



۱۳۵۹

دانشگاه علوم دریایی امام خمینی
(ره) - نوشهر
دانشکده مهندسی الکترونیک و
مخابرات دریایی

چهارمین کنفرانس الکترومغناطیس

مهندسی ایران

(کام ۱۳۹۴)

اسفندماه ۱۳۹۴



گرافن و کاربردهای آن در صنایع آنتنی

حسین غلامعلی نژاد^{۱*}، علی غفورزاده یزدی^۲، مسعود موحدی^۳

^{۱،۲،۳} دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران

* gholamalinejad@stu.yazd.ac.ir

داده است. از آن جایی که هراتم کربن با سه کربن مجاور خودش پیوند تشکیل داده است، لذا یک الکترون از هراتم کربن، بدون پیوند باقی مانده است. علت اصلی ویژگی‌های متمایز کننده‌ی گرافن، وجود این تک الکترون غیر پیوندی است. اولین ساختار تک لایه‌ی گرافن توسط گیم و نووسلف در سال ۲۰۰۴ تهیه شد. اختراعی که شش سال بعد، نوبل فیزیک را به این دو دانشمند رسانید. اختراع گرافن موجب ایجاد تحولات شگرف در صنایع کاربردی، خصوصا صنایع الکترونیکی، صنایع مخابراتی سیمی و بدون سیم، الکترونیک نوری، صنایع فوتونیک و... شد. از جمله مشخصات اصلی این ماده می توان به رسانایی الکتریکی سطحی بسیار بالا و قابل تنظیم (۲۵۰ برابر سریع تر از سیلیکون در شرایط خلا)، استحکام مکانیکی بالا و قابل تنظیم (تا ۲۰۰ برابر مقاوم تر از فولاد)، انعطاف پذیری کشسانی بالا (تا ۱۲۰ برابر طول اولیه) اشاره کرد. رسانایی سطحی گرافن توسط رابطه‌ی کوپو محاسبه می‌شود. رابطه‌ی رسانایی گرافن به صورت زیر تعریف می‌شود [۱]:

$$\sigma_g = \sigma_{inter} + \sigma_{intra}$$

$$\sigma_{intra}(\omega) = \frac{2k_B T e^2}{\pi \hbar^2} \ln \left(2 \cosh \left(\frac{\mu_c}{2k_B T} \right) \right) \frac{i}{\omega + i\tau^{-1}}$$

چکیده: ساخت ادوات ساده‌تر، دارای کاربرد و کاربری آسان‌تر و هزینه بری کم‌تر، از دلایل اصلی رشد علوم و فنون است. در علم مخابرات، تلاش برای دستیابی به سیستم‌های با نویز کم‌تر، ابعاد کوچک‌تر، قابلیت انتقال امواج در فرکانس‌های بالا (باند تراهرتز)، قابلیت انتقال و پردازش سیگنال با کم‌ترین تغییرات ناخواسته روی آن، از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی برای پیشرفت و توسعه‌ی این شاخه‌ی علمی می‌باشد. گرافن، یکی از جدیدترین اختراعات بشر در حوزه‌ی مواد است که با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی جالب توجه خود، جایگاه ویژه‌ای برای تحقق اهداف فوق‌الذکر در علم مخابرات یافته است. در مقاله‌ی فرارو، بخشی از مهم‌ترین کاربردهای گرافن در صنایع آنتنی بیان شده است.

کلیدواژه: آنتن، گرافن.

۱- مقدمه

گرافن، یک لایه از اتم‌های کربن است که به صورت آرایش لانه زنبوری به هم متصل شده‌اند. در این آرایش، هر اتم کربن با سه کربن مجاور خودش پیوند تشکیل

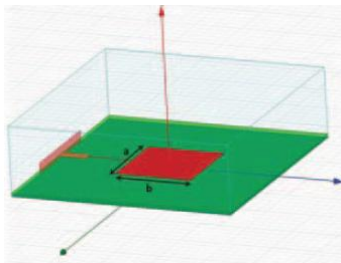
۳. استفاده از گرافن برای تنظیم فرکانسی (فلز زیر گرافن)

۴. استفاده از گرافن برای تنظیم جهت تابش آنتن

در ادامه به اختصار موارد فوق توضیح داده شده است.

