МАТЕРИАЛЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 537.533.2

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПОЛЕВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИТНЫХ АЛМАЗОГРАФИТОВЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

© 2022 г. Р. К. Яфаров^{*a*, *b*, *, А. В. Сторублев^{*b*, *c*, **}}

^аСаратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской АН, ул.Зеленая, д. 38, Саратов, 410019 Россия ^bСаратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, ул. Астраханская, д. 83, Саратов, 410012 Россия ^cAO "НПП "Алмаз", ул. им. И.В. Панфилова, д. 1, Саратов, 410033 Россия *E-mail: pirpc@yandex.ru **E-mail: StorublevAV@almaz-rpe.ru Поступила в редакцию 19.05.2021 г. После доработки 19.05.2021 г.

Принята к публикации 27.07.2021 г.

Установлены и получили интерпретацию факторы, ограничивающие долговечность сильноточных полевых источников электронов на основе нанокомпозитных алмазографитовых пленочных структур в нестационарных температурно-вакуумных условиях эксплуатации. Установлено, что сильноточная эмиссия сопровождается распылением ионами остаточного газа вакуумной системы атомов материала автокатода и его переосаждением на анод. Показано, что осажденный материал на аноде изменением полярности напряжения в межэлектродном зазоре может быть переосажден на катодный электрод с восстановлением его исходной эмиссионной способности.

DOI: 10.31857/S0544126922010100

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время общепризнано, что освоение диапазона электромагнитных волн между микроволновым и инфракрасным (100 ГГц и выше) является ключевой проблемой электроники. Источники когерентного излучения терагерцевого (ТГц) диапазона имеют широкие перспективы применения в таких областях, как безопасность и противодействие терроризму (дистанционное обнаружение взрывчатых веществ), беспроводные информационно-коммуникационные системы высокоскоростной передачи данных, радиоастрономия, спектроскопия, медицина и пр. Имеются различные подходы к освоению ТГц диапазона, например, с помощью приборов твердотельной или квантовой электроники. Однако, не вызывает сомнений, что для достижения уровней мощности порядка десятков ватт и выше оптимальными являются электровакуумные приборы (ЭВП). Компактные источники ТГц диапазона такой мощности могут быть реализованы на основе миниатюрных аналогов "классических" приборов вакуумной СВЧ электроники: ламп бегущей и обратной волны.

Основная проблема при создании относительно мощных источников когерентного ТГц излучения заключается в необходимости получения электронных пучков со сверхвысокими плотностями тока. что в немалой степени, кроме vвеличения мощности, обусловлено уменьшением размеров приборов. Наряду с традиционным повышением рабочей частоты, мощности и обеспечением мгновенного времени готовности систем навигации и космической связи, ставятся задачи по увеличению их надежности и срока службы в десятки и сотни тысяч часов [1]. Как показывает практика, надежность и долговечность, а также стабильность электрических характеристик ЭВП в значительной степени определяются эмиссионной надежностью и долговечностью катодов. В настоящее время, в большинстве производимых в мире ЭВП, в том числе СВЧ диапазона длин волн, нашли применение термоэмиссионные металлопористые катоды (МПК).

Одним из основных требований, предъявляемых к современным МПК ЭВП, особенно со стороны миниатюрных ламп бегущей волны (**ЛБВ**) мм- и ТГц диапазонов, является повышение плотности отбираемого тока, которое достигается увеличением рабочей температуры. Увеличение температуры МПК влечет за собой повышение скорости испарения активного вещества. Вследствие повышения скорости испарения активного веще-



Рис. 1. Схематичное изображение планарно-торцевого наноалмазографитового автокатода.

ства и его ограниченного запаса при уменьшающихся габаритных размерах ЭВП, обусловленных требованиями заданных диапазонов длин волн, долговечность работы МПК не достаточно высока. К другим недостаткам термокатодов относятся большое время готовности и недостаточно высокая предельная плотность токоотбора, которая находится на уровне не более десятков А/см².

