



ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 537.533.2

Углеродный пленочный нанокompозит для сильноточных полевых источников электронов

Р. К. Яфаров, В. Я. Шаныгин, Д. В. Нефедов

Яфаров Равиль Кяшшафович, доктор технических наук, заведующий лабораторией субмикронной электронно-ионной технологии, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, rigrs@yandex.ru

Шаныгин Виталий Яковлевич, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории субмикронной электронно-ионной технологии, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, vitairgun@mail.ru

Нефедов Денис Владимирович, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории субмикронной электронно-ионной технологии, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, nefedov_dv@rambler.ru

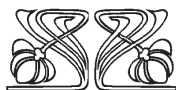
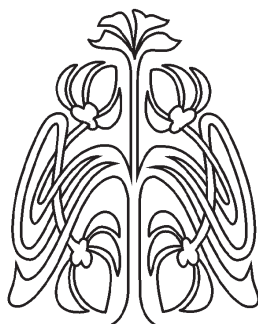
Сформулированы требования и проблемы при создании катодных материалов для сильноточной эмиссионной электроники. Показано, что для создания автокатодов с плотностью тока до 100 А/см^2 и выше необходима разработка новых наноструктурных углеродных материалов с поверхностной плотностью наноалмазных острий не менее чем $10^6\text{--}10^8 \text{ см}^{-2}$. С использованием неравновесной микроволновой плазмы низкого давления определены области режимов для получения углеродных пленочных покрытий, содержащих алмазную и графитовую фазы в различных объемных соотношениях. Обнаружен эффект самоорганизации алмазных нанокристаллитов в графитовых и полимероподобных углеродных пленках при осаждении в микроволновой плазме паров этанола низкого давления. Установлено экспериментально и затем обосновано с использованием кластерной модели структуры аморфного углерода влияние водорода на автоэмиссионные характеристики полученных алмазографитовых пленочных структур. Получены ленточные источники холодных электронов с плотностью автоэмиссионного тока в импульсе более 100 А/см^2 .

Ключевые слова: микроволновая плазма, алмазные кристаллиты, самоорганизация, полевая эмиссия электронов.

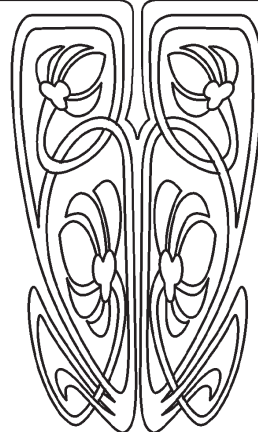
DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-1-68-75>

Введение

Анализ научно-технической литературы по созданию автоэмиссионных источников электронов свидетельствует о том, что проблема получения сильноточного туннелирования электронов с поверхности эмиттерных материалов в электровакуумных приборах (ЭВП) неразрывно связана с фундаментальными материаловедческими проблемами, которые обусловлены поиском условий, способствующих повышению прочности материалов при эксплуатации в сильных электрических полях и температурных градиентах [1–3]. Работа



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





автоэлектронного катода (АЭК) в ЭВП сопровождается ионной бомбардировкой его поверхности, адсорбцией и десорбцией ионов и молекул остаточных газов, поверхностной миграцией атомов и т.п. Стабильность работы автоэлектронных катодов чрезвычайно чувствительна к изменению геометрии катода и к состоянию его поверхности. В зависимости от конкретной конструкции и режима эксплуатации АЭК перечисленные процессы, порознь или в некоторой совокупности, приводят к ряду эффектов, изменяющих режим его работы. К этим эффектам относятся: катодное распыление материала эмиттера, изменение количества и расположение микровыступов, изменение работы выхода электронов, разогрев катода и механические напряжения.

Таким образом, анализ работ по автоэлектронной эмиссии показывает, что материалы АЭК должны обладать определенной совокупностью свойств: низкими и стабильными значениями работы выхода электронов, малым коэффициентом катодного распыления, высоким значением механической прочности, высокой электро- и теплопроводностью. Кроме того, материалы должны быть технологичными и доступными.

Так как автоэлектронная эмиссия осуществляется с эмиссионных выступов, где реализуется наибольшая напряженность электрического поля, то очевидным для повышения деградационной стойкости автокатодов является необходимость снижения токовой нагрузки на каждый из них. Максимальное значение такой нагрузки зависит от свойств используемого многоострийного эмиттерного материала [4, 5].

