بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

ساخت و مشخصه‌یابی فیلتر میکروموج برپایه بلور مگنتوفوتونی

علی سبحانی[۱]، سیده مهری حمیدی سنگ‌دهی[۱]، علی آفتابی[۲] و مژگان نجفی[۳]

[۱] آزمایشگاه مگنتوپلاسمونیک، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

m_hamidi@sbu.ac.ir & alisobhani68@gmail.com

[۲] دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

[۳] دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران.

چکیده – این پژوهش یک روش جدید برای ساخت فیلتر میکروموج ارائه می‌دهد. به منظور دست‌یابی به این هدف، نانوسیم‌های نیکل توسط روش الکتروانباشت در قالب آلومینا آماده شدند و سپس در اتانول پخش شده و برای تبخیر اتانول در یک توزیع دمایی یکنواخت قرار گرفتند و برای سنتز ترکیب پلیمر و نانوسیم در پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان پخش شدند. در نهایت قبل از سخت شدن پلیمر در یک میدان مغناطیسی خارجی هم‌راستا شدند. سپس پلیمر سخت شده خالص و شامل نانوسیم‌ها به ابعاد مساوی بریده شده و به منظور ساخت بلور مگنتوفوتونی به روش پیوند پلاسمایی به یکدیگر متصل شدند. سپس پاسخ فرکانسی بلور مگنتوفوتونی توسط تحلیل‌گر برداری شبکه در محدوده فرکانسی *MHz* ۵۰ تا *GHz* ۴۰ اندازه‌گیری شد.

کلید واژه- نانوسیم‌های نیکل، روش الکتروانباشت، پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، طیف عبور میکروموج.

Fabrication and Characterization of a Microwave Filter based on a Magnetic Photonic Bandgap Material

A. Sobhani [1], S. M. Hamidi [1], A. Aftabi [2] and M. Najafi [3]

Abstract- This letter presents a novel method for the fabrication of a microwave filter based on a magnetic photonic bandgap material (MPBG). To achieve this purpose the Nickel nanowires prepared by electrodeposition method in anodic alumina template and then dispersed in ethanol and placed in a heater to evaporate the ethanol and dispersed in PDMS matrix and finally aligned in the external magnetic field, before the polymer is cured. Then cured PDMS with and without NWs were cutted with surgical blade in same dimensions, and Eventually, bonded together for the formation MPBG with plasma bonding technique. Then, the frequency response of the MPBG measured by vector network analyzer in frequency range from 50 MHz to 40 GHz.

Keywords: Nickel Nanowires; electrodeposition method; Polydimethylsiloxane; Microwave Transmission spectra.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

۱- مقدمه

پلیمرهای مغناطیسی، به صورت ترکیب محیط پلیمری و عناصر مغناطیسی، ترکیب‌های چند منظوره هستند که به عنوان مواد هوشمند نو ظهور مطرح گردیده‌اند. این ترکیب‌ها ویژگی‌های الکترومغناطیسی تنظیم پذیر (مانند ضریب شکست و جذب RF) دارند و به عنوان تحریک حرارتی از راه دور می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند [۱]. این ترکیب‌ها کاربردهای بالقوه شامل حفاظ الکترومغناطیسی [۲-۳] حسگرهای مغناطیسی [۴-۹] و پلیمرهای حافظه‌دار در دستگاه‌های پزشکی را دارا می‌باشند [۱۰].

در این پژوهش نانوسیم‌ها در بستره پلیمری پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان[1] به عنوان پلیمر مناسب برای ساخت بلور مگنتوفوتونی مورد استفاده قرار گرفتند. قطر کوچک نانوسیم‌ها در مقایسه با عمق پوسته، هم‌چنین ماهیت عایق پلیمر، نفوذ کامل میدان الکترومغناطیسی درون نانوسیم‌ها را تضمین می‌کند.

