

لایه‌نشانی اکسید قلع به روش LPCVD

علیرضا صدرایی، محمد عروتنی‌نیا و فرامرز حسین‌بابایی

چکیده: در این مقاله یک سامانه ساده و کارا برای لایه‌نشانی اکسید قلع به روش LPCVD ارائه شده است. سامانه دارای ویژگیهای نوینی است که نشانش لایه‌های اکسید قلع را در یک محفظه بسته ممکن ساخته است. در طول فرآیند لایه‌نشانی، سامانه ورودی ندارد و کنترل پارامترهای فرآیند لایه‌نشانی به آسانی میسر است. لایه اکسید قلع از ترکیب بخارهای کلرید قلع و آب روی زیرلایه شیشه‌ای در دمای 250°C تشکیل می‌شود. منبع پیش ماده داخل محفظه واکنش تعبیه شده است و تبخیر کنترل شده اجزاء واکنش در داخل محفظه لایه‌نشانی انجام می‌شود. تنظیم فشار محفظه در محدوده $50-10$ Torr توسط مجموعه‌ای متشکل از یک پمپ روتاری و سه شیر خلاء، برای هر نرخ تبخیر ممکن گردیده‌است. کلیه پارامترهای مهم فرآیند شامل نرخ تبخیر، دمای زیرلایه، فشار محفظه، مدت لایه‌نشانی و نسبت اجزای پیش ماده قابل اندازه‌گیری و کنترل می‌باشند. میکروگرافهای SEM لایه‌های بدست آمده در محدوده ضخامت $400-50$ nm مطالعه شده‌است. بدون اعمال آلاینش، حداکثر ضریب هدایت سطحی لایه‌های اکسید قلع حاصل، 10^{-3} moh.□ است. در هدایت سطحی بیش از 10^{-4} moh.□، هدایت سطحی نمونه‌های نشانده شده با خطای $\pm 10\%$ تغییر قابل تکرار بود.

واژه‌های کلیدی: اکسید قلع، لایه نازک، رسانای شفاف، LPCVD

۱. مقدمه

اکسید قلع از خانواده نیمه‌هادیهای اکسید فلزی و ذاتا از نوع n است [1]. مصرف لایه‌های نازک آلایش شده این نیمه‌هادی در الکترونیک نوری به عنوان هادی شفاف بسیار وسیع است. از لایه‌های شفاف و رسانای اکسید قلع در فرآیند ساخت سلولهای خورشیدی به عنوان اتصالهای شفاف و در صنایع خودروسازی به عنوان گرم‌کننده‌های نامرئی بر روی شیشه‌ها استفاده می‌شود [2, 3]. همچنین حسگرهای گاز ساخته شده بر اساس لایه‌های نازک و ضخیم اکسید قلع کاربردهای فراوانی در زمینه آشکارسازی و اندازه-

گیری انواع گاز دارند [4-8]. ساخت حسگرهای گاز اکسید قلع به روش LPCVD¹ توسط گروه پژوهشی ما قبلا گزارش شده است [8]. ریزساختار و مشخصات الکتریکی لایه‌های نازک اکسید قلع، به روش لایه‌نشانی آنها بستگی دارد [5]. با توجه به مصارف وسیع لایه‌های اکسید قلع، روشهای متنوعی برای لایه‌نشانی این ماده مورد استفاده قرار گرفته است. انواع روشهای CVD [9-14]، کندوپاش² [15, 16]، sol-gel [17, 18]، و انواع روشهای تبخیر در خلا [19, 20] از این جمله‌اند. روش LPCVD اولین بار برای لایه‌نشانی سیلیکان مورد استفاده قرار گرفت [21]. مزیت‌های این روش، حصول کیفیت بالاتر و کنترل بهتر ساختار لایه‌های رشد داده شده، امکان لایه‌نشانی همزمان روی تعداد زیادی زیرلایه، نرخ رشد بالاتر و کاهش اثر آلودگیهای محیطی در فرآیند ساخت می‌باشد؛ اما به جرات می‌توان گفت که مزیت اصلی LPCVD اقتصادی است. در این روش نیاز به خلا قوی (فشار پایینتر از $5-10$ Torr) نیست و لایه‌نشانی در فشارهای قابل دسترسی با پمپهای ساده مکانیکی صورت می‌گیرد. نرخ زیاد رشد لایه و عدم نیاز به محیط‌های با کلاس تمیزی بالا نیز به وجاهت اقتصادی روش LPCVD، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، می‌افزاید.

