بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

مطالعه چرخش کر در ساختارGraphene/SiC/Al در ناحیه‌ی تراهرتز

صبرا مرادی [۱و*]، رضا عبدی‌قلعه [۱]، بیتا رومی [۱]، امیر مدنی [۱]
[۱]گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب، ایران
*s.moradi@ubonab.ac.ir

چکیده – در این مقاله، طیف‌های بازتاب، چرخش کر و بیضی‌گونگی آن در ساختار سه لایه‌ای متشکل از گرافن، سیلیکون کربید و آلومینیم در ناحیه‌ی فرکانسی تراهرتز مطالعه شده است. با استفاده از روش ماتریس انتقال ۴×۴ طیف‌های ساختار Graphene/SiC محاسبه و با طیف‌های ساختار Graphene/SiC/Al مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که طیف‌های بازتاب هر دو ساختار دارای رفتار تشدیدی است، ولی در ساختار حاوی Al مقدار بازتاب در فرکانس‌های مشابه متفاوت است. هم‌چنین رفتار تشدیدی در طیف-های چرخش کر و بیضی‌گونگی هر دو ساختار نیز مشاهده می‌شود که با به کار گرفتن Al، مقدار بیشینه‌ی آنها تغییر یافته است. هم‌چنین با افزایش شدت میدان مغناطیسی خارجی، رفتار طیف‌های چرخش کر و بیضی‌گونگی نیز تغییر می‌کنند.

کلید واژه- گرافن، چرخش کر، بازتاب.

Study of Kerr Rotation in Graphene/SiC/Al Structure in THz Region

Sabra Moradi[1], Reza Abdi-Ghaleh[1], Bita Roumi[1], Amir Madani[1]
[1]Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

Abstract- In this paper, reflection, Kerr rotation and ellipticity spectra of a three layered structure constitiuted of Graphene, Silicon Carbid, and Aluminium were studied in terehertze frequency region. Using 4×4 transfer matrix method the spectra of Graphene/SiC structure were calculated and compared with the spectra of Graphene/SiC/Al structure. The results show that both reflection spectra have resonance behaviors. But, in the structure containing the Al, the reflection values at similar frequencies are different. Moreover, resonance behavior in Kerr rotation and ellipticity spectra were seen for both of the structures, inwhich by using the Al layer their maximum values were changed. Also, by increasing the external magnetic field strength, behavior of Kerr rotation and ellipticity spectra were changed.

Keywords: Graphene, Kerr rotation, Reflection.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

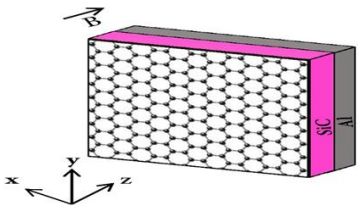
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

مقدمه

گرافن به عنوان ماده‌ی دو بعدی که از شبکه‌ی کربنی لانه-زنبوری با ضخامت یک اتم تشکیل شده است، خواص الکترونی و اپتیکی ویژه‌ای دارد. گرافن به دلیل تحرک‌پذیری بسیار بالای حاملین بار و رسانندگی حرارتی و الکتریکی بسیار زیاد و نیز کنترل‌پذیر بودن این ویژگی‌ها با عوامل خارجی مانند اعمال میدان الکتریکی یا مغناطیسی، تفاوت چشم‌گیری با یک لایه‌ی فلزی یا نیم‌رسانای نازک دارد [۱]. اخیرا از لحاظ نظری و تجربی اثبات شده است که گرافن می‌تواند انتخاب خوبی در مگنتواپتیک نیز باشد. از جمله اثرات مگنتواپتیکی که در بررسی خواص مغناطیسی سطوح، حسگرهای مگنتواپتیکی، حافظه‌های مغناطیسی و ایزولاتورها استفاده می‌شود، اثر کِر مگنتواپتیکی است [۲]. در این مقاله طیف‌های بازتابی، چرخش کر و بیضی‌گونگی ساختار Graphene/SiC/Al در ناحیه‌ی فرکانسی تراهرتز مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

