# لایه نشانی تبخیر حرارتی مبتنی بر مقاومت الکتریکی

نفیسه شریفی

# سیستم جامع آموزش فناوری نانو

ستاد ویژه توسعه فناوری نانو در راستای تأمین نیازهای آموزشی دانش آموزان و دانشجویان مقاطع و رشته‌های مختلف و سایر علاقه مندان به علوم وفناوری نانو اقدام به تدوین سیستم جامع آموزش فناوری نانو نموده است. فایل حاضر، فایل ارائه مقاله ای است که در سایت آموزش فناوری نانو با جانمایی:

**دوره؛ روش های سنتز نانوساختارها**
**درس؛لایه نشانی تبخیری**
**جلسه؛ دوم**

بارگذاری گردیده که به منظور کمک به یادگیری مطالب اصلی توسط کاربر و نیز روان شدن برگزاری کارگاه ها و سمینارهای آموزشی، طراحی شده که در اختیار علاقه مندان قرار گرفته است. استفاده از این فایل ها ضمن کمک به یادگیری بهتر مخاطبان، برگزاری سمینارها و کارگاه های تخصصی را برای نهادهای ترویجی آسانتر خواهد نمود.

# لایه نشانی به روش تبخیر حرارتی

- برای ایجاد پوشش‌هایی با کیفیت بالا، از روش‌های لایه نشانی در خلا می‌توان استفاده کرد.

- از جمله این روش‌ها؛ روش‌های لایه نشانی فیزیکی بخار ( Physical Vapor Deposition PVD) است که تبخیر حرارتی مبتنی بر مقاومت الکتریکی (Evaporative Deposition) یکی از انواع روش‌های PVD محسوب می‌شود.

- لایه نشانی به روش تبخیر حرارتی فرآیندی است که در محیط خلأ و به کمک اعمال جریان الکتریکی برای تبخیر ماده منبع صورت می‌گیرد و هدایت و انتقال ماده تبخیر شده به سمت زیرلایه، بر اساس اختلاف فشار میان محلی که ماده منبع و زیرلایه قرار دارد، اتفاق می‌افتد.

- این روش لایه‌نشانی یکی از رایج‌ترین انواع لایه‌نشانی‌ها در ساخت لایه‌های نازک به‌شمار می‌رود.

# لایه نشانی به روش تبخیر حرارتی

- پارامترهایی که در این نوع لایه‌نشانی بایستی کنترل شوند، عبارتند از:

**فشار محفظه**

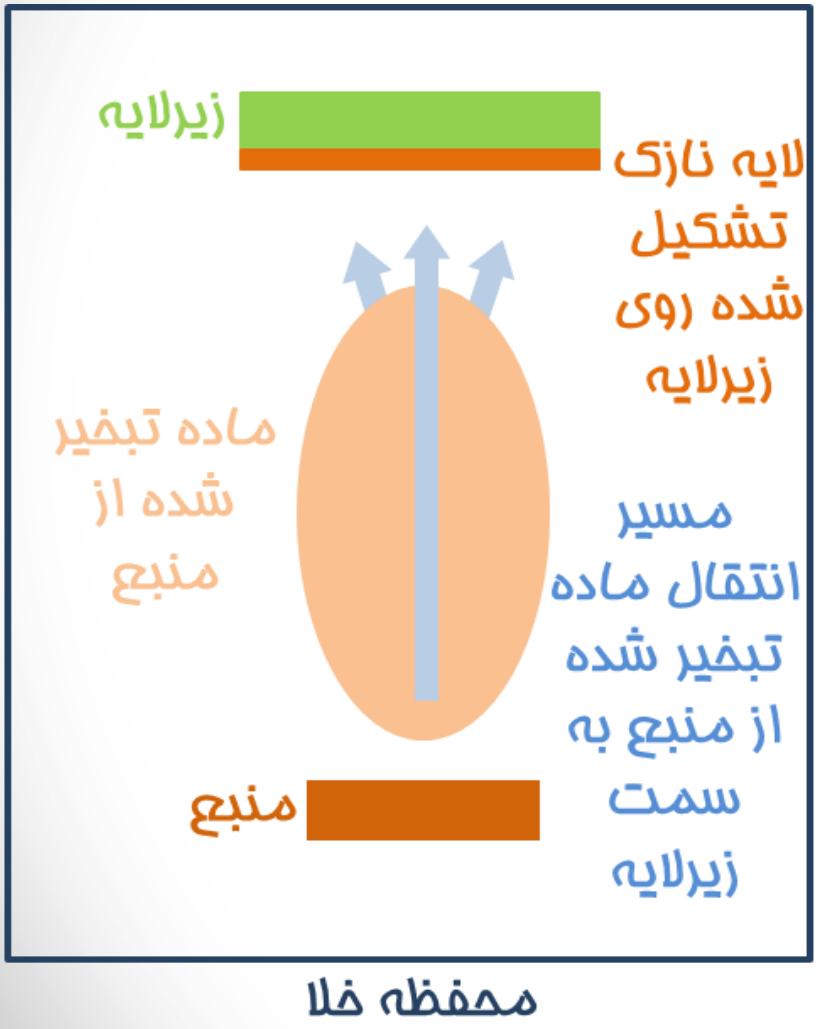
**دمای بوته‌ای که ماده منبع در آن قرار می‌گیرد.**

