

10; 12

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ПРЕДЕЛЬНО МАЛЫМ ФАЗОВЫМ ОБЪЕМОМ

И. Н. Мешков, А. Н. Шарпа, А. В. Шемякин

Обсуждаются основные эффекты, определяющие эмиттанс тонкого пучка с высокой плотностью мощности. Рассмотрены варианты прикатодной оптики пушек с малым размером эмиттирующей поверхности, позволяющие получить минимальный эмиттанс при заданном токе и предельной для данного эмиттера плотности тока. Экспериментально получен пучок с эмиттансом, близким к тепловому.

В ряде задач электронной оптики необходимо формирование пучков с минимально возможным фазовым объемом при заданном токе пучка. Один из таких примеров — пушка разрабатываемой в ИЯФ СО АН СССР технологической электронно-лучевой установки для размерной обработки материалов. Основное требование к электронному пучку в этой установке состоит в том, что плотность мощности на мишени должна быть достаточной для эффективной обработки — не менее $3 \cdot 10^6$ Вт/см²; энергия электронов 100 кэВ, ток пучка до 10 мА, диаметр пучка на мишени не более 0.15 мм. Заданный размер пучка на мишени и конкретные решения по электронно-оптической системе определяют ограничения на эмиттанс пучка $\epsilon \leq 0.3\pi$ мм·мрад.

Основные эффекты, определяющие эмиттанс, — это тепловые скорости и электронно-оптические aberrации.

При заданной энергии электронов eU эмиттанс, связанный с тепловым разбросом, практически однозначно определяется радиусом эмиттера r_s ,

$$\epsilon_1 \approx \pi r_s \sqrt{T/eU}, \quad (1)$$

где T — температура катода. Это означает, что для $\epsilon \leq 0.3\pi$ радиус эмиттера не должен превышать 0.2 мм.

Такая оценка предполагает, что вклад электронно-оптических aberrаций мал. В противном случае размер эмиттера должен быть уменьшен. Однако при токе 10 мА заметное уменьшение r_s требует увеличения плотности тока с катода j выше 10 А/см², а выпускаемые промышленностью катодные узлы не обеспечивают надежную работу при такой плотности тока.

Ограничение на плотность тока эмиссии означает, что формирование электронного пучка с требуемыми параметрами становится реальным только при условии $\epsilon_2 < \epsilon_1$, где ϵ_2 — эмиттанс, связанный с электронно-оптическими aberrациями.

Оценки на плотность тока эмиссии сделаны в предположении, что она равномерна по катоду. Пушка с сильной неоднородностью распределения $j(r)$ оказывается практически непригодной, так как при заданных значениях тока и максимальной плотности тока требует увеличения размера эмиттера.

Таким образом, необходимо разработать пушку с диаметром эмиттера около 0.4 мм, обеспечивающую равномерную эмиссию с $j \approx 10$ А/см². При этом увеличение эмиттанса пучка, связанное с электронно-оптическими aberrациями, должно быть меньше 0.3π мм·мрад.

Увеличение эффективного фазового объема, связанное с aberrациями, может возникать в результате прохождения пучка вблизи электродов, в районе катода и анода. При малом первеансе пушки этих областей разделены и могут рассматриваться независимо. Для оценки aberrаций анодной линзы рассмотрим плоский диод с зазором L и отверстием в аноде радиуса R_A . В отсутствие пространственного заряда угол, набираемый в аноде, можно оценить как [1]

$$\alpha \approx r_A / 4L, \quad (2)$$

где r_A — радиус частицы вблизи анода.

Численные расчеты показывают что отклонение $\delta\alpha$ зависимости $\alpha(r_A)$ от линейной мало $\delta\alpha/\alpha \leq 10^{-2}$ при $r_A/R_A < 0.8$ для $R_A/L = 0.1-0.2$. Для низкопервеанской пушки это означает, что анод не вносит заметных искажений эмиттанса.

