



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-125-7-51-58>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 544.653.23+537.533.2

АВТОЭЛЕКТРОННЫЕ КАТОДЫ НА ОСНОВЕ МАССИВОВ НИОБИЕВЫХ ОКСИДНЫХ СТОЛБИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР ДЛЯ ПОЛЕВЫХ ЭМИССИОННЫХ ДИСПЛЕЕВ

ГОРОХ Г.Г.¹, ТАРАТЫН И.А.², ПЛИГОВКА А.Н.¹, ЛОЗОВЕНКО А.А.¹, ЗАХЛЕБАЕВА А.И.¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь

²ОАО «Минский НИИ радиоматериалов», Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 5 ноября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. В статье обсуждаются перспективы создания управляемых матриц автоэлектронных катодов на основе массивов столбиковых оксидных ниобиевых наноструктур для полевых эмиссионных дисплеев. Разработаны и исследованы геометрические модели автоэлектронных катодов и вакуумных элементов на их основе. Получены распределения электрического поля в вакуумном устройстве при различных расстояниях между катодом и анодом, приложенных напряжениях между ними, форме и микрогеометрии катодов. На основании результатов моделирования рассчитаны оптимальные геометрические параметры наноструктурированных автоэлектронных катодов и матриц на их основе. Разработан технологический маршрут изготовления матриц автоэлектронных катодов на основе массивов ниобиевых металлоксидных столбиковых наноструктур, формируемых электрохимическим анодированием тонкопленочной системы Al/Nb. Изготовлены образцы управляемых матриц автоэлектронных катодов и исследованы их вольт-амперные характеристики при межэлектродном зазоре 2, 5 и 10 мкм в различных электрических режимах при изменении напряженности электрического поля от 3 до 85 В/мкм. При 2 мкм зазоре между анодом и катодом эмиссия возникает при минимальных пороговых напряжениях, однако характеризуется ограниченными значениями токов. Увеличение межэлектродного зазора позволяет увеличить эмиссионные токи, однако при этом повышаются пороговые напряжения. В импульсном режиме достигаются большие значения эмиссионных токов. При зазоре 5 мкм между катодом и анодом пороговое напряжение составило 9,16 В, максимальные токи достигали 350 мкА при напряжении 22,5 В. В импульсном режиме эмиссия возникала при 11,06 В, максимальный ток достигал 1500 мкА при 40 В.

Ключевые слова: автоэлектронные катоды, анодный оксид ниобия, микродисплеи, интегрированные вакуумные элементы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке научно-технической программы Союзного государства «Технология-СГ» (задание 2.3.2.1).

Для цитирования. Горох Г.Г., Таратын И.А., Плиговка А.Н., Лозовенко А.А., Захлебаева А.И. Автоэлектронные катоды на основе массивов ниобиевых оксидных столбиковых наноструктур для полевых эмиссионных дисплеев. Доклады БГУИР. 2019; 7(125): 51-58

AUTOELECTRONIC CATHODES BASED ON ARRAYS OF NIOBIUM-OXIDE COLUMNAR NANOSTRUCTURES FOR FIELD EMISSION DISPLAYS

GENNADY G. GOROKH¹, IGOR A. TARATYN², ANDREI N. PLIGOVKA¹,
ANDREI A. LAZAVENKA¹, HANNA I. ZAKHLEBAYEVA¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

²OJSC “Minsk Research Institute of Radiomaterials”, Minsk, Republic of Belarus

Submitted 5 November 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The article discusses the prospects of creating controlled field-effect cathodes based on arrays of columnar oxide niobium nanostructures for field emission displays. Geometrical models of field-emission cathodes and vacuum elements have been developed and investigated. The distribution of the electric field in the vacuum device at various distances between the cathode and the anode, the applied voltages between them, the shape and microgeometry of the cathodes were obtained. The optimal geometric parameters of nanostructured autoelectronic cathodes and matrices of these were calculated based on the simulation. The technological route has been developed for the production of autoelectronic cathode matrices based on arrays of niobium-oxide columnar nanostructures formed by electrochemical anodization of Al/Nb thin-film system. The samples of controlled arrays of autoelectronic cathodes were fabricated and the current-voltage characteristics with interelectrode gap of 2, 5 and 10 μm in various electric modes with change in the electric field strength from 3 to 85 $\text{V}/\mu\text{m}$ were studied. At 2 μm gap between the anode and cathode, the emission occurs at minimum threshold voltages, but it is characterized by limited current values. The increasing in the interelectrode gap allows rising the emission currents, however, the threshold voltages increase. In the pulsed mode, the large emission currents are achieved. The threshold voltage of autoelectronic cathode matrices with interelectrode gap of 5 μm was 9.16 V, the maximum currents reached 350 μA at voltage of 22.5 V. In the pulsed mode, the emission arose at 11.06 V, the maximum current reached 1500 μA at 40 V.

