

УДК 631

Внешние ветви диаграмм эмиттанса вблизи катода

О. Д. Потаткин

Государственное предприятие "Научно-исследовательский институт электроники
и оптики", Москва, Россия

Предложена новая модель иммерсионного объектива. Эта модель включает в себя два скрещенных однородных поля, одно из которых направлено вдоль электронно-оптической оси и имеет ускоряющий потенциал, другое — внешнее направлено перпендикулярно оси и имеет отрицательный потенциал. Эта модель описывает внешние ветви диаграмм эмиттанса вблизи катода. По полученным формулам построены диаграммы эмиттанса вблизи плоского катода и траектории непараксиальных электронов.

Существующие модели электронных пушек являются существенно параксиальными и не позволяют проводить анализ поведения внешних ветвей диаграмм эмиттанса в зависимости от значения напряжения смещения на управляющем электроде. К тому же построение самих диаграмм эмиттанса вблизи катода и получение однозначной зависимости между точкой на ветви диаграммы и точкой эмиссии на поверхности катода возможны только в результате обширных численных расчетов и не могут быть получены из результатов эксперимента. Предложена аналитическая модель поля вблизи катода, позволяющая аналитически рассчитать траектории непараксиальных электронов, эмитированных вблизи границы области эмиссии. Модель построена на основе скрещенных однородных электростатических полей. Рассмотрим систему уравнений, описывающих движение электрона в однородном поле:

$$\begin{aligned} m \ddot{y} &= 0, \\ m \ddot{z} &= eE_1. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_{01Z} &= (2e E_0/m)^{1/2} \cos \gamma, \\ V_{01Y} &= (2e E_0/m)^{1/2} \sin \gamma, \end{aligned} \quad (2)$$

где e — заряд электрона;
 m — масса электрона.

Предполагается, что точка эмиссии находится в начале координатных осей, в точке (0, 0). Решение системы уравнений (1) с начальными условиями (2):

$$y_1 = \frac{m (V_{01Z}^2 + 2eE_1z / m)^{1/2} - V_{01Z}}{e E_1} V_{01Y}. \quad (3)$$

Когда электрон заходит в область с тормозящим полем в точке (0, 0), начальные условия уже другие:

$$\begin{aligned} m \ddot{y} &= -eE_2, \\ m \ddot{z} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_{02Y} &= (2e E_0/m)^{1/2} \sin \gamma, \\ V_{02Z} &= \sqrt{V_{01Z}^2 + 2(e/m)E_1(z - z_1)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Решение элементарно:

$$y_2 = -(eE_2/2mV_{02Z}^2)z^2 + (V_{02Y}/V_{02Z})z. \quad (6)$$

Для траектории, имеющей на катоде угол наклона γ , энергию эмиссии E_0 , координату R_0 , уравнение траектории, проходящей в поле с напряженностью E_1 , принимает вид:

$$R_1(z) = 2z \left[\sqrt{\frac{E_0}{E_1 z} \left(\frac{E_0 \cos^2 \gamma}{E_1 z} + 1 \right)} - \frac{E_0}{E_1 z} \cos \gamma \right] \sin \gamma + R_0. \quad (7)$$

Наклон траектории может быть записан

$$R_1s(z) = E_0 \sin \gamma / \sqrt{E_0(E_0 \cos^2 \gamma + E_1 z)} \quad (8)$$

для любых значений z , меньших z_1 , и R_0 , меньших 0. Обозначим: $R_1s(z_1) = \gamma_1$.

При этом координата точки z_1 может быть определена из начальных условий:

$$z_1 = R_0 E_1 / 4 \sin^2 \gamma + R_0 \cos \gamma / \sin \gamma. \quad (9)$$

Для траекторий, проходящих в поле с напряженностью E_2 , уравнение траектории записывается следующим образом:

$$R_2(z) = (-E_2/4(E_0 \cos^2 \gamma + E_1 z_1)) (z - z_1)^2 + (z - z_1) E_0^{1/2} \sin \gamma / (E_0 \cos^2 \gamma + E_1 z_1)^{1/2}. \quad (10)$$

Наклон траектории в поле с напряженностью E_2 :

$$R_2s(z) = (-E_2/2(E_0 \cos^2 \gamma + E_1 z_1)) (z - z_1) + E_0^{1/2} \sin \gamma / (E_0 \cos^2 \gamma + E_1 z_1)^{1/2}. \quad (11)$$

