

УДК 537.533.3

*Д.Ю. Тарабрин*

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В КАТОДНО-МОДУЛЯТОРНОМ УЗЛЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ

*Представлена работа по оценке влияния пространственного заряда в катодно-модуляторном узле электронной пушки, используемой в электронной оже-спектроскопии. Рассмотрено два метода оценки: приближенно-аналитический и численный. Плотность тока эмиссии с катода варьировалась от 6 до 160 А/см<sup>2</sup>. Установлено, что в указанном диапазоне плотностей тока при ускоряющем напряжении 5 кВ влиянием пространственного заряда можно пренебречь. Сделан вывод об адекватности рассматриваемых методов оценки.*

**Ключевые слова:** электронная и ионная оптика, электронная пушка, электрод Венельта, кроссовер, пространственный заряд, первеанс, распределение напряженности электрического поля.

**Введение.** Основное назначение электронной пушки, которая является по своей сути электронным прожектором, состоит в ускорении эмитированных катодом электронов и переносе изображения катода на мишень. Традиционно электронная пушка состоит из катодно-модуляторного узла (КМУ) и каскада фокусирующих линз. В катодно-модуляторном узле происходит формирование электронного пучка с заданными геометрическими и физическими параметрами, определяемыми распределением потенциала в пространстве пролета электронов. Область пространства, непосредственно примыкающая к катоду, имеет низкий потенциал. В этой области энергия, передаваемая электронам электрическим полем, мала и сравнима по величине с энергией, приобретаемой электронами при эмиссии [1]. Такие области с низким потенциалом являются зонами «неустойчивости» и сильно подвержены влиянию пространственного заряда, который при больших значениях тока эмиссии с катода может стать фактором, определяющим качество формирования электронного пучка.

После эмиссии из катода электроны не сразу приобретают энергию, передаваемую им электрическим полем, нормальная составляющая (относительно плоскости эмиттера) которого, как правило, преобладает. В прикатодной области скорость электронов мала и под действием кулоновских сил расталкивания электронный пучок уширяется по всей длине. Это уширение сказывается на яркости, величина которой уменьшается за счет увеличения углового раз-

броса электронов и, как следствие, увеличения сферических aberrаций. Поэтому устройство, электродная система которого рассчитана и разработана без учета пространственного заряда, может на практике не обеспечить параметры, полученные в ходе расчета.

Пушки, используемые в электронной оже-спектроскопии в качестве источника первичных электронов, как правило, имеют небольшое ускоряющее напряжение (до 5 кВ), являющееся оптимальным для возбуждения оже-электронов большинства материалов [2].

В электронных пушках обычно используют вольфрамовые нитевидные, LaB<sub>6</sub>, автоэмиссионные или термо-автоэмиссионные катоды. Первые используются реже в силу их низкой яркости. Последние два имеют высокую яркость, но очень дорогие. Непосредственное сравнение указанных эмиттеров показывает, что при токах пучка порядка 10<sup>-8</sup> А лучше использовать катод из LaB<sub>6</sub>, позволяющий получать заданные размеры пятна и высокое отношение сигнала к шуму [3]. Указанная величина тока на выходе электронной пушки достаточна для проведения качественного энергоанализа оже-электронов. В области формирования электронного пучка, т.е. в катодно-модуляторном узле, ток пучка на несколько порядков выше, поскольку там отсутствуют потери на диафрагмах, используемых для обрезания электронов с большим угловым разбросом. Ток пучка при фиксированной площади эмиссии, как правило, определяет величину пространственного заряда.

**Цель работы** – оценка пространственного заряда в катодно-модуляторном узле при различных значениях тока эмиссии с катода.

**Приближенно-аналитический метод.** Для проведения локального оже-анализа необходим электронный пучок первичных электронов не более 1 мкм, формирование которого предполагает использование катода с небольшой эмитирующей поверхностью. Для таких задач наиболее подходит LaB<sub>6</sub> катод, например ES-423E. Данный катод имеет форму усеченного конуса. Диаметр эмитирующей поверхности может быть выбран исходя из условий эксплуатации и области применения, от 2 до 320 мкм. Максимальная плотность тока  $j$ , рекомендованная из соображений долговечности работы катода, составляет 30 А/см<sup>2</sup>. При диаметре эмитирующей поверхности  $d_k = 20$  мкм (наиболее используемая конфигурация) ток эмиссии  $I$  составит 94.2 мкА. Для оценки влияния пространственного заряда в эмиссионных системах используют такой параметр, как первеанс:

$$G = I / U^{3/2}, \quad (1)$$

где  $U$  – ускоряющее напряжение.

