

ویژگی های نانو ساختار نقره/اکسید سیلیکون

علی بهاری و سیده مژده فدایی

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران

چکیده

ترانزیستورهای اثر میدانی یکی از مهم ترین قسمت های مدارهای مجتمع می باشند. در ساختار این نوع ترانزیستورها، الکتروود فلزی بر روی لایه ای از اکسید سیلیکون قرار گرفته است و زیر لایه نیز از جنس سیلیکون اختیار شده است. ما عنصر نقره را به عنوان الکتروود اختیار نمودیم و با استفاده از طیف های گرفته شده از تکنیک تابش های سینکروترونی که تکنیک حساس به سطح است تلاش کردیم تا بینیم که آیا می توان از نانو ساختار نقره در تماس با فیلم اکسید بدین منظور استفاده کرد یا نه. علاوه بر آن تاثیر میدان های الکتریکی عبوری از آن را نیز بررسی کردیم. تغییرات موضعی در $Ag/SiO_2/Si$ نشان می دهد که فیلم تشکیل شده بر زیر لایه ی سیلیکونی تمام سطح آن را پوشش می دهد به طوری که شاهد فیلم یکنواختی هستیم و هم چنین میدان ضعیف الکتریکی در فیلم های نازک تر اکسید (کمتر از 2nm) نسبت به فیلم ضخیم تر آن به دست آمده است.

کلمات کلیدی: فیلم نازک، اکسید سیلیکون، فیلم نقره، تابش سینکروترونی

Investigation of nano structural properties of Ag/SiO₂

A. Bahari and S. M. Fadai

Department of Physics, Mazandaran University

Abstract

Field effect transistor is of importance in the integrated circuit. The metal electrode is on a silicon dioxide layer and is grown on a silicon substrate. We used silver as the electrode. The structural properties of a single silver layer on top of the silicon oxide film has been studied using synchrotron radiation, sensitive to changes in a chemical environment, permits high resolution photoelectron spectroscopy of nano thickness silver film on top of oxide. The local variations of the $Ag/SiO_2/Si$ demonstrated a good uniformity of coverage oxide film and the weaker electrical field across the thinner oxide film ($< 2\text{nm}$) respect to thicker oxide film.

Keywords: Thin film, Silicon oxide, Silver film, Synchrotron radiation

E-mail of corresponding authors: Phy_f12@yahoo.com, a.bahari @ umz.ac.ir

مقدمه

با کاهش روز افزون ابعاد قطعات الکترونیکی و نزدیک تر شدن برخی قسمت های آن به یکدیگر پدیده های مزاحمی اتفاق می افتند که سبب می شوند تا کنترل عبور حامل ها از این قطعات را از دست بدهیم. یکی از قسمت های مهم مدارهای مجتمع را می توان ترانزیستورهای اثر

میدانی MOSFET

(MetalOxide_Semiconductor_Field_Effect_Transistor) و یا مجموعه ای از آنها که

C(Complementary)MOS باشد را نام برد. با

کوچک شدگی تابع نمایی اندازه ی قطعات الکترونی

طبیعی است که اندازه ی تمام اجزا از جمله ترانزیستورها، به سرعت کوچک می شوند و در نتیجه چشمه (Source)

و چاه (Drain) ترانزیستور به یکدیگر نزدیک می شوند

از نزدیک شدن آنها، تداخل و استتار حامل های عبوری

به وسیله ی حامل های دیگر در کانال صورت می گیرد که

باعث می شود تا به دلیل تونل زنی، جریان نشتی حامل ها

و نفوذ برون از گیت دی الکترونیک، نتوان گیت اکسید فرا

نازک 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 نیتريد سیلیکون [۴-۶] و اکسید آلومینیم [۳-۷]

پیشنهاد کرده اند. جدای از گیت دی الکترونیک، گیت و کانال

نانوترانزیستورها به شدت تحت تأثیر فرآیند کوچک

شدگی قطعات قرار گرفته اند و مشکلات زیادی در

بکارگیری بیشتر آن ها با مواد تشکیل دهنده ی فعلی به

وجود آمده است که تماس الکترونها با گیت یکی از این

موارد است [۹-۱۱].