Keywords: autoelectronic cathodes, niobium metal oxide, microdisplays, integrated vacuum elements.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The work was supported by scientific-technical program of the Common State “Technology-SG” (task 2.3.2.1).

For citation. Gorokh G.G., Taratyn I.A., Pligovka A.N., Lazavenka A.A., Zakhlebayeva H.I. Autoelectronic cathodes based on arrays of niobium-oxide columnar nanostructures for field emission displays. Doklady BGUIR. 2019; 7(125): 51-58.

Введение

Полевые эмиссионные дисплеи (ПЭД) – новое поколение мониторов, индикаторов и других средств отображения информации, которые сочетают в себе свойства электронно-лучевых трубок и жидкокристаллических панелей и обладают улучшенными потребительскими свойствами и техническими характеристиками [1]. В ПЭД предусматривается использование нескольких тысяч элементарных светящихся ячеек в каждой информационной точке (пикселе) экрана, а такое гигантское резервирование приводит к многократному росту их надежности. Наиболее важным элементом в конструкции ПЭД являются источники электронов – матрицы автоэлектронных катодов (МАЭК), поскольку от их эффективности зависят все основные характеристики дисплеев [2]. При этом, как показал анализ технических решений в области создания МАЭК, основным путем повышения эффективности катодов является микроминиатюризация как самих матриц, так и их отдельных элементов [3]. Данное решение позволяет понизить управляющие напряжения, повысить уровень токов излучения и их стабильность во времени, делает возможным излучение на больших площадях с высокой однородностью на поверхности [4]. Применение нанотехнологических подходов позволит решить многие вопросы микроминиатюризации элементов ПЭД и повысить их технические характеристики [5]. В данной работе описаны процессы создания наноструктурированных катодов для МАЭК на основе массивов столбиковых наноструктур из металлоксида ниобия, формируемых при последовательном электрохимическом анодировании

двухслойной системы Al/Nb [6, 7], и представлены результаты исследований матриц автоэлектронных катодов на основе сформированных массивов металлоксидных наноструктур с заданными геометрическими параметрами.

Моделирование параметров МАЭК на основе металлоксидных наноструктур

Для разработки конструкции автоэлектронного катода в матрице для ПЭД было проведено моделирование параметров МАЭК, учитывающих распределение силовых линий электрического поля при подаче напряжения от 10 до 150 В между анодом и катодом, содержащем полость в диэлектрике, в которой находился наноструктурированный катод из металлоксидных наноструктур. Моделирование вакуумного устройства, содержащего матрицу наноструктурированных катодов, в двумерной геометрии проводили с помощью программного комплекса *MATLAB*. При моделировании параметров катода учитывали геометрические параметры составляющих его наностолбиков – длину l , радиус r и расстояние между ними s . Используя различные комбинации соотношений размеров катода, рассчитывали и производили анализ распределения силовых линий электрического поля между катодами и анодом и рассчитывали значения коэффициентов усиления β . При расчетах параметры столбиковых наноструктур $2r \times l$ принимали равными 50×500 нм, расстояние между центрами столбиков $s = 100$ нм, размер одной ячейки для моделирования составлял 2×5 мкм.