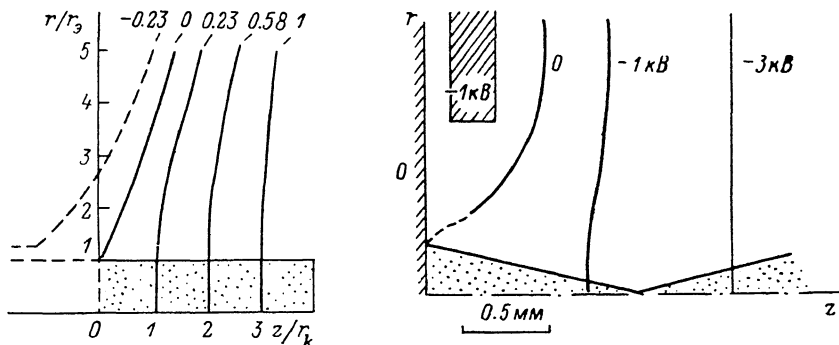


Рис. 1. Семейство эквипотенциальных поверхностей в пушке, формирующей параллельный аксиально-симметричный поток [1].

Цифры на кривых означают относительный потенциал. Штриховой линией показаны электроды для пушки с катодом в виде цилиндра.

Рис. 2. Геометрия прикатодной области пушки с эмиттирующим пятном, ограниченным нулевой эквипотенциалью.

Анодная плоскость находится на расстоянии 34 мм от катода под потенциалом 100 кВ. Ход эквипотенциали вблизи катода показан качественно.

Оценки показывают, что сильнее эффективный эмиттанс может увеличиться в прикатодной области. Как известно, в принципе возможно формирование безабберационного пучка (пушка Пирса [2]). На рис. 1 приведена картина эквипотенциалей — решение внешней задачи для однородного цилиндрического пучка. Заменяя нулевую эквипотенциаль электродом, получают традиционную пушку Пирса. Однако реализация этого решения в пушке с малым диаметром катода сопряжена со значительными трудностями. Они связаны с влиянием зазора между катодом и прикатодным электродом, необходимого, как правило, для тепловой развязки. Эту трудность можно устранить, заменяя отрицательную эквипотенциаль прикатодным электродом с потенциалом ниже катодного. Конструктивный зазор удален при этом от эмиттирующей поверхности. Это возможно только при специальной форме катода. Хорошим приближением, в частности, является цилиндр (рис. 1). Отметим, что безабберационность прикатодной оптики можно контролировать по распределению плотности тока по сечению пучка $j(r)$, поскольку, как показано в [3], однородное распределение плотности тока означает прямолинейность траекторий вблизи катода.

Основная сложность для применения такой пушки в технологической установке в том, что промышленность не выпускает катодных узлов подходящей формы и достаточной надежности.

При экспериментальном изучении оказалось, что однородное распределение можно реализовать также в пушке с традиционной геометрией (см., например, [4]):

плоский катод с большой эмиттирующей поверхностью, перед катодной плоскостью расположен управляющий электрод в виде диафрагмы (рис. 2). Управляющий электрод находится под отрицательным относительно катода потенциалом $U_{упр}$, так что пятно токоотбора ограничивается нулевой эквипотенциалью. Выяснилось, что при достаточно большом диаметре отверстия в управляющем электроде можно подобрать $U_{упр}$ так, чтобы размер эмиттирующего пятна был много меньше характерных размеров электродов и нулевая эквипотенциаль подходила к катодной плоскости под небольшим углом. При этом

