

ساخت و بررسی بلندگو و میکروفون شفاف و انعطاف پذیر بر پایه نانولوله‌های کربنی

اکبر قاسمی یک‌لنگی^۱، سیامک اسماعیل‌زاده خادم^{۲*}

۱. گروه نانومواد، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

حسگرها و عملگرهای صوتی شفاف نسل جدیدی از تراگذارهای صوتی هستند که می‌توانند تحولی در صنایع میکروفون‌ها و بلندگوها ایجاد کنند. این تراگذارها با داشتن خواصی چون شفافیت، انعطاف‌پذیری، تختی، وزن و ضخامت بسیار کم پتانسیل فراوانی برای کاربردهای متنوع همچون سامانه‌های بلندگو برای مصارف عمومی، سامانه‌های فعال الغاء نوفه، نمایشگرها، تلفن‌های همراه و میکروفون‌های شنود دارند. در این بررسی هدف ساخت یک نخست‌نمونه از این تراگذارهای شفاف بود. در این پژوهش با پوشش دادن نانولوله‌های کربنی چند دیواره به روی زیرلایه پلیمری پلی‌وینیلیدن فلوراید، یک حسگر و عملگر صوتی شفاف ساخته و مشخصه‌یابی شد. در ابتدا، محلول نانولوله‌های کربنی کاملاً پراکنده شده تهیه شد و عملیات پوشش دادن به نانولوله‌ها روی زیرلایه به شیوه غوطه‌وری و با اصلاح سطح زیرلایه صورت گرفت. پوششی با مقاومت سطحی $2/2 \text{ k}\Omega/\text{sq}$ و شفافیت ۷۵ درصد ساخته شد. سپس، تراگذار ساخته شده در اتاق ناپژواک مورد آزمون قرار گرفت و نتایج با نتایج کارهای پیشین مقایسه شدند. تراگذار ساخته‌شده تحت تحریک با نوفه سفید با ولتاژ ۲۵ ولت صدایی با شدت ۵۸ دسی‌بل تولید کرد.

کلیدواژه‌ها: حسگر و عملگر صوتی، نانولوله کربنی، بلندگوی انعطاف‌پذیر.

۱. مقدمه

اهاگا در سال ۱۹۸۳ یک بلندگوی تخت از جنس مواد مرکب (کامپوزیت) پیزوالکتریک بر پایه پی‌وی‌دی‌اف^۱ را مورد مطالعه قرار داد [۱]. این مطالعه بر روی تخمین نظریه سطح فشار صدا متمرکز شد و ساخت بلندگوهای تخت ولی غیرانعطاف‌پذیر را مقدور کرد. تحقیق مذکور پلیمر پیزوالکتریک را با الکترودهای فلزی غیرشفاف و یک پایه پلاستیکی برای قابلیت اعتماد مکانیکی استفاده می‌کرد.

هیدت و همکاران در سال ۱۹۹۸ یک بلندگوی الکترواکوستیک که از پاسخ الکترواستریکتیو یک لایه پلیمری استفاده می‌کرد را ساختند [۲]. این بلندگو بالای ۸۰ دسی‌بل سطح فشار صوتی به وسیله عناصر «حبابی» خود تولید می‌کرد. اگرچه بسامد بالای تشدید (حدود

۱۵۰۰ هرتز) و میدان الکتریکی لازم بالا (۲۵ ولت بر میکرومتر) از استفاده آن برای کاربردهای معمول جلوگیری می‌کند. جدیداً پیزوالکتریک پی‌وی‌دی‌اف برای ساخت تراگذارهای صوتی مورد بررسی قرار گرفته است و هم‌چنین به عنوان حسگر یا عملگر یا هر دو مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج آن‌ها نشان داده که پی‌وی‌دی‌اف راه‌حل مناسبی برای تراگذارهای صوتی لایه نازک است. اگرچه پی‌وی‌دی‌اف به تنهایی شفاف است ولی عدم شفافیت الکترودها مشکل بزرگی ایجاد می‌کند [۳]. لی و همکاران در سال ۲۰۰۳ با استفاده از الکترودهای پی‌ای‌دی‌آئی-پی‌اس‌اس^۲ و پلیمر پی‌وی‌دی‌اف عملگر صوتی شفافی را ساختند که شفافیت و رسانایی کم‌نقطه ضعف آن بود [۴]. یو و همکاران در سال ۲۰۰۶ اولین حسگر و عملگر صوتی کاملاً شفاف را با استفاده از