ساخت و مشخصه‌یابی دستگاه‌های میکروموج و بلورهای مگنتوفوتونی بر پایه آرایه‌ای از نانوسیم‌های فرومغناطیس موازی الکترونباشت شده در قالب پلی‌کربنات متخلخل قبلا مورد مطالعه و پژوهش قرار گرفته‌اند [۱۱-۱۳]. در این پژوهش، نانوسیم‌ها به روش الکترونباشت در قالب آلومینا سنتز و سپس در اتانول پخش شده و در یک توزیع دمایی یکنواخت برای تبخیر اتانول قرار گرفتند و در نهایت در پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان پخش شدند، قبل از سخت شدن پلیمر میدان مغناطیسی خارجی جهت هم‌راستا کردن نانوسیم‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این روش برخلاف قالب پلی‌کربنات متخلخل یک روش کم هزینه، آسان و فراگیر برای کنترل مواد نانوساختار در سیالات در یک محدوده بزرگ است.

پژوهش‌های اخیر [۱۴-۱۵] نشان داده است که پیوند پلیمر با پلیمر بدون نیاز به هیچ ماده چسبنده تنها با اصلاح سطوح مورد نظر بدون تخریب فیزیکی سطح، توسط پلاسما غیرحرارتی امکان پذیر است [۱۶-۱۷]. بنابراین در این پژوهش، پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان خالص و شامل نانوسیم‌های نیکل هم‌راستا شده توسط روش پیوند پلاسمایی به یک‌دیگر متصل شدند.

سپس طیف عبور میکروموج توسط تحلیل‌گر برداری شبکه[2] اندازه‌گیری شد.

۲- روش تجربی

در این پژوهش قالب آلومینای نانوحفره که به صورت تجاری در دسترس است (Whatman, Inc)، برای الکترونباشت نانوسیم‌های نیکل مورد استفاده قرار گرفت. این قالب تخلخل بالا و حفره‌های استوانه‌ای نزدیک به هم به قطر ۱۰۰ nm و طول ۶۰ میکرون دارد. قبل از انباشت نیکل، یک لایه طلا به ضخامت ۳۸۵ nm بروی یک طرف قالب به روش تبخیر فیزیکی به عنوان کاتد لایه‌نشانی شد و یک میله گرافیتی، به صورت عمودی در بشر به عنوان آند در سلول الکترونباشت مورد استفاده قرار گرفت. سطح قالب در معرض محلول الکترولیت شامل به ترتیب gr/Lit ۳۰۰ سولفات نیکل ($NiSO_4.6H_2O$)، ۴۵ gr/Lit کلراید نیکل ($NiCl_2.6H_2O$) و ۴۵ gr/Lit اسید بوریک (H_3BO_3) قرار گرفت. انباشت با اعمال ولتاژ مستقیم ۲/۵ ولت به دو سر آند و کاتد شروع و به مدت ۶۰ دقیقه در دمای اتاق به طول انجامید. به منظور جداسازی نانوسیم‌های نیکل از قالب ابتدا فیلم طلا با آغشته کردن قالب به محلول شامل ید، پتاسیم یدید و آب به مدت ۸ دقیقه حذف شد. سپس قالب فورا با آب دوبار تقطیر شستشو داده شد و پس از آن قالب آلومینا در محلول سدیم هیدروکسید ۶ مولار به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق حل شد. بلافاصله نانوسیم‌ها توسط دستگاه آلتراسونیک با آب و اتانول چندین مرتبه مورد شستشو قرار گرفتند. سرانجام نانوسیم‌ها در اتانول پخش شده و به منظور تبخیر اتانول در یک توزیع دمایی یکنواخت قرار داده شدند.