Идеальными электрофизическими свойствами для применения в качестве долговечных высокостабильных автоэмиссионных катодов обладает нанокристаллический алмаз, у которого кроме традиционных свойств алмаза, присущих массивному кристаллическому состоянию, присутствуют квантовые эффекты, характерные для низкоразмерных систем [6]. Достоинства его заключаются в сочетании рекордно высоких дрейфовой скорости носителей тока и электрической прочности кристаллов с высокой теплопроводностью (2000 Вт/м·К, что в 5 раз превышает теплопроводность меди) [7]. Практически это выражается в том, что для автоэмиссии можно использовать сильные электрические поля без опасения, что материал катода разрушится под влиянием импульса тока или джоулева тепла. Перспективны также его уникальные электронно-эмиссионные свойства, связанные с отрица-

тельным электронным сродством, которое присуще широкозонным полупроводникам [8–10].

Благодаря этим свойствам сотрудниками Аргонской национальной лаборатории (США) показано, что нанокристаллические алмазные покрытия nanoострий и пленки, полученные с использованием неравновесной микроволновой плазмы, способны обеспечивать чрезвычайно высокую плотность тока (до 60–100 мкА на острие!) и стабильность.

В работе [11] с использованием традиционных микроэлектронных технологий разработана технология изготовления многоострийных автоэммиттеров с алмазным покрытием. Эмиттеры представляют собой кремниевые острия диаметром от 1 до 10 мкм, с длиной (высотой) не менее 10 мкм, с радиусом закругления при вершине менее 10 нм, углом при вершине менее 30°, выполненные из нитевидных кристаллов кремния, эпитаксиально выращенных на монокристаллической кремниевой подложке.

Большая высота и малый радиус закругления вершины автоэлектронных эмиттеров обеспечивают большой коэффициент усиления поля. Вместе с тем алмазные частицы на вершине или алмазоподобные пленочные покрытия, обладающие пониженной эффективной работой выхода, в сочетании с указанными характеристиками эмиттеров обеспечивают низкие рабочие напряжения, снижают требования к рабочему вакууму из-за низкого коэффициента катодного распыления, способствуют повышению деградационной стойкости катода [12].

Однако простые расчеты показывают, что полученные острия имеют поверхностную плотность в интервале от 10^3 до 10^4 см⁻². При этом для получения плотности тока до 100 А/см² и выше токовая нагрузка на каждый эмиссионный центр должна составить 10^4 – 10^5 мкА. Согласно имеющимся современным мировым достижениям и теоретическим оценкам такие автоэмиссионные матрицы в принципе не могут обеспечить получение заданных плотностей автоэмиссионных токов.

Таким образом, для получения высокостабильных и деградационно стойких эмиттеров с плотностью автоэмиссионного тока до 100 А/см² и выше необходимо иметь многоострийные катодные материалы с поверхностной плотностью острий не менее чем 10^6 – 10^8 см⁻². При этом токовая нагрузка на каждое острие может составить от 1 до 100 мкА, что согласно известным литературным данным является достижимым при использовании острийных алмазных эмиттеров.



При поверхностной плотности острий 10^6 – 10^8 см⁻² период их расположения должен быть меньше 10 и лучше – меньше 1 мкм. С точки зрения использования современных литографических микроэлектронных технологий создание таких многоострийных матриц представляется вполне реализуемой задачей. Однако это приведет к неоправданному удорожанию их стоимости.

Решение этой проблемы, как и в случае разработки промышленных технологий получения квантовых точек [13], может быть достигнуто разработкой новых технологий создания алмазных многострийных катодных материалов с использованием явлений самоорганизации. При этом должны быть решены вопросы транспорта электронов к эмитирующим центрам, так как сам по себе алмаз является инертным материалом и хорошим диэлектриком.

Вместе с тем современные фундаментальные исследования углеродных материалов ставят под сомнение саму возможность получения нанокристаллитов алмаза с использованием микроэлектронных вакуумных технологий. Так, в литературе широко обсуждается изменение фазового состояния углерода в связи с уменьшением размера частиц – может ли быть устойчивым углерод в виде алмаза вместо графита? Основная трудность заключается в большой поверхностной энергии алмаза, которая, с одной стороны, является причиной низкой устойчивости частиц размером менее 10 нм и вынуждает систему нанокристаллитов снижать общую энергию путем, например, коагуляции, с другой, дает энергетическую возможность для перехода графит–алмаз, так как приведенная на моль объемных атомов величина поверхностной энергии составляет несколько сотен кДж/моль. Такая энергия способна повлиять на фазовое состояние углерода.