* نویسنده پاسخگو: khadem@modares.ac.ir

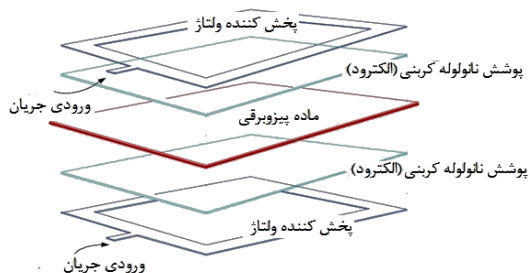
^۱ PVDF; Poly Vinyl Dene Fluoride

^۲ PEDOT- PSS; Poly Ethylene Dioxy Thiophene- Poly Styrene Sulfonate

ولتاژی توسط لایه تولید می‌شود که از طریق الکترودها دریافت می‌گردد.

۲. روش تحقیق

در ابتدا نمای کلی ساختار بلندگو و میکروفونی که در نهایت ساخته می‌شود در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، ساختار بلندگو از دو لایه پخش کننده ولتاژ و دو لایه الکتروود نانولوله کربنی و یک لایه ماده پیزوبرقی تشکیل شده است. لایه‌های پخش کننده ولتاژ، لایه‌های نازکی از جنس طلا هستند که برای بهتر رسیدن علامت ورودی به قسمت‌های مختلف الکترودها ایجاد شده‌اند.



شکل ۱ نمای کلی ساختار سامانه بلندگو و میکروفون ساخته شده.

۲-۱. ساخت لایه نانولوله‌های کربنی

۲-۱-۱. ایجاد گروه‌های عاملی بر روی نانولوله‌های کربنی
برای ایجاد گروه‌های عاملی بر روی سطح نانولوله‌ها یک گرم نانولوله در ۸۰ میلی‌لیتر اسیدنیتریک غلیظ ریخته، به مدت ۱۰ دقیقه تحت امواج فراآوایی حمامی قرار گرفته، سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای جوش اسید جوشانده شده و هم‌زمان توسط همزن مغناطیسی با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه هم‌زده می‌شود. بعد از کامل شدن واکنش‌ها محلول فوق بر روی قیف بخنر مجهز به پمپ خلا و فیلتر ۰/۲ میکرون (تفلونی) ریخته و با آب مقطر شستشو داده تا پی‌اچ^۲ به ۷ برسد. نانولوله‌های باقی‌مانده از فیلتر جدا شده و در دمای ۴۵ درجه در گرمکن به مدت ۴۸ ساعت خشک شد.

الکترودهای نانولوله کربنی تک‌دیواره ساختند [۳]. گروه‌های تحقیقاتی بسیاری روش‌های مختلفی را برای توسعه حسگرها و عملگرهای لایه نازک صوتی انجام داده‌اند. مطالعات زیادی برای استفاده از پی‌وی‌دی‌اف به‌عنوان بلندگو صورت گرفته است ولی هیچ‌کدام انعطاف‌پذیری و شفافیت بالایی را به همراه یکدیگر نداشته‌اند.

یک شرکت ژاپنی (شرکت پایونیر) بلندگوهای بسامد بالا به‌وسیله پی‌وی‌دی‌اف تولید کرده، ولی از الکترودهای آلومینیومی غیرشفاف استفاده کرده است [۵].

شرکت‌های نکست سوند، های ویو و ... صدا از صفحه تلویزیون یا رایانه شخصی تولید کرده‌اند و دیگران بلندگوهای فوق نازک برای صفحات نمایش تخت ایجاد کرده‌اند. هنوز هم این روش‌های تولید صدا فقط برای مواد و وسایل غیرانعطاف‌پذیر به کار می‌روند و نمی‌توان از آن‌ها برای صفحات انعطاف‌پذیر مثل آنچه که در این پژوهش بررسی شده به کار برد [۶].