- در این روش، ماده منبع که به عنوان پوشش استفاده می‌شود (مانند یک قطعه فلز) در یک ظرف (بوته) که با نام قایقک یا فیلامان نیز شناخته می‌شود و از جنس فلزات مقاوم است، قرار می‌گیرد.
- با عبور جریان برق از قایقک یا بوته و داغ شدن ماده مورد نظر به عنوان ماده منبع و تبخیر آن در محیط خلاء، به دلیل اختلاف فشاری که بین محل بوته و محل زیرلایه وجود دارد، یک لایه بسیار نازک بر روی زیرلایه قرار می‌گیرد.
- این روش پیش تر، در اوایل قرن بیستم به منظور ساخت آینه‌های فلزی از آلومینیوم یا نقره یا قطعات ماشین آلات مورد استفاده قرار می‌گرفت.



http://edu.nano.ir

# لایه نشانی به روش تبخیر حرارتی




- سه مرحله اصلی در هر فرآیند لایه نشانی فیزیکی تحت شرایط خلأ شامل موارد زیر است:

1. تبخیر ماده منبع
2. انتقال بخار از منبع به زیرلایه
3. تشکیل لایه نازک روی زیرلایه



http://edu.nano.ir

# لایه نشانی به روش تبخیر حرارتی

- فرایندهای لایه نشانی باید تحت شرایط خلا انجام شوند؛ زیرا برای تبخیر حرارتی دمای بسیار بالایی نیاز است و هر فلز واکنش پذیری، در دمای بالا در مجاورت اکسیژن، اکسید می‌شود.

- از طرف دیگر، حضور و برخورد مولکول‌های سایر گازها در مسیر انتقال ماده تبخیر شده از منبع به زیرلایه موجب می‌شود که نرخ لایه نشانی کاهش یابد و مانع از تشکیل لایه‌های با چگالی بیشتر شود.

