

Research Paper

Synthesis and Investigation of Electrical and Magnetic Properties of Ag/Hf₃NiO_y Nanocomposites¹

Reza Gholipur²

Received:2020.12.12

Revised:2021.01.05

Accepted:2021.04.04

Abstract

In this research, the electric, magnetic and structural behaviors of the Ag/Hf₃NiO_y nanostructures fabricated using the co-precipitation technique were studied. Since, the fabrication of ordered metallic structure arrays is habitually complex, the mass production of these structures is being prevented. In recent years, researchers have begun to explore materials with inherent DNG property. Metamaterials allow both field components of light to couple to meta-atoms and thus they enable entirely new optical properties and exciting applications. Ag/Hf₃NiO_y disordered percolative composites contain conductive nanoparticles. When the concentration of metal nanoparticles in semi-continuous composites is less than the percolation threshold, the real part of the dielectric constant is positive. Also, the permeability constants can be controlled by silver content, meaning that this parameter is adjustable. Interestingly, decreased permeability was observed in samples with higher silver content. When the silver content exceeded the percolation threshold, silver networks were formed due to the interconnection of silver nanoparticles. The effective magnetic properties were due to the magnetic resonance and eddy current of the samples with an external magnetic field. The plasma oscillations of conduction electrons in the samples at a metallic state led to the negative permittivity.

Keywords: *Metamaterial, Nanocomposite, Ag/Hf₃NiO_y, Permittivity and Permeability.*

¹ - DOI: 10.22051/ijap.2021.34347.1184

² - Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: r.gholipur@razi.ac.ir

سنتر و بررسی ویژگی‌های الکتریکی و مغناطیسی نانوکامپوزیت‌های $\text{Ag}/\text{Hf}_3\text{NiO}_y$ ^۱

رضا قلی‌پور^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۵

چکیده

در این تحقیق، ویژگی‌های الکتریکی و مغناطیسی و ساختاری نانوکامپوزیت‌های $\text{Ag}/\text{Hf}_3\text{NiO}_y$ که با روش هم‌رسوبی سنتز شدند، مطالعه شد. به علت اینکه ساخت فراماده‌های منظم سخت و پیچیده است، در سال‌های اخیر تحقیق در زمینه فراماده‌های نامنظم با خواص جفت منفی بیشتر شده است. فرامواد ساختارهایی هستند که با هر دو مؤلفه نور برهمکنش می‌کنند و خواص ویژه‌ای پدید می‌آورند. کامپوزیت‌های کاتوره‌ای $\text{Ag}/\text{Hf}_3\text{NiO}_y$ به عنوان کامپوزیت‌های نفوذی، شامل نانوذرات رسانا هستند. زمانی که غلظت نانوذرات فلزی در کامپوزیت‌های نیمه‌پیوسته کمتر از آستانه نفوذ است، قسمت حقیقی ثابت دی‌الکتریک مثبت است. همچنین ثابت تراوایی و گذردهی را می‌توان با میدان الکترومغناطیسی خارجی کنترل کرد، به عبارتی این دو پارامتر تنظیم‌پذیر است. کاهش تراوایی و گذردهی در نمونه‌های دارای مقدار نقره بیشتر مشاهده شد. زمانی که مقدار نقره از آستانه نفوذ بیشتر شد، شبکه‌های نقره به علت تلفیق نانوذرات در نمونه‌ها تشکیل شدند. خواص مغناطیسی نمونه‌ها به علت تشدید مغناطیسی و جریان ادی

^۱ DOI: 10.22051/ijap.2021.34347.1184

^۲ استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. Email: r.gholipur@razi.ac.ir

نسبت به میدان الکترومغناطیسی اعمالی بودند. نوسان پلاسمای الکترون‌های رسانش در نمونه‌های با حالت فلزی به گذردهی منفی انجامید.
واژگان کلیدی: فراماده، نانوکامپوزیت، نقره-اکسید نیکل هافنیوم، گذردهی و تراوایی.

۱. مقدمه

ایجاد تحول در فرامواد از حوزه نانوکامپوزیت‌ها به علت ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است. بسیاری از نواقص موجود در راه پیشبرد و ارتقاء خصوصیات حوزه ساخت فرامواد با ورود به عرصه نانوکامپوزیت مرتفع می‌شود. پیشرفت پژوهش‌های مربوط به کامپوزیت‌های فرامواد نامنظم در سال‌های اخیر، کاربرد این مواد کامپوزیتی در صنعت را میسر می‌سازد [۱]. همچنان که می‌دانیم پاسخ سیستم به میدان الکترومغناطیس با دو پارامتر ماکروسکوپی تراوایی مؤثر و گذردهی مؤثر تعیین می‌شود [۲]:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'', \mu = \mu' - i\mu'' \quad (1)$$

