

04;11

Долговременная воспроизводимость эмиссионных характеристик алмазографитовых полевых источников электронов в нестационарных вакуумных условиях эксплуатации

© Р.К. Яфаров^{1,2}, А.В. Сторублев^{2,3}¹ Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Саратов, Россия² Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия³ АО „НПП „Алмаз“, Саратов, Россия

E-mail: pirpc@yandex.ru

Поступило в Редакцию 25 мая 2021 г.

В окончательной редакции 12 сентября 2021 г.

Принято к публикации 14 сентября 2021 г.

Приведены результаты исследования долговременной воспроизводимости эмиссионных характеристик полевых источников электронов на основе композитных нанокремниевых пленочных покрытий с плотностью автоэмиссионного тока более 1000 A/cm^2 . Установлено, что полевая эмиссия с высокой плотностью автоэмиссионного тока сопровождается распылением ионами остаточного газа атомов материала автокатода и его пересадением на анод. Результаты могут быть использованы для прогнозирования срока службы алмазографитовых автокатодов при эксплуатации в нестационарных температурно-вакуумных условиях.

Ключевые слова: алмазографитовый нанокремний, сильноточная полевая эмиссия, воспроизводимость параметров вольт-амперных характеристик, срок службы.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.24.51792.18883

Электровacuумные приборы СВЧ-, суб- и терагерцевого (THz) диапазонов имеют широкое применение как в наземных, так и в воздушно-космических радиотехнических устройствах. Наряду с повышением рабочей частоты, мощности и обеспечением мгновенного времени готовности систем навигации и космической связи ставятся задачи увеличения их надежности и срока службы в десятки и сотни тысяч часов [1]. Освоение THz-диапазона осуществляется с помощью приборов твердотельной либо вакуумной эмиссионной электроники. Однако ограничения на реализуемую мощность, связанные с совокупностью физических эффектов, приборные проявления которых известны как „терагерцевая яма“, позволяют при реализации мощных THz-устройств отдать предпочтение приборам вакуумной эмиссионной электроники. Актуальной становится реализация миниатюрных аналогов ЛБВ (лампы бегущей волны) и ЛОВ (лампы обратной волны).

Как показывает практика, надежность и долговечность, а также стабильность характеристик электровacuумных приборов (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) с различными добавками, предназначенными для уменьшения температурного коэффициента работы выхода электронов. Одним из основных требований, предъявляемых к МПК, особенно со стороны миниатюрных ламп бегущей волны миллиметрового и терагерцевого диапазонов, является повышение плотно-

сти отбираемого тока, которое достигается увеличением рабочей температуры. Однако это приводит к росту скорости испарения активного вещества, входящего в состав МПК, и с учетом его ограниченного количества при малых габаритах ЭВП к уменьшению срока службы.

В настоящее время в производстве ЭВП СВЧ- и субтерагерцевого диапазонов рассматривается возможность использования кроме МПК источников электронов, функционирующие которых основано на явлении полевой эмиссии электронов, которые обладают в отличие от термокатодов сверхвысоким быстродействием [2]. Одним из наиболее перспективных материалов для создания подобного типа устройств являются нанокремниевые пленочные структуры [3–5]. Показано, что при выборе режимов синтеза алмазографитовых нанокремниевых композитов в неравновесной микроволновой плазме паров этанола низкого давления может быть получено снижение порога полевой эмиссии электронов с 15–17 до 4–6 $\text{V}/\mu\text{m}$ и увеличение плотности автоэмиссионного тока в импульсах микросекундной длительности свыше 100 A/cm^2 [6].

Целью настоящей работы является исследование долговременной стабильности эмиссионных характеристик полевых источников электронов на основе композитных нанокремниевых пленочных покрытий с уровнем плотности автоэмиссионного тока не менее 100 A/cm^2 в нестационарных температурно-вакуумных условиях эксплуатации.

В качестве автоэмиссионных катодов использовались алмазографитовые пленочные структуры толщиной около $0.1 \mu\text{m}$, осажденные на поликордовые пластины в

микроволновой плазме паров этанола по методике, изложенной в [6]. Эмитирующей частью катодов были торцы алмазографитовой пленки, на расстоянии $7 \cdot 10^{-3}$ м от которых напылялся металлический контакт с прикладываемым катодным потенциалом. Измерительное устройство обеспечивало равную удаленность точек торца катода относительно анода из молибдена диаметром $5.5 \cdot 10^{-3}$ м. Межэлектродный зазор составлял $4 \cdot 10^{-5}$ м. Измерения проводились в вакуумной камере при давлении $P = (3-4) \cdot 10^{-5}$ 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 $5.017 \cdot 10^3 \Omega$ для наблюдения за изменениями напряжения и полевого тока.

