

## افزایش جذب نوری گرافن تک لایه بر اساس ساختار میکروکاواک نیم رسانا

ساناز ایمان نژاد ، سعید شجاعی

گروه فوتونیک - پژوهشگاه فیزیک کاربردی و ستاره شناسی - دانشگاه تبریز

### چکیده

در این تحقیق یک میکروکاواک نیم رسانا متشکل از یک لایه سی نقص و بازتابنده های براگ در نظر گرفته شده است. چنین میکروکاواکی می تواند یک مد خاص را محصور کند. ما از این میکروکاواک برای افزایش میزان جذب گرافن استفاده کرده ایم. نتایج نشان می دهد جذب گرافن یک تابع مدوله شده از طول موج و وابسته به پارامترهای سیستم می باشد. به طوری که می تواند در یک طول موج خاص جذبی در حدود ۹۹٪ داشته باشد.

با شناخت و بررسی خواص منحصر به فرد گرافن طی سالهای اخیر این ماده برای ساخت ادوات اپتوالکترونیکی بسیار مورد توجه قرار گرفت. گرافن تک لایه فقط ۲.۳٪ نور برخوردی را جذب می کند [1]. لذا برای استفاده از این ماده و بهره برداری از ویژگی های نوری منحصر به فرد آن برای ساخت ادوات مذکور نیازمند افزایش طول برهمکنش نور با گرافن و در نتیجه افزایش جذب نوری آن هستیم [2]. طی چند سال اخیر راهکارهای متفاوتی برای افزایش جذب گرافن ارائه شده است که مهمترین آنها عبارتند از:

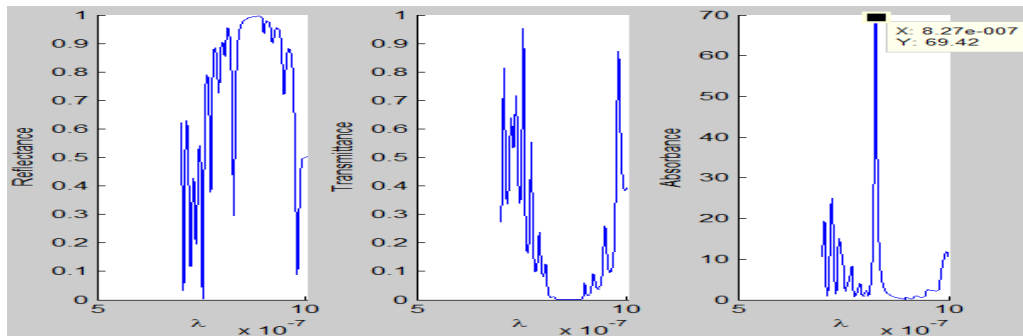
(۱) ایجاد میکرو دیسک های گرافنی روی یک ساختار لایه ای [3]. (۲) بهره مندی از فیزیک نقاط کوانتومی در گرافن [4]. (۳) استفاده از توری گرافن پایه [5]. (۴) تعبیه گرافن داخل یک کاواک نوری [6]. (۵) نشان دادن گرافن بر روی یک بلور فوتونی در محدوده ی طول موج های مرئی [7].

در موارد ۱، ۲، ۳ تحریک پلاسمون ها سبب افزایش میزان جذب می شود. در مورد ۴، حرکت رفت و برگشتی فوتون به تله افتاده در کاواک و برخورد مکرر به گرافن سبب افزایش میزان جذب می شود. ما در این تحقیق به شناسایی مکانیسم تقویت جذب از طریق میکروکاواک پرداخته ایم. به منظور مطابقت دادن با نتایج تجربی اخیر، کار مقاله ی [6] را به طور عددی شبیه سازی کرده ایم. روش محاسباتی مورد استفاده روش ماتریس انتقال می باشد چرا که بهترین روش برای محاسبه ی ضرایب عبور و بازتاب در سیستم های لایه ای می باشد [8]. برای محاسبه ی جذب وابسته به طول موج،  $A(\lambda)$  با رابطه ی  $A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda)$  لازم است بازتابندگی  $R(\lambda)$  و تراکسیل  $T(\lambda)$  محاسبه شوند.

