

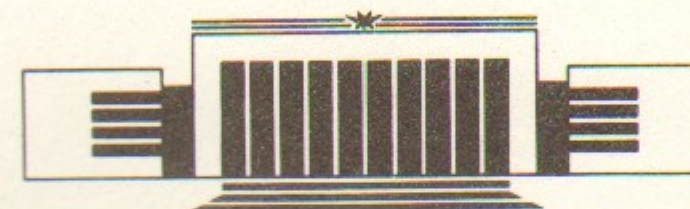


28
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

**И.В. Горнаков, И.Н. Мешков, А.Н. Оленьков,
А.Н. Шарапа, А.В. Шемякин**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ УСТАНОВКА
ДЛЯ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

ПРЕПРИНТ 89-179



НОВОСИБИРСК

ВВЕДЕНИЕ

Размерная обработка материалов электронным пучком имеет уже заметную историю [1], но, как это часто бывает в технике, с развитием общетехнического уровня и обогащения «арсенала» элементов и средств старые методы претерпевают второе рождение, выходя на качественно новый уровень. Именно так дело обстоит сегодня с электронно-лучевой размерной обработкой. Новые качества достигаются благодаря появлению

- источников электронов высокой яркости;
- малоабберационных электронно-оптических элементов;
- методов и средств автоматизации установок.

Обработка изделий концентрированным электронным пучком с высокой плотностью мощности (более 1 МВт/см^2) позволяет решать широкий круг задач. Например, это прошивка коммутационных отверстий в керамических платах и изолирующих слоях при изготовлении гибридных схем, балансировка гироскопов снятием микроколичеств вещества, формирование систем проводников фрезеровкой фольгированных поверхностей и т. д.

При решении таких задач известную конкуренцию электронно-лучевым системам составляют лазерные. При сравнении электронно-лучевых и лазерных установок основное преимущество последних — возможность обработки на атмосфере. В то же время из-за различия коэффициентов отражения для обработки разных материалов необходимы лазеры с разной длиной волны. Кроме того, из-за сложности перемещения мощного лазерного луча в таких установках используют передвижение детали точным столом, что резко снижает скорость обработки. К недостаткам можно отнести также значительные размеры и высокую потребляемую мощность. Отметим также, что в ряде случаев по условиям технологии требуется обработка именно в вакууме.

Таким образом, использование для размерной обработки электронного пучка с его управляемостью и независимостью вложенной

мощности от сорта обрабатываемого материала оказывается привлекательным. Отсутствие промышленного выпуска в СССР электронно-лучевых установок размерной обработки связано, в частности, с тем что существующие единичные экземпляры таких установок имеют электронный пучок или неподвижный, или с разверткой на несколько миллиметров, так что практически для всех задач нужно также использовать механическое сканирование (стол). В итоге производительность таких установок не превышает производительность лазерных, а создание стола, который должен перемещаться в вакууме с высокой точностью, — сложная техническая задача. Наша промышленность пока не выпускает серийно столов с требуемыми параметрами.

Наиболее полно преимущества электронно-лучевой обработки проявляются в схеме, в которой мишень во время обработки неподвижна, а пучок перемещается по всей ее поверхности отклоняющей системой. В данной работе описывается технологическая электронно-лучевая установка размерной обработки конструкций (УРОК), реализующая именно такой принцип. Основные ее параметры и описание крупных конструктивных узлов приведены в разделе 1.

При разработке установки, использующей схему с неподвижной мишенью, на смену сложностям с изготовлением и использованием точного вакуумного стола приходят проблемы, связанные с достаточно жесткими требованиями к электронно-оптической системе (ЭОС). Сложность задачи состоит в необходимости совместить высокую плотность мощности в пятне обработки и сканирование пучком большой поверхности. Ее решение потребовало проведения специальных исследований по всем элементам ЭОС. Результатам этой работы посвящены разделы 3—6. В разделе 2 описаны использованные при этом методики.

Наряду с основным вариантом при создании установки рассматривалась также ЭОС с магнитным сопровождением. Такая схема обсуждается в разделе 7. Опыт по настройке и эксплуатации установки отражен в разделе 8.

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Технологическая электронно-лучевая установка УРОК, предназначенная для размерной обработки различных материалов, разрабатывается в ИЯФ СО АН СССР с 1984 года [2]. Первые образцы установки ориентированы на обработку керамических

плат размером 60×48 мм и толщиной до 1 мм. Исходя из этого, выбраны следующие параметры установки.

Таблица 1

Параметры установки

Энергия электронов	100 кэВ
Ток в импульсе	до 7 мА
Размер пучка на мишени	0.1—0.15 мм
Площадь обработки	60×48 мм
Длительность импульса тока	10 мкс—1 мс
Частота следования импульсов	до 50 Гц
Точность позиционирования пучка на мишени	20 мкм
Отклонение угла падения пучка на мишень от прямого	< 0.02 рад

Установка занимает площадь около 15 м^2 , мощность, потребляемая от сети, не более 3 кВт, вес около 1 т. Конструктивно установка состоит из электронно-оптической колонны с технологической камерой и вакуумной системой, высоковольтного источника, комплекта ЭВМ «МЕРА-60», радиостойки и стола с терминалом и цветным дисплеем.

1.1. Электронно-оптическая колонна

Эскиз электронно-оптической колонны показан на рис. 1.1. Пучок формируется трехэлектродной пушкой (раздел 3) и затем фокусируется магнитной линзой (раздел 4). Рядом с линзой размещен стигматор, позволяющий корректировать форму пучка на мишени. Перемещение пучка по поверхности мишени осуществляется за счет отклонения в поле магнитной отклоняющей системы (раздел 5). Расположенная вблизи мишени дополнительная отклоняющая («выправляющая») система сообщает пучку угол, равный углу отклонения в первой системе, но противоположно направленный, так что пучок падает на мишень перпендикулярно поверхности (раздел 6). Электроны, прошедшие сквозь мишень, попадают в цилиндр Фарадея.

Вся электронно-оптическая колонна выполнена в виде четырех отдельных узлов, соединенных вакуумно-плотно между собой с помощью фланцев: 1) электронная пушка с вакуумным шиббером, 2) линза со стигматором, 3) отклоняющая система, 4) выправляющая система. Колонна окружена свинцовым экраном, обеспечива-

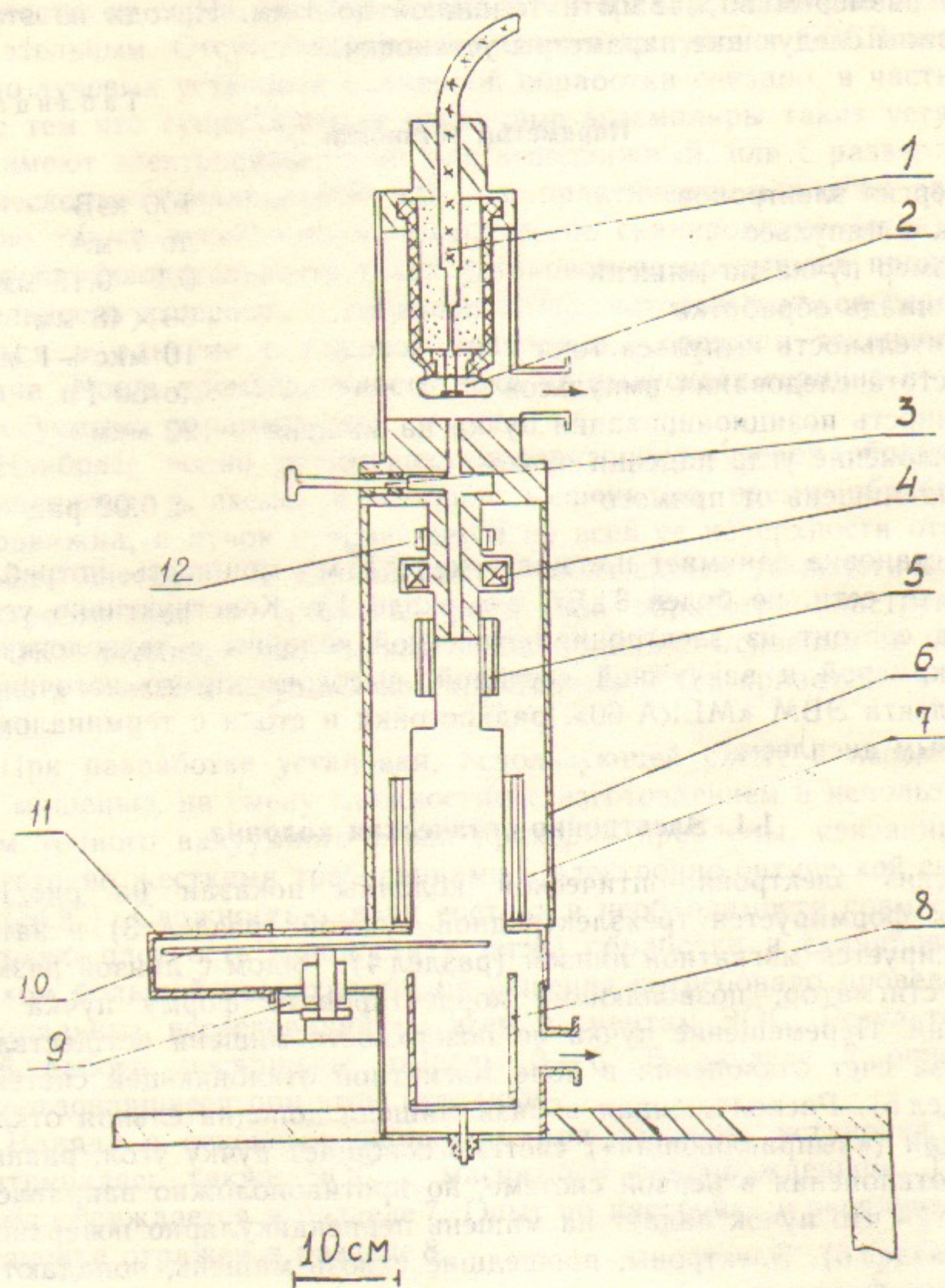


Рис. 1.1. Схема электронно-оптической колонны:

1 — высоковольтный ввод; 2 — электронная пушка; 3 — шибер; 4 — магнитная линза; 5 — отклоняющая система; 6 — радиационная защита; 7 — выправляющая система; 8 — цилиндр Фарадея; 9 — двигатель поворота; 10 — диск с изделиями; 11 — технологическая камера, 12 — стигматор. Стрелками показано направление вакуумной откачки.

ющим радиационную защиту. Ввод высокого напряжения, питания накала, напряжения управляющего электрода осуществляется кабелем в верхнюю часть колонны.

1.2. Технологическая камера

Технологическая камера предназначена для обработки десяти керамических пластин размером 60×48 мм. Пластины предварительно (на атмосфере) закрепляются в диске. Каждая пластина поджимается к трем штифтам, положение которых является реперным для последующих технологических процессов. Снаряженный диск помещается на ось вращения в вакуумную камеру и камера откачивается. Пластины приводятся в «позицию обработки» поворотом диска, осуществляемым электродвигателем РД-09 с «мальтийским крестом». Ввод вращения в вакуум — через уплотнение Вильсона.

При повороте точность выставления края пластины около 0.5 мм. Для позиционирования требуемого рисунка по образцу с необходимой точностью (20 мкм) нужно каждый раз определять точное положение пластины в системе отсчета пучка. Такое «нацеливание» производится с помощью того же электронного пучка. Для этого вблизи каждой пластины расположены по два отверстия диаметром 1 мм, расположение которых относительно своей тройки штифтов предварительно измерено с точностью лучше 10 мкм. При нацеливании определяются координаты центров этих отверстий в системе отсчета пучка (см. раздел 2), и затем по известному расположению пластины относительно реперных отверстий вычисляются значения токов отклоняющей системы, приводящие пучок в требуемые точки на пластине. После вычислений (они занимают несколько секунд — в зависимости от требуемого количества отверстий) происходит прошивка керамики импульсами нужной длительности. Например, для прошивки отверстия диаметром 0.15 мм в керамике 22ХС толщиной 0.5 мм требуется 5 импульсов тока 5 мА длительностью 0.8 мс каждый (раздел 8).

