



طراحی جاذب فرامواد مبتنی بر گرافن برای کاربردهای مادون قرمز میانی

فرشاد انصاری پور، کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات آذربایجان شرقی،

تبریز، ایران

stu.f.ansaripoor@iaut.ac.ir

حسن رسولی سقایی، دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، ایران

h_rasooli@iaut.ac.ir

چکیده

در این مقاله به بررسی جاذب فرامواد دو بانده، برای جذب امواج مادون قرمز میانی پرداخته شده است. ساختار جاذب طراحی شده از نوع فلز-عایق-فلز بوده که دارای طیف جذبی در طول موج های 3 و 5 میکرومتر است. در مرحله اول با بهره گیری از تکنیک رزونانس در طول موج های خاص و تنظیم ابعاد پچ های موجود بر روی سطح جاذب، امکان ایجاد رزونانس در این طول موج ها فراهم شده و جذب بالای 80% اتفاق می افتد. در این طراحی، میزان جذب، دارای پهنای باند زیادی است که مطلوب کاربرد برای انتخاب نور با تک طول موج نیست. لذا به منظور باریکتر کردن پهنای باند جذبی، در مرحله بعد از گرافن در دو طرف لایه دی الکتریک استفاده شده است. وجود گرافن، قدرت انتخاب پذیری طول موج های مورد نظر با پیک جذبی تیز را سبب شده و میزان جذب نزدیک 100% را در طول موج 5 میکرومتر و همچنین میزان جذب نزدیک 60% را در طول موج 3 میکرومتر، را فراهم کرده است.

کلیدواژه ها: جاذب فرامواد، جذب، طول موج، گرافن، مادون قرمز میانی.

1- مقدمه

جاذب های فرامواد به دلیل دارا بودن ویژگی های برجسته از قبیل میزان جذب بالا و نزدیک 100% امواج الکترومغناطیسی، قابلیت تنظیم طول موج به منظور جذب طول موج های خاصی از طیف الکترومغناطیسی، ضخامت کم و در حدود چند ده الی چند صد نانومتر، کاربردهای زیادی در حوزه الکترواپتیک و فوتونیک دارند [1-3]. از جمله این نوع کاربردها می توان طراحی جاذب های طیف مرئی مورد استفاده در سلول های خورشیدی، جاذب های دو بانده و چند بانده در محدوده تراهرتز و مایکروویو، طراحی سنسورهای نوری و پلاسمونیک را نام



برد [4-6]. در حالت کلی دو نوع جاذب وجود دارد که به واسطه طیف‌های جذبی‌شان دسته‌بندی می‌شوند. نوع اول مربوط به جاذب باند پهن بوده که قابلیت جذب بالایی را در طیف وسیعی از طول موج‌ها دارد و نوع دوم جاذب باند باریک که در طول موج‌های خاصی جذب بالایی دارد [7 و 8]. در سال‌های اخیر جاذب متامتریالی با استفاده از نانو میله‌های طلا به منظور جذب کامل فرکانس‌های مادون قرمز، ارایه شده است [9]. همچنین جاذب‌های با باند بسیار باریک به منظور استفاده در بیوسنسورهای پلاسمونیک و فیلترهای جذبی طراحی شده [10] و تحقیقات زیادی نیز به منظور طراحی ساختارهای خاصی برای حذف وابستگی جذب به پلاریزاسیون نور فرودی، انجام شده است [11 و 12].

در این مقاله به معرفی جاذب فرامواد دو بانده در باند مادون قرمز میانی و نزدیک، می‌پردازیم. جاذب طراحی شده دارای پیک جذب در طول موج‌های 3 و 5 میکرومتر و دارای طیف بانده وسیعی در حوالی این دو طول موج است. به منظور کاهش میزان پهنای طیف جذبی و به صفر رساندن میزان جذب در سایر طول موج‌ها، از گرافن استفاده شده است. گرافن به دلیل دارا بودن خواص الکترونیکی و اپتیکی فوق العاده، در سال‌های اخیر توجه خاصی را به خود جلب کرده و تاکنون در کاربردهای گوناگون از قبیل آشکارسازهای نوری، سلول‌های خورشیدی، ادوات فعال و غیر فعال، ترانزیستورهای نانو مقیاس، محدوده تراهرتز و جاذب‌ها بکار رفته است [13 و 14]. این ماده شگفت‌انگیز در سال 2004 برای اولین بار توسط آندره گایم و کنستانتین نووسلوف، ساخته شد [15]. خصوصیات گرافن از قبیل رسانندگی و نفوذپذیری الکتریکی از طریق فرمول کوبو قابل تبیین است [16]. میزان رسانندگی شامل دو قسمت رسانندگی بین بانده و درون بانده است که از طریق فرمول‌های زیر بیان می‌گردد [17]:

$$S_s = S_s^{intra} + S_s^{inter} \quad (1)$$

$$S_s^{intra} = \frac{2K_B T e^2}{p h^2} \ln \left(2 \cosh \frac{E_f}{2K_B T} \right) \frac{i}{w + it}^{-1} \quad (2)$$

$$S_s^{inter} = \frac{e^2}{4h} \ln \left[H \left(\frac{w}{2} \right) + i \frac{4w}{p} \int_0^\infty \frac{H(\Omega) - H \left(\frac{w}{2} \right)}{w^2 - 4\Omega^2} d\Omega \right] \quad (3)$$

$$H(\Omega) = \sinh \left(\frac{h\Omega}{K_B T} \right) / \left[\cosh \left(\frac{h\Omega}{K_B T} \right) + \cosh \left(\frac{E_f}{K_B T} \right) \right] \quad (4)$$



که در آنها T دما، K_B ثابت بولتزمن، ω فرکانس زاویه‌ای موج الکترومغناطیسی، h ثابت پلانک، E_f سطح فرمی گرافن، τ زمان آسایش و e واحد بار الکتریکی است. مقدار ضریب نفوذپذیری الکتریکی موثر از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$e_{eff} = 1 + i \frac{S_s}{e_0 \omega \Delta} \quad (5)$$

که در آن Δ ضخامت گرافن است. می‌توان گفت که گرافن به عنوان یک فلز نازک دارای فرکانس پلاسما وابسته به سطح فرمی بوده و مقدارش برابر است با:

$$w_p = \left[\frac{2e^2 K_B T}{p h^2 e_0 \Delta} \ln \left(2 \cosh \frac{E_f}{2K_B T} \right) \right]^{1/2} \quad (6)$$

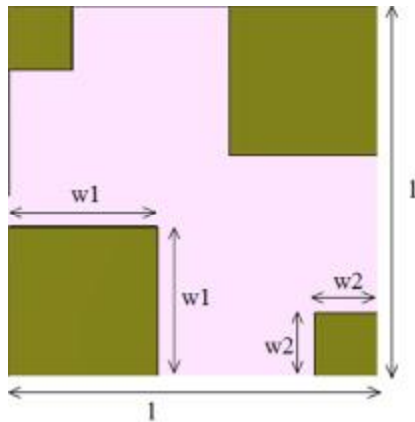
از آنجایی که هر جاذبی دارای طیف جذبی است که میزان آن به ازای طول موج، از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$A = I - R - T \quad (7)$$

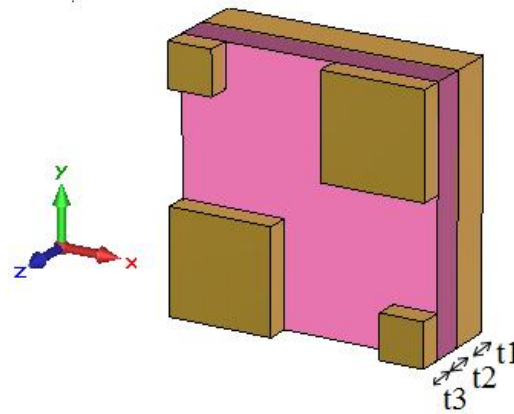
که در آن T و R به ترتیب مولفه‌های عبوری و بازتابی هستند.

2- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت به ارایه نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌پردازیم که شبیه‌سازی‌ها با استفاده از تکنیک تمام موج و با استفاده از نرم‌افزار CST انجام یافته است. شماتیک ساختار سلول واحد جاذب فرامواد طراحی شده در شکل 1 نشان داده شده است. این جاذب دارای دو لایه هادی بوده که با یک لایه دی‌الکتریک از همدیگر جدا شده‌اند. لایه پایینی از یک لایه کامل از جنس طلا جهت حذف مولفه‌های عبوری، لایه بالایی متشکل از پچ‌های مجزا و از جنس طلا و لایه دی‌الکتریک از جنس Si انتخاب شده است. مقادیر ابعاد و پارامترهای بکار رفته به ترتیب برابر با $t_1 = 185 \text{ nm}$ ، $t_2 = 150 \text{ nm}$ ، $t_3 = 100 \text{ nm}$ ، $l = 1082 \text{ nm}$ ، $w_1 = 436 \text{ nm}$ ، $w_2 = 186 \text{ nm}$ است.



