

2D o'lchamdagi grafin kvant sig'imining O 'YuCh maydon ta'sirida o'zgarishi

M.O. Kosimova

Namangan Muhandislik-Qurilish Instituti
e-mail: omamuraqosimova@gmail.com

B.A. Xusanboyev

Namangan muhandislik-qurilish instituti
e-mail: bahromxusanboyev2106@gmail.com

Abstrakt. Ushbu ishda 2D o'lchamdagi grafin kvant sig'imining o'ta yuqori chastotali maydon ta'sirida o'zgarishi aniqlandi. Grafen kabi ikki o'lchovli materiallarda sig'im faqat geometrik o'lcham bilan emas, balki energiya zichligi holatlari bilan ham aniqlanadi. O'YuCh maydoni zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini nazorat qiladi, bu esa energiya xolatlari zichligini o'zgartiradi. Grafenda energiya zichligi holatlari Dirak konusiga ega bo'lib, kimyoviy potensial Dirak nuqtasiga yaqin bo'lganda kvant sig'imi sezilarli darajada o'zgaradi. Grafen kvant sig'imining ortishi uni yuqori samarali energiya saqlash tizimlari, sezgir sensorlar, optoelektronik qurilmalar va kvant hisoblash texnologiyalarida amaliyotga joriy qilishga imkon yaratadi. Shu sabab, ushbu hodisani tadqiq qilish ilm-fanning zamonaviy muammolaridan biridir.

Kalit so'zlar: 2D grafen, kvant sig'imi, Dirak nuqta, Dirak konuslari, O'YuCh maydon

Изменение квантовой емкости декантера в 2D измерении под воздействием поля СВЧ

Аннотация: В данной работе было установлено, что квантовая емкость 2D графена изменяется под воздействием поля сверхвысокой частоты. В двумерных материалах, таких как графен, емкость определяется не только геометрическим размером, но и плотностью энергии состояний. Поле СВЧ управляет концентрацией носителей заряда, что изменяет плотность энергетических состояний. Графен имеет конус Дирака состояний плотности энергии, и квантовая емкость существенно меняется, когда химический потенциал приближается к точке Дирака. Увеличение квантовой емкости

графена позволяет реализовать его в высокоэффективных системах хранения энергии, чувствительных сенсорах, оптоэлектронных устройствах и технологиях квантовых вычислений. Поэтому изучение этого явления является одной из современных задач науки.

Ключевые слова: 2D-графен, квантовая емкость, точка Дирака, конусы Дирака, СВЧ поле.

Change in the quantum capacity of a decanter in 2D dimension under the influence of a microwave field

Abstract: In this work, it was found that the quantum capacitance of 2D graphene changes under the influence of a microwave field. In two-dimensional materials such as graphene, the capacitance is determined not only by the geometric size, but also by the density of states. The microwave field controls the concentration of charge carriers, which changes the density of energy states. Graphene has a Dirac cone of energy density states, and the quantum capacitance changes significantly when the chemical potential approaches the Dirac point. Increasing the quantum capacitance of graphene allows it to be implemented in highly efficient energy storage systems, sensitive sensors, optoelectronic devices and quantum computing technologies. Therefore, the study of this phenomenon is one of the modern problems of science.

Keywords: 2D graphene, quantum capacitance, Dirac point, Dirac cones, microwave field.

KIRISH

So'ngi yillarda 2D o'lchamdagi uglerod atomlaridan tuzilgan grafen, nanoelektronika sohasida katta qiziqish uyg'otib kelmoqda [1-3]. 2D materiallar - bu faqat bitta yoki bir nechta atomlardan iborat bo'lgan materiallardir. Ular juda qiziqarli hamda ilm-fan sohasida juda keng qo'llaniladi [4-5].

