

Разработка и исследование автоэмиссионной среды для автокатодов мобильных силовых СВЧ приборов

© В.А. Беспалов,¹ Э.А. Ильичев,¹ С.В. Куклев,² А.Е. Кулешов,¹ Р.М. Набиев,¹ Н.Н. Патюков,¹ Г.Н. Петрухин,¹ Г.С. Рычков,¹ Д.С. Соколов,² Е.Г. Тевверовская,¹ Е.Ю. Шелюхин¹

¹ Национальный исследовательский университет „Московский институт электронной техники“, 124498 Зеленоград, Москва, Россия

² Общество с ограниченной ответственностью „МЭЛЗ ФЭУ“, 124460 Зеленоград, Москва, Россия
e-mail: edil44@mail.ru

(Поступило в Редакцию 23 ноября 2016 г. В окончательной редакции 25 июля 2017 г.)

Предложены и экспериментально исследованы автоэмиссионные среды, выполненные на основе гетероструктуры кремний/алмаз с массивами кремниевых микроострий на гетерогранице. Архитектура гетероструктур оптимизирована для применений в качестве активной среды автокатодов мобильных силовых СВЧ приборов.

DOI: 10.21883/JTF.2018.03.45607.2107

Введение

Радиационностойкая и термостойкая электронная компонентная база (ЭКБ) для приборов и устройств силовой электроники СВЧ и микроволнового диапазона частот остро востребована широким спектром приборов и технических систем. При реализации маломощных СВЧ приборов предпочтение отдается арсениду галлия и твердым растворам на его основе (GaAs–AlAs, GaAs–InAs), здесь в настоящее время достигнуты значительные успехи [1–3]. Существенные успехи достигнуты и в развитии вакуумной силовой СВЧ и микроволновой электроники, в том числе в таких ее актуальных направлениях, как радиолокация (до 30 GHz), космическая связь, точная локация объектов в субтера- и терагерцовом диапазоне частот, медицинская диагностика и терапия ($\Delta f = 300\text{--}700\text{ GHz}$). Однако существующие разработки ЭКБ вакуумной силовой СВЧ электроники не удовлетворяют требованиям по мобильности (времени выхода системы в рабочий режим), габаритам и КПД со стороны целого ряда технических систем [4,5].

Выбор базовых материалов и физических эффектов

Оценки предельных параметров приборов, выполненных на основе различных материалов, позволяют получить шкалу сравнительной эффективности их использования в разработках ЭКБ для силовой СВЧ и микроволновой электроники. В табл. 1 представлены параметры нормализованных по отношению к кремнию критериев эффективности различных материалов для ЭКБ СВЧ и субтерагерцового диапазона частот. Оценки получены при использовании значений параметров материалов, представленных в табл. 2, и наиболее эффективным для

радиочастотных применений оказывается алмаз. С учетом фактора „технологичности“ материала (линейные размеры подложек, уровень концентраций фоновой примеси, концентрации структурных дефектов и глубоких энергетических центров) представленная выше шкала сравнительной эффективности материалов претерпевает поправки, касающиеся алмаза. Предпочтение отдают нитриду галлия [6,7], а при реализации твердотельных маломощных приборов — арсениду галлия и твердым растворам на его основе (GaAs–AlAs, GaAs–InAs).

Перечисленные критерии выбора материалов, основанные на сравнительном анализе их электрофизических свойств и учете уровня развития маршрутных технологий, следует дополнить еще фактором — учетом предельных возможностей физических механизмов, положенных в основу работы приборов. При этом доминирующая роль того или иного физического эффекта при реализации характеристик приборов определяется в значительной степени их конструкцией и функциями. Так, для маломощных устройств, способных работать в диапазоне частот больше 100 GHz, наиболее успешными являются разработки приборов, в основе работы которых лежат туннельные эффекты (например, туннельно-резонансные транзисторы и диоды на основе GaAs–AlAs и GaAs–InAs). Им характерна „мультиустойчивость“, позволяющая создать очень компактные конструкции функциональных схем с быстродействием в субтерагерцовом диапазоне частот (генераторы, умножители частоты, среды для динамической памяти и др.). Напротив, при реализации твердотельных силовых СВЧ приборов предпочтение отдают нитриду галлия и его твердым растворам. На GaN сегодня создана линейка полевых транзисторов, перекрывающих диапазон частот до 80 GHz и мощностей до 180 W: 80 GHz — 0.3 W, 4 GHz — 15 W, 2.17 GHz — 180 W.

Однако реализовать работу полевых приборов, эффективных в частотном диапазоне свыше 40 GHz с

Таблица 1. Значения параметров нормализованных критериев эффективности различных материалов

Материал	Критерии				
	$JM = (E_c v_s / 2\pi)^2$	$KM = \lambda(v_s/\epsilon)^{1/2}$	$VM = \mu\epsilon E_c^3$	$VH = \mu E_c^2$	$QF1 = \lambda\mu\epsilon E_c^3$
Si	1	1	1	1	1
Ge	0.04	0.27	0.13	0.29	0.052
GaAs	14.3	0.42	46	227	14.1
SiC	539	3.78	897	90.7	2200
β -GaN	750	2.44	1460	161	2030
Алмаз	8043	18.84	26000	1630	210000

Таблица 2. Параметры, использованные при расчетах нормализованных критериев эффективности материалов

Материал	Размерность					
	$\mu_e, \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	$E_c, \text{V/cm}$	$v_s, \text{cm/s}$	$\lambda, \text{W/cm K}$	ϵ	$E_g(300 \text{ K}), \text{eV}$
Si	1500	$3 \cdot 10^5$	10^7	1.5	11.8	1.12
Ge	3900	10^5	$6 \cdot 10^6$	0.6	16.0	0.67
GaAs	8500	$6 \cdot 10^5$	$1.9 \cdot 10^7$	0.46	12.0	1.43
β -GaN	1200–2000	$3.3 \cdot 10^6$	$2.5 \cdot 10^7$	2.1	9.7	3.3
SiC	650–1000	$3.5 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^7$	3.7 (4H)	10.0	3.23 (4H)
Алмаз	2200	10^7	$2.7 \cdot 10^7$	12.0	5.7	5.4

Примечание. μ_e — подвижность электронов, E_c — предельные напряженности электрического поля, v_s — скорость насыщения электронов, λ — коэффициент теплопроводности, ϵ — диэлектрическая проницаемость, E_g — ширина запрещенной зоны.