زمانی که ε و μ ماده قسمت‌های حقیقی منفی دارند، چنین ماده‌ای را فرامواد جفت منفی (DNG) و زمانی که یکی از این دو منفی باشد، فرامواد تک منفی (SNG) می‌نامند [۳-۶]. مواد DNG تحقیقات زیادی را در سال‌های اخیر به علت خواص الکترومغناطیسی منحصر به فرد و عملکرد ویژه‌شان به همراه داشته‌اند که می‌توان به سرعت فاز منفی [۷]، ضریب شکست منفی [۸]، پوشش‌های نامرئی‌کننده [۹] و عدسی‌های کامل [۱۰] اشاره کرد. مواد SNG که کمتر به آن‌ها توجه کرده‌اند، قابلیت خوبی در ساخت وسایل دارند [۱۱-۱۳]. برای مثال، مواد دارای گذردهی منفی را می‌توان در تصویربرداری میدان نزدیک^۱ [۱۴]، در عملکردهای انتقال توان بی‌سیم یا آنتن‌های بسامد رادیویی با کارایی مطلوب [۱۵]، استفاده کرد. امروزه ضروری است که از این مواد در صنعت استفاده شود. ساختار کلی فراماده‌ها شامل این‌هاست: (۱) ساختار با حلقه‌ها و سیم‌های فلزی دوره‌ای [۱۶] و (۲) ساختار با نانوذرات فلزی در محیط دی‌الکتریک [۱۷-۲۴].

واحدهای سازنده فرامواد منظم در شکل و اندازه متنوع تنظیم می‌شود، که پاسخ‌های الکتریکی و مغناطیسی را تنظیم‌پذیر می‌سازد. ساخت فرامواد منظم با روش‌های لایه‌نشانی بخار شیمیایی پرتو یون متمرکز [۲۵]، لیتوگرافی هولوگرافی سه‌بعدی [۲۶]، لیتوگرافی پرتو ایکس عمیق [۲۷] و

^۱ Near field imaging

لیتوگرافی نانونقش‌های چندلایه‌ای^۱ [۲۸]، سخت و پیچیده و هزینه‌بر است. در مقابل، کامپوزیت‌های فلزیدی الکتریک کاتوره‌ای یا نامنظم را می‌توان با روش‌های تبخیر گرمایی، تبخیر پرتوالکترون، کندوپاش^۲ و آبکاری^۳ [۲۹] ساخت. در سال ۲۰۱۳، توساک^۴ [۳۰] نشان داد مواد کامپوزیتی که شامل اجزاء رسانای کشیده و جهت‌دار هستند، با قرار گرفتن در محیط دی‌الکتریک خواص ویژه‌ای از خود نشان می‌دهند. تراوایی مؤثر محیط فلزیدی الکتریک که شامل دی‌الکتریک با خواص مغناطیسی عالی، گذردهی زیاد، پایداری مطلوب گرمایی، کیفیت عالی سطح مشترک با نانوذرات است، در ناحیه میکروموج به مراتب نسبت به مواد دیگر بیشتر است. تشدید مغناطیسی با تشدیدهای مغناطیسی تحریک‌شده از جریان‌های اِدی و خواص مغناطیسی محیط به دست می‌آید. به دست آوردن تشدیدهای الکتریکی و مغناطیسی در یک محدوده یکسان بسامدی، سخت و مشکل است. یک راه حل ممکن برای این مسئله استفاده از ساختار مغناطیسی تشدید همراه با ساختار فلزی/اکسیدی غیرتشدید است، که پیش‌زمینه مربوط به گذردهی منفی را فراهم می‌کند. این عمل را می‌توان با فلزات نجیب مانند طلا و نقره که گذردهی منفی در بسامدهای اپتیکی و میکروموج دارند، به دست آورد. عنصرهایی مانند نیکل و آهن و نیکل هم به عنوان ساختارهای تشدید استفاده می‌شود. اِتلاف برای الکترون‌های رسانش از برهمکنش‌های الکترون-الکترون و الکترون-فونون، پراکندگی به علت عیوب شبکه یا مرزخانه‌ها، پدید می‌آید. ثابت میرایی مجموع تمام نواخت‌های میرایی به علت پراکندگی الکترون-الکترون، الکترون-فونون و عیوب شبکه و پراکندگی مرزخانه‌هاست. در میان فلزات، نقره کمترین ثابت میرایی را دارد و بهترین انتخاب در بسامدهای کم است. طلا که ثابت میرایی بزرگ‌تری نسبت به نقره دارد در بسامدهای فرسرخ نزدیک استفاده می‌شود. در ادامه، روش سنتز نانوذرات نقره در محیط دی‌الکتریک اکسید هافنیوم تقویت‌شده با نیکل را شرح می‌دهیم و سپس خواص مغناطیسی، الکتریکی، ساختاری و اپتیکی آن را بررسی می‌کنیم و نشان می‌دهیم که این ترکیب به عنوان یک ماده SNG قابلیت DNG را نیز می‌تواند داشته باشد.

