



دانشگاه بلوچستان  
تحصیلات تکمیلی

پایان نامه کارشناسی ارشد در مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)

عنوان:

# شبیه‌سازی لایه‌نشانی شیمیایی بخار در رآکتور استوانه‌ای با فشار اتمسفر

اساتید راهنما:

دکتر امین بهزاد مهر

دکتر طاهره فنایی شیخ‌الاسلامی

تحقیق و نگارش:

احمد جمالی کیخا

اردیبهشت ۱۳۹۰

## بسمه تعالی

این پایان نامه با عنوان "شبیه سازی لایه نشانی شیمیایی بخار در رآکتور استوانه ای با فشار اتمسفر"، قسمتی از برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک توسط دانشجو احمد جمالی کیخا تحت راهنمایی اساتید پایان نامه دکتر امین بهزادمهر و دکتر طاهره فنایی شیخ الاسلامی تهیه شده است. استفاده از مطالب آن به منظور اهداف آموزشی با ذکر مرجع و اطلاع کتبی به حوزه تحصیلات تکمیلی دانشگاه سیستان و بلوچستان مجاز می باشد.

احمد جمالی کیخا

این پایان نامه ۸ واحد درسی شناخته می شود و در تاریخ ۱۳۹۰/۰۲/۱۹ توسط هیئت داوران بررسی و درجه عالی به آن تعلق گرفت.

تاریخ	امضاء	نام و نام خانوادگی
		دکتر امین بهزادمهر
		استاد راهنما:
		دکتر طاهره فنایی شیخ الاسلامی
		استاد راهنما:
		دکتر حسین آتشی
		داور ۱:
		دکتر حسین عجم
		داور ۲:
		دکتر غلامحسین اکبری
		نماینده تحصیلات تکمیلی:



## تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب احمد جمالی کیخا تأیید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان‌نامه پیش از این برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه سیستان و بلوچستان می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: احمد جمالی کیخا

امضاء

تقدیم به:

تقدیم به پیشگاه حضرت ولی عصر (عجل الله تعالی فرجه الشریف)

## سپاسگزاری

**مَنّت خدای را عزوجل، که ملاحظتس موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت. هر نفسی که فرو می‌رود ممدّ حیات است و چون برمی‌آید، مفرّح ذات. پس در هر نفس دو نعمت موجود است و بر هر نعمت، شکری واجب.**

از دست و زبان که برآید      گز عهده‌ی شکرش به درآید

**با تشکر بسیار از والدین ارجمندم.**

با تشکر از حمایت‌های علمی و معنوی اساتید محترم، دکتر بهرام مهر و دکتر فنایح و با تشکر از همکاری دکتر آتشی، دکتر کیخوایی، مهندس ابوییان و دیگر عزیزانی که در زمینه‌ی انجام پایان‌نامه، به من یاری رساندند.

با تشکر ویژه از همسرم که در سختی‌های زندگی مرا همراهی کرد.

همچنین با سپاس از خرزندم. که با ایجاد شادی در فام، به من برای انجام کار، رومیح داد.

## چکیده:

در پایان‌نامه‌ی حاضر، لایه‌نشانی شیمیایی بخار یک ماده‌ی پلیمری (پلی‌کربوسیلان) در یک رآکتور استوانه‌ای و در فشار جو با استفاده از گاز آرگون، به عنوان گاز حامل، برای تولید فیلم نازک سیلیکون کرباید، شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی به صورت عددی و با به کارگیری روش حجم محدود، انجام شده است.

تاثیر پارامترهای کسر جرمی ورودی، عدد رینولدز ورودی، دمای زیرلایه، فاصله‌ی زیرلایه از ورودی، دمای دیواره‌ی رآکتور، دمای مخلوط ورودی، و فاصله‌ی زیرلایه از محور مرکزی رآکتور، بر سرعت لایه‌نشانی، مورد بررسی قرار گرفتند.

با استفاده از نتایج حاصله از مطالعه‌ی پارامتری، طرح آزمایش برای رآکتور مدل شده، صورت پذیرفت و شدت تاثیر تمام پارامترها بر سرعت لایه‌نشانی شیمیایی بخار، با انجام طراحی آزمایش دو سطحی، مورد ارزیابی قرار گرفت.

