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 گل‌محمدی

دانشکده‌ی مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه تبریز

چکیده -در این مقاله به بررسی موجبرهای مبتنی بر ساختارهایی از نانولوله های کربنی چند جداره پرداخته شده است و تاثیر تغییر اندازه‌ی ثابت شبکه به موج هایTE عبوری از ساختار مورد مطالعه قرار گرفته است. با برداشتن ردیفی از نانولوله‌ها در شبکه برای طول موج های 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 نانولوله ها بعنوان موجبر استفاده شده که می تواند در مدارات پلازمونی مورد استفاده قرار بگیرد.

کلید واژه- نانولوله‌های کربنی چندجداره، کریستال فوتونیک، موجبر، پلازمون های 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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-29]

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

۱- مقدمه

نانولوله‌های کربنی تک‌جداره می‌توانند با کایرالیتی یا جهت رشد متفاوت خواص فلزی، نیمه‌هادی یا عایق داشته باشند. می‌توانیم نانولوله‌های کربنی را حاصل پیچش یک صفحه‌ی گرافن حول محوری درنظر گرفته و با صرف‌نظر 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 شده اند 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 می شود. در حالت کلی ساختار تشکیل شده است از نانولوله‌های کربنی عمود بر صفحه‌ی انتشار موج با شعاع ۵۰nm و با ثابت شبکه که برای حالات ۴۰۰nm و ۳۰۰nmو۲۰۰nm نیز مورد تحقیق قرار می گیرد. در نهایت با بدست آوردن فرکانس پلاسما برای شبکه‌ی نانولوله‌های کربنی و فرکانس تشدید انتشار پلازمون های ساکن موجبر های متناسب با طول موج های مختلف برای نانولوله‌های کربنی چندجداره ارائه می شود.

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.$\varepsilon_{\parallel}(\omega)$ و $\varepsilon_{\perp}(\omega)$ به ترتیب ثوابت دی الکتریک برای حالت جهت هم راستا با محور نانولوله و عمود بر محور آن می باشد. برای محاسبه‌ی $\varepsilon_{\perp}(\omega)$ باید تاثیرات بین باندی وداخل باندی بطور جداگانه بررسی شود، بگونه‌ای که در رابطه‌ی زیر داریم:

$$\varepsilon_{\perp}(\omega)= \varepsilon_{\perp}^{f}(\omega)+ \varepsilon_{\perp}^{b}(\omega) \qquad (۱)$$

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

$$\varepsilon_{\perp}^{f}(\omega) = ۱ - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega/\tau} \qquad (۲)$$

$$\varepsilon_{\perp}^{b}(\omega)= \sum_{m=1}^{m} \frac{\sigma_m^2}{\omega_m^2+\omega^2-i\omega\gamma_m} \qquad (۳)$$

$$\varepsilon_{\perp}(\omega) = ۱ - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega/\tau} + \sum_{m=1}^{m} \frac{\sigma_m^2}{\omega_m^2+\omega^2-i\omega\gamma_m} \qquad (۴)$$

قسمت اول این رابطه ω_p وτ 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 می توان به این موارد اشاره نمود که باید تعدادm را زیاد درنظر گرفت تا دقت قسمت لورنتز بیشتر شود، همچنین باید این را درنظر بگیریم که در هنگام تطبیق نقاط بدست آمده برای طول موج های 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 محدودیت های این روش این است که به دلیل وابستگی ثابت تضعیف، γ_m، به فرکانس، خطا در روش عددی مشاهده می شد که به همین خاطر این ثابت را مستقل از فرکانس درنظر گرفته‌ایم.

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

$$\lambda_p = a\sqrt{2\pi \ln\left(\frac{a}{r}\right)} \qquad (۵)$$

a و r به ترتیب نشان دهنده‌ی ثابت شبکه و شعاع نانولوله می باشند. همچنین λ_p نشان دهنده ی طول موج پلاسما برای ساختار می باشد. ساختار بصورت فیلتر بالاگذر عمل می کند و طول موج های بلندتر از شبکه نمی توانند از آن عبور کنند[۲],[۳].

