کوک‌پذیری دایکرویزم دایروی در آرایه‌ای از نانومیله‌های L شکل ساندویچ شده بین دو تک لایه‌ی گرافن

عباس قاسم‌پور اردکانی، خاطره مرادی

بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز

چکیده - در این مقاله، با قرار دادن یک آرایه از نانومیله‌های L شکل از جنس نقره بین دو تک لایه‌ی گرافن، یک فراسطح کایرال پیشنهاد می‌شود که دایکرویزم دایروی در آن قابل کنترل است. به این منظور نور با قطبش‌های دایروی راستگرد و چپگرد به صورت عمودی و مایل به ساختار مورد نظر تابیده شده و طیف دایکرویزم دایروی آن به ازای انرژی‌های فرمی متفاوت گرافن محاسبه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که می‌توان با تغییر انرژی فرمی، بیشینه مقدار طیف دایکرویزم دایروی و طول موجی که در آن بیشینه رخ می‌دهد را تنظیم کرد.

کلید واژه- انرژی فرمی، تک لایه‌ی گرافن، دایکرویزم دایروی، کایرال، نانوساختار.

Tuning of circular dichroism in an array of L-shaped nanorods sandwiched between two graphene single layers

Abbas Ghasempour Ardakani, Khatereh Moradi

Department of Physics, College of Science, Shiraz University, Shiraz 71454, Iran

Abstract- In this paper, by inserting an array of silver L-shaped nanorods between two layers of graphene, we propose a chiral metasurface in which circular dichriosm is tunable. Left and right-handed circularly polarized lights are normally and obliquely incident onto the proposed structure and circular dichroism spectrum is calculated for different Fermi energies of graphene. Our simulated results demonstrate that maximum value of circular dichroism spectrum and the wavelength in which maximum occurs can be tuned by changing the Fermi energy.

Keywords: Fermi energy, Single layer of graphene, Circular dichroism, Chiral, Nanostructure.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

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

۱- مقدمه

فراماده الکترومغناطیسی که از ساختارهای مصنوعی متناوب تشکیل شده‌اند، ویژگی‌های خارق‌العاده‌ای مانند ضریب شکست منفی و ابرلنزها از خود نشان می‌دهند که در مواد عادی دیده نمی‌شوند. فراماده که از واحدهای ساختاری زیر طول موج فلز-دی‌الکتریک تشکیل شده‌اند، به علت کاربرد در کنترل انتشار امواج الکترومغناطیس، توجهات زیادی را در دهه‌ی اخیر به خود جلب کرده‌اند. فراماده کایرال دسته‌ی جدیدی از فراماده هستند که سلول واحد آن‌ها بر روی تصویر آینه‌ای خود منطبق نمی‌شود و بخاطر غیر متقارن بودن ذاتیشان، پاسخ‌های متفاوتی به موج قطبیده‌ی دایروی راستگرد و چپگرد می‌دهند که دایکرویزم دایروی نام دارد [۱]. دایکرویزم دایروی به صورت اختلاف عبور موج فرودی قطبیده‌ی دایروی راستگرد و چپگرد تعریف می‌شود و برای مشخص کردن میزان آن، پارامتر دایکرویزم دایروی به صورت $\Delta = T_{RCP} - T_{LCP}$ تعریف می‌شود که T_{RCP} و T_{LCP} به ترتیب ضرایب عبور برای نور با قطبش دایروی راستگرد و چپگرد می‌باشند. دایکرویزم دایروی یکی از روش‌های اسپکتروسکوپی است که می‌تواند برای آشکارسازی و توصیف مولکول‌های آلی و زیستی استفاده شود [۲]. در سال‌های اخیر پدیده‌ی دایکرویزم دایروی در هر دو فراماده کایرال ذاتی [۳] و غیرذاتی [۴] مشاهده شده است. در فراماده کایرال ذاتی برای هر دو فرود عمودی و مایل پدیده‌ی دایکرویزم دایروی رخ می‌دهد در حالی که در فراماده کایرال غیرذاتی که از سلول‌های واحد غیرکایرال تشکیل شده‌اند، این اثر فقط تحت فرود مایل رخ می‌دهد. فراماده دو بعدی یا تخت که به آن‌ها فراسطوح گفته می‌شود، دارای افت کم‌تر و ساخت آسان‌تر نسبت به فراماده سه بعدی هستند [۵].