мощностью свыше 10 W, оставаясь при этом в рамках ЭКБ твердотельной электроники, затруднительно даже при использовании вышеуказанных высокоэффективных материалов. Это связано с рядом принципиальных физических и конструкционных ограничений, например с уменьшением коэффициента разветвления (а значит, добротности) при частотах свыше 40 GHz из-за значимости величин входной и паразитной емкостей у силовых твердотельных усилительных приборов. Задачи эти решаются использованием ЭКБ вакуумной эмиссионной СВЧ электроники, в рамках которой приборы (например, клистроны и ЛБВ) с рабочими токами > 1 A и напряжениями в сотни и тысячи V способны устойчиво работать при повышенных дозах радиации и в температурном диапазоне от -100°C до $+300^\circ\text{C}$. Однако мобильность и КПД таких приборов для выполнения ряда задач недопустимо низки, а энергозатратность и большие габариты затрудняют бортовые применения. Причина заключена в использовании в вакуумных силовых приборах термокатодов в качестве источника электронов. Устранить указанные недостатки можно, заменив термокатоды на сильноточные автокатоды, которые помимо чрезвычайно высокой мобильности (время выхода прибора в рабочий режим) позволяют реализовать монохроматичный электронный пучок, устойчивы к колебаниям температуры, слабо чувствительны к внешней радиации, компактны, обеспечивают экспоненциально высокую крутизну вольт-амперных характеристик. Однако 40–50 лет интенсивной многоплановой работы многочисленных групп исследователей в различных

лабораториях мира [8–15] не позволили реализовать сильноточные автокатоды и на их основе приборы с совокупностью перечисленных свойств. Не удалось изготовить стабильные автокатоды на плотности токов более 0.1 A/cm^2 для работы в режиме постоянного тока и более 1 A/cm^2 для работы в импульсном режиме, при полном токе, составляющем хотя бы $\sim 0.1 \text{ A}$. Типичные величины полных токов реализованных автокатодов, как правило, не превышают десятка миллиампер (10 mA), а ресурс их работы чрезвычайно низок (не более 10–100 h в зависимости от амплитуды тока). Причин тому несколько, а их устранение чрезвычайно сложно. Основные из них:

- а) отсутствуют технологии формирования острых автоэмиссионных сред с малой дисперсией аспектных отношений микроострий массива;
- б) недопустимо низок предел текучести исходных материалов;
- в) существуют проблемы отвода тепла от наноразмерных микроострий массива;
- г) чрезмерно велики (4–5 eV) величины потенциальных барьеров автоэмиссионных микроострий на основе тугоплавких металлов и полупроводников, требующие использования больших рабочих напряжений.

Несложно оценить, что минимально допустимое значение предела текучести для автоэмиссионного острия (σ_{edge}) превышает величину в $(3-5) \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ при диаметре острия $\sim 50 \text{ \AA}$ и пороговом эффективном электрическом поле в $\sim 10 \text{ V/\mu m}$. При этом для наиболее часто используемых в электронике материалов с высо-

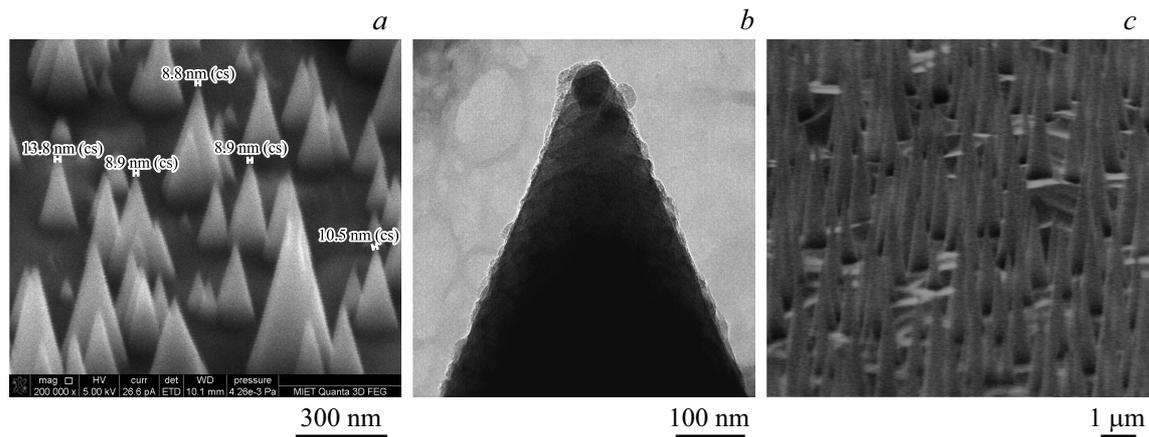


Рис. 1. РЭМ (а и с) и ПЭМ (b) изображения микроострий, сформированных в подложке монокристаллического кремния.

кими прочностными свойствами, таких как вольфрам и кремний, пределы текучести составляют соответственно $\sigma_w \approx 300 \text{ N/mm}^2$ и $\sigma_{\text{Si}} \approx 10^3 \text{ N/mm}^2$. При протекании автоэмиссионного тока $\sim 1 \mu\text{A}$ через кремниевое микроострие (nanoSi) высотой $\sim 1 \mu\text{m}$ и диаметром $\sim 100 \text{ \AA}$ из-за джоулевого тепла происходит его нагрев до температур $1000\text{--}1200^\circ\text{C}$ (оценки эти подтверждаются в экспериментах), и, как следствие, наблюдается значительная деградация предела текучести. К материалам микроострий, удовлетворяющим требованиям по пределу текучести, относятся алмаз, нитрид галлия и карбид кремния. Алмаз, наиболее эффективный из таких материалов, обладает рядом и других не менее важных преимуществ (табл. 2).

Выбор структуры и конструкции сильноточного автокатаода

Оценки температуры разогрева алмазных микроострий в рабочем режиме дают значения в $\sim 200^\circ\text{C}$ при той же геометрии, что и для кремниевых микроострий, а существенно большая величина предела текучести алмаза ($\sigma_{\text{diamond}} = 3.5 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$), с учетом снижения величины пороговых полей автоэмиссии за счет отрицательной энергии сродства к электрону для кристаллографического направления (111), указывают на потенциальную эффективность использования алмаза для сильноточных острийных автокатодов с большим временным ресурсом работы.