1.3. Вакуумная система

В процессе работы необходимо сохранять высокий вакуум в пушке при большом выносе вещества в технологической камере. Поэтому высоковакуумная откачка пушечной и технологической частей осуществляется отдельно двумя магниторазрядными насосами НОРД-100. Для улучшения вакуумной развязки канал в ано-

де пушки ограничен диафрагмой диаметром 3 мм. При смене изделий пушечная часть отсекается вентилем с ручным приводом, расположенным перед линзой, а насос камеры НОРД-100 — соответственно шибером ДУ-100. Предварительное разрежение создается форвакуумным насосом 2НВР-5ДМ. Поскольку смена катода производится достаточно редко и основные затраты времени связаны с активировкой катода, специального канала для форвакуумной откачки пушки не предусмотрено — откачка осуществляется через электронно-оптический тракт. Рабочий вакуум в пушке $0.5 \div 2 \cdot 10^{-5}$ Па, в технологической камере — $0.1 \div 2 \cdot 10^{-3}$ Па. Вакуумные вентили пневмо-электрические. Время откачки до рабочего вакуума 15 минут.

Использование магнитоэлектрических насосов связано, в первую очередь, с необходимостью безмасляной откачки, простотой их эксплуатации, отсутствием вибрации и достаточным ресурсом работы — тысячи часов при давлении 10^{-3} Па. По-видимому, для откачки пушки разумной альтернативы магнитоэлектрическому насосу нет. В то же время при использовании его для откачки технологической камеры невысокая производительность снижает предельные параметры установки. Поэтому сейчас обсуждается возможность применения турбомолекулярного или специального диффузионного насоса с малым (10^{-7} Па) остаточным давлением.

1.4. Высоковольтный источник

Источник высокого напряжения выполнен в виде отдельного высоковольтного блока с воздушной изоляцией и работает на частоте 50 Гц по схеме однополупериодного выпрямителя. Основные элементы: трансформатор ТВО-140/50, 9 диодов СДЛ-1300, 2 накопительных конденсатора ИМ-100-0.1. Использование накопительных конденсаторов обеспечивает приемлемую (не более 50 В) подсадку напряжения в течение импульса при его длительности 1 мс и токе до 10 мА. Внутри высоковольтного блока смонтированы точный делитель с долговременной стабильностью 10^{-4} , схема управления пушкой, находящаяся под высоким потенциалом, и разделительный трансформатор, питающий эту схему. Сигналы на открывание пушки подаются по оптическому кабелю. Коммутация с колонной осуществляется высоковольтным кабелем 4КВЭЛ-220. Компоновка с кабельным вводом высокого напряжения в пушку, с одной стороны, резко облегчает радиационную защиту колонны, с другой — оставляет возможность перехода на другой тип высоко-

вольтного источника, например, с масляной изоляцией. Схема с активной стабилизацией по первичной цепи высоковольтного трансформатора обеспечивает долговременную стабильность высокого напряжения лучше $2 \cdot 10^{-4}$. Собственные времена системы стабилизации — около секунды. Поэтому при обработке после включения импульсов тока заданной частоты и длительности в течение секунды производится сброс пучка мимо мишени, и лишь затем, когда уровень высокого напряжения устанавливается, начинается собственно обработка изделия.

Выполнение высоковольтного источника в виде блока с воздушной изоляцией, элементы которого — небольшое количество готовых промышленных изделий, — это наиболее естественное решение для первых экземпляров установки: дешевое, надежное, простое в обслуживании. Другие рассмотренные варианты оказались значительно сложнее. Кроме вопросов о стоимости, надежности самого источника, одна из проблем — доступ к пока наименее надежному узлу: схеме управления пушкой. Существенно также решение вопроса с подсадкой напряжения во время импульса. Так, в рассматривавшемся варианте с элегазовой изоляцией затруднено использование промышленных маслonaполненных накопительных емкостей, и предполагалось стабилизировать уровень напряжения во время импульса с помощью специальной лампы в высоковольтной цепи источника. Однако, реализовать такую схему с временами стабилизации порядка десятка микросекунд не удалось.

Недостаток воздушного варианта — значительные размеры: источник занимает около половины всей площади установки. По-видимому, наиболее реальный шаг в сторону уменьшения размера — это использование высоковольтных источников с масляной изоляцией, разработанных в НПО «Электрон» (г. Сумы) для питания электронных микроскопов. Дополняя такой источник отдельным воздушным объемом, содержащим накопительные емкости и схему управления, можно получить вариант, занимающий площадь вдвое меньшую нынешней. С повышением надежности схемы управления можно осуществить следующий шаг — погрузить в масло все элементы.

1.5. Система управления

Управление установкой частично автоматизировано. Вручную осуществляется управление вакуумной системой, выставление высокого напряжения и накала. Включение тока, регулировка час-

тоты и длительности импульсов, изменение токов линзы, стигматора, отклоняющей и выправляющей систем, измерение тока пучка происходит через ЭВМ. Попытки автоматизировать управление вакуумной системой показали, что необходимость учета большого количества различных состояний приводит к резкому увеличению объема программы и, соответственно, снижению ее работоспособности. В то же время не возникает нового качества, так как оператор все равно необходим. Кроме того, не удалось обеспечить надежную работу шибера пушки в автоматизированной модификации, и он используется с ручным приводом.

Управляющая ЭВМ — машина семейства Электроника-60. В первой установке это комплект МERA-60 (Электроника-60, КАМАК-крейт, дисковод с флоппи-дисками), дополненный электронным диском разработки ИЯФ, в двух следующих — МERA-660. В отдельной стойке смонтированы усилители мощности для питания элементов ЭОС и другие электронные блоки, пускатели и кнопки управления, вакуумметры, осциллограф.

Применение ЭВМ для управления пучком в установке принципиально. Оно позволяет быстро перемещать пучок в наперед заданные точки, точно позиционировать его по изделию, управлять процессом обработки, реализовать удобную процедуру ввода данных. Использование КАМАК-крейта позволило обойтись минимальным количеством новых разработок электронной аппаратуры, обеспечило простоту наладки и ремонта, широкие возможности изменения состава электроники. Все это важно при создании и запуске установки. При переходе к серийному выпуску, вероятно, разумнее разрабатывать и использовать более специализированную электронику: без избыточных возможностей, но более дешевую.

Благодаря автоматизации установки появляются дополнительные возможности по использованию специальных методик для изучения свойств ЭОС. Этим вопросам посвящен следующий раздел.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

Для настройки установки, юстировки ее ЭОС, оптимизации режимов работы необходимы достаточно точные измерения параметров пучка: поперечных размеров, координат центра, энергии электронов и т. д. Как отмечалось, токи обмоток всех элементов ЭОС задаются от ЭВМ; туда же поступают результаты измерения с помощью АЦП тока пучка, проходящего на коллектор (цилиндр

Фарадея). Возможность машинной обработки зависимостей тока коллектора от токов различных обмоток позволила разработать и использовать в ходе исследования ЭОС несколько методик указанных измерений.

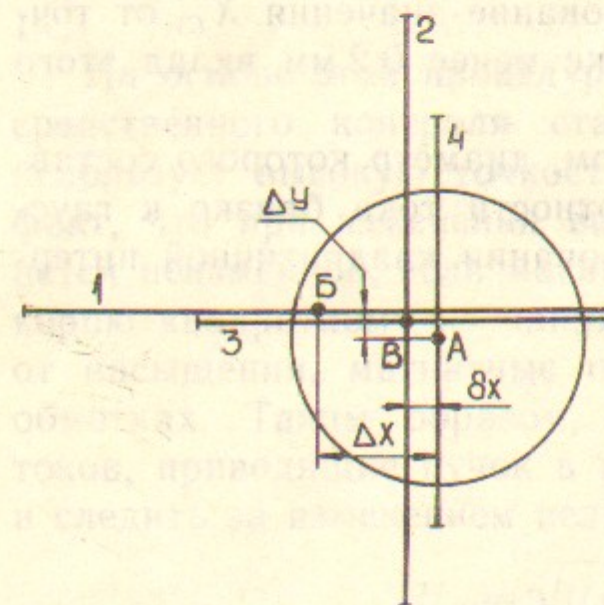


Рис. 2.1. Схема нахождения центра отверстия:

точка *a* — центр отверстия; *b* — первоначально предполагаемое положение центра; *в* — положение, найденное при первых сканированиях. Цифры у отрезков обозначают последовательность сканирований.

Одна из них — нахождение точных значений токов в отклоняющей системе, приводящих пучок в центр отверстия. Для этого использовалось сканирование пучком отверстий, имевших, как правило, диаметр 1 мм и изготовленных в танталовой или графитовой шайбе. Чтобы уменьшить повреждение краев отверстий, сканирование проводилось короткими (длительностью 20 мкс) импульсами. Предварительно координата центра отверстия была известна с точностью 0.5 мм, так что пучок, выставленный в предполагаемый центр, по крайней мере, частично проходит в отверстие. Процедура состоит из ряда последовательных сканирований, при которых пучок пересекает обязательно оба края отверстия (рис. 2.1). Поэтому длина первых сканирований по обеим координатам составляет ± 1 мм относительно предполагаемого центра. Уточненная координата вычисляется с помощью формулы Симпсона:

$$X_{C1} = \frac{X_0 I_0 + 4X_1 I_1 + 2X_2 I_2 + \dots + 4X_{N-1} I_{N-1} + X_N I_N}{I_0 + 4I_1 + 2I_2 + \dots + 4I_{N-1} + I_N}, \quad (2.1)$$

где I_i — ток, проходящий в отверстие при координате пучка X_i . Можно оценить, что для точечного пучка точность определения X_{C1} примерно равна половине шага (0.1 мм при $N=10$). Если требуется заметно лучшая точность, необходимо учитывать и другие факторы, в частности, величину начальной ошибки (расстояние

между предполагаемым и истинным положениями центра). Для измерения такой зависимости предварительно многократным подробным сканированием находилось точное положение центра. Затем задавалось смещение «предполагаемого центра» по одной из координат (ΔX либо ΔY на рис. 2.1) и регистрировалось отклонение δX полученного за одно сканирование значения X_{C1} от точного (рис. 2.2). При начальной ошибке менее 0.2 мм вклад этого фактора не превышает 10 мкм.

