بیست و چهارمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و
دهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۱۰ الی ۱۲ بهمن ۹۶ – دانشگاه شهرکرد
24th Iranian Conference on Optics and Photonics (ICOP 2018) and
9th Iranian Conference on Photonics Engineering and Technology (ICPET 2018)
Jan 30 - Feb 1 , 2018 - Shahrekord University

مشخصه‌یابی گرافین بر روی زیرلایه کوارتز به روش طیف‌سنجی تراهرتز

علیرضا دولت‌آبادی[۱و۲]، مهدی باحقیقت[۲]، محمد کی[۳] و نصرتا... گرانپایه[۱*]

[۱]دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی-تهران، [۲]دانشگاه رجا-قزوین، [۳]دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

*نویسنده مسئول: granpayeh@kntu.ac.ir

چکیده–در این مقاله، نتایج حاصل از اندازه‌گیری پارامترهای مشخصه مختلف تک‌لایه گرافین بر زیرلایه کوارتز ارائه می‌شود. این نتایج بر اساس اندازه‌گیری به روش طیف سنجی تراهرتز به‌دست آمده‌اند. نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی به کمک برازش بر پارامترهای مدل درود برای رسانایی گرافین، به دست آمده‌اند.

کلید واژه- مشخصه‌یابی گرافین، طیف‌سنجی تراهرتز ، گرافین، مدل درود.

Characterization of Graphene over the Quartz Substrate Using Terahertz Spectroscopy

Alireza Dolatabady[1,2], Mahdi Bahaghighat[2], Mohammad Kei[3], and Nosrat Granpayeh[1*]

[1]K.N. Toosi University of Technology, [2]Raja University of Qazvin, 3Islamic Azad University Central Tehran Branch, [*]Corresponding Author

Abstract-In this paper the results of analysis of a graphene layer over the quartz substrate is investigated based on terahertz spectroscopy. The characteristic parameters are deduced by fitting the experimental data into the Drude model for graphene conductivity.

Keywords: Graphene characterization, Drude model, Graphene, Terahertz spectroscopy.

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

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

۱- مقدمه

گرافین، ساختاری تک لایه از اتم‌های کربن که در آرایشی شش ضلعی در کنار هم قرار گرفته‌اند، به عنوان نخستین ماده کشف شده دوبعدی به شمار می‌آید. با توجه به ویژگی‌های جالب و قابل توجه مکانیکی، شیمیایی، گرمایی، الکتریکی و نوری قابل تحقق توسط این ماده، توجه بسیاری از پژوهش‌گران به این ماده جلب شده است. تمرکز بسیار بالای میدان‌های در حال انتشار بر لایه گرافین، امکان ایجاد ادوات بسیار فشرده، در ابعادی کمتر از طول موج و حد پراش نور را فراهم نموده است [۳-۱].

برای مطالعه رفتار گرافین در مسائل مختلف الکترومغناطیس، از مدل رسانایی آن استفاده می‌شود. این مدل در فرکانس‌های تراهرتز، که طیف فرکانسی مورد نظر در این مطالعه است، به دو پارامتر انرژی شیمیایی و زمان استراحت حامل‌ها وابسته است [۴]. بنابراین برای مشخص بودن رسانایی گرافین، آگاهی از مقدار این پارامترها ضروری است.

پارامتر رسانایی، نشان‌دهنده میزان هدایت الکتریکی یک ماده است. یکی از روش‌ها برای مطالعه این ویژگی، روش بررسی چهار نقطه‌ای است که از اتصالات فلزی برای اندازه-گیری رسانایی بهره می‌برد [۵]. این روش، علاوه بر امکان تشکیل اتصال اهمی با ماده و بنابراین تغییر مقدار رسانایی، در کاربردهایی مثل تک‌لایه گرافین باعث آسیب به ماده شده و به عنوان یک راه‌کار غیرکاربردی در نظر گرفته می-شود. در این مقاله، به روش طیف‌سنجی تراهرتز، به مطالعه رفتار گرافین بر یک زیرلایه کوارتز و رسانایی الکتریکی آن پرداخته و با استفاده از برازش منحنی طیفی آن، دو پارامتر پتانسیل شیمیایی و زمان استراحت حامل‌های بار را استنتاج می‌نماییم.

