

Моделирование технологического процесса формирования катодно-сеточного узла и его эмиссионных свойств

Н.А. Дюжев, М.А. Махиборода, Е.Э. Гусев*, Т.А. Грязнева, Г.Д. Демин

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», *bubbledouble@mail.ru

Аннотация — В работе представлен результат моделирования в программном пакете TCAD технологического процесса создания катодно-сеточного узла (КСУ), состоящего из автоэмиссионного катода и сеточных управляющих электродов. Представлен процесс формирования и заострения иглы катода, основанный на стандартной кремниевой технологии групповой обработки пластин. Предложенный технологический маршрут позволяет осуществить вскрытие самосовмещённых эмиттерных областей в сеточном слое без проведения дорогостоящих операций фотолитографии либо химико-механической полировки. На основе полученной в TCAD структуры КСУ с использованием средств COMSOL MultiPhysics проведен расчёт вольт-амперных характеристик автоэмиссионного триода, которые хорошо согласуются с результатами экспериментальных измерений полевой эмиссии в триоде, полученными на специально разработанном для этих целей измерительном стенде.

Ключевые слова — автоэлектронная эмиссия, катодно-сеточный узел, вакуумные интегральные схемы, TCAD

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возрождается интерес к разработкам в области вакуумной электроники применительно к созданию быстродействующих вакуумных интегральных схем (ВИС) с субмикронным вакуумным каналом, сочетающих в себе устойчивость к радиационному воздействию, высокой температуре, долговечность и способность к дальнейшему масштабированию [1]. Использование вакуума в качестве среды для распространения носителей заряда позволяет предотвратить возникающее фоновое рассеяние на решетке твердотельного материала, в связи с чем скорость электронов в вакууме оказывается на несколько порядков выше, чем в полупроводнике, при сохранении более высокого отношения частота/выходная мощность. Однако большое энергопотребление и малые токи эмиссии в вакууме долгое время останавливали широкое распространение ВИС по сравнению с менее затратной технологией КМОП. Устройства на основе таких схем оказались перспективны в ряде областей, в частности, в экстремальной электронике, а также космической и авиационной отрасли [2]. Комбинация преимуществ полупроводниковых устройств с высоким быстродействием вакуума при переходе к нанометровому масштабу может привести к созданию принципиально нового поколения полупроводниковых

триодных структур с малым энергопотреблением и высокой скоростью протекания тока по вакуумному каналу [3].

II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА ФОРМИРОВАНИЯ ИГЛЫ КАТОДА

Рассматриваемая в работе структура КСУ формируется в программном пакете приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD [4] и состоит из двух отдельных технологических маршрутов, относящихся к созданию иглы катода и самого КСУ. Ниже представлен технологический маршрут изготовления иглы полевого эмиттера, позволяющий групповое изготовление матрицы автоэмиссионных катодов. В процессе моделирования использовалась кремниевая подложка с концентрацией атомов фосфора $1 \cdot 10^{15}$ ат./см³ и кристаллографической ориентацией (100). Была сформирована защитная маска с помощью термического окисления Si на величину 0.2 мкм и анизотропного осаждения Si₃N₄. Далее проведена операция фотолитографии с последующим анизотропным травлением диэлектрических слоёв до поверхности Si. Анизотропное травление Si на глубину 1.5 мкм позволяет сформировать столбик, который является предварительной заготовкой иглы катода, что показано на рис. 1.

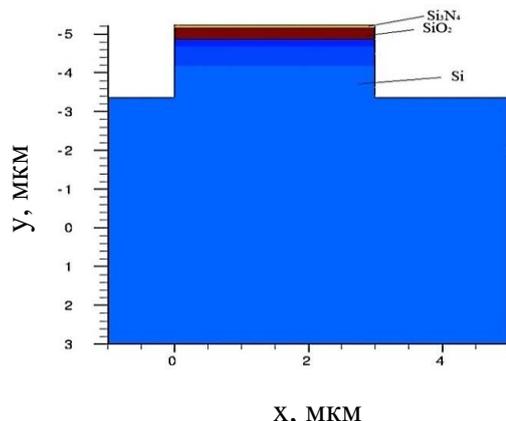


Рис. 1. Форма столбика Si/SiO₂/Si₃N₄ после анизотропного травления слоев

Создание вертикальных стенок столбика проводится аналогично технологии Bosch, причём диаметр сформированной структуры составляет 3 мкм. На следующем этапе маршрута с помощью

изотропного травления Si на величину 1.2 мкм формируется заточка иглы, после которой проведено длительное сухое окисление. В результате, часть материала Si переходит в оксидный слой толщиной 0.38 мкм, прилегающий к поверхности иглы (рис. 2).

