

پاسخ‌دهی سنسورهای نوری بر پایه گرافین-ابرسانا

بهناز افخمی عقدا^۱، علی مفتخرزاده^۲، مهدی حسینی^۳

Response of Graphene-Superconductor Based Optical Sensor

Behnaz Afkhami Aghda, Ali Moftakharzadeh, Mehdi Hosseini

Email:baaelec86@gmail.com

چکیده

در این مقاله پاسخ‌دهی سنسورهای ساخته شده از گرافین و ابرسانا در حالت بایاس ولتاژ محاسبه و سپس تاثیر پارامترهای گوناگون از جمله دما، میدان مغناطیسی و مقاومت بر این کمیت بررسی شده است. بدین منظور با حل همزمان معادلات انرژی آزاد و چگالی حاملین گرافین در دمای پایین، گرمای ویژه گرافین و رسانش حرارتی برهمکنش الکترون-فونون قطعه محاسبه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میدان مغناطیسی، میزان پاسخ‌دهی افزایش یافته و بعد از رسیدن به نقطه ماکزیمم تقریباً روند ثابتی را در پیش می‌گیرد، در حالی که با افزایش دما میزان پاسخ‌دهی قطعه کاهش می‌یابد. همچنین بررسی‌ها نشان داد در حالت بایاس ولتاژ، با افزایش مقاومت پاسخ‌دهی قطعه کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی

گرافین، سنسورهای نوری، مشخصه پاسخ‌دهی.

۱. مقدمه

گرافین تک لایه‌ای متشکل از اتم‌های کربن که در شبکه لانه زنبوری چیده شده‌اند، در سال ۲۰۰۴ توسط گروه گیم ساخته شد [1,2]. گرافین نازک‌ترین ماده‌ای است که بشر تاکنون به آن دست یافته است. این ماده با وجود این که ساختار متراکمی دارد، به علت ضخامت بسیار اندکش که برابر با ضخامت یک اتم کربن است، نور را از خود عبور می‌دهد و از شفافیت ۹۷/۳ درصد برخوردار است [3]. این ماده به علت داشتن خواص فوق العاده در رسانندگی الکتریکی و رسانندگی گرمایی، نسبت سطح به حجم بالا و مدول یانگ قابل مقایسه با الماس، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. گرافین به عنوان کاندیدای مناسب برای جایگزینی سیلیکون در ادوات نانوفوتونیک و نانوالکترونیک توجه گسترده‌ای را در تحقیقات بنیادی و کاربردی به خود جلب کرده است.

گرافین خواص فیزیکی بسیار جالبی از خود نشان می‌دهد: حامل‌های بار در آن شبیه ذرات نسبیتی بدون جرم رفتار می‌کنند و می‌توان آن‌ها را به وسیله معادله دیراک توصیف کرد [4]. به علاوه گرافین هم در دمای اتاق و هم با مقادیر زیاد ناخالصی موبیلیتی بالایی از خود نشان می‌دهد [5]. آخرین خصوصیت مطرح شده، نانو روبان‌های گرافینی (GNRs) را به عنوان بهترین کاندیدا برای ساخت ادوات الکترونیکی در آینده مطرح می‌سازد [2].

^۱ گروه مهندسی برق، پردیس علوم و تحقیقات یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

