نانومقیاس
سال دوم | شماره‌ی دوم | تابستان ۱۳۹۴
www.nanomeghyas.ir

سوئیچ نوری قابل تنظیمِ مبتنی بر نانولوله‌ی کربنی چندجداره

سینا سلیمانی[۱] | سعید گل‌محمدی هریس[۲*]

۱.دانشکده مهندسی نانوفناوری-نانوالکترونیک، دانشگاه تبریز
۲.دانشکده مهندسی برق الکترونیک، دانشگاه تبریز

چکیده

در این مقاله با یک روش جدید که بر اساس مختصات استوانه‌ای می‌باشد، به معرفی تابع دی‌الکتریک غیرایزوتروپیک برای نانولوله‌ی کربنی چندجداره پرداخته شده است. نانولوله‌ای با شعاع داخلی ۲۲ نانومتر و شعاع خارجی ۲۵ نانومتر که داخل آن با ماده‌ی دی‌الکتریک پلی‌سیلیکون پر شده است برای هدایت امواج نوری بصورت پلاسمون پلاریتون‌های سطحی مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به قابل تغییر بودن سطح فرمی در صفحات گرافنیِ نانولوله، با اعمال میدان الکتریکی هدایت دینامیک آن را در نقطه‌ای تغییر داده‌ایم که از هدایت پلاسمون پلاریتون‌های سطحی جلوگیری کرده و می‌تواند به عنوان یک سوئیچ نوری عمل نماید.

واژگان کلیدی: پلاسمون پلاریتون‌های سطحی، تابع دی‌الکتریک، غیرایزوتروپیک، گرافن، نانولوله‌های کربنی چندجداره.

۱ مقدمه

نانولوله‌های کربنی و گرافن بدلیل هدایت دینامیکی بالا و داشتن قابلیتِ میزبانی برای پلاسمون پلاریتون‌های سطحی، در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین و دانشمندان قرار گرفته‌اند [۱،۲]. همچنین قابلیت تنظیم سطح فرمی با اعمال ولتاژ و میدان خارجی که توان تنظیم هدایت مدهای پلاسمونی را در اختیار محققین قرار می‌دهد، می‌تواند این مواد را جایگزینی مناسب برای فلزات نجیب مانند طلا و نقره نماید [۳]. نانولوله‌های کربنی تک جداره بدلیل داشتن شعاع کم، هدایت دینامیکی و به طبعِ آن رفتار اپتیکی متفاوتی از صفحات گرافنی نشان می دهند، که این رفتار وابسته به کایرالیتی آن‌ها می‌باشد[۴]. این درحالی است که نانولوله‌های کربنی تک جداره با شعاع بزرگتر از ۱۰ نانومتر بدلیل بزرگ بودن محیط سطح مقطعی، می‌توانند رفتار اپتیکی مشابه با صفحه‌ی گرافنی داشته باشند و بتوانند به کایرالیتی نانولوله وابسته نباشند [۵]. نانولوله‌های کربنی بدلیل تفاوت در ساختار و رشد و عدم کنترل کامل بر آن می‌توانند جداره‌هایی با کایرالیتی‌های متفاوتی داشته باشند که رفتار اپتیکی آن‌ها در برخی از تحقیقات، با مدل درود-لورنتز و با تعمیم دادن خواص اپتیکیِ گرافیت با همان ضخامت شبیه‌سازی می شود [۶]. در این مقاله، هدایت دینامیک و تابع دی‌الکتریک غیرایزوتروپیکِ صفحات گرافن به ضخامت ۳ نانومتر در مختصات استوانه‌ای به نانولوله‌ی کربنی چند جداره با شعاع داخلی ۲۲ نانومتر و شعاع خارجی ۲۵ نانومتر تعمیم داده شده‌است. از آنجایی که فاصله‌ی بین صفحات گرافنی به اندازه‌ی ۰,۳۴ نانومتر می‌باشد در این ضخامت از گرافن می توانیم ۸ جداره‌ی گرافنی داشته باشیم. بدلیل زیاد بودن شعاع کوچکترین جداره‌ی نانولوله، این روش می‌تواند تقریبِ درستی برای خواص اپتیکی آن باشد. برای ایجاد محیط دی‌الکتریک و میزبانی برای امواج پلاسمون پلاریتون‌های سطحی، داخل نانولوله را پر شده با ماده‌ی دی‌الکتریک پلی‌سیلیکون با ضریب شکست ۲,۴ در فرکانس شبیه‌سازی در نظر می‌گیریم. قرارگرفتن محیط دی‌الکتریک در داخل نانولوله باعث هدایت نوریِ متمرکز در سطح دیواره‌ی داخلی نانولوله می‌شود و ضریب محدود شدگی را افزایش خواهد داد. فرکانس شبیه سازی ۳۰ تراهرتز انتخاب شده که در این فرکانس قسمت حقیقی تابع دی‌الکتریکِ گرافن در سطح آن بطور مناسبی منفی بوده و مناسب برای هدایت پلاسمونی می‌باشد. پس از ارائه‌ی ساختار موجبر پلاسمونی بر اساس نانولوله‌ی کربنی به بررسی اینکه آیا امکان کنترل الکتریکی این هدایت وجود دارد، پرداخته

