

что поверхности, ограничивающие канал, отсутствуют, а отверстие для вывода электронов из области ускорения закрыто металлической сеткой; K — поверхность катода, G — эмиттирующая поверхность, имеющая форму усеченного конуса с образующей, равной одному миллиметру, R_n обозначает ширину зазора между электродами (в расчетах R_n варьировалось).

Предполагаем, что пространство между анодом и катодом представляет собой бесконечную полосу, т. е. пренебрегаем искажением стационарного электромагнитного поля в области ускорения за счет конечности размеров электродов, а также влиянием анодного отверстия. Допустимость подобного подхода определяется выбором соотношений между α , R_0 , R_n , где α — угол наклона электродов к оси системы, R_0 — средний радиус эмиттирующей поверхности.

Пусть внутренний электрод имеет потенциал U_0 , а внешний находится под нулевым потенциалом. Задача заключается в расчете траектории движения электронов в зависимости от конфигурации электродов и выбора параметров электронно-оптической системы, позволяющей создать трубчатый поток электронов с необходимой энергией и вывести его из области ускорения с максимальным g -фактором. Последнему требованию удовлетворяют только те электроны, которые попадают в область постоянного магнитного поля, не сделав ни одной петли в пространстве между анодом и катодом (см. рис. 2). Предполагается, что электроны инжектируются внутрь области ускорения со скоростями, равными нулю, и плотность тока эмиттера ограничена пространственным зарядом и эмиссионной способностью катода. Первый шаг анализа геометрии пучка производится без учета пространственного заряда с помощью наиболее простого алгоритма определения потенциала. Движение электронов происходит под действием электрического поля $E = -\text{grad } \phi$ и магнитного поля h . Конфигурация электродов, показанная на рис. 1, позволяет проанализировать возможности данной системы инжекции, рассчитывая электрическое поле как поле цилиндрического конденсатора:

$$E = \frac{U_0}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \times \frac{1}{r}, \quad U = U_0 \frac{\ln \frac{r}{r_2}}{\ln \frac{r_1}{r_2}}, \quad (1)$$

где r_1 , r_2 — радиусы внешнего и внутреннего конуса, U_0 — разность потенциалов между электродами.

Проекция вектора напряженности электрического поля на декартовы оси равны

$$E = E_0 \cdot l, \quad l_z = \sin \alpha, \quad (2)$$

$$l_x = \cos \alpha \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad l_y = \cos \alpha \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}},$$

где

$$E_0 = - \frac{U_0}{300} \frac{1}{\ln \frac{R_0 + h - z \text{tg } \alpha}{R_0 - z \text{tg } \alpha}} \frac{1}{\cos \alpha \sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (3)$$

Магнитное поле предполагается постоянным и однородным по всей области ускорения:

$$H = H_0 h, \quad h_1 = h_2 = 0, \quad h_3 = 1, \quad (4)$$

где h_1 , h_2 , h_3 — проекции h на оси ox , oy , oz .

При сделанных предположениях относительно полей с учетом релятивистских поправок в уравнении движения задача сводится к решению системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{dv_i}{d\tau} = F_i, \quad \frac{dr_i}{d\tau} = v_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} F_1 &= -\Delta [k(l_x - v_x \chi) + v_y], \\ F_2 &= -\Delta [k(l_y - v_y \chi) - v_x], \\ F_3 &= -\Delta [k(l_z - v_z \chi)], \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Delta = \sqrt{1 - v^2}, \quad \chi = (v1),$$