В результате расчета микрогеометрии наноструктурированных катодов и исследования распределения напряженности электрического поля при расстоянии между катодом и анодом в 2, 5 и 10 мкм и при условии углубления катодов на 2 и 5 мкм были определены геометрические модели с заданными граничными условиями. На рис. 1 в качестве примера представлены распределения напряженности поля между МАЭК и анодом системы для двух вариантов геометрических параметров структуры: на плоской подложке (рис. 1, *a*) и при углублении катодов на 0,5 мкм (рис. 1, *b*). Полученные данные позволили проанализировать распределение электрического поля между катодом и анодом при напряженности в диапазоне 2,5–12 МВ/см. Так, при напряжении 150 В между плоским катодом и анодом для зазоров 10, 5 и 2 мкм напряженности поля на расстоянии 0,5 мкм от поверхности наноструктурированного катода составляют $2,5 \times 10^6$, $3,25 \times 10^6$ и 12×10^6 В/см соответственно.

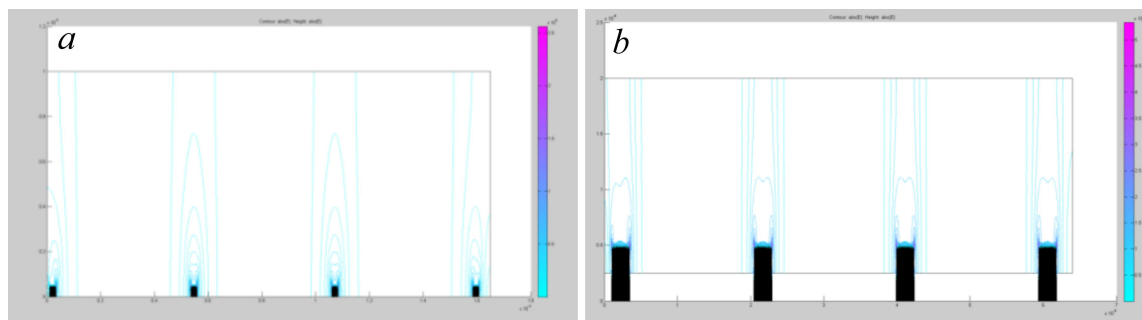


Рис. 1. Распределение напряженности поля в МАЭК при 150 В при расстоянии между анодом и катодами 5 мкм и шаге 20 мкм: *a* – на плоской подложке; *b* – при углублении катодов на 0,5 мкм
Fig. 1. Field distribution in matrix of autoelectronic cathodes at 150 V at space between anode and cathodes of 5 μm and step of 20 μm : *a* – on planar substrate; *b* – at deepening of cathodes on 0,5 μm

В результате многочисленных вариаций параметров определены геометрические размеры МАЭК. Определена оптимальная геометрическая модель возникновения автоэлектронной эмиссии в отдельном катоде и в матрице при минимальных напряжениях – расстояние между катодами – 20 мкм, величина углубления в подложку – от 0,5 до 5 мкм. Анализ распределения электрического поля между катодами заданных размеров и анодом при изменении напряженности в диапазоне 2,5–12 МВ/см показал, что по критерию максимальной плотности эмиссионного тока (плотности силовых линий) при минимальных напряжениях