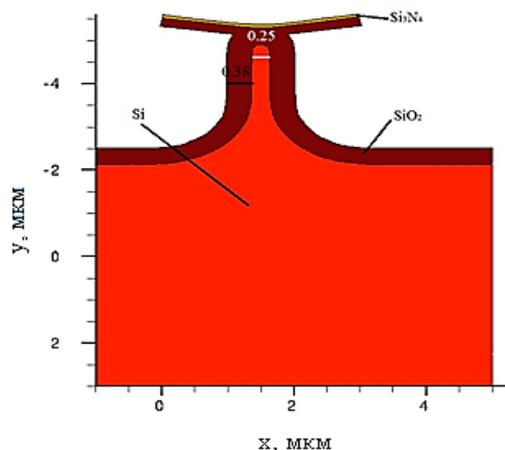


Рис. 2. Форма иглы катода с поверхностным оксидным слоем SiO₂ после операции сухого окисления

Первоначально толщина иглы составляет 0.25 мкм, тогда как последующее удаление диэлектрических пленок и изотропное травление Si на величину 0.1 мкм позволяет получить иглу с малым радиусом скругления, показанную на рис. 3.

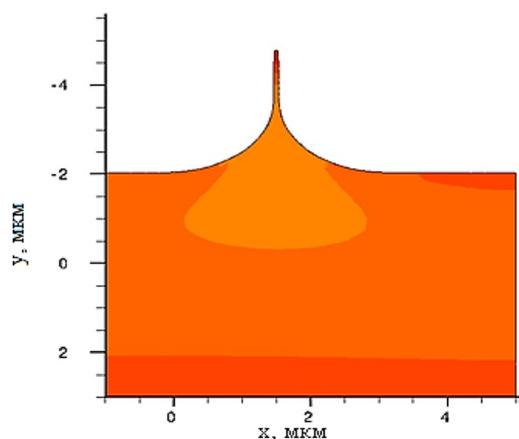


Рис. 3. Структура иглы катода на заключительном этапе технологического маршрута

При этом предварительная диффузия фосфора позволяет уменьшить время проведения окисления и увеличить число основных носителей заряда.

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА ФОРМИРОВАНИЯ КСУ

Далее перейдем к результатам моделирования технологии изготовления КСУ, где достижение профиля катода КСУ производится посредством заточки иглы с помощью операции влажного термического окисления при температуре 950°C в течение 50 минут (рис. 4).

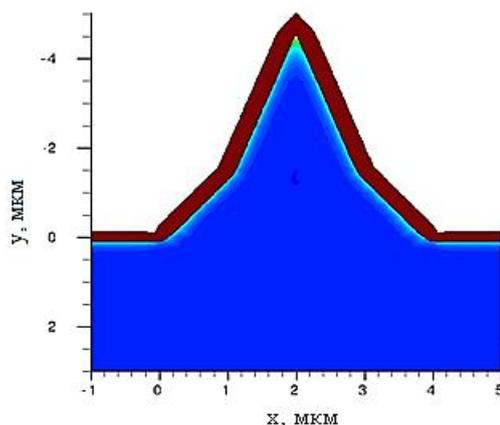


Рис. 4. Форма иглы катода после проведения влажного термического окисления

Из рис. 4 наглядно видно, что пологая область окисляется медленнее, чем вершина острия. Толщина диоксида кремния в пологой области составляет 200 нм. С целью создания области изоляции между управляющими сеточными электродами Al и катодом путем плазмохимического осаждения получен слой SiO₂ толщиной 1.0 мкм, после чего произведено напыление 0.5 мкм Al. Для выравнивания верхней границы сеточных электродов и вершины катода, а также для защиты катода при эксплуатации, нанесен слой фоторезиста (ф/р) толщиной 2.25 мкм (рис. 5).