$$v' = cv, \quad \tau = t\omega_0,$$

$$k = \frac{E_0}{H_0}, \quad \omega_0 = \frac{eH_0}{mc} \quad (7)$$

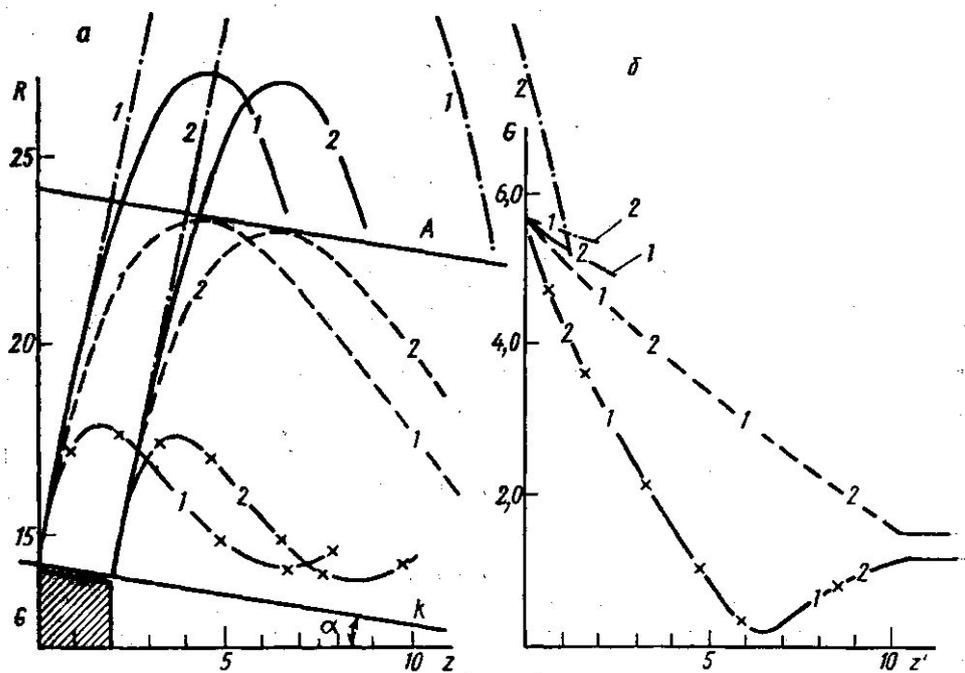


Рис. 2

Интегрирование (5) проводилось на ЭВМ БЭСМ-6 с помощью стандартной программы, использующей метод Рунге — Кутты с модификацией Мерсона с заданной точностью $\epsilon = 10^{-3}$.

Результаты расчета одного характерного варианта ($\alpha = 10^\circ$, $R_H = 10$ мм, ширина эмиттера 2 мм, $R_0 = 14$ мм) представлены на рис. 2. Приведенные на рис. 2, а траектории электронов, инжектированных с крайних точек эмиттера (цифры 1 и 2), иллюстрируют влияние параметров электромагнитной системы E_0 , H_0 на ход кривых ($H_0 = 1000$ э., $U_0 = 22500$ и 50000 В). Выбор малого угла наклона катода к оси системы приводит к тому, что отношение поперечной скорости к продольной (g -фактор) в конце области ускорения, как видно из рис. 2, б,

достигает большой величины: при $H_0=500$ э, $U_0=22\ 500$ и $50\ 000$ В, $g=5$. Характерным моментом, следующим также из рассмотрения рис. 2, б, является совпадение поведения величины g -фактора для крайних электронов. На приведенном графике $z'=z-z_0$, где z_0 — координата точки вылета электрона. Постоянство этой величины для траекторий, начинающихся с разных точек эмиттера, позволяет предполагать, что разброс по скоростям электронов будет небольшим. С другой стороны, построенные траектории наглядно показывают, что, несмотря на значительный интервал изменения параметров электро-магнитного поля, малое значение α приводит к попаданию частиц на анод с внешней стороны электрода, либо они остаются внутри инжектора.

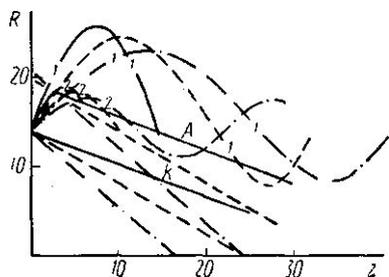


Рис. 3

Графики, показывающие как меняются траектории электронов в зависимости от угла наклона системы α и магнитного поля, приведены на рис. 3. При этом эрозия электродов равна $R_n=5$ мм, разность потенциалов равна 20 кВ. Траектории движения электронов, соответствующие трем положениям катода

$\alpha=20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$, нанесены сплошной, пунктирной и штрих-пунктирной линией, а в зависимости от величины магнитного поля $H_0=500, 1000$ э проставлены на траекториях цифры

