

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1399.6.2.10.6

درصد همانندی: ۴٪

بررسی اثر ترموآکوستیکی فیلم‌های نازک گرافن اکسید تولیدشده به روش فیلتراسیون خلأ روی غشاء پلی ونیلیدین فلوراید

محمد رضا کازرانی وحدانی^{۱*}، آرمان فرهمند^۲

kazerani@mut.ac.ir

armanf1371@gmail.com

^{۱*} نویسنده مسئول، مجتمع دانشگاهی هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۲ کارشناسی ارشد، بخش مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز، شیراز

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۰۷

چکیده

در این پژوهش اثر ترموآکوستیک فیلم‌های نازک اکسید گرافن که به روش فیلتراسیون خلأ روی غشاءهای متخلخل پلی ونیلیدین فلوراید (PVDF) تهیه شده‌اند، مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور پس از آماده سازی، نمونه‌ها الکتروود گذاری شدند و امپدانس الکتریکی آن‌ها اندازه گیری شد. صرف نظر از افت و خیزهای بسیار اندک، تمام نمونه‌ها امپدانس مقاومتی خالص از خود نشان دادند. در ادامه سطح فشار آکوستیکی تولیدشده با نمونه‌ها در اثر اعمال سیگنال الکتریکی متناوب به نمونه‌ها در بازه فرکانسی 150Hz تا 20kHz اندازه گیری شد. نتایج بیانگر آن است که با افزایش دامنه ولتاژ سیگنال ورودی، سطح فشار آکوستیکی حاصل از نمونه‌ها در بازه فرکانسی مورد آزمایش تقریباً به طور پیوسته افزایش می‌یابد. آن‌چنان که انتظار می‌رود در اثر پدیده ترموآکوستیک فرکانس سیگنال‌های آکوستیکی تولیدشده دو برابر سیگنال تحریک الکتریکی باشد. همچنین با توجه به ضخامت یکسان لایه‌ها سطح فشار آکوستیکی نمونه‌ها با کاهش مقاومت لایه‌ها و افزایش ولتاژ تحریک افزایش می‌یابد. مطالعه طیف فشار آکوستیکی همچنین بیانگر آن است که به ازای یک فرکانس تحریک الکتریکی ثابت طیف تابشی دارای دو بیشینه یکی در فرکانس برابر فرکانس تحریک و دیگری در فرکانس دو برابر آن است. این پدیده برای نخستین بار است که گزارش می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اثر ترموآکوستیک، گرافن، پلی ونیلیدین فلوراید

۱. مقدمه

کراندال مشاهده شد [۱]. آن‌ها مشاهده کردند که با عبور یک جریان الکتریکی متناوب از یک لایه نازک پلاتینی

اثر ترموآکوستیک اولین بار در سال ۱۹۱۹ توسط آرنولد و

ترموآکوستیک بیشتر مورد توجه محققان قرار گیرد. در نتیجه در سال‌های اخیر مقاله‌های بسیاری به بررسی ساخت مبدل‌های ترموآکوستیک با استفاده از نانو ساختارهای مختلف مانند نانو سیم‌های فلزی [۳-۵]، لایه‌های نازک فلزی [۶]، لایه‌های نازک پلیمری رسانا [۷] و مانند آن پرداخته‌اند.

گرافن، یک ماده به نسبت جدید است که در سال ۲۰۰۴ در حین مطالعه روی خواص ساختاری آن، به ویژگی‌های الکتریکی آن پی برده شد. این ماده دارای یک تحرک الکتریکی^۱ بزرگ نزدیک به $15000 \text{cm}^2/\text{Vs}$ برای الکترون‌هاست. علاوه بر این، رسانندگی حرارتی^۲ یک ورق معلق گرافن حدود $3000-5000 \text{W/mK}$ است که بالاترین میزان نسبت به سایر مواد است. از سوی دیگر ظرفیت گرمایی واحد سطح گرافن آزاد حدود 10^{-10}J/mK است که مقدار آن، یک مرتبه از فیلم نانو لوله کربنی تک لایه کمتر است. این مسئله گرافن را به کاندیدای مناسبی برای استفاده در مبدل‌های ترموآکوستیک تبدیل می‌کند [۸].

