای بازپخت، نمونه ها به سوی بلورین شدن، تشکیل نانوبلورک ها و نرمی مغناطیسی رفته که همراه با افزایش نفوذپذیری مغناطیسی آنها می باشد. افزایش نفوذپذیری مغناطیسی خود باعث افزایش درصد



- [5] S. Zhang, J. Sun, D. Xing “Improvement of giant magneto impedance of Co-rich melt extraction wires by stress-current annealing”, *Rare Metals*, 30, 327 (2011).
- [6] M. Coisson, S. N. Kane, P. Tiberto, F. Vinai, J. Appl. phys. “Influence of DC joule-Heating Treatment on Magneto impedance Effect in Amorphous Alloy”, *J. Magn. Magn. Mater.* 271, 312 (2004).
- [3] سید مجید محسنی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر
- [4] P. Jantaratana, C. Sirisathikul, *IEEE Transactions on Magnetics*, “Effects of thickness and heat treatments on giant magnetoimpedance of electrodeposited cobalt on silver wires” 42, 358 (2006).



طراحی و پیاده‌سازی سیستم کنترل اتوماتیک فشار محفظه خلأ توکامک دماوند با استفاده از کنترل مدل چندگانه

امینی، مهدی^{۱*}؛ رسولی، حسین^۱؛ علیاری شوره‌دلی، مهدی^۲؛ دارابی، امیررضا^۱؛ بابایی، حجت^۱؛ بروغنی، فهیمه^۱

^۱ پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

^۲ گروه مهندسی کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

*mehdiaminiee@gmail.com and eeaminim@email.kntu.ac.ir

چکیده

در این مقاله طراحی و پیاده‌سازی کنترل‌کننده چندگانه فشار محفظه خلأ در توکامک دماوند ارائه می‌گردد. کنترل‌کننده PI با ورودی مرجع وزن‌دار در قالب کنترل مدل چندگانه برای رسیدن به مقدار مطلوب فشار محفظه خلأ مورد استفاده قرار گرفته است. مدل مرتبه یک با تأخیر، بر مبنای داده‌های عملی برای شناسایی سیستم بکار گرفته شده است. حسگر پیرانی-کاتد سرد برای اندازه‌گیری فشار محفظه، شیر پیزوالکتریک برای تزریق گاز، پردازنده $STM32$ و رابط کاربری نرم‌افزاری از اجزای سیستم طراحی شده می‌باشند. همچنین نتایج آزمایش‌های عملی نشان‌دهنده توانایی کنترل‌کننده‌های طراحی شده در ردیابی پروفایل فشار مطلوب می‌باشد.

Design and Implementation of the Automatic Pressure Control System for the Vacuum Vessel of Damavand Tokamak using Multiple Model Control

Amini, Mahdi¹; Rasouli, Hossein¹; Aliyari Shoorehdeli, Mahdi²; Darabi, Amir Reza¹; Babaee, Hojjat¹; Borooghani, Fahime¹

¹ Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, Tehran

² Department of Systems and Control, Faculty of Electrical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran

Abstract

This paper presents the design and implementation of the pressure control system for the vacuum vessel of Damavand Tokamak. Setpoint weighted PI controller in multiple model framework is used to achieve the desired vacuum chamber pressure. First order with dead time model is applied for the system identification based on the experimental data. A Cold Cathode Pirani gauge to measure the chamber pressure, a piezoelectric valve to inject the gas, an STM23 microcontroller, and a software user interface are components of the designed system. Experimental results show that the designed controllers are able to follow the desired pressure profile.



مقدمه

با این مشکل، از مدل‌سازی چندگانه برای شناسایی مدل‌های خطی برای محدوده‌های مشخصی از فشار استفاده شده است. در این مقاله، ابتدا ساختار سیستم مولد خلأ و تزریق گاز توکامک دماوند معرفی می‌گردد. در بخش بعدی مدل‌سازی سیستم انجام شده و کنترل‌کننده‌های مربوطه طراحی می‌گردد. در ادامه نتایج عملی آزمایش‌های انجام شده جهت بررسی عملکرد کنترل‌کننده‌ها ارائه می‌شود. در بخش آخر نیز نتیجه‌گیری انجام می‌گیرد.

توکامک دماوند

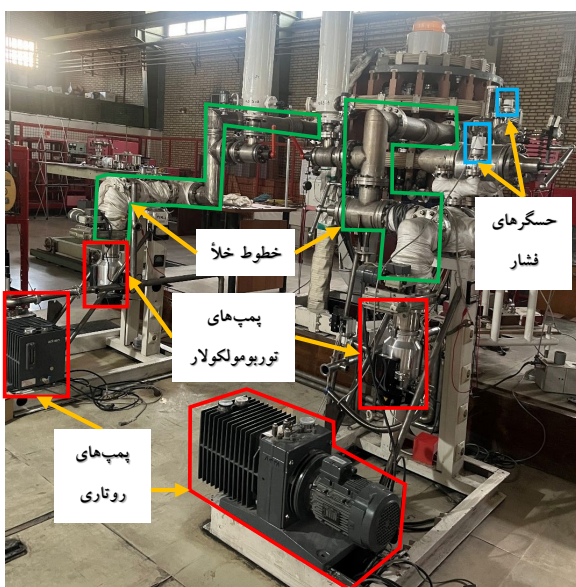
ماشین توکامک دماوند به همراه سامانه مولد خلأ آن در شکل ۱ نشان داده شده است. این سیستم از دو خط مجزا برای تخلیه محفظه تشکیل شده است که هر کدام شامل یک پمپ روتاری، یک پمپ توربومولکولار، دو شیر برقی، یک شیر دریچه‌ای، یک شیر دستی و دو حسگر فشار پیرانی-کاتد سرد می‌باشد. روند اجرای فرایند خلأ در [۲] و [۷] بیان شده است. پس از ایجاد خلأ بالا در محفظه توکامک، لازم است که گاز مورد واکنش (هیدروژن) به درون محفظه تزریق شود که این کار از طریق تنظیم ولتاژ شیر پیزوالکتریک MV112 صورت می‌پذیرد. پیش‌تر تنظیم ولتاژ این عملگر به صورت دستی انجام می‌شد که مشکلاتی از قبیل عدم

دستگاه توکامک، یکی از مهم‌ترین و محتمل‌ترین راه‌حل‌ها برای رسیدن به انرژی پاک در همجوشی هسته‌ای است که در آن پلاسماهای بسیار گرم از طریق میدان‌های مغناطیسی محصور و کنترل می‌شود. توکامک دماوند یک دستگاه پژوهشی برای محصورسازی مغناطیسی با محفظه خلأ به حجم $0/09$ متر مکعب است که در خلأ بالا (حدود 10^{-7} تور) کار می‌کند [۱].

در توکامک دماوند، تنظیم فشار توسط یک کاربر انسانی و به صورت دستی تنظیم می‌گردید که با عدم دقت و سرعت کافی در تنظیم و نیز عدم توانایی در حذف سریع اغتشاش همراه بود. از این رو هدف پروژه حاضر، طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم خودکار برای تزریق گاز و کنترل فشار آن درون محفظه خلأ می‌باشد. در پژوهش‌های پیشین، شناسایی سیستم و طراحی کنترل‌کننده برای سامانه کنترل دستی فشار محفظه صورت گرفته است [۲].

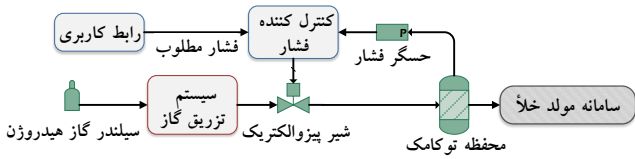
در توکامک DIII-D، تزریق گاز توسط کنترل شیرهای برقی با سرعت قطع و وصل چند میلی‌ثانیه‌ای انجام می‌شود [۳]. در [۴] یک زیرساخت عمومی مبتنی بر مدل‌های شبکه عصبی داده-محور ارائه شده است که در آن با بکارگیری یک مجموعه از کنترلرهای مدل-پیش‌بین برای کنترل دما و فشار لحظه‌ای، پیاده‌سازی و آزمایش شده است. در توکامک TCV، جهت دستیابی به کنترل توزیع شده بر روی معکوس پروفایل ضریب ایمنی و پارامتر فشار پلاسما β ، الگوریتم‌های حلقه-بسته مبتنی بر مدل فرموله شده‌اند [۵]. در توکامک ADITYA-U، فشار گاز تزریقی با اعمال پالس قابل برنامه‌ریزی^۱ به شیر پیزوالکتریک کنترل می‌شود [۶].

در توکامک دماوند، محفظه توسط پمپ‌های روتاری، توربومولکولار و جذبی خلأ می‌شود. میزان خلأ محفظه توسط یک حسگر پیرانی-کاتد سرد اندازه‌گیری می‌شود. سپس سیگنال کنترلی به صورت ولتاژ به یک شیر پیزوالکتریک اعمال می‌شود تا میزان گاز تزریقی به محفظه کنترل شود. یکی از چالش‌های این مسئله، رفتار غیرخطی سیستم در فشارهای مختلف می‌باشد. جهت مواجهه

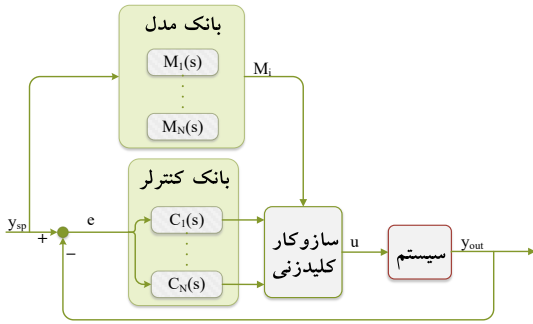


شکل ۱: توکامک دماوند به همراه سیستم مولد خلأ

^۱ Programmable Pulse Generator (PPG)



شکل ۲: سیستم کنترل حلقه بسته برای فشار محفظه توکامک دماوند



شکل ۳: ساختار کنترل مدل چندگانه

در این مقاله، شیوه مورد استفاده برای انتخاب کنترل کننده مناسب به این گونه است که سیگنال کنترلی اعمالی به سیستم، مجموع وزن دار شده از خروجی تمام کنترل کننده‌ها می‌باشد، به طوری که بسته به اینکه فشار مطلوب در هر لحظه در کدام ناحیه کاری قرار بگیرد، کنترل کننده‌ی مربوط به همان ناحیه دارای ضریب یک (بیشترین وزن) و دیگر کنترل کننده‌ها دارای ضریب صفر (کمترین وزن) خواهند بود. در مرز بین دو ناحیه که نیاز به کلیدزنی و تغییر از یک کنترل کننده به دیگری می‌باشد، این تبدیل به صورت نرم و با استفاده از یک تابع سیگموئیدی انجام می‌شود (رابطه ۲).

$$w_i = \begin{cases} \frac{e^{\sigma(y_{sp}-c_i)}}{e^{\sigma(y_{sp}-c_i)} + 1}; & b_{i-1} \leq y_{sp} < b_i \\ \frac{e^{-\sigma(y_{sp}-c_i)}}{e^{-\sigma(y_{sp}-c_i)} + 1}; & b_i \leq y_{sp} < b_{i+1} \\ \vdots; & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$i = 2, \dots, N-1$

که در آن N تعداد کنترل کننده‌ها، y_{sp} فشار مطلوب، b_i بیانگر i امین نقطه‌ی کار سیستم، c_i نقطه‌ی کلیدزنی بین دو کنترل کننده و σ میزان سختی کلیدزنی می‌باشد. در این مقاله، از کنترل

دقت کافی، تنظیم زمان‌بر و ناتوانی در حذف سریع اغتشاش به همراه داشت. از این رو در این پژوهش، یک سیستم خودکار جدید برای کنترل فشار محفظه خلأ طراحی و ساخته شد که مشتمل بر یک برد الکترونیکی و یک رابط کاربری نرم‌افزاری می‌باشد. در شکل ۲ نمودار کلی سیستم پیاده‌سازی شده نشان داده شده است که مطابق آن، فشار محفظه از طریق خلأسنج ACC1009 اندازه‌گیری شده و با مقدار فشار مطلوب که از پیش توسط کاربر و از طریق رابط کاربری تعیین شده است، مقایسه می‌گردد. سپس بر اساس نوع کنترل کننده‌ی انتخابی توسط کاربر، سیگنال کنترلی تولید و به صورت ولتاژ به شیر پیزوالکتریک اعمال می‌گردد [۸].

مدل‌سازی و طراحی کنترل کننده

کنترل کننده PID به واسطه کارآمدی آن در کاربردهای متنوع، یکی از فراگیرترین کنترل کننده‌های موجود در صنعت محسوب می‌شود [۹]. در این پژوهش نیز، کنترل کننده PID به علت اثرگذاری آن، هزینه پایین و سادگی در پیاده‌سازی، به عنوان روش اولیه انتخاب شده است. بر این اساس مدل مورد استفاده جهت شناسایی سیستم، مدل مرتبه اول با تأخیر می‌باشد که به آن مدل فرآیندی نیز گفته می‌شود [۱۰].

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-T_d s} \quad (1)$$

در اینجا k بهره، τ ثابت زمانی و T_d تأخیر زمانی می‌باشد. ضرایب این مدل را می‌توان از روی پاسخ پله‌ی سیستم بدست آورد که این کار از طریق آزمایش‌های مختلف و با اعمال ولتاژهای پله‌ای به عنوان ورودی حلقه-باز، انجام شده است [۸].

با وجود پدیده‌ی هیستریزیس و همچنین تغییر بهره‌ی سیستم در فشارهای مختلف، مشاهده شد که سیستم تحت کنترل، یک سیستم غیرخطی می‌باشد [۸]. بنابراین، یک مدل فرآیندی نمی‌تواند به دقت رفتار سیستم را در تمام نقاط کاری توصیف کند. در نتیجه، به ازای هر کدام از پله‌های اعمال شده به سیستم، یک مدل فرآیندی شناسایی شده و به دنبال آن کنترل کننده‌ی مربوطه طراحی می‌گردد. با این توصیف، یک بانک مدل و یک بانک کنترل کننده‌ی متناظر بوجود آمد که نمایی از آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

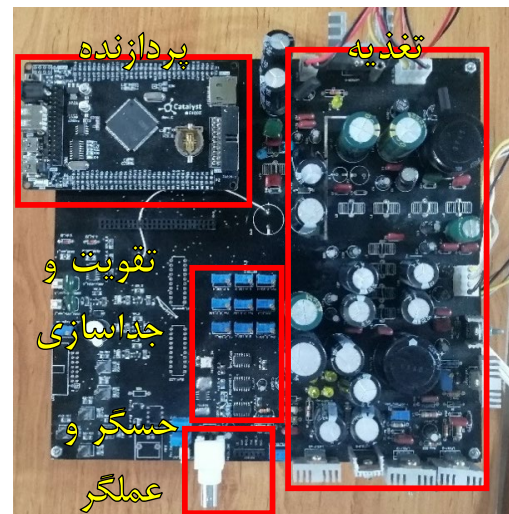


می‌دهد که از قابلیت‌های آن می‌توان به نمایش نموداری و برخط مقادیر فشار محفظه و ولتاژ عملگر (شیر پیزوالکتریک)، تنظیم ضرایب و ساختار کنترل کننده و اعمال پروفایل‌های ولتاژ ورودی و فشار مطلوب اشاره نمود. جهت مقایسه و بررسی نتایج عملی، عملکرد کنترل کننده تکی با کنترل مدل چندگانه در دو آزمایش مجزا ارائه می‌گردد. شکل ۶ پاسخ تجربی به یک کنترل پروفایل فشار در نقاط کار مختلف را نشان می‌دهد که توسط یک کنترل کننده PI با ضرایب طراحی شده برای ناحیه 8×10^{-5} تور کنترل می‌شود. با توجه به شکل مشخص است سیستم کنترل ورودی‌های کوچک‌تر را به کندی ردیابی کرده و در فشارهای بالا نیز فراجش بیشتری از خود نشان می‌دهد که بیانگر ضعف این روش در کنترل سیستم غیرخطی برای تمام نقاط کار می‌باشد. در آزمایش دوم، با تقسیم بندی نقاط کار و اختصاص کنترل کننده‌های مجزا به هر ناحیه، از روش کنترل مدل چندگانه استفاده می‌گردد که نتیجه‌ی آن در شکل ۷ برای ردیابی پروفایل مرجع مشابه آزمایش اول، نشان داده شده است. مشخص است که خروجی به خوبی توانسته است پروفایل ورودی را دنبال کند. جهت مقایسه جزئی‌تر، معیار مجموع قدرمطلق خطا برای هر دو آزمایش محاسبه شده است که این عدد در حضور کنترل مدل چندگانه برابر $64/96$ و در عدم حضور آن (آزمایش اول) برابر $73/5$ می‌باشد که نشان دهنده‌ی برتری کنترل مدل چندگانه در ردیابی پروفایل ورودی برای سیستم غیرخطی است.

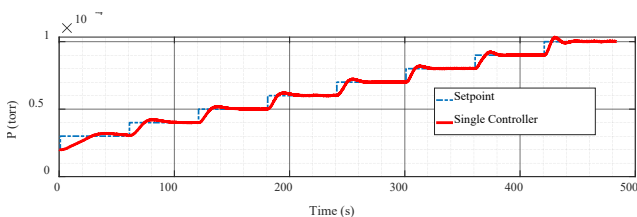
کننده‌های PI با ورودی مرجع وزن‌دار [۱۰] استفاده شده است. جهت تعیین ضرایب کنترل کننده از روش کوهن-کون (CC) استفاده شده است که مبتنی بر ضرایب مدل مرتبه یک با تأخیر محاسبه می‌شود [۱۰].

نتایج عملی

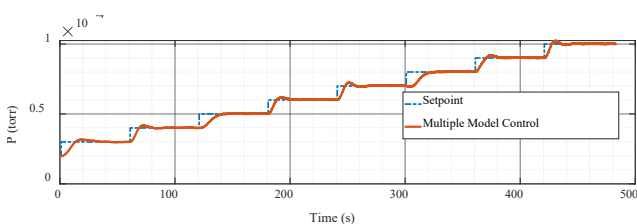
دستگاه ساخته شده در شکل ۴ نشان داده شده است که براساس پردازنده STM32 و نمونه برداری آنالوگ به دیجیتال ۱۲ بیت و تقویت کننده قدرت ۰ تا ۱۰۰ ولت ساخته شده است. همچنین رابط کاربری نرم‌افزاری در محیط MATLAB طراحی و پیادسازی شده که می‌توان فشار محفظه‌ی خلأ را به صورت حلقه باز و حلقه بسته کنترل نمود. شکل ۵ تصویری از این رابط کاربری را نشان



شکل ۴: سخت افزار سیستم کنترل فشار محفظه توکامک دماوند



شکل ۶: نتایج عملی کنترل سیستم در حضور یک کنترل کننده PI



شکل ۷: نتایج عملی کنترل سیستم در حضور کنترل مدل چندگانه



شکل ۵: رابط کاربری سیستم کنترل فشار محفظه توکامک دماوند



- [3] J. L. Luxon, "A brief introduction to the DIII-D tokamak," *Fusion Science and Technology*, vol. 48, no. 2, 2005.
- [4] J. Abbate, R. Conlin, R. Shousha, K. Erickson and E. Kolemen, "A general infrastructure for data-driven control design and implementation in tokamaks," *Journal of Plasma Physics*, vol. 89, no. 1, 2023.
- [5] B. Mavkov, E. Witrant, C. Prieur, E. Maljaars, F. Felici, O. Sauter and the TCV-Team, "Experimental validation of a Lyapunov-based controller for the plasma safety factor and plasma pressure in the TCV tokamak," *Nuclear Fusion*, vol. 58, no. 3, 2018.
- [6] R. L. Tanna, H. Raj and J. Ghosh, "Overview of operation and experiments in the ADITYA-U tokamak," *Nuclear Fusion*, vol. 59, no. 11, 2019.
- [7] ح. رسولی، م. علیاری شوره‌دلی و م. امینی، "شناسایی مدل و طراحی کنترل‌کننده برای فشار محفظه توکامک دماوند،" در *دهمین کنفرانس ملی خلاء ایران*، تبریز، ۱۴۰۰.
- [8] م. امینی، م. علیاری شوره‌دلی و ح. رسولی، "طراحی و پیاده‌سازی سیستم کنترل فشار محفظه توکامک دماوند،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۴۰۱.
- [9] T. E. Marlin, *Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance*, New York: McGraw Hill, 2000.
- [۱۰] ع. فاتحی، سیستم‌های کنترل فرآیند، تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۳.

نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از معرفی سیستم مولد خلاء و تزریق گاز توکامک دماوند، سیستم کنترل خودکار طراحی شده ارائه گردید. از مدل مرتبه یک با تأخیر برای مدل‌سازی فشار محفظه و به دنبال آن از کنترل‌کننده PI با ورودی مرجع وزن‌دار برای کنترل فشار استفاده گردید. ساختار عملی و دلیل استفاده از کنترل مدل چندگانه مطرح شد و با انجام آزمایش‌هایی برتری کنترل مدل چندگانه در ردیابی پروفایل ورودی در تمام نقاط کاری سیستم غیرخطی نشان داده شد.

مرجع‌ها

- [1] M. Ariola and A. Pironti, *Magnetic Control of Tokamak Plasmas*, Springer, 2008.
- [2] ح. رسولی، م. علیاری شوره‌دلی و م. امینی، "مدل‌سازی فشار محفظه و طراحی کنترل‌کننده برای کنترل پروفایل فشار در توکامک دماوند،" *مجله علوم و فنون هسته‌ای*، جلد ۴۴، شماره ۳، ۱۴۰۲، ص ۱۳۹-۱۳۰.



کاهش زاویه تماس سطح PMMA با محلول ژلاتین در اثر پلاسمای آرگون و ماندگاری آن

ابراهیمی، راحله

دانشکده الکترومغناطیس دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان

Ra.Ebrahimi91@gmail.com

چکیده

به منظور بررسی کاهش انرژی سطح مشترک محلول ژلاتین با PMMA، زوایای تماس محلول با سطح تخت بسیار، قبل و بعد از ۳ دقیقه اعمال پلاسمای آرگون در شرایط معین اندازه گیری شد. میانگین کاهش زوایای تماس برای سه نمونه بسیار ۳۰، ۴۰ و ۱۱ درجه مشاهده شد. زوایای تماس پس از چند روز نگهداری در شرایط سرد و خشک و ۱ ساعت فرسودن در دمای نسبتاً بالا نیز اندازه گیری شدند. شرایط نگهداری سرد و خشک در بدترین حالت ۲۰ درصد افزایش زاویه و فرسودن در شرایط گرم در بدترین حالت ۴۰ درصد افزایش زاویه نشان داد. با وجود نگهداری بیش از ۱۰۰ ساعت و فرآیند فرسودن، هنوز زوایای تماس نسبت به وضعیت قبل از اصلاح سطح کمتر بودند که می تواند نشان از کافی بودن اصلاح سطح و ماندگاری چند روزه آن برای بهبود کیفیت شکل دهی ژلاتین با قالب PMMA باشد.

Decreasing in PMMA-gelatin solution contact angle due to argon plasma treatment and its durability

Ebrahimi, Raheleh

¹ Department of electromagnetics, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan

Abstract

In order to study on decreasing gelatin solution-PMMA interface energy, contact angles of the solution on a flat surface of the plasma-treated and the untreated polymers were measured in certain conditions. For three polymer samples the average of contact angles decrease were 30, 40 and 11 degrees. Contact angles were measured also for dry and cold stored samples (132 hours) and 1 hour aged samples in warm ambient. At worst for cold and dry stored samples, contact angles were 20 percent upper and for high temperature stored samples were 40 percent more. Despite these increases in contact angles, aged plasma treated polymers did have lower contact angle compared with untreated state.



مقدمه

ژلاتین بخاطر فراوانی، زیست‌سازگاری، کشش سطحی و خاصیت ژل شدن، کاربردهای متعددی در ساخت قطعات ریز مانند بافت زیستی مصنوعی یا ابزار ریزسیال داشته است. برای شکل‌دهی به محلول ژلاتین در ابعاد زیر میلی‌متر، پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) برش شده با لیزر به لحاظ ماده و روش ساخت مقرون به صرفه است. این بسپار با نام تجاری پلکسی شناخته می‌شود و در طول موج لیزر کربن‌دی‌اکسید (۱۰/۶ میکرون) بسیار جاذب است هم‌چنین نفوذپذیری گرمایی کم و نقطه‌ی تصعید پایین (۳۰۰ سلسیوس) دارد که موجب می‌شود با لیزر کربن دی‌اکسید بخوبی بریده شود [۱]. می‌خواهیم یک قطعه خیلی ریز از ژلاتین با قالب ایجاد شده توسط لیزر روی پلکسی بسازیم. به این منظور تماس شدن کامل محلول روی بسپار یا به بیان دیگر کاهش انرژی سطح مشترک آن‌ها اهمیت دارد.

سطح PMMA طبیعتاً آبگریز است. روش‌های گرمایی، شیمیایی و فیزیکی برای اصلاح سطح آن انجام شده و از میان آن‌ها روش اعمال پلاسما ارزان و سازگار با محیط‌زیست است. افزایش انرژی سطح بسپارها از جمله پلی‌متیل متاکریلات، تفلون، پلی‌اتیلن، پلی‌اتیلن ترفتالات، پلی‌دی‌متیل سیلوکسان و انواع دیگر با اعمال پلاسمای اکسیژن، نیتروژن، آرگون، هلیوم و هوا گزارش شده است [۲]. در مقاله‌ای که در ژورنال خلا چاپ شده است، آبدوست شدن سطح این بسپار در اثر پلاسمای اکسیژن مطالعه شده و علاوه بر آن اثر شرایط نگهداری نمونه در دما و رطوبت‌های متفاوت بر پایدار ماندن سطح اصلاح شده بررسی شده است. شرایط نگهداری خشک و دمای ۵ سلسیوس ۱۰ درجه زاویه تماس با آب را افزایش داده که این کمیت برای شرایط نگهداری در ۵۰ سلسیوس، ۲ برابر بوده است [۳].

تاثیر غلظت ژلاتین و فرآیند ژل شدن روی آبدوستی یا آبگریزی سطح آن مشاهده شده و با نحوه چرخش مولکول‌های ژلاتین در فرآیند ژل شدن تفسیر شده است [۴]، [۵]. پس این تحقیق با فرضیه اثر فعال شدن سطح روی جذب مولکول‌های آب و چرخش مولکول‌های ژلاتین، تغییر زاویه تماس محلول ژلاتین با

سطح تخت پلکسی را در غلظت و دمای ثابت می‌آزماید. سپس اثر ۲ شرایط نگهداری شامل دما و رطوبت را برای بررسی تغییرات زاویه تماس آزمایش می‌کند.

جزئیات آزمایش

آماده‌سازی نمونه‌ها: سه نمونه پلکسی تجاری در قطعات ۲*۲ سانتی‌متر مربع با مواد شوینده، اتانول و آب بدون یون هر کدام ۱۰ دقیقه توسط حمام فراصوت شسته و خشک شدند.

پلاسما: برای اعمال پلاسما، محفظه‌ای تا فشار تقریباً یک صدم توریچلی خالی شد و سپس شارش گاز آرگون با فشار اطراف ۰/۲ توریچلی برقرار شد. پلاسما در استوانه‌ای به قطر ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر برقرار شد؛ در حالی که با ولتاژ ۵۳۰ ولت و جریان مستقیم پالسی ۱/۹ آمپر با دوره کاری ۷۰ درصد تغذیه می‌شد. مدت زمان برقراری پلاسما روی نمونه‌ها ۳ دقیقه و دمای پلاسما ۳۱ سلسیوس بود.

آماده‌سازی محلول ژلاتین: پس از متورم شدن پودر ژلاتین به نسبت ۱۰ درصد وزنی در آب بدون یون، مخلوط در دمای ۷۰ سلسیوس قرار داده شد تا ژلاتین کاملاً حل شود. محلول رنگ‌آمیزی شد و پس از رسیدن محلول به دمای ۳۰ سلسیوس، آزمون اندازه‌گیری زاویه تماس انجام شد.

اندازه‌گیری زاویه تماس: ۰/۰۵ میلی‌لیتر محلول ژلاتین از ارتفاع ۲ سانتی‌متر به آرامی روی سطوح هم‌دما با محیط انداخته شد. چند قطره روی هر نمونه با دوربین با مکان و زاویه ثابت نسبت به نمونه‌ها عکس گرفته شد و سپس با نرم‌افزار ImageJ زوایای تماس از دو طرف اندازه‌گیری شد.

نگهداری: نمونه‌های اصلاح شده توسط پلاسما در ظرف در بسته در کنار سیلیکاژل جاذب رطوبت در دمای ۲۰- سلسیوس و رطوبت ۲۶ درصد به مدت ۱۳۰ ساعت نگهداری شد.

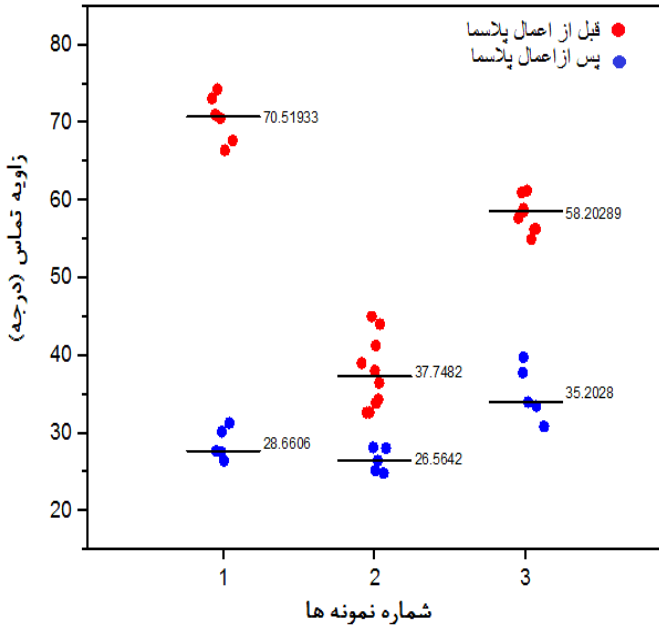
فرسودن (aging): نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت در دمای ۴۵ سلسیوس با رطوبت ۳۲ درصد قرار گرفتند.



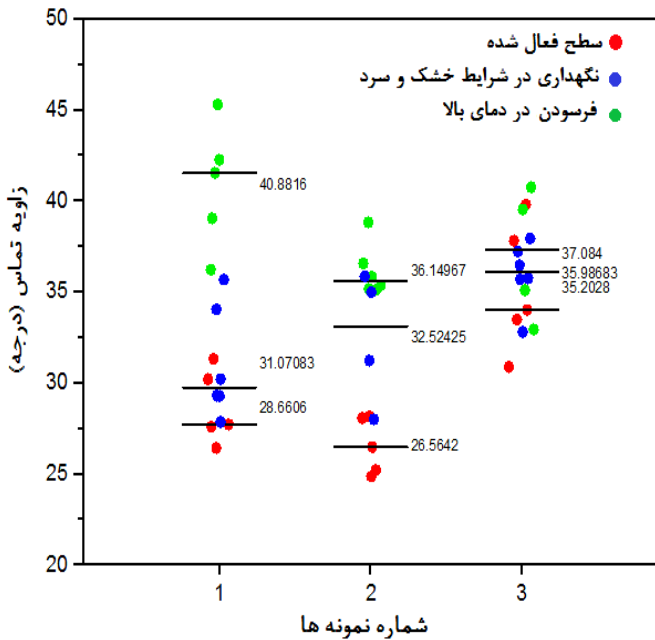
نتایج و بحث

علت پایدار نماندن سطح اصلاح شده PMMA چرخش یا نفوذ مولکول‌های زنجیر کوتاه در راستای تمایل سطح برای کاهش

نتایج اندازه‌گیری زوایای تماس محلول ژلاتین با سطح تخت پلکسی برای نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ قبل و بعد از اعمال پلاسما در شکل ۱ نشان داده شده است. در هر سه نمونه زوایای تماس با نسبت‌های متفاوت کاهش یافته اما شاید بتوان گفت نزدیک بودن زوایای تماس بعد از اعمال پلاسما به همدیگر معنادار است و احتمالاً شرایط پلاسما نسبت به شرایط اولیه نمونه‌ها تاثیر بیشتری بر کسب این نتیجه داشته است. اگر کاهش انرژی سطح مشترک محلول ژلاتین و PMMA در پروژه اصلی ما موثر افتاد، در پی تکمیل این تحقیق با بررسی متغیرهای دیگر مثل زمان برمی‌آیم و گرنه بررسی تاثیر متغیر زمان که داده‌های شکل ۱ احتمال بالایی برای آن نشان می‌دهند، یک پیشنهاد بعنوان تحقیقات آینده است. شکل ۲ زوایای تماس را برای سه نمونه در سه وضعیت طبق جدول ۱ نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد دما در پایداری سطح موثر بوده چون به طور میانگین ۳۰، ۴۰ و ۱۱ درجه کاهش زاویه تماس برای سه نمونه مشاهده شد. زوایای تماس پس از ۱۳۲ ساعت نگهداری در شرایط سرد و خشک و ۱ ساعت فرسودن در شرایط دمای ۴۵ سلیسیوس نیز اندازه‌گیری شدند. شرایط نگهداری سرد و خشک در بدترین حالت ۲۰ درصد افزایش زاویه و فرسودن در شرایط دما بالا در بدترین حالت ۴۰ درصد افزایش زاویه نشان داد و با وجود نگهداری بیش از ۱۰۰ ساعت و فرآیند فرسودن، هنوز زوایای تماس نسبت به وضعیت قبل از اصلاح سطح ۴۰ و ۶۰ درصد هستند که می‌تواند نشان از کافی بودن اصلاح سطح و ماندگاری چند روزه آن برای بهبود کیفیت شکل‌دهی ژلاتین با قالب PMMA باشد.



شکل ۱. زوایای تماس محلول ژلاتین با سطح تخت پلکسی برای نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ قبل و بعد از اعمال پلاسما، اعداد روی نمودار میانگین چندین اندازه‌گیری است.



شکل ۲. زوایای تماس برای سه نمونه در سه وضعیت پس از اصلاح سطح، اعداد روی نمودار میانگین چندین اندازه‌گیری است.

جدول ۱. وضعیت نمونه‌ها هنگام اندازه‌گیری زاویه تماس پس از اصلاح سطح

وضعیت	گذشت زمان پس از اصلاح سطح	دما (سلیسیوس)	رطوبت نسبی (درصد)
سطح فعال	۳۰ دقیقه	-۲۰	۲۶
نگهداری سرد و خشک	۱۳۰ ساعت	-۲۰	۲۶
فرسودن	۱ ساعت	۴۵	۳۲



تکرارپذیر نیست اما ثبت گزارش این کار ممکن است الهام بخش تحقیقات دقیق و تکرارپذیر در آینده باشد.

سپاسگزاری

از همکاری دانشکده مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر بخاطر دستگاه ایجاد پلاسما تشکر می‌کنم.

مرجع‌ها

- [1] A. B. Khoshaim, A. H. Elsheikh, E. B. Moustafa, M. Basha, and E. A. Showaib; "Experimental investigation on laser cutting of PMMA sheets: Effects of process factors on kerf characteristics" *J. Mater. Res. Technol.*, vol. **11**; (2021) pp. 235–246.
- [2] D. Rymuszka, K. Terpiłowski, L. Hołysz, and E. Chibowski; "Changes in surface properties of polymethylmethacrylate (PMMA) treated with air plasma" *Ann. Univ. MARIAE CURIE-SKŁODOWSKA LUBLIN – Pol. Chem.*, vol. **70**; (2015).
- [3] A. Vesel and M. Mozetic; "Surface modification and ageing of PMMA polymer by oxygen plasma treatment" *Vacuum*, vol. **86**; (2011); no. 6, pp. 634–637.
- [4] T. Białopiotrowicz and B. Jańczuk; "Changes of the surface free energy of the adsorptive gelatin films" *Eur. Polym. J.*, vol. **37**; (2001) no. 5, pp. 1047–1051.
- [5] T. Białopiotrowicz and B. Jańczuk; "Surface properties of gelatin films" *Langmuir*, vol. **18**; (2002) no. 24, pp. 9462–9468.

انرژی بیان شده است. زیرا معمولاً بسپارها غیر بلوری اند و نفوذ مولکول‌ها بین سطح و حجم محتمل است پس نگهداری در دمای پایین احتمال این حرکت‌ها را کم می‌کند [۳].

جمع‌بندی

در نتیجه پژوهش‌های پیشین، در کم شدن انرژی سطح مشترک محلول ژلاتین و PMMA، آبدوست بودن سطح بسپار، غلظت محلول و فرآیند ژل شدن موثر هستند. در این تحقیق اثر آبدوستی سطح بسپار ناشی از اعمال پلاسمای آرگون و اثر دما و رطوبت بر ماندگاری آن غربال‌گری شد؛ یعنی معلوم شد متغیر اعمال پلاسما بر آبدوستی سطح و متغیرهای دما و رطوبت در ماندگاری آبدوستی موثر هستند. تکمیل پژوهش در گام‌های بعدی نیازمند طراحی و اجرای آزمایش‌های پرشمار دیگر است تا چگونگی وابستگی انرژی سطح مشترک به متغیرهای غربال شده مطالعه شود. هرچند به علت کم بودن تعداد نمونه‌ها و معین نبودن نوع ژلاتین و دقیق نبودن روش اندازه‌گیری زاویه تماس، نتایج کار



بررسی اثر خودکانونی تناوبی کر بر شدت سالیتون فضایی؛ روش وردشی

قلندری، محبوبه^۱؛ برخوردار علی آبادی، مهدی^۲

^۱ گروه مهندسی انرژی و فیزیک، دانشکده مهندسی شیمی و صنایع، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر

^۲ گروه فیزیک کاربردی و مواد پیشرفته، دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

mahboubeh.ghalandari@gmail.com and m.ghalandari@mazust.ac.ir

چکیده

در این مقاله، انتشار سالیتون‌های فضایی در محیطی با غیرخطی مدوله‌شده فضایی مطالعه کرده‌ایم. معادله موج شامل پراش و خودکانونی تناوبی است. برای حل معادله موج، از روش وردشی به چهار معادله‌ی جفت شده حاکم بر پارامترهای سالیتون رسیدیم. معادلات جفت شده را با روش عددی مونت کارلو حل کردیم. اثر ضریب غیرخطی مربوط به خودکانونی تناوبی کر، بر ویژگی‌های فیزیکی مانند نمایه‌ی شدت و نوسانات دامنه‌ی سالیتون در نظر گرفته شده است.

Investigating the effect of Kerr's periodic self-focusing on spatial soliton intensity; Variational method

Ghalandari, Mahboubeh^{1,*}; Barkhordar Ali Abadi, Mehdi²

¹ Department of Energy engineering and physics, Faculty of Chemical and Industrial Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr

² Department of Applied Physics and Advanced Materials, Faculty of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract

In this article, we have studied the propagation of spatial solitons in a medium with spatially modulated nonlinearity. The wave equation includes diffraction and periodic self-focusing. To solve the wave equation, we used Variational method to arrive four coupled equations governing the parameters of the. We solved the coupled equations by Monte Carlo numerical method. The effect of the non-linear coefficient related to the periodic self-focusing of Kerr has been considered on the physical characteristics such as the intensity profile and amplitude oscillations of the soliton.

PACS No. 42



مقدمه

نمایه‌ی مستطیلی و سهموی [۱۳]، اشباع و تأثیرات هندسه ضریب شکست بر محلی سازی سالیتون فضایی [۱۴] مطالعه کرده بودیم. در کار فعلی، ما رفتار سالیتون‌های فضایی را که در محیطی با یک غیرخطی مدوله شده فضایی منتشر می‌شوند، بررسی می‌کنیم. برای مطالعه معادله شرودینگر غیرخطی در حضور اثر کر تناوبی از روش وردشی^۶ استفاده شده است. ما تأثیر غیرخطی تناوبی را بر رفتار سالیتون بررسی می‌کنیم.

