

На правах рукописи

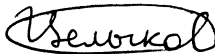
Цельковский Александр Анатольевич

**ДИФФУЗИОННО-ДРЕЙФОВАЯ МОДЕЛЬ ГРАФЕНОВОГО
ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2012 г.

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

Научный руководитель

Зебрев Геннадий Иванович,
доктор технических наук,
доцент кафедры микро- и наноэлектроники
НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты

Петросянц Константин Орестович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой электроники и наноэлектроники
Московского института электроники и математики
НИУ ВШЭ

Усейнов Рустэм Галеевич,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
ФГУП «Научно-исследовательский институт приборов»

Ведущая организация

Физико-технологический институт
Российской академии наук (ФТИАН)

Защита состоится 24 декабря 2012 г. в 15:00 в конференц-зале К-608 на заседании диссертационного совета Д 212.130.02 НИЯУ МИФИ по адресу 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан « 14 » ноября 2012 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать один экземпляр отзыва, заверенного печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, профессор



П. К. Скоробогатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации

В электронике долгие годы доминирует кремниевая технология, что обусловлено физическими свойствами кремния, его распространённостью и технологичностью. При этом прогресс обеспечивается в первую очередь уменьшением проектных норм элементов. В современных транзисторах массового производства длина канала может составлять 22 нм. Приближается предел масштабирования, что заставляет искать новые материалы с лучшими электронными свойствами.

В высокочастотной электронике помимо кремния используются арсенид галлия и фосфид индия – материалы, отличающиеся высокой подвижностью, но при этом требующие более сложной технологии. Частота отсечки транзистора на основе GaAs может достигать 660 ГГц при длине канала 20 нм. В 2004 г. был впервые получен графен – моноатомный слой углерода, который сразу стал рассматриваться как перспективный материал для полевых транзисторов – базовых элементов современной микроэлектроники. В графене наблюдается очень высокая подвижность носителей заряда ($\sim 10\,000\text{ см}^2/(\text{В}\times\text{с})$), что делает материал перспективным для высокочастотных применений. В 2012 г. частота отсечки графеновых транзисторов достигла 427 ГГц. Ожидается, что дальнейшее совершенствование технологии и уменьшение длины канала даст возможность преодолеть рубеж в 1 ТГц. Высокочастотные графеновые транзисторы могут расширить возможности, к примеру, скоростных интерфейсов передачи данных, радаров, найти применение в медицинской визуализации, спектроскопии и множестве других областей. Это заставляет крупнейшие мировые корпорации, среди которых Samsung, IBM, Toshiba, вести активные исследования в области графеновой электроники. Активную поддержку проектов, связанных с развитием высокочастотных графеновых транзисторов, осуществляет Агентство по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам США (DARPA).

Потенциальная область применения транзисторов на основе графена ограничена из-за отсутствия в этом материале запрещённой зоны. Большой ток утечки в закрытом состоянии не позволяет использовать графеновые транзисторы в цифровой электронике, налагающей жесткие ограничения на энергопотребление элементов. Современные кремниевые транзисторы имеют отношение токов во включённом и выключенном состояниях порядка 10^6 ; в графене данное значение на 5 порядков меньше.

Высокая подвижность в графене позволяет надеяться на завоевание ниши в аналоговой электронике, где невозможность блокирования тока не является принципиальным ограничивающим фактором. При этом положительную роль может сыграть еще одна особенность графеновых транзисторов – амбиполярный характер проводимости в канале (способность

изменять тип проводимости в зависимости от смещения на затворе). Амбиполярность вместе с неразрывной и квадратичной в окрестности точки электронейтральности передаточной характеристикой расширяет возможности схемотехнического проектирования: изготовлены схемы умножения частоты, двухпозиционной фазовой манипуляции, смещения сигналов на основе одного графенового транзистора. Эти устройства описаны в работах 2009–2012 гг. К. Mohanram, Т. Palacios, Н. Wang, А. Hsu, S. Lee, L. Liao (США), V. Russo (Италия), О. Habibpour (Швеция), Z. Wang (Китай), Y.-M. Lin (IBM), P. Pasanen (Nokia) и др.

В связи с развитием графеновой электроники встает задача схемотехнического проектирования с использованием графеновых транзисторов. Это требует создания простых аналитических «компактных моделей», подобных, к примеру, BSIM и PSP, которые являются промышленным стандартом для КМОП-технологии. Такие модели предназначены для компьютерных расчётов и интеграции в существующие системы автоматизированного проектирования. От компактных моделей графеновых транзисторов требуется описывать специфические приборные эффекты в графене – например, генерацию носителей, обусловленную нулевой шириной запрещённой зоны. Модели должны учитывать влияние поверхностных состояний, присутствие которых характерно для полевых структур, а также отражать типичную структурную особенность графеновых транзисторов – наличие двойного затвора.

Математические модели графеновых полевых транзисторов в своих работах развивают V. Ryzhii, M. Ryzhii (Япония), M. S. Shur (США), В. В. Вьюрков (гидродинамическая модель, ФТИАН), Г. И. Зебрев (диффузионно-дрейфовая модель, НИЯУ МИФИ), F. Schwierz, S. A. Thiele (Германия), I. Meric (США), O. Moldovan, D. Jiménez (Испания), J. Stake (Швеция). При этом недостаточно внимания уделяется вопросу адаптации получаемых результатов для целей схемотехнического моделирования.

Таким образом, значимой и актуальной является задача развития компактных моделей графеновых полевых транзисторов с двойным затвором, учитывающих специфические физические особенности графена и пригодных для использования при схемотехническом моделировании в современных САПР.

Цель и задачи диссертации

Цель диссертации заключается в создании диффузионно-дрейфовой компактной модели графенового полевого транзистора с двойным затвором, основанной на аналитическом решении уравнения непрерывности тока в канале и пригодной для использования в системах автоматизированного проектирования.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **основные задачи**.

- 1) Обобщение математической модели электростатики графенового полевого транзистора на случай конфигурации с двойным затвором.
- 2) Разработка диффузионно-дрейфовой модели вольт-амперных характеристик графенового полевого транзистора, основанной на аналитическом решении уравнения непрерывности тока в канале, с учётом режимов насыщения скорости и электростатического запираения канала.
- 3) Создание математической модели несобственной проводимости в рамках модели вольт-амперных характеристик графенового полевого транзистора.
- 4) Разработка совместимого с современными SPICE-подобными САПР программного средства для схемотехнического моделирования графеновых полевых транзисторов.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

- 1) Математическая модель электростатики графенового полевого транзистора с двойным затвором, учитывающая влияние поверхностных состояний.
- 2) Диффузионно-дрейфовая модель вольт-амперных характеристик графенового полевого транзистора с учётом режимов насыщения скорости и электростатического запираения канала.
- 3) Механизм экспериментально наблюдаемой суперлинейной проводимости в канале графенового транзистора, заключающийся в генерации носителей заряда в сильных электрических полях.