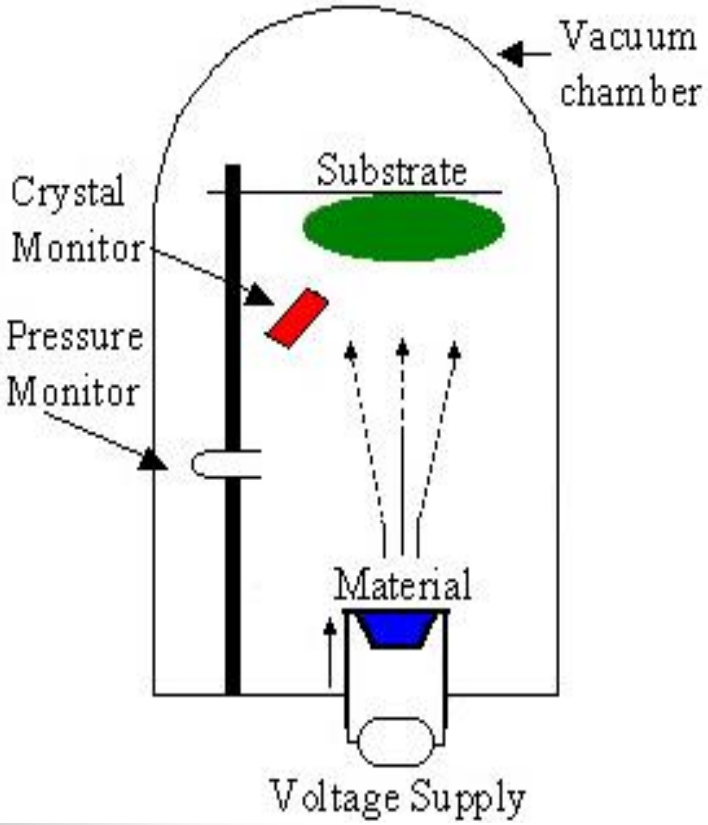
- در شرایط خلا تعداد مولکول‌ها کاهش می‌یابند و میزان برخورد مولکول‌های ماده منبع با مولکول‌های موجود در محفظه، کاهش می‌یابد.



http://edu.nano.ir

# طرز کار لایه‌نشانی به روش تبخیر حرارتی

- در این روش لایه نشانی، ماده منبع حرارت داده می‌شود تا ماده به‌صورت بخار از سطح ماده منبع آزاد شود و به‌دلیل اختلاف فشار محیط اطراف زیرلایه با محیط اطراف منبع، ماده تبخیر شده به سمت زیرلایه حرکت می‌کند.

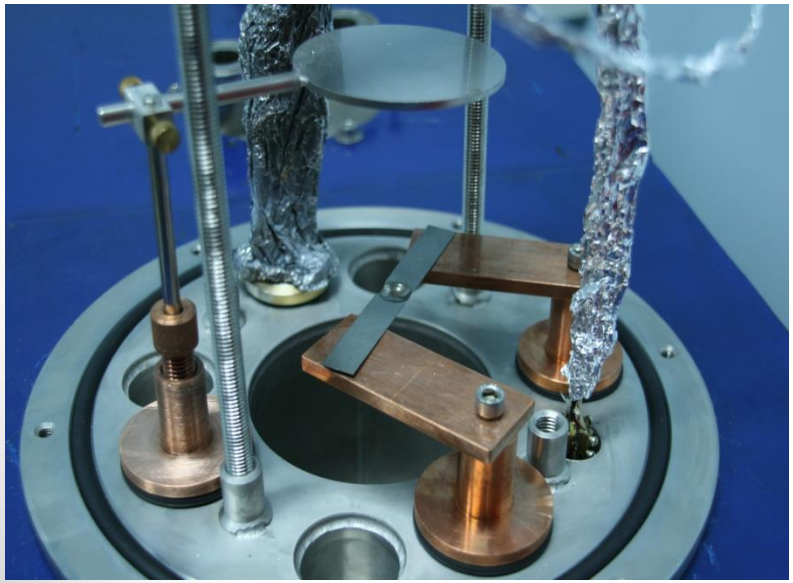



- هنگامی که اتم‌ها، مولکول‌ها و خوشه‌هایی از مولکول‌ها که در فاز بخار هستند به زیرلایه می‌رسند، چگالیده می‌شوند و از حالت بخار به حالت جامد تغییر فاز می‌دهند.
- گرمای چگالش به وسیله زیرلایه جذب می شود.
- از دیدگاه میکروسکوپی گرمایی که از این فرایند به‌دست می‌آید می‌تواند بسیار زیاد باشد، به‌طوری‌که اگر زیرلایه پلاستیکی باشد یا دمای ذوب آن پایین باشد، هنگام پوشش‌دهی و در حین لایه‌نشانی می‌تواند ذوب شود.


http://edu.nano.ir

# طرز کار لایه‌نشانی به روش تبخیر حرارتی

- با انجام آزمایش‌های مختلف و تنظیم فاصله مناسب بین منبع و زیرلایه می‌توان گرمای ایجاد شده را کنترل کرد تا مانع از ذوب شدن زیرلایه شد.
- در تبخیر حرارتی به روش مقاومت الکتریکی در واقع به ماده منبع، گرما داده می‌شود.
- این روش، ساده‌ترین روش در میان روش‌های تبخیر حرارتی است که در محفظه خلا انجام می‌شود.



