

## ЭЛЕКТРОННАЯ И ИОННАЯ ЭМИССИЯ

УДК 537.533.2

# БЕЗДИССИПАТИВНЫЙ ТРАНСПОРТ И ПОЛЕВАЯ ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В 2D УГЛЕРОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМ БАРЬЕРОМ<sup>1</sup>

© 2023 г. Р. К. Яфаров<sup>а</sup>, \*, Н. О. Шабунин<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
ул. Зеленая, 38, Саратов, 410019 Российская Федерация

\*E-mail: pirpc@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.05.2023 г.

После доработки 17.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Исследовано влияние толщины туннельно тонкого обедненного носителями заряда углеродного слоя в обогащенной некристаллической углеродной матрице на бездиссипативный транспорт и полевою эмиссию электронов. Установлено, что “геометрическое” повышение собственной энергии электронов увеличивает прозрачность потенциальных барьеров для бездиссипативного транспорта в гетероструктуре и на границе твердое тело–вакуум. Показано, что введение в углеродную матрицу квантового барьера увеличивает поперечный ток и выпрямительные свойства гетероструктур, повышает плотности полевых токов и крутизну вольтамперных характеристик.

DOI: 10.31857/S0033849423100200, EDN: DMPKGT

### ВВЕДЕНИЕ

Создание элементной базы вакуумной микроэлектроники и сильноточных автоэмиссионных катодов (АЭК) для устройств генерации сигналов сверхвысокой частоты (СВЧ) и субтерагерцового диапазонов является в настоящее время актуальной задачей, поскольку приборы становятся радиационно-стойкими и обладают сверхвысоким быстродействием. Однако их созданию препятствует ряд фундаментальных проблем. Они связаны, с одной стороны, с получением устойчивой морфологии поверхности твердых тел к воздействию сильных электрических полей и температурных градиентов в условиях технического вакуума, а с другой – с повышением прозрачности потенциальных барьеров на границе твердое тело–вакуум, которое достигается увеличением коэффициентов усиления электрического поля на эмитирующих выступах АЭК. Исследования по этим направлениям следуют из практического опыта использования АЭК и классической теории Фаулера и Нордгейма. Однако, как показывает опыт и анализ результатов многочисленных исследований, решение проблемы, связанной с получением долговременной и стабильной сильноточной полевой эмиссии

электронов, остается открытым. Это свидетельствует о том, что традиционные пути исследования кардинального решения проблемы не дают. Одним из наиболее перспективных материалов, который может быть использован для получения сильноточных АЭК, являются нанокompозитные углеродные пленочные структуры [1–3].

В работе [4] показано, что в низкоразмерных углеродных 2D-гетероструктурах с различным электронным обогащением слоев уменьшение толщины обедненного слоя до величины, сравнимой с длиной волны де Бройля, усиливает их выпрямительные свойства и увеличивает плотности полевых токов катодных матриц на их основе. Увеличение полевых токов достигается при низкой крутизне вольтамперной характеристики (ВАХ) и достаточно высоких порогах активации эмиссии. Это ограничивает использование полевых источников электронов в приборах вакуумной микроэлектроники СВЧ- и субтерагерцового диапазонов.

Цель работы – исследование и разработка способов повышения прозрачности потенциальных барьеров для бездиссипативного транспорта в углеродных 2D-гетероструктурах твердотельной и эмиссионной микроэлектроники СВЧ- и субтерагерцового диапазонов.

<sup>1</sup> Работа удостоена премии на 19-м конкурсе молодых ученых имени Ивана Анисимкина.

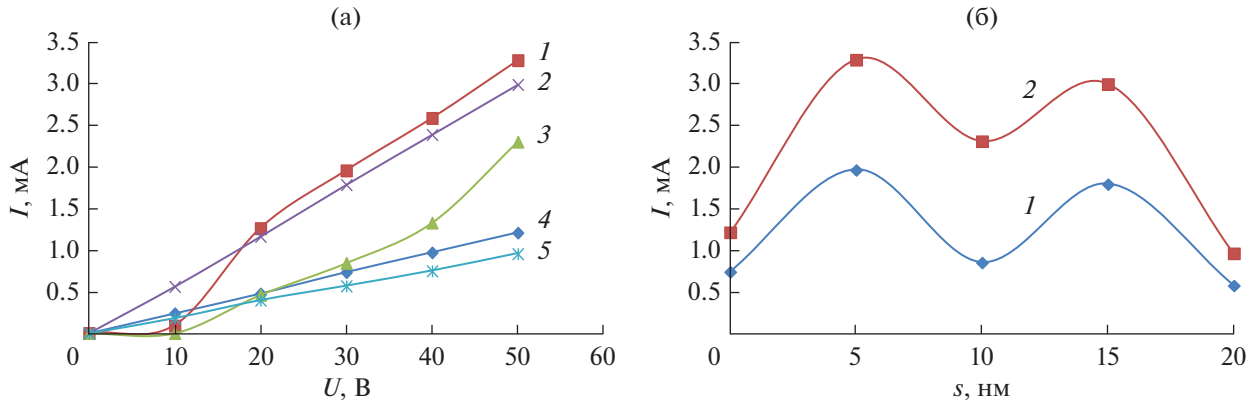


Рис. 1. ВАХ (а) в гетероструктурах с различными толщинами обедненных слоев, нм: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 20; 5 – 0; поперечные токи (б) при напряжениях 30 (1) и 50 В (2).