تاریخ دریافت: ۹۴/۴/۱۳ | تاریخ پذیرش: ۹۴/۶/۱۸

* ایمیل مسئول مکاتبات: sgolmohammadi@tabrizu.ac.ir

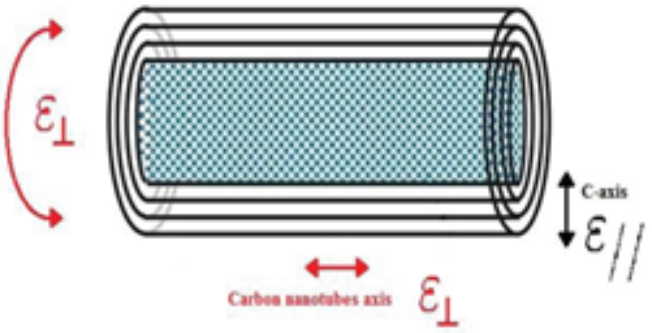
خواهد شد. این قابلیت که بتوانیم سطح فرمی صفحات گرافن را با اعمال ولتاژ خارجی کنترل کنیم اثبات شده و مورد توجه محققین و دانشمندان بسیاری قرار گرفته است [۷]. آنچه که بیشتر در این تحقیق مدنظر قرار گرفته است بررسی تئوریِ این ساختار می‌باشد و به نحوه‌ی عملی سازی آن پرداخته نشده است. بنا بر نتایج بدست‌آمده می‌توانیم با اعمال میدان خارجی میدان‌های الکتریکی پلاسمونیِ سطحی را در محل اعمال میدان خارجی بدلیل جذب زیاد آن متوقف نموده و یک سوئیچ پلاسمونی قابل تنظیم بر اساس نانولوله‌ی کربنی چندجداره ارائه نماییم.

