

10; 12

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ С ВЫВОДОМ ПУЧКА БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ В АТМОСФЕРУ

М. А. Аброян, Г. И. Трубников

Проведено расчетно-теоретическое исследование влияния электронно-оптических факторов на коэффициент вывода пучка в высоковольтных ускорителях с широким сечением пучка. Дискретность системы катодов, взаимное наложение пучков от отдельных эмиттеров является основным фактором, вызывающим потери электронов в отверстиях опорной решетки, на которую наложена разделительная фольга. Показано, что одним из эффективных способов увеличения коэффициента вывода является использование экранирующей сетки в виде стерижной, параллельных эмиттерам. Проведено сравнение расчетов с экспериментами.

Особенность электронных ускорителей с пучком большого сечения состоит в использовании дискретной системы катодов. Наиболее часто используются протяженные термокатоды — прямокальные нити, расположенные в одной плоскости [1-3]. Электронные пучки от отдельных нитей, перемешиваясь между собой, создают общий поток, обладающий разбросом по поперечным скоростям. Именно наличием этого разброса в значительной степени объясняются сравнительно низкие коэффициенты вывода пучка, характерные для ускорителей этого типа. В данной работе анализируются электронно-оптические факторы, определяющие коэффициент вывода пучка, т. е. эффективность ускорителя.

Коэффициент вывода, т. е. отношение числа электронов, выведенных в атмосферу, к числу ускоренных электронов, можно представить как произведение трех коэффициентов

$$\eta_0 = \eta_\phi \eta_r \eta_\gamma \quad (1)$$

Здесь η_ϕ — прозрачность фольги, зависящая от энергии электронов, материала и толщины фольги и составляющая в практически интересных случаях величину около 90 % [4]; η_r — геометрическая прозрачность опорной решетки, равная отношению суммарной площади отверстий к общей площади решетки; η_γ — угловая прозрачность, т. е. доля электронов, попавших во входное сечение отверстия и прошедших сквозь канал отверстия, минуя его стенку.

Выразим значения указанных коэффициентов через геометрические размеры опорной решетки. Наиболее часто в опорных решетках используются круглые отверстия, так как они создают наилучшие условия для прочности фольги. Наибольшую геометрическую прозрачность обеспечивает при этом «сотовая» система размещения отверстий. При диаметре отверстия D и толщине перемычки между отверстиями Δ

$$\eta_r = \frac{\pi D^2}{2\sqrt{3}(D+\Delta)^2} \approx 0.9 \frac{D^2}{(D+\Delta)^2} \quad (2)$$

Для электрона, попавшего во входное сечение канала длиной L и имеющего угол наклона α , вероятность пролета через выходное сечение составляет

$$p = \frac{\beta - \sin \beta}{\pi} \quad (3)$$

где $\beta = 2 \arccos(L \operatorname{tg} \alpha / D)$.

Для малых углов это выражение упрощается. Переходя к среднему углу падающего потока, получаем для угловой прозрачности

$$\eta_{\gamma} = 1 - \frac{L}{D45} \alpha^{\circ}, \quad (4)$$

где α° — средний угол в градусах.

Средний угол потока электронов определяет качество пучка в отношении угловой прозрачности. В практических случаях эта величина составляет $1-3^{\circ}$, тем не менее даже эти небольшие углы приводят к заметным потерям, так как

из-за технических требований отношение L/D приходится брать достаточно большим.

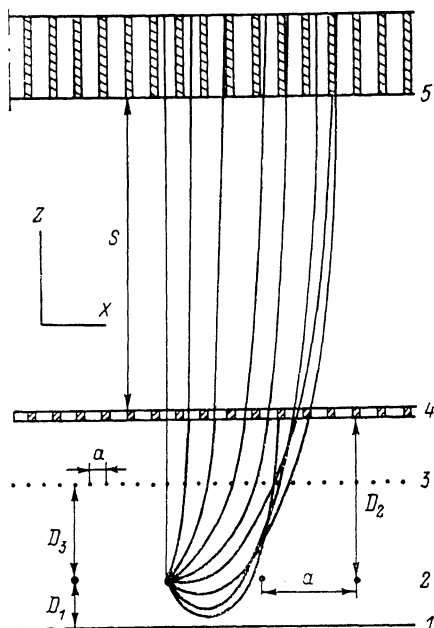


Рис. 1.

$$\Phi(x, z) = C_1 \ln \left(\sin^2 \frac{\pi x}{a} + \operatorname{sh}^2 \frac{\pi z}{a} \right) + C_2 \ln \left(\sin^2 \frac{\pi x}{a_1} + \operatorname{sh}^2 \frac{\pi(z - D_3)}{a_1} \right) + C_3 z + C_4. \quad (5)$$

Здесь $\Phi(x, z)$ — потенциал электрического поля, геометрические параметры показаны на рис. 1.