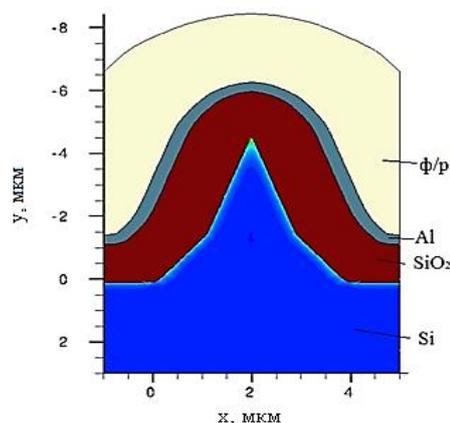


Рис. 5. Форма структуры Si - SiO₂ - Al - ф/р после осаждения

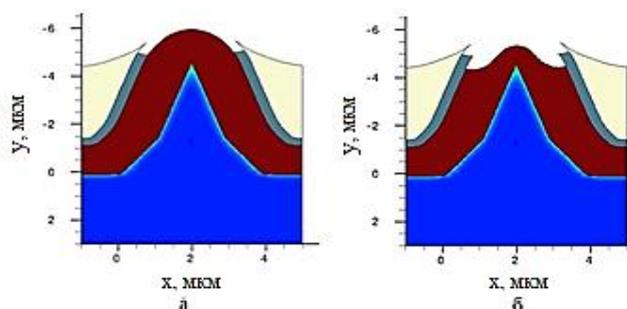


Рис. 6. Форма структуры Si - SiO₂ - Al- ф/р: после изотропного травления (а) слоев ф/р и Al, (б) – слоя SiO₂

Изотропное травление ф/р производится на величину 2.25 мкм и Al на 0.5 мкм (рис. 6а), после которого стравливается слой SiO₂ на 0.6 мкм (рис. 6б).

На последнем этапе маршрута проведено изотропное травление Al на величину 0.22 мкм и SiO₂ на величину 0.8 мкм с целью снятия слоев на поверхности иголки, в результате чего получается структура КСУ, показанная на рис. 7.

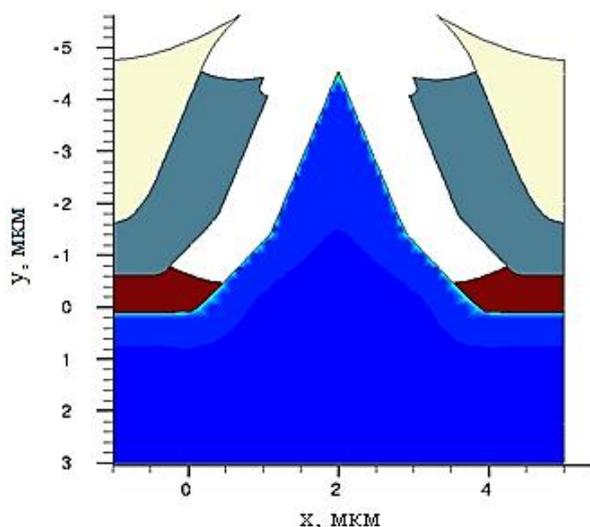


Рис. 7. Структура КСУ на заключительном этапе технологического маршрута

Высота иголки эмиттера КСУ после моделирования всего технологического маршрута составляет 4.63 мкм, а расстояние между алюминиевыми электродами сетки - 2.93 мкм. Представленный маршрут создания КСУ позволяет произвести вскрытие самосовмещенных эмиттерных областей в сеточном слое без проведения дополнительных дорогостоящих операций фотолитографии либо химико-механической полировки. На основании вышеприведенных расчётов, авторами разработана топология полевого нанокатода и получено свидетельство на интеллектуальную собственность [5].

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ КСУ

При помощи метода конечных элементов в среде Comsol MultiPhysics [6] для рассчитанной в TCAD структуры КСУ получено распределение напряженности электрического поля вблизи острия эмиттера для различных значений напряжения на сеточных электродах. На основе полученных значений поля с использованием уравнения Фаулера-Нордгейма получена зависимость тока автоэлектронной эмиссии от величины потенциала на сеточных электродах, показанная на рис. 8.