نسخه اصلی مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۴/۷ واصل، و پس از بازنگریهای لازم، در تاریخ ۱۳۸۴/۱۰/۱۴ به تصویب نهایی رسیده است. سرپرستی داوری‌ها توسط دبیر تخصصی، دکتر حجت کاشانی صورت گرفته و مقاله توسط ایشان برای چاپ توصیه شده است. علیرضا صدرایی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. محمد عروتنی‌نیا، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

دکتر فرامرز حسین‌بابایی، استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. fhbabaei@shaw.ca

¹ Low Pressure Chemical Vapor Deposition

² Sputtering

علیرضا صدراپی، محمد عروتی‌نیا و فرامرز حسین‌بابایی

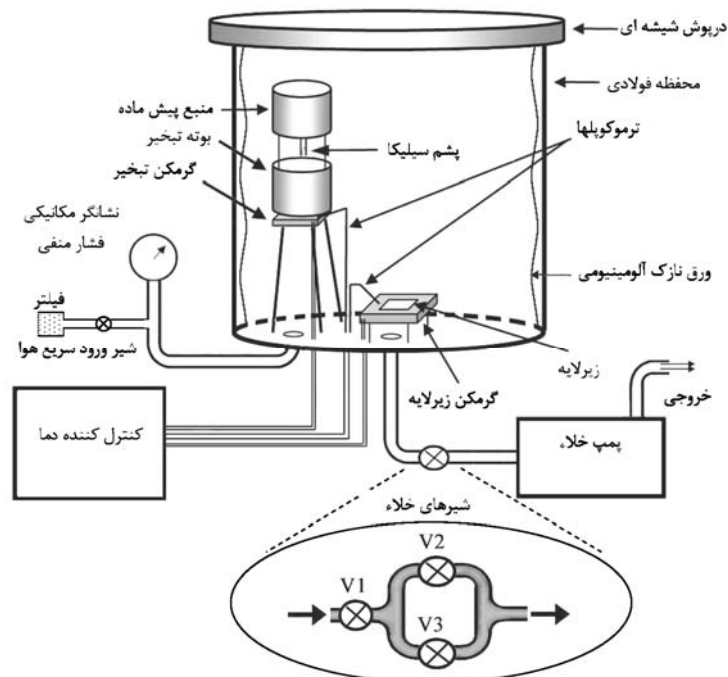
مجموعه شیر خلاء (شکل ۱) متشکل از دو شیر موازی V2 و V3 می باشد که به طور سری با شیر اصلی V1 قرار دارند. شیر V1 همواره در وضعیت کاملاً باز یا کاملاً بسته قرار دارد. این شیر در ابتدای فرایند لایه نشانی باز می شود. همزمان با V1، شیر V3 نیز کاملاً باز شده تخلیه محفظه با حداکثر جریان ممکن انجام می‌پذیرد. شیر V2 بر اساس تجارب قبلی تنظیم شده و به اندازه معینی نیمه باز است. پس از حصول فشار مطلوب و در شروع لایه نشانی، V3 بسته می شود. از این پس V2 در مسیر جریان گاز به خارج مقاومت کرده، بسته به میزان تولید بخار در داخل محفظه، باعث افزایش فشار محفظه می شود. فشار محفظه در حالت تعادل بستگی به نرخ تبخیر محلول پیش ماده و میزان باز بودن شیر V2 دارد. با تنظیم و ثابت نگاه داشتن V2، می توان فشار محفظه را با تغییر نرخ تبخیر محلول، در حد مطلوب کنترل نمود.