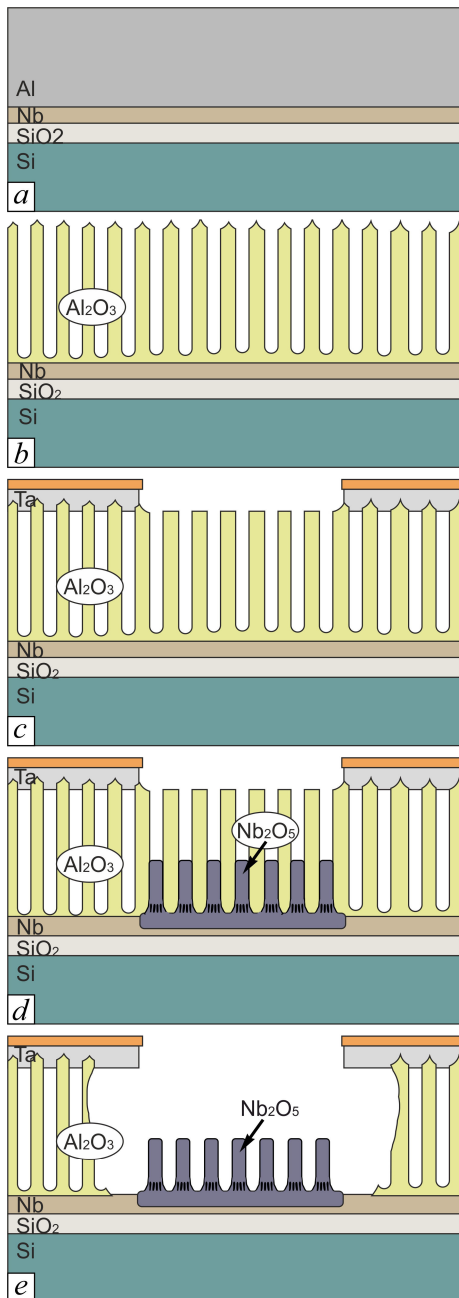


Рис. 2. Последовательность технологического маршрута изготовления МАЭК: *a* – напыление слоев Nb/Al на Si подложку, *b* – анодирование Al, *c* – напыление Ta, фотолитография, плазмохимическое травление Ta, *d* – реанодирование Nb, *e* – локальное травление ПАОА

Fig. 2. Process of autoelectronic cathodes matrix formation: *a* – sputtering of Nb/Al on Si substrate; *b* – Al anodization, *c* – Ta sputtering, photolithography, plasma-chemical etching of Ta, *d* – Nb reanodization, *e* – local dissolution of anodic alumina

межэлектродное расстояние может варьироваться в диапазоне 2–10 мкм, при этом максимальные плотности силовых линий достигаются в вакуумных элементах данной конструкции при напряжениях 10–100 В. На основе разработанной модели были рассчитаны оптимальные геометрические размеры МАЭК.

Разработка технологического маршрута и изготовление МАЭК

МАЭК представляет собой слоистую структуру, состоящую из кремниевой подложки, на которой расположена матрица пористого анодного оксида алюминия (ПАОА) со встроенными наностолбиками анодного оксида ниобия. Шина управления катодами расположена непосредственно на подложке, вакуумная часть элементов размещена в полостях, формируемых с помощью специально разработанных процессов локального травления диэлектрических и проводящих слоев, обеспечивающих изоляционные функции и выполняющих роль управляющей сетки и анода. В каждой полости находится один наноструктурированный катод, состоящий из массива металлооксидных столбиков ниобия.

Технологический маршрут изготовления МАЭК основан на следующих базовых технологических операциях (рис. 2): напыление слоев ниобия и алюминия на окисленную кремниевую подложку (рис. 2, *a*); анодирование слоя алюминия до ниобия (рис. 2, *b*); напыление тантала, фотолитография по рисунку автоэлектронных катодов, плазмохимическое травление металлической пленки (рис. 2, *c*); высоковольтное реанодирование ниобия для формирования столбиковых наноструктур требуемой высоты (рис. 2, *d*); жидкостное травление ПАОА в окнах фоторезистивной маски для формирования объемных колодцев над катодами (рис. 2, *e*). Далее проводят удаление фоторезиста, высокотемпературный отжиг, сборку, вакуумирование и герметизацию структур.

Для формирования МАЭК использовали кремниевые подложки, на которые методом магнетронного распыления в вакууме были нанесены слои Nb толщиной 300 нм и Al толщиной 1,5 мкм. Электрохимическое анодирование образцов проводили в потенциостатическом режиме [7] в 0,4 М растворе $C_2H_2O_4$ при напряжении 53 В. Высоковольтное реанодирование подслоя ниобия через поры сформированного ПАОА проводили в 0,2 М растворе $C_6H_8O_7$ при напряжении 320 В. Электрические режимы анодирования задавали с помощью источника питания Keysight N5752A, регистрацию и мониторинг параметров процесса

проводили с помощью мультиметра Keysight 34470A, соединенного посредством USB с персональным компьютером с установленным программным обеспечением LabView. Сформированную матрицу ПАОА локально удаляли в окнах фоторезистивной маски в 50 % водном растворе H_3PO_4 при температуре 323 К в течение 30 мин.