۲. روند آزمایش

۲-۱ سنتز دی‌الکتریک

سنتز نمونه‌های نانو ساختاری دی‌الکتریک اکسید نیکل هافنیوم با روش هم‌رسوبی انجام می‌گیرد. این روش از اصلی‌ترین و جزء اولین‌ها در میان روش‌های شیمیایی ساخت نانوذرات است. در این

¹ Multilayer nanoimprint lithography

² Sputtering

³ Electroplating

⁴ Tsutaoka

روش یک مادهٔ محلول در محیط به یک ساختار نامحلول تبدیل می‌شود. به طور کلی تشکیل محصولات کم محلول از حالت مایع اساس این روش است. فرایند رسوب‌گیری، مراحل هسته-زایی و رشد را به همراه دارد. با تنظیم این دو حالت می‌توان کیفیت محصول را بیشتر کرد. کلرید هافنیوم^۱ و کلرید نیکل (II) به عنوان پیش‌ماده استفاده می‌شود. محلولی با غلظت ۱ مولار از هافنیوم و نیکل به نسبت مولی ۳ به ۱ به دست می‌آوریم. سپس محلول آمونیم را برای جلوگیری از انباشتگی ذرات، قطره قطره به آن اضافه می‌کنیم. در ادامه، این محلول را در همزن مغناطیسی قوی در دمای اتاق قرار می‌دهیم که در نهایت دی‌الکتريکی با تخلخل عالی حاصل می‌شود. تخلخل سبب می‌شود که نانوذرات نقره در محیط دی‌الکتريک به راحتی قرار بگیرند.

۲-۲ رشد نانوذرات نقره

نانوذرات نقره با کاهش نیترات نقره در اتیلن گلیکول به دست می‌آید. نانوذرات طلا با کاهش اسید کلروآتوریک در دی‌متیل فرمامید^۲ (DMF) که نقش دانه را دارد، به دست می‌آید. در رشد نقره از طلا به عنوان دانه استفاده می‌کنیم. دو دسته سنتز با دانه‌ها وجود دارد: (۱) رشد همگن و (۲) رشد ناهمگن. اگر دانه‌ها با فلز رشد‌کننده یکسان باشند یعنی دانه‌ها نقره باشند، این فرایند همگن است. در رشد ناهمگن، فلزی انتخاب می‌شود که ثابت شبکهٔ دانه و نقره نزدیک به هم باشد. اختلاف زیاد در ثابت شبکه سبب رشد غیرهمبافته^۳ می‌شود و ساختارهای نامطلوب به دست می‌آید. طلا را می‌توان به عنوان دانه استفاده کرد، چرا که ثابت شبکه‌ای مشابه با نقره دارد. اتلاف-های نقره به سختی سطح بستگی دارد. در ابتدا محلول اسید کلروآتوریک را با حل کردن ۱۰ میلی‌لیتر DMF در ۱ میلی‌لیتر محلول ۰/۰۰۵ مولار اسید کلروآتوریک به دست می‌آوریم. چهار دقیقه بعد، ۱۷۰ میلی‌گرم نیترات نقره و ۱۷۰ میلی‌گرم PVP را که جداگانه در DMF حل شده بودند، به محلول اسید کلروآتوریک با نواخت تقریبی ۲ میلی‌لیتر در دقیقه اضافه می‌کنیم. برای بررسی اثر زمان در رشد نانوذرات، این محلول در دمای ۱۶۰ درجهٔ سلسیوس به مدت ۶۰ دقیقه تحت همزن مغناطیسی قرار می‌گیرد. شبکهٔ نانوذرات نقره شروع به رشد کردن در این مرحله می‌کنند و سپس محلول را با استون رقیق می‌کنیم و سپس آن را تحت سانتریفیوژ با ۲۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه قرار می‌دهیم. باید توجه کرد که فشار اکسیژن نیز در محیط نباید خیلی زیاد باشد که باعث می‌شود به علت فرایند حکاکی^۴، نانومیلهٔ نقره تشکیل نشود. سپس نانوذرات