پس از آن، برای ساخت ترکیب پلیمری نانوسیم‌های نیکل، پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان به عنوان پلیمر مناسب مورد استفاده قرار گرفت، که شامل پلیمر پایه و یک عامل سخت کننده است که با نسب حجمی ۱:۱۰ با یک‌دیگر ترکیب می‌شوند. نانوسیم‌های نیکل با پلیمر پایه در حدود wt ٪۰/۰۵، مخلوط شدند. پخش نانوسیم‌های نیکل در دو مرحله انجام شد. ابتدا ترکیب پلیمر پایه و نانوسیم‌های نیکل به مدت یک ساعت در دمای اتاق در

[1] Polydimethylsiloxane

[2] Vector Network Analyzer

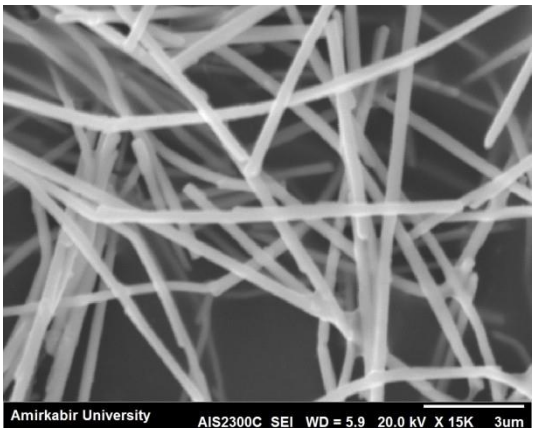
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

دستگاه آلتراسونیک قرار داده شد و سپس بطور مکانیکی با یک DC موتور به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شد. یک دقیقه قبل از هم زدن نهایی، عامل سخت کننده در یک نسبت حجمی ۱۰:۱ به پلیمر پایه افزوده شد. سپس ترکیب پلیمر و نانوسیم‌ها در یک قالب ریخته شده و به منظور حباب‌زدایی به مدت ۱۵ دقیقه در خلاء قرار داده شد. در نهایت به منظور سخت شدن، ترکیب پلیمر و نانوسیم‌ها به مدت ۲ ساعت در یک توزیع دمایی یکنواخت ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. در طول مرحله سخت شدن برای هم‌راستا کردن نانوسیم‌ها در پلیمر پلی-دی‌متیل‌سیلوکسان، ترکیب پلیمر و نانوسیم‌ها در مجاورت یک میدان مغناطیسی خارجی به بزرگی ۲۰ گوس، ایجاد شده توسط یک سیم پیچ هلمهولتز قرار داده شد.

به منظور ساخت فیلتر میکروموج بر پایه بلور مگنتوفوتونی، ترکیب پلیمر و نانوسیم‌ها سنتز شده در مرحله قبل و پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان سخت شده خالص به روش برش میکرونی به ابعاد مساوی ۱/۵ mm بریده شدند. سرانجام این لایه‌ها بصورت یک در میان به روش پیوند پلاسمایی به یک دیگر متصل شدند.

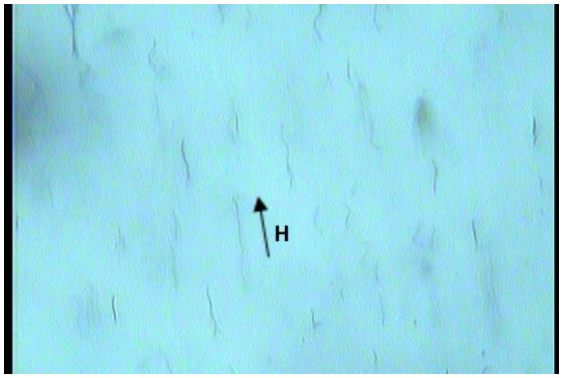
۳- نتایج و بحث

شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوسیم-های نیکل بعد از خارج شدن از قالب را نشان می‌دهد. نانوسیم‌ها میانگین طول ۶ تا ۷ میکرون و قطری در محدوده ۱۰۰ تا ۲۰۰ نانومتر دارند.



شکل ۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوسیم‌های نیکل بعد از خارج شدن از قالب.