## 1. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Трехслойные углеродные гетероструктуры с различными толщинами и электронным обогащением слоев получали осаждением с помощью микроволновой плазмы паров этанола низкого давления [5]. В качестве нижнего и верхнего слоев гетероструктуры были использованы обогащенные электронами углеродные пленки. Толщина основания гетероструктур составляла 0.2 мкм, толщина промежуточного обедненного электронами углеродного слоя в различных гетероструктурах изменялась в интервале от 5 до 20 нм, толщина верхнего обогащенного слоя была фиксированной и составляла 120 нм. Подключение гетероструктуры к источнику питания при статических электрических измерениях осуществлялось через никелевые контактные площадки, осажденные термическим испарением в вакууме на верхних и нижних обогащенных слоях гетероструктуры. Исследования автоэмиссионных свойств проводили в условиях высокого вакуума ( $10^{-6}$  Па) на диодной структуре,

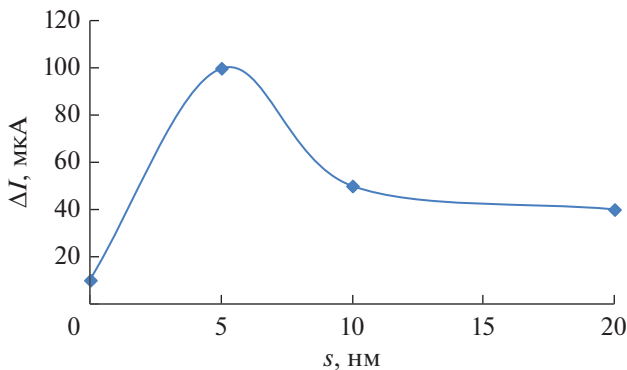


Рис. 2. Зависимость от толщины обедненного слоя разности поперечных токов через гетероструктуры при прямой и обратной полярности напряжения 50 В.

способной изменять расстояние между электродами с точностью до 1 мкм по методике, изложенной в [6]. Пороги активации автоэмиссии определяли по напряженности электрического поля в импульсе длительностью 10 мкс, при которой полевые токи составляли 5  $\mu A$ .

На рис. 1, 2 приведены результаты статических электрических измерений ВАХ трехслойных углеродных структур при комнатной температуре. При толщинах обедненных слоев 5 и 10 нм поперечные токи в гетероструктурах при увеличении напряжения от 0 до 10 В были существенно меньше, чем при других толщинах и при их отсутствии. При больших напряжениях они интенсивно увеличивались. Наиболее сильное и быстрое увеличение тока при увеличении напряжения выше 10 В наблюдалось для толщины 5 нм. При 20 В такой ток превышал более чем в три раза ток в структуре без обедненного носителями углеродного слоя. При напряжениях 30 и 50 В поперечные токи имеют максимумы при толщинах обедненного слоя 5 и 15 нм. Разности поперечных токов при прямой и обратной полярностях напряжения, характеризующие выпрямительные свойства гетероструктур, зависят от напряжения между стоком и истоком и имеют максимум при толщине обедненного слоя 5 нм. При напряжении 50 В разность между прямым и обратным токами при толщине обедненного слоя 5 нм, по сравнению с толщиной 100 нм, увеличилась от 9 до 140  $\mu A$ , а при напряжении 100 В – от 22 до 220  $\mu A$ .

Плотности полевых токов при использовании промежуточного туннельно тонкого углеродного слоя обедненного носителями заряда увеличиваются в 1.5...2.5 раза (рис. 3, 4). Так же как при статических измерениях, наибольший полевой ток наблюдается для толщины обедненного слоя 5 нм. Он реализуется при наименьшем пороге начала полевой эмиссии и наибольшей крутизне ВАХ. С увеличением толщины обедненного слоя пороги

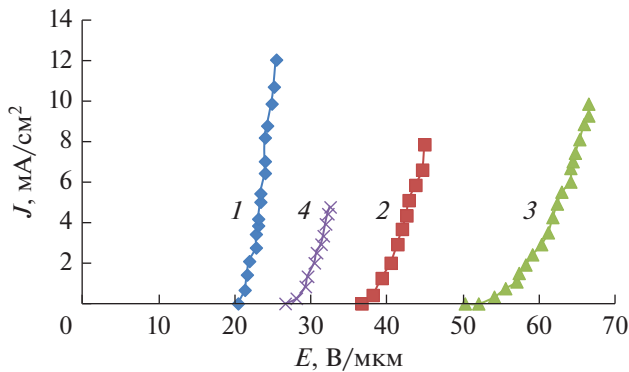


Рис. 3. Полевые ВАХ углеродных 2D-гетероструктур при различной толщине обедненного слоя, нм: 5 (1), 10 (2), 15 (3) и 0 (4).

