سومین کنفرانس تخصصی سه شنبه و چهارشنبه ۲۹ و ۳۰ اردیبهشت ماه ۱۳۹۲
فناوری نانو در صنعت برق و انرژی

No. 15-F-AAA-0000

ساخت نانوژنراتور بر اساس نانوصفحات اکسیدروی برای برداشت انرژی‌های محیطی

مدرسی نژاد، الهام؛ درباری، سارا
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
دانشگاه تربیت مدرس
تهران، ایران
elham.modaresi@yahoo.com

چکیده — در میان نانوساختارهای اکسیدروی، اغلب نانوسیم‌ها برای ساخت نانوژنراتور استفاده شده است. با این حال اخیرا نشان داده شده است که نانوصفحات اکسیدروی علاوه بر نسبت سطح به حجم بالا از پایداری مکانیکی بهتری نسبت به نانوسیم‌های اکسیدروی برخودار هستند و کاندیدای مناسبی برای ساخت نانوژنراتور به حساب می‌آیند. در این مقاله، ساخت نانوژنراتور بر اساس نانوصفات اکسیدروی را گزارش می‌کنیم. نانوصفحات اکسیدروی به روش هیدروترمال روی لایه‌ی آلومینیومی رشد داده شده‌اند. همچنین نیکل به عنوان الکترود بالایی نانوژنراتور استفاده شده و اتصال شاتکی با طرف دیگر نانوساختارها ایجاد می‌کند. بعد از بسته‌بندی ساختار، مشخصه الکتریکی ساختار قبل و بعد از اعمال نیروی خارجی مورد بررسی قرار گرفت. توان خروجی نانوژنراتور ساخته شده بر اساس نانوصفحات اکسیدروی، به ازای اعمال نیروی ۳ mg، برابر ۰٫۳۷ $\mu W/cm^2$ اندازه گیری شد. سپس با جایگزین کردن الکترودی با ناهمواری نانومتری به جای الکترود شاتکی، توان خروجی به دوبرابر حالت اولیه افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی — نانوژنراتور، نانوصفحات اکسیدروی، برداشت انرژی

۱. مقدمه

سیستم انرژی در جهان عمدتا بر پایه‌ی منابع اولیه انرژی از قبیل نفت، گاز و زغال سنگ استوار است. سوخت‌های فسیلی علاوه بر این که تجدید ناپذیر هستند، احتراق آن باعث آلودگی آب و هوا نیز می‌شود. یکی از راه‌کارهای کاهش وابستگی جهانی به منابع انرژی سوخت‌های فسیلی، برداشت انرژی از منابع محیطی است. سلول‌های خورشیدی و نانوژنراتورهای پیزوالکتریک می‌توانند بعنوان جایگزین پاک و تجدیدپذیر، سوخت‌های فسیلی مورد استفاده قرار گیرند.

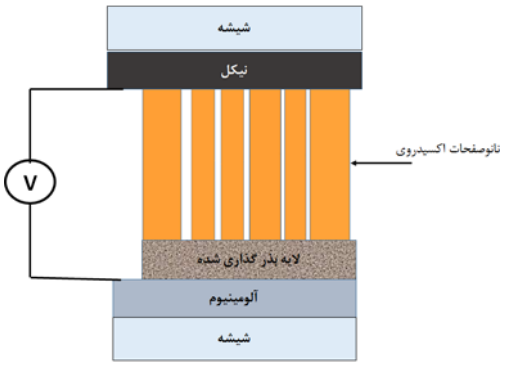
نانوژنراتورهای پیزوالکتریک، در این میان به عنوان منابع مقرون به صرفه برای برداشت انرژی از انرژی مکانیکی محیطی مطرح هستند. اولین نانوژنراتور در سال ۲۰۰۶ توسط Wang و همکارانش ساخته شد. این نانوژنراتور شامل یک نانوسیم اکسیدروی که توسط نیروی اتمی میکروسکوپی تحریک می‌شد، بود [۱].