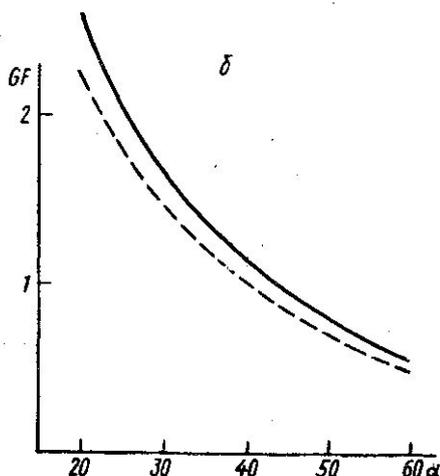
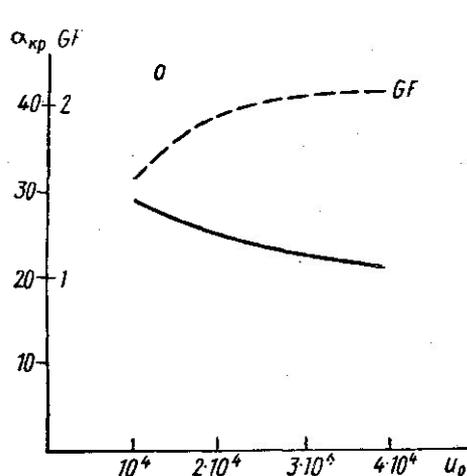


Рис. 4

1 и 2. Расчеты показывают, что главное влияние на вылет частиц из области ускорения оказывает выбор угла α . Только при значениях α больших некоторой минимальной величины или иначе критической ($\alpha_{кр}$) возможно попадание электронов в область адиабатического дрейфа. Как следует из приведенных на рис. 3 траекторий, при $H_0=500$ Э, $\alpha_{кр}=25 \pm 5^\circ$, при $H_0=1000$ э, $\alpha_{кр}=35 \pm 5^\circ$.

В табл. 1 приведены результаты более подробного исследования $\alpha_{кр}$ в зависимости от H_0 и U_0 . Причем величины $\alpha_{кр}$, приведенные в первом столбце, рассчитаны с точностью $\pm 0,5^\circ$, а в остальных столбцах

точность расчета $\pm 2,5^\circ$. Точность расчета определяется выбором шага по углу α . Свободные клетки в таблице свидетельствуют о том, что при заданных значениях полей электроны не попадают в канал.

$\frac{H_0}{U}$	$3 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$	$6 \cdot 10^2$	$7 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^2$	$9 \cdot 10^2$	10^3
10^4	29,5	32,5	32,5	32,5	—	—	—	—
$2 \cdot 10^4$	25,5	27,5	27,5	32,5	32,5	32,5	32,5	—
$3 \cdot 10^4$	23,5	27,5	27,5	32,5	32,5	32,5	32,5	32,5
$4 \cdot 10^4$	22,5	27,5	27,5	27,5	32,5	32,5	32,5	32,5

Более наглядной иллюстрацией зависимости $\alpha_{кр}$ и g -фактора от U_0 служит график, приведенный на рис. 4, а ($H_0=300$ э). Характерным моментом построенных кривых является плавное уменьшение $\alpha_{кр}$ с увеличением U_0 .

На рис. 4, б (при $H_0=500$ и 1000 э, $R_H=5$ мм, $R_0=14$ мм, $U_0=20$ кВ) показано влияние измерения угла наклона катода на величину g -фактора электрона в момент попадания в канал.

Приведенный краткий анализ дает представление о роли, которую играет подбор параметров электромагнитной системы и геометрия электродов для создания предложенной модели пушки.

В заключение авторы выражают благодарность проф. Ф. А. Королеву за интерес к работе и обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Девятков Н. Д., Голакт Н. Б. «Радиотехника и электроника», 12, 1973—1988, 1967.
2. Гапонов А. В., Гольденберг А. А. «Письма в ЖЭТФ», 2, 430, 1965.
3. Королев Ф. А., Курин А. Ф. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон., № 5, 116, 1969.

Поступила в редакцию
24.6 1974 г.

Кафедра
электроники