

مجله فیزیک کاربردی دانشگاه الزهراء (س)

شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۱

## سنتز و مطالعه ویژگی های الکتریکی نانوکامپوزیت های هیبریدی NiO/PVC به عنوان گیت دی الکتریک ترانزیستور OFET

امیر حیاتی<sup>۱</sup>

علی بهاری<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۱/۵/۱۳

تاریخ تصویب: ۹۱/۱۱/۹

### چکیده

در این مقاله، نانوکامپوزیت های هیبریدی با غلظت متفاوت ماده ی آلی، در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد، به روش سل - ژل در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد، سنتز نمودیم. فازهای نانوبلورکها و بلورینگی با استفاده از روش های پراش اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) و تصاویر X-Map بررسی نمودیم. مشخصه خاصیت الکتریکی با آماده سازی یک و بفر از نانوپودر هیبریدی NiO/PVC و محاسبه ثابت دی الکتریک با استفاده از دستگاه GPS 132 A انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که نمونه

---

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری فیزیک، دانشگاه مازندران

<sup>۲</sup> دانشیار فیزیک، دانشگاه مازندران؛ a.bahari@umz.ac.ir

NiO/PVC با درصد وزنی ۱:۲۵۰ دارای ثابت دی الکتریک بالا تر، ریخت‌شناسی بهتر، زبری سطح کمتر و جریان نشتی کمتر بوده و می‌تواند به عنوان یک دی الکتریک گیت مناسب برای ادوات آتی ترانزیستور اثر میدانی آلی (OFET) استفاده شود.

**واژه‌های کلیدی:** نانوکامپوزیت هیبریدی NiO/PVC، روش سُل - ژل، ترانزیستورهای OFET.

## ۱ - مقدمه

در سال‌های اخیر ضخامت گیت دی اکسید سیلیکان در تکنولوژی CMOS به کمتر از دو نانومتر رسیده است. این تمایل بی‌سابقه به کوچک کردن ترانزیستورها، علاوه بر مزایای فراوان تکنولوژیکی، مشکلاتی همچون افزایش تونل زنی کوانتومی، افزایش جریان نشتی و نفوذ اتم بور از گیت دی الکتریک فرنازک را به همراه داشته است [۱]. اخیراً مواد نانوکامپوزیت هیبریدی آلی-غیر آلی، شامل اکسیدهای فلزی، به خاطر ویژگی‌های خوب الکتریکی همچون جریان نشتی پایین و ثابت دی الکتریک بالا به عنوان جایگزین مناسب برای گیت دی الکتریک ترانزیستورهای اثر میدانی آلی پیشنهاد شده‌اند [۲-۴]. در طول دهه‌های اخیر، تراشه‌های الکترونیکی با ابعاد بسیار کوچک تولید شده‌اند. با توجه به اینکه ضخامت موثر دی الکتریک  $\text{SiO}_2$  در جریان تولید ترانزیستور اثر میدانی فلز-اکسید-نیمه‌رسانا (MOSFET) در حال کاهش تا حدود یک نانومتر رسیده است، طبیعی است که به واسطه اثر تونل‌زنی کوانتومی و نفوذ اتم‌های سبک نظیر بور به داخل فیلم، جریان‌های نشتی افزایش یافته و باعث افت کارایی گیت دی الکتریک می‌گردند. این مشکلات موجب می‌شود در زمینه تولید ادوات جدید ترانزیستورهای اثر میدانی معماری جدیدی در حوزه‌ی نانو الکترونیک مطرح گردد [۵-۷]. در دهه‌های گذشته برای رفع مشکل ترانزیستورهای اثر میدانی، مواد مختلفی برای جایگزینی  $\text{SiO}_2$  معرفی شدند. یک دسته از این مواد دارای ثابت دی الکتریک بالا نظیر  $\text{HfO}_2$  و  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  بودند [۸-۱۴]. علاوه بر این،

برای ارتقاء کارایی ترانزیستورهای اثر میدانی MOS، پژوهشگران سعی کرده‌اند به مطالعه نانو کامپوزیت‌های هیبریدی آلی-غیر آلی بپردازند. در سال‌های اخیر به خاطر خواص مواد نانو کامپوزیت هیبریدی آلی شامل اکسیدهای فلزی منحصر به فرد در حوزه‌های مختلف نظیر کاتالیست‌ها و دارا بودن فاکتورهای کیفی مناسب، پژوهشگران توجه گسترده‌ای به این مواد داشته‌اند [۱۵-۱۸].

