



کتابنامه ارائه مقاله

Code: CHCONF15-03530242
ID: 353

کنفرانس بین المللی یافته های نوین پژوهشی در

علوم شیمی و مهندسی شیمی

The International Conference in New Research of Chemistry and Chemical Engineering

بین وسیله کنوایی می شود مقاله با عنوان:

پوریسی تاثیر سرعت ورودی و دمای سطح در لایه نشانی شیمیایی بخار سیلیسیم در محیط

پلازما

نویسنده / نویسندگان: کامل میلانی شیروان، محبتی باهوریان، تیمور بنبرادی، بهنام نورجلالی

دکتر ترانس بین المللی یافته های نوین پژوهشی در شیمی و مهندسی شیمی، مورخ پنج آذر ۱۳۹۴ در دانشگاه تهران، با حضور ایشان به صورت سخنرانی ارائه کردند.
توفیق روز افزون شما را در عرصه های علمی و اجرایی کشور عزیزمان، ایران آرزو مندیم.

دکتر عبدالحسین روشنان
رئیس کنفرانس



دکتر کامران معانی
دبیر اجرایی کنفرانس



بررسی تاثیر سرعت ورودی، مولار گاز ورودی و دمای سطح در لایه نشانی شیمیایی بخارسیلیسیم در محیط پلاسما

کامل میلانی شیروان^{۱*}، مجتبی ماموریان^۲، تیمور بهزادی^۱، بهنام پورجلالی^۱

۱- شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی

۲- دانشگاه فردوسی مشهد

خلاصه

لایه نشانی شیمیایی بخار به کمک پلاسما یکی از پرکاربردترین روش های لایه نشانی است که معمولاً در دماهای کمتر از ۳۵۰ درجه سانتی گراد صورت می گیرد. در این روش، بجای انرژی گرمایی از ذرات انرژی دار برای انجام واکنش، استفاده می شود تا لایه نشانی بتواند در دمای پایین و با سرعت قابل قبولی صورت گیرد. در این سیستم، توان الکتریکی با ولتاژ نسبتاً بالا و در فشار پایین برای یونیزه کردن گاز فراهم می شود که باعث شکستن مولکول های گاز به الکترون ها و یون ها می شود. در مقاله حاضر لایه نشانی فیلم نازک سیلیکن (Si) در رآکتور PECVD شبیه سازی شده و فرآیند تشکیل Si بر روی زیر لایه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. ورودی رآکتور، گاز سیلان (SiH₄)، به عنوان گاز اصلی واکنش دهنده می باشد که محیط پلاسما را ایجاد می کند. در این شبیه سازی محیط گازی، محیطی پیوسته، جریان گاز جریان آرام و سرعت ورودی گاز برابر با ۰/۱ متر بر ثانیه فرض شده است. از اثرات تابش صرف نظر شده و گازها در محیط پلاسما ایده آل در نظر گرفته شده اند. در نتیجه این شبیه سازی که با استفاده از نرم افزار فلونت انجام شده است، نرخ لایه نشانی Si و همچنین پروفیل لایه نشانی محاسبه شده و اثر ۳ پارامتر مختلف سرعت ورودی، مولار گاز و دمای سطح روی لایه نشانی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: لایه نشانی به کمک پلاسما (PECVD)، شبیه سازی، سیلیسیم، گاز سیلان

۱. مقدمه

در فرآیندهای ساخت قطعات میکرو اعم از الکترونیکی و ممز به دفعات نیاز به لایه نشانی فیلم های نازک با کیفیت بالا و کاملاً کنترل شده وجود دارد. این فیلم ها گرفته از لایه های شناخته شده مانند سیلیکن، گالیوم آرسناید، نیترو سیلیسیم و ... تا مواد نوین مانند کربن نانو تیوپ و انواع پلیمرها می توانند با روش های مختلف لایه نشانی بخار شیمیایی (CVD) نشانده شوند. یکی از پر کاربردترین و کنترل پذیرترین این روش ها لایه نشانی بخار شیمیایی به کمک پلاسما (PECVD) می باشد.

* Corresponding author: کارشناس مجتمع گاز پارس جنوبی، دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد
Email: milani.kamel@gmail.com

