

## تأثیر دمای بازپخت بر تحرک پذیری و مشخصه‌های الکتریکی گیت دی الکتریک NiO/PVC

امیر حیاتی

دانشکده فنی و حرفه‌ای امام محمد باقر(ع)، دانشگاه فنی و حرفه‌ای مازندران، ساری

پست الکترونیکی: amhaiati@tvu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۲۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۱۱/۱۳)

### چکیده

در ترانزیستورهای اثر میدانی ضخامت گیت دی الکتریک اکسید سیلیکون ۱ تا ۲ نانومتر است. بنابراین کاهش ضخامت گیت به ۱ نانومتر برای تولیدات آتی، سبب افزایش جریان تونلی و نشتی می‌شود. یکی از گزینه‌های مطلوب به عنوان گیت دی الکتریک، نانو کامپوزیت‌های هیبریدی هستند که ثابت دی الکتریک بالا و گاف نوازی پهنی داشته و در تماس با زیرلایه یا بستر سیلیکونی تعادل حرارتی دارند. در کار حاضر، نمونه‌های هیبریدی NiO/PVC با غلظت‌های مختلف ماده آلی را به عنوان یک ماده دی الکتریک مناسب به روش سل ژل سنتز کرده و تلاش کردیم به کمک تکنیک تجربی تحلیل حرارتی و مشتق آن، کاهش وزن نمونه‌ها را در مقابل حرارت بررسی کنیم. برای اندازه‌گیری تحرک‌پذیری، ثابت دی الکتریک و رسانندگی نمونه‌های مزبور در دماهای بازپخت مختلف با دستگاه A۱۳۲GPS، از محاسبه انرژی فعال‌سازی در نمودار لگاریتمی رسانندگی برحسب عکس دما استفاده کردیم. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که نمونه NiO/PVC:۲ به جهت دارا بودن ثابت دی الکتریک بالاتر جریان نشتی کمتری دارد. رفتار همه نمونه‌ها نسبت به افزایش دما تا دماهای ۴۰۰ کلوین تقریباً یکسان است. تفاوت میان نمونه‌ها در دماهای بالاتر بروز می‌کند، به صورتی که نمونه NiO/PVC:۲ در دماهای بالای ۴۰۰ کلوین تحرک‌پذیری بالاتری دارند.

واژه‌های کلیدی: نانوترانزیستور ماسفت، گیت دی الکتریک، نانو کامپوزیت هیبریدی NiO:PVC، روش سل ژل

### ۱. مقدمه

آلی-غیرآلی به دلیل دارا بودن مشخصه‌های کیفی مناسب و مطلوب، در کانون توجهات قرار گرفته‌اند.

از این رو از اکسید نیکل به عنوان یک ماده غیر آلی و پلی وینیل کلرید به عنوان ماده آلی با مشخصه‌های کاتالیستی و دی الکتریکی مطلوب استفاده کردیم [۵]. پلی وینیل کلرید به علت ثابت دی الکتریک بالا، سنتز در

درسال‌های اخیر، ضخامت گیت دی الکتریک ترانزیستورهای اثر میدانی حدود یک نانومتر است [۱-۳] بنابراین جریان‌های نشتی، تونلی و نفوذ اتم‌های سبک نظیر بور باعث افت کارایی گیت دی الکتریک می‌شوند [۴]. برای حل این مشکلات نانو کامپوزیت‌های هیبریدی

جدول ۱. ثابت دی‌الکتریک و سایر پارامترهای مربوط به قرص‌های نانوکامپوزیتی.