^۲ دانشگاه یزد، دانشکده برق و کامپیوتر

^۳ دانشگاه صنعتی شیراز، دانشکده فیزیک

گرافین ماده‌ای است که ترکیبی از خواص فلزات و نیمه هادی‌ها را دارد و از ویژگی‌های خاصی برخوردار است، که این خصوصیات منجر به کاربردهای فراوان این ماده شده است. برخی از کاربردهای گرافین عبارتند از: آشکارسازهای گاز تک مولکولی، ترانزیستورهای گرافینی، مدولاتورهای اپتیکی گرافینی و سنسور شیمیایی با قابلیت تشخیص بالا [6]. در سال‌های اخیر، علاقه زیادی برای مطالعه مجاورت گرافین با ابررساناها، نیمه رساناها و فرومغناطیس‌ها وجود داشته است. بیناگر برای اولین بار، رسانندگی اتصالات نرمال-ابررسانا را با پایه گرافین مورد مطالعه قرار داد و موضوع انعکاس آینه‌ای آندریف را در فصل مشترک اتصال بیان کرد [7]. پس از آن، مطالعه رسانندگی برای اتصالات مختلف ابررسانا، نرمال، عایق با پایه گرافین ادامه پیدا کرد.

ما در این مقاله، به بررسی تراشه‌های نوری ساخته شده از گرافین و ابررسانا می‌پردازیم. برای این کار ضمن محاسبه کمیت ترمودینامیکی قابلیت مغناطیسی و مغناطیس‌کنندگی گرافین در دمای پایین با استفاده از انرژی فرمی و انرژی آزاد، اثر میدان مغناطیسی و دما بر روی پاسخ ولتاژ سنسورهای ساخته شده از گرافین (مانند بالومتر) را محاسبه می‌نماییم.

۲. محاسبات

پاسخ ولتاژ برای یک سیستم متشکل از ابررسانا و گرافین از رابطه زیر بدست می‌آید [8]:

$$S_I(\omega, V) = \frac{\partial I / \partial T}{-i\omega C_V + 5\sum \nu T_e^4 + \frac{\partial p}{\partial T}} \quad (1)$$

که در آن:

$$\frac{\partial I}{\partial T} \approx \frac{0.49}{eR} \sqrt{\frac{k_B \Delta}{T_e}} \quad (2)$$

و پارامترهای $5\sum \nu T_e^4$ و $\frac{\partial p}{\partial T}$ به ترتیب بیانگر رسانش حرارتی برهمکنش الکترون فونون (G_{e-ph}) و رسانش حرارتی مرتبط با پیوند NIS (G_{NIS}) می‌باشند.

لازم به ذکر است در حالت تعادل دمای الکترون‌ها و فونون‌ها برابر خواهد بود ($T_e = T_{ph} = T$).
با در نظر گرفتن فرکانس‌های کم، پاسخ ولتاژ به صورت زیر قابل بیان است:

$$S_I(0, V) = \frac{\partial I / \partial T}{G_{e-ph} + G_{NIS}} \quad (3)$$

برای محاسبه پاسخ ولتاژ در سنسورهای ابررسانا-گرافین، در اولین مرحله لازم است رسانش حرارتی برهمکنش الکترون فونون در گرافین (G_{e-ph}) محاسبه گردد.

انرژی آزاد و انرژی فرمی برای یک گرافین شامل N لایه از حل همزمان دو معادله (۴) و (۵) بدست می‌آیند [9]:

$$n_0 = \frac{4B}{\phi_0} \sum_{n=1}^{\infty} g_n \left(1 + e^{\beta(\varepsilon_{n,N} - \varepsilon_F)}\right)^{-1} \quad (4)$$

$$f_N = n_0 \varepsilon_F - \frac{4B}{\beta \phi_0} \sum_{n=0}^{\infty} g_n \ln \left(1 + e^{\beta(\varepsilon_F - \varepsilon_{n,N})}\right) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{n,N} = \alpha^N B^{\frac{N}{2}} \sqrt{\frac{(n-1+N)!}{(n-1)!}}, \quad g_n = \begin{cases} \frac{N}{2} & n=0 \\ 1 & n>0 \end{cases}$$