В работе [14] проанализирована поверхностная энергия алмаза, известная в литературе по первопринципным расчетам, а также из экспериментов по скалыванию и смачиванию. С использованием термохимических и термодинамических методов рассмотрена энергетика нанокристаллов алмаза различного габитуса с гидрированной и окисленной поверхностью. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что их поверхностная энергия может становиться отрицательной. С другой стороны, эксперименты по смачиванию в различных атмосферах не указывают на какие-либо существенные изменения поверхностной энергии алмаза в сравнении с графитом в инертной атмосфере и атмосфере водорода.

Таким образом, согласно современным представлениям для получения наноструктурированных алмазных катодных материалов с поверхностной плотностью алмазных нанокристаллитов не менее чем 10^6 – 10^8 см⁻² предстоит определить фундаментальные факторы, которые позволят осуществить поиск условий низкотемпературного синтеза и кинетических преимуществ в получении углеродных материалов различных аллотропных модификаций, содержащих атомы углерода в sp^2 и sp^3 валентном состоянии гибридизации, и определить их роль и механизм при формировании наноконпозиционных алмазграфитовых структур.

Следует отметить также, что, согласно литературным данным, флуктуация тока с одного автоэмиссионного острия составляет около 50%. По законам статистики большое количество острий уменьшает флуктуации общего тока, которая для таких концентраций эмиссионных центров не превысит 1%.

Экспериментальной целью работы было исследование возможностей получения с использованием микроволновой плазмы композиционных пленочных структур на основе графита с включениями алмазных нанокристаллитов с поверхностной плотностью не менее 10^6 – 10^8 см⁻².

Материалы и методы

Плазмохимическое осаждение углеродных структур проводилось в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника на частоте 2.45 ГГц [15, 16]. Мощность СВЧ-излучения и индукция магнитного поля составляли 250 Вт и 875 Гс. Величина магнитного поля обеспечивала выполнение условий электронного циклотронного резонанса, при котором степень ионизации плазмы составляла около 5%. Осаждение осуществлялось на кварцевые и поликорковые подложки с использованием в качестве рабочего вещества паров этанола при давлении от 0.05 до 1.0 Па. Подложки в экспериментах нагревались до температуры $300 \pm 10^\circ\text{C}$. Исследования углеродных структур осуществлялись с использованием методов атомно-силовой и электронной микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа и комбинационного рассеяния света (КРС).

В результате проведенных исследований определены области режимов, обеспечивающих как раздельное получение углеродных пленочных структур заданной аллотропной модификации (алмазные и графитовые), так и



нанокристаллических структур, содержащих алмазную и графитовую фазы в различных объемных соотношениях. Установлено, что при температурах подложек выше 200°C в области давлений паров этанола между конденсацией в

СВЧ плазме алмазных и графитовых пленочных структур наблюдалось осаждение наноккомпозитных углеродных покрытий, представляющих собой графитовую матрицу с включениями алмазоподобных нанокристаллитов (рис. 1 и 2).

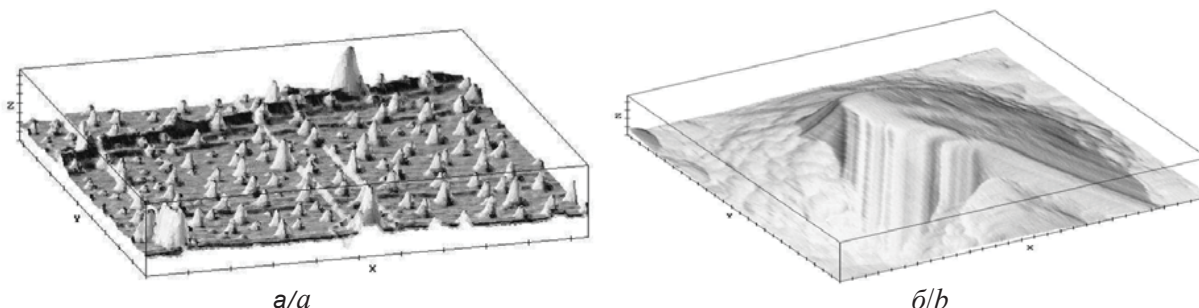


Рис. 1. АСМ-изображение наноалмазной углеводородной матрицы (а) (масштаб: X, Y: 1 мкм, Z: 0.1 мкм) и наноалмазного кристаллита в ней (б) (масштаб: X, Y: 0.1 мкм, Z: 0.01 мкм)