در سال‌های اخیر طرح‌های زیادی از نانوژنراتور با استفاده از نانوساختارهای یک‌بعدی اکسیدروی (نانوسیم‌ها و نانولوله‌ها) مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله، ساخت نانوژنراتور بر اساس نانوصفحات اکسیدروی که به روش هیدرو ترمال رشده کرده اند را گزارش می‌کنیم. نانوصفحات اکسیدروی استحکام مکانیکی بالاتری نسبت به

نانوسیم‌های اکسیدروی دارند، که برای ساخت نانوژنراتور کاندیدای بهتری هستند [۲]. بعلاوه هنگامی که سطوح مسطح به عنوان الکترود شاتکی عمل می‌کنند، منجر به تماس با احتمال کم بین نانوسیم‌های اکسیدروی و الکترود بالا، در هنگام هل دادن و یا خم کردن می‌شود. بنابراین چگالی جریان خروجی کم خواهد بود [۳]. بنابراین در نهایت از الکترود ناهموار به عنوان الکترود بالای نانوژنراتور استفاده کردیم و خروجی نانوژنراتور در این حالت افزایش پیدا کرد.

۲. مراحل ساخت نانوژنراتور

شماتیکی از نانوژنراتور ساخته شده در شکل ۱ نشان داده شده است. قطعه ساخته شده از سه قسمت مهم نانوصفحات اکسیدروی، لایه نیکل (تماس شاتکی با نانو ساختارها) و لایه آلومینیومی (تماس اهمی با نانوساختارها) تشکیل شده است. در ادامه خلاصه‌ای از مراحل ساخت توضیح داده شده است. مرحله اول بذر گذاری است. در این مرحله لایه ای از بافت نانوبلوراکسیدروی با ضخامت ۱۰۰ نانومتر که در جهت محور C است، روی بستر آلومینیومی پوشش داده می‌شود. برای بذرگذاری روشی که توسط Lori E. Greene و همکاران [۴] معرفی شده، در این تحقیق استفاده می‌شود. در مرحله بعد نانوصفحات اکسیدروی به روش هیدروترمال روی بستر آلومینیومی رشد داده می‌شوند. در این روش ۰.۰۲ مولار زینک نیترات و هگزامتیل تترامین در دمای ۹۰ درجه با هم واکنش می‌دهند و نمونه بذر گذاری شده به مدت سه ساعت در محلول آماده شده قرار می‌گیرد [۵].



شکل ۱: شمای کلی نانوژنراتور ساخته شده بر پایه نانوصفحات اکسیدروی.

پس از اینکه رشد نانوصفحات اکسیدروی کامل شد، لایه نیکل به عنوان الکترود بالا روی نانوصفحات اکسیدروی قرار می‌گیرد و نانوژنراتور ساخته شده برای اندازه گیری‌های الکتریکی بسته بندی می‌شود.

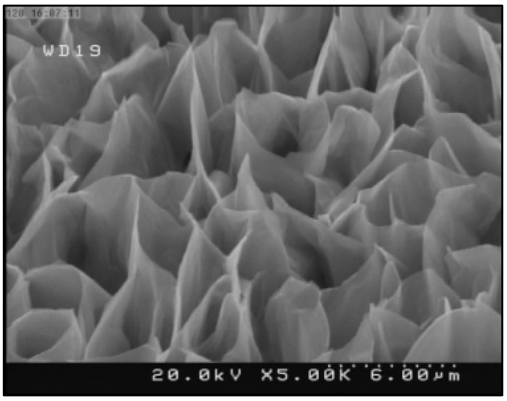
در ادامه برای افزایش خروجی به جای لایه نیکل صاف، از بستر شیشه‌ای که روی آن نانوسیم‌های کوتاه برای ایجاد سطح ناهموار رشد داده شده‌اند و سپس لایه نیکل روی آن قرار می‌گیرد، استفاده شده است. به طوری که عملکرد انرژی مهار شده و ثبات سیستم را بهبود می‌یابد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. ویژگی های ساختاری نانو صفحات اکسیدروی

شکل ۲ تصویر SEM از نانوصفحات اکسیدروی که روی بستر آلومینیومی رشد داده شده‌اند، را نشان می‌دهد.

همانطور که در تصویر مشاهده می‌کنیم، رشد یکنواخت و هم‌تراز از نانوصفحات اکسیدروی را داریم. ابعاد نانوصفحات در حدود میکرومتر و ضخامت آن در حدود ۵۰ نانومتر است.