مدل و محاسبات نظری

ساختار مورد بررسی در این مقاله به صورت Graphene/SiC/Al است. همانطور که در شکل ۱ نمایش داده شده، در این ساختار گرافن به عنوان لایه‌ای فوق نازک با ضخامت $d_g = 0.335\,\text{nm}$ در نظر گرفته شده که روی لایه‌ی دی‌الکتریک SiC با ضخامت $d_{SiC} = 10\mu m$ قرار دارد و این لایه‌ها روی یک لایه از آلومینیوم به ضخامت $d_{Al} = 40\,\text{nm}$ قرار داده شده‌اند. لایه‌های تشکیل دهنده‌ی ساختار در صفحات x-y قرار دارند و محور z عمود بر سطوح لایه‌ها است. هم‌چنین میدان مغناطیسی خارجی در راستای



شکل ۱: شماتیک ساختار Graphene/SiC/Al

محور z بر ساختار اعمال شده است. در محاسبات عددی ضریب گذردهی الکتریکی SiC برابر $\varepsilon_{SiC}=12.25$ فرض شده است. هم‌چنین ضریب گذردهی الکتریکی آلومینیوم $\varepsilon_{Al}(\nu) = -3.2\times10^4 + i\,6.7\times10^5\,\nu^{-1}$ در نظر گرفته شده که در آن ν فرکانس نور فرودی است [۳]. با توجه به اینکه گرافن تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی خواص ژیروتروپی از خود نشان می‌دهد، رسانندگی اپتیکی آن به صورت تانسور زیر خواهد بود:

$$\sigma_G = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ -\sigma_{xy} & \sigma_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \qquad (۱)$$

مولفه‌های ماتریس گذردهی به صورت $\varepsilon_{xx} = 1 + (\sigma_{xx} / \omega\varepsilon_0 d_g)$، $\varepsilon_{xy} = (\sigma_{xy} / \omega\varepsilon_0 d_g)$، $\varepsilon_{zz} = 1$ هستند [۴]، که در آن ω فرکانس زاویه‌ای نور فرودی است. المان‌های قطر اصلی، گذردهی الکتریکی ماده را نشان می‌دهد و المان‌های غیرقطری در اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی بوجود می‌آید [۵]:

$$\varepsilon_g = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ -\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \qquad (۲)$$

عناصر قطری و غیرقطری تانسور رسانندگی گرافن تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی از معادلات زیر به دست می‌آیند که از مدل درود نتیجه می‌شود [۶]:

$$\sigma_{xx}(\omega, \mathrm{B}) = \frac{2D}{\pi} \frac{1/\tau - i\omega}{(\omega_c)^2 - (\omega + i/\tau)^2} \qquad (۳)$$

$$\sigma_{xy}(\omega, \mathrm{B}) = -\frac{2D}{\pi} \frac{\omega_c}{(\omega_c)^2 - (\omega + i/\tau)^2} \qquad (۴)$$

در این رابطه $D = 2\sigma_0 |\varepsilon_F| / \hbar$ وزن درود، $\omega_c = eBV_F^{\,2} / \varepsilon_F$ فرکانس سیکلوترونی، $\sigma_0 = e^2 / 4\hbar$ رسانندگی عمومی گرافن، ε_F انرژی تراز فرمی، τ زمان پراکندگی و $V_F = 1.02\times10^6\,m/s$ سرعت فرمی است

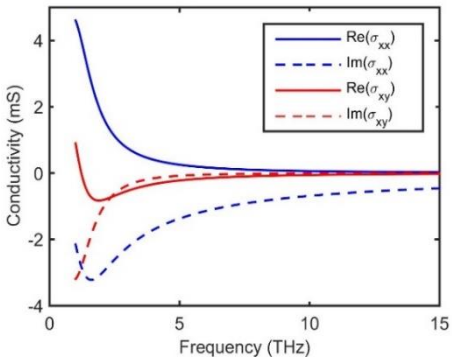
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

[۷]. ما از روش ماتریس انتقال ۴×۴ برای محاسبه‌ی طیف-های بازتاب، چرخش کر و بیضی‌گونگی استفاده کرده‌ایم. در این روش برای هر لایه از ساختار یک ماتریس انتقال در نظر گرفته می‌شود که به ضخامت، ضریب گذردهی الکتریکی و فرکانس نور فرودی بستگی دارد. با داشتن المان‌های ماتریس انتقال کل، می‌توان کمیت‌های اشاره شده را محاسبه نمود [۸].

