

ЭЛЕКТРОННАЯ И ИОННАЯ ЭМИССИЯ

УДК 537.533.2

БЕЗДИССИПАТИВНЫЙ ТРАНСПОРТ И ПОЛЕВАЯ ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В 2D УГЛЕРОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМ БАРЬЕРОМ¹

© 2023 г. Р. К. Яфаров^а, *, Н. О. Шабунин^а

^а 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 полевую 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.

¹ Работа удостоена премии на 19-м конкурсе молодых ученых имени Ивана Анисимкина.

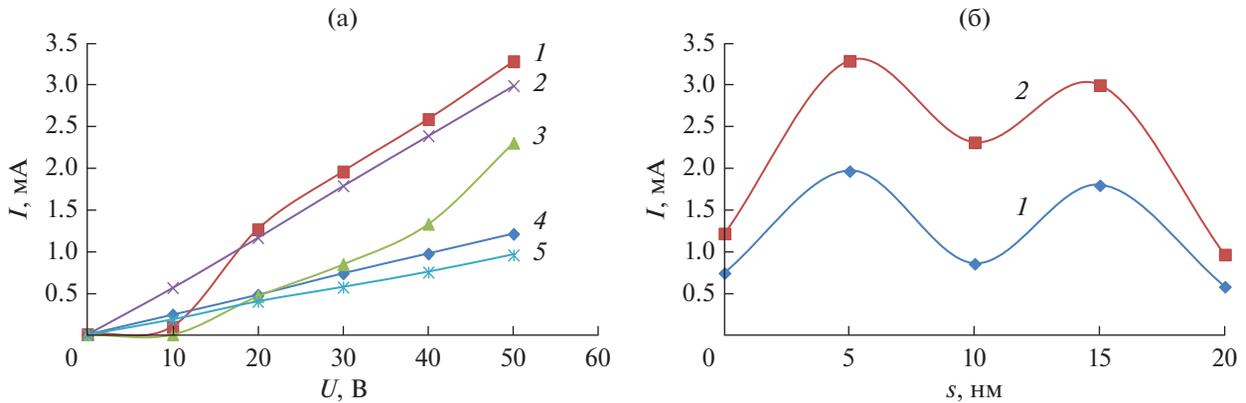


Рис. 1. ВАХ (а) в гетероструктурах с различными толщинами обедненных слоев, нм: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 20; 5 – 0; поперечные токи (б) при напряжениях 30 (1) и 50 В (2).

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,

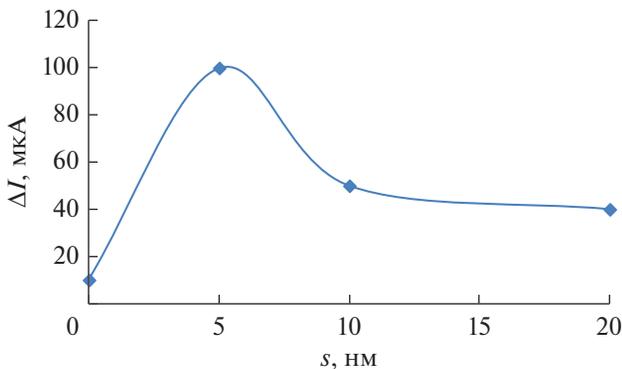


Рис. 2. Зависимость от толщины обедненного слоя разности поперечных токов через гетероструктуры при прямой и обратной полярности напряжения 50 В.

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 μA.

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 мкА, а при напряжении 100 В – от 22 до 220 мкА.

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

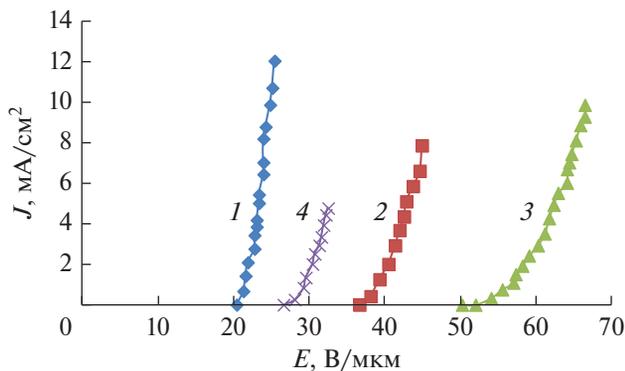


Рис. 3. Полевые ВАХ углеродных 2D-гетероструктур при различной толщине обедненного слоя, нм: 5 (1), 10 (2), 15 (3) и 0 (4).

начала полевой эмиссии увеличиваются, а крутизна ВАХ уменьшается.

В рассматриваемых гетероструктурах 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

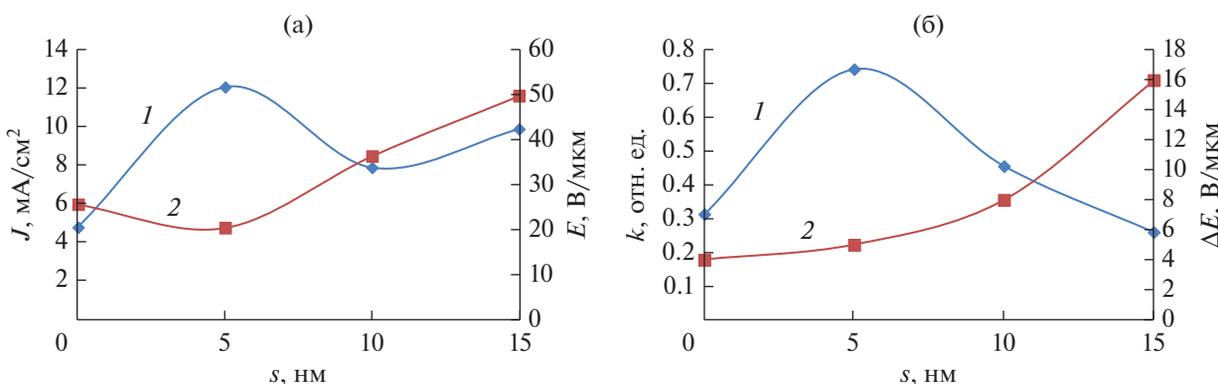


Рис. 4. Зависимости от толщины обедненных слоев углеродной гетероструктуры: а – плотностей полевых токов (J) и порогов активации эмиссии (2), б – крутизны ВАХ (J) и интервалов допустимых напряженностей электрических полей (2).

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 автокатада. 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.