Научная новизна диссертации

- 1) Получены аналитические зависимости концентрации носителей и уровня Ферми в графене от напряжений на затворах.
- 2) Разработана диффузионно-дрейфовая модель вольт-амперных характеристик графенового транзистора, позволяющая в единой форме описывать два режима насыщения: электростатическое запираение канала и насыщение скорости.
- 3) Предложена модель генерации носителей заряда в канале графенового транзистора, описывающая наблюдаемые эффекты несобственной проводимости.

Практическая значимость диссертации

- 1) Разработанные модели адаптированы для использования в системах автоматизированного проектирования в качестве компактной модели графенового полевого транзистора с двойным затвором.
- 2) Компактная модель реализована на языке Verilog-A, что делает возможной её интеграцию в современные SPICE-подобные САПР, предназначенные для схемотехнического проектирования.

- 3) Разработанная компактная модель позволяет проводить оптимизацию параметров и режима работы графенового транзистора с целью максимизации быстродействия и минимизации искажений сигнала.
- 4) Разработанная модель позволяет прогнозировать влияние геометрических и электрофизических параметров графенового транзистора на его вольт-амперные характеристики и частоту отсечки.

Компактная модель графенового полевого транзистора с двойным затвором зарегистрирована в Федеральном институте промышленной собственности (свидетельство № 2012619131 от 08.10.2012).

Результаты работы использованы при выполнении НИР «Моделирование и разработка методов характеристики параметров высокочастотных полевых транзисторов на основе графена для использования их в высокопроизводительных телекоммуникационных системах» по ГК № 11.519.11.4019 от 21.10.2011.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертации докладывались на Научных сессиях МИФИ (2009, 2011, 2012), Международной научно-технической конференции «Микроэлектроника и наноинженерия» (Зеленоград, 2008), Всероссийской конференции «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях» (Москва, 2009), Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2009» (Зеленоград, 2009), Международной конференции «International Conference on Micro- and Nanoelectronics» (ICMNE-2009), Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных по фундаментальным наукам «Ломоносов-2011» (Москва), Всероссийской научно-технической конференции «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА» (Дубна, 2011), Европейской конференции по микроэлектронике MIEL (Сербия, г. Ниш, 2012), Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2012).

Опубликованные результаты

По теме диссертации с 2008 по 2012 г. опубликовано 24 работы, в том числе две в российских периодических изданиях, рекомендованных ВАК, и одна в рецензируемом сборнике трудов международной конференции MIEL, включённом в библиографические базы Scopus и IEEE Xplore.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка литературы и одного приложения. Общий объем диссертации – 140 страниц. Диссертация содержит 96 рисунков. В списке литературы 165 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Электростатика и статистика носителей двухзатворного графенового полевого транзистора

Графен представляет собой отдельную плоскость углерода, слой монокристаллической толщины, и обладает свойствами бесщелевого проводника с линейным законом дисперсии. Это означает, что носители заряда в графене не имеют эффективной массы и движутся с постоянной скоростью $v_0 \cong 10^8$ см/с вне зависимости от их импульса.

Снижение толщины канала до одного атомного слоя обеспечивает улучшение электростатических характеристик графеновых полевых транзисторов. К уменьшению паразитных ёмкостей ведёт в том числе отсутствие обеднённой области, существующей в традиционных кремниевых МОП-структурах. Отличительной чертой графеновых транзисторов является важная роль квантовой ёмкости, связанной с видом энергетической зависимости плотности состояний в графене.

В диссертации рассматривается распространённая конфигурация графеновых транзисторов с двойным затвором (рис. 1). Роль нижнего затвора, используемого для коррекции типа проводимости и управления положением точки минимума тока, играет подложка. В данной работе математическая модель электростатики и статистики носителей графенового полевого транзистора с одним затвором, предложенная Г. И. Зебрёвым, обобщена на случай двухзатворной конфигурации. В модели используются точные аналитические выражения, полученные на основе решения базовых уравнений электростатики, что отличает её от других моделей, либо имеющих полуэмпирический характер, либо не учитывающих влияние поверхностных состояний и существенную роль квантовой ёмкости.

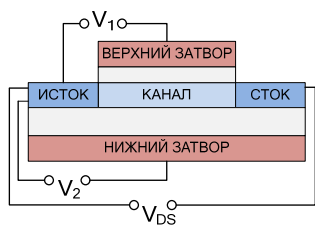


Рисунок 1 – Структура графенового полевого транзистора с двойным затвором

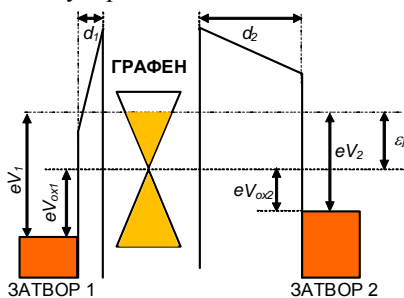


Рисунок 2 – Зонная диаграмма графеновой полевой структуры с двойным затвором

Зонная диаграмма графенового полевого транзистора с двойным затвором показана на рис. 2. Оба затвора имеют положительное смещение

относительно заземлённого графена. Уравнение электронейтральности имеет вид

$$\varepsilon_1 \varepsilon_0 \frac{eV_1 - \varepsilon_F}{d_1} + \varepsilon_2 \varepsilon_0 \frac{eV_2 - \varepsilon_F}{d_2} = e^2 n_S(\varepsilon_F) + C_{it} \varepsilon_F, \quad (1)$$

или, что то же самое, плотность заряда в графене $e n_S$ выражается как

$$\begin{aligned} e^2 n_S &= e(C_1 V_1 + C_2 V_2) - \varepsilon_F (C_1 + C_2 + C_{it}) = \\ &= (C_1 + C_2) \left(eV_{Geff}(V_1, V_2) - \left(1 + \frac{C_{it}}{C_1 + C_2} \right) \varepsilon_F(V_1, V_2) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где $V_{1(2)}$ – напряжение на верхнем (нижнем) затворе, $V_{Geff} = (C_1 V_1 + C_2 V_2)/(C_1 + C_2)$ – эффективное напряжение на затворе, $V_{1(2)} = |V_{G1(2)} - V_{NP1(2)}|$, $V_{NP1(2)}$ – напряжения электронейтральности, ε_F – энергия Ферми в графене, $C_{1(2)}$ – удельная ёмкость верхнего (нижнего) диэлектрика, C_{it} – удельная низкочастотная ёмкость поверхностных состояний.