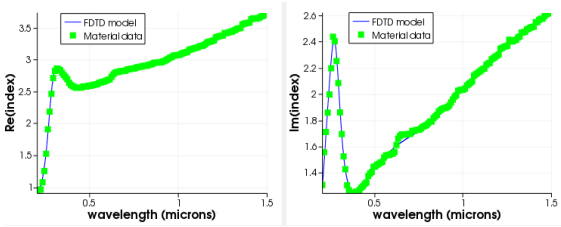
[۱] Durde-Lorentz

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-29]

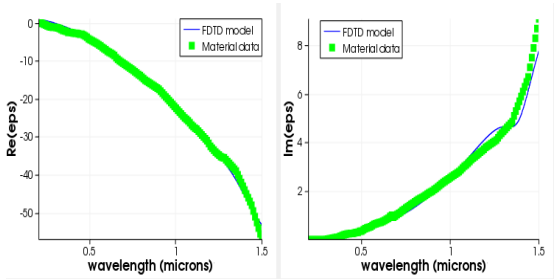
در مرحله ی بعدی فرکانسی که در آن بیشترین پاشندگی برای نانولوله های کربنی خواهیم داشت بدست می آید و از آن برای انتقال موج بصورت پلازمون های ساکن مبتنی بر نانولوله های کربنی استفاده می شود.

۳- نتایج و بحث

شکل۱و 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.

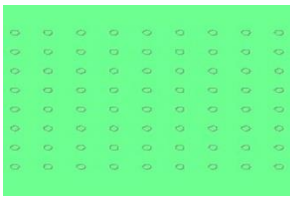


شکل ۱: قسمت حقیقی و موهومی ثابت دی‌الکتریک $\varepsilon_{\perp}(\omega)$ بر حسب طول موج [۱].

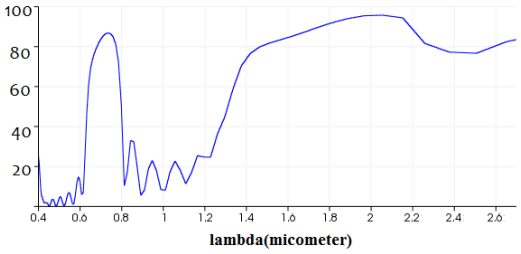


شکل ۲: قسمت حقیقی و موهومی ثابت دی‌الکتریک $\varepsilon_{\parallel}(\omega)$ برحسب طول موج [۶].

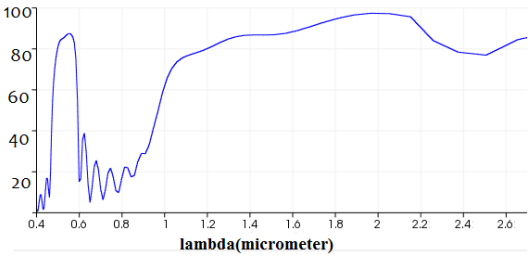
همانگونه که در شکل۳ دیده می‌شود ساختار مورد شبیه سازی تشکیل یافته است از نانولوله‌های عمود برصفحه که بصورت شبکه‌ی مستطیلی در نظر گرفته شده است.



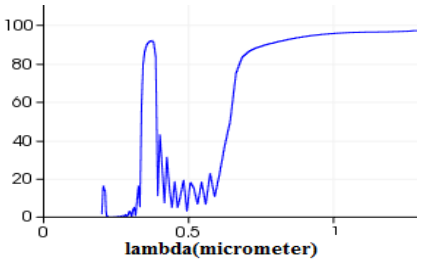
شکل ۳: شبکه ی نانولوله‌های کربنی عمود بر سطح انتشار امواج TE,TM با ثابت شبکه ی ۴۰۰nm و شعاع نانو لوله ها ۵۰nm.



شکل ۴: نمودار بالا نشان دهنده‌ی بازتاب موج تخت TE از ساختار با ثابت شبکه ی ۴۰۰nm می‌باشد. که در طول موج۱,۴۴um، ۸۵٪ از موج TE را بازتاب می نماید. همچنین پیک بازتاب در طول موج ۷۵۰nm به دلیل برقرار بودن شرط براگ دیده می‌شود.