أ. استفاده از گرافن به عنوان فلز تشعشی

در برخی از ساختارها، از گرافن به عنوان فلز تشعشی استفاده می‌کنند. ساده‌ترین نمونه‌ی آن در شکل ۱ مشاهده می‌شود [۳].



شکل ۱ تصویر آنتن گرافنی با فلز تشعشی گرافن [۳].

در این ساختار، فلز تشعشی، یک لایه گرافن می‌باشد که توسط یک خط انتقال ریزنواری فلزی تغذیه می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل این ساختار با نرم افزار HFSS در بازه فرکانسی ماکروویو برای سه مقدار مختلف ضریب پتانسیل شیمیایی بررسی شده‌است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، هرچه مقدار ضریب پتانسیل شیمیایی بیشتر باشد، فرکانس تشدید هم بیشتر خواهد بود. و هرچقدر این ضریب بیشتر باشد، راندمان تشعشی در فرکانس تشدید بیشتر خواهد بود. نمونه‌ی دیگری که می‌توان از آنتن‌های با فلز تشعشی گرافنی مثال زد، آنتن شکل ۳ است [۲] که یک آنتن تک قطبی می‌باشد.

$$\sigma_{\text{graphene}}(\omega) = \frac{e^2}{4\hbar} \left[H\left(\frac{\omega}{2}\right) + i \frac{4\omega}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{H(\epsilon) - H\left(\frac{\omega}{2}\right)}{\omega^2 - 4\epsilon^2} d\epsilon \right]$$

$$H(\epsilon) = \frac{\text{SINH}(\hbar\epsilon/k_B T)}{\text{COSH}(\mu_c/k_B T) + \text{COSH}(\hbar\epsilon/k_B T)}$$

$\omega = 2\pi f$ و f فرکانس کار

Γ : نرخ پراکندگی سطحی گرافن

ϵ : انرژی لحظه‌ای موجود در گرافن که به دلیل

اعمال میدان الکتریکی خارجی به وجود می‌آید

μ_c : ضریب پتانسیل شیمیایی

\hbar : ثابت پلانک

e : بار الکترون

\hbar : ثابت کاهش یافته‌ی پلانک

T : دمای محیط برحسب کلوین

k_B : ثابت بولتزمن

τ : زمان استراحت موج

همان‌طور که از رابطه‌ی فوق برداشت می‌شود، مقدار σ در گرافن به چهار پارامتر فرکانس، دما، ضریب پتانسیل شیمیایی و زمان استراحت بستگی دارد. برای تغییرپذیر کردن گرافن، مقدار μ_c تغییر داده می‌شود. تغییر مقدار μ_c نیز توسط تغییر مقدار ولتاژ تغذیه‌ی گرافن انجام می‌گیرد. این تغییرات از رابطه‌ی زیر تبعیت می‌کنند [۲].

$$E = \frac{2e}{\hbar v_F \epsilon_0} \int_0^{\infty} \epsilon (n_f(\epsilon) - n_f(\epsilon - 2\mu_c)) d\epsilon$$

۲- آنتن‌های گرافنی

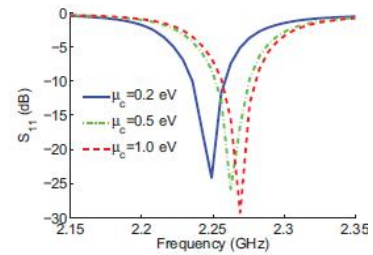
استفاده‌هایی که تاکنون از گرافن در صنایع آنتنی شده است را می‌توان در چند دسته‌ی زیر خلاصه کرد:

۱. استفاده از گرافن به عنوان پیچ تشعشی

۲. استفاده از گرافن برای تنظیم فرکانسی (فلز

روی گرافن)

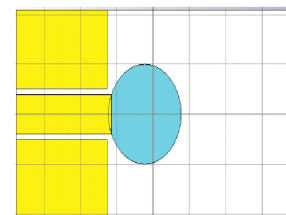
نتایج حاصل از شبیه سازی این ساختار با استفاده از نرم افزار CST به صورت شکل ۴ می باشد. همان طور که مشاهده می شود، فرکانس تشدید ۰.۳۵ تراهرتز می باشد. به دلیل عدم وجود صفحه ی زمین، تشعشع به صورت متقارن از دو طرف آنتن صورت می گیرد.