Grafenning kvant sig'imini aniq o'lchash uchun kvant sig'imiga mos keladigan katta oksid sig'imiga ega metall-oksid-yarimo'tkazgich (MOYa) strukturalari grafenda yaratilishi kerak. Biroq, buni tajribada amalga oshirish qiyin bo'lib qolmoqda. Adabiyotlarda grafenda kvant sig'imini kuzatgan va o'lchash

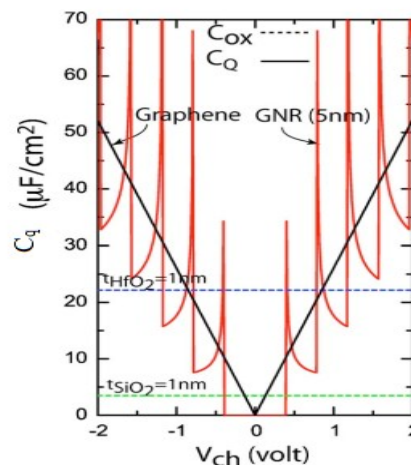
natijalari nazariyaga mos kelishini ko'rsatilgan [6-8]. Ammo, Dirak nuqtasi yaqinida nazariyadan og'ish barcha o'lchovlarda kuzatildi. Ushbu og'ish odatda zaryadlangan ifloslanishlar tomonidan hosil bo'lgan elektron-kovak juftlariga bog'liq deb hisoblanadi. [9] ishda o'ta yupqa Y_2O_3 kirish dielektrikidan foydalangan holda, grafen MOYA qurilmasining sig'imi o'lchandi va grafenning kvant sig'imi yuqori aniqlikda ajratildi. Dirak nuqtasi yaqinidagi xatti-harakatlarni tasvirlash uchun, elektron-kovak juftlari modeliga asoslangan umumiy mikroskopik sig'im modeli ishlab chiqilgan. [10] ishda grafen tranzistorlarining potentsial ishlashi haqidagi ko'plab tafsilotlar berilgan. [11] ishda grafenli ikki o'lchovli qatlamlar va nano o'lchovli qatlamlarda (sheets) tashuvchi statistikasi uchun fundamental natijalar olingan.

Nano o'lchamli qurilmalarni loyihalashda muhim miqdor kvant sig'imidir [12]. Grafen nanoqatlamlarida elektrostatik potentsial U_{ch} va elektronning zaryadi q

va kvant sig'im ta'rifidan $C_q = \frac{dq}{dU_{ch}}$ foydalanib, 2D o'lchamli grafen uchun

$$C_q = \frac{2q^2kT}{\pi(\hbar v_F)^2} \ln \left[2 \left(1 + \cosh \frac{qU_{ch}}{kT} \right) \right] \quad (1)$$

ifoda kelib chiqadi (1-rasm) [11].



1-rasm. 2D o'lchamli grafen kvant sig'imining elektrostatik potentsialga bog'liqligi [11].

Shularga qaramasdan yarimo'tkazgichli qurilma asosiy vositalari 2D o'lchamdagi grafen kvant sig'imining o'ta yuqori chastotali maydonga bog'liqligi, yetarli darajada o'rganilmagan.

TADQIQOT METODOLOGIYASI

O'ta yuqori chastotali maydon maydon ta'sirida elektron va kovaklarning qizishi asosiy va asosiy bo'lmagan zaryad tashuvchilarning injeksiya toklari $e^{-\frac{e\phi}{kT_e}}$,

$e^{-\frac{e\phi}{kT_h}}$ ko'rinishida harorat ortishi bilan ortib boradi, bundan tashqari, p-n o'tish potensial to'sig'i tashqi O'YuCh maydon ta'sirida davriy ravishda o'zgarib turadi.

Hosil bo'lgan injeksiya toklari $e^{-\frac{e(\phi_0 + U \cos \omega t)}{kT_e}}$, $e^{-\frac{e(\phi_0 - U \cos \omega t)}{kT_h}}$ ko'rinishni oladi. Bu yerda

$U_1 = \int \vec{E}_I dx$, p-n o'tishga tushayotgan elektromagnit to'liqinning p-n o'tish tekisligiga perpendikulyar tashkil etuvchisi. Bu esa o'z navbatida

$e^{\frac{eU_1}{kT_e}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{\frac{eU_1 \cos \omega t}{kT_e}} d\omega t$ o'rtacha tokni oshishiga sabab bo'ladi [13-15]. p-n o'tishli diodlarda qizish va to'g'rilanish natijasida rekombinatsiya toklari ortadi. O'YuCh to'liqin energiyasining bir qismi erkin elektron va kovaklar haroratini ortiradi.