اخیرا با استفاده از روش‌های گرمصوتی^۱ بلندگوهای شفاف و انعطاف‌پذیر متنوعی ساخته شده‌اند [۵، ۷-۱۰]. در این تحقیق از پوشش‌های شفاف، رسانا و انعطاف‌پذیر نانولوله کربنی بر روی یک پلیمر پیزوالکتریک که نقش اصلی در تولید و دریافت امواج صوتی را دارد، استفاده شد و در مقایسه با کارهای گذشته نتایج بسیار قابل توجهی به‌دست آمد.

نحوه عملکرد این سامانه بلندگو و میکروفون به این صورت است که الکترودهای شفاف و رسانای نانولوله کربنی در دو طرف لایه پلیمری (پی‌وی‌دی‌اف) قرار می‌گیرند و با اعمال ولتاژ باعث تحریک این ماده‌ی پیزوالکتریک می‌شوند. بسامد ولتاژ اعمالی با بسامد علامت ورودی برابر است و در نتیجه تغییر شکل لایه‌ی پیزوالکتریک، هوای اطراف را با همان بسامد منقبض و منبسط می‌کند و امواج صوتی با همان بسامد علامت تحریک‌کننده تولید می‌شوند. در حالت میکروفون، آنچه رخ می‌دهد دقیقاً حالت برعکس دارد. یعنی امواج صوتی موجود در محیط لایه‌ی پیزوالکتریک را فشرده و منبسط می‌کنند و در نتیجه

² pH

¹ Thermoacoustic

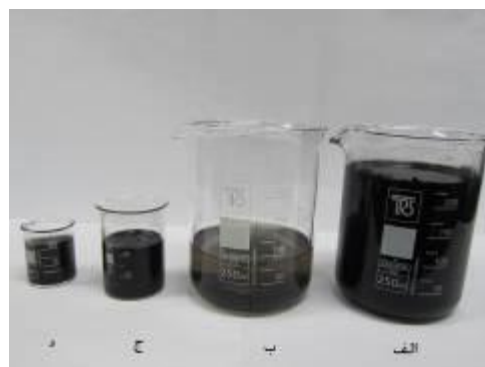
می‌باشد. ولی پلیمر پی‌ای‌تی که از نظر خواص شیمیایی سطحی مانند پلیمر پی‌وی‌دی‌اف عمل می‌کند و در کارهای قبلی انجام شده در این زمینه به‌عنوان زیرلایه برای پوشش‌های نانولوله کربنی استفاده شده است. در اینجا برای انجام آزمایش‌های اولیه و بررسی‌های بیشتر و به‌دست آوردن اطلاعات ابتدایی در مورد لایه‌های نازک نانولوله کربنی استفاده شد. دلیل این امر کم هزینه بودن این پلیمر در مقابل پی‌وی‌دی‌اف و در دسترس بودن آن می‌باشد. بدین منظور لایه‌هایی از جنس پی‌ای‌تی تهیه شد که در ابتدا سطح آن‌ها به‌وسیله دی‌سی‌ام^۲ تمیز می‌شود. برای این منظور به مدت ۲۰ دقیقه لایه‌های پی‌ای‌تی را در داخل محلول قرار داده و به‌وسیله همزن مغناطیسی هم‌زده شد. در نهایت سطح آن به آرامی تمیز می‌گردد. پس از خشک شدن، سطح کاملاً تمیز و آماده برای عملیات آماده‌سازی اولیه می‌باشد.

در ابتدا زیرلایه توسط محلول آبی ۶ مولار NaOH به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه هیدرولیز شد. این کار باعث می‌شود تا سطح زیرلایه هیدرولیز شده و بار منفی پیدا کند.