هدف ما در این مقاله ساخت مبدل‌های ترموآکوستیک به کمک سنتز لایه‌های نازک گرافنی شبه معلق است. در این مقاله ما از اکسید گرافن برای سنتز لایه‌های نازک استفاده می‌کنیم. به این منظور در بخش ۲ روش تهیه فیلم‌های گرافنی و روش رساناسازی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. آزمون‌های الکتریکی و آکوستیکی انجام شده روی نمونه‌ها در بخش ۳ به تفصیل بیان شده‌اند. در بخش ۴ نیز جمع‌بندی مقاله ارائه شده است.

۲. مواد و روش کار

در این تحقیق برای سنتز نانو ذرات گرافن اکسید، از گرافیت، اسید سولفوریک ۹۸٪، اسید فسفریک، پتاسیم پرمنگنات، هیدروژن پراکسید، اتانول، هیدروژن یدید و گاز نیتروژن استفاده شده است که شرکت سازنده تمامی مواد ذکر شده (غیر از گاز نیتروژن) مرک آلمان است.

برای سنتز نانو ذرات گرافن اکسید ابتدا مقداری گرافیت به مخلوط ۹ به ۱ اسید سولفوریک و اسید فسفریک اضافه شد. بعد از یک ساعت چرخش پتاسیم پرمنگنات در دمای زیر ۵

امواج آکوستیکی ایجاد می‌شود. به دلیل بازدهی بسیار اندک، در آن زمان این پدیده چندان مورد توجه محققان قرار نگرفت و هرگز به شکل صنعتی به کارگیری نشد. در سال ۲۰۰۸ میلادی ژیاو و همکاران اثر ترموآکوستیک را در حین عبور جریان الکتریکی از نانولوله‌های کربنی مشاهده کردند [۲]. آن‌ها ورقه‌ای بسیار نازک از نانولوله‌های کربنی را طی فرایند ساده "کشیدن" از یک جنگل از نانولوله‌های ابر هم خط که بر زیر لایه سیلیکونی رشد داده شده بود، تهیه کردند. پس از الکتروگذاری و عبور جریان الکتریکی متناوب از این صفحه آن‌ها مشاهده کردند که امواج آکوستیکی با فرکانسی برابر دو برابر سیگنال الکتریکی اعمالی در فضای اطراف صفحه ایجاد می‌شود که به خوبی قابل شنیدن است. ژیاو مبانی نظری این پدیده که در ابتدا توسط آرنولد توسعه داده شده بود را بسط داد. بر این اساس با اعمال یک سیگنال الکتریکی متناوب (سینوسی)، جریان الکتریکی در نیم سیکل اول از صفر شروع به افزایش می‌کند. عبور جریان از صفحه سبب تولید گرما در اثر پدیده گرمای ژول می‌شود. این گرما در ادامه به محیط اطراف (هوا) منتقل می‌شود و سبب منبسط شدن هوای مجاور صفحه می‌شود. زمانی که در پایان این نیم سیکل جریان به صفر کاهش می‌یابد، دمای صفحه کاهش می‌یابد و این سبب منقبض شدن هوای اطراف می‌شود. این انقباض و انبساط پشت سر هم که در نیم سیکل بعدی (و تمام سیکل‌های بعدی) تکرار می‌شود، در فضای اطراف منتشر شده و یک موج آکوستیکی تولید می‌کند. به این ترتیب فرکانس امواج آکوستیکی ایجاد شده دو برابر فرکانس سیگنال الکتریکی اعمال شده می‌باشد. همچنین این فرمول‌بندی نشان می‌دهد از آنجا که باید گرمای قابل توجهی در صفحه تولید و به محیط منتقل شود، ظرفیت گرمایی واحد سطح پایین و ضریب رسانندگی الکتریکی و گرمایی بالای لایه به بازده ترموآکوستیک بالاتری منجر می‌شود.