بدین ترتیب رشد نقره و یا لایه نشانی فیلم نقره بر سطح

اکسید سیلیکون و یا زیر لایه ی سیلیکون حائز اهمیت

است. در واقع می خواهیم به جای روش قدیمی مدل

خازن MOS که در غیاب بایاس خارجی به آن، پتانسیل

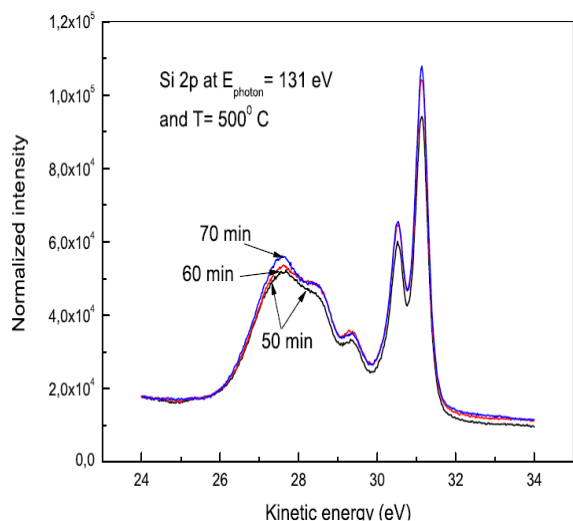
سطح سیلیکون آن برابر منفی ولتاژ تخت

نواری (Flat_Band Voltage) بوده است، در اینجا از

خمش نواری مربوط به تغییرات شیمیایی قله های Si_2P و Ag_3d استفاده می کنیم و میدان عبوری از فیلم اکسید با ضخامت های متفاوت نقره را بررسی می کنیم. ساختار نواری و جابجایی ناشی از پیوندهای شیمیایی نقره-اکسیژن-سیلیکون به وسیله ی تکنیک بسیار حساس به سطح مطالعه شده اند. این تکنیک از قدرت تفکیک سازی بالایی برخوردار است طوری که قله های مربوط به اسپین بالا و پایین را از هم جدا می کند یعنی می توان دو قله ی توده ی سیلیکون که $Si_2P_{1/2}$ و $Si_2P_{3/2}$ باشند را به وضوح مشاهده نمود. نتیجه ی تجزیه و تحلیل طیف ها نشان داده است که فیلم یکنواختی با تبخیر نقره بر فیلم اکسید فرا نازک شکل گرفته است و میدان الکتریکی با کاهش ضخامت فیلم ضعیف تر می شود.

شیوه ی انجام آزمایش و نتایج آن

زیر لایه ی $Si(111)$ از ورقه های سیلیکونی با مقاومت ویژه ی ۵ اهم-سانتی متر، ضخامت ۲ میلی متر که از یک طرف صاف و صیقلی شده بود بریده شد. اندازه ی ابعاد نمونه سیلیکونی 1×3 سانتی متر مربع بوده است. ابتدا نمونه را درون بشر حاوی اتانول نموده و سپس بشر را در حمام فراصوت به مدت یک ساعت قرار دادیم تا اکسید اولیه ای 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 می رود به عبارت دیگر امکان تشکیل پیوند بین اتم های کربن و اکسیژن موجود در محیط با پیوند های کامل نشده ی اتم های سیلیکون وجود دارد، لذا آن را با استون شستشو داده و با نگهدارنده های تالیوم که در گرمای نسبتاً زیاد در قیاس با سیلیکون و نقره بخار نمی شوند، نمونه ها را در محفظه ی فرا خلاء و یا UHV(Ultra High Vacuum) بر روی گردنده ای نگاه داشته ایم و برای تمیز سازی بیشتر چند بار سریع جریان الکتریکی را از آن گذرانیدیم به طوری که دمای نمونه به حدود $1200^\circ C$ در سانتیگراد می رسد. اکسیژن و کربن همان طوری که در