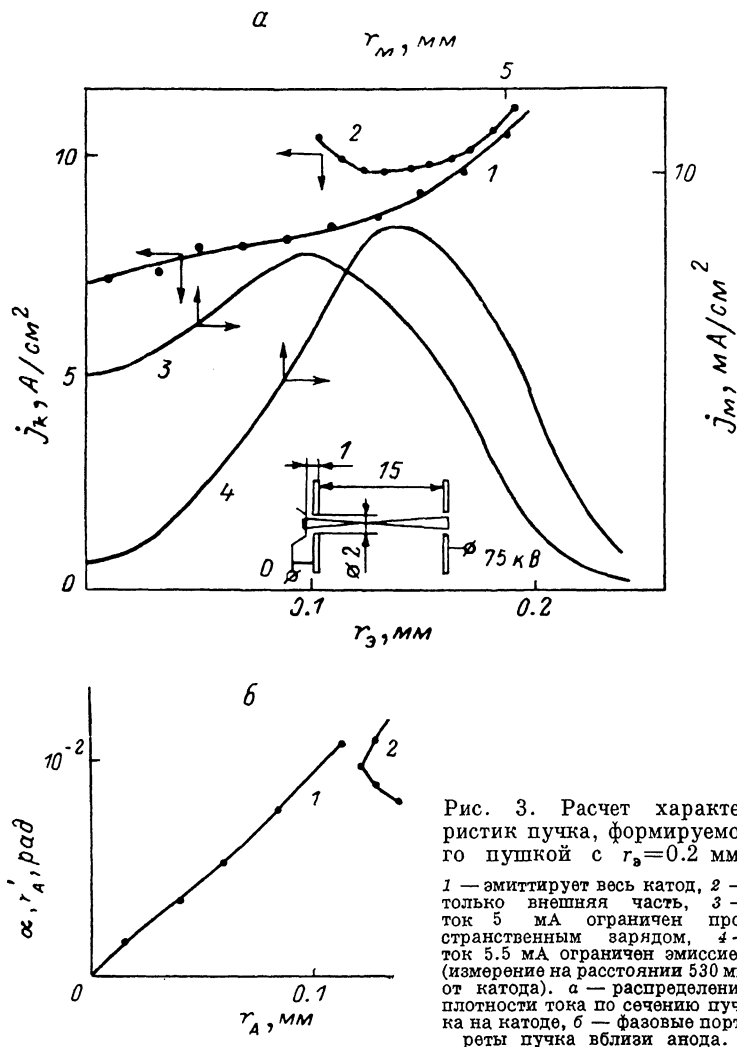


Рис. 3. Расчет характеристик пучка, формируемого пушкой с $r_s=0.2$ мм. 1 — эмиттирует весь катод, 2 — только внешняя часть, 3 — ток 5 мА ограничен пространственным зарядом, 4 — ток 5.5 мА ограничен эмиссией (измерение на расстоянии 530 мм от катода). а — распределение плотности тока по сечению пучка на катоде, б — фазовые портреты пучка вблизи анода.

угол сходимости пучка мал, а распределение плотности тока однородно. Это означает, что вблизи катода реализуется распределение потенциалов идеальной пушки со сходящимся пучком и aberrации отсутствуют.

Численные расчеты этой пушки, к сожалению, не обладают достаточной достоверностью и их результаты не согласуются с измерениями. Вероятно, это связано с расчетными трудностями вблизи точки ветвления нулевой эквипотенциали (рис. 2).

Как отмечено ниже, такая пушка эффективно работает лишь при первеансах, заметно более низких, чем требуется в установке. В то же время оба рассмотренных варианта обеспечивают вообще говоря, сколь угодно малую величину aberrаций. Фактически же требуется, чтобы эффективный эмиттанс пучка ϵ_2 , связанный с aberrациями, был много меньше теплового эмиттанса. Это условие выполнить тем легче, чем меньше первеанс пучка. Действительно, считая воз-

мушение сосредоточенным вблизи катода и большим можно оценить поперечную скорость v_{\perp} для геометрии с плоскими электродами как

$$v_{\perp} \sim \sqrt{\frac{2eU}{m}} r_0/L, \quad (3)$$

где L — зазор анод—катод; e , m — заряд и масса электрона.

Тогда

$$\epsilon_2 < r_0^{3/2}/L^{1/2} \quad (4)$$

уменьшается с уменьшением отношения r_0/L , т. е. первеанса.

Требуемый первеанс достаточно мал ($3 \cdot 10^{-10}$ А/В^{3/2}), поэтому возможно, отказавшись от строгой однородности распределения $j(r)$, совместить требования на первеанс, приемлемое значение эмиттанса ϵ_2 и простую форму катода.