در این مسیر ماده اکسید نیکل را به عنوان یک ماده غیر آلی و پلی وینیل کلرید را به عنوان یک ماده آلی در نظر گرفتیم. دلیل این انتخاب‌ها این است که نانوذرات اکسید نیکل به عنوان یک کاتالیست و ماده‌ی دی الکتریک، بسیار عالی عمل کرده‌اند [۱۹]. از طرف دیگر، به واسطه خواص پلی وینیل کلرید در بسیاری از حوزه‌ها، به طور گسترده از این ماده استفاده می‌شود [۲۰ و ۲۱].

نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که نمونه NiO/PVC با ۵ گرم NiO و ۰/۰۲ گرم PVC (معادل درصد وزنی ۱:۲۵۰) سنتز شده در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد، در مقایسه با دیگر نمونه‌های سنتز شده، دارای ثابت دی الکتریک بالاتر، مورفولوژی (ریخت) مناسب‌تر، زبری سطح و جریان نشستی کمتر می‌باشد و می‌تواند به عنوان گیت دی الکتریک مناسب برای ادوات ترانزیستورهای اثر میدانی آلی آتی (OFET) معرفی گردد.

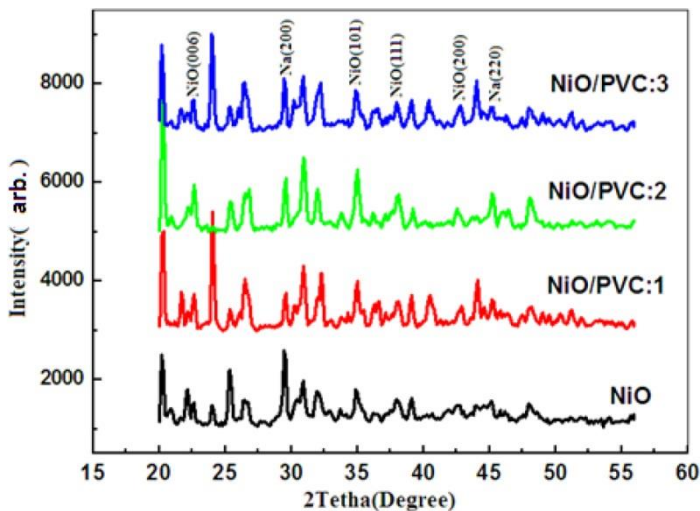
## ۲- آزمایش

در این پژوهش از روش سل-ژل برای سنتز NiO/PVC استفاده شده است. نیترات نیکل شش آبه [AR, 98%] همراه با آب به عنوان پیش ماده برای نانو بلورک های اکسید نیکل و تترا هیدرو فوران [ACROS ORGANIC, 99%] نیز به عنوان حلال پلی وینیل کلرید به کار رفته است: ۵ گرم نیترات نیکل شش آبه در ۵۰ میلی لیتر آب مقطر دو بار یونیزه حل و برای ۲۰ دقیقه در دمای ثابت ۸۰ درجه سانتی گراد روی همزن مغناطیسی به طور پیوسته تحت چرخش مغناطیسی قرار می‌گیرد. برای آماده شدن بستر سنتز مقدار ۰/۶ گرم NaOH به محلول اضافه می‌شود. هیدروکسید سدیم محیط را بازی می‌کند و PH محلول را بین ۷-۱۰ قرار می‌دهد. ۰/۰۱ گرم پودر PVC را در ۰/۳ میلی لیتر محلول THF در لوله آزمایش