با انجام طراحی آزمایش دو سطحی و انتخاب موثرترین پارامترها، طراحی آزمایش، به صورت سه سطحی و با پارامترهای انتخابی، انجام شد.

پس از انجام مراحل فوق، کسر جرمی مخلوط ورودی، به عنوان موثرترین پارامتر بر سرعت لایه‌نشانی به دست آمد. پس از کسر جرمی ورودی، عدد رینولدز ورودی و فاصله‌ی زیرلایه از ورودی، بیشترین تاثیر را بر سرعت لایه‌نشانی سیلیکون کرباید دارند. کسر جرمی ورودی و عدد رینولدز، با سرعت لایه‌نشانی، نسبت مستقیم، و فاصله‌ی زیرلایه از ورودی، با سرعت لایه‌نشانی، نسبت عکس دارد.

**کلمات کلیدی:** لایه‌نشانی شیمیایی بخار در فشار اتمسفر، شبیه‌سازی، طراحی آزمایش، پلی‌کربوسیلان، منبع

پلیمری، لایه‌نشانی سیلیکون کرباید، روش حل حجم محدود

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه و تاریخچه.....
۲	۱-۱ مقدمه .....
۲	۱-۱-۱ مقدمه‌ای بر روش‌های لایه‌نشانی.....
۳	۲-۱-۱ مقدمه‌ای بر لایه‌نشانی شیمیایی بخار.....
۵	۳-۱-۱ لایه‌نشانی شیمیایی بخار در فشار اتمسفر.....
۸	۴-۱-۱ مقدمه‌ای بر سلیکون کرباید.....
۱۰	۲-۱ تاریخچه.....
۱۰	۱-۲-۱ تاریخچه‌ی لایه‌نشانی شیمیایی بخار.....
۱۴	۲-۲-۱ تاریخچه‌ی شبیه‌سازی لایه‌نشانی شیمیایی بخار.....
۱۶	۳-۱ پروژه‌ی حاضر.....
۱۷	فصل دوم: تعریف مساله و مدل‌سازی.....
۱۸	۱-۲ تعریف مساله .....
۱۸	۲-۲ شرح مختصری از روش‌های عددی نرم افزاری.....
۲۰	۳-۲ مدل‌سازی ریاضی .....
۲۱	۱-۳-۲ فرضیات اساسی .....
۲۱	۲-۳-۲ معادلات حاکم .....
۲۴	۳-۳-۲ واکنش‌های سطحی .....
۲۴	۴-۳-۲ شرایط مرزی .....
۲۶	۵-۳-۲ معادله‌ی حالت .....
۲۶	۶-۳-۲ مدل‌سازی مکانیزم واکنش‌های شیمیایی .....
۲۷	۷-۳-۲ روش‌های عددی برای شبیه‌سازی معادلات لایه‌نشانی شیمیایی بخار .....
۳۰	۴-۲ توصیف مدل .....
۳۱	۱-۴-۲ شرایط مرزی .....
۳۲	۵-۲ شرط همگرایی برای رسیدن به جواب.....
۳۲	۶-۲ به دست آوردن شبکه‌ی مناسب برای حل.....
۳۵	فصل سوم: اعتبارسنجی و مطالعه‌ی تاثیر پارامترها بر سرعت لایه‌نشانی.....
۳۶	۱-۳ اعتبارسنجی مدل ایجاد شده.....
۳۶	۱-۱-۳ اعتبارسنجی مدل با کار بلنکوئت و همکاران .....
۳۷	۲-۱-۳ اعتبارسنجی با مدل کی و همکاران .....
۳۸	۳-۱-۳ اعتبارسنجی با مدل فنایی و همکاران .....