На рис. 3 приведены результаты численного расчета пушки с плоским катодом, пятно токоотбора которого ограничено напылением антиэмиттера. Ток, как и в предыдущем случае, регулируется потенциалом прикатодной диафрагмы. При первеансе $3 \cdot 10^{-10}$ А/В^{3/2} возникающий эмиттанс ϵ_2 не превышает 0.03π мм \times \times мрад, а неоднородность плотности тока по катоду меньше 40 %. Катод при этом используется эффективно, так как при однородном распределении с той же максимальной плотностью тока полный ток был бы больше всего (на 15 %). Отметим, что расчет велся без учета тепловых скоростей и для тока, ограниченного пространственным зарядом. Как показали эксперименты, фазовый объем может сильно искажаться, если часть катода работает в режиме ограниченной эмиссии. Для оценки этого эффекта был проведен численный расчет в случае, когда центральная часть катода пушки (половина диаметра) не эмиттирует. Ток при этом изменяется примерно на 10 %, но, как видно из рис. 3, б, эмиттанс вырастает до 0.3π мм \cdot мрад.

Экспериментальная установка

Измерения характеристик пушки проводились на макете установки для размерной обработки материалов. Пучок, сформированный пушкой, проходит через линзу, отклоняющую систему и попадает на мишень. Распределение плотности тока по сечению несфокусированного пучка и угол его расходимости измеряются с помощью перемещения пучка отклоняющей системой по танталовой фольге с отверстием диаметров 0.5—1 мм. Для измерения размера сфокусированного пучка используется сканирование вблизи края того же отверстия. Искомый размер определяется как величина перемещения между положениями, при которых в отверстие проходит соответственно 5 и 95 % полного тока. Все измерения автоматизированы и проводятся в импульсном режиме при длительности импульса 10—100 мкс.

По измеренному минимальному размеру пучка d_{\min} и известному расстоянию линза—мишень S_1 можно, считая вклад пространственного заряда и аберраций линзы несущественным, оценить разброс углов в линзе θ

$$\theta \approx d_{\min}/2S_1. \quad (5)$$

Вычислив по измеренному углу расходимости радиус пучка в линзе r_1 , можно получить оценку сверху эмиттанса ϵ пучка, выходящего из пушки

$$\epsilon \approx \pi\theta r_1. \quad (6)$$

В работе использовались промышленный катодный узел КПУ-45 с металлопористым эмиттером и его модификация с эмиттирующей поверхностью, ограниченной запылением.

Пушка с катодом КПУ-45

Диаметр эмиттирующей поверхности катода КПУ-45 составляет 1.5 мм, и для получения малого r_0 пятно токоотбора необходимо формировать нулевой эквипотенциалью (рис. 2). Характерные распределения плотности тока по се-

чение пучка приведены на рис. 4. При малых токах распределение неоднородно, затем в центре появляется максимум. Как отмечено выше, это означает и появление aberrаций. Зависимость угла расходимости β от первеанса P (при изменении тока напряжением управляющего электрода) в широком диапазоне показана на рис. 5. С ростом тока угол вначале растет, затем кривая имеет резкий минимум. Уменьшение угла означает, что нулевая эквипотенциаль пересекла границу эмиттирующей поверхности. Первеанс в точке минимального размера примерно равен вычисленному для пушки Пирса с параллельным пучком. При дальнейшем увеличении тока пучок становится расходящимся от катода. Вид кривых $\beta(P)$ для малых размеров эмиттирующего пятна слабо зависит от

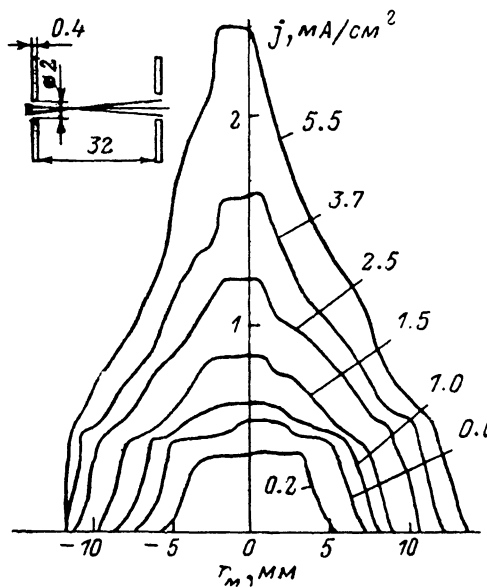


Рис. 4. Распределение плотности тока по сечению пучка на расстоянии 380 мм от катода.