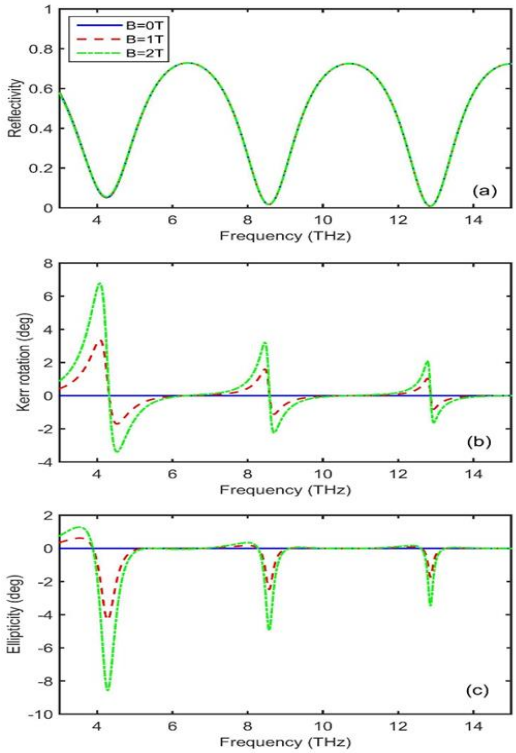
نتایج و بحث

المان‌های قطری و غیرقطری رسانندگی تک لایه‌ی گرافن در حضور میدان مغناطیسی B=1 T در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: قسمت‌های حقیقی و موهومی المان‌های قطری و غیرقطری رسانندگی گرافن در میدان مغناطیسی B=1T برحسب فرکانس نور فرودی.

ملاحظه می‌شود که قسمت‌های حقیقی و موهومی رسانندگی‌های قطری و غیرقطری گرافن در فرکانس‌های کم دارای بیشینه مقدار بوده و در ادامه در فرکانس‌های بالاتر سیر نزولی داشته و به صفر می‌رسد. طیف‌های بازتاب، چرخش کر و بیضی‌گونگی ساختارGraphene /SiC به ازای میدان‌های مغناطیسی B=0,1,2T در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند. با تغییر میدان مغناطیسی، المان غیرقطری رسانندگی اپتیکی گرافن و به تبع آن المان غیرقطری ثابت گذردهی الکتریکی گرافن تغییر می‌کند. ولی بازتاب عمدتا با المان قطری لایه‌ی ژیروتروپی ارتباط دارد. بنابراین همانگونه که در شکل ۳(a) مشاهده می‌شود، طیف‌های بازتاب ساختار به ازای میدان‌های مغناطیسی مختلف تفاوت زیادی را نشان نمی‌دهند و این سه نمودار عملا روی یکدیگر قرار می‌گیرند.



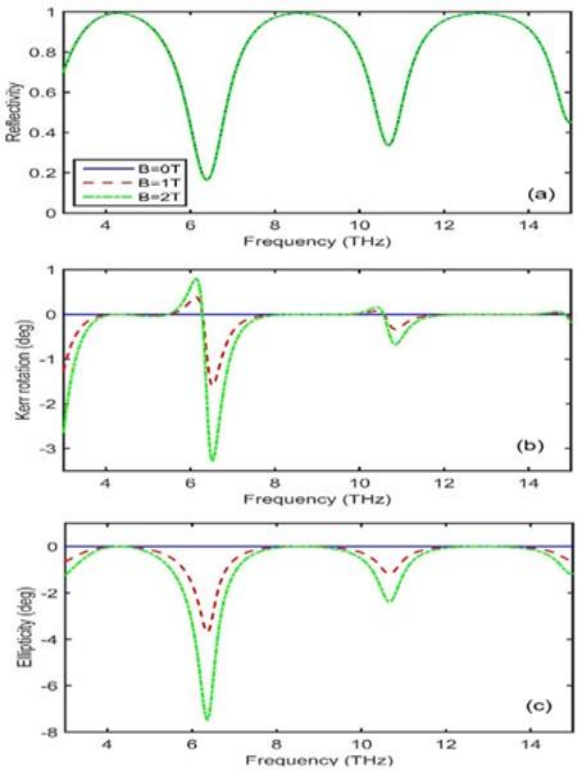
شکل۳: طیف‌های (a) بازتاب، (b) چرخش کر و (c) بیضی‌گونگی ساختار Graphene/SiC بر حسب فرکانس نور فرودی و به ازای میدان‌های مغناطیسی مختلف.