شکل ۲ تصویر نوری از نانوسیم‌های هم‌راستا شده در پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان را نشان می‌دهد. به وضوح دیده می‌شود که نانوسیم‌های نیکل در جهت میدان مغناطیسی اعمالی، هم‌راستا شده‌اند.



شکل ۲: تصویر نوری از نانوسیم‌های هم‌راستا شده در پلیمر پلی‌دی-متیل‌سیلوکسان.

شکل ۳ عدم وجود حباب و پیوند عالی بین دو لایه پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان خالص و ترکیب پلیمر و نانوسیم‌ها به روش پیوند پلاسمایی را نشان می‌دهد.

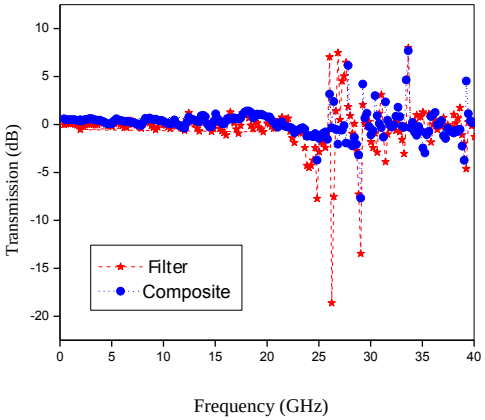


شکل ۳: تصویر نوری از پیوند بین دولایه پلیمر پلی‌دی‌متیل-سیلوکسان خالص و ترکیب پلیمر و نانوسیم‌ها به روش پیوند پلاسمایی.

شکل ۴ منحنی عبور میکروموج اندازه‌گیری شده از بلور مگنتوفوتونی (ستاره‌ها) و ترکیب پلیمر پلی‌دی‌متیل-سیلوکسان و نانوسیم‌های نیکل (دایره‌ها) توسط تحلیل‌گر برداری شبکه (VNA) مدل 8722ES در محدوده فرکانسی ۵۰ MHz تا ۴۰ GHz بدون اعمال میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. کل طول بلور مگنتوفوتونی ۱/۲ cm است. در منحنی عبور ما دو کمینه می‌بینیم، اولی به دلیل اثر بلور مگنتوفوتونی در فرکانس ۲۶/۲ GHz است، زیرا این کمینه در منحنی عبور ترکیب پلیمر و نانوسیم‌ها حذف می‌شود. کمینه دوم در فرکانس GHz

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

۲۹، متناظر با تشدید فرومغناطیسی نانوسیم‌های نیکل است.



شکل ۴: عبور میکروموج اندازه‌گیری شده از بلور مگنتوفوتونی (ستاره‌ها) و ترکیب پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان و نانوسیم‌ها (دایره-ها) در میدان مغناطیسی صفر.

۴- نتیجه‌گیری

به طور خلاصه، نانوسیم‌های نیکل با موفقیت درون قالب آلومینا به روش الکتروانباشت سنتز شدند و در اتانول پخش شده و در یک توزیع دمایی یکنواخت برای تبخیر شدن اتانول قرار گرفتند. سپس در پلیمر پلی‌دی‌متیل-سیلوکسان پخش شده و در نهایت میدان مغناطیسی خارجی برای هم‌راستا کردن نانوسیم‌ها، قبل از سخت شدن پلیمر مورد استفاده قرار گرفت.

در این پژوهش یک روش جدید برای ساخت فیلتر میکروموج بر پایه بلور مگنتوفوتونی ارائه شد، که پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان سخت شده خالص و شامل نانوسیم‌ها به روش برش میکرونی به ابعاد مساوی ۱/۵ میلی‌متر تقسیم شدند. سپس بصورت یک در میان به منظور ساخت بلور مگنتوفوتونی به روش پیوند پلاسمایی به یک‌دیگر متصل شدند.