نمونه	ضریب کیفیت	توان اتلافی	ظرفیت بر حسب پیکو فاراد	ثابت دی‌الکتریک
NiO	۱/۰۰۹	۰/۹۹	۱۷۳/۵	۵۲/۰۴۷
NiO/PVC:۱	۱/۰۱۷	۰/۹۳	۱۸/۱	۵۴/۰۲۱
NiO/PVC:۲	۰/۹۵۰	۱/۰۵	۲۲/۵	۶۸/۰۹۹
NiO/PVC:۳	۱/۰۱۱	۰/۹۸	۱۹/۴	۵۸/۱۰۷

دمای پایین و ارزان بودن برای ما اهمیت دارد. نتایج کار نشان می‌دهند که نانو کامپوزیت هیبریدی NiO/PVC:۲ در میان سایر نمونه‌ها از ثابت دی‌الکتریک بالا، جریان نشستی پایین و تحرک‌پذیری بالای حامل‌ها برخوردار است و از این رو برای گیت دی‌الکتریک نانوترانزیستورهای آتی، نسبت به دی‌اکسید سیلیسیم ویژگی‌های الکتریکی مناسب تری را دارند.

## ۲. تجربی

برای سنتز نانو ذرات NiO/PVC با استفاده از روش سل-ژل از پیش ماده نیترات نیکل ۶ آبه ( $\text{NiNO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )، پلی وینیل کلرید و آب دو بار یونیده به عنوان حلال استفاده کردیم. ابتدا ۵ گرم نیترات نیکل شش آبه را در ۵۰ میلی لیتر آب مقطر حل کرده و برای ۱۵ دقیقه در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد تحت چرخش مغناطیسی قرار دادیم. پس از افزودن ۰/۶ گرم NaOH به محلول و تنظیم pH بین ۷-۱۰ مقدار ۰/۱ گرم PVC را به ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر افزوده و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد روی همزن مغناطیسی قرار می‌دهیم. پس از ده دقیقه، این محلول را به صورت قطره قطره به ظرف اول اضافه کرده و به مدت ۴۸ ساعت روی همزن مغناطیسی در دمای اتاق قرار دادیم. ژل به دست آمده ابتدا به مدت ۲۴ ساعت و در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در کوره الکتریکی خشک شده و در نهایت پودر حاصل از آن را در دماهای ۱۵۰،

۲۵۰ و ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد مورد بازیخت قرار دادیم. برای ساختن غلظت‌های ۰/۲ و ۰/۴ گرم از PVC، آزمایش را با همین شرایط تکرار کردیم که به صورت NiO/PVC:۱، NiO/PVC:۲ و NiO/PVC:۳ مشخص شده‌اند.

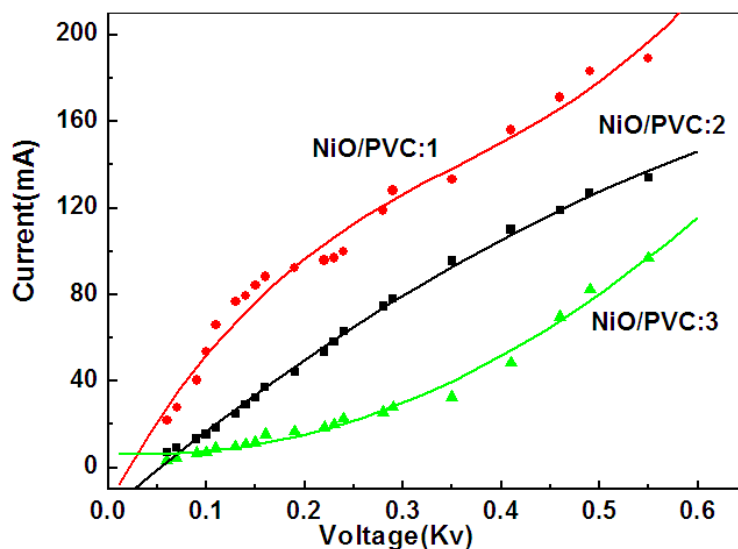
## ۳. نتایج و بحث

همانطور که در جدول ۱ ملاحظه می‌کنید ظرفیت، ضریب کیفیت، توان اتلافی و ثابت دی‌الکتریک قرص‌های ساخته شده از نمونه‌ها به ضخامت ۳ میلی‌متر و قطر ۱/۲ سانتی‌متر را با دستگاه GPS۱۳۲A و در بسامد یک کیلوهرتز اندازه گرفتیم. مطابق داده‌های موجود در جدول ۱ نمونه NiO/PVC:۲ ثابت دی‌الکتریک بزرگ تری دارد.