ساختار مقاله به‌این صورت است که: در بخش دوم مبانی تحلیلی روش مطالعه ارائه می‌شود. در بخش سوم، چیدمان و نتایج آزمایش مطرح می‌شوند. در بخش چهارم نیز با بیان نتیجه‌گیری، مقاله خاتمه می‌یابد.

۲- مبانی تحلیلی روش مطالعه

برای معرفی گرافین در فرکانس‌های تراهرتز از مدل شبه درود به صورت زیر برای معرف رسانایی آن استفاده می‌شود [۶]:

$$\sigma_g = \frac{ie^2\mu_c}{\pi\hbar^2\left(\omega + i\tau^{-1}\right)} \qquad (۱)$$

که در آن e، $\hbar$ و ω، به ترتیب بار الکترون، ثابت پلانک کاهش یافته، و فرکانس زاویه‌ای هستند. τ و μ_c نیز به ترتیب زمان استراحت حامل‌های بار و پتانسیل شیمیایی هستند که باید برای هر لایه گرافین محاسبه شوند. برای محاسبه دو پارامتر τ و μ_c در این مقاله، از مطالعه میدان دور و روش طیف‌سنجی تراهرتز استفاده می‌کنیم. در ادامه این بخش، تئوری حاکم بر استنتاج پارامترهای زمان استراحت و پتانسیل شیمیایی به کمک این روش و نیز مبانی طیف‌سنجی تراهرتز معرفی می‌شوند.

۲-۱- تحلیل ساختار تک‌لایه شامل گرافین

اندازه‌گیری ویژگی‌های نوری مواد مانند عبور و بازتاب موج، ابزاری برای مطالعه ویژگی‌های الکترونیک آنها را فراهم می‌آورد. محیطی را در نظر بگیرید که در حالت کلی دارای تلفات است، و بنابراین دارای ضریب‌های گذردهی ($\tilde{\varepsilon}_r$)، شکست (n)، و رسانایی ($\tilde{\sigma}$) مختلط است. با درنظر گرفتن تابش یک موج صفحه‌ای به محیطی سه لایه مانند شکل ۱، ضریب عبور مختلط موج به صورت زیر تعریف می‌شود [۷]:

$$\tilde{T}(f) = \frac{1 + i\beta\sqrt{\tilde{\varepsilon}_r}}{1 + i\beta\dfrac{\left(1-\sqrt{\tilde{\varepsilon}_r}\right)\left(\sqrt{\tilde{\varepsilon}_r} - \sqrt{\tilde{\varepsilon}_{sub}}\right)}{1+\tilde{\varepsilon}_{sub}}} \qquad (۲)$$

که در آن β ثابت انتشار است. برای حالتی که لایه میانی، ماده‌ای دوبعدی با ضخامت بسیار ناچیز باشد، رابطه (۲) به-صورت زیر خواهد بود [۸]:

$$\tilde{T}(f) = \frac{n_{sub}+1}{n_{sub}+1+Z_0\tilde{\sigma}(f)} \qquad (۳)$$

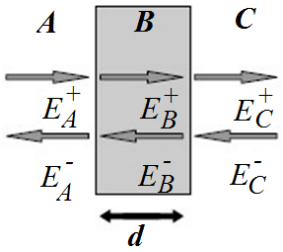
که در آن n_{sub}، ضریب شکست زیرلایه و Z_0، امپدانس فضای آزاد برابر با ۳۷۷ اهم است. با حل رابطه (۳)، مقدار رسانایی به عنوان تابعی از فرکانس به‌دست خواهد آمد:

$$\tilde{\sigma}(f) = \frac{\left(1-\tilde{T}\right)\left(n_{sub}+1\right)}{\tilde{T}Z_0} \qquad (۴)$$

در این مطالعات از زیرلایه بلور کوارتز (SiO_2) استفاده شده است که در فرکانس‌های تراهرتز فاقد پاشندگی است. بنابراین مقدار n_{sub} برابر با ۲/۱ است [۹].

