

УДК 621.385.032

А.В. ЛОЯН, М.Ю. ТИТОВ, Е.П. СОЛОНИНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

МИНИМИЗАЦИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ЭМИТТЕРОВ КАТОДОВ ЭРД

В данной работе представлены результаты численного моделирования распределения напряженности электрического поля (ЭП) по поверхности эмиттера при его испытаниях. В программном продукте Ansys 11 была реализована конечно-элементная модель устройства для исследования эмиссионных свойств. Проведенные расчеты показали, что форма и размеры элементов узла «анод - эмиттер» в устройстве по исследованию эмиссионных свойств могут вносить значительную неоднородность в распределение ЭП. Были проанализированы результаты расчетов и даны рекомендации, позволяющие минимизировать неоднородность ЭП.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, эмиттер, анод, численный расчет.

Введение

Одним из важнейших характеристик эмиссионного материала полых катодов ЭРД является работа выхода, измерению которой посвящено большое количество работ [1-3]. Все они базируются на методике, в основу которой положена формула Ричардсона-Дэшмана с поправкой Шоттки на ускоряющее поле [4].

Измерения проводят в области токов насыщения с последующей экстраполяцией к нулевому потенциалу. Эта формула справедлива и для не однородного по работе выхода эмиттера, но электрическое поле должно быть постоянно по поверхности образца. Неравномерность напряженности электрического поля E может вносить существенные искажения в измеряемую ВАХ промежутка, неопределенность при обработке экспериментальных результатов. Поэтому исследование неравномерности является необходимой задачей.

Предварительные исследования неравномерности электрического поля по поверхности эмиттера в устройстве описанном в [5] показали, что подобной требование выполняется не в полной мере. Поэтому были проведена исследовательская работа и найдены решения для повышения однородности электрических полей (ЭП) по поверхности эмиттера. В связи со сложностью интерпретации многих факторов, которые могут вносить неравномерность в распределение ЭП (процессы при эмиссии тока с поверхности эмиттера, структура рабочей поверхности эмиттера и т.д.) данная работа ограничивается минимизацией неравномерности распределения E в результате подбора формы и размеров элементов устройства для исследования эмиссионных материалов.

Исследование распределения напряженности E на поверхности эмиттера в зависимости от конфигурации элементов испытательного устройства осуществлялось численным методом в программном продукте Ansys 11.

1. Узел «анод-эмиттер»

Определяющими распределение электрического поля по поверхности эмиттера являются находящиеся в непосредственной близости от нее элементы устройства. Исходная схема этого узла «анода-эмиттера» представлена на рис. 1 и представляет собой цилиндрический эмиттер 4, на расстоянии h от рабочей поверхности которого расположен анод 5 (добавить размеры анода и отверстия). В аноде сделано отверстие, используемое для измерения температуры эмиттера. В основании эмиттера находится тонкостенный металлический экран 3. Элементы окружает металлическая стенка 2.

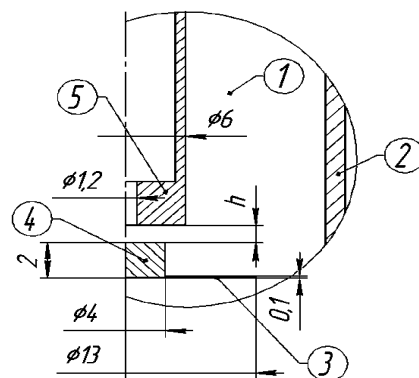


Рис. 1. Геометрическая модель узла «анод-эмиттер»: 1 – окружающее пространство (вакуум); 2 – металлическая стенка; 3 – экран; 4 – эмиттер; 5 – анод

2. Численная модель

Задача по расчету напряженности электрического поля E (электростатический анализ [6]) решалась в осесимметричном двухмерном виде. Расчетная область состоит из элементов конструкции (по рис. 1) и окружающего пространства (вакуум). Электрические свойства элементов задавались при помощи относительной диэлектрической проницаемости (для вакуума $\epsilon = 1$, для металлических элементов $\epsilon \gg 1$). В качестве нагрузок прикладывалась разность потенциалов между эмиттером и анодом.

2. Результаты расчета

На рис. 2 представлено распределение электрических потенциалов (напряжения) в расчетной области.