روند مطالعات علمی در تولید لایه‌های نیمه هادی با بهبود درک فیزیک پلاسما و فرآیندهای شیمیایی آن منجر به ارائه مدل‌های ریاضی پیشرفته برای این فرآیندهای لایه نشانی شد [۱]. در این راستا مطالعاتی در توسعه مدل‌ها برای فرآیند پلاسما و همچنین برای رآکتورهای PECVD توسط اکونومو و همکاران انجام شد [۲] تا فیلم‌های نازک نیتريد سيليكون را لایه نشانی کنند که لایلیون و همکاران [۳]، کاکینو و دیسپاکس [۴] این مدل‌ها را در طراحی موفق رآکتورها بکار بردند. دیوید جی کولینز و همکاران [۵] در سال ۱۹۹۴ بر روی یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی که فرآیند لایه نشانی نیتريد سيليكون را شبیه سازی می‌کرد کار کردند و نتایج بدست آمده را با نتایج آزمایشگاهی که از یک رآکتور تک ویفره مدل ۵۰۰۰ بدست آمده بود مقایسه نمودند و نتایج قابل قبولی بدست آوردند. آنها در این کار از آمونیاک (NH_3) و سیلان (SiH_4) بعنوان واکنشگرهای گازی استفاده نمودند. یو جائه کیم و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۵ جریان سیال، انتقال حرارت و جرم در لایه نازک تولید شده در رآکتور لایه نشانی شیمیایی عمودی با مدل شاور هد (shower head) و ساسپتور چرخان را شبیه سازی کردند. هدف آنها این بود که بهترین شرایط کاری را برای طراحی shower head و سرعت چرخش ساسپتور پیدا کنند. داسیلوا و همکاران [۷] با استفاده از شبیه سازی به کمک نرم افزار انسیس (ANSYS)، منحنی های دما و سرعت را در رآکتور بدست آوردند. نتایج، تاثیر بالای هندسه رآکتور و فرآیند لایه نشانی در توزیع سرعت را نشان داد. جائه سانگ بانک و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۷ بر روی مشخصات میدان‌های شار حرارتی (Thermal-Flow) در رآکتورهای PECVD با شرایط عملیاتی متغیر کار کردند. آنها در این کار یک رآکتور سه بعدی استوانه ای با ساسپتور چرخان را مورد مطالعه عددی قرار دادند و در این کار از نرم افزار فلونت (Fluent) استفاده نمودند. مواد بکار رفته در این کار، تری متیل گالیم ($Ga(CH_3)_3$) و آرسناید (ASH_3) بود که برای دو حالت ساسپتور چرخان و ساسپتور غیر چرخان به بررسی نرخ لایه نشانی پرداختند. آنها نهایتاً به این نتیجه رسیدند که ساسپتور چرخان نرخ لایه نشانی بیشتری را نسبت به غیر چرخان نشان می دهد.

در مقاله حاضر شبیه سازی لایه نشانی بخار سیلیسیم به کمک PECVD در شرایط محیط گازی پیوسته با جریان گاز آرام انجام شده است. هدف از این شبیه سازی یافتن تمام پارامترهای موثر در کیفیت و کمیت لایه نشانی می‌باشد. بدین منظور نرخ لایه نشانی Si و پروفیل آن محاسبه شده و اثر ۳ پارامتر مختلف روی آن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. مدل بدست آمده قابل استفاده در تولید انواع فیلم‌های نازک دیگر از جمله کربید سیلیسیم، ژرمانید سیلیسیم و سایر مواد نوین مورد استفاده در فرآیندهای تولید قطعات برداشت کننده انرژی‌های نو و همچنین انواع سنسورهای بایو و ... می‌باشد.

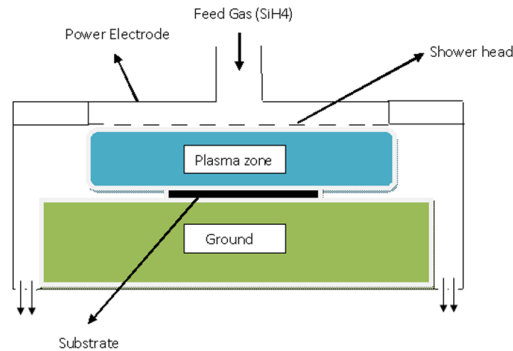
۲. تعریف مدل

شماتیک رآکتور مطابق شکل ۱ متشکل از سه قسمت اصلی شامل ورودی، پلاسما و زیرلایه می باشد. در ورودی گاز سیلان وارد می شود که در اثر حضور میدان الکتریکی القایی ناشی از دو الکترود که شامل الکترود منفی و زمین (الکترود مثبت) می باشد یونیزه می شود و محیط پلاسما را بوجود می آورد. در ادامه بر اثر برهمکنش های شیمیایی ناشی از یونیزاسیون گاز سیلان، لایه ای از سیلیسیم بر روی زیرلایه، تشکیل می شود.

۳. تعریف مدل

در شبیه سازی سیستم مورد بحث فرضیاتی به شرحی که در ذیل می‌آید در نظر گرفته می‌شود:

۱- واکنش‌هایی که به صورت حجمی در فضای میان دو الکترود صورت می‌گیرد از میان واکنش‌های متعدد بر مبنای سرعت و اهمیت واکنش به صورت زیر انتخاب می‌شود [۹ و ۱۰]:



شکل ۱: شماتیک رآکتور PECVD



همانگونه که در معادلات بالا ملاحظه می‌شود معادله ۱ و ۲، معادلات شکسته شدن گاز سیلان ورودی به رآکتور در اثر میدان بوجود آمده می‌باشد که اجزای ایجاد شده در این مرحله شامل هیدروژن مولکولی، سلیل رادیکالی، و الکترون می‌باشد.