شکل ۲ در این تحلیل $a=b=41.08\text{mm}$ و ضریب گذردهی الکتریکی زیرلایه ۱.۵۲ می باشد و بازه ی فرکانسی مربوط به فرکانس های ماکروویو می باشد [۳].

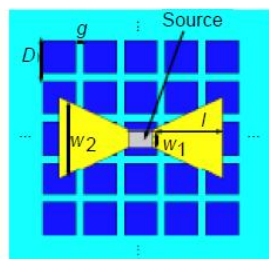
ب. استفاده از گرافن در ساختار آنتن برای تنظیم فرکانسی (فلز روی گرافن)

یکی از قابلیت های بسیار جالب آنتن های گرافنی، امکان تنظیم فرکانس تشدید، بدون تغییر ابعاد و اندازه های فیزیکی آنتن است. این کار با تغییر ولتاژ متصل به گرافن (اصطلاحاً ولتاژ گیت گرافن) انجام می شود. برای نمونه یک آنتن bowtie با فلز تشعشعی قرار گرفته روی صفحه ی گرافنی که در مرجع [۲] تحلیل شده است، در ادامه بررسی می شود. شکل با دید از مقابل و دید از بالای این آنتن در شکل ۵ مشاهده می شود.



شکل ۳ تصویر آنتن گرافنی تک قطبی پهن باند با فلز تشعشعی گرافن [۲].

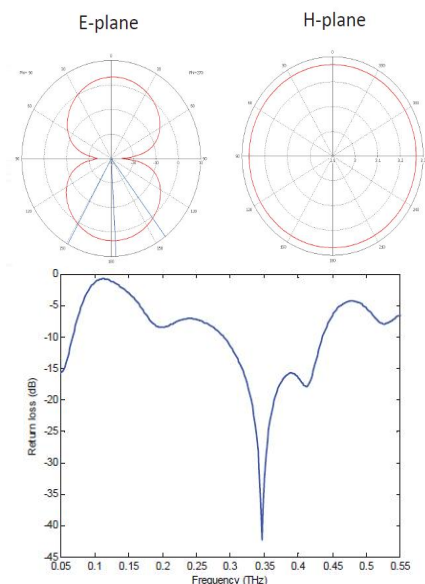
این آنتن از یک خط تغذیه طلا از نوع CPW و یک فلز تشعشعی گرافنی دایروی با شعاع ۱۰۰ میکرومتر و زیرلایه ی گالیوم آرسناید با ضخامت ۱۰ میکرومتر و ابعاد ۴۲۰ در ۷۵۳.۳ میکرومتر تشکیل شده است.



شکل ۴ تصویر آنتن گرافنی bowtie با فلز قرار گرفته روی صفحه ی گرافن [۲].

ج. استفاده از گرافن در ساختار آنتن برای تنظیم فرکانسی (فلز زیر گرافن)

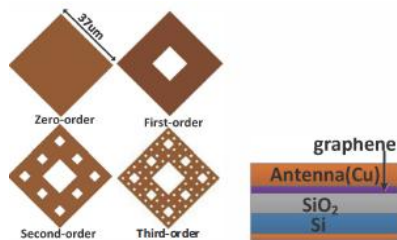
در برخی دیگر از ساختارها، از گرافن برای بهبود اوضاع تشعشعی آنتنی که قبلاً طراحی و ساخته شده است، استفاده می شود. در این نوع، از گرافن به عنوان روکش فلز تشعشعی فلزی استفاده می شود و با این کار پترن تشعشعی و راندمان بهبود می یابد. از این نوع



شکل ۴ نتایج تحلیل آنتن گرافنی تک قطبی پهن باند با فلز تشعشعی گرافن [۲].