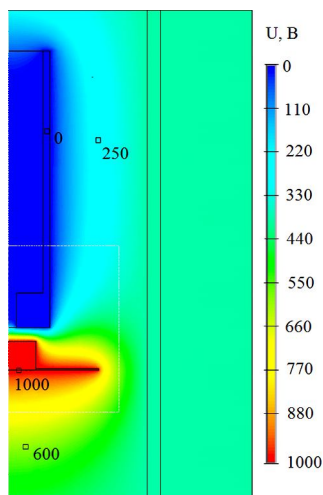


Рис. 2. Распределение электрического потенциала: (напряжение между эмиттером и анодом 1000В)

На рис. 3 и 4 представлены распределение напряженности электрического поля в рабочем зазоре (область между рабочей поверхностью эмиттера и анодом).

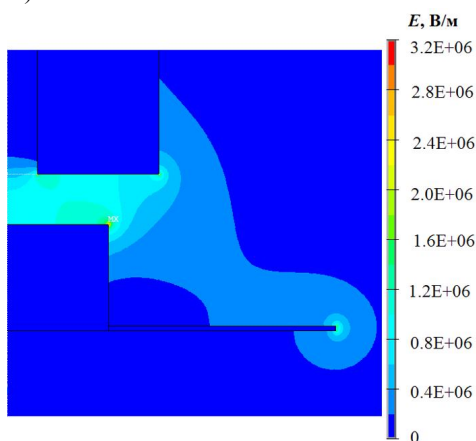


Рис. 3. Распределение величины напряженности ЭП

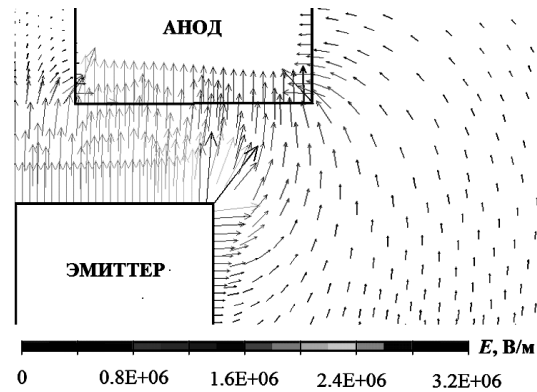


Рис. 4. Распределения вектора напряженности ЭП в рабочем зазоре

По полученному графику (рис. 5) видно, что распределение напряженности по поверхности эмиттера не является однородным, разница между минимальным и максимальным значением E может достигать порядка. Для количественной оценки однородности распределения E были введены два коэффициента:

$$k_{\min} = \frac{E_{\min}}{E_{\text{mid}}} \text{ и } k_{\max} = \frac{E_{\text{mid}}}{E_{\max}}, \quad (1)$$

где E_{\min} и E_{\max} – минимальное и максимальное значение E на поверхности эмиттера; E_{mid} – среднее арифметическое значение E .

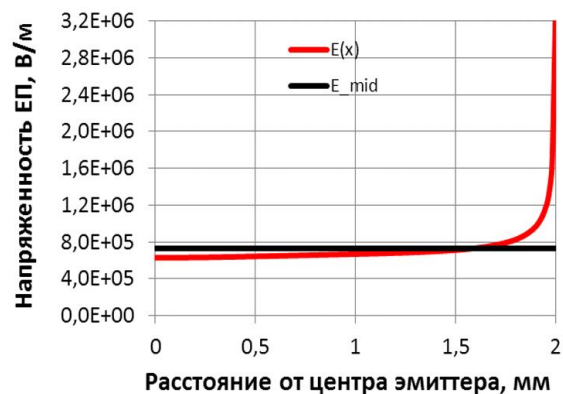


Рис. 5. Распределение напряженности ЭП по рабочей поверхности эмиттера

Для данной конфигурации узла коэффициенты k_{\min} и k_{\max} соответственно составили 0,86 и 0,23. Наибольшую неравномерность при данной конфигурации узла вносит краевой эффект – край эмиттера является концентратором электрического поля.

Снизить резкое увеличение E у края эмиттера и повысить равномерность его распределения удалось, установив экран 3 в уровень с рабочей поверхностью эмиттера (рис. 6, вариант II).

При этом k_{\min} и k_{\max} выросли до 0,96 и 0,98 соответственно.

На следующем этапе для варианта II было изучено влияние расстояния от рабочей поверхности эмиттера до анода h на распределение E по поверхности эмиттера.

