بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین
کنفرانس مهندسی و فناوری
فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

بررسی خواص اپتیکی غیرخطی اکسیدگرافن با استفاده از روش مدولاسیون خودفازی فضایی(SSPM)

محمد جواد مرادی، محمدعلی حداد*، معین گلستانی‌فر، فاطمه استواری، محمود برهانی

دانشکده فیزیک دانشگاه یزد، صفائیه، بلوار دانشگاه، یزد، صندوق پستی:۷۴۱-۸۹۱۹۵

m.moradi۷٤@stu.yazd.ac.ir, mahaddad@yazd.ac.ir, m.golestanifar@stu.yazd.ac.com, ostovari@yazd.ac.ir, mborhani@yazd.ac.ir

چکیده – با کشف نانوساختارهای گرافن، مطالعه بر روی این گروه از مواد افزایش یافت. در این مقاله، ما به بررسی خاصیت اپتیکی غیرخطی اکسیدگرافن می‌پردازیم. در این پژوهش، ضریب شکست غیرخطی و همچنین پذیرفتاری الکتریکی مرتبه سوم اکسیدگرافن رقیق شده در محلول NMP، با استفاده از روش مدولاسیون خودفاز فضایی در چهار غلظت متفاوت از نمونه اندازه‌گیری شده است. آزمایش‌ها با استفاده از لیزر پیوسته Nd:YAG با طول موج ۵۳۲ نانومتر انجام شده است. با توجه به داده‌های تجربی به دست آمده، ضرایب شکست غیرخطی و پذیرفتاری الکتریکی مرتبه سوم به ترتیب از مرتبه $۱۰^{-۷}$ $cm^{۲}/w$ و $۱۰^{-۱۱}$ e.s.u اندازه‌گیری شدند.

کلید واژه- اپتیک غیرخطی، پذیرفتاری الکتریکی مرتبه سوم، ضریب شکست غیرخطی، اکسیدگرافن، مدولاسیون خودفاز فضایی.

Studying the optical nonlinear features of Graphene Oxide (GO) using Spatial Self-Phase Modulation (SSPM)

Mohammad Javad Moradi, Mohammad Ali Haddad*, Moein Golestanifar, Fatemeh Ostovari, Mahmoud Borhani

Department of Physics, Yazd University, Yazd, Iran, PO Box ۸۹۱۹۵-۷٤۱

m.moradi۷٤@stu.yazd.ac.ir, mahaddad@yazd.ac.ir, m.golestanifar@stu.yazd.ac.com, ostovari@yazd.ac.ir. mborhani@yazd.ac.ir

Abstract: The discovery of graphene nanostructures attracted a great attention in this class of materials. In this paper, we investigate the nonlinear optical properties of graphene oxide. We applied spatial self-phase modulation to estimate the nonlinear refractive index of n_2 and third-order electrical susceptibility of $\chi^{(3)}$ for graphene oxide dispersed in NMP solution at four different concentrations. A ٥٣٢ nm continuous-wave Nd:YAG laser was used in the experiment. According to obtained experimental data, the n_2 and $\chi^{(3)}$ values measured in the range of $۱۰^{-۷}$ $cm^{۲}/W$ and $۱۰^{-۱۱}$ e.s.u.

Keywords: Nonlinear Optic, Third Order of Electrical Susceptibility, Nonlinear Refractive Index, Graphene Oxide, Spatial Self Phase Modulation (SSPM).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-25]