۲ مدلسازی

در این مقاله ساختاری که طراحی و مورد بررسی قرار می‌گیرد شامل نانولوله‌ی کربنی چندجداره با شعاع داخلی ۲۲ نانومتر و شعاع خارجی ۲۵ نانومتر می‌باشد که بدلیل شعاع داخلی زیاد می‌تواند بصورت صفحه‌ی گرافنی با ضخامت ۳ نانومتر که رول شده است درنظر گرفته شود. صفحات گرافنی بدلیل ضخامت کم و فاصله‌ی بین صفحاتِ در حدود ۲,۵ برابر فاصله‌ی بین اتمی، نمی‌توانند در جهت عمود بر سطح خود هدایت دینامیکی قابل توجهی نشان دهند و به همین دلیل در بیشتر موارد از این هدایت صرفنظر می‌شود. تابع دی‌الکتریکی که در جهت میدان الکتریکی عمود بر سطح صفحات گرافنی درنظر گرفته می‌شود در بیشتر مواقع میانگین تابع دی‌الکتریک محیط اطراف خواهد بود [۸]. این ساختار صفحه‌ی گرافنی را دارای تابع دی‌الکتریک غیرایزوتروپیک می‌کند که در صورت رول شدن آن باید در مختصات استوانه‌ای مورد بحث و شبیه‌سازی قرار گیرد. همچنین در مدل ارائه شده از اثر هیبریداسیون که به موجب انحنای صفحه‌ی گرافنی می‌تواند بوجود بیاید، بدلیل زیاد بودن شعاع آن صرفنظر می‌شود [۹]. این مدل می‌تواند بیانگر خواص فیزیکی این نوع نانولوله بصورت بسیار دقیق و مناسبی باشد. هدایت دینامیک صفحات گرافنی با استفاده از رابطه معروف آن در منابع مختلفی ارائه شده است [۱۰]. همچنین در این روابط از تونل زنی بین صفحات گرافنی نانولوله بدلیل ناچیز بودن آن صرفنظر شده است [۱۱]. در این رابطه در شرایطی که تعداد صفحات گرافنی بیشتر باشد این هدایت به تعداد صفحات موجود در لایه‌ی گرافنی ضرب خواهد شد و در تابع دی‌الکتریک آن ضخامت متناظر با آن، برای بدست آوردن هدایت دینامیک حجمی اعمال می‌شود. رابطه (۱) بیانگر ارتباط بین هدایت ماده‌ی هادی با تابع دی‌الکتریک آن می‌باشد.

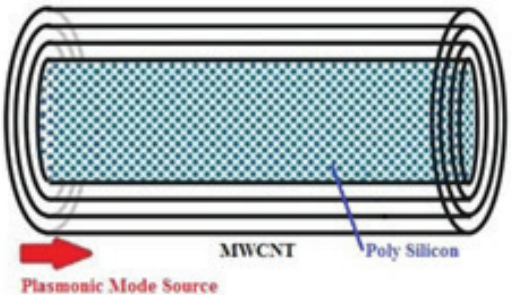
$$\tilde{\varepsilon}_r(\omega) = \varepsilon_r + j\frac{\sigma(\omega)}{\omega\varepsilon_0 t} \qquad (۱)$$

در این رابطه t نشان دهنده‌ی ضخامت صفحه‌ی گرافنی می‌باشد که به اندازه‌ی ۳ نانومتر می‌باشد. و w فرکانس برحسب رادیان می باشد. رابطه‌ی بالا برای تغییرات زمانِ منفی درنظر گرفته شده است. بعد از بدست آوردن خواص اپیتکی مربوط به این نانولوله‌ی کربنی به مدلسازی ساختار مربوط پرداخته می‌شود. همانگونه که به آن اشاره شد تابع دی‌الکتریک غیرایزوتروپیک نانولوله‌ی کربنی باید در مختصات استوانه‌ای مورد بحث قرارگیرد. شکل ۱ نمایش دهنده‌ی این تابع دی الکتریک می‌باشد. همانگونه که در آن مشاهده می‌شود نانولوله در جهت طولی و همچنین در روی سطح آن و در جهت عرضی، بدلیل زیاد بودن شعاع باید تابع دی‌الکتریک صفحه‌ای گرافن را داشته باشد. ولی برای جهت عمود بر صفحه‌ی گرافنی این تابع دی‌الکتریک میانگین دو محیط خارجی نانولوله و داخلی آن درنظر گرفته می‌شود. در شکل ۱ $\varepsilon_\perp$ و $\varepsilon_\parallel$ به ترتیب برای تابع دی‌الکتریک در جهت عمود بر صفحه‌ی گرافنی نانولوله‌ی کربنی و روی سطح صفحه‌ی گرافنی آن می‌باشد.