Fig. 1. AFM-image of a nano-diamond hydrocarbon matrix (a) (scale: X, Y: 1 μm, Z: 0.1 μm.) and a nano-diamond crystallite in it (b) (scale: X, Y: 0.1 μm, Z: 0.01 μm)

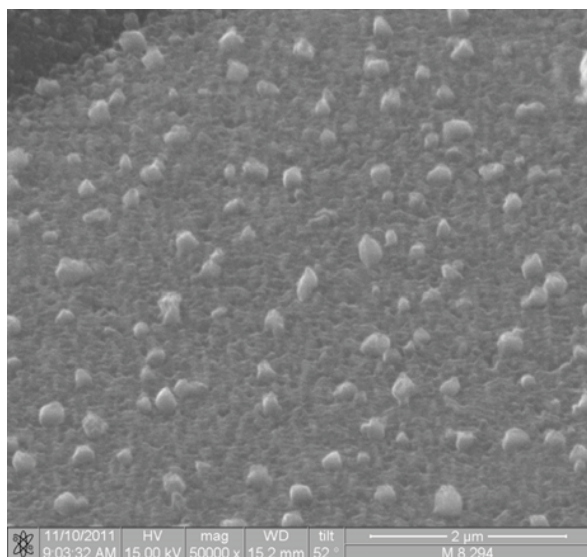


Рис. 2. СЭМ-изображение наноккомпозитной алмазграфитовой пленки

Fig. 2. SEM-image of the nanocomposite diamond-graphite film

Их размер и концентрация зависят от режима осаждения. Рентгеноструктурные исследования показали присутствие в полученных углеродных покрытиях включений мелкокристаллической фазы графита (002), алмазоподобной фазы кубической ориентации (111) и гексагональных решеток трех различных структурных модификаций (лонсдейлит, C(20H) и др.). Исследования с использованием сканирующего электронного микроскопа фирмы «JEOL» (Япония) образцов, полученных в режимах СВЧ плазмы с

положительным смещением, показали наличие интенсивной катодолуминесценции в видимом спектральном диапазоне. Как известно, это свидетельствует о том, что кроме атомов углерода в состоянии sp^2 гибридизации, как в графите и графене, в структуре находятся также атомы углерода в состоянии sp^3 гибридизации, как в алмазе или метане. Эти результаты подтверждены данными КРС.

Результаты и их обсуждение

Обнаруженный эффект самоорганизации алмазных нанокристаллитов в графитовых и полимероподобных углеводородных матрицах обусловлен следующим. Микроволновая плазма в диапазоне давлений паров этанола от 0.01 до 0.5 Па за счет изменения частоты столкновений и вводимой мощности позволяет генерировать широкий энергетический спектр свободных электронов. В результате их неупругих столкновений с молекулами плазмообразующего газа формируются ионы и атомы углерода различных степеней возбуждения, которые в результате термоударов на холодной подложке и локальных пересыщений образуют зародыши новой фазы той или иной аллотропной модификации. При этом вероятность зарождения наноалмазов возрастает, поскольку преобладающими при их образовании являются не термодинамические факторы, а процессы физической кинетики [17].

Установлено экспериментально и затем обосновано с использованием кластерной модели



структуры аморфного углерода влияние режима осаждения алмазографитовых пленочных структур в плазме паров этанола на их автоэмиссионные характеристики.

При нулевом и/или отрицательном смещении на подложкодержателе в процессах плазмохимического синтеза в полученных углеродных структурах увеличивается содержание связанного водорода в виде моногидридных и дигидридных связей. Активное поступление водорода в процессе роста препятствует термодинамически равновесной конденсации графитовой фазы и усиливает влияние кинетических факторов, которые способствуют образованию фаз со смешанными sp^3 - и sp^2 -связями. В спектрах комбинационного рассеяния света (КРС спектрах) этих пленок (кривая 2 на рис. 3) наблюдается достаточно широкая полоса в области 1330 см^{-1} , что свидетельствует о большом разбросе по размерам образующихся π -связанных кластеров, которые характерны для графитовых структур, а также небольшие гауссоподобные выступы в области 1120 и 1180 см^{-1} , которые соответствуют наноалмазной модификации углерода. При положительных смещениях поступление ионизированного водорода в пленку уменьшается и процесс ее роста протекает в более термодинамических равновесных условиях. В спектрах КРС этот факт выражается в том, что полоса в области 1330 см^{-1} становится более