در سال‌های اخیر، گرافن به عنوان جانشینی برای فلزات در ساخت تراشه‌های پلاسمونی مورد توجه قرار گرفته است. گرافن یک لایه‌ی دو بعدی از اتم‌های کربن با ضخامت یک اتم است که در یک شبکه‌ی شش ضلعی لانه‌ی زنبوری قرار گرفته است. این ماده دارای ویژگی‌های اپتیکی و الکترونیکی منحصر به فردی است. با اعمال ولتاژ گیت، می‌توان انرژی فرمی گرافن و در نتیجه خواص اپتیکی آن را کنترل کرد. لازم به ذکر است که هر دو گذار درون نواری و بین نواری در رسانندگی گرافن مشارکت دارند. همچنین گرافن در فرکانس‌های حدود چند تراهرتز رفتارهای پلاسمونی قوی از خود نشان می‌دهد. خواص اپتیکی گرافن با یک رسانندگی سطحی توصیف می‌شود که با استفاده از فرمول شناخته شده‌ی کوبو به دست می‌آید و به صورت زیر بیان می‌شود:

(۱)

$$\sigma_g = i\frac{e^2 k_B T}{\pi\hbar^2\left(\omega + i\tau^{-1}\right)}\left\{\frac{\mu_c}{k_B T} + 2\ln\left[\exp\left(-\frac{\mu_c}{k_B T}\right)+1\right]\right\} + \mathrm{i}\frac{e^2}{4\pi\hbar^2}\ln\left[\frac{2|\mu_c| - \hbar\left(\omega + i\tau^{-1}\right)}{2|\mu_c| + \hbar\left(\omega + i\tau^{-1}\right)}\right]$$

در این رابطه، e بار الکترون، k_B ثابت بولتزمن، $\hbar$ ثابت پلانک کاهش یافته، ω فرکانس زاویه‌ای فرودی، T دما، μ_c انرژی فرمی، $\tau = \frac{\mu\mu_c}{e v_f}$ زمان واهلش حامل‌ها، μ تحرک پذیری حامل‌ها و v_f سرعت فرمی است. در رابطه‌ی (۱)، جمله اول و دوم به ترتیب مربوط به گذارهای درون نواری و بین نواری هستند.

به لایه‌ی گرافن یک ضریب دی‌الکتریک نسبت داده می‌شود که رابطه‌ی آن بر حسب رسانندگی گرافن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\varepsilon(K,\omega) = 2.5 + \frac{i\sigma_g(K,\omega)}{\varepsilon_0 \omega d_g} \qquad (۲)$$

در این رابطه، dg ضخامت گرافن است که حدود ۰/۳۵ نانومتر است [۶].

در این مقاله، یک فراسطح کایرال کوک‌پذیر شامل آرایه‌ای از نانومیله‌های L شکل از جنس نقره که بین دو تک لایه‌ی گرافن ساندویچ شده است، پیشنهاد می‌شود. طیف دایکرویزم دایروی ناشی از این ساختار تحت تابش عمودی و مایل به ازای انرژی‌های فرمی متفاوت گرافن محاسبه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که از این ساختار می‌توان برای کنترل طیف دایکرویزم دایروی استفاده کرد.