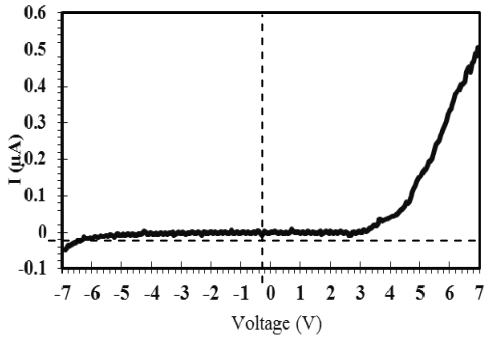
شکل۲: تصاویر SEM از نانوصفحات اکسیدروی روی بستر آلومینیومی

۳.۲. عملکرد نانوژنراتور

در نانوژنراتور ساخته شده، از آلومینیوم به عنوان الکترود پایینی که با نانوصفحات اتصال اهمی و از نیکل نیز به عنوان الکترود بالایی که با نانوصفحات اکسیدروی اتصال شاتکی برقرار می‌کند، استفاده می‌شود. هنگامی که به سیستم نیرویی وارد می شود، نانوصفحات تحت فشار قرار می‌گیرند. تنش در نانوصفحات باعث القای پتانسیل پیزو در آن و در نتیجه تغییر مشخصه الکتریکی می‌شود، زیرا سد پتانسیل اتصال فلز- نیمه هادی، تحت تاثیر فشار وارده تغییر می‌کند.

مشخصه الکتریکی نانوژنراتور بدون اعمال نیرو

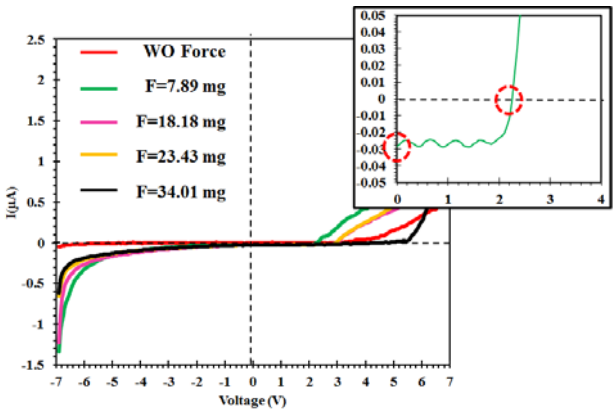
شکل ۳ مشخصه الکتریکی نانوژنراتور را در حالت بدون اعمال نیرو نشان می‌دهد. همانطور که در شکل دیده می‌شود، مشخصه حالت شاتکی دارد، که نشان دهنده اتصال شاتکی بین نانوصفحات و الکترود نیکل بالایی است. همچنین ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه آن صفر است، چون در این حالت به سیستم نیرو وارد نمی‌شود.



شکل ۳: منحنی جریان – ولتاژ نانوژنراتور در حالت بدون اعمال نیروی خارجی.

مشخصه الکتریکی نانوژنراتور تحت اعمال نیروهای مختلف

موقعی که نانوصفحه اکسیدروی در طول مرکز خود فشرده می‌شود، بارهای پیزو در سطح آن بوجود می‌آید، که موجب ایجاد پتانسیل پیزو در نانوصفحه می‌شود. طبق گزارش‌ها طرف کشیده شده و فشرده شده نانوصفحه به ترتیب پتانسیل مثبت و پتانسیل منفی به خود می‌گیرند[۱]. تنش در این حال باعث تغییر خروجی نانوژنراتور می‌شود.



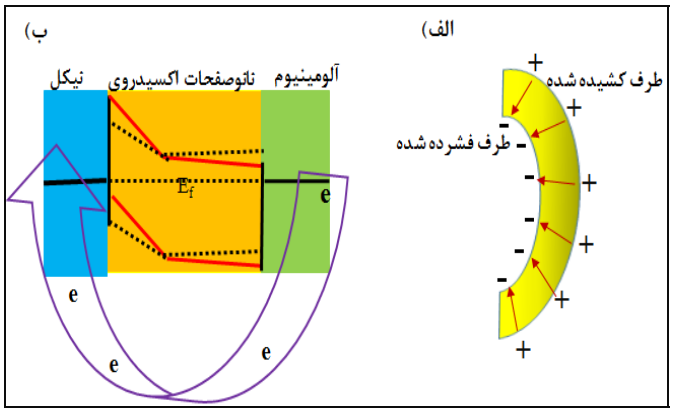
شکل ۴: منحنی جریان-ولتاژ با اعمال نیرو های مختلف خارجی (نیروهای قبل و بعد از اشباع).