بعد از شستن با آب دی‌آی^۳، زیرلایه در محلول wt% پی‌دی‌دی‌ای^۴ ۱/۵ (به همراه NaCl ۰/۵ مولار) به مدت ۱۵ دقیقه در دمای اتاق قرار گرفت و پس از آن با آب دی‌آی شسته شد. محلول پی‌دی‌دی‌ای باعث می‌شود تا سطح زیرلایه به‌خاطر وجود گروه‌های آمونیوم بار مثبت پیدا کند. زیرلایه پلیمری سپس در محلول پی‌اس‌اس^۵ ۰/۳ درصد وزنی (به همراه NaCl ۰/۵ مولار) به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفت و شسته شد. پلیمر پی‌اس‌اس به‌دلیل وجود گروه‌های سولفونات دقیقاً برعکس پی‌دی‌دی‌ای عمل می‌کند و به سطح زیرلایه بار منفی می‌دهد. عملیات جذب پی‌دی‌دی‌ای/ پی‌اس‌اس دو مرتبه انجام شد و در نهایت با محلول پی‌دی‌دی‌ای دوباره عملیات تکرار گردید. در نتیجه بیرونی‌ترین لایه، لایه پی‌دی‌دی‌ای با بار مثبت می‌باشد. در اینجا پی‌دی‌دی‌ای به‌خاطر خاصیت بالای آب‌دوستی خود از بین پلیمرهای کاتیونی انتخاب شده

۲-۱-۲. پراکنده کردن نانولوله‌های کربنی در حلال

برای پراکنده کردن نانولوله‌های کربنی در آب و به‌دست آوردن جوهر نانولوله لازم برای پوشش در ابتدا پودر نانولوله کربنی را به آب بدون یون با غلظت‌های ۱ g/l اضافه می‌کنیم و به مدت چندین ساعت به‌وسیله همزن مغناطیسی هم می‌زنیم تا نانولوله‌ها در آب پراکنده شوند و از حالت اولیه توده‌ای در بیابند سپس با استفاده از دستگاه حمام فراآوایی به مدت ۴۰ دقیقه محلول را تحت امواج فراآوایی قرار دادیم. در نهایت برای پراکنده کردن تمامی کلوخه‌های نانولوله کربنی که احتمالاً در محلول باقی مانده‌اند از دستگاه تولیدکننده امواج صوتی پرابی با توان ۴۰۰ وات به مدت ۲۰ دقیقه استفاده کردیم. محلول‌های ساخته شده تا ۳ ماه بدون ته‌نشین شدن پایدار می‌مانند. برای پایدار ماندن نانولوله‌ها در آب سطح آن‌ها عامل‌دار شده که این گروه‌های کربوکسیل با بار منفی مانع از بهم چسبیدن و کلوخه شدن مجدد نانولوله‌ها می‌شود.



شکل ۲ نمونه‌های محلول نانولوله کربنی الف) محلول کاملاً پراکنده شده نانولوله چنددیواره با غلظت ۱ g/l ب) محلول پراکنده نشده نانولوله تک‌دیواره ج) محلول پراکنده شده نانولوله چنددیواره با غلظت ۲ g/l د) محلول پراکنده شده نانولوله تک‌دیواره با غلظت ۱ g/l

۲-۲. آماده‌سازی زیرلایه‌ی پلیمری

زیرلایه‌ی مورد استفاده در این پژوهش یک لایه نازک از پلیمر پی‌وی‌دی‌اف و یا پی‌ای‌تی^۱ است. پلیمر پی‌وی‌دی‌اف پیزوالکتریک و ماده اصلی مدنظر این تحقیق می‌باشد. این ماده از نظر نظامی استراتژیک است و تهیه آن به‌صورت لایه پیزوالکتریک کار دشوار و وقت‌گیری

^۱ PET; Poly Ethylene Terephthalate

^۲ DCM; Di Chloro Methane

^۳ DI

^۴ PDDA; Poly Diallyl Dimethyl Ammonium Chloride

^۵ PSS; Poly Sodiumstyrene Sulfonate

الکتریکی دارد؛ ولی برای ایجاد یک میدان الکتریکی توسط نانولوله‌ها باید دو لایه پوشش دو طرف پلیمر از همدیگر مجزا باشند. برای رفع این مشکل لبه‌های زیرلایه را پس از ایجاد پوشش می‌توان برید. برای به‌دست‌آوردن هدایت بهتر می‌توان چند بار عملیات پوشش‌دهی را تکرار نمود. هر بار با ایجاد لایه‌ی جدید، مقاومت لایه نانولوله کربنی کاهش یافته ولی شفافیت هم کم‌تر می‌شود.

پس از ایجاد پوشش، نمونه در گرمکن خشک شده تا حالایی که نانولوله‌های کربنی پراکنده‌شده در آن، تبخیر گردد و پیوند بین نانولوله‌ها در لایه نازک ایجاد شده، بهتر شود. مدت زمان قرارگرفتن نمونه در گرمکن یک ساعت و درجه حرارت گرمکن ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، که در میزان رسانایی نهایی لایه ایجادشده موثر است.