¹ Zirconyl chloride octahydrate

² N,N-dimethylformamide

³ Nonepitaxial

⁴ Etching process

نقره را به محلول هافنیوم/نیکل با نسبت‌های وزنی ۰، ۵، ۱۵، ۲۰ درصد اضافه می‌کنیم. سپس محلول حاصل را در همزن شدید مغناطیسی قرار می‌دهیم. در ادامه، محلول را تحت فراصوت به مدت ۶۰ دقیقه قرار می‌دهیم و سرانجام محلول نهایی را در دمای ۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک می‌کنیم. برای مطالعه نقش نقره در خواص الکتریکی و مغناطیسی دی‌الکتریک اکسید هافنیوم نیکل، یک نمونه خام بدون ذرات نقره نیز سنتز می‌کنیم، یعنی همه مراحل بالا را تکرار می‌کنیم و فقط مراحل مربوط به سنتز نقره را حذف می‌کنیم. نمونه‌های حاصل را AHNx با ۲۰، ۱۵، ۵، x=۰ نامگذاری می‌کنیم. تحلیل فازهای بلورک‌ها به کمک اندازه‌گیری‌های پراش پرتو ایکس با دستگاه MPD3000 صورت گرفت. تحلیل‌های مورفولوژی سطح و میکروسکوپی با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با دستگاه VEGA\TESCAN-XMU صورت گرفت. اندازه‌گیری‌های تراوایی و گذردهی به کمک نظریه‌های خازن و القایی به دست آمد. در روش خازنی ماده بین دو الکترود قرار می‌گیرد که خازنی را تشکیل می‌دهند. در روش القایی ماده داخل یک وسیله شیشه‌ای گرد (چنبره) قرار می‌گیرد و سپس به کمک مولد فانکش، گذردهی و تراوایی ماده را با روابط زیر به دست می‌آوریم [۳۱]:

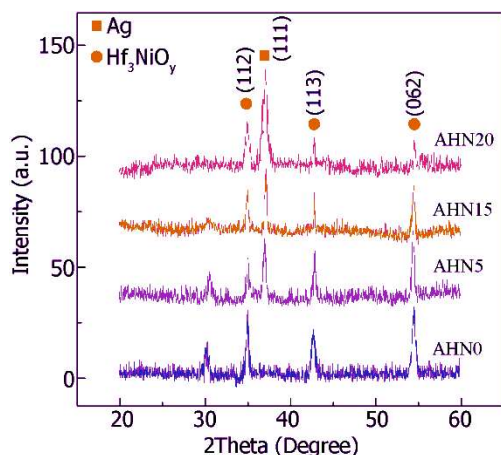
$$\varepsilon' = \frac{Cl}{\varepsilon_0 A}, \varepsilon'' = \frac{l}{RA\omega\varepsilon_0} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{2\pi(L-L_0)}{N^2\mu_0 h \ln \frac{d}{c}} + 1, L = \frac{Z^*}{i\omega} \quad (3)$$

که در آن‌ها، l ضخامت نمونه، C ظرفیت، R مقاومت، A مساحت صفحه الکترود، ε_0 گذردهی فضای آزاد، L خودالقای چنبره با ماده و L_0 خودالقای بدون ماده است. Z^* مقاومت ظاهری چنبره با نمونه، ω بسامد زاویه‌ای و μ_0 تراوایی فضای آزاد است. N تعداد حلقه، C قطر درونی، d قطر بیرونی و h ارتفاع است.

۳. نتایج حاصل و بحث

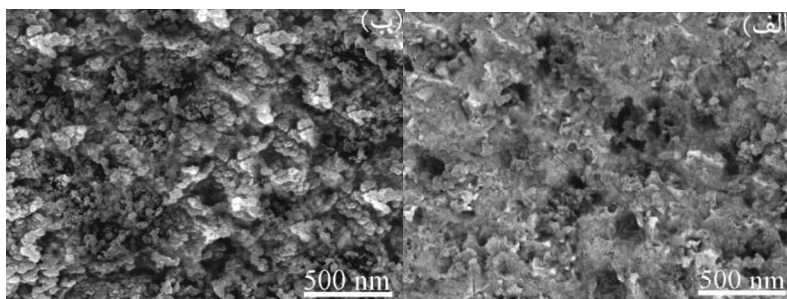
طیف‌های XRD نمونه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با تزریق نقره نمونه‌ها به صورت بلوری تشکیل شدند. چهار قله مربوط به دی‌الکتریک با کد مرجع (۰۷۳۳-۰۰۲۶) مشخص می‌شوند. با افزایش مقدار نقره شدت قله‌های مربوط به دی‌الکتریک در حال کاهش است.



شکل ۱ طیف‌های XRD مربوط به نمونه‌های با مقدار نقره ۰، ۵، ۱۵، ۲۰ درصد.

قله‌ای که در $2\theta = 30.085^\circ$ مشاهده می‌شود، مربوط به صفحه (۱۱۱) اکسید هافنیوم نیکل است که با افزایش مقدار نقره در نمونه AHN20 دیگر دیده نمی‌شود. با افزایش مقدار نقره شاهد جابه‌جایی قله نقره به سمت زاویه‌های کمتر هستیم. شدت قله نمونه ۲۰ نسبت به نمونه‌های دیگر بیشتر است، که انتظار این نیز می‌رفت. قله (۱۱۱) نقره با کد مرجع (۰۰-۰۰۱-۱۱۶۴) مشخص می‌شود.