فرمالیزم

معادله‌ی شرودینگر غیرخطی در حضور اثر غیرخطی کر مدوله شده را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$i \frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - g(x) |\psi|^2 \psi \quad (1)$$

در اینجا ψ بیانگر دامنه‌ی کند تغییر میدان است و Z فاصله انتشار نرمالیزه شده را نشان می‌دهد. در معادله (۱)، جمله اول در سمت راست نشان دهنده پراش و جمله دوم خودکانونی^۷ (SF) را نشان می‌دهد. در این مقاله، شکل غیرخطی تناوبی را به صورت تعریف می‌کنیم

$$g(x) = g_0 \cos(x) \quad (2)$$

که g_0 ضریب غیرخطی است. با استفاده از فرمول لاگرانژی توسعه یافته در مرجع [۱۵]، معادله (۱) را می‌توان به عنوان یک معادله اوایلر-لاگرانژی با توجه به روش وردشی [۱۶] بازنویسی کرد. فرض می‌کنیم تابع حدسی دارای نمایه‌ی گوسی باشد که به صورت زیر است:

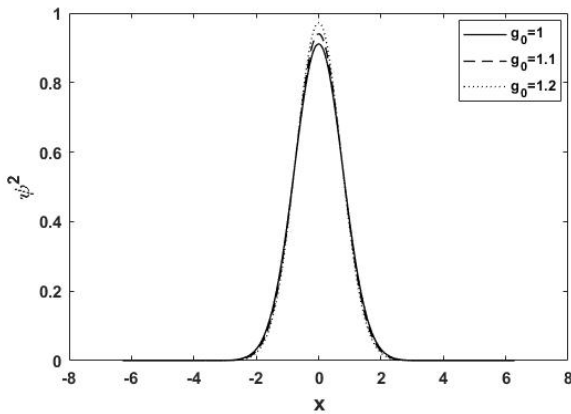
$$\psi(x, z) = A(z) \exp \left(i b(z) + \frac{-x^2(1+iq(z))}{2w(z)^2} \right) \quad (3)$$

که A دامنه، b فاز دامنه، w عرض باریکه و q چیرپ مکانی است که متناسب با انحناى جبهه موج باریکه است. با پیروی از روشهای

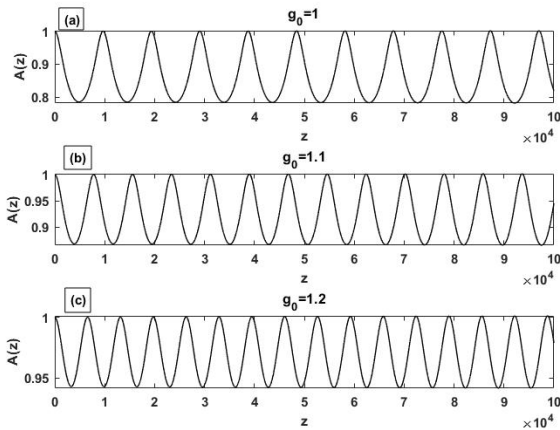
سالیتون های نوری پرتوهای خود هدایت شونده‌ای هستند که در هنگام انتشار در نتیجه اثر متقابل بین اثرات خطی و غیرخطی شکل خود را حفظ می‌کنند [۱-۳]. اگر اثرات غیرخطی پاشندگی را متعادل کند، سالیتون زمانی نامیده می‌شود. از سوی دیگر، اگر اثرات غیرخطی پراش را متعادل کند، سالیتون فضایی نامیده می‌شود [۱-۳]. در این کار، ما تنها به بررسی سالیتون‌های فضایی می‌پردازیم. در سال ۱۹۶۴، چیانو^۱ و همکاران، سالیتون‌های فضایی را به صورت نظری پیش بینی کردند [۴]. آنها نشان دادند که از واگرایی یک باریکه‌ی نوری در اثر پراش می‌توان در یک محیط نوری غیرخطی جلوگیری کرد [۴]. سالیتون‌های فضایی نیز به صورت تجربی مشاهده شده‌اند [۵-۸]. یکی از کاربردهای اصلی سالیتون‌های فضایی، سوئیچینگ پرتوهای نور با استفاده از سالیتون‌های فضایی است، یعنی کنترل نور توسط نور [۹] که می‌تواند در دو سطح کلاسیک و کوانتومی رخ دهد. کنترل یک باریکه‌ی نور توسط دیگری می‌تواند برای ارتباطات نوری و پردازش اطلاعات نوری مفید باشد. برای کشف همه کاربردهای ممکن، درک ویژگی‌های کلی فیزیک سالیتون فضایی بسیار مهم است. انتشار سالیتون‌های فضایی از طریق موجبرهای غیرخطی با نمایه‌های مختلف ضریب شکست عرضی قبلاً مورد بررسی قرار گرفته است [۱۰]. در سال ۱۹۹۷، گریزا^۲ و همکاران، رفتار نوسانی (اثر نوسان^۳) را برای سالیتون‌هایی که در یک موجبر با نمایه‌ی ضریب شکست عرضی گاوسی منتشر می‌شوند، نشان داد [۱۱]. در سال ۲۰۰۱، سوریان^۴ و ون گروسن^۵، انتشار یک سالیتون فضایی را در یک موجبر با نمایه‌ی ضریب شکست مثالی مورد بررسی قرار دادند. آنها اثرات مشابهی را مشاهده کردند، یعنی باریکه‌ی سالیتون در درون موجبر نوسان می‌کند [۱۲]. در کارهای قبلی خود، انتشار سالیتون فضایی را از طریق موجبرها با

^۵ van Groesen
^۶ Variational method
^۷ Self-focusing

^۱ Chiao
^۲ Garzia
^۳ swing effect
^۴ Suryanto



شکل ۱: نمایه‌ی شدت سالیتون بر حسب X برای مقادیر مختلف ضریب غیرخطی (a) $g_0=1.2$ (b) $g_0=1.1$ و (c) $g_0=1$



شکل ۲: تغییرات دامنه‌ی سالیتون بر حسب فاصله‌ی انتشار Z برای مقادیر مختلف ضریب غیرخطی (a) $g_0=1$ (b) $g_0=1.1$ و (c) $g_0=1.2$

بینیم که با افزایش ضریب غیرخطی، تعداد نوسانات دامنه‌ی سالیتون افزایش می‌یابد و دامنه‌ی نوسانات دامنه‌ی سالیتون کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، انتشار سالیتون‌های فضایی در معادله شرودینگر را با یک غیرخطی مدوله‌شده فضایی بررسی کردیم. برای مقادیر مختلف ضریب غیر خطی، رفتار سالیتونی را مشاهده کردیم. همچنین مشاهده کردیم که با افزایش ضریب غیرخطی، تعداد نوسانات دامنه‌ی سالیتون افزایش و دامنه‌ی نوسانات دامنه‌ی سالیتون کاهش یافت.

استاندارد وردشی [۱۶]، معادلات حاکم بر پارامترهای q, w, A و b را می‌یابیم:

$$A'(z) = \frac{A(z)q(z)}{2w(z)^2} \quad (4)$$

$$w'(z) = -\frac{q(z)}{w(z)} \quad (5)$$

$$q'(z) = \frac{g_0 A(z)^2 e^{-\frac{1}{8}w(z)^2} w(z)^2}{4\sqrt{2}} + \frac{g_0 A(z)^2 e^{-\frac{1}{8}w(z)^2}}{\sqrt{2}} - \frac{q(z)^2}{w(z)^2} - \frac{1}{w(z)^2} \quad (6)$$

$$b'(z) = \frac{g_0 A(z)^2 e^{-\frac{1}{8}w(z)^2} w(z)^2}{16\sqrt{2}} + \frac{5g_0 A(z)^2 e^{-\frac{1}{8}w(z)^2}}{4\sqrt{2}} - \frac{1}{2w(z)^2} \quad (7)$$

چهار معادله‌ی کوپل شده را به روش عددی مونت کارلو^۱ با شرایط اولیه‌ی $A(0)=1, q(0)=0, w(0)=1$ حل می‌کنیم که در بخش بعد این نتایج آمده است.

نتایج عددی

شکل (1)، نمایه‌ی شدت سالیتون بر حسب X را برای مقادیر مختلف ضریب غیرخطی (a) $g_0=1$ ، (b) $g_0=1.1$ و (c) $g_0=1.2$ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌کنید با افزایش ضریب غیر خطی، ارتفاع قله شدت بیشتر شده است که آن به این دلیل است اثر کر قوی تر شده و خودکانونی بیشتری رخ داده است.

شکل ۲ تغییرات دامنه‌ی سالیتون را بر حسب فاصله‌ی انتشار Z برای مقادیر مختلف ضریب غیرخطی $g_0=1, 1.1, 1.2$ نشان می‌دهد. مشاهده می‌کنیم که دامنه‌ی سالیتون دارای نوسانات سینوسی است. دامنه‌ی سالیتون حول محور Z با مقدار میانگین ثابت در نوسان است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای مقادیر مختلف ضریب غیرخطی، رفتار سالیتونی را مشاهده می‌کنیم. همچنین می

^۱ Monte-carlo method



- [9] S. Trillo, S. Wabnitz, E.M. Wright, G.I. Stegeman, "Soliton switching in fiber nonlinear directional couplers" *Opt. Lett.* **13** (1988) 672.
- [10] A. B. Aceves, J. V. Moloney, and A. C. Newell, "Theory of light beam propagation at nonlinear interfaces. I. Equivalent particle theory for a single interface," *Phys. Rev. A* **39**, 1809 (1989)
- [11] F. Garzia, C. Sibilina, and M. Bertolotti, "Swing effect of Spatial Soliton," *Opt. Commun.* **139**, 193 (1997).
- [12] A. Suryanto, E. van Groesen, "On the swing effect of spatial inhomogeneous NLS solitons", *J. Nonlin. Opt. Phys. Mater.***10** (2001) 143.
- [13] M. Ghalandari, M. Solaimani, "Spatial soliton propagation through waveguides: rectangular and parabolic rectangular index profile", *Opt Quant Electron* **48** (2016) 514.
- [14] M. Ghalandari, A. Ghadi, M. Solaimani and S. Mirzanejad, "Saturation and Refractive Index Geometry Effects on Localization of a Spatial Soliton in a Waveguide with Parabolic Rectangular Index Profile", *Journal of Elec Materi* **48** (2019)5797.
- [15] M Chen, Q Guo, D Lu, W Hu, "Variational approach for breathers in a nonlinear fractional Schrödinger equation", *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.* **71**(2019) 73.
- [16] B. A. Malomed, "Variational methods in nonlinear fiber optics and related fields", *Prog. Opt.* **43** (2002) 71.
- [1] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optic"s (Academic, 2001) ,
- [2] G. P. Agrawal, "Fiber Optic Communication Systems "(Wiley, 2002).
- [3] R. Y. Chiao, S. Trillo, W. Torruellas, "Spatial Solitons", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 2001.
- [4] R. Y. Chiao, E. Garmire and C. H. Townes, "Self-trapping of optical beams", *Phys. Rev. Lett.* **13** (1964) 479.
- [5] A. Barthelemy, S. Maneuf and C. Froehly, "Propagation soliton et auto-confinement de faisceaux laser par non linaritoptique de Kerr" *Opt. Commun.***55** (1985) 201.
- [6] J. S. Aitchison, A. M. Weiner, Y. Silberberg, M. L. Oliver, J. L. Jackel, D. E. Leaird, E. M. Vogel and P. W. E. Smith, "Experimental observation of spatial soliton interactions" *Opt. Lett.* **16** (1991)15.
- [7] J. S. Aitchison, Y. Silberberg, A. M. Weiner, D. E. Leaird, M. K. Olivier, J. L. Jackel and P.W. E. Smith, "Spatial optical solitons in planar glass waveguides" *J. Opt. Soc. Am. B* **8**(1991) 1290.
- [8] R. De La Fuente, A. Barthelemy and C. Froehly, "Spatial-soliton-induced guided waves in a homogeneous nonlinear Kerr medium", *Opt. Lett.* **16** (1991) 793.



نشاندن پوشش‌های الکترولس انتخابی نیکل بر روی ITO به منظور کاربردهای پلاسمونیک و مگنتوپلاسمونیک

پورشریف، اکرم^۱؛ حمیدی، سیده مهری^۲

^۱ گروه نانومواد، دانشکده مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

^۲ گروه مگنتوپلاسمونیک، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی تهران

a_poursharif@sbu.ac.ir and m_hamidi@sbu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش تلاش برای ایجاد نانوحلقه نیکلی بر روی ITO در سایزهای ۲۰۰ نانومتر تا ۳۰۰ نانومتر انجام شده است. این کار بر اساس الکترولس انتخابی یک تک لایه خودآرایی شده و ایجاد مکان‌های فعال بر روی زیرلایه و به وسیله حمام‌های نیکل-فسفر و نیکل-بر انجام شده است. هدف از پژوهش حاضر به کارگیری روش‌های متداول پوشش دهی الکترولس انتخابی برای ایجاد نانوآرایه در کاربردهای پلاسمونیک و مگنتوپلاسمونیک می‌باشد. به همین علت یک بار هم این کار در حمام کامپوزیتی نیکل-نقره انجام شده است.

Deposition of selective nickel electroless coatings on ITO for plasmonic and magnetoplasmonic applications

poursharif, Akram¹; Hamidi, sayyede Mehri²

1 Department of Material Engineering, nanomaterial group, Isfahan University of Technology, Isfahan

2 Magneto-plasmonic Lab, Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract

In this research, an attempt has been made to create nickel nanorings on ITO with sizes of 200 nm to 300 nm. This work is based on the selective electroless of a self-assembled monolayer and the creation of active sites on the substrate by means of nickel-phosphorus and nickel-boron baths. The purpose of this research is to use the common methods of selective electroless coating to create nanoarrays in plasmonic and magnetoplasmonic applications. For this reason, this work has been done once in a nickel-silver composite bath.



مقدمه

تلاش برای ایجاد نانوآرایه‌ها و انجام نانولیتوگرافی در کاربردهای الکترونیکی مانند تراشه‌های کامپیوتری، همچنین حافظه‌های مغناطیسی و کاربردهای پلاسمونیک همواره مدنظر بوده است. در این میان یکی از اهداف محققان، به کارگیری روش‌های ساده و قابل انجام برای تولید انبوه مانند الکترولس بوده است [۱و۲]. آنچه در تحقیق حاضر دنبال می‌شود، استفاده از لیتوگرافی ذره‌ای یا لیتوگرافی کروی در کنار روش الکترولس است. در این نوع از لیتوگرافی ابتدا ماسکی با استفاده از محلول کلونیدی نانوذرات بر روی زیر لایه ساخته می‌شود. سپس سطح در معرض یک تک لایه خود آراییده SAM¹ قرار می‌گیرد. ماسک از زیر لایه جدا می‌شود و تنها مناطق خاصی از آن برای انجام پوشش مناسب است. آنچه استفاده از این روش را مشکل می‌نماید، انتخاب زیرلایه‌هایی از جنس شیشه و ITO است که برای سنجش پلاسمونیک و مگنتوپلاسمونیک قابل استفاده می‌باشد. سیلان کردن در کار حاضر، ایجاد یک تک لایه خودآراییده است که به صورت انتخابی تنها در زیر پایه هر نانوکره ایجاد می‌شود. چرا که در جریان خشک شدن تنها آب کمی در زیر پایه نانوکرات به جای می‌ماند و این مکان که برای هیدرولیز شدن ترکیبات سیلان مناسب است، پس از ایجاد اتصال‌های عرضی با یکدیگر سیلان می‌شود و تبدیل به یک مکان برای اتصال با پالادیوم می‌گردد و بنابر این مناسب الکترولس انتخابی می‌گردد [۳]. مزیت روش پوشش دهی الکترولس علاوه بر سادگی و در دسترس بودن و همچنین قابل استفاده در تولید انبوه، توانایی ایجاد پوشش‌های کامپوزیتی است [۳]. ما در کار حاضر یک بار نمونه‌ها را در حمام نیکلی و بار دیگر در حمام کامپوزیتی نیکل-نقره پوشش داده‌ایم.

روش ایجاد نانوآرایه بر سطح شیشه

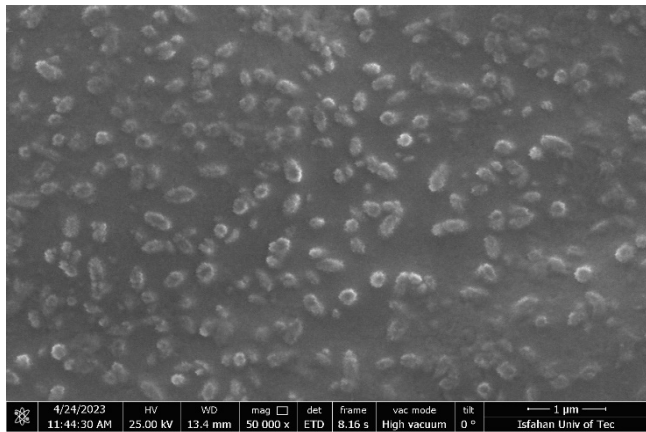
ابتدا سطح شیشه به منظور آماده سازی اولیه به میزان ۱۰ دقیقه در استون، متانول، و آب یون زدایی شده در دستگاه آلتراسونیک قرار داده می‌شود، سپس آن را در محلول پرینها (prinha

solution) که محلولی ترکیبی از H₂SO₄ /H₂O₂ به نسبت های ۳:۱ است، به مدت ۳ ساعت قرار می‌دهند و سطح شیشه را با دمش گاز نیتروژن خشک می‌کنند. این زمان برای زیر لایه‌های ITO در حدود ۵ دقیقه است تا از تخریب پوشش ITO جلوگیری شود. در کار حاضر زیر لایه ITO را انتخاب شده است زیرا خواص پلاسمونیک را تقویت می‌کند [۴]. هر چند آماده سازی آن برای انجام الکترولس مشکل است. الکترولس در دمای بالا حدود ۸۰ درجه و به مدت ۲/۵ ساعت انجام می‌شود. پس از آن ۴۰ میکرولیتر از نانوذرات سیلیکا با غلظت ۵۰ میلی گرم بر میلی لیتر بر سطح ذره به روش پوشش دهی چرخشی نشانده می‌شود سپس ۴۰ میکرولیتر APTES به روش تبخیر از فاز بخار بر سطح نمونه می‌نشیند. در مرحله بعد نمونه‌ها در اتانول و آب شناور و در دستگاه آلتراسونیک قرار داده می‌شود [۵].

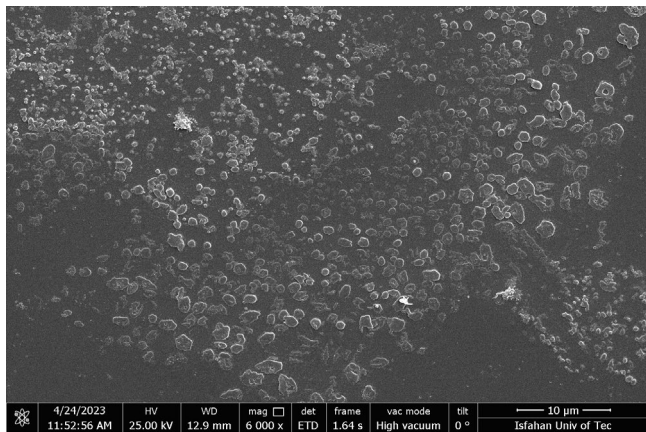
این کار سه بار تکرار می‌شود تا از جدا شدن ذرات سیلیکا مطمئن شویم. در مرحله بعدی سطح شیشه جهت انجام مراحل تکمیلی قبل از محلول الکترولس به ترتیب در سه محلول ۱- حساس ساز و فعال ساز ۲- محلول شتابدهنده ۳- محلول جوانه ساز حاوی ۱ تا ۲٪ نیکل با شرایط زیر فرو برده می‌شود [۶].

محلول حساس ساز و فعال ساز حاوی ۲۶ میلی گرم بر لیتر پالادیوم و بین ۲ تا ۸ گرم بر لیتر قلع می‌باشد که به مدت ۵ دقیقه نمونه در آن فرو برده می‌شود و سپس با آب مقطر شسته می‌شود. محلول شتابدهنده به منظور افزایش چسبندگی و زدودن سطح از ذرات قلع باقی مانده استفاده می‌شود. این محلول حاوی ۳۰ تا ۴۰ درصد نیترات سدیم و ۲۰ درصد اسید اگزالیک و ۴/۵ درصد H₂SO₄ در آب است. که نمونه به مدت ۵ دقیقه در دمای ۵۰ درجه در آن فرو می‌رود. محلول سوم که حاوی ۱ تا ۲ درصد نیکل می‌باشد pH حدود ۸ تا ۱۰ دارد که در مدت زمان ۱ تا ۳ دقیقه و در دمای ۲۵ درجه سطح در معرض آن قرار می‌گیرد. پس از آن یکی از نمونه‌های آماده شده به محلول الکترولس نیکل-فسفر با ترکیب نشان داده شده در جدول ۱ انتقال داده می‌شود. یکی دیگر از نمونه‌های آماده شده نیز به محلول الکترولس نیکل-بر-نقره با مشخصات موجود در جدول ۲ انتقال داده می‌شود.

