

Микроразряды в диодах с малыми зазорами и автоэмиссионными катодами из стеклоуглерода

© А.И. Бенедик, Т.М. Крачковская, В.И. Шестеркин

Научно-производственное предприятие „Алмаз“,
410033 Саратов, Россия
e-mail: Shesterkin.V@mail.ru

(Поступило в Редакцию 27 января 2015 г.)

Приведены результаты экспериментального исследования микроразрядов в диодах с малыми зазорами и с автоэмиссионными катодами из стеклоуглерода. Показано, что в диодах с многоострийными катодами микроразряды зарождаются и развиваются на вершинах микроострий, когда плотность тока автоэмиссии достигает критических значений в соответствии с теорией Дайка. В диодах с развитой поверхностью без микроострий плотность тока автоэлектронной эмиссии не достигает критических значений и не является причиной возникновения микроразрядов. Экспериментально установлено, что при зазорах диодного промежутка меньше $100\ \mu\text{m}$ изменение давления остаточных газов от $1 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ Torr не влияет на эмиссионную способность и стабильность автоэлектронной эмиссии катодов из стеклоуглерода. Пороговая напряженность поля, при которой возникают микроразряды в диодах с катодами из стеклоуглерода, не изменяется в диапазоне давления остаточных газов от $1 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ Torr.

Введение

Развитие современных технологий и использование материалов, в том числе и углеродных, позволили создать автоэмиссионные катоды с плотностью токоотбора до $10\ \text{A}/\text{cm}^2$ и более. На их основе созданы экспериментальные образцы электронных приборов, работающих в СВЧ-диапазоне длин волн [1]. С продвижением в коротковолновую часть СВЧ-диапазона необходимы автоэмиссионные катоды с плотностью тока $100\ \text{A}/\text{cm}^2$ и более. Попытки увеличить плотность тока за счет увеличения напряженности вытягивающего электрода приводят к нестабильности автоэлектронной эмиссии и пробоям.

Исследованию пробойных явлений диодных промежутков посвящено значительное количество работ [2]. Авторы работы [3] считали, что причиной возникновения пробоев в диодах являются процессы, возникавшие на поверхности анода и развивающиеся в направлении от анода к катоду. Причиной пробоев являлся разогрев поверхности анода кинетической энергией падающего на него электронного потока вплоть до температуры, близкой к температуре плавления материала анода. Группой Дайка было установлено, что инициатором пробоев являлись процессы, зарождавшиеся непосредственно на вершинах острий и развивавшиеся в направлении от катода к аноду [4]. Непосредственной причиной пробоев являлась высокая плотность собственного автоэмиссионного тока ($10^8 - 10^9\ \text{A}/\text{cm}^2$), вызывавшая разогрев кончика острия джоулевым теплом до температур, при которых автоэлектронная эмиссия могла переходить в автотермоэлектронную эмиссию с все более возрастающей долей тока термоэлектронной эмиссии. Это приводило к еще большему повышению температуры кончика острия, и процесс далее развивался лавинообразно. Происходили испарение материала на кончике острия, ионизация продуктов испарения, образование плазмы (факела) и далее процесс заканчивается пробоем.

В [5] исследованы пробойные явления, развивавшиеся не на кончиках микроострий, а внутри пор микроострийного размера на поверхности катода, причина которых связана с пороэлектронной эмиссией.

Пробойные явления наблюдались и в диодах с автоэмиссионными катодами в виде матрицы микроострий из стеклоуглерода [6]. Последствиями пробоев были ухудшение вакуума и необратимое уменьшение автоэмиссионного тока катода, вследствие чего вольт-амперные характеристики смещались в область более высоких значений напряжений.

Более детальное исследование пробойных явлений показало, что глобальному пробоему предшествовали микроразряды (одна из стадий развития вакуумного пробоя) в виде единичных выбросов тока длительностью $\leq 0.1\ \mu\text{s}$ и амплитудой, в несколько раз превышающей величину катодного тока в импульсе [7]. В течение импульса тока катода длительностью $30\ \mu\text{s}$ наблюдалось 3–5 микроразрядов, которые, однако, не приводили к изменению формы и амплитуды импульса тока катода.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований микроразрядов в диодах с малыми зазорами ($1 - 100\ \mu\text{m}$) с автоэмиссионными катодами из стеклоуглерода с различной топологией поверхности катодов и графитовыми анодами.

