

مقایسه ویژگی نانو ساختاری اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم

علی بهاری*، ماندانا رودباری شهمیری** و نورالدین میرنیا***
گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر

(دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۵/۲۴ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۰/۱۲/۸)

چکیده -

Si(100)

واژگان کلیدی:

Comparison of Nano Structural Properties of Al_2O_3 and TiO_2 Films

A. Bahari, M. Roodbari Shahmiri and N. Mirnia

Department of Physics, University of Mazandaran, Babolsar

Abstract: Recently, high - K materials such as Al_2O_3 and TiO_2 films have been studied to replace ultra thin gate silicon dioxide film. In the present work, these films were grown on the top of Si(100) surface at different temperatures and under ultra high vacuum conditions. The obtained results showed that Al_2O_3 has a structure better than that of TiO_2 and thus can be used as a good gate dielectric for future MISFET (Metal - Insulator- Semiconductor- Field - Effect- Transistors) devices.

Keywords: ultra thin film, nano structures, gate dielectric and metallic oxides.

* - دانشیار

** - دانشجوی دکتری

*** - استادیار

هستند که پژوهشگران بر روی آنها کار می‌کنند. اما مشکل اساسی این مواد در نداشتن لایه مناسبی بوده است که مابین فیلم مزبور و بستر سیلیکونی شکل می‌گیرد.

بدین ترتیب رشد چنین فیلم هایی بر سطح اکسید سیلیکون و یا زیر لایه سیلیکون حائز اهمیت است. این کار با دستگاه لایه نشانی بخار شیمیایی و ارتعاشگر دانشگاه نیوکاسل استرالیا در شرایط فشار 10^{-7} تور انجام شده است.

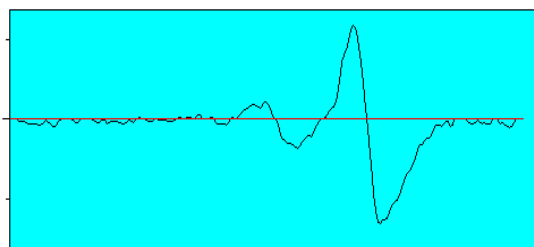
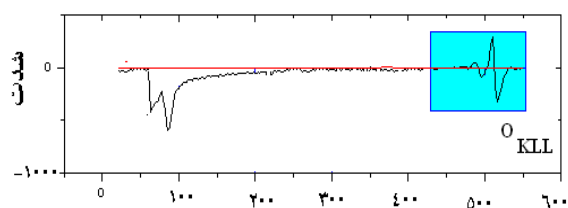
ساختار و جابه‌جایی ناشی از پیوندهای شیمیایی چنین فیلمهایی توسط تکنیک بسیار حساس به سطح اوزه (از دانشگاه ادنسه دانمارک - پرکین المر) مطالعه شده‌اند. نتیجه تجزیه و تحلیل طیفها نشان داده است که اکسید آلومینیوم از ساختار و لایه میانی بهتری نسبت به اکسید تیتانیوم با زیرلایه سیلیکونی برخوردار است و می‌تواند به عنوان یک کاندیدای مناسبی برای قطعات نانو الکترونیک و مدارهای مجتمع آتی معرفی شود.

۲- شیوه انجام آزمایش و نتایج آن

زیر لایه ی Si(100) از ورقه‌های سیلیکونی با مقاومت ویژه ۵ اهم - سانتی متر، ضخامت ۲ میلی متر که از یک طرف صاف و صیقلی شده بود بریده شد. اندازه ابعاد نمونه سیلیکونی 1×1 سانتی متر مربع بوده است. ابتدا نمونه را درون بشر حاوی اتانول کرده و سپس بشر را در حمام فراصوت به مدت یک ساعت قرار دادیم تا اکسید اولیه‌ای که بر روی نمونه شکل گرفته بود از بین برود. پس از اینکه نمونه از حمام فرا صوت بیرون آورده شد، امکان رشد فیلم بسیار بسیار نازکی از اکسید می‌رود به عبارت دیگر امکان تشکیل پیوند بین اتمهای کربن و اکسیژن موجود در محیط با پیوندهای کامل نشده اتمهای سیلیکون وجود دارد، از این رو آن را با استون شستشو داده و با نگهدارنده‌های تالیوم که در گرمای نسبتاً زیاد در قیاس با سیلیکون و آلومینیوم و تیتانیوم بخار نمی‌شوند، نمونه‌ها را در محفظه فرا خلاء بر روی گردنده‌ای نگاه داشته‌ایم و برای تمیز سازی بیشتر چند بار سریع جریان الکتریکی را از آن گذرانیم به طوری که دمای نمونه به حدود 1200° درجه سانتیگراد