شکل ۲. طیف اکسید فرا نازک سیلیکون که بر زیر لایه ی $Si(111)$ در دمای ۵۰۰ درجه ی سانتی گراد و فشار 5×10^{-7} تور رشد داده شده است. انرژی فوتون فرودی ۱۳۱ الکترون ولت است

عمود بر سطح نمونه صورت گرفته است.

برای آنکه اتم های نقره را بر فیلم اکسید سیلیکون بنشانیم، از یک بوته ی استوانه ای بورن- نیتريد استفاده کرده ایم که بسامد نگار آهنگ تغییر زمانی جرم قطعه سیم های نقره را نشان می داد و ما با استفاده از این آهنگ جرمی و [۱۲-۱]، میزان تبخیر نقره بر اکسید را معین نمودیم که از

$$0.25 ML \text{ تا } 2/5 ML \text{ بیانگر تک لایه است یعنی معادل}$$

ضخامت بسیار نازک پوشش نقره ایی بر فیلم می باشد و آن را می توان بر اساس لانگمیر (معادل حاصلضرب فشار 10^{-6} تور گازی به مدت یک ثانیه) مشخص نمود .

طیف های مربوط به $Ag/SiO_2/Si$ را در شکل های (۳) و (۴) مشاهده می کنید. ملاحظه می کنید که قله های $Si2p_{3/2}$ در حدود $E_K = 31/1$ الکترون ولت و $Si2p_{1/2}$ در $E_K = 30/5$ الکترون ولت (E_K انرژی جنبشی فتو الکترون های گسیلی از سطح فیلم است که

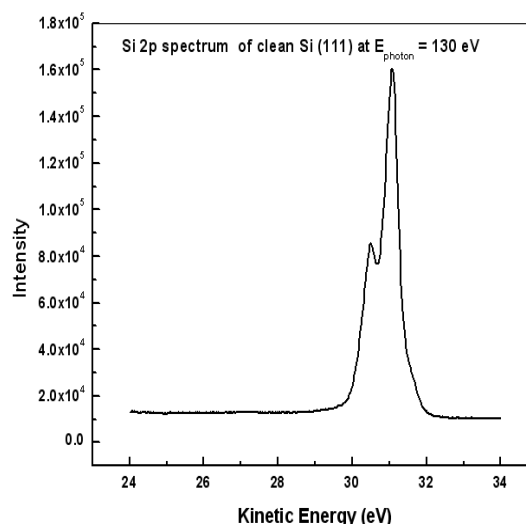
برابر تفاضل انرژی فوتون فرودی و انرژی بستگی ۹۹

الکترون ولتی سیلیکون است) در شکل (۳) با افزایش لایه نشانی نقره به سمت انرژی جنبشی بالاتر و یا انرژی

بستگی پایین تر جابجا می شود که بیانگر تشکیل پیوند

شیمیایی بین اتم های نقره، اکسیژن و سیلیکون است .

شکل (۱) مشاهده می شود، سطح نمونه $Si(111)$ را ترک کرده اند و تنها دو قله ی مربوط به سیلیکون تمیز مشاهده می شوند. بیشتر ناخالصی ها توسط پمپ ها از محفظه خارج شده اند به طوری که فشار درون محفظه به 10^{-11} تور رسیده است.