¹Self-Assembly monolayer



شکل ۱: تصویر FESEM مربوط به نانوحلقه های نیکلی به وجود آمده در حمام Ni-B



شکل ۲: تصویر FESEM مربوط به میکروذرات نیکلی به وجود آمده در حمام Ni-P

شده است، شانه پلاسمونیک در نور پلازما شده P با مد TM دیده می شود. بنابر این در حمام های پلاسمونیک ذرات کوچک تری به وجود می آیند که برای بررسی های پلاسمونیک مناسب تر هستند. نمونه تهیه شده در حمام الکترولس نیکل بر به منظور بررسی مگنتوپلاسمونیک در معرض تابش امواج از ۲۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر و تحت میدان مغناطیسی قرار می گیرد. بازتابش آن توسط یک اسپکترومتر ذخیره می شود (شکل ۳ و ۴). نتایج به برنامه Labview داده می شود. تا تبدیل به چرخش اثر کر شود. در شکل ۵ پارامتر چرخش نسبت به طول موج را مشاهده می کنید.

جدول ۱: ترکیب حمام نیکل-فسفر

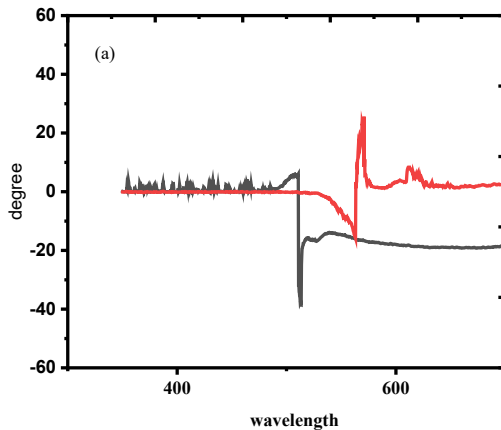
پارامترهای ترکیب	میزان
سولفات نیکل (NiSO ₄ .6H ₂ O)	۲۵g/L
سیترات سدیم (Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ .2H ₂ O)	۵۰g/L
هیپوفسفیفات سدیم (Na ₂ H ₂ PO ₂ .H ₂ O)	۲۵g/L
اسید لاکتیک (C ₃ H ₆ O ₃)	۵g/L
سولفات آمونیوم ((NH ₄) ₂ SO ₄)	۲۸g/L
استات سرب (Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂)	۲g/L

جدول ۲: ترکیب حمام نیکل-بر

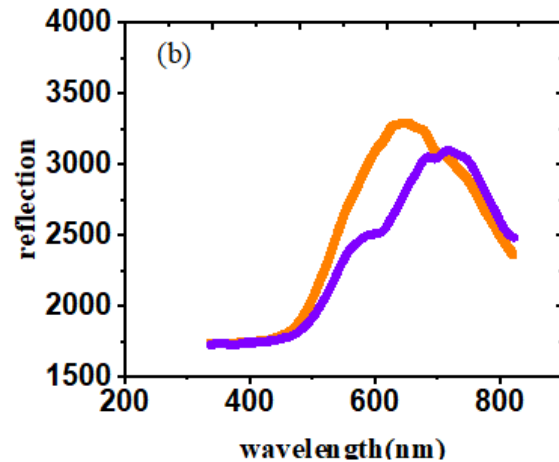
پارامترهای ترکیب	میزان
نترات نیکل (Ni(NO) ₃)	۴۴g/L
سیترات سدیم (Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ .2H ₂ O)	۲۰g/L
دی متیل آمینوبران (DMAB)	۲g/L
اسید لاکتیک (C ₃ H ₆ O ₃)	۱۰g/L
نانوذرات کروی نقره	۰٫۰۰۱g/L
ستیل تری متیل آمونیوم بروماید (C ₁₉ H ₄₂ BrN)	۰٫۰۵g/L
سدیم دودسیل سولفونات (SDS)	۰٫۰۰۵g/L

نتایج

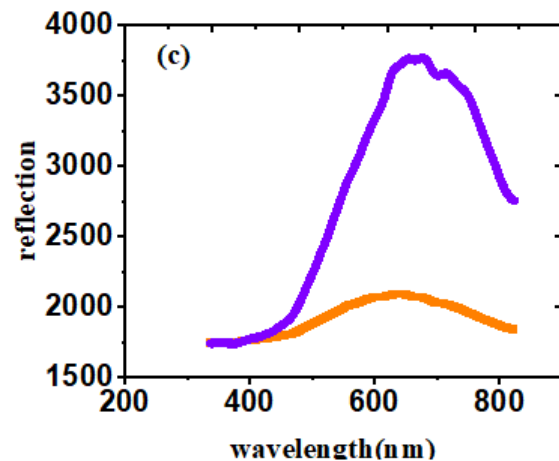
تصاویر FESEM هر دو با هم مقایسه شدند. از مقایسه تصاویر این دو نمونه نتیجه گیری می شود که نانوحلقه های تهیه شده با حمام نیکل-بر سایز کوچک تری در حد ۲۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر دارند. این در حالی است که اندازه ذرات تهیه شده در حمام نیکل فسفر در حد ۱ میکرومتر است. نمونه های آماده شده تحت بازتابش مورد ارزیابی قرار گرفت. که نتایج آن در شکل ۱ و ۲ زیر آورده شده است. همان گونه که دیده می شود در نمونه نیکل فسفر یک نوع آنیزوتروپی در نور بازتابش شده مشاهده می شود. علاوه بر آن در نمونه با نانوحلقه های کوچک تر که در حمام نیکل-بر درست



شکل 5: چرخش اثر کر طولی در نمونه نانوحلقه های نیکلی به وجود آمده در حمام نیکل-بر در دو میدان مغناطیسی با جریان ۳ آمپر (سیاه) و جریان ۲ آمپر (قرمز)



شکل 3: بازتابش نور در نمونه نانوحلقه های نیکلی به وجود آمده در حمام نیکل-بر



شکل 4: بازتابش نور در نمونه میکروذرات نیکلی به وجود آمده در حمام نیکل-فسفر

مرجع ها

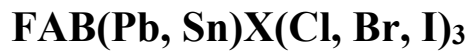
- [1] Tetsuya, O.; Nao, T.; Shinichi, K. "Fabrication of nickel dots using selective electroless deposition on silicon wafer". *J. Chem. Lett.*, 27, No 7, (1998) 657-658. <https://doi.org/10.1246/cl.1998.657>
- [2] Zhu, K.; Chen, Y.; Ma, Ch.; He, W.; Wang, Ch.; Wang, Sh.; Zhou, G.; Wang, Zh.; Liu, Y.; Huang, Y.; Zhang, W.; Sun, Y. "Anisotropic growth of electroless nickel-phosphorus plating on fine sliver lines for L-shape terminal electrode structure of chip inductor". *J. Appl. Surf. Sci.*, 493, (2019), 143633-143643. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143633>
- [3] Saner, C. M. K.; Lusker, K. L.; LeJeune, Z. M.; Serem, W. K.; Garno, J. C. Self-Assembly of Octadecyltrichlorosilane: Surface Structures Formed Using Different Protocols of Particle Lithography. *Beilstein J. Nanotechnol.* 2012, No. 3, 114-22.
- [4] Jung, M.; Choi, Y.; "Comparative study on plasmonic properties of a Ni film and 2D Ni nanodot array fabricated on an ITO substrate". *J. Mater. Lett.*, 204, (2017) 49-52. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.06.004>
- [5] Kuruppu Arachchige, N. M. K.; Chambers, Ph. C.; Taylor, A. M.; Highland, Z. L.; and Garno, J. C. Nickel Nanofilms Electrolessly Deposited on Organosilane Nanorings and Characterized by Contact Mode AFM Combined with Magnetic Sample Modulation. *ACS Appl. Nano Mater.* 2019, 2, No 4, 2193-2203. <https://doi.org/10.1021/acsanm.9b00153>
- [6] Abdul Wadi, M. A. ; Ming Liew, S. ; Lih Lim, S. ; Enhanced nickel plating process, US 20200148589 A1, Western Digital Technologies Inc, 2021.

نتیجه گیری

به منظور کاربرد روش های شیمیایی در بررسی های پلاسمونیک و مگنتوپلاسمونیک، استفاده از حمام الکترولس نیکل بر از این لحاظ مناسب تر است که قابلیت ایجاد ذرات ریزتری را دارد. و یک افت در نتایج پلاسمونیک مشاهده می شود. همچنین باعث چرخش اثر کر ثر چیدمان LMOKE خواهد شد. که می توان از آن در حسگرهای پلاسمونیک و مگنتوپلاسمونیک استفاده نمود.



تجزیه و تحلیل عملکرد مقایسه ای سلول های خورشیدی پروسکایت مبتنی بر



کریمی مونه، پرپسا^۱؛ شریفی، نفیسه^۲

^۱ دانشکده فیزیک دانشگاه کاشان، دانشگاه کاشان، کاشان ۸۷۳۱۷، ایران

^۲ پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان، کاشان ۸۷۳۱۷، ایران

sharifi@kashanu.ac.ir and parisa.mjkarimi@gmail.com

چکیده

در سال های اخیر، به دلیل پیشرفت های چشمگیر در بازدهی سلول های خورشیدی پروسکایتی (PSC)، علاقه مندی زیادی به این سلول ها وجود داشته است. سلول های خورشیدی پروسکایتی مبتنی بر فرمامیدینیم (FA) به دلیل بازدهی قابل توجه تبدیل توان (PCEs) که از ۲۵ درصد فراتر رفته است، به عنوان کاندیدهای امیدوارکننده برای دستگاه های فتوولتائیک نسل بعدی ظاهر شده اند. عملکرد برتر سلول های خورشیدی پروسکایتی مبتنی بر فرمامیدینیم را می توان به شکاف باندهای مطلوب، تحرک حامل بالا و طول انتشار بار طولانی نسبت داد. بهینه سازی ساختار، مواد و پارامترهای PSC ها، می تواند از طریق آزمایش های پرهزینه و وقت گیر انجام شود. با این حال، شبیه سازی عددی نیز می تواند برای این منظور مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه از نرم افزار SCAPS برای بررسی و مقایسه ترکیبات $\text{FAB(Pb, Sn)X(Cl, Br, I)}_3$ استفاده شده است. چون مواد معدنی پایداری بیشتری در مقایسه با لایه انتقال دهنده حفره متداول که اسپایروامتد است؛ دارند. در این پژوهش از Cu_2O به عنوان لایه های انتقال دهنده حفره (HTL) استفاده شد. در نهایت برای ترکیب $\text{FTO/SnO}_2/\text{FAPbI}_3/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Carbon}$ بازدهی تبدیل توان ۱۴/۶۵ درصد و $\text{FTO/SnO}_2/\text{FASnI}_3/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Carbon}$ ، جریان اتصال کوتاه (Jsc) ۲۶/۵۹ میلی آمپر بر سانتی متر مربع بدست آمد.

Comparative Performance Analysis $\text{FAB(Pb, Sn)X(Cl, Br, I)}_3$ - based Perovskites Solar Cells

Parisa Karimi Moone¹, Nafiseh Sharifi^{1,2*}

¹ Department of Photonics and Plasma, Faculty of Physics, University of Kashan, Kashan 87317, Iran

² Institute of Nanoscience and Nanotechnology, University of Kashan, Kashan 87317, Iran

Abstract

In recent years, there has been a great deal of interest in perovskite solar cells (PSCs) due to their impressive efficiency gains. Formamidinium (FA)-based perovskite solar cells (PSCs) have emerged as promising candidates for next-generation photovoltaic devices due to their remarkable power conversion efficiencies (PCEs) that have surpassed 25%. The superior performance of FA-PSCs can be attributed to their favorable bandgap, high carrier mobility, and long charge diffusion lengths. Optimization of the structure, materials, and parameters of PSCs can be achieved through costly and time-consuming experiments. However, numerical simulation can also be used for this purpose. In this study, the SCAPS software was used to investigate and compare $\text{FAB(Pb, Sn)X(Cl, Br, I)}_3$ compositions. Inorganic materials have higher stability compared to the common hole transport layer, which is spiro-OMeTAD. In this study, Cu_2O was used as the hole transport layer (HTL). Finally, the highest power conversion efficiency (PCE) of 14.65% and the highest short-circuit current (JSC) of 26.59 mA/cm^2 were obtained for the $\text{FTO/SnO}_2/\text{FAPbI}_3/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Carbon}$ and $\text{FTO/SnO}_2/\text{FASnI}_3/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Carbon}$ compositions, respectively.



مقدمه

طراحی ساختار و مدل سازی

در دهه های اخیر، توسعه تکنولوژی سلول های خورشیدی به یک مرحله بسیار پیشرفته رسیده است. یکی از ابزارهای مهم در این زمینه، نرم افزار شبیه سازی SCAPS-1D (نسخه ۳.۳.۰۶) است. محاسبات مورد استفاده در SCAPS-1D عمدتاً بر اساس معادلات پیوستگی الکترون و حفره (معادله (۱) و (۲)) و همچنین معادله پواسون (معادله (۳)) است. هدف این ابزار شبیه سازی، بررسی رفتار انواع سلول های خورشیدی با ساختار ناهمسان است که با حضور چندین لایه از مواد نیمه رسانای مختلف متمایز می شوند (۴).

$$\frac{dJ_n}{dx} + G_n - R_n = 0 \rightarrow (1)$$

$$-\frac{dJ_p}{dx} + G_p - R_p = 0 \rightarrow (2)$$

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{-q}{\epsilon_r} [p(x) - n(x) + N_D^+(x) - N_A^-(x) \pm N_i] \rightarrow (3)$$

که در آن $q = \text{بار}$ ، $\epsilon_r = \text{گذردهی دی الکتریک}$ ، $\psi(x) = \text{پتانسیل الکتریکی}$ ، $p(x) = \text{غلظت حفره های آزاد}$ ، $n(x) = \text{غلظت الکترون های آزاد}$ ، $N_D^+(x) = \text{غلظت حامل های دهنده}$ ، $N_A^-(x) = \text{غلظت حامل های گیرنده}$ ، $N_i = \text{چگالی نقص}$ ، $J_n = \text{چگالی جریان الکترون}$ ، $J_p = \text{چگالی جریان حفره}$ ، $G_n = \text{نرخ تولید الکترون}$ ، $G_p = \text{نرخ تولید حفره}$ ، $R_n = \text{نرخ بازترکیب الکترون}$ و $R_p = \text{نرخ بازترکیب حفره می باشند (۵)}$.

ساختار سلول خورشیدی پروسکایتی شبیه سازی شده، مطابق با شکل ۱، از FTO: لایه رسانای شفاف، SnO_2 : لایه انتقال الکترون، پروسکایت: لایه فعال، Cu_2O : لایه انتقال حفره و Carbon: الکتروود پشتی تشکیل شده است.

پارامترهای ورودی ضروری شبیه سازی برای هر لایه به ترتیب انرژی شکاف نواری، میزان الکترون خواهی، چگالی مؤثر حالت های نوار هدایت، چگالی مؤثر حالت های نوار ظرفیت، تحرک الکترون، تحرک حفره، غلظت حالت های گیرنده و دهنده و هر دو سرعت حرارتی الکترون و سرعت حرارتی حفره هستند. سرعت حرارتی برای الکترون و حفره 10^7 سانتی متر بر ثانیه،

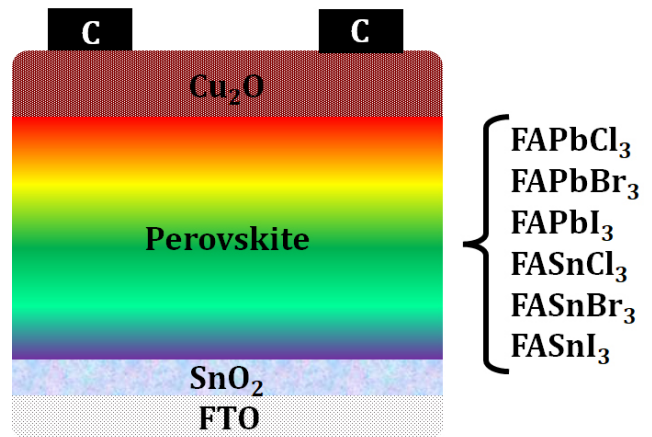
سلول های خورشیدی پروسکایتی (PSCs) یک فناوری نوظهور در تولید انرژی خورشیدی هستند که به دلیل هزینه های تولید پایین و پتانسیل بالای بهره وری، مورد توجه زیادی قرار گرفته اند. این سلول ها از یک لایه پروسکایتی به عنوان لایه فعال استفاده می کنند که از ترکیبات فلزی و هالوژن تشکیل شده است. سلول های خورشیدی پروسکایت با بهره وری گزارش شده ۲۵/۵ درصد، یکی از کارآمدترین سلول های خورشیدی موجود هستند (۱). این سلول ها، در مدت زمان کوتاهی، پیشرفت قابل توجهی در راندمان تبدیل توان داشته اند. سلول های خورشیدی پروسکایتی، به دلیل مزایای متعددی از جمله: ضریب جذب بالا، تحرک حامل بار عالی، فاصله باند انرژی مستقیم و قابل تنظیم، کاهش انرژی اتصال اکسایتون، مقرون به صرفه بودن، و توانایی تولید در دمای اتاق، توسعه یافته اند (۲). با پیشرفت های اخیر در زمینه سلول های خورشیدی پروسکایتی، سلول های خورشیدی مبتنی بر فرمیدینوم به عنوان یک گزینه امیدوارکننده برای تولید انرژی خورشیدی مطرح شده اند. این سلول ها، با استفاده از فرمیدینوم (FA) به عنوان یک عنصر کلیدی، ترکیبی از پایداری و عملکرد بهبود یافته را ارائه می دهند که آنها را به کانون توجه تحقیقات انرژی های تجدیدپذیر تبدیل کرده است (۳). در این مطالعه، عملکرد پروسکایت های ترکیبی آلی-معدنی (HOIPs) مختلف را از جمله FAPbCl_3 ، FAPbBr_3 ، FAPbI_3 ، FASnCl_3 ، FASnBr_3 و FASnI_3 مورد بررسی قرار گرفت. برای بهبود تحرک حامل های بار در HOIPs، از SnO_2 به عنوان لایه انتقال الکترون (ETL) به جای TiO_2 استفاده کردیم. دارای تحرک الکترونی بالاتری نسبت به TiO_2 است که می تواند به انتقال کارآمدتر الکترون ها از لایه پروسکایت به الکتروود کمک کند. علاوه بر این، Cu_2O به عنوان لایه انتقال حفره (HTL) انتخاب شد، زیرا همترازی نواری مطلوبی با تمام HOIPs مورد مطالعه دارد. همترازی نواری مطلوب بین ETL و HTL می تواند به انتقال کارآمدتر حفره ها از لایه پروسکایت به الکتروود کمک کند.



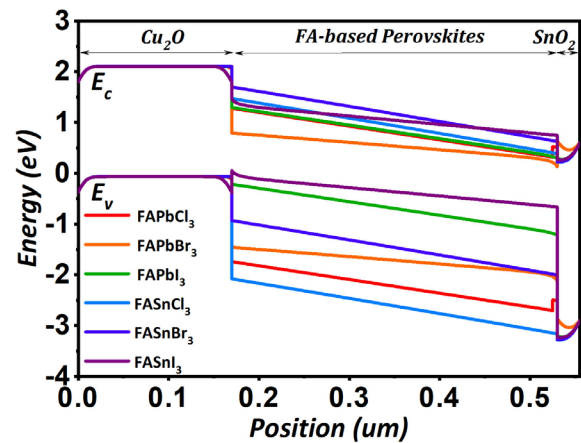
Perovskite/ETL و HTL/Perovskite ، تابع توزیع نقص ها به صورت گاوسی، انرژی مشخصه ۰/۱ الکترون ولت و همچنین تابع کار برای FTO و Carbon به ترتیب ۴/۶ و ۵ الکترون ولت قرار داده شد.

نتایج

نمودار سطوح انرژی یک PSC ترتیب سطوح انرژی لایه های مختلف در سلول است. همترازی سطوح باید به گونه ای باشد که الکترون ها بتوانند به راحتی از تراز رسانش لایه جاذب به سمت تراز رسانش ETL حرکت کنند و حفره ها بتوانند به راحتی از تراز ظرفیت HTL به تراز ظرفیت لایه جاذب حرکت کنند. این برای جداسازی و جمع آوری کارآمد حامل های بار ضروری است. با درک فاصله ترازهای انرژی، می توان موادی را با تطابق ترازهای انرژی و خواص نوری مورد نظر طراحی کنند، که به بهبود کارایی PSC ها کمک کنند. در شکل ۲ نمودار ترازهای انرژی ساختارهای شبیه سازی شده نمایش داده شده و مشاهده می شود، که هر ۶ لایه جاذب همترازی بالایی با مواد ETL و HTL مجاور خود دارند.

