

# Содержание

## Материалы электронной техники

*Грибов Б. Г., Зиновьев К.В., Калашник О.Н., Герасименко Н.Н., Смирнов Д.И., Суханов В.Н.* Структура и фазовый состав монооксида кремния ..... 3

*Громов Д.Г., Шулятьев А.С., Редичев Е.Н., Берестов А.Т.* Влияние толщины и числа слоев на оптические и электрофизические свойства периодической структуры на основе Cu/ZnO:Ga ..... 9

## Микроэлектронные приборы и системы

*Адамов Ю.Ф., Сибагатуллин А.Г., Шурчков И.О.* Методы коррекции электротермической связи в аналоговых блоках на гетероструктурных биполярных транзисторах ..... 14

*Воробьев Н.В., Петров О.В., Терентьев А.И., Демьянов В.В.* Индивидуальные дозиметры на основе полупроводниковых детекторов ... 19

*Дюжнев Н.А., Махиборода М.А., Кретов В.И., Чурилин М.Н. Руднев В.Ю.* Исследование тепловой деградации кремниевого автоэмиссионного катода как двухфазной системы ..... 23

*Штерн М.Ю., Штерн Ю.И., Шерченков А.А.* Термоэлектрические системы для обеспечения тепловых режимов вычислительной техники ... 30

## Схемотехника и проектирование

*Заглядин Г.Г.* Метод глобальной трассировки цепей субмикронных СБИС, основанный на использовании семейства деревьев Штейнера ..... 39

*Гусев С.В., Алексеев А.А., Шумилин С.С.* Использование GALS-архитектуры с динамическим управлением синхросигналами для повышения энергоэффективности цифровых устройств ..... 45

*Топильский В.Б.* Схемы формирования сигналов в сверхбыстродействующих фотоэлектрических растровых интерполяторах ..... 51

## Микропроцессорная техника

*Щагин А.В., Амосов Е.Ю.* Адаптивный алгоритм для автоматизации работы термостата ..... 59

## Информационные технологии

*Шишкевич А.А.* Оценка показателей надежности кворумированных вычислительных устройств при отказах и сбоях ..... 65

## Методы и техника измерений

*Усанов Д.А., Постельга А.Э., Сысоев Н.Ю.* Определение электропроводности и толщины полупроводниковых слоев по спектру отражения СВЧ-излучения ..... 71

<i>Елесин В.В., Назарова Г.Н., Чуков Г.В.</i> Маршрут исследований ИС многозарядных фазовращателей и аттенюаторов для АФАР СВЧ-диапазона .....	78
--	----

### **Краткие сообщения**

<i>Аредов А.А.</i> Влияние токов утечки в узле управляющего напряжения ГУН на уровень дискретных составляющих в спектре сигнала системы ИФАПЧ .....	86
---	----

<i>Захаров А.Ю.</i> Способ пайки элементов электровакуумных СВЧ-приборов .....	88
--	----

<i>Неустроев С.А.</i> Потенциалы тетраэдров кубического углерода .....	89
--	----

### **Юбилей**

Чаплыгину Юрию Александровичу – 60 лет .....	92
--	----

Неволину Владимиру Кирилловичу – 70 лет .....	94
---	----

25 лет Институту проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук .....	95
---	----

### **Конференции. Школы**

Всероссийская школа-семинар для студентов, аспирантов и молодых специалистов «Нанозлектроника» (18–20 мая 2011 г., г. Зеленоград)	97
---	----

Contents .....	98
----------------	----

Abstracts .....	99
-----------------	----

К сведению авторов .....	103
--------------------------	-----

## **Исследование тепловой деградации кремниевого автоэмиссионного катода как двухфазной системы**

*Н.А.Дюжев, М.А.Махиборода*

**Национальный исследовательский университет «МИЭТ»**

*В.И.Кретов, М.Н.Чурилин*

**Московский государственный институт электроники и математики  
(технический университет)**

*В.Ю.Руднев*

**Московский технический университет связи и информатики**

Описано экспериментальное исследование факторов, влияющих на тепловую деградацию одиночного кремниевого автоэмиссионного катода острейного типа в процессе отбора эмиссионного тока. Приводятся результаты численного моделирования температурной динамики автоэмиссионного катода в условиях наличия свободной границы раздела жидкой и твердой фаз с учетом поверхностного натяжения.