۳۹	..... بررسی نتایج ۲-۳
۴۴	..... بررسی تاثیر سرعت ورودی (عدد رینولدز) بر سرعت لایه‌نشانی شیمیایی بخار.. ۱-۲-۳
۴۸	..... بررسی تاثیر کسر جرمی ورودی بر سرعت لایه‌نشانی شیمیایی بخار ۲-۲-۳
۵۲	..... بررسی تاثیر فاصله زیرلایه از مقطع ورودی بر سرعت لایه‌نشانی شیمیایی بخار. ۳-۲-۳
۵۶	..... بررسی تاثیر دمای زیرلایه بر سرعت لایه‌نشانی شیمیایی بخار ۴-۲-۳
۶۰	..... بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر یکنواختی لایه‌نشانی شیمیایی بخار ۵-۲-۳
۶۳	<b>فصل چهارم: طراحی آزمایش برای یافتن سرعت لایه‌نشانی مناسب.....</b>
۶۴	..... ۱-۴ مقدمه.....
۶۵	..... ۲-۴ انجام طراحی آزمایش برای مدل .....
۷۵	..... ۳-۴ اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از طراحی آزمایش .....
۷۶	<b>فصل پنجم: جمع بندی و ارایه‌ی پیشنهادات.....</b>
۷۷	..... ۱-۵ مقدمه .....
۷۷	..... ۲-۵ جمع‌بندی نتایج .....
۷۸	..... ۳-۵ ارایه‌ی پیشنهادات .....
۸۰	..... مراجع .....



## فهرست جدول ها

صفحه	عنوان جدول
۲۸	جدول ۱-۲. مقایسه‌ی روش‌های المان محدود و حجم محدود
۳۲	جدول ۲-۲. شرایط مرزی مساله
۳۴	جدول ۲-۳. انتخاب مدل دارای استقلال شبکه
۳۷	جدول ۱-۳. شرایط مرزی در کار کی و همکاران
	جدول ۲-۳. شرایط مرزی برای بررسی تاثیر سرعت ورودی بر سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار
۴۴	
	جدول ۳-۳. شرایط مرزی برای بررسی تاثیر کسر جرمی پلیمر ورودی بر سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار
۴۸	
	جدول ۳-۴. شرایط مرزی برای بررسی تاثیر فاصله ی زیر لایه از ورودی بر سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار
۵۲	
	جدول ۳-۵. شرایط مرزی برای بررسی تاثیر دمای زیر لایه بر سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار
۵۶	
۶۶	جدول ۱-۴. سطوح مختلف چهار پارامتر اصلی برای انجام طراحی آزمایش سه سطحی
۶۶	جدول ۲-۴. شبیه سازی ها و نتایج به دست آمده برای انجام طراحی آزمایش
۷۴	جدول ۳-۴. آنالیز واریانس برای طراحی آزمایش <sup>۴</sup> مدل شبیه سازی شده
۷۵	جدول ۴-۴. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از کانتورها و شبیه سازی

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان شکل
۳	شکل ۱-۱. شکل شماتیک واکنش های انجام شده برای تولید فیلم نازک از ماده
۵	شکل ۱-۲. کنترل یکنواختی لایه‌ی نشست کرده در CVD با تغییر در زاویه‌ی زیرلایه
۵	شکل ۱-۳. کنترل یکنواختی لایه‌ی نشست کرده در CVD با استفاده از زیرلایه‌ی چرخشی
	شکل ۱-۴. نمودار جریان گازهای ورودی به رآکتور و دمای رآکتور، از ابتدا تا پایان فرآیند
۷	لایه‌نشانی سیلیکون در کار باو و همکاران
۳۰	شکل ۲-۱. نمایی از رآکتور مدل شده در نرم افزار فلوئنت
۳۰	شکل ۲-۲. نمایی از مش‌بندی رآکتور و شرایط مرزی مساله
۳۱	شکل ۲-۳. نمایی از مش بندی مقطع رآکتور
۳۳	شکل ۲-۴. انتخاب شبکه مناسب
۳۷	شکل ۳-۱. نتایج شبیه سازی در مقایسه با نتایج تجربی بلنکوئت و همکاران
۳۸	شکل ۳-۲. نتایج شبیه سازی در مقایسه با نتایج کی و همکاران
۳۹	شکل ۳-۳. اعتبارسنجی مدل با نتایج تجربی فنایی و همکاران
۴۰	شکل ۳-۴. بررسی تاثیر سرعت ورودی (رینولدز) بر سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار
۴۱	شکل ۳-۵. بررسی تاثیر کسر جرمی ورودی بر سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار
۴۱	شکل ۳-۶. بررسی تاثیر دمای مخلوط ورودی بر سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار
	شکل ۳-۷. بررسی تاثیر فاصله ی زیرلایه از محور مرکزی رآکتور بر سرعت لایه نشانی
۴۲	شیمیایی بخار
	شکل ۳-۸. بررسی تاثیر فاصله ی زیرلایه از مقطع ورودی رآکتور بر سرعت لایه نشانی
۴۲	شیمیایی بخار
۴۳	شکل ۳-۹. بررسی تاثیر دمای زیرلایه بر سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار

- شکل ۳-۱۰. بررسی تاثیر دمای دیواره ی رآکتور بر سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار ۴۳
- شکل ۳-۱۱. بررسی تاثیر سرعت ورودی بر غلظت ماده‌ی پلیمری ۴۵
- شکل ۳-۱۲. سرعت لایه نشانی، به ازای سرعت های مختلف ورودی ۴۵
- شکل ۳-۱۳. بررسی تاثیر سرعت ورودی بر سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار بر سطح بالایی زیرلایه ۴۶
- شکل ۳-۱۴. بررسی جریان برگشتی در پشت زیرلایه، به ازای سرعت های مختلف ورودی ۴۷
- شکل ۳-۱۵. بررسی تاثیر سرعت ورودی بر کانتور سرعت بی بُعد در مقطع کناری رآکتور ۴۷
- شکل ۳-۱۶. بررسی تاثیر کسرجرمی پلیمر ورودی به رآکتور بر غلظت آن ۴۸
- شکل ۳-۱۷. سرعت لایه نشانی، به ازای کسر جرمی های مختلف ورودی ۴۹
- شکل ۳-۱۸. بررسی تاثیر کسر جرمی ورودی بر سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار بر سطح بالایی زیرلایه ۵۰
- شکل ۳-۱۹. بررسی جریان برگشتی در پشت زیرلایه، به ازای کسر جرمی های مختلف ورودی ۵۱
- شکل ۳-۲۰. بررسی تاثیر کسر جرمی ورودی بر کانتور سرعت بی بُعد در مقطع کناری رآکتور ۵۱
- شکل ۳-۲۱. بررسی تاثیر فاصله‌ی زیرلایه از ورودی بر غلظت ماده‌ی پلیمری ۵۲
- شکل ۳-۲۲. سرعت لایه‌نشانی، به ازای فاصله‌های مختلف زیرلایه از ورودی ۵۳
- شکل ۳-۲۳. بررسی تاثیر فاصله ی زیرلایه از ورودی بر سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار بر سطح بالایی زیرلایه ۵۴
- شکل ۳-۲۴. بررسی جریان‌برگشتی درپشت زیرلایه، به ازای فاصله‌های مختلف زیرلایه از ورودی ۵۵
- شکل ۳-۲۵. بررسی تاثیر فاصله ی زیرلایه از ورودی بر کانتور سرعت بی بُعد در مقطع کناری رآکتور ۵۵
- شکل ۳-۲۶. بررسی تاثیر دمای زیرلایه بر غلظت ماده‌ی پلیمری ۵۶
- شکل ۳-۲۷. سرعت لایه‌نشانی، به ازای دماهای مختلف زیرلایه ۵۷
- شکل ۳-۲۸. بررسی تاثیر دمای زیرلایه بر سرعت لایه‌نشانی شیمیایی بخار روی سطح بالایی زیرلایه ۵۸
- شکل ۳-۲۹. بررسی جریان برگشتی در پشت زیرلایه، به ازای دماهای مختلف زیرلایه ۵۹

- شکل ۳-۳۰. بررسی تاثیر دمای زیر لایه بر کانتور سرعت بی بُعد در مقطع کناری رآکتور ۵۹
- شکل ۳-۳۱. بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر یکنواختی سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار ۶۱
- شکل ۳-۳۲. نمودار سرعت بی بُعد برای بررسی تاثیر فاصله از محور مرکزی رآکتور بر یکنواختی سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار ۶۲
- شکل ۴-۱. شدت تاثیر هر یک از پارامترها بر روی سرعت لایه نشانی ۶۵
- شکل ۴-۲. شدت تاثیر هر یک از پارامترها بر روی سرعت لایه نشانی ۶۹
- شکل ۴-۳. نمایش تاثیر پارامترهای اصلی بر سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار، در قالب کانتور ۷۱
- شکل ۴-۴. نمایش تاثیر پارامترهای اصلی بر یکنواختی سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار (دلتا)، در قالب کانتور ۷۳
- شکل ۵-۱. نمونه‌ی پیشنهادی برای ادامه‌ی کار ۷۹