الکترون‌های تولید شده در این مرحله در میدان موجود شتاب گرفته و در برخورد با سایر ملکول‌ها باعث شکسته شدن آن‌ها می‌شوند. بر اثر ادامه این بر همکنش‌ها سیلیسیم همانند واکنش نشان داده شده در معادله (۶) بر روی زیر لایه می‌نشیند.

۲- جریان گاز در رآکتور آرام در نظر گرفته می‌شود. این مطلب از این حقیقت منشاء می‌گیرد که عدد رینولدز برای رآکتورهای لایه نشانی پلاسما اصولاً از مرتبه یک می‌باشد [۱۱].

۳- از اثرات انتقال حرارت تابشی و نیز اثرات پخش داخلی اجزا صرف نظر می‌شود. همچنین محفظه رآکتور آدیاباتیک فرض می‌شود [۱۱].

۴- تقریباً می‌توان گفت لایه نشانی ناشی از وجود سلیل رادیکالی می‌باشد که واکنش صورت گرفته به فرم معادله (۶) می‌باشد [۹].

۴. معادلات حاکم بر فرآیند :

معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، ناوراستوکس، انرژی و انتقال جرم می‌باشد که به صورت‌های زیر نشان داده می‌شود:

معادله پیوستگی:

$$(\nabla \cdot \rho u) = 0 \quad (۷)$$

در اینجا ρ چگالی مخلوط گاز راکتور می‌باشد و u سرعت مخلوط گاز می‌باشد.

معادله مومنتوم:

$$\nabla \cdot \rho u u = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g \quad (۸)$$

در اینجا p فشار در راکتور، ρg نیروی ثقلی، و τ تنش برشی است. تنش برشی به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau = \mu [\nabla u + (\nabla u)^T] - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u) \delta \quad (۹)$$

که μ لزجت دینامیکی مخلوط گاز و δ مشخص کننده واحد تانسور می‌باشد.

معادله انرژی :

$$c_p \nabla \cdot (\rho u T) - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = \nabla \cdot (RT \sum_{i=1}^N \frac{D_i^T}{M_i} \nabla (\ln f_i)) + \quad (۱۰)$$

انتقال حرارت دوفور انتقال حرارت هدایت انتقال حرارت همرفت

$$\sum_{i=1}^N \frac{H_i}{M_i} \nabla \cdot j_i - \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K H_i \nu_{ik} (R_k^g - R_{-k}^g) \quad (۱۰)$$

گرمای تولیدی از واکنش‌های فاز گازی حرارت ناشی از پخش مواد داخل راکتور

همانگونه که مشاهده می‌شود این معادله شامل انتقال حرارت به علت اثر دوفور، انتقال حرارت هدایت، انتقال حرارت همرفت، گرمای تولیدی از واکنش‌های فاز گازی، و حرارت ناشی از پخش مواد داخل راکتور می‌باشد. معادله نشان دهنده آن است که در شرایط پایا انتقال حرارت جابجایی برابر با مجموع انتقال حرارت‌های ناشی از هدایت و اثر دوفور و پخش مواد داخل راکتور و گرمای تولیدی از واکنش‌هاست. البته باید در نظر داشت که در بیشتر واکنش‌های لایه نشانی از اثرات دوفور و اینتر دیفیوژن صرف نظر می‌شود و نیز می‌توان از گرمای تولیدی در اثر انجام واکنش‌های شیمیایی در شرایطی که واکنشگرها به صورت خیلی رقیق در داخل گاز پیشران قرار می‌گیرند، صرف نظر کرد. در نتیجه معادله (۱۰) را می‌توان به فرم زیر ساده نمود :

$$c_p \nabla \cdot (\rho u T) - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = 0 \quad (۱۱)$$

که در اینجا c_p گرمای ویژه مخلوط گاز، T دمای مخلوط گاز و λ ضریب هدایت حرارتی است.

معادله پیوستگی جرم اجزا :

$$-\nabla \cdot (\rho u w_i) - \nabla \cdot \vec{j}_i + R_i = 0 \quad (12)$$

که در اینجا w_i کسر جرمی اجزا و j_i فلاکس جرمی اجزا است که بوسیله گرادیان غلظت تولید می‌شود. با فرض رقیق بودن داریم :

$$R_i = M_i \sum_{r=1}^{N_r} R_{i,r} \quad (13)$$

که D_i ضریب پخش موثر، R_i نرخ مولار خالص واکنش اجزاست که بصورت زیر بیان می‌شود :

$$J_i = -\rho D_i \nabla w_i \quad (14)$$

که M_i مولار جرمی اجزاست $R_{i,r}$ نرخ مولار خالص واکنش جز i ام می‌باشد. و به صورت زیر بیان می‌شود :

$$R_{i,r} = (v_{i,r}'' - v_{i,r}') (k_{f,r} \prod_{j=1}^{N_r} [c_{j,r}] \eta_{j,r}') \quad (15)$$