*Ключевые слова:* вакуумная наноэлектроника, автоэлектронная эмиссия, наноразмерный эмиттер, автокатод, тепловыделение, межфазная граница, деградация катода, система фазового поля, растровый электронный микроскоп.

В настоящее время возможность использования автоэлектронной эмиссии ограничивается наличием ряда нерешенных технологических и физических проблем. К ним относятся плохая воспроизводимость эмиссионных характеристик, нестабильность эмиссионного тока и деградация катодов в процессе работы. В литературе основной причиной деградации автокатодов называют интенсивное тепловыделение при прохождении через катод тока проводимости [1]. В теории Фаулера – Нордгейма максимально возможная плотность эмиссионного тока может достигать  $1,1 \cdot 10^{11}$  А/см<sup>2</sup>. Это соответствует случаю полного снятия потенциального барьера на границе катода внешним полем, когда достигается полная туннельная прозрачность барьера. На практике достижимые плотности тока оказываются намного меньше, так как гораздо раньше происходит разрушение эмиттера, связанное с тепловым разогревом катода и возникающей перестройкой фазовой структуры острия и его деградацией. Исследование процессов теплопроводности и переходных процессов на границе раздела фаз в автокатоде с наноразмерной эмитирующей областью имеет важное прикладное значение, поэтому необходим детальный анализ механизмов развития явлений деградации.

В настоящей работе описано экспериментальное исследование и проведен теоретический анализ режимов тепловыделения в процессе автоэлектронной миссии с применением численных методов.

Объект исследования – одиночный острый автокатод, сформированный методами анизотропного травления в объеме подложки монокристаллического кремния. Геометрические размеры составляют: высота кремниевого катода 15 мкм, угол при вершине около  $20^\circ$ , радиус скругления острия менее 10 нм.

**Экспериментальное исследование тепловой деградации автокатодов в процессе отбора эмиссионного тока.** Экспериментальное исследование проводится в три этапа. Вначале каждый экспериментальный образец исследуется на растровом электронном микроскопе (РЭМ). Далее проводятся электрофизические измерения, в процессе которых с катодов отбирается эмиссионный ток различного уровня и в течение разных интервалов времени. После отбора эмиссионного тока образцы катодов повторно исследуются на РЭМ, фиксируется изменение их геометрических параметров.

Измерения эмиссионных токов проводятся в диодной конфигурации. С этой целью изготовлена специальная оснастка. К неподвижно закрепленному кристаллу с катодом при помощи микрометрического винта подводится металлическая пластина-анод. Расстояние между катодом и анодом составляет от 0,3 до 0,5 мм. Оснастка с образцом помещается в вакуумную камеру, обеспечивающую при постоянной откачке технический вакуум с давлением остаточных газов до  $10^{-6}$  мм рт. ст. Значение порогового анодного напряжения, при котором начинал регистрироваться эмиссионный ток, находится в пределах  $1,5 \cdot 10^3$  В. Напряженность электрического поля на вершине катода при данном напряжении достигает  $5 \cdot 10^7$  В/см. Минимальный регистрируемый в эксперименте уровень тока составляет  $10^{-8}$  А. Максимальный наблюдаемый ток с единичного катода достигает  $15 \cdot 10^{-6}$  А, что соответствует плотности тока с вершины катода около  $10^7$  А/см<sup>2</sup>. При этом зависимость тока от анодного напряжения имеет типичный экспоненциальный характер. При токе на уровне  $10^{-6}$  А наблюдается стабильная эмиссия в течение нескольких часов. Амплитуда флуктуационных колебаний тока при этом не превышает  $3 \cdot 10^{-8}$  А.

Изучалось влияние среднего уровня отбираемого эмиссионного тока, а также продолжительности его отбора на характер деградации автокатаода. Было исследовано более 100 образцов автокатодов. В этих экспериментах средний уровень тока эмиссии изменялся от  $5 \cdot 10^{-7}$  до  $1,5 \cdot 10^{-5}$  А, а время работы катода от 1 с до 8 ч. Рис.1 иллюстрирует влияние на автокатод кратковременного отбора эмиссионного тока. Длительность импульса, оцениваемая по фронтам нарастания и спада тока, составляет около 3 с. Пиковое значение силы тока в импульсе 2,2 мкА. На рис.2 приведены результаты длительного отбора тока эмиссии разных уровней для трех экспериментальных образцов автокатодов.