- با اعمال و گذر جریان الکتریکی از قایقک، که در واقع یک نوع مقاومت الکتریکی است، دمای آن افزایش می‌یابد و درنتیجه ماده منبع که در داخل آن قرار دارد و می‌تواند یک عنصر فلزی یا آلیاژ مخلوط یا ترکیبی باشد، را تبخیر کند.



http://edu.nano.ir

# طرز کار لایه‌نشانی به روش تبخیر حرارتی

- در این روش ولتاژِ پایین و جریانِ بالا به محفظه خلأ اعمال می‌شود.
- توان الکتریکی از فیلامان یا قایقک عبور داده می‌شود که در تماس با ماده منبع است.
- فیلامان یا قایقک معمولاً از ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم می‌شود.
- برای تبخیر حرارتی مؤثر بایستی فشار بخار ماده منبع در دمایی که به فیلامان یا قایقک اعمال می‌شود، مقدار قابل قبولی باشد.

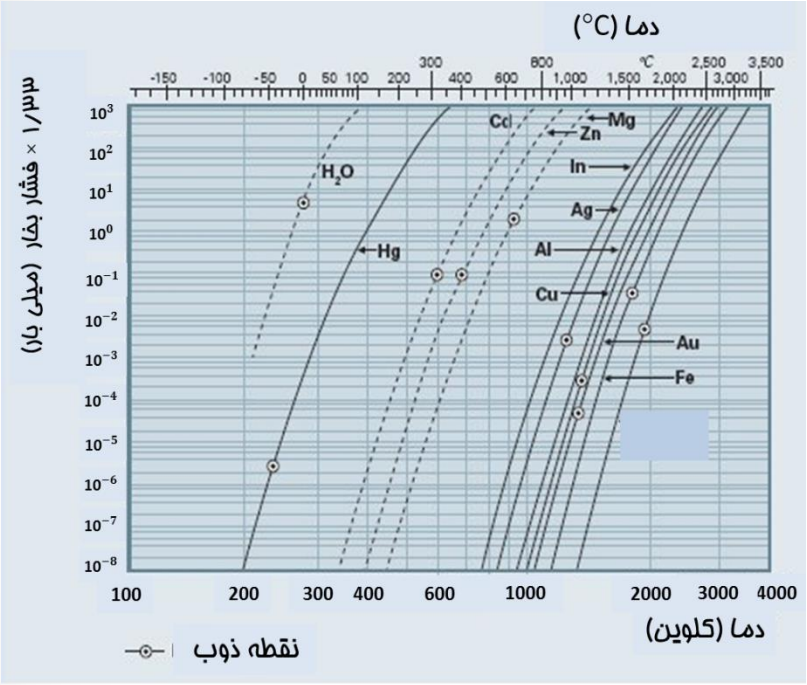
| ماده منبع | دمای تبخیر ($^oC$) |
|---|---|
| مس | ۱۵۱۶ |
| نیکل | ۱۸۴۸ |
| آلومینیوم | ۱۳۹۰ |
| روی | ۳۲۵ |
| کروم | ۱۶۱۲ |



http://edu.nano.ir

# طرز کار لایه‌نشانی به روش تبخیر حرارتی

- در یک دمای خاص، فشار بخاری که از یک ماده ساطع می‌شود، فشار بخار تعادلی نام دارد.
- بعد از جیوه، کادمیوم در همه دماها، فشار بخار تعادلی بالاتری را نسبت به بقیه مواد دارد.
- کمترین فشار بخار تعادلی متعلق به آهن است.
- مقدار عددی فشار بخار برای هر فلز در یک دمای مشخص را می‌توان از روی چنین منحنی‌هایی به دست آورد.