که $v_{i,r}'$ و $v_{i,r}''$ ضرایب استیکیومتری، $\eta_{j,r}'$ و $c_{j,r}$ غلظت مولار و سرعت واکنش مثبت اندیس هر واکنش دهنده یا محصول است N_r تعداد واکنش دهنده‌ها و محصولات است. نرخ ثابت پیشرفت واکنش $k_{f,r}$ می‌تواند بوسیله معادله آرینوس محاسبه شود که :

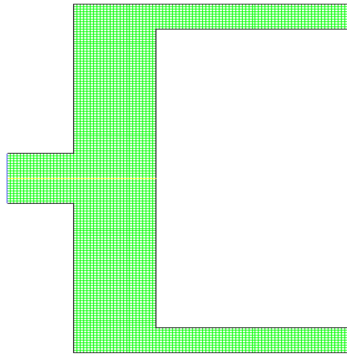
$$K_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT} \quad (16)$$

که A_r فاکتور پیش توان واکنش، $\beta_r = 0$ که اندیس حرارتی است. در اینجا E_r انرژی فعال سازی واکنش می‌باشد. و نیز $R = 8.314 \times 10^3 \text{ Jmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ، ثابت گاز هاست [۳].

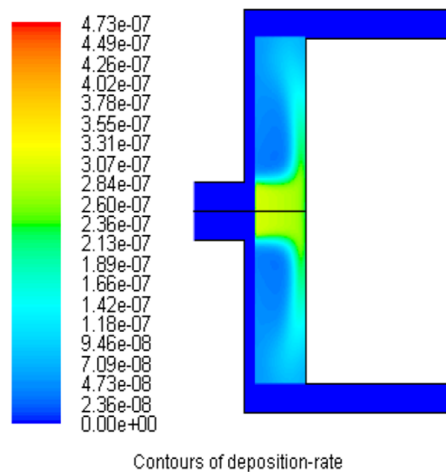
۴. نتایج و بحث

در این بخش به بررسی نتایج بدست آمده از فرآیند لایه نشانی Si بر روی زیر لایه موجود در رآکتور شکل ۱ پرداخته می‌شود، با این تفاوت که فقط لایه نشانی بر روی زیر لایه مورد بررسی قرار گرفته است و بررسی لایه نشانی بر روی سایر قسمت‌ها همچون ground در پژوهش‌های بعدی مد نظر می‌باشد. در ابتدا همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود شبکه بندی کار که توسط نرم افزار Gambit انجام شده مشاهده می‌شود. این شبکه بندی شامل ۲۴۶۰۰ سلول می‌باشد که بر اساس تست شبکه پیدا شده است.

کانتور نرخ لایه نشانی Si را بر روی زیر لایه در شکل ۳ آورده شده است. همانطور که در کانتور مشاهده می‌شود واکنش‌های لایه نشانی در ناحیه پلاسما مشهود هستند که با فاصله گرفتن از سطح زیر لایه و همچنین در راستای طول مقدار لایه نشانی کمتر می‌شود که این به ماهیت سطحی واکنش ۶ بر می‌گردد.

