

На правах рукописи

Свинцов Дмитрий Александрович

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ
ГРАФЕНА И ЕГО МОДИФИКАЦИЙ

05.27.01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро-
и нано- электроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва-2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технологическом институте Российской академии наук (ФТИАН РАН).

Научный руководитель:

Кандидат физико-математических наук Вьюрков Владимир Владимирович

Официальные оппоненты:

Лейман Владимир Георгиевич, доктор физико-математических наук, Московский физико-технический институт, профессор кафедры общей физики;

Федирко Валерий Алексеевич, доктор физико-математических наук, Московский государственный технологический университет СТАНКИН, профессор кафедры прикладной математики.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН)

Защита состоится 26 сентября 2012 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 002.204.02 при Физико-технологическом институте Российской академии наук по адресу: г. Москва, Нахимовский проспект д. 36 к. 1, 6 этаж, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технологического института РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2012 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.204.02
кандидат физико-математических наук



Вьюрков В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Графен – двумерная модификация углерода – привлекает внимание исследователей благодаря своим необычным электрофизическим свойствам с момента выхода пионерской статьи Новоселова, Гейма и Морозова [1]. Помимо фундаментального интереса, связанного с «релятивистским» поведением носителей заряда, графен перспективен как материал для приборов нано-, оптоэлектроники и плазмоники.

При обсуждении достоинств приборов на основе графена в литературе повсеместно упоминаются

- Высокая подвижность электронов (предельное значение в подвешенных образцах при $T = 240$ К составляет $120\,000\text{ см}^2/\text{В с}$ [2,3]);
- Возможность эффективного управления электрическими и оптическими свойствами с помощью внешнего напряжения. Эффективность в данном случае обусловлена низкой плотностью электронных состояний, происходящей из линейности спектра.

Основным препятствием к применению графена в логических схемах является отсутствие запрещенной зоны, приводящее к невысокому (порядка 100) отношению токов открытого и закрытого состояний в полевых транзисторах на его основе (не считая туннельных транзисторов [4]). Поэтому к настоящему времени наноэлектронным приборам на основе графена и его модификаций отводится ниша в высокочастотных аналоговых, плазмонных и оптоэлектронных устройствах [5].

Для выявления перспективных возможностей приборов на основе графена повсеместно применяется математическое моделирование в силу технологической сложности изготовления реальных образцов. Известно множество публикаций, посвященных теоретическому описанию кинетических явлений в графене, причем язык описания варьируется от элементарного (например, описание транзисторов на основе графена по полной аналогии с кремниевыми [6]) до чрезвычайно сложного (вычисление минимальной проводимости с привлечением понятия «дрожащего движения» (*zitterbewegung*)). Замечено, что в работах, посвященных моделированию транзисторов на графене, зачастую игнорируются важные результаты, полученные в работах по вычислению проводимости. В результате модели приборов «обрастают» большим количеством нефизических подгоночных параметров.

Важно, что в большинстве работ, описывающих кинетические явления в графене, игнорируется факт сильного кулоновского взаимодействия между носителями заряда. Данный факт значительно сказывается на транспортных явлениях, для описания которых становится применимой гидродинамическая модель, разработанная в данной работе. Гидродинамика электрон - дырочной плазмы в графене имеет значительные отличия от таковой для классических жидкостей в силу ее двухкомпонентности и линейности энергетического спектра частиц.

Гидродинамическая модель успешно описывает наблюдаемые вольтамперные характеристики полевых транзисторов на основе графена без привлечения нефизических параметров и может быть использована для дальнейшей оптимизации конструкций приборов. Особый интерес представляет вопрос о возможности получения высокой надпороговой крутизны характеристики транзистора, важной для применений в аналоговых схемах. Также в рамках модели может быть исследована проблема создания инверсной заселенности в транзисторах на графене, которая имеет первостепенное значение для создания инжекционных лазеров.

В рамках гидродинамической модели возможно описание плазменных колебаний в двумерном электронном газе графена. Данные колебания могут найти применение в приборах для детектирования и генерации электромагнитного излучения различных диапазонов, в том числе терагерцового и инфракрасного [7]. В отличие от предыдущих теорий распространения плазмонов [8,9], гидродинамическая модель позволяет строго рассмотреть вопрос о затухании волн и выявить условия, при которых данное затухание минимально. В работе показано, что плазменные волны в нейтральном графене сильно подавлены электрон - дырочными столкновениями, вместо них основным типом колебаний является электрон - дырочный звук. Подавление плазменных волн может существенно снизить темп рекомбинации фотовозбужденных носителей [10], что является положительным аспектом для создания лазеров на основе графена.

Модификации графена, обладающие запрещенной зоной, могут рассматриваться как перспективные материалы и для цифровой, и для аналоговой электроники. При этом межэлектронное рассеяние в них не так сильно, как в однослойном графене, что позволяет применять баллистические модели для описания короткоканальных приборов. Особого внимания среди модификаций заслуживает двухслойный графен, обладающий довольно экзотическим электронным спектром:

непрямозонным, изотропным, имеющим участок с отрицательной эффективной массой вблизи дна зоны [11]. Эти особенности находят отражение в характеристиках баллистических полевых транзисторов, исследованию которых посвящена отдельная глава работы.

Цель диссертационной работы

Целью данной работы является построение теорий электронного транспорта в однослойном и двухслойном графене, моделирование и анализ характеристик нанoeлектронных приборов на основе данных материалов.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- Построить теорию электронного транспорта в однослойном графене, учитывающую сильное взаимодействие между носителями заряда;
- Проверить корректность данной теории путем сравнения рассчитанных и экспериментально измеренных зависимостей проводимости графена от концентрации носителей заряда;
- Используя основные уравнения развитой теории, промоделировать стоковые и затворные характеристики полевых транзисторов на основе графена;
- Используя развитую теорию, рассчитать спектры коллективных возбуждений в электрон - дырочной плазме графена с учетом затухания;
- Построить баллистическую теорию электронного транспорта в полевых транзисторах на основе двухслойного графена, учитывающую особенности электронного спектра;
- Выявить влияние особенностей электронного спектра двухслойного графена на характеристики транзисторов на его основе.