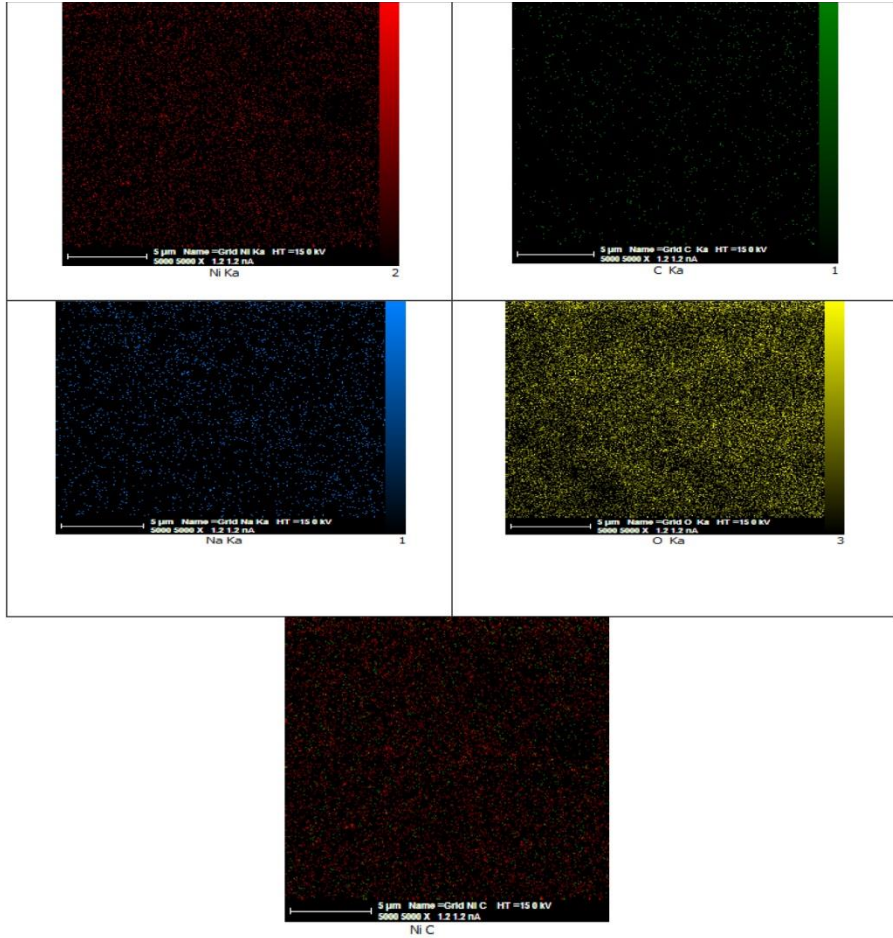
ریخته و آن را به شدت تکان می‌دهیم. پس از حل شدن کامل PVC در محلول THF، به صورت قطره قطره به محلول اول اضافه می‌کنیم. محلول سبز رنگ آماده شده به مدت ۲۴ ساعت در همان دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد روی همزن مغناطیسی تحت چرخش مغناطیسی قرار می‌گیرد. بعد از این مدت، سل پایدار به ژل تبدیل می‌شود. ژل حاضر در کوره الکتریکی قرار می‌گیرد و پس از ۲۴ ساعت و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شود و به صورت یک جامد متخلخل در می‌آید. جامد به دست آمده در بوتله چینی با استفاده از آون آسیاب شده و به صورت پودر در می‌آید. برای غلظت‌های دیگر PVC آزمایش‌ها با همین شرایط تکرار می‌شود.