Для энергии Ферми как функции напряжения на двух затворах получено аналитическое выражение

$$\varepsilon_F(V_1, V_2) = \left(m^2 \varepsilon_{ad}^2 + 2\varepsilon_{ad} eV_{Geff} \right)^{1/2} - m\varepsilon_{ad}, \quad (3)$$

$$m = 1 + \frac{C_{it}}{C_1 + C_2}, \quad \varepsilon_{ad} = \frac{\pi \hbar^2 v_0^2 (C_1 + C_2)}{2e^2}, \quad (4)$$

где v_0 – скорость Ферми в графене. Если одна из ёмкостей диэлектриков много больше другой, все уравнения сводятся к однозатворному случаю. Эквивалентная схема графенового полевого транзистора с двойным затвором представлена на рис. 3.

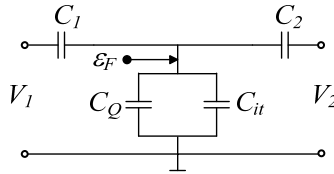


Рисунок 3 – Эквивалентная схема графеновой структуры с двойным затвором

Ёмкость затвора 1 (2) при заземлённом затворе 2 (1) определяется как

$$C_{G1(2)} = \left(\frac{1}{C_{1(2)}} + \frac{1}{C_Q + C_{it} + C_{2(1)}} \right), \quad (5)$$

где C_Q – квантовая ёмкость.

Таким образом, разработанная модель учитывает специфическую электростатику графеновых полевых транзисторов, в том числе наличие

второго затвора и важную роль квантовой ёмкости, а также влияние поверхностных состояний, и позволяет получать аналитические зависимости концентрации носителей и уровня Ферми от напряжений на затворах.

2 Вольт-амперные характеристики графенового полевого транзистора с учётом двух режимов насыщения

Разработанная компактная модель графенового полевого транзистора с двойным затвором основана на аналитическом решении уравнения непрерывности тока в диффузионно-дрейфовом приближении и позволяет непрерывным образом в аналитической форме описывать вольт-амперные характеристики транзистора во всех режимах работы. Она является развитием модели, предложенной Г. И. Зебрёвым.

По сложившейся классификации предлагаемая модель является основанной на поверхностном потенциале (surface-potential-based). Модели этого типа наиболее точно описывают реальную физику транзистора, хотя и требуют относительно сложных вычислений. В последние годы в связи с ростом вычислительных мощностей такие модели (например, PSP – компактная модель кремниевого МОПТ) завоевывают всё большую популярность.

Полевой транзистор – фундаментально нелинейный прибор, работающий в общем случае при значительных смещениях на всех электродах. Насыщение тока в канале полевого транзистора при большом электрическом поле между истоком и стоком обусловлено двумя причинами, а именно блокировкой тока из-за обеднения плотности носителей вблизи стока и насыщением скорости носителей заряда на уровне $v_{opt} \leq v_0$ из-за эмиссии оптических фононов. Описание двух типов насыщения может быть объединено выражением

$$I_D = \frac{1}{2} g_{D0} V_S \left(1 - \exp \left(-2 \frac{V_{DS}}{V_S} \right) \right), \quad (6)$$

где $g_{D0} = (W/L)e\mu_0 n_{S0}$ – малосигнальная полная проводимость, W и L – ширина и длина канала соответственно, n_{S0} – плотность носителей вблизи истока, μ_0 – подвижность носителей заряда, V_{DS} – смещение на стоке, V_S – обобщённое напряжение насыщения:

$$V_S = V_{D0} \tanh(V_{DSAT}/V_{D0}), \quad (7)$$

представляющее собой минимальное из характеризующего насыщение скорости напряжения

$$V_{D0} \equiv \frac{2v_{opt}L}{\mu_0} \approx 10 \left(\frac{2v_{opt}}{10^8 \text{ см/с}} \right) \left(\frac{L}{1 \text{ мкм}} \right) \left(\frac{10^3 \text{ см}^2/(B \times c)}{\mu_0} \right) \text{ В}, \quad (8)$$

где v_{opt} – максимальная дрейфовая скорость, определяемая рассеянием на оптических фононах, и напряжения электростатического запираания

$$V_{DSAT}(V_1, V_2) = V_{Geff} + en_s(V_1, V_2)/(C_1 + C_2). \quad (9)$$

При малых V_{DS} ($V_{DS} \ll V_S$) ток стока в каждом из случаев совпадает и определяется только малосигнальной полной проводимостью g_{D0} .

Электростатическое запираание, в свою очередь, можно характеризовать своей скоростью насыщения v_S : $I_{DSAT} = Wen_{S0}v_S$, где

$$v_S = \frac{\mu_0 V_{DSAT}}{2L}. \quad (10)$$

Тип насыщения тока стока зависит как от геометрических и транспортных параметров транзистора (определяющих V_{D0}), так и от электрического режима, поскольку V_{DSAT} является функцией напряжений на затворах. Безразмерный параметр

$$a(V_1, V_2) = \frac{v_S}{v_{opt}} = \frac{\mu_0 V_{DSAT}}{2v_{opt}L} = \frac{V_{DSAT}}{V_{D0}} \quad (11)$$

позволяет разделить два типа насыщения тока в полевых транзисторах при больших V_{DS} . При $a \ll 1$ (в длинноканальных транзисторах с тонкими подзатворными диэлектриками, при малых плотности носителей и подвижности) преобладает (I) электростатическое запираание (зависимость тока насыщения от смещения на затворе квадратичная: $I_D \sim (V_G - V_{NP})^2$), если же $a \gg 1$, ток насыщения $I_{DSAT} = Wen_{S0}v_{opt}$ определяется (II) насыщением скорости носителей заряда (при этом ток насыщения от смещения на затворе зависит линейно: $I_D \sim (V_G - V_{NP})$).

Характер насыщения тока влияет на частоту отсечки транзистора

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi WLC_{GG}}, \quad (12)$$

где C_{GG} – удельная ёмкость затвора. В режиме насыщения скорости крутизна

$$g_m = \left(\frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right)_{V_{DS}} \quad (13)$$

не зависит от длины канала, что приводит к зависимости частоты отсечки от длины канала вида $f_T \sim 1/L$, а при электростатическом запираании крутизна обратно пропорциональна длине канала, поэтому $f_T \sim 1/L^2$. Как видно из (11) и рис. 4, уменьшение длины канала ведет к увеличению роли насыщения скорости, а значит, и к замедлению темпа роста частоты отсечки при масштабировании.