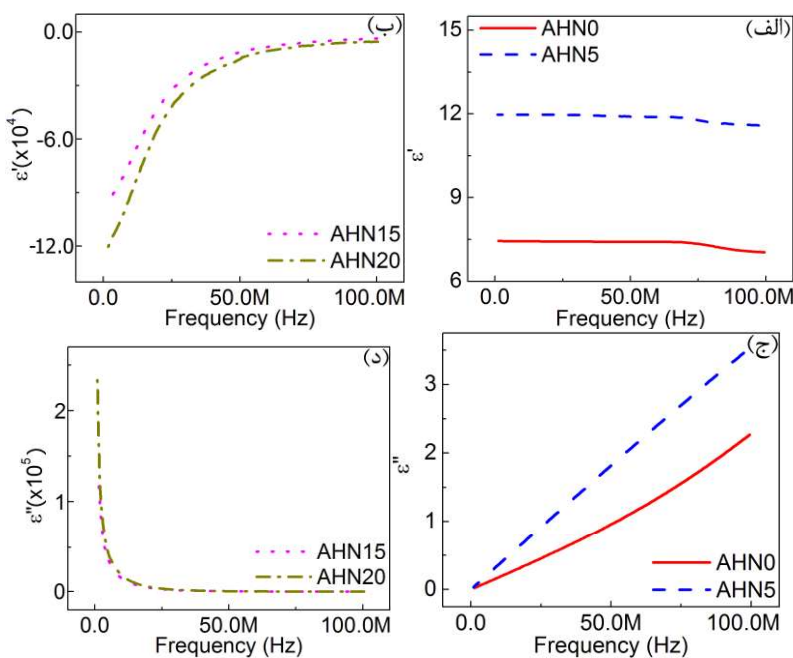
تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های AHN20 و AHN0 در شکل ۲ آمده است. مشاهده می‌شود که با افزایش نقره محیط چگال‌تر و تخلخل محیط کمتر می‌شود، چرا که ذرات نقره این منفذها را پر می‌کنند. مورفولوژی نمونه ۲۰ به گونه‌ای است که به هم پیوستگی ذرات بیشتر است.



شکل ۲ تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های با مقدار نقره (الف) ۰ و (ب) ۲۰ درصد.

وابستگی بسامدی گذردهی نمونه‌ها در شکل ۳ آمده است. مشاهده می‌شود که نمونه‌های زیر آستانه نفوذ یک پراکندگی عادی گذردهی دی‌الکتریک نشان می‌دهند. گذردهی مثبت است و با

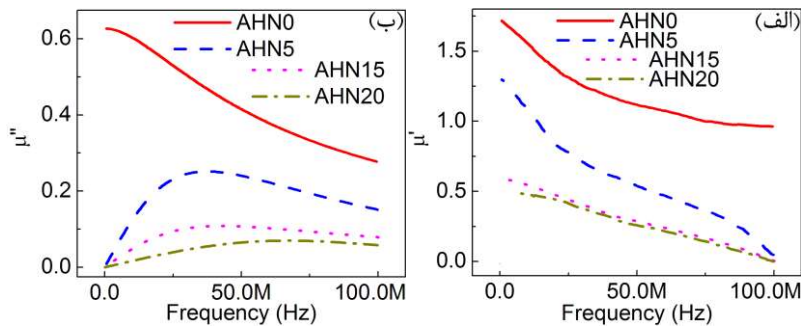
افزایش بسامد کاهش می‌یابد، که می‌توان آن را به قطبش الکترون‌های موضعی نسبت داد. قسمت موهومی ثابت دی‌الکتریک این نمونه‌ها از قسمت حقیقی آن کوچک‌تر است و از طرفی گذردی حقیقی با افزایش مقدار نقره افزایش یافته است. زمانی که مقدار نقره ۱۵ و ۲۰ درصد می‌شود، ثابت دی‌الکتریک حقیقی منفی می‌شود. برای نمونه‌های ۱۵ و ۲۰، مقدار نقره از آستانه نفوذ تجاوز کرده است و رفتار القایی نشان می‌دهد. افزایش بیشتر نقره تا ۲۰ درصد باعث می‌شود که ثابت دی‌الکتریک منفی‌تر شود، چرا که در نمونه با نقره ۲۰ درصد، خاصیت دی‌الکتریک کمی کم شده است. گذردی منفی نتیجه‌ای از تشکیل مسیرهای رسانای سه‌بعدی در کامپوزیت است. شبکه‌های نقره توسط ارتباط ذرات نقره تشکیل می‌شوند.



شکل ۳ تغییرات گذردی (الف) و (ب) حقیقی، (ج) و (د) موهومی بر حسب بسامد مربوط به نمونه‌های با مقدار نقره ۵، ۱۵ و ۲۰ درصد.