1. Объекты исследований

Экспериментальные исследования микроразрядов проводились на трех макетах диодов с плоскими электродами и изменявшейся в ходе эксперимента величиной вакуумного зазора. В одном из макетов (диод *D1*) на катоде была сформирована матрица микроострий (рис. 1), во втором макете (*D2*) вся поверхность катода была подвергнута термохимическому текстурированию сплошной

пленкой никеля (рис. 2), в третьем ($D3$) поверхность катода была отполирована до 11-го класса чистоты (рис. 3). Автоэмиссионные катоды в диодах были изготовлены из монолитного стеклоуглерода марки СУ-2000 и имели форму дисков диаметром 3 мм с закругленными краями. Диски анодов диаметром 10 мм были изготовлены из графита марки МПГ-6. Рабочая поверхность анодов была отполирована до 6-го класса чистоты. Матрица микроострий на рабочей поверхности катода в диоде $D1$ была сформирована с использованием тонкопленочной технологии, фотолитографии и термохимического травления [8]. Микроострия имели форму усеченного конуса с диаметром вершины $d \approx 1.7 \mu\text{m}$, высотой $h \approx 12 \mu\text{m}$ и

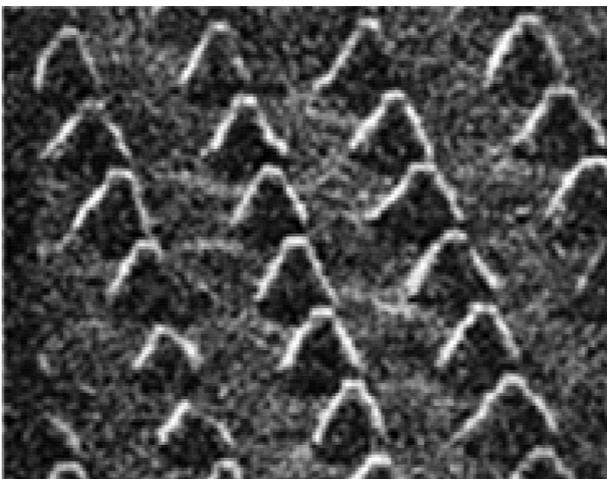


Рис. 1. Фотография участка катода с матрицей микроострий.

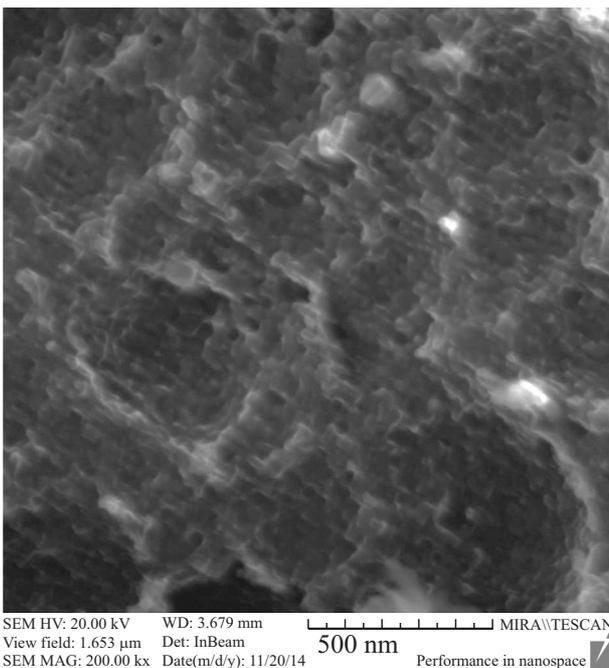


Рис. 2. Фотография участка катода с текстурированной поверхностью.