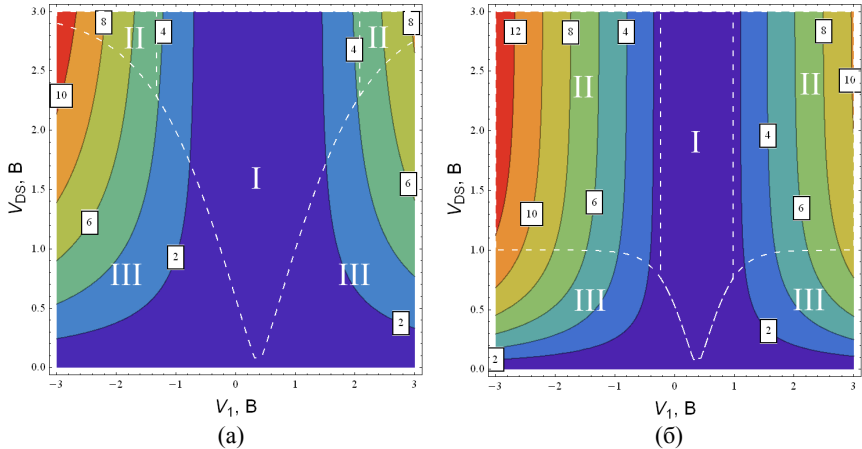


Рисунок 4 – Контурный график тока стока графенового полевого транзистора с двойным затвором как функции напряжений на верхнем затворе и стоке, (а) $L = 1,5$ мкм ($V_{D0} = 3$ В), (б) $L = 0,5$ мкм ($V_{D0} = 1$ В). Пунктирные линии разделяют области с разными режимами тока стока: (I) электростатическое запираение, (II) насыщение скорости, (III) отсутствие насыщения. Числа в белых прямоугольниках показывают величину тока стока в мА

На рис. 5 показаны расчётные вольт-амперные характеристики графенового транзистора с двойным затвором, а на рис. 6 – зависимость характера насыщения от параметров технологии: подвижности, напряжения питания $V_{DD} \approx V_{DSAT}/2$, скорости насыщения v_{opt} и длины канала L .

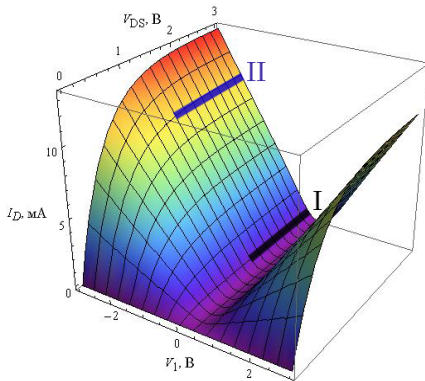


Рисунок 5 – Результаты моделирования тока стока графенового полевого транзистора как функции V_1 и V_{DS} ; $V_{D0} = 1$ В; (I) $V_{DSAT} = 0,6$ В, $a = 0,6$; (II) $V_{DSAT} = 4,7$ В, $a = 4,7$

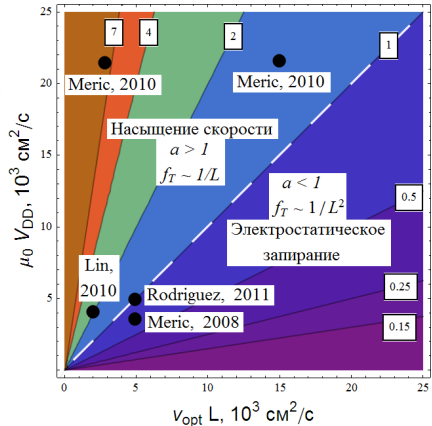


Рисунок 6 – Характер насыщения тока (цифрами показаны значения параметра a) и параметры некоторых лабораторных образцов графеновых транзисторов

Представленная модель непрерывным образом описывает вольт-амперные характеристики графенового транзистора с учётом двух типов насыщения (электростатического запираения и насыщения скорости) и позволяет оценивать влияние геометрических и электрофизических параметров транзистора на его частоту отсечки и на характер насыщения тока.

3 Эффекты сильных полей в канале графенового полевого транзистора

Отсутствие запрещённой зоны в графене ведет к существенному влиянию несобственной проводимости на вольт-амперные характеристики транзистора. Появление несобственных носителей может быть связано как с ударной ионизацией, так и с туннельной генерацией.

а) Ударная ионизация

Вызванное ударной ионизацией лавинное размножение носителей в области сильного поля вблизи стока в режиме насыщения является главным механизмом пробоя в обычных кремниевых приборах, что накладывает верхний предел на максимальное смещение для большинства диодов и биполярных транзисторов и на стоковые напряжения кремниевых МОПТ. Роль ударной ионизации возрастает с уменьшением ширины запрещённой зоны. Отсутствие запрещённой зоны в графене может привести к тому, что скорость генерации вследствие ударной ионизации будет велика даже в отсутствие высокоэнергетичных носителей.

В графене n -типа генерация в основном определяется электронами с большой энергией, полученной от электрического поля. Они тратят её на переходы из зоны в зону, безызлучательно передавая часть энергии другому электрону (оже-ионизация). Аналогично, энергия, выделяемая в ходе оже-рекомбинации электрона и дырки, передается другому основному носителю (электрону в графене n -типа). При достаточно большом смещении на стоке значительное число основных носителей, появившихся вследствие ударной ионизации вблизи стока, будет двигаться по направлению к стоку, тогда как неосновные носители будут перемещаться по направлению к истоку. Полный ток ограничивается процессом рекомбинации, который подавляет вызванное ударной ионизацией размножение основных носителей.

Пусть плотность тока у истока $J_n(0)$ известна. Найти плотности электронной J_n и дырочной J_p компонент можно путём решения системы уравнений непрерывности тока в канале с учётом граничных условий:

$$\begin{cases} \frac{dJ_n(x)}{dx} = (\alpha - \beta)J_D + \beta J_n(x), & J_n(0) = J_{n0}, \\ \frac{dJ_p}{dy} = -\alpha(E)J_D + \beta J_p, & J_p(L) = 0, \end{cases} \quad (15)$$

где $\alpha(E)$ – коэффициент ударной ионизации (скорость генерации на единице длины, т. е. число электронно-дырочных пар, созданных в канале носителем, движущимся по направлению электрического поля), предполагаемый одинаковым для электронов и дырок в графене; β – коэффициент рекомбинации.

Плотность полного электронно-дырочного тока постоянна по всей длине канала и является суммой электронной и дырочной компонент:

$$J_D = J_n(L) = J_n(x) + J_p(x) = \frac{J_{n0}}{1-m}, \quad (16)$$

$$m = \int_0^L e^{-\beta x} \alpha(x) dx \cong \frac{\varepsilon_D e^{-\beta L}}{e \kappa E_m \ell_m} \exp\left(-\frac{E_m}{E(L)}\right), \quad (17)$$

где ℓ_m – длина свободного пробега по энергии, E_m – критическое электрическое поле ударной ионизации, $E(L)$ – электрическое поле в конце канала. Коэффициент умножения для электронов $M_n \equiv J_n(L)/J_{n0}$ выражается через интеграл m как $M_n = 1/(1-m)$.

