Письма в ЖЭТФ, том 106, вып. 9, с. 587 – 590

Влияние топологии наноразмерного острийного графен/SiC эмиттера на образование колец в сильных электрических полях

А. М. Светличный, И. Л. Житяев[1)]

Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, 347922 Таганрог, Россия

Поступила в редакцию 10 августа 2017 г.

После переработки 6 сентября 2017 г.

Проведено моделирование распределения напряженности электрического поля, плотности тока и траекторий эмиттированных электронов с учетом топологии наноразмерного острийного графен/SiC эмиттера. Анализ полученных моделей показал усиление напряженности электрического поля и плотности тока на концентрических наноразмерных выступах по периферии эмиттера. Показано, что наноразмерные выступы являются источниками интенсивной эмиссии электронов, наложение траекторий которых приводит к появлению нескольких колец на эмиссионном изображении.

DOI: 10.7868/S0370274X17210123

Введение. Актуальной проблемой современной автоэмиссионной микро- и наноэлектроники является разработка приборов и устройств различного назначения с высокой стабильностью характеристик в сильных электрических полях при высокой плотности тока и возможностью работы в терагерцовом диапазоне частот. Карбид кремния в качестве исходного материала для этих целей обладает рядом значительных характеристик: высокой химической стойкостью, теплопроводностью, механической прочностью и устойчивостью к ионизирующим излучениям. Пленки графена на поверхности эмиссионных структур из карбида кремния также перспективны, так как, обладая уникальными электрофизическими характеристиками, снижают работу выхода электронов из SiC. Важным параметром является технологичность получения графеновых пленок на подложках SiC большого диаметра путем термической деструкции карбида кремния в вакууме. Пленки графена, полученные этим методом, имеют малую дефектность, оптически прозрачны и обладают высокой адгезией к карбиду кремния [1–4].

Одним из основных факторов, влияющих на стабильность эмиссии электронов, является деградация автокатодов в сильных электрических полях при высокой плотности тока, сопровождающаяся изменением геометрии эмиттирующей поверхности. Исследованиями [5–7] факторов, влияющих на стабильность эмиссии из вольфрамовых катодов, и условий их разрушения при большой плотности тока установлено, что в предпробойном режиме наблюдается появление яркого кольца по периметру эмиссионного изображения и самопроизвольное возрастание эмиссионного тока при постоянном напряжении в импульсе. Возрастание эмиссионного тока авторы объясняли переходом автоэлектронной эмиссии в термоэлектронную, приводящую к разрушению катода.

Кольцо вокруг первичного автоэмиссионного изображения наблюдали также в плоскопараллельных структурах, имеющих микровыступы на поверхности катода [8]. Условия появления кольца авторы не относят к предпробойным режимам и объясняют вторичными электронами, эмиттированными анодом, которые под действием электрического поля возвращаются на анод.

Образование кольца на эмиссионном изображении наблюдалось и при исследовании массива углеродных нанотрубок в процессе их роста при температуре 700 °C [9]. Авторы работы связывают появление кольца с автотермоэлектронными процессами в нанотрубках, возникающими при дополнительном резистивном саморазогреве нанотрубок.

Объяснению эффекта кольца в углеродных нанотрубках посвящена работа [10]. В ней была развита идея, изложенная в работе [11], о причине появления кольца за счет ограничения эмиссии с вершины катода областью пространственного заряда и увеличения плотности тока на переферии эмиттера из-за сгущения траекторий электронов, испускаемых с боковой поверхности эмиттера. В исследовании численно рассчитана плотность тока по периметру нанотрубки с учетом температуры эмиттера и траекторий эмиттированных электронов. Появление кольца авторы объясняют самофокусировкой электронов, испускаемых боковой поверхностью нанотрубки, сопровождающееся высокотемпературным нагревом.