Определение элементного состава поверхностей планарно-торцевых автоэмиссионных структур после электрических испытаний проведено с использованием автоэмиссионного сканирующего микроскопа MIRA 2 LMU производства фирмы Tescan, оснащенного системой Oxford INCA Energy 350. Система рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford INCA Energy 350 с детектором PentaFET-x3 обладает разрешением по K_{α} Mn не хуже 133 eV и площадью кристалла детектора 30 mm^2 , что позволяло проводить количественный анализ химических элементов от бора до урана.

После общего обезгаживания измерительного устройства, которое проводилось при прогреве встроенными нагревателями и давлении в вакуумной камере $1.6 \cdot 10^{-5}$ Па, обезгаживание анода осуществлялось автоэмиссионным током катода около $8 \cdot 10^{-3}$ А. Процесс сопровождался свечением, интенсивность которого увеличивалась с увеличением напряженности электрического поля и величины автоэмиссионного тока (рис. 1). Испытания на долговременную воспроизводимость характеристик катода проводились при циклических изменениях вакуума в диапазоне от $9 \cdot 10^{-6}$ Па при работающем высоковакуумном насосе до 0.1 Па к концу периода испытаний. Имитировались условия с аварийным отключением питающего напряжения и средств откачки, которые состояли в следующем. После испытаний автокатаода при заданном напряжении в течение определенного промежутка времени (от 0.5 до 3 h в разных циклах) проводился замер вольт-амперных характеристик (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.

На рис. 2 приведены изменения тока эмиссии (кривая I) и напряжения (кривая II) источника питания с нестабилизированным выходным напряжением в течение восьми циклов испытаний с суммарной длительностью свыше 13.5 h. В эту длительность время отключе-

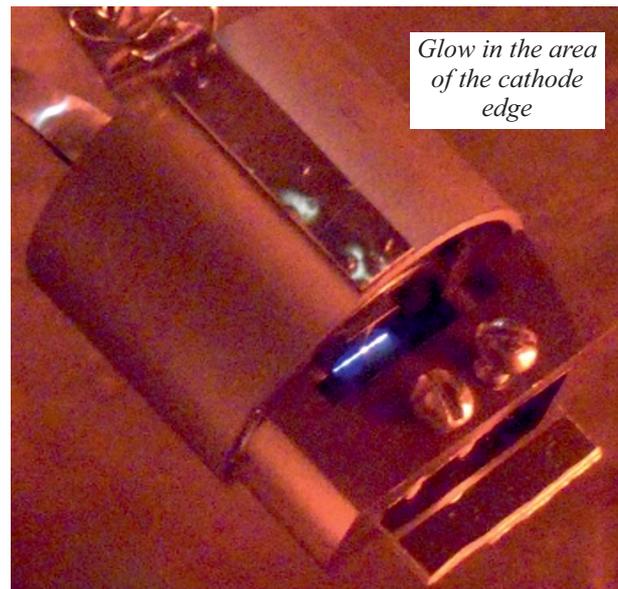


Рис. 1. Свечение торца катода при плотности полевого тока 1450 A/cm^2 .

ния источника питания и средств откачки не включалось. Можно видеть, что полевой ток, как и следовало ожидать согласно Фаулеру и Нордгейму [7], очень чувствителен к нестабильности напряжения источника питания. При фиксированной напряженности поля около 50 V/\mu m и циклическом изменении вакуумных условий эксплуатации автокатаода полевой ток изменялся в пределах от $6 \cdot 10^{-3}$ до $8 \cdot 10^{-3}$ А, что составляет около 25% при средней плотности токоотбора $1.3 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$.

На рис. 3 приведены ВАХ автокатаода, полученные в начале испытаний и после завершения восьми циклов. Можно видеть, что, несмотря на неблагоприятные факторы, связанные с периодическим отключением питающего напряжения и ухудшением вакуума, полевая эмиссионная способность катода за время испытаний имела хорошую воспроизводимость. Об этом свидетельствуют, в частности, линейные зависимости токов от напряженности электрического поля, построенные в координатах Фаулера–Нордгейма для режимов, обеспечивающих сверхвысокую плотность тока полевой эмиссии.

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

В работе [6] показано, что алмазографитовые пленочные композиты, использованные при испытаниях в качестве полевых источников электронов, представляют собой графитовые матрицы с погруженными в них алмазными нанокристаллитами. Поэтому, вероятнее всего, распылению подвергается графитовая компонента матрицы. Об этом может свидетельствовать высокая воспроизводимость ВАХ после различных циклов испы-

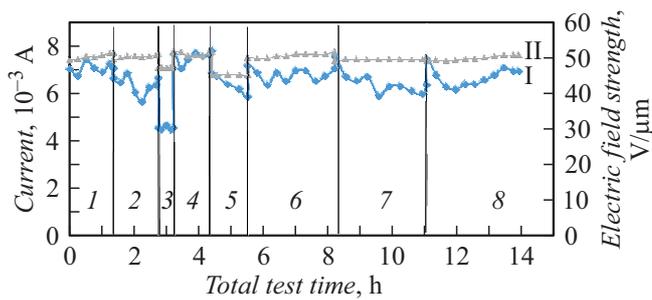


Рис. 2. Изменения полевого тока (I) и напряженности поля (II) в межэлектродном зазоре в течение восьми циклов долговременных испытаний (1–8 — циклы испытаний).