در طیف بازتاب ساختار Graphene/SiC رفتار تشدیدی مشاهده می‌شود که ناشی از متناسب بودن ضخامت لایه‌ی SiC با طول موج نور فرودی است. دامنه‌ی نوسانات ضریب بازتاب این ساختار در محدوده‌ی 0-0.78 می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های ۳(b) و ۳(c) مشاهده می‌شود هیچ چرخش کر و بیضی‌گونگی به ازای B=0T وجود ندارد. چون به ازای B=0، المان غیرقطری رسانندگی اپتیکی و بنابراین المان غیرقطری ضریب گذردهی الکتریکی آن صفر می‌شود و ماده به لحاظ مگنتواپتیکی غیر فعال خواهد بود. به ازای میدان-های مغناطیسی B=1,2T، چرخش کر افزایش یافته در شکل ۳(b) مشاهده می‌شود. هم‌چنین مشاهده می‌شود که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، مقدار چرخش کر در فرکانس‌های تشدیدی نیز افزایش می‌یابد. طیف‌های بازتاب، چرخش کر و بیضی‌گونگی ساختار Graphene/SiC/Al به

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

ازای میدان‌های مغناطیسی مختلف در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل۴: طیف‌های (a) بازتاب، (b) چرخش کر و (c) بیضی‌گونگی ساختار Graphene/SiC/Al بر حسب فرکانس نور فرودی و به ازای میدان‌های مغناطیسی مختلف.

مشاهده می‌شود که با قرار دادن لایه Al در ساختار، دامنه نوسان طیف بازتاب کاهش و مقدار آن افزایش یافته است به طوری که در بعضی فرکانس‌های خاص به مقدار بازتاب به یک نیز رسیده است. مشابه ساختار بدون Al، به ازای فرکانس‌های تشدیدی، افزایش چرخش کر نیز مشاهده می‌شود که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، مقدار آنها افزایش یافته است. هم چنین بیضی‌گونگی نیز در فرکانس‌های تشدیدی افزایش یافته است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا طیف‌های بازتاب، چرخش کر و بیضی‌گونگی ساختار Graphene/SiC مطالعه شد. سپس با قرار دادن لایه‌ی آلومینیوم در ساختار، طیف‌های مذکور برای ساختار Graphene /SiC/Al بدست آمد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که رفتار تشدیدی در طیف‌های بازتاب هر دو ساختار مشاهده می‌شود، ولی مقدار ضریب بازتاب ساختار حاوی آلومینیوم مقادیر بیشتری دارد، به طوری که در برخی فرکانس‌ها به یک نیز می‌رسد. طیف‌های چرخش کر و بیضی‌گونگی هر دو ساختار در فرکانس‌هایی نزدیک فرکانس‌های تشدید طیف بازتاب، رفتار تشدیدی را نشان می‌دهند که با افزایش شدت میدان مغناطیسی اندازه‌ی آنها افزایش یافته است.

مرجع‌ها

[1] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, “Electric field effect in atomically thin carbon films”, Science 306, 666-669, 2004.

[2] Crassee, J. Levallois, A. L. Walter, M. Ostler, A. Bostwick, E. Rotenberg, T. Seyller, D. van der Marel, and A. B. Kuzmenko, “Giant Faraday rotation in single-and multilayer graphene”, Nature Physics, 7, 48-51, 2011.

[3] K. Bane and G. Stupakov, in Proceeding of EPAC 2006 (JACoW, Edinburgh, 2006), pp. 2955–2957 .

[4] Y. S. Lee, Principles of Terahertz Science and Technology, Springer, 2009.

[5] S. Sakaguchi and N. Sugimoto, “Transmission properties of multilayer films composed of magneto-optical anddielectric materials”, J. Lightwave Technol. 17, 1087–1092, 1999.

[6] M. Tymchenko, A. Yu. Nikitin, L. Martin-Moreno, “Faraday rotation due to excitation of magnetoplasmons in graphene microribbons”, ACS nano 7, 9780-9787, 2013.

[7] D. L. Sounas, and C. Caloz, “Gyrotropy and nonreciprocity of graphene for microwave applications”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 60, 901-914, 2012.

[8] S. Visnovsky, K. Postava, and T. Yamaguchi, “Magneto-optic polar Kerr and Faraday effects in magnetic superlattices”, Czechoslovak Journal of Physics 51, 917-949, 2001.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]