Эти измерения проводились с пучком, диаметр которого составлял 0.1—0.2 мм, а распределение плотности тока близко к гауссовскому. Как оказалось, при использовании квадратичной интер-

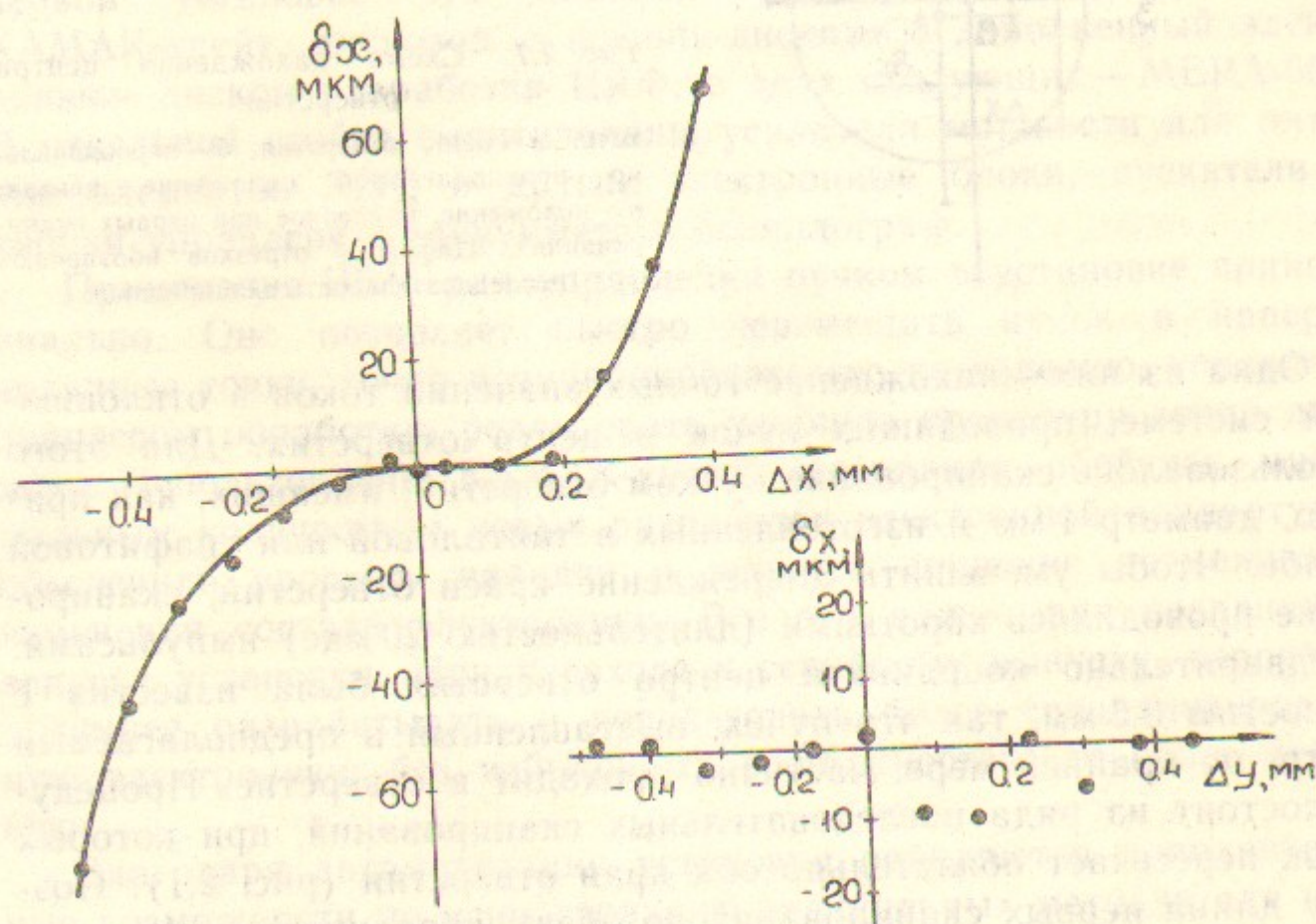


Рис. 2.2. Зависимость точности нахождения центра отверстия от величины начальной ошибки (измерения). Обозначения те же, что и на рис. 2.1.

δx — величина ошибки в определении X -координаты при задании смещения предполагаемого центра на ΔX (а) и ΔY (б) от действительного положения центра. Длина сканирования 1.6 мм, диаметр пучка 0.15 мм, $N=15$.

поляции (2.1), точность заметно возрастала, когда величина шага становилась меньше диаметра пучка. Так, на рис. 2.2 видно, что разброс точек вокруг гладкой кривой меньше полушага и составляет примерно 5 мкм. Эта точность определяется стабильностью высокого напряжения и токов усилителей отклоняющей системы,

шагом ЦАПа, точностью изготовления краев отверстия и не улучшается с увеличением числа шагов. Поэтому стандартная процедура нахождения центра выглядит следующим образом: сканирование на ± 1 мм с $N=10$ по обеим координатам, затем повторное на ± 0.7 мм с $N=15$. Точность не хуже 10 мкм, полное время около 1 с.

На основе этой процедуры была разработана программа непосредственного контроля стабильности энергии электронов. Она использует высокую точность и стабильность усилителей токов и факт, что при изменении высокого напряжения траектория останется неизменной, если магнитные поля изменить пропорционально корню квадратному из напряжения. Поскольку сердечники далеки от насыщения, магнитные поля изменяются линейно с токами в обмотках. Таким образом, достаточно измерять величины этих токов, приводящие пучок в центры двух отверстий (I_{X1}, I_{Y1}), (I_{X2}, I_{Y2}) и следить за изменением величины

$$U_{eff} = \sqrt{(I_{X1} - I_{X2})^2 + (I_{Y1} - I_{Y2})^2}, \quad (2.2)$$

которая пропорциональна напряжению. Использование двух отверстий позволяет исключить дрейф нулей усилителей. Одно измерение занимает около 2 с, точность измерения отклонений напряжения $5 \cdot 10^{-5}$ в течение десятков минут и $2 \cdot 10^{-4}$ — долговременная.

Заметная часть экспериментов была связана с измерением размеров сфокусированного пучка. Эти измерения проводились с помощью сканирования краев тех же отверстий. Предварительно определялись координаты центра отверстия, затем пучок проходил в радиальном направлении по одной из координат от положения нулевого токопрохождения в отверстие до полного (рис. 2.3). Далее перемещениями пучка с шагом 5 мкм уточнялись координаты, при которых проходит 5 и 95% полного тока. Разница между этими координатами принимается за размер пучка по данному направлению. Выяснилось, что для круглого пучка с диаметром 40—400 мкм такой способ дает верное представление о диаметре, внутри которого содержится около 80% тока. Точность определения размера составляет 10—20 мкм.

Для оценки искажений формы пучка такая процедура повторялась по 4 направлениям через 45° (рис. 2.4) и по полученным значениям очерчивалась граница пучка в виде восьмиугольника. Для эллипсоидальных искажений такое восстановление формы оказывается достаточно точным.

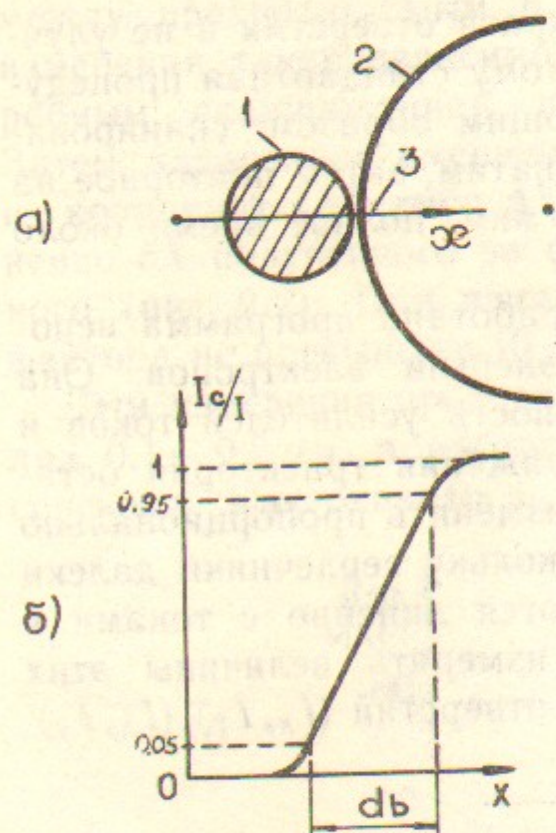


Рис. 2.3. Схема измерения размера пучка:

а: 1 — пучок, 2 — граница отверстия, 3 — траектория движения центра пучка; б — соответствующая зависимость тока I_c , проходящего через отверстие в коллектор, от координаты x центра пучка.

В экспериментах, связанных с изучением оптики пушки, исследовались распределения плотности тока по сечению несфокусированного пучка. Для снятия таких распределений пучок, диаметр которого составлял, как правило, 10—20 мм, перемещался по мишени с отверстием 0.2—1 мм, и регистрировалась зависимость тока, проходящего в отверстие, от координаты пучка. Как показывают оценки, при выключенной линзе угол расходимости пучка за пушкой слабо меняется по его длине. Поэтому, измеряя размер пучка на мишени и считая его линейно расходящимся от катода, можно достаточно точно восстановить диаметр пучка в различных элементах ЭОС.

Все измерения проводились в импульсном режиме при длительности 10—150 мкс.

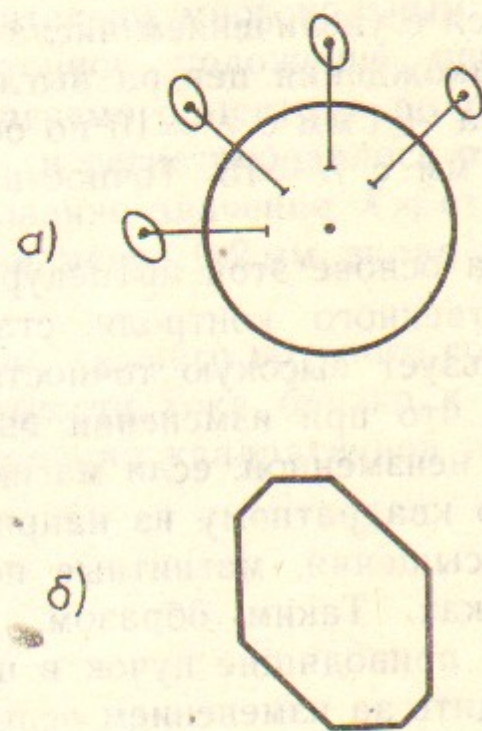


Рис. 2.4. Схема измерения формы пучка:

а — траектории движения пучка по краям отверстия, б — восстановление формы пучка по величинам размеров пучка, измеренным по соответствующим направлениям.

3. ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА

Параметры, указанные в табл. 1, обуславливают жесткие требования ко всей ЭОС и, в частности, к электронной пушке: эмиттанс формируемого ею пучка должен быть близок к минимально возможному при заданном токе и максимально допустимой плотности тока эмиссии.

Дать оценку допустимого эмиттанса пучка можно из требований к минимальному размеру пятна на мишени r_{\min} . В ЭОС (рис. 1.2) пучок сходится от линзы до тех пор, пока угол сходимости не сравняется с угловым разбросом внутри пучка. Отсюда, считая траектории прямолинейными, получаем эмиттанс (в соответствии с формулой Ленгмюра, например, [1, с.41])

$$\epsilon \leq \pi r_{\min} r_l / L_l, \quad (3.1)$$

где r_l — радиус пучка в линзе, L_l — расстояние между линзой и мишенью. Как показали эксперименты, для развертки пучка по площади 60×48 мм требуется $L_l = 400$ мм, радиус $r_l \leq 3$ мм ограничен электронно-оптическими aberrациями. Тогда

$$\epsilon \leq 0.3 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}. \quad (3.2)$$

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

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

$$\epsilon_1 = \pi r_k \sqrt{\frac{T}{eU}}, \quad (3.3)$$

где T — температура катода. Это означает, что для условия (3.2) и $T = 0.1$ эВ 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_k требует увеличения плотности тока с катода J_k выше 10 А/см^2 , а выпускаемые промышленностью катодные узлы не обеспечивают надежную работу при такой плотности тока.

Ограничение плотности тока эмиссии означает, что формирование электронного пучка с требуемыми параметрами становится реальным только при условии, что ϵ_2 — эмиттанс, связанный с электронно-оптическими aberrациями,

$$\epsilon_2 < \epsilon_1.$$

(3.4)

Оценки плотности 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, можно сформулировать требования к пушке: ее оптика должна обеспечивать малые (по сравнению с 0.3λ мм·мрад) искажения эмиттанса и равномерную плотность тока эмиссии до 10 А/см^2 при напряжении 100 кВ, а эмиттер — надежно работать при такой плотности тока и иметь радиус около 0.2 мм.

3.1. Эксперименты с различными типами катодов

При выборе эмиттера пушки рассматривалось несколько типов катодных узлов.

В известных установках размерной обработки используются [1], как правило, петлевые вольфрамовые катоды (рис. 3.1,а). Это связано в первую очередь с их низкой чувствительностью к вакуумным условиям. В то же время при плотностях тока эмиссии около 10 А/см^2 они обладают малым (порядка десяти часов) временем жизни. Необходимость фактически ежедневной смены катода резко усложняет эксплуатацию установки. Кроме того, вольфрамовые катоды обладают высокой рабочей температурой и, соответственно, большими тепловыми скоростями эмитируемых электронов.