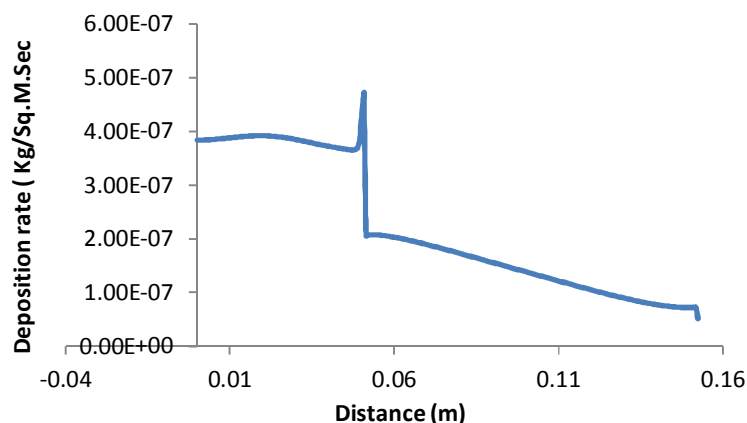


شکل ۲: شبکه مورد استفاده در نرم افزار Gambit

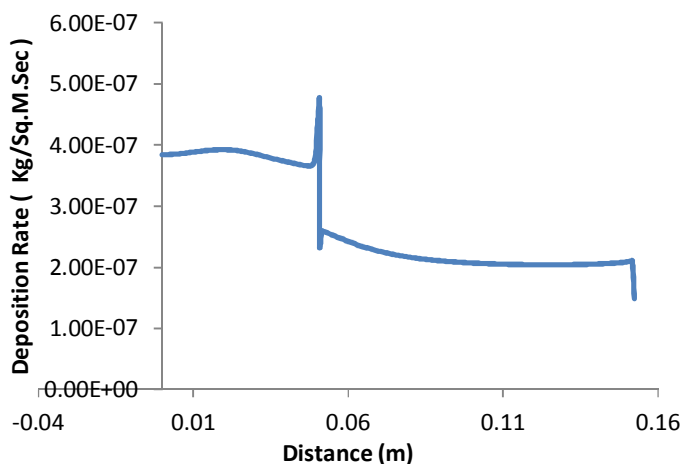


شکل ۳: کانتور لایه نشانی سلیسیوم

با ورود گاز سیلان ۱۰۰٪ به رآکتور از قسمت ورودی که در شکل مشهود می‌باشد و انجام فرآیندهای شیمیایی شامل معادلات ۱ تا ۶ نرخ لایه نشانی بر روی زیر لایه مقدار تقریبی 4.00×10^{-07} بدست آمد که نمودار نرخ لایه نشانی بر روی زیر لایه مطابق شکل ۴ می‌باشد. (البته در این شکل نرخ لایه نشانی در قسمت ground نیز مشاهده می‌شود.) همانگونه که دیده می‌شود نرخ لایه نشانی بر روی زیر لایه تقریباً یکنواخت می‌باشد مگر در قسمتی که زیر لایه به زمین متصل می‌شود که این غیر یکنواختی در ادامه لایه نشانی نیز در انتها مشاهده می‌گردد. می‌توان گفت که این امر ناشی از تلاطمی است که در گاز واکنشگر در اثر اختلاف ارتفاع زیر لایه با زمین بوجود می‌آید. لازم به ذکر است که نمودار شکل ۴ با کاربرد Shower head در قسمت زمین رسم شده است. نکته با اهمیت در اینجا نقش shower head به عنوان یک وسیله در یکنواخت سازی لایه نشانی می‌باشد. همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، به علت عدم وجود shower head نرخ لایه نشانی در قسمت زمین رآکتور به شکلی کاملاً غیر یکنواخت انجام شده است.



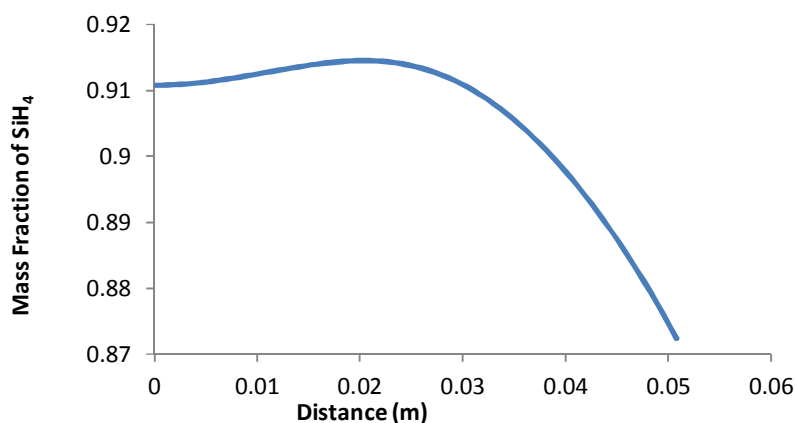
شکل ۴: نرخ لایه نشانی سیلیسیوم



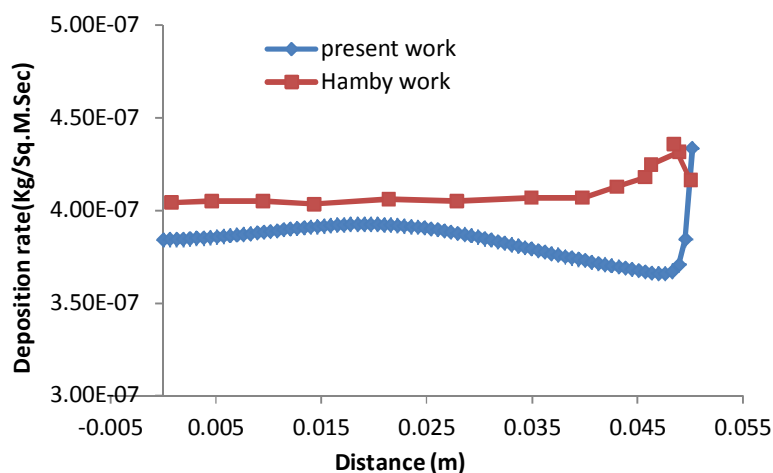
شکل ۵: نرخ لایه نشانی سیلیسیوم (در غیاب shower head)

نمودار کسر جرمی سیلان (SiH_4) بر حسب فاصله از مرکز زیر لایه در شکل ۶ مشاهده می‌شود. همانگونه که دیده می‌شود مقدار کسر جرمی SiH_4 با فاصله گرفتن از مرکز زیر لایه کاهش می‌یابد که این امر ناشی از مصرف و شکسته شدن گاز SiH_4 در اثر واکنش پلاسمایی می‌باشد. با توجه بیشتر در شکل مشاهده می‌شود که کسر جرمی در قسمت ورودی به رآکتور افزایش می‌یابد که این امر ناشی از عدم وجود الکتروود در قسمت ورودی و عدم شکسته شدن SiH_4 توسط میدان می‌باشد.