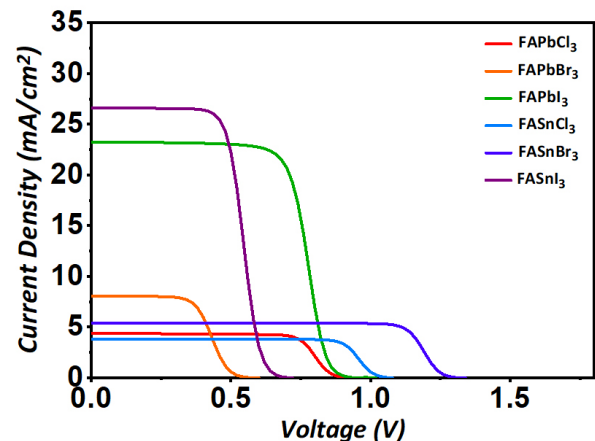


شکل ۱: ساختار سلول خورشیدی شبیه سازی شده



شکل ۲: نمودار باند انرژی لایه های مختلف HOIP

هنگامی که پایین ترین سطح نوار رسانش لایه ETL بالاتر از پایین ترین سطح نوار رسانش پروسکایت باشد، یک قله در سطح مشترک Perovskite/ETL تشکیل می شود و مانعی برای جریان الکترون ایجاد می کند. که در اتصال FASnI₃ و SnO₂ قابل مشاهده است. در شکل ۳ و ۴ نمودارهای جریان-ولتاژ و بازدهی کوانتومی قابل مشاهده است. طبق نمودار ۳ ساختار سلول با لایه جاذب های FASnI₃ و FAPbI₃ بالاترین بازدهی به ترتیب ۱۴/۶۵ و ۱۱/۷۱ را دارا است. که این با توجه به نمودار ۴ که این دو ماده بازدهی کوانتومی بالاتری نسبت به سایر ساختار ها دارند تایید می شود، و می تواند به دلیل شکاف نواری پایین ترین این مواد نسبت به سایر ترکیبات پروسکایتی مبتنی بر FA باشد.



شکل ۳: نمودار جریان-ولتاژ سلول های مدل سازی شده

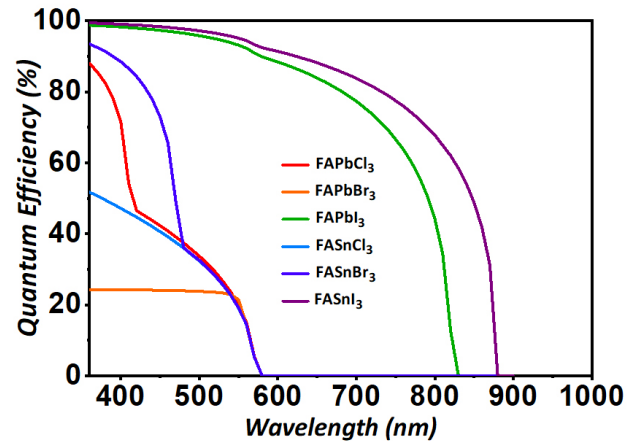
برای نزدیکی به حالت واقعی و در نظر گرفتن نقص های بازترکیبی سطحی دو لایه IDL1 و IDL2 به ترتیب بین



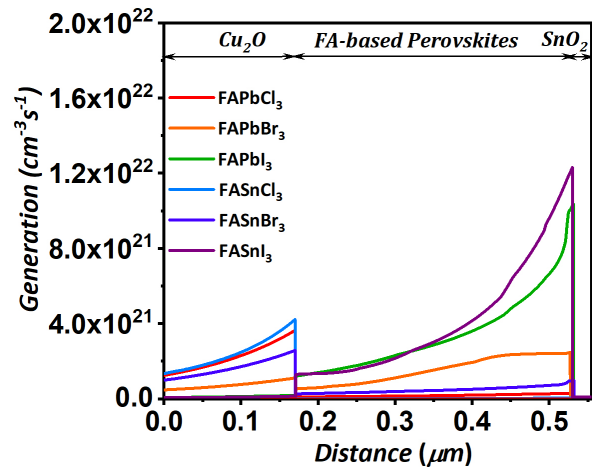
وقتی یک فوتون توسط یک الکترون جذب می شود، باعث می شود که الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانایی حرکت کند. این فرآیند منجر به ایجاد جفت الکترون-حفره می شود، جایی که یک حفره در نوار ظرفیت باقی می ماند. این پدیده در عملکرد سلول‌های خورشیدی، جایی که هدف تولید و جداسازی این جفت‌های الکترون-حفره برای تولید حامل است، از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. در محل اتصال ETL/Perovskite و Perovskite/HTL نرخ تولید این جفت‌های الکترون-حفره به اوج خود می‌رسد (شکل ۵). این نشان می‌دهد که این اتصال‌ها به ویژه در ارتقاء جذب فوتون‌ها و ایجاد جفت الکترون-حفره موثر هستند. علاوه بر این، نشان می‌دهد که سلول خورشیدی با لایه جاذب $FASnI_3$ ، نرخ تولید بالاتر است، به خصوص در محل اتصال ETL/Perovskite. این نشان می‌دهد که ماده $FASnI_3$ به ویژه در تولید جفت الکترون-حفره کارآمدتر است و جریان اتصال کوتاه، بالاتر این ساختار نسبت به سایر ساختارها، تاییدی بر این ادعا می‌باشد (جدول ۱).

نتیجه گیری

این مطالعه از نرم افزاری SCAPS-1D برای تجزیه و تحلیل عددی PSC‌ها با پروسکایت‌های مختلف استفاده کرد. تمرکز بر درک تأثیر مواد مختلف HOIPs بر عملکرد سلول‌های خورشیدی با پیکربندی $FTO/SnO_2/Perovskite/Cu_2O/Carbon$ ، که به SnO_2 به عنوان ETL و Cu_2O به عنوان HTL عمل می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که PSC‌های دارای $FASnBr_3$ بالاترین V_{oc} و همچنین بالاترین فاکتور پرشدگی به ترتیب ۱/۳۲ ولت و ۷۹/۱۵ نشان دادند. PSC‌ها با لایه جاذب پروسکایتی $FAPbI_3$ بهترین راندمان تبدیل توان را با ۱۴/۶۵ دارا می‌باشد که نشان دهنده کارایی $FAPbI_3$ در تبدیل نور خورشید به الکتریسیته است. علاوه بر این، این سلول خورشیدی خاص $FASnI_3$ بالاترین چگالی جریان اتصال کوتاه را با ۲۶/۵۹ میلی آمپر بر سانتی‌متر مربع نشان داد که توانایی آن در تولید جریان بالا را برجسته می‌کند.



شکل ۴: نمودار بازدهی کوانتومی سلول‌های مدل‌سازی شده



شکل ۵: توزیع فضایی نرخ تولید حامل‌ها

جدول ۱: پارامترهای عملکردی سلول‌های خورشیدی دارای پروسکایت‌های مختلف

	FAPbBr ₃	FAPbI ₃	FAPbCl ₃	FASnBr ₃	FASnI ₃	FASnCl ₃
V_{oc}	0.581	0.947	0.924	1.320	0.713	1.075
J_{cs}	8.078	23.25	4.396	5.407	26.59	3.813
FF	56.92	66.49	72.12	79.15	61.75	77.43
PCE	2.68	14.65	2.93	5.65	11.71	3.17



- [3] Tara A, Bharti V, Sharma S, Gupta R. Device simulation of FASnI₃ based perovskite solar cell with Zn(O_{0.3}, S_{0.7}) as electron transport layer using SCAPS-1D. Opt Mater (Amst) [Internet]. 2021;119(July):111362.
- [4] Burgelman M, Nollet P, Degraeve S. Modelling polycrystalline semiconductor solar cells. Thin Solid Films [Internet]. 2000 Feb;361–362:527–32.
- [5] Lin L, Jiang L, Li P, Xiong H, Kang Z, Fan B, et al. Simulated development and optimized performance of CsPbI₃ based all-inorganic perovskite solar cells. Vol. 198, Solar Energy. 2020. p. 454–60.

مرجع ها

- [1] Ahmad K, Kim H. Improved photovoltaic performance and stability of perovskite solar cells with device structure of (ITO/SnO₂/CH₃NH₃PbI₃/rGO+spiro-MeOTAD/Au). Mater Sci Eng B Solid-State Mater Adv Technol [Internet]. 2023;289(December 2022):116227.
- [2] Alla M, Bimli S, Manjunath V, Samtham M, Kasaudhan A, Choudhary E, et al. Towards lead-free all-inorganic perovskite solar cell with theoretical efficiency approaching 23%. Mater Technol [Internet]. 2022;37(14):2963–9.



طراحی یک دستگاه لایه‌نشانی فیزیکی بخار ابعاد کوچک برای کاربردهای آزمایشگاهی

فتح الهی، محمدرضا

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی قم، بلوار سردار شهید خدایا کرم (جاده قدیم تهران)، قم

fathollahi@qut.ac.ir and m.r.fathollahi@gmail.com

چکیده

فناوری خلأ، یکی از صنایع فوق پیشرفته مادر محسوب می‌گردد، به گونه‌ای که بیان می‌گردد در تمامی تولیدات و منسوجات پیشرفته کنونی ساخت بشر، ردپا و کاربردی از فناوری خلأ وجود داشته است. از جمله کاربردهای حیاتی فناوری خلأ می‌توان به کاربرد آن در صنعت معظم ساخت ادوات الکترونیکی - مخابراتی و افزاه‌های نیمه هادی اشاره کرد. دستگاه لایه‌نشانی حرارتی تبخیری، یکی از ساده‌ترین سیستم‌های خلأ محسوب می‌گردد که به منظور ایجاد لایه‌ها و پوشش‌های نازک از مواد مختلف با ضخامت از مرتبه نانومتر تا میکرومتر کاربرد دارد. در مقاله حاضر، طراحی دستگاه لایه‌نشانی حرارتی تبخیری تحت خلأ ابعاد کوچک برای کاربرد آزمایشگاهی ارائه می‌شود. بر اساس ملزوماتی مانند ملزومات ساخت نمونه، منابع تبخیر مواد، ملزومات ساختاری دستگاه و سرعت تخلیه و ساینز پمپ‌ها، ساختار دستگاه طراحی می‌گردد.

Designing a Small-Size Physical Vapor Deposition System for Laboratory Applications

Fathollahi, Mohammadreza

Faculty of Electrical and Computer Engineering, Qom University of Technology, Qom, 3718146645, Iran

Abstract

Vacuum technology is regarded as one of the most advanced industries, with its applications and traces found in nearly all modern sophisticated man-made products and textiles. Among the critical applications of vacuum technology is its use in the major industries of electronic-telecommunications and semiconductor device manufacturing. Thermal evaporation coating systems are one of the simplest vacuum facilities, used to fabricate thin films and coatings of various materials with thicknesses ranging from nanometers to micrometers. In this article, we present the design of a small-size vacuum thermal evaporation coating system for laboratory applications. The system structure is designed to meet various circumstances, including sample preparation, evaporation sources, structural integrity of the system, and the pumps' size and evacuation speeds.



مقدمه

محفظه و ۷- انتخاب پمپ مناسب و نهایی کردن قطر دهانه اتصال. در ابتدا با تمرکز بر روی **base plate**، ابعاد آن، با توجه به ماسک، **boat** تبخیر و قطر دهانه اتصال پمپ تعیین می‌شود. ارتفاع محفظه نیز به فاصله مناسب **boat** با ماسک، برای حصول لایه‌نشانی یکنواخت، بستگی پیدا می‌کند.

تخمین ابعاد نگهدار نمونه و ماسک

یک طرح استاندارد برای قرارگیری مجموعه‌ای از نمونه‌ها بصورت یک مربع $4\text{in} * 4\text{in}$ با قابلیت قرارگرفتن ۴ لام آزمایشگاهی در کنار یکدیگر می‌باشد. به هر جهت ابعاد نگهدار نمونه، باعث تحمیل قید جدی بر روی ابعاد و هندسه **base plate** نمی‌گردد و ابعاد **base plate** بیشتر بر اساس دیگر ابعاد، محدود و معین می‌گردد، زیرا اغلب نیاز نیست پایه نگهدار نمونه بر روی **base plate** ثابت (**fix**) گردد. با این حال، ارتفاع قرارگیری نگهدار ماسک نقش مستقیمی در تعیین ارتفاع محفظه برعهده خواهد داشت.

تخمین ابعاد و محل قرارگیری **boat** ها بر صفحه

ابعاد و فواصل پایه‌ها، بر اساس اندازه منابع تبخیر طراحی می‌شوند. با فرض بکارگیری **boat**های با طول ۴ الی ۵ اینچ، شکل ۱ کلیت طرح یک جفت پایه را نشان می‌دهد، همچنین شکل، نمای کلی محل قرارگیری پایه الکترودها در شکل نشان داده شده است. قابل توجه آنکه تیغه الکترودها آزادانه قابلیت چرخش 360° درجه دارند. در حالت کلی، مکان‌یابی محل الکترودها و دهانه‌ها با قیود خاص بر روی **base plate**، به کمک مسائل مکان هندسی بصورت دقیق قابل محاسبه است.

تخمین قطر دهانه اتصال پمپ

پمپ دیفوزن بعنوان پمپ خلأ بالا در سیستم حاضر، در نظر گرفته می‌شود. قطر دهانه (**Flange**) ورودی پمپ‌ها متناسب با سرعت تخلیه پمپ می‌باشد. در یک تخمین اولیه، برای سیستم تحت طراحی، پمپ دیفوزنی با سرعت تخلیه 300 l/s (شاید 150 l/s و یا 700 l/s) مناسب خواهد بود که البته در ادامه طراحی با توجه به سطح تحت خلأ (متناسب با سطح محفظه) محاسبه خواهد شد. در تخمین اولیه بر اساس **ISO100** دهانه‌ای به قطر تقریباً برابر 102mm (داخلی) / 130mm (خارجی) در مرکز **base plate**

بطور کلی یکی از روشهای مرسوم ایجاد لایه‌ها و پوشش‌ها در محدوده نانومتر تا بعضاً میکرومتر از برخی مواد، مانند عناصر فلزی و بعضی نمکها و مواد آلی مولکول کوچک، به کمک تبخیر این گونه مواد در شرایط خلأ بالا صورت می‌پذیرد. لایه‌ها و پوشش‌های نازک، کاربرد گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف فناوری دارند؛ از جمله، می‌توان به ایجاد پوشش‌های خاص برای ساخت مواد پیشرفته و یا ایجاد ساختارهای چندلایه‌ای نانومتری در ساخت افزاره‌های الکترونیکی و مخابراتی و بسیاری کاربردهای دیگر مانند میکروالکترونیک و فناوری سیلیکون، پوشش دهی دکوراتیو، پوشش‌های مقاوم‌ساز سخت‌کننده، پوشش دهی با کاربردهای اپتیکی، پوشش دهی مواد مغناطیسی، پوشش دهی مواد با عملکرد ضد بازتاب و محافظ و بسیاری کاربردهای دیگر اشاره نمود. در مقاله حاضر، طراحی یک دستگاه لایه‌نشانی کوچک مدنظر قرار دارد که کاربرد اصلی آن آماده‌سازی نمونه‌های **prototype** و نمونه‌های آزمایشگاهی - دانشگاهی می‌باشد. چنین سیستمی با ابعاد کوچک، دارای مزیت کوتاه بودن زمان خلأ شدن سیستم و بالبع، افزایش سرعت عمل در تحقیقات می‌باشد.

روند کلی تخمین ابعاد اجزاء مختلف دستگاه

بر روی **base plate** دایره‌ای شکل در محیط کناری دهانه اتصال پمپ در وسط **plate**، در جلو و در سمت کاربر دو جفت پایه الکتروود خنک شونده با آبگرد، با امکان نصب و برداشت در دسترس ۲ عدد **boat** یا **basket**، تعبیه می‌گردد. در سمت مقابل دهانه‌ها و **Feedthrough** های الکتریکی و مکانیکی به منظور اتصال فشارسنج‌ها، **heater** نمونه و دیواره چمبر و **shutter** نمونه در نظر گرفته می‌شود. همچنین **sample holder** بر روی یک پایه غیرثابت و با قابلیت جابه‌جا شدن قرار خواهد گرفت. بطور کلی روند تخمین و تعیین ابعاد **base plate** و حجم محفظه و انتخاب پمپ مناسب را می‌توان بصورت زیر دنبال نمود: ۱- تخمین ابعاد نگهدار ماسک و ارتفاع آن، ۲- تخمین ابعاد و محل قرارگیری **boat** ها بر روی **plate**، ۳- تخمین قطر دهانه اتصال پمپ، ۴- تخمین ابعاد **base plate**، ۵- تخمین ارتفاع محفظه، ۶- تخمین حجم



انتخاب پمپ روتاری بر اساس تخلیه حجمی

لازم است، محاسبات پمپ مناسب برای هر دو حالت کاری (حالت تخلیه حجمی و حالت پشتیبان) انجام شود و پمپ مناسب بر اساس بحرانی‌ترین شرط انتخاب شود. در شرایط تخلیه حجمی یک پمپ روتاری، می‌توان بر اساس رابطه (۲)، سرعت تخلیه مورد نیاز را محاسبه نمود [۲ و ۳]:

$$S_{eff} = \frac{V}{t} \ln(P_{atm}/P_{vac}) \quad (2)$$

که در آن V حجم مورد تخلیه، t مدت زمان تخلیه، P_{atm} فشار اولیه و P_{vac} فشار نهایی می‌باشد. فشار اولیه برابر 1 atm ، فشار نهایی برابر $5 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ در نظر گرفته می‌شود. حجم تحت تخلیه در یک تخمین اولیه ۳۰ تا ۴۰ درصد بیشتر برابر با ۷۰ لیتر در نظر گرفته می‌شود و t زمان تخلیه برابر ۵ دقیقه در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، یک پمپ با سرعت تخلیه برابر با $S_{eff} = 8.2 \text{ m}^3/\text{h}$ و با یک ضریب اطمینان $1/5$ برابر حدود $12 \text{ m}^3/\text{h}$ مناسب خواهد بود.

انتخاب پمپ دیفوژن

برای انتخاب پمپ دیفوژن مناسب، لازم است مقدار گاز ساطع شده از سطوح داخلی سیستم و فشار نهایی مورد نیاز را در نظر داشت و سرعت تخلیه مورد نیاز برای شرایط خلأ بالا را محاسبه نمود. برای استیل ضد زنگ مقدار گاز آزاد شده در واحد سطح (m^2) و واحد زمان (s) حدوداً برابر $2.66 \times 10^{-4} \text{ mbar l / s m}^2$ می‌باشد [۲] و همچنین، برای سطح داخلی محفظه داریم:

$$2 \times (\pi \times 0.2^2) + 2\pi \times 0.2 \times 0.4 = 0.7536 \text{ m}^2$$

در شرایط خلأ بالا، سرعت تخلیه گاز از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$S_{eff} = Q/P \quad (3)$$

که در آن Q مقدار گاز آزاد شده در واحد زمان از واحد سطح و P فشار نهایی (بعنوان مثال برابر $2 \times 10^{-6} \text{ mbar}$) می‌باشد. با در نظر گرفتن ضریب اطمینان $1/5$ برای سطح، سرعت تخلیه برابر 150 $1/\text{s}$ بدست می‌آید، لذا، پمپی با دهانه‌ای متناسب با ISO100 و با سرعت تخلیه 300 $1/\text{s}$ مناسب می‌نماید.