## فهرست علائم

نشانه	علامت
ظرفیت گرمایی ویژه (بر واحد جرم)	$c_p$
قطر رآکتور (cm)	$D$
ضریب پخش موثر برای جز $A_m$	$D_i$
ضریب پخش دوگانه برای جزیهای $A_m$ و $A_n$	$D_{ij}$
ضریب پخش حرارتی جز $A_m$	$D_i^T$
تابع مشخصه، برای یکنواختی لایه ی تولید شده بر روی زیرلایه	Delta
انرژی شکست پیوند	$E_g$
انرژی فعال سازی	$E_a$
کسر مولی جز $A_m$	$f_i$
سرعت رشد $A_m$ جامد	$G_j$
بردار شتاب گرانش	$\vec{g}$
انتالپی مولی جز $A_m$	$H_i$
تانسور واحد	$\vec{I}$
شار پخشی کل برای جز $A_m$	$\vec{J}_i$
شار پخشی برای جز $A_m$ به دلیل پخش جرمی	$\vec{J}_i^C$
شار پخشی برای جز $A_m$ به دلیل پخش حرارتی	$\vec{J}_i^T$
ثابت بولتزمن	$k_B$
مجموع واکنش های انجام شده بر روی سطح	$L$
جرم مولی مخلوط گازی	$M$
جرم مولی جز $A_m$	$M_i$

مجموع واکنشگرها و محصولات جامد	$N$
بردار یکه	$\vec{n}$
عدد آووگادرو	$N_0$
فشار (Pa)	$P$
ثابت عمومی گازها	$R$
سرعت واکنش رفت برای واکنش kام	$R_k^g$
سرعت واکنش برگشت برای واکنش kام	$R_{-k}^g$
سرعت لایه نشانی شیمیایی بخار	SDR
دما (°C)	$T$
بردار سرعت (m/s)	$\vec{v}$
بردار سرعت جز iام (m/s)	$\vec{v}_i$
فاصله ی زیرلایه از مقطع ورودی رآکتور (mm)	$x_s$

### علائم یونانی

ضرایب استوکیومتری برای گاز iام در واکنش سطحی lام	$\alpha_{il}$
ضرایب استوکیومتری برای جز جامد iام در واکنش سطحی lام	$\beta_{jl}$
هدایت حرارتی	$\lambda$
لزجت دینامیک	$\mu$
قطر برخورد، ثابت استفان-بولتزمن	$\sigma$
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$
تانسور تنش لزجت	$\vec{\tau}$
کسر جرمی جز iام	$\omega_i$

### پانویس ها

در مورد جز iام و jام	$i, j$
----------------------	--------

در مورد ورودی رآکتور	$in$
در مورد واکنش سطحی $l$ ام	$l$
در مورد زیرلایه	$S$
در مورد دیواره ی رآکتور	$w$

#### بالا نویس ها

در شرایط دما و فشار استاندارد	$0$
ناشی از پخش گرمی	$C$
ناشی از پخش حرارتی	$T$

## فصل اول

### مقدمه و تاریخچه



## ۱-۱ مقدمه

### ۱-۱-۱ مقدمه‌ای بر روش‌های لایه‌نشانی

با توجه به نیاز بشر برای استفاده از فیلم‌های نازک، روش‌های خاصی، تحت عنوان روش‌های لایه‌نشانی برای تولید این فیلم‌ها، به کار برده می‌شوند که در دو نوع کلی لایه‌نشانی فیزیکی و لایه‌نشانی شیمیایی، تقسیم‌بندی می‌شوند:

الف- **لایه‌نشانی فیزیکی بخار<sup>۱</sup> (PVD):** که خود به انواع مختلفی مانند تبخیر (Evaporation)، کندوپاش (Sputtering)، رشد لایه از طریق باریکه‌ی مولکولی (Molecular Beam Epitaxy)، روش لیزر پالسی (Pulsed Laser Deposition)، آبرکاری الکتریکی (Electro Plating)، آبرکاری بدون استفاده از انرژی الکتریکی (Electroless Plating)، آبرکاری یونی (Ion Plating) و ... از جمله انواع مختلف لایه‌نشانی فیزیکی بخار است [۱].