نتیجه‌ی دیگری که می‌توان از شکل فوق برداشت کرد، این است که با افزایش تعداد لایه‌های گرافن، مقدار ضریب جذب نیز افزایش می‌یابد.

نوع دیگری از آنتن‌های گرافنی، آنتن‌هایی هستند که فلز تشعشعی روی یک لایه گرافن قرار گرفته است. برای مثال یک شکل شماتیک آنتن فرکتال که در باند تراهرتز کار می‌کند، در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸ شکل شماتیک و شکل صفحه‌ی تشعشعی یک آنتن فرکتال گرافنی [۵].

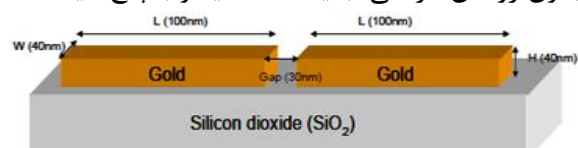
د. استفاده از گرافن برای تنظیم جهت تابش آنتن

روال کلی کار این آنتن‌ها به این صورت است که اعمال ولتاژ به طور عمود بر صفحه‌ی گرافن، موجب تغییر ضریب پتانسیل شیمیایی می‌شود و تغییر این ضریب، موجبات تغییر رسانندگی سطحی و در نتیجه، مقاومت سطحی گرافن را فراهم می‌آورد. با تغییر امپدانس سطحی گرافن، می‌توان خواص تشعشعی آن را تغییر داد و تنظیم کرد.

این نوع آنتن‌های گرافنی را می‌توان به دو دسته‌ی کلی تقسیم کرد. دسته‌ی اول آنتن‌های موج نشستی گرافنی است. جهت تشعشع روزه‌های این آنتن با تغییر ضریب پتانسیل شیمیایی گرافن تنظیم می‌شود. یکی از ساختارهای قابل پیاده‌سازی به صورت عملی که در مقاله‌ی [۶] معرفی شده است، در شکل ۹ نمایش داده شده است.

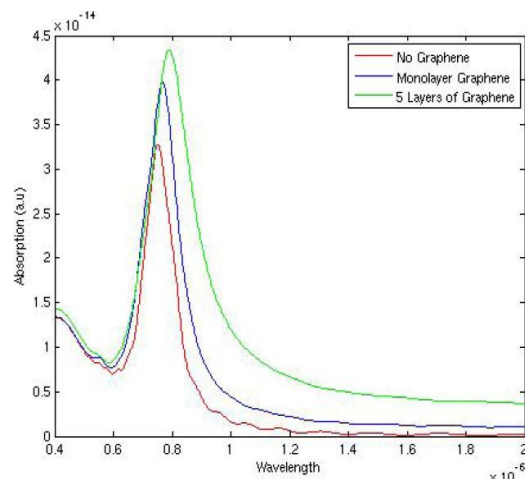
آنتن‌ها می‌توان به نانوآنتن‌های اپتیکال اشاره کرد. نانوآنتن‌های اپتیکال فرکانس تشدیدی در بازه فرکانسی امواج مرئی دارند و ابعادی بسیار کوچک (۱۰۰ تا ۲۰۰ نانومتر) دارا هستند. یکی از این نوع آنتن‌ها در مرجع [۴] بررسی شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نانوآنتن مورد بررسی از نوع دو قطبی می‌باشد که فلز تشعشعی از جنس طلا و زیرلایه‌ی از جنس سیلیکون دی‌اکسید دارد.

آنتن مورد بررسی در این مقاله، در سه حالت (بدون روکش گرافنی، با یک تک لایه و با پنج لایه



شکل ۶ تصویر آنتن دو قطبی پهن باند با فلز تشعشعی طلا [۴].

