

УДК 537.9

## **Квазиклассический метод расчета плотности тока щелевых модификаций графена в присутствии статического и переменного электрических полей**

Глазов С.Ю., Мещерякова Н.Е., Подгорная И.А.

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный социально-педагогический  
университет»

*Аннотация:* В работе представлены результаты теоретического исследования и сравнительный анализ зависимостей плотности тока в щелевых модификациях графена (щелевом графене, одномерной и двумерной сверхрешетке на основе графена) от характеристик и ориентации приложенных статического и переменного квазиклассически сильных электрических полей.

*Ключевые слова:* щелевой графен, сверхрешетка на основе графена, плотность тока, кинетическое уравнение Больцмана, статическое электрическое поле, переменное электрическое поле, ряд Фурье.

В работе развивается квазиклассический подход для расчета плотности тока в щелевых модификациях графена в сильных электрических полях, при котором закон дисперсии носителей получен в результате квантовомеханического расчета, а вычисление электрического тока производилось с помощью классического кинетического уравнения. Для аналитических вычислений удобно использовать модельный энергетический спектр, с хорошей степенью точности аппроксимирующий «истинный» спектр. Для нахождения плотности тока неравновесная функция распределения носителей находится из решения классического уравнения Больцмана, интеграл столкновений в котором выбран в приближении постоянного времени релаксации. Скорость носителей заряда раскладывается в ряд Фурье. В зависимости от вида спектра щелевой модификации графена для численного расчета постоянной составляющей плотности тока удерживается определенное количество членов ряда для обеспечения заданной точности.

В рамках исследования были изучены следующие модификации графена: щелевой графен, одномерная и двумерная сверхрешетки на основе графена. Неаддитивность энергетического спектра графена приводит и к неаддитивности спектров структур, создаваемых на его основе. Эта особенность приводит к взаимной зависимости движений носителей заряда вдоль перпендикулярных друг другу направлений, появляется возможность управления плотностью тока графена электрическими полями, ориентированными перпендикулярно к изучаемому направлению протекания тока.

Отдельным особенностям проводимости рассматриваемых в данной работе структур было посвящено достаточно большое количество исследований, выполненных в рамках квазиклассического подхода [1-5]. Отметим, что в данных полупроводниковых структурах проявляются эффекты отрицательной дифференциальной проводимости, абсолютной отрицательной проводимости и самоиндуцированной прозрачности, которые хорошо известны в теории узкозонных полупроводниковых структур и квантовых полупроводниковых сверхрешеток [6]. Анизотропия структур и неаддитивность энергетического спектра, могут приводить к несовпадению направлений

векторов напряженности электрического поля и плотности электрического тока [7, 8].

Кратко сформулируем результаты проделанной работы.

В результате проведенного анализа выявлены сходства и отличия нелинейного отклика рассматриваемых щелевых модификаций графена на действие сильных электрических полей.

Выполнено сравнение зависимостей постоянной составляющей плотности тока в изученных щелевых модификациях графена от параметров поперечно ориентированных электрических полей. Определены соотношения между параметрами приложенных полей, при которых наблюдается существенное различие между возможными значениями плотности тока, и, соответственно, управление проводимостью наиболее эффективно.

Изучена зависимость угла отклонения вектора плотности тока от направления вектора напряженности постоянного электрического поля, когда исследуемый образец находится под совместным действием постоянного и переменного электрических полей. Показано, что векторы напряженности постоянного электрического поля и плотности тока в двумерной структуре совпадают при ориентации поля вдоль характерных кристаллографических направлений, а для квадратных графеновых сверхрешеток также в сильных полях еще в двух направлениях, симметричных относительно биссекторного. Если на структуру дополнительно действует переменное поле, приложенное вдоль высокосимметричных направлений, то векторы плотности тока и напряженности постоянного электрического поля совпадают. В противном случае переменное электрическое поле существенно влияет на ориентацию вектора плотности тока. Это связано с неодинаковым разогревом носителей заряда из разных долин в сильных электрических полях и особенностями энергетического спектра.