محاسبات ما بر اساس طراحی یک میکروکاواک نیم رسانا با لایه های نازک از جنس  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  و  $\text{AlAs}/\text{AlGaAs}$  به عنوان بازتابنده های توزیعی براگ و ناحیه بین بازتابنده ها (در ساختار مورد نظر یک لایه بافر) است. بازتابنده ها به صورت تناوبی از لایه ها هستند که از مواد با گاف باندی بزرگ ساخته شده اند و غیر جاذب هستند. ضخامت این لایه ها بنا به رابطه ی  $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_c / 4$  که به شرط براگ معروف است، محاسبه می شود.

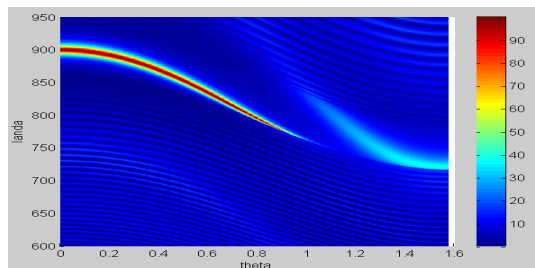
$\lambda_c$  طول موج مد محصور شده در میکروکاواک می باشد که طول موج مرکزی نامیده می شود. بازتابنده ی بالایی چینی متناوب از به ترتیب لایه ی اول  $\text{SiO}_2$  با ضریب شکست  $1/45$  و ضخامت  $147$  نانومتر و لایه ی دوم  $\text{Si}_3\text{N}_4$  با ضریب شکست  $1/87$  و ضخامت  $113$  نانومتر است. بازتابنده ی پایینی چینی متناوب از به ترتیب لایه ی اول  $\text{AlAs}$  با ضریب شکست  $3/05$  و ضخامت  $70$  نانومتر و لایه ی دوم  $\text{AlGaAs}$  با ضریب شکست  $3/5$  و ضخامت  $61$  نانومتر است. به دلیل اهمیت طول موج  $850$  نانومتر در کاربردهای نوری، آن را به عنوان طول موج مرکزی انتخاب کردیم [9]. می توان هر طول موجی از ناحیه ی فروسرخ میانی تا فرابنفش را انتخاب کرد و یک کاواک با اتلاف پایین ساخت. در محاسبه ضریب شکست در بازتابنده های براگ از این تقریب استفاده شده است که به جای در نظر گرفتن وابستگی ضریب شکست به طول موج، ضریب شکست را برای طول موج مرکزی ناحیه باند توقف بکار می گیریم. میکروکاواک مورد مطالعه متشکل از  $N_1=7$  جفت لایه های  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  در بازتابنده بالایی و  $N_2=25$  جفت لایه های

در بازتابنده پایینی است. در وسط این بازتابنده ها یک لایه از جنس  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (بافر) با ضخامت  $d=111$  نانومتر به عنوان لایه نقص تعبیه شده است. یک لایه گرافن بین دو بازتابنده (و در قسمت بافر بلافاصله روی بازتابنده بالایی) ساندویچ شده که (طبق محاسبه) دقیقاً در محل بیشینه مقدار دامنه میدان الکتریکی قرار می گیرد. شکل ۱ نمایش دهنده ی بازتابندگی و تراگیل و جذب برحسب طول موج برای سیستم تعریف شده است که میزان جذب حاصل برابر با  $69.42\%$  می باشد.