В настоящее время существуют другие типы катодных узлов, способные конкурировать с вольфрамовыми. Нами были проведены испытания нескольких типов таких узлов.

Прямокальный иридиево-цериевый катод (рис. 3.1,б) выполнен в виде кубика с ребром 0.2 мм, выступающего над большим кубом с ребром 0.8 мм. Токоотбор происходит с торцевой поверхности кубика, граница эмитирующей поверхности определяется нулевой эквипотенциалью. В этом режиме удавалось снимать ток до 5 мА с фокусировкой его в нужный размер в течение десятков часов. Катодный узел удовлетворяет всем требованиям, но, к сожалению, бесперспективен для промышленного выпуска из-за высокой стоимости.

В нашем распоряжении были также образцы острейшего борид-лантанового катода, разрабатываемого для промышленного

применения. Катод представляет собой заостренный стержень длиной 20 мм и сечением в прямоугольной части 1×1 мм (рис. 3.1,в). Стержень распилен в продольном направлении почти до острия, и на полученную таким образом петлю подается ток накала. Эмитирующая поверхность вблизи острия выделялась нулевой эквипо-

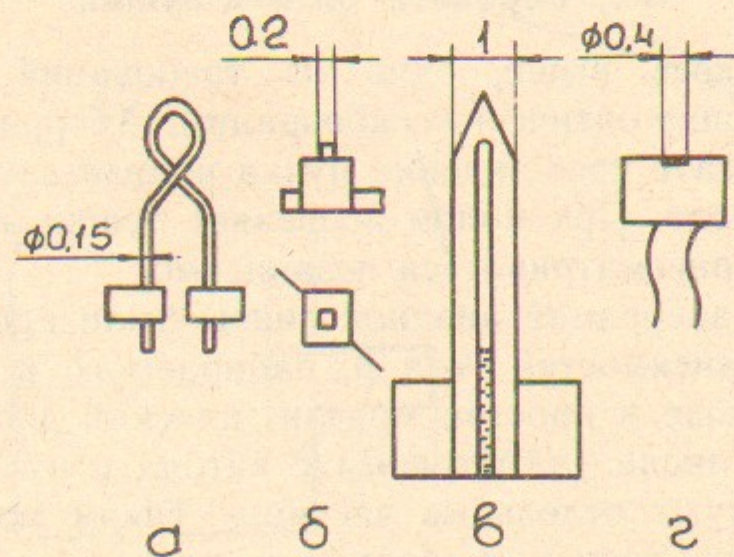


Рис. 3.1. Схемы катодов:

а — петлевой вольфрамовый; б — иридий-цериевый; в — острейший борид-лантановый; г — металлопористый.

тенциалью. Испытания показали, что, используя этот катод, можно сформировать пучок с требуемыми параметрами, однако, катодный узел на его основе не обладает пока достаточной надежностью.

Таким образом, все три высокотемпературных катодных узла, имевшихся в нашем распоряжении, обладают серьезными недостатками, заметно снижающими эксплуатационные характеристики установки. Поэтому параллельно проводилась работа по формированию пучка в пушке с металлопористым катодом. Основные преимущества металлопористого катода — долговечность и дешевизна. Однако, использование металлопористого катода в технологической установке связано с очевидными трудностями из-за высоких требований к вакуумным условиям, так как катод разработан для эксплуатации в отпаянных системах. Создать аналогичные условия в технологической установке достаточно сложно, поскольку при обработке материалов пучком происходит активное газоотделение. Другая особенность технологической установки — необходимость напуска атмосферы в камеру при загрузке деталей. Поэтому потребовалось проведение значительной работы по определению вакуумных условий, обеспечивающих надежную эмиссию с плот-

ностью тока порядка 10 А/см^2 и разработке достаточно простой системы, обеспечивающей эти условия (см. раздел 3.4). Результаты ее оказались обнадеживающими, и металлопористый эмиттер выбран в качестве основного варианта.

3.2. Варианты оптики пушки

Как отмечалось выше, одно из требований к пушке — это малость электронно-оптических aberrаций. Aberrации могут возникать в результате прохождения пучка вблизи электродов: в районе катода и анода. При малом первеансе пушки эти области разделены и могут рассматриваться независимо.

Для оценки aberrаций анодной линзы были проведены численные расчеты зависимостей угла β , набираемого в анодной линзе, от радиуса в аноде в простой модели: плоский диод с зазором L_d и отверстием в аноде диаметра d_a , с катода с нулевой начальной скоростью стартуют отдельные частицы. Такая модель позволяет правильно оценить величину aberrаций, поскольку первеанс пушки мал и угол расходимости пучка много меньше единицы. Результаты расчетов представлены на рис. 3.2 в виде зависимостей отклонения $\delta\beta$ угла β от предсказываемого по линейной формуле (например, [3]):

$$\delta\beta = \beta - (r_a/4L_d)/(1 - d_a/2\pi L_d), \quad (3.5)$$

где r_a — радиус частицы вблизи анода. По приведенным графикам можно оценить, что при радиусе пучка в аноде 1 мм увеличение эмиттанса даже для $d_a = 3 \text{ мм}$ составит около $0.05 \text{ л.мм} \cdot \text{мрад}$, что пренебрежимо мало. Видно также, однако, что пучок в этом случае должен быть съюстирован с точностью нескольких десятых миллиметра. Поэтому диаметр анодного отверстия сделан равным 5 мм, а вакуумная диафрагма заглублена (рис. 3.1), так что практически aberrации анодной линзы малы, если пучок полностью проходит через вакуумную диафрагму.

Оценки показывают, что сильнее эффективный эмиттанс может увеличиваться в прикатодной области. Были рассмотрены несколько вариантов прикатодной оптики.

Как известно, в принципе возможно формирование безабберационного однородного пучка (пушка Пирса [5]). На рис. 3.3 приведена картина эквипотенциалей — решение внешней задачи для однородного цилиндрического пучка. Заменяя нулевую эквипотенциаль электродом, получают традиционную пушку Пирса. Однако

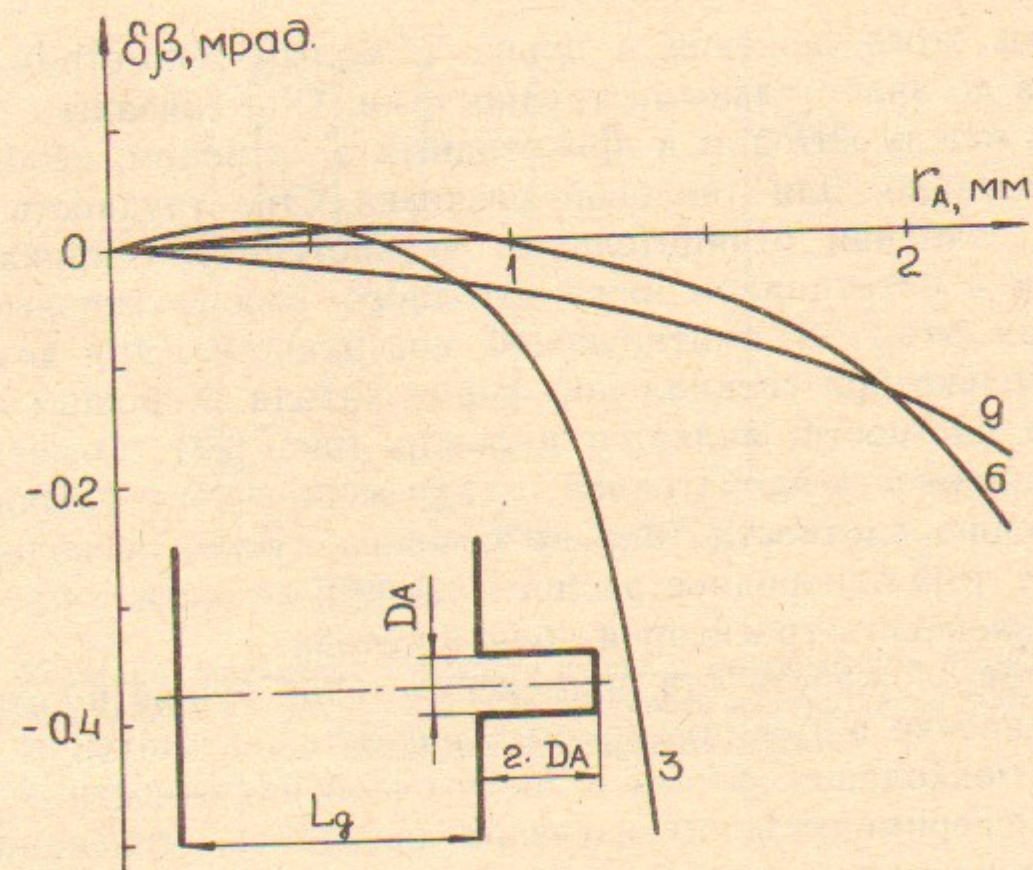


Рис. 3.2. Численный расчет aberrаций анодной линзы. Цифры у кривых обозначают диаметр отверстия в аноде d_a .

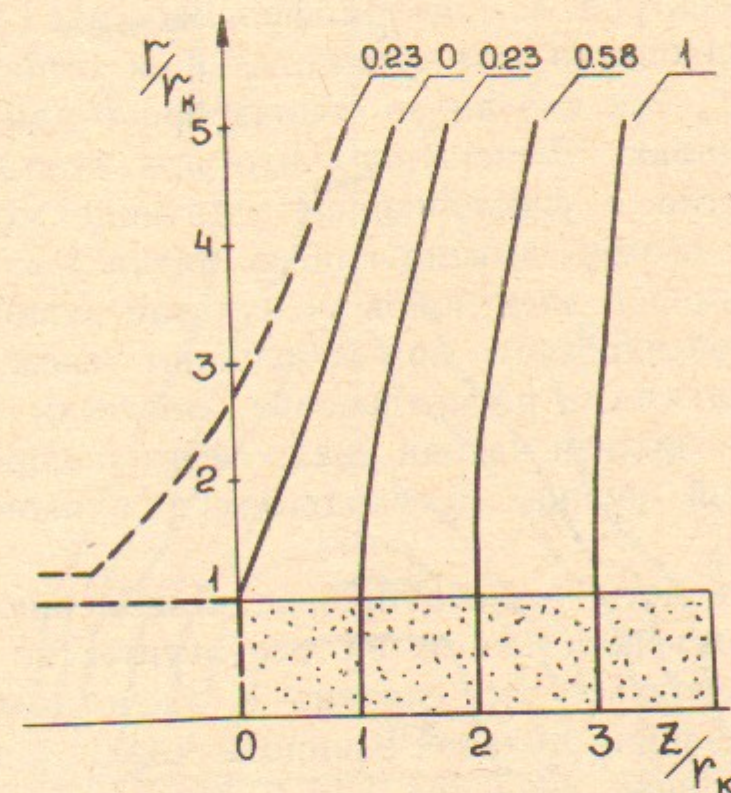


Рис. 3.3. Семейство эквипотенциальных поверхностей в пушке, формирующей параллельный аксиально-симметричный поток [4].

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

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 эмитирующей поверхности. Это возможно, конечно, только при специальной форме катода. Хорошим приближением, в частности, является цилиндр (рис. 3.3). Отметим, что безабберационность прикатодной оптики можно контролировать по распределению плотности тока по сечению пучка, поскольку, как показано в [6], 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, [7]): плоский катод с большой эмитирующей поверхностью, перед катодной плоскостью расположен управляющий электрод в виде диафрагмы (рис. 3.4). 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 эмитирующего пятна был много меньше характерных размеров электродов, и нулевая эквипотенциаль подходила к катодной плоскости под небольшим углом. При этом угол сходимости пучка мал, а распределение плотности тока однородно. Это означает, что вблизи катода реализуется распределение потенциалов идеальной пушки со сходящимся пучком и абберации 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. 3.4).