که در آن ϕ_0 کوانتای شار، B میدان مغناطیسی، ε_F انرژی فرمی، $\beta = \frac{\gamma_1}{k_B T}$ که در آن $\gamma_1 = 0.4 \text{ eV}$ ، T دما، k_B ثابت بولتزمن و n_0 چگالی حاملین گرافین می‌باشند.
با در نظر گرفتن تقریب‌های زیر:

$$\begin{aligned} n > 0 &\Rightarrow T \ll T_F \Rightarrow \beta \gg 1 \\ &\Rightarrow \varepsilon_{n,N} - \varepsilon_F > 0 \Rightarrow e^{\beta(\varepsilon_{n,N} - \varepsilon_F)} \gg 1, \end{aligned} \quad (6)$$

معادلات (۴) و (۵) به صورت زیر قابل تقریب‌اند.

$$\begin{aligned} n_0 &= \frac{4B}{\phi_0} \sum_{n=1}^{\infty} g_n e^{-\beta(\varepsilon_{n,N} - \varepsilon_F)} \left(1 + e^{-\beta(\varepsilon_{n,N} - \varepsilon_F)}\right)^{-1} \\ &\Rightarrow n_0 \approx \frac{4B}{\phi_0} \sum_{n=1}^{\infty} g_n e^{-\beta(\varepsilon_{n,N} - \varepsilon_F)}. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} f_N &\approx n_0 \varepsilon_F - \frac{4B}{\beta \phi_0} g_0 \ln(1 + e^{\beta \varepsilon_F}) \\ &\quad - \frac{4B}{\beta \phi_0} \sum_{n=0}^{\infty} g_n e^{\beta(\varepsilon_F - \varepsilon_{n,N})}. \end{aligned} \quad (8)$$

با استفاده از روابط (۷)، (۸) و بکارگیری تقریب دمای پایین، روابط (۶)، انرژی آزاد (f_N) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned} f_N &\approx n_0 \varepsilon_F - (2B/\beta \phi_0) (\beta \varepsilon_F + e^{-\beta \varepsilon_F}) \\ &\quad - (2B/\beta \phi_0) \sum_{n=0}^{\infty} g_n e^{\beta(\varepsilon_F - \varepsilon_{n,N})}. \end{aligned} \quad (9)$$

با توجه به تک لایه بودن گرافین ($N=1$) و رابطه‌های (۴)، (۵) و (۸) انرژی آزاد به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$\begin{aligned} f_N &\approx - \left[(2B/\beta \phi_0) - n_0/\beta \right] \\ &\quad \times \left[\ln(4B/\beta \phi_0) - \beta \alpha \sqrt{B} + \exp\left(-[\sqrt{2}-1] \beta \alpha \sqrt{B}\right) \right] \\ &\quad - (8B^2/n_0 \beta \phi_0^2) \left(-\beta \alpha \sqrt{B} + \exp\left(-[\sqrt{2}-1] \beta \alpha \sqrt{B}\right) \right). \end{aligned} \quad (10)$$

با داشتن انرژی آزاد محاسبه رسانش حرارتی برهمکنش الکترون فونون امکان پذیر خواهد بود. برای محاسبه پارامترهای این رابطه می‌توان از فرمول‌های زیر کمک گرفت. در روابط زیر v ، l و V_m به ترتیب بیانگر سرعت اولیه فرمی، مسافت آزاد متوسط و حجم مولی خواهد بود.

$$C_V = -T \left(\frac{\partial^2 F}{\partial T^2} \right)_V, \quad G_{e-ph} = \frac{1}{3} v l \frac{C_V}{V_m}. \quad (11)$$



با به کار بردن $f_N = \frac{F}{\gamma_1} \rightarrow F = f_N \times \gamma_1$ ، گرمای ویژه ابررسانا-گرافین (Cv) و سپس رسانش حرارتی برهمکنش الکترون فونون (G_{e-ph}) محاسبه می‌گردد. همچنین برای ساده‌سازی از پارامتر $\mu = \frac{\gamma_1}{k_B T} \alpha \sqrt{B}$ استفاده شده است.

