



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



طراحی موجبرهای نوری مبتنی بر نانولوله‌های کربنی چندجداره

سینا سلیمانی، سعید گل محمدی

دانشکده‌ی مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه تبریز

چکیده- در این مقاله به بررسی موجبرهای مبتنی بر ساختارهایی از نانولوله‌های کربنی چند جداره پرداخته شده است و تاثیر تغییر اندازه‌ی ثابت شبکه به موج‌های TE عبوری از ساختار مورد مطالعه قرار گرفته است. با برداشتن ردیفی از نانولوله‌ها در شبکه برای طول موج‌های بالا تر از فرکانس پلاسمای شبکه، موجبری طراحی شده است. در ساختار نهایی ارائه شده با بدست آوردن فرکانس پلازمون‌های ساکن برای نانولوله‌های کربنی از ردیفی از نانولوله‌ها بعنوان موجبر استفاده شده که می‌تواند در مدارات پلازمونی مورد استفاده قرار بگیرد.

کلید واژه- نانولوله‌های کربنی چندجداره، کریستال فوتونیک، موجبر، پلازمون‌های ساکن سطحی.

Design of Optical Waveguides based on Multi-wall Carbon Nanotubes

Sina Soleymani, Saeed Golmohammadi

School of Engineering Emerging Technologies, Tabriz University

Abstract- In this paper optical waveguides based on Multi-wall Carbon Nanotubes (MWCNT) are investigated and the effect of changing the lattice constant for TE and TM electromagnetic waves has studied. Also structure with defect of MWCNTs for wavelengths longer than plasma frequency designed for electromagnetic wave propagation. At the last structure, localized surface plasmon wavelength for MWCNTs has calculated and utilized for new kind of plasmonic waveguide which can be used in plasmonic circuits.

Keywords: MWCNT, Crystal photonic, waveguide, Localized surface plasmons

۱- مقدمه

قسمت مشخص کننده‌ی بین بانندی که با تاثیر الکترون‌های آزاد نیز شناخته می‌شود با مدل درود و قسمت داخل بانندی با مدل لورنتز، که مربوط به الکترون‌های باند می‌شود به ترتیب با روابط (۲) و (۳) و رابطه‌ی نهایی بصورت رابطه (۴) درخواهد آمد.

$$\epsilon_{\perp}^f(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega/\tau} \quad (2)$$

$$\epsilon_{\perp}^b(\omega) = \sum_{m=1}^m \frac{\sigma_m^2}{\omega_m^2 + \omega^2 - i\omega\gamma_m} \quad (3)$$

$$\epsilon_{\perp}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega/\tau} + \sum_{m=1}^m \frac{\sigma_m^2}{\omega_m^2 + \omega^2 - i\omega\gamma_m} \quad (4)$$

قسمت اول این رابطه ω_p و τ به ترتیب نشان دهنده‌ی فرکانس پلاسما و زمان بازنشستن الکترون می‌باشد. همچنین σ_m ، γ_m و ω_m به ترتیب نشان دهنده‌ی قدرت نوسان، ثابت تضعیف و فرکانس آن می‌باشند [۱] و [۸]. از محدودیت‌های این روش می‌توان به این موارد اشاره نمود که باید تعداد m را زیاد در نظر گرفت تا دقت قسمت لورنتز بیشتر شود، همچنین باید این را در نظر بگیریم که در هنگام تطبیق نقاط بدست آمده برای طول موج‌های مختلف بصورت منحنی، باید دقت بیشتری را مدنظر قرار دهیم، که در هر حالت خطا اندکی مانند شکل‌های (۱) و (۲) وجود خواهد داشت. از دیگر محدودیت‌های این روش این است که به دلیل وابستگی ثابت تضعیف، γ_m به فرکانس، خطا در روش عددی مشاهده می‌شد که به همین خاطر این ثابت را مستقل از فرکانس در نظر گرفته‌ایم.

برای ساختاری بصورت کریستال فوتونیک که از نانولوله‌های فلزی با قطر کم تشکیل شده است، پاسخ به امواج الکترومغناطیسی با رابطه‌ی (۵) بدست می‌آید که می‌توانیم این قضیه را به نانولوله‌های فلزی هم تعمیم دهیم [۷].

$$\lambda_p = a \sqrt{2\pi \ln \left(\frac{a}{r} \right)} \quad (5)$$

a و r به ترتیب نشان دهنده‌ی ثابت شبکه و شعاع نانولوله می‌باشند. همچنین λ_p نشان دهنده‌ی طول موج پلاسما برای ساختار می‌باشد. ساختار بصورت فیلتر بالاگذر عمل می‌کند و طول موج‌های بلندتر از شبکه نمی‌توانند از آن عبور کنند [۲]، [۳].