Экспериментальное изучение такой пушки было проведено с промышленно выпускаемым металлопористым катодом КПУ-45. Диаметр его эмитирующей поверхности составляет 1.5 мм, и для получения малого r_k пятно токоотбора необходимо формировать нулевой эквипотенциалью (см. рис. 3.4). Характерные распределе-

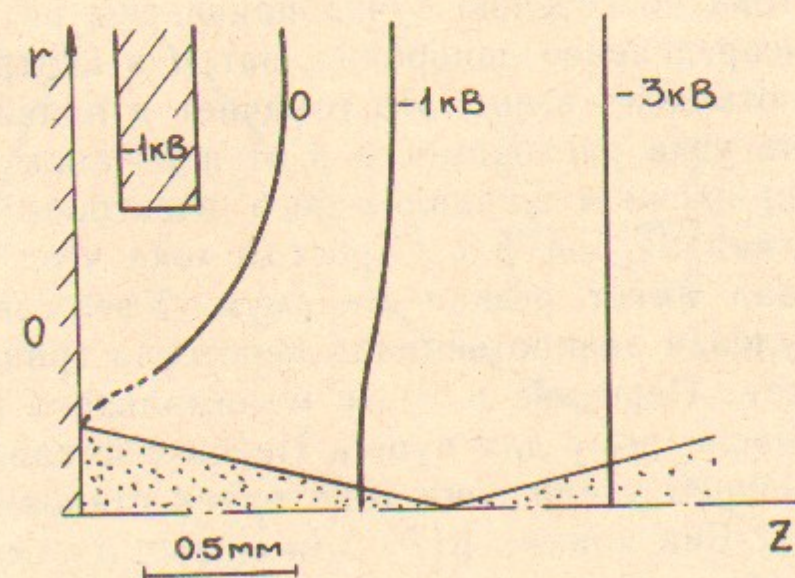


Рис. 3.4. Геометрия прикатодной области пушки с эмитирующим пятном, ограниченным нулевой эквипотенциалью. Анодная плоскость находится на расстоянии 34 мм от катода под потенциалом 100 кВ.

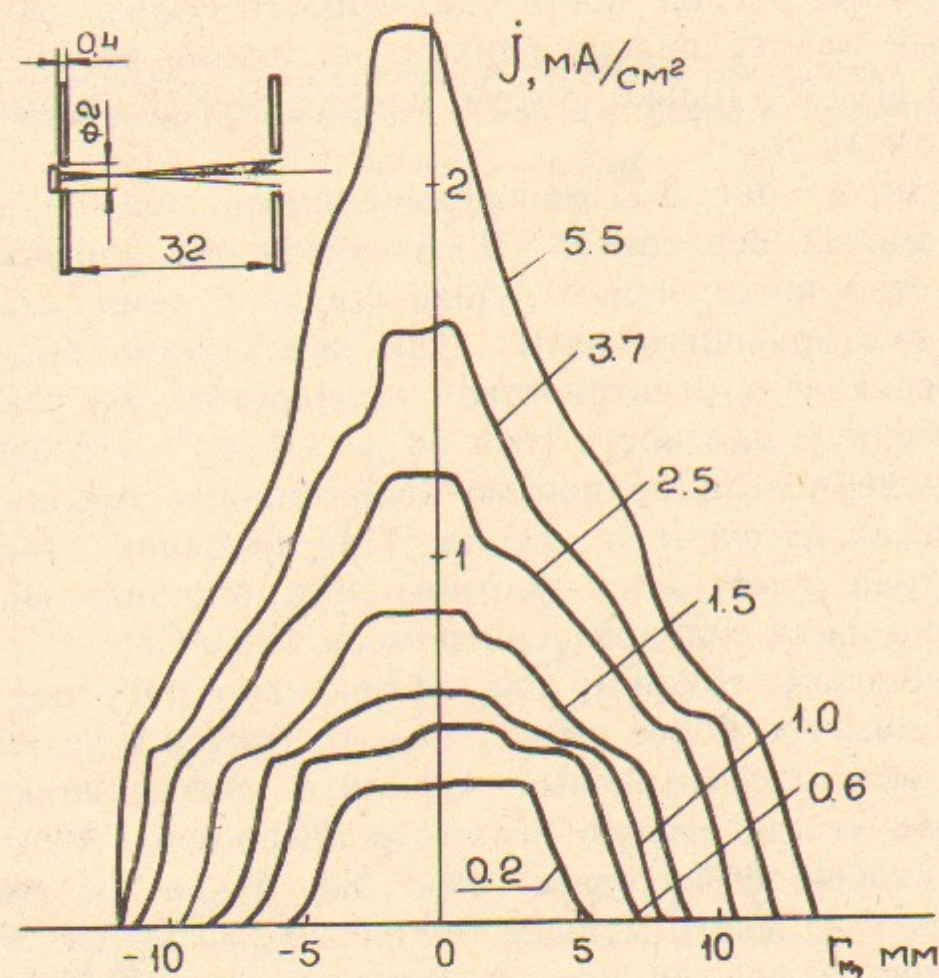


Рис. 3.5. Распределение плотности тока по сечению пучка на расстоянии 380 мм от катода. Эмитирующее пятно ограничено нулевой эквипотенциалью. Цифры на кривых — ток пучка в мА.

ния плотности тока по сечению пучка приведены на рис. 3.5. При малых токах распределение однородно, 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. 3.6. С ростом тока угол вначале растет, затем кривая имеет резкий минимум. Уменьшение размера означает, что нулевая эквипотенциаль пересекла границу эмитирующей 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 эмитирующего пятна слабо зависит от геометрических размеров прикатодной диафрагмы, а неоднородность распределения уменьшается с увеличением диаметра отверстия (рис. 3.7).

Эмиттанс пучка можно оценить по (3.1), измеряя минимальный размер пучка на мишени. К сожалению, в интересующей области параметров углы расходимости оказываются больше 20 мрад, и на минимальный размер сильно влияют aberrации магнитной линзы. Поэтому (3.1) дает только грубую оценку сверху на эмиттанс пучка: $\varepsilon < 1 \text{ п.мм} \cdot \text{мрад}$.

Как видно из рис. 3.7, однородное распределение реализуется лишь при малых первеансах. В этом режиме плотность тока с катода заметно ниже, чем в пушке Пирса с теми же зазором и площадью эмитирующего пятна. Так как минимальная величина зазора определяется электрической прочностью, 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 эмитирующая площадь используется неэффективно из-за сильной неравномерности $J(R)$.

Таким образом, 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 пушки. Действительно, считая возмущение сосредоточенным вблизи катода и большим, можно оценить поперечную скорость v_r для геометрии с плоскими электродами как

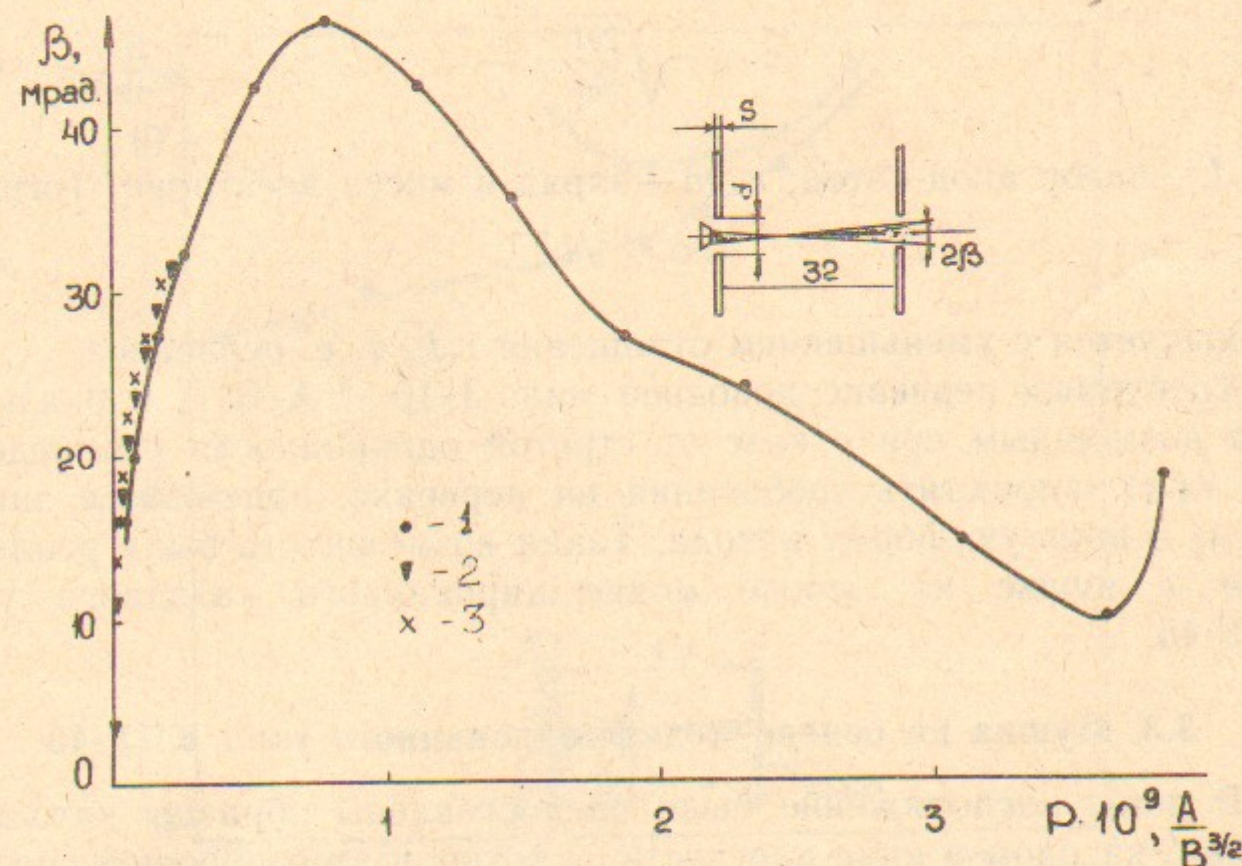


Рис. 3.6. Зависимость угла расходимости от первеанса для пушек с эмитирующим пятном, ограниченным нулевой эквипотенциалью. Геометрические параметры:

- 1: $D=7 \text{ мм}, S=1.2 \text{ мм}$;
- 2: $D=4 \text{ мм}, S=2.2 \text{ мм}$;
- 3: $D=2 \text{ мм}, S=0.4 \text{ мм}$.