Для определения констант C_1, C_2, C_3 и C_4 на начальном этапе определяются граничные условия на электродах: $x=r_0, z=0, \Phi=U_0$ (потенциал катода); $x=0, z=-D_1, \Phi=U_1$ (потенциал спредера); $x=0, z=D_2, \Phi=U_2$ (потенциал экранирующей сетки); $x=r_1, z=D_3, \Phi=U_3$ (потенциал управляющей сетки). Получив константы, можем получить напряженность поля в любой точке, это позволяет решить уравнения движения электронов для последовательности частиц с начальными координатами, соответствующими поверхности катодной нити.

В примененном подходе отсутствует учет пространственного заряда пучка. Это не позволяет рассчитать распределение плотности тока, но траектории электронов описываются с большой степенью достоверности, поскольку влияние объемного заряда фактически ограничивается узкой (десятки микрон) зоной вокруг эмиттеров [6]. Трудности решения самосогласованной задачи для данной системы связаны с несоизмеримостью диаметра и всей расчетной области. Такие попытки делались для сравнительно больших диаметров эмиттеров, но сравнение с экспериментами не проводилось [7].

Фокусирующее действие отверстий экранирующей сетки оценивается по формуле тонкой линзы. В промежутке «экранирующая сетка—анод» предполагается движение электрона с заданными начальными условиями в однородном

поле. Вычислительная программа позволяет в численных экспериментах выделять различные факторы, влияющие на траектории электронов, исключая остальные, а также исследовать различные комбинации этих факторов.

На рис. 1 показаны траектории электронов без учета влияния управляющей сетки при нулевом напряжении на спредере. Соответствующий этому случаю фазовый портрет ($U_{c,п} = U_k$), т. е. зависимость угла от координаты, представлен на рис. 2. Для приведенного случая средний угол оказывается равным 1.4° . Таким образом, первым фактором, определяющим средний угол, является провисание потенциала между нитями катода. При $D_1 \approx a/2$ электроны от одного катода не огибают соседние катоды, этот случай можно считать оптимальным. Ширина отдельного пучка на аноде при этом составляет приблизительно $3a$, что также можно считать оптимальным, поскольку наложение пучков с целью сглаживания неоднородности является принципиальной особенностью данной системы.

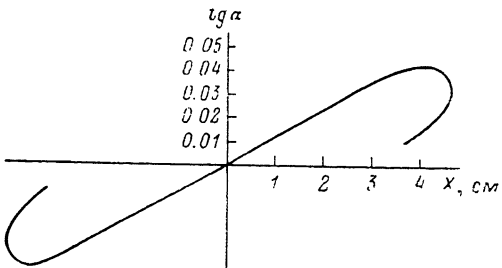


Рис. 2.

Проследить влияние этого фактора можно путем подачи отрицательного потенциала на спредер. При этом изменяется провисание поля между эмиттерами вплоть до случая практически однородного поля, когда нулевой потенциал катода является «естественным».

На рис. 3 приведены фазовые диаграммы пучка для случаев, когда потенциал на спредере составляет $0.25 U_3$ и $0.5 U_3$. Средний угол для этих случаев составляет соответственно 1.25 и 0.6° . При увеличении отрицательного потенциала уменьшается ток с тыльной стороны катода, пучок сжимается, уменьшается его полная величина. Можно отметить, что наклон фазовой кривой,

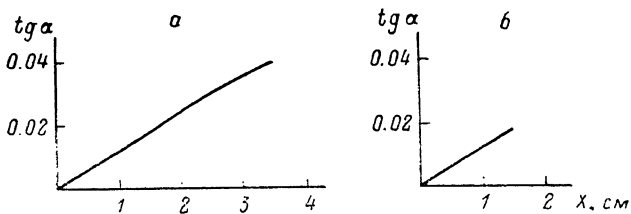


Рис. 3. Фазовые портреты пучка при отрицательных потенциалах на спредере.