Повторные исследования экспериментальных образцов на РЭМ (см. рис.1 и 2) во всех случаях выявляли деградацию эмиттера и перестройку его геометрии, вызванную частичным расплавлением катода, однако характер тепловой деградации оказался разным для различных режимов отбора тока.

Установлено, что уровень отбираемого тока эмиссии влияет на изменение формы катода. На рис.3 приведены РЭМ-изображения катодов после отбора тока уровня 0,5 и 3 мкА. В первом случае (рис.3,а) зона расплава сосредоточена в верхней части эмиттера, но не затрагивает острие катода, которое сохранило исходные геометрические параметры. Во втором случае (рис.3,б) вершина катода расплавлена полностью. Локализация зоны расплава без выхода на вершину эмиттера наблюдалась в большинстве опытов при уровне эмиссионного тока ниже 1 мкА.

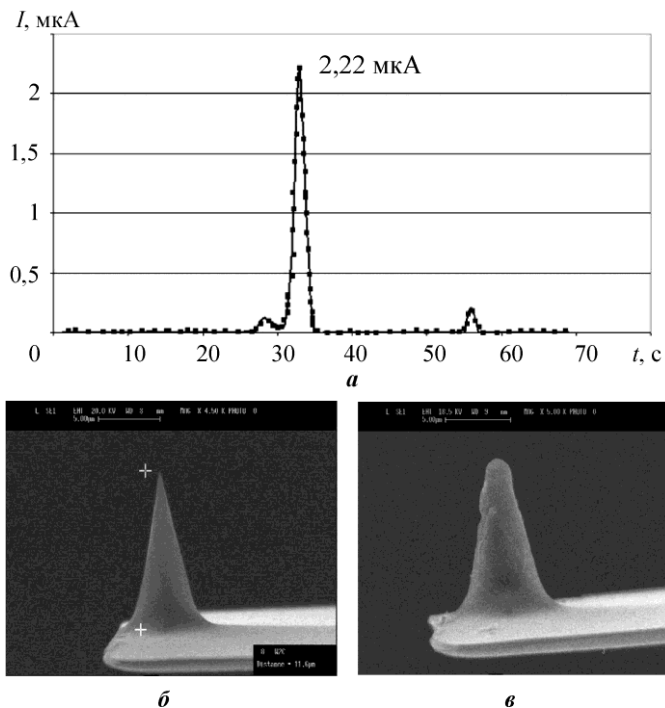


Рис.1. Влияние кратковременного отбора тока на деградацию автокатода: *a* – зависимость эмиссионного тока катода от времени; *б* – РЭМ-изображение катода до отбора эмиссионного тока; *в* – РЭМ-изображение катода после отбора эмиссионного тока