Научная новизна и достоверность работы

Научная новизна работы состоит в следующих результатах, которые были получены впервые:

- Разработана гидродинамическая модель проводимости графена, учитывающая сильное межчастичное взаимодействие, характерное для данного материала. Экспериментальная зависимость сопротивления графена от напряжения на управляющем электроде объяснена в рамках предложенной модели. Показано, что максимальное сопротивление графена обусловлено сильным электрон – дырочным рассеянием и слабо зависит от температуры. Резкий спад сопротивления по обе стороны от максимума обусловлен эффектом увлечения неосновных носителей заряда основными;

- В рамках гидродинамической модели получены характеристики полевых транзисторов на основе графена. Показано, что квази-плато на стоковой характеристике транзистора является результатом появления нейтральной области с сильным электрон-дырочным рассеянием в канале транзистора;

- Рассчитаны спектры и затухание коллективных возбуждений в электрон - дырочной плазме графена. Показано, что в нейтральной биполярной плазме распространение заряженных плазменных волн сильно подавлено электрон - дырочным рассеянием. В данных условиях слабо затухающим типом колебаний является нейтральный электрон - дырочный звук, скорость которого практически не зависит от концентрации носителей заряда;

- Построена баллистическая модель полевого транзистора на основе двухслойного графена, учитывающая особенности электронного спектра. Показано, что проводимость канала как функция напряжения на затворе при нулевой температуре испытывает скачок, что ранее наблюдалось только для одномерных систем. Следствием этого скачка является рекордно высокая крутизна надпороговой характеристики данного транзистора при комнатной температуре.

Достоверность результатов обеспечивается применением фундаментальных физических теорий и сравнением результатов моделирования с экспериментальными данными.

Положения, выносимые на защиту

- Гидродинамическая модель транспорта носителей заряда, разработанная в диссертации, объясняет основные особенности вольтамперных характеристик полевых транзисторов на основе графена, такие как узкий пик на зависимости сопротивления канала от напряжения на затворе и квази-плато на стоковой характеристике. Данные эффекты обусловлены сильным электрон - дырочным рассеянием и увлечением неосновных носителей заряда основными.

- Зависимость проводимости канала баллистического полевого транзистора на двухслойном графене от напряжения на затворе испытывает скачок при нулевой температуре. Наличие данного скачка приводит к рекордно высокой надпороговой крутизне транзистора при комнатной температуре.

- Доминирующим типом коллективных возбуждений в нейтральной биполярной плазме графена являются электрон - дырочные звуковые волны. Распространение заряженных плазменных волн в данных условиях сильно подавлено электрон - дырочным рассеянием;

Практическая значимость работы

Результаты работы позволяют рассчитывать и оптимизировать характеристики приборов на основе графена и его модификаций. Разработанные модели нашли применение в программном комплексе, разрабатываемом по заказу Министерства образования и науки РФ.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях:

- 2nd international symposium on graphene devices ISGD-2010, Sendai, Japan;
- X российская конференция по физике полупроводников, Нижний Новгород, 2011;
- Rusnanoforum-2011, Москва;
- Japan-Russia-USA symposium on modeling of graphene terahertz, nano-mechanical and acousto-optical devices, Aizu-Wakamatsu, Japan, 2012.

Публикации

Основные результаты работы представлены в 4 публикациях, две из которых опубликованы в рецензируемых международных журналах (Journal of Applied Physics, Japanese Journal of Applied Physics), включенных в библиографическую базу Web of Science. Две другие статьи опубликованы в журнале «Вестник МГТУ им. Баумана, Серия «Приборостроение», входящем в список журналов и изданий, утвержденный Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации. Одна публикация по тематике принята в печать в журнал «Физика и техника полупроводников».

Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Общая постановка задачи осуществлялась научным руководителем автора Вьюрковым В.В.. Модели транспорта носителей заряда, представленные в работе, разработаны автором совместно с научным

руководителем. Компьютерное моделирование приборов и анализ полученных характеристик выполнены лично автором.

Непосредственное участие коллег автора в проведенных исследованиях отражено в виде их соавторства в опубликованных работах. Результаты, выносимые на защиту и составляющие научную новизну работы, получены автором лично.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из 4 глав, заключения и приложения. Каждая из глав завершается разделом «Выводы», в котором резюмируются полученные результаты. Общие выводы по работе приведены в заключении.

Содержание диссертации изложено на 98 страницах. Рукопись содержит 25 рисунков. Список литературы содержит 70 ссылок на цитируемые источники. Кроме того, приведен список из 4 публикаций автора по тематике диссертации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 проведен анализ существующих моделей электронного транспорта в однослойном и двухслойном графене.

Рассмотрены различные модели для вычисления проводимости: метод температурных функций Грина [12], решения кинетического уравнения с рассмотрением различных типов рассеяния [13].

Проанализированы работы, в которых производится вычисление минимальной проводимости графена с учетом электрон - электронного рассеяния [14].

Рассмотрены модели полевых транзисторов на основе однослойного и двухслойного графена и выявлено, что большинство работ по транспорту в однослойном графене игнорируют факт сильного межчастичного взаимодействия, сохраняющегося даже при энергии Ферми вдали от дираковской точки. Также показано, что существующие модели транспорта в двухслойном графене не учитывают особенностей электронного спектра, которые могут повлиять на характеристики полевых транзисторов в баллистическом режиме, особенно при низких температурах.

В главе 2 производится вывод уравнений гидродинамики двухкомпонентной электрон - дырочной плазмы графена с сильным взаимодействием между компонентами.

Высокая частота межчастичных столкновений в графене (оценочно $v_{ee} = 5 \times 10^{13}$ Гц) по сравнению с частотой столкновений носителей заряда с фононами и дефектами решетки приводит к установлению локально-равновесных функций распределения электронов и дырок:

$$f_e(\mathbf{p}) = \left[1 + \exp\left(\frac{pv_F - \mathbf{p}\mathbf{V}_e - \mu_e}{T_e}\right) \right]^{-1}, f_h(\mathbf{p}) = \left[1 + \exp\left(\frac{pv_F - \mathbf{p}\mathbf{V}_h + \mu_h}{T_h}\right) \right]^{-1}, \quad (1.1)$$

где $v_F = 10^6$ м/с – скорость Ферми, а неизвестные значения химических потенциалов μ_e, μ_h , дрейфовых скоростей $\mathbf{V}_e, \mathbf{V}_h$ и температур T_e, T_h электронов и дырок определяются из системы уравнений гидродинамики. Вывод этих уравнений производится из кинетического уравнения Больцмана для безмассовых фермионов по процедуре, аналогичной методу Чепмена-Энскога.

Уравнения непрерывности для безмассовых носителей по форме совпадают с таковыми для классических частиц:

$$\frac{\partial \Sigma_e}{\partial t} + \frac{\partial(\Sigma_e \mathbf{V}_e)}{\partial \mathbf{r}} = -R, \quad \frac{\partial \Sigma_h}{\partial t} + \frac{\partial(\Sigma_h \mathbf{V}_h)}{\partial \mathbf{r}} = -R, \quad (1.2)$$

где $\Sigma_e(\mu_e)$ и $\Sigma_h(\mu_h)$ – концентрации электронов и дырок, а R – темп рекомбинации, приводящий к выравниванию уровней химических потенциалов носителей.