Из проблем, названных выше, наиболее сложной для реализации сильноточных острийных автокатодов остается проблема формирования массива наноразмерных микроострий с малой дисперсией аспектных отношений. В [16–18] предложены конструкции микроострийных автокатодов и технологии их изготовления, которые направлены на нейтрализацию отрицательного влияния на режим работы микроострийного автокатаода даже значительной дисперсии высот микроострий. Суть

этих предложений состоит в том, что автоэмиссионная среда выполняется в виде гетероструктуры подложка Si/nanoSi/алмаз, в которой массивы кремниевых микроострий (nanoSi) располагаются на границе раздела кремний/алмаз. В качестве алмазной пленки используется поликристаллическая алмазная пленка (ПАП) слабо легированная акцепторами (бором), осажденная PECVD методом на поверхность с массивами кремниевых микроострий. Толщина ПАП выбирается приблизительно равной средней высоте микроострий массива. Присутствие алмазной пленки приводит к тому, что каждое из кремниевых микроострий заключается в жесткий алмазный каркас, упрочняющий кремниевые микроострия и реализующий эффективный отвод тепла от каждого из них. Для твердотельных вариантов автоэмиссионных диодов (ТАД) поверх поликристаллического алмазного слоя (C^*) осаждается металлическая пленка с адгезионным подслоем (например, Cr/Au). Таким образом, независимо от высот микроострий массива при приложении к гетероструктуре разности потенциалов (минус на подложке) поле вблизи каждого из микроострий определяется приложенной к структуре разностью потенциалов, толщиной алмазного слоя и диаметром вершин микроострий. В случае равенства диаметров вершин микроострий это обеспечит для каждого из них (независимо от высот микроострий) одинаковые пороговые автоэмиссионные условия. Остается единственное требование — реализовать автоэмиссионный массив с микроостриями, имеющими малую дисперсию диаметров вершин. Нами разработана технология, позволяющая реализовать массивы микроострий с малой дисперсией углов при вершинах (рис. 1). В случае острийных автокатодов для вакуумных автоэмиссионных приборов поверх поликристаллического алмазного слоя осаждается туннельно-прозрачная металл-углеродная пленка наноразмерной толщины ($\sim 10 \text{ nm}$). Указанная аморфная пленка получена [19,20] посредством одновременного распыления из плазмотронного и магнетронного источников на холодную подложку углеродного [полифенилметилсилоксан

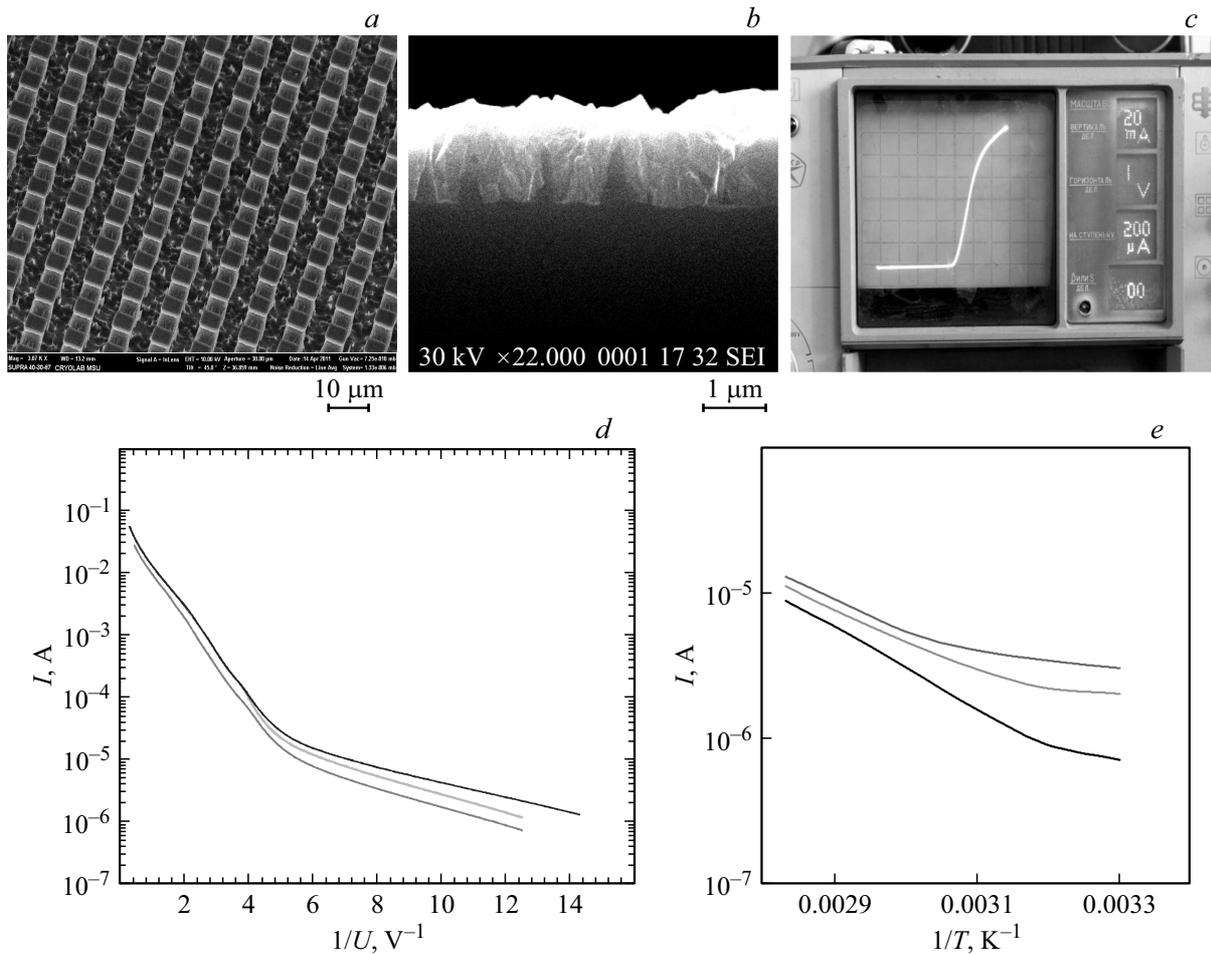


Рис. 2. РЭМ изображения и характеристики твердотельного автоэмиссионного диода (ТАД): *a* — совокупность диодных автоэмиссионных ячеек (мезаструктур) на поверхности кристалла ТАД; *b* — поперечное сечение мезаструктуры кристалла ТАД (подложка Si/nanoSi/C*); *c* — фотоизображение ВАХ произвольной диодной автоэмиссионной ячейки (мезаструктуры) ТАД; *d* — ВАХ произвольной диодной автоэмиссионной ячейки ТАД в „фаулеровских“ координатах в режиме „прямого“ смещения; *e* — температурная зависимость тока ячейки ТАД в режиме „обратного смещения“ ($U_{fb} = 9\text{ V}$) для произвольных трех ячеек кристалла.