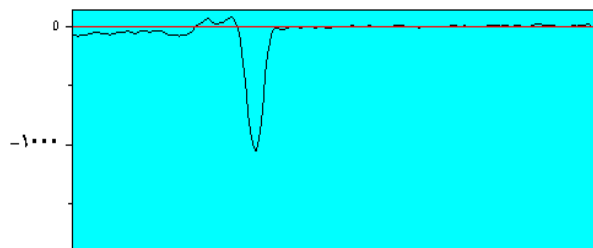
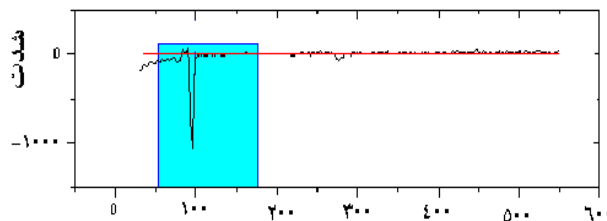
با پیشرفت زیادی که در صنایع الکترونیکی پیش آمده است شاهد کاهش تابع نمایی اندازه قطعات الکترونیکی هستیم که در کنار افزایش دو برابری تعداد چنین قطعاتی در تراشه‌های الکترونیکی به ازای هر ۱۸ ماه، با چالشهای اساسی روبه رو هستیم که امکان ادامه روند کوچک سازی را با داشتن گیت اکسیدی فراناژک سلب می‌کند. در واقع، کاهش روز افزون ابعاد قطعات الکترونیکی و نزدیکتر شدن برخی قسمتهای آن به یکدیگر پدیده‌های مزاحمی اتفاق می‌افتند که سبب می‌شوند تا کنترل عبور حاملها از ترانزیستورهای اثر میدانی MOSFET^۱ و یا مجموعه‌ای از آنها که CMOS^۲ باشد را از دست بدهیم. با کوچک شدگی تابع نمایی اندازه قطعات الکترونی، طبیعی است که اندازه تمام اجزا از جمله ترانزیستورها، به سرعت کوچک شوند و در نتیجه چشمه^۳ و چاه^۴ ترانزیستور به یکدیگر نزدیک می‌شوند. از نزدیک شدن آنها، تداخل و استتار حاملهای عبوری به وسیله حاملهای دیگر در کانال صورت می‌گیرد که باعث می‌شود تا به دلیل تونل زنی، جریان نشستی حاملها و نفوذ بور از گیت دی الکتریک، نتوان گیت اکسید فرا نازک سیلیکون را در تولیدات آتی نانو ترانزیستورها به کار گرفت [۱-۳]. تأثیر این عوامل به قدری زیاد است که بسیاری از پژوهشگران تعویض گیت اکسید فرا نازک را با موادی دیگر نظیر نیتريدسیلیکون [۴-۶] و اکسید آلومینیوم و تیتانیوم [۳-۷] پیشنهاد کرده‌اند. جدای از گیت دی الکتریک، گیت و کانال نانوترانزیستورها به شدت تحت تأثیر فرایند کوچک شدگی قطعات قرار گرفته‌اند و مشکلات زیادی در به کارگیری بیشتر آنها با مواد تشکیل دهنده فعلی به وجود آمده است که تماس الکترودها با گیت یکی از این موارد است [۹-۱۱].

از این رو باید به سراغ مواد عایقی که مشکلات گیت اکسید سیلیکون فراناژک را نداشته باشد رفت که مواد مزبور باید از ثابت دی الکتریک بالا و ساختار آمروف و مهمتر از آنها از لایه میانی خوبی با زیرلایه سیلیکونی برخوردار باشند. همان طوری که در بالا اشاره شد اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم گزینه‌هایی



انرژی جنبشی (الکترون ولت) ۵۰۰

شکل ۲- طیف اکسید فرا نازک سیلیکون که بر زیر لایه سیلیکون در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد و فشار 5×10^{-6} تور رشد داده شده است.