جهت اعتبار سنجی لایه نشانی بر روی زیر لایه ، نتیجه بدست آمده از نرم افزار ، با کار هامبی [۱۲] اعتبار سنجی شده است که نتیجه در شکل ۷ قابل مشاهده می‌باشد که با محاسبه خطا به روش انتگرالی مقدار آن ۳٪ تخمین زده شد.



شکل ۶: کسر جرمی SiH₄

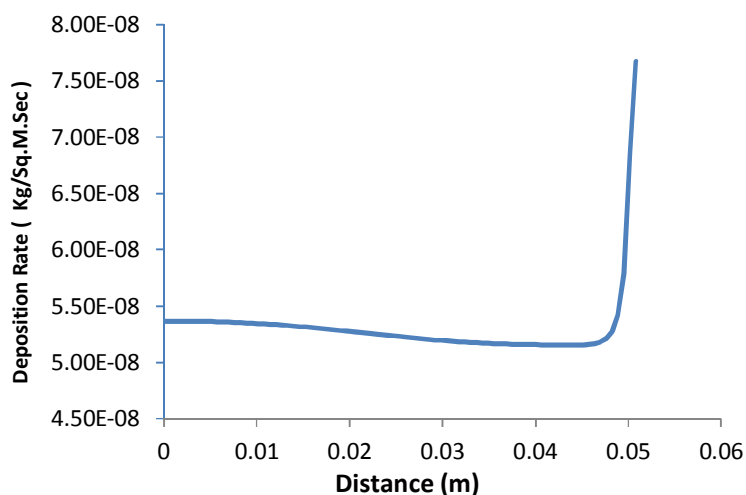


شکل ۷: اعتبار سنجی کار با Hamby [۱۲]

در ادامه کار به بررسی سه عامل موثر مهم در لایه نشانی پرداخته می‌شود و اثر این پارامترها مورد مطالعه قرار

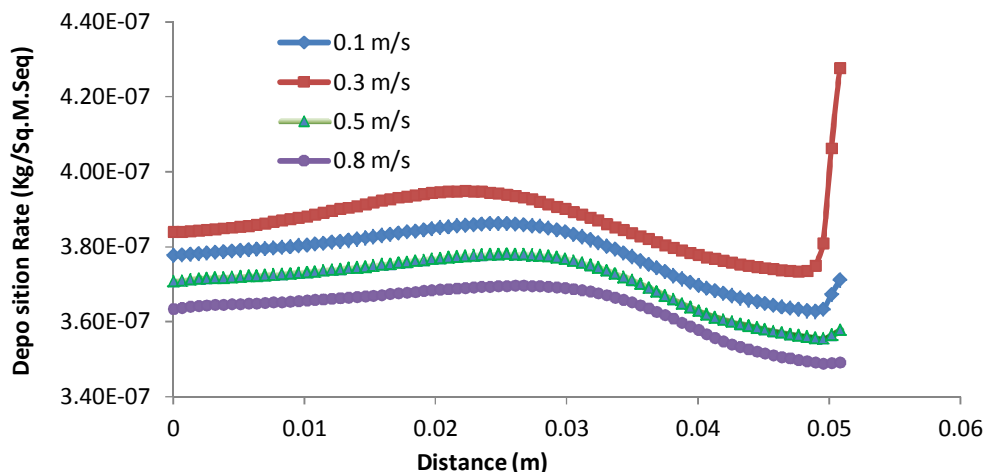
می‌گیرد:

یکی از این عوامل مهم در لایه نشانی وجود گاز پیشران همراه با گاز اصلی (سیلان) می‌باشد. همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود اگر همراه گاز سیلان درصدی از گازهای پیشران هلیوم و هیدروژن به کار برده شود، مشاهده می‌شود که نرخ لایه نشانی به طور معنا داری کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان در این دانست که گازی مانند هیدروژن در محیط پلاسما تحت اثر برخوردهای الکترونی به ازای هر اتم هیدروژن دو اتم رادیکالی ایجاد می‌کند و به این ترتیب با ادامه واکنش امکان ایجاد رادیکال سلیل که جزء اصلی در لایه نشانی سلیسیوم می‌باشد کاهش می‌دهد. به این معنا که با افزایش رادیکال‌ها شانس تشکیل SiH₃ به عنوان عامل اصلی در لایه نشانی از SiH₄ کاهش یافته و در نتیجه آن نرخ لایه نشانی نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۸: نرخ لایه نشانی با گاز پیشران