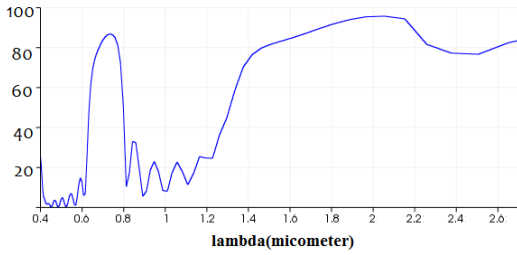
نانولوله‌های کربنی تک‌جداره می‌توانند با کایرالیته یا جهت رشد متفاوت خواص فلزی، نیمه‌هادی یا عایق داشته باشند. می‌توانیم نانولوله‌های کربنی را حاصل پیچش یک صفحه‌ی گرافن حول محوری در نظر گرفته و با صرف نظر نمودن از انحنای آن خواص گرافن را به نانولوله تعمیم دهیم. در این مقاله از نانولوله‌های کربنی چندجداره که از تعداد زیادی نانولوله‌ی تک‌جداره‌ی تودرتو تشکیل شده‌اند بعنوان موجبر استفاده شده است. تحلیل ساختار برای موج‌های TE، TM با روش FDTD انجام گرفته که معادله‌ی انتشار موج را برای این محیط بررسی می‌کند. ابتدا نحوه‌ی بدست آوردن ثابت دی‌الکتریک برای نانولوله‌های کربنی چندجداره بررسی خواهد شد، که از مدل درود-لورنتز برای این کار استفاده می‌شود. در حالت کلی ساختار تشکیل شده است از نانولوله‌های کربنی عمود بر صفحه‌ی انتشار موج با شعاع 50 nm و با ثابت شبکه که برای حالات 400 nm و 300 nm و 200 nm نیز مورد تحقیق قرار می‌گیرد. در نهایت با بدست آوردن فرکانس پلاسما برای شبکه‌ی نانولوله‌های کربنی و فرکانس تشدید انتشار پلازمون‌های ساکن موجبر‌های متناسب با طول موج‌های مختلف برای نانولوله‌های کربنی چندجداره ارائه می‌شود.

۲- روش محاسبات

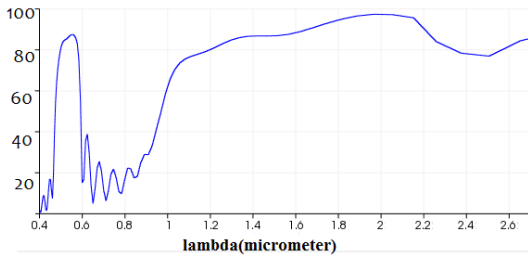
در این مقاله مدل مورد استفاده برای بررسی ثابت دی‌الکتریک نانولوله‌های کربنی چندجداره، مدل درود-لورنتز^۱ می‌باشد [۱]. برای محاسبه‌ی ثابت دی‌الکتریک باید ابتدا به این نکته توجه کنیم که نانولوله‌های کربنی چندجداره مانند گرافیت در جهت عمود بر راستا و همچنین در راستای محورشان ثابت دی‌الکتریک متفاوتی دارند. $\epsilon_{\perp}(\omega)$ و $\epsilon_{\parallel}(\omega)$ به ترتیب ثابت دی‌الکتریک برای حالت جهت هم راستا با محور نانولوله و عمود بر محور آن می‌باشد. برای محاسبه‌ی $\epsilon_{\perp}(\omega)$ باید تاثیرات بین بانندی و داخل بانندی بطور جداگانه بررسی شود، بگونه‌ای که در رابطه‌ی زیر داریم:

$$\epsilon_{\perp}(\omega) = \epsilon_{\perp}^f(\omega) + \epsilon_{\perp}^b(\omega) \quad (1)$$

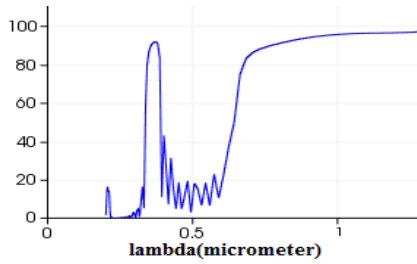
^۱ Durde-Lorentz



شکل ۴: نمودار بالا نشان دهنده ی بازتاب موج تخت TE از ساختار با ثابت شبکه ی ۴۰۰ nm می باشد. که در طول موج ۱,۴۴um، ۸۵٪ از موج TE را بازتاب می نماید. همچنین پیک بازتاب در طول موج ۷۵۰ nm به دلیل برقرار بودن شرط براگ دیده می شود.



شکل ۵: نمودار بالا نشان دهنده ی بازتاب موج تخت TE بر حسب درصد از ساختار با ثابت شبکه ۳۰۰ nm می باشد. که در طول موج ۰,۱um، ۸۰٪ از موج TE را بازتاب می نماید. همچنین پیک بازتاب در طول موج ۵۵۰ nm به دلیل برقرار بودن شرط براگ دیده می شود.