برای گرم کردن زیرلایه ها از یک گرم کن الکتریکی مسطح استفاده شد. این گرم کن با استقرار سیمهایی به قطر ۰/۵ mm از آلیاژ آلومینیم-کروم-آهن (A-1, Kanthal) روی ورقه های میکا ساخته شد. این افزار می تواند زیرلایه ها را تا دمای ۶۰۰°C گرم کند. زیرلایه ها با واسطه یک ورقه استیل، ساندویچ شده بین دو لایه میکا، روی گرم کننده قرار داده می شوند. این ساختار باعث یکنواختی دما روی زیرلایه ها می گردد. کل توان الکتریکی مصرف شده توسط المان حرارتی حداکثر ۱۰۰W بوده باعث ازدیاد بیش از اندازه دمای محفظه نمی گردید. برای اندازه گیری دمای سطح زیرلایه ها از ترموکوپل نوع K استفاده شد. نقطه اتصال ترموکوپل مستقیماً روی یکی از زیرلایه ها مستقر شده خروجی آن به یک میلی ولت‌متر و یک دستگاه کنترل کننده دما متصل گردید.

در مقاله حاضر، جزئیات یک سامانه LPCVD طراحی شده با ویژگیهای نوین ساختاری و کاربردی گزارش می شود. ساختار این سامانه ساده بوده به طور کامل قابل ساخت در داخل کشور می‌باشد. این سامانه در عین سادگی و ارزانی، اجازه کنترل پارامترهای اصلی لایه نشانی را به کاربر ارائه می کند. نتایج لایه نشانی با این سامانه به همراه روشهای به کار رفته برای کنترل پارامترهای مهم فرایند ارائه شده است. محدوده ضخامت و هدایت الکتریکی لایه‌های نشانداده شده به همراه قابلیت تکرار پذیری فرایند لایه نشانی مورد بحث قرار گرفته است.

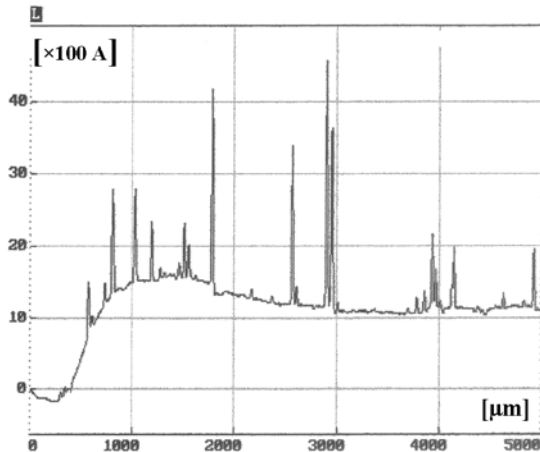
۲. طراحی سامانه و کار آزمایشگاهی

طرح واره سامانه لایه نشانی در شکل ۱ ارائه شده است. محفظه واکنش از یک استوانه فولادی به قطر داخلی ۳۰ cm، ارتفاع ۴۰ cm و ضخامت ۸ mm ساخته شده است. این استوانه بر روی یک حلقه لاستیکی از جنس رزین سیلیکان، روی یک سطح مسطح فولادی مستقر است. جدا کردن محفظه جهت شستشوی قسمتهای مختلف آن نیز به سادگی امکانپذیر است. درپوش محفظه از شیشه سودا-لایم با ضخامت ۱۰ mm ساخته شده است. ضخامت انتخاب شده تضمین کننده تحمل اختلاف فشار دو طرف آن به هنگام اجرای فرایند می باشد. همه اتصالات به گریس سیلیکان آغشته می‌باشند. برای کاهش فشار محفظه، از یک پمپ روتاری (GEC-) (BS.2406-G, MACHINES) استفاده شده که توسط یک مجموعه شیر خلاء قابل تنظیم، به محفظه متصل شده است. خلاء ایجاد شده توسط این پمپ تا ۱ Torr مورد آزمایش قرار گرفت.



شکل ۱. طرح واره سامانه طراحی شده برای LPCVD اکسید قلع

نشانی در فشار ثابت صورت گرفته است. در فشار ثابت، نرخ تبخیر و جریان تخلیه با یکدیگر مساوی بوده پارامتر موثر در فرایند از ناحیه این دو عامل، همان فشار بخار پیش ماده در محفظه خواهد بود.



شکل ۲. نمونه ای از نتایج اندازه گیری ضخامت لایه های اکسید قلع. این منحنی از روبش سطحی در حوالی لبه لایه حاصل شده است. قله های تیز مربوط به ذرات غبار و ناهمواریهای سطحی است.