شکل ۱ تابع دی الکتریک غیرایزوتروپیک نانولوله کربنی چندجداره که از ماده‌ی پلی سیلیکون پر شده است. در روی سطح نانولوله هم در جهت طولی و هم در جهت محیطی آن مقدار تابع دی‌الکتریک برابر بوده ولی در جهت عمود بر صفحات گرافنی این تابع مقدار متفاوتی خواهد داشت.

مدِ پلاسمونی که برای این ساختار مورد مطالعه قرار می‌گیرد، در فرکانس ۳۰ تراهرتز و خارج از نانولوله‌ی کربنی به آن اعمال می‌شود. این مد بدلیل وجود ماده‌ی دی‌الکتریک در داخل نانولوله به داخل آن محدود می‌شود. شکل ۲ نمایش‌دهنده‌ی نحوه‌ی اعمال مد پلاسمونی به این ساختار می‌باشد. همچنین مدلسازی بر اساس حل ۳ بعدی معادلات ماکسول با استفاده از روش FDTD می‌باشد.

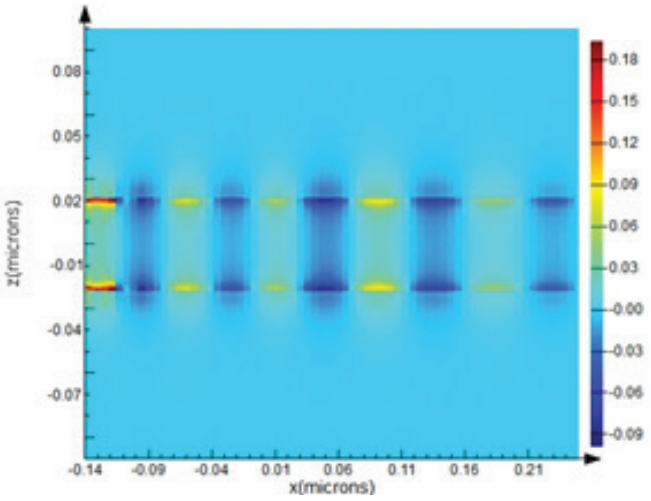


شکل ۲ مد پلاسمونی برای هدایت پلاسمون پلاریتون های سطحی روی نانولوله ی کربنی

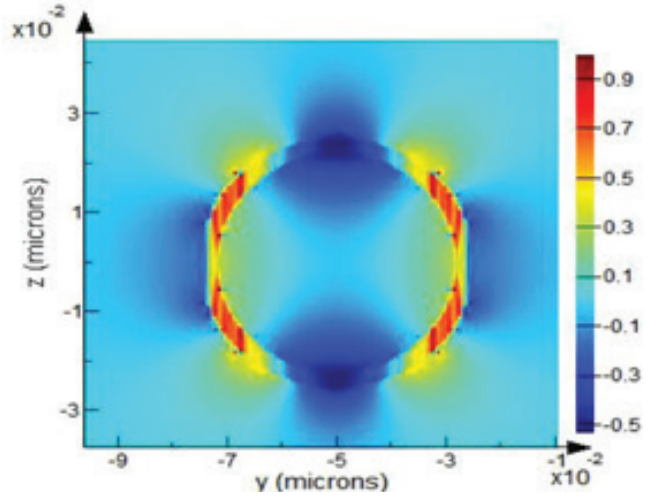
۳ نتایج و بحث

مد پلاسمونی ایجاد شده دارای n_{eff} برابر با ۱۲۱ می‌باشد که طول موج پلاسمون پلاریتون های سطحی برای آن ۸۲,۵ نانومتر خواهد بود بعلاوه مقدار اتلاف توان در این موجبر ۳۴۱۱ دسی‌بل بر سانتی‌متر است. شکل ۳ نشان دهنده‌ی میدان الکتریکی در جهت z محور مختصات می‌باشد.