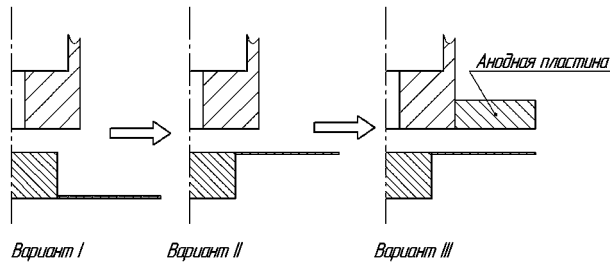


Рис. 6. Схемы узла «эмиттер-анод»

Оказалось, что для разных h на распределение E в большей или меньшей степени оказывают влияние различные геометрические факторы и форма распределения E меняется. Было выделены пять наиболее характерных видов распределения E (рис. 7 – 11).

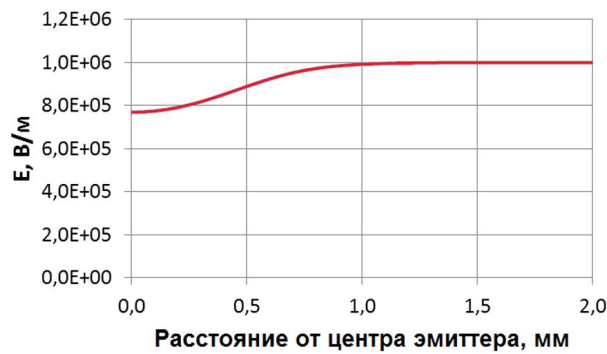


Рис. 7. Распределение E по поверхности эмиттера при расстоянии $h = 0,50$ мм

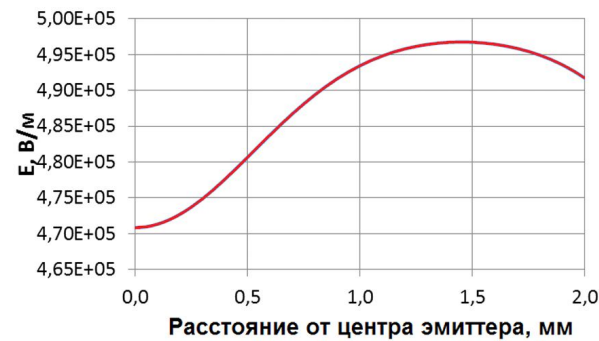


Рис. 8. Распределение E по поверхности эмиттера при расстоянии $h = 1$ мм

Так на расстояниях $h 0,5...1$ мм на распределение E имеет сильное влияние отверстие в аноде – на рис. 7 показан провал напряженности E в центре эмиттера. Далее при увеличении h уменьшается влияние отверстия в аноде и вклад в неравномер-

ность вносит малый диаметр анода по отношению к диаметру эмиттера – на рис. 8 по поверхности эмиттера E уменьшается при приближении к краю эмиттера (уже на расстоянии $h 2$ мм (рис. 9) отверстие в аноде не влияет на распределение напряженности E). Подобного эффекта удалось избежать, установив дополнительную анодную пластину (рис.6, вариант III) и увеличив тем самым диаметр анода по отношению к диаметру эмиттера. При $h > 5,5$ мм и уже при $h = 7$ мм (рис. 11) форма кривой имеет другой вид (рис. 10 – промежуточный вид при $h = 6$ мм) – E уменьшается от центра к краю эмиттера. Дальнейшее увеличение h не приводит к изменению вида кривой распределения E .