Значение угла γ_1 не меняется при выходе из тормозящего поля в точке $(z_2, 0)$. Оно равно значению угла на входе, в точке $(z_1, 0)$, поскольку при выходе из области тормозящего поля не изменяется продольная составляющая скорости электрона. При этом R -компонента скорости равна и противоположна той, которая имеется в точке $(z_1, 0)$. Приравняв $R_2s(z)$ нулю и подставив полученное значение z в (9), мы можем найти максимальную высоту траектории R_m :

$$R_m = (E_0 \sin^2 \gamma) / E_2. \quad (12)$$

Формулы (9), (10) верны для любых значений z , больших z_1 , и меньших, чем z_2 . Если траектория опять возвращается в поле с напряженностью E_1 , то уравнение траектории запишется:

$$\begin{aligned} R_3(z) = & -\frac{2}{E_1} \left[\sqrt{E_0 \{E_0 \cos^2 \gamma + E_1 z_1\} \cos^2 \gamma_1 + E_1 (z - z_2)} - \right. \\ & \left. - \sqrt{E_0 \{E_0 \cos^2 \gamma + E_1 z_1\} \cos \gamma_1} \right] \sin \gamma, \end{aligned} \quad (13)$$

а координата точки возврата z_2 :

$$z_2 = (4/E_2)[E_0 \cos \gamma \sin \gamma + E_1 R_0/2] + z_1, \quad (14)$$

при этом тангенс угла наклона траектории $R_3(z)$:

$$R_3(z) = -\sin \gamma_1 / \sqrt{E_0 \{E_0 \cos^2 \gamma + E_1 z_1\} \cos^2 \gamma_1 + E_1 (z - z_2)}. \quad (15)$$

Пример построения диаграммы эмиттанса для электронов, вышедших с начальной энергией $E_0 = 0,25$ эВ, $E_1 = 0,015$ В/мм, $E_2 = 0,003125$ В/мм и углами эмиссии $\gamma = 89^\circ, 0^\circ$, представлен на рис. 1. Выбор плоскости измерения $z_3 = 0,15 R_0$ является произвольным, но в практике численных расчетов ограничивается снизу соответствующим предельным значением угла полного отражения γ_1 , при котором электрон движется параллельно оси вдоль прямой (z, R_m), а сверху — значением координаты z , при котором напряженность поля E_2 , полученная из результатов численного расчета, максимальна. Расстояние между соседними точками эмиссии d составляет $0,05 R_0$. Соотношение между углами $\gamma_1 = R_1(z_3)$ и $\gamma_2 = R_2(z_3)$ может быть получено из (7) и (10), однако мы не приводим этот результат из-за его громоздкости, а ограничимся важным и простым случаем этого соотношения для траекторий 3 и 1 (рис. 2) при $z_3 = z_2$ и $z_1 = 0$:

$$\gamma_{1m} = 1 / \sqrt{\text{ctg}^2 \gamma + 4(E_1 / E_2) \text{ctg} \gamma}, \quad \gamma_{2m} = \gamma. \quad (16)$$

Следует отметить, что угол γ_{1m} зависит только от соотношения напряженностей полей E_1/E_2 , а не от абсолютного числового значения E_2 и E_1 .

Приведенные примеры и формулы позволяют производить оценку характерного максимального угла эмиссии, максимального размера каустики вблизи катода и, что наиболее важно, описывают механизм формирования угловой aberrации пучка.

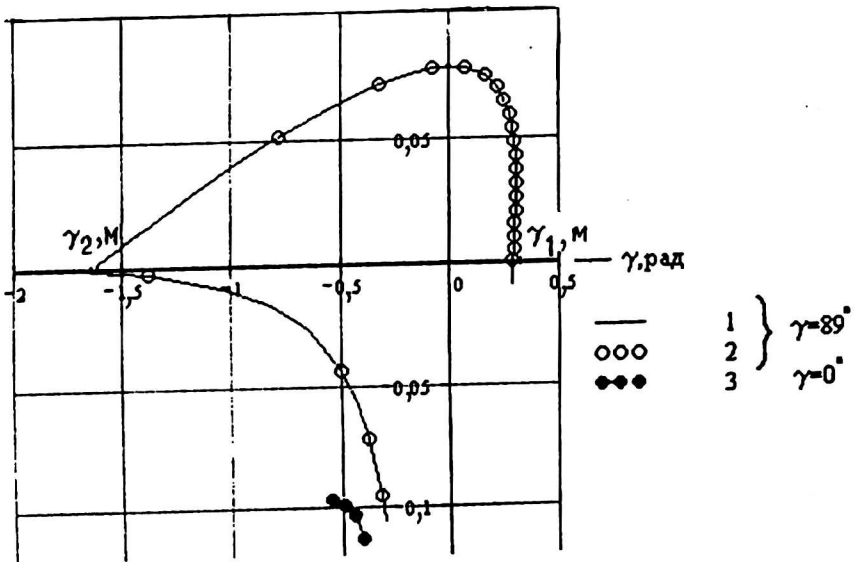


Рис. 1. Пример построения диаграммы эмиттанса для электронов с разными углами вылета