$(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{SiO}(\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{SiO})_3\text{Si}(\text{CH}_3)_3]$ и металлического (молибден) материалов. При такой архитектуре автоэмиссионной среды автокатода на основе гетероструктуры подложка Si/nanoSi/C*/(Mo : C : Si), возникшая разность электрических потенциалов между микроостриями различной высоты „снимается“ (компенсируется) протеканием тока по проводящей композитной пленке Mo : C : Si, так что она по всей поверхности автокатода будет находиться под одним потенциалом. Таким образом, у подавляющего большинства микроострий поле вблизи их вершин независимо от высоты микроострий будет определяться приложенной разностью потенциалов, толщиной ПАП и диаметрами вершин микроострий. В плоских приборных конструкциях при таком подходе в жертву, безусловно, приносится однородность поля в пространстве между катодом и анодом, что приведет к ухудшению монохроматичности состава пучка электронов. Однако для высокоточных применений это, как правило, не столь существенно.

Результаты экспериментальных исследований

В экспериментальных исследованиях образцов автоэмиссионной среды с архитектурой подложка Si/nanoSi площадью $1 \times 1\text{ mm}$, установлено, что при эмиссии электронов в вакуум максимальный автоэмиссионный ток не превышает $50\text{--}100\text{ }\mu\text{A}$. И это несмотря на то, что на указанной площади находится до $\sim (1\text{--}5) \cdot 10^4$ микроострий, а из каждого отдельного микроострия экспериментально удается снять автоэмиссионный ток в пределах $\sim 0.7\text{--}1.2\text{ }\mu\text{A}$. Таким образом, наблюдается значительное (более чем в 100 раз) расхождение ожидаемых и реализуемых величин полных токов. При исследованиях твердотельного автоэмиссионного диода [16,17] с автокатодом на основе гетероструктуры подложка Si/nanoSi/C*/Cr/Au (рис. 2, *a, b*), в которой выполнены автоэмиссионные ячейки в виде мезаструктур площадью 0.25 mm^2 с расположенными на них массивами крем-

ниевых микроострий, покрытых поликристаллической алмазной пленкой (C^*) толщиной $\sim 0.5\text{--}0.8\ \mu\text{m}$, удается достичь автоэмиссионных токов в $\sim 100\text{--}120\ \text{mA}$ (т.е. на три порядка больших) и реализовать плотности тока в $50\ \text{A}/\text{cm}^2$. Без использования специальных мер для отвода от кристалла тепла ограничения по току с одной мезаструктуры (автоэмиссионной ячейки) на основе гетероструктуры подложка $\text{Si}/\text{nanoSi}/C^*/\text{Cr}/\text{Au}$ наступали с $\sim 100\ \text{mA}$ (рис. 2, *c*). На кристалле размером в $1\ \text{cm}^2$ расположено до ~ 50 таких автоэмиссионных ячеек (мезаструктур). Исследования показали, что ВАХ каждой из автоэмиссионных ячеек в режиме прямого смещения „спрямляется“ в координатах Фаулера–Нордгейма (рис. 2, *d*) и в диапазоне $300\text{--}400\ \text{K}$ не зависит от температуры. Характер ВАХ в режиме обратного смещения (рис. 2, *e*) определяется глубокими энергетическими центрами с энергией активации $\sim 0.6\ \text{eV}$.

Для прямых экспериментальных исследований степени однородности автоэмиссии электронов в вакуум с поверхности автокатодов большой площади нами разработана конструкция корпуса макета вакуумного автоэмиссионного диода, позволяющая в режиме „on line“ наблюдать автоэмиссию с любого участка поверхности автокатада [21]. На рис. 3 представлена схема конструкции исследуемого макета вакуумного автоэмиссионного диода. Его автокатод 3 имел 2-сторонний кольцевой контакт по периферии к тыльной стороне подложки. Внешний диаметр пластины автокатада составлял $24.5\ \text{mm}$, расстояние между анодами 6, 7 и автокатодом 3 составляло $\sim 0.8\ \text{mm}$. Анод был выполнен в виде катодолюминесцентного экрана на основе ZnS/Cr , расположенного на волоконно-оптическом стекле, обеспечивающем вывод оптического изображения видимого диапазона (картины катодолюминесценции вещества анода-экрана) из корпуса с пространственным разрешением в $\sim 50\ \mu\text{m}$.

Измерению степени однородности автоэмиссии в режиме постоянного тока с поверхности автокатодов большой площади подлежали четыре типа экспериментальных образцов, отличающихся архитектурой структуры автокатада. Специальных мер для отвода „джоулева“ тепла от автокатада и анода-экрана не предпринималось. У образцов первого типа (подложка Si/nanoSi) поверхность автокатада выполнена в виде совокупности мезаструктур с массивами кремниевых микроострий, углы при вершинах которых в пределах пластины составляли $\sim 17\text{--}19^\circ$. В образцах второго типа автокатод выполнен на основе гетероструктуры подложка $\text{Si}/\text{nanoSi}/(\text{Mo} : \text{C} : \text{Si})$, углы при вершинах микроострий которой в пределах пластины составляли $\sim 19\text{--}21^\circ$. Образцы третьего типа имели автокатод на основе гетероструктуры подложка $\text{Si}/\text{nanoSi}/C^*$, а автокатод образцов четвертого типа был выполнен на основе гетероструктуры подложка $\text{Si}/\text{nanoSi}/C^*/(\text{Mo} : \text{C} : \text{Si})$. На лицевой поверхности образцов всех четырех типов была выполнена (рис. 2, *a*) совокупность мезаструктур (~ 50 pcs на кристалле автокатада) с площадью каждой из них