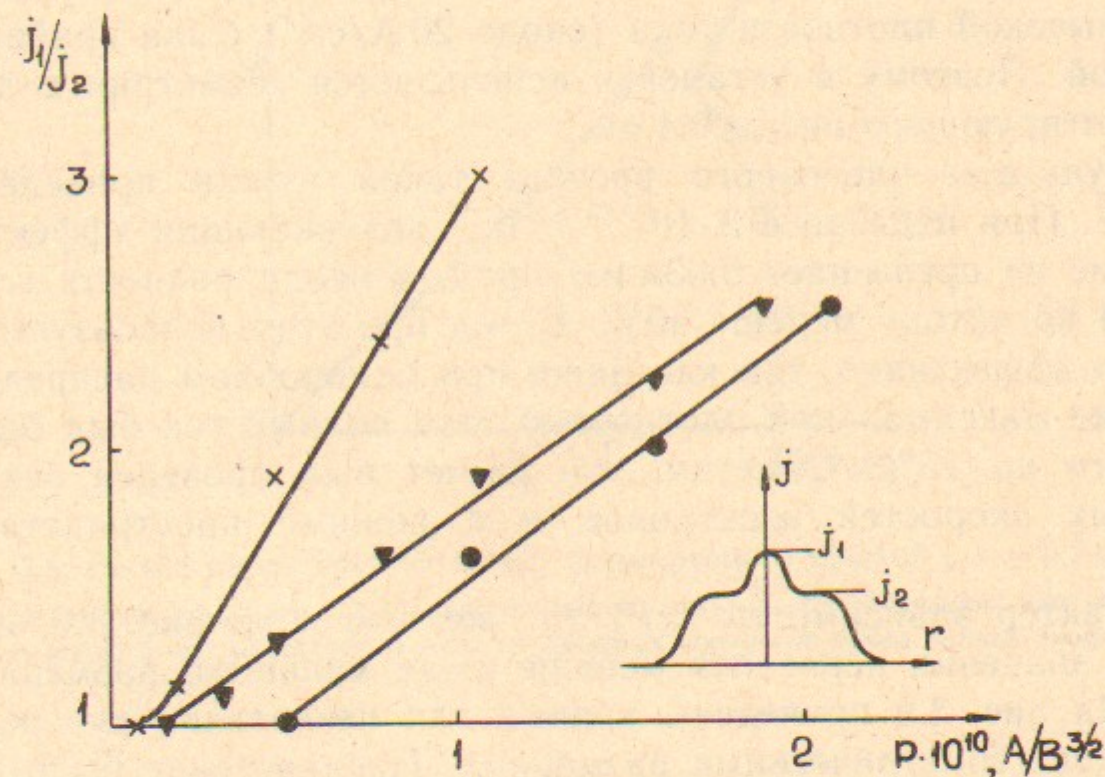


Рис. 3.7. Зависимость неоднородности распределения плотности тока по сечению пучка от первеанса пушки. Обозначения те же, что и на рис. 3.6.

$$v_r \leq \sqrt{\frac{2eU}{m} \cdot \frac{r_k}{L}}, \quad (3.6)$$

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

$$\varepsilon_2 < r_k^{3/2} / L^{1/2}, \quad (3.7)$$

уменьшается с уменьшением отношения $r_k L$, т. е. первеанса.

Требуемый первеанс довольно мал: $3 \cdot 10^{-10} \text{ А/В}^{3/2}$, и оказывается возможным при отказе от строгой однородности распределения $J(R)$ совместить требования на первеанс, приемлемое значение ε_2 и простую форму катода. Такая возможность была реализована в пушке на основе модифицированного катодного узла КПУ-45.

3.3. Пушка на основе модифицированного узла КПУ-45

В наше распоряжение были предоставлены образцы катодных узлов с катодом в виде плоскости, у которой эмитирующей способностью обладает только центральная часть малого диаметра (рис. 3.1,з). Пушка на его основе имела качественно ту же конфигурацию, что и в предыдущем случае.

В первом варианте пушки использовался катод с диаметром 0.25 мм. Такой катод обеспечивал ток до 6 мА, но эмиссия при столь высокой плотности тока (около 20 А/см^2) была крайне неустойчивой. Поэтому в установке используется геометрия с диаметром эмитирующего пятна 0.4 мм.

Результаты численного расчета такой пушки приведены на рис. 3.8. При первеансе $3 \cdot 10^{-10} \text{ А/В}^{3/2}$ возникающий эффективный эмиттанс не превышает $0.03 \text{ л мм} \cdot \text{мрад}$, а неоднородность плотности тока по катоду меньше 40%. Катод при этом используется достаточно эффективно, так как даже при однородном распределении с той же максимальной плотностью тока полный ток был бы больше всего на 15%. Отметим, что расчет был проведен без учета тепловых скоростей электронов и в режиме пространственного заряда.

Характер зависимости $\beta(P)$ тот же, что и на рис. 3.6, но численные значения первеанса меньше из-за меньшего размера эмиттера. На рис. 3.9 приведены кривые для нескольких пушек, отличающихся геометрическими размерами. Предпочтение было отдано варианту пушки №4, как обладающему достаточным первеансом, углом расходимости, согласованным с остальной ЭОС, а управля-

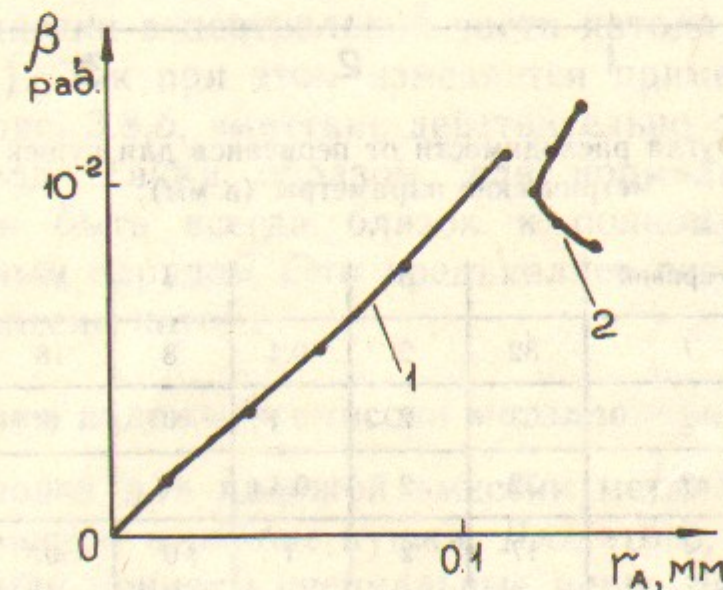
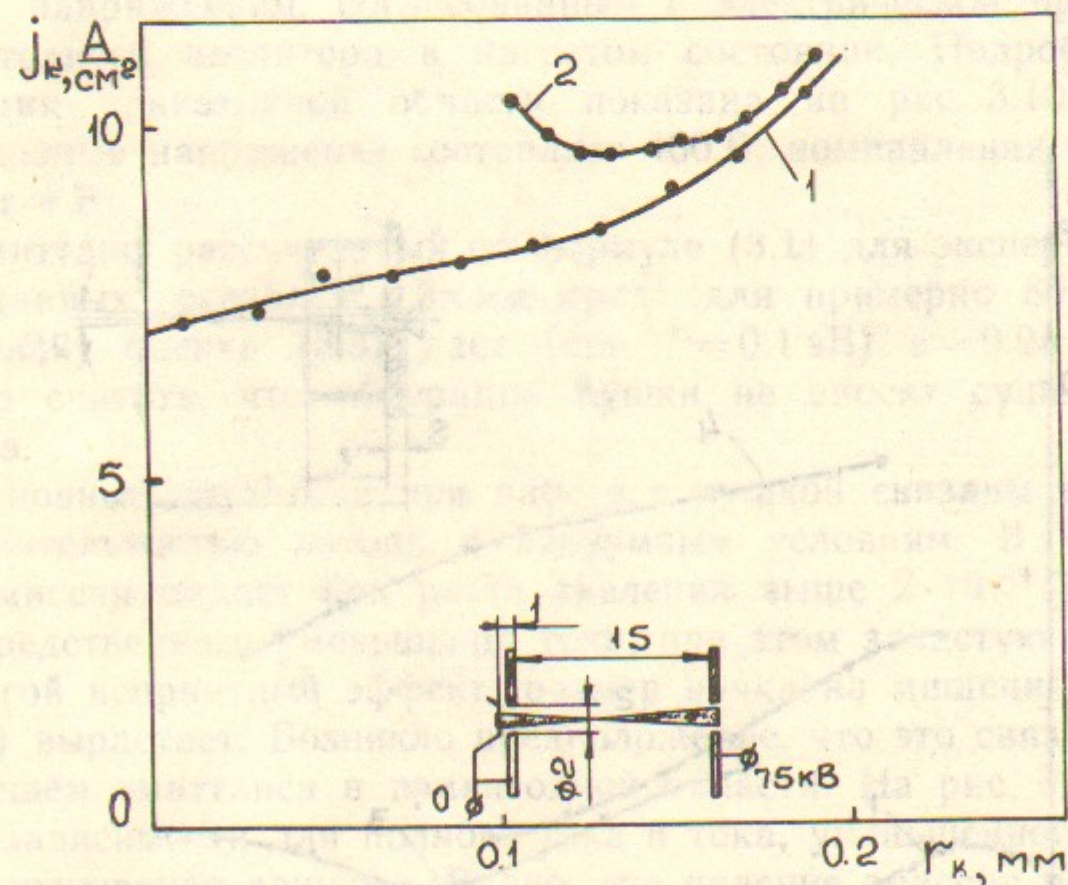


Рис. 3.8. Расчет характеристик пучка, формируемого пушкой с $r_k = 0.2$ мм: кривая 1 — эмитирует весь катод, 2 — только внешнюю часть; а — распределение плотности тока по сечению пучка на катоду, б — расчет фазовых портретов пучка вблизи анода.

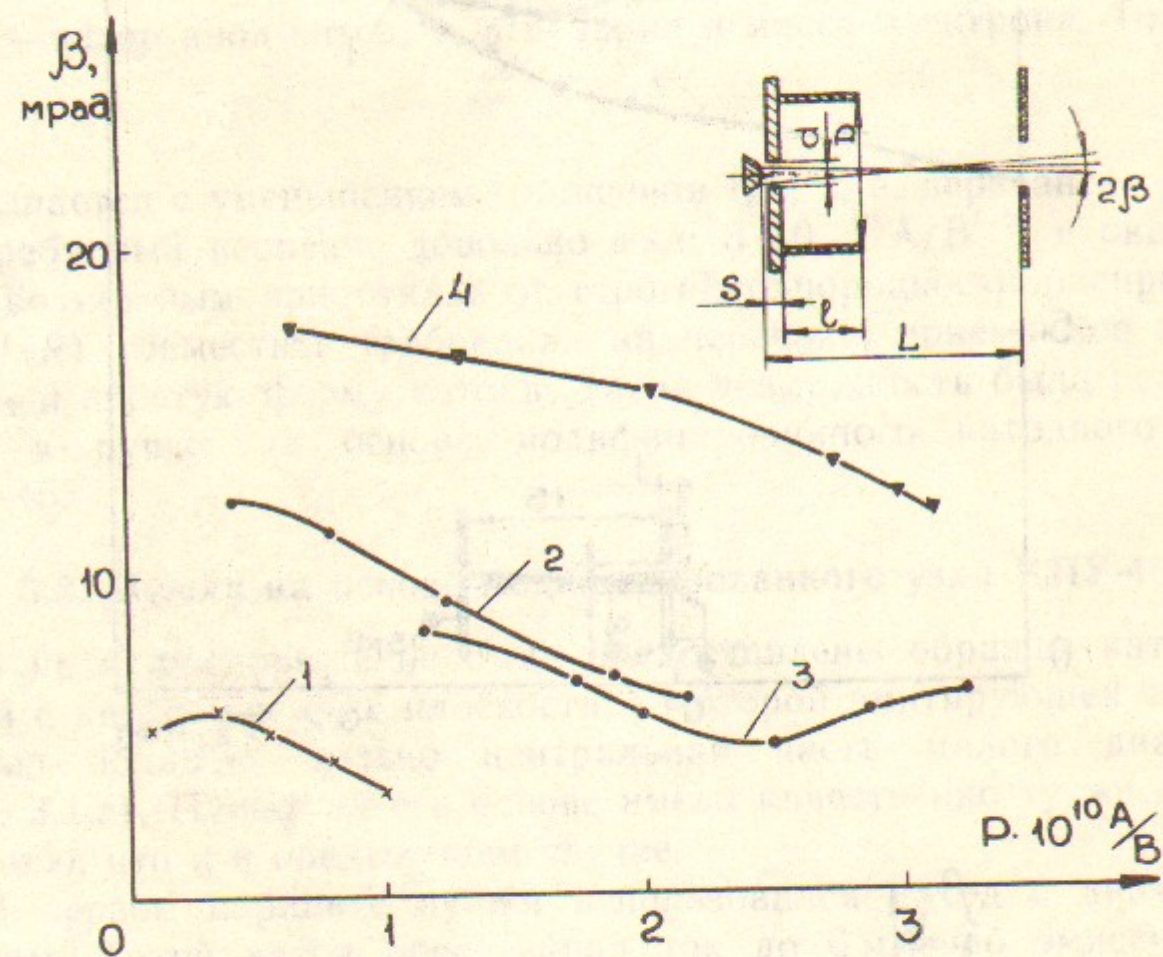


Рис. 3.9. Зависимость угла расходимости от первеанса для пушек с $r_k = 0.2$ мм. Геометрические параметры (в мм):

№ кривой	L	d	s	l	D
1	32	2	0.4	8	18
2	63	2	0.4	0	0
3	32	2	0.4	10	40
4	17	2	1	0	0

ющим напряжением, согласованным с электрической прочностью прикатодного изолятора в нагретом состоянии. Подробнее конструкция прикатодной области показана на рис. 3.10. Полное запирающее напряжение составляет 400 В, номинальная мощность накала 4 Вт.