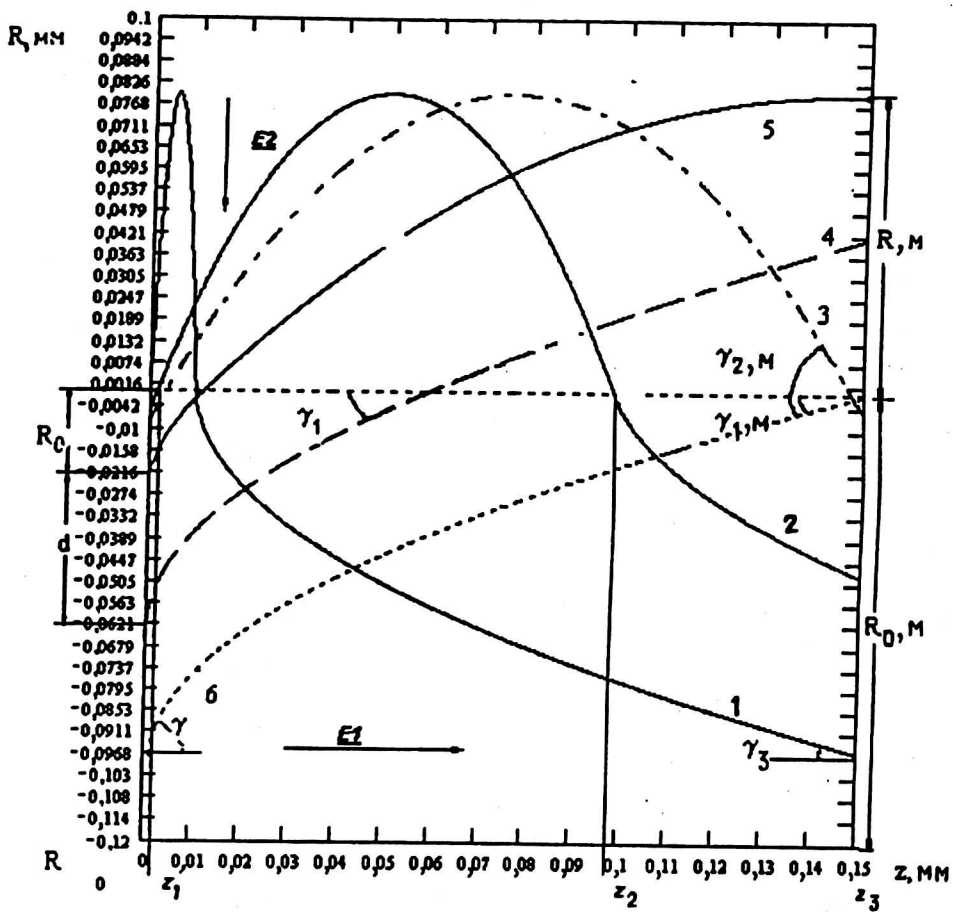


Рис. 2. Траектории электронов моделей.

Траектории 1—6, вышедшие из разных точек катода с разным начальным значением угла γ . E_1 — область радиуса R_0 м с ускоряющей электроны напряженностью поля; E_2 — с тормозящей; R_0 — расстояние между точкой эмиссии $(0, R_1(0))$ и границей раздела областей; z_1, z_2 — осевые координаты точек входа и выхода электрона из области с E_1 в область E_2 , соответственно; z_3 — осевая координата плоскости определения диаграммы эмиттанса

Outward loops of emittance diagramm near to cathode

O. D. Potapkin

Research Institute of Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

A new model of immersion objective was developed. The model includes two uniform fields: one of them has the acceleration field strength, another is outward transversal field with negative potential. This model describes the behaviour of outward branches of emittance diagramm near a cathode region rather well. There are character points of electron beam angles at the diagramm. The useful formulae were got. The electron trajectories were plotted.