Исследования микроструктуры сформированных образцов проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi S-806 при ускоряющем напряжении 15–25 кВ. На рис. 3 представлены микрофотографии скола ПАОА со столбиковыми наноструктурами в порах (рис. 3, *a*), массива наноструктур после удаления ПАОА (рис. 3, *b*), массива наноструктур сверху (рис. 3, *c*), сечения колодца в ПАОА с микрокатодом (рис. 3, *d*), катодов сверху (рис. 3, *e*), а также схема кристалла с МАЭК (рис. 3, *f*).

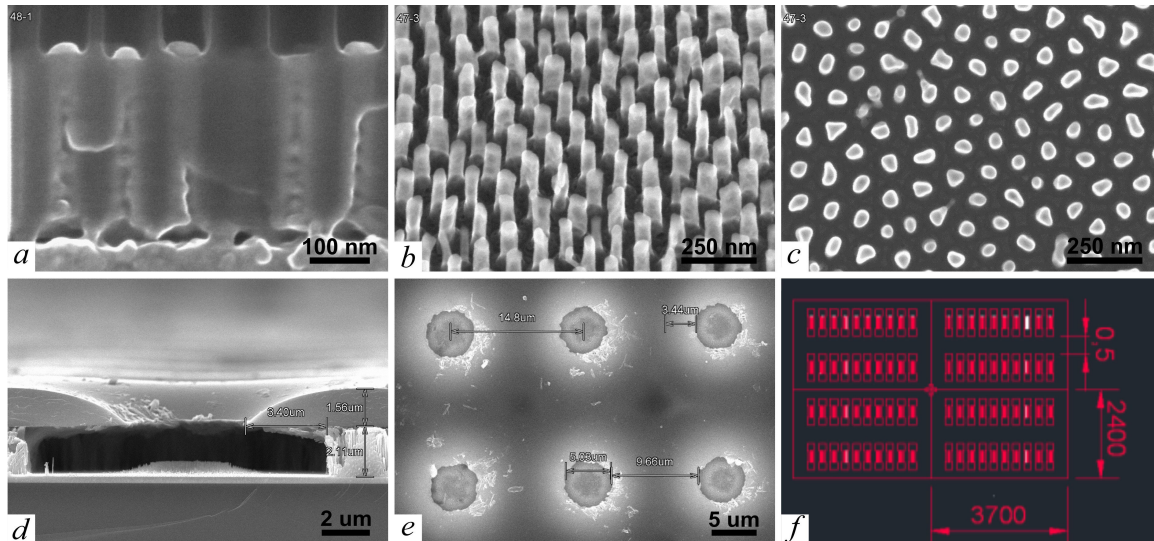


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения сечения ПАОА со столбиковыми наноструктурами в порах (*a*), массива наноструктур после удаления ПАОА (*b*), массива наноструктур сверху (*c*), сечения колодца в ПАОА с микрокатодом (*d*), катодов сверху (*e*), схема кристалла с МАЭК (*f*)

Fig. 3. Scanning electron microscope images: cross-section of anodic alumina with columnar nanostructures (*a*), columnar nanostructures after anodic alumina dissolution (*b*), columnar nanostructures top view (*c*), cross-section of cavity with cathode in anodic alumina (*d*), top view of cathodes (*e*), scheme of autoelectronic cathodes on chip (*f*)

По разработанному маршруту были изготовлены образцы МАЭК, геометрические параметры которых были определены по результатам моделирования. 100 катодов диаметром 3 мкм с шагом 15 мкм располагались в матрице размером 200×700 мкм линейками 5×20 . В кристалле размером 2400×3700 мкм размещалось по 20 матриц элементов, соединенных параллельно в две линейки по 10 матриц, как схематично изображено на рис. 3, *f*.

Измерение вольт-амперных характеристик МАЭК

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) МАЭК измеряли с применением специализированного вакуумного измерительного стенда. Электрические режимы измерений задавали с помощью анализатора Keysight B2901A, а ВАХ образцов регистрировали с помощью мультиметра Keysight 34470A. Управление электрическими режимами и регистрацию параметров осуществляли с помощью персонального компьютера с установленным программным обеспечением EasyEXPERT group+ Device Characterization Software by Keysight Technologies. Исследования ВАХ образцов МАЭК проводили в режиме постоянного и импульсного напряжения при прикладываемой между катодом и анодом разности потенциалов в диапазоне от 0 до 125 В, при межэлектродном расстоянии между катодом и встроенным анодом, равным 2 мкм, а также при расстоянии 5 мкм между подложкой и внешним анодом. В результате измерений достигалась напряженность электрического поля 3–85 В/мкм. Пороговые напряжения определяли при достижении током значения 1 мкА.