گسترش فناوری نانو امکان تولید غشاءها و رشته‌هایی بسیار نازک و در نتیجه با ظرفیت گرمایی بسیار اندک را فراهم آورده است. این مسئله سبب شده است که پدیده

شد. برای این کار از فویل‌های نازک مسی استفاده شد. ابتدا باریکه‌هایی به طول ۳ و عرض ۰/۵ سانتی متر را از فویل جدا و سپس این باریکه‌ها از طول تا زده شد تا سطح مقطع آن‌ها شکل V به خود بگیرد. سپس دو تا از این الکترودهای مسی، با استفاده از چسب قطره‌ای بر روی هر پایه چسبانده شد طوری که یک بازوی V در دو طرف پنجره هر پایه قرار گیرد و دهانه آن به سمت مرکز پنجره باشد. در ادامه درون دهانه V شکل الکترودهای مسی به چسب نقره آغشته و یک غشاء روی پایه طوری قرار داده شد که لبه آن درون دهانه V شکل الکترودها قرار گیرد. سپس با احتیاط الکترودها فشرده شد تا دهانه V شکل آن بر روی هم بسته شود و دو طرف غشاء از طریق چسب نقره در تماس با الکترودها قرار گیرد [۱۰].

این فرایند برای هر دو الکتروده روی هر پایه انجام شد. برای خشک شدن چسب نقره و بهینه شدن اتصال مکانیکی و رسانندگی الکتریکی آن، آزمایش‌های آکوستیکی و الکتریکی ۲۴ ساعت پس از اتصال غشاء انجام شد. از چسب نقره باید به اندازه کافی استفاده شود؛ زیرا استفاده کمتر از حد، اتصال مناسب و سراسری ایجاد نمی‌کند و استفاده بیش از مقدار از چسب نقره باعث خواهد شد سطح غشاء به چسب آلوده شود، در نتیجه کارایی آن کاهش یابد [۱۰].

۳. نتایج و بحث

۳-۱. آزمایش امپدانس الکتریکی

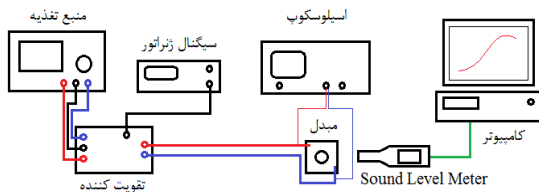
پاسخ آکوستیکی یک مبدل الکتروآکوستیکی تابعی از طبیعت الکتریکی آن است. در پدیده ترموآکوستیک سیگنال الکتریکی اعمال شده به مبدل در اثر تبدیل مستقیم به انرژی گرمایی به انرژی آکوستیکی در محیط تبدیل می‌شود. در نتیجه در این فرایند رسانندگی الکتریکی نمونه‌ها نقش اساسی بازی می‌کند. بنابراین به منظور آنکه معیاری کمی از این کمیت داشته باشیم؛ پس از الکتروده گذاری امپدانس الکتریکی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروم آنالایزر Keysight مدل 4990A در بازه فرکانسی 0-20kHz اندازه‌گیری شد. نتایج در شکل ۱ به نمایش گذاشته شده