Grafen kabi ikki o'lchovli materiallarda sig'im faqat geometrik o'lcham bilan emas, balki energiya zichligi holatlari bilan ham aniqlanadi. Kvant sig'imi quyidagi formula orqali ifodalanadi:

$$C_q = e^2 \frac{\partial n}{\partial \mu}$$

bu yerda e – elektronni zaryadi, n – zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi.

O'YuCh maydoni zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini nazorat qiladi, bu esa energiya xolatlari zichligini o'zgartiradi. Grafenda energiya holatlari zichligi Dirak konusiga ega bo'lib, kimyoviy potensial Dirak nuqtasiga yaqin bo'lganda kvant sig'imi sezilarli darajada o'zgaradi.

Ishning maqsadi, 2D o'lchamdagi grafen kvant sig'imining o'ta yuqori chastotali maydonga bog'liq holda o'zgarishini aniqlashdan iborat.

TAHLIL VA NATIJALAR

2D o'lchamdagi grafen kvant sig'imining O 'YuCh maydon ta'sirida o'zgarishi

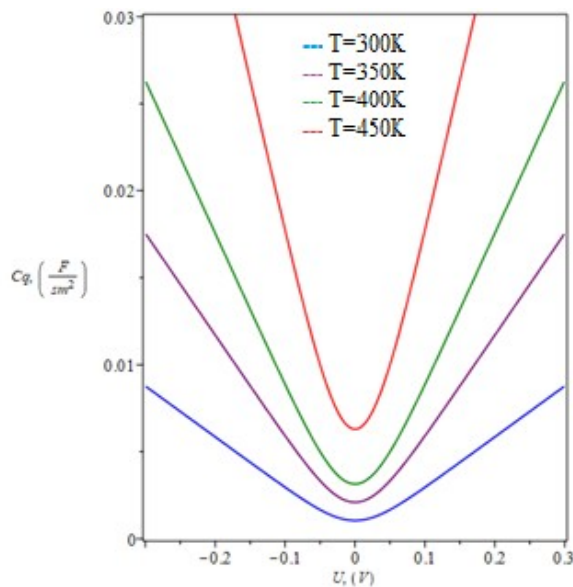
2D o'lchamli grafin kvant sig'imi (1) ifoda yordamida aniqlanadi. Ushbu ifodadan foydalanib, O'YuCh maydon, ya'ni $T_e, T_h > T$ bo'lganda 2D o'lchamli grafin kvant sig'imi formulasini keltirib chiqarish mumkin.

$$C_q = \frac{2q^2 k (T - T_{e,h})}{\pi (\hbar \vartheta_F)^2} \ln \left[2 \left(1 + \cosh \frac{qU_{ch}}{kT} \right) \right] \quad (2)$$

Bu yerda, q – elektronning zaryadi, k – Bolsman doimiysi, T – panjara harorati, $T_{e,h}$ – electron va kovaklar harorati bo'lib, ular O'YuCh maydon ta'sirida panjara haroratidan yuqori bo'ladi. $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ga teng bo'lib, $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $\vartheta_F = 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ - grafenda zaryad tashuvchilarning Fermi tezligi [11], U_{ch} – elektrostatik potensial.