انرژی جنبشی (الکترون ولت) ۱۰۰

شکل ۱- طیف تمیز زیر لایه سیلیکون بعد از چندین بار عبور جریان الکتریکی از آن به دست آمده‌اند. همان‌طوری که مشاهده می‌شود تنها قله‌های مربوط به سیلیکون وجود دارند.

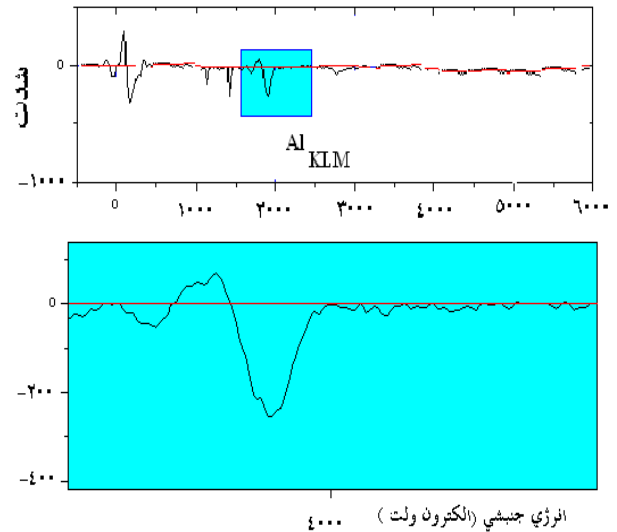
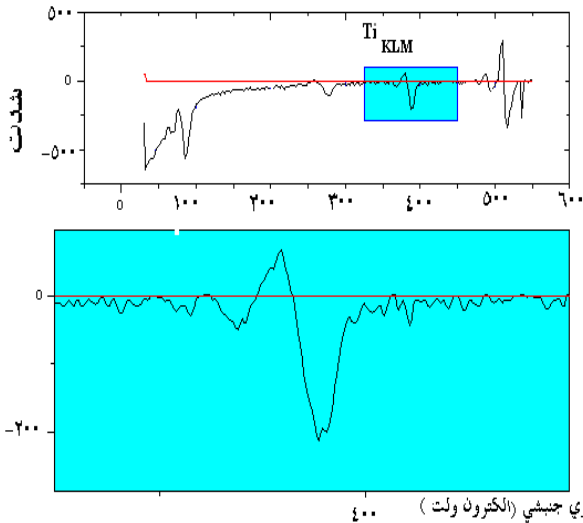
دهیم. ضخامت لایه‌ها با استفاده از آهنگ جرمی [۸-۱۲]، معین کردیم که بر اساس لانگمیر (معادل حاصلضرب فشار 10^{-6} اتور گازی به مدت یک ثانیه) مشخص شدند. طیفهای مربوط به اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شدند.

ملاحظه می‌کنید بر حسب داده‌های به‌دست آمده، تغییرات قله‌های کپه‌ای زیر لایه سیلیکون و کپه اکسید سیلیکون با افزایش اتمهای آلومینیوم و تیتانیوم (فلز) را در شکل (۵) ترسیم کرده‌ایم. ملاحظه می‌کنید که بعد از نشستن حدود یک تک لایه فلز بر سطح فیلم یک تماس الکتریکی خوب بین سطح جلویی و پشتی نمونه شکل گرفته است. حتی این تماس در پایتتر از ۱ ML فلز هم صورت گرفته است. کمتر از ۱ ML به معنی کاملاً پوشیده نشدن سطح فیلم است به عبارتی حتی اگر مقداری از سطح فیلم با فلز پوشانده نشود به اصطلاح با جزیره‌ها و یا مناطق خوشه‌واری از فیلم فلز روبه‌رو باشیم باز هم خمش نواری توده سیلیکون را خواهیم داشت، شکل (۵) را نگاه کنید.

می‌رسد. اکسیژن و کربن همان طوری که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، سطح نمونه را ترک کرده‌اند و تنها دو قله مربوط به سیلیکون تمیز مشاهده می‌شوند. پیشتر ناخالصیها توسط پمپها از محفظه خارج شده‌اند به طوری که فشار درون محفظه به 10^{-7} تور رسیده است.