$$G_{e-ph} \approx \left(\left[\frac{1.373B^2}{n_0 \phi_0^2} + \frac{0.343B}{\phi_0} \right] \mu - 0.414n_0 \right) \times \frac{vl}{3} \frac{k_B \mu}{V_m} e^{-0.41\mu}. \quad (12)$$

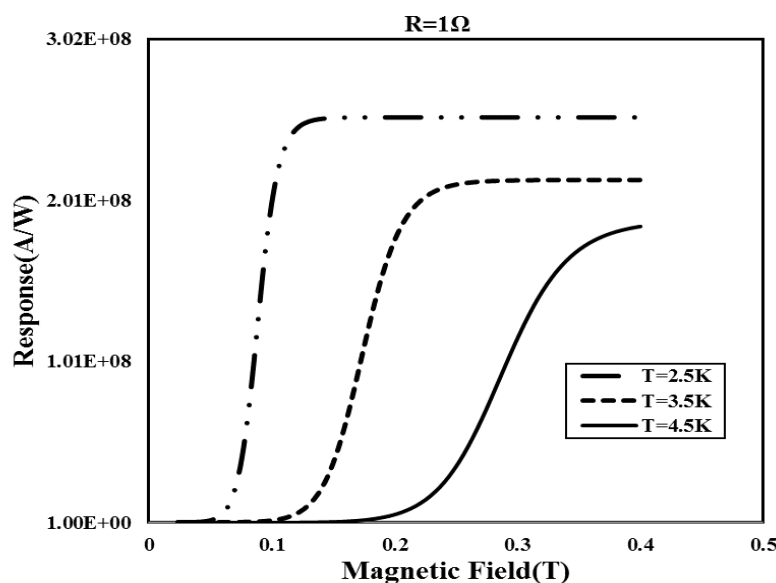
با محاسبه رسانش حرارتی برهمکنش الکترون فونون، محاسبه پاسخ سنسور در حالت بایاس ولتاژ امکان پذیر خواهد بود. بنابراین با در نظر گرفتن معادلات (۲)، (۳) و (۱۲) پاسخ ولتاژ قطعه برابر است با:

$$S_I(0, V) = \frac{\frac{0.49}{eR} \sqrt{\frac{k_B \Delta}{T}}}{\left(\left[\frac{1.373B^2}{n_0 \phi_0^2} + \frac{0.343B}{\phi_0} \right] \mu - 0.414n_0 \right) \frac{vl}{3} k_B \mu^{-0.41\mu} + G_{NIS}} \quad (13)$$

لازم به ذکر است پاسخ ولتاژ نهایی نسبت به پارامتر حجم مولی نرمالیزه شده است.