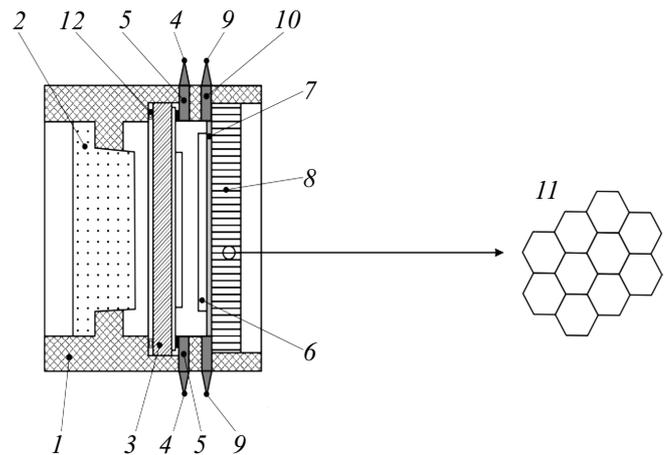


Рис. 3. Схематическое изображение макета вакуумного автоэмиссионного диода (ВАД), позволяющего наблюдать степень однородности автоэмиссии с поверхности автокатада большой площади в режиме „on line“ (1 — вакуумно-плотный металлокерамический корпус, 2 — входное окно, 3 — автокатод, 4, 9 — проводящие электроды, 5, 10, 12 — контакты кольцевые, 6, 7 — анод-экран, 8 — волоконно-оптическое стекло (ВОС), 11 — фрагмент ВОС).

$0.5 \times 0.5\ \text{mm}$, а массивы кремниевых микроострий располагались на поверхности кремниевых мезаструктур.

Результаты измерения образцов первого типа (подложка Si/nanoSi) практически не отличались от результатов, полученных ранее в процессе многочисленных измерений тестовых автоэмиссионных сред с массивами кремниевых микроострий той же и несколько большей ($1 \times 1\ \text{mm}$) площади. Эффективные пороговые поля автоэмиссии здесь составляли $\sim 5.5\ \text{V}/\mu\text{m}$, а максимальные токи, снимаемые с автокатодов указанной выше площади, не превышали $100\text{--}200\ \mu\text{A}$. При этом ВАХ вакуумных автоэмиссионных диодов с автокатадами первого типа крайне нестабильны, сопровождались значительным уровнем токового шума, рабочий ресурс диодов не превышал $5\text{--}15\ \text{min}$ (имела место интенсивная деградация автоэмиссионного тока в течение первой минуты и монотонная — на последующем отрезке времени). Визуализация (по катодолюминесценции) области прихода электронов на анод-экран из ZnS показало „блуждающий“ характер автоэмиссии электронов с поверхности автокатодов первого типа. Повторное включение диодов первого типа не воспроизводило ни порогов включения диода, ни места локализации процесса автоэмиссии, ни функциональный вид предыдущей ВАХ.

На рис. 4 представлены интенсивность автоэмиссионного тока и картина его координатной визуализации на аноде-экране для образцов с автокатадами второго типа (подложка $\text{Si}/\text{nanoSi}/(\text{Mo} : \text{C} : \text{Si})$). Как и в автоэмиссионных диодах с автокатадами первого типа, здесь наблюдается автоэмиссия лишь из ограниченного числа локальных областей поверхности пластины автокатада. Однако динамика включения и выключения вакуумного диода с

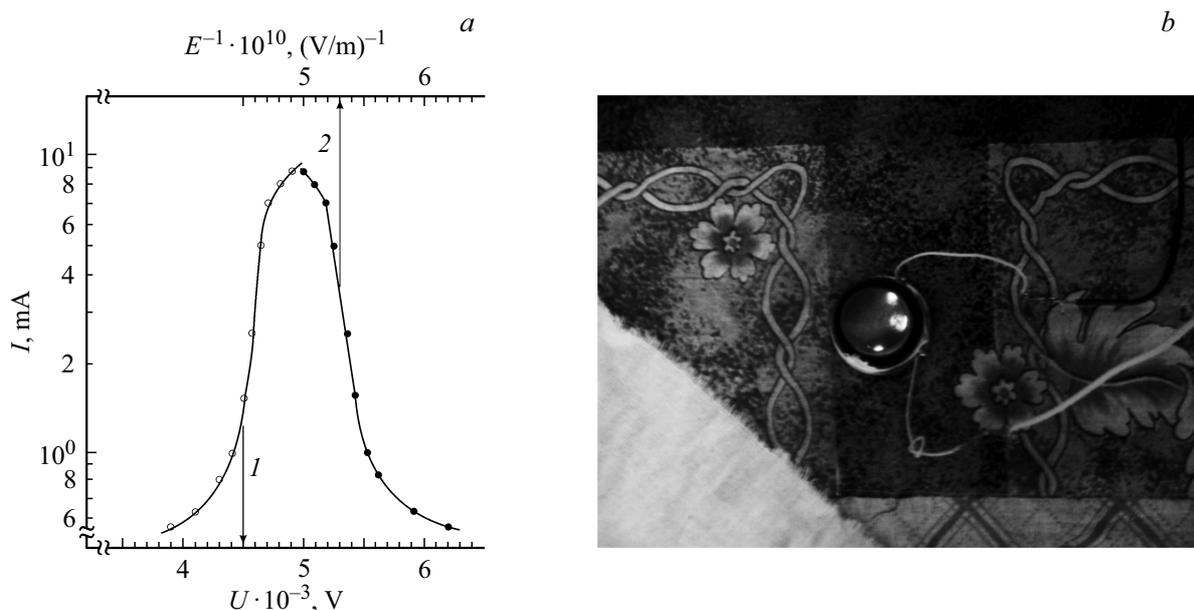


Рис. 4. Характеристики образцов ВАД с автокатадами второго типа (подложка Si/nanoSi/(Mo : C : Si)): *a* — ВАХ образцов вакуумных автоэмиссионных диодов в „полулогарифмических“ координатах (1) и в координатах Фаулера–Нордгейма (2); *b* — фотоизображение в режиме „on line“ картины катодоллюминесценции активного вещества анода-экрана, визуализирующей координаты эмиссии с локальных областей автокатада.

