

## СОЗДАНИЕ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ ДЛЯ МОЩНЫХ ЭВП И ВАКУУМНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Яфаров Р.К.

*Саратовский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН, г. Саратов, Россия, E-mail: pirpc@yandex.ru*

Идеальными электрофизическими свойствами для применения в мощных ЭВП в качестве автоэмиссионных катодов обладает нанокристаллический алмаз. Благодаря этому, 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 [1] с использованием микроэлектронных технологий разработан способ изготовления многоострийных автоэммиттеров с алмазным покрытием. Эмиттеры представляют собой кремниевые острия диаметром от 1 до 10 мкм, с высотой не менее 10 мкм и радиусом закругления при вершине менее 10 нм, 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 [2,3].

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

Таким образом, для получения сильноточных и деградационно стойких эмиттеров с плотностью автоэмиссионного тока до 100 А/см<sup>2</sup> и выше необходимо иметь многоострийные катодные материалы с поверхностной плотностью острий не менее, чем  $10^6$  –  $10^8$  см<sup>-2</sup>. 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<sup>-2</sup> 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 их удорожанию.

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

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%.

Цель работы – исследование возможностей получения в микроволновой плазме композиционных пленочных структур на основе графита с включениями алмазных нанокристаллитов с поверхностной плотностью не менее  $10^6$  –  $10^8$  см<sup>-2</sup>.

Плазмохимическое осаждение углеродных структур проводилось в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника на частоте 2,45 GHz

[4]. Мощность СВЧ-излучения и индукция магнитного поля составляли 250 W и 875 Gs. 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 Pa до 1,0 Pa. 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).

Установлено, что при температурах подложек выше  $200^\circ\text{C}$  в области давлений паров этанола между конденсацией в СВЧ плазме алмазных и графитовых пленочных структур наблюдалось осаждение наноконпозиционных углеродных покрытий, представляющих собой графитовую матрицу с включениями алмазоподобных нанокристаллитов (рис. 1). Их размер и концентрация зависят от режима осаждения. Рентгеноструктурные исследования показали присутствие включений мелкокристаллической фазы графита (002), алмазоподобной фазы кубической ориентации (111) и гексагональных решеток трех различных структурных модификаций (лонсдейлит, C(20H) и др.). Эти результаты подтверждены данными КРС (рис.2).

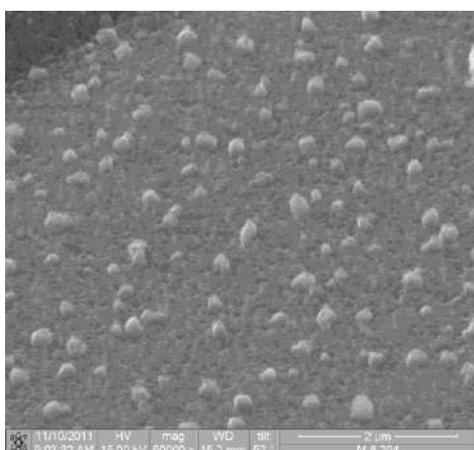


Рисунок 1 – СЭМ – изображение наноконпозиционной алмазграфитовой пленки

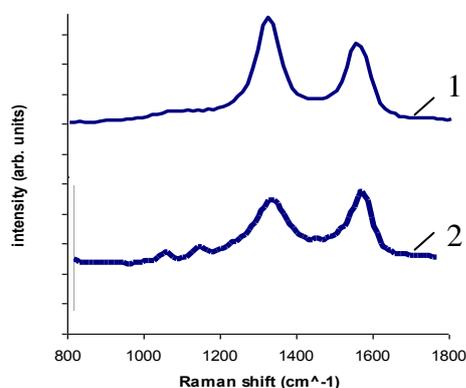


Рисунок 2 –Спектры КРС для углеродных пленок, полученных при различных смещениях в СВЧ плазме паров этанола: 1 -  $U = +200\text{V}$ ; 2 -  $U = -300\text{V}$

Обнаруженный эффект самоорганизации алмазных нанокристаллитов в графитовых матрицах обусловлен следующим. Микроволновая плазма в магнитном поле 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 при термоударах на холодной подложке и локальных пересыщениях 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.

Установлено экспериментально и затем обосновано с использованием кластерной модели структуры аморфного углерода влияние режима осаждения алмазграфитовых пленочных структур на их автоэмиссионные характеристики.

При отрицательных смещениях на подложкодержателе в процессах плазмохимического синтеза усиливается влияние кинетических факторов, которые способствуют образованию фаз аморфного углерода со смешанными  $sp^3$ - и  $sp^2$  связями. В КРС спектрах этих пленок (кривая 2 на рис. 2) наблюдается достаточно широкая полоса в области  $1330\text{ cm}^{-1}$ , 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  $1180\text{ cm}^{-1}$ ,

которые соответствуют наноалмазной модификации углерода. При положительных смещениях процесс роста пленки протекает в более термодинамических равновесных условиях. В спектрах КРС этот факт выражается в том, что полоса в области  $1330\text{ см}^{-1}$  становится более узкой и сильной, по сравнению с пиком в области  $1580\text{ см}^{-1}$  (кривая 1 на рис.2). Такая трансформация КРС пиков свидетельствует о более однородных и больших по размерам  $\pi$ -связанных графитовых кластерах. Это способствует уменьшению энергии активации проводимости в композитной структуре и улучшению условий доставки электронов к наноалмазным кристаллитам, которые 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 возбуждения автоэмиссии. Полученное таким образом уменьшение рабочих напряжений автоэмиссии позволяет увеличить запас электрической прочности синтезированных пленочных алмазографитовых структур и получить ленточные источники холодных электронов с плотностью автоэмиссионного тока в импульсе более  $100\text{ А/см}^2$ .

Разработанная технология плазмохимического осаждения наноалмазографитовых пленочных структур позволяет формировать эмиттеры холодных электронов при температурах от  $250$  до  $350^\circ\text{C}$ . Это дает возможность совместить ее с другими технологиями микроэлектронного производства.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10033).

#### **Список литературы:**

1. Гиваргизов Е.И., Жирнов В.В., Степанова А.Н., Обеленская Л.Н. Матричный автоэлектронный катод и электронный прибор для оптического отображения информации. Патент на изобретение RU № 2074444.
2. Алмазы в электронной технике: Сб. ст. Отв. ред. В.Б. Квасков. Энергоатомиздат. М. 1990. -248 с.
3. Белл Р. Эмиттеры с отрицательным электронным средством. // М. Госэнергоиздат. 1973.
4. Яфаров Р.К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. М.: Физматлит, 2009. -216 с.