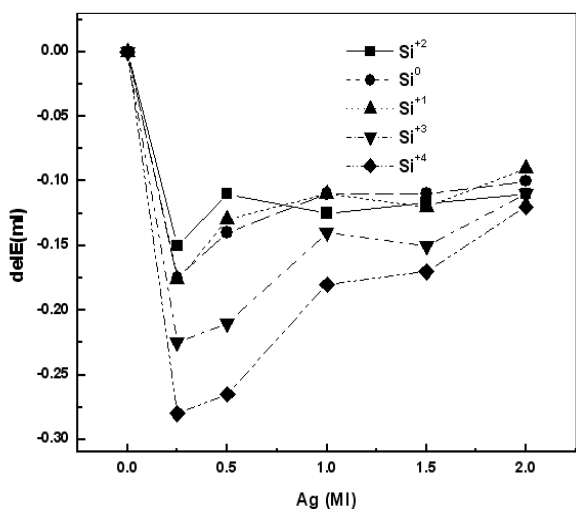


شکل ۱. طیف تمیز زیر لایه ی $Si(111)$ که بعد از چندین بار عبور جریان الکتریکی از آن به دست آمده اند. تنها دو قله ی $Si2p_{3/2}$ و $Si2p_{1/2}$ در انرژی جنبشی $31/1 eV$ و $31/4 eV$ مشاهده می شوند. انرژی اشعه ی فرودی تابش سینکروترونی برابر ۱۳۱ الکترون ولت است

اینک که نمونه ی 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 نمود و اجازه می دهیم تا مولکول های اکسیژن در سراسر فضای درون محفظه ی فرا خلاء پخش گردد و بدین ترتیب اکسیژن و سیلیکون در شرایط فرا خلاء و دمای ۵۰۰ درجه ی سانتی گراد شروع به ایجاد پیوند می کنند و بدین صورت فیلم فرا نازک اکسید سیلیکون تشکیل می شود. که طیف اکسید سیلیکون فرا نازک را در شکل (۲) مشاهده می کنید. جایی که فشار به 5×10^{-7} تور رسیده است.

این طیف ها با تابش سینکروترونی گرفته شده اند و از خط پرتو $SGM1$ که از توری کروی تکفام کننده و آنالیز نیم کروی $SCIENTA$ به شعاع ۲۰ سانتی متر تشکیل شده بهره می گیرد. به طوری که تمام آزمایش ها با خط گسیل

عکس این جابجایی را برای قله های Ag ملاحظه می کنید.

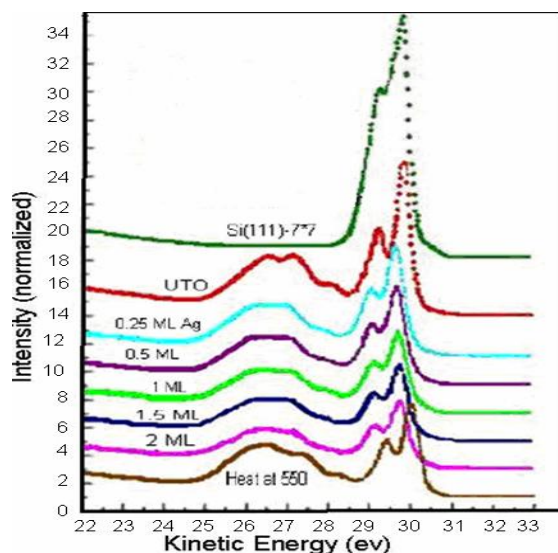


شکل ۴. تغییرات نسبی در موقعیت (انرژی جنبشی) قله های سیلیکون و توده ی اکسید سیلیکون برای ۰/۳ نانومتر اکسید با اتم های نقره که از خمش نواری به میزان میدان الکتریکی عبوری از فیلم رسیدیم

بر حسب داده های بدست آمده، تغییرات قله های کپه ای زیر لایه ی سیلیکون و کپه ی اکسید سیلیکون با افزایش اتم های نقره را در شکل های (۴) و (۵) ترسیم نموده ایم. ملاحظه می کنید که بعد از نشستن حدود یک تک لایه ی نقره بر سطح فیلم یک تماس الکتریکی خوب بین سطح جلویی و پشتی نمونه شکل گرفته است. حتی این تماس در پایین تر از $1 ML$ نقره هم صورت گرفته است. کمتر از $1 ML$ به معنی کاملاً پوشیده نشدن سطح فیلم است به عبارتی حتی اگر مقداری از سطح فیلم با نقره پوشانده نشود به اصطلاح با جزیره ها و یا مناطق خوشه واری از فیلم نقره روبه رو باشیم باز هم خمش نواری توده ی سیلیکون را خواهیم داشت.