Перспективным направлением миниатюризации приборов ТГц диапазона является замена термоэмиссионных катодов на полевые катоды. Преимущества последних хорошо известны [2, 3]. Одним из наиболее перспективных материалов для создания подобного типа устройств являются наноуглеродные пленочные структуры [4-6]. Показано, что выбором режимов конденсации алмазографитовых нанокомпозитов в неравновесной микроволновой плазме паров этанола низкого давления получено снижение порога полевой эмиссии электронов с 15-17 до 4-6 В/мкм и увеличение плотности автоэмиссионного тока в импульсах микросекундной длительности свыше 100 А/см² [7]. Такие характеристики полевых источников электронов удовлетворяют практически всем современным требованиям, предъявляемым к ЭВП СВЧ и субтерагерцового диапазонов. Ключевые вопросы, сдерживающие их промышленное применение, связаны с долговременной устойчивостью и воспроизводимостью эмиссионных характеристик в течение необходимых для ЭВП сроков службы.

Целью работы являлось исследование долговременной стабильности эмиссионных характеристик сильноточных полевых источников электронов на основе композитных наноуглеродных пленочных покрытий с уровнем плотности автоэмиссионного тока не менее 100 А/см² в нестационарных температурно-вакуумных условиях эксплуатации.

2. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве автоэмиссионных катодов использовались алмазографитовые плёночные структуры толщиной около 100 нм, осажденные на поликоровые пластины в микроволновой плазме паров этанола по методике, изложенной в [7]. Эмитирующей частью катодов были торцы алмазогафитовой плёнки, на расстоянии 7 мм от которых напылялся металлический контакт с прикладываемым катодным потенциалом (рис. 1).

Измерительное диодное устройство обеспечивало равную удаленность точек торца катода относительно анода из молибдена диаметром 5.5 мм. Межэлектродный зазор составлял 40 мкм. Измерения проводились в вакуумной камере при давлении $P = (2-3) \times 10^{-5}$ Па с использованием источника питания постоянного напряжения. Измерительная часть установки, кроме источника питания, включала записывающий многоканальный осциллограф, высоковольтный делитель напряжения, а также измерительное сопротивление ПЭВ-100 с номиналом 5.017 кОм для наблюдения за изменениями напряжения и полевого тока. Определение элементного состава поверхностей планарно-торцевых автоэмиссионных структур после электрических испытаний проведено с использованием автоэмиссионного сканирующего микроскоп MIRA 2 LMU производства фирмы Tescan, оснащенный системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350. Чувствительность детектора INCA Energy составляла 133 эВ/10 мм², что позволяет анализировать химические элементы от бериллия до плутония.

После общего обезгаживания измерительного устройства, которое проводилось при прогреве встроенными нагревателями и давлении в вакуумной камере 2×10^5 Па, обезгаживание анода осуществлялось автоэмиссионным током катода около 8 мА. Процесс сильноточного обезгаживания анода сопровождался свечением, интенсивность которого увеличивалась с увеличением напряженности электрического поля и величины автоэмиссионного тока (рис. 2).

Испытания на долговременную воспроизводимость характеристик катода проводились при циклических изменениях вакуума в диапазоне от 9×10^6 Па при работающем высоковакуумном насосе до 0.1 Па к концу периода, в котором насос находился в выключенном состоянии. Обезгаживание завершалось нагревом анода электронным пучком мощностью свыше 15 Вт в течение 30 мин. Максимальный автоэмиссионный ток достигал величины 12 мА.



Рис. 2. Свечение торца катода при напряженности поля 35 В/мкм и плотности полевого тока 1090 А/см².

На рис. 3 приведены осциллограммы нестабилизированного выходного напряжения источника питания и падения напряжения на измерительном резисторе, при необходимости пересчитываемое в эмиссионный ток, полученные при проведении одного из циклов испытаний. Можно видеть, что полевой ток, как и следовало ожидать согласно Фаулеру и Нордгейму [8], очень чувствителен к нестабильности напряжения источника питания.