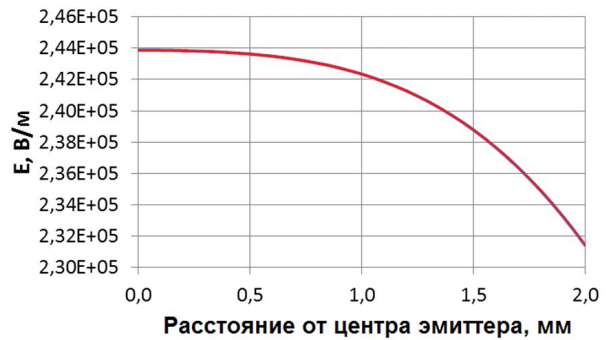


Рис. 9. Распределение E по поверхности эмиттера при расстоянии $h = 2$ мм

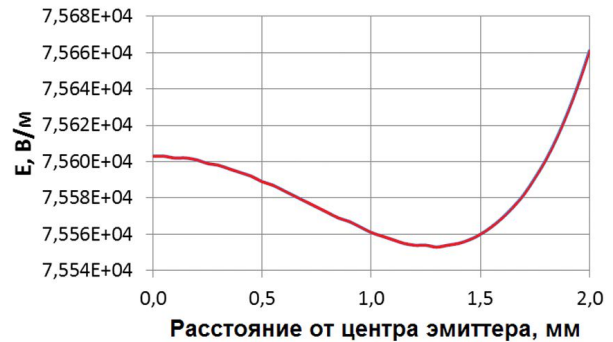


Рис. 10. Распределение E по поверхности эмиттера при расстоянии $h = 6$ мм



Рис. 11. Распределение E по поверхности эмиттера при расстоянии $h = 7$ мм

На рисунке 12 представлены зависимости коэффициентов равномерности k_{min} и k_{max} от расстояния h для двух вариантов схемы «анод-эмиттер» (варианты II и III). Для варианта II присутствуют 2 пика, при которых коэффициенты равномерности близки к единице – при $h=1,3$ мм и $h=6,0$ мм. С точки зрения как необходимости точной установки h для обеспечения высокой равномерности (при $h=1,3$ мм), так и потребности в высоковольтном источнике питания для обеспечения требуемого уровня напряженности E (при $h=6,0$ мм) вариант II является менее подходящим.

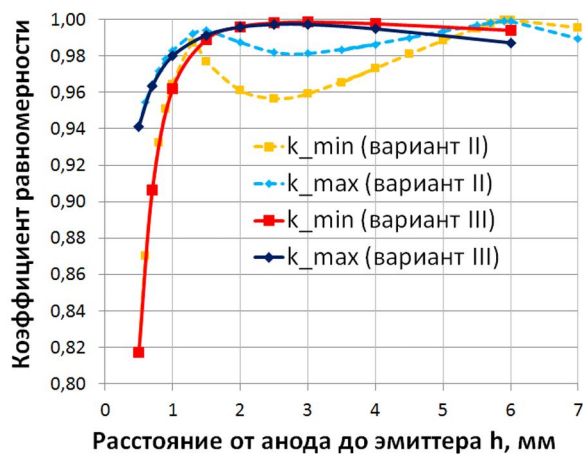


Рис. 12. Зависимость коэффициентов равномерности от расстояния h для двух вариантов узла II и III

Вариант III с дополнительной анодной пластиной при $h=2...4$ мм обладает высоким коэффициентом равномерности 0,995 и не имеет недостатков варианта II.

С технологической точки зрения расположить эмиттер (4) и экран (3) в уровень и без зазора не представляется возможным, поэтому был проведен численный эксперимент и определено влияние зазора на равномерность распределения (рис. 13).

Как можно увидеть из рис. 13 зазор между экраном и эмиттером может вносить существенную неравномерность в распределение E по поверхности эмиттера. Зазор 0,1 мм (на радиус) уменьшает коэффициенты k_{min} и k_{max} до 0,98 и 0,61 соответственно.

Выводы и планы дальнейших работ

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Форма и размеры элементов узла «анод-эмиттер» в значительной степени влияют на равномерность распределения напряженности электрического поля по поверхности эмиттера.
2. Для повышения равномерности распределения E необходимо устранять эффект концентрации

напряженности электрического поля на краях эмиттера. Этого можно добиться, установив металлический экран в уровень с рабочей поверхностью эмиттера. Кроме того необходимо устанавливать экран без зазора к эмиттеру.

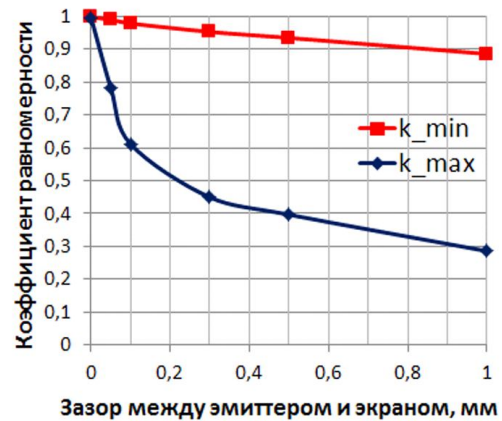


Рис. 13. Зависимость коэффициентов равномерности от зазора между эмиттером и экраном

3. Приемник электронного тока (анод) должен быть больше в диаметре, чем диаметр эмиттера как минимум в 2–3 раза.