طیف تراوایی کامپوزیت در شکل ۴ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که تراوایی حقیقی با افزایش مقدار نقره کاهش می‌یابد. علاوه بر این، منحنی تراوایی بر حسب بسامد نوعی واهلش عادی هستند. با افزایش بسامد همچنین شاهد کاهش تراوایی به علت اثر جریان‌های ایدی و تشدید مغناطیسی هستیم، که چنانکه بحث کردیم، شبکه نقره که در نمونه ۲۰ تشکیل می‌شود تحت یک میدان الکترومغناطیسی قرار می‌گیرد. حلقه‌های جریان که در نمونه القا می‌شود باعث پدید آمدن

یک میدان الکترومغناطیسی اضافی می‌شود که بر خلاف میدان الکترومغناطیسی خارجی است. به محض اینکه میدان الکترومغناطیسی قوی القاشده توسط حلقه‌های جریان، میدان مغناطیسی ناشی از موج فرودی را حذف می‌کند، کاهش تراوایی پدید می‌آید. اگرچه تراوایی منفی در کامپوزیت‌ها پدید نمی‌آید، گرایش نمودارها در کاهش مستمر تراوایی برحسب بسامد مشهود است.



شکل ۴ تغییرات تراوایی (الف) حقیقی و (ب) موهومی برحسب بسامد مربوط به نمونه‌های با مقدار نقره ۰، ۵، ۱۵، ۲۰ درصد.

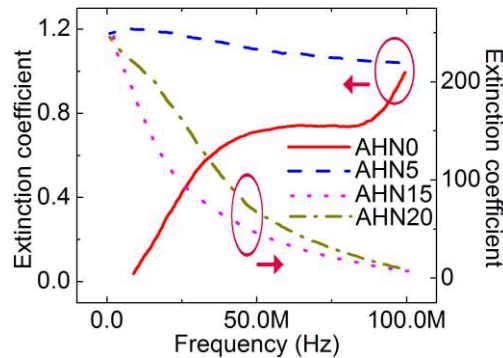
شکل ۵ ضریب خاموشی نمونه‌ها را نشان می‌دهد که از رابطه زیر به دست آمده است [۳۲]،

(۴)

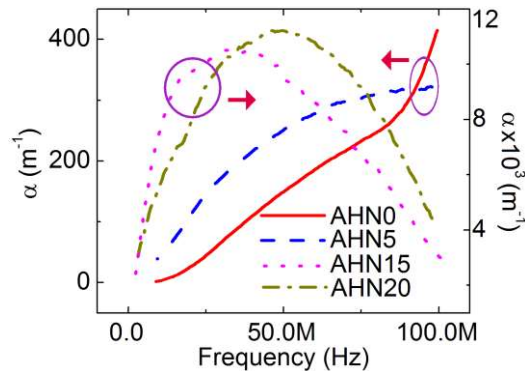
$$k = \frac{\mu''\epsilon' + \mu'\epsilon''}{\sqrt{2}(|\mu| + \mu'\epsilon' - \mu''\epsilon'')^{1/2}}$$

برای نمونه‌های ۵ و ۱۵ و ۲۰ ضریب خاموشی با افزایش بسامد کاهش می‌یابد. به علت اینکه ثابت دی‌الکتریک نمونه AHN20 منفی است، ایجاد یک قسمت موهومی ثابت دی‌الکتریک می‌کند. با افزایش مقدار نقره ضریب خاموشی نمونه ۲۰ نسبت به نمونه ۱۵ افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار نقره تا ۵ درصد مقدار ضریب خاموشی بیشتر می‌شود که می‌توان آن را به رفتار خازنی نسبت داد، یعنی جذب بیشتر می‌شود. مشاهده شده است که ضریب خاموشی نمونه AHN20 نسبت به نمونه‌های دیگر بیشتر است که می‌تواند در نانوجاذب‌ها استفاده شود.

تغییرات ضریب جذب $\alpha = 2k\omega/c$ که در آن، c سرعت نور و ω بسامد میدان الکترومغناطیسی و k ضریب خاموشی است) برحسب بسامد در شکل ۶ نشان داده شده است. نمونه AHN5 نسبت به نمونه‌های دیگر، ضریب جذب کمتری دارد، اما در نواحی بالا ضریب جذب افزایش می‌یابد. برای نمونه ۲۰ نسبت به دیگر نمونه‌ها، ضریب جذب بیشتر شده است که تأییدی بر نتایج ضریب خاموشی است.



شکل ۵ تغییرات ضریب خاموشی بر حسب بسامد مربوط به نمونه‌های با مقدار نقره ۰، ۵، ۱۵، ۲۰ درصد.