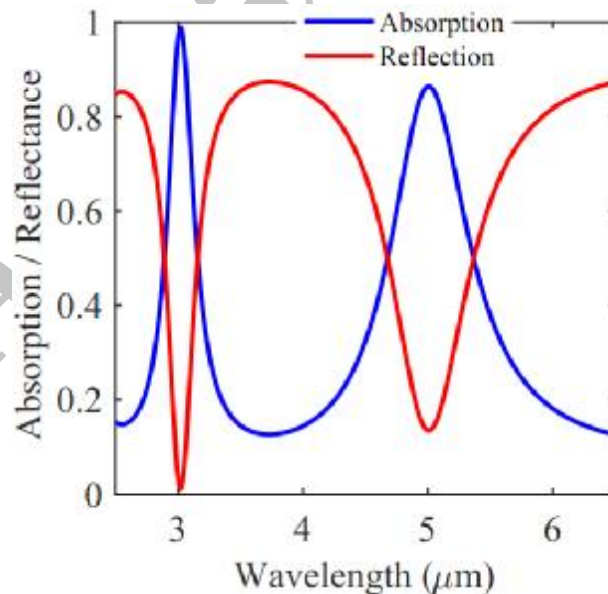
(ب)



(الف)

شکل 1: شماتیک ساختاری سلول واحد جاذب فرامواد (الف) نمای سه بعدی و (ب) نمای دو بعدی

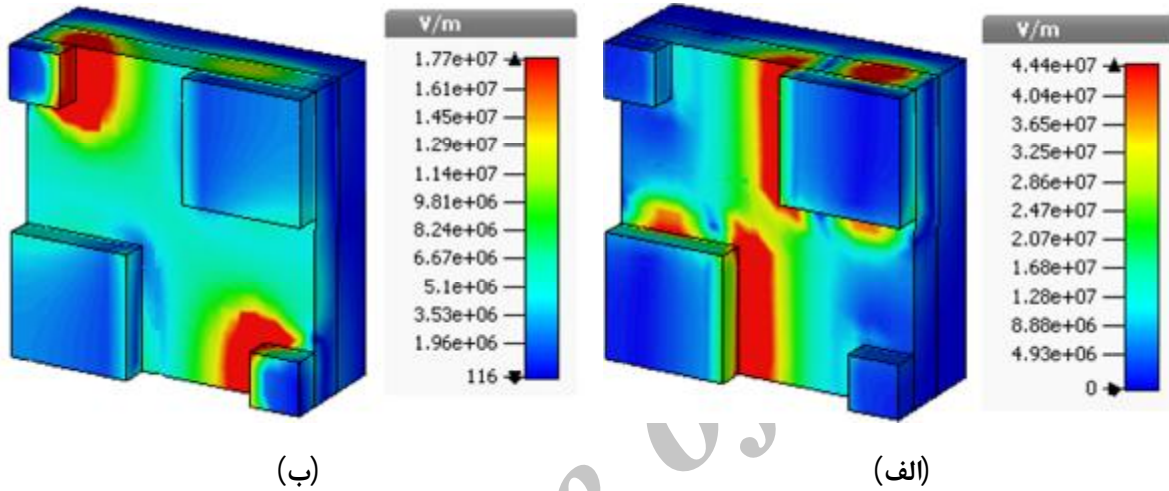
در شکل 2 نمودار میزان جذب و بازتاب بر حسب طول موج، رسم شده است. همانطور که دیده می شود منحنی جذب، دارای دو پیک در طول موج های 3 و 5 میکرومتر است که در آن ها میزان جذب بالای 80% است. مقادیر و محل این نقاط به شدت وابسته به ابعاد ساختار هست بطوری که با تغییر و طراحی دقیق، می توان به پیک جذبی بالاتر در طول موج مورد نظر دست یافت.