همچنین در شکل ۴ میدان الکتریکیِ مد پلاسمونی مورد بحث، در جهت z محور مختصات و در صفحه‌ی سطح مقطعی نانولوله نمایش داده شده است.



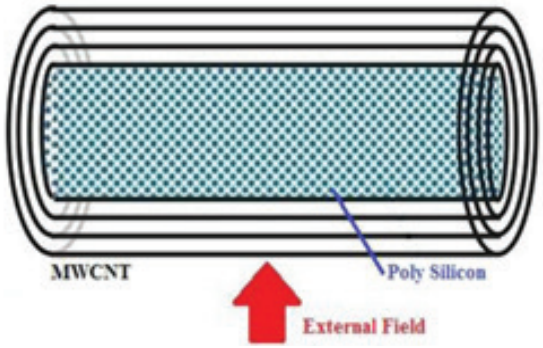
شکل ۳ انتشار پلاسمون پلاریتون‌های سطحی روی دیواره‌ی داخلی نانولوله‌ی کربنی در فرکانس ۳۰ THz و طول موج پلاسمونی برابر با ۸۲,۵ نانومتر که بیشتر در داخل نانولوله و در ناحیه‌ی پلی‌سیلیکونی محدود شده است. که در آن صفحات گرافنی دارای پتانسیل شیمیایی برابر با ۵۰۰ میلی‌الکترون‌ولت می‌باشند. داشت.



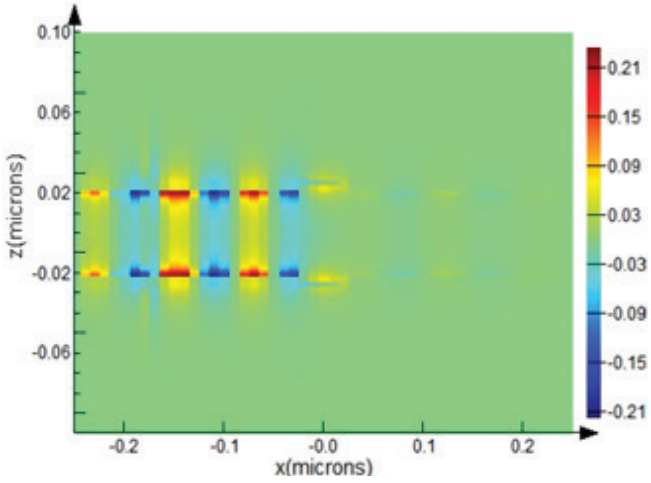
شکل ۴ مد پلاسمونی در جهت سطح مقطعی نانولوله‌ی کربنی چند جداره.

پس از بررسی قابلیت هدایت امواج پلاسمونی بر روی سطح نانولوله‌ی کربنی با صفحات گرافنیِ دارای پتانسیل شیمیایی ۵۰۰ میلی الکترون‌ولت، به بررسی حالتی پرداخته می‌شود که در آن می توان با اعمال ولتاژ منفی خارجی از انتشار این امواج جلوگیری کرد و در نهایت ساختاری بصورت یک سوئیچ نوری قابل تنظیم با ولتاژ خارجی طراحی نمود. باید توجه داشت که صفحات گرافنی مورد نظر دارای دوپینگ اولیه بوده و دارای پتانسیل شیمیایی برابر با ۵۰۰ میلی‌الکترون‌ولت می‌باشند که با اعمال ولتاژ به اندازه‌ی ۴۰۰ میلی ولت در ناحیه‌ی مرکزی نانولوله به عرض ۲۵ نانومتر، این پتانسیل شیمیایی در ناحیه‌ی مذکور برابر با ۱۰۰ میلی‌الکترون‌ولت خواهد شد. این کاهش در پتانسیل شیمیایی باعث می‌شود تا قسمت حقیقی تابع هدایت دینامیک صفحات گرافنی در فرکانس ۳۰ تراهرتز مقادیر بسیار بزرگتری داشته باشد. قسمت حقیقی تابع هدایت دینامیک با قسمت موهومی تابع دی‌الکتریک گرافن مطابق با رابطه‌ی (۱) ارتباط مستقیم دارد. همچنین باتوجه به ارتباط مستقیم قسمت موهومی تابع دی‌الکتریک صفحات گرافنی با مقدار جذب آن‌ها، این مد پلاسمونی بسرعت در ناحیه‌یِ با اعمال ولتاژ منفی، جذب خواهد شد. جذب سریع این مد پلاسمونی در ناحیه‌ای از نانولوله که تحت اعمال ولتاژ خارجی می‌باشد، می‌تواند نمایانگر ساختار یک سوئیچ نوریِ قابل تنظیم با ولتاژ باشد. شکل ۵ بیانگر نقطه‌ی اعمالی این ولتاژ خارجی می‌باشد. همچنین نتیجه‌ی مدلسازیِ تغییر در سطح فرمی در ناحیه‌ی مرکزی نانولوله در شکل ۶ نشان داده شده‌است.