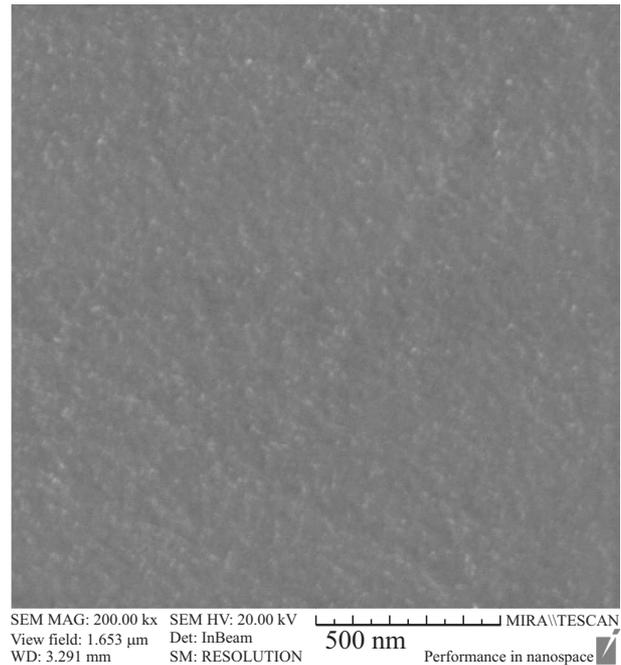


Рис. 3. Фотография участка катода с полированной поверхностью.

располагались в углах квадрата со стороной $20 \mu\text{m}$, что соответствовало плотности упаковки $N = 2.5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2}$.

Система внутривакуумного перемещения позволяла изменять величину зазора диодного промежутка d_{c-a} от $0 \mu\text{m}$ (касание катода и анода) до $100 \mu\text{m}$ с точностью $1 \mu\text{m}$. Измерения проводились в импульсном режиме работы генератора отрицательных импульсов длительностью $\tau = 30 \mu\text{s}$ при скважности $Q = 500$ в вакууме от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-7}$ Торр в режиме непрерывной откачки. Импульсы отрицательной полярности подавались на катод, в то время как анод был заземлен через измерительное сопротивление $R = 100 \Omega$. Для защиты микроострий от пробоев в цепь катода было последовательно включено балластное сопротивление $R = 84 \text{ k}\Omega$. Катоды диодов были подвергнуты предварительной формовке по методике [9].

2. Результаты экспериментов

В ходе экспериментов измерялись значения напряжений (далее напряжение микрозаряда U_p), при которых в течение стабильного во времени импульса тока катода возникали кратковременные выбросы тока, амплитуда которых превышала амплитуду тока катода. За выбросом следовал кратковременный спад тока катода, затем величина его возвращалась к прежнему значению. Количество выбросов тока в течение единичного импульса составляло от трех до пяти. На рис. 4 представлены зависимости U_p от величины зазора диодного промежутка d_{c-a} для диодов $D1$, $D2$ и $D3$.

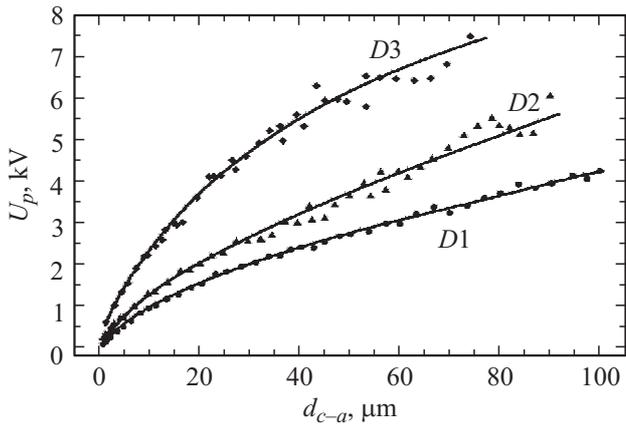


Рис. 4. Зависимость напряжения U_p разряда от величины зазора d_{c-a} в диодах $D1$, $D2$ и $D3$.