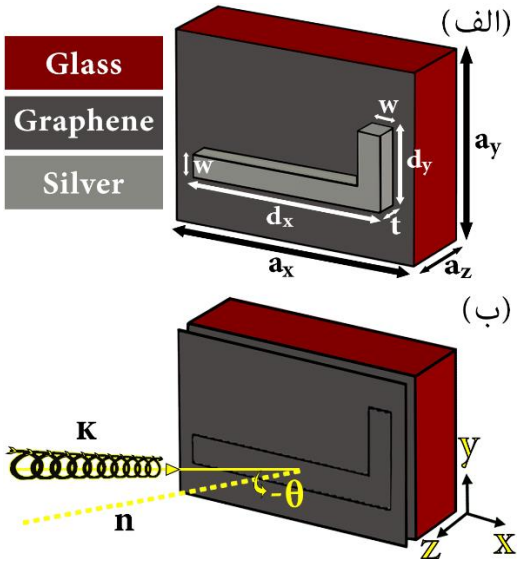
۲- طراحی ساختار و شبیه‌سازی

یک لایه‌ی نازک گرافن به ضخامت ۱ نانومتر روی یک

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

زیرلایه از جنس شیشه با ضریب شکست ۱/۵ و با ضخامت a_z لایه نشانی شده است. بر روی این لایه‌ی گرافن، یک لایه‌ی نقره به ضخامت t قرار می‌گیرد که در آن آرایه‌ای از نانومیله‌های L شکل به گونه‌ای ایجاد می‌شود که بین نانوساختارهای L شکل هوا باشد. به علاوه لایه‌ی گرافن دیگری به ضخامت ۱ نانومتر روی آرایه‌ی نانومیله‌های L شکل قرار می‌گیرد. طرحواره‌ای از سلول واحد این فراسطح در شکل ۱ نشان داده شده است که در آن a_x و a_y ثابت‌های شبکه، d_x، d_y و w به ترتیب طول بازوی افقی و عمودی و پهنای بازوهای نانومیله‌ی L شکل و θ زاویه‌ی نور فرودی می‌باشند.

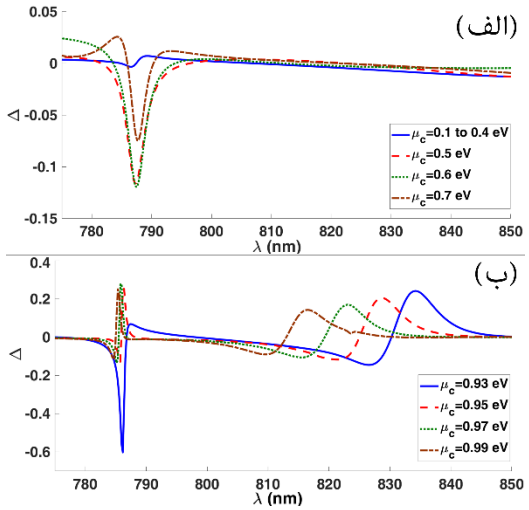


شکل ۱: طرحواره‌ای از سلول واحد نانوساختار طراحی شده؛ (الف) یک نانومیله‌ی L شکل قرار گرفته بر روی تک لایه‌ی گرافن. (ب) نانومیله‌ی L شکل ساندویچ شده بین دو تک لایه‌ی گرافن.

ساختار مفروض تحت تابش موج تخت قطبیده‌ی دایروی راستگرد و چپگرد با فرود عمودی (θ=0°) و مایل (θ=60°) قرار می‌گیرد. برای مطالعه‌ی انتشار نور از این ساختار، از نرم افزار CST استفاده می‌شود که اساس آن روش انتگرال محدود است. مقادیر استفاده شده برای پارامترها در شبیه-سازی به صورت a_x=450، a_y=250، a_z=200، d_x=260، d_y=100، t=30 و w=30 نانومتر هستند.

۳- بحث و نتایج عددی

ابتدا یک موج قطبیده‌ی دایروی با قطبش‌های راستگرد و چپگرد به صورت عمودی به این ساختار تابیده و طیف دایکرویزم دایروی به ازای انرژی‌های فرمی متفاوت محاسبه می‌شود. نتایج مربوطه در شکل ۲ نشان داده شده است.