При  $U = 5$  кВ первеанс электронного пучка в системе с указанными выше параметрами составит примерно  $2.66 \cdot 10^{-10}$  А/В<sup>3/2</sup>. Влиянием пространственного заряда можно пренебречь, если первеанс не превышает  $10^{-8}$  А/В<sup>3/2</sup> [4]. Поскольку полученная величина на два порядка меньше предельного значения, пространственным зарядом можно пренебречь. Однако такая оценка по первеансу является достаточно грубой и может быть использована лишь в первом приближении.

Для того чтобы оценить, насколько велико влияние пространственного заряда в той или иной области, необходимо знать среднее расстояние между частицами и их скорость. Известно, что концентрация заряженных частиц может быть определена из выражения:

$$n = \frac{j}{e \cdot v}, \quad (2)$$

где  $e$  и  $v$  – соответственно заряд и скорость электрона. Скорость электрона при этом составляет:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m}}, \quad (3)$$

где  $e \cdot U$  – энергия электрона,  $m$  – масса электрона. Для расчета целесообразно использовать энергию электрона, которую он приобретает за счет ускорения. Таким образом, при ускоряющем напряжении 5 кВ энергия электрона будет равна 5 кэВ. Его скорость при этом будет равна  $4.19 \cdot 10^7$  м/с.

Используя формулу (2), находим концентрацию электронов  $n$  для плотности тока пучка 30 А/см<sup>2</sup>. Она составляет  $4.47 \cdot 10^{16}$  м<sup>-3</sup>. Зная концентрацию и предположив, что все электроны распределены равномерно, можно узнать размеры ячейки объемом  $r \times r \times r$ , которую занимает каждый электрон. При этом

$$r = \sqrt[3]{\frac{1}{n}} = 2.8 \text{ мкм}. \quad (4)$$

Зная расстояние между двумя соседними электронами и величину их заряда, можно определить силу, с которой они расталкиваются:

$$F = 8.98 \cdot 10^9 \cdot \frac{(|e| \cdot |e|)^2}{r^2}, \quad (5)$$

где  $F$  – сила кулоновского взаимодействия.

При этом ускорение, которое получают электроны, равно:

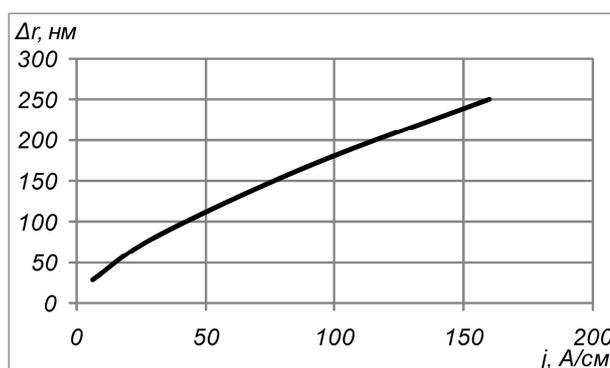
$$a = \frac{F}{m} = 3.18 \cdot 10^{13} \text{ м/с}^2. \quad (6)$$

За время пролета электронов от катода до анода расстояние между электронами изменится на величину

$$\Delta r = \frac{a}{2} \cdot \left( \frac{\Delta z}{v} \right)^2 = 81 \text{ нм}, \quad (7)$$

где  $\Delta z$  – расстояние между катодом и анодом, равное 3 мм (для исследуемой геометрии).

На рисунке 1 представлена зависимость увеличения расстояния между электронами в области анода от плотности тока эмиссии. Следует отметить, что плотности тока выше 30 А/см<sup>2</sup> не являются типичными для вышеупомянутого катода на основе LaB<sub>6</sub> и взяты для теоретического исследования.



**Рисунок 1** – Зависимость увеличения расстояния между электронами от плотности тока эмиссии

Полученные величины достаточно малы. К тому же помимо расталкивающих сил между электронами на них действуют соседние электроны, и суммарная сила намного меньше. Также следует отметить, что рассчитанная концентрация соответствует лишь области вблизи эмитирующей поверхности катода. Поскольку элек-

троны покидают катод под разными углами, при удалении от него их концентрация уменьшается.

Полученные результаты расчета с использованием описанной выше методики свидетельствуют о том, что в диапазоне плотностей тока эмиссии от 6 до 160 А/см<sup>2</sup> пространственным зарядом можно пренебречь.