برای نصب پمپ در نظر گرفته می‌شود که معادل با دایره‌ای به شعاع $3in - 1.4 \sim$ (بحرانی‌ترین حالت $3in$) در مرکز می‌باشد. با توجه به تخمین قطر دهانه اتصال پمپ و مکان یابی محل پایه الکترودها، می‌توان تخمینی از شعاع $base \ plate$ بدست می‌آورد که معادل قطری در حدود ۴۰ سانتی‌متر می‌باشد:

$$3 + 0.5 + 2 + 1 + 1.5 = 8 \text{ inch } (\approx 40 \text{ cm})$$

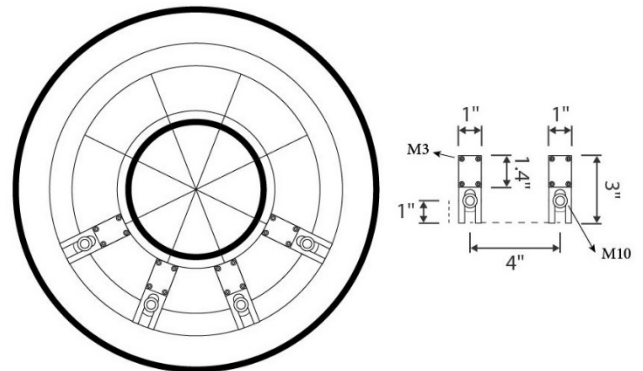
تخمین و تعیین ارتفاع محفظه

فاصله مناسب نگهدار نمونه از منبع تبخیر بر اساس یکنواختی لایه تشکیل شده تعیین می‌گردد. می‌توان فاصله مناسب میان منبع و نمونه (H) را بر حسب فاصله مرکز تا گوشه نمونه (L) و نسبت ضخامت لایه در مرکز نمونه (l_0) و ضخامت لایه در منتهی الیه گوشه آن (l) بصورت رابطه (۱) محاسبه نمود [۱]:

$$H = L \left[\left(\frac{l_0}{l} \right)^{1/2} - 1 \right]^{-1/2} \quad (1)$$

با فرض مقدار L برابر 5 cm ، اگر اختلاف قابل قبول ضخامت لایه در گوشه نمونه با مرکز آنرا حداکثر 10% فرض کنیم، فاصله حداقل منبع تا نمونه برابر با $H = 21.6 \text{ cm} \approx 9 \text{ in}$ بدست می‌آید. در ادامه، برای محاسبه ارتفاع محفظه، بخش بالایی ادامه استوانه با سر عدسی شکل به شعاع $base \ plate$ و ارتفاع 10 cm می‌باشد و همچنین ارتفاع پایه الکترودها برابر با 3 in و فاصله الکترودها تا نمونه 9 in در مجموع 12 in برابر 30 cm می‌باشد که در کل ارتفاع محفظه برابر 40 cm بدست می‌دهد و برای حجم محفظه خواهیم داشت:

$$\pi \times 0.2^2 \times 0.4 = 0.05024 \text{ m}^3 \approx 50 \text{ lit}$$



شکل ۱: طرح جفت پایه الکترودها و طرح کلی محل قرارگیری پایه الکترودها



انتخاب پمپ روتاری بعنوان پمپ پشتیبان

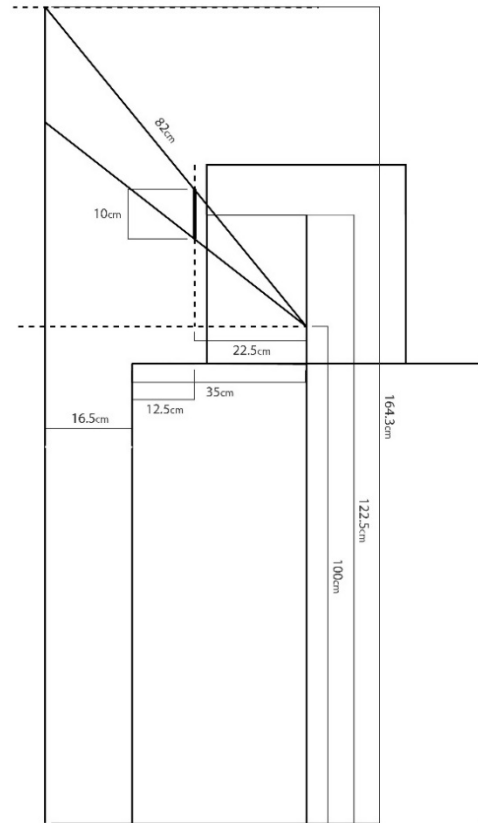
در مرحله آخر، شرط پمپ روتاری بعنوان پشتیبان را بررسی می‌نماییم، در طول فرآیند خلأسازی و تبخیر، بیشترین مقدار گاز که توسط پمپ دیفیوژن تخلیه می‌شود، برای حالتی است که چمبر بیشترین فشار (کمترین خلأ) را در محدوده کاری دارد، برای یک پمپ دیفیوژن، بیشترین فشار چمبر که پمپ دیفیوژن هنوز می‌تواند بدرستی کار کند برابر با 10^{-3} mbar می‌باشد. همچنین حداقل فشار back دیفیوژن که پمپ روتاری باید این حداقل را تامین کند تا پمپ دیفیوژن بدرستی کار کند برابر با 10^{-1} mbar می‌باشد، که با در نظر گرفتن دشوارترین شرایط کاری برای سیستم تخلیه، محفظه در فشار 10^{-3} mbar و فشار پشتیبان برابر 10^{-1} mbar (یک تقریب متداول و قابل اطمینان اختلاف فشار دو مرتبه (۱۰۰ برابر) در دو سمت پمپ دیفیوژن) می‌توان رابطه (۴) را بر اساس مقدار گاز تخلیه در واحد زمان (Q) بصورت زیر نوشت:

$$P_{chamber} \times S_{eff-diff} = P_{backing} \times S_{eff-rotary} \quad (4)$$

که در نتیجه آن سرعت تخلیه موثر پمپ روتاری مورد نیاز برای پشتیبانی برابر با $5.4 \text{ m}^3/\text{h}$ بدست می‌آید. پس برای سیستم کوچک مدنظر در اساس شرط تخلیه حجمی برای پمپ روتاری تعیین کننده‌تر است. برای محاسبه یک مرتبه دقیق‌تر سرعت تخلیه پمپ پشتیبان، می‌توان Q_{max} خروجی ماکزیمم پمپ دیفیوژن و CBP فشار بحرانی پشتیبان پمپ دیفیوژن را در نظر گرفت. لازم به توضیح است که محاسبات مربوط به پمپ‌ها با ساده‌ترین فرمولاسیون انجام شده است که هدف ارائه یک تخمین اولیه قابل اطمینان بوده است.

محاسبات اسکلت دستگاه

در محاسبات اسکلت یا چارچوب دستگاه، ارتفاع چارچوب base plate و محل پنجره دید مورد توجه قرار می‌گیرد. مطابق استاندارد، ارتفاع مناسب برای base plate تقریباً برابر با 92.5cm معادل 37 inch می‌باشد [۴]. شکل ۲، ابعاد و اندازه‌های مرتبط با محاسبه محل مناسب پنجره دید برای سیستم را نشان می‌دهد، که بر اساس روابط هندسه عمومی محاسبه می‌شوند. همچنین ملاحظه می‌شود اگر بر اساس محاسبات انجام شده فرض کنیم محل پنجره دید (بالای چمبر) به شکل دایره‌ای به قطر 10cm (4 inch) دقیقاً



شکل ۲: طرح کلی چارچوب دستگاه لایه‌نشانی.



شکل ۳: نمایی سه بعدی از دستگاه



قرار گرفت که می‌تواند در آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گیرد.

مرجع‌ها

- [۱] S. M. Sze and M.-K. Lee; “*Semiconductor Devices, Physics and Technology*”; (2012).
- [۲] N. Harris; “*Modern Vacuum Practice*”; 5th edition, Edwards High Vacuum International (1989).
- [۳] Vacuum Society of Iran; “*Applied training of vacuum science and technology: comprehensive course*”; (2016-2017).
- [۴] A. L. Cohen et al; “*Elements of Ergonomics Programs*”; (1997)

در مقابل نگهدار نمونه قرار داشته باشد، آنگاه شخص با قرار گرفتن به فاصله 30cm~ از دستگاه، می‌تواند منبع تبخیر را مشاهده نماید و منبع تبخیر در فاصله تقریباً برابر 80cm~ خط دید مستقیم (line of sight) او قرار خواهد داشت. شکل ۳، نمونه مدلسازی دستگاه را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، طراحی یک دستگاه لایه نشانی کوچک مدنظر



آنتن میکرواستریپ چهار بانده تراهرتز برای کاربردهای ارتباط بی سیم

عشوری، محمدحسین؛ فاخته، سعید

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

Mh.Asouri69@gmail.com and Saeedfakhte@qut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش یک آنتن میکرواستریپ برای کاربرد در سیستم‌های ارتباطات بی‌سیم در بانده فرکانسی تراهرتز دارای ارائه شده است. ساختار آنتن پیشنهادی شامل یک پچ میکرواستریپ مربعی شکل که توسط یک خط میکرواستریپ تغذیه می‌شود. یک نوار دور پچ وجود دارد که به پهنای بانده امپدانس کمک می‌کند و یک سری وایا که نوار دور پچ را به صفحه زیرین آنتن متصل کرده که هم به پهنای بانده امپدانس کمک می‌کند و هم به کاهش جفت متقابل بین آنتن‌ها کمک می‌کند. محدوده عملکرد آنتن پیشنهادی بین ۲۷ تا ۳۳ تراهرتز می‌باشد.

Quad-Band Terahertz Microstrip Antenna for Wireless Communication Applications

Ashuri, Mohammad Hossein; Fakhte, Saeed

Department of Electrical and Computer Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

Abstract

This study presents a microstrip antenna designed for terahertz frequency wireless communication systems. The proposed design features a square microstrip patch excited by a microstrip line. It includes a surrounding strip that enhances impedance bandwidth and a series of vias linking this strip to the antenna's lower plate, which serves to both improve impedance bandwidth and decrease cross-coupling among antennas. The operational frequency range of the proposed antenna spans from 27 to 33 terahertz.



مقدمه

شبکه‌های محلی بی‌سیم ترابیت (T-WLAN) می‌توانند ارتباط بی‌عیب و نقصی بین لینک‌های فیبر نوری پرسرعت و لپ‌تاپ‌ها و تبلت‌های شخصی ایجاد کنند. پیوندهای سیمی و بی‌سیم از سرعت یکسانی در ارتباطات تراهرتز برخوردارند [5].

طراحی آنتن

ابعاد آنتن پیشنهادی در شکل ۱ و جزئیات اندازه آن در جدول ۱ آورده شده است. در شکل ۱-الف نمای آنتن پیشنهادی از جانب آورده شده است، جنس زیر لایه استفاده شده از جنس سیلیکون دی‌اکسید SiO_2 می‌باشد که ضریب گذردهی الکتریکی آن ۳.۸ می‌باشد. در قسمت ب نمای قسمت فلزی آنتن پیشنهادی آورده شده است که از جنس آلومینیوم Au می‌باشد. در قسمت ث نمای کلی آنتن پیشنهادی آورده شده است، همان‌طور که در شکل ۱ می‌بینیم آنتن پیشنهادی از یک آنتن پچ ماکرو استریپ مربعی شکل تشکیل شده است، دورتادور پچ از یک نوار فلزی شکل که به وسیله وایا به صفحه زیرین آنتن متصل شده قرار گرفته است. با قرار دادن ۴ آنتن با زاویه ۹۰ درجه شکل کلی آنتن پیشنهادی بدست می‌آید. وایا‌های استفاده شده در اطراف آنتن باعث افزایش پهنای باند امیدانسی و کاهش جفت متقابل بین آنتن‌ها می‌گردد در شکل ۲ نمودار پارامتر S را برای آنتن پیشنهادی بدون وایا‌های دور آن مشاهده می‌کنید. در شکل ۳ پارامترهای S برای آنتن بدون وایا و نوار دور پچ آورده شده است.

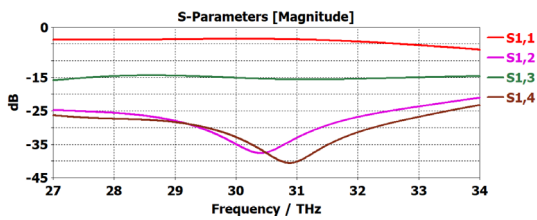
بحث و بررسی

ساخت آنتن‌های تراهرتزی به کمک روش‌های پیشرفته ساخت بر پایه فناوری خلأ انجام می‌شود. که به منظور تولید ادوات با دقت بالا و ویژگی‌های مطلوب الکترونیکی-مخابراتی بکار گرفته می‌شود. به طور کلی روند ساخت آنتن‌ها بر مبنای فناوری خلأ از قرار ذیل است [6-9]. ابتدا طراحی آنتن مورد نظر به وسیله نرم افزارهای طراحی آنتن مانند CST Microwav و HFSS انجام می‌شود تا پارامترهای کلیدی مثل ابعاد، شکل آنتن و پارامترهای

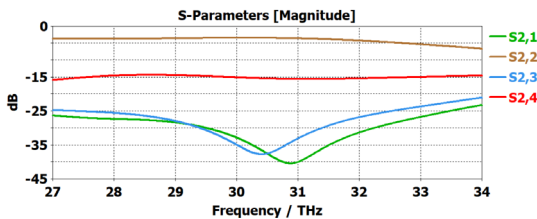
آنتن‌های ماکرو استریپ دارای ساختاری در ابعاد میکرو متر و تشکیل یافته از لایه‌های دی‌الکتریک نظیر اکسید سیلیکون SiO_2 و لایه‌های فلزی نظیر نقره Ag ، آلومینیوم Al ، و طلا Au می‌باشند. که این نوع افزاره‌های مایکروویوی/الکترونیکی/مخابراتی اغلب به کمک چند مرحله فرایند تحت خلأ نظیر PECVD، sputtering و PVD انجام می‌شود.

باند‌های ارتباطی بی‌سیم به طور فزاینده‌ای به شدت شلوغ می‌شوند و تقاضای روزافزون برای پهنای باند بیشتر، بهره‌برداری از طیف الکترومغناطیسی ناشناخته را در ناحیه زیر تراهرتز (THz) تحریک کرده است [1]. پهنای باند بالاتر ارائه شده توسط باند زیر تراهرتز می‌تواند بسیار بالا باشد. نرخ داده در مرتبه ۰.۱ THz/s برای سیستم‌های بی‌سیم آینده [2]. با این حال، تشعشعات زیر تراهرتز توسط اکثر مواد، از جمله مولکول‌های موجود در جو مانند بخار آب، جذب می‌شود. برای چنین سیستم‌هایی، انتشار خط دید مورد نیاز است و حتی برای چنین شرایطی، به دلیل تلفات مسیر ذاتاً زیاد، محدوده نسبتاً محدود است. از آنجایی که تلفات مسیر نسبتاً زیاد است و گیرنده‌های زیر تراهرتز فعلی حساس نیستند، بنابراین باید تلاش زیادی برای به حداکثر رساندن افزایش تابش و کارایی آنتن‌های زیر تراهرتز انجام شود. طبق قضیه شانون، جابه‌جایی به فرکانس‌های بالاتر، پهنای باند بیشتری را ارائه می‌کند و ظرفیت کانال را افزایش می‌دهد [3].

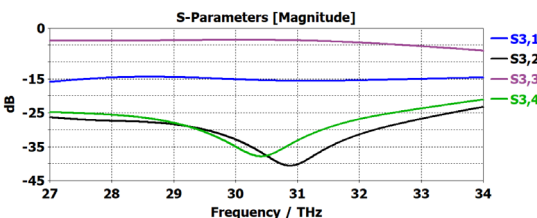
آنتن‌های تراهرتز برای سیستم‌های ارتباطی تراهرتزی که از ۰.۱ تا ۱۰ تراهرتز کار می‌کنند ضروری هستند. آنها ارتباطات بی‌سیم، تصویربرداری و سنجش با سرعت بالا را امکان‌پذیر می‌کنند. با این حال، طراحی آنتن‌های تراهرتز کارآمد به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد این محدوده فرکانس چالش‌برانگیز است. اندازه طول‌موج کوچک، از ۳۰ تا ۳۰۰۰ میکرومتر، ساخت آنتن‌هایی با ابعاد مشابه را چالش‌برانگیز می‌کند. برای غلبه بر این چالش، تکنیک‌های ساخت پیشرفته و مواد دقیق مورد نیاز است [4].



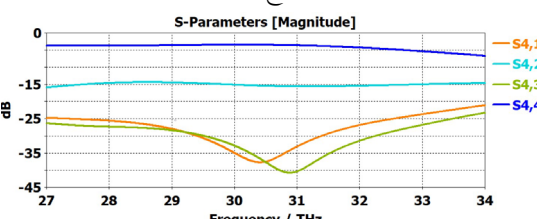
(الف)



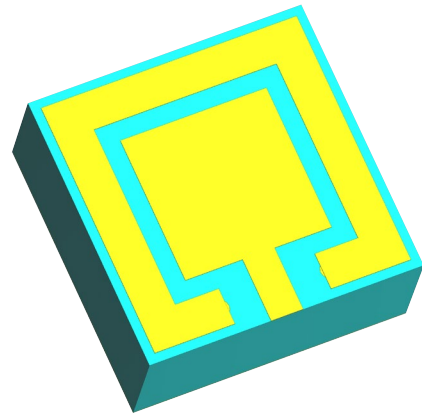
(ب)



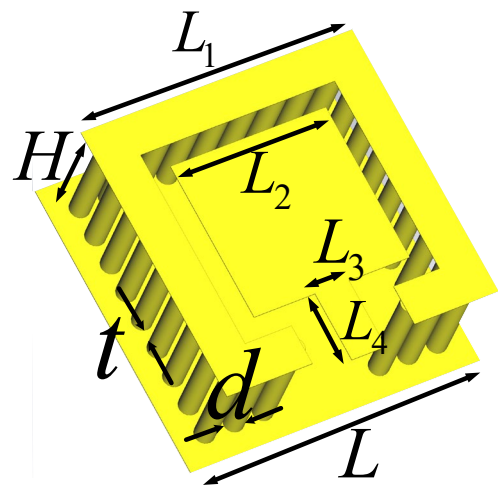
(ج)



(پ)



(الف)



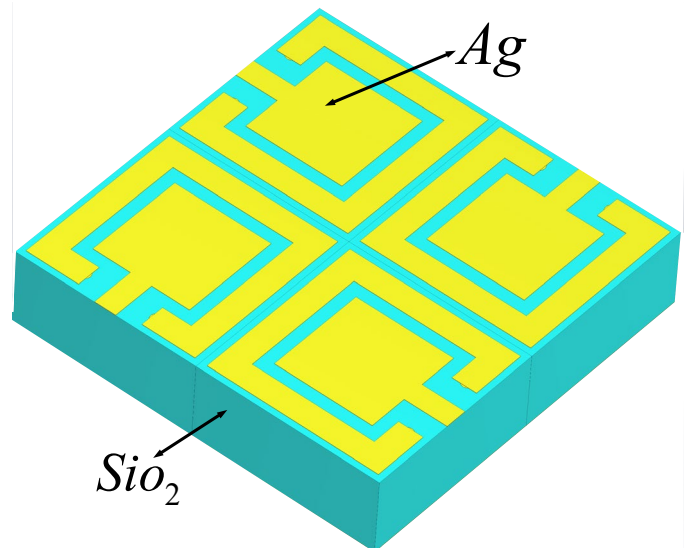
(ب)

شکل ۲ نمودار پارامتر S را برای آنتن پیشنهادی بدون وایا های دور آنتن

جدول ۱ جزئیات اندازه آنتن (um)

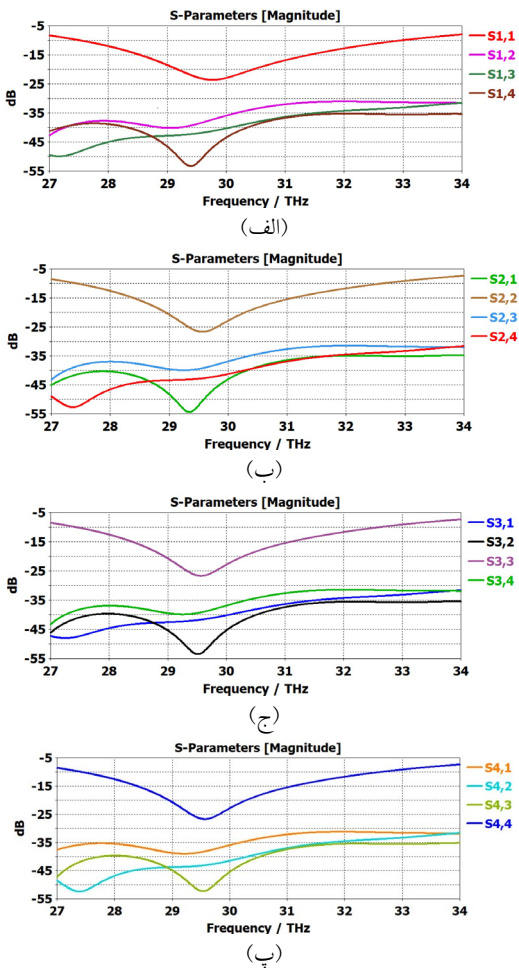
پارامتر	H	L ₁	L
اندازه	1.25	2.8	3
پارامتر	L ₂	d	t
اندازه	1.6	2	1
پارامتر	L ₃	L ₄	L ₅
اندازه	0.35	0.7	0.4