درجه سلسیوس به محلول اضافه شد. پس از اضافه کردن پتاسیم پر منگنات رنگ محصول از مشکی به سبز تیره تغییر کرد، سپس دمای فرایند به ۵۵ درجه رسانده شد و به مدت ۱۲ ساعت در این دما باقی ماند. در این ۱۲ ساعت دو بار به فاصله زمانی ۶ ساعت محلول در حمام التراسونیک قرار گرفت و رنگ آن به قهوه‌ای تیره تغییر یافت. در این مرحله آب یخ‌زده را به محلول اضافه و تا یک ساعت هم زده شد و در همین حین هیدروژن پراکسید به محلول افزوده شد. در این هنگام محلول از نارنجی به زرد باز تغییر رنگ داد. در ادامه گرافن اکسید تولید شده با استفاده از سانتریفیوژ از محلول جدا شده و در ابتدا با محلول هیدروژن کلرید ۵ درصد و سپس با آب دیونیزه شستشو داده شد تا زمانی که PH آن با PH آب مقطر یکسان شد. سپس بار دیگر گرافن با استفاده از سانتریفیوژ از محلول جدا شد و در آن در دمای ۵۵ درجه قرار گرفت تا به مدت دو روز در اتمسفر نیتروژن خشک شود [۹].

در مرحله بعد گرافن به روش فیلتراسیون خلأ بر روی یک غشا متخلخل پلی نیلیدین فلوراید پوشش دهی شد. پس از خشک شدن لایه گرافن ایجاد شده از روی غشا جدا و آزمون‌های الکتریکی و آکوستیکی روی آن انجام شد. پیش از انجام آزمون‌های الکتریکی مبدل‌های ساخته شده ابتدا باید آن‌ها را برای آزمایش آماده نمود. آماده‌سازی این نمونه‌ها شامل دو مرحله نصب روی پایه و الکتروده گذاری است. برای جلوگیری از اتصال کوتاه الکتریکی، پایه‌هایی از جنس پلکسی گلاس و با استفاده از برش لیزری ساخته شدند. این پایه‌ها وظیفه محافظت فیزیکی از غشاء در حین آزمایش را برعهده دارند؛ همچنین یک پنجره (حفره) روی ورقه پلکسی گلاس و در پشت غشاء، به شعاع تقریبی ۰/۹ قطر غشاء ایجاد شد که هدف از آن جلوگیری از بازتاب امواج صوتی تولید شده در پشت مبدل به سمت جلو می‌باشد و تا بر روی امواج تابشی از سطح جلویی مبدل که در آزمایش اندازه‌گیری می‌شود، تأثیر نگذاشته و نتایج آزمون را مختل نکند. برای اعمال سیگنال الکتریکی به غشاءهای گرافنی دو الکتروده مناسب با مقاومت الکتریکی اندک در دو طرف غشاء نصب

صورت تابعی از فرکانس با استفاده از چیدمان شکل ۲، اندازه گیری شد. در این چیدمان سیگنال‌های الکتریکی به صورت موج پیوسته به وسیله مولد سیگنال Rigol مدل DG1022 تولید شده است. سیگنال‌های تولیدشده با مولد سیگنال دارای حداکثر دامنه قله تا قله 20V هستند. این سیگنال‌ها قبل از اعمال به نمونه‌ها باید تقویت شوند. برای این منظور یک مدار تقویت کننده طراحی شد که در بازه فرکانسی 0-60kHz سیگنال‌های الکتریکی را با بهره ثابت تقویت می‌کند. مدار طراحی شده می‌تواند سیگنال‌های الکتریکی را تا ولتاژ پیک تا پیک $V_{pp}=40v$ تقویت کند. تغذیه این مدار با دو ولتاژ DC موازی از یک منبع تغذیه GW Instek مدل GPS-4303 تأمین می‌شود. مدار تقویت کننده، دامنه سیگنال ورودی را حداکثر به اندازه ولتاژ جریان مستقیم منبع تغذیه افزایش می‌دهد. سیگنال تقویت شده خروجی این مدار در ادامه به مبدل اعمال شد.