شکل ۶: نمودار بالا نشان دهنده ی بازتاب موج تخت TE بر حسب درصد از ساختار با ثابت شبکه ۲۰۰ nm می باشد. که در طول موج ۵۹۰ nm بازتاب موج TE شروع به افزایش می کند. و در طول موج ۳۵۰ nm پیک بازتاب به دلیل برقرار بودن شرط براگ دیده می شود.

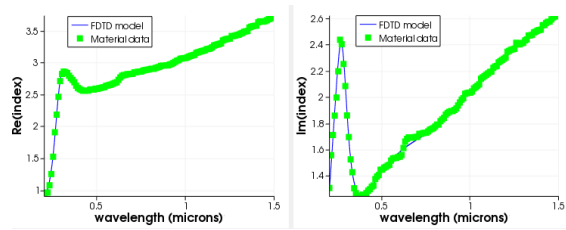
همانگونه که در شکل های ۴، ۵ و ۶ مشاهده می نمایم ساختار متناسب با ثابت دی الکتریک موج TE را بازتاب نموده و اجازه ی عبور را نمی دهد، که عملکردی مشابه با فیلتر بالا گذر دارد.

در شکل (۷) مشاهده می شود که با برداشتن ردیفی از نانولوله ها در مسیر انتشار موج که باید اندازه ی آن حداقل برابر با اندازه طول موج باشد منتشره باشد می توانیم انتشار موج را در آن راستا داشته باشیم [۲]. همچنین با

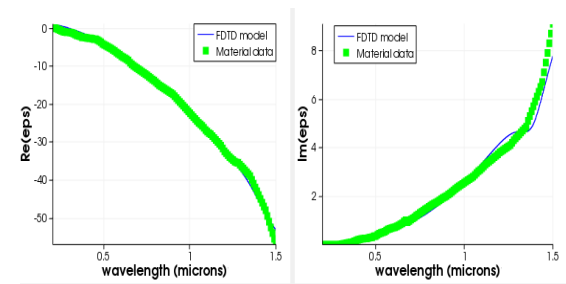
در مرحله ی بعدی فرکانسی که در آن بیشترین پاشندگی برای نانولوله های کربنی خواهیم داشت بدست می آید و از آن برای انتقال موج بصورت پلازمون های ساکن مبتنی بر نانولوله های کربنی استفاده می شود.

۳- نتایج و بحث

شکل ۱ و ۲ به ترتیب نشان دهنده ی ثوابت دی الکتریک بحث شده در دو جهت عمود بر محور نانولوله و هم جهت با محور نانولوله می باشند.

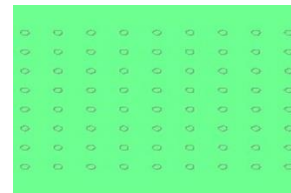


شکل ۱: قسمت حقیقی و موهومی ثابت دی الکتریک $\epsilon_1(\omega)$ بر حسب طول موج [۱].



شکل ۲: قسمت حقیقی و موهومی ثابت دی الکتریک $\epsilon_2(\omega)$ بر حسب طول موج [۲].

همانگونه که در شکل ۳ دیده می شود ساختار مورد شبیه سازی تشکیل یافته است از نانولوله های عمود بر صفحه که بصورت شبکه ی مستطیلی در نظر گرفته شده است.



شکل ۳: شبکه ی نانولوله های کربنی عمود بر سطح انتشار امواج TE, TM با ثابت شبکه ی ۴۰۰ nm و شعاع نانو لوله ها ۵۰ nm.

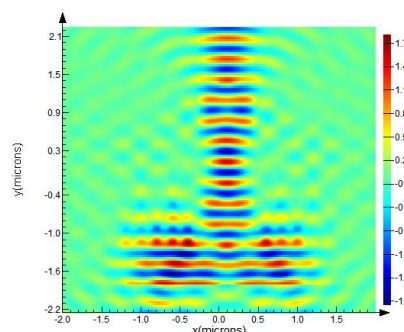
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از خواص نوری نانولوله‌های کربنی چندجداره و با محاسبه‌ی دی‌الکتریک آن‌ها با روش درود-لورنتز انتشار موج‌ها TE, TM برای سه نوع ساختار بررسی شده است. برای شبکه‌ای از نانولوله‌های کربنی با شعاع ۵۰nm و ثوابت شبکه‌ی ۲۰۰nm, ۳۰۰nm, ۴۰۰nm سیستم رفتار فیلتر بالاگذر نشان می‌دهد و به تاثیر تغییر ثابت شبکه اشاره شده و در نهایت ساختاری برای انتشار موج برحسب پلازمون‌های ساکن برای طول موج ۰.۹۵um طراحی و ارائه شد که می‌تواند در مدارات پلازمونی استفاده داشته باشد.