Особенности электронного спектра носителей графена в полной мере проявляются в уравнениях Эйлера для электронов и дырок:

$$\frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\langle p_e \rangle \mathbf{V}_e}{v_F} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \frac{v_F \langle p_e \rangle}{2} - e \Sigma_e \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{r}} = -\beta_e \mathbf{V}_e - \beta_{eh} (\mathbf{V}_e - \mathbf{V}_h), \quad (1.3)$$

$$\frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\langle p_h \rangle \mathbf{V}_h}{v_F} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \frac{v_F \langle p_h \rangle}{2} + e \Sigma_h \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{r}} = -\beta_h \mathbf{V}_h - \beta_{eh} (\mathbf{V}_h - \mathbf{V}_e). \quad (1.4)$$

в которых $\langle p_e \rangle$ и $\langle p_h \rangle$ – средний модуль импульса электронов и дырок, рассчитанный на единицу площади, φ – электрический потенциал, коэффициенты β_e и β_h описывают взаимодействие носителей со внешними рассеивателями (фононами и примесями), а коэффициент β_{eh} отвечает за сильное взаимодействие между двумя типами носителей заряда.

Уравнения Эйлера могут быть записаны в привычной для классической гидродинамики форме с помощью введения фиктивной плотности электронов и дырок $\rho_{e,h} = 3\langle p_{e,h} \rangle / 2v_F$, которая зависит от концентрации носителей и не может быть вынесена за знак дифференцирования. Масса носителей, соответствующая этой плотности $M_{e,h} = \rho_{e,h} / \Sigma_{e,h}$, составляет 0,024 массы свободного электрона для нейтрального графена.

Диссипативные слагаемые в правой части уравнения Эйлера получены с помощью линеаризации интегралов столкновений по дрейфовым скоростям частиц, при этом «коэффициенты трения» β_e и β_h зависят от механизма рассеяния и концентрации носителей. Особого внимания заслуживает «трение» между электронной и дырочной компонентами, описываемое слагаемым $\beta_{eh}(\mathbf{V}_e - \mathbf{V}_h)$. Электрон - дырочное рассеяние для нейтрального графена является доминирующим, что выражается условием $\beta_{eh} \gg \beta_e, \beta_{eh} \gg \beta_h$. При высоком уровне химического потенциала μ (при большом напряжении на затворе) коэффициент трения спадает экспоненциально $\beta_{eh} \sim e^{-\mu/T}$ в силу малости концентрации неосновных носителей.

В рамках уравнений гидродинамики удастся вычислить зависимость статической проводимости листа графена G от концентраций носителей, для чего используются стационарные уравнения Эйлера в предположении отсутствии градиента температуры и химического потенциала:

$$G = \frac{e^2(\Sigma_e - \Sigma_h)^2}{\beta_e + \beta_h + \beta_e\beta_h / \beta_{eh}} + \frac{e^2(\Sigma_e^2\beta_h + \Sigma_h^2\beta_e)}{\beta_{eh}(\beta_e + \beta_h) + \beta_e\beta_h} \quad (1.5)$$

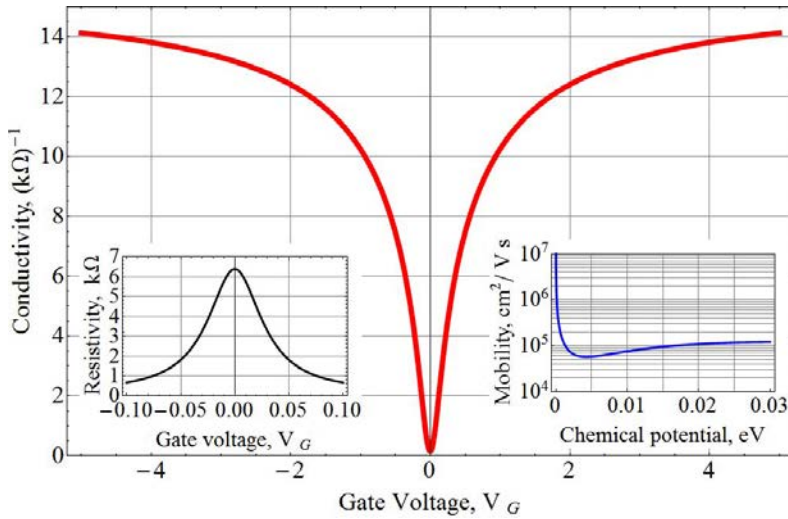


Рис. 1. Рассчитанная зависимость проводимости графенового слоя от напряжения на затворе. На вставках: слева – зависимость удельного сопротивления листа графена от напряжения на затворе, справа – зависимость подвижности носителей от уровня химпотенциала (предполагаемого единым для электронов и дырок)

Рассчитанные зависимости проводимости от напряжения на затворе по формуле (1.5) приведены на рис. 1, там же на вставках представлены зависимость удельного сопротивления в окрестности точки минимальной проводимости и зависимость подвижности от уровня химического потенциала.

В ранних работах минимум проводимости

нейтрального графена был ассоциирован с минимальностью концентрации носителей заряда в точке нейтральности. Мы утверждаем, что данный эффект обостряется наличием сильного электрон-дырочного рассеяния, что приводит к более узкому пику на зависимости $G(V_G)$, реально наблюдаемому на эксперименте. Более того, детальный анализ уравнений (1.3), (1.4) показывает, что уже при небольшом отклонении от точки нейтральности, таком, что

$$\frac{|\Sigma_h - \Sigma_e|}{\Sigma_e} > \sqrt{\frac{\beta_{eh}}{\beta_e}} \Big|_{\mu=0}, \quad (1.6)$$

разность скоростей электронов и дырок становится малой ($|V_h - V_e| / |V_h + V_e| \approx 1 / 2 \sqrt{\beta_h / \beta_{eh}}$), т.е. основные носители заряда затягивают за собой неосновные. Влияние сильного электрон-дырочного рассеяния прекращается уже при небольшом различии между плотностями частиц, при этом сам коэффициент трения β_{eh} может оставаться достаточно большим по сравнению с β_e . Данный эффект приводит к еще более заметному сужению пика на зависимости сопротивления от напряжения на затворе.

Дополнительным аргументом в пользу теории влияния электрон-дырочного рассеяния на минимальную проводимость, является

независимость проводимости (1.5) при $\Sigma_e = \Sigma_h$ от температуры. Данный факт был подтвержден измерениями в диапазоне от единиц до сотен градусов Кельвина.