فشار بخار تعادلی تعدادی از فلزات در دماهای مختلف

# طرز کار لایه‌نشانی به روش تبخیر حرارتی

- با استفاده از منحنی فشار بخار مواد و بر اساس فشاری که در محفظه لایه‌نشانی ایجاد شده است، می‌توان مقدار دمای مورد نیاز ماده منبع را برای تبخیر شدن به دست آورد.
- به طور ساده برای سیمی که طول آن $L$ و سطح مقطع آن $A$ باشد، رابطه میان دمای فیلامان ($T$) و توان الکتریکی اعمال شده ($P$) به صورت زیر خواهد بود:

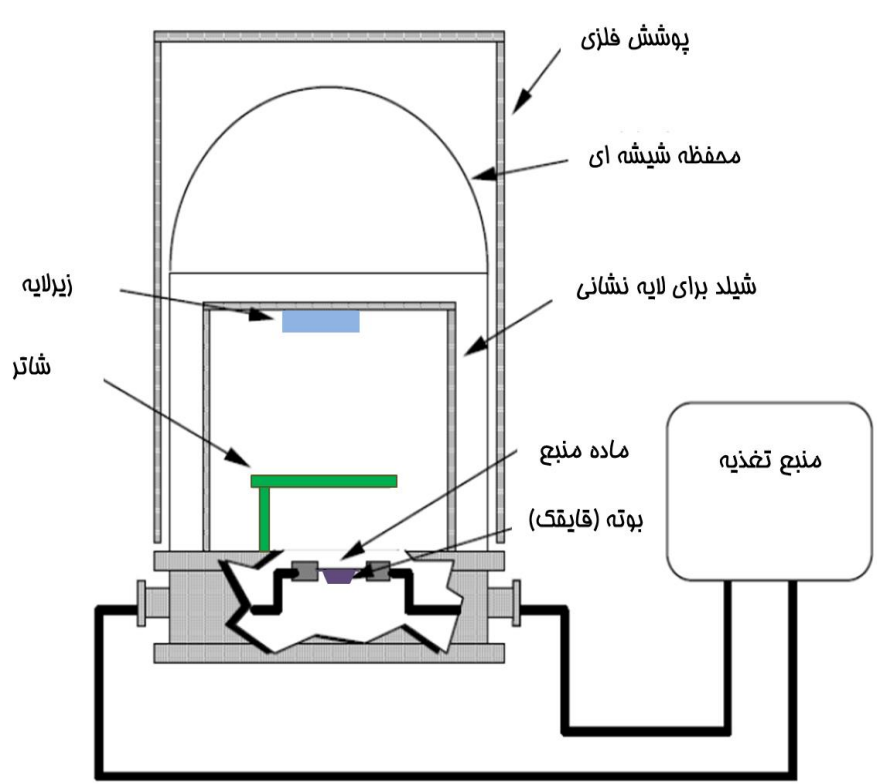
$$P = i^2 \rho(0) \left[ \frac{T}{T(0)} \right]^n \frac{L}{A_c}$$

- $i$ جریان الکتریکی اعمال شده
- $\rho(0)$ مقاومت الکتریکی در دمای مرجع
- $T(0)=293$
- $n$ کمیت ثابتی که معمولاً مقدار آن نزدیک به عدد ۱ است.
- $L$ طول فیلامان
- $A_c$ مساحت سطح مقطع فیلامان سیمی شکل

# طرز کار لایه‌نشانی به روش تبخیر حرارتی

- تبخیر حرارتی معمولاً در شرایط خلأ بالا (فشار بین $10^{-3}$ تا $10^{-9}$ میلی‌بار) و حتی خلأ بسیار بالا (فشار بین $10^{-9}$ تا $10^{-12}$ میلی‌بار) انجام می‌شود.