узкой и сильной по сравнению с пиком в области 1580 см^{-1} (кривая 1 на рис. 3). Трансформация полосы в области 1330 см^{-1} по сравнению с той же полосой в КРС спектре углеродных пленок, полученных при отрицательных смещениях, происходит за счет отсутствия полосы 1250 см^{-1} , которая обусловлена колебаниями С-С связей в узлах разветвления структуры. Такая трансформация КРС пиков свидетельствует о более однородных и больших по размерам π -связанных графитовых кластерах, а также об уменьшении разветвленности структуры и лучшей локализации их системы сопряжения (рис. 4).

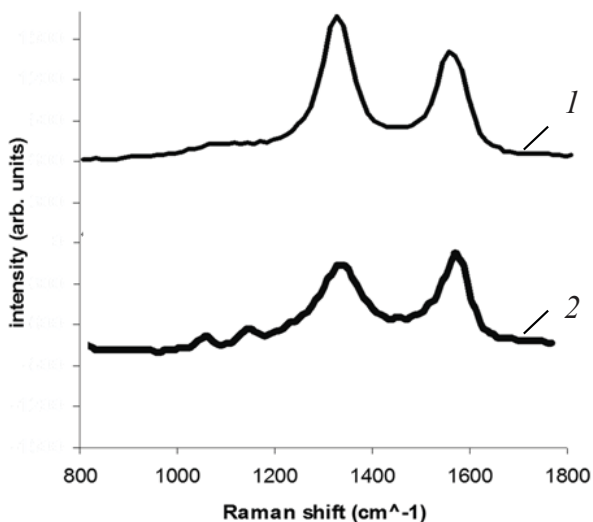
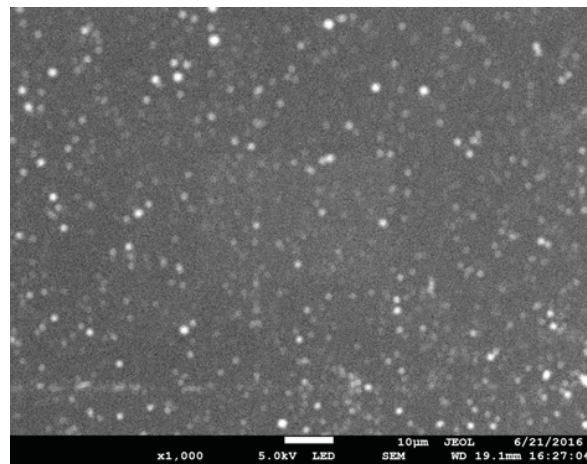
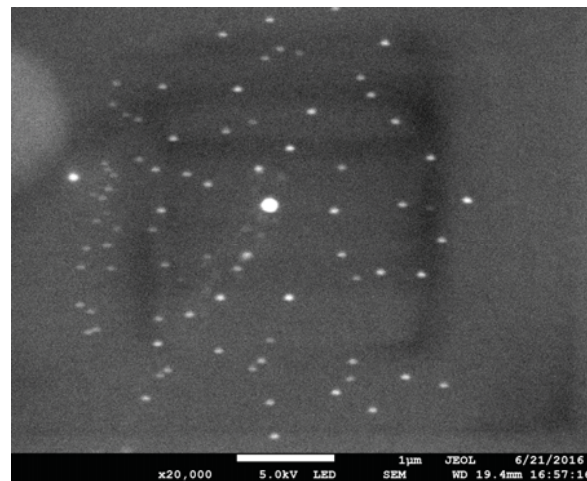


Рис. 3. Спектры КРС для углеродных пленок, полученных при различных смещениях в СВЧ плазме паров этанола: 1 – $U = +200\text{ В}$, 2 – $U = -300\text{ В}$

Fig. 3. Raman spectra for carbon films obtained at different biases in the microwave plasma of ethanol vapor: 1 – $U = +200\text{ V}$, 2 – $U = -300\text{ V}$



a/a



b/b

Рис. 4. СЭМ-изображения нанокompозитных алмазографитовых пленочных структур с поверхностной плотностью наноалмазных включений $10^6\text{--}10^8\text{ см}^{-2}$, полученных при различных увеличениях: а – $\times 1000$, б – $\times 20000$