در شکل ۴ مشخصه الکتریکی در حالت بدون اعمال نیرو با حالتی که به سیستم نیرو اعمال شده است، مقایسه می‌شود.

با توجه به شکل، با اعمال نیرو، ولتاژ مدار باز که نشان دهنده ولتاژ پیزوی نانوصفحات است، افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش نیرو دوقطبی‌های بیشتری در ساختار بوجود می‌آیند و در تولید ولتاژ خروجی شرکت می‌کنند.

منحنی جریان–زمان و ولتاژ–زمان

همانطور که قبلا اشاره شد، عملکرد اصلی نانوژنراتور تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی است. با منحرف شدن نانوصفحات اکسیدروی از حالت تعادل، دو قطبی‌های الکتریکی در سراسر نانوصفحات ایجاد می‌شود، جهت این دو قطبی‌ها جهت میدان پیزو در نانوصفحات را نشان می‌دهد، که از طرف کششی به سمت فشاری نانوصفحات است (شکل ۵. الف). میدان پیزو باعث حرکت الکترون‌های آزاد در نانوصفحات و در نتیجه ایجاد جریان در نانوژنراتور به شرطی که الکترود بالایی با طرف فشاری نانوصفحات در تماس باشد، می‌شود. جریان خروجی متناسب با اعمال نیروهای مختلف تغییر می‌کند. جریان تا زمانی ادامه دارد که کل الکترون‌های آزاد انتقال پیدا کنند و پشت سد شاتکی بین نیکل و نانوصفحات جمع شوند، سپس جریان صفر می‌شود (شکل۵. ب). بنابراین جریان خروجی در حالت بدون بایاس در زمان کوتاهی وجود دارد و پس از آن صفر می‌شود.

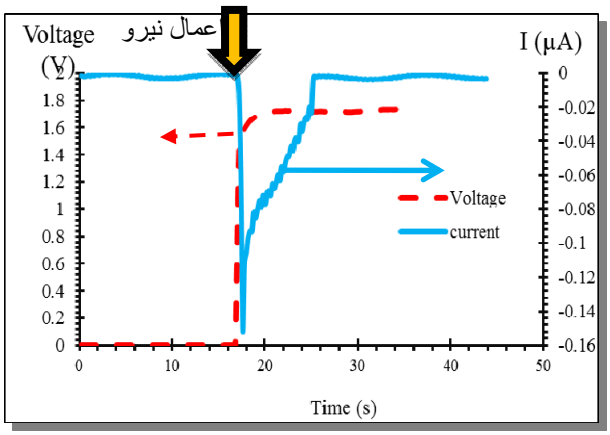


شکل ۵: الف) نانوصفحه اکسیدروی تحت اعمال نیروی خارجی ب) جهت انتقال الکترون در حالت بایاس مستقیم (خود بایاس) در فصل مشترک بین نانوصفحه اکسیدروی و فلز (اتصال شاتکی)

برای اندازه‌گیری ولتاژ پیزوالکتریک با اعمال نیروهای مختلف، نمودار ولتاژ– زمان به ازای جریان صفر نیز اندازه گرفته شد. تا هنگامی که نیرو به سیستم اعمال می‌شود، دوقطبی‌های الکتریکی در ساختار وجود دارند. بنابراین

ولتاژ پیزو بر خلاف جریان تا هنگامی که نیرو وجود دارد، مقدار ثابتی باقی می‌ماند.

شکل ۶ نمودار جریان–زمان و ولتاژ–زمان را به ازای نیروی ۳ mg نشان می‌دهد. با توجه به نمودار جریان– زمان با اعمال نیرو جریان تا حدود ۱۴۰ نانومتر افزایش می‌یابد، اما بعد از چند ثانیه به صفر می‌رسد. در حالی که ولتاژ مقدار به مقدار ثابت ۱٫۷ ولت می‌رسد و ثابت باقی می‌ماند. توان خروجی در این حالت حدود ۳۷۲ نانو وات بر سانتی مترمربع است.