**Численный метод расчета и оценки влияния пространственного заряда.** Распределение заряда в пространстве в общем случае зависит от геометрии электродов и может содержать участки сильной неоднородности. Современные средства компьютерного моделирования являются инструментом адекватного описания процессов распространения потоков заряженных частиц с учетом их пространственного заряда. Для точного расчета пространственного заряда и распределения электрического поля необходимо провести несколько итераций. На рисунке 2 представлен пример блок-схемы такого расчета.

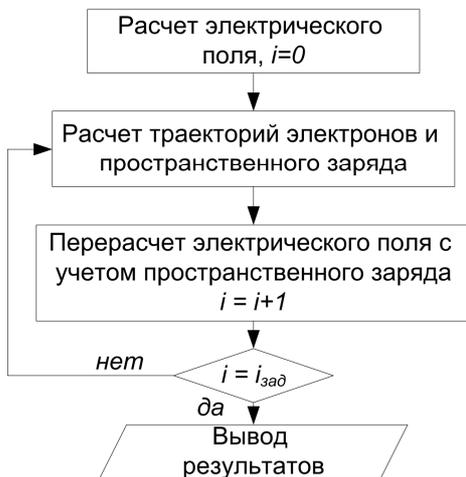


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма расчета электрического поля с учетом пространственного заряда

Сначала проводится расчет электрического поля. Затем рассчитываются траектории электронов и пространственный заряд. После происходит перерасчет начального электрического поля с учетом распределения пространственного заряда. Данное решение сохраняется. Затем в полученном электрическом поле заново рассчитываются траектории электронов и распределение пространственного заряда. Данный цикл выполняется до тех пор, пока количество итераций не станет равным заданному.

В ходе численного моделирования были использованы следующие параметры. Геометрия катода имеет вид усеченного конуса, угол наклона образующей которого равен 90°. Диаметр эмитирующей поверхности  $d_k = 20$  мкм. Ускоряющее напряжение  $U_{уск} = 5$  кВ. Источник электронов задан в соответствии с максвелловским

распределением по начальным скоростям:

$$f(v) = \sqrt{\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot T}} \exp\left(-\frac{m \cdot v^2}{2 \cdot k \cdot T}\right), \quad (8)$$

где  $T$  – температура, равная 1800 К. На рисунке 3 представлены траектории электронов, полученные в ходе расчета. Причем напряжение на электроде Венельта (модулятор) выбиралось таким образом, чтобы нулевая по отношению к катоду эквипотенциаль во всех моделях «примыкала» к его конусообразной поверхности в одной и той же точке. Расчетная сетка также оставалась неизменной.

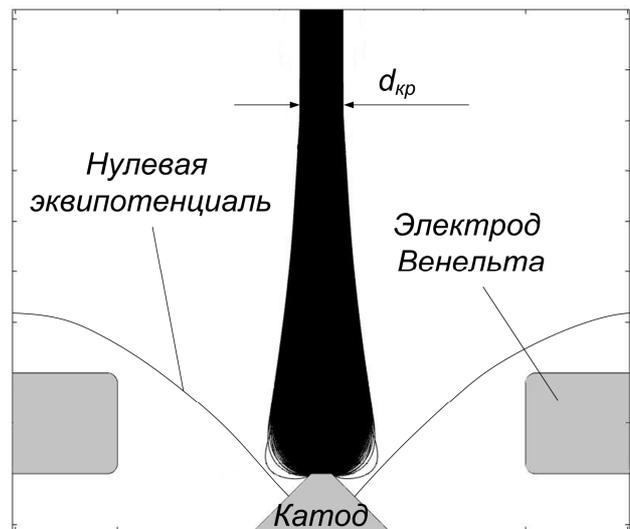


Рисунок 3 – Траектории электронов, эмитированных с поверхности катода

После эмиссии электронов с катода происходит их первичная фокусировка в области кроссовера. На рисунке 3 обозначен диаметр кроссовера  $d_{кр}$ .

На рисунке 4 представлено распределение пространственного заряда при плотности тока эмиссии 30 А/см<sup>2</sup>.