به منظور اطلاع از میزان دامنه ولتاژ ورودی و اطمینان از اینکه دامنه ولتاژ اعمال شده به مبدل در تمام فرکانس‌ها ثابت باشد، جریان خروجی مدار تقویت کننده در هر فرکانس به وسیله اسیلوسکوپ اندازه گیری و در صورت افزایش یا کاهش دامنه ولتاژ ورودی، این دامنه با مولد سیگنال یا منبع تغذیه تنظیم شد.

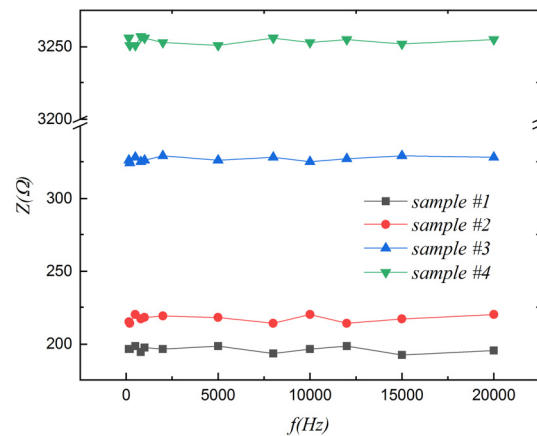


شکل ۲. چیدمان اندازه گیری پاسخ آکوستیک نمونه مبدل‌های ساخته شده

سه دسته اندازه گیری آکوستیکی به شرح زیر بر مبدل‌های تهیه شده انجام شد:

الف) اندازه گیری تراز تابش صوت به صورت تابعی از فرکانس: در این آزمون سیگنال‌های الکتریکی با دامنه ولتاژ ثابت $V_{pp}=20v$ در فرکانس‌های مختلف از 150Hz تا 20kHz به مبدل اعمال شد و سیگنال صوتی با استفاده از چیدمانی شکل ۲ اندازه گیری و به کمک رایانه ذخیره شد.

است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود؛ صرف نظر از افت و خیزهای اندک، دامنه امپدانس الکتریکی نمونه‌ها در این بازه فرکانسی ثابت است. اندازه گیری فاز همچنین نشان می‌دهد که فاز امپدانس الکتریکی نمونه‌ها در این بازه فرکانسی برابر با صفر بوده که بیانگر حقیقی (مقاومتی خالص) بودن امپدانس است.



شکل ۱. اندازه امپدانس الکتریکی مبدل‌های ساخته شده به صورت تابعی از فرکانس

ثابت و حقیقی بودن امپدانس مبدل‌ها طراحی و ساخت مدار تقویت کننده اختصاصی این مبدل‌ها را بسیار ساده می‌کند؛ زیرا نیاز به تطبیق امپدانس به منظور حذف اندوکتانس یا کپسیتانس مبدل را از بین می‌برد. همچنین لازم نیست که گین تقویت کننده به صورت وابسته به فرکانس تنظیم شود. در جدول ۱ اندازه دامنه و فاز امپدانس به طور خلاصه آورده شده است. همان‌طور که از داده‌های این جدول برمی‌آید، با افزایش زمان ماند در HI مقاومت الکتریکی نمونه‌ها کاهش یافته است.

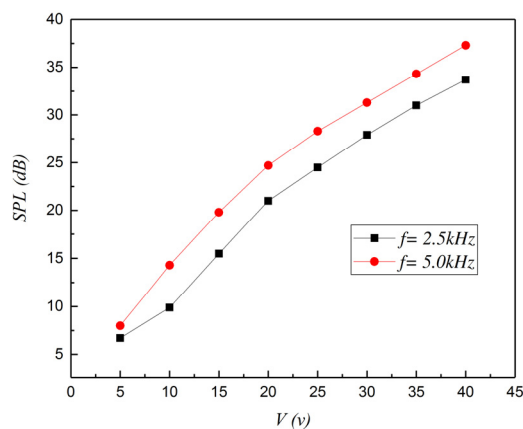
جدول ۱. امپدانس و فاز اندازه گیری شده نمونه‌های گرافتی