Fig. 4. SEM-images of nanocomposite diamond-graphite film structures with a surface density of nano-diamond inclusions of $10^6\text{--}10^8\text{ см}^{-2}$, obtained at various magnifications: а – $\times 1000$, б – $\times 20000$



Это способствует уменьшению энергии активации проводимости в полученной композитной структуре и улучшению условий доставки электронов к наноалмазным кристаллитам, которые, как говорилось выше, обладают по сравнению с графитовыми наноструктурами пониженной эффективной работой выхода и более высокой деградационной стойкостью. В результате этого за счет повышения прозрачности потенциальных барьеров, как в объеме, так и на поверхности углеродной структуры, уменьшается порог электрического поля, после приложения которого пленки начинают эмитировать электроны. Полученное таким образом уменьшение рабочих напряжений автоэмиссии позволило увеличить запас электрической прочности синтезированных пленочных алмазографитовых структур и получить ленточные источники холодных электронов с плотностью автоэмиссионного тока в импульсе более 100 А/см² [18].

Заключение

Разработанная технология плазмохимического осаждения наноалмазографитовых пленочных структур позволяет формировать эмиттеры холодных электронов при температурах от 250 до 350°C. Это дает возможность совместить ее с другими технологиями микроэлектронного производства. Основными областями применения композиционных наноалмазографитовых материалов являются создание на их основе элементной базы радиационно-стойкой вакуумной микроэлектроники, энергоэффективных источников белого света, плоских катодолуминоцентных экранов и дисплеев.

Список литературы

- Mittal G., Lahiri I. Recent progress in nanostructured next-generation field emission devices // J. Phys. D : Appl. Phys. 2014. Vol. 47. P. 323001. DOI: 10.1088/0022-3727/47/32/323001
- Kumar S., Duesberg G. S., Pratap R., Raghavan S. Graphene field emission devices // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105. P. 103107. DOI: 10.1063/1.4895022
- Filip V., Filip L. D., Hei Wong. Review on peculiar issues of field emission in vacuum nanoelectronic devices // Solid-State Electronics. 2017. Vol. 138. P. 3–15. DOI: 10.1016/j.sse.2017.09.010
- Cichy B., Gorecka-Drzazga A. Electron field emission from microtip arrays // Vacuum. 2008. Vol. 82, iss. 10. P. 1062–1068. DOI: 10.1016/j.vacuum.2008.01.040
- Castro C. P., Assis T. A. Degradation of a large area field emitter : Correspondence between linearity and saturation in Fowler-Nordheim plots and unorthodox field electron emission // Vacuum. 2018. Vol. 152. P. 50–56. DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.03.001
- Yinhang Zhang Kyong, Yop Rhee, David Hui, Soo-Jin Park. A critical review of nanodiamond based nanocomposites : Synthesis, properties and applications // Composites Part B : Engineering. 2018. Vol. 143. P. 19–27. DOI: 10.1016/j.compositesb.01.028
- Алмазы в электронной технике : сб. ст. / отв. ред. В. Б. Квасков. М. : Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
- Елинсон М. И., Васильев Г. Ф. Ненакаливаемые катоды. М. : Наука, 1974. 278 с.
- Белл П. Эмиттеры с отрицательным электронным средством. М. : Госэнергоиздат, 1973. 190 с.
- Dimitrov D. A., Smithe D., Cary J. R., Ben-Zvi I., Rao T., Smedley J., Wang E. Modeling electron emission and surface effects from diamond cathodes // J. Appl. Phys. 2015. Vol. 117. P. 055708. DOI: 10.1063/1.4907393
- Патент № 2074444 РФ. Матричный автоэлектронный катод и электронный прибор для оптического отображения информации / Гиваргизов Е. И., Жирнов В. В., Степанова А. Н., Обеленская Л. Н. МПК H01J 31/12. 1997. Бюл. № 2.
- Terranova M. L., Orlanducci S., Rossi M., Tamburri E. Nanodiamonds for field emission: state of the art // Nanoscale. 2015. Vol. 7. P. 5094. DOI: 10.1039/c4nr07171a
- Леденцов Н. Н., Устинов В. М., Шукин В. А., Копьев П. С., Алферов Ж. И., Бимберг Д. Гетероструктуры с квантовыми точками : получение, свойства, лазеры. Обзор // ФТП. 1998. Т. 32, № 4. С. 385 – 410.
- Спицын Б. В., Жевненко С. Н. Термохимия и термодинамика нанокристаллов алмаза // Углерод : фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технологии : сб. тез. докл. 10-й Междунар. конф. Троицк : Тривант, 2016. С. 429.
- Яфаров Р. К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. М. : Физматлит, 2009. 216 с.
- Яфаров Р. К. Неравновесная СВЧ плазма низкого давления в научных исследованиях и разработках микро- и нанозлектроники // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2015. Т. 15, вып. 2. С. 16–31.
- Saravanan A., Huang B. R., Sankaran K. J., Keiser G., Kurian J., Tai N. H., Lin I. N. Structural modification of nanocrystalline diamond films via positive/negative bias enhanced nucleation and growth processes for improving their electron field emission properties // J. Appl. Phys. 2015. Vol. 117. P. 215307. DOI: 10.1063/1.4921875
- Яфаров Р. К., Нефедов Д. В., Шаныгин В. Я. Исследование планарно-торцевой автоэмиссии нанокompозитных углеродных покрытий с ультрадисперсными алмазами // Актуальные проблемы электронного приборостроения : материалы междунар. науч.-техн. конф. : в 2 т. Саратов : Амрит, 2018. Т. 1. С. 147–154.