۲-۴. نمونه نهایی

به‌دلیل ضخامت کم زیرلایه، امکان اتصال مستقیم سیم به تراگذار ساخته‌شده نبود؛ به‌همین دلیل احتیاج به نگهدارنده‌ای برای ثابت‌کردن تراگذار و اتصال سیم‌ها به آن وجود داشت که از پلیمر پلکسی برای ساختن آن استفاده شد و دو نوار فویل آلومینیومی نقش اتصال الکترودها را داشتند. در شکل ۴ نمونه نهایی ساخته‌شده به همراه نگهدارنده مشاهده می‌شود.

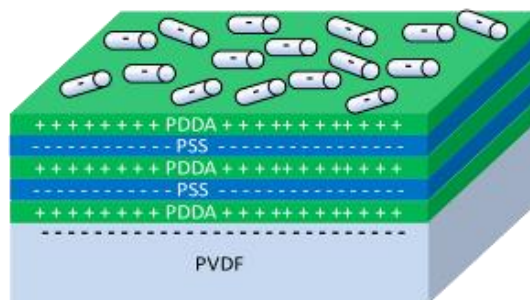


شکل ۴ حسگر و عملگر نهایی ساخته‌شده.

۳. نتایج

نمونه حسگر و عملگر صوتی ساخته‌شده در یک اتاق ناپژواک^۱ (آزمایشگاه صوت دانشکده فیزیک دانشگاه

است. آخرین لایه‌ای که روی سطح زیرلایه پلیمری ایجاد می‌شود لایه‌ای با بار مثبت است که این امر به جذب بهتر نانولوله‌های کربن کمک می‌کند و باعث استحکام بیش‌تر لایه‌ی نانولوله کربنی بروی سطح زیرلایه می‌گردد.



شکل ۳ تصویر طرح‌واره آماده‌سازی زیرلایه پلیمری برای پوشش‌دهی نانولوله‌های کربنی.

۲-۳. پوشش‌دهی به روش غوطه‌وری

زیرلایه به‌صورت عمود بر سطح مایع به داخل آن فروبرده می‌شود و پس از مدت زمان ۳۰ ثانیه به همان‌صورت بیرون می‌آوریم. این روش بسیار ساده است و احتیاج به هیچ تجهیزات خاصی ندارد. جوهر نانولوله کربنی لازم برای این روش احتیاج به لزجت خاصی ندارد و تنها شبه‌سنج لازم پایداربودن نانولوله‌ها و یکنواخت‌بودن پراکندگی آن‌ها در محلول است.

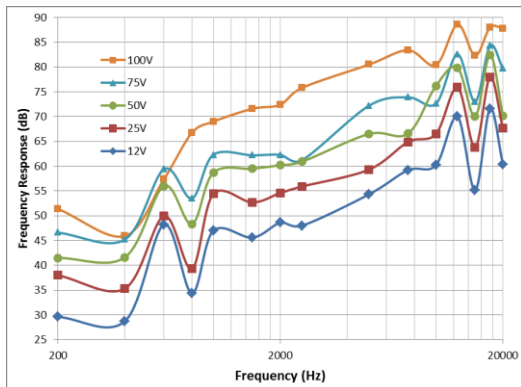
نکته مهم در رابطه با روش پوشش‌دهی غوطه‌وری، این است که، قبل و بعد از پوشش، زیرلایه باید با آب دی‌یونیزه تمیز شود. دلیل شستن زیرلایه قبل از پوشش، برای از بین‌بردن پی‌دی‌دی‌ای که بر روی سطح باقی مانده می‌باشد، زیرا اگر پی‌دی‌دی‌ای وارد محلول نانولوله کربنی شود باعث خنثی‌شدن سطح نانولوله‌ها می‌شود و محلول پایداری خود را از دست می‌دهد. دلیل شستن زیرلایه بعد از پوشش هم، از بین‌بردن کلوخه‌های نانولوله که بر روی سطح زیرلایه چسبیده‌اند و در کل یکنواخت‌ترکردن پوشش می‌باشد. این کار می‌تواند بدون افزایش مقاومت لایه نانولوله کربنی شفافیت آن‌را بالا ببرد.