شماره نمونه	دامنه امپدانس	فاز
۱	193.6Ω	0°
۲	215.0Ω	0°
۳	324.0Ω	0°
۴	3252Ω	0°

۳-۲. چیدمان اندازه گیری‌های آکوستیکی

در ادامه، کارایی آکوستیکی نمونه‌ها مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. به این منظور پاسخ الکتروآکوستیکی نمونه‌ها به

دامنه ولتاژ سیگنال ورودی کمتر از 20v تقریباً برابر واحد است. در صورتی که با افزایش دامنه به بیش از این مقدار شیب نمودار به حدود ۰/۵ کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان با افزایش دامنه سیگنال، تراز شدت صوت را افزایش داد. افزایش تراز شدت با ولتاژ اعمالی به نمونه‌ها دارای محدودیت است، زیرا افزایش بیش از حد ولتاژ دمای سطح مبدل را به شدت افزایش می‌دهد که این امر سبب اکسید شدن (سوختن) مبدل می‌شود. به همین دلیل در این مقاله برای جلوگیری از این پدیده دامنه ولتاژ سیگنال الکتریکی اعمال شده به مبدل محدود به $V_{pp}=40v$ نگهداشته شد.

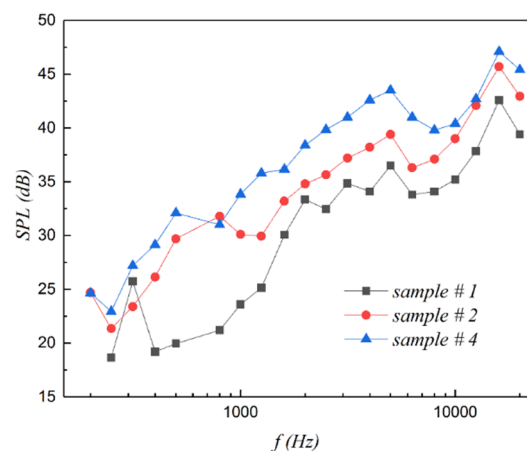


شکل ۴. تغییرات تراز تابش مبدل در فرکانس‌های 2.5kHz و 5.0kHz به صورت تابعی از دامنه ولتاژ سیگنال ورودی

ج) اندازه‌گیری طیف فرکانسی تراز تابش صوت: یک

ویژگی اصلی پدیده ترموآکوستیک این است که فرکانس تابش آکوستیکی تولیدشده دو برابر فرکانس سیگنال الکتریکی اعمال شده f_0 است [۲-۵]. همان‌طور که در توضیحات شکل ۳ نیز اشاره شد؛ در اندازه‌گیری‌های انجام شده در این پژوهش نیز این ویژگی مشاهده می‌شود. اما در عین حال با نگاهی دقیق‌تر به توزیع طیفی سیگنال آکوستیکی اندازه‌گیری شده مشاهده شد که طیف فرکانسی تراز تابشی علاوه بر فرکانس $2f_0$ در فرکانس f_0 نیز دارای مقدار قابل توجهی است. به عنوان نمونه طیف فرکانسی تراز تابش آکوستیکی مبدل برای سیگنال الکتریکی ورودی با فرکانس 5.0kHz در شکل ۵ رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود علاوه بر فرکانس 10kHz که بر اساس پدیده ترموآکوستیک مورد انتظار است، تراز تابشی