در اینجا نتیجه تغییر دو پارامتر مهم فرایند یعنی دمای زیرپایه و غلظت محلول پیش ماده مورد توجه قرار گرفته است. سایر عوامل در مقدار معینی تثبیت شده اند. عوامل ثابت در مقداری تثبیت گردیده اند که بر حسب تجربه بهترین نتایج لایه نشانی را باعث شده اند. تاثیر تغییر بقیه پارامترهای فرایند لایه نشانی بر ویژگیهای محصول، مورد مطالعه قرار گرفته است؛ جزئیات نتایج در جای دیگر گزارش شده [8] یا خواهد شد [5].

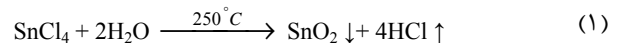
فشار محفظه واکنش، در طول کلیه فرایندهای لایه نشانی بر اساس تجارب قبلی، در ۳۰ Torr تثبیت می گردید. در سامانه LPCVD تمایل به حصول فشار پایینتر در محفظه فرایند می باشد، به عنوان مثال لایه نشانی سیلیکون به این روش در فشار ۱-۰/۵ Torr انجام می شود [21]. اما تجربه نشان داد که در سامانه حاضر، نرخ رشد لایه SnO_2 در فشار های کمتر از ۲۰ Torr به میزان غیر قابل قبولی کاهش می یابد. به عنوان مثال در فشار ۱۵ Torr، پس از ۱۰ دقیقه لایه نشانی با استفاده از محلول پیش ماده با غلظت ۱ Mole، لایه ای با ضخامت کمتر از ۳۰ nm بصورت غیر یکنواخت رشد می کند. از طرف دیگر با افزایش بیش از حد فشار محفظه، از کیفیت لایه ها و خصوصا کیفیت اتصال لایه-زیرلایه کاسته می شود.

از محلول تترا کلرید قلع ($\text{Art } \#7810, \text{MERCK}$) با خلوص ۹۹/۹۹٪ در آب مقطر به عنوان پیش ماده استفاده شد [3]. این محلول در داخل محفظه واکنش با نرخ کنترل شده بخار می شود. سامانه تبخیر قابل کنترل، مطابق شکل ۱، از یک مخزن محلول، متصل به لوله ای پر شده از پشم سیلیکای^۲ فشرده برای ایجاد جریان تدریجی و یک بوته تبخیر سریع تشکیل شده است. پیش ماده از مخزن بصورت قطره ای به داخل بوته تبخیر که توسط یک گرم کن مستقل تا دمای 200°C گرم شده است، چکیده به سرعت تبخیر می شود. تعداد قطرات در دقیقه به فشردگی پشم سیلیکا مربوط بوده در صورت نیاز توسط کاربر پس از هر تجربه قابل تغییر است. تبخیر لحظه ای قطرات در بوته داغ متضمن تبخیر همزمان و کامل اجزای آن است [3]. وجود پشم سیلیکا باعث می شود که خروج قطرات از مخزن محلول و سقوط آنها در بوته تبخیر دقیقی پس از ریختن محلول به داخل مخزن آغاز شود که در این زمان پمپ خلاء فشار محفظه را به حد مطلوب رسانده است. کلیه مراحل کار از طریق درپوش شیشه ای محفظه قابل مشاهده می باشد. هر فرایند لایه نشانی با اتمام محلول پیش ماده در مخزن پایان می پذیرد. در این هنگام گرمکن تبخیر و گرمکن زیرلایه خاموش شده شیر VI بسته می شود.

ضریب هدایت لایه های نشانداده شده، با استفاده از پروب چهار سر (VEECO, FPP5000) اندازه گیری شد. نحوه اتصالات در این اندازه گیریها فشاری است. اهمی بودن اتصالات پروبهای دستگاه و لایه SnO_2 نیز بررسی و تایید گردید. ضخامت لایه های حاصل با استفاده از دستگاه Alpha-step 500 اندازه گیری شد. این دستگاه برجستگیهای سطحی را با وضوح نامی 25 \AA اندازه گیری می نماید. یک نمونه از منحنی های خروجی دستگاه اندازه گیری ضخامت به هنگام جارو کردن لبه یک لایه اکسید قلع روی زیرلایه شیشه ای در شکل ۲ ارائه شده است. از این دیاگرام ضخامت لایه اکسید قلع، ۱۳۰ nm مستفاد می گردد.