یکی از محاسن اصلی روش پوشش‌دهی غوطه‌وری این است که، دو طرف زیرلایه با یک‌بار اقدام پوشش پیدا می‌کند. ولی مشکلی که به همراه این خاصیت می‌باشد، این است که، پوشش دو سطح با یکدیگر رسانایی

^۱ Anechoic chamber

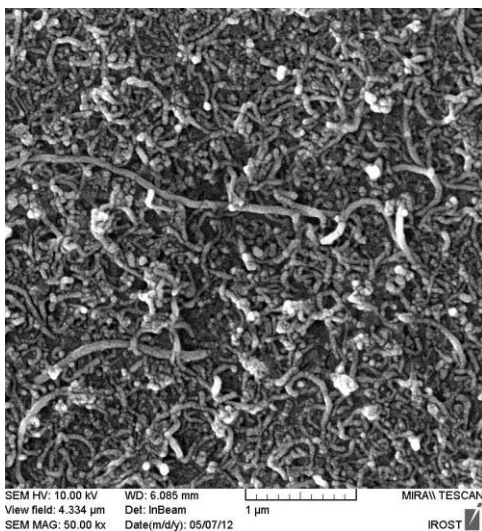
۳-۲. نتایج حالت عملگر صوتی (بلندگو)

برای بررسی عملگر ساخته شده به عنوان یک بلندگو از یک دستگاه تولید علامت استفاده گردید و بلندگو در بسامدهای مختلف با ولتاژ مشخص تحریک شد. برای بررسی بیش تر ولتاژهای مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل در شکل ۷ نشان داده شده اند.



شکل ۷ نتایج بررسی نمونه به عنوان یک بلندگو در طیف بسامدهای شنوایی انسان.

همان طور که در شکل ۷ ملاحظه می شود. سطح فشار صوتی تولید شده توسط بلندگو در ولتاژهای تحریک ۱۲، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ ولت، در بسامدهای ۲۰۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز نشان داده شده اند.



شکل ۸ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از لایه نازک نانولوله کربنی با بزرگنمایی ۵۰ هزار برابر.

صنعتی شریف) مورد بررسی قرار گرفت که سامانه مورد استفاده در شکل ۵ نشان داده شده است.

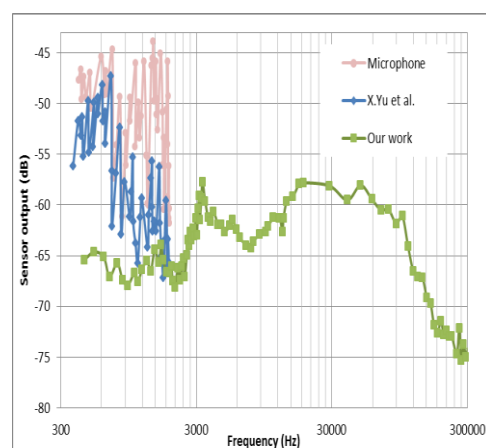


شکل ۵ قرارگیری نهایی عملگر و دستگاه سنجش سطح صدا در اتاق ناپژواک.

نتایج در دو حالت حسگر و عملگر (میکروفون و بلندگو) مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۱. نتایج حالت حسگر صوتی (میکروفون)

شکل ۶ میزان ولتاژ خروجی از حسگر در بسامدهای مختلف تا ۳۰۰ کیلوهرتز نشان را می دهد و آن را با نتایج کار یو و همکاران و میکروفون اُدیو-تکنیکا ای تی آر ۳۵ مقایسه می کند [۱۱]. همانطور که مشاهده می گردد، در بسامدهای ۳ تا ۱۰۰ کیلوهرتز، خروجی میکروفون تقریباً خطی بوده که نشان دهنده مناسب بودن حسگر ساخته شده برای این گستره از بسامدها می باشد.



شکل ۶ مقایسه میکروفون اُدیو-تکنیکا ای تی آر ۳۵ و نتایج یو و همکاران [۳] با حسگر ساخته شده در این پژوهش.