مقدمه

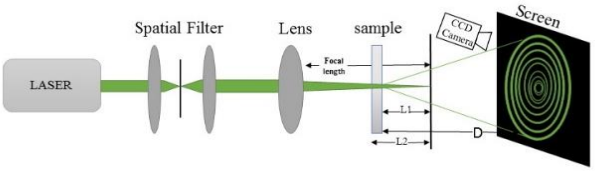
از سال ۲۰۰۶ تا کنون، خواص متعددی از گرافن ناب (Pristine Graphen) آشکار شده‌است. خواص گرافن شامل تحرک بالای بارهای الکتریکی به همراه جذب نور مرئی حداکثر تا ۳/۲ ٪، هدایت حرارتی عالی، استحکام بالا می‌باشد [۱-۳]. استوبینسکی و همکارانش توانستند ساختار شیمیایی اکسید گرافن چند لایه‌ای را با روش‌های پراش اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) و طیف سنجی الکترونی بررسی کنند. طیف‌سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس(XPS) و طیف‌سنجی از دست دادن انرژی الکترون بازتابی (REELS) نیز از روش‌هایی است که آنان برای بررسی خواص مواد فوق استفاده کردند [۴]. بیناب نگاری رامان بخشی جدایی ناپذیر از تحقیقات گرافن است. برای تعیین تعداد و جهت لایه‌ها، کیفیت و انواع لبه‌ها و اثرات اغتشاش‌ها مانند میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، کرنش، دوپینگ، اختلال و گروه‌های عملکردی از روش طیف سنجی رامان استفاده می‌شود [۵]. همچنین، همانطور که در ادامه بررسی خواهیم کرد، خواهیم دید که گرافن خواص نوری غیرخطی چشمگیری را از خود نشان می‌دهد. برای مثال در لیزرهای فوق سریع به عنوان جاذب های اشباع پذیر به کار برده می‌شود [۶]. برای بررسی خواص اپتیکی غیرخطی مواد از جمله گرافن از روش‌های مختلفی استفاده شده‌است [۷-۹]. در این مقاله رفتار اپتیکی غیر خطی اکسید گرافن با استفاده از روش مدولاسیون خودفازی فضایی SSPM مورد مطالعه قرارگرفته شد و ضرایب شکست غیرخطی (n_2) و پذیرفتاری الکتریکی مرتبه سوم غیرخطی χ^3 نمونه‌های حاوی اکسیدگرافن اندازه‌گیری شد.

روش آزمایشگاهی و تهیه نمونه

در این پژوهش محلول اکسیدگرافن کاهیده شده در حلال نرمال متیل پیرولیدون (NMP) به عنوان نمونه‌های آزمایشگاهی انتخاب و مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل(۱)، ۴ نمونه محلول آماده شده اکسیدگرافن در NMP را نشان می‌دهد. برای انجام آزمایش، از لیزر پیوسته Nd: YAG ۵۳۲ نانومتر با توان حداکثر ۱۲۰ میلی‌وات و مشاهده پدیده SSPM در آزمایشگاه استفاده شد. شکل (۲) چیدمان نوعی SSPM را نشان می‌دهد.

شکل۱: تصویر نمونه ها

در این آرایه، پرتو لیزر توسط یک عدسی همگرا به شعاع کانونی ۱۰ سانتی‌متر برای بررسی نمونه و تمرکز پرتو لیزر روی نمونه‌ها استفاده شد. با توجه به واگرایی پرتو لیزر، اندازه‌ی قطر کمره پرتو لیزر در کانون حدود ۳۰۰ میکرومتر



شکل۲: چیدمان آزمایشگاهی تکنیک SSPM

تخمین زده شده است. پس از عبور پرتو کانونی شده لیزر با محلول نمونه حاوی اکسیدگرافن، طرح‌های پراش به صورت حلقه‌های متحدالمرکز بر روی صفحه دور دیده شد که این طرح‌ها و تعداد حلقه‌ها به شدت نور فرودی وابسته خواهد بود. با توجه به غیریکنواخت بودن شدت گاوسی لیزر در راستای عرضی، بخش غیرخطی ضریب شکست نمونه شدت‌های گوناگون لیزری را تجربه می‌کند که منجر به تغییر فاز در نقاط مختلف جبهه موج فرودی می‌شود. از

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-25]

برهم‌نهی نقاط گوناگون، طرح‌های تداخلی پراش به وجود خواهد آمد که به صورت نواحی تاریک و روشن دیده می‌شوند. تغییر فاز ایجاد شده در جبهه موج طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۸]:

$$\Delta\varphi(r) = \frac{2\pi n_0}{\lambda}\int_0^{L_{eff}} \Delta n(r,z)dz \qquad (۱)$$

در این رابطه Δn تغییرات ضریب شکست در راستای عرضی است. در واقع، چنانچه تغییرات جبهه موج بر اثر تغییرات ضریب شکست، کمتر از π باشد، آنگاه رویداد خود-کانونی و خود-واکانونی پرتو غالب خواهد بود. از سوی دیگر اگر تغییرات فاز جبهه موج بیشتر از π باشد، محیط منجر به رویداد مدولاسیون خود-فازی فضایی (SSPM) و مشاهده نمایه حلقه‌های متحدالمرکز پرتو برهمکنش در میدان دور خواهد شد. زمانی که شدت پرتو از کم به زیاد افزایش پیدا می‌کند تعداد حلقه‌ها نیز از کم به زیاد تغییر می‌کند. این تغییر به صورت خطی انجام می‌شود که با شیب خط این تغییرات می‌توان ضریب شکست غیرخطی و پذیرفتاری الکتریکی مرتبه سوم غیرخطی ماده را محاسبه کرد. ضریب شکست غیرخطی ماده را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد [۸]:

$$n_۲ = \frac{\lambda}{۲\, n_۰ L_{eff}}\frac{N}{I} \qquad (۲)$$

که در اینجا λ طول موج لیزر، n_0 ضریب شکست خطی حلال NMP، N تعداد حلقه‌های پراش و I شدت نور فرودی به ماده مورد بررسی است. در این معادله L_{eff} طول موثر ماده اپتیکی در زمان برهمکنش نور لیزر با ماده است که از فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$L_{eff} = \int_{L_۱}^{L_۲} (۱ + \frac{z^۲}{z_۰^۲})^{-۱}\, dz \qquad (۳)$$

z فاصله ماده تا روزنه و z_0 طول ریلی است. پذیرفتاری الکتریکی مرتبه سوم غیرخطی نمونه با استفاده از کمیت $n_۲$ ماده و به صورت زیر محاسبه می‌شود (۸).

$$\chi^{(۳)} = \frac{c\lambda n_۰}{۲.۴ \times ۱۰^۴ \pi^۲ L_{eff}}\frac{dN}{dI} = \frac{n_۰^۲ c}{۱۲\pi^۲ \times ۱۰^۳}\, n_۲ \qquad (۴)$$

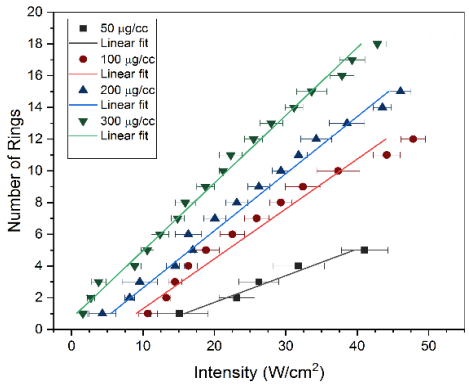
که c سرعت نور و λ طول موج لیزر است.

برای اندازه‌گیری توان پرتوها فرودی از توان‌سنج شرکت ThorLab و ثبت طرح‌های پراش حلقوی از دوربین دیجیتالی Canon استفاده شد.

نتایج و بحث

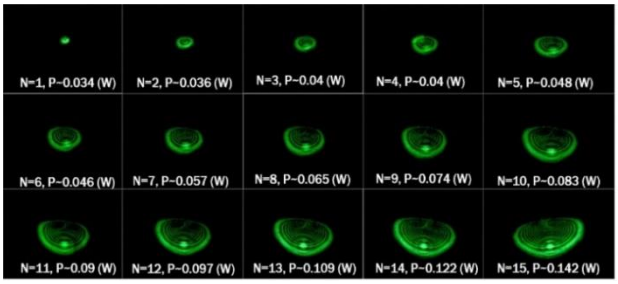
شکل (۳) و شکل (۴) به ترتیب گستره تغییر شدت توان متمرکز شده در نمونه اکسیدگرافن در حلال NMP را بر حسب تعداد حلقه‌های تشکیل شده، و نیز الگوی های مشاهده شده حلقه‌های متمرکز را در چهار غلظت نشان می‌دهند. همانگونه که دیده می‌شود با افزایش شدت پرتو از کم به زیاد، تعداد حلقه‌ها نیز افزایش می‌یابد. نکته‌ای که حائز اهمیت است، آن است که این تغییرات بصورت خطی رخ می‌دهد و با افزایش غلظت شیب خط افزایش می‌یابد.

می‌توان مشاهده کرد که با افزایش غلظت، توان آستانه‌ای که با استفاده از آن اولین حلقه پراش SSPM را مشاهده می‌کنیم نیز کاهش پیدا می‌کند. عدم تقارن مشاهده شده حلقه‌ها، ناشی از تغییرات حرارتی نمونه قسمت بالایی و



شکل۳: تغییرات تعداد حلقه ها بر حسب تغییر شدت توان برخوردی به محلول اکسیدگرافن کاهیده شده در غلظت‌های مختلف

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-25]



شکل ۴: طرح پراش SSPM در محلول(μg/cc) ۲۰۰ از اکسید گرافن در NMP

پایینی منطقه کانونی شده پرتو است. در جدول ۱ مقادیر ضریب شکست غیرخطی $n_۲$ و پذیرفتاری الکتریکی مرتبه سوم غیرخطی ماده $\chi^۳$ محاسبه شده برای نمونه‌های مختلف با غلظت‌های گوناگون گزارش شده است. در این مقاله نشان داده شده است که با افزایش تراکم اکسید گرافن‌کاهیده در حلال، رفتار اپتیکی غیر خطی ماده تغییر می‌یابد.