### ۳- بحث و نتایج

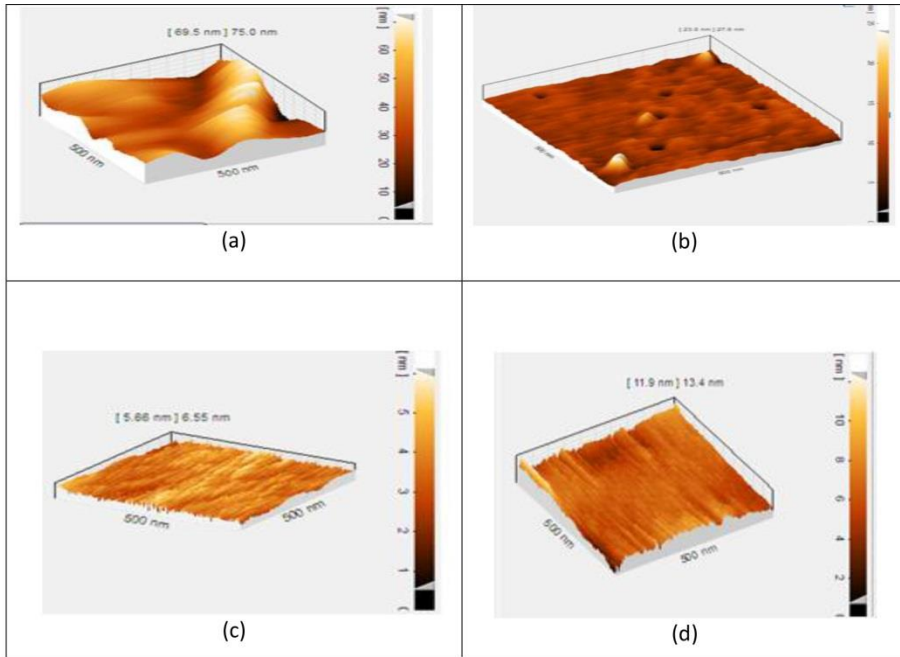
طیف پراش اشعه ایکس (XRD)، تصاویر X-Map و طیف توپوگرافی میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) در شکل‌های ۱ تا ۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱: طیف پراش XRD مربوط به نمونه‌ی NiO و نانوکامپوزیت هیبریدی NiO/PVC با غلظت‌های مختلف PVC.



شکل ۲: تصاویر X-map نشان دهنده ی عناصر O، Ni، C و Na و ترکیب نیکل و کربن در نانو کامپوزیت PVC/NiO با نسبت ۱:۲۵۰.



شکل ۳: تصاویر سه بعدی AFM مربوط به نمونه‌ی NiO (a) و NiO/PVC با غلظت‌های (b) ۱:۵۰۰، (c) ۱:۲۵۰ و (c) ۱:۱۲۵.

جدول ۱: فاکتورهای زبری مربوط به نمونه‌های NiO و نانوکامپوزیت هیبریدی NiO/PVC با غلظت‌های مختلف PVC که با استفاده از تکنیک DME-SPM تهیه شده است.

Sample	NiO	NiO/PVC:I	NiO/PVC:II	NiO/PVC :III
S <sub>y</sub>	۳/۳۸ nm	۱۸/۹ nm	۵/۴۶ nm	۶/۱۲ nm
S <sub>z</sub>	۱۷/۹ nm	۱۳/۱ nm	۵/۰۷ nm	۵/۴۱ nm
S <sub>a</sub>	۴/۵۸nm	۹۰۷pm	۵۴۶pm	۶۸۳pm
S <sub>q</sub>	۶/۰۸ nm	۱/ ۴۰ nm	۶۹۹pm	۸۴۷pm

جدول ۲: ثابت دی الکتریک نمونه‌های NiO و NiO/PVC با غلظت‌های مختلف PV که با استفاده از دستگاه GPS 132 A تهیه شده است.