ریز ساختار ترکیب پلیمر و نانوسیم‌ها توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین عبور میکروموج فیلتر ساخته شده توسط تحلیل‌گر برداری شبکه در محدوده ۵۰ MHz تا ۴۰ GHz اندازه‌گیری شد. با مقایسه طیف عبوری ترکیب پلیمر و نانوسیم‌ها و بلور مگنتوفوتونی، فرکانس باند نواری و تشدید فرومغناطیسی نانوسیم‌ها به ترتیب ۲۶/۲ GHz و ۲۹ GHz بدست آمد.

مراجع

[1] K.W.E. cheng, C.Y. Tang, D.K.W. Cheng, H. Wu, Y.L. Ho, and Y. Lu, "Investigation of polymer bonded materials for power conversion," *Proceeding of 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*. Vol. 3 (2002) 1254.

[2] F. Tsuda, H. Ono, S. Shinohara, and R. Sato "Effect of installing magnetic-composite sheeting on transmission line to suppress conducted-electromagnetic noise," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record*, Vol. 2 (2000) 867.

[3] L.K. Lagorce, M.G. Allen, "Ferrite filled polymers for integrated power conversion devices," *Proceedings. 1996 International Symposium on Microelectronics*, Vol. 2920 (1996) 176.

[4] H.S. Gokturk, T.J. Fiske, and D.M. Kalyon, "Electric and magnetic properties of a thermoplastic elastomer incorporated with ferromagnetic powders," *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 29 (1993) 4170.

[5] K.L. Lagorce and M.G. Allen, "Micromachined polymer magnets," *Proceedings. IEEE, The Ninth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems*, P 85-90, 1996.

[6] L. Lagorce, D. Kercher, J. English, O. Brand, A. Glezer, and M. Allen "Batch-fabricated microjet coolers for electronic components," *Proceedings. 1997 International Symposium on Microelectronics*, P. 494, 1997.

[7] L.K. Lagorce and M.G. Allen "Magnetic and mechanical properties of micromachined strontium ferrite/polyimide composites," *Journal of Microelectromechanical System*, Vol. 6 (1997) 307.

[8] L.K. Lagorce, O. Brand, M.G. Allen "Magnetic microactuators based on polymer magnets," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 8 (1999) 2.

[9] J.G. Boyd, D.C. Lagoudas, and S. Cheong-Soo "Arrays of micro-electrodes and electromagnets for processing of electro-magneto-elastic multifunctional composite materials," *The International Society for Optical Engineering*, Vol. 5055 (2003) 268.

[10] P.R. Buckley, G.H. Mckinley, T.S. Wilson, W. Small, W.J. Benett, J.P. Bearinger, M.W. Mcelfresh, and D.J. Maitland, "Inductively heated shape memory polymer for the magnetic actuation of medical devices," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 53 (2006) 2075.

[11] A. Saib, D. Vanhoenacker, A. Huynen, A. Encinas, and L. Piraux "Magnetic photonic band-gap material at microwave frequencies based on ferromagnetic nanowires," *Proc. Applied Physics Letters (AIP)*, 83 (2003) 2378.

[12] A. Saib, and I. Huynen "Transmission Lines on Periodic bandgap metamaterials: from microwave to optics application," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 7, 2005.

[13] M. Sharma, B.k. Kuanr and Ananjan Basu, "Tunable Coplanar Waveguide Microwave Device on Ferromagnetic Nanowires," *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, Vol. 2 (2014) 1.

[14] B.H. Jo, L.M. Van Lerberghe, K.M. Motsegood and D.J. beebe, *J. Microelectromech. Syst.* 9 (2000)76-81.

[15] S. hattarcharya, A. Datta, J.M. Berg and S. Gangopadhyay, *J. Microelectromech. Syst.* 14 (2005) 590-97.

[16] N. De Geyter, R.morent and Leys C Surf. Coat. *Technol.* 201 (2006) 2460-6.

[17] N. De Geyter, R. Morent, C. Leys, L. Gengembre and E. Payen, *Surf. Coat. Technol.* 201 (2007) 7066-75.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]