^۱ Audio-Technica ATR35

۳-۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از لایه نانولوله کربنی

در شکل ۸ تصویر میکروسکوپ الکترونی از لایه‌ی شفاف و رسانایی نانولوله کربنی که بر روی زیرلایه پی‌وی‌دی‌اف ایجاد شده، نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نانولوله‌های کربنی با جهت‌گیری کاملاً تصادفی بر روی زیرلایه پراکنده شده‌اند. قطر نانولوله‌ها در حدود ۴۰ تا ۸۰ نانومتر است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

یکی از نکات اصلی برای ساخت یک بلندگو و میکروفون شفاف و انعطاف‌پذیر، داشتن ماده‌ای شفاف، انعطاف‌پذیر و رسانا برای ساخت الکترودها است. در بین مواد شفاف و رسانای موجود، خاصیت انعطاف‌پذیری وجود ندارد و لایه نازک نانولوله کربنی می‌تواند این کار را به‌خوبی انجام دهد؛ که در این پژوهش نمونه‌ای مناسب از این ماده ساخته و مورد استفاده قرار گرفت. در تصویر میکروسکوپ روبشی الکترونی می‌توان نوساختار این لایه را مشاهده نمود، که نانولوله‌های کربنی با آرایشی تصادفی در تماس با یکدیگر قرار گرفته و رسانایی لازم برای لایه را به‌وجود آورده‌اند.

در مورد حالت میکروفون نمونه ساخته‌شده می‌توان مشاهده کرد، که تا بسامدهای فراسدا هم این نمونه کارایی داشته و علامت خروجی قابل اندازه‌گیری بوده است. برای بسامدهای بالای ۱۰۰ کیلوهرتز شدت علامت خروجی سریعاً کاهش یافته و میکروفون کارایی خود را از دست داده است. لازم به ذکر است که برای ثبت‌کردن علامت‌های ضعیف خروجی از میکروفون ساخته‌شده باید از یک تقویت‌کننده استفاده شود.

برای مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از این تحقیق با دیگر پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، نتایج به‌دست آمده از حالت میکروفون با نتایج کارهای دیگران در یک نمودار نشان داده شده‌است (شکل ۶). همان‌طور که ملاحظه می‌گردد حسگر ساخته‌شده در این پژوهش، با توجه به برخورداری از مساحت کم‌تر، میزان علامت خروجی خوبی در مقایسه با دیگر میکروفون‌ها داشته است. هم‌چنین تا بسامد ۳۰۰ کیلوهرتز پاسخگو بوده که

نشان‌دهنده‌ی قابلیت بالای این میکروفون می‌باشد. هم‌چنین در شکل ۶ دیده می‌شود که میزان نوسانات در علامت خروجی میکروفون ساخته‌شده در این‌جا، در مقایسه با یک میکروفون تجاری و میکروفون ساخته‌شده توسط یو و همکاران بسیار کم‌تر است.

در مورد حالت بلندگو همان‌طور که در شکل ۷ هم مشاهده می‌گردد در گستره‌ی شنوایی انسان، کارایی صوتی خوبی از خود نشان می‌دهد. با ولتاژ تحریک ۱۰۰ ولت، شدت صدای خروجی از بلندگو به بالای ۸۵ دسی‌بل رسید. به‌عنوان یکی از امتیازات این بلندگو می‌توان به کارایی بالای آن در بسامدهای بالا اشاره نمود. در این پژوهش امکان بررسی بلندگو در بسامدهای فراسدا وجود نداشت، ولی با توجه به نتایج حاصل می‌توان تشخیص داد که کارایی این بلندگوها در بسامدهای بالا بسیار مناسب‌تر از بسامدهای زیر ۱۰ کیلوهرتز خواهد بود.

برای مقایسه‌ی حالت بلندگو با دیگر پژوهش‌های موجود می‌توان به تحقیق یو و همکاران اشاره کرد که در آن بلندگوی ساخته شده مانند این تحقیق از پلیمر شفاف با الکترودهای متفاوت استفاده کرده است. سطح صدای تولیدشده در بسامد ۱۰ کیلوهرتز در این تحقیق با ولتاژ ورودی ۲۵ ولت حدود ۷۰ دسی‌بل است که از میزان این تحقیق یعنی ۶۵ دسی‌بل، بیش‌تر است. لازم به ذکر است که مساحت سطحی بلندگوی ساخته‌شده در این پژوهش از نمونه مذکور کم‌تر است و این تفاوت مقایسه‌ی دو بلندگو را دشوار می‌کند.