شکل ۶ تغییرات ضریب جذب بر حسب بسامد مربوط به نمونه‌های با مقدار نقره ۰، ۵، ۱۵، ۲۰ درصد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، خواص ساختاری، الکتریکی، مغناطیسی و اپتیکی نانوکامپوزیت نقره/اکسید هافنیوم نیکل را مطالعه کردیم. در این نانوکامپوزیت، فضای بین نانوذرات نقره با دی‌الکتریک اکسید هافنیوم نیکل پر شد. می‌توان برای بهتر شدن عملکرد از دی‌الکتریک با ثابت دی‌الکتریک بیشتر استفاده کرد، چرا که باعث می‌شود جریان جابه‌جایی بین نانوذرات بیشتر شود و مغناطش بهتری شکل بگیرد. همچنین می‌توان از دی‌الکتریک‌هایی استفاده کرد که شکل تزریقی برای بیشتر کردن خواص مغناطیسی نداشته باشد مانند اکسید گارنت. گذردهی و تراوایی این مواد به طور چشمگیری در پاسخ ماده تأثیر می‌گذارد. مزیت اصلی استفاده از اکسید هافنیوم نیکل، تخلخلی است که در سطح ایجاد می‌کند. برای بیشتر شدن این تخلخل استفاده از مواد متخلخل‌کننده به عنوان کمکی مفید است، مانند زئولیت‌ها، کربن‌های فعال‌شده، ترکیبات فلز-آلی، سرامیک،

سیلیکات، آبروژل و پلیمرها. با آستانه نفوذ کمتر، نمونه با مقدار کمتری از نقره به حالت فلزی می‌رسید. نمونه‌هایی که با مقدار کمتری از نقره به حالت فلزی می‌رسیدند قسمت موهومی گذردهی آن‌ها کمتر بود. به علت تشکیل گشتاورهای دوقطبی الکتریکی زیر آستانه نفوذ، ثابت دی‌الکتریک با افزایش مقدار نقره افزایش یافت. تغییرات ضریب خاموشی زیر آستانه نفوذ نسبت به نمونه‌های بالای آستانه نفوذ کمتر بود، که نشان می‌داد نمونه رفتاری خازنی دارد. حلقه‌های جریان ادی نقش مهمی در کاهش تراوایی داشتند. در ساختار منظم گشتاور مغناطیسی افزایش می‌یابد که طبق قانون لنز کاهش بیشتر تراوایی را شاهد هستیم. رفتار کاهشی تراوایی نمونه AHN20 به عنوان یک ماده SNG نشان می‌دهد که این ماده با مهیا شدن شرایط خواص ماده DNG را نیز از خود نشان می‌دهد.

منابع

- [1] Shalaev W. Cai, V., *Optical Metamaterials Fundamentals and Applications*, 1st Ed., Springer-Verlag, New York (2010).
- [2] Chui S. T., Hu L., Theoretical investigation on the possibility of preparing left-handed materials in metallic magnetic granular composites, *Phys. Rev. B* 65, 144407 (2002).
- [3] Sounas D. L., Kantartzis N. V., Systematic surface wave analysis of the interfaces of composite DNG/SNG media, *Optics Express* 17, 8513 (2009).
- [4] Smith D. R., Padilla W. J., Vier D. C., Nasser S. C. N., Schultz S., Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity, *Phys. Rev. Lett.* 84, 4184 (2000).
- [5] Zhang Z. D., Fan R. H., Shi Z. C., Pan S. B., Yan K. L., Sun K. N., Zhang J. D., Liu X. F., Wang X. L., Dou S. X., Tunable negative permittivity behavior and conductor-insulator transition in dual composites prepared by selective reduction reaction, *J. Mater. Chem. C* 1, 79 (2013).
- [6] Zhu J. H., Wei S. Y., Haldolaarachchige N., He J., Young D. P., Guo Z. H., Very large magnetoresistive graphene disk with negative permittivity, *Nanoscale* 4, 152 (2014).
- [7] Zhao H., Kang L., Zhou J., Zhao Q., Li L., Peng L., Bai Y., Experimental demonstration of tunable negative phase velocity and negative refraction in a ferromagnetic/ferroelectric composite metamaterial, *Appl. Phys. Lett.* 93, 201106 (2008).
- [8] Houck A. A., Brock J. B., Chuang I. L., Experimental Observations of a Left-Handed Material That Obeys Snell's Law, *Phys. Rev. Lett.* 90, 137401 (2003).
- [9] Anantha Ramakrishna S., Physics of negative refractive index materials, *Rep. Prog. Phys.* 68, 449 (2005).
- [10] Fang N., Lee H., Sun C., Zhang X., Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens, *Science* 308, 534 (2005).
- [11] Hou Q., Yan K. L., Fan R. H., Zhang Z. D., Chen M., Sun K., Cheng C. B., Experimental realization of tunable negative permittivity in percolative $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{19}\text{B}_{13}$ /epoxy composites, *RSC Adv.* 5, 9472 (2015).
- [12] Zhu J. H., Wei S. Y., Zhang L., Mao Y. B., Ryu J., Mavinakuli P., Karki A. B., Young D. P., Guo Z. H., Conductive Polypyrrole/Tungsten Oxide Metacomposites with Negative Permittivity, *J. Phys. Chem. C* 114, 16335 (2010).
- [13] Liu C. D., Lee S. N., Ho C. H., Han J. L., Hsieh K. H., Electrical Properties of Well-Dispersed Nanopolyaniline/Epoxy Hybrids Prepared Using an Absorption-Transferring Process, *J. Phys. Chem. C* 112, 15956 (2008).