۳. نتایج و بحث

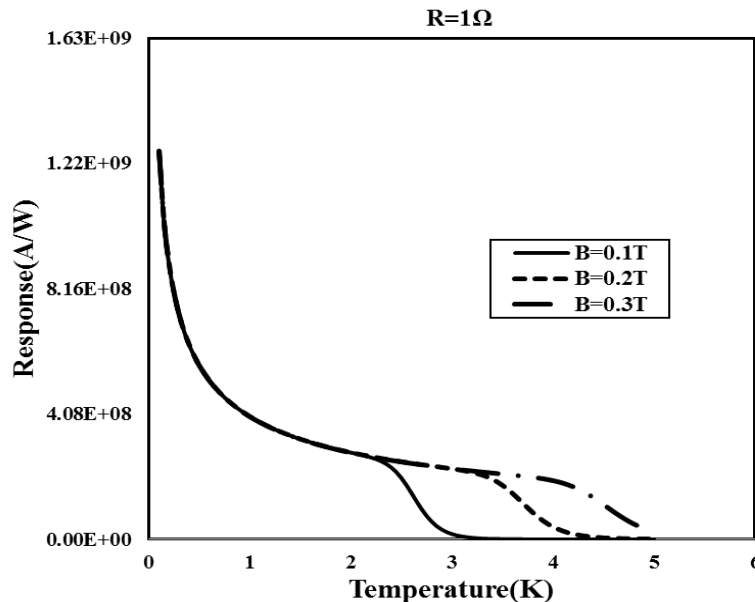
در شکل شماره ۱ نمودار پاسخ ولتاژ بر حسب میدان مغناطیسی در دماهای مختلف آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش میدان مغناطیسی، میزان پاسخ‌دهی افزایش یافته و بعد از رسیدن به نقطه ماکزیمم تقریباً روند ثابتی را در پیش گرفته و ثابت می‌شود. لازم به ذکر است این رفتار وابسته به دمای قطعه نیز می‌باشد؛ به طوری که با افزایش دما شیب و سرعت رسیدن پاسخ به نقطه ماکزیمم ملایم‌تر شده و در واقع در دماهای بالاتر نقطه ماکزیمم در میدان‌های مغناطیسی بزرگتری پدید می‌آید و به طبع آن نمودار در میدان‌های مغناطیسی بزرگتر ثابت می‌شود. نکته قابل توجه دیگر در این شکل این است که: در دماهای بالاتر، روند افزایشی پاسخ‌دهی از میدان‌های مغناطیسی بزرگتری شروع می‌شود به طوری که در دمای $T=3.5K$ نمودار از میدان $B=0.1T$ روند افزایشی به خود می‌گیرد در حالی که این نکته در دمای $4/5$ کلوین در میدان مغناطیسی بالاتر از $B=0.2T$ رخ می‌دهد.





شکل ۱: نمودار پاسخ‌دهی بر حسب میدان مغناطیسی در دماهای گوناگون. مقاومت و G_{NIS} به ترتیب برابر 1Ω و 1.5×10^{-13} در نظر گرفته شده است.

شکل شماره ۲ نمودار پاسخ‌دهی بر حسب دما در میدان‌های مغناطیسی گوناگون را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمودار پاسخ‌دهی بر حسب دما در میدان‌های مغناطیسی متفاوت. $R=1\Omega$ و $G_{NIS}=1.5 \times 10^{-13}$