начала полевой эмиссии увеличиваются, а крутизна ВАХ уменьшается.

В рассматриваемых гетероструктурах туннельно тонкие слои обедненных углеродных пленок, являющиеся по своей природе полуметаллами, при комнатной температуре меньше длины волны де Бройля, которая для полупроводниковых структур составляет от 25 до 100 нм, а для металлов на порядок меньше. В планарных гетероструктурах с макроразмерными толщинами верхнего и нижнего обогащенных слоев они представляет собой типичные квантовые барьеры (КБ). При приложении электрических полей это позволяет электронам туннелировать сквозь квантоворазмерные слои, коэффициент прозрачности  $D$  которых тем выше, чем меньше их толщина  $l$  [7]:

$$D \approx \exp \left[ -\frac{2}{h_0} \int_0^l \sqrt{2m(U - W)} dx \right], \quad (1)$$

где  $h = 6.62 \times 10^{-34}$  Дж с – постоянная Планка,  $m$  – масса туннелирующей частицы,  $U$  – потен-

циальная энергия,  $W$  – энергия электрона, падающего на барьер.

С увеличением толщины квантоворазмерных пленочных слоев нулевые уровни энергии электронов  $E_1$  уменьшаются обратно пропорционально ее квадрату. Оценки показывают, что вследствие размерного квантования  $E_1$  в 2D-структурах с толщинами обедненных слоев 5, 10 и 15 нм составляют соответственно около 0.2, 0.05 и 0.02 эВ. Наибольшие коэффициенты туннелирования в квантоворазмерных структурах реализуются в случаях, когда уровни энергии близки к средней кинетической энергии электронов эмиттеров, которая при комнатной температуре составляет около 0.025 эВ.

С увеличением напряженности внешнего поля энергии основных состояний электронов в низкоразмерных структурах снижаются, а кинетическая энергия электронов возрастает. При сближении их значений до величины порядка  $k_0 T$  токи сквозь гетероструктуры интенсивно увеличиваются. Вследствие более низкой “геометрической” туннельной прозрачности зависимость тока от напряжения при толщине слоя 10 нм и небольших напряженностях электрического поля более слабая, чем для толщины 5 нм. При увеличении напряжения влияние поля усиливается и ток ускоренно возрастает (рис. 1а, кривая 2).

При ширине квантового барьера 15 нм нулевая энергия близка к средней кинетической энергией электронов. Возникает условие, близкое к резонансному туннелированию, при котором поперечный ток через гетероструктуру с увеличением напряжения увеличивается практически линейно (рис. 1а, кривая 3). Для толщины обедненного слоя 20 нм и больше эффект размерного квантования отсутствует. Об этом свидетельствует зависимость между током и напряжением, близкая к закону Ома, со значительно более низким, по сравнению с толщиной 15 нм, коэффициентом

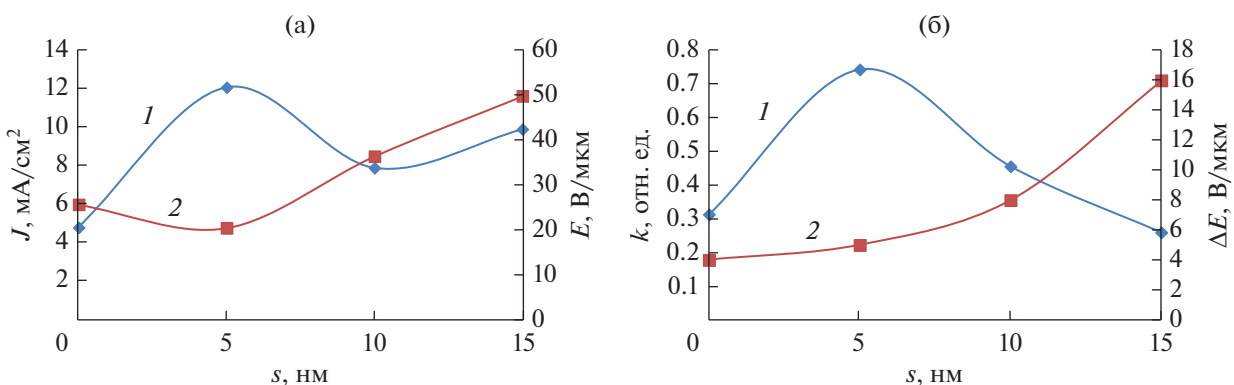


Рис. 4. Зависимости от толщины обедненных слоев углеродной гетероструктуры: а – плотностей полевых токов ( $J$ ) и порогов активации эмиссии (2), б – крутизны ВАХ (1) и интервалов допустимых напряженностей электрических полей (2).