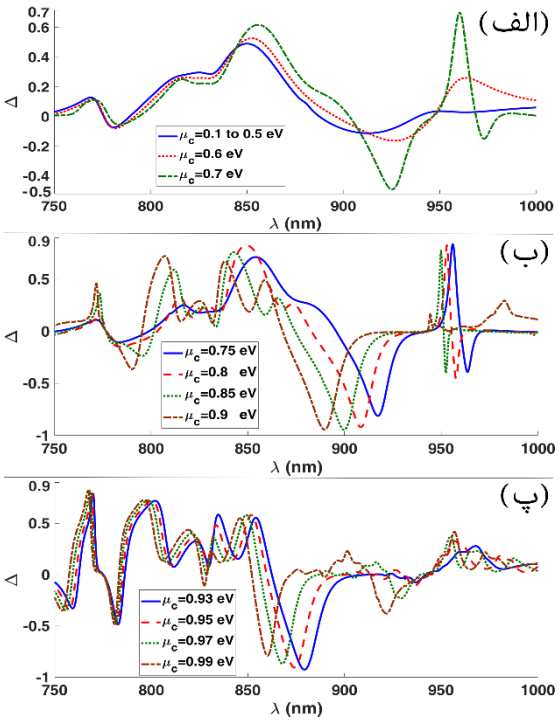
شکل ۲: طیف دایکرویزم دایروی برای فرود عمودی (θ=0°) یک موج قطبیده‌ی دایروی راستگرد و چپگرد به نانوساختار طراحی شده به ازای انرژی‌های فرمی مختلف؛ (الف) در بازه‌ی ۰/۱ تا ۰/۷ الکترون ولت و (ب) در بازه‌ی ۰/۹۳ تا ۰/۹۹ الکترون ولت.

همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، با تغییر انرژی فرمی گرافن، طیف دایکرویزم دایروی تغییر می‌کند. در شکل ۲ (الف) دیده می‌شود وقتی انرژی فرمی از ۰/۱ به ۰/۴ الکترون ولت افزایش می‌یابد، طیف دایکرویزم دایروی بدون تغییر باقی می‌ماند و در ناحیه‌ی طول موجی ۷۵۰ تا ۸۵۰ نانومتر تقریباً Δ=0 است (منحنی آبی رنگ). با افزایش انرژی فرمی تا ۰/۷ الکترون ولت، دره‌هایی در طیف دایکرویزم دایروی مشاهده می‌شود. در شکل ۲ (ب)، به ازای انرژی فرمی ۰/۹۳ الکترون ولت، بیشینه مقدار ۰/۶ برای دایکرویزم دایروی در طول موج ۷۸۶ نانومتر رخ می‌دهد. همچنین قله‌های سمت راست طیف دایکرویزم دایروی در این شکل، با افزایش انرژی فرمی از ۰/۹۳ به ۰/۹۹ الکترون ولت، به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر جابجا می‌شوند.

حال یک موج قطبیده‌ی دایروی راستگرد و چپگرد تحت فرود مایل با زاویه‌ی ۶۰ درجه به ساختار تابیده و طیف دایکرویزم دایروی به ازای انرژی‌های فرمی متفاوت لایه‌های گرافن محاسبه می‌شود. نتایج مربوطه در شکل ۳ نشان داده شده است.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]



شکل ۳: طیف دایکرویزم دایروی برای فرود مایل (θ=60°) یک موج قطبیده‌ی دایروی راستگرد و چپگرد به نانوساختار طراحی شده به ازای انرژی‌های فرمی متفاوت لایه‌ی گرافن؛ (الف) در بازه‌ی ۰/۱ تا ۰/۷ الکترون ولت، (ب) در بازه‌ی ۰/۷۵ تا ۰/۹ الکترون ولت و (پ) در بازه‌ی ۰/۹۳ تا ۰/۹۹ الکترون ولت.