Поле в конце канала, определяющее величину параметра m , редуцируется конечным значением сопротивления контактов R_C (рис. 7):

$$\frac{V_D - V_{D,int}}{R_C} = I_D(V_{D,int}(V_D)), \quad (18)$$

где $V_{D,int}$ – падение напряжения на канале транзистора.

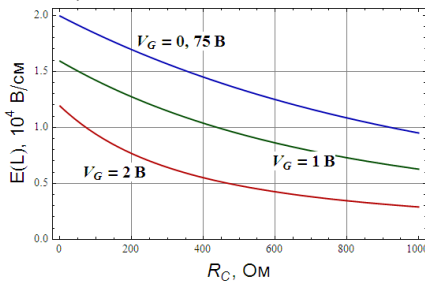


Рисунок 7 – Зависимость электрического поля в конце канала от сопротивления контактов при различных напряжениях на затворе

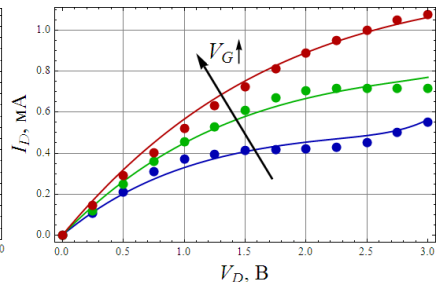


Рисунок 8 – Результаты моделирования тока стока (линии) и экспериментальные данные (точки; Meric et al., 2008) при различных напряжениях на затворе и сопротивлении контактов 300 Ом

С ростом напряжения на затворе (а значит, и концентрации носителей заряда в канале) электрические поля в канале уменьшаются, и влияние ударной ионизации на ток снижается. Это может приводить к исчезновению излома и быстрого роста тока (кинк-эффекта) с выходных ВАХ в рабочем диапазоне напряжений на стоке (см. рис. 8).

б) Туннельная генерация

Туннельная генерация в графене аналогична туннелированию в обратном смещённом p - n -переходе в случае нулевой ширины запрещённой зоны.

Путем интегрирования вероятности туннелирования по углам, образованным векторами электрического поля и импульса электрона, для скорости генерации на единице площади графенового канала длиной L получена зависимость $U_{gen} \sim E^{3/2} \sim 1/L^{3/2}$, где E – тянущее электрическое поле. Полный генерационный ток можно приближенно определить, умножив скорость генерации на площадь канала:

$$I_{Dgen} = eWLU_{gen} \sim 1/\sqrt{L}. \quad (19)$$

Зависимость $I_{Dgen} \sim L^{-1/2}$ прослеживается экспериментально (рис. 9).

С ростом напряжения на стоке и увеличением поля в канале ток туннельной генерации подавляет насыщение. Это позволяет описать излом выходной характеристики и дальнейший быстрый рост тока при больших V_D (рис. 10). Увеличение затворного напряжения приводит к появлению участка насыщения и исчезновению точки излома и второго участка роста в исследуемом диапазоне напряжений на стоке.

Модель туннельной генерации позволяет описать экспериментально наблюдаемый (Luo, 2008; Meric, 2010 и др.) быстрый суперлинейный рост тока в точке электронейтральности, где генерационный ток приближенно равен полному току канала (рис. 10). При этом увеличение напряжения на затворе приводит к уменьшению тянущего электрического поля в канале и снижению генерационной составляющей полного тока.

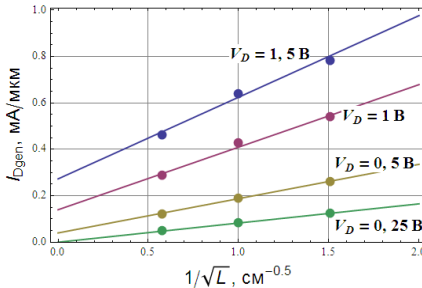


Рисунок 9 – Плотность генерационного тока как функция $1/L^{1/2}$ при различных V_D . Точками показаны экспериментальные данные (Meric et al., 2008)

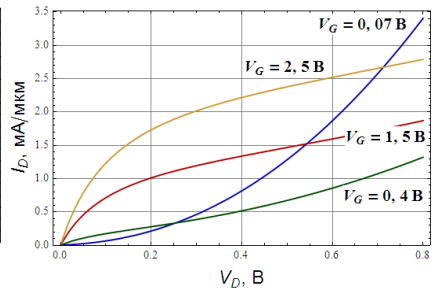


Рисунок 10 – Результаты моделирования выходных характеристик с учётом туннельной генерации при разных напряжениях на затворе

Таким образом, учёт генерации носителей позволяет качественно описывать экспериментально наблюдаемую суперлинейную проводимость в канале графенового транзистора.

4 Схемотехническое моделирование с использованием графеновых полевых транзисторов

Представленная в разделах 1-3 компактная модель графенового полевого транзистора была реализована на языке Verilog-A. Этот язык предназначен для описания аналоговой аппаратуры и позволяет реализовывать модели объектов на различных уровнях абстракции. Одним из главных преимуществ Verilog-A с точки зрения разработки компактных моделей является его широкое распространение как составной части языка Verilog-AMS, являющегося расширением Verilog на случай аналого-цифровой аппаратуры. Это обуславливает наличие необходимых для работы с Verilog-A средств в большинстве современных САПР. Также к достоинствам языка Verilog-A следует отнести простоту его использования и интеграции написанных на нем моделей в программы моделирования типа SPICE, а также возможность работать с частными производными в символьном виде.

Для верификации и иллюстрации возможностей разработанной компактной модели проведено моделирование ряда графеновых устройств, представленных в работах Т. Palacios, Н. Wang, А. Hsu и др. 2009–2012 гг.

а) Двухполупериодный выпрямитель и умножитель частоты

Амбиполярные свойства графенового транзистора отражает его передаточная характеристика (рис. 11 (а)). Нулевая ширина запрещённой зоны, которая является недостатком для цифровых применений, может стать преимуществом для аналоговой электроники, поскольку не вносит разрыва в передаточную характеристику. Положением точки минимума тока можно управлять, подавая на затвор постоянное напряжение смещения. Если канал графенового транзистора смещён в состояние электронейтральности напряжением V_{NP} , при подаче на затвор синусоидального сигнала (рис. 11 (а)) происходит чередование электронной и дырочной проводимости в канале (рис. 11 (б)). При этом транзистор играет роль двухполупериодного выпрямителя или удвоителя частоты. Благодаря отсутствию запрещённой зоны передаточная характеристика непрерывна. Это делает крутизну (13) также непрерывной функцией, меняющей знак при изменении полярности приложенного к затвору смещения (рис. 11 (в)):

$$g_m \cong \frac{W}{2L} \mu_0 C_{CH} V_S \left(1 - \exp\left(-\frac{2V_{DS}}{V_S}\right) \right), \quad (20)$$

где I_D – ток стока, V_{GS} – напряжение затвор-исток, C_{CH} – ёмкость канала, V_{DS} – напряжение сток-исток, V_S – характерное напряжение насыщения, объединяющее два типа насыщения тока в канале – обусловленное электростатическим запирающим каналом и вызванное насыщением дрейфовой скорости носителей заряда.