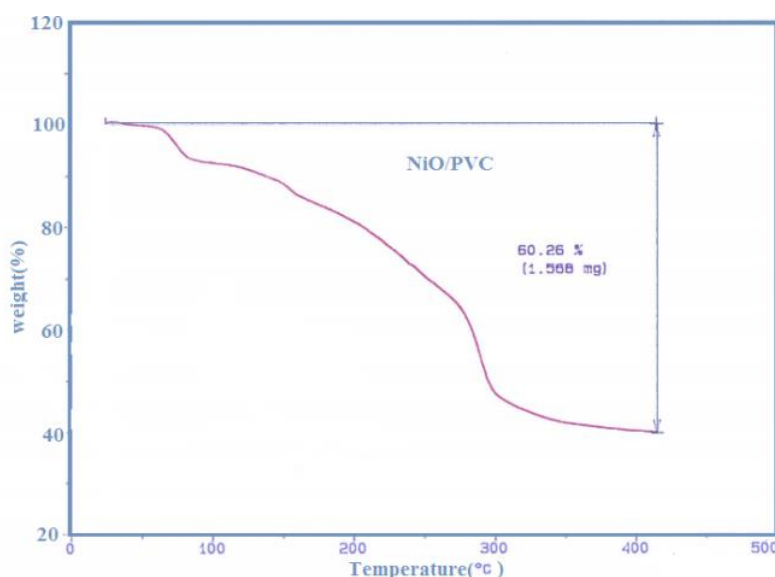
بیشترین مقدار ضریب کیفیت  $Q_F$  بیانگر کمترین آهنگ انرژی از دست رفته نسبت به انرژی ذخیره شده است چون مطابق رابطه (۱)، هر چه ضریب کیفیت بالاتر باشد زمان واهلش کمتر است و از آنجا که ضریب توان اتلافی از معکوس ضریب کیفیت به دست می‌آید پس با افزایش ضریب اتلافی، انرژی بیشتری تلف می‌شود.

$$Q_F = \left\{ \begin{array}{l} \text{نسبت انرژی ذخیره شده در خازن به} \\ \text{انرژی تلف شده در یک دوره} \end{array} \right\} \times 2\pi, \quad (1)$$

$$Q_F = \frac{1}{D_F}, \quad (2)$$



شکل ۱. نمودار I-V مربوط به نمونه‌های NiO/PVC.



شکل ۲. منحنی TGA مربوط به نانوکامپوزیت هیبریدی NiO/PVC:۲.