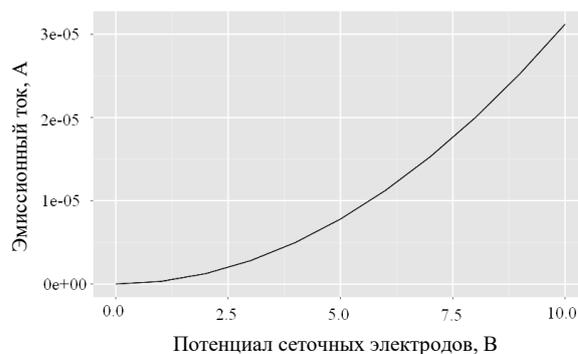


Рис. 8. Зависимость тока автоэлектронной эмиссии от потенциала на сеточных электродах, рассчитанная для структуры КСУ из рис. 1

Полученная структура позволяет получить плотности тока эмиссии плотностью $5.9 \cdot 10^5$ А/см², что эквивалентно значению тока порядка 30 мкА, рассчитанному на единицу поверхности полевого катода при управляющем напряжении 10 В.

V. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ КСУ

Для изучения процесса автоэлектронной эмиссии в тестовых образцах КСУ был изготовлен специальный измерительный стенд, который позволяет не только определять основные эмиссионные характеристики нанокатода, но и проводить макетное моделирование работы простейшей электронно-оптической системы визуализации эмиссионного тока. Стенд представляет собой трехэлектродный прибор, в котором есть возможность управления током эмиссии и яркостью свечения экрана. Структуры с интегральным катодным блоком размещаются на металлической подставке и прижимаются прижимной фторопластовой пластиной, где металлическая подставка герметично подсоединена к электрическим выводам вакуумной камеры. При этом осуществляется электрический контакт между нижней стороной кристалла с металлическим покрытием и подставкой. Вращением микрометрического винта сеточный электрод опускается к структурам с интегральным катодным блоком до требуемой величины зазора. Измерения проводились при техническом вакууме с давлением остаточных газов до $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. Необходимое давление в вакуумной камере поддерживалось при непрерывной откачке с помощью масляного форвакуумного и турбомолекулярного насоса (Varian DryVar 150) и контролировалось при помощи вакуумметра ВМБ-8. На рис. 9 приведена схема экспериментальной установки для исследования эмиссионных характеристик в триодном режиме.

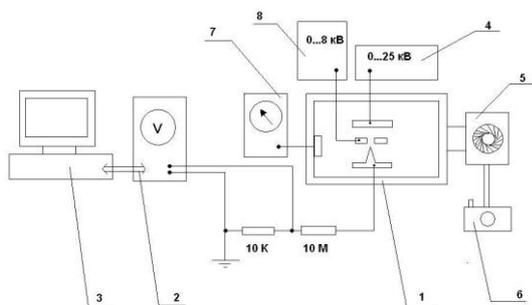


Рис. 9. Схема экспериментальной установки для исследования эмиссионных характеристик в триодном режиме, где 1- вакуумная камера, 2 – цифровой мультиметр, 3 – компьютер, 4 – перестраиваемый источник до 25 кВ, 5 – турбомолекулярный насос Varian DryVar 150, 6 – форвакуумный насос, 7 – вакуумметр ВМБ-8, 8 - перестраиваемый источник до 25 кВ

Над катодом и сеткой на специальной фторопластовой рамке устанавливался экран так, что зазор между внешней поверхностью сетки и люминофорным покрытием экрана составлял 0.7 – 0.8 см. На рис. 10 изображен используемый экран с фторопластовой рамкой.

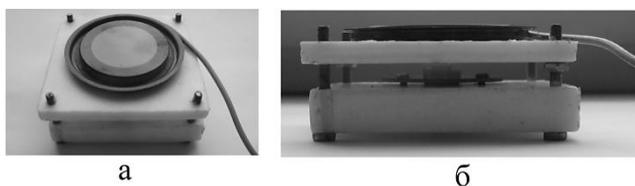


Рис. 10. Экран и фторопластовая подставка: а – вид сверху; б – вид сбоку

Во время измерений на сетку и экран подавались постоянные напряжения от двух перестраиваемых высоковольтных источников. Эмиссионный ток фиксировался в катодной цепи, где для фиксирования электрофизических параметров катода использовался цифровой мультиметр, соединенный с персональным компьютером. В ходе испытаний на стенде для исследования процессов возбуждения автоэлектронной эмиссии в тестовых образцах полевого катода фиксировалась временная зависимость тока эмиссии на катоде. На сеточный электрод подавалось напряжение в диапазоне 0...+3 кВ. Минимальный уровень регистрируемого в цепи тока составлял 2 нА, а катодный ток составлял 25 мкА при напряжении на сеточных электродах 10 В, что согласуется с результатами на рис. 8 численного моделирования полевой эмиссии. Максимальное значение катодного тока, которые удалось зафиксировать, находилось в диапазоне 35-39 мкА. Типичный вид экспериментальной зависимости тока от времени, полученной при исследовании процессов полевой эмиссии на тестовых триодных структурах с кремниевым КСУ, представлен на рис. 11.