مربوط به عملکرد آنتن به دقت مشخص گردد. پس از انتخاب و تهیه زیر لایه مناسب جهت استفاده در فرایند ساخت، به کمک فرایند های لایه نشانی در خلاء مانند اسپاترینگ (کند و پایش) یا لایه نشانی تبخیری حرارتی پوشانیده می شود تا لایه نازک مد نظر

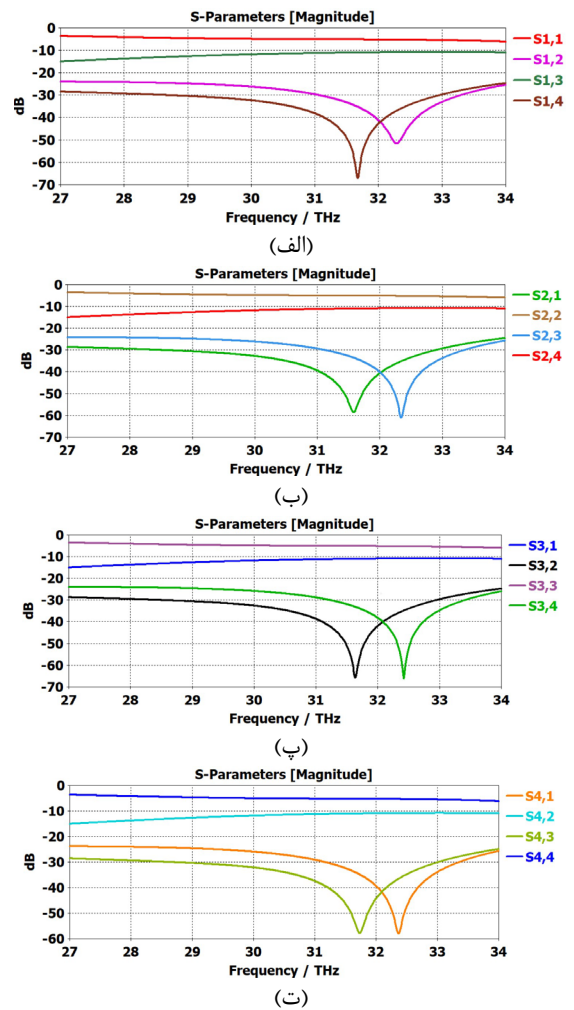


(پ)

شکل ۱. (الف) نمای از جانب آنتن پیشنهادی (ب) نمای از بالا برای آنتن پیشنهادی (پ) نمای کلی آنتن پیشنهادی



شکل ۴ پارامترهای S برای آنتن پیشنهادی



شکل ۳ پارامترهای S برای آنتن بدون وایا و نوار دور پیچ

در پایان، ساختار این آنتن شکل گرفته که باید با استفاده از روشهای دقیق مونتاژ شوند و اتصالات مورد نیاز برای ایجاد ارتباطات مداری با دیگر ادوات الکترونیکی باند تراهرتز ایجاد گردد [12-13]. بکارگیری فناوریهای تحت خلاء در ساخت آنتنهای تراهرتز متضمن عملکرد بالا و دقت بالای این افزاره هاست که این امر برای برای بازده و دقت بالای این دسته از ادوات بسیار حیاتی است، که در نتیجه برای تولید آنتنهایی با بازده فرکانسی و پهن باند مناسب برای کاربرد گوناگون از جمله پایش سلامت بر خط بسیار مطلوب هستند.

رسانا یا دی الکتریک بر روی زیر لایه ایجاد شود که از جمله لایه های رسانای فلزی مانند آلومینیوم و طلا و لایه های دی الکتریک مانند دی اکسید سیلیکون می توان نام برد که به کمک اسپاترینگ یا تبخیر بر روی زیر لایه انجام می شود. پس از آن برای الگو دهی لایه های ساختار آنتن از تکنیک های لیتو گرافی نوری یا الکترونی برای تعریف پترن های دقیق روی لایه های رسانا و دی الکتریک استفاده می شود تا شکل ها و طرح های دقیق ساختار آنتن حکاکی شود [10-11]. که در نهایت اغلب ساختار با لایه های حفاظتی یا با عملکرد خاص پوشانیده می شود.



همان‌طور که در شکل ۵ پیداست، آنتن در هر دو صفحه XZ و YZ از الگوی تشعشعی یکسانی برابر برخوردار می‌باشد.

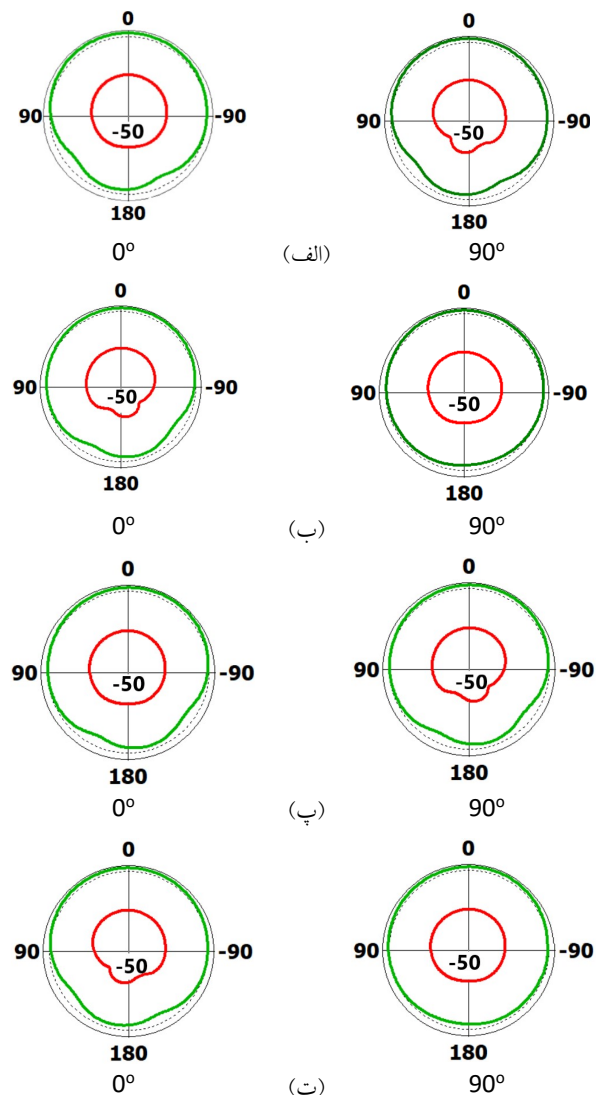
نتیجه‌گیری

در این کار یک آنتن میکرواستریپ برای کاربرد در سیستم‌های ارتباطات بی‌سیم در محدوده فرکانسی ۲۷ تا ۳۳ تراهرتز ارائه شده است. ساختار آنتن پیشنهادی شامل یک پیچ میکرواستریپ مربعی‌شکل که توسط یک خط میکرواستریپ تغذیه می‌شود. یک نوار دور پیچ وجود دارد که به پهنای باند امپدانس کمک می‌کند و یک سری وایا که نوار دور پیچ را به صفحه زیرین آنتن متصل کرده که هم به پهنای باند امپدانس کمک می‌کند و هم به کاهش جفت متقابل بین آنتن‌ها کمک می‌کند. باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی ایزولاسیون بسیار خوبی بین پورت‌ها وجود دارد.

مرجع‌ها

- [1]. T. Nagatsuma, G. Ducournau, & C. C. Renaud. "Advances in terahertz communications accelerated by photonics"; *Nat. Photonics* 10, (2016) 371-379.
- [2]. I. F. Akyildiz, J. M. Jornet, & C. Han. "Terahertz band: Next frontier for wireless communications"; *Physical Communication* 12, (2014) 16-32.
- [3]. E. Ahmadi, S. Fakhte, & Hosseini, S.S. "Dielectric rod nanoantenna fed by a planar plasmonic waveguide"; *Opt Quant Electron* (2023) 55, 115.
- [4]. S. Fakhte, M.M. Taskhiri, "Dual-band terahertz dielectric resonator antenna with graphene loading"; *Optic Quantum Electron* 54 NO 12, (2022) 845-846.
- [5]. N. Naem, S. Parveen, and A. Ismail, "Terahertz Communications for 5G and Beyond", *Antenna Fundamentals for Legacy Mobile Applications and Beyond*, pp. (2018) 305-322.
- [6]. P. Jeyakumar, J. Anandpushparaj, P. Thanapal, et al. "Terahertz Micro-Strip Patch Antenna Design and Modelling for 6G Mobile Communication"; *J. Electr. Eng. Technol.* 18, (2023) 2253-2262.
- [7]. Nathan M. Burford and Magda O. El-Shenawee "Review of terahertz photoconductive antenna technology,"; *Optical Engineering* 56 NO 1, (2017) 010901.
- [8]. S. V. Dukhopelnykov, M. Lucido, R. Sauleau and A. I. Nosich, "Circular Dielectric Rod With Conformal Strip of Graphene as Tunable Terahertz Antenna: Interplay of Inverse Electromagnetic Jet, Whispering Gallery and Plasmon Effects,"; *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 27, no. (2021) 1-8.
- [9]. M. S. Rabbani and H. Ghafouri-Shiraz, "Liquid Crystalline Polymer Substrate-Based THz Microstrip Antenna Arrays for Medical Applications,"; *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. (2017) 1533-1536.
- [10]. S. S. Yao, Y. J. Cheng, Y. F. Wu and H. N. Yang, "THz 2-D Frequency Scanning Planar Integrated Array Antenna With Improved Efficiency,"; *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 6, (2021) 983-987.
- [11]. K. Topalli, G. C. Trichopoulos, and K. Sertel, "An Indirect Impedance Characterization Method for Monolithic THz Antennas Using Coplanar Probe Measurements,"; *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, (2012) 3-5.

شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی شده آنتن پیشنهادی آورده شده است. محدوده عملیاتی برای آنتن ارائه شده از فرکانس ۲۷.۴۸ تراهرتز تا ۳۳ تراهرتز برابر با ۱۸.۲۴۷٪ می‌باشد. باتوجه به شکل ۴ تأثیر آنتن‌ها بر روی یکدیگر در شرایط مطلوبی قرار دارد؛ یعنی ایزولاسیون بین پورت‌ها به‌خوبی برقرار می‌باشد. در شکل ۵ الگوی تابش آنتن پیشنهادی را در صفحات E و H در فرکانس‌های 30 THz را مشاهده می‌کنیم.



شکل ۵ الگوی تابش در صفحات XY و YZ. الف. آنتن ۱، ب. آنتن ۲، پ. آنتن ۳، ت. آنتن ۴.



[13]. D. M. Bodet and J. M. Jornet, "Directional Antennas for Sub-THz and THz MIMO Systems: Bridging the Gap Between Theory and Implementation," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 4 (2023) 2261-2273.

[12]. J. Montero-de-Paz, E. Ugarte-Muñoz, L. E. García-Muñoz, I. C. Mayorga and D. Segovia-Vargas, "Meander Dipole Antenna to Increase CW THz Photomixing Emitted Power," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 9 (2014) 4868-4872.



تأثیر غلظت محلول پروسکایت متیل آمونیوم سرب بر مایند بر عملکرد دیود نورگسیل پروسکایتی

رستمی، علی اکبر؛ صادقی قیری، محمدرضا؛ طاهری قهریزجانی، رضا؛ مهاجرانی، عزالدین

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

photonics.alia@gmail.com and e-mohajerani@sbu.ac.ir

چکیده

امروزه دیودهای نورگسیل معدنی (LED) و آلی (OLED) به طور گسترده در کاربردهای مختلفی مانند منابع روشنایی و نمایشگرها مورد استفاده قرار می‌گیرند. دیودهای نورگسیل پروسکایتی (PeLED) به دلیل ویژگی‌های برجسته از جمله: پایه محلول بودن، بازدهی کوانتومی بالا، خلوص رنگ بالا، شکاف باند تنظیم پذیر، تحرک حامل‌های بار بالا و... توجه زیادی را در دهه گذشته به خود جلب کرده‌اند. مورفولوژی فیلم پروسکایت برای دستگاه‌های نورگسیل اهمیت بسیار زیادی دارد که با غلظت محلول پیش ساز می‌توان آن را کنترل کرد. به واسطه‌ی افزایش غلظت محلول پیش ساز، می‌توان چگالی هسته‌زایی و همچنین ابعاد بلورک-های پروسکایت را افزایش داد که در نتیجه آن، شدت نورخروجی، پایداری و طول عمر افزاره افزایش می‌یابد.

The effect of methyl ammonium lead bromide perovskite solution on perovskite light emitting diode performance

Rostami, Ali Akbar; Sadeghi Ghiri, Mohammadreza; Taheri Ghahrizjani, Reza; Mohajerani, Ezeddin

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

Today, both inorganic and organic perovskite light-emitting diodes (LEDs) are extensively used in various applications, such as lighting sources and displays. Perovskite LEDs have garnered significant attention in the past decade due to their prominent features, including solubility, high quantum efficiency, high color purity, tunable bandgap, and high charge carrier mobility. The morphology of the perovskite film plays a crucial role in optoelectronic devices, and it can be controlled by adjusting the precursor solution's concentration. By increasing the concentration of the precursor solution, the density of nucleation centers and the dimensions of perovskite crystals can be enhanced. As a result, the output light intensity, stability, and the lifespan of the devices increase. The significance of perovskite film morphology is paramount for optoelectronic devices, and precise control over it through precursor solution concentration has proven to be instrumental in optimizing device performance.

PACS No. 85.60.Jb



مقدمه

امروزه نور بخش جدایی ناپذیر زندگی بشر در تمامی عرصه‌ها می‌باشد. از این رو تلاش برای ساخت و دستیابی به منابع نوری جدید با بازدهی بالا، مصرف انرژی کم، طول عمر بالا و طول موج مناسب برای کاربردهای گوناگون یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های بشر امروزی است. در حال حاضر، دیودهای نورگسیل معدنی (LED) و دیودهای نورگسیل آلی (OLED) به طور گسترده در منابع روشنایی و نمایشگرها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴].

مواد پروسکایتی به دلیل ویژگی‌های اپتوالکترونیکی برجسته از جمله پایه محلول بودن، شکاف باند تنظیم پذیر، خلوص رنگ، بازده کوانتومی بالا، تحرک حامل‌های بار بالا، انعطاف پذیری و فناوری ساخت ارزان و راحت، گزینه مناسبی به عنوان لایه نورگسیل در دیودهای نورگسیل پروسکایتی می‌باشند. از این رو، این دسته از مواد در دهه گذشته توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند [۳].

در این پژوهش ما به بررسی و ساخت دیود نورگسیل مبتنی بر پروسکایت هیبریدی متیل آمونیوم سرب برماید (MAPbBr_3) و تأثیر غلظت محلول پروسکایت در تشکیل لایه پروسکایت و عملکرد افزاره پرداخته‌ایم. سه محلول پروسکایت با غلظت‌های ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ وزنی آماده گردید و افزاره‌های نورگسیل با استفاده از آن‌ها ساخته شد و به مقایسه نتایج آن‌ها پرداختیم [۲ و ۱].

بخش تجربی

در ابتدا پروسکایت MAPbBr_3 با غلظت‌های ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ وزنی در یک سی‌سی حلال دی‌متیل فرم‌امید (DMF) حل گردید و سه محلول مورد نظر به دست آمد. سپس زیرلایه اکسید قلع ایندیم (ITO) که بر روی شیشه شفاف به روش کندوپاش لایه نشانی شده است را با حلال ایزوپروپانول و آب دیونایز شسته و خشک می‌کنیم. حال با قرار دادن آن در دستگاه UV-Ozone Treatment به واسطه تابش نور فرابنفش و اوزون، سطح ITO را تمیز و آبدوست می‌کنیم. ۱۰۰ میکرولیتر از محلول پلی (۳،۴-اتیلن دی‌اکسی تیوفن)-پلی (استایرن-سولفونات) (PEDOT:PSS) به

روش چرخشی با سرعت ۳۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ ثانیه بر روی ITO لایه نشانی می‌کنیم و لایه ایجاد شده را در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد خشک می‌کنیم. ۱۰۰ میکرولیتر از محلول پروسکایت MAPbBr_3 را روی لایه PEDOT:PSS با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ ثانیه به روش چرخشی لایه نشانی کرده و برای خروج حلال‌های باقی مانده از ساختار، آن را در محفظه خلاً با فشار ۱۰ میلی بار به مدت ۱۰ دقیقه قرار می‌دهیم. پس از آن، لایه ایجاد شده را در دمای ۸۵ درجه سانتی گراد به مدت ۲۰ دقیقه پخت می‌کنیم. سپس ۱۰۰ میکرولیتر از محلول پلی (متیل متاکریلات) (PMMA) که به صورت ۱۰ میلی گرم در یک سی‌سی کلروبنزن (Chlorobenzene) حل شده است را به روش چرخشی روی لایه پروسکایت با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ ثانیه لایه نشانی کرده و به مدت ۳۰ دقیقه تحت دمای ۷۵ درجه سانتی گراد پخت می‌کنیم. در نهایت از چسب نقره به عنوان الکترود کاتد استفاده کرده و به روش دکتر بلید روی PMMA لایه نشانی کرده و لایه تشکیل شده را در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به طور کامل خشک می‌کنیم. سه افزاره نور گسیل به روش توضیح داده شده با سه محلول پروسکایت با غلظت‌های متفاوت ساخته و مورد بررسی قرار گرفت.

بحث و نتایج

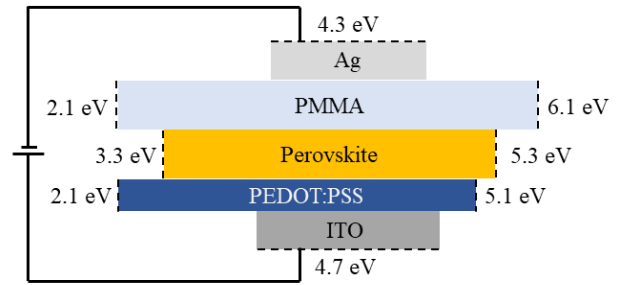
به طور کلی در دیودهای نور گسیل اساس کار، تشکیل زوج الکترون-حفره (اکسایتون) و بازترکیب نوری آن‌ها می‌باشد. مطابق شکل ۱ با اعمال بایاس مستقیم به افزاره و اعمال ولتاژ به آن، الکترون‌ها از سمت کاتد به ساختار تزریق می‌شوند. الکترون‌ها در مواجه با لایه نارسانای PMMA سد پتانسیل بزرگی در برابر خود می‌بینند. الکترون‌هایی که انرژی کافی دارند طبق پدیده تونل زنی کوانتومی از لایه PMMA عبور کرده و خود را به لایه نورگسیل می‌رسانند [۴]. در واقع این لایه عایق با اصلاح نرخ تزریق الکترون‌ها به لایه نورگسیل و تشکیل اکسایتون‌ها مانع از تجمع الکترون در لایه نورگسیل شده و از بازترکیب غیر تابشی اکسایتون‌ها و افزایش جریان گذرنده از افزاره (جریان نشتی) که



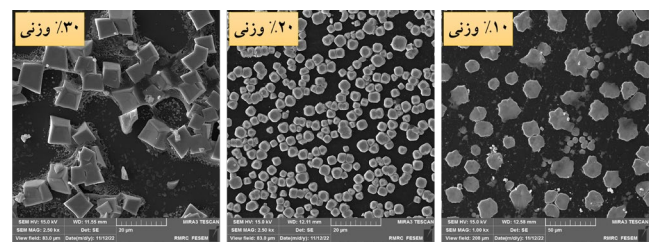
ضروری است که از به دام افتادن حامل‌های بار در نقص‌های شبکه، سطح مشترک لایه‌ها و تله‌های انرژی جلوگیری کرد و احتمال بازترکیب‌های غیر تابشی را به حداقل رساند. همچنین تعداد مراکز هسته‌زا و اندازه بلورک‌های پروسکایت که بازترکیب تابشی در آن‌ها صورت می‌گیرد بسیار با اهمیت است. هرچه تعداد مراکز هسته‌زایی بیشتر باشد احتمال بازترکیب در این مراکز افزایش می‌یابد. در نتیجه بازدهی نوری افزاره بهبود می‌یابد. در ابتدا سه محلول پیش ساز پروسکایت با غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی آماده شد و سپس با استفاده از آن‌ها سه افزاره نوری ساخته شد. مطابق شکل ۲ در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت محلول پیش ساز پروسکایت، هسته‌زایی و ابعاد بلورک‌ها افزایش یافته است. با افزایش هسته‌زایی، مراکز بازترکیب بیشتر شده، بازدهی نوری افزاره افزایش و جریان نشتی گذرنده از آن کاهش می‌یابد. در نتیجه، بر اثر پدیده گرمایش ژول (Joule Heating) گرمای کمتری در افزاره القا می‌شود و طول عمر افزاره افزایش می‌یابد. با افزایش ابعاد بلورک‌ها پایداری و آستانه تخریب آن‌ها فزونی می‌یابد.