Вычисление проводимости как функции напряжения на затворе является простейшим примером решения гидродинамических уравнений, представленным в главе 2. Дальнейшим развитием применения теории является моделирование характеристик полевого транзистора на основе графена. Для этого система уравнений гидродинамики должна быть дополнена уравнением Пуассона для транзисторной структуры, изображенной на рис. 2.

Наиболее строгая постановка задачи гидродинамики и электростатики с граничными условиями приведена в тексте диссертации. Здесь мы ограничимся описанием аналитической модели, качественно воспроизводящей особенности характеристик транзистора. Основным предположением модели является малость влияния межконтактных областей (между истоком и затвором, стоком и затвором) на характеристики прибора. При этом связь между локальным потенциалом в канале φ и зарядовой плотностью в области под затвором дается уравнением плоского конденсатора

$$\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{d}(V_G - \varphi) = |e|(\Sigma_e - \Sigma_h). \quad (1.7)$$

Построение аналитической модели полевого транзистора возможно далее в предположении сильной рекомбинации (такой, что характерное время рекомбинации много меньше времени пролета канала частицей). При сильной рекомбинации электрон-дырочная система описывается единым химическим потенциалом, а уравнение непрерывности для компонент плазмы сводится к общему стационарному уравнению непрерывности для плотности тока j :

$$\frac{d}{dx}(\Sigma_e V_e - \Sigma_h V_h) = \frac{dj}{dx} = 0. \quad (1.8)$$

Интегрирование этого уравнения по длине канала L (фактически, по длине подзатворной области) вместе с условием $j = -Gd\varphi / dx$ приводит к окончательному выражению для тока транзистора:

$$j = -\frac{1}{L} \int_0^{V_D} G(\varphi) d\varphi. \quad (1.9)$$

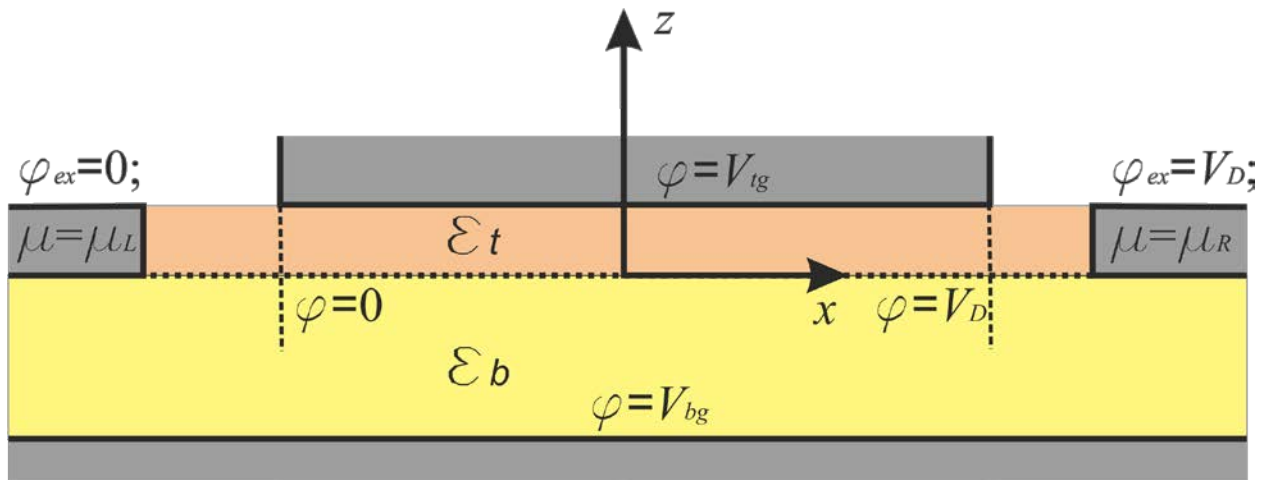


Рис. 2. Схематическое изображение поперечного разреза моделируемого полевого транзистора с пояснением граничных условий к уравнениям гидродинамики и уравнению Пуассона в строгой постановке (φ_{ex}) и в приближении плавного канала

Рассчитанные по данной формуле зависимости $j(V_G)$ и $j(V_D)$ представлены на Рис. 3.

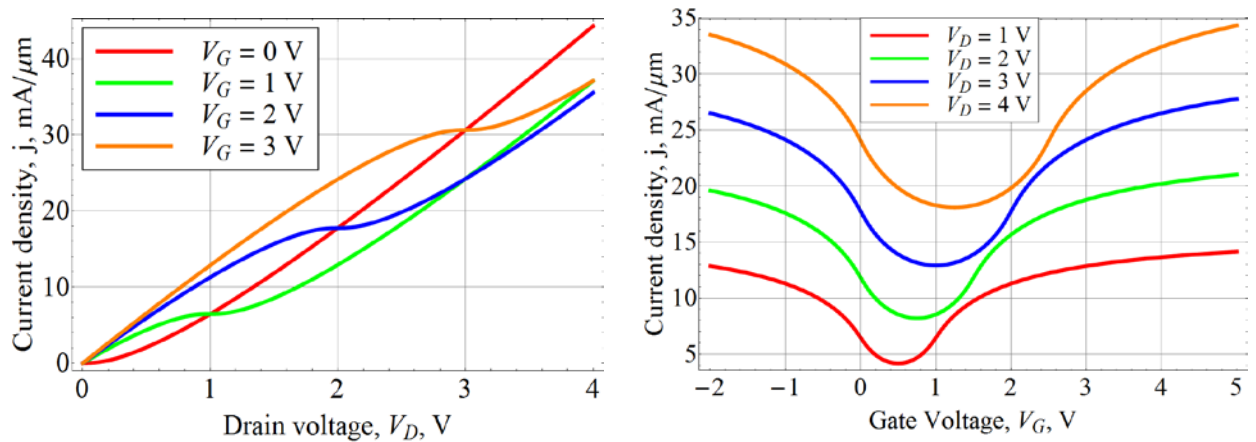


Рис. 3. Рассчитанные стоковые (слева) и затворные (справа) характеристики полевого транзистора на графене. Длина канала 1 мкм, толщина подзатворного диэлектрика 10 нм, доминирующий механизм рассеяния – акустические фононы

Квази-плато на стоковой характеристике является следствием появления точки минимальной проводимости в канале, данная точка появляется строго при $V_D = V_G$ вблизи контакта стока, как это следует из уравнения (1.7). Заметим, что ранние теории привлекали для объяснения данного квази-плато эффект насыщения скорости, который не может наблюдаться при малых напряжениях на стоке.