در نهایت به‌عنوان نتیجه‌گیری می‌توان اضافه کرد که در مقایسه با ساختارهای مشابه، لایه‌های نازک نانولوله کربنی بدون کاهش چندان شفافیت و انعطاف‌پذیری لایه با خروجی صوتی مناسبی که از بلندگوها مشاهده شد به‌عنوان یکی از گزینه‌های مناسب برای ساخت بلندگوهای شفاف مطرح هستند. هم‌چنین عملکرد بلندگو و میکروفون پیزوالکتریک ساخته‌شده نشان‌دهنده‌ی این حقیقت است که این دسته از حسگرها و عملگرهای صوتی در بسامدهای بالا (بالتر از ۱۰ کیلوهرتز یا فراسدا) دارای کارایی مناسبی بوده و قابلیت تجاری‌سازی دارند.

۵. فهرست منابع
- [11] M.S. Mirshekarloo, C.Y. Tan, X. Yu, L. Zhang, S. Chen, K. Yao, F. Cui, S.M. Pandit, S.H. Chong, S.T. Tan, "Transparent piezoelectric film speakers for windows with active noise mitigation function," *Applied Acoustics*, vol. 137, pp. 90-97, 2018.
- [1] J. Ohga, "A flat piezoelectric polymer film loudspeaker as a multi-resonance system," *Journal of Acoustical Society of Japan*, vol. 4, pp. 113-120, 1983.
- [2] R. Heydt, R. Kornbluh, R. Pelrine, V. Mason, "Design and performance of an electrostrictive-polymer-film acoustic actuator," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 215, pp. 297-311, 1998.
- [3] X. Yu, R. Rajamani, K.A. Stelson, T. Cui, "Carbon nanotube-based transparent thin film acoustic actuators and sensor," *Sensors and Actuators A*, vol. 132, pp. 626-631, 2006.
- [4] C.S. Lee, J.Y. Kim, D.E. Lee, J. Joo, B.G. Wagh, S. Han, Y.W. Beag, S.K. Koh, "Flexible and transparent organic film speaker by using highly conducting PEDOT/PSS as electrode," *Synthetic Metals*, vol. 139, no. 2, pp. 457-461, 2003.
- [5] S. Kang, S. Cho, R. Shanker, H. Lee, J. Park, D.-S. Um, Y. Lee, H. Ko, "Transparent and conductive nanomembranes with orthogonal silver nanowire arrays for skin-attachable loudspeakers and microphones," *Science Advances*, vol. 4, p. eaas8772, 2018.
- [6] W. Li, D. Torres, R. Díaz, Z. Wang, C. Wu, C. Wang, Z.L. Wang, N. Sepulveda, "Nanogenerator-based dual-functional and self-powered thin patch loudspeaker or microphone for flexible electronics," *Nature Communications*, vol. 8, p. 15310, 2017.
- [7] L.-Q. Tao, H. Sun, Y. Liu, Z.-Y. Ju, Y. Yang, T.-L. Ren, "Flexible graphene sound device based on laser reduced graphene," *Applied Physics Letters*, vol. 111, pp. 103104-9, 2017.
- [8] M.R. Bobinger, P. La Torraca, J. Mock, M. Becherer, L. Cattani, D. Angeli, L. Larcher, P. Lugli, "Solution-processing of Copper Nanowires for Transparent Heaters and Thermo-Acoustic Loudspeakers," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 17, no. 5, 2018.
- [9] P. La Torraca, M. Bobinger, P. Pavan, M. Becherer, S. Zhao, M. Koebel, L. Cattani, P. Lugli, L. Larcher, "High Efficiency Thermoacoustic Loudspeaker Made with a Silica Aerogel Substrate," *Advanced Materials Technologies*, vol. 3, no. 8, 2018.
- [10] Z. Zhang, H. Tian, P. Lv, Y. Yang, Q. Yang, S. Yang, G. Wang, T. Ren, "High-performance sound source devices based on graphene woven fabrics," *Applied Physics Letters*, vol. 110, no. 9, 2017.