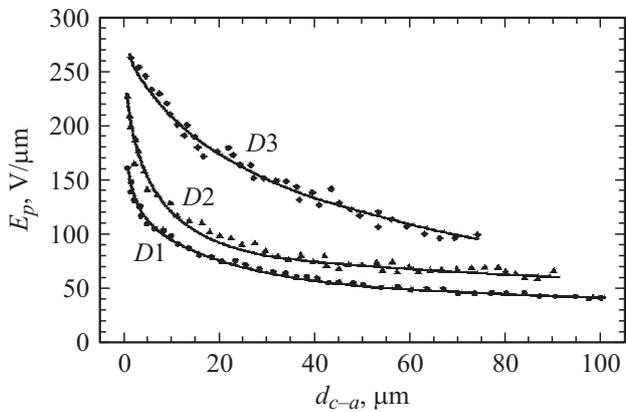


Рис. 5. Зависимости напряженности поля E_p от величины зазора d_{c-a} в диодах $D1$, $D2$ и $D3$.

На рис. 5 приведены зависимости пробойных значений напряженностей поля в диодах $E_p = U_p/d_{c-a}$ от величины междуэлектродного зазора d_{c-a} . Для диода с матрицей микроострий в диапазоне изменения зазора $30 \leq d_{c-a} \leq 100 \mu\text{m}$ напряженность поля стремится к значению $E_p \approx 40 \text{ V}/\mu\text{m}$. При зазорах $d_{c-a} \leq 30 \mu\text{m}$ величина E_p возрастает тем больше, чем меньше величина зазора. Электропрочность вакуумного зазора в диоде $D2$ с текстурированной поверхностью катода примерно на 40% выше, чем в диоде $D1$ с катодом, содержащим матрицу микроострий, а в диоде $D3$ примерно на 20% выше, чем в диоде $D2$.

На основе экспериментально полученных вольт-амперных характеристик диодов определены значения эффективной площади эмиссии S_{eff} катодов и соответствующие им значения эффективной плотности тока J_{eff} эмиссионных центров при различных зазорах d_{c-a} (рис. 6, 7, 8) [10]. В диапазоне изменения величины зазора $30 \mu\text{m} \leq d_{c-a} \leq 100 \mu\text{m}$ в диоде $D1$ значения эффективной плотности тока для единичного микроострия составляет $(1 - 3) \cdot 10^9 \text{ A}/\text{cm}^2$. При таких значениях плотности тока температура

эмиссионных центров достигает $\approx 3000^\circ \text{C}$ [11]. Поскольку приведенные выше значения J_{eff} являются усредненными по всем эмиссионным центрам на поверхности катода, то можно предположить, что значения J_{eff} , а значит и температуры, для отдельных микроострий с различными аспектными отношениями будут отличаться от приведенных выше значений как в меньшую, так и в большую стороны.

В диоде $D2$ с текстурированной поверхностью без микроострий минимальные значения эффективной пло-

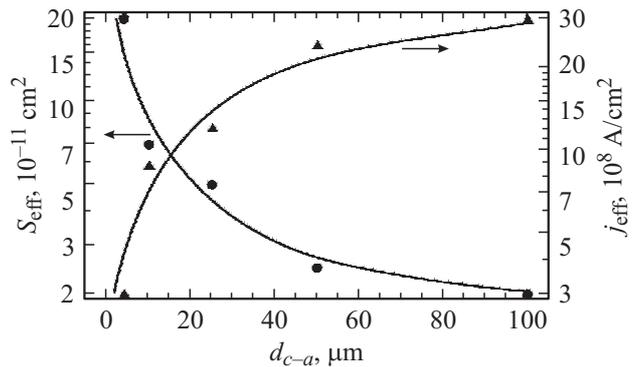


Рис. 6. Зависимости эффективной площади эмиссии и эффективной плотности тока от величины зазора d_{c-a} для диода $D1$.

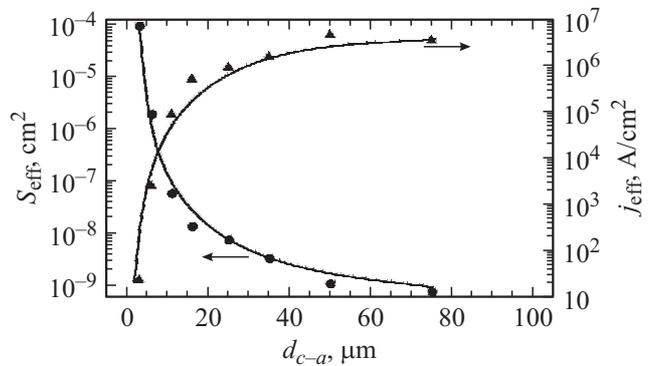


Рис. 7. Зависимости эффективной площади эмиссии и эффективной плотности тока от величины зазора d_{c-a} для диода $D2$.