ب- **لایه‌نشانی شیمیایی بخار<sup>۲</sup> (CVD):** لایه‌نشانی شیمیایی بخار (CVD) فرآیندی است شیمیایی، برای تبدیل مولکول‌های گازی شکل (تحت عنوان واکنشگر) به ماده‌ای جامد (به شکل پودر یا فیلم نازک)، بر روی یک سطح به عنوان زیرلایه. لایه‌نشانی شیمیایی بخار نیز مانند روش فیزیکی به انواع مختلفی انجام می‌پذیرد، که متداول‌ترین آن‌ها را نام می‌بریم:

لایه‌نشانی شیمیایی بخار در فشار اتمسفر<sup>۳</sup> (APCVD)، لایه‌نشانی شیمیایی بخار در فشارهای کم<sup>۴</sup> (LPCVD)، لایه‌نشانی شیمیایی بخار به کمک پلاسما<sup>۵</sup> (PECVD)، لایه‌نشانی فلز-آلی (MOCVD)<sup>۶</sup> و ... از جمله روش‌های انجام لایه‌نشانی به صورت شیمیایی است [۱].

<sup>1</sup> Physical Vapor Deposition

<sup>2</sup> Chemical Vapor Deposition

<sup>3</sup> Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition

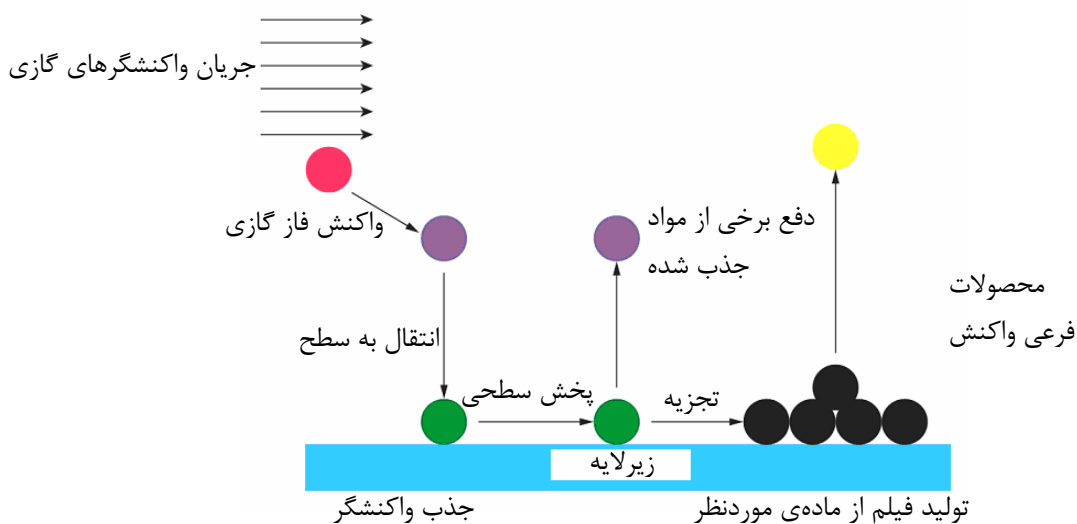
<sup>4</sup> Low Pressure Chemical Vapor Deposition

<sup>5</sup> Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition

<sup>6</sup> Metal-Organic Chemical Vapor Deposition

## ۱-۲-۱ مقدمه‌ای بر لایه نشانی شیمیایی بخار

در حالت کلی، لایه نشانی شیمیایی بخار، تشکیل یک نوار نازک جامد بر روی یک ماده به عنوان زیرلایه (Substrate)، از طریق واکنش شیمیایی واکنش گرهای (Precursores) گازی است. شکل ۱-۱ فرآیندهای انجام شده در طی لایه‌نشانی شیمیایی بخار را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. هدف از لایه‌نشانی شیمیایی بخار، تولید فیلم یکنواخت (یونیفرم) و نازکی از ماده‌ی مورد نظر با خلوص مناسب است. اهمیت لایه‌نشانی شیمیایی بخار در تولید مواد مختلف، از آن جایی است که مواد به دست آمده به کمک CVD در تولید مواد نیمه‌هادی، عایق‌های حرارتی قوی، وسایل اپتوالکترونیک، سلول‌های خورشیدی، میکروماشین‌ها، مواد کاتالیست، پوشش‌های محافظ و ... کاربرد وسیع دارد [۲].