2D o'lchamli grafen Dirak nuqtasi - grafenning elektron tuzilmasidagi fundamental xususiyat bo'lib, u elektronlarning energiya va impuls bog'lanishini aniqlovchi Dirak konuslarining uchrashgan nuqtasidir. Bu nuqtada elektronlarning energiyasi bo'ladi, ya'ni Fermi energiyasi Dirak nuqtasiga mos keladi. Elektronlar Dirak nuqtasida massasiz bo'lib, ular yorug'lik tezligiga o'xshash tezlikda harakat qiladi. Dirak nuqtasida grafen yarim metall kabi harakat qiladi. U yaxshi o'tkazgich bo'lib, uning o'tkazuvchanligi tashqi sharoitlarga kuchli bog'liq bo'ladi. O'YuCh maydon 2D o'lchamli grafin Dirak nuqtalarini o'zgartiradi. O'YuCh maydon grafinda elektronlarning energiya spektriga dinamik ta'sir ko'rsatadi. Yuqori chastotali elektromagnit maydon grafinda Floquet-Bloch modellarini hosil qiladi. Maydonning intensivligi va chastotasi yuqori bo'lsa, Dirak nuqtalarining energiya spektrida yangi energiya zonalar yoki bo'shliqlar hosil bo'lishi mumkin. Grafinda elektronlar uzun masofalarda to'qnashuvlarsiz harakatlanadi, bu esa an'anaviy yarimo'tkazgichlardan farqli, juda samarali p-n o'tish hosil qiladi. An'anaviy yarimo'tkazgichlardan farqli ravishda, grafin p-n o'tishlari katta shaffoflik ko'rsatadi, ya'ni elektronlar yuqori ehtimollik bilan p-n o'tishdan o'tadi. Bu 2D o'lchamli grafen kvant sig'imini ortishiga olib keladi.

(2) ifoda yordamida 2D o'lchamli grafin kvant sig'imining kuchlanishga bog'liqlik grafigini olish mumkin.



2-rasm. 2D o'lchamli grafen kvant sig'ining elektrostatik potensialga bog'liqligi

2 – rasmdan ko‘rinib turibdiki, O‘YuCh maydon ta’sirida 2D o‘lchamli grafen kvant sig‘imi ortib boradi. Agar elektromagnit maydon polarizatsiyasi aylanma bo'lsa, grafinda energiya spektrida topologik bo'shliq hosil bo'lishi mumkin. Bu hodisa yangi fizik xususiyatlarga olib keladi. Grafen kvant sig‘imi O‘YuCh maydoni ta'sirida nolinear o‘zgaradi. Sig‘imning minimal qiymati Dirak nuqtasida kuzatiladi. Zaryad tashuvchilarni kuchliroq konsentratsiyalash orqali sig‘imni sezilarli darajada oshirish mumkin.

XULOSA VA TAKLIFLAR

O‘YuCh maydon ta’sirida 2D o‘lchamli grafen kvant sig‘imi ortib boradi. Grafen yuqori darajada zaryad tashuvchilarni yig‘ish imkoniyatiga ega bo‘lgani uchun, uning kvant sig‘ining ortishi gazlar, biomolekulalar yoki boshqa kimyoviy moddalarni aniqlashda sensorlar sezgirligini ortiradi. Kvant sig‘ining ortishi grafenning energiyani samarali saqlash qobiliyatini ortiradi, chunki ko‘proq zaryad tashuvchilarni to‘plash va qayta bo‘shatish imkoniyati paydo bo‘ladi. Tez zaryadlanadigan va yuqori quvvat sig‘imli energiya saqlash qurilmalari ishlab chiqish imkonini beradi. Grafen kvant sig‘ining ortishi elektronlarning transport xususiyatlarini yaxshilaydi. Bu uni yuqori samarali tranzistorlar uchun ideal materialga aylantiradi. Grafen asosidagi tranzistorlar odatdagi kremniy tranzistorlariga qaraganda yuqoriroq tezlik va quvvat samaradorligini ta'minlaydi.

Grafen kvant sig'iminig ortishi fotonlarni (yorug'lik zarrachalari) samarali boshqarish va ulardan foydalanish imkonini beradi. Yuqori samarali quyosh panellari, shaffof displeylar va lazerlar yaratishda ishlatiladi.