Образец для цитирования:

Яфаров Р. К., Шаныгин В. Я., Нефедов Д. В. Углеродный пленочный нанокompозит для сильноточных полевых источников электронов // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2019. Т. 19, вып. 1. С. 68–75. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-1-68-75>



Carbon Film Nanocomposite for High-Current Field Electron Sources

R. K. Yafarov, V. Ya. Shanygin, D. V. Nefedov

Ravil K. Yafarov, <https://orcid.org/0000-0001-6678-511X>, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38 Zelenaya Str., Saratov 410019, Russia, pirpc@yandex.ru

Vitaliy Ya. Shanygin, <https://orcid.org/0000-0001-8445-6491>, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38 Zelenaya Str., Saratov 410019, Russia, vitairerun@mail.ru

Denis V. Nefedov, <https://orcid.org/0000-0002-8695-5777>, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38 Zelenaya Str., Saratov 410019, Russia, nefedov_dv@rambler.ru

Background and Objectives: Requirements and problems are formulated when creating cathode materials for high-current emission electronics. It has been shown that to create autocathodes with a current density of up to 100 A/cm² and above, the development of new nanostructured carbon materials with a surface density of nanodiamond edges of not less than 10⁶–10⁸ cm⁻² is necessary. Using a non-equilibrium low-pressure microwave plasma, the regions of regimes for obtaining carbon film coatings containing the diamond and graphite phases in various volume ratios are determined. **Materials and Methods:** Plasma-chemical deposition of carbon structures was carried out in a vacuum unit using a microwave ion-plasma source at a frequency of 2.45 GHz. Deposition was carried out on quartz and polycore substrates using ethanol vapor as a working substance at a pressure of from 0.05 Pa to 1.0 Pa. The substrates in the experiments were heated to a temperature of 300 ± 10° C. Studies of carbon structures were carried out using atomic-force and electron microscopy, as well as X-ray analysis and Raman scattering. **Results:** It was established experimentally and then substantiated using a cluster model of the structure of amorphous carbon, the influence of the mode of deposition of diamond-graphite film structures in the plasma of ethanol vapor on their field emission characteristics. The formation of more uniform and larger π-bonded graphite clusters helps to reduce the activation energy of conductivity in the composite structure and to improve the conditions of electron delivery to nanodiamond crystallites, which have a lower effective work function and higher degradation resistance. **Conclusion:** The developed technology of plasma-chemical deposition of nano-diamond graphite film structures allows the formation of emitters of cold electrons at temperatures from 250 to 350° C. This makes it possible to combine it with other microelectronic production technologies.

Keywords: microwave plasma, diamond crystallites, self-organization, field emission of electrons.