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

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



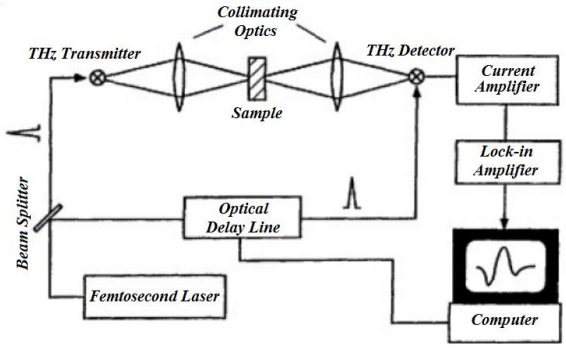
شکل ۱-محیطی سه‌لایه برای استنتاج رابطه عبور موج، ضمن تابش موج صفحه‌ای [۷].

۲-۲- طیف‌سنجی تراهرتز

طیف‌سنجی تراهرتز، روشی است که در آن ویژگی‌های دی‌الکتریک یک نمونه، در یک آرایش عبور موج، تعیین می‌شود. برای استخراج اطلاعات طیفی، اندازه‌گیری دو میزان عبور لازم است که برای زیرلایه عاری از گرافین (به عنوان نرخ عبور مرجع) و بار دیگر زیرلایه شامل گرافین، صورت می‌گیرد. شکل ۲، نمایی از چیدمان طیف‌سنجی تراهرتز را نشان می‌دهد. یک لیزر فمتوثانیه، قطار پالسی را تحویل می‌دهد که توسط یک مقسم پرتو، به دو بخش تبدیل می‌شود. استفاده از این مقسم پرتو، رابطه زمانی مشخصی بین آشکارسازی پمپ و پالس تولید شده ایجاد می‌کند. یکی از این پرتوها به سوی یک آنتن فوتوکانداکتیو هدایت می‌شود که پالس لیزر را به یک پالس تراهرتز تبدیل کرده و مانند یک امیتر عمل می‌کند. یک عدسی موازی‌کننده پالس تراهرتز را هدایت و بر نمونه متمرکز می‌کند. حامل‌های بار در نمونه با موج تراهرتز اندرکنش کرده و شکل آنرا تغییر می‌دهند. پالس تراهرتز عبوری، از میان عدسی دوم عبور کرده که آنرا بر گیرنده، که آنتن فوتوکانداکتیو دوم است، متمرکز می‌نماید. پرتو لیزر دوم از مقسم پرتو نیز، از یک خط تاخیر نوری عبور می‌کند. فاصله عبور این پرتو به‌گونه‌ای تنظیم شده و در نهایت این پرتو به سوی گیرنده هدایت می‌شود. از این پرتو لیزر به همراهی با آنتن فوتوکانداکتیو برای اندازه‌گیری پالس تراهرتز عبور یافته استفاده می‌شود. همچنین یک تقویت‌کننده جریان برای تقویت سیگنال دریافتی از آشکارساز، و نیز یک تقویت‌کننده قفل برای تمایز سیگنال دریافتی از نویز زمینه، به‌کار گرفته می‌شوند [۸].

۳- چیدمان آزمایش و نتایج آن

چیدمان آزمایش در شکل ۲ نشان داده می‌شود. تجهیزات به‌کاررفته، علاوه بر یک لیزر فیبری، دو آنتن فوتوکانداکتیو هستند که وظیفه آنها تولید و آشکارسازی تراهرتز است. مقسم پرتو، خط تاخیر نوری، تقویت‌کننده جریان، تقویت-کننده قفل، دو عدسی، و یک پردازنده برای ذخیره‌سازی و تحلیل نتایج، دیگر اجزای تشکیل دهنده چیدمان آزمایش بر میز اپتیکی به‌کاربرده شده هستند.



شکل ۲-نمایی شماتیک از چیدمان یک طیف‌سنج تراهرتز، که شرح عملکرد آن در متن داده شده است [۸].