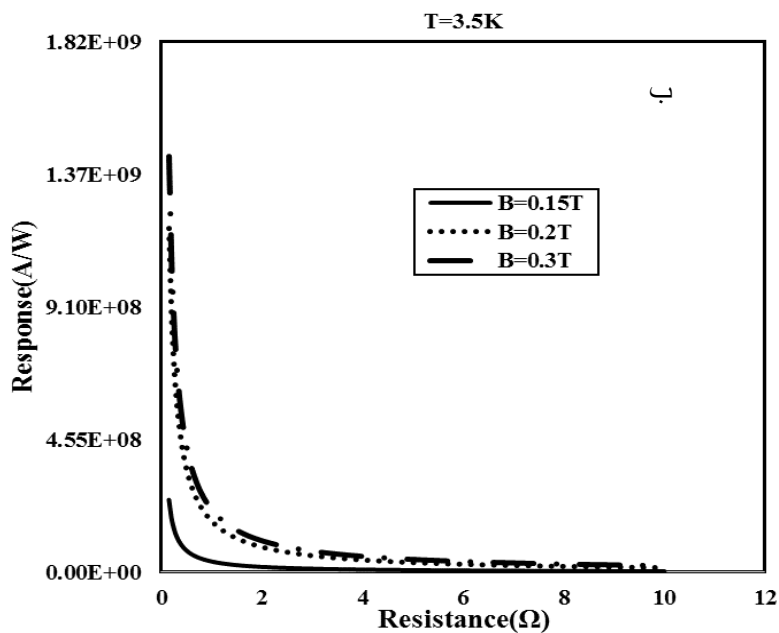
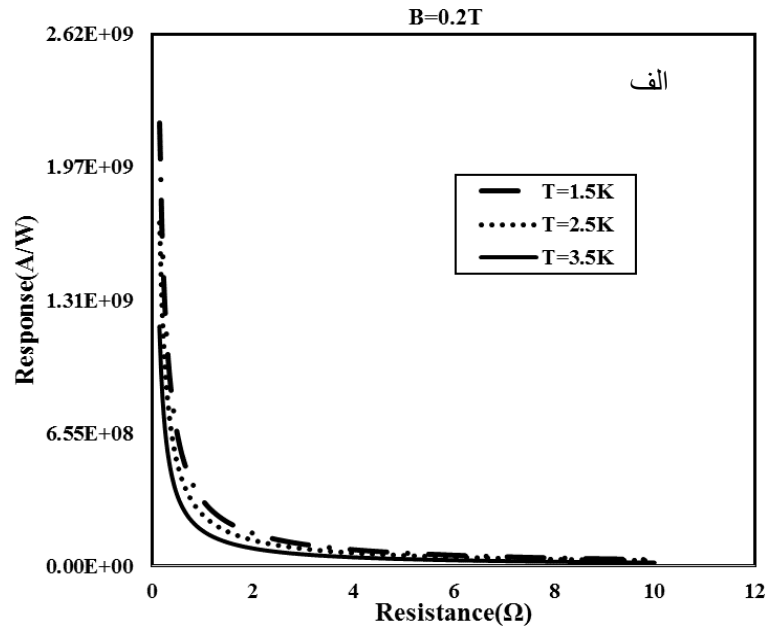
همانطور که از شکل شماره ۲ مشخص است به طور کلی با افزایش دما، میزان پاسخ‌دهی قطعه کاهش می‌یابد. اما چند نکته در این شکل حائز اهمیت است؛ اولاً تا دمای تقریبی $T=2K$ برای میدان‌های مغناطیسی گوناگون، نمودار رفتار مشابه‌ای را نشان می‌دهد بنابراین می‌توان گفت تا دمای تقریبی $2K$ پاسخ قطعه بر حسب دما به میدان مغناطیسی وابسته نیست و رفتاری مستقل از میدان را خواهد داشت. ثانیاً بعد از $T=2K$ ، با افزایش میدان مغناطیسی شیب و سرعت کاهش پاسخ‌دهی، ملایم شده و نمودارها در دماهای بالاتری به سمت ثابت شدن حرکت می‌کند. ثالثاً نمودارها بسته به میدان مغناطیسی مربوطه به سمت صفر میل می‌کنند که نقطه کاری مناسبی برای سنسور نمی‌باشد. یک نکته قابل تامل دیگر در این شکل، کاهش بسیار شدید پاسخ در دماهای زیر 1 کلوین می‌باشد.

شکل شماره ۳ تاثیر پارامتر مقاومت بر پاسخ‌دهی قطعه را مورد بررسی قرار داده است. بدین منظور نمودار پاسخ‌دهی بر حسب مقاومت در دماهای مختلف و میدان مغناطیسی ثابت (شکل ۳-الف) و نمودار پاسخ‌دهی بر حسب مقاومت در میدان‌های مغناطیسی گوناگون و دمای ثابت (شکل ۳-ب) ترسیم شده است.

شکل (۳-الف) نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت، میزان پاسخ‌دهی کاهش می‌یابد و این کاهش، در مقاومت‌های کمتر از 2 اهم بسیار شدید است. بعد از کاهش پاسخ‌دهی با شیب تند، سرعت کاهش میزان پاسخ متعادل شده و در نهایت به سمت ثابت شدن حرکت می‌کند. همچنین از این شکل مشخص است که با افزایش دما در یک میدان مغناطیسی ثابت، میزان پاسخ قطعه کاهش می‌یابد و شروع حرکت نمودار از پاسخ‌دهی کوچکتری خواهد بود.