شکل 2: نمودار میزان جذب و بازتابش برای جاذب طراحی شده در طول موج های 3 و 5 میکرومتر

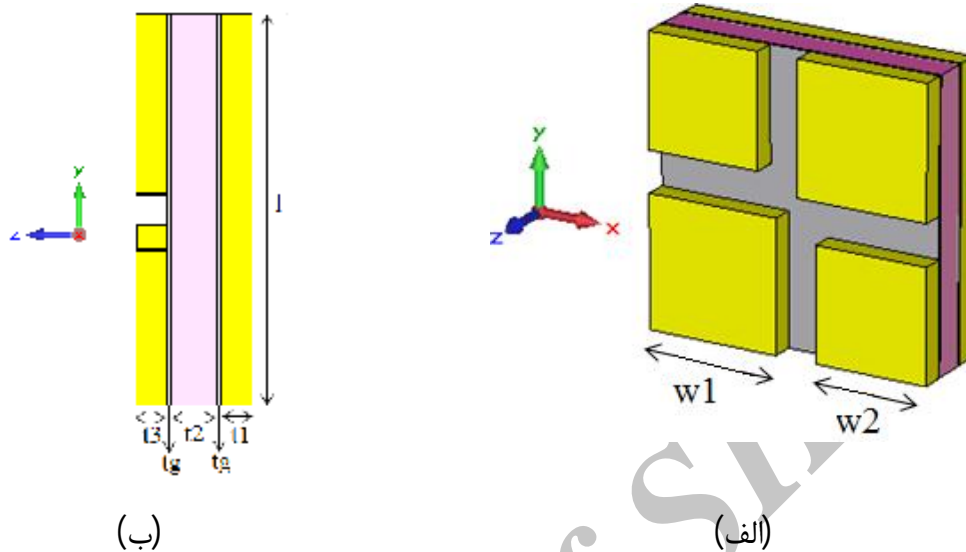


در شکل 3 نمودارهای توزیع میدان الکتریکی نشان داده شده است. شکل 3-الف، مربوط به طول موج 3 میکرومتر و شکل 3-ب، مربوط به طول موج 5 میکرومتر است. همانطور که دیده می شود میدان در اطراف پیچ های مربعی به مراتب بیشتر از بقیه نقاط جاذب هست و این نشان دهنده رزونانس الکتریکی است که پیچ های کوچکتر باعث رزونانس در طول موج 5 میکرومتر و پیچ های بزرگتر عامل رزونانس در طول موج 3 میکرومتر هستند.



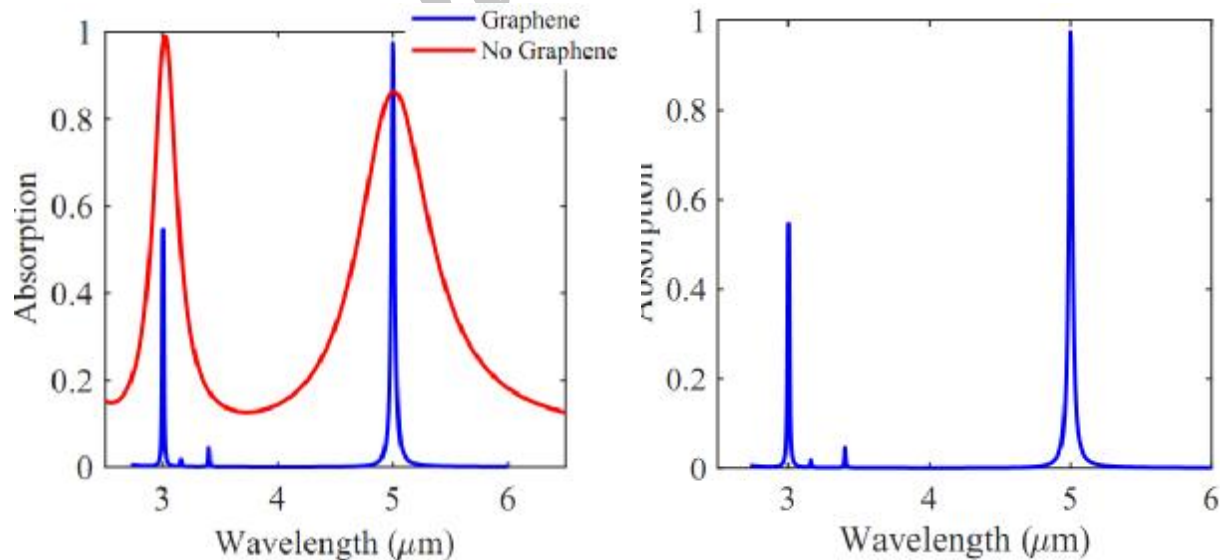
شکل 3: پروفایل توزیع میدان الکتریکی در جاذب در طول موج های (الف) 3 میکرومتر و (ب) 5 میکرومتر