По полученным данным строили ВАХ. При измерениях в режиме постоянного напряжения пороговые напряжения между верхней поверхностью катода и встроенным анодом при межэлектродном расстоянии между катодом и анодом 2 мкм составили около 1,86 В, что соответствовало пороговой напряженности электрического поля 0,93 В/мкм. ВАХ образцов имели экспоненциальный вид, максимальный ток достигал значения 200 мкА, соответственно, каждый отдельный катод эмитировал ток около 500 нА. При зазоре между подложкой и внешним анодом в 5 мкм пороговое напряжение составило 9,16 В, что соответствовало пороговой напряженности электрического поля 1,3 В/мкм. При этом максимальные токи достигали значения 350 мкА при напряжении 22,5 В (рис. 4, а).

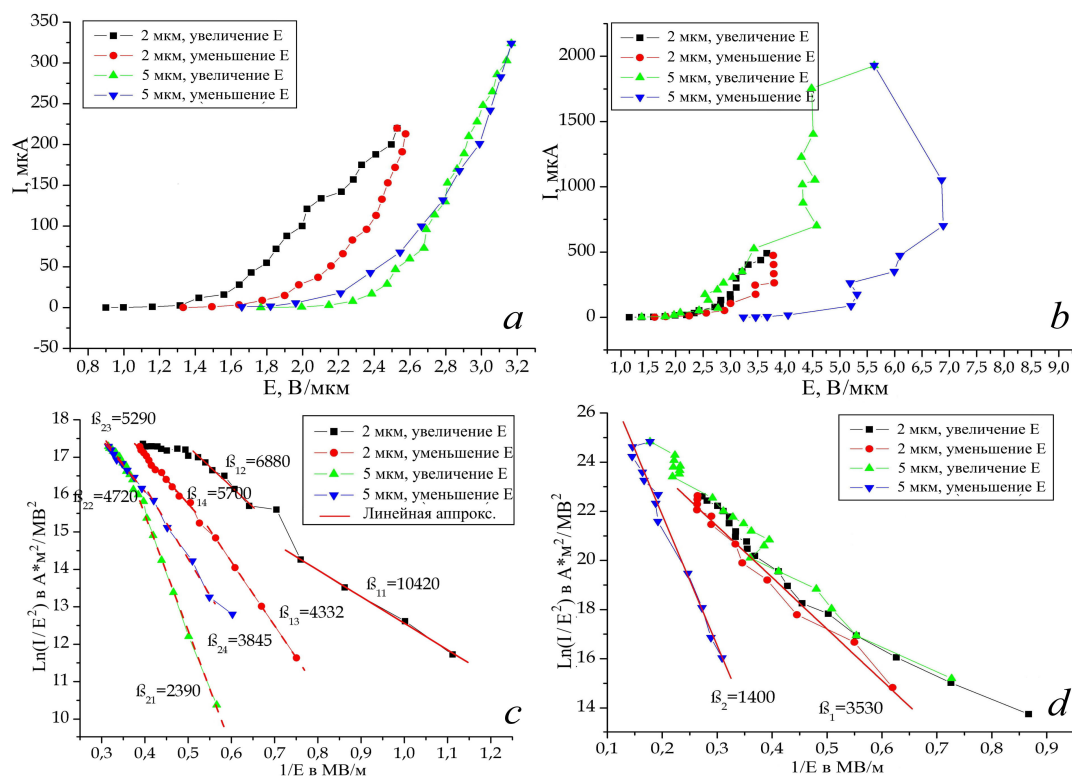


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики матриц автоэлектронных катодов в режиме постоянного напряжения (а, с) и в импульсном режиме (b, d), построенные в линейных координатах (а, b) и в координатах Фаулера–Нордгейма (с, d)

Fig. 4. Current-voltage curves of autoelectronic cathodes matrix at DC voltage (a, c) and in pulse mode (b, d) plotted in line (a, b) and Fowler-Nordheim (c, d) coordinates