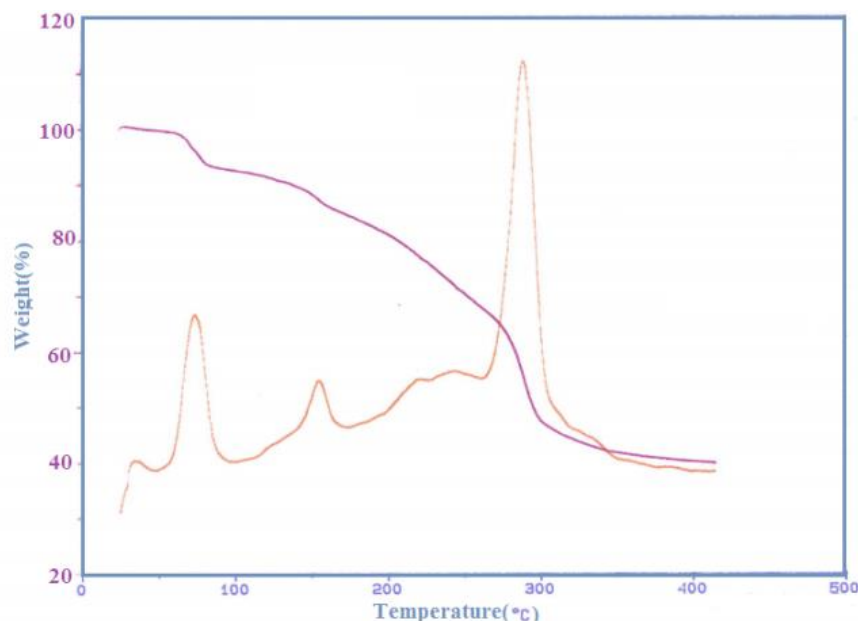
NiO/PVC:۲ به طور تقریبی به صورت یک خط است که رفتار اهمی این نمونه را نشان می‌دهد. رفتار غیراهمی برای دیگر نمونه‌ها، به مقاومت ظاهری ارتباط پیدا می‌کند که می‌توان آن را به صورت تماس شوتکی لحاظ کرد.

شکل ۲ منحنی TGA نمونه‌های NiO/PVC را نشان می‌دهد که کاهش وزن از دمای ۵۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد.

شکل ۱ منحنی‌های جریان-ولتاژ مربوط به نمونه‌های NiO/PVC را نشان می‌دهد که از برازش نقاط به دست آمده از نتایج تجربی به صورت یک معادله درجه شش مطابق رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$I = aV^6 + bV^5 + cV^4 + dV^3 + eV^2 + fV + g, \quad (3)$$

همانطور که ملاحظه می‌کنید میان جریان و ولتاژ رابطه خطی برقرار نیست و تنها در گستره معینی از ولتاژها رفتار نمونه



شکل ۳. منحنی DTG مربوط به نانوکامپوزیت هیبریدی NiO/PVC:۲.

به این مفهوم است که سازوکار شیمیایی تخریب عوض شده است.

افزایش تحرک پذیری حامل‌ها و کاهش جریان نشتی سبب کاهش ولتاژ آستانه می‌شود که یکی از مشخصه‌های اصلی درانتخاب گیت دی‌الکتریک است [۶]. برای تعیین خواص الکتریکی نمونه‌ها از فرمول آرنیوس استفاده کردیم که به صورت رابطه (۴) است [۷].

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_a}{K_B T}\right), \quad (4)$$

$\sigma$  ضریب رسانندگی،  $E_a$  انرژی فعال سازی،  $\sigma_0$  رسانندگی الکتریکی بیشینه و  $K_B$  ثابت بولتزمن است.

مطابق شکل ۴ برای به دست آوردن تحرک پذیری حامل‌ها،

نمودار  $\log \sigma$  را برحسب  $\frac{1}{T}$  رسم کرده و شیب نمودار را به دست آوردیم که معرف  $\frac{E_a}{K_B}$  است و از روی آن می‌توان انرژی فعال سازی و  $\sigma_0$  را به دست آورد.

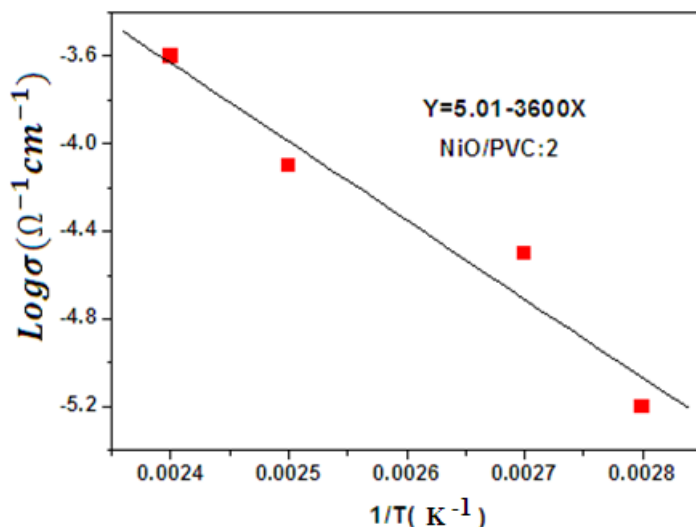
$$\log \sigma = \log \sigma_0 - \frac{E_a}{K_B T}, \quad (5)$$