در این شکل می‌توانیم با اتصال قطب مثبت و منفی به ترتیب به پلی‌سیلیکون و ناحیه‌ی مرکزی نانولوله که با فلش قرمز نشان داده شده است، انتشار امواج پلاسمونی را کنترل نمود.



شکل ۵ با اعمال ولتاژ خارجی منفی به ناحیه‌ای واقع در مرکز نانولوله‌ی کربنی چندجداره به اندازه‌ی ۴۰۰ میلی‌ولت و ایجاد تغییر در سطح فرمیِ صفحات گرافنی به اندازه‌ی ۴۰۰ میلی‌الکترون ولت می‌توانیم از انتشار امواج پلاسمونی روی نانولوله‌ی کربنی جلوگیری نماییم. این ولتاژ را می‌توان با ایجاد اتصال‌هایی در ناحیه‌ی پلی سیلیکونی به عنوان قطب مثبت و همچنین ناحیه‌ای واقع در مرکز نانولوله و در محلی که با فلش قرمز رنگ نشان داده شده است بعنوان قطب منفی اعمال نمود.



شکل ۶ مد پلاسمونی با طول موج پلاسمونی برابر با ۸۲،۵ نانومتر در فرکانس ۳۰ تراهرتز که با اعمال میدان خارجی به ناحیه‌ای واقع در مرکز نانولوله به اندازه‌ی ۴۰۰ میلی الکترون‌ولت، می‌توانیم از انتشار پلاسمون پلاریتون‌های سطحی جلوگیری نماییم که یک سوئیچ نوری قابل تنظیم با ولتاژ خارجی خواهد بود.

۴ نتیجه‌گیری

در این مقاله به طراحی ساختار یک موجبر نوری بر اساس پلاسمون پلاریتون‌های سطحی پرداخته شده است. نانولوله‌ی کربنی با شعاع داخلی ۲۲ نانومتر و شعاع خارجی ۲۵ نانومتر که با ماده‌ی پلی‌سیلیکون با ضریب شکست حقیقی ۲،۴، پر شده است و برای هدایت موج پلاسمونی در نظر گرفته شده است. شعاع داخلی بزرگ نانولوله کربنی باعث می‌شود تا بتوانیم از وابستگی خواص نوریِ جداره‌های نانولوله به کایرالیتی آن‌ها صرفنظر کرده و آن را مانند یک صفحه‌ی گرافنی با ضخامت ۳ نانومتر که رول شده است درنظر بگیریم و خواص اپتیکی گرافن را به نانولوله تعمیم دهیم. با توجه به قابل تنظیم بودن سطح پتانسیل شیمیایی برای صفحات گرافن، موجبر پلاسمونی طراحی‌شده کاملا قابل تنظیم با ولتاژ خارجی بوده و می‌توانیم از آن به‌عنوان یک موجبر پلاسمونی یا سوئیچ پلاسمونیِ قابل کنترل با ولتاژ خارجی استفاده نماییم.