در انطباق با اثر ترموآکوستیک (که در مقدمه توضیح داده شد)، فرکانس سیگنال‌های آکوستیکی اندازه‌گیری شده در این آزمایش دو برابر فرکانس سیگنالی الکتریکی اعمال شده به وسیله تقویت کننده به مبدل است. نتایج این اندازه‌گیری در شکل ۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود به ازای یک دامنه ورودی ثابت، با افزایش فرکانس سیگنال الکتریکی، شدت صوت تابشی با لگاریتم فرکانس به صورت خطی افزایش می‌یابد. علاوه بر این می‌بینیم شدت صوت تابشی با افزایش زمان ماند در اسید افزایش یافته است. این نکته از نتایج ارائه شده در شکل (۱) و جدول (۱) قابل پیش‌بینی است؛ زیرا با افزایش شماره نمونه‌ها امپدانس حقیقی (مقاومت الکتریکی) نمونه‌ها کاهش و در نتیجه رسانندگی آن‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه بازده تبدیل انرژی الکتریکی به گرمایی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه انرژی آکوستیکی از تبدیل مستقیم انرژی گرمایی به دست می‌آید، انتظار می‌رود با افزایش رسانندگی یا کاهش مقاومت الکتریکی راندمان مبدل افزایش یابد.



شکل ۳. نحوه تغییرات سطح تابش آکوستیکی مبدل به صورت تابعی از فرکانس

ب) اندازه‌گیری تراز تابش صوت به صورت تابعی از

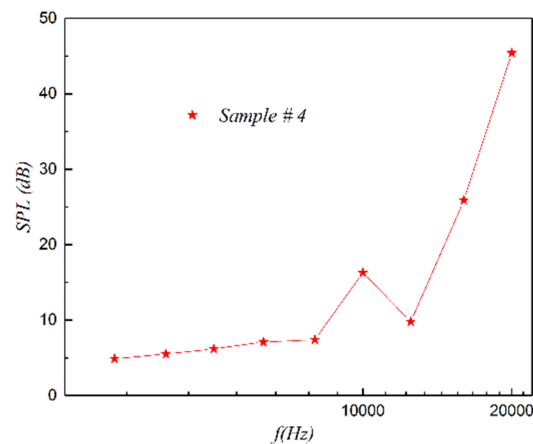
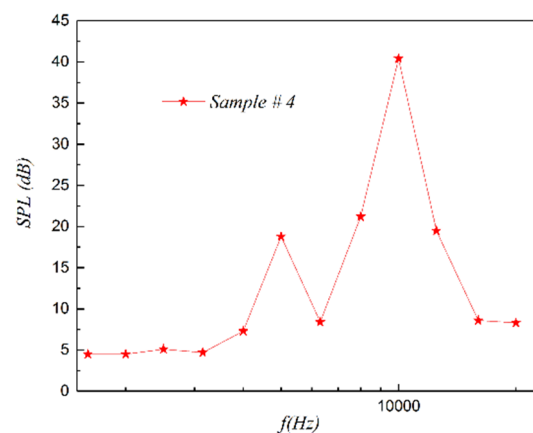
ولتاژ: به منظور مطالعه نحوه تغییرات تراز شدت صوت با دامنه ولتاژ ورودی، در شکل ۴ تراز شدت صوت به صورت تابعی از دامنه ولتاژ ورودی در دو فرکانس 2.5kHz و 5.0kHz رسم شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود؛ در هر دو مورد با افزایش دامنه سیگنال ورودی دامنه تراز شدت صوت افزایش می‌یابد. شیب این افزایش برای

از این مرحله نمونه‌ها الکتروگذاری و بر روی پایه‌های مناسب نصب شدند و دامنه و فاز امپدانس مبدل‌ها به صورت تابعی از فرکانس اندازه‌گیری شد. نتایج نشانگر آن است که با افزایش زمان ماند رسانندگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در ادامه آزمایش‌های آکوستیکی با اندازه‌گیری سطح تابش آکوستیکی به صورت تابعی از فرکانس و ولتاژ انجام شد. همچنین طیف سیگنال‌های آکوستیکی تولید شده نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که به ازای دامنه ثابت سیگنال‌های الکتریکی ورودی، با افزایش فرکانس شدت صوت تابشی متناسب با لگاریتم فرکانس افزایش می‌یابد؛ همچنین با افزایش دامنه سیگنال الکتریکی تراز دارد، زیرا افزایش بیش از حد ولتاژ دمای سطح مبدل را به شدت افزایش می‌دهد که این می‌تواند سبب اکسیدشدگی (سوختن) مبدل شود.