همان‌گونه که در شکل ۳ (الف) دیده می‌شود به ازای انرژی‌های فرمی که در بازه‌ی ۰/۱ تا ۰/۵ الکترون ولت قرار دارند، طیف دایکرویزم دایروی نسبت به تغییرات انرژی فرمی تغییراتی از خود نشان نمی‌دهد. با افزایش انرژی فرمی از ۰/۵ تا ۰/۷ الکترون ولت منحنی دایکرویزم دایروی تغییر خواهد کرد و مقدار دایکرویزم در طول موج‌های ۹۲۵ و ۹۶۰ نانومتر افزایش می‌یابد. مطابق با شکل ۳ (ب)، وقتی انرژی فرمی از ۰/۷۵ تا ۰/۹ الکترون ولت افزایش می‌یابد، قله‌های مشاهده شده در منحنی دایکرویزم در اطراف طول موج ۸۵۰ و ۹۵۰ نانومتر به سمت طول موج‌های کم‌تر جابجا می‌شوند. همچنین دره‌های مشاهده شده در این شکل در اطراف طول موج ۹۰۰ نانومتر نیز با افزایش انرژی فرمی به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر میل می‌کنند. مقایسه‌ی شکل ۳ (الف) با ۳ (ب) نشان می‌دهد که به ازای انرژی‌های فرمی بزرگ‌تر میزان بیشینه و کمینه در منحنی دایکرویزم افزایش می‌یابد. با بررسی شکل ۳ (پ) به این نتیجه می‌رسیم که هنگامی که انرژی فرمی از ۰/۹۳ تا ۰/۹۹ الکترون ولت افزایش می‌یابد، دره‌های مشاهده شده در منحنی دایکرویزم در اطراف طول موج ۸۷۵ نانومتر بیش‌تر تحت تأثیر تغییرات انرژی فرمی قرار می‌گیرند و با افزایش انرژی فرمی، به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر جابجا می‌شوند. همچنین در شکل‌های ۳ (ب) و ۳ (پ) مقدار دایکرویزم به ازای بعضی از طول موج‌ها و انرژی‌های فرمی نزدیک ۱ می‌باشد که یکی از بیش‌ترین مقادیر به دست آمده برای دایکرویزم دایروی محسوب می‌شود.

علت بستگی منحنی دایکرویزم دایروی به انرژی فرمی گرافن از این حقیقت ناشی می‌شود که دوقطبی‌های الکتریکی و مغناطیسی القا شده در نانومیله‌های فلزی به ضریب شکست محیط اطراف آن‌ها وابسته است. با توجه به اینکه لایه‌های گرافنی در اطراف نانومیله‌ها قرار دارند و ضریب شکست آن‌ها به رسانندگی گرافن بستگی دارد، انتظار داریم که طبق رابطه‌ی (۱) با تغییر انرژی فرمی منحنی دایکرویزم دایروی در ساختار طراحی شده تغییر کند.

۴- نتیجه گیری

یک فراسطح کایرال شامل آرایه‌ای از نانومیله‌های L شکل از جنس نقره که بین دو تک لایه‌ی گرافن ساندویچ شده است، پیشنهاد شد. طیف دایکرویزم دایروی برای هر دو فرود عمودی و مایل و به ازای انرژی‌های فرمی متفاوت گرافن، محاسبه شد. نتایج محاسبات نشان داد که طیف دایکرویزم دایروی در ساختار طراحی شده شدیداً به انرژی فرمی بستگی دارد. بنابراین با تغییر انرژی فرمی در این ساختار می‌توان دایکرویزم دایروی و عبور نور با قطبش دایروی را کنترل کرد.

مراجع

[1] B. Wang, J. Zhou, T. Koschny, M. Kafesaki, C. M. Soukoulis, “Chiral metamaterials: simulations and experiments”, J. Opt. A: Pure Appl. Opt., Vol. 11, No 11, pp. 114003-1-114003-10, 2009.

[2] S. Wu, P. Qu, J. Liu, D. Lei, K. Zhang, S. Zhao, Y. Zhu, “Giant circular dichroism and its reversal in solid and inverse plasmonic gammadion-shaped structures”, Opt. express, Vol. 24, No. 24, pp. 27763-27770, 2016.

[3] Y. H. Wang, J. Shao, J. Li, Z. Liu, J. Li, Z. G. Dong, Y. Zhai, “Broadband high-efficiency transmission asymmetry by a chiral bilayer bar metastructure”, J. Appl. Phys., Vol. 117, No. 17, pp. 173102-1-173102-7, 2015.

[4] T. Cao, C. Wei, L. Zhang, “Modeling of multi-band circular dichroism using metal/dielectric/metal achiral metamaterials”, Opt. Materials Express, Vol. 4, No. 8, pp. 1526-1534, 2014.

[5] H. T. Chen, A. J. Taylor, N. Yu, “A review of metasurfaces: physics and applications”, Reports on Progress in Physics, Vol. 79, No. 7, 076401-1-076401-44, 2016.

[6] H. J. Li, L. L. Wang, B. Sun, Z. R. Huang, X. Zhai, “Tunable mid-infrared plasmonic band-pass filter based on a single graphene sheet with cavities”, J. Appl. Phys, Vol. 116, No. 22, pp. 224505-1-224505-6, 2014.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]