۳. نتایج و بحث

در طول فرایند لایه نشانی، با واکنش بخار SnCl_4 و بخار آب در دمای سطح زیرلایه، SnO_2 آزاد می شود. معادله واکنش به شرح زیر است [14]:



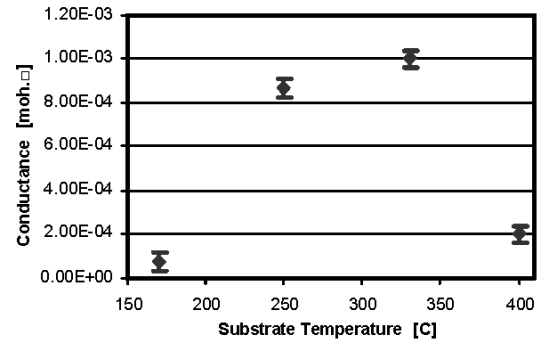
اکسید قلع حاصل روی زیرلایه نشسته اجزای فرار به همراه مواد ترکیب نشده توسط پمپ به خارج هدایت می شود. متغیرهای اصلی فرایند عبارتند از غلظت محلول پیش ماده، فشار بخار پیش ماده در محفظه، دمای زیرلایه، جنس و کیفیت سطح زیرلایه و طول زمان لایه نشانی. نرخ تبخیر پیش ماده و نرخ تخلیه گاز از محفظه جزو این متغیرها قید نشده اند زیرا که همه عملیات لایه

² Silica wool

حداکثر ضخامت لایه های نشانده شده ۴۰۰ nm است. محدود کننده ضخامت لایه، مدت ممکن برای لایه نشانی است که توسط حجم مخزن پیش ماده تعیین می گردد. برای ایجاد لایه های با ضخامت بیشتر می باید حجم پیش ماده در مخزن داخل محفظه و زمان فرایند لایه نشانی را افزایش داد که خود مستلزم تغییر ساختار تبخیر کننده و حسب آن، تغییر طرح سامانه از نظر ابعاد است. نشانش لایه یکنواخت با ضخامت کمتر از ۵۰ nm نیز در سامانه موجود ممکن نگردید، چرا که در لایه های شکل گرفته با ضخامت کمتر از ۵۰ nm، هدایت سطحی به دلیل عدم یکنواختی لایه و جدا بودن جزایری از نیمه هادی روی زیرلایه، عملاً قابل اندازه گیری نبوده ویژگیهای ساختاری لایه ایجاد شده تکرار پذیر نبود.

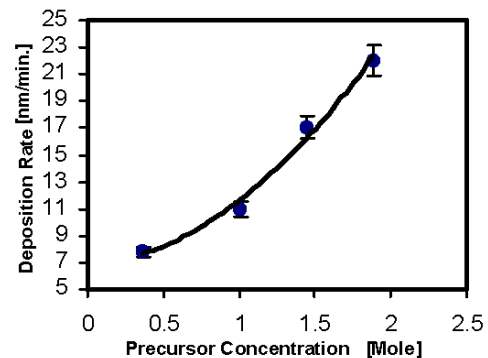
نرخ رشد لایه اکسید قلع با اندازه گیری ضخامت لایه ها محاسبه شد. روی زیرلایه شیشه ای در دمای ۲۵۰°C، با استفاده از پیش ماده ای با غلظت ۱ مولکول گرم کلرید قلع بر لیتر و در فشار ثابت ۳۰ Torr، نرخ رشدی معادل ۱۱۰ A°/min بدست آمد. مشخص می‌یابد، بیشترین نرخ رشد اندازه گیری شده ۲۵۰ A°/min بود. شکل ۴ تغییرات نرخ رشد لایه اکسید قلع را بر حسب تغییر غلظت محلول پیش ماده نشان می دهد. با توجه به اینکه فراوانی مولکولهای SnCl₄ در بخار مجاور زیرلایه به طور خطی با غلظت محلول پیش ماده افزایش می یابد، انتظار آن می رود که نرخ رشد نیز با همین روند افزایش یابد. لیکن در نتایج ارائه شده در شکل ۴ وابستگی بیش از درجه ۱ مشهود است. این روند غیر خطی را می توان به ساز و کار هسته بندی^۱ اکسید قلع روی زیرلایه و وابستگی آن به فراوانی مولکول SnCl₄ در جوار سطح رشد نسبت داد. وابستگی اخیر، عملاً وابستگی نرخ رشد به فراوانی مولکولهای SnCl₄ را مضاعف می سازد. مطالعه بیشتر، خصوصاً روی انواع دیگر زیر لایه، موضوع را روشنتر خواهد نمود.