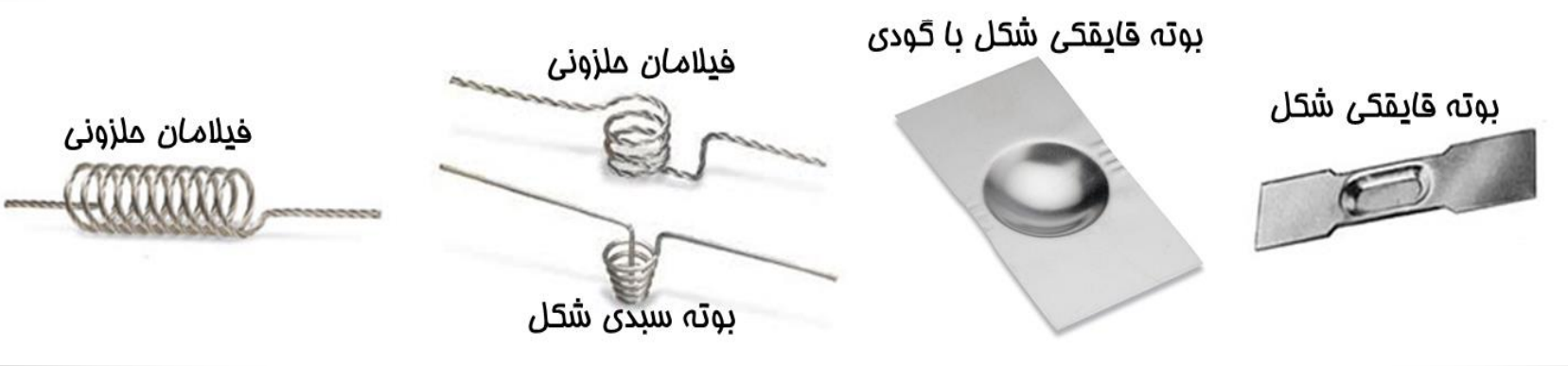
- محفظه هایی که برای این منظور به کار گرفته می‌شوند، بل جار ( Bell Jar) نام دارند که امکان طراحی‌های گوناگونی را فراهم می‌آورند و با آنها می‌توان فرایند تبخیر را با صرف هزینه کم مشاهده کرد.




طرح‌واره لایه محفظه خلأ
برای ساخت لایه نازک به روش تبخیر حرارتی

# طرز کار لایه‌نشانی به روش تبخیر حرارتی

- فیلامان‌ها یا قایقک‌هایی که برای قرار دادن ماده منبع استفاده می‌شوند معمولاً از جنس تنگستن، مولیبدن، تانتالیوم، برونیترید و سرامیک و یا آلیاژهایی از این نوع مواد است.
- فیلامان‌ها بایستی نقطه ذوب بالا داشته باشد و قابلیت حل شدن آن در ماده منبع پایین باشد تا با ماده منبع آلیاژ تشکیل ندهند. همچنین در برابر شوک های حرارتی مقاوم باشد و ماده منبع بتواند آن را مرطوب کند.
- فیلامان‌ها بایستی در برابر گازهای موجود در محیط غیرفعال باشند.



# ویژگی های لایه نازک تشکیل شده به روش تبخیر حرارتی مبتنی بر مقاومت الکتریکی

- ماده تبخیر شده در هنگام رسیدن به زیرلایه روی زیر لایه انباشته می‌شود.
- مراحل تشکیل لایه روی زیرلایه شامل هسته‌زایی و رشد است.

در مرحله هسته زایی اتم‌ها و مولکول‌هایی که به سطح زیرلایه می‌رسند انرژی گرمایی خود را که ناشی از حرکت جنبشی آن است، روی سطح مصرف می‌کنند و درواقع آن را به سطح منتقل می‌کنند. هنگامی که این انرژی به طور کامل از بین رفت مولکول‌ها به زیرلایه می‌چسبند و هسته تشکیل می‌شود.

با ادامه یافتن تشکیل هسته‌ها، لایه‌هایی به‌صورت ورقه‌های پیوسته شکل می‌گیرد و سرانجام زیرلایه را می‌پوشانند. به این ترتیب در حین رشدِ لایه ریزساختار، لایه نشانده شده گسترش می‌یابد. این ریزساختار از نظر اندازه ذره‌ها، جهت‌گیری آنها، تخلخل، ناخالصی‌های موجود و گازهای به دام افتاده مورد توجه‌اند.