При измерениях, проводимых в импульсном режиме (рис. 4, b), между верхней поверхностью катода и встроенным анодом возникала автоэлектронная эмиссия при напряженности поля 1,23 В/мкм. При величине зазора между подложкой и внешним анодом 5 мкм напряженность поля незначительно увеличивалась до 1,5 В/мкм. ВАХ также имели экспоненциальный вид, но максимальный ток в импульсном режиме был значительно выше и достигал значения 500 мкА при 75 В в случае 2 мкм зазора между катодом и анодом и 2000 мкА при 40 В в случае внешнего анода, расположенного на расстоянии 5 мкм. Таким образом, преимуществом импульсного режима является получение больших значений эмиссионных токов [8]. При пересчете на один катод эмиссионный ток составил 40 мкА, что более чем на порядок превышает значение эмиссионного тока, полученное в режиме постоянного напряжения. Представленные данные использовали для построения графиков в координатах Фаулера–Нордгейма (рис. 4, c, d). После проведения линейной аппроксимации были рассчитаны интегральные коэффициенты усиления электрического поля β . Для режима постоянного напряжения коэффициент β составил 10420 и 4332 для установленного зазора между катодом и анодом 2 мкм, а также 3845 и 2930 для внешнего 5 мкм зазора. Для импульсного режима рассчитанный интегральный коэффициент усиления поля β составил 3530 и 1400 для установленного 2 мкм и внешнего 5 мкм зазора соответственно.

Заклучение

На основании физико-математические моделей, учитывающих особенности переноса электронов в тонкопленочных приборных структурах с холодными катодами, рассчитаны оптимальные геометрические размеры отдельного автоэмиссионного элемента и матриц автоэлектронных катодов. Разработан технологический маршрут изготовления матриц автоэлектронных катодов из массивов ниобиевых металлоксидных столбиковых наноструктур и изготовлены образцы. Проведены исследования ВАХ матриц тонкопленочных эмиссионных элементов в диодной конфигурации. В импульсном режиме достигаются на порядок большие эмиссионные токи, чем в режиме постоянного напряжения. Рассчитанные усредненные значения коэффициентов усиления электрического поля для МАЭК с установленным зазором между катодом и анодом превышают значения коэффициентов для элементов с внешним анодом. Проведенные исследования электрофизических характеристик изготовленных экспериментальных образцов показали высокие эмиссионные свойства разработанных автоэлектронных катодов, матрицы которых могут быть использованы в полевых эмиссионных микродисплеях.

Список литературы

7. Огурцов О. Полевые эмиссионные дисплеи – новое направление развития плоских устройств воспроизведения изображения. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 1997; 5 (11): 25-29.
8. Templier F., Bouzid K. *OLED Microdisplays: Technology and Applications*. Hoboken NJ: John Wiley & Sons, Inc; 2014. DOI: 10.1002/9781119004745.
9. Kim H.D., Chung H.J., Berkeley B.H., Kim S.S. Emerging technologies for the commercialization of AMOLED TVs. *Journal of the Society for Information Display*. 2009; 25 (9): 18-22. DOI: 10.4018/978-1-60566-172-8.ch002.
10. Sarganov V.F., Gorokh G.G. Array of niobium nanotips formed in porous anodic alumina matrix. *SPIE Conference Proceedings*. 2000; 4019: 526-530. DOI: 10.1117/12.382321.
11. Татаренко Н.И., Кравченко В.Ф. *Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе*. М.: Физматлит; 2006.
12. Mozalev A., Vázquez R.M., Bittencourt C., Cossement D., Gispert-Guirado F., Llobet E., Habazaki H. Formation-structure-properties of niobium-oxide nanocolumn arrays via self-organized anodization of sputter-deposited aluminum-on-niobium layers. *Journal of Materials Chemistry C*. 2014; 2 (24): 4847-4860. DOI: 10.1039/c4tc00349g.
13. Pligovka A., Lazavenka A., Gorokh G. Anodic niobia column-like 3-D nanostructures for semiconductor devices. *IEEE Transactions on Nanotechnology*. 2019; 18: 790-797. DOI: 10.1109/tnano.2019.2930901.
14. Cheng Z., Sun L., Li Z.Y., Serbun P., Kargin N., Labunov V., Shulitski B., Kashko I., Grapov D., Gorokh G. Field emission cathodes based on structured carbon nanotube arrays. *World Journal of Research and Review*. 2017; 4 (3): 8-27. DOI: 10.1889/1.2433587.