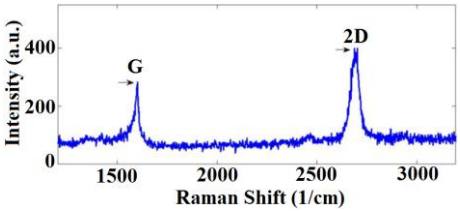
نمونه مورد بررسی، تک‌لایه گرافین تولید شده به روش لایه‌نشانی بخار شیمیایی، بر ورقه مسی است که سپس بر زیرلایه کوارتز منتقل شده است. برای اطمینان از اینکه ساختار تنها شامل یک لایه گرافین است، از روش طیف-سنجی رامان استفاده می‌شود. در این روش، پرتو لیزر به نمونه تابیده می‌شود و سپس موج پراکنده شده جمع‌آوری و شدت آن در طول‌موج تابش اندازه‌گیری می‌شود. شدت امواج پراکنده شده نسبت به شدت نور تابیده شده، اطلاعاتی راجع به ساختار نمونه فراهم می‌آورد. طیف رامان نمونه مورد بررسی در شکل ۳ نشان داده می‌شود که محور افقی، عدد موج نور تابیده را بر حسب cm^{-1} ($1=33.33\ cm^{-1}$ THz)، و محور عمودی شدت نور پراکنده شده را نشان می‌دهد. دو اوج مشخص، با نام‌های "G" و "2D" در شکل مشاهده می‌شوند که از ویژگی‌های یک تک‌لایه گرافین خالص و بدون نقص است [۱۰].

در شکل‌های ۴ و ۵، منحنی زمانی دامنه برای شکل‌موج میدان الکتریکی عبوری و نیز شدت طیف متناظر آن، به ترتیب برگرفته از آزمایش به روش طیف‌سنجی تراهرتز و اعمال تبدیل فوریه بر آن، نشان داده می‌شود. در این دو شکل، منحنی‌های قرمز رنگ برای ساختار زیرلایه تنها بدون لایه گرافین و منحنی‌های آبی برای ساختار شامل لایه گرافین است. منحنی‌های آبی رنگ نسبت به منحنی-های قرمز رنگ شدت کمتری را نشان می‌دهند که ناشی از تلفات لایه گرافین، و یا به عبارتی بخش موهومی ضریب

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

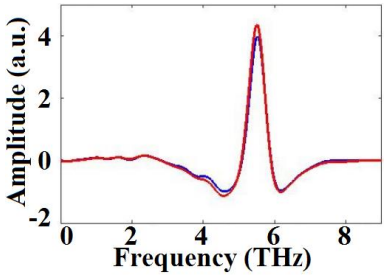
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

شکست آن است.

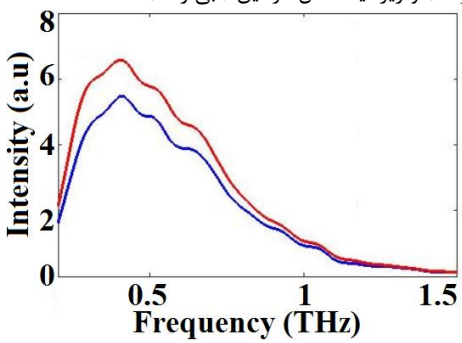


شکل ۳-طیف رامان ساختار مورد بررسی شامل تک‌لایه گرافین.

شکل ۶، طیف رسانایی به‌هنجار شده نسبت به $G_0=2e^2/h$ را نشان می‌دهد. منحنی آبی رنگ، نقاط داده اندازه‌گیری شده رسانایی را به کمک رابطه (۴) و منحنی قرمز، برازش این داده‌ها را به روش حداقل مربعات با مدل درود از رابطه (۱) نشان می‌دهد. ضریب عبور موج ($\tilde{T}$) از توان دوم نسبت دو شدت طیف آبی و قرمز رنگ شکل ۵ محاسبه شده است. مطابق این برازش، پارامترهای پیدا شده برای زمان استراحت و پتانسیل شیمیایی برابر با ۰/۱۵ پیکوثانیه و ۹۹ میلی الکترون ولت به‌دست می‌آیند.