میکروگرافهای SEM نشان داد که لایه‌های رشد داده شده در محدوده دمایی ۲۵۰-۳۵۰°C، از یکنواختی بیشتری برخوردارند. دو نمونه از میکروگرافهای لایه های رشد داده شده در شکل ۵ ارائه شده است. کلیه شرایط لایه نشانی به جز دما در مورد این دو نمونه یکسان بوده است. لایه‌های رشد یافته در دمای بالاتر دارای دانه‌های درشت تری بوده از یکنواختی سطحی کمتری برخوردارند. لایه‌های بدست آمده روی زیرلایه های سردتر از ۲۰۰°C با وجود یکنواختی، انسجام و اتصال کافی به زیرلایه را نداشتند. با مطالعه وابستگی دو ویژگی اتصال به زیرلایه و یکنواختی، بازه دمایی بهینه ۳۵۰-۲۵۰°C مشخص گردید. نمونه های رشد داده شده در این بازه دمایی، روی زیرلایه‌های شیشه سودا-لایم، از پوشش یکنواخت و اتصال مناسب به زیرلایه برخوردار بودند.



شکل ۳. تغییر هدایت الکتریکی سطحی لایه های SnO₂ بر حسب تغییر دمای زیرلایه در فرایند لایه نشانی. غلظت محلول پیش ماده برابر ۱ مولکول گرم بر لیتر، فشار محفظه ۳۰ Torr و زمان لایه نشانی ۱۰ دقیقه

عدد ۳۰ Torr فشار بهینه ای بین این دو غایت نامطلوب است که به طور تجربی حاصل شده است. لایه نشانی در دماهای مختلف زیرلایه نیز بررسی گردید. با تغییر دما در محدوده ۴۰۰-۱۵۰°C، لایه های اکسید قلع با ضریب هدایت سطحی در بازه ۱۰^{-۳} mohm - ۱۰^{-۴} حاصل شد. برای حصول اطمینان از عملکرد سامانه و تکرارپذیری فرایند، با ثابت نگاه داشتن پارامترهای لایه نشانی، هر آزمایش چندین بار تکرار شد. نهایتاً تکرار پذیری در تعیین ویژگی اصلی لایه های نشانده شده (ضریب هدایت سطحی) با قبول تغییراتی برابر ۱۰٪ ± حاصل شد. تکرار پذیری در ضخامتهای بیش از ۱۰۰ nm حاصل می گردد؛ با کاهش ضخامت و بالارفتن مقاومت سطحی، بازه تغییر ضریب مقاومت سطحی نیز در محصول وسعت یافته تکرار پذیری کاهش می یابد. در ضخامتهای کمتر از ۵۰ nm ویژگیهای هدایتی عملاً تکرار پذیر نبود. شکل ۳ تغییرات هدایت سطحی لایه های حاصل را نسبت به دمای زیرلایه نشان می دهد. در این سری آزمایش زمان لایه نشانی ثابت و برابر ۱۰ دقیقه بوده- است. مشخص گردید که بیشترین هدایت الکتریکی در لایه‌های نشانده شده در محدوده ۲۵۰-۳۵۰°C حادث می شود.



شکل ۴. منحنی تغییر نرخ رشد لایه اکسید قلع بر حسب تغییر غلظت پیش ماده. فشار محفظه ۳۰ Torr، دمای زیرلایه ۲۵۰°C و مدت لایه نشانی ۱۰ دقیقه است.