Эмиттирующее пятно ограничено нулевой эквипотенциалью. Цифры на кривых — ток в мА.

геометрических размеров прикатодной диафрагмы, а неоднородность распределения уменьшается с увеличением диаметра отверстия. К сожалению, в интересующей области первеансов углы расходимости оказываются больше 20 мрад. При этом минимальный размер пучка на мишени определяется aberrациями

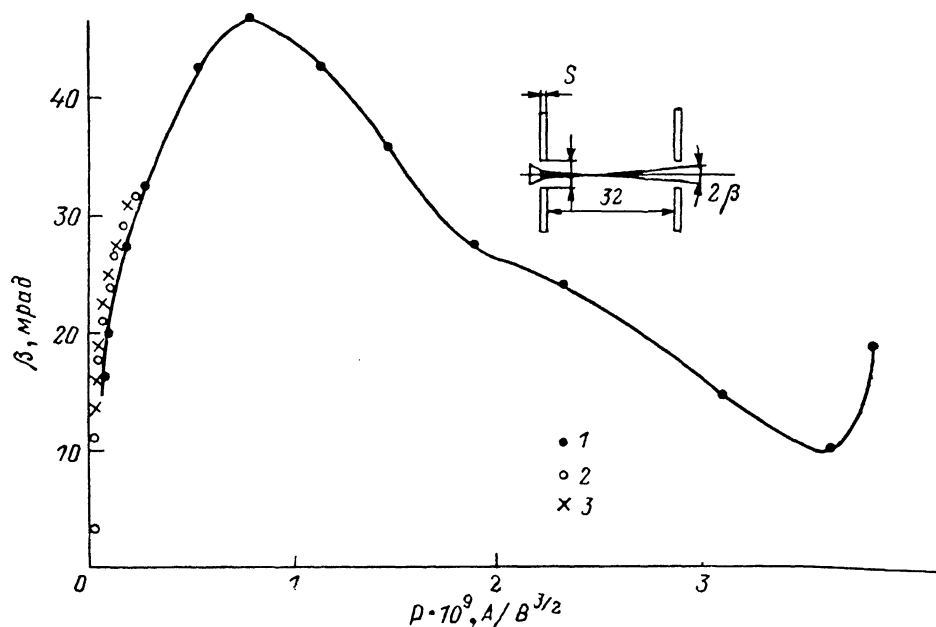


Рис. 5. Зависимость угла расходимости от первеанса для пушек с эмиттирующим пятном, ограниченным нулевой эквипотенциалью.

d , мм: 1 — 7, 2 — 4, 3 — 2; S , мм: 1 — 1.2, 2 — 2.2, 3 — 0.4.

линзы, поэтому (7) дает только грубую оценку сверху на эмиттанс пучка $\epsilon < 1\pi$ мм·мрад.

Как видно из рис. 4, однородное распределение $j(r)$ реализуется лишь при малых первеансах. В этом режиме плотность тока с катода заметно ниже, чем

в пушке Пирса с теми же зазором и площадью эмиттирующего пятна. Так как минимальная величина зазора определяется электрической прочностью, то не удастся получить равномерную плотность тока выше 1 А/см^2 . Это означает, что в такой пушке нельзя полностью использовать эмиссионную способность металлопористого катода. При больших токах средняя плотность тока растет, но эмиттирующая площадь используется неэффективно из-за сильной неравномерности $j(r)$.

Пушка с запыленным катодом

В работе использованы катоды с малой эмиттирующей поверхностью, изготовленные по специальной технологии. Первый вариант катода с $r_s = 0.12 \text{ мм}$ обеспечивал ток до 6 мА , но эмиссия при столь высокой плотности тока (около 20 А/см^2) была неустойчивой. Поэтому пришлось выбрать геометрию с диаметром эмиттирующего пятна 0.4 мм (рис. 3). Характер зависимости $\beta(P)$ тот же,