نکته ی جالبی که در شکل های (۴) و (۵) مشاهده می کنید تغییرات کند ΔE از حدود $0.5 ML$ به بالا است که تغییرات چندانی را نشان نمی دهد. 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 ی ساختار نواری MOS با فلز نقره (Ag)، عایق اکسید (SiO_2) و

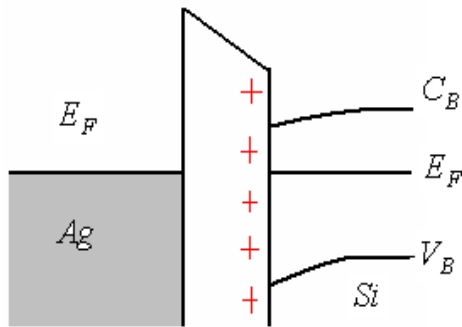


شکل ۳. طیف های Si_{2p} با انرژی 130 الکترون ولت. فوتون های فرودی که به صورت تابعی از مقدار Ag لایه نشانی شده رسم شده اند. ضخامت اکسید سیلیکون با توجه به [۶، ۲] حدود 0.3 نانومتر بر آورد شده است. ML به پوشیدگی تک لایه ی نقره بر اکسید سیلیکون دلالت دارد

در این شکل ها می بینید که شدت قله ها با افزایش اکسیژن (شکل ۲) و نقره (شکل ۳) کاهش می یابد که بیانگر دخالت اتم های سیلیکون در تشکیل پیوند می باشد. در بین قله های اشاره شده در بالا با بر آمدگی واقع در $25-27$ الکترون ولت مربوط به کپه یا توده ی فیلم اکسید دار لایه ی میانی ($Interface$) قرار دارد که چگونگی تغییر آن با افزایش اتم های خارجی نقره را به آینده موقوف می کنیم. که باید با برنامه ی استاندارد $Fitxps$ [۱۳] تجزیه و تحلیل شود ولیکن همچنان با لایه ی میانی که تیز ($Sharp$) نیست رو به رو هستیم که این به معنی میکرو کریستالی بودن لایه ی میانی است که از مزیت فیلم مزبور می باشد.

بحث

به منظور تأثیر ضخامت فیلم اکسید در میدان الکتریکی عبوری سعی کردیم تا اتم های نقره را بر 0.35 و 0.8



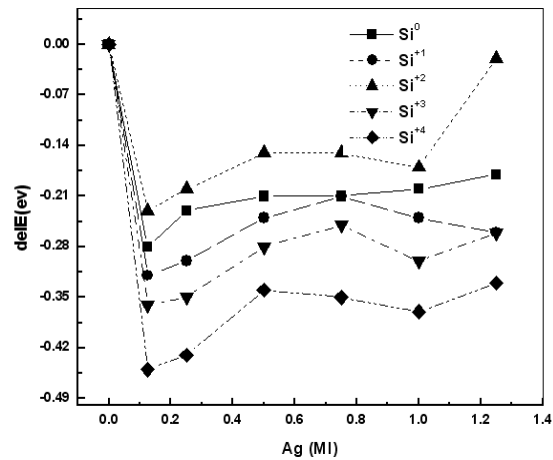
شکل ۶. ساختار نواری MOS با فلز Ag، عایق اکسید SiO_2 و نیمه رسانای سیلیکون Si در بایاس صفر. میدان الکتریکی در اکسید برابر شیب موضعی پتانسیل است. وقتی بارها مثبت هستند و در همسایگی سیلیکون واقع در لایه ی میانی SiO_2/Si قرار دارند خمش نواری به سمت پایین در شکل است. خمش نواری کاملاً در [۱۴] توضیح داده شده است