$U_{c, п}$, В: а — -400 , б — -800 .

характеризующий расходимость пучка, не меняется в зависимости от потенциала спредера. Это объясняется тем, что начальная расходимость определяется кривизной эмиттера и примыкающих эквипотенциальных поверхностей (рис. 4, а). Устранить влияние этого фактора можно применением плоского катода. Соответствующий численный эксперимент был проведен, его результаты показаны на рис. 4, б.

Таким образом, подачей отрицательного потенциала на спредер и применением плоского эмиттера можно добиться существенного уменьшения среднего угла. Однако эти способы связаны с уменьшением эмиттирующей поверхности, т. е. с отказом от одного из важнейших преимуществ дискретной системы катодов.

Рассмотрим влияние следующего фактора — фокусирующего действия управляющей сетки. С электронно-оптической точки зрения управляющая сетка представляет собой ряд цилиндрических линз. Каждая из линз фокусирует свою часть электронного пучка (рис. 5, а). Фазовая кривая пучка перестает быть непрерывной, делясь на отдельные отрезки. Количество и длины этих отрезков зависят от густоты сетки (рис. 5, б, в). Анализ результатов показывает, что влияние густоты сетки на средний угол пучка невелико, поскольку в результате фокусировки приблизительно у половины электронов углы увеличиваются,

а у другой половины уменьшаются. Суммарное воздействие зависит от взаимного расположения эмиттера и нитей сетки, в целом влияние этого фактора незначительно.

В отличие от цилиндрических линз управляющей сетки линзы экранирующей сетки являются осесимметричными, т. е. осуществляют фокусировку не только в плоскости XZ , но и в плоскости YZ , параллельной эмиттерам и нитям

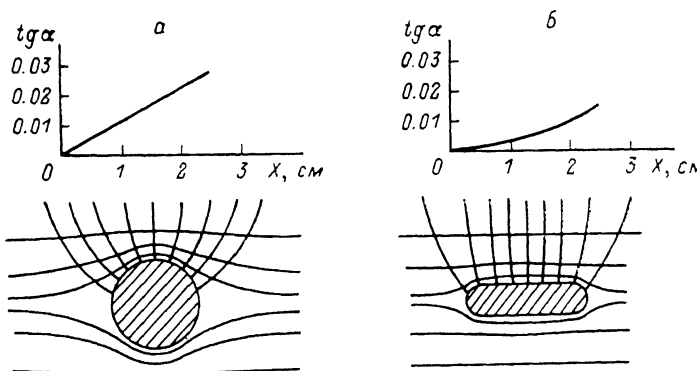


Рис. 4. Траектории электронов и фазовые портреты пучка для цилиндрического (а) и плоского (б) эмиттеров.

управляющей сетки. Воздействие на пучок отверстий формирующей сетки оценивалось в приближении тонких линз [8] с применением вероятностного подхода.

Расчеты, проведенные с учетом всех факторов для конкретных случаев, дали совпадение с экспериментальными данными. Система дискретных катодов в комбинации с экранирующей сеткой образует поток со средним угловым разбросом

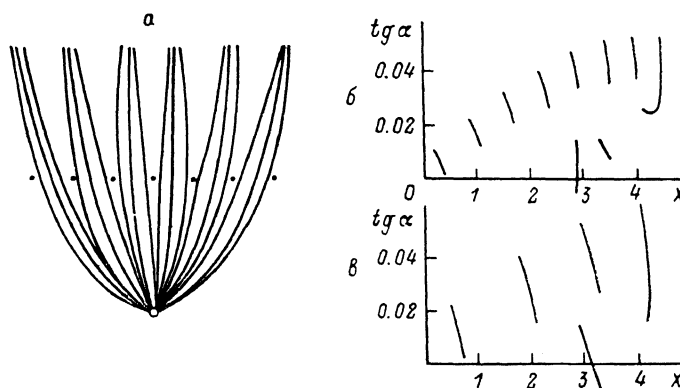


Рис. 5. Влияние управляющей сетки на угловой разброс.

а — траектории электронов; б, в — фазовые портреты пучка. В случае б шаг сетки вдвое меньше, чем в случае в.