شکل ۱: بازتابندگی (چپ)، تراگیل (وسط)، جذب (راست) بر حسب طول موج نور فرودی برای سیستم میکروکاوک نیم رسانا به همراه گرافن  $\lambda_c=850\text{nm}$ ,  $N_1=7$ ,  $N_2=25$ ,  $d=111\text{nm}$

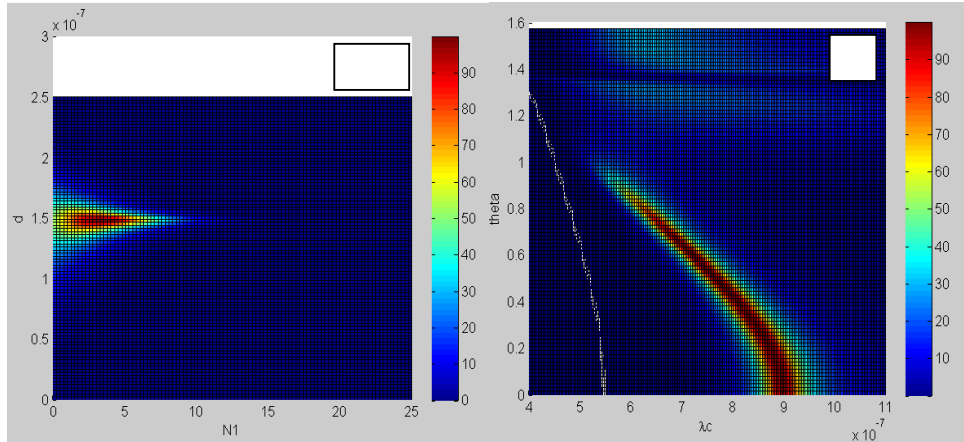
ما در این تحقیق به مهندسی پارامترهای میکروکاوک برای بهبود میزان جذب در گرافن پرداخته ایم، از جمله تغییر طول موج نور فرودی که به تبع آن ضخامت لایه های بازتابنده های توزیعی نیز تغییر می کنند (با نه شرط براگ)، تغییر ضخامت لایه نقص (لایه بافر)، تغییر زاویه فرودی و تغییر تعداد جفت لایه های بازتابنده ها و بدین صورت سیستم خود را برای افزایش میزان جذب بهینه می کنیم. نتایج بدست آمده توافق خوبی با نتایج تجربی منبع ۶ دارند. محاسبات ما نشان داد که تغییر دادن زاویه نور فرودی در طول موج های بیش از  $900$  نانومتر اثر چشمگیری روی میزان جذب ندارد و همچنین در بررسی تعداد جفت لایه های بازتابنده های بالایی و پایینی، بهبود جذب را در کاهش تعداد جفت لایه های بازتابنده ی بالایی و افزایش تعداد جفت لایه های بازتابنده ی پایینی ( $N_2=61$  و  $N_1=4$ ) مشاهده کردیم. افزایش ضخامت لایه نقص و همچنین افزایش طول موج نور فرودی نیز تاثیر قابل توجهی بر افزایش جذب از خود نشان داده است. اشاره به این نکته ارزشمند است که پارامترهای بهینه شده ی بدست آمده، می توانند پیشنهادی برای ساخت سیستم واقعی در آزمایشگاه به منظور ساخت ادوات نوری بر پایه ی جذب گرافن باشند. شکل ۲ نمایش دهنده ی گاف باندهی سیستم بهینه شده ی میکروکاوک نیم رسانا با تک ورقه ی گرافنی تعبیه شده در آن می باشد. با استفاده از مقادیر بهینه شده ی  $\lambda_c=900\text{nm}$ ,  $N_1=4$ ,  $N_2=61$ ,  $d=146.6\text{nm}$ ، جذبی معادل  $99.19\%$  بدست آمد. همانطور که از شکل پیداست با افزایش زاویه ی فرودی جذب کاهش می یابد.



شکل ۲: نمودار جذب بر حسب طول موج و زاویه نور فرودی برای میکروکاوک نیم رسانا باتک ورقه ی گرافنی تعبیه شده در آن، با مقادیر بهینه شده ی  $\lambda_c=900\text{nm}$ ,  $N_1=4$ ,  $N_2=61$ ,  $d=146.6\text{nm}$

در شکل ۳ (الف) با ثابت نگه داشتن طول موج مرکزی، زاویه ی تابش و تعداد جفت لایه های بازتابنده ی پایینی، به بررسی جذب بر حسب پارامترهای ضخامت لایه نقص و تعداد جفت لایه های بازتابنده ی بالایی پرداخته ایم. به