пропорциональности, а также низкий поперечный ток, который меньше, чем в углеродной гетероструктуре без обедненного слоя.

При полевой эмиссии в сильных импульсных электрических полях высокая нулевая энергия электронов в гетероструктуре с шириной КБ 5 нм увеличивает их кинетическую энергию и поперечный ток, при этом уменьшается порог начала полевой эмиссии и увеличивается в соответствии с (1) коэффициент прозрачности потенциального барьера (ПБ) на границе твердое тело–вакуум. Увеличение прозрачности происходит за счет уменьшения разности между высотой ПБ (работой выхода электронов) и собственной энергией туннелирующего электрона. Благодаря бездиссипативному транспорту электронов процессы, связанные с развитием ударной ионизации атомов в углеродной гетероструктуре, замедляются. При небольшом, по сравнению с одиночным обогащенным слоем, увеличении интервала допустимых напряженностей внешнего электрического поля увеличиваются в разы плотность полевого тока и крутизна ВАХ (рис. 4).

При увеличении толщины обедненного слоя увеличиваются поперечные сопротивления гетероструктур и повышаются пороги активации полевой эмиссии. Вследствие снижения  $E_1$  уменьшаются прозрачности ПБ на границе твердое тело–вакуум, повышаются интервалы допустимых напряженностей электрических полей и уменьшается крутизна ВАХ. Повышение порогов активации эмиссии и допустимых напряженностей внешних полей при более низкой прозрачности ПБ увеличивает в гетероструктуре напряженность электрического поля и ускоряет развитие процессов ударной ионизации. Для обедненного слоя толщиной 10 нм, по сравнению с толщиной 5 нм, это приводит к разрушению гетероструктуры при меньшей плотности полевого тока. Аналогично развиваются процессы при ширине КБ 15 нм. Низкая нулевая энергия электронов уменьшает прозрачности обедненного слоя и вакуумного промежутка, снижает составляющую тока, связанную с бездиссипативным транспортом электронов в гетероструктуре, и увеличивает порог активации эмиссии. Возросшее, по сравнению с меньшими толщинами обедненных слоев, рассеяние электронов на дефектах структуры замедляют скорость нарастания тока и темп развития ударной ионизации атомов в приповерхностном углеродном слое при увеличении допустимой напряженности внешнего поля. Это позволяет, по сравнению с толщиной слоя 10 нм,

увеличить полевой ток, но при более низкой крутизне ВАХ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В углеродных гетероструктурах без использования КБ в виде туннельно тонких обедненных носителями заряда слоев механизмы бездиссипативного транспорта и повышения прозрачности потенциального барьера на границе твердое тело–вакуум за счет “геометрического” повышения собственной энергии электронов отсутствуют. Полевая эмиссия осуществляется только за счет уменьшения высоты и толщины ПБ на границе твердое тело–вакуум для туннелирования электронов с энергиями, близкими к стационарному “морю Ферми”. Напряженность внешнего электрического поля для этого, как известно, составляет  $10^6$ – $10^7$  В/см, что весьма близко к электрической прочности массивных материалов и, тем более, пленочных структур на их основе. Эти факторы определяют низкие допустимые диапазоны внешних электрических полей и полевые токи.

“Геометрическое” увеличение собственной энергии электронов и формирование условий резонансного туннелирования в углеродных гетероструктурах с квантоворазмерным обедненным слоем в сильных импульсных электрических полях микросекундной длительности увеличивает поперечные токи и повышает прозрачность потенциального барьера на границе твердое тело–вакуум без увеличения энергетической нагрузки на материал автокатода. Это позволяет в разы увеличить плотность полевого тока и крутизну ВАХ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фурсей Г.Н., Поляков М.А., Кантонистов А.А. и др. // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 6. С. 71.
2. Panda K., Hyeok J.J., Park J.Y. et al. // Sci. Rep. 2007. № 7. P. 16325.
3. Sobaszek M., Siuzdak K., Ryl J. et al. // J. Phys. Chem. C. 2017. V. 121. № 38. P. 20821.
4. Яфаров Р.К., Шабунин Н.О. // Микроэлектроника. 2023. Т. 52. № 1. С. 71.
5. Яфаров Р.К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. М.: Физматлит, 2009.
6. Яфаров Р.К. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 9. С. 3.
7. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики. М.: Наука, 1983.