Эмиттанс, рассчитанный по формуле (3.1) для экспериментальных данных, оказался $0.3 \mu\text{м} \cdot \text{мрад}$ (для примерно 80% тока). Поскольку оценка (3.3) дает (при $T = 0.1 \text{ эВ}$) $\epsilon = 0.2 \mu\text{м} \cdot \text{мрад}$, можно считать, что aberrации пушки не вносят существенного вклада.

Основные трудности при работе с пушкой связаны с высокой чувствительностью катода к вакуумным условиям. В частности, ток эмиссии падает при росте давления выше $2 \cdot 10^{-4}$ Па. Кроме непосредственного уменьшения тока, при этом зачастую возникает и другой неприятный эффект: размер пучка на мишени резко (до 2 раз) вырастает. Возникло предположение, что это связано с возрастанием эмиттанса в прикатодной области. На рис. 3.11 приведены зависимости для полного тока и тока, уменьшенного на 15% из-за ухудшения вакуума. Видно, что падение эмиссии происходит в первую очередь в центральной части катода. Были проведены численные расчеты, в которых такой эффект моделировался отсутствием эмиссии в центральной части катода пушки (на половине диаметра). Ток при этом изменяется примерно на 10%, но, как видно из рис. 3.8, б, эмиттанс действительно сильно вырастает: до $0.3 \mu\text{м} \cdot \text{мрад}$. Таким образом, для нормальной работы ток катода должен быть всегда близок к полному, ограниченному пространственным зарядом. Это предъявляет особые требования к надежности эмиссии катода.

3.4. Условия надежной эмиссии металлопористого катода

Первое условие для надежной эмиссии металлопористого катода — высокий вакуум в районе пушки. Для этого, как отмечалось в разделе 1.3, были приняты специальные меры: отдельная безмасляная откачка пушки и технологической камеры; шиббер, отсекающий пушку при вскрытии технологической камеры; диафрагма вблизи анода. Такие меры позволяют поддерживать при обработке перепад давлений в камере и пушке до 100 раз.

Первоначально вакуумные уплотнения камеры пушки были выполнены из резины. При этом давление в объеме пушки составляло $0.5 \div 1 \cdot 10^{-4}$ Па и не менялось при работе с пучком вплоть

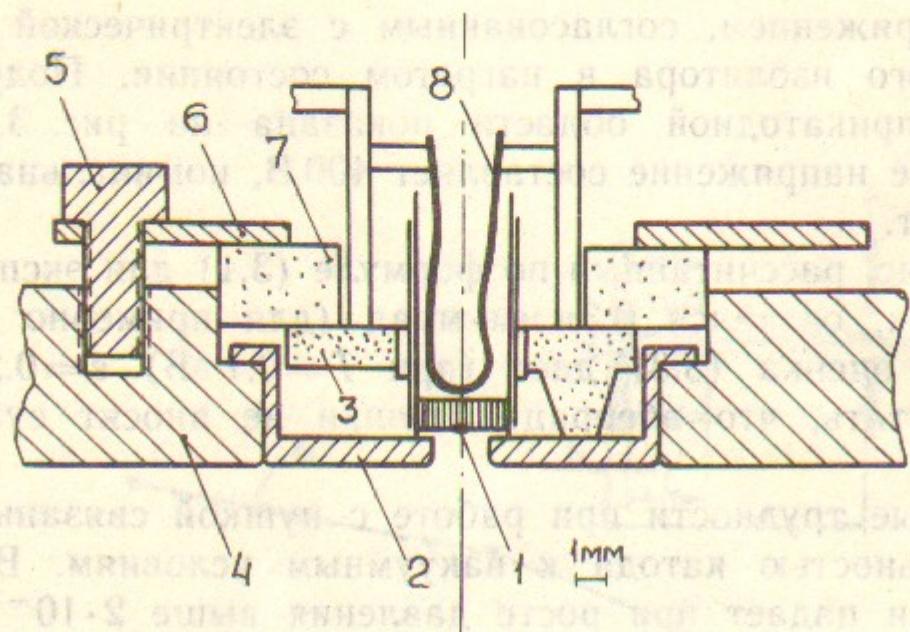


Рис. 3.10. Конструкция прикатодной области:

1—эмиттер; 2—молибденовый колпачок (управляющий электрод); 3—изолятор катодного узла; 4—диск; 5—прижимной винт; 6—прижимная шайба; 7—дополнительное изолирующее кольцо; 8—нить накала.

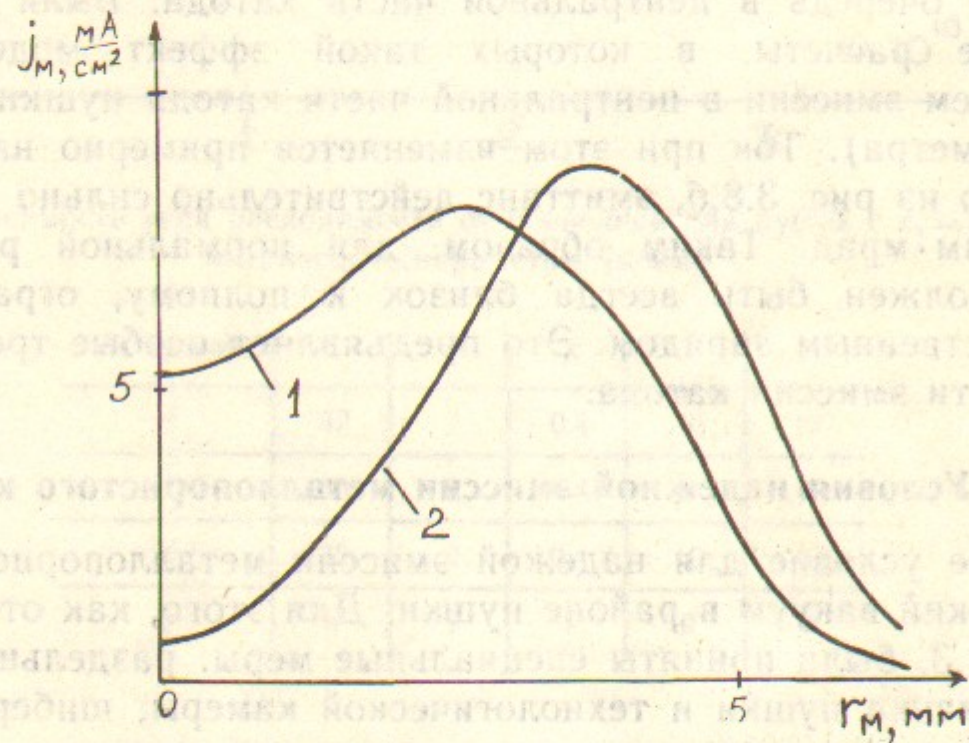


Рис. 3.11. Распределение плотности тока по сечению пучка, измеренное на расстоянии 530 мм от катода (геометрия пушки та же, что на рис. 3.8.):

1—ток 6 мА, ограничен пространственным зарядом; 2—ток 5.5 мА, ограничен эмиссией.

до увеличения давления в технологической камере до, примерно, 10^{-3} Па, катод работал при плотности тока катода 5 А/см^2 в режиме пространственного заряда. Однако, сделать эмиссию достаточно устойчивой не удалось даже при напряжении накала 8 В вместо номинальных 6.3 В. Так, требовалось около получаса для выхода катода на режим полного тока после вскрытия технологической камеры, а после выключения насосов на сутки время выхода составляло уже несколько часов.

Была обнаружена еще одна, не вполне понятная, особенность в работе катода. При его отравлении эмиссия зачастую восстанавливалась, если напуском воздуха давление увеличивалось до $2 \cdot 10^{-4}$ Па.

Неустойчивая работа катода была связана, по-видимому, с отравлением катода органическими парами резиновых уплотнений. Поэтому была проведена замена уплотнений на металлические: медные и индиевые. В камере пушки резиновое уплотнение малого диаметра оставлено только в шибере, отсекающем технологическую камеру. Для очистки камеры пушки проводилась обработка тлеющим разрядом.

После этих изменений состояние катода заметно улучшилось. Полный ток появляется сразу после откачки технологической камеры до уровня $3 \cdot 10^{-3}$ Па и открытия шибера. Рабочий вакуум в пушке $0.5 \div 2 \cdot 10^{-5}$ Па; при выключении насосов давление возрастает за сутки до 10^{-1} Па, но это не приводит к увеличению времени выхода на рабочий режим. Напряжение накала, при котором возможна устойчивая работа с плотностью тока эмиссии 5 А/см^2 , снизилось до 6.6 В, оставаясь, однако, выше номинального. В таком режиме катоды работали до трех месяцев (по восемь часов в день) без снижения эмиссии. Ухудшение свойств катода было связано, как правило, уже не с вакуумными условиями, а со вскрытиями по разным причинам камеры пушки на атмосферу. Отметим, что при 1-2 вскрытиях на атмосферу катод оставался работоспособным, но возрастало рабочее напряжение накала.

Эмиссионная способность катода значительно снижалась при попадании электронного пучка на электроды, находящиеся вблизи катода. Так, при выпадении на анодную диафрагму среднего тока в десятки микроампер ток эмиссии падал на порядок. Такое же выпадение на диафрагму в средней плоскости магнитной линзы уменьшало ток на 20—50%, хотя заметные изменения в давлении отсутствовали.

Следует признать, что до конца проблема надежной работы

катода не решена. Существует значительный разброс в свойствах от экземпляра к экземпляру. Так, при смене катода время от момента вскрытия пушки до выхода на режим обычно занимает около 8 часов, а для части катодов время выхода на полный ток растягивалось на несколько дней. Несколько катодов из примерно трех десятков использованных были заменены из-за появления утечек по изолятору при длительном прогреве, два катода не дали эмиссии вообще. Тем не менее, эти проблемы представляются разрешимыми.

4. ФОРМИРОВАНИЕ МИНИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ПУЧКА НА МИШЕНИ

Пучок, выходящий из пушки, фокусируется затем на мишень магнитной линзой. Основные параметры, влияющие на минимальный размер пучка на мишени, — его ток, энергия, эмиттанс, размер в линзе, расстояние от линзы до мишени и размеры линзы. Ток и энергия заданы для установки; эмиттанс пучка также ограничен достаточно жестко (раздел 3). Расстояние до мишени необходимо выбирать минимально возможным. Как показано в следующем разделе, абберрации отклонения ограничивают максимальный угол отклонения величиной около 0.2 рад. Поэтому для смещения пучка на мишени 40 мм требуется расстояние между центрами отклоняющей системы и выправляющего элемента около 200 мм. Эта величина, а также размеры линзы, отклоняющей катушки и выправляющего элемента (рис. 1.2) задают минимальное расстояние от мишени до линзы: $L_n = 350$ мм. Таким образом, оптимизировать необходимо размеры линзы и радиус r_n пучка в ней.