وضوح دیده می شود که با افزایش ضخامت لایه نقص (لایه بافر) جذب کاهش می یابد، از طرفی بیشینه جذب برای  $N_1$  از ۴ تا ۵ جفت لایه بدست می آید. در شکل ۳ (ب) با ثابت نگه داشتن ضخامت لایه نقص و تعداد جفت لایه های بازتابنده ی بالایی و پایینی، به بررسی جذب بر حسب پارامترهای طول موج مرکزی که تعیین کننده ی ضخامت لایه های بازتابنده ها می باشد و زاویه ی تابش پرداخته ایم. به وضوح دیده می شود که در برخورد نرمال نور تابشی بیشینه جذب در  $\lambda_c=900\text{nm}$  حاصل می شود و در طول موج های کوتاهتر (۹۰۰-۶۵۰) برای بدست آوردن جذب بیشینه باید تابش مایل ( $0-0.8$  رادیان) باشد.



شکل ۳(الف): نمودار جذب بر حسب پارامترهای ضخامت لایه نقص و تعداد جفت لایه های بازتابنده ی بالایی برای نیم رسانای تک مد با یک ورقه گرافن تعبیه شده در آن با  $N_2=61, \lambda_c=900\text{nm}$

شکل ۳(ب): نمودار جذب بر حسب پارامترهای ضخامت لایه های بازتابنده ها و زاویه نور فرودی برای نیم رسانای تک مد با یک ورقه گرافن تعبیه شده در آن با  $N_2=61, d=146.6\text{nm}, N_1=4$

### نتیجه گیری

به طور خلاصه با بهره گیری از ساختار میکروکاوک نیم رسانا و مهندسی پارامترهای مربوطه، جذب نوری را برای گرافن تک لایه در یک طول موج دلخواه افزایش دادیم. مشاهده کردیم که کاهش تعداد جفت لایه های بازتابنده بالایی و افزایش تعداد جفت لایه های بازتابنده ی پایینی باعث افزایش جذب و همچنین افزایش توامان ضخامت نقص (بافر) و طول موج نور فرودی باعث افزایش جذب می شود. محاسبات نشان داد که برای طول موج های کوچکتر از ۹۰۰ نانومتر برای تابش عمودی بیشترین جذب را داریم. نتایج حاصل توافق خوبی با نتایج تجربی دارند.

### مرجع ها

1. Nair, R. R.; Blake, P.; Grigorenko, A. N.; Novoselov, K. S.; Booth, T. J.; Stauber, T.; Peres, N. M. R.; Geim, A. K. *Science* (2008), **320**, 1308.
2. Mueller, T.; Xia, F.; Avouris, Ph. *Nat. Photonics* (2010), **4**, 297-301.
3. Yan H., Li X., Chandra B., Tulevski G., Wu Y., Freitag M., Zhu W., Avouris P. and Xia F., *Nat. Nanotechnol.*, **7** (2012) 330.
4. Konstantatos G., Badioli M., Gaudreau L., Osmond J., Bernechea M., de Arquer P. G., Gatti F. and Koppens F. H. L., *Nat. Nanotechnol.*, **7** (2012) 363.
5. Peres N. M. R., Ferreira A., Bludov Y. V. and Vasilevskiy M. I., *J. Phys.: Condens. Matter*, **24** (2012) 245303.
6. Furchi M., Urich A., Pospischil A., Lilley G., Unterrainer K., Detz H., Klang P., Andrews A. M., Schrenk W., Strasser G. and Mueller T., *Nano Lett.*, **12** (2012) 2773.
7. Liu J. T., Liu N. H., Li J., Li X. J. and Huang J. H., *Appl. Phys. Lett.*, **101** (2012) 052104.
8. N. M. R. Peres and Yu. V. Bludov, *EPL*, **101** (2013) 58002
9. Pepeljugoski, P.; Kuchta, D.; Kwark, Y.; Pleunis, P.; Kuyt, G. *IEEE Photonics Technol. Lett.* (2002), **14**, 717-719.