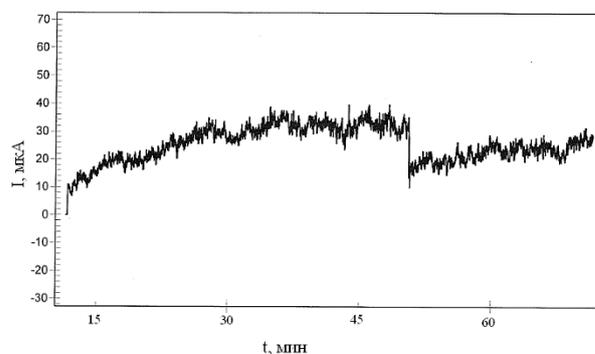


Рис. 11. Экспериментальная зависимость тока полевой эмиссии КСУ от времени при напряжении на сеточных электродах 10 В

Поскольку в стенд для исследования тестовых образцов полевого нанокатода была привнесена дополнительная оснастка с использованием люминофорного экрана с целью обеспечения возможности визуализации эмиссионного процесса, также было проведено исследование управления током эмиссии на характер свечения. Управление током эмиссии осуществлялось посредством изменения потенциала на сеточном электроде. Изменение потенциала на аноде (экране) позволяло управлять яркостью свечения. Влияния потенциала анода на эмиссионный ток в ходе опытов зафиксировано не было. Было также обнаружено, что характерные флуктуации эмиссионного тока мало влияют на визуальную стабильность свечения экрана. Вид тестовой триодной структуры через иллюминатор вакуумной камеры во время измерений представлен на рис. 12. Тем самым дополнительно было произведено макетное моделирование работы простейшей электронно-оптической системы визуализации на основе КСУ.

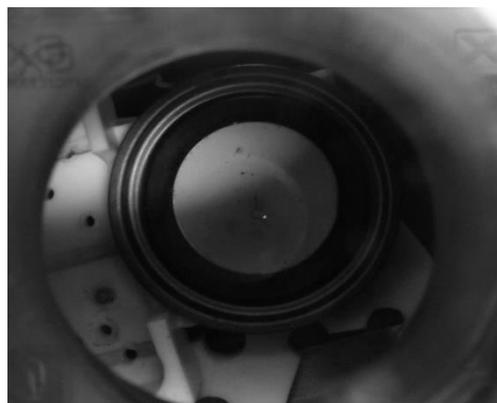


Рис. 12. Вид через иллюминатор вакуумной камеры во время измерений (отчетливо видна светящаяся точка на люминофорной поверхности экрана, показывающая протекание процесса полевой эмиссии в КСУ)

VI. ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенное приборно-технологическое моделирование КСУ позволило разработать топологию полевого нанокатода и КСУ, которая впоследствии была использована в

теоретической модели расчёта вольт-амперных характеристик КСУ [7]. Экспериментальное исследование тестовых триодных структур с КСУ показало, что в ходе испытаний эмиссионные токи достигали значений, сопоставимых с теоретическими расчётами, а в процессах автоэлектронной эмиссии наблюдалась приемлемая временная и флуктуационная стабильность. Полученные результаты работы могут быть применимы для создания нового поколения быстродействующих ВИС применительно к медицинским технологиям, космической связи и телекоммуникациям [8], а также микродисплеев высокого разрешения [9].

ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена на оборудовании ЦКП «МСТ и ЭКБ» при поддержке Минобрнауки РФ соглашение №14.578.21.0001 (RFMEFI57814X0001).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Han J.-W., Sub Oh J., and Meyyappan M. Vacuum nanoelectronics: Back to the future? – Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor // *Appl. Phys. Lett.*, 2012. no. 100, p. 213505.
- [2] Nikiforov A. Yu., Telec V.A. Radiation resistance of electronic componential base of special equipment and

communication systems // *Spectekhnika i svyaz*. 2011. № 4-5.