Максимальная величина пространственного заряда сосредоточена в прикатодной области, и поэтому, как уже было отмечено, наиболее сильно подвержены его влиянию электроны, скорость которых близка к тепловой. Именно в этой области образуется виртуальный катод. В ходе численного моделирования эмиссия электронов с конусообразных поверхностей была опущена. Во-первых, кристалл LaV<sub>6</sub> ориентирован таким образом, что основная часть электронов, которая участвует в формировании изображения, эмитирует с площадки диаметром 20 мкм на кончике катода. С конусообразных поверхностей эмиссия электронов значительно меньше. Во-вторых, напряжение на электроде Венельта при оптимальном режиме работы [5] выбирается таким образом, чтобы нулевая по отношению к

катоду эквипотенциаль «примыкала» к конусообразной поверхности несколько ниже (10 – 15 мкм) границы эмитирующей поверхности. Благодаря такому режиму, электроны, эмитированные с боковой конусообразной поверхности ниже нулевой эквипотенциали, возвращаются обратно на катод, а электроны, эмитированные выше данной эквипотенциали, за счет слабого ускоряющего поля и сильного воздействия пространственного заряда дефокусируются и не участвуют в формировании кроссовера.

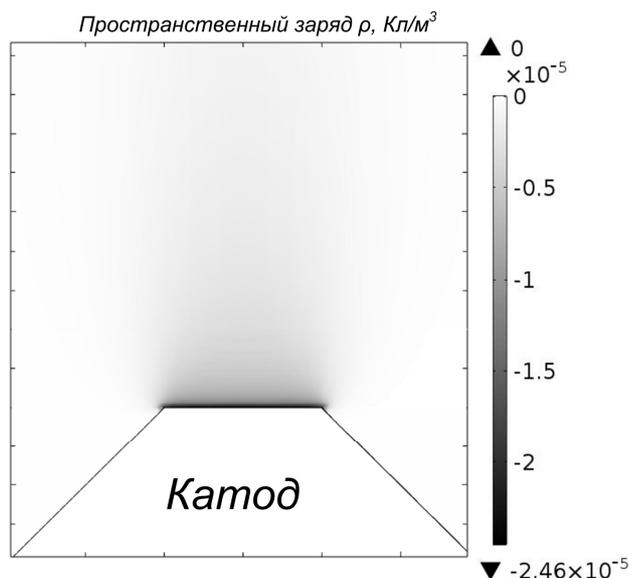


Рисунок 4 – Распределение пространственного заряда вблизи эмитирующей поверхности катода при плотности тока 30 А/см<sup>2</sup>

На рисунке 5 представлена зависимость максимальной величины пространственного заряда у поверхности катода от плотности тока эмиссии.

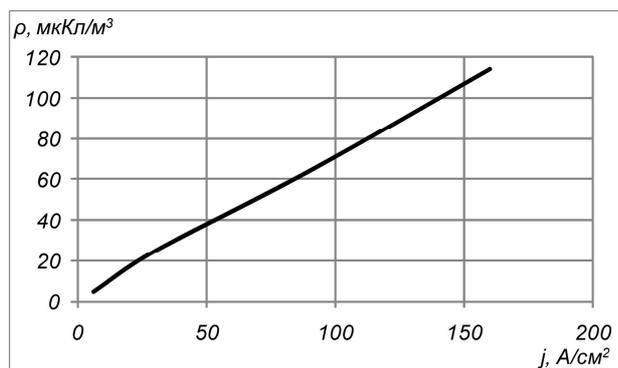


Рисунок 5 – Зависимость максимальной величины пространственного заряда в прикатодной области от плотности тока эмиссии

С увеличением максимальной величины пространственного заряда у эмитирующей поверхности изменяется положение виртуального катода, смещаясь несколько ближе в сторону анода. Поскольку пространственный заряд при-

водит к изменению распределения электрического поля, для оценки данного изменения была получена относительная разница напряженностей электрического поля, рассчитанных с учетом и без учета пространственного заряда:

$$\delta U' = \frac{|U'_{n.z.} - U'|}{\langle U' \rangle}, \quad (9)$$

где  $\delta U'$  – относительная разница напряженностей электрического поля,  $U'_{n.z.}$  и  $U'$  – напряженности электрического поля, рассчитанные соответственно с учетом и без учета пространственного заряда,  $\langle U' \rangle = 1.39 \cdot 10^5$  В/м – величина средней напряженности электрического поля без учета пространственного заряда в точке на оси, отстоящей от эмитирующей поверхности катода на расстоянии 20 мкм. На рисунке 6 представлено полученное распределение.