اینک که نمونه بسیار تمیز و عاری از هر گونه ناخالصی و کثیفی در اختیار داریم، شیر مخزن اکسیژن با درصد خلوص اسمی ۹۹/۹۹ را به آرامی باز کرده و اجازه می‌دهیم تا مولکولهای اکسیژن در سراسر فضای درون محفظه فرا خلاء پخش شود و بدین ترتیب اکسیژن و سیلیکون در شرایط فرا خلاء و دمای ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد شروع به ایجاد پیوند می‌کنند و بدین صورت فیلم فرا نازک اکسید سیلیکون تشکیل می‌شود. یک نمونه از طیف اکسید سیلیکون فرا نازک را در شکل (۲) مشاهده می‌کنید. جایی که فشار به 5×10^{-6} تور رسیده است. این طیف با تکنیک اوزه گرفته شده است.

با تبخیر کردن سیمهای آلومینیوم و تیتانیوم توانستیم فیلمهای اکسید فلزی آنها را بر فیلم اکسید سیلیکون تشکیل



شکل ۴- طیف اکسید فرا نازک تیتانیوم که بر زیر لایه سیلیکون در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد و فشار 5×10^{-6} تور رشد داده شده است.

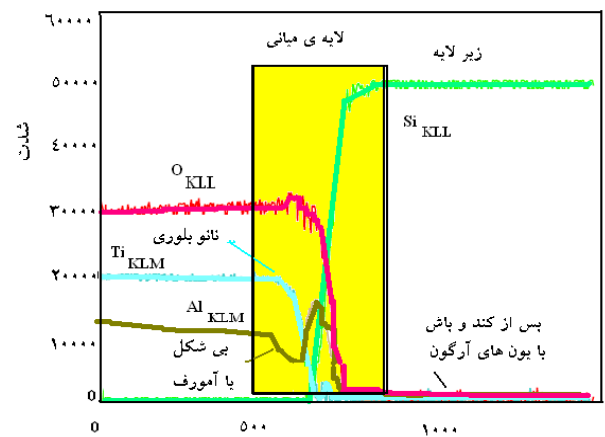
شکل ۳- طیف اکسید فرا نازک آلومینیوم که بر زیر لایه سیلیکون در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد و فشار 5×10^{-6} تور رشد داده شده است.

سیلیکون Si(100) در شکل (۶) را نگاه کنید که چگونه بارهای مثبت در همسایگی مرز اکسید با زیر لایه سیلیکون شکل گرفته است و همین تغییر و جابه‌جایی چگالی بار است که بنا به قانون پواسون یعنی $\Delta E = \rho / \epsilon$ میدان الکتریکی E در اکسید را باعث می‌شوند. ساختارهای Metal/ SiO₂ / Si(100) در شکل (۶) نشان می‌دهد که در غیاب هر گونه اتصال (و یا بیایسی) خمش نواری در سیلیکون برابر اختلاف تابع کار فلز- نیمرسانا (W_{MS}) است که برای الکترون با بار e داریم:

$$W_{MS} = \frac{W_M - W_S}{e} \quad (1)$$

که W_M و W_S به ترتیب تابع کار فلز و نیمه رسانا و یا مقدار انرژی لازم برای فرار الکترون از تراز فرمی (E_F) به خلاء را نشان می‌دهد.

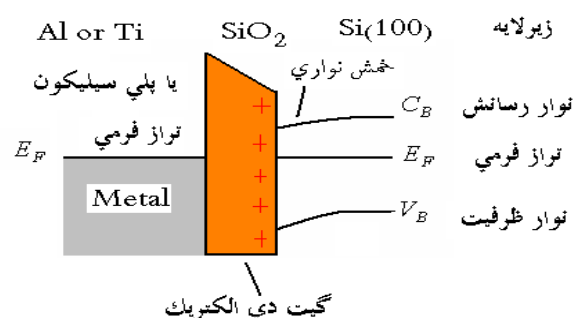
با توجه به [۱۳] مقدار W_{MS} برابر 0.3 e- ولت است که از توزیع هر گونه بار الکتریکی در اکسید ناشی می‌شود. اگر فرض شود بارهای مثبت در نزدیکیهای سطح زیر لایه سیلیکون داریم آنگاه به دلیل قطبش در دی الکتریک اکسید سیلیکون شاهد ایجاد میدان الکتریکی خواهیم بود که این به صورت جابه‌جایی قله‌ها در شکل‌های (۳) و (۴) دیده می‌شوند و برابر منفی مقدار



شکل ۵- تغییرات نسبی در موقعیت (انرژی جنبشی) قله‌های سیلیکون و توده اکسید سیلیکون برای 0.3 نانومتر اکسید با اتم‌های فلز که از خمش نواری به میزان میدان الکتریکی عبوری از فیلم رسیدیم.