На рис. 12 представлена моделируемая схема. Предлагаемое схематическое изображение графенового транзистора демонстрирует его амбиполярные свойства, объединяя изображения n - и p -канального МОП-транзисторов.

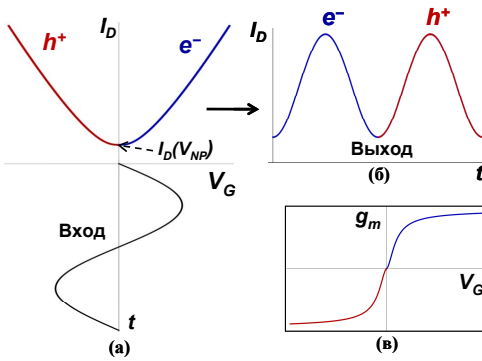


Рисунок 11 – Передаточная характеристика $I_D(V_{GS})$ графенового транзистора и входной сигнал $V_{GS}(t)$ (а); ток стока $I_D(t)$ (б); крутизна $g_m(t)$ (в)

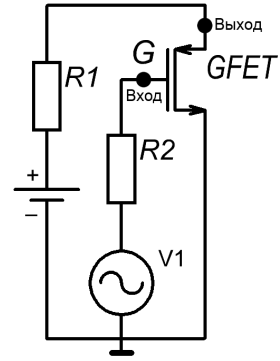


Рисунок 12 – Двухполю- периодный выпрямитель и умножитель частоты

Свойства устройства обусловлены как симметрией передаточной характеристики, так и её формой. Если характеристика квадратичная, т. е. $I_D \sim (V_G - V_{NP})^2$ (рис. 13, сплошная линия), в спектре выходного сигнала хорошо подавляются гармоники выше второй (рис. 14), и на выходе получается гармонический сигнал с удвоенной частотой (рис. 15 (а)). Линейная передаточная характеристика $I_D \sim (V_G - V_{NP})$ обеспечивает выпрямление входного сигнала (рис. 15 (б)).

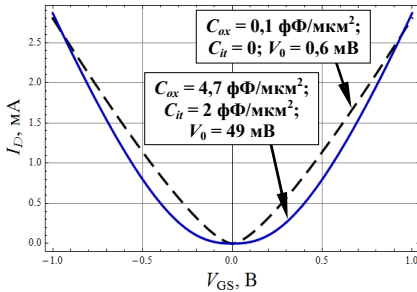


Рисунок 13 – Результаты моделирования передаточных характеристик графенового транзистора; для наглядности ток, отмеченный пунктирной линией, увеличен в 25 раз. Характерное напряжение $V_0 = m^2 \epsilon_d / e$

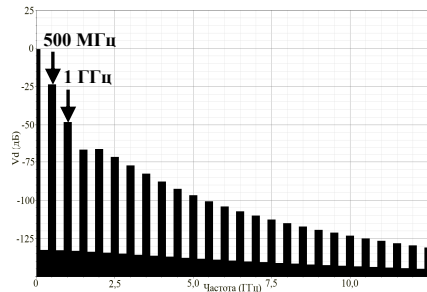


Рисунок 14 – Результаты моделирования спектра выходного сигнала умножителя частоты, характеристики которого представлены на рис. 13 (сплошной линией) и 15 (а). На входе сигнал частотой 250 МГц

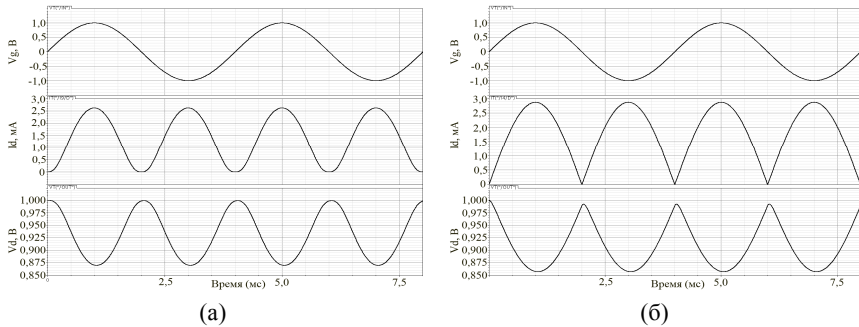


Рисунок 15 – Результаты моделирования (сверху вниз) напряжения на входе (затворе транзистора) схемы, представленной на рис. 12, тока стока транзистора, напряжения на выходе (стоке транзистора) в случае квадратичной (а) и линейной (б) передаточной характеристики

б) Смеситель

Квадратичная передаточная характеристика графенового транзистора позволяет использовать его в качестве смесителя сигналов. Как и ранее, канал должен быть смещён в точку электронейтральности V_{NP} . На вход смесителя (рис. 16) подаются два сигнала с частотами f_1 и f_2 .

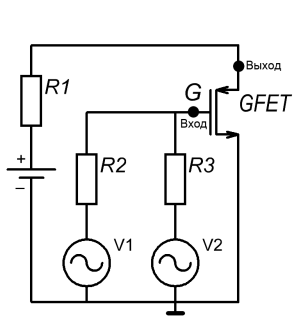


Рисунок 16 – Смеситель на основе графенового транзистора

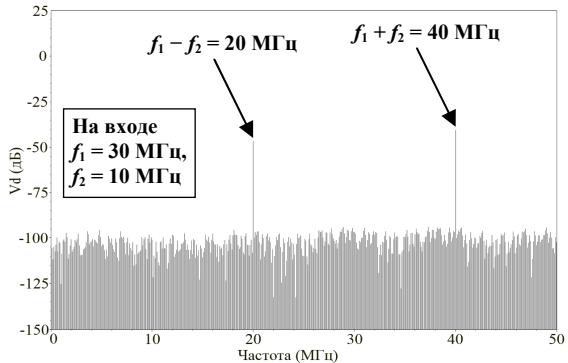


Рисунок 17 – Результаты моделирования спектра выходного сигнала смесителя (передаточная характеристика представлена на рис. 13 сплошной линией)

Сигнал на выходе имеет полезные гармоники $f_1 + f_2$ и $f_1 - f_2$ (рис. 17). Благодаря симметрии и квадратичности передаточной характеристики эффективно подавляются нечетные гармоники, присутствующие в униполярных смесителях.