Зависимость плотности тока от напряжения на затворе имеет минимум при $V_G = V_D / 2$, при этом проводимость слоя графена (средняя по каналу) минимальна. Поведение «хвостов» характеристики $j(V_G)$ зависит от доминирующего механизма рассеяния,

Уже применение простых аналитических моделей полевого транзистора, основанных на гидродинамической теории транспорта, объясняет основные особенности наблюдаемых характеристик. В работе проанализирована применимость данных приближений. В частности, рассмотрен случай конечной рекомбинации, связанной с испусканием оптических фононов. Также выписаны нелинейные по скорости поправки к уравнениям гидродинамики и показано, что они имеют порядок $(V / v_F)^2$, т.е. представленные уравнения (1.2)-(1.4) работают при скоростях упорядоченного движения, существенно меньших скорости Ферми, являющейся предельной для электронов в графене.

В главе 3 представлена баллистическая модель полевого транзистора на основе двухслойного графена, учитывающая особенности электронного спектра, образно называемого «Мексиканской шляпой»:

$$\varepsilon(p) = \pm \sqrt{\frac{\gamma_1^2}{2} + \frac{\Delta^2}{4} + p^2 v_F^2} \pm \sqrt{\frac{\gamma_1^4}{4} + p^2 v_F^2 (\gamma_1^2 + \Delta^2)}. \quad (1.10)$$

Данный спектр имеет локальный максимум при $p = 0$ с отрицательной эффективной массой в его окрестности и локальный минимум при $p_{\min} = (\Delta / 2v_F) \sqrt{(2\gamma_1^2 + \Delta^2) / (\gamma_1^2 + \Delta^2)}$ с соответствующей энергией $\varepsilon_{\min} = \gamma_1 \Delta / (2\sqrt{\gamma_1^2 + \Delta^2})$.

Рассматривается классическая баллистическая модель, для которой коэффициент прохождения электроном барьера, создаваемого затвором, может принимать только значения 0 или 1, в зависимости от энергии и импульса налетающего электрона.

Показано, что электроны из контакта истока с энергией $\varepsilon < \varepsilon_{\min} + eV_C$ (V_C - высота потенциального барьера в канале транзистора, определяемая напряжением на затворе из модели плоского конденсатора) не могут попасть в канал транзистора, т.к. в области барьера достигают точки экстремума

энергетического спектра и меняют направление групповой скорости. Соответственно, и в канале транзистора состояния с $p \in [0, p_{\min}]$ (состояния на «колпаке мексиканской шляпы») являются пустыми в отсутствие рассеяния. Если же такое состояние заполняется в результате рассеяния, то данный электрон локализуется на вершине потенциального барьера в канале благодаря отрицательной эффективной массе.

Получена формула для тока транзистора в баллистическом режиме:

$$j = \frac{2e}{\pi^2 \hbar^2} \int_{\varepsilon_{\min} + eV_C}^{+\infty} p(\varepsilon - eV_C) [f_S(\varepsilon) - f_D(\varepsilon)] d\varepsilon \quad (1.11)$$

в которой $p(\varepsilon)$ - зависимость импульса частицы от энергии, соответствующая ветви спектра правее точки минимума p_{\min} , f_S и f_D - функции распределения электронов в контактах истока и стока, соответственно. Наличие изотропного смещенного минимума в энергетическом спектре приводит, как это видно из (1.11), к скачку кондуктанса $G = dj / dV_D$ при нулевой температуре, равному

$$\Delta G = \frac{e^2}{\hbar} \frac{4\Delta}{\hbar v_F} \sqrt{\frac{2\gamma_1^2 + \Delta^2}{\gamma_1^2 + \Delta^2}}. \quad (1.12)$$

Скачок происходит при напряжении на затворе, для которого дно зоны проводимости в канале совпадает с уровнем Ферми в истоке. Если предположить, что в отсутствие внешних напряжений уровень Ферми в графене $\mu > 0$ (что может обеспечиваться, например, контактной разностью потенциалов с подложкой), то зависимость проводимости от напряжения на затворе будет выглядеть, как показано на Рис. 4. Напряжение на затворе отсчитывается от состояния, для которого уровень Ферми в контакте истока проходит через середину запрещенной зоны в канале. Характеристики реальных приборов при этом получатся сдвинутыми на величину, определяемую уровнем Ферми μ (остаточным легированием).

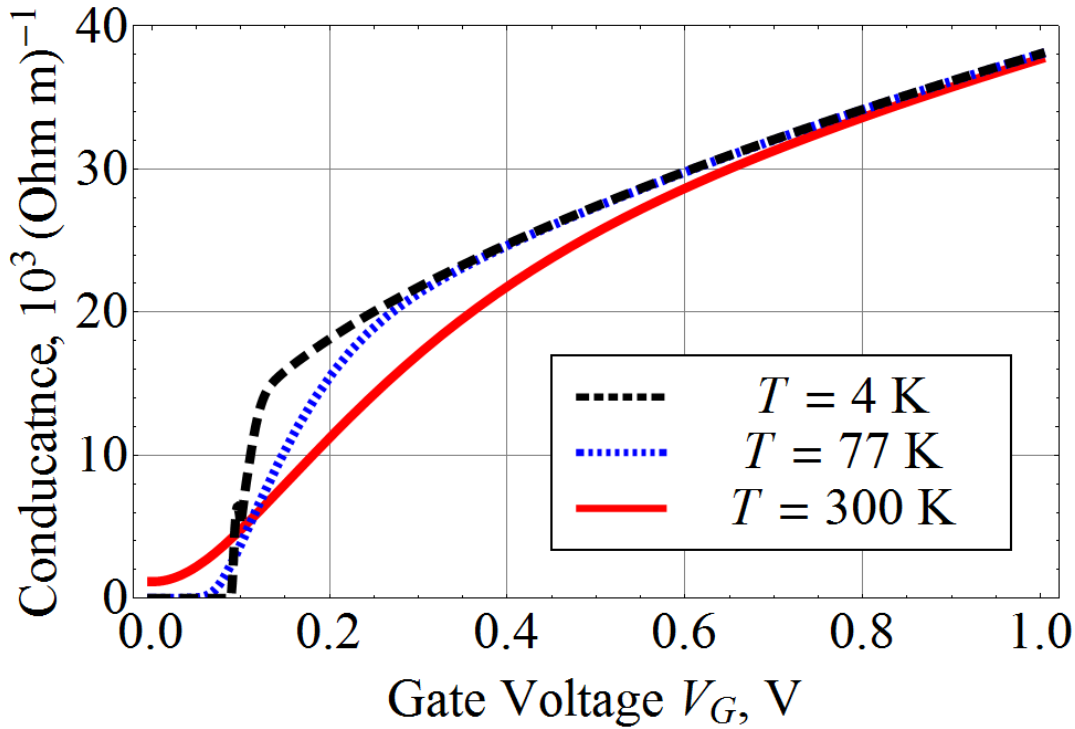


Рис. 4. Зависимость кондактанса dj / dV_D баллистического транзистора на двухслойном графене от напряжения на затворе при различных температурах