- [3] Srisonphan S., Jung Y. S., and Kim H. K. Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor with a vacuum channel // *Nat. Nanotechnol.*, 2012, no. 7, pp. 504-508.
- [4] Sentaurus TCAD. Available at: <http://www.synopsys.com/tools/tcad/Pages/default.aspx> (accessed 20.11.2015)
- [5] Djuzhev N.A., Makhaboroda M.A., Zolotarev V.I., Gusev E.E. Topologiya polevogo nakatoda – The topology of field-emission nano-cathode. Patent RF, №2016630035, 2016.
- [6] COMSOL MultiPhysics. Available at: <https://www.comsol.com/> (accessed 25.02.2016)
- [7] Makhaboroda M.A., Gusev E.E., Preobrazhensky R.U., Gryazneva T.A.. Numerical simulation of the process of formation of the cathode unit with auto emission emitter based on silicon // *Proceedings of the 18th youth scientific school of solid state electronics "Micro- and new generation Nanotechnics"*, p.79-81, 2015, Saint Petersburg.
- [8] Han J.-W. and Meyyappan W. Nanoscale vacuum channel transistor // *Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Nanotechnology*, Toronto, Canada, August 18-21, 2014, p. 172.
- [9] Djuzhev N.A., Makhaboroda M.A., Gudkova S.A., Skvortsov V.E. The electron beam microdisplay of the high resolution based on the field emission cathode unit // *Proceedings of the 27th International Display Research Conference*, Moscow, 18-22 September, 2007, pp. 321-322.

The process flow simulation of the cathode-grid system and its emission properties

N.A. Djuzhev, M.A. Makhaboroda, E.E. Gusev*, T.A. Gryazneva, G.D. Demin

National Research University of Electronic Technology «MIEE», *bubbledouble@mail.ru

Keywords — field emission, cathode-grid system, vacuum integrated circuit, current density, TCAD

ABSTRACT

In this work, the results of simulation of the technological process for cathode-grid system creation (CGS) are presented. The cathode-grid system consists of a field-emission cathode and grid control electrodes. The technology of the cathode needle formation and sharpening based on the standard group silicon wafers processing is described. The proposed route allowed us to realize the self-aligned emitter layers opening in the grid without expensive photolithography or chemical-mechanical polishing. On the basis of CGS created using software packages TCAD and COMSOL Multiphysics, the calculations of current-voltage characteristics of a field-emission triode were performed. The results of the calculations were in good agreement with the experimental measurements of the field emission in the triode, obtained on stand specially designed for this purpose.

ACKNOWLEDGEMENT

The work was supported by the RF Ministry of Education and Science (project № 14.578.21.0001 (id RFMEFI57814X0001)).

REFERENCES

- [1] Han J.-W., Sub Oh J., and Meyyappan M. Vacuum nanoelectronics: Back to the future? – Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor // *Appl. Phys. Lett.*, 2012, no. 100, p. 213505.
- [2] Nikiforov A. Yu., Telec V.A. Radiation resistance of electronic componential base of special equipment and communication systems // *Spectekhnika i svyaz*. 2011. № 4-5 (in Russian).
- [3] Srisonphan S., Jung Y. S., and Kim H. K. Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor with a vacuum channel // *Nat. Nanotechnol.*, 2012, no. 7, pp. 504-508.
- [4] Sentaurus TCAD. Available at: <http://www.synopsys.com/tools/tcad/Pages/default.aspx> (accessed 20.11.2015)
- [5] Djuzhev N.A., Makhaboroda M.A., Zolotarev V.I., Gusev E.E. Topologiya polevogo nakatoda - The topology of field-emission nano-cathode. Patent RF, №2016630035, 2016 (in Russian).

- [6] COMSOL MultiPhysics. Available at: <https://www.comsol.com/> (accessed 25.02.2016)
- [7] Makhaboroda M.A., Gusev E.E., Preobrazhensky R.U., Gryazneva T.A.. Numerical simulation of the process of formation of the cathode unit with auto emission emitter based on silicon // Proceedings of the 18th youth scientific school of solid state electronics "Micro- and new generation Nanotechnics", p.79-81, 2015, Saint Petersburg.
- [8] Han J.-W. and Meyyappan W. Nanoscale vacuum channel transistor // Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Nanotechnology, Toronto, Canada, August 18-21, 2014, p. 172.
- [9] Djuzhev N.A., Makhaboroda M.A., Gudkova S.A., Skvortsov V.E. The electron beam microdisplay of the high resolution based on the field emission cathode unit // Proceedings of the 27th International Display Research Conference, Moscow, 18-22 September, 2007, pp. 321-322.