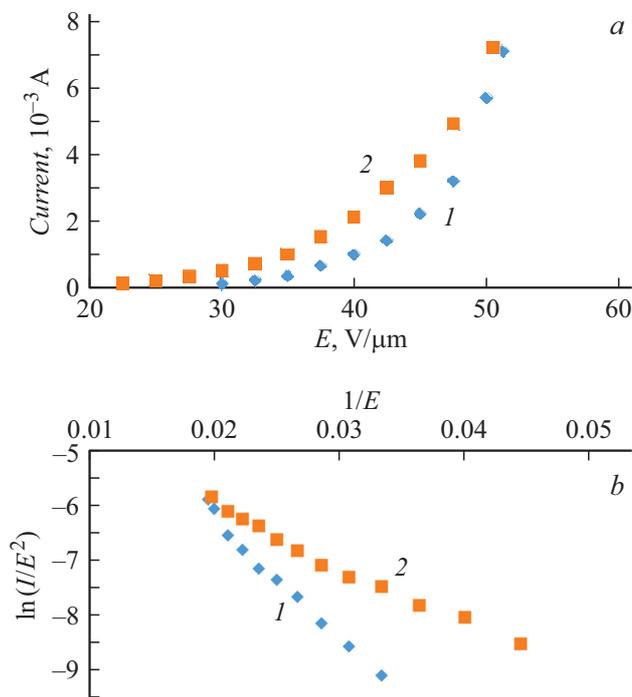


Рис. 3. ВАХ катода, полученные до (1) и после восьми циклов испытаний (2). *a* — в линейных координатах; *b* — в координатах Фаулера–Нордгейма.

таний, которая в предположении автоэмиссии не только с алмазных нанокристаллитов, но и с графитовых микровыступов могла бы претерпевать существенные трансформации. Преимущественное распыление графитовой фазы, находящейся в окружении алмазных нанокристаллитов, обусловлено более низкой теплопроводностью графита и, как следствие, более высокими температурой нагрева и коэффициентом распыления ионами остаточной атмосферы прибора. Распыленные атомы углерода ионизируются в сильном электрическом поле, образуя при рекомбинации в потоке электронов, эмитированных автокатодом, светящиеся вакуумно-плазменные катодные факелы [8].

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокой долговременной воспроизводимости эмис-

сионных характеристик полевых источников электронов на основе алмазграфитовых пленочных структур. Они могут быть использованы для прогнозирования сроков службы автокатодов при эксплуатации в заданных силовых токовых режимах с возможным возникновением нестационарных температурно-вакуумных условий.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.H. Booske, D.R. Whaley, W.L. Menninger, R.S. Hollister, C.M. Armstrong, in *Modern microwave and millimeter-wave power electronics*, ed by R.J. Barker, N.C. Luhmann, J.H. Booske (Wiley-Interscience, N.Y., 2005), p. 171–245.
- [2] G. Mittal, I. Lahiri, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **47**, 323001 (2014). DOI: 10.1088/0022-3727/47/32/323001
- [3] Г.Н. Фурсей, М.А. Поляков, А.А. Кантонистов, А.М. Яфясов, Б.С. Павлов, В.Б. Божевольнов, *ЖТФ*, **83** (6), 71 (2013). [G.N. Fursei, M.A. Polyakov, A.A. Kantonistov, A.M. Yafyasov, B.S. Pavlov, V.B. Bozhevol'nov, *Tech. Phys.*, **58** (6), 845 (2013). DOI: 0.1134/S1063784213060121].
- [4] K. Panda, J.J. Hyeok, J.Y. Park, K.J. Sankaran, S. Balakrishnan, *I.N. Lin, Sci. Rep.*, **7**, 16325 (2017).
- [5] M. Sobaszek, K. Siuzdak, J. Ryl, M. Sawczak, S. Gupta, S.B. Carrizosa, M. Ficek, B. Dec, K. Darowicki, R. Bogdanowicz, *J. Phys. Chem. C*, **121**, 20821 (2017).
- [6] R.K. Yafarov, *J. Commun. Technol. Electron.*, **64**, 1431 (2019). DOI: 10.1134/S1064226919120180
- [7] R.H. Fowler, L.W. Nordheim, *Proc. Roy. Soc. Lond. A.*, **119**, 173 (1928).
- [8] Г.А. Месяц, *Взрывная электронная эмиссия* (Физматлит, М., 2011).