С увеличением температуры скачок размывается, тем не менее, крутизна зависимости $G(V_G)$ остается высокой. Для максимальной крутизны при комнатной температуре получена аналитическая оценка:

$$\left. \frac{dG}{dV_G} \right|_{\max} = 5 \times 10^4 \text{ (Ом м В)}^{-1} \quad (1.13)$$

при значении параметра $\Delta = 0.2$ эВ. Следует отметить, что параметр Δ (энергетическая асимметрия верхнего и нижнего слоев графена) сам зависит от напряженности поля между слоями. Для обеспечения $\Delta = 0.2$ эВ между затворами транзистора необходимо приложить постоянное напряжение порядка 20 В при толщине диэлектрика 10 нм, в то время как рабочие напряжения могут быть значительно меньше.

Рассчитаны зависимости плотности тока баллистического транзистора на двухслойном графене от напряжений на стоке и затворе, получены оценки отношения токов открытого и закрытого состояний при различных напряжениях на стоке. При комнатной температуре эти токи отличаются на два порядка, что недостаточно для использования транзисторов на двухслойном графене в логических схемах.

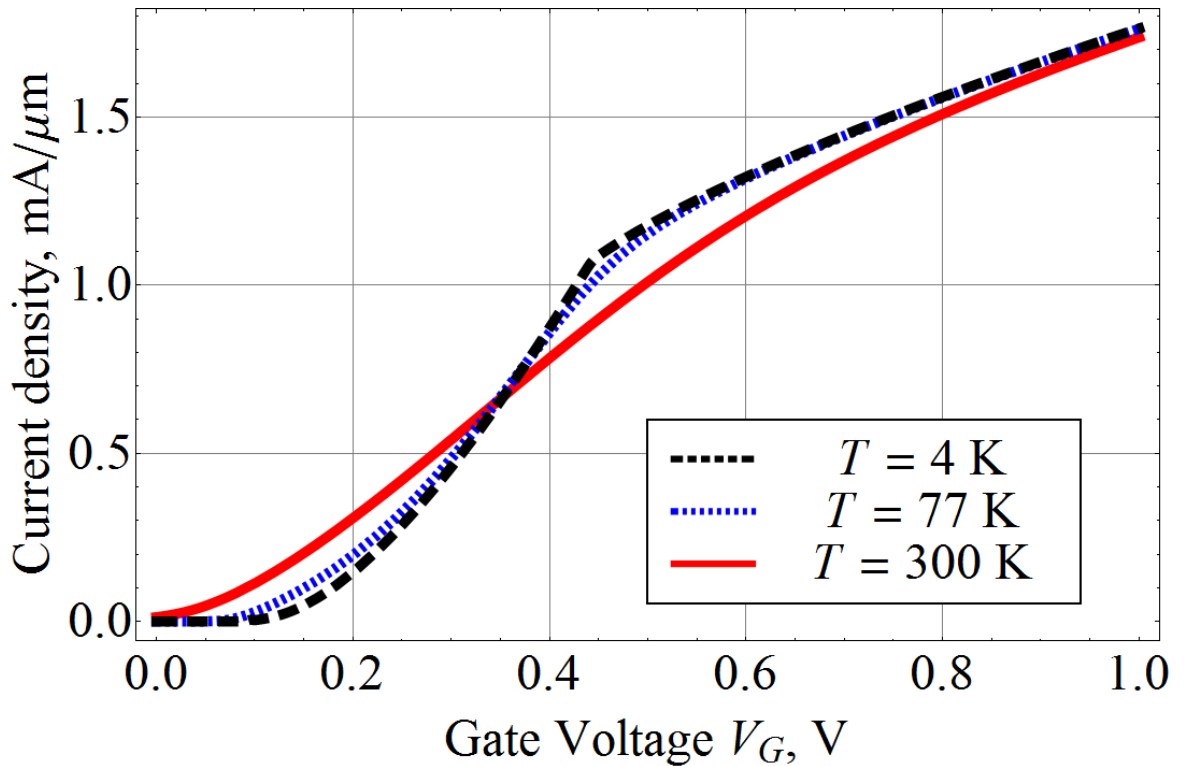


Рис. 5. Рассчитанные зависимости тока баллистического транзистора на основе двухслойного графена при напряжении на стоке $V_D = 0.05$ В и различных температурах

В то же время, высокая крутизна надпороговой характеристики (на порядок превышающая аналогичную величину для баллистического КНИ-транзистора) открывает перспективы использования двухслойного графена в высокочастотных аналоговых схемах.

В главе 4 на основании гидродинамической модели проанализированы спектры плазменных волн в однослойном графене. Основным отличием разрабатываемого подхода от прежних описаний плазменных колебаний является независимое рассмотрение осцилляций электронной и дырочной компонент плазмы.

Зависимости частоты плазменных колебаний ω от волнового вектора k найдены с помощью анализа малых гармонических возмущений электрического поля, химических потенциалов и скоростей электронов и дырок в уравнениях гидродинамики (1.2)-(1.4) и уравнениях Максвелла.

В предельных случаях симметричной биполярной плазмы (нейтральный графен) и монополярной плазмы удастся получить аналитические выражения для спектров плазменных колебаний в структурах с затвором. Для биполярной плазмы имеется две ветви закона дисперсии:

$$\omega_- = -i \frac{v_i}{2} + \sqrt{k^2 v^2 - \left(\frac{v_i}{2}\right)^2}, \quad (1.14)$$

$$\omega_+ = -i \left(\frac{v_i + v_{eh}}{2}\right) + \sqrt{k^2 v^2 (1 + 2r)^2 - \left(\frac{v_i + v_{eh}}{2}\right)^2}, \quad (1.15)$$

где v_i есть частота столкновений носителей заряда со внешними рассеивателями, v_{eh} есть частота электрон - дырочных столкновений, $r = e^2 \langle p^{-1} \rangle d / \epsilon \epsilon_0 v_F$ - безразмерный параметр, характеризующий транзисторную структуру, а v - характерная скорость колебаний, слабо зависящая от напряжения на затворе и колеблющаяся от $v_F / \sqrt{3}$ до $v_F / \sqrt{2}$ в зависимости от уровня химического потенциала. Ветвь (1.14) является слабо затухающей ($v_{eh} \gg v_i$), ей соответствуют колебания, в которой скорости электронов и дырок сонаправлены, а возмущения электронной плотности не происходит. По аналогии с ионным звуком мы называем эту ветвь электрон-дырочным звуком. Насколько известно автору работы, ранее о существовании подобных волн в графене не сообщалось.