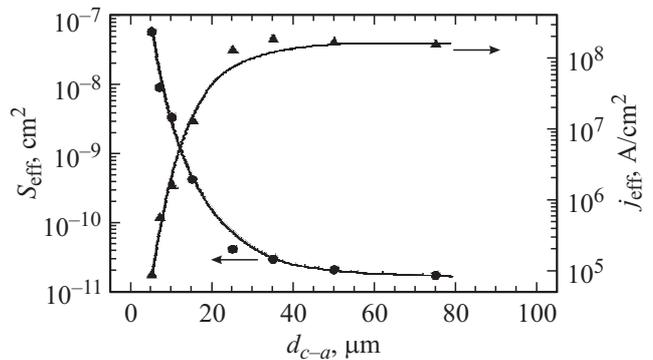


Рис. 8. Зависимости эффективной площади эмиссии и эффективной плотности тока от величины зазора d_{c-a} для диода $D3$.

Динамика процесса развития микроразрядов

Давление, Торг	I_k , мА	Наличие микроразрядов
$1 \cdot 10^{-7}$	11	Микроразрядов нет
$6.5 \cdot 10^{-7}$	11	„ „
$3.6 \cdot 10^{-6}$	11	„ „
$9 \cdot 10^{-5}$	11	„ „
$1 \cdot 10^{-5}$	10.5	„ „
$1.3 \cdot 10^{-5}$	10	Единичные микроразряды
$7.5 \cdot 10^{-5}$	9	Единичные микроразряды участились до 5 за импульс
$1 \cdot 10^{-4}$	7.5	Количество микроразрядов в импульсе более 10
$1 \cdot 10^{-3}$	5.9	Микроразряды заполнили всю длину импульса
$1 \cdot 10^{-4}$	6	Единичные микроразряды
$1 \cdot 10^{-5}$	6.2	Микроразрядов нет
$6 \cdot 10^{-5}$	6.5	„ „
$2 \cdot 10^{-6}$	7.2	„ „
$1 \cdot 10^{-6}$	8	„ „
$1 \cdot 10^{-7}$	11	Ток катода восстановился

шади эмиссии катода примерно на два порядка величины больше, чем у катода в $D1$ с матрицей микроострий при той же величине зазора.

При $d_{c-a} = 3 \mu\text{m}$ значение S_{eff} возрастает примерно на пять порядков величины и составляет $\approx 0.14\%$ от площади катода.

В диоде $D3$ с полированной поверхностью катода J_{eff} достигает критического для микроразряда значения при зазорах $d_{c-a} \geq 20 \mu\text{m}$. При меньших зазорах значение J_{eff} круто снижается вследствие резкого возрастания S_{eff} .

Вследствие того, что в диодах $D2$ и $D3$ коэффициенты усиления поля на эмиссионных центрах в несколько раз меньше, чем в диоде $D1$, токи автоэлектронной эмиссии в данных диодах по абсолютной величине на порядок меньше, чем в диоде $D1$ при тех же значениях напряженности поля E_p [10].

Проведены исследования влияния давления остаточных газов на микроразряды в диоде $D1$ с матрицей микроострий (см. таблицу). С этой целью при давлении $P = 1 \cdot 10^{-7}$ Торр переключался вентиль, соединяющий ионно-геттерный насос „Норд-600“ с исследуемым объектом, и давление в исследуемом объеме повышалось за счет натекания газов через фланцевые соединения. При зазоре $d_{c-a} = 20 \mu\text{m}$ и напряжении анода $U_a = 1550 \text{ V}$ автоэмиссионный ток катода составлял $I_k = 11 \text{ mA}$.