При испытаниях имитировались условия с аварийным отключением питающего напряжения и средств откачки, которые состояли в следующем. После испытаний автокатода при заданном напряжении в течение определенного промежутка времени (от 0.5 до 3 часов в разных циклах) проводился замер ВАХ и отключение источника питания. После остывания измерительного устройства отключались средства откачки, в результате чего давление в камере повышалось до 0.1 Па. Далее цикл испытаний с откачкой, подъемом напряжения, выдержкой при поданном напряжении и измерениями ВАХ повторялся. Всего выполнено 8 циклов испытаний.

На рис. 4 приведены изменения тока эмиссии и напряжения источника питания в течение 8 циклов испытаний с суммарной длительностью свыше 13.5 ч. В эту длительность время отключения источника питания и средств откачки не включалось. Можно видеть, что при фиксированной напряженности поля около 50 В/мкм и циклическом изменении вакуумных условий эксплуатации автокатода полевой ток изменялся в пределах от 6 до 8 мА, что составляет около 25% при средней плотности токоотбора 1.3 × 10³ А/см².

На рис. 5 приведены ВАХ автокатода, полученные в начале испытаний и после завершения 8 циклов. Можно видеть, что несмотря на неблагоприятные факторы, связанные с периодическими отключениями питающего напряжения и ухудшением вакуума, полевая эмиссионная способность катода за время испытаний имела хорошую воспроизводимость. Об этом свидетельствуют, в частности, линейные зависимости полевых токов от напряженности электрического поля, построенные в координатах Фаулера и Нордгейма в режимах обеспечивающих сверхвысокую плотность тока полевой эмиссии.

С целью выяснения природы свечения после демонтажа вакуумного измерительного устройства проведены исследования поверхности анода. Изучение элементного состава показало наличие на его поверхности углеродной фазы. Для иссле-



Рис. 3. Осциллограммы выходного напряжения источника питания (внизу) и падения напряжения на измерительном резисторе (вверху) в течение одного из циклов испытаний.

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 51 № 2 2022



Рис. 4. Изменения полевого тока (9) и напряженности поля (10) в межэлектродном зазоре в течение 8 циклов долговременных испытаний (1–8 – циклы испытаний).



Рис. 5. ВАХ катода, измеренные до (кривая *I*) и после 8 циклов испытаний (кривая *2*): (*a*) в линейных координатах; (б) в координатах Фаулера-Нордгейма.

дования свойств осажденной на аноде углеродной структуры, катод вновь был установлен в вакуумную камеру и проведен новый цикл испытаний, который полностью воспроизвел полученную ранее ВАХ. С целью исследования эмиссионной способности углеродного слоя, осажденного на анод в процессе сильноточной полевой эмиссии с катода, на анод подавалось отрицательное относительно катода напряжение. При этом в электрической цепи фиксировался ток, значения которого были соизмеримы с ранее полученными токами эмиссии с катода. Однако ток анода не был стабильным. При напряженностях электрического поля свыше 40 В/мкм происходили микропробои, результатом которых являлось падение тока. До возникновения пробоев на ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма присутствует линейный участок. Поэтому эмиссионный ток с анода также имеет автоэмиссионную природу (рис. 6).

После прекращения эмиссии с анода при фиксированном напряжении осуществлялось прямое включение диодной структуры. При измерениях ВАХ было установлено улучшение эмиссионной способности катода. Положительный эффект проявлялся в снижении порога начала полевой эмиссии и повышении крутизны ВАХ, что позволяет получать аналогичные токи при меньших напряженностях электрического поля (рис. 7).