Sample	NiO	NiO/PVC:I	NiO/PVC:II	NiO/PVC :III
K	۵۲/۰۴۷	۵۶/۰۲۱	۶۸/۰۹۹	۵۸/۱۰۷

ساختار بلوری و اندازه نانوبلورک‌ها با روش اشعه X (Phillips PW-1710) تعیین می‌شود. شکل ۱ تاثیر میزان غلظت PVC را روی پراش نمونه NiO و نانوکامپوزیت هیبریدی NiO/PVC به دست آمده نشان می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش مقدار PVC در NiO/PVC، نانوکامپوزیت هیبریدی در فازهای بس بلوری شکل می‌گیرد که نشان‌دهنده کاهش درجه بلور شدگی ترکیب NiO/PVC به واسطه افزایش مقدار PVC و متعاقب آن تشکیل فازهای شبه آمورف می‌شود. فازهای آمورف معمولاً در مقایسه با فازهای بلوری جریان نشتی کمتری دارند.

شکل ۲ تصاویر X-map مربوط به نانوبلورک‌های هیبریدی NiO/PVC با غلظت ۱:۲۵۰ را نشان می‌دهد. در این تصویر توزیع یکنواخت و همگن مقادیر نیکل، کربن، سدیم و اکسیژن در نانوبلورک NiO/PVC دیده می‌شود. از این تصاویر به وضوح دیده می‌شود که حضور ماده آلی PVC در ماتریس NiO مانع از کلوخه‌ای شدن نمونه‌ها شده است. کلوخه‌ای شدن ذرات در سطح، زبری سطح را به طور قابل توجهی افزایش داده باعث افزایش قابل توجه تله‌ها در سطح نمونه می‌شود که خود کاهش تحرک پذیری حامل‌ها را در سطح موجب می‌گردد.

شکل ۳ تصاویر سه بعدی AFM مربوط به نمونه‌های NiO و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی NiO/PVC با غلظت‌های مختلف PVC نمونه‌های سنتز شده در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد را نمایش می‌دهد. از تصاویر سه بعدی AFM روشن است که افزایش مقدار PVC در نمونه‌های نانوکامپوزیت هیبریدی NiO/PVC منجر به ایجاد سطوح صاف می‌شود که این هموار بودن در نمونه NiO/PVC با غلظت ۱:۲۵۰ بیشتر از بقیه نمونه‌هاست. در جدول ۱ پارامترهای زبری سطح، زبری متوسط و دیگر پارامترهای مربوط به نمونه‌ها با استفاده از تکنیک DME-SPM، جمع‌آوری شده است. زبری سطح به علت اختلال ناشی از انباشت ذرات در سطح به وجود می‌آید و باعث کاهش تحرک پذیری حامل‌ها در سطح می‌شود. این امر موجب افزایش ولتاژ آستانه و کاهش ثابت دی‌الکتریک می‌شود. مطلوب‌ترین نتایج، مربوط به نمونه NiO/PVC با غلظت ۱:۲۵۰ می‌باشد که منجر به تقویت خواص الکتریکی آن می‌شود. پیش‌بینی می‌شود که نمونه NiO/PVC با این

غلظت به واسطه سطوح صاف و محکم، نقش مسدودکننده خوبی در جلوگیری از رشد لایه میانی SiO<sub>2</sub> در MOSFET داشته باشد.

برای توصیف خواص الکتریکی، قرص‌هایی از نانوپودر هیبریدی NiO/PVC تهیه و ظرفیت خازن‌ها را با استفاده از دستگاه GPS 132 A تعیین و سپس با استفاده از فرمول  $C = \frac{K\epsilon_0 A}{d}$  ثابت دی الکتریک آن‌ها را محاسبه کردیم. نتایج حاصل در جدول ۲ آمده است. این نتایج نشان می‌دهند که با اضافه کردن ماده PVC در نمونه NiO ثابت دی الکتریک به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و برای نمونه NiO/PVC با غلظت ۱:۲۵۰ به بیشینه مقدار خود می‌رسد. اندازه ثابت دی الکتریک برای نمونه NiO/PVC با غلظت ۱:۲۵۰ و در دمای ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، برابر ۶۸/۰۹۹ به دست آمده است. فرمول پل-فرانکل وابستگی بین چگالی جریان و ثابت دی الکتریک را تعیین می‌کند [۱۴]:

$$J_{PF} = J_0 \exp\left(\frac{-q(\phi_{PF} - \sqrt{qE/\pi\epsilon\epsilon_0})}{KT}\right) \quad (2)$$