مراجع

- [1] Arnold HD, Crandall IB. The thermophone as a precision source of sound. *Physical review*. 1917 Jul 1;10(1):22.
- [2] Xiao L, Chen Z, Feng C, Liu L, Bai ZQ, Wang Y, Qian L, et al. Flexible, stretchable, transparent carbon nanotube thin film loudspeakers. *Nano letters*. 2008 Dec 10;8(12):4539-45.
- [3] Dutta R, Albee B, van der Veer WE, Harville T, Donovan KC, Papamoschou D, et al. Gold nanowire thermophones, *The Journal of Physical Chemistry C*, 2014 Dec 18;118(50):29101-7.
- [4] Kang S, Cho S, Shanker R, Lee H, Park J, Um DS, et al. Transparent and conductive nanomembranes with orthogonal silver nanowire arrays for skin-attachable loudspeakers and microphones. *Science advances*; 2018 Aug 1;4(8): 8772.
- [5] Bobinger M, La Torraca P, Mock J, Becherer M, Cattani L, Angeli D, et al. Solution-processing of copper nanowires for transparent heaters and thermo-acoustic loudspeakers. *IEEE Transactions on Nanotechnology*. 2018 Apr 24;17(5):940-7.
- [6] Wang YD, Hu HP, Wang DD. Generalized Theory of Thermo-Acoustic Emission from Nanocrystalline Porous Silicon. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;(472):734-38.

در 5.0kHz نیز دامنه قابل توجهی در حدود نصف تراز در فرکانس 10kHz را دارا است. علاوه بر این حول فرکانس 5.0kHz نیز دامنه نسبت به زمینه افزایش قابل توجهی دارد. این مسئله تنها محدود به فرکانس تحریک 5.0kHz نیست و به ازای همه فرکانس‌های تحریک الکتریکی مشاهده می‌شود. به‌عنوان مثال در شکل ۵ همین اثر برای فرکانس ورودی 10kHz نمایش داده شده است. در اینجا نیز علاوه بر فرکانس 20kHz سیگنال آکوستیکی خروجی دارای یک بیشینه موضعی در فرکانس سیگنال الکتریکی یعنی 10kHz است.



شکل ۵. تراز فشار آکوستیکی به ازای فرکانس سیگنال ورودی 5kHz (بالا) و 10kHz (پایین)

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، چهار نمونه گرافنی از مبدل‌های ترموآکوستیکی ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. به این منظور غشاءهای گرافنی با استفاده از روش فیلتراسیون خلأ روی PVDF ساخته و با استفاده از محلول HI رسانا شد. پس

- [7] Tian H, Xie D, Yang Y, Ren TL, Wang YF, Zhou CJ, et al. Transparent, flexible, ultrathin sound source devices using indium tin oxide films. *Applied Physics Letters*. 2011 Jul 25;99(4):043503.
- [8] Tian H, Li C, Mohammad MA, Cui YL, Mi WT, Yang Y, et al. Graphene earphones: Entertainment for both humans and animals. *ACS nano*. 2014 Jun 24;8(6):5883-90.
- [9] Marcano DC, Kosynkin DV, Berlin JM, Sinitskii A, Sun Z, Slesarev A, Alemany LB, et al. Improved synthesis of graphene oxide. *ACS nano*. 2010 Aug 24;4(8):4806-14.
- [10] Pei S, Zhao J, Du J, Ren W, Cheng HM. Direct reduction of graphene oxide films into highly conductive and flexible graphene films by hydrohalic acids. *Carbon*. 2010 Dec 1;48(15):4466-74.

پی‌نوشت

1. Electric Mobility
2. Thermal Conductivity