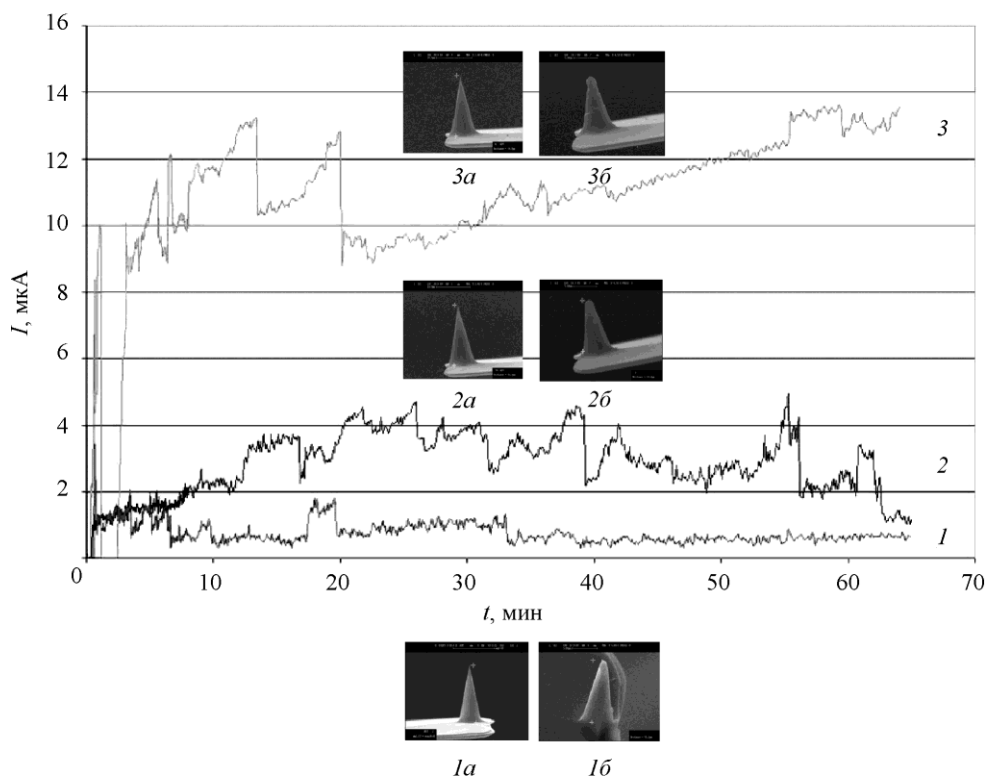


Рис.2. Влияние уровня отбираемого тока эмиссии на деградацию автокатодов: *1, 2, 3* – зависимости эмиссионного тока катода от времени; *1а, 2а, 3а* – РЭМ-изображения катодов до отбора эмиссионного тока; *1б, 2б, 3б* – РЭМ-изображения катодов после отбора эмиссионного тока

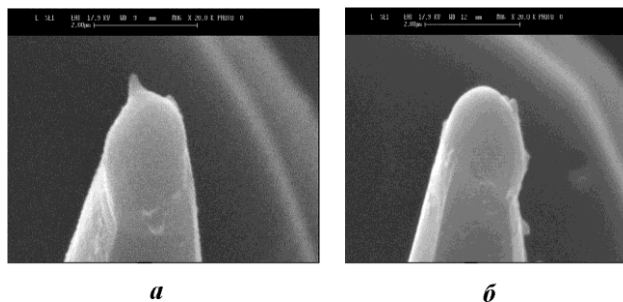


Рис.3. РЭМ-изображения двух катодов после отбора тока различного уровня: *a* – 0,5 мкА; *б* – 3 мкА

Явной зависимости степени деградации от продолжительности работы катода выявлено не было. Таким образом, описанная деградация происходит в коротком промежутке времени (менее 1 с) после начала автоэлектронной эмиссии.

**Численное моделирование процесса разогрева наноразмерного острия как двухфазной системы.** Наиболее полное и корректное описание кинетики разогрева твердотельного острейного автокатода дано в работе [2], где показано, что за время развития тепловой неустойчивости (единицы наносекунд) максимум температуры успевает сместиться в глубь эмиттера. В этом случае плавление материала катода действительно может начинаться в его объеме на некотором удалении от вершины.

Исходя из результатов, приведенных в [2], а также описанного экспериментального исследования, проведем численное моделирование тепловой динамики одиночного автокатода как двухфазной системы, считая, что в начальный момент времени участок с жидкой фазой уже образовался в объеме катода и локализован на некотором расстоянии от вершины.

Для качественной оценки процессов, происходящих в катоде при образовании твердой и жидкой фаз во время разогрева эмиссионным током, используется модель фазового поля, предложенная Г.Каджиналпом (G.Caginalp) [3, 4]. При реализации численных расчетов применяется двумерная модель, в которой катод представляет собой плоский конус с вершиной в начале координат. В связи с этим перейдем к полярным координатам. Тогда система уравнений фазового поля примет следующий вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - k \Delta \theta = -\frac{l}{2} \frac{\partial u}{\partial t} + I^2 R, \quad (1)$$

$$\alpha \frac{\partial u}{\partial t} - K \Delta u = \frac{1}{\varepsilon} (u - u^3) + K \theta (1 - u^2), \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2},$$

где  $\theta = (T - T_0)$  – температура материала катода относительно температуры плавления  $T_0$ ;  $r$  – полярный радиус;  $\varphi$  – полярный угол;  $u$  – функция порядка [4];  $l$  – скрытая теплота плавления;  $\alpha$  – время релаксации;  $k$  – температуропроводность;  $K$  – поверхностное натяжение;  $\varepsilon$  – малый параметр системы;  $I$  – полный автоэмиссионный ток катода;  $R = \rho/r$  – омическое сопротивление материала катода;  $\rho$  – удельное сопротивление материала катода.