Закону дисперсии (1.15) соответствуют плазменные колебания, в которых скорости электронов и дырок направлены противоположно, по этой причине данные колебания сильно подавлены электрон-дырочным рассеянием.

В монополярной электронной системе основным типом колебаний являются электронные осцилляции на фоне неподвижных дырок, их затухание имеет порядок $v_{ei} = 2v_F \beta_e / \langle p_e \rangle$, а закон дисперсии в пределе высоких концентраций электронов совпадает с вычисленным в прежних работах:

$$\omega_+ \approx -i \frac{v_{ei}}{2} + 2 \frac{ek}{\hbar} \sqrt{\mu_e d}. \quad (1.16)$$

Рассчитанные законы дисперсии для различных концентраций частиц представлены на Рис. 6.

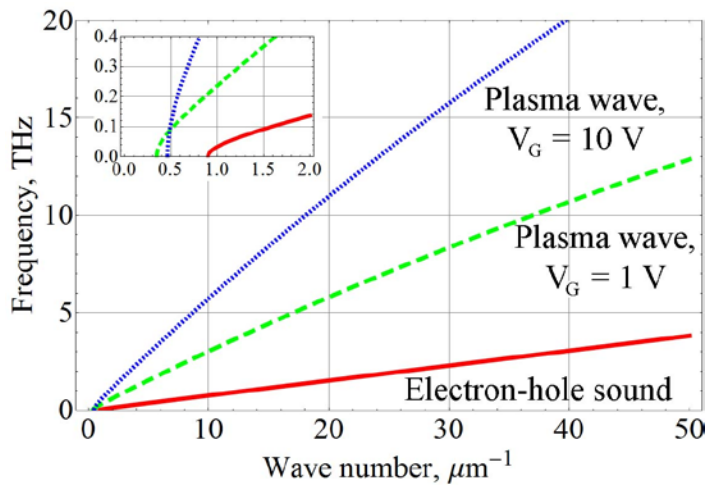


Рис. 6. Рассчитанные законы дисперсии слабозатухающих коллективных возбуждений для нейтрального графена (нижняя ветвь) и графена под затвором при различных напряжениях на затворе

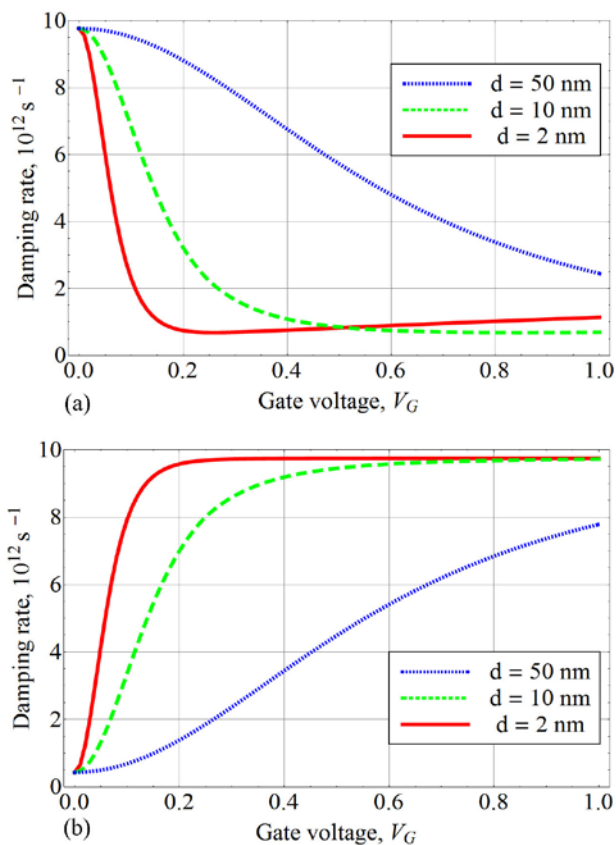


Рис. 7. Рассчитанные зависимости коэффициента затухания коллективных возбуждений в графене с затвором: а) для плазменных колебаний б) для электрон - дырочного звука (в точке нейтральности), переходящего в колебания неосновных носителей

Рассмотрен вопрос о затухании плазменных колебаний, важный для практического применения данных процессов в приборах плазмоники. Неустранимым диссипативным процессом для плазменных волн является рассеяние на акустических фононах, что приводит к затуханию порядка $(0.5 \div 1.0) \times 10^{12} \text{ с}^{-1}$.

Таким образом, фактор добротности для терагерцовых плазменных колебаний в структурах с затвором получается небольшим (порядка единицы). В работе в качестве возможного решения данной проблемы предложено использовать плазменные волны в структурах без затвора. Одной из перспективных конструкций является структура с двойным слоем графена, разделенным диэлектриком. Плазменные волны в подобных структурах связываются с фотонами с образованием поляритонов на низкочастотном участке спектра. При этом затухание уменьшается, что можно интерпретировать как переход энергии электронных колебаний в энергию поля. Соответствующие законы

дисперсии и коэффициенты затухания для графена без затворов приведены на Рис. 8.

Таким образом, для применений в области терагерцовой плазмоники наибольший интерес представляют не транзисторные структуры с затворами, а структуры с изолированным или двойным слоем графена.

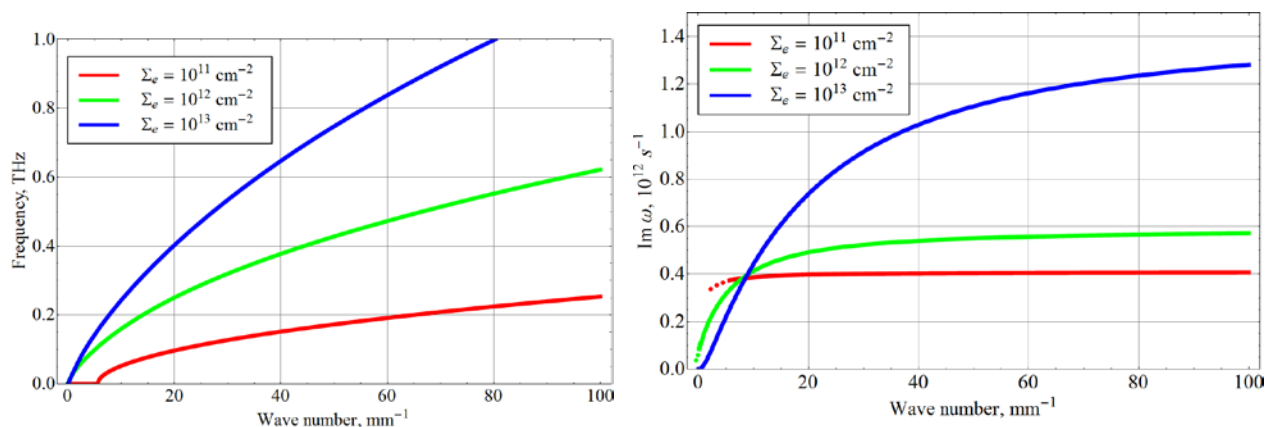


Рис. 8. Законы дисперсии (слева) и коэффициенты затухания (справа) для поляритонов в графене без затвора при разных концентрациях электронов. Доминирующий механизм рассеяния – акустические фононы

В **Заключении** диссертации изложены основные выводы, составляющие научную новизну работы.