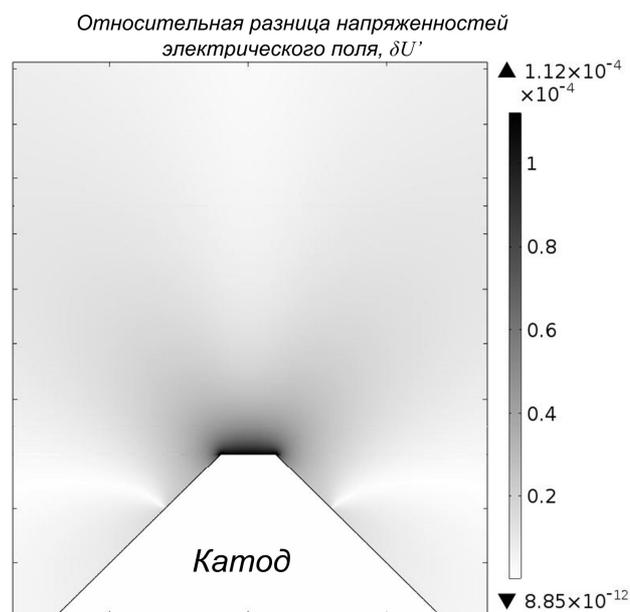


Рисунок 6 – Распределение относительной разницы напряженностей электрического поля, рассчитанных с учетом и без учета пространственного заряда

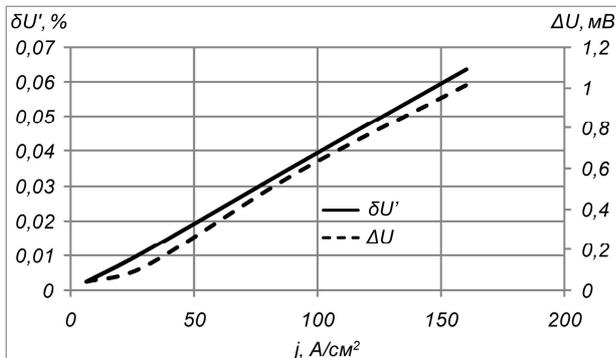
Представленное на рисунке 6 распределение свидетельствует о том, что наибольшее искажение электрического поля за счет пространственного заряда имеет место в прикатодной области.

Для более детальной оценки перераспределения электрического поля была получена абсолютная разница распределений потенциалов, рассчитанных с учетом и без учета пространственного заряда:

$$\Delta U = ||U'_{n.z.}| - |U||. \quad (10)$$

Представленные на рисунке 7 зависимости позволяют сделать вывод о том, что искажение электрического поля для рассчитанного диапа-

зона плотностей тока пренебрежимо мало. Кроме того, диаметр кроссовера и его положение во всех моделях оставались практически неизменными.



**Рисунок 7 –** Зависимости максимальной величины относительной разницы распределений напряженности электрического поля (сплошная) и максимальной величины абсолютной разницы распределений потенциала (штриховая) от плотности тока эмиссии с катода

**Заключение.** Результаты, полученные с помощью приближенно-аналитического метода, показали, что при плотностях тока эмиссии с катода до  $160 A/cm^2$  и ускоряющем поле 5 кВ влиянием пространственного заряда можно пренебречь. Полученные в ходе численного моделирования результаты подтвердили адекватность

используемого метода. Установлено, что максимальное влияние пространственного заряда на электроны имеет место вблизи эмитирующей поверхности катода, где энергия, передаваемая электронам электрическим полем, мала. Для уменьшения этого влияния необходимо повышать напряженность электрического поля у поверхности катода путем выбора геометрии электродов.

#### **Библиографический список**

1. Монастырский М.А. Исследование aberrаций эмиссионных электронно-оптических систем в областях с низким потенциалом // Журнал технической физики. 1989. Том 59. Вып. 12. С. 49 – 55.
2. Трубицын А.А., Толстогузов А.Б., Саулебеков А.О., Суворов Д.В., Тарабрин Д.Ю., Камбарова Ж.Т., Кукса П.И. Проектирование длиннофокусного оже-микроанализатора // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 42-1. С. 54-59.
3. Бриггс Д., Сих М.П. Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии: пер. с англ. М.: Мир, 1987. 600 с.
4. Елизаров А.А. Физика интенсивных электронных и ионных пучков: учеб. пособие. М.: Моск. гос. ин-т электроники и математики, 2007. 40 с.
5. Sewel P.B. General guidelines for operating ES-423E LaB<sub>6</sub> cathodes. Kimball Physics // Inc. Technical Bulletin # LaB<sub>6</sub>. 1991. 5 p.