# ویژگی های لایه نازک تشکیل شده به روش تبخیر حرارتی مبتنی بر مقاومت الکتریکی

- برهم‌کنش‌های شیمیایی میان اتم‌ها و سطح، قدرت پیوند میان لایه و زیرلایه را معین می‌کند.
- اصولاً فرآیندهای لایه‌نشانی تحت خلأ در میان فرآیندهای دیگری مانند لایه‌نشانی الکتروشیمیایی و پاشش، حائز اهمیت اند. زیرا از لایه‌نشانی تحت خلأ، خلوص شیمیایی بالا، چسبندگی خوب میان لایه نازک و زیرلایه، کنترل تنش مکانیکی لایه، ساخت لایه‌های بسیار نازک و چند لایه‌هایی از مواد مختلف و همچنین کمترین میزان به دام افتادگی گاز حاصل می‌شود.
- انرژی جنبشی اتم‌های فرودی، دمای زیرلایه، نرخ لایه نشانی، انرژی که در هنگام رشد لایه به آن اعمال می‌شود و حضور و اثر شارش گازها در هنگام انتقال ماده تبخیر شده از منبع به زیرلایه، پارامترهایی هستند که بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لایه نازک مورد نظر مؤثرند.
- با تغییر و کنترل پارامترهای فوق می‌توان لایه نازکی را که قدرت مکانیکی، چسبندگی، بازتاب نوری، مقاومت الکتریکی، ویژگی‌های مغناطیسی و چگالی متفاوتی داشته باشد را ساخت.



http://edu.nano.ir

# ویژگی های لایه نازک تشکیل شده به روش تبخیر حرارتی مبتنی بر مقاومت الکتریکی

- موارد استفاده‌ی لایه‌های تشکیل شده به روش تبخیر حرارتی مبتنی بر مقاومت الکتریکی عبارتند از:

- با استفاده از تبخیر حرارتی می‌توان پوشش‌های ظریف با ضخامت یکنواخت و سختی مناسب را روی گستره‌ای از زیرلایه‌ها با جنس‌های متفاوت، از فولاد تا انواع پلاستیک، ایجادکرد.

# مزایای لایه نشانی به روش تبخیر حرارتی مبتنی بر مقاومت الکتریکی

- پوشش‌هایی را که با روش تبخیر حرارتی ساخته می‌شوند، در گستره‌ای از دماهای مختلف از دمای اتاق تا دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌توان روی قطعات گوناگون قرار داد.

- با این روش پوششی بسیار یکنواخت می‌توان ایجاد کرد که چسبندگی پوشش یا لایه نازک به زیرلایه را در مقایسه با برخی از روش‌های پوشش‌دهی، تا بیش از شش برابر افزایش می‌دهد.

- در مقایسه با افزایش طول عمر و کیفیت بالای پوشش، هزینه آن منطقی و حتی پایین ارزیابی می‌شود.

- رنگ زیبای حاصل از اکثر پوشش‌ها، امکان استفاده از آنها را در قطعات لوکس و دکوری نیز فراهم نموده است.



http://edu.nano.ir

# مشارکت در توسعه سیستم جامع آموزش فناوری نانو

سیستم جامع آموزش فناوری نانو با مشارکت دانشجویان و علاقه مندان در مقاطع دکتری وکارشناسی ارشد گرایش های مختلف فناوری نانو و سایر رشته های مرتبط با این فناوری نوین در حال توسعه است. لذا از تمامی اساتید، دانشجویان، متخصصین و علاقه مندان تقاضا می گردد نظرات، پیشنهادات و انتقادات خود را به منظور توسعه هر چه بهتر این سیستم با سایت آموزش فناوری نانو در میان بگذارند.

Edu@nano.ir

ستاد ویژه توسعه فناوری نانو
کارگروه ترویج و فرهنگ سازی عمومی

پایان

Edu@nano.ir