1. Разработана гидродинамическая модель проводимости графена, учитывающая сильное межчастичное взаимодействие, характерное для данного материала. Экспериментальная зависимость сопротивления графена от напряжения на управляющем электроде объяснена в рамках предложенной модели. Показано, что максимальное сопротивление графена обусловлено сильным электрон – дырочным рассеянием и слабо зависит от температуры. Резкий спад сопротивления по обе стороны от максимума обусловлен эффектом увлечения неосновных носителей заряда основными;

2. В рамках гидродинамической модели получены характеристики полевых транзисторов на основе графена. Показано, что квази-плато на стоковой характеристике транзистора является результатом появления нейтральной области с сильным электрон-дырочным рассеянием в канале транзистора;

3. Рассчитаны спектры и затухание коллективных возбуждений в электрон - дырочной плазме графена. Показано, что в нейтральной биполярной плазме распространение заряженных плазменных волн сильно

подавлено электрон - дырочным рассеянием. В данных условиях слабо затухающим типом колебаний является нейтральный электрон - дырочный звук, скорость которого практически не зависит от концентрации носителей заряда;

4. Построена баллистическая модель полевого транзистора на основе двухслойного графена, учитывающая особенности электронного спектра. Показано, что проводимость канала как функция напряжения на затворе при нулевой температуре испытывает скачок, что ранее наблюдалось только для одномерных систем. Следствием этого скачка является рекордно высокая крутизна надпороговой характеристики данного транзистора при комнатной температуре.

В **Приложении** приведены коды программ, реализующих моделирование транзисторов на основе однослойного и двухслойного графена.

Публикации автора по теме диссертации

A1. **D. Svintsov**, V. Vyurkov, S. Yurchenko, V. Ryzhii, T. Otsuji "Hydrodynamic model for electron-hole plasma in graphene", Journal of Applied Physics, Vol. 111, Iss. 8, pp. 083715-083715-10 (2012);

A2. **D. Svintsov**, V. Vyurkov, V. Ryzhii, T. Otsuji "Effect of "Mexican Hat" on Graphene Bilayer Field-Effect Transistor Characteristics", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 50, Iss. 7, pp. 070112-070112-6 (2011);

A3. Юрченко С.О., **Свинцов Д.А.**, Вьюрков В.В., Рыжий В.И. «Гидродинамическая модель малых возмущений и спектр электрон-дырочных плазмонов в графене», Вестник МГТУ им. Баумана, Серия «Приборостроение», специальный выпуск «Современные проблемы оплотехники» (2011);

A4. Юрченко С.О., **Свинцов Д.А.** «Парадокс вычисления потока носителей в графене», Вестник МГТУ им. Баумана, Серия «Приборостроение», специальный выпуск «Современные проблемы оплотехники» (2011).

A5. **Свинцов Д.А.**, Вьюрков В.В., Лукичев В.Ф., Орликовский А.А., Буренков А., Охнер Р. «Туннельные полевые транзисторы на основе графена», Физика и техника полупроводников, статья принята в печать;

A6. **D. Svintsov**, V. Vyurkov, V. Ryzhii, and T. Otsuji “Effect of "Mexican Hat" on Graphene Bilayer Field-Effect Transistor Characteristics”, 2nd International Symposium on Graphene Devices – Technical Digest, pp. 28-29;

A7. Вьюрков В.В., Орликовский А.А., **Свинцов Д.А.**, Семенихин И.А. «Полевые нанотранзисторы на сверхтонком кремнии и графене», X российская конференция по физике полупроводников – сборник тезисов, стр. 225;

A8. Вьюрков В.В., Орликовский А.А., **Свинцов Д.А.**, Семенихин И.А. «Нанотранзисторы с ультратонкими кремниевыми и графеновыми каналами», Rusnanoforum-2011;

A9. **D. Svintsov**, V. Vyurkov, S. Yurchenko, V. Ryzhii, T. Otsuji “Collective excitations in graphene bipolar plasma”, Japan-Russia-USA symposium on modeling of graphene terahertz, nano-mechanical and acousto-optical devices – Technical Digest.

Список цитируемой литературы

1. K.S. Novoselov. et al. Science **306**, 666 (2004);
2. K.I. Bolotin et. al, Phys. Rev. Lett. **101**, 096802 (2008);
3. K. I. Bolotin et. al, Solid State Comm. **146**, 351 (2008);
4. L. Britnell et. al., Science **335**, 947 (2012);
5. K. Kim et. al., Nature, **479**, 7373 (2011);
6. H. Wang, D.A. Antoniadis IEEE Trans. El. Dev., **58**, 1523-1533, (2011);
7. M. Dyakonov and M. Shur, Phys. Rev. Lett. **71**, (1993).
8. V. Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji, J. Appl. Phys., **101**, 024509 (2007);
9. A. Principi, R. Asgari, M. Polini, Solid State Comm. **151**, 21 (2011);
10. F. Rana, Phys. Rev. B **84**, 045437 (2011);
11. E. McCann, D. S. L. Abergel, and V. I. Falco, Eur. Phys. J. Spec. Top. **148** (2007);
12. L.A. Falkovsky and A.A. Varlamov, Eur. Phys. J. B **56**, 281-284 (2007);
13. F. Vasko and V. Ryzhii, Physical Review B, **76**, 233404 (2007);
14. L. Fritz, J. Schmalian, M. Muller, and S. Sachdev, Phys. Rev. B **78**, 085416 (2008).

Свинцов Дмитрий Александрович

Кинетические явления в структурах на основе графена и его модификаций

Подписано в печать 25 августа 2012 г. Формат 60 x 84 1/16

Усл. печ. л. 1,25 Тираж 70 экз. Заказ № 77

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технологический институт Российской академии наук (ФТИАН РАН)

117218, г. Москва, Нахимовский проспект д. 36 к. 1

Издательский сектор оперативной полиграфии МФТИ

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9