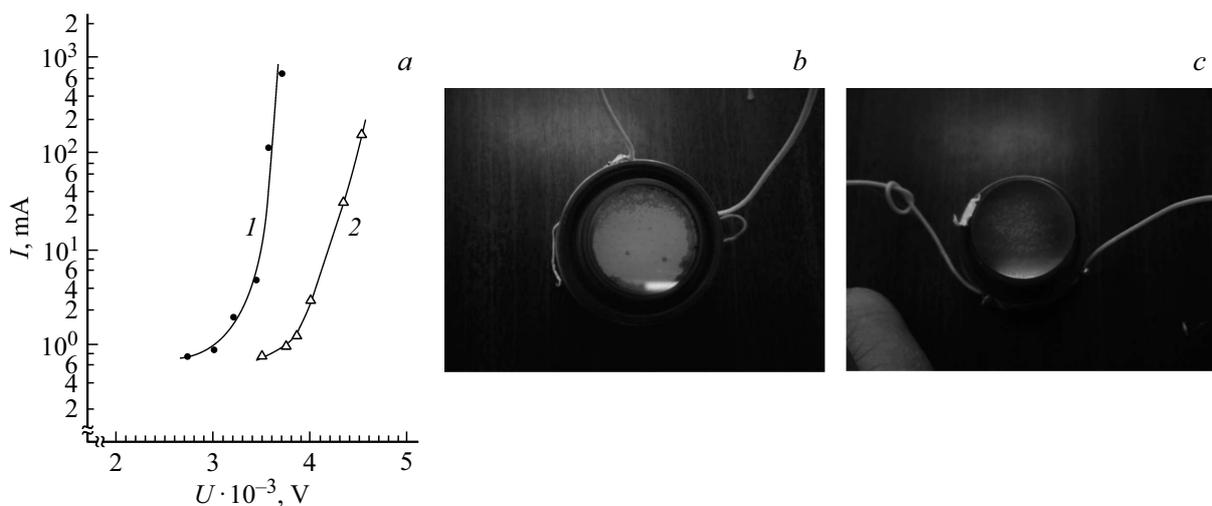


Рис. 5. Характеристики образцов ВАД с автокатадами третьего (подложка Si/nanoSi/C*) и четвертого (подложка Si/nanoSi/C*/(Mo : C : Si)) типов: *a* — ВАХ образцов вакуумных автоэмиссионных диодов третьего (2) и четвертого (1) типов; *b* — фотоизображение в режиме „on line“ картины катодоллюминесценции активного вещества анода-экрана, визуализирующей координаты эмиссии с поверхности автокатада образцов третьего (2) типа; *c* — фотоизображение в режиме „on line“ картины катодоллюминесценции активного вещества анода-экрана, визуализирующей координаты эмиссии с поверхности автокатада образцов четвертого (1) типа.

автокатадами второго типа совершенно иная. Повторные включения диода воспроизводят пороговые характеристики, функциональный вид ВАХ и координаты эмитирующих электроны локальных областей автокатада. Отсутствует явление краткосрочной деградации ВАХ, а токи в максимуме уже достигают величин $\sim 7-9$ мА. Обработка ВАХ в координатах Фаулера–Нордгейма указывает на наличие участка спрямления ВАХ в диапазоне токов

1–7 мА. Обработка ВАХ в приближении сильного поля с использованием функциональной зависимости

$$j = \frac{q^2 V^2}{E_m b_0 8 \pi^2 \hbar} \exp \left[- \frac{4 b_0 \sqrt{2m}}{3 q \hbar} \cdot \frac{E_m^{1.5}}{V} \right]$$

и в соответствии с представлениями, развитыми в [22] с учетом геометрии микрострий (рис. 1), позволяет