В предложенной модели за счет малых размеров расчетной области можно пренебречь температурной зависимостью температуропроводности и удельного сопротивления кремния и принять  $k = \text{const}$  и  $\rho = \text{const}$ .

Функция порядка  $u$  асимптотически стремится к значению  $-1$  справа для области с жидкой фазой и к значению  $1$  слева для области с твердой фазой. При этом переход вещества из твердой фазы в жидкую происходит на участке длиной  $\varepsilon$ . В качестве начальных данных для  $u$  рассматривается следующая функция [5, 6]:

$$u|_{t=0} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{th} \left( \frac{r_1 - r}{\varepsilon} \right) + \operatorname{th} \left( \frac{r - r_2}{\varepsilon} \right) - \operatorname{th} \left( \frac{r_1 - r}{\varepsilon} \right) \operatorname{th} \left( \frac{r - r_2}{\varepsilon} \right) \right],$$

где  $r = r_1$  и  $r = r_2$  задают положение границы раздела фаз.

Начальные данные для температуры выбираются в следующем виде:

$$\begin{cases} \theta = a_1 r - b_1, & r \in \left( 0; \frac{R_{\max}}{2} \right); \\ \theta = -a_2 r + b_2, & r \in \left[ \frac{R_{\max}}{2}; R_{\max} \right), \end{cases}$$

где  $a_1, a_2, b_1, b_2$  – некоторые положительные постоянные.

Выбранные начальные данные соответствуют случаю, когда в начальный момент времени жидкая фаза уже локализована в области конуса между сечениями радиусами  $r_1$  и  $r_2$  (рис.4). Подобный выбор начальных условий обусловлен экспериментальными наблюдениями, указывающими на то, что тепловой режим в автокатоде устанавливается в очень коротком временном интервале после начала эмиссии. Поэтому из рассмотрения исключается механизм образования жидкой фазы, достаточно подробно описанный в [2], и все внимание фокусируется на дальнейшем развитии температурной динамики во времени.

Разогрев катода за счет эффекта Джоуля учитывается с помощью введения соответствующего источника тепла в правую часть уравнения теплопроводности (1). В качестве граничного условия к системе (1), (2) на внешней границе конуса для функции  $\theta$  рассматривается условие Неймана, физический смысл которого состоит в отсутствие потока тепла через внешнюю поверхность эмиттера, работающего в вакууме. В качестве разностной схемы при проведении численного моделирования используется двумерный аналог продольно-поперечной схемы в полярных координатах [7].

Параметрическое семейство расчетных зависимостей температуры и функции порядка от номера шага по  $r$  (радиуса сечения конуса) представлено на рис.5. Анализ данных зависимостей показывает, что локализованная в начальный момент область жидкой фазы со временем смещается в сторону больших радиусов, т.е. в глубь катода. Данный факт может быть обусловлен учетом в предложенной физико-математической модели поперечного натяжения на криволинейной

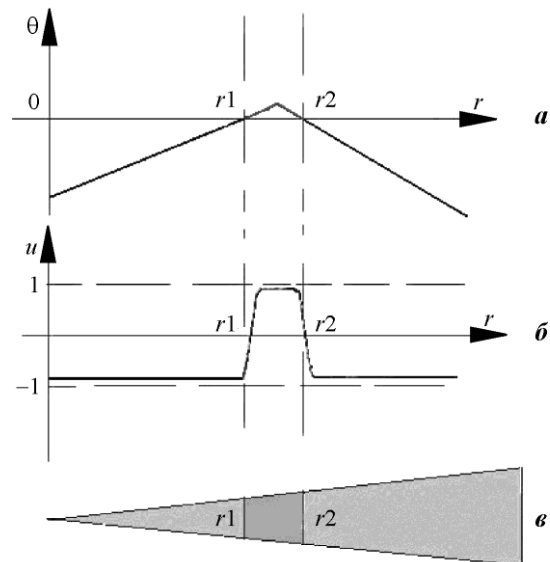


Рис.4. Начальные условия для задачи численного моделирования тепловых процессов в двухфазном автокатоде:  $a$  – функция  $\theta$ ;  $b$  – функция  $u$ ;  $c$  – схема локализации жидкой и твердой фаз в автокатоде