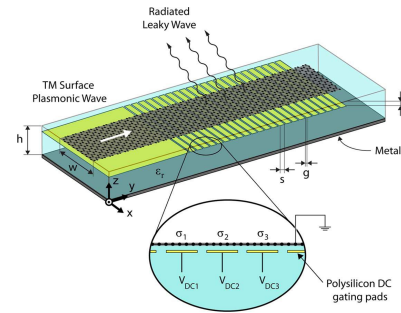
گرافن) بررسی شده است. در آنتن‌های اپتیکال، مقدار ضریب جذب^۱ در فرکانس تشدید اهمیت دارد. همان‌طور که از نتایج تحلیل مشاهده می‌شود، هرچه تعداد لایه‌های گرافن روی فلز تشعشعی، بیشتر شود، فرکانس تشدید کاهش خواهد یافت.



شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی آنتن دو قطبی پهن باند با فلز تشعشعی طلا بدون روکش گرافن، با یک لایه روکش و پنج لایه روکش گرافنی [۴].

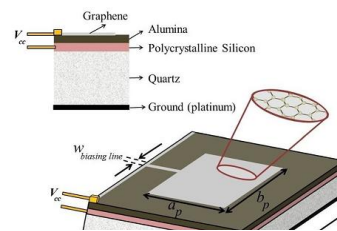
^۱.absorption factor

- [۱] I. Llatser, C. Kremersb, A. Cabellos-Aparicio, J. M. Jornetc, E. Alarcóna, and D. N. Chigrinb, "Graphene-based nano-patch antenna for terahertz radiation," *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, vol. 10, pp. ۳۰۸-۳۰۳, ۲۰۱۱.
- [۲] X. Wang, W. Zhao, J. Hu, and T. Zhang, "A novel tunable antenna at THz frequencies using Graphene-based artificial magnetic conductor(AMC)," *Electromagnetics Research Letters*, vol. 41, pp. 29-38, 2013.
- [۳] J. S. Gomez Diaz and J. Perruisseau-Carrier, "microwave to THz properties of graphene and potential antenna application," presented at the Antennas and propagation(ISAP),2012 International Symposium on, Nagoys, 2012.
- [۴] B. Mehta and M. Zaghoul, "Tuning Nano Antenna with Graphene," presented at the Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2013 IEEE 2013.
- [۵] Y. Xu, J. Hu, and W. Yin, "Design of a novel reconfigurable Sierpinski fractal graphene antenna operating at THz band," presented at the presented at the Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), Orlando, 2013.
- [۶] M. Esquius-Morote, J. S. Gomez-Diaz, and J. Perruisseau- Carrier, "Sinusoidally Modulated Graphene Leaky-Wave Antenna for Electronic Beams scanning at THz," *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on* pp-۱۱۶ . ۲۰۱۴, ۱۲۲.
- [۷] E. Carrasco, M. Tamagnone, and J. Perruisseau-Carrier, "Tunable graphene reflective cells for THz reflectarrays and generalized law of reflection," *Applied Physics Letters*, vol. 102, pp. 104103 - 104103-4, 2013.



شکل ۹ شمایی از یک آنتن موج نشتی ساخته شده با استفاده از گرافن [۶].

این ساختار از یک ورق گرافنی نهشته شده روی یک زیرلایه‌ی عایق و چند جوشن فلزی تغذیه DC مستقل که در فاصله‌های مکانی منظم و مشخص، زیرلایه و گرافن را محیط شده‌اند، تشکیل شده‌است. دسته‌ی دیگر، آنتن‌های آرایه بازتابی گرافنی می‌باشد. نمونه‌ای از این نوع آنتن‌ها در [۷] معرفی شده‌است. تصویر این آنتن در زیر نمایش داده شده‌است. اولین آنتن آرایه بازتابی گرافنی با بیم قابل تنظیم توسط کاراسکو و دیگران معرفی و طراحی شد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، مدل پیشنهادی توسط کاراسکو، یک ساختار چندلایه با یک لایه گرافن است و گرافن در نقش فلز تشعشعی عمل می‌کند.



شکل ۱۰ اولین نمونه‌ی همان آرایه بازتابی گرافنی [۷].

۳- نتیجه‌گیری

استفاده از گرافن توانسته‌است مشکلات طراحی مثل ابعاد کوچک، تنظیم فرکانسی و تنظیم جهت بیم را تا به راحتی و تنها توسط تغییر دادن مقدار ضریب پتانسیل شیمیایی تا حد زیادی کاهش دهد.