References

1. Mittal G., Lahiri I. Recent progress in nanostructured next-generation field emission devices. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2014, vol. 47, pp. 323001. DOI: 10.1088/0022-3727/47/32/323001
2. Kumar S., Duesberg G. S., Pratap R., Raghavan S. Graphene field emission devices. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 105, pp. 103107. DOI: 10.1063/1.4895022
3. Filip V., Filip L. D., Hei Wong. Review on peculiar issues of field emission in vacuum nanoelectronic devices. *Solid-State Electron.*, 2017, vol. 138, pp. 3–15. DOI: 10.1016/j.sse.2017.09.010
4. Cichy B., Gorecka-Drzazga A. Electron field emission from microtip arrays. *Vacuum*, 2008, vol. 82, iss. 10, pp. 1062–1068. DOI: 10.1016/j.vacuum.2008.01.040
5. Castro C. P., Assis T. A. Degradation of a large area field emitter: Correspondence between linearity and saturation in Fowler-Nordheim plots and unorthodox field electron emission. *Vacuum*, 2018, vol. 152, pp. 50–56. DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.03.001
6. Yinhang Zhang Kyong, Yop Rhee, David Hui, Soo-Jin Park. A critical review of nanodiamond based nanocomposites: Synthesis, properties and applications. *Composites Part B*, 2018, vol. 143, pp. 19–27. DOI: 10.1016/j.compositesb.01.028
7. *Almazy v elektronnoy tekhnike* [Diamonds in electronics]: sb. st. Otv. red. V. B. Kvaskov. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 248 p. (in Russian).
8. Elinson M. I., Vasil'ev G.F. *Nenakalivaemye katody* [Non-hot cathodes]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 278 p. (in Russian).
9. Bell R. *Emittery s otricatel'nyy elektronnyy srodstvom* [Emitters with negative electron affinity]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1973. 190 p. (in Russian).
10. Dimitrov D. A., Smithe D., Cary J. R., Ben-Zvi I., Rao T., Smedley J., Wang E. Modeling electron emission and surface effects from diamond cathodes. *J. Appl. Phys.*, 2015, vol. 117, pp. 055708. DOI: 10.1063/1.4907393
11. Givargizov E. I., Zhirmov V. V., Stepanova A. N., Obelenskaya L. N. *Matrichnyy avtoelektronnyy katod i elektronnyy pribor dlya opticheskogo otobrazheniya informatsii* [Matrix autoelectronic cathode and electronic device for optical information display]. Patent RF no. 2074444, MPK H01J 31/12, 1997 (in Russian).
12. Terranova M. L., Orlanducci S., Rossi M., Tamburri E. Nanodiamonds for field emission: state of the art. *Nanoscale*, 2015, vol. 7, pp. 5094. DOI: 10.1039/c4nr07171a
13. Ledentsov N. N., Ustinov V. M., Shchukin V. A., Kop'ev P. S., Alferov Zh. I., Bimberg D. Quantum dot heterostructures: Fabrication, properties, lasers (Review). *Semiconductors*, 1998, vol. 32, iss. 4, pp. 385–410.
14. Spitsyn B. V., Zhevnenko S. N. Termokhimiya i termodinamika nanokristallov almaza [Thermochemistry and thermodynamics of diamond nanocrystals]. *Uglerod: fundamental'nyye problemy nauki, materialovedeniye, tekhnologii: sb. tezisov dokladov 10-y mezhhdunar. konf. Troitsk, Trovant Publ.*, 2016. 429 p. (in Russian).
15. Yafarov R. K. *Fizika SVCh vakuumno-plazmennyy nanotekhnologii* [Physics of microwave vacuum plasma nanotechnology]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 216 p. (in Russian).



16. Yafarov R. K. Nonequilibrium the Microwave Plasma of Low Pressure in Scientific Researches and Development Micro and Nanoelectronics. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2015, vol. 15, iss. 2, pp. 16–31 (in Russian).
17. Saravanan A., Huang B. R., Sankaran K. J., Keiser G., Kurian J., Tai N. H., Lin I. N. Structural modification of nanocrystalline diamond films via positive/negative bias enhanced nucleation and growth processes for improving their electron field emission properties. *J. Appl. Phys.*, 2015, vol. 117, pp. 215307. DOI: 10.1063/1.4921875
18. Yafarov R. K., Nefedov D. V., Shanygin V. Ya. Issledovaniye planarno-tortsevoy avtoemissii nanokompозитnykh uglerodnykh pokrytiy s ul'tradispersnymialmazami [Investigation of the planar-end field emission of nanocomposite carbon coatings with ultrafine diamonds]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Aktual'nyye problemy elektronnoy priborostroyeniya": v 2 t.* [International conference on Actual problems of electron devices engineering: in 2 vols.]. Saratov, Amirit Publ., 2018, vol. 1, pp. 147–154 (in Russian).

Cite this article as:

Yafarov R. K., Shanygin V. Ya., Nefedov D. V. Carbon Film Nanocomposite for High-Current Field Electron Sources. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2019, vol. 19, iss. 1, pp. 68–75 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-1-68-75>