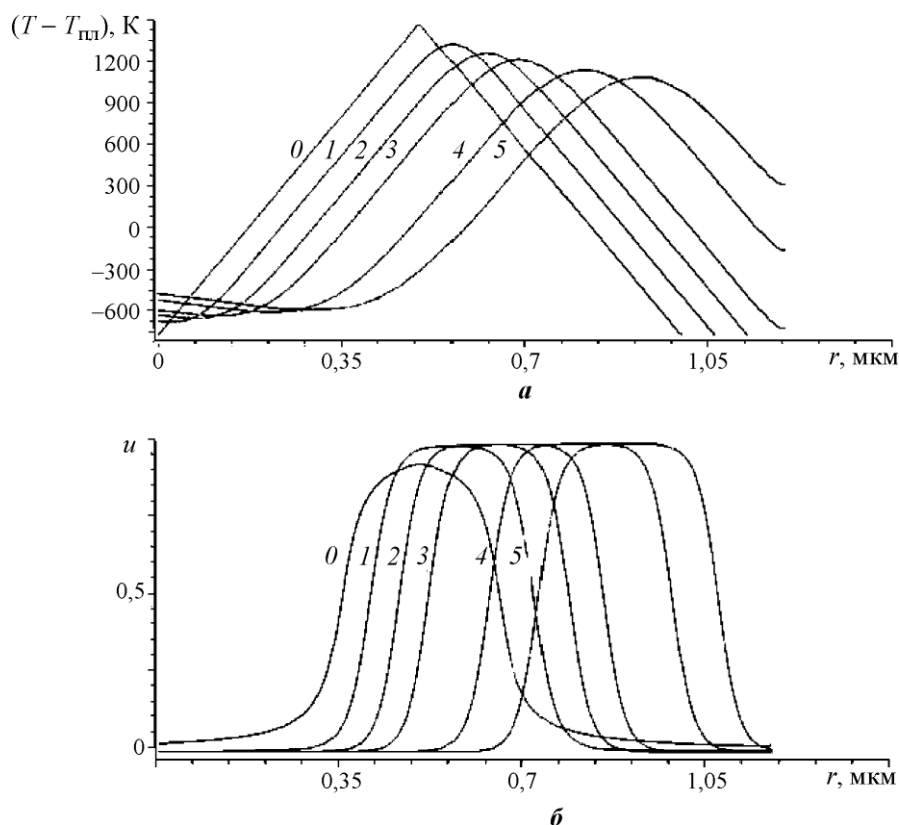


Рис.5. Параметрическое семейство расчетных зависимостей температуры (а) и функции порядка (б) от номера шага по  $r$ : кривая 0 соответствует начальным условиям, кривые 1–5 следуют в порядке увеличения времени (от начального к конечному)

поверхности раздела фаз. В рассматриваемой геометрии задачи, а именно в конусе, поверхностное натяжение препятствует движению фазового фронта в направлении уменьшения кривизны поверхности, минимальное значение которой достигается на вершине. Тем не менее, независимо от направления движения фазовых фронтов температура вершины катода со временем растет (см. рис.5). Скорость роста температуры вершины находится в прямой зависимости от величины тока  $I$  и обусловлена джоулевым разогревом.

В результате экспериментального исследования установлено наличие в процессе отдачи эмиссионного тока жидкой фазы в теле катода (расплавление катода током проводимости). Кроме того, в ряде случаев зона расплава локализуется и не выходит на вершину катода. В связи с этим наибольший интерес представляет теоретическая иллюстрация наблюдаемого экспериментально эффекта локализации расплава в средней части катода.