1)e-mail: izhityaev@sfedu.ru

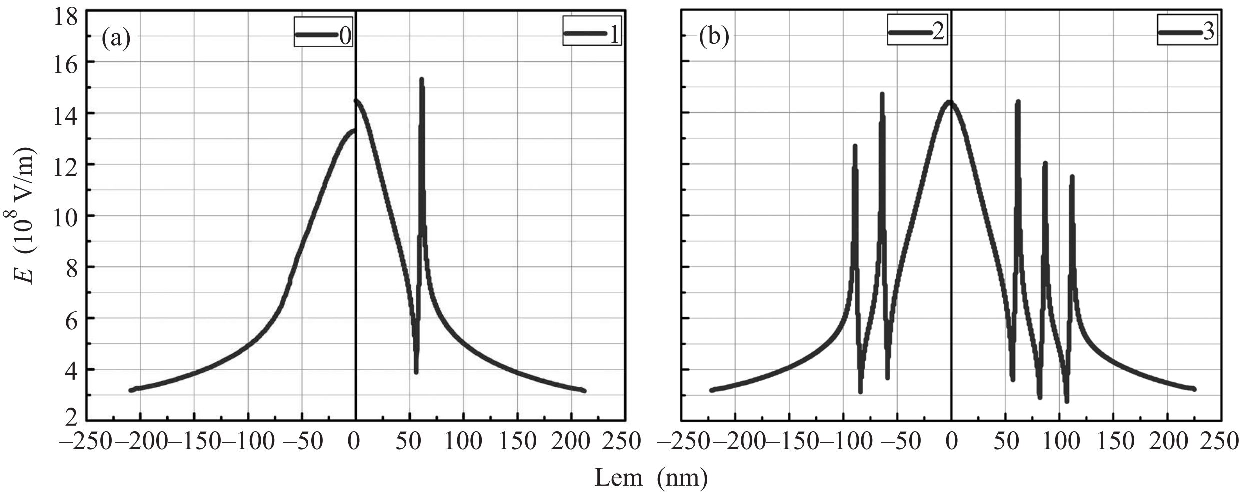

Рис. 1. Распределение напряженности электрического поля E по эмиссионной поверхности катода Lem

Исследованиями молибденовых, танталовых, ниобиевых, рениевых и карбидовольфрамовых катодов было обнаружено появление нескольких колец в предпробойном режиме [12–16]. Существует предположение, что несколько колец может образовываться за счет эмиссии с дефектных участков с более высоким электрическим сопротивлением на боковой поверхности эмиттера [10]. В работе [11] говорится, что появление нескольких колец на эмиссионном изображении может указывать на дифракционную природу их возникновения. Авторы [17] связывают появление нескольких колец с распространением упругих волн с вертикальной поляризацией вдоль границы тонкого слоя квазижидкого металла на поверхности эмиттера. В настоящее время природа появления нескольких колец на эмиссионном изображении не имеет объективного объяснения.

В данной работе получены новые результаты, объясняющие влияние неоднородности поверхности наноразмерного острийного эмиттера на появление нескольких колец на эмиссионном изображении в сильных электрических полях. В предпробойном режиме образование кольца по периметру изображения эмиттера на аноде, возможно, связано с локализацией напряженности поля на периферийной части острия вследствие изменения геометрии эмиттирующей поверхности. Особенно это наглядно видно в эмиссионных структурах с катодом в форме лезвия, когда напряженность поля на краях в несколько раз превышает значения в центре. В острийных эмиттерах максимальная напряженность поля изначально концентрируется в верхней центральной точке. В результате частичного удаления материала катода в сильных электрических полях и термополевой перестройки на поверхности острия формируются микро- и нановыступы [14, 18–21]. Из теневых фотографий эмиттера следует, что острие принимает форму усеченного конуса или пирамиды с концентрическими ступеньками [22–24]. Локализованное на этих участках электрическое поле с максимальной напряженностью способствует увеличению плотности тока и высокоинтенсивной эмиссии электронов, уплотнение пучка которых на аноде проявляется в виде колец на эмиссионном изображении.

Моделирование и результаты. Известно, что кольца на эмиссионном изображении наблюдают в условиях сильноточных электрических полей. С целью выявления соответствующих условий решалась задача определения напряженности электрического поля и плотности эмиссионного тока по поверхности эмиттера. Так как в сильных электрических полях при высокой плотности тока происходит модификация эмиссионной поверхности, в данной работе проведена количественная оценка напряженности поля и плотности тока с учетом неоднородности эмиссионной поверхности, подтверждающая соответствие сильноточным условиям эмиссии. Далее выполнен расчет траекторий эмиттированных электронов в межэлектродном промежутке с эмиттером острийного типа и полусферическим анодом. В работе использовано программное обеспечение для мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics.