Обсуждение результатов

Полученные результаты экспериментальных исследований микроразрядов показали, что эффективная плотность тока автоэлектронной эмиссии в диоде с матрицей микроострий соответствовала критическим для микро-разряда значениям плотности тока во всем диапазоне

изменения зазоров d_{c-a} , что в соответствии с теорией Дайка являлось причиной микроразрядов. В диоде с текстурированной поверхностью катода эффективная плотность тока на вершинах микроострий была значительно меньше критических значений при всех исследованных в эксперименте зазорах и не могла являться инициатором микроразрядов. В диоде с полированной поверхностью катода плотность тока на эмиссионных центрах достигала критических значений при зазорах $d_{c-a} \geq 20 \mu\text{m}$. При меньших зазорах диодного промежутка, так же как и в диоде с текстурированной поверхностью катода, плотность тока на эмиссионных центрах не достигала критических значений и не являлась причиной микро-разрядов.

В диодах с текстурированной и полированной поверхностями автоэмиссионных катодов без микроострий, у которых эмиссионными центрами являются острия наноразмерного уровня, и значениями коэффициентов усиления поля, примерно в пять раз меньшими, чем в диоде с катодом в виде матрицы микроострий, для возникновения микроразрядов необходима более высокая напряженность поля. Вследствие того, что у автоэмиссионного катода с текстурированной поверхностью без микроострий эффективная площадь эмиссии на несколько порядков больше, чем у катодов с матрицей микроострий, плотность тока на эмиссионных центрах не достигает критических значений и не является причиной микроразрядов.

Приведенные результаты исследований влияния давления остаточных газов на возникновение микроразрядов показали, что при малых зазорах диодных промежутков (меньше $100 \mu\text{m}$) и давлении остаточных газов до $\approx 1 \cdot 10^{-5}$ Торр величина порогового напряжения микро-разрядов сохранялась неизменной.

Заключение

Исследования микроразрядов в диодах с автоэмиссионными катодами из стеклоуглерода с различной структурой рабочей поверхности показали, что электропрочность диодных промежутков тем выше, чем меньше коэффициент усиления электрического поля на эмиссионных центрах.

Результаты экспериментальных исследований микро-разрядов в диодах с автоэмиссионными катодами в виде матрицы микроострий из стеклоуглерода показали, что микроразряды возникали, когда плотность автоэмиссионного тока на вершинах микроострий достигала значений больше $1 \cdot 10^8 \text{ A/cm}^2$, что согласуется с теорией Дайка.

В диодах с автоэмиссионными катодами без микроострий с развитой рабочей поверхностью эффективная площадь эмиссии на несколько порядков больше, чем у катодов с матрицей микроострий. Плотность тока на эмиссионных центрах не достигала критических значений и не являлась причиной микроразрядов.

Список литературы

- [1] *Whaley D.R., Duggal R., Armstrong C.M., Bellew C.L., Holland C.E., Spindt C.A.* // IEEE Transactions On Electron Devices. 2009. Vol. 56. N 5. P. 896–904.
- [2] *Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* / Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
- [3] *Chiels J.A.* // J. Appl. Phys. 1937. Vol. 8. P. 622–626.
- [4] *Dyke W.P., Trolan J.K., Martin E.E., Barbour J.P.* // Phys. Rev. 1953. Vol. 91. N 5. P. 1043–1053.
- [5] *Татарнинова Н.В.* / Влияние процессов в порах поверхности электродов на вакуумную электроизоляцию. Дис. на соискание ученой степени докт. физ.-мат. наук, 1998.
- [6] *Shesterkin V.I., Grigoriev Yu.A., Semenov V.C.* // 38-th International Field Emission Symposium. Vienna, Austria, 1991.
- [7] *Шестеркин В.И., Бенедик А.И., Крачковская Т.М.* // Матер. конф. „Актуальные проблемы электронного приборостроения“. 2014. С. 100–105.
- [8] А.с. № 1738013 Россия. МКИ H01j1/30. Способ формирования топологии преимущественно многоострийного катода. Ю.А. Григорьев, С.В. Васильковский, В.И. Шестеркин, З.А. Ярцева № 481/937/24-21. 1993.
- [9] *Шестеркин В.И.* // Вестн. Саратовского гос. ун-та. 2013. № 4 (73). С. 52–56.
- [10] *Шестеркин В.И.* // РИЭ. 2014. Т. 59. № 8. С. 788–793.
- [11] *Шестеркин В.И., Глухова О.Е., Иванов Д.А., Колесникова А.С.* // РИЭ. 2014. Т. 59. № 8. С. 782–787.