$3-4^\circ$, что приводит к 25 %-ным потерям на стенках каналов диаметром 8 мм и глубиной 30 мм.

Таким образом, основными факторами, приводящими к угловому разбросу потока, являются сама по себе дискретность катодной системы и перфорационная структура экранирующей сетки. Если первый фактор присущ данной системе по определению и уменьшение его влияния приводит либо к увеличению неоднородности электронного потока, либо к увеличению мощности накала эмиттеров, то второй фактор можно устранить, перейдя к линейной структуре экранирующей сетки.

Такая структура показана на рис. 6. Экранирующая сетка представляет из себя ряд стержней, параллельных эмиттерам и нитям управляющей сетки.

Применяя прежний подход, опишем потенциал во всем пространстве между спредером и анодом

$$\varphi(x, z) = C_1 \ln \left(\sin^2 \frac{\pi x}{a} + \operatorname{sh}^2 \frac{\pi z}{a} \right) + C_2 \ln \left(\sin^2 \frac{\pi(x-G_1)}{a_1} + \operatorname{sh}^2 \frac{\pi(z-D_3)}{a_1} \right) + C_3 \ln \left(\sin^2 \frac{\pi(x-G_2)}{a_2} + \operatorname{sh}^2 \frac{\pi(z-D_4)}{a_2} \right) + C_4 z + C_5. \quad (6)$$

Вычислительная программа позволяет получить траектории электронов, величину среднего угла, потери на обеих сетках, величину напряженности в любой точке.

Основным выводом из проведенных численных экспериментов является установление факта уменьшения среднего угла до уровня $1.7-2^\circ$, что означает двукратное уменьшение потерь электронов на стенках отверстий опорной решетки.

При оптимизации геометрических размеров электронно-оптической системы преследовались две

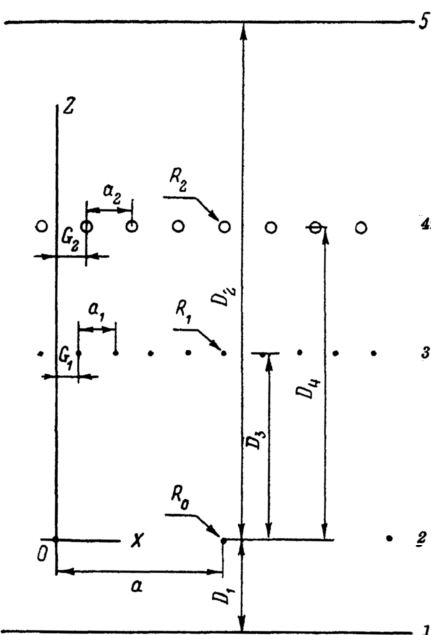


Рис. 6. Электронно-оптическая система со стержневой экранирующей сеткой. 1 — спредер, 2 — катод, 3 — управляющая сетка, 4 — экранирующая сетка, 5 — анод.

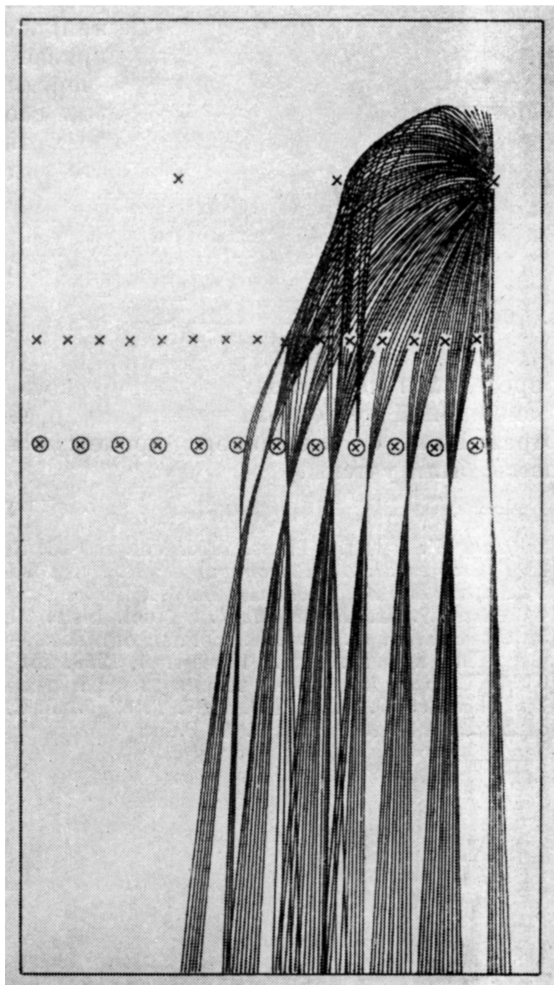


Рис. 7. Траектории электронов в системе с упорядоченной структурой.