¹ Nucleation

اندازه‌گیری شده $230^\circ\text{A}/\text{min}$ است. نرخ رشد با تغییر غلظت کلرید قلع در محلول پیش ماده قابل تغییر است. حداکثر هدایت الکتریکی سطحی در نمونه های نشانده شده در دمای زیرپایه $250-350^\circ\text{C}$ مشاهده شد. این بازه دمایی از نقاط نظر دیگر نیز به عنوان بازه دمایی بهینه تعیین گردید. مطالعه ریز ساختار فیلمها نشان داد که اندازه دانه های SnO_2 با افزایش دمای زیرپایه افزایش پیدا می کند. در دماهای بالاتر از بازه دمایی بهینه، اندازه بزرگ دانه ها باعث کاهش یکنواختی لایه ها می شود. در شرایط گزارش شده، نتایج لایه نشانی با قبول $\pm 10\%$ تغییر در هدایت سطحی لایه‌ها قابل تکرار است.

مراجع

[1] Zhang G. and Lio M., "Effect of particle size and dopant on properties of SnO_2 -based gas sensors", Sensors and Actuators B, Vol. 69, 2000, pp. 144-152.

[2] Tamura S., Ishida T., Magara H., Mihara T., Tabata O., Tatsuta T., "Transparent conductive tin oxide films by photochemical vapour deposition", Thin Solid Films 343-344, 1999, pp.142-144.

[3] McCurdy R.J., "Successful implementation methods of atmospheric CVD on a glass manufacturing line", Thin Solid Films 351, 1999, pp. 66-72.

[4] Hossein-Babaei F. and Orvatinia M., "Gas diagnosis based on selective diffusion retardation in air filled capillaries", Sensors and Actuators B, Vol. 96, 2003, pp. 298-303.

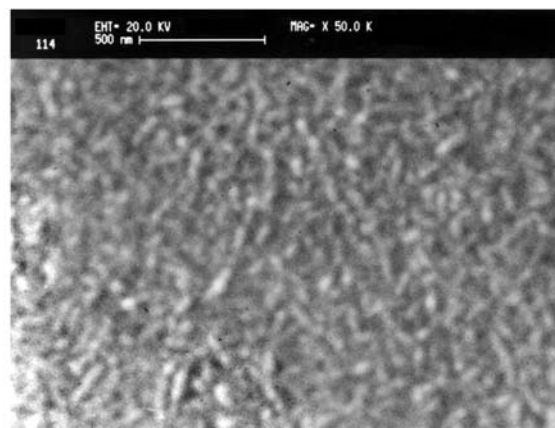
[۵] عروتی نیا محمد و حسین بابایی فرامرز، "عوامل موثر در تعیین پاسخ گذرای حسگرهای مقاومتی گاز"، مجله فنی و مهندسی مدرس، پذیرفته شده برای چاپ (۱۳۸۴).

[6] Hossein-Babaei F. and Orvatinia M., "A novel approach to hydrogen sensing", IEEE Sensors Journal, Vol. 4, 2004, No. 6, pp. 802-806.

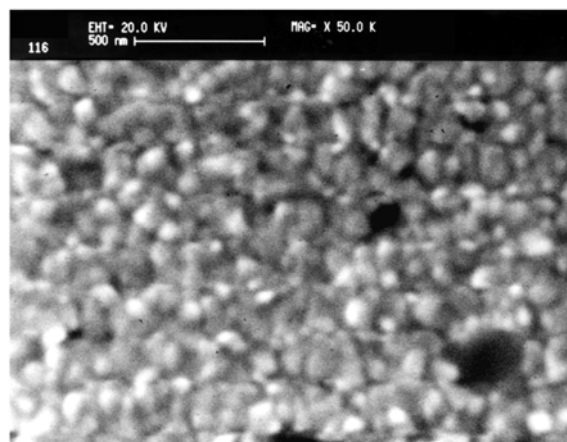
[7] Hossein-Babaei F. and Orvatinia M., "Analysis of thickness dependence of the sensitivity in thin film resistive gas sensors", Sensors and Actuators B, Vol. 89, 2003, pp. 256-261.

[8] Hossein-Babaei F. and Orvatinia M., "Thickness dependence of sensitivity in thin film tin oxide gas sensors deposited by vapor pyrolysis", Int. J. Eng., Vol. 16, 2003, No. 1, pp. 33-40.

[9] Hellegouarch F., Arefi-Khonsari F., Planade R., Amouroux J., "PECVD prepared SnO_2 thin films for ethanol sensors", Sensors and Actuators B, Vol. 73, 2001, pp. 27-34.