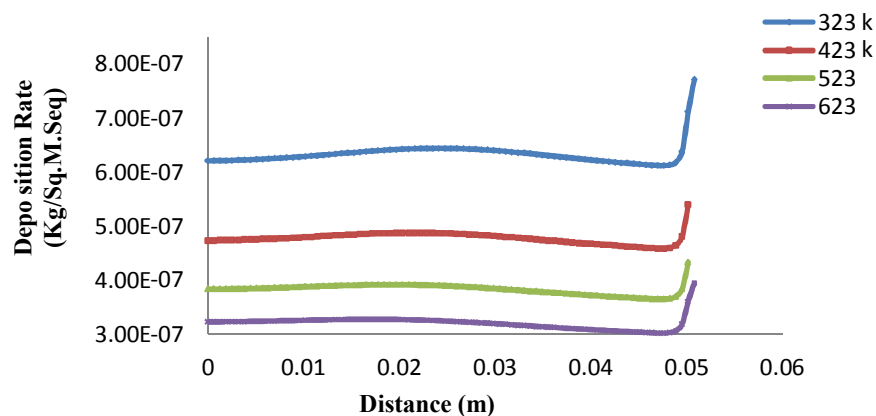
یکی دیگر از پارامترهای مهمی که می توان به نقش آن در لایه نشانی اشاره نمود سرعت ورود گاز به داخل رآکتور می باشد. همانگونه که در شکل ۹ نیز مشاهده می شود نرخ لایه نشانی برای ۴ سرعت ورودی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همانگونه که مشهود است هر چه سرعت گاز در ورودی بیشتر باشد نرخ لایه نشانی کمتر است که این از آنجا منشا می گیرد که با افزایش سرعت زمان لازم برای شکسته شدن مولکول های گازی کاهش یافته و در نتیجه رادیکال سلیل کمتری ایجاد می شود. لازم به ذکر است که تقریباً ۹۸٪ لایه نشانی سلیسیوم به دلیل وجود رادیکال های سلیل می باشد.



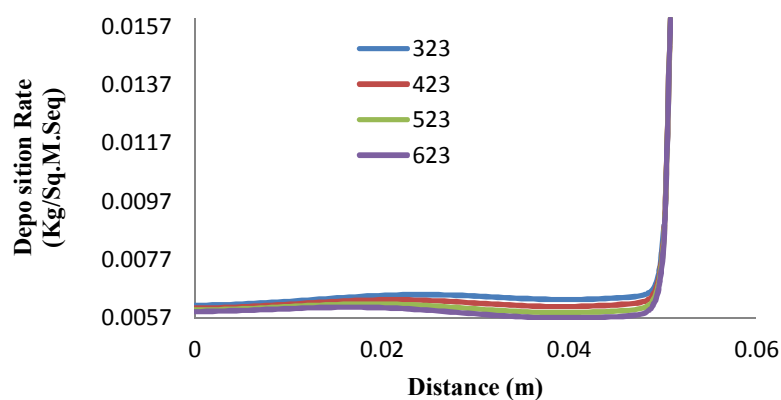
شکل ۹: نرخ لایه نشانی برای ۴ سرعت ورودی مختلف

و عامل موثر دیگر در زمینه لایه نشانی که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته تاثیر دمای زیر لایه بر روی لایه نشانی می باشد همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می شود مقدار لایه نشانی با افزایش دمای سطح زیر لایه کاهش می یابد. در بررسی علت این موضوع اگر به شکل ۱۱ توجه شود میزان کسر جرمی سیلیل (SiH3) را در ۴ دمای متفاوت ۳۲۳،

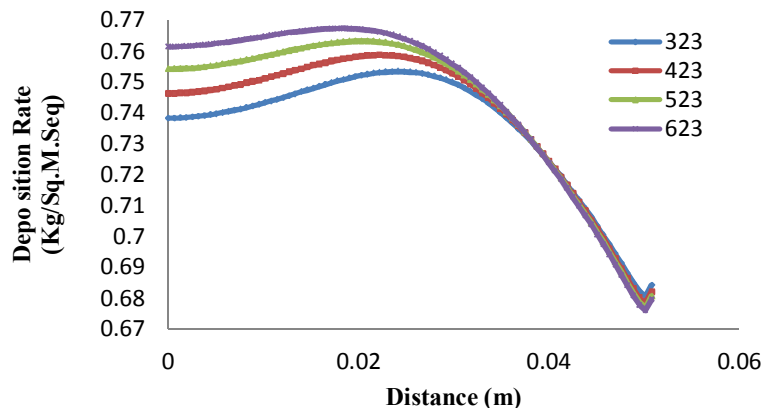
۴۲۳، ۵۲۳ و ۶۲۳ درجه کلویین نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، کسر جرمی سلیل با افزایش دما کاهش می‌یابد که در نتیجه این موضوع کسر جرمی سیلان (SiH₄) همانگونه که در شکل ۱۲ قابل مشاهده می‌باشد، افزایش می‌یابد. همانگونه که قبلاً نیز ذکر شد ۹۸٪ لایه نشانی در اثر وجود سلیل می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش دمای سطح میزان کمتری سیلان به سلیل تبدیل شده و در نتیجه طبق معادله ۶ میزان لایه نشانی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰: نرخ لایه نشانی برای ۴ دمای مختلف