цели, находящиеся в противоречии между собой: а) уменьшение локальных напряженностей на экранирующей сетке, б) увеличение пропускной способности экранирующей сетки. В результате была найдена структура, отвечающая обоим целям. В этой структуре соотношение шагов управляющей и экранирующей сеток подбирается таким, чтобы пучки, сформированные ячейками управляющей сетки, проходили экранирующую сетку с минимальными потерями. При этом появляется возможность применить в экранирующей сетке стержни сравнительно большого диаметра, чтобы удовлетворить требованиям высоковольтной прочности. На рис. 7 представлены траектории электронов в структуре, у которой шаги катода и сеток равны соответственно

30.6 и 7.5 мм. Диаметр стержней экранирующей сетки равен 3 мм, т. е. геометрическая прозрачность равна 60 %, в то же время фактическая прозрачность экранирующей сетки оказывается около 90 %. Максимальная напряженность поля в ускоряющем зазоре на поверхности стержней всего на 30 % превышает среднюю.

Экспериментальная проверка подтвердила результаты расчетов. Переход к экранирующей сетке в виде стержней не ухудшил электрической прочности ускорителя; коэффициент вывода пучка вырос на 10 %. На рис. 8 показаны расчетные (штриховые линии) и экспериментальные (сплошные линии) кривые зависимости коэффициента вывода от энергии ускоренных электронов. Пары кривых соответствуют различным потенциалам на вытягивающей сетке. Следует отметить, что в данном случае коэффициент вывода

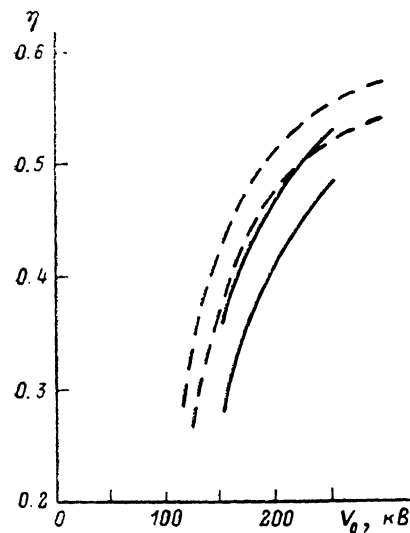


Рис. 8. Зависимость коэффициента вывода от энергии ускоренных электронов.

Сплошные линии — эксперимент, штриховые — расчет.

определялся как отношение измеренного в атмосфере тока к току нагрузки. Измеряемый же ток отличается от выведенного на величину тока электронов, отраженных от воздушного промежутка и коллектора. В расчетах эти процессы были учтены.

Литература

- [1] Hunt W. // IEEE Trans. 1975. Vol. ED-22. N 11. P. 1010—1013.
- [2] Григорьев Ю. В., Шантурин Л. П. // ПТЭ. 1978. № 4. С. 187—189.
- [3] Аброян М. А., Богомазов П. М., Зверев С. Ф. и др. // ПТЭ. 1982. № 5. С. 28—30.
- [4] Seltzer S. M., Berger M. J. // Nucl. Instr. Meth. 1974. Vol. 119. P. 157—179.
- [5] Страшкевич А. М. Электронная оптика электрических полей, не обладающих симметрией вращения. М.: Физматгиз, 1959. 251 с.
- [6] Клейнер Э. Ю. Основы теории электронных ламп. М.: Высш. шк., 1974. 367 с.
- [7] Григорьев Ю. В. // РИЭ. 1987. Т. 32. № 5. С. 1064—1070.
- [8] Кельман В. М., Явор С. Я. Электронная оптика. М.: Наука, 1968. 487 с.

Поступило в Редакцию
13 ноября 1987 г.