با توجه به اینکه طیف جذبی ساختار بالا دارای طیف باریکتری نبوده و همچنین در بقیه طول موج ها مقدارش صفر نیست، لذا باید طراحی مجددی جهت باریکتر کردن ساختار مورد نظر و همچنین به صفر رساندن میزان جذب در غیر از طول موج های مذکور انجام گیرد. بدین منظور از گرافن استفاده شده است که شماتیک آن در شکل 4 نشان داده شده است. در این ساختار گرافن در دو طرف ماده دی الکتریک با ضخامت ده نانومتر بکار رفته است. ابعاد بکار رفته برابر با $t_1 = 100 \text{ nm}$, $t_2 = 150 \text{ nm}$, $t_3 = 100 \text{ nm}$, $t_g = 10 \text{ nm}$, $l = 1250 \text{ nm}$, $w_1 = 575 \text{ nm}$ و $w_2 = 475 \text{ nm}$ است.



شکل 4: شماتیک ساختار جاذب فرامواد طراحی شده با استفاده از گرافن (الف) نمای سه بعدی و (ب) نمای از جانب

در شکل 5 (الف) نمودار میزان جذب بر حسب طول موج برای جاذب متامتریالی با استفاده از گرافن، نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود نمودار دارای دو پیک جذبی تیز در طول موج های 3 و 5 میکرومتر با میزان جذب بالاتر از 55% است. این درحالی است که در بقیه طول موج ها مقادیر صفر و یا نزدیک به صفر است و جاذب دارای پهنای طیفی باریکتری بوده که قابلیت تشخیص و جذب تنها دو طول موج را دارد. در شکل 5 (ب) به مقایسه این دو ساختار پرداخته شده است.



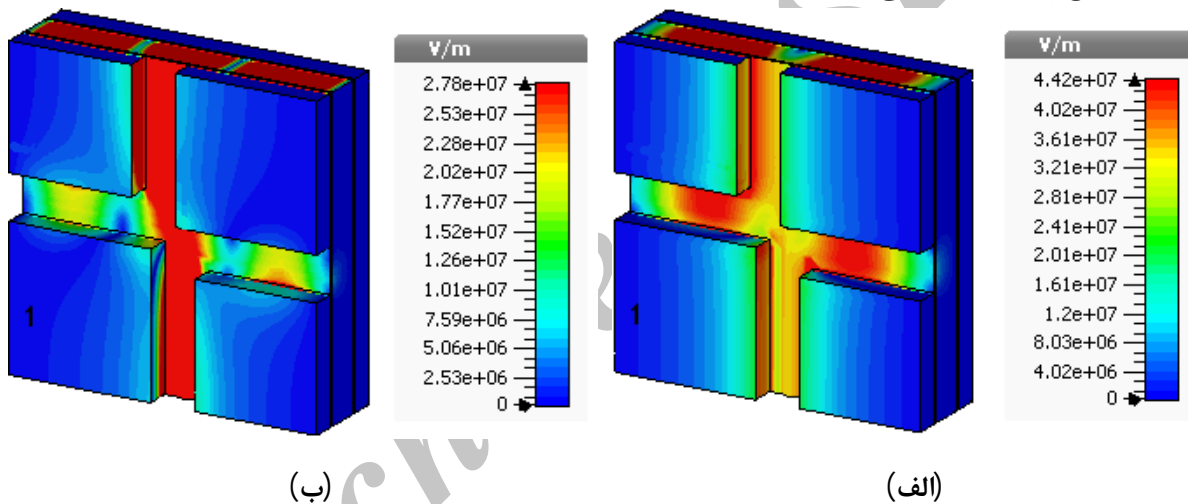
(ب)

(الف)

شکل 5: نمودارهای جذب بر حسب طول موج (الف) جاذب فرامواد با استفاده گرافن در دو طرف ماده دی الکتریک و (ب) مقایسه

جاذب های فرامواد در حالات بدون وجود گرافن و با وجود گرافن از نظر میزان جذب و پهنای جذبی

در شکل 6، پروفایل های توزیع میدان الکتریکی برای جاذب فرامواد به همراه گرافن نشان داده شده است. شکل 6-الف، مربوط به طول موج 3 میکرومتر و شکل 6-ب، مربوط به طول موج 5 میکرومتر بوده که در آن ها میزان تمرکز میدان در بین پیچ ها اتفاق افتاده است. دیده می شود که میدان در بین پیچ ها در طول موج 5 میکرومتر بیشتر است و این دلیل زیاد بودن میزان جذب نسبت به طول موج 3 میکرومتر است. وجود گرافن نیز به دلیل تحریک امواج پلاسمون سطحی، باعث افزایش این میدان شده است.