در ادامه با استفاده از رابطه (۶) به محاسبه تحرک پذیری حامل‌ها پرداختیم که در آن  $\mu$  تحرک پذیری حامل‌ها و  $N_0$  چگالی

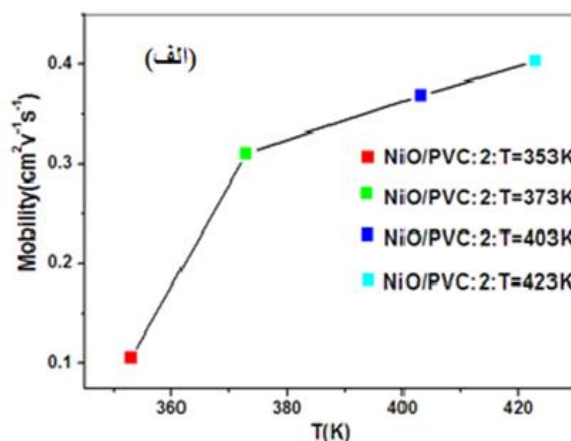
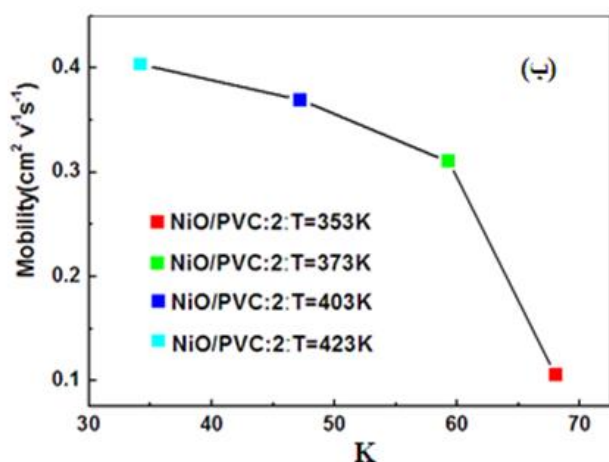
سه تغییر عمده در کاهش وزن از منحنی<sup>۱</sup> مشاهده می‌شود که اولین قله از آهنگ کاهش وزن بین ۵۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ممکن است مربوط به از دست دادن آب پیش ماده‌ها و تجزیه ناخالصی‌ها و همچنین مواد آلی باشد. قله دوم کاهش وزن بین ۱۳۰ و ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به تجزیه هیدروکسید نیکل در پیش ماده مربوط است که در آن فاز بلوری NiO از  $Ni(OH)_2$  شکل می‌گیرد. سومین قله کاهش وزن بین ۲۹۰ تا ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه نیترات نیکل در پیش ماده‌ها است. از طرفی در این بازه دمایی، نمونه ۶۰/۲۸ درصد وزن خود را از دست داده و تخریب نمونه تا حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مقدار رطوبت و حلال‌های باقیمانده در نانوکامپوزیت مربوط می‌شود.

برای اینکه بتوانیم به صورت دقیق سرعت تخریب نمونه را تعیین کنیم از مشتق منحنی TGA تحت عنوان نمودار DTG استفاده کردیم. همانطور که در شکل ۳ می‌بینید بیشترین سرعت تغییرات در منحنی DTG مربوط به نقاطی است که در آن قله مشاهده می‌شود. همچنین هر جا که شیب منحنی وزن ماده برحسب دما عوض شود

۱. Thermogravimetric analysis



شکل ۴. نمودار لگاریتم رسانندگی نمونه NiO/PVC:۲ برحسب عکس دما.