نکته جالبی که در شکل (۵) مشاهده می‌کنید تغییرات کند ΔE است که تغییرات چندانی را نشان نمی‌دهد. به عبارتی مواجه با تخلیه شدگی بیشتر و ثابت شدگی تغییرات میدان الکتریکی عبوری از اکسید هستیم.

برای اینکه به این نکته پی ببریم طرحواره ساختار نواری MOS با فلز آلومینیوم و یا تیتانیوم، عایق اکسید و نیمه رسانای



شکل ۶- ساختار نواری MOS با فلزهای آلومینیوم و تیتانیوم، عایق اکسید سیلیکون و نیمه رسانای سیلیکون در بایاس صفر در این شکل به طور طرحواره نشان داده شده است. میدان الکتریکی در اکسید برابر شیب موضعی پتانسیل است. وقتی بارها مثبت هستند و در همسایگی سیلیکون واقع در لایه میانی قرار دارند خمش نواری به سمت پایین در شکل است.

تخت نواری^۵ است یعنی:

$$\Delta V_G = W_{MS} - \frac{Q_f}{C_0} \quad (2)$$

که Q_f کل بارهای ثابت مثبت در اکسید لایه میانی تا زیر لایه سیلیکون است و C_0 هم ظرفیت خازن ناشی از بارهای نااهمنام دو طرف مرز اکسید/سیلیکون و اکسید/فلز است و Q_f با تغییر بایاس تغییر می کند که چگونگی این تغییر و ایجاد لایه های تجمع و تخلیه ای را به آینده می سپاریم. تنها در اینجا بیان می شود که مقدار ΔE برای اکسید 0.35 نانومتر نسبت به اکسیدی با ضخامت 0.8 نانومتر کمتر است. علت قویتر بودن میدان الکتریکی در اکسید ضخیمتر را می توان ناشی از تعداد بیشتر بارهای ثابت تولید شده در فیلم دانست که شکل های (۳) و (۴) این موضوع را تأیید می کنند. از طرف دیگر، تغییرات یکنواخت ΔE بعد از تشکیل فیلمی بیش از یک تک لایه آلومینیوم و تیتانیوم نشان می دهد که فیلم یکنواخت و همگنی از اکسید شکل گرفته است چون قطبش بار و به عبارتی بارهای مثبت و منفی در این وضعیت کمتر ایجاد می شوند و همه قسمت های فیلم یکسان دیده می شوند. مطابق آنچه گفته شد رسانایی در زیر لایه (سیلیکون) با رسانایی در فیلم متفاوت است. فرایند تغییرات را می توان چنین شرح داد که حالات

سطح، خودشان را طوری توزیع می کنند تا سبب ایجاد بار در سطح شوند. این نتایج که منجر به همخط کردن ترازهای فرمی می شوند، باعث خمشی در نوارهای انرژی می شوند که تغییرات بیشتر جگالی حاملها را در سطح زیر سیلیکون لایه باعث می شوند و به لایه ای که به لایه بار- فضا معروف است، منجر می شوند. اینک به لایه میانی فیلمهای اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم در شکل (۵) نگاه می کنیم که در آن طیفهای کند و پاش که به وسیله یونهای آرگون صورت گرفته اند به وضوح تیز بودن لایه میانی اکسید تیتانیوم را نسبت به اکسید آلومینیوم با زیر لایه سیلیکونی نشان می دهد. این بدان معناست که لایه میانی TiO_2/SiO_2 به سمت نانوبلورکها پیش می رود. در حالی که با توجه به شکل (۵) ساختار Al_2O_3 یک ساختار آمورف یا بی شکل را داراست. از آنجایی که ساختارهای بی شکل نسبت به ساختارهای نانو و یا میکرو بلوری کمتر اجازه عبور به اتمهای سبکی مثل بور و حتی الکترونها را می دهند می توانند به یک ماده دی الکتریک مناسبتری به شمار بیایند.