که در آن  $\epsilon$  ثابت دی الکتریک،  $\phi_{PF}$  پتانسیل گیرانداز،  $E$  میدان الکتریکی و همچنین  $K$  نیز ثابت بولتزمن است. مشاهده می‌شود که اثر پل-فرانکل به خاطر وجود تله‌هایی که به واسطه ترازهای ناکاملی ایجاد شده، می‌تواند باعث جذب سطحی اتم‌های اکسیژن حاضر در نواحی مرزدانه شود. این اثر موجب تغییر خواص الکتریکی نانوساختارها می‌شود. از این رابطه ملاحظه می‌شود که چگالی جریان ناشی با ثابت دی الکتریک رابطه عکس دارد. به عبارتی با افزایش ثابت دی الکتریک اندازه جریان ناشی کاهش می‌یابد بنابراین نمونه NiO/PVC با غلظت ۱:۲۵۰ دارای کمترین جریان ناشی است.

#### ۴- نتیجه گیری

در تجربه انجام شده خواص الکتریکی نانوکامپوزیت هیبریدی NiO/PVC با روش سل-ژل، مطالعه گردید. تحلیل‌های XRD آشکار می‌کند که نانوکامپوزیت هیبریدی در فازهای بس بلوری شکل می‌گیرد که نشان‌دهنده کاهش درجه بلور شدگی ترکیب NiO/PVC تابعی از افزایش مقدار PVC و متعاقب آن تشکیل فازهای شبه آمورف است.



معادله (۲) نشان می‌دهد که افزایش ثابت دی‌الکتریک متناسب با کاهش جریان نشتی است. مطابق نتایج به دست آمده از داده‌های تجربی (نتایج جدول ۱ و ۲)، نمونه NiO/PVC با غلظت ۱:۲۵۰ بیشترین مقدار ثابت دی‌الکتریک را دارد و نسبت به سایر نمونه‌ها می‌تواند به عنوان یک ماده گیت دی‌الکتریک مناسب برای OFET‌های تولیدی آینده معرفی گردد.

## ۵- منابع

- [1] S.M. Sze; “*Semiconductor Devices: Physics and Technology*”; 3<sup>rd</sup> edition, Wiley, New York (1985) 139.
- [2] J.L. Almaral-Sa’ncheza, E. Rubio, A. Mendoza- Galva’na, R. Ramí-rez-Bon; “Red colored transparent PMMA- SiO<sub>2</sub> hybrid films”; *Journal of Physics Chemistry Solids* **66** (2005) 1660-1667.
- [3] N. Gang, Y. Wu<sup>1</sup>, B. Lili, G. Hao, Z. Wenhao and G. Jinzhang “Preparation of Ps/SiO<sub>2</sub> nanocomposites by surface-initiated nitroxide-mediated radical poly-merization”; *Chinese Science Bulletin* **51**, No. 13 (2006) 1644-1647.
- [4] A. Fidalgo and L. Ilharco; “The defect structure of sol- gel derived silica/polytetrahydrofuran hybride films by FTIR”; *Journal of Non-Crystal Solids* **283**, No. 1 (2001) 144-154.
- [5] A. Bahari, P. Morgen and K. Pederson; “Growth of ultrathin silicon nitride on Si (111) at low temperature”, *Phys Rev B* **72**, No. 20 (2005) 205323.
- [6] A. Bahari, U. Robenhagen, P. Morgen, and Z.S. Li; “Growth of a stacked Silicon Nitride/Silicon Oxide Dielectric on Si(100)”; *Journal of Vacuum Science and Technology B* **24** (2005) 2119-23.
- [7] P.R. Giri; “Atom capture by nanotube and scaling anomaly”, *Int. J. Theor. Phys.* **47**, No. 6 (2008) 1776-1783.
- [8] M. Wu, Y.I. Alivov and H. Morkoc; “High -k dielectrics and advanced channel concepts for Si MOSFET”; *J. Mater. Sci: Mate. Electron* **19**, No. 6 (2008) 915-951.