شکل ۵. (الف) نمودار تحرک پذیری نمونه NiO/PVC:۲ برحسب دما و (ب) نمودار تحرک پذیری نمونه NiO/PVC:۲ برحسب ثابت دی الکتریک.

۵. ب ملاحظه می کنید که تحرک پذیری با افزایش ثابت دی الکتریک کاهش یافته است که ممکن است به علت افزایش جایگزیدگی حامل ها به وسیله قطبش الکترونی در دی الکتریک با ثابت دی الکتریک بالا باشد. همچنان که فصل مشترک دی الکتریک-نیم رسانا بیشتر قطبی می شود چگالی حالت های جایگزیده بیشتر می شود. یعنی برهمکنش میان حامل با محیط دی الکتریک به وسیله نزدیک ترین دو قطبی ها غالب می شود. این منجر به برهمکنش پلارون ها با جرم موثر بالا در کانال با

حالت های موثر در ترازهای رسانش بلور است. مقدار تقریبی  $N_v$  برابر  $10^{21}$  در نظر گرفته شده است [۸]. در ادامه نتایج حاصل به همراه تحلیل منحنی ها آمده است.

$$\sigma_0 = eN_v \mu, \quad (6)$$

در شکل ۵. الف می بینیم که با افزایش دما از ۳۵۳ تا ۴۲۳ کلون، تحرک پذیری حامل ها افزایش یافته است؛ زیرا افزایش دمای بازپخت موجب افزایش چگالی حامل ها در فصل مشترک و در نهایت افزایش تحرک پذیری می شود. همچنین در شکل

### ۵. نتیجه گیری

برای تعیین خواص الکتریکی و مکانیکی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی NiO/PVC تلاش کردیم اثر غلظت ماده آلی و دما را بر نتایج بررسی کنیم. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های NiO/PVC از نظر غلظت تا حدودی رفتاری مشابه دارند، اما نمونه ۲: NiO/PVC در میان سایر نمونه‌ها ثابت دی‌الکتریک بالاتری دارد. بنابراین برای جایگزینی در ترانزیستورهای ماسفت به جای دی‌اکسید سیلیسیم پیشنهاد می‌شوند.

دوقطبی‌ها می‌شود که باعث کاهش تحرک‌پذیری حامل‌ها می‌شود.

برای محاسبه جریان نشستی، نسبت  $\frac{I_{on}}{I_{off}}$  را محاسبه می‌کنیم که در OFET های نوع P از فرمول زیر به دست می‌آید [۹].

$$\frac{I_{on}}{I_{off}} = 1 + \frac{\mu CV_d}{\sigma rd}, \quad (7)$$

در این فرمول با استفاده از داده‌های جدول ۱ و مقادیر متعارف مربوط به ترانزیستورهای OFET به ازای یک ولتاژ معین

$(V_d = -5V)$  نسبت  $\frac{I_{on}}{I_{off}} \approx 10^3$  به دست می‌آید که یک

نسبت قابل توجه است.

### مراجع

1. H Klauk, et al., *J. Appl. Phys.* **92**(2002) 5259.
2. PK Roy and IC Kizilyalli, *Appl. Phys. Lett.* **72**(1998) 2835.
3. M. Shtein, J. Mapel, J.B. Benziger, and S.R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.* **81**(2002)268.
4. Y C Yeo, et al., *Appl. Phys. Lett.* **81**(2002) 2091.
5. A Hayati, and A Bahari, *J Nanostruct*, **4**(2014)
6. PD Ye, et al., *Appl. Phys. Lett.* **86**(2005) 063501.
7. S Nakayama, and M Sakamoto, *J EUR CERAM SOC.* **18**(1998) 1413.
8. TB Singh, et al., *Adv. Mater.* **17**(2005) 2315.
9. S Liu, et al., *Adv. Mater.* **21**(2009) 1217.