- [14] Li B., Sui G., Zhong W. H., Single Negative Metamaterials in Unstructured Polymer Nanocomposites toward Selectable and Controllable Negative Permittivity, *Adv. Mater.* 21, 4176 (2009).
- [15] Ziolkowski R. W., Erentok A., Metamaterial-based efficient electrically small antennas, *IEEE Trans. Antennas Propag.* 54, 2113 (2006).
- [16] Smith D. R., Padilla W. J., Vier D. C., Nemat-Nasser S. C., Schultz S., Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity, *Phys. Rev. Lett.* 84, 4184 (2000).
- [17] Zhou J., Zhang L., Tuttle G., Koschny T., Soukoulis C. M., Negative index materials using simple short wire pairs, *Phys. Rev. B* 73, 041101R (2006).
- [18] Pendry J. B., Negative refraction makes a perfect lens, *Phys. Rev. Lett.* 85, 3966 (2000).
- [19] Pendry J. B., Schurig D., Smith D. R., Controlling electromagnetic fields, *Science* 312, 1780 (2006).
- [20] Parazzoli C. G., Greigor R. B., Li K., Koltenbah B. E. C., Tanielian M., Experimental verification and simulation of negative index of refraction using Snell's law, *Phys. Rev. Lett.* 90, 107401 (2003).
- [21] Shalaev V. M., Cai W. S., Chettiar U. K., Yuan H. K., Sarychev A. K., Drachev V. P., Kildishev A. V., Negative index of refraction in optical metamaterials, *Opt. Lett.* 30, 3356 (2005).
- [22] Zhang S., Fan W. J., Panoiu N. C., Malloy K. J., Osgood R. M., Brueck S. R. J., Experimental demonstration of near-infrared negative-index metamaterials, *Phys. Rev. Lett.* 95, 137404 (2005).
- [23] Tsakmakidis K. L., Hermann C., Klaedtke A., Jamois C., Hess O., Surface Plasmon polaritons in generalized slab heterostructures with negative permittivity and permeability, *Phys. Rev. B* 73, 085104 (2006).
- [24] He G., Wu R.-x., Poo Y., Chen P., Magnetically tunable double-negative material composed of ferrite-dielectric and metallic mesh, *J. Appl. Phys.* 107, 093522 (2010).
- [25] Morita T., Kondo K., Hoshino T., Kaito T., Fujita J., Ichihashi T., Ishida M., Ochiai Y., Tajima T., Matsui S., Nanomechanical switch fabrication by focused-ion-beam chemical vapor deposition, *J. Vac. Sci. Technol. B* 22, 3137 (2004).
- [26] Campbell M., Sharp D. N., Harrison M. T., Denning R. G., Turberfield A. J., Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography, *Nature* 404, 53 (2000).
- [27] Ehrfeld W., Lehr H., Deep X-ray-lithography for the production of 3-dimensional microstructures from metals, polymers and ceramics, *Radiat. Phys. Chem.* 45, 349 (1995).
- [28] Kehagias N., Reboud V., Chansin G., Zelsmann M., Jeppesen C., Schuster C., Kubenz M., Reuther F., Gruetzner G., Torres C. M. S., Reverse-contact UV nanoimprint lithography for multilayered structure fabrication, *Nanotechnology* 18, 175303 (2007).
- [29] Cai W., Shalaev V., *Optical Metamaterials Fundamentals and Applications*, first ed., Springer-Verlag, New York (2010).
- [30] Tsutaoka T., Kasagi T., Yamamoto S., Hatakeyama K., Low frequency plasmonic state and negative permittivity spectra of coagulated Cu granular composite materials in the percolation threshold. *Appl. Phys. Lett.*, 102, 181904-181907 (2013).
- [31] Yan K. L., Fan R. H., Shi Z. C., Chen M., Qian L., Wei Y. L., Sun K., Li J., Negative Permittivity Behavior and Magnetic Performance of Perovskite $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ at High-frequency, *J. Mater. Chem. C* 2, 1028 (2014).
- [32] Depine R. A., Lakhtakia A., A new condition to identify isotropic dielectric-magnetic materials displaying negative phase velocity, *Micro. and Opti. Techno. Lett.* 41, 315 (2004).