نواری (Flat Band) است یعنی:

$$\Delta V_G = W_{MS} - Q_f / C_0$$

که Q_f کل بارهای ثابت مثبت در اکسید لایه ی میانی تا زیر لایه ی سیلیکون است و C_0 هم ظرفیت خازن ناشی از بارهای ناهمنام دو طرف مرز اکسید /سیلیکون و اکسید/نقره می باشد و Q_f با تغییر بایاس تغییر می کند که چگونگی این تغییر و ایجاد لایه های تجمعی 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 قوی تر بودن میدان الکتریکی در اکسید ضخیم تر را می توان ناشی از تعداد بیشتر بارهای ثابت تولید شده در فیلم دانست که جابجایی انرژی قله های Si_{2p} در شکل های (۲) و (۴) این موضوع را تایید می کنند. از طرفی تغییرات یکنواخت ΔE بعد از تشکیل فیلمی بیش از یک تک لایه نقره 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 ی قسمت های فیلم یکسان دیده می شوند. مطابق آنچه گفته شد رسانایی در زیر لایه (سیلیکون) با رسانایی در فیلم

نیمرسانای سیلیکون Si () در شکل (۶) را نگاه کنید که



شکل ۵. تغییرات نسبی در موقعیت (انرژی جنبشی) قله های سیلیکون و توده ی اکسید سیلیکون برای 0.3 نانومتر اکسید با اتم های نقره که از خمش نواری به میزان میدان الکتریکی عبوری از فیلم رسیدیم

چگونه بارهای مثبت در همسایگی مرز اکسید با زیر لایه ی سیلیکون شکل گرفته است و همین تغییر و جابجایی چگالی بار است که بنا به قانون پواسون یعنی

$$\Delta E = \rho / \epsilon$$

می شوند. ساختار های $Ag/SiO_2/Si$ در شکل (۶) نشان می دهد که در غیاب هر گونه اتصال (و یا بایاسی) خمش نواری در سیلیکون برابر اختلاف تابع کار فلز-نیمرسانا (W_{MS}) است که برای الکترون با بار e داریم: $W_{MS} = (W_M - W_S) / e$ که W_M و W_S به ترتیب تابع کار فلز و نیمرسانا و یا مقدار انرژی لازم برای فرار الکترون از تراز فرمی (E_F) به خلاء را نشان می دهد.

با توجه به [۱۴ و ۱۳] مقدار W_{MS} برابر -3 ولت می باشد که از توزیع هر گونه بار الکتریکی در اکسید ناشی می شود. اگر فرض شود بارهای مثبت در نزدیکی های سطح زیر لایه ی سیلیکون داریم آنگاه به دلیل قطبش در دی الکتریک اکسید سیلیکون شاهد ایجاد میدان الکتریکی خواهیم بود که این به صورت جابجایی قله ها در شکل های (۲ تا ۴) دیده می شوند و برابر مقدار تخت