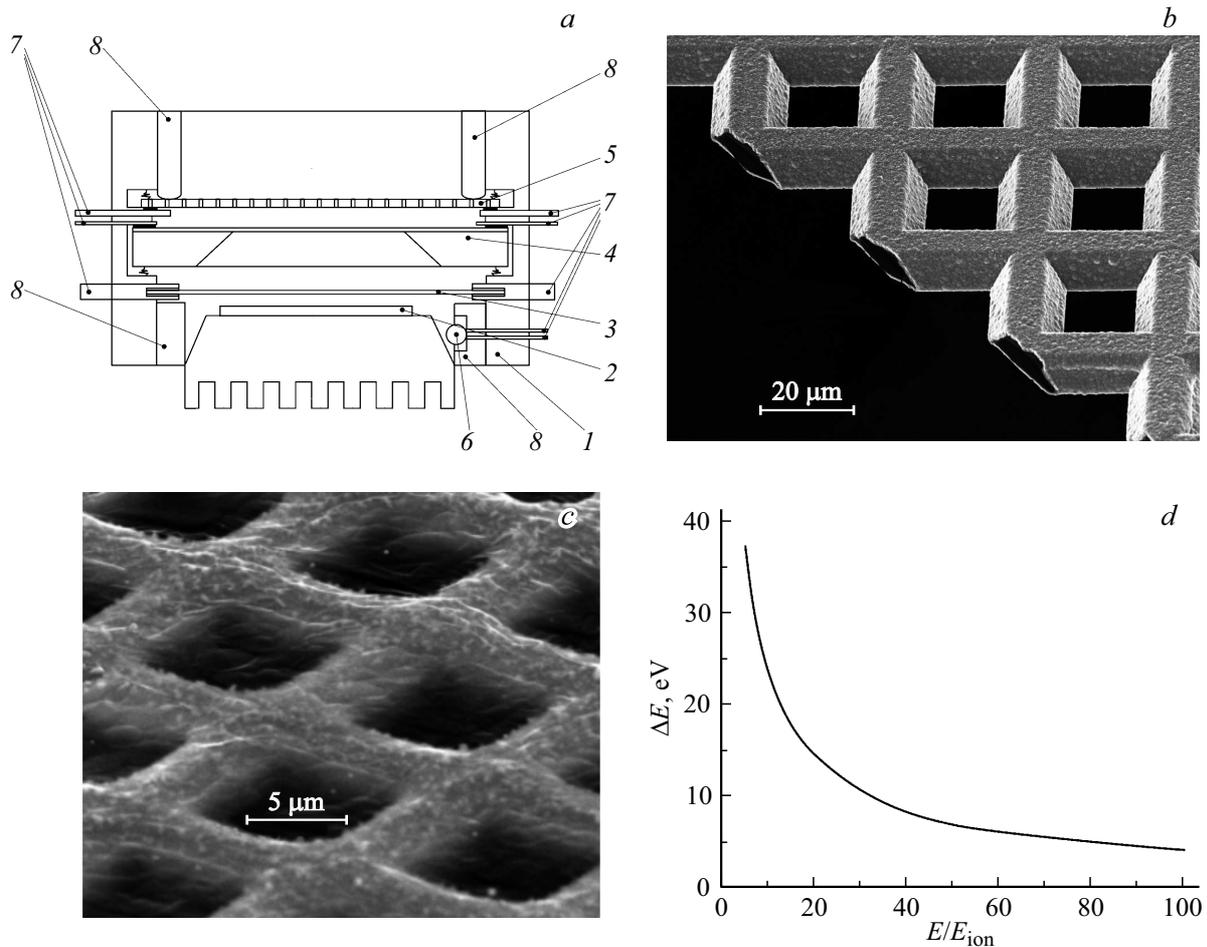


Рис. 6. Комбинированный эмиссионный катод: *a* — схематическое изображение: 1 — вакуумно-плотный корпус устройства, 2 — острый автокатод, 3 — вытягивающий электроны электрод, 4 — умножитель-концентратор потока электронов, 5 — управляющий электрод (управляющая сетка), 6 — геттер, 7 — электрические контакты к перечисленным элементам, 8 — изолирующие кольца; *b* — РЭМ изображение фрагмента умножителя-концентратора потока электронов с активным слоем из ПАП; *c* — РЭМ изображение графенового электрода; *d* — энергетические потери электронов в графеновом электроде.

оценить энергию барьера для выхода электронов в вакуум в ~ 1.9 eV.

Здесь введены следующие обозначения: E_m — энергетическая величина барьера, b_0 — средний диаметр вершины микроострия, V — потенциал относительно микроострия в точке, найденной с учетом условия обострения поля, q — элементарный заряд, \hbar — постоянная Планка, m — масса электрона).

Вплоть до токов ~ 6 mA величина электрического тока растет сверхлинейно, а при токах, больших 7 mA, наблюдается его сублинейный рост. Деграция ВАХ образцов второго типа не имеет места вплоть до подачи на автоэмиссионный диод предельно допустимых напряжений (~ 5 kV), при которых реализуется межэлектродный пробой по поверхности корпуса автоэмиссионного диода. Картина визуализации посредством катодолуминесценции области прихода эмитируемых электронов на люминесцирующий анод-экран указывает на стабильный локальный характер автоэмиссии электронов с

поверхности автокатада второго типа. При этом участку спрямления ВАХ в координатах Фаулера–Нордгейма соответствует сверхлинейный рост яркости пятна изображения на аноде-экране (для токов 1–7 mA).

Результаты измерений ВАХ образца третьего типа (подложка Si/nanoSi/C*) представлены на рис. 5, *a* (кривая 2), а на рис. 5, *b* дана картина визуализации координат его автоэмиссионного тока на аноде-экране. В диодах этого типа также не удастся достичь однородного свечения всей площади анода-экрана. При достижении пороговой величины автоэмиссии (~ 5 V/ μ m) наблюдается сверхлинейный характер роста полного автоэмиссионного тока от напряжения на вакуумном автоэмиссионном диоде. При этом, судя по картине визуализации тока, автоэмиссия электронов начинается с периферии поверхности автокатада близ кольцевого электрода контакта к периферии пластины. Расположение области эмитирующих электроны микроострий на поверхности автокатада имеет ярко выраженную

радиальную симметрию и при повышении напряжения область, эмитирующая электроны, проявляет тенденцию к расширению в радиальном направлении к центру пластины автокатода. Однако выйти на „фаулеровский“ участок ВАХ и достичь токов насыщения в образцах третьего типа не удается. При токах, больших ~ 150 mA, поверхность высокоомного анода-экрана (ZnS) начинает выгорать (при этом на излучающих свет участках анода-экрана выделяется мощность $\sim 1-2$ W).

Результаты измерений экспериментальных образцов с автокатадами четвертого типа, выполненными в виде гетероструктуры подложка Si/nanoSi/C*/(Mo : C : Si), указывают на существенно более высокую однородность процесса автоэмиссии с поверхности образца. Здесь с ростом разности потенциалов между катодом и анодом-экраном растет площадь катодолуминесцирующей поверхности (с ростом напряжения она монотонно расширяется в радиальном направлении, захватывая все новые участки от периферии к центру) и экспоненциально растет ток, достигающий 700 mA при напряжении ~ 3750 V (рис. 5, а, кривая 1). Затем наступает интенсивное разрушение высокоомного (на базе ZnS) анода-экрана, в силу чего участка ВАХ с „фаулеровским“ характером зависимости достичь здесь также не удается. Напомним, при исследованиях использовался режим постоянного тока, и отсутствовал принудительный отвод тепла с анода-экрана и автокатода. На рис. 5, с видно, что для образца четвертого типа в процессе испытаний выгорание активного вещества анода-экрана происходило по всей поверхности анода-экрана. Сквозь волоконно-оптическое стекло наблюдались массивы выгорающих на аноде-экране пятен, по геометрии напоминающие упомянутые выше мезаструктуры.

Выводы

1. Представленные выше результаты экспериментальных исследований позволяют сделать аргументированное заключение о реализации процесса автоэмиссии практически со всей поверхности автокатода (диаметром активной области ~ 15 mm) при использовании архитектуры структуры четвертого типа. При этом близ порога „зажигания“ свечение экрана (а значит, выход автоэлектронов) начинается с поверхности гетероструктурного автокатода близ кольцевого электрода, выполненного на периферии подложки. Пороговое напряжение автоэмиссии составляет ~ 3300 V (что соответствует эффективной напряженности электрического поля в ~ 4.5 V/ μ m). Выход на автоэмиссию с полной площади автокатода осуществляется при приращении (на фоне значения в 3300 V) рабочего напряжения на величину ~ 50 V. Подчеркнем, обсуждаемая конструкция автоэмиссионного диода использована только для проверки в режиме „on line“ степени однородности автоэмиссии с поверхности автокатодов большой площади. Цель —

выбор базовой архитектуры автоэмитирующей среды, а затем и конструкции автокатода. Проверить стойкость автокатода к процессам деградации в обсуждаемой конструкции не представляется возможным из-за неперенной деградации высокоомного вещества анода (поликристаллического ZnS).