в) Схема двухпозиционной фазовой манипуляции

Амбиполярная проводимость графенового транзистора может использоваться в схеме двухпозиционной фазовой манипуляции (рис. 18). Схема

позволяет изменять фазу несущего высокочастотного сигнала при помощи управляющего прямоугольного сигнала большой амплитуды (рис. 19).

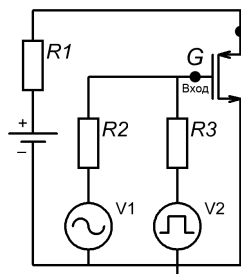


Рисунок 18 – Схема двухпозиционной фазовой манипуляции

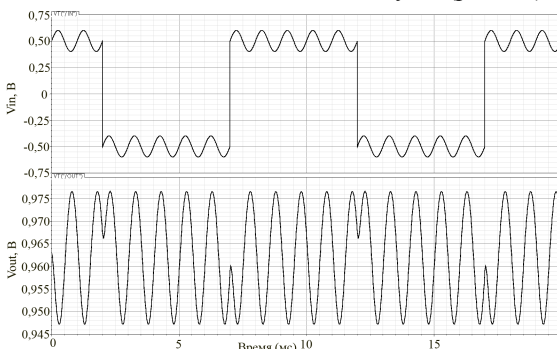


Рисунок 19 – Результаты моделирования напряжений на входе (вверху) и выходе (внизу) схемы двухпозиционной фазовой манипуляции

Цифровой прямоугольный сигнал переключает канал между электронной проводимостью (при положительном смещении) и дырочной проводимостью (при отрицательном смещении). На левой ветви передаточной характеристики (при дырочной проводимости) крутизна отрицательная, а на правой ветви (при электронной проводимости) – положительная (рис. 11 (в)). Поэтому переключение между логическими «1» и «0» ведет к изменению фазы высокочастотного гармонического сигнала малой амплитуды на 180° . Таким образом, в схеме фазовой манипуляции гармонические колебания входного напряжения происходят относительно симметричных точек на правой и левой ветвях передаточной характеристики (и не меняют тип проводимости), а в схеме умножения частоты – относительно точки электронейтральности (и переключают тип проводимости; рис. 11 (а)).

Все описанные устройства имеют простую схемотехнику – один графеновый транзистор – отличаясь между собой только входными сигналами. Свойства этих устройств обусловлены амбиполярной проводимостью и формой передаточной характеристики графенового транзистора.

г) Рекомендации по выбору оптимальных параметров и режима работы транзистора для аналоговых применений

Выбор режима и параметров работы графенового транзистора зависит от области применения устройства на его основе. Если требуется преобразовать гармонический сигнал в гармонический без искажений (например, в удвоителе частоты или смесителе), оптимальным режимом является работа при электростатическом запираии канала, т. е. при одновременном выполнении соотношений $V_D > V_{DSAT}$ ($V_G < V_D/2$) и $V_{D0} > V_{DSAT}$ ($a < 1$; равносильно $V_G < v_{opt}L/\mu_0$). В этом случае передаточная характеристика квад-

ратична. Частота отсечки при электростатическом запираии канала снижается (см. рис. 6).

Для достижения максимальной частоты отсечки следует работать при насыщении скорости, т.е. одновременном выполнении соотношений $V_D > V_{D0}$ ($V_D > 2v_{opt}L/\mu_0$) и $V_{DSAT} > V_{D0}$ ($V_G > v_{opt}L/\mu_0$), или при малом смещении на стоке $V_D \ll V_G$ ($V_D \ll V_G$). Ветви передаточной характеристики при этом линейны. Такой режим оптимален, например, для двухполупериодного выпрямителя, а также для схемы двухпозиционной фазовой манипуляции. Следует отметить, что рост напряжения V_0 , определяемого ёмкостями C_{ii} и C_{ox} (рис. 13), ведёт к сглаживанию передаточной характеристики в окрестности точки электронейтральности.

Заключение

Основной научный результат диссертации заключается в создании диффузионно-дрейфовой компактной модели графенового полевого транзистора с двойным затвором, основанной на аналитическом решении уравнения непрерывности тока в канале и пригодной для использования в составе SPICE-подобных САПР.

Основные теоретические результаты

- 1) Разработана математическая модель электростатики графенового полевого транзистора с двойным затвором, учитывающая влияние поверхностных состояний и позволяющая получать в аналитическом виде зависимости концентрации носителей и уровня Ферми в графене от напряжений на затворах.
- 2) Разработана математическая модель вольт-амперных характеристик графенового полевого транзистора в диффузионно-дрейфовом приближении, учитывающая режимы насыщения скорости и электростатического запираии канала.
- 3) Показана роль несобственной проводимости в графене и предложены математические модели генерационного тока в графеновом транзисторе.

Основные практические результаты

- 1) Разработанная модель графенового полевого транзистора с двойным затвором адаптирована для использования в средствах автоматизированного проектирования в качестве компактной модели.
- 2) Компактная модель реализована в виде программного средства на языке Verilog-A с целью встраивания в SPICE-подобные САПР. Разработанное программное средство зарегистрировано в Федеральном институте промышленной собственности.
- 3) Предложены рекомендации по выбору оптимальных параметров и режима работы графенового транзистора для аналоговых применений.

- 4) Разработанная модель позволяет оценивать влияние геометрических и электрофизических параметров графенового транзистора на его частоту отсечки и на характер насыщения тока.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

- 1) А. А. Цельковский, И. А. Данилов, Г. И. Зебрев. Компактная модель графенового полевого транзистора на языке Verilog-A // Журнал «Программные продукты и системы» № 1 (97). – 2012. – С. 122-126.
- 2) G. Zebrev, A. Tselykovskiy, V. Turin. Physics-Based Compact Modeling of Double-Gate Graphene Field-Effect Transistor Operation // 28th International Conference on Microelectronics (MIEL) Proceedings. – 2012. – pp. 237-240. – ISBN 978-1-4673-0237-1.
- 3) А. А. Цельковский, И. А. Данилов, Г. И. Зебрев. Моделирование аналоговых устройств графеновой электроники // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2012. Сборник трудов под общей редакцией академика РАН А. Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2012. – С. 143-146.