منابع

1. A. Bahari, U. Robenhagen, P. Morgen and Z. S. Li, *Growth of ultrathin silicon nitride on Si(111) at low temperatures*, *Physical Review B*, 72, (2005) 205323-29.
2. P. Morgen, A. Bahari, U. Robenhagen, J. Anderson, K. Hansen, K. Pederson, M. G. Rao, Z. S. Li, *Roads to Ultra thin Silicon Oxide*. *Journal Vacuum and Technology A*, 23, 201-207.(2005).
3. A. Bahari, P. Morgen, K. Pedersen, Z. S. Li, *Growth of a Stacked Silicon Nitride /Silicon Oxide Dielectric on Si (100)*. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 24, 2119-23.(2006).
4. P. Morgen, F. K. Dam, G. Gundlach, T. Jensen, L. B. Takker, S. Tougaard and K. Pedersen, *Recent progress in silicon oxidation: Towards ultra thin oxides; in: Recent Res Devel. Applied Physics*, 5, (2002) 287 – 311.
5. G. Locovsky, *Growth and investigation of TiO₂ and AlN nanostructure's properties*, IBM Research development 6, (1999) 39-59.
6. A. Bahari, P. Morgen and Z. S. Li, *Properties of ultra thin pure silicon nitride films on Si (111)*, *Surf, Sci.*, 29, (2006) 66- 73.
7. A. Bahari and M. Amiri, *Phonon Dispersion Relation of Carbon Nanotube*, *Acta Physica Polonica A*, 115, (2009,) 625 – 28.
8. J. W. Kim, H. W. Yeom, *Surface and interface structures of epitaxial silicon nitride on Si(111)*, *Physical Review B*, 67, (2003) 035304- 15
9. T. Itami, H. Aoki, T. Shibata, M. Ikeda and K. Hotozuka, *The estimation of concentration fluctuations in liquid Ag-Si and Au-Si alloys*, *Journal Non-Crystalline Solids*, 353, (2007) 3011- 29.
10. A. Bahari, *An alternative method for determining carbon nano tube band energy*, *Acta Physica Polonica A*, 115,(2009), 622- 625.
11. M. Nakhei and A. Bahari, *Topography measurement of nano silicon oxide film*, *International Journal of Science*, 4, (2009)290 – 294.

متفاوت است. فرآیند 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 گردند که تغییرات بیشتر جگالی حامل ها را در سطح زیر سیلیکون لایه باعث می شوند و به لایه ای که به لایه ی بار-فضا معروف است، منجر می گردند.

نتایج

با روش جدید و مفید رشد اکسید و لایه نشانی نقره بر اکسید دریافتیم که میدان الکتریکی ایجاد شده با فیلم های ضخیم تر اکسید، قوی تر می باشد. به عبارتی یکی از عوامل محدود کننده ی کارایی گیت اکسید فرا نازک به تحمل ولتاژ آن بر می گردد که به دلیل ضعیف تر بودن میدان الکتریکی ایجاد شده با بارها، شاهد کاهش بازده ی فیلم های فرا نازک هستیم. از طرفی می توان از این روش به جای تکنیک CV در مطالعه ی ویژگی الکتریکی فیلم های فرا نازک و نازک استفاده کرد و در چگونگی تماس الکتروود های فلزی با گیت آن را به کار گرفت.

قدردانی

همان طور که اشاره شد، داده ها با استفاده از تابش سینکروترونی در دانشگاه آرهوس دانمارک جمع آوری شده اند و طیف های سینکروترونی با دستگاه پیشرفته *ASTRI* گرفتیم و بدین وسیله از دکتر لی و پروفیسور پرمورگن که شرایط انجام آزمایش را فراهم کرده اند و اجازه دادند به دلیل متن فارسی مقاله، تنها در این قسمت مقاله از آنها یاد شود نهایت تشکر و سپاس را به عمل آوریم. این مقاله با گرانت دانشگاه مازندران حمایت شده است و از مسئولین دانشگاه مازندران نیز قدردانی می شود.

12. H.-J. Liu, Z.X. Xie, H. Watanabe, J. Qu, K. Tanaka, *Growth of nano-crystalline metal dots on the Si(1 1 1)-7 × 7 surface saturated with C₂H₅OH*, *Physical Review B*, 601, (2007) 5093-5097 .
13. D. Adams and J. N. Andersen, *FITXPS: a fitting program for core level spectra available from*; ftp: //boobpic. ifa. au. dk / Pub / fitxps.
14. I. Os't'a'dal, P. Koca'n, P. Soboti'k, J. Pudl, *Direct Observation of Long-Range Assisted Formation of Ag Clusters on Si(111)7×7*, *Physical review letter*, 95, (2005) 146101 – 11.