Результаты численного моделирования явно указывают на действие двух эффектов: 1) поверхностное натяжение на межфазной границе препятствует выходу фазового фронта на вершину эмиттера, в результате чего область расплава и максимум температуры со временем смещаются в глубь катода; 2) разогрев катода протекающим по нему током проводимости ведет к росту температуры вершины. Данные факты находятся в хорошем согласии с экспериментальными наблюдениями, согласно которым вершина катода не подвергается пластическим деформациям при отборе токов менее 1 мкА и плавится при более высоких токах. Отметим, что при постановке задачи численного моделирования не учитывался эффект Ноттингама [8], а также другие поверхностные и объемные источники. Тем не менее, учет только действия поверхностного натяжения



на границе жидкой фазы при указанной геометрии задачи дает результат, хорошо согласующийся с экспериментальными наблюдениями. Численный эксперимент позволяет выработать математически обоснованные рекомендации по оптимизации базовых конструкций и технологии изготовления эмиттеров, катодных узлов и электронно-оптических систем.

Результаты, полученные в настоящей работе, позволяют объяснить процессы деградации автоэмиссионного катода. В частности, задача подбора оптимальной с точки зрения минимизации разогрева конфигурации катода сводится к обеспечению наилучшего отвода тепла из середины и основания автоэлектронного эмиттера.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2012 годы» (ГК № 02.523.11.3018).*

### Литература

1. **Фурсей Г.Н.** Автоэлектронная эмиссия // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6, № 11.
2. **Глазнов Д.В., Баскин Л.М., Фурсей Г.Н.** Кинетика импульсного нагрева острых автокатодов реальной геометрии эмиссионным током высокой плотности // ЖТФ. – 1989. – Т. 59, Вып. 5. – С. 60–68.
3. **Caginalp G.** An analysis of a phase field model of a free boundary // Arch. Rational Mech. Anal. – 1986. – Vol. 92. – P. 205–245.
4. **Caginalp G., Chen X.** Phase field equations in the singular limit of sharp interface problem // On the Evolution of Phase Boundaries / Ed. by **M.Gurtin and G.B.McFadden**. – Vol. 43, IMA Vol. Math. Appl, N.Y.: Springer, 1992. – P. 1–28.
5. **Данилов В.Г., Омелянов Г.А., Радкевич Е.В.** Асимптотическое решение системы фазового поля и модифицированная задача Стефана // Дифф. уравнения. – 1995. – Т. 31, № 3. – С. 483–491.
6. **Danilov V.G., Omel'yanov G.A., Radkevich E.V.** Hugoniot-type conditions and weak solutions to the phase-field system // Euro Journal of Applied Mathematics. – 1999. – Vol. 10. – P. 55–77.
7. **Omel'yanov G.A., Rudnev V.Yu.** Interaction of free boundaries in the modified Stefan problem // Non-linear Phenomena in Complex Systems. – 2004. – Vol.7, №3. – P. 227–237.
8. **Nottingham W.B.** // Phys. Rev. – 1941. – Vol. 59, N 11. – P. 907–908.

Статья поступила 2 марта 2011 г.

**Дюжев Николай Алексеевич** – кандидат физико-математических наук, начальник Научно-технологического центра нано- и микросистемной техники (НТЦ НМСТ) МИЭТ. *Область научных интересов:* нано- и мембранная технология, вакуумная и плазменная электроника, СВЧ-электроника, нано- и микроструктуры.

**Махиборода Максим Александрович** – руководитель лаборатории исследования изделий нано- и микросистемной техники НТЦ НМСТ МИЭТ. *Область научных интересов:* математическая физика, математическое моделирование, вакуумная и плазменная электроника, средства визуализации, мезоскопика, нано- и микро-структуры. **E-mail:** [m.makhiboroda@gmail.com](mailto:m.makhiboroda@gmail.com)

**Кретов Вадим Игоревич** – аспирант кафедры прикладной математики МИЭМ. *Область научных интересов:* молекулярная динамика, математическое моделирование, формальные грамматики.

**Чурилин Максим Николаевич** – аспирант кафедры прикладной математики МИЭМ. *Область научных интересов:* наноструктуры и нанотехнологии, квантовые вычисления, математическое моделирование.

**Руднев Вадим Юрьевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Московского технического университета связи и информатики. *Область научных интересов:* асимптотические методы решения уравнений в частных производных, математическое моделирование.