۳- نتایج

با روش جدید و مفید رشد اکسید و لایه نشانی فیلم بر اکسید دریافتیم که میدان الکتریکی ایجاد شده با فیلمهای ضخیمتر اکسید، قویتر است. به عبارتی یکی از عوامل محدود کننده کارایی گیت اکسید فرا نازک به تحمل ولتاژ آن بر می گردد که به دلیل ضعیفتر بودن میدان الکتریکی ایجاد شده با بارها، شاهد کاهش بازده فیلمهای فرا نازک هستیم. با توجه به آنچه که در بالا بیان شده است می توان اکسید آلومینیوم را به عنوان یک ماده دی الکتریک مناسب برای نانو ترانزیستورهای میسفت آتی مطرح کرد.

قدردانی

همان طور که اشاره شد، داده ها با استفاده از دستگاههای دانشگاههای نیوکاسل استرالیا و ادنسه دانمارک انجام شده اند و بدین وسیله از پروفسورها رادنی و پر مورگن که شرایط انجام

سپاس را به عمل آوریم.

آزمایش را فراهم کرده‌اند و اجازه دادند به دلیل متن فارسی مقاله، تنها در این قسمت مقاله از آنها یاد شود نهایت تشکر و

واژه نامه

- | | | |
|--|----------------------|--------------|
| 1. metal-oxide – semiconductor –field – effect –transistor | 2. complementary MOS | 4. drain |
| | 3. source | 5. flat band |

مراجع

1. Bahari, A., Robenhagen, U., Morgen, P., and Li, Z. C., "Grown of Ultra Thin Silicon Nitride on Si (111) at Low Temperatures", *Physical Review B.*, Vol.72, pp. :205323-9, 2005.
2. Morgen, P., Bahari, A., Robenhagen, U., Anderson, J., Hansen, K., Pederson, K., and Rao, M. G., "Roads to Ultra Thin Silicon Oxide," *Journal Vacuum, Science and Technology A*, Vol. 23, pp. 201-9, 2005.
3. Bahari, A., Morgen, P., and Pederson, K., "Growth of a Stacked Silicon Nitride /Silicon Oxide Dielectric on Si (100)," *Journal Vacuum, Science and Technology B*, Vol. 24, pp. 2119-25, 2006.
4. Tien, S., and Duh, J., "Comparison of Microstructure and Phase Transformation for Nanolayered CrN / AlN and TiN/AlN Coatings at Elevated Temperatures in Air Environm.," *Thin Solid Films*, Vol. 515, pp. 1097 – 1101, 2006.
5. Talyansky V., "Fabrication and Characterization of Epitaxial AlN/TiN Bilayers on Sapphire," *Thin Solid Films*, Vol.23, pp. 37-41, 2009.
6. Bahari, A., Morgen, P. and Zi L, "Valence Band Studies of the Ultra Thin Pure Silicon Nitride Films on Si(100)," *Surface Science*, Vol. 600, pp. 2966- 71, 2006.
7. Bahari, A., Morgen, P., and Zi L, "Ultra Thin Silicon Nitride Films on Si(100) Studied with Core Level Photoemission," *Surface Science*, Vol. 602, pp. 2315-24, 2008.
8. Wong, M., Hsiao, G. and Yang, S., "Preparation and Characterization of AlN/ZrN and AlN/TiN Nanolaminate Coatings," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 133-134, pp. 160-165, 2000.
9. Toshio I., Hirokatsu, A., Takeru, S., Motoshige, I., Koichi, H., J. Non-Crystalline Solids Vol. 353, P. 3011, 2007.
10. Bahari, A., "An Alternative Method for CNT," *Acta Physica Polonica*, Vol. 115, pp. 622- 25, 2009.
11. Tien, S., Lin, C., Tsai, Y., and Duh, J., "Oxidation Behavior, Microstructure Evolution and Thermal Stability in Nanostructured CrN/AlN Multilayer Hard Coatings," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 55, pp. 321-28, 2010.
12. Mar, J., Xu, X.L., Baumberg, J., Irvine, A., Stanley, C., and Williams, D. A., "Electrically Tunable Hole Tunnelling from a Single Self- Assembled Quantumdot Embedded in an n-i-Schottky Photovoltaic Cell," *Applied Physics Letters*, Vol. 99, pp. 031102- 05, 2011.
13. Kontogeorgos, A., David, R. E., Snoswell, E., Chris, E. F., and Jeremy, J., "Inducing Symmetry Breaking in Nanostructures: Anisotropic Stretch-Tuning Photonic Crystals," *Physical Review Letters*, Vol. 105, pp. 233909- 13, 2010.