## Литература

1. Завьялов Д. В., Конченков В. И., Крючков С. В. Выпрямление поперечного тока в сверхрешетке на основе графена // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46, вып. 1. С. 113-120.
2. Глазов С. Ю., Мещерякова Н. Е. Генерация высших гармоник в сверхрешетке на основе графена в присутствии постоянного электрического поля // Наносистемы: физика, химия, математика. 2012. Т. 3, № 1. С. 64-70.
3. Глазов С. Ю. Управление проводимостью графена поперечными статическим и переменным электрическими полями // Известия РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83, № 1. С. 19-23.
4. Глазов С. Ю., Мещерякова Н. Е., Подгорная И. А. Управление проводимостью двумерной графеновой сверхрешетки поперечными электрическими полями // Известия РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87, № 1. С. 34-37.
5. Глазов С. Ю., Подгорная И. А. Особенности проводимости двумерной графеновой сверхрешетки в квазиклассически сильных внешних электрических полях с учетом ионизации примеси // Журнал радиоэлектроники. 2025. № 1.
6. Басс Ф. Г., Булгаков А. А., Тетервов А. П. Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками. Москва: Наука, 1989. 288 с.

7. Романов Ю. А., Демидов Е. В. Нелинейная проводимость и вольт-амперные характеристики двумерных полупроводниковых сверхрешеток // Физика и техника полупроводников. 1997. Т. 31, вып. 3. С. 308-310.
8. Орлов М. Л., Орлов Л. К. Особенности транспорта электронов в двумерных квантовых сверхрешетках с неассоциативным законом дисперсии // Физика и техника полупроводников. 2021. Т. 55, вып. 3. С. 241-250.

MSC 42B05

## A quasiclassical method for calculating the current density of gap modifications of graphene in the presence of static and alternating electric fields

S.Yu. Glazov, N.E. Mescheryakova, I.A. Podgornaya  
Volgograd State Socio-Pedagogical University

*Abstract:* The paper presents the results of a theoretical study and a comparative analysis of the dependences of the current density in gap modifications of graphene (gap graphene, one-dimensional and two-dimensional superlattice based on graphene) on the characteristics and orientation of the applied static and alternating quasiclassical strong electric fields.

*Keywords:* gap graphene, graphene superlattice, current density, Boltzmann kinetic equation, static electric field, alternating electric field, Fourier series.

### References

1. Zavyalov D. V., Konchenkov V. I., Kryuchkov S. V. Vyryamlenie poperechnogo toka v sverkhresetke na osnove grafena [Rectification of transverse current in graphene-based superlattice] // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2012. Vol. 46, iss. 1. P. 113-120. (in Russian)
2. Glazov S. Yu., Meshcheryakova N. E. Generatsiya vysshikh garmonik v sverkhresetke na osnove grafena v prisutstvii postoyannogo elektricheskogo polya [Generation of higher harmonics in graphene-based superlattice in the presence of constant electric field] // Nanosistemy: fizika, khimiya, matematika. 2012. Vol. 3, no. 1. P. 64-70. (in Russian)
3. Glazov S. Yu. Upravlenie provodimostyu grafena poperechnymi staticheskimi i peremennymi elektricheskimi polyami [Control of graphene conductivity by transverse static and alternating electric fields] // Izvestiya RAN. Ser. fiz. 2019. Vol. 83, no. 1. P. 19-23. (in Russian)
4. Glazov S. Yu., Meshcheryakova N. E., Podgornaya I. A. Upravlenie provodimostyu dvumernoy grafetovoy sverkhresetki poperechnymi elektricheskimi polyami [Control of conductivity of two-dimensional graphene superlattice by transverse electric fields] // Izvestiya RAN. Ser. fiz. 2023. Vol. 87, no. 1. P. 34-37. (in Russian)
5. Glazov S. Yu., Podgornaya I. A. Osobennosti provodimosti dvumernoy grafetovoy sverkhresetki v kvaziklassicheski silnykh vneshnikh elektricheskikh polyakh s uchetom ionizatsii primesi [Features of conductivity of two-dimensional graphene superlattice in quasi-classically strong external electric fields taking into account impurity ionization] // Zhurnal radioelektroniki. 2025. No. 1. (in Russian)
6. Bass F. G., Bulgakov A. A., Teterov A. P. Vysokochastotnye svoystva poluprovodnikov so sverkhresetkami [High-frequency properties of semiconductors with superlattices]. Moscow: Nauka, 1989. 288 p. (in Russian)

7. Romanov Yu. A., Demidov E. V. Nelineynaya provodimost i volt-ampernye kharakteristiki dvumernykh poluprovodnikovykh sverkhresetok [Nonlinear conductivity and current-voltage characteristics of two-dimensional semiconductor superlattices] // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 1997. Vol. 31, iss. 3. P. 308-310. (in Russian)
8. Orlov M. L., Orlov L. K. Osobennosti transporta elektronov v dvumernykh kvantovykh sverkhresetkakh s neassotsiativnym zakonom dispersii [Features of electron transport in two-dimensional quantum superlattices with non-associative dispersion law] // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2021. Vol. 55, iss. 3. P. 241-250. (in Russian)