شکل (۳-ب) نتیجه کلی شکل (۳-الف) را تایید نموده و نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت میزان پاسخ کاهش می‌یابد. همچنین نشان می‌دهد که با افزایش میدان مغناطیسی، میزان پاسخ‌دهی افزایش یافت و شروع حرکت نمودارها از پاسخ‌های بسیار بزرگ‌تری خواهد بود.



شکل ۳: بررسی تاثیر مقاومت بر میزان پاسخ‌دهی. در این راستا (الف) نمودار پاسخ‌دهی بر حسب مقاومت در دماهای مختلف و میدان مغناطیسی ثابت $B=0.2T$ و (ب) نمودار پاسخ‌دهی بر حسب مقاومت در میدان‌های مغناطیسی گوناگون و دمای ثابت $T=3.5K$ ترسیم شده است.



۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر پارامترهایی همچون میدان مغناطیسی، دما و مقاومت بر روی سنسورهای بر پایه اتصال ابررسانا و گرافین مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور کمیت‌های فیزیکی از جمله انرژی آزاد، انرژی درونی و رسانندگی حرارتی بر حسب دما و میدان مغناطیسی در دماهای پایین محاسبه، سپس به کمک این کمیت‌ها پاسخ تراشه در حالت بایاس ولتاژ محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میدان مغناطیسی، میزان پاسخ‌دهی افزایش یافته و بعد از رسیدن به نقطه ماکزیمم تقریباً روند ثابتی را در پیش می‌گیرد؛ لازم به ذکر است چگونگی این رفتار وابسته به دمای قطعه می‌باشد. همچنین نمودارها نشان دادند که با افزایش دما، میزان پاسخ‌دهی قطعه کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است تا دمای تقریبی $T=2K$ برای میدان‌های مغناطیسی گوناگون، نمودار رفتار مشابه‌ای را نشان دادند بنابراین می‌توان گفت تا دمای تقریبی $2K$ پاسخ قطعه بر حسب دما به میدان مغناطیسی وابسته نیست و رفتاری مستقل از میدان را خواهد داشت. در نهایت بررسی‌ها روی پارامتر مقاومت نشان داد که با افزایش مقاومت، میزان پاسخ‌دهی سنسور کاهش می‌یابد.

۵. منابع و مراجع

- [1] Geim, A. K., *Graphene: status and prospects*, science, No. 324, 2009, pp. 1530-1534.
- [2] Geim, A. K. and Novoselov, K. S., *The rise of graphene*, Nature Materials, No. 6, 2007, pp. 183-191.
- [3] Li, X. S., Zhu, Y. W., and Cai, W. W., *Transfer of large-area graphene films for high performance transparent conductive electrodes*, Nano Letters, No. 9 (12), 2009, pp. 4359-4363.
- [4] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S. V., Grigorieva, I. V., and Firsov, A. A., *Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films*, Science, No. 5696, 2004, pp. 666-669.
- [5] Schedin, F., Geim, A. K., Morozov, S. V., Hill, E. W., Blake, P., Katsonelson, M. I., and Novoselov, K. S., *Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene*, Nature Materials, No. 6, 2007, pp. 652-655.
- [6] Rahm, M., Li, J. S., and Padilla, W. J., *THz wave modulators: a brief review on different modulation techniques*, Journal of Infraredm Millimeter and Terahertz Waves, No. 34(1), 2013, pp. 1-27.
- [7] Beenaker, C. W. J., *Specular Andreev Reflection in Graphene*, Phys. Rev.Lett., No. 97, 2006, pp. 067007.
- [8] Golubev, D. and Kuzmin, L., *Nonequilibrium theory of a hot-electron bolometer with normal metal-insulatorsuperconductor tunnel junction*, Journal of Applied Physics, No. 11, 2001, pp. 6464-6472.
- [9] Duppen B. V. and Peeters. F. M., *Thermodynamic properties of the electron gas in multilayer graphene in the presence of a perpendicular magnetic field*, Physical Review B, No. 88(24), 2013, pp. 245429.