مراجع

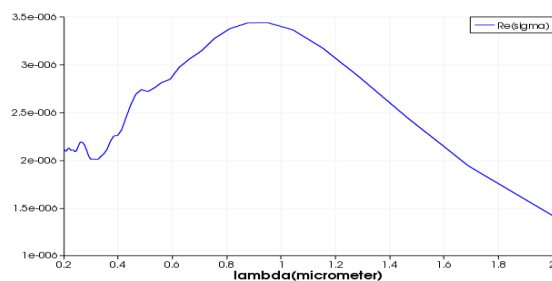
- [۱] H. Butt, T.D. Wilkinson, and G.A.J. Amarutunga *FEM MODELING OF PERIODIC ARRAYS OF MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES*, **Progress In Electromagnetics Research M**, Vol. ۲۲, ۱-۱۲-۲۰۱۲
- [۲] Alireza Mobini and Vahid Ahmadi, *NANOSCALE ALL-ANGLE WAVEGUIDE BASED ON PLASMON BAND EFFECT IN TRINGULAR ARRAY OF MWCNTS*, **JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY**, VOL. ۳۱, NO. ۲۳, ۲۰۱۳
- [۳] Haideer Butt, Qing Dai, Timothy D. Wilkinson, Gehan A.J. Amarutunga. *Negative index photonic crystal lenses based on carbon nanotube arrays*, **SCIVerse ScienceDirect Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications** ۱۰ (۲۰۱۲) ۴۹۹-۵۰۵
- [۴] Yue Wang, Xuan Wang, Qun Wu, Xun-jun He, Tai-long Gui, Yi-Jing Tong *Surface Plasmon Resonant THz wave Transmission on Carbon Nanotube Flim*, **Plasmonics** (۲۰۱۲) ۷: ۴۱۱-۴۱۵
- [۵] Arash Ahmadi, Saeed Golmohammadi, *comprehensive investigation of nobel metal nano particles shape, size and material on optical response of optimal plasmonic Y-splitter waveguides*, **Optics Communications** ۳۱۰ (۲۰۱۴) ۱-۱۱
- [۶] X. Cui · L. Dong · W. Zhang · W. Wu · Y. Tang · D. Erni *Numerical investigation of Multi wall carbon nanotube based multi segmented optical antenna* **Applied physics B Lasers and Optics**.
- [۷] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, W.J. Stewart, *Low frequency plasmons in thin-wire structures*, **Journal of Physics: Condensed Matter** ۱۰ (۱۹۹۸) ۴۷۸۵-۴۸۰۹.
- [۸] E. Lidorikis and A. C. Ferrari, *Photonics with multiwall carbon nanotube arrays*, **ACS Nano**, vol. ۲, no. ۵, pp. ۱۲۳۸-۱۲۴۸, Apr. ۲۰۰۹.

ایجاد کانال با اندازه‌های مختلف می‌توانیم طول موج‌های مختلف را از یکدیگر جدا نماییم.

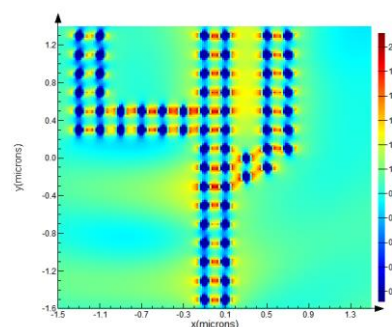


شکل ۷: منبع موج تخت از بین ساختار نانولوله‌های کربنی هدایت داده می‌شود. فاصله‌ی خالی بین نانولوله‌ها ۰.۸um بوده و امتدادش ۲.۲um و ثابت شبکه برابر با ۲۰۰nm می‌باشد [۲].

در ساختار نهایی با بدست آوردن طول موج پلازمون‌های ساکن برای نانولوله‌ها می‌توانیم موجبر پلازمونی داشته باشیم. همانگونه که در شکل زیر دیده می‌شود طول موجی که حداکثر مقدار پاشندگی را داریم برابر با ۰.۹۵um می‌باشد که از آن می‌توانیم بعنوان موجبر مبتنی بر نانولوله‌ی کربنی چند جداره استفاده نماییم.



شکل ۸: در شکل بالا طول موجی که بیشترین پاشندگی در نانو لوله‌ها اتفاق می‌افتد را نشان می‌دهد که در طول موج ۰.۹۵um می‌باشد [۳].



شکل ۹: موج تخت با طول موج ۰.۹۵um وارد ساختار شده است و هدایت بصورت پلاسمون‌های ساکن مشاهده می‌شود [۵].