2. Дополнительно облегчить рабочий режим автокатода позволит предложенная нами [21] двухкаскадная схема эмиссионного катодного узла (рис. 6, а), согласно которой в конструкции эмиссионного прибора последовательно располагаются собственно автокатод, вытягивающий электрод, множитель-концентратор потока электронов (УКЭ) и управляющий электрод. В такой конструкции „центр тяжести“ процесса формирования электронного пучка переносится на УКЭ с активным слоем из поликристаллической алмазной пленки. Конструкция УКЭ (рис. 6, б) позволяет осуществить режим умножения „на отражение“ в конструкции „на прострел“. Это, как показывают измерения, допускает реализацию коэффициента умножения до величин в 50–100.

3. В качестве материала для вытягивающего 3 и управляющего 5 электродов (рис. 6, а) комбинированного эмиссионного катодного узла в гибридном исполнении могут быть использованы графеновые пленки (рис. 6, с). Наши более ранние исследования [23,24] показали, что коэффициент прозрачности графеновой пленки для электронов с энергией большей 200 eV составляет $\sim 90-95\%$ (рис. 6, д). Столь высокий коэффициент прозрачности графеновых пленок позволяет существенно снизить сеточные токи (в приборах с управляющими металлическими сетками сеточные токи составляют 30–40% от полного анодного тока).

4. Использование предложенной двухкаскадной конструкции эмиссионного катода в приборах вакуумной сильноточной эмиссионной электроники, работа которых основана на функциональной интеграции автоэмиссии и вторичной эмиссии, позволяет не только облегчить автокатуду условия работы, но и уменьшить время выхода сильноточного катодного узла в рабочий режим с 2–3 min (в случае термокатода) до ~ 10 ns. Действительно, близко расположенный к собственно автокатуду вытягивающий электрод (3 на рис. 6, а) будет в статике задавать максимально возможный токовый режим. Динамика работы прибора (модуляция тока во времени) будет определяться подачей сигнала на управляющий электрод 5, регулирующий поток электронов из резервуара внутренней полости ячейки множителя-концентратора потока электронов, и значительно удаленный от поверхности автокатода. Это позволяет минимизировать емкость системы и не ограничивает ее широкополосности, которая обеспечивается мобильностью эффектов автоэмиссии ($\sim 1-10$ ps) и вторичной эмиссии (~ 0.1 ns) электронов, положенных в основу работы комбинированного эмиссионного катода.

Список литературы

- [1] *Ayzenshtat G.I., Yushenko A.Y., Gushchin S.M., Dmitriev D.V.* et al. // *Semiconductors*. 2010. Vol. 44. N 10. P. 1362–1364.
- [2] *Коколов А.А., Черкашин М.В.* // Докл. ТУСУРа. 2011. № 2 (24). Ч. 2. С. 17–23.
- [3] *Hek A.P.* Design, Realization and Test of GaAs-based Monolithic Integrated X-band High Power Amplifiers. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2002. 322 p.
- [4] *Subramanian K.* et al. Backgated Diamond Field Tip Array Cathodes for 220 GHz TWT. Vanderbilt University, 2009. Final Report. Under Contract W911NF-08-C-0052.
- [5] *James B.G.* // *Microwave Systems News and Commun. Technology*. 1986. Vol. 16. N 10. P. 105–118.
- [6] *Yu M., Ward R., Hovda D.H.* et al. // *IEEE Microw. Wirel. Co.* 2007. Vol. 17. N 12. P. 894–896.
- [7] *Ma B.Y., Boutros K.S., Hacker J.B., Nagy G.* // *IEEE MTT-S*. 2008. P. 1473–1476.
- [8] *Махов В.И.* // *Электронная промышленность*. 1994. № 7–8. С. 93–98.
- [9] *Chung B.H., Han S.Y., Choi J.O.* // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2002. Vol. 20 (50). P. 2080–2084.
- [10] *Wang Z.L., Gao R.P., de Heer W.A., Poncharal P.* // *Appl. Phys. Lett.* 2002. Vol. 80. P. 856–859.
- [11] *Дюбуа Б.Ч., Королев А.Н.* // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника*. 2011. Вып. 1 (508). С. 5–24.
- [12] *Ляшенко С.А., Волков А.П., Образцов А.Н.* // *ЖТФ*. 2012. Т. 82. Вып. 2. С. 94–98.
- [13] *Jensen K.L., Yater J.E., Shaw J.L.* et al. // *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 108. P. 044509.
- [14] *Ha J.K., Chung B.H., Han S.Y.* et al. // *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2002. Vol. 20. N 50. P. 2080–2084.
- [15] *Беспалов В.А., Ильичев Э.А., Кириленко Е.П.* и др. // *Изв. вузов. Электроника*. 2014. № 4 (108). С. 27–35.
- [16] *Беспалов В.А., Ильичев Э.А., Кулешов А.Е., Мигунов Д.М.* и др. // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39. Вып. 4. С. 46–52.
- [17] *Беспалов В.А., Ильичев Э.А., Кулешов А.Е., Мигунов Д.М.* и др. // *ЖТФ*. 2014. Т. 84. Вып. 10. С. 112–116.
- [18] *Ильичев Э., Кулешов А., Набиев Р., Петрухин Г.* и др. // *Электроника НТБ*. 2014. Спецвыпуск (00137). С. 143–155.
- [19] *Горячев А.В., Ильичев Э.А., Кириленко Г.Г., Кириленко Е.П., Мигунова Е.С., Петрухин Г.Н., Рычков Г.С., Шелюхин Е.Ю.* // 12-я междунар. конф. „Пленки и покрытия-2015“. СПб., 2015. С. 219–221.
- [20] *Belyaev S.N., Kirpilenko G.G., Kirilenko E.P., Goryachev A.V.* et al. // *J. Surf. Invest. X-ray*. 2016. Vol. 10. N 4. P. 753–757.
- [21] ГК № 14.427.11.0003. Шифр „2013-24-14-426-0001“. НИУ „МИЭТ“. Зеленоград. Руководитель НИР Ильичев Э.А.
- [22] *Ильичев Э.А., Набиев Р.М., Петрухин Г.Н., Рычков Г.С., Кулешов А.Е., Мигунов Д.М.* // *Изв. вузов. Электроника*. 2011. № 5 (91). С. 18–35.
- [23] *Ильичев Э.А., Кулешов А.Е., Набиев Р.М., Петрухин Г.Н.* и др. // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39. Вып. 18. С. 25–31.
- [24] *Ильичев Э.А., Кириленко Е.П., Петрухин Г.Н., Рычков Г.С.* и др. // *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40. Вып. 2. С. 10–15.