جدول ۱: مقادیر ضریب شکست غیرخطی و پذیرفتاری الکتریکی مرتبه سوم غیرخطی ماده

(μg/cc)	$n_۲$ $\times ۱۰^{-۷}$ $(cm^۲/W)$	$\chi^{(3)}$ $\times ۱۰^{-۱۱}$ (e.s.u)	$\chi^{(3)}$ $\times ۱۰^{-۳}$ (m^2/V^2)
۵۰	۳۰,۴± ۳,۳۰	۱۶,۷± ۱,۸۱	۱۱,۹± ۱,۲۹
۱۰۰	۵۶,۹± ۳,۳۵	۳۱,۲± ۱,۸۴	۲۲,۳± ۱,۳۱
۲۰۰	۶۵,۲± ۱,۹۴	۳۵,۷± ۱,۰۶	۲۵,۵± ۰,۷۶
۳۰۰	۷۷,۲± ۱,۵۳	۴۲,۳± ۸,۳۸	۳۰,۲± ۰,۶۰

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روش مدولاسیون خودفاز فضایی رفتار اپتیکی غیرخطی غلظت‌های متفاوت اکسید گرافن در حلال NMP بررسی شد. با استفاده از این روش ضرایب شکست غیرخطی و پذیرفتاری الکتریکی مرتبه سوم به ترتیب از مرتبه $۱۰^{-۷}$ cm^۲/w و $۱۰^{-۱۱}$ e.s.u اندازه‌گیری شد. می‌توان از این روش برای اندازه‌گیری سایر محیط‌های غیرخطی استفاده کرد.

مرجع‌ها

[۱] Partoens, B., & Peeters, F. M. (۲۰۰۶). From graphene to graphite: Electronic structure around the K point. *Physical Review B*, *74*(۷), ۰۷۵۴۰۴.

[۲] Nair, R. R., Blake, P., Grigorenko, A. N., Novoselov, K. S., Booth, T. J., Stauber, T., & Geim, A. K. (۲۰۰۸). Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science*, *320*(۵۸۸۱), ۱۳۰۸-۱۳۰۸.

[۳] Bolotin, K. I., Sikes, K. J., Jiang, Z., Klima, M., Fudenberg, G., Hone, J., & Stormer, H. L. (۲۰۰۸). Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. *Solid state communications*, *146*(۹-۱۰), ۳۵۱-۳۵۵.

[۴] Stobinski, L., Lesiak, B., Malolepszy, A., Mazurkiewicz, M., Mierzwa, B., Zemek, J., & Bieloshapka, I. (۲۰۱۴). Graphene oxide and reduced graphene oxide studied by the XRD, TEM and electron spectroscopy methods. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, *195*, ۱۴۵-۱۵۴.

[۵] Ferrari, A. C., & Basko, D. M. (۲۰۱۳). Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene. *Nature nanotechnology*, *8*(۴), ۲۳۵-۲۴۶.

[۶] Bao, Q., Zhang, H., Wang, Y., Ni, Z., Yan, Y., Shen, Z. X., & Tang, D. Y. (۲۰۰۹). Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers. *Advanced Functional Materials*, *19*(۱۹), ۳۰۷۷-۳۰۸۳.

[۷] Sheik-Bahae, M., Said, A. A., Wei, T. H., Hagan, D. J., & Van Stryland, E. W. (۱۹۹۰). Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam. *IEEE journal of quantum electronics*, *26*(۴), ۷۶۰-۷۶۹.

[۸] Shan, Y., Tang, J., Wu, L., Lu, S., Dai, X., & Xiang, Y. (۲۰۱۹). Spatial self-phase modulation and all-optical switching of graphene oxide dispersions. *Journal of Alloys and Compounds*, *771*, ۹۰۰-۹۰۴.

[۹] Wang, G., Zhang, S., Umran, F. A., Cheng, X., Dong, N., Coghlan, D., & Wang, J. (۲۰۱۴). Tunable effective nonlinear refractive index of graphene dispersions during the distortion of

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-25]