Minnatdorchilik

Ish FZ-20200929243 - “Yarim o'tkazgichli quyosh fotoelementlar va nanostrukturalarning xarakteristikalariga kuchli elektromagnit maydonda qizigan elektron va fononlarning ta'siri” fundamental tadqiqot granti tomonidan moliyaviy qo'llab-quvvatlandi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Geim, A., Novoselov, K. The rise of graphene. *Nature Mater* **6**, 183–191 (2007). <https://doi.org/10.1038/nmat1849>
2. Novoselov, K., Geim, A., Morozov, S. *et al.* Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature* **438**, 197–200 (2005). <https://doi.org/10.1038/nature04233>
3. Han, M. Y., Özyilmaz, B., Zhang, Y., & Kim, P. (2007). Energy Band-Gap Engineering of Graphene Nanoribbons. *Physical Review Letters*, 98(20). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.206805>
4. Obradovic, B., Kotlyar, R., Heinz, F., Matagne, P., Rakshit, T., Giles, M. D., ... Nikonov, D. E. (2006). Analysis of graphene nanoribbons as a channel material for field-effect transistors. *Applied Physics Letters*, 88(14), 142102. <https://doi.org/10.1063/1.2191420>
5. Lemme, M.C., Echtermeyer, T. J., Baus, M., & Kurz, H. (2007). A Graphene Field-Effect Device. *IEEE Electron Device Letters*, 28(4), 282–284. <https://doi.org/10.1109/LED.2007.891668>
6. Chen, X., Wang, L., Li, W., Wang, Y., Wu, Z., Zhang, M., ... Wang, N. (2013). Electron-electron interactions in monolayer graphene quantum capacitors. *Nano Research*, 6(8), 619–626. <https://doi.org/10.1007/s12274-013-0338-2>
7. Giannazzo, F., Sonde, S., Huntzinger, JR. *et al.* Lateral uniformity of the transport properties of graphene/4H-SiC (0001) interface by nanoscale

- current measurements. *MRS Online Proceedings Library* **1205**, 3 (2009).
<https://doi.org/10.1557/PROC-1205-L03-02>
8. Dröscher, S., Roulleau, P., Molitor, F., Studerus, P., Stampfer, C., Ensslin, K., & Ihn, T. (2010). Quantum capacitance and density of states of graphene. *Applied Physics Letters*, 96(15), 152104.
(<https://doi.org/10.1063/1.3391670>)
 9. Huilong Xu, Zhiyong Zhang, Lian-Mao Peng Measurements and microscopic model of quantum capacitance in graphene. *Appl. Phys. Lett.* 98, 133122 (2011). <https://doi.org/10.1063/1.3574011>
 10. Schwierz, F. (2010). Graphene transistors. *Nature Nanotechnology*, 5(7), 487–496. <https://doi.org/10.1038/nnano.2010.89>
 11. Fang, T., Konar, A., Xing, H., & Jena, D. (2007). Carrier statistics and quantum capacitance of graphene sheets and ribbons. *Applied Physics Letters*, 91(9), 092109. <https://doi.org/10.1063/1.2776887>
 12. John, D. L., Castro, L. C., & Pulfrey, D. L. (2004). Quantum capacitance in nanoscale device modeling. *Journal of Applied Physics*, 96(9), 5180–5184.
<https://doi.org/10.1063/1.1803614>
 13. Gafur Gulyamov, Bahodir Shahobiddinov, Alisher Soliyev, Shoxruh Nazarov, Baxtiyor Mislidinov Change in the Fermi Quas Level and Current – Voltage Characteristics of Diodes with a p-n Junction under the Action of Light and Deformation // AIP Conference (Scopus). Accepted 10 december 2021 MIST-IV-1019. <https://conf.domnit.ru/ru/materialy/mist-aerospace-2021>.
 14. Gulyamov G. et al. Influence of deformation and light on the diffusion capacity and differential resistance of the pn junction of a strong electromagnetic field //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2023. – T. 2700. – №. 1.
 15. Gulyamov, G. (2023). THE INFLUENCE OF DEFORMATION AND LIGHT ON THE PNJUNCTION IV CHARACTERISTIC IN AN ELECTROMAGNETIC FIELD. *Eur. Chem. Bull*, 12, S3.