В работе [7] показано, что алмазографитовые пленочные композиты представляют собой графитовые матрицы с погруженными в них алмазными нанокристаллитами. Поэтому, вероятнее всего, при сильноточной полевой эмиссии распылению подвергается графитовая компонента матрицы. Об этом может свидетельствовать высокая воспроизводимость ВАХ после различных циклов испытаний, которая в предположении автоэмиссии не только с алмазных нанокристаллитов, но и графитовых микровыступов, могла бы претерпевать существенные трансформации. Преимушественное распыление графитовой фазы, находяшейся в окружении алмазных нанокристаллитов. обусловлено более низкой теплопроводностью графита и, как следствие, более высокими температурой нагрева и коэффициентом ионного распыления. Распыленные атомы углерода ионизируются



Рис. 6. ВАХ полевой эмиссии с анода: (а) в линейных координатах; (б) в координатах Фаулера-Нордгейма.



Рис. 7. Изменение ВАХ автоэмиссионного катода до (1) и после (2) переосаждения эмиссионного материала с анода на катод: (*a*) в линейных координатах; (*б*) в координатах Фаулера-Нордгейма.

в сильном электрическом поле, образуя при рекомбинации в потоке полевых электронов светящиеся вакуумно-плазменные катодные факелы, вершинами которых являются преимущественно наноалмазные эмиссионные центры [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокой долговременной воспроизводимости эмиссионных характеристик сильноточных полевых источников электронов на основе алмазографитовых пленочных структур.

Впервые установлен эффект качественного изменения углеродной структуры с восстановлением исходной эмиссионной способности полевого катода после переосаждения на него с анода распыленного материала, которое может быть реализовано изменением полярности напряжения в межэлектродном зазоре. Обнаруженный эффект может быть использован как для создания автоэмиссионного катода с улучшенными эмиссионными характеристиками, так и для восстановле-

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 51 № 2 2022

ния его эмиссионной способности при долговременной работе в составе ЭВП.

Результаты могут быть использованы для прогнозирования сроков службы полевых алмазографитовых источников электронов при эксплуатации в заданных силовых токовых режимах с возможным возникновением нестационарных температурновакуумных условий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-10033) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-38-90216).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Booske J.H., Whaley D.R., Menninger W.L., Hollister R.S., Armstrong C.M. Traveling-wave tubes in Modern Microwave and Millimeter-Wave Power Electronics / Eds. R.J. Barker et al. / New York: Wiley-Interscience, 2005, ch. 4, pp. 171–245.
- 2. *Mittal G., Lahiri I.* Recent progress in nanostructured next-generation field emission devices // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. V. 47. P. 323001. https://doi.org/10.1088/0022-3727/47/32/323001

- 3. Елинсон М.И., Кудинцева Г.А., Кулюпин Ю.А. и др. Ненакаливаемые катоды. М.: Сов. радио. 1974, 336 с.
- Фурсей Г.Н., Поляков М.А., Кантонистов А.А., Яфясов А.М., Павлов Б.С., Божевольнов В.Б. Автоэлектронная и взрывная эмиссия из графеноподобных структур // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 6. С. 71–77.
- Panda K., Hyeok J.J., Park J.Y., Sankaran K.J., Balakrishnan S., Lin I.N. Nanoscale Investigation of Enhanced Electron Field Emission for Silver Ion Implanted/Postannealed Ultrananocrystalline Diamond Films // Sci. Rep. 2017. V. 7. 16395.
- Sobaszek M., Siuzdak K., Ryl J., Sawczak M., Gupta S., Carrizosa S.B., Ficek M., Dec B., Darowicki K., Bogdanowicz R. Diamond Phase (sp3-C) Rich Boron-Doped

Carbon Nanowalls (sp2-C): Physicochemical and Electrochemical Properties // J. Phys. Chem. C. 2017. V. 121. P. 20821–20833.

 Yafarov R.K. Microstructural Modifications of Diamond-Graphite Nanocomposites for High-Current Field Electron Sources // Journal of Communications Technology and Electronics. V. 64. № 12. P. 1431– 1436.

https://doi.org/10.1134/S1064226919120180

- Fowler R.H., Nordheim L.W. Electronemission in intense electric fields // Proc. R. Soc. London. A. 1928. V. 119. P. 173–181.
- 9. Месяц Г.А. Взрывная электронная эмиссия. М.: Физматлит. 2011, 280 с.