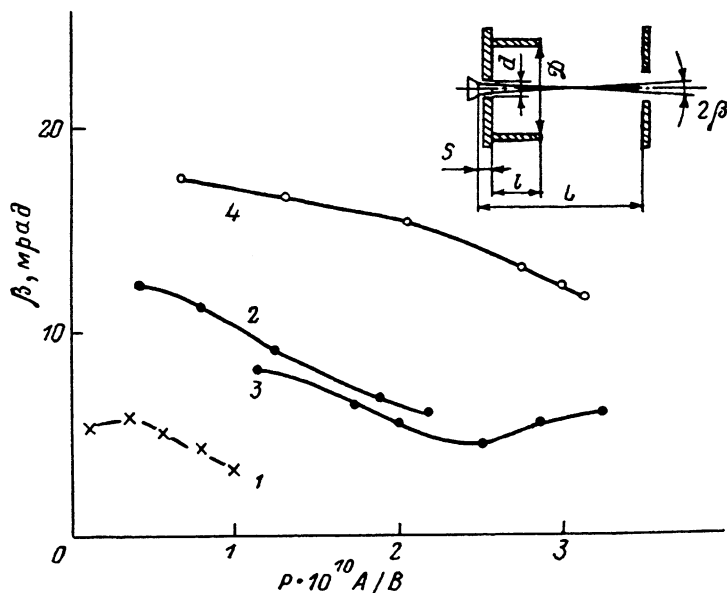


Рис. 6. Зависимость угла расходимости от первеанса для пушек с $r_s = 0.2 \text{ мм}$.

$L, \text{ мм}$: 1, 3 — 32; 2 — 63; 4 — 17; $d, \text{ мм}$: 1—4 — 2; $S, \text{ мм}$: 1—3 — 0.4, 4 — 1; $l, \text{ мм}$: 1 — 8; 2, 4 — 0; 3 — 10; $D, \text{ мм}$: 1 — 18; 2, 4 — 0; 3 — 40.

что и на рис. 5, но численные значения первеанса меньше из-за меньшего размера эмиттера. На рис. 6 приведены кривые для нескольких пушек, отличающихся геометрическими размерами. Эмиттанс, рассчитанный по формуле (6) для экспериментальных данных, оказался $0.3\pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ (для примерно 80 % тока). Поскольку оценка (1) дает (при $T = 0.1 \text{ эВ}$) $\epsilon_1 = 0.2\pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$, то можно считать, что aberrации пушки не вносят существенного вклада. Основные трудности при работе с пушкой связаны с высокой чувствительностью катода к вакуумным условиям. При росте давления выше $1 \cdot 10^{-6} \text{ Тор}$ ток эмиссии падает. На рис. 4 приведены зависимости для полного тока и тока, уменьшенного на 10 % из-за ухудшения вакуума. Видно, что падение эмиссии происходит в первую очередь в центральной части катода. Измерения показали, что при этом эффективный фазовый объем вырастает примерно в два раза, что согласуется с результатами численных расчетов.

Заключение

Описано два варианта оптики пушек, позволяющие формировать пучок с фазовым объемом, близким к минимально возможному — тепловому, величина которого определяется размером эмиттирующего пятна. На основе промышленно

выпускаемого катода создана пушка, формирующая однородный пучок с током 0.5 мА. В пушке на основе катода с запыленной поверхностью экспериментально получен пучок с параметрами: энергия 100 КэВ, ток до 10 мА при эмиттансе менее 0.3π мм·мрад. Все расчеты были проведены на пакете прикладных программ «POISSON-2» [5].

Авторы выражают благодарность Т. Н. Андреевой, принимавшей участие в расчетах, Н. А. Иофису, Ю. М. Хащеватскому и Ю. В. Гуркову за разработку и изготовление катодных узлов.

Литература

- [1] *Алямовский И. В.* Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966. 456 с.
- [2] *Пирс Дж. Р.* Теория и расчет электронных пучков. М.: Сов. радио, 1956. 115 с.
- [3] *Кириштейн П. Т., Кайно Г. С. Уотерс У. Е.* Формирование электронных пучков. М.: Мир, 1970. 600 с.
- [4] *Жигарев А. А.* Электронно-лучевые приборы. М.; Л.: Энергия, 1965. 335 с.
- [5] *Астрелин В. Т., Иванов В. Я.* // Автометрия. 1980. № 3. С. 92—99.

Институт ядерной физики
СО АН СССР
Новосибирск

Поступило в Редакцию
17 февраля 1988 г.