شکل ۶: نمودار جریان و ولتاژ- زمان نانوژنراتور تحت تنش در حالت بدون بایاس.

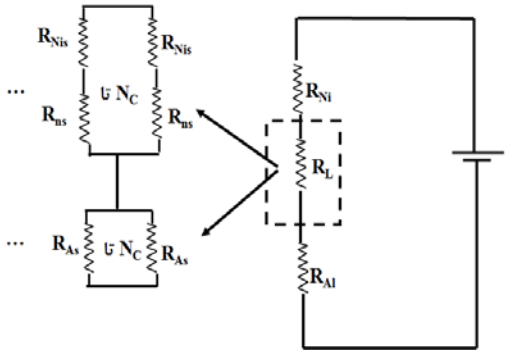
تأثیر پیوند شاتکی با سطح ناهموار بر خروجی نانوژنراتور ساخته شده

برای افزایش خروجی الکترود شاتکی با سطح ناهموار و تابع کار بالا بسیار مؤثر است. هنگامی که سطوح مسطح به عنوان الکترود بالا عمل می‌کنند، منجر به تماس با احتمال کم بین نانوصفحات اکسیدروی و الکترود بالا در هنگام هل دادن و یا خم کردن می‌شود. در نتیجه چگالی جریان خروجی کاهش پیدا می‌کند. در اینجا به جای لایه نیکل صاف، از بستر شیشه‌ای که روی آن نانوسیم‌های کوتاه برای ایجاد سطح ناهموار رشد داده شده‌اند و سپس لایه نیکل روی آن قرار می‌گیرد، استفاده شده است. به طوری که عملکرد انرژی مهار شده و ثبات سیستم را بهبود می‌بخشد. می‌توان دریافت که سطح ناهموار الکترود بالایی پتانسیل پیزوالکتریک و در نتیجه خروجی نانوژنراتور را افزایش می‌دهد.

شکل ۷ تصویر SEM نانوسیم‌های اکسیدروی کوتاه برای ایجاد ناهمواری که روی بستر شیشه ای رشد پیدا کرده‌اند، را نشان می‌دهد. در این حالت بسیاری از نانوصفحات اکسیدروی حتی با طول کوتاه در تماس با الکترود شاتکی قرار می‌گیرند و نانوصفحات بیشتری در تولید جریان شرکت می‌کنند. بنابراین هنگامی الکترود ناهموار به عنوان الکترود شاتکی در نانوژنراتور استفاده می‌شود، انتظار می‌رود که باعث افزایش فعالیت نانوصفحات در تماس با الکترود بالا شود، در نتیجه توان تولیدی افزایش می‌یابد.

شکل ۷: تصویر SEM نانوسیم‌های کوتاه اکسیدروی

مدار معادل الکتریکی نانوژنراتور، برای نشان دادن شرایط تماس بین نانوسیم‌ها و الکترودها در شکل ۸ نشان داده شده است. در این مدار مقاومت الکترود پایینی، الکترود بالایی با R_{Ni} و R_{Al} نشان داده می‌شود. همچنین R_L، نشان دهنده مقاومت نانوصفحات (R_{ns})، مقاومت تماسی بین نانوصفحات و الکترود بالایی (R_{Nis}) و الکترود پایینی (R_{As}) است. N_C تعداد نانوصفحات که در تولید جریان شرکت می‌کنند، را نشان می‌دهد.

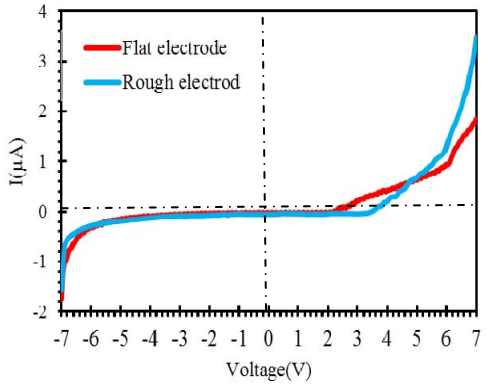


شکل ۸: مدار معادل الکتریکی نانوژنراتور.