شکل ۱-۱. شکل شماتیک واکنش‌های انجام شده برای تولید فیلم نازک از ماده [۳]

- واکنشگرها دارای شرایطی باید باشند، تا بتوان از آن‌ها برای لایه‌نشانی شیمیایی بخار، استفاده کرد:
- ۱- داشتن فراریت بالا، برای این که بتوانند به صورت بخار، وارد رآکتور شوند.
  - ۲- پایداری در مسیر ورود به رآکتور. (پایداری نسبت به مواد دیگر و پایداری به دمای محیط انتقال)
  - ۳- خلوص کافی برای تولید فیلم نازک با درصد خلوص قابل قبول.
  - ۴- قابلیت استفاده برای ابعاد صنعتی و بزرگ در تولیدات با خلوص بالا.
  - ۵- ارزان و در دسترس بودن.

۶- غیر خورنده و غیر سمی بودن.

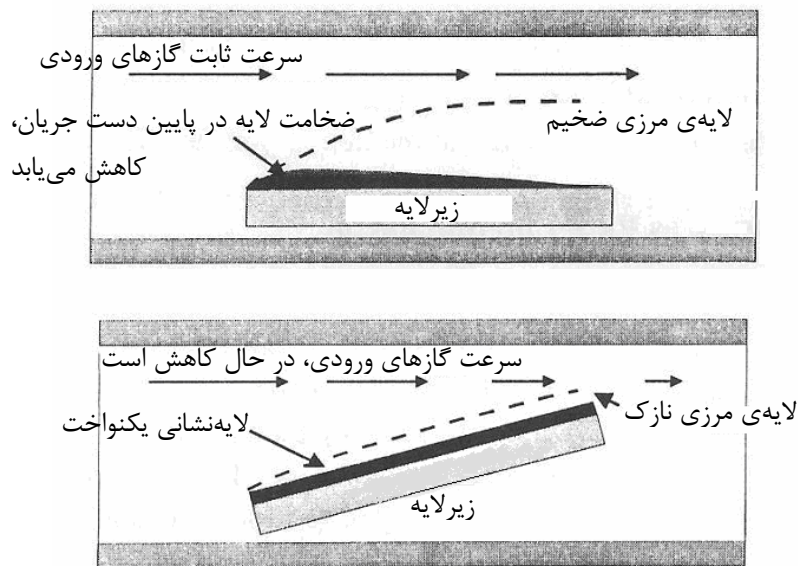
یکی از انواع خاص لایه‌نشانی شیمیایی بخار، لایه‌نشانی مواد فلز-آلی (Metal-Organic CVD) می‌باشد؛ که در آن از واکنش گرهایی که از ترکیب فلز با یک ماده‌ی آلی به دست آمده‌اند، استفاده می‌شود. عبارت کلی ترکیب فلز-آلی، ما را به سمت ترکیباتی که شامل یک پیوند مستقیم فلز-کربن هستند، سوق می‌دهد، مانند پیوندهای فلز-آلکیل و فلز-کربونیل؛ ولی درحقیقت، در این نوع لایه‌نشانی از دیگر پیوندهای فلزی نیز استفاده می‌شود؛ واکنش گرهایی با پیوند فلز-اکسیژن (مانند فلز-الکوکسیدها و فلز-تا-دی کتونات‌ها)، فلز-نیتروژن (مانند فلز-آلکیل‌امیدها) و حتی واکنش‌های هیدرید-فلز (مانند تری متیلامین الان) از جمله واکنش گرهایی غیر آلی به کار رفته در این نوع از لایه‌نشانی است [۴].