Для теоретических расчетов применены геометрические параметры экспериментальных образцов наноразмерных эмиттеров из графен/SiC как материала с низкой работой выхода [3]. Толщина пленки графена на поверхности карбида кремния составляла 3 нм, что соответствует порядка 10 слоям. Были рассмотрены несколько моделей острийного эмиттера. Изначально катод с высотой 1 мкм и углом накло-

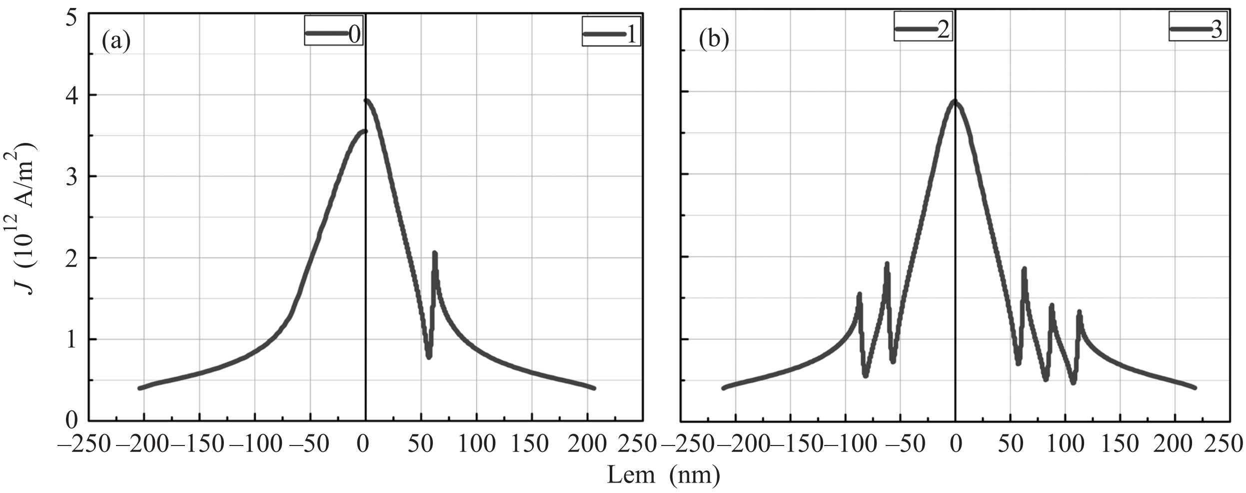

Рис. 2. Распределение плотности тока J по эмиссионной поверхности катода Lem

на боковой поверхности относительно вертикали 10° имел идеальное полусферическое окончание с радиусом 50 нм, радиус полусферического анода составлял 350 нм. Затем геометрия эмиттирующей области по переферии дополнялась от одной до трех наноразмерных концентрических ступеней высотой 20 нм и шириной 5 нм.

В связи с осевой симметрией эмиттера полученные результаты моделирования представлены на рис. 1–3 попарно: (a) – для случаев без выступа и с одним выступом, (b) – с двумя и тремя выступами, где 0 – без выступа, 1–3 – соответствуют количеству выступов. Для наноуглеродных материалов характерна низкопороговая эмиссия при напряженности поля 10^6–10^7 В/м. Полученные по результатам моделирования значения напряженности электрического поля для наноразмерного графен/SiC эмиттера превышают пороговые на несколько порядков. Распределение напряженности электрического поля вдоль эмиттирующей поверхности катода представлено на рис. 1. Поле высокой напряженности способствует высокой интенсивности автоэлектронной эмиссии, что подтверждают графики распределения плотности тока по эмиссионной поверхности на рис. 2. На наноразмерных выступах наблюдается усиление напряженности электрического поля и плотности тока. Плотность эмиссионного тока на вершинах концентрических ступеней в 2–3 раза выше, чем у их основания и достигает значений порядка 10^{12} А/м^2. Плотность тока и напряженность электрического поля уменьшаются на каждом выступе с увеличением их числа по переферии эмиттера. При этом напряженность поля и плотность тока увеличиваются на участке боковой поверхности эмиттера без выступов. Снижение напряженности поля на выступах может быть связано с усилением эффекта экранирования при небольших расстояниях между ними.