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد با افزایش غلظت محلول پیش ساز جریان عبوری از افزاره به دلیل افزایش هسته‌زایی، کاهش می‌یابد و در نتیجه آن، گرمای کمتری در افزاره ایجاد شده و طول عمر افزاره فزونی می‌یابد.

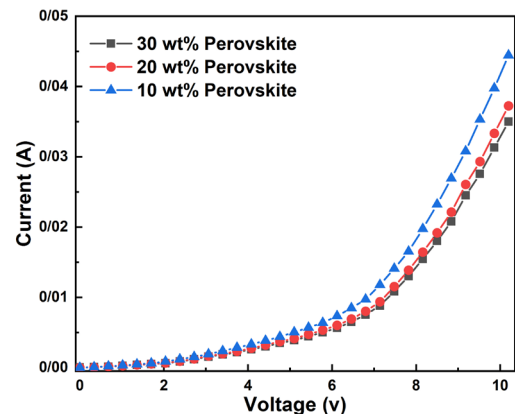
بر اساس ساختار و سطوح انرژی پروسکایت MAPbBr_3 طول موج تحریک این ماده ۴۰۵ نانومتر بوده و طول موج تابش آن ۵۳۲ نانومتر است. با استفاده از لیزر ۴۰۵ نانومتر لایه‌های پروسکایتی که با محلول‌های پیش ساز ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی، لایه نشانی شده‌اند را تحریک می‌کنیم. همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، شدت قله طیف نورتابناکی (PL) به علت افزایش چگالی مراکز هسته‌زایی و کاهش نقص‌های شبکه بلوری پروسکایت، فزونی می‌یابد. با توجه به شکل ۵ با افزایش غلظت محلول پیش ساز پروسکایت ضخامت لایه تشکیل شده، تعداد بلورک‌ها و ابعاد آن‌ها افزایش یافته و در نتیجه مقدار جذب نور در لایه نورگسیل پروسکایتی افزایش می‌یابد. قله طیف نورتابی الکتريکی (EL)



شکل ۱: ساختار دیود نورگسیل پروسکایتی ساخته شده به همراه سطوح انرژی لایه‌های مورد استفاده



شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی



شکل ۳: نمودار جریان بر حسب ولتاژ

سبب گرم شدن و کاهش کارایی آن می‌شود، جلوگیری می‌کند. همچنین لایه PMMA از پروسکایت در برابر عوامل مخرب خارجی از جمله اکسیژن و رطوبت محافظت می‌کند. در طرف دیگر، حفره‌ها از طریق آند به ساختار تزریق می‌شوند و به کمک لایه انتقال دهنده حفره PEDOT:PSS به لایه نورگسیل می‌رسند. الکترون‌ها و حفره‌ها بایکدیگر تشکیل اکسایتون داده و در این لایه به شکل نوری بازترکیب می‌شوند و فوتونی متناسب با گاف انرژی پروسکایت ساطع می‌کنند [۳]. برای افزایش بازدهی نوری افزاره،



رخ می‌دهد و باعث افزایش شدت قله طیف EL می‌شود که این مسئله نشان دهنده افزایش شدت نور خروجی افزاره می‌باشد که شکل ۶ شهودی بر این موضوع می‌باشد.

نتیجه گیری

به واسطه مهندسی مورفولوژی، با استفاده از محلول‌های پیش ساز پروسکایت توانستیم فیلم‌های پروسکایت با چگالی هسته‌های زیاد و کریستال‌هایی با ابعاد بزرگ رشد دهیم. با افزایش غلظت محلول پیش ساز تعداد مراکز هسته‌زا به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد. جریان گذرنده از افزاره (جریان نشتی) کاهش و بازترکیب‌های تابشی در آن مراکز افزایش می‌یابد. در نتیجه بازدهی و شدت نوردهی دیود نورگسیل پروسکایتی به شکل چشم‌گیری افزایش پیدا می‌کند.

مرجع‌ها

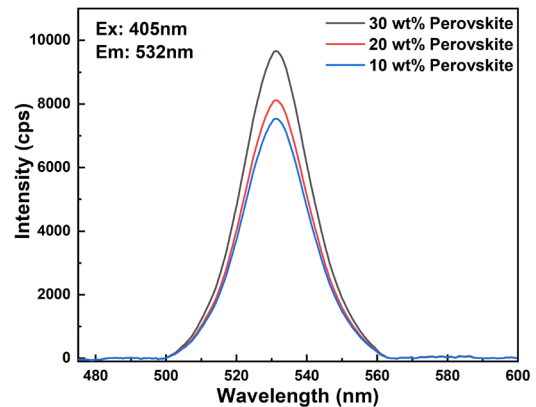
[1] Chandran, Bevita K., Sjoerd A. Veldhuis, Xin Yu Chin, Annalisa Bruno, Natalia Yantara, Xiaodong Chen, and Subodh Mhaisalkar. "Precursor non-stoichiometry to enable improved CH₃NH₃PbBr₃ nanocrystal LED performance." *Physical Chemistry Chemical Physics* **20**, no. 8 (2018): 5918-5925.

[2] Wang, Zhibin, Tai Cheng, Fuzhi Wang, Songyuan Dai, and Zhan'ao Tan. "Morphology engineering for high-performance and multicolored perovskite light-emitting diodes with simple device structures." *Small* **12**, no. 32 (2016): 4412-4420.

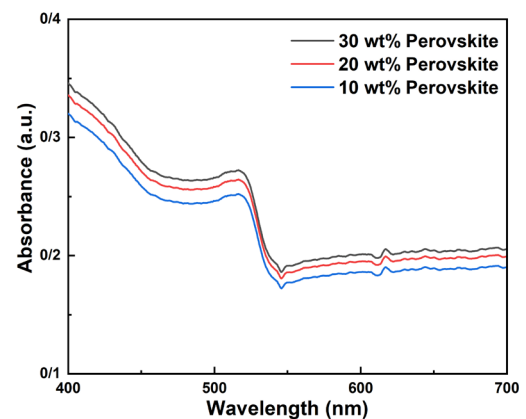
[3] Quan, Li Na, Barry P. Rand, Richard H. Friend, Subodh Gautam Mhaisalkar, Tae-Woo Lee, and Edward H. Sargent. "Perovskites for next-generation optical sources." *Chemical reviews* **119**, no. 12 (2019): 7444-7477.

[4] Lai, Jingya, Zichao Zhao, Yanfeng Miao, Saixue Wang, Dawei Liu, Zhiyuan Kuang, Lei Xu et al. "High-brightness perovskite microcrystalline light-emitting diodes." *The Journal of Physical Chemistry Letters* **13**, no. 13 (2022): 2963-2968.

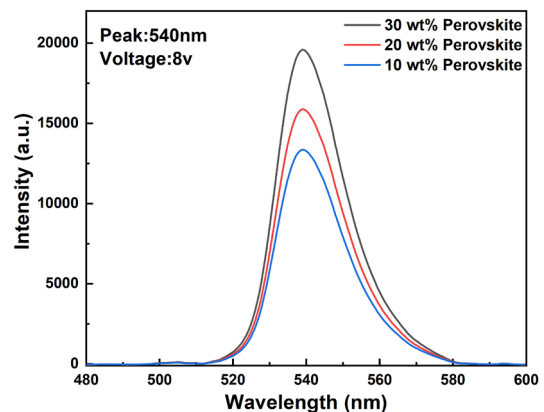
برای ماده MAPbBr₃ در طول موج ۵۴۰ نانومتر (سبز) است. با افزایش غلظت محلول پیش ساز پروسکایت تعداد مراکز رنگ افزایش یافته و در نتیجه بازترکیب‌های تابشی بیشتری در این مراکز



شکل ۴: نمودار نورتابناکی (فوتولومینسانس)



شکل ۵: نمودار جذب



شکل ۶: نمودار نورتابی الکتریکی (الکترولمینسانس)



مطالعه تجربی گسیل یون در دستگاه پلازما کانونی مدر ۲۰ kJ

نوشین پیش بین، علی نصیری، حسن حسین خانی، امیر رئیس دانا، داود سهرابی، مهدی بخش زاد محمودی

پژوهشکده پلازما و گداخت هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

Npishbin1985@gmail.com

چکیده

در این مطالعه به بررسی انتشار یون دستگاه پلازما کانونی ۲۰kJ نوع مدر پرداخته شده است. ابتدا با انجام آزمایشات متعدد، فشار و ولتاژ بهینه دستگاه مشخص شده و سپس میزان انتشار یون ها در شرایط بهینه مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای ثبت سیگنال جریان و مشتق جریان از آشکارساز پیچیده روگوفسکی و برای ثبت سیگنال های یونی از فنجان فارادی استفاده شد. قوی ترین سیگنال های پینچ و یون با گاز نئون در ولتاژ ۱۴kV فشار ۷ torr به دست آمده است. حداکثر انرژی یون های ساطع شده ۴۲۰ کیلوژول است. این نوع یون ها کاربردهای خاص خود را به عنوان یون های لایه ساز در فرآیندهای لایه نشانی دارند.

Experimental study of ion emission in a Mather plasma focus device 20 kJ

Noushin Pishbin*, Ali Nasiri, Amir Reisdana, Hasan Hoseinkhani, Davod Sohrabi, Mehdi Bakhshzad Mahmoudi

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Abstract

In this research, the ion emission of the Mather type plasma focus device 20kJ has studied. at first, by performing numerous tests, the optimal pressure and voltage of the device has been determined and then the emission of ions has been evaluated in the optimal conditions. In order to record the current and derivative of the current signals a Rogowski coil detector and for recording the ion signals, a Faraday cup was used. The strongest pinch and ion signals were obtained with neon gas at a voltage of 14 kV and a pressure of 7 torr. The maximum of energy of the emitted ions is 420 kJ. These types of ions have their own applications as layer forming ions in layering processes.



جدول ۱: شرایط بهینه دستگاه پلاسما کانونی ۲۰kJ

نوع گاز	فشار گاز (torr)	ولتاژ شارژر خازن (kV)
نتون	۳ تا ۷	۱۴

مقدمه

یکی از دستگاه‌هایی که از آن برای رسیدن به واکنشهای گداخت گرما- هسته ای و باریکه- هدف استفاده می‌شود، ماشین مولد پلاسما کانونی می‌باشد. ماشین‌های مولد پلاسما کانونی با قابلیت عبور یک جریان بسیار بالا از یک گاز کم فشار و تشکیل پلاسما تنگیده شده در انتهای آند، ضمن تولید یک پلاسما داغ و چگال با نیمه عمر کوتاه، شرایط وقوع واکنش گداخت دوتریوم- دوتریوم را فراهم نموده که مهم‌ترین محصولات آن نوترون‌های سریع، پرتو ایکس نرم و سخت و یون‌های پرانرژی است. یون-های تولید شده در دستگاه‌های پلاسما کانونی به سبب داشتن ویژگی‌های خاص همواره کاربردهای زیادی در صنعت و پژوهش دارند. در این بین می‌توان به انرژی بسیار زیاد این یونها اشاره نمود که آنها را به عنوان منبع مناسبی برای تست مخرب مواد تبدیل نموده است. لذا مطالعه و بررسی این یونها بسیار مورد توجه پژوهشگران بوده است [۱-۵]. در ادامه مطالعات انجام شده، در این پژوهش گسیل یون از دستگاه پلاسما کانونی ۲۰kJ واقع در سازمان انرژی اتمی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است که در ادامه به شرح نتایج حاصل شده می‌پردازیم.

تئوری

یکی از مهمترین پدیده‌های مشاهده شده در دستگاه پلاسما کانونی، ایجاد یون‌هایی با انرژی چندین برابر ولتاژ شارژر بانک خازنی (برای مثال چند صد keV برای الکترون و تا چند ده MeV برای یون) است. مدل‌های مختلفی بر توصیف چگونگی شتاب گیری این ذرات پیشنهاد شده است که بر اساس آن یون‌های گسیل شده با سه سازوکار میدان الکتریکی القایی- میدان الکتریکی مقاومتی و مدل سورفاترون شتاب می‌گیرند. با وجود تأثیر قابل توجه پارامترهای عملکردی بر گسیل پرتوهای پرانرژی از دستگاه پلاسما کانونی لازم است که شرایط بهینه هر دستگاه برای رخداد تنگش و گسیل پرتو تعیین شود. لذا پس از انجام آزمایشات متعدد بر دستگاه پلاسما کانونی ۲۰kJ با فشار، ولتاژ و گازهای مختلف، شرایط بهینه این دستگاه به شرح ذیل حاصل شد:

به منظور تعیین این شرایط بهینه، از معیار عمق کانونی سازی دستگاه پلاسما کانونی استفاده شد. این معیار معادل با بیشترین مقدار $\frac{df}{dt}$ است که از سیگنال مشتق جریان قابل تعیین است. مشخصات تنگش از قبیل ابعاد تنگش و سرعت پلاسما مستقیماً با سرعت فشرده سازی $\frac{drp}{dt}$ ارتباط دارند که این سرعت نیز با سیگنال مشتق جریان و تغییرات آن در زمان تنگش ارتباط دارد. با توجه به سازوکارهای مختلف در تولید یون‌های گسیلی، اندازه-گیری و مشخصه‌یابی مربوط به این یونها در زمان‌های مختلف، این امکان را فراهم می‌آورد تا شناخت بهتری در مورد سازوکارهای حاکم بر رفتار گسیل یون در این دستگاه به عمل آید. آشکارسازی یونها به علت داشتن توان توقف بالا و برد بسیار کوتاه در مقایسه با دیگر پرتوها بسیار متفاوت و مشکلات خاص خود را دارد. به علت توان توقف بالای یون سنگین، تجهیزات خلأ قوی که بتواند خلأ بالایی را ایجاد کند مورد نیاز است. عدم حساسیت آشکارساز به سایر پرتوها مانند گاما، نوترون و الکترون که در دستگاه پلاسما کانونی تولید می‌شود نیز ضروری است. به علت حجم کوچک محفظه‌ی دستگاه، باید امکان تهیه آشکارساز در ابعاد خیلی کوچک (در حد سانتی‌متر) میسر باشد. مقاومت در برابر حرارت و موج شوک نیز یکی دیگر از شرایط آشکارسازی یونی در دستگاه پلاسما کانونی می‌باشد. با توجه به محدودیت-های فوق، آشکارسازهای رد هسته‌ای، تامسون و فنجان فارادی به عنوان آشکارسازهای مناسب جهت آشکارسازی یون‌های تولید شده در دستگاه پلاسما کانونی می‌باشند. از میان این آشکارسازها، آشکارساز فنجان فارادی در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفته است.



تکنیک فاصله زمانی بین سیگنال مشتق جریان و سیگنال یونی مبنا قرار گرفته است. همان طور که مشاهده می شود بیشترین انرژی یون های پلاسمای نئون در ولتاژ تخلیه 14 kV ، مربوط به فشار 7 torr است.

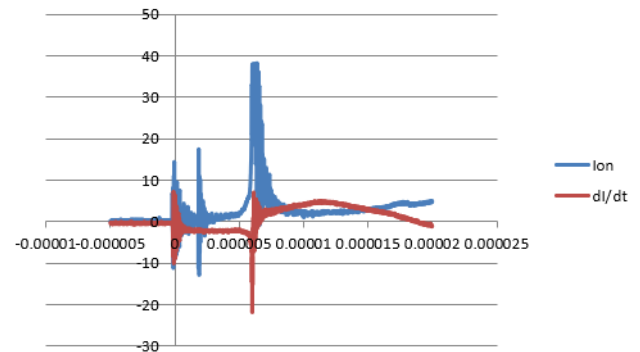
نتیجه گیری

با توجه به اهمیت کاربرد دستگاه های پلاسمای کانونی به دلیل گسیل پرتوهای پرانرژی، در این پژوهش اقدام به مشخصه یابی گسیل یون از دستگاه پلاسمای کانونی 20 kJ نموده ایم. در این راستا شرایط بهینه دستگاه را تعیین نموده و سپس با استفاده از آشکارساز فنجان فارادی و سیستم تشخیصی الکتریکی پیچه روگوفسکی، سیگنال یون گسیل شده را مورد مطالعه قرار داده ایم. همان طور که مشاهده می شود قویترین تنگش و سیگنال یون گاز نئون در فشار 7 torr و ولتاژ تخلیه 14 kV حاصل می شود. در این شرایط بهینه، میانگین انرژی یون گسیل شده 420 keV به دست آمده است. انرژی یون های گسیل شده به روش زمان پرواز محاسبه شده است. بیشتر بودن ارتفاع و پهنای سیگنال یونی (مساحت زیر سیگنال) بیانگر بیشتر بودن شار یون های گسیل شده است.

مرجع ها

[1] Jia Wang and Tsin-Chi Yang, (1988) "A study of X-ray emission from the anode region in a plasma focus device" J. Phys. D: Appl. Phys. **21** 700.
 [2] Ram Niranjana, et al., (2018) "Application of medium energy plasma focus device in study of radioisotopes", Physics Letters A, Volume 382, Issue 46, Pages 3365-3368.
 [3] Diab, F. Ion-beam Investigation in a 1.5-kJ Dense Plasma Focus Device. *Plasma Phys. Rep.* **45**, 952-964 (2019).
 [4] R. A. Behbahani, F. M. Aghamir, Correlation of current drop, filling gas pressure, and ion beam emission in a low energy Mather-type plasma focus device, *Journal of Applied Physics*, Vol. 111, p.p. 043304-043305 (2012).
 [5] قاسمی، ب.، مشخصه یابی گسیل یون نیتروژن در دستگاه پلاسمای کانونی SBUMTPF1، رساله دکتری مهندسی هسته ای، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۲.

به منظور تحلیل سیگنال های بدست آمده، به تمام سیگنال ها در بازه زمانی رویداد تنگش و گسیل یون، با استفاده از نرم افزار متلب منحنی گاوسی برازش شده است. در شکل ۱ نمونه ای از سیگنال های ثبت شده توسط آشکارساز پیچه روگوفسکی و فنجان فارادی نشان داده شده است. در جدول ۲ نیز نتایج پردازش و تحلیل سیگنال های یونی آورده شده است. FWHM پهنای کامل در عمق نیم بیشینه و معیاری از طول عمر ستون پلاسمای است. نماد A_i نشانگر سطح زیر نمودار سیگنال یونی و H_i ارتفاع نمودار برازش شده است. کانونی شدن در دستگاه پلاسمای کانونی را می توان با توجه به عمق (میزان فرورفتگی) تنگش و شیب منفی آن در سیگنال مشتق جریان مشخص کرد. قابل ذکر است که مقادیر موجود در جداول بالا، حاصل میانگین گیری از حداقل سه تخلیه در شرایط مشابه می باشد. به منظور محاسبه انرژی یون های گسیل شده از تکنیک زمان پرواز استفاده شده است. در استفاده از این



شکل ۱: سیگنال یون و مشتق جریان دستگاه پلاسمای کانونی 20 kJ با گاز نئون در فشار 7 torr و ولتاژ 14 kV

جدول ۲: نتایج پردازش سیگنال یونی پلاسمای کانونی 20 kJ با گاز نئون در ولتاژ 14 kV

Pressure (torr)	3	4	5	6	7
Mean FWHM	5.71×10^{-7}	0.1961×10^{-6}	0.1066×10^{-6}	0.0038×10^{-4}	0.1637×10^{-4}
Mean H_i	36.8051	35.2086	31.4751	31.2801	38.7336
Mean A_i	4.2923×10^{-5}	1.8217×10^{-5}	1.9714×10^{-5}	3.6937×10^{-5}	1.6930×10^{-4}
Mean Energy (keV)	72.95	117.12	143.87	214.47	420.56

The 11th National Vacuum Conference of Iran



شماره تماس انجمن: ۰۹۱۲۸۱۸۴۶۹۷

پایگاه اینترنتی و وبگاه انجمن خلأ ایران: www.vsi.ir

پایگاه اینترنتی و وبگاه دانشگاه خاتم: <https://khatam.ac.ir>

پست الکترونیکی انجمن: info@vsi.ir



<http://www.vsi.ir/vac11>



conf.isc.ac/trustseal/check.php?code=۰۲۲۳۱-۸۰۹۶۰