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



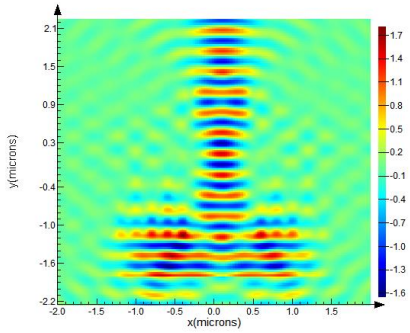
شکل ۶: نمودار بالا نشان دهنده ی بازتاب موج تخت TE بر حسب درصد از ساختار با ثابت شبکه ۲۰۰nm می‌باشد. که در طول موج ۵۹۰nm،بازتاب موج TE شروع به افزایش می کند. و در طول موج ۳۵۰nm پیک بازتاب به دلیل برقرار بودن شرط براگ دیده می شود.

همانگونه که در شکل های ۴، ۵ و۶ مشاهده می نماییم ساختار متناسب با ثابت دی الکتریک موج TE را بازتاب نموده و اجازه‌ی عبور را نمی‌دهد، که عملکردی مشابه با فیلتر بالا گذر دارد.

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

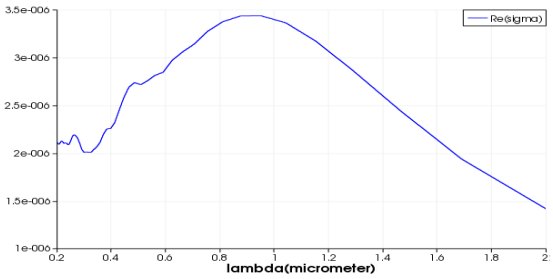
[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-29]

ایجاد کانال با اندازه های مختلف می‌توانیم طول موج های مختلف را از یکدیگر جدا نماییم.

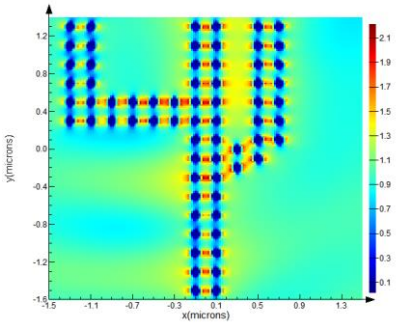


شکل ۷:منبع موج تخت از بین ساختار نانولوله های کربنی هدایت داده می شود. فاصله‌ی خالی بین نانولوله‌ها ۰.۸um بوده و امتدادش۲,۲um و ثابت شبکه برابر با ۲۰۰nm می باشد[۲].

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



شکل ۸: در شکل بالا طول موجی که بیشترین پاشندگی در نانو لوله ها اتفاق می افتد را نشان می دهد که در طول موج ۰.۹۵um می باشد[۳].



شکل ۹: موج تخت با طول موج ۰.۹۵um وارد ساختار شده است و هدایت بصورت پلاسمون های ساکن مشاهده می شود[۵].

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** وثوابت شبکه‌ی **۴۰۰nm, ۳۰۰nm, ۲۰۰nm** 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. Amaratunga *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. Amaratunga. *Negative index photonic crystal lenses based on carbon nanotube arrays.***SCIVerse ScienceDirect Photonics and Nanostructures** – Fundamentals and Applications ۱۰ (۲۰۱۲) ٤۹۹–٥۰٥

[٤] 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) ۷:٤۱۱–٤۱٥

[٥] Arash Ahmadivand, 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 (۲۰۱٤) ۱–۱۱

[٦] 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) ٤۷۸٥–٤۸۰۹.

[۸] E. Lidorikis and A. C. Ferrari, *Photonics with multiwall carbon nanotube arrays*, ***ACS Nano,*** vol. ۳, no. ٥, pp. ۱۲۳۸–۱۲٤۸, Apr. ۲۰۰۹.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-29]