- [9] G.D. Wilk, R.M. Wallace and J.M. Anthony; “High-k gate dielectric current status and material properties considerations”; *J. Appl. Phys.* **89**, No. 10 (2001) 5243-5275.
- [10] H. Wu, Zhao, Y and M.H. White; “Quantum mechanical modeling of MOSFET gate leakage for high -k gate dielectric”; *Solid -State Electron* **50**, No. 6 (2006) 1164-69.
- [11] M. Zaharescu; “Correlation between the method of preparation and the properties of sol-gel HfO<sub>2</sub> thin films”; *J. Non -Crystalline solids* **354**, No. 6 (2008) 409-415.
- [12] S. Dell; “Structural Characterization of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Zener-Pinned Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> by NMR, XRD and Electron Microscopy”; *Journal of Physics and Chemistry* **111**, No. 37 (2007) 13740-13746.
- [13] A. Chin; “High quality La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gate dielectrics with equivalent oxide thickness 5-10 Å”; *Symposia VLSI Technology and Technology Digest* **16** (2010) 17-24.
- [14] S. Zafar, A. Kumar, E. Gusev and E. Cartier; “Threshold voltage instabilities in high-k gate dielectric stacks”, *IEEE Trans; Device Mater. Reliab.* **5**, No. 1 (2005) 45-64.
- [15] N. Hirashima, M. Nakamura, M. Iizuka, and K. Kudo; “Fabrication of Organic Vertical-Type Field Effect Transistors Using Polystyrene Spheres as Evaporation Mask”; *Super-Functionality Organic Devices* **6** (2010) 158-160.
- [16] A.L. Deman and J. Tardy; “PMMA-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> bilayer gate dielectric for low operating voltage organics FETs”; *Organic Electronics* **6**, No. 2 (2005) 55-104.
- [17] A. Bahari and M. Jamali; “Organic Thin Film Transistors with Polyvinylpyrrolidone/Nickel Oxide Sol-Gel Derived Nanocomposite Insulator”; *Journal of Nanostructures* **2**, No. 5 (2012) 313-316.
- [18] M. Alagiri, S. Ponnusamy and C. Muthamizhchelvan; “Synthesis and characterization of NiO nanoparticles by sol-gel method”; *J. Matter. Sci. Matter. Electron* **23**, No. 14 (2012) 728-737.
- [19] G. Broaza, K. Piszczek, K. Schulte and T. Sterzynski; “Nanocomposites of Polyvinyl chloride with CNT”; *Composites Sci. and Technol.* **67**, No.5 (2007) 890-894.

[20] R.O. Ponce, A. Facchetti and T.J. Marks; “High-k Organic and Hybrid Dielectrics for Low- Voltage Organic field- Effect Transistors”; *Chem. Rev* **110**, No. 1 (2010) 205-239.

[21] X. Wei, G. Fu, H. Zhong, Li. Xie, Jin. Xiao, Y. Xie, Y. Wang, Z. Zhang, Y. Yang, H. Wu; “Electro deposition of Nickel Hydroxide Films on Nickel Foil and Its Electrochemical Performances for Supercapacitor”; *International Journal of Electrochemical Science* 4, No. 1 (2009) 1052 – 1062.

[22] S. Dibenedetto, A. Facchetti, M. Ratner and T.J. Marks; “Charge Conduction and Breakdown Mechanisms in Self-Assembled Nanodielectrics”; *J. Am. Chem. Soc.* **131**, No. 20 (2009) 7158-7168.