شکل 6: پروفایل توزیع میدان الکتریکی در جاذب در طول موج های (الف) 3 میکرومتر و (ب) 5 میکرومتر

3- نتیجه گیری

در این مقاله به طراحی جاذب فرامواد دوباندی با استفاده از ساختار فلز-عایق-فلز پرداخته شد. جاذب مورد نظر قابلیت جذب بالای 80% در طول موج های 3 و 5 میکرومتر را دارد که منحنی های جذب دارای پهنای جذبی زیادی در اطراف طول موج های مذکور بودند. به منظور باریک کردن باند جذب و تیزتر شدن پیک آن، از گرافن با ضخامت ده نانومتر استفاده شده است. وجود گرافن باعث شده تا در طول موج های مذکور، میزان جذب بالای 55% برسد و در سایر طول موج ها صفر شود.



مراجع

- [1] Kim, J., Han, K., & Hahn, J. W. (2017). "Selective dual-band metamaterial perfect absorber for infrared stealth technology". *Scientific reports*, 7, 6740.
- [2] Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., & Padilla, W. J. (2008). "Perfect metamaterial absorber". *Physical review letters*, 100(20), 207402.
- [3] Mulla, B., & Sabah, C. (2016). "Multiband metamaterial absorber design based on plasmonic resonances for solar energy harvesting". *Plasmonics*, 11(5), 1313-1321.
- [4] Li, M., Yang, H. L., Hou, X. W., Tian, Y., & Hou, D. Y. (2010). Perfect metamaterial absorber with dual bands. *Progress In Electromagnetics Research*, 108, 37-49.
- [5] Tao, H., Landy, N. I., Bingham, C. M., Zhang, X., Averitt, R. D., & Padilla, W. J. (2008). A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization. *Optics express*, 16(10), 7181-7188.
- [6] Liu, N., Mesch, M., Weiss, T., Hentschel, M., & Giessen, H. (2010). "Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor". *Nano letters*, 10(7), 2342-2348.
- [7] Tao, H., Bingham, C. M., Pilon, D., Fan, K., Strikwerda, A. C., Shrekenhamer, D., ... & Averitt, R. D. (2010). A dual band terahertz metamaterial absorber. *Journal of physics D: Applied physics*, 43(22), 225102.
- [8] Xiong, H., Hong, J. S., Luo, C. M., & Zhong, L. L. (2013). "An ultrathin and broadband metamaterial absorber using multi-layer structures". *Journal of Applied Physics*, 114(6), 064109.
- [9] Su, Z., Yin, J. & Zhao, X. . "Soft and broadband infrared metamaterial absorber based on gold nanorod/liquid crystal hybrid with tunable total absorption". *Sci. Rep.* 5, 16698 , (2015).
- [10] Jamali, A. A., & Witzigmann, B. (2014). Plasmonic perfect absorbers for biosensing applications. *Plasmonics*, 9(6), 1265-1270.
- [11] Lin, C. H., Chern, R. L., & Lin, H. Y. (2011). Polarization-independent broad-band nearly perfect absorbers in the visible regime. *Optics express*, 19(2), 415-424.
- [12] Cao, T., Wei, C. W., Simpson, R. E., Zhang, L., & Cryan, M. J. (2014). Broadband polarization-independent perfect absorber using a phase-change metamaterial at visible frequencies. *Scientific reports*, 4.
- [13] Avouris, P., & Xia, F. (2012). Graphene applications in electronics and photonics. *Mrs Bulletin*, 37(12), 1225-1234.
- [14] Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J. W., Potts, J. R., & Ruoff, R. S. (2010). Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications. *Advanced materials*, 22(35), 3906-3924.
- [15] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S., Jiang, D., Katsnelson, M., Grigorieva, I., ... & Firsov, A. A. (2005). Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *nature*, 438(7065), 197-200



- [16] J. D. Buron, D. H. Petersen, P. Bø ggild, D. G. Cooke, M. Hilke, J. Sun, E. Whiteway, P. F. Nielsen, O. Hansen, A. Yurgens, and P. U. Jepsen, "Graphene conductance uniformity mapping." *Nano Lett.* 12, 5074-5081 (2012)
- [17] Andryieuski, A., & Lavrinenko, A. V. (2013). Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: effective surface conductivity approach. *Optics express*, 21(7), 9144-9155.

Archive of SID