На рис. 3 представлены картины распределения траекторий электронов в плоскости ZOX. Следует отметить неоднородность электронного потока на аноде. Показано, что в случае эмиттера без выступов наблюдается уплотнение потоков электронов, эмиттированных с нижнего участка боковой поверхности. Обнаружено, что появление ступени по периферии эмиттера приводит к локальной компрессии электронного пучка. Наноразмерные выступы на эмиттере способствуют появлению на аноде дополнительных участков с уплотнением и разряжением пучков электронов. Увеличение числа выступов напрямую влияет на количество таких участков на аноде.

Причиной уплотнения электронного потока является образование дополнительных наноразмерных источников эмиссии на катоде, а также увеличение площади эмиссии с появлением ступени по переферии эмиттера. Происходит уплотнение потоков электронов, испускаемых горизонтальными и вертикальными участками ступеней. Подобное распределение электронных потоков объясняет наблюдение на эмиссионном изображении нескольких обособленных друг от друга колец, чередующихся по интенсивности.

Выводы. В результате проведенных исследований установлено, что напряженность электрического поля и плотность тока усиливаются на наноразмерных выступах по переферии острийного графен/SiC эмиттера. Значения плотности тока и напряженности электрического поля соразмерны значениям, полученным для наноразмерных эмиттеров на основе углеродсодержащих материалов [10]. Траектории электронов, испускаемых эмиттером без выступов,

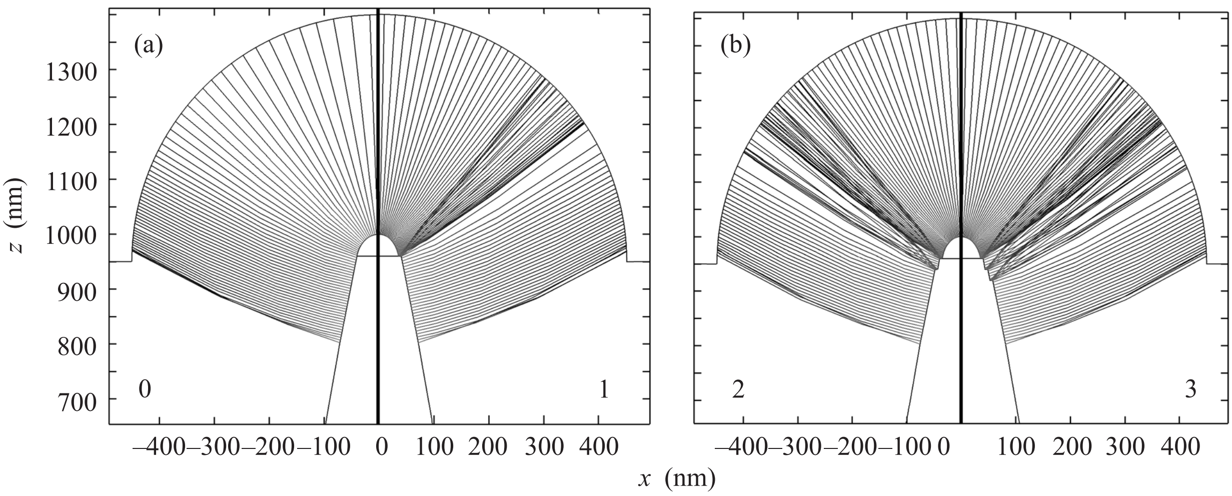

Рис. 3. Распределение потоков электронов в межэлектродном промежутке с эмиттерами различной конфигурации

согласуются с результатами для катодов острийного типа [10, 11]. Впервые показано, что на аноде происходит локализация потоков электронов, эмиттируемых с концентрических ступеней, способствующих формированию множественных колец на эмиссионном изображении. Данные результаты соответствуют автоэмиссионным картинам, полученным экспериментально с использованием сферических автоэмиссионых микроскопов-проекторов [12, 13, 15]. Предложено новое объяснение появления множественных колец на эмиссионном изображении. Механизм образования колец, рассмотренный в случае катода на основе графен/SiC, может быть распространен для эмиттеров острийного типа, изготовленных из других материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке внутреннего гранта Южного федерального университета # ВнГр-07/2017-26.