شکل ۱۱: کسر جرمی SiH₃ برای ۴ دمای مختلف



شکل ۱۲: کسر جرمی SiH_4 برای ۴ دمای مختلف

۴. نتیجه گیری

در کار حاضر مطالعه عددی فرآیند لایه نشانی بخار شیمیایی به کمک پلاسما برای گاز سیلان خالص انجام شده است و نرخ لایه نشانی بر روی زیر لایه و عوامل موثر در این لایه نشانی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. پس از بررسی ۳ عامل مهم بر لایه نشانی، این نتیجه حاصل شد که افزایش سرعت و نیز وجود گازهای پیشران همراه با گاز اصلی و نیز افزایش دمای سطح زیر لایه از جمله عواملی می باشند که در کاهش نرخ لایه نشانی موثر بوده و تا حد امکان باید در بهینه سازی آنها کوشید. البته ناگفته نماند عوامل و پارامترهای دیگری نیز در نرخ لایه نشانی موثر می باشند که از جمله آنها می توان به: چرخش یا عدم چرخش زیر لایه، وجود Shower head، زاویه زیر لایه اشاره کرد. امید است در کارهای آتی به این موارد و نقش آنها در لایه نشانی پرداخته شود.

۵. مراجع

- [1] Armaou Antonios, C. and Panagiotis, D., (1999) "Plasma enhanced chemical vapor deposition: Modeling and control", Chemical Engineering Science, 54.
- [2] Economou, D. J., Park, S., & Williams, G. D., (1989) "Uniformity of etching in parallel plate plasma reactors" J. Electrochem. Soc., 136, pp. 188-198.
- [3] Layeillon, L., Dollet, A., Couderc, J. P., & Despax, B., (1994) "Analysis and modeling of plasma enhanced CVD reactors part I: Two-dimensional treatment of a-Si: H deposition" Plasma Sources Sci. Technol., 3, pp. 61-71.
- [4] Caquineau, H., & Despax, B., (1997) "Influence of the reactor design in the case of silicon nitride PECVD" Chem. Engng. Sci., 52, pp. 2901-2914.
- [5] Collins, David J., Strojwas, Andrzej J., Fellow, White, Daniel D., (1994) "A CFD Model for the PECVD of Silicon Nitride", IEEE TRANSACTIONS ON SEMICONDUCTOR MANUFACTURING, 1(2).
- [6] Kim, y., Byung you, H., Jin-Hyo Boo, k., Youn J., (2005) "Effects of showerhead shapes on the flow fields in a RF-PECVD reactor" Surface & Coatings Technology, NO. 193, pp.88- 93.

- [7] Da Silva, Ana Neilde, R., Morimoto, Nilton, I. "Gas Flow Simulation in a PECVD Reactor" LSI – EPUSP – PSI- São Paulo, S.P, Brazil
- [8] Baek, J., Kim, Y., Boo, Jin-Hyo, L., Jong-Chul, (2007) "Characteristics of Thermal-Flow Fields in a PECVD Reactor with Various Operating Conditions". Journal of the Korean Physical Society, Vol. 51, No. 3, September, pp. 1113-1118.
- [9] Conde, J. P., Chan, K. K., Blum, J., Arienzo, M., and Cuomo, J. J., (1992) "Deposition of amorphous silicon using a tubular reactor with concentric-electrode confinement". J. Appl. Phys., 71, pp. 3981-3989.
- [10] Kushner, M. J., (1987) "On the balance between silylene and silyl radicals in rf glow discharges in silane : The effect on deposition rates of a-Si:H ". J. Appl. Phys., 62(7), October, pp. 2803-2811.
- [11] Ding, J., Zhao, Yazhi, Y., Ningyi, sh., Mingming, W., Chen, Ye., Kan, B., (2011) "Effect of electrode architecture and process parameters on distribution of SiH₃ in a PECVD system". Vacuum, NO.86, PP. 344-349.
- [12] Hamby, E.S., Demos, A.T., kabamba, P.T., Khargonekar, p.p., (1995) "A Control Oriented Modeling Methodology for Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition Processes "American Control Conference.