Статьи и материалы конференций

- 4) Г. И. Зебрев, Е. А. Зоткин, А. А. Цельковский, Е. В. Мельник. Моделирование полевого транзистора на основе графеновой наноленты // Микроэлектроника и наноинженерия: Международная научно-техническая конференция (Зеленоград, 25-27 ноября 2008): тезисы докладов. – Московский гос. ин-т электронной техники (техн. ун-т). – М., 2008.
- 5) А. А. Цельковский, Е. В. Мельник, Г. И. Зебрев. Моделирование вольт-амперных характеристик графенового полевого транзистора с учётом эффекта насыщения скорости носителей // Научная сессия МИФИ – 2009. Сборник научных трудов. – 2009. – XII Московская международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «Молодёжь и наука». Тезисы докладов. Часть 1. – С. 134-135.
- 6) Е. В. Мельник, А. А. Цельковский, Г. И. Зебрев. Моделирование графенового полевого транзистора с двойным затвором // Научная сессия МИФИ – 2009. Сборник научных трудов. – 2009. – XII Московская международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «Молодёжь и наука». Тезисы докладов. Часть 1. – С. 136-137.
- 7) Г. И. Зебрев, Е. А. Зоткин, А. А. Цельковский, Е. В. Мельник. Моделирование графеновых полевых транзисторов на основе структур с широким каналом и нанолент // II Всероссийская конференция «Мно-

- гомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях». Сборник тезисов докладов. – М.: МИФИ, 2009. – С. 177-178.
- 8) А. А. Цельковский, Е. В. Мельник. Вольт-амперные характеристики графенового полевого транзистора с учётом эффекта насыщения дрейфовой скорости // 16-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2009»: Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2009. – С. 68.
 - 9) G. I. Zebrev, E. A. Zotkin, A. A. Tselykovskiy, E. V. Melnik, V. O. Turin. Bulk and Nanoribbon Graphene Field-Effect Transistor Modeling // International Conference “Micro- and nanoelectronics – 2009” (ICMNE–2009). – Book of abstracts. – O3-10, 2009.
 - 10) А. А. Цельковский, Е. В. Мельник. Метод извлечения плотности поверхностных состояний и квантовой ёмкости в транзисторных наноструктурах на основе графена // Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов в области нанотехнологий и наноматериалов. Сборник студенческих научных работ. – НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 178-183.
 - 11) А. А. Цельковский, Г. И. Зебрев. Влияние ударной ионизации и сопротивления стока на вольт-амперные характеристики графеновых полевых транзисторов // Научная сессия МИФИ – 2011. Сборник научных трудов. – Ч. 1. XIV Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «Молодёжь и наука» – М.: МИФИ, 2011. – С. 182-184.
 - 12) Е. В. Мельник, А. А. Цельковский, Г. И. Зебрев. Метод извлечения плотности поверхностных состояний и квантовой ёмкости в графеновых транзисторных наноструктурах // Научная сессия МИФИ – 2011. Сборник научных трудов. – Ч. 1. XIV Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «Молодёжь и наука» – М.: МИФИ, 2011. – С. 180-182.
 - 13) G. I. Zebrev, E. V. Melnik, A. A. Tselykovskiy. Quantum Capacitance vs Chemical Potential Universal Curve and Interface Trap Parameter Extraction in Graphene Gated Structures // Condensed Matter: Mesoscale and Nanoscale Physics. – arXiv: 1011.5127v1. – 2010.
 - 14) Г. И. Зебрев, Е. А. Зоткин, Е. В. Мельник, А. А. Цельковский. Плотность поверхностных состояний и квантовая ёмкость в графеновых транзисторах: метод разделения и их влияние на токовые характеристики // Научная сессия МИФИ – 2011. Сборник научных трудов. – Т. 1. – М.: МИФИ, 2011. – С. 121.
 - 15) А. А. Цельковский. Генерация носителей заряда в канале графенового транзистора при сильных тянущих электрических полях // Сборник тезисов секции «Физика» Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных по фундаментальным наукам «Ломоно-

- сов–2011»: в 2 т. / Физический факультет МГУ. – Москва, 2011. – Т. 2. – С. 90–92.
- 16) G. I. Zebrev, E. V. Melnik, A. A. Tselykovskiy. Influence of Interface Traps and Electron-Hole Puddles on Quantum Capacitance and Conductivity in Graphene Field-Effect Transistors // *Condensed Matter: Mesoscale and Nanoscale Physics*. – arXiv: 1011.5127v2. – 2011.
 - 17) А. А. Цельковский, Г. И. Зебрев. Графеновый транзистор с двойным затвором // *Сборник трудов по тематическому направлению развития ННС «Нанoeлектроника»*. – М.: ВНИИТЭ, 2011. – С. 137.
 - 18) А. А. Цельковский, И. А. Данилов, М. С. Горбунов, Д. К. Батманова, А. А. Ивлев, Г. И. Зебрев. Моделирование аналоговых устройств амбиполярной графеновой электроники // *Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА. Материалы научно-технической конференции*. – М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2011. – С. 166-169.
 - 19) А. А. Цельковский, И. А. Данилов, Г. И. Зебрев. Разработка компактной модели графенового полевого транзистора на языке Verilog-A // *Математическое и компьютерное моделирование систем: теоретические и прикладные аспекты. Труды НИИСИ РАН*. – Т. 1. – № 2. – М., НИИСИ РАН, 2011. – С. 35-40.
 - 20) А. А. Цельковский, Д. К. Батманова, Г. И. Зебрев. Компактная модель графенового транзистора с двойным затвором, предназначенная для проектирования высокочастотных схем // *Научная сессия МИФИ – 2012. Сборник научных трудов*. – 2012. – XV Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «Молодёжь и наука». Тезисы докладов. Часть 1. – С. 89-90.
 - 21) А. А. Цельковский, И. А. Данилов, Г. И. Зебрев. Графеновая схемотехника: моделирование аналоговых устройств // *Научная сессия МИФИ – 2012. Сборник научных трудов*. – 2012. – XV Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «Молодёжь и наука». Тезисы докладов. Часть 1. – С. 91-92.
 - 22) G. I. Zebrev, A. A. Tselykovskiy, D. K. Batmanova, E. V. Melnik. Small-Signal Capacitance and Current Parameter Modeling in Large-Scale High-Frequency Graphene Field-Effect Transistors // *Condensed Matter: Mesoscale and Nanoscale Physics*. – arXiv: 1112.3856v1. – 2011.
 - 23) А. А. Цельковский, И. А. Данилов, Г. И. Зебрев, Д. К. Батманова. Амбиполярная графеновая электроника: моделирование устройств и перспективы // *Научная сессия МИФИ – 2012. Сборник научных трудов*. – Т. 1. – М.: МИФИ, 2012. – С. 138.
 - 24) Г. И. Зебрев, А. А. Цельковский, Д. К. Батманова, Е. В. Мельник. Моделирование элементов высокочастотной графеновой электроники // *Научная сессия МИФИ – 2012. Сборник научных трудов*. – Т.1. – М.: МИФИ, 2012. – С. 70.