1. A. A. Lebedev, A. M. Strel'chuk, D. V. Shamshur, G. A. Oganesyan, S. P. Lebedev, M. G. Mynbaeva, and A. V. Sadokhin, Semiconductors **44**, 1389 (2010).
2. R. V. Konakova, O. F. Kolomys, O. B. Okhrimenko, V. V. Strelchuk, E. Yu. Volkov, M. N. Grigoriev, A. M. Svetlichnyi, and O. B. Spiridonov, Semiconductors **47**, 812 (2013).
3. R. V. Konakova, O. B. Okhrimenko, A. M. Svetlichnyi, O. A. Ageev, E. Yu. Volkov, A. S. Kolomiytsev, I. L. Jityaev, and O. B. Spiridonov, Semiconductors **49**, 1242 (2015).
4. R. V. Konakova, O. B. Okhrimenko, A. F. Kolomys, V. V. Strel'chuk, A. M. Svetlichnyi, O. A. Ageev, E. Yu. Volkov, A. S. Kolomiitsev, I. L. Zhityaev, and O. B. Spiridonov, J. Superhard Mater. **38**, 235 (2016).
5. W. P. Dyke and J. K. Trolan, Phys. Rev. **89**, 799 (1953).
6. W. P. Dyke, J. K. Trolan, E. E. Martin, and J. P. Barbour, Phys. Rev. **91**, 1043 (1953).
7. W. W. Dolan, W. P. Dyke, and J. K. Trolan, Phys. Rev. **91**, 1054 (1953).
8. К. Н. Никольский, А. С. Батурин, А. И. Князев, Р. Г. Чесов, Е. П. Шешин, ЖТФ **74**, 110 (2004).
9. J.-M. Bonard, M. Croci, Ch. Klinke, F. Conus, I. Arfaoui, T. Stŏckli, and A. Chatelain, Phys. Rev. B **67**, 085412 (2003).
10. M. Marchand, C. Journet, Ch. Adessi, and S. T. Purcell, Phys. Rev. B **80**, 245425 (2009).
11. А. В. Батраков, Д. И. Проскуровский, Письма в ЖТФ **25**, 57 (1999).
12. И. Л. Сокольская, Г. Н. Фурсей, Радиотехника и электроника **7**, 1474 (1962).
13. И. Л. Сокольская, Г. Н. Фурсей, Радиотехника и электроника **7**, 1484 (1962).
14. Д. Н. Кротевич, В. Е. Птицын, Г. Н. Фурсей, ЖТФ **55**, 625 (1985).
15. Г. Н. Фурсей, И. Д. Толкачева, Радиотехника и электроника **8**, 1210 (1963).
16. Г. Н. Фурсей, ЖТФ **34**, 1312 (1964).
17. В. М. Жуков, Н. В. Егоров, ЖТФ **61**, 170 (1991).
18. M. Benjamin and R. O. Jenkins, Proc. Royal Soc. A **176**, 262 (1940).
19. И. Л. Сокольская, ЖТФ **261**, 1177 (1956).
20. L. W. Swanson and L. C. Crouser, J. App. Phys. **40**, 4741 (1969).
21. В. М. Лобанов, Ю. М. Юмагузин, Письма в ЖТФ **28**, 3 (2002).
22. В. Н. Шредник, В. Г. Павлов, А. А. Рабинович, Б. М. Шайхин, Изв. АН СССР, сер. физич. **38**, 296 (1974).
23. И. Д. Вентова, Г. Н. Фурсей, А. А. Полежаев, ЖТФ **47**, 849 (1977).
24. V. G. Pavlov, Phys. Solid State **47**, 2180 (2005).