هنگامی که از الکترود شاتکی ناهموار استفاده می‌شود، تعداد نانوصفحات که در تولید توان شرکت دارند، افزایش پیدا می‌کنند. باتوجه به مدار معادل مقاومت خروجی در این حالت کاهش و در نتیجه جریان خروجی افزایش

می‌یابد. همچنین ولتاژ پیزو نیز به دلیل افزایش تعداد نانوصفحات درگیر با الکترود بالاافزایش می‌یابد. بنابراین هنگامی که الکترود بالایی ناهموار است، توان تولیدی نانوژنراتور افزایش می‌یابد.

شکل ۹ منحنی جریان–ولتاژ نانوژنراتور را برای دو حالت الکترود شاتکی صاف و ناهموار در حضور نیروی ۷٫۸۹ mg نشان می‌دهد. با توجه به شکل ولتاژ مدار باز از برای حالت الکترود ناهموار نسبت به الکترود صاف از ۲٫۲ به ۳٫۵ ولت و جریان اتصال اتصال کوتاه از ۳۰ نانوآمپر به ۵۰ نانوآمپر افزایش می‌یابد.

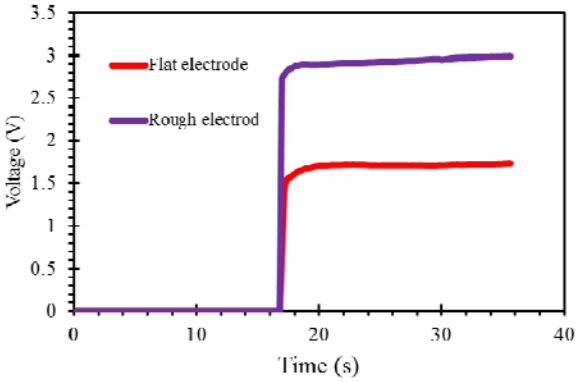


شکل ۹: منحنی جریان-ولتاژ نانوژنراتور با الکترود شاتکی صاف و ناهموار

در نهایت هم نمودار ولتاژ– زمان در شکل ۱۰ به ازای نیروی ۳mg در دو حالت الکترود شاتکی صاف و ناهموار رسم شده است. به ازای نیروی برابر ولتاژ خروجی در حالت صاف تقریبا دو برابر حالت ناهموار است. بنابراین با ایجاد الکترود ناهموار طوری که نانوصفحات بیشتری در تولید جریان شرکت کنند، می‌توان خروجی نانوژنراتور را افزایش داد.

نتیجه‌گیری

به طور خلاصه از روش هیدروترمال برای رشد نانوصفحات اکسیدروی استفاده کردیم. تصویر SEM رشد یکنواخت و هم تراز نانوصفحات را نشان می‌دهد. نانوژنراتور بر اساس نانوصفحات اکسیدروی که روی بستر آلومینیومی رشد پیدا کرده‌اند، را ساختیم. توان خروجی نانوژنراتور به ازای اعمال نیروی ۳ mg، برابر ۰٫۳۷ $\mu W/cm^2$ است. با تغییر الکترود شاتکی صاف به ناهموار توان خروجی را دوبرابر کردیم.



شکل ۱۰: منحنی ولتاژ-زمان نانوژنراتور با الکترود شاتکی صاف و ناهموار.

منابع

[1] Z. L. Wang and J. Song, "Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays." *Science*, *312*(5771), 242-246. (2006).

[2] K. H . Kim et al. "Piezoelectric two-dimensional nanosheets/anionic layer heterojunction for efficient direct current power generation." *Scientific reports* 3 (2013).

[3] D.Choi, , et al., Nanoscale networked single-walled carbon-nanotube electrodes for transparent flexible nanogenerators. The Journal of Physical Chemistry C, 2009. **114**(2): p. 1379-1384.

[4] L. E. Greene, et al. "General route to vertical ZnO nanowire arrays using textured ZnO seeds." *Nano Letters* 5.7 (2005): 1231-1236.

[5] Zhang, Y., et al., *Synthesis, characterization, and applications of ZnO nanowires.* Journal of Nanomaterials, 2012. **2012**: p. 20.