لایه‌نشانی شیمیایی بخار تقویت شده با پلاسما (PECVD)، فناوری است که در آن از انرژی ناشی از میدان الکتریکی بهره‌برده می‌شود؛ و هدف از این کار، تولید یون‌های فعال شیمیایی است که در واکنش‌های ناهمگن شرکت می‌کنند. در مجموع، این فرآیندها منجر به تشکیل لایه‌ای بر روی زیرلایه در دماهای پایین می‌شود [۲].

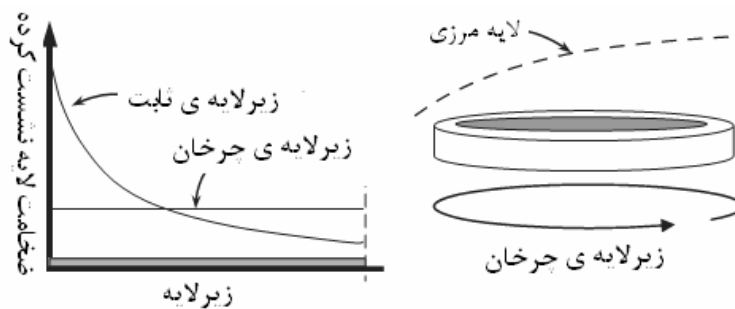
رسوب لایه‌ی اتمی (Atomic Layer Deposition)، تجمع لایه‌ی اتمی (Atomic Layer Epitaxy)، لایه‌نشانی در پالس‌های متناوب (Alternatively-Pulsed CVD) و یا لایه‌نشانی لایه‌ی اتمی (Atomic Layer CVD)، به نوعی از لایه‌نشانی شیمیایی بخار گفته می‌شود که در آن:

واکنشگرها به صورت بخار با دوره‌ی تناوب مشخص، به سمت سطح زیرلایه هدایت می‌شوند و پس از هر بار ورود واکنشگرها به رآکتور، محیط رآکتور با یک گاز بی‌اثر، پاک‌سازی و خالی می‌شود. واکنش‌های شیمیایی که منجر به تولید فیلم در ALD می‌شوند، منحصر بر روی زیرلایه و در دمایی پایین‌تر از دمای تجزیه‌ی واکنشگر فلزی، اتفاق می‌افتند؛ همچنین در این نوع از لایه‌نشانی، واکنش‌های انجام شده در فاز بخار، بی‌اهمیت‌اند [۲].

از دیگر موارد موثر بر لایه‌نشانی شیمیایی بخار، زاویه‌ی زیرلایه و چرخش آن است. این دو پارامتر، بر یکنواختی لایه‌ی نشست کرده، موثرند. بررسی‌های انجام شده در زمینه‌ی یکنواختی لایه‌ی نشست کرده بر روی زیرلایه، نشان می‌دهد که با قرار دادن زیرلایه تحت زاویه‌ای نسبت به جریان مواد ورودی (شکل ۱-۲)، و یا استفاده از زیرلایه‌ی گردنده (چرخشی) (شکل ۱-۳) می‌تواند لایه‌ای با یکنواختی بیشتر تولید کند. [۵]



شکل ۱-۲. کنترل یکنواختی لایه نشانی در CVD با تغییر در زاویه زیر لایه [۵]



شکل ۱-۳. کنترل یکنواختی لایه نشانی در CVD با استفاده از زیر لایه ی چرخشی [۵]

### ۱-۱-۳ لایه نشانی شیمیایی بخار در فشار اتمسفر

APCVD فرآیندی است که لایه نشانی در آن در فشار اتمسفر و در دماهای بالایی تا  $1300^{\circ}\text{C}$ ، برای سرعت های بالای لایه نشانی ( $10\ \mu\text{m}/\text{min}$ )، کاربرد دارد. این روش به دلیل کار در دمای بالا، اتم ها را با نظم مورد نظر در ساختار کریستالی ماده، به نحوی قرار می دهد که کمترین نقص در ساختمان ماده، رخ دهد؛ به همین دلیل از این روش در رشد مواد به صورت همبند (Epitaxial) می توان استفاده کرد (مثلا رشد سیلیکون بر روی زیر لایه ی سیلیکونی) [۶].