References

1. Ogurtzov O. Field-Emission Displays: a New Technology for Flat Image Devices. *Electronics: science, technology, business*. 1997; 5 (11): 25-29 (in Russian).
2. Templier F., Bouzid K. *OLED Microdisplays: Technology and Applications*. Hoboken NJ: John Wiley & Sons, Inc; 2014. DOI: 10.1002/9781119004745.
3. Kim H.D., Chung H.J., Berkeley B.H., Kim S.S. Emerging technologies for the commercialization of AMOLED TVs. *Journal of the Society for Information Display*. 2009; 25 (9): 18-22. DOI: 10.4018/978-1-60566-172-8.ch002.
4. Sarganov V.F., Gorokh G.G. Array of niobium nanotips formed in porous anodic alumina matrix. *SPIE Conference Proceedings*. 2000; 4019: 526-530. DOI: 10.1117/12.382321.
5. Tatarenko N.I., Kravchenko V.F. *Field emission nanostructures and based devices*. Moscow: PhysMathLit; 2006.
6. Mozalev A., Vázquez R.M., Bittencourt C., Cossement D., Gispert-Guirado F., Llobet E., Habazaki H. Formation-structure-properties of niobium-oxide nanocolumn arrays via self-organized anodization of sputter-deposited aluminum-on-niobium layers. *Journal of Materials Chemistry C*. 2014; 2 (24): 4847-4860. DOI: 10.1039/c4tc00349g.

7. Pligovka A., Lazavenka A., Gorokh G. Anodic niobia column-like 3-D nanostructures for semiconductor devices. *IEEE Transactions on Nanotechnology*. 2019; 18: 790-797. DOI: 10.1109/tnano.2019.2930901.
8. Cheng Z., Sun L., Li Z.Y., Serbun P., Kargin N., Labunov V., Shulitski B., Kashko I., Grapov D., Gorokh G. Field emission cathodes based on structured carbon nanotube arrays. *World Journal of Research and Review*. 2017; 4 (3): 8-27. DOI: 10.1889/1.2433587.

Вклад авторов

Горох Г.Г. выполнил моделирование параметров МАЭК, принял участие в интерпретации результатов.

Плиговка А.Н. разработал технологический маршрут.

Таратын И.А. разработал конструкции, выполнил изготовление матриц катодов.

Лозовенко А.А. выполнил измерение ВАХ, принял участие в интерпретации результатов.

Захлебаева А.И. выполнила обработку данных.

Authors contribution

Gorokh G.G. performed modeling of MAEC parameters, took part in the interpretation of the results.

Pligovka A.N. developed a technological route.

Taratyn I.A. developed designs, completed the manufacture of cathode matrices.

Lazavenka A.A. performed a measurement of the I–V characteristic, took part in the interpretation of the results.

Zakhlebayeva A.I. performed data processing.

Сведения об авторах

Горох Г.Г., к.т.н., заведующий НИЛ 4.10 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Таратын И.А., к.т.н., зам директора по научной работе ОАО «Минский НИИ радиоматериалов».

Плиговка А.Н., к.т.н., с.н.с. НИЛ 4.10 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Лозовенко А.А., н.с. НИЛ 4.10 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Захлебаева А.И., н.с. НИЛ 4.10 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Gorokh G.G., PhD, head of R&D Laboratory 4.10 of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Taratyn I.A., PhD, Deputy Director for Research of OJSC «Minsk Research Institute of Radiomaterials».

Pligovka A.N., PhD, senior researcher of R&D Laboratory 4.10 of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lazavenka A.A., researcher of R&D Laboratory 4.10 of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zakhlebayeva H.I., researcher of R&D Laboratory 4.10 of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-80-47;
e-mail: gorokh@bsuir.by
Горох Геннадий Георгиевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki st., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-80-47;
e-mail: gorokh@bsuir.by
Gorokh Gennady Georgievich