4. Для данной конфигурации устройства расстояние между анодом и эмиттером должно быть 2...3 мм.

В результате проведенной работы были найдены решения, позволившие повысить равномерность распределения электрического поля на поверхности эмиттера с 0,86 до ~1. Однако остались некоторые факторы, степень влияния которых неизвестно. К ним, в частности, можно отнести погрешности позиционирования эмиттера и анода. В дальнейшем планируется их исследование и решение. Необходимо будет так же найти конструктивное решение компенсирующее зазор между экраном и эмиттером и обеспечивает равномерное распределение напряженности электрического поля.

Литература

1. Влияние структуры поверхности металлопористых катодов на их эмиссионные свойства [Текст] / Б.Ч. Дюбуа, А.Г. Михальченко, О.В. Поливникова, М.П. Темиряева // Электронная техника: Сер. 1. СВЧ-техника. – 2010. – Вып. 1 (504). – С. 25 – 34.
2. Росновская, Л.А. Эмиссионные свойства барий-стронциевых вольфрамовых катодов [Текст] / Л.А. Росновская, С.К. Тареева // Электронная техника. Генераторные, модуляторные и рентгеновские приборы. – 1969. – №1. – С. 61 – 65.
3. Росновская, Л.А. Металлопористые прессовано-пропитанные катоды на основе вольфрамово-

го порошка со сферической формой частиц [Текст] / Л.А. Росновская, Г.А. Гаврилова, С.Г. Шатрова // Электронная техника: Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1971. – №7. С. 92 – 96.

4. Владимиров, Г.Г. Физическая электроника. Часть I. Термоэлектронная эмиссия [Текст]: учеб.-методическое пособие / Г.Г. Владимиров; Мин-во общ. и проф. образования Рос. Федерации, СПб гос. ун-т. – СПб.: Изд-во СПб. гос. ун-та, 2007. – 187 с.

5. Предварительные испытания La-B-Sc эмиттеров катодов ЭРД [Текст] / А.В. Лоян,

Н.Н. Кошелев, Е.П. Солонинко, Е.Г. Агеева // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – №8 (75). – С. 68-72.

6. Электронная версия руководства к ANSYS Fifth Edition, ANSYS Release 5.6 [Электронный ресурс] / ANSYS, Inc., ANSYS, Inc. is a UL registered ISO 9001: 1994 Company, 1999. – Режим доступа: <http://www.gobookee.net/welding-by-ansys-tutorial/>. – 4.06.2013.

Поступила в редакцию 4.06.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. кафедры А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина.

МІНІМІЗАЦІЯ НЕОДНОРІДНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПРІ ВИПРОБУВАННЯХ ЕМІТЕРІВ КАТОДІВ ЕРД

А.В. Лоян, М.Ю. Тітов, Є.П. Солонинко

У даній роботі представлені результати чисельного моделювання розподілу напруженості електричного поля (ЕП) по поверхні емітера при його випробуваннях. У програмному продукті Ansys 11 була реалізована кінцево-елементна модель пристрою для дослідження емісійних властивостей. Проведені розрахунки показали, що форма і розміри елементів вузла «анод - емітер» у пристрої з дослідження емісійних властивостей можуть вносити значну неоднорідність у розподіл ЕП. Були проаналізовані результати розрахунків і дані рекомендації, що дозволяють мінімізувати неоднорідність ЕП.

Ключові слова: напруженість електричного поля, емітер, анод, чисельний розрахунок.

ELECTRIC FIELD HETEROGENEITY MINIMIZATION DURING TESTS OF EMITTERS IN ELECTRIC PROPULSION CATHODES

A.V. Loyan, M.Y. Titov, E.P. Solonynko

This paper presents results of numerical modeling of the distribution of the electric field (EF) on the surface of the emitter at its test. In the software product Ansys 11 it was implemented the finite element model of the device for study of emission properties. The calculations showed that the shape and size of a unit "anode - emitter" in the device of emission properties investigation can make a significant heterogeneity in the distribution of the EF. We analyzed the results and gave recommendations for minimization of heterogeneity of EF.

Key words: electric field strength, emitter, anode, numerical calculation.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. кафедры 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.

Тітов Максим Юрьевич – инженер каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: titov@d4.khai.edu.

Солонинко Евгений Павлович – аспирант каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: solonynkoyevgen@gmail.com