مراجع

[1] A. N. Grigorenko, M. Polini, and K. S. Novoselov, “Graphene plasmonics,” Nat. Photonics, vol. 6, no. 11, pp. 749–758, 2012.

[2] J.-S. Gómez-Díaz and J. Perruisseau-Carrier, “Graphene-based plasmonic switches at near infrared frequencies,” Opt. Express, vol. 21, no. 13, pp. 15490–15504, 2013.

[3] F. H. L. Koppens, D. E. Chang, and F. J. Garcia de Abajo, “Graphene plasmonics: a platform for strong light–matter interactions,” Nano Lett., vol. 11, no. 8, pp. 3370–3377, 2011.

[4] J. Hao and G. W. Hanson, “Infrared and optical properties of carbon nanotube dipole antennas,” Nanotechnology, IEEE Trans., vol. 5, no. 6, pp. 766–775, 2006.

[5] I. Soto Lamata, P. Alonso-González, R. Hillenbrand, and A. Y. Nikitin, “Plasmons in cylindrical 2D materials as a platform for nanophotonic circuits,” ACS Photonics, vol. 2, no. 2, pp. 280–286, 2015.

[6] H. Butt, Q. Dai, T. D. Wilkinson, and G. A. J. Amaratunga, “Negative index photonic crystal lenses based on carbon nanotube arrays,” Photonics Nanostructures-Fundamentals Appl., vol. 10, no. 4, pp. 499–505, 2012.

[7] J. Lao, J. Tao, Q. J. Wang, and X. G. Huang, “Tunable graphene-based plasmonic waveguides: nano modulators and nano attenuators,” Laser Photon. Rev., vol. 8, no. 4, pp. 569–574, 2014.

[8] I.-T. Lin, Y.-P. Lai, K.-H. Wu, and J.-M. Liu, “Terahertz Optoelectronic Property of Graphene: Substrate-Induced Effects on Plasmonic Characteristics,” Appl. Sci., vol. 4, no. 1, pp. 28–41, 2014.

[9] J. Berres and G. W. Hanson, “Multiwall carbon nanotubes at RF-THz frequencies: Scattering, shielding, effective conductivity, and power dissipation,” Antennas Propagation, IEEE Trans., vol. 59, no. 8, pp. 3098–3103, 2011.

[10] L. A. Falkovsky, “Optical properties of graphene,” in Journal of Physics: Conference Series, 2008, vol. 129, no. 1, p. 12004.

[11] M. V Shuba, G. Y. Slepyan, S. A. Maksimenko, C. Thomsen, and A. Lakhtakia, “Theory of multiwall carbon nanotubes as waveguides and antennas in the infrared and the visible regimes,” Phys. Rev. B, vol. 79, no. 15, p. 155403, 2009.

www.nanomeghyas.ir
Nanoscale
| Vol 2 | No.2 | Summer 2015 |

Tunable Plasmonic Switch Based on Multi-wall Carbon Nanotube

S. Soleymani[1] | S. golmohammadi Haris[2*]

1.School of Engineering Emerging Technology, University of Tabriz, Tabriz
2.Faculty of Electrical Engineering, University of Tabriz, Tabriz

Abstract

In this paper we utilized a new method in definition of anisotropic permittivity function of multi-wall carbon nanotubes, which is based on cylindrical coordination. Nanotube with inner radius of 22 nm and outer radius of 25nm and having its inside filled with poly-silicon as a dielectric material, utilized for guiding surface plasmon polaritons waves. Thanks to adjustable Fermi level of graphene sheets in nanotube, we can change dynamic conductivity of them by applying external voltage or electric field and design a tunable plasmonic switch.

Keywords

Anisotropic, Graphene, Multi-wall carbon nanotube, Permittivity function, Surface plasmon polaritons.

*Correspondent Author Email: sgolmohammadi@tabrizu.ac.ir