الف



ب

شکل ۵. میکرو گراف لایه نازک اکسید قلع رشد داده شده روی زیرپایه شیشه‌ای سودا-لایم. فشار محفظه 30 Torr ، غلظت محلول پیش ماده 2 مولکول گرم بر لیتر، زمان لایه نشانی 10 دقیقه و دمای زیرپایه به هنگام لایه نشانی 250°C (الف) و 400°C (ب) بوده است.

۴. نتیجه گیری

سامانه ای ساده، اقتصادی و کارا برای LPCVD لایه های نازک اکسید قلع ارائه شد. این سامانه، برای اولین بار، نشانش LPCVD لایه‌های SnO_2 را در یک محفظه بسته میسر نمود. این سامانه از هیدرولیز SnCl_4 در جوار زیرپایه داغ برای رشد لایه اکسید قلع سود می جوید. در طول فرایند لایه نشانی، سامانه ورودی ندارد و به این دلیل استفاده از این سامانه به طور مشخص از تاثیر عوامل مخرب محیطی، همچون آلودگی ها و ذرات غبار، می کاهد. ساختار این سامانه به گونه ای است که کنترل پارامترهای اصلی فرایند لایه نشانی شامل نرخ تبخیر پیش ماده، فشار محفظه واکنش، دمای زیرپایه و طول زمان لایه نشانی را به سادگی میسر می سازد. کارایی سامانه با نشاندن لایه های نازک یکنواخت در بازه ضخامت $50-400\text{ nm}$ نمایش داده شد. حداکثر نرخ رشد لایه اکسید قلع

- [16] Ruske M., Brauer G., Pistner J., Pfafflin U., Szczyrbowski J., "Properties of SnO₂ films prepared by DC and MF reactive sputtering", Thin Solid Films, 1999, pp.146-150.
- [17] Park Sung-Soon, Mackenzie J. D., "Sol-gel-derived tin oxide thin films", Thin Solid Films 258, 1995, pp.268-273.
- [18] Cobianu C., Savaniu C., Siciliano P., Capone S., Utraiainen M., Niinisto L., "SnO₂ sol-gel derived thin films for integrated gas sensors", Sensors and Actuators B, Vol. 77, 2001, pp. 496-502.
- [19] El Khakani M. A., Dolbec R., Serventi A. M., Horrillo M. C., Trudeau M., Saint-jacques R. G., Rickerby D. C., Sayago I., "Pulsed laser deposition of nanostructureed tin oxide films for gas sensing application", Sensors and Actuators B, Vol. 77, 2001, pp.383-388.
- [20] Madhusudhana Reddy M. H., Chandorkar A. N., "E-beam deposited SnO₂, Pt-SnO₂ and Pd-SnO₂ thin films for LPG detection", Thin Solid Films 349, 1999, pp.260-265.
- [21] Ohring M., *The Material Science of Thin Films*, Academic Press, 1992.
- [10] Suh S., Zhang Z., Chu Wei-Kan, Hoffman D. M., "Atmospheric-pressure chemical vapor deposition of fluorine-doped tin oxide thin films", Thin Solid Films 345, 1999, pp.240-243.
- [11] Proscia J. and Gordon R. G., "Properties of fluorine doped tin oxide films produced by atmospheric pressure chemical vapor deposition from tetramethyltin, bromotrifluoromethane and oxygen", Thin Solid Films 214, 1992, pp. 175-187.
- [12] Zhao S., Wei P., Chen S., "Enhancement of trimethylamine sensitivity of MOCVD-SnO₂ thin film gas sensor by thorium", Sensors and Actuators B, Vol. 62, 2000, pp. 117-120.
- [13] Maruyama T., Morishita T., "Tin dioxide thin films prepared by photochemical vapour deposition from tin(II) acetate", Thin Solid Films 251, 1994, pp. 19-22.
- [14] Li Ch., Hua B., "Preparation of nanocrystalline SnO₂ thin film coated Al₂O₃ ultrafine particles by fluidized chemical vapor deposition", Thin Solid Films 310, 1994, pp. 238 – 243.
- [15] Choe Y. S., Chung J. H., Kim D. S, Baik H. K., "Ion beam sputtering of SnO₂ with low energy ion oxygen ion beams", Thin Solid Films 341, 1999, pp.230-233.