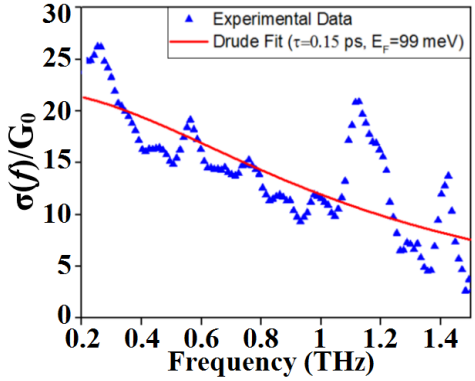
شکل ۴-شدت میدان زمانی پالس تراهرتز عبور یافته از زیرلایه تنها (قرمز رنگ) و زیرلایه شامل گرافین (آبی رنگ).



شکل ۵-طیف شدت موج عبور یافته از زیرلایه تنها (قرمز رنگ) و زیرلایه شامل گرافین (آبی رنگ).

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با به‌کار بردن روش طیف‌سنجی تراهرتز برای یک تک لایه گرافین بر زیرلایه کوارتز، به مطالعه پارامتر رسانایی آن برای استنتاج دو مشخصه مهم پتانسیل شیمیایی و زمان استراحت حامل‌های بار پرداخته شد. با برازش منحنی تجربی یافته شده بر مدل درود در بازه فرکانسی ۰/۲ تا ۱/۵ تراهرتز، مقادیر ۹۹ میلی‌الکترون-ولت و ۰/۱۵ پیکوثانیه برای دو مشخصه یادشده به‌دست آمد.



شکل ۶-طیف رسانایی به‌هنجار شده ساختار مورد بررسی، به کمک داده‌های حاصل از طیف‌سنجی تراهرتز و رابطه (۴) (آبی رنگ) و برازش آنها با روش حداقل مربعات بر مدل درود از رابطه (۱) (قرمز رنگ).

قدردانی

نویسنده اول از همکاران آزمایشگاه تراهرتز دانشگاه صنعتی آیندهُوِن هلند آقایان استان تِرهورن، نیلز فَن هوف، آلِکسی هالپین، و مدیر محترم گروه نانوفتونیک آقای کایمه گومِز ریواس برای بحث‌های سازنده در مورد نحوه استفاده از تجهیزات و همکاری در اندازه‌گیری‌ها قدردانی می‌نماید.

مرجع‌ها

[1] A. Dolatabady and N. Granpayeh, “Plasmonic magnetic sensor in graphene mounted on a magneto-optic grating,” IEEE Trans. Magnet. to be published, 2017.
[2] A. Dolatabady, S. Asgari, and N. Granpayeh, “Farinfrared nanoscale graphene based refractive index sensor,” IEEE Sens. J. Vol. 18, pp. 569-574, 2018.
[3] S. Asgari, A. Dolatabady and N. Granpayeh, “Tunable midinfrared wavelength selective structures based on resonator with antisymmetric parallel graphene pair,” Opt. Engin. Vol. 56, pp. 067102 (1-6), 2017.
[4] G.W. Hanson, “Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene,” J. Appl. Phys. Vol. 103, pp. 064302 (1-8), 2008.
[5] C.L. Petersen, T.M. Hansen, P. Boggild, A. Boisen, O. Hansen, T. Hassenkam, and F. Grey, “Scanning microscopic four-point conductivity probes,” Sens. Actuators A: Phys. Vol. 96, pp. 53-58, 2002.
[6] H.J. Li, L.L. Wang, B. Sun, Z.R. Huang, and X. Zhai, “Controlling mid-infrared surface plasmon polaritons in the parallel graphene air,” Appl. Phys. Express, Vol. 7, pp. 125101 (1-4), 2014.
[7] S.A. Furman and A.V. Tikhonravov, *Basics of Optics of Multilayer Systems*, Frontieres, 1996.
[8] M.C. Nuss and J. Orenstein, *Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids*, Springer, 1998.
[9] L. Gao, F. Lemarchand, and M. Lequime, “Exploitation of multiple incidences spectrometric measurements for thin film reverse engineering,” Opt. Express, Vol. 20, pp. 15734-15751, 2012.
[10] A.C. Ferrari and D.M. Basko, “Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene,” Nat. Nanotechnol. Vol. 8, pp. 235-246, 2013.

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

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