4.1. Оценки минимального размера

Отличительная черта установки — большой размер площади, обрабатываемой перемещающимся электронным пучком. Следствие этого — значительно большее, чем для установок со столом, расстояние L_n между линзой и мишенью. Это обстоятельство оказывается принципиальным для ЭОС: при таких параметрах минимальный размер пучка на мишени определяется уже не только его тепловым фазовым объемом и абберрациями ЭОС, но и пространственным зарядом. Оценим влияние каждого из этих эффектов.

Если влияние пространственного заряда и абберраций пренебрежимо мало, минимальный радиус пучка можно оценить из (3.1):

$$r_1 = \frac{\varepsilon L_n}{\pi r_n} \quad (4.1)$$

При уменьшении размера пучка и увеличении его тока все больше сказывается влияние пространственного заряда пучка. Минимальный размер в этом случае можно оценить как [4]

$$r_2 = r_n \exp \left\{ -\operatorname{tg}^2 \alpha_l \left(\sqrt{\frac{2m}{e}} \cdot P \right)^{-1} \right\}, \quad (4.2)$$

где P — первеанс пучка, α_l — угол сходимости. Параметры установки соответствуют случаю малого угла сходимости и малого первеанса:

$$\alpha_l \ll 1, \quad \kappa = \left(\frac{r_n}{L_n} \right)^2 \frac{\sqrt{e/2m}}{P} \quad (4.3)$$

Можно показать, что с точностью до $1/\kappa^2$

$$\operatorname{tg} \alpha_l = \frac{r_n}{L_n} (1 + 1/2\kappa), \quad r_1 = r_n \exp(-\kappa - 1). \quad (4.4)$$

Из (4.1) — (4.4) следует, что минимальный размер уменьшается с ростом r_n . Однако, с увеличением r_n возрастает также и вклад абберраций линзы и отклоняющей системы. Наиболее принципиальным видом абберраций, который не устраняется юстировкой, является сферическая. В отсутствие действия других факторов радиус «кружка размытия», возникающего из-за сферической абберрации при оптимальной фокусировке приосевых частиц, можно оценить по формулам и графикам, приведенным в [8]. Известно также [3], что минимальный радиус в этом случае достигается при меньшем токе фокусирующей линзы и равен четверти радиуса кружка размытия:

$$r_3 = \frac{r_n^3}{4D_n^3} L_n \left\{ k_1 \left(\frac{D_n}{F} \right)^2 + k_2 \left(\frac{D_n}{F} \right) \right\}, \quad (4.5)$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты, зависящие от отношения внутреннего диаметра магнитопровода линзы D_n к размеру ее воздушного зазора S ; F — фокусное расстояние линзы.

Минимальный размер пучка на мишени, возникающий в результате всех трех факторов, можно оценить

$$r_m = r_1 + r_2 + r_3. \quad (4.6)$$

На рис. 4.1 показана вычисленная таким образом зависимость $r_m(r_l)$. Видно, что при заданных геометрических размерах существует оптимум по размеру пучка в линзе.

4.2. Измерения минимального размера

Экспериментальное изучение показало, что реальная ситуация с минимальным размером пучка на мишени заметно сложнее простых оценок (4.1) — (4.6). Например, размер увеличивается при неполной эмиссии катода, сильной асимметрии в элементах ЭОС или ошибках в их выставлении, при наличии паразитных магнитных полей и т. д. Поэтому заметная часть экспериментальной работы была связана с выяснением влияния различных факторов на величину минимального размера и устранением всякого рода вредных эффектов, связанных с конкретными техническими решениями. Основную часть их удается убрать за счет соблюдения определенных требований к элементам вакуумной системы, материалам, точностям и т. д. Остающееся же влияние приводит в основном к астигматичности пучка и компенсируется с помощью стигматора, расположенного вблизи линзы. Стигматор представляет собой пару совмещенных квадрупольных линз, поля в которых повернуты на 45° друг относительно друга. Подбором токов стигматора удается устранить вклад осевого астигматизма практически полностью. Это подтверждают приводимые ниже зависимости минимального размера пучка в центре мишени от различных параметров. Один из наиболее существенных параметров — это размер пучка в линзе, r_l (см. рис. 4.1). Оперативно его можно изменять с помощью потенциала управляющего электрода $U_{упр}$ (при этом, конечно, изменяется и ток пучка). Изменение r_l при фиксированном первеансе пучка возможно при изменении геометрии пушки или расстояния между нею и линзой. На рис. 4.2 приведены зависимости минимального размера пучка на мишени от его радиуса в линзе для двух линз, отличающихся геометрическими размерами. Для узкого пучка минимальный радиус определяется пространственным зарядом и эмиттансом — его величина одинакова для обеих линз. При увеличении r_l становится существенным вклад аберраций линзы, и r_m для линзы большего диаметра оказывается меньшим. Как отмечалось, эмиттанс пучка определяется в основном тепловым разбросом на катоде, поэтому его вклад в минимальный радиус падает с напряжением как $U^{-1/2}$. В то же время при пропорциональном изменении всех потенциалов первеанс и размер

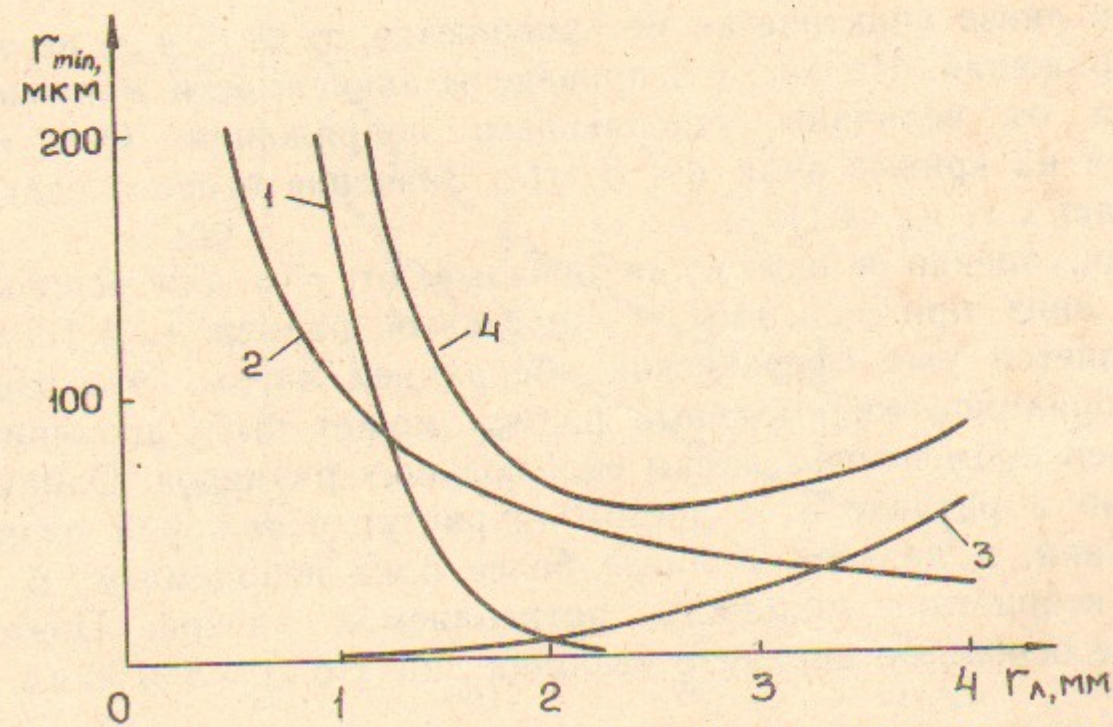


Рис. 4.1. Расчетная зависимость минимального размера пучка на мишени от его радиуса в линзе для пучка с параметрами:

$I=5$ мА, $U=75$ кВ, $\epsilon=0.3$ л.мм·град. Геометрические размеры линзы: $d_l=44$ мм, $S_l=40$ мм. Кривая 1 — расчет влияния пространственного заряда, 2 — фазового объема, 3 — сферической аберрации, 4 — сумма кривых 1, 2, 3.

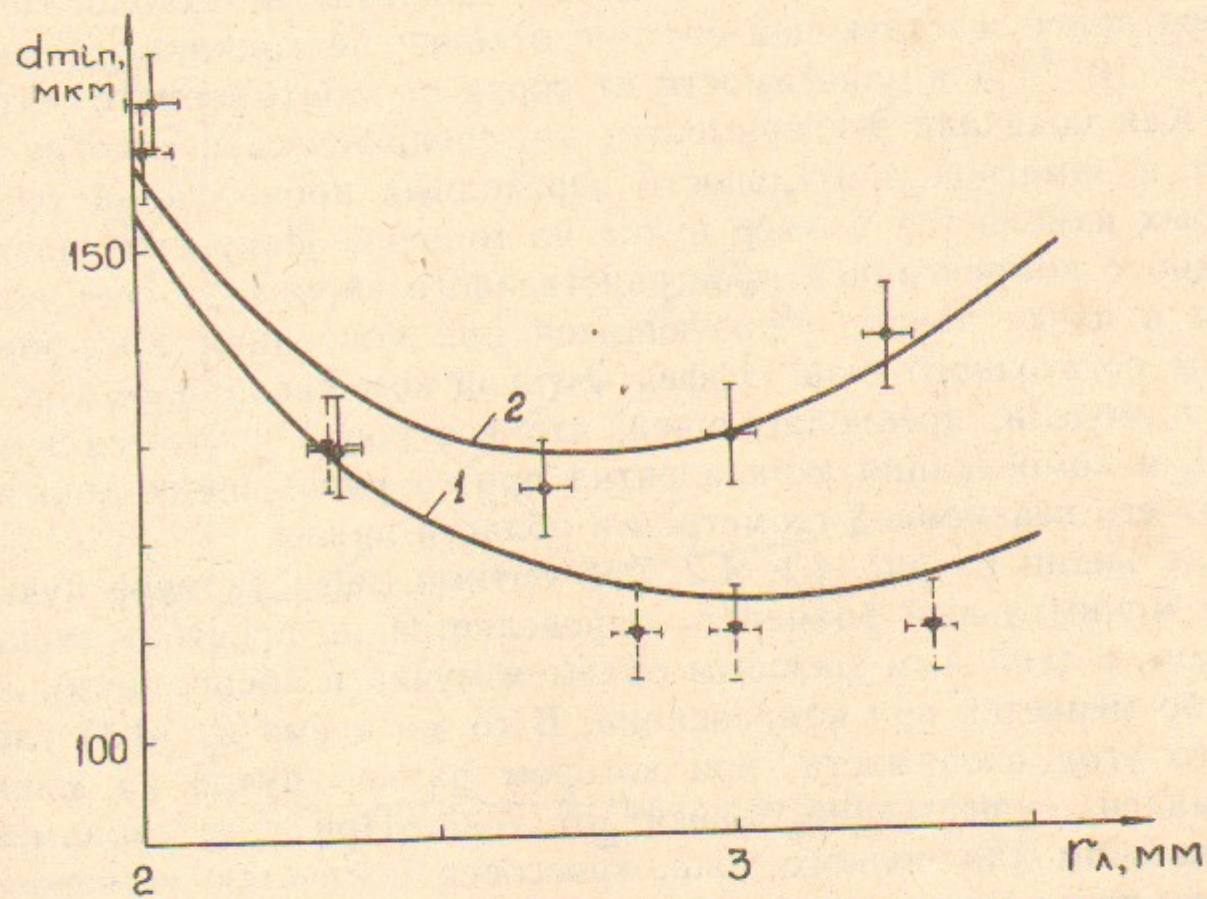


Рис. 4.2. Экспериментальная зависимость минимального размера пучка на мишени от его радиуса в линзе.

$U=75$ кВ. Размеры линзы: \blacktriangledown — $S_l=60$ мм, $D_l=60$ мм; \bullet — $S_l=40$ мм, $D_l=44$ мм. 1, 2 — соответствующие расчетные кривые.

пучка в линзе практически не изменяются, т. е. r_2 и r_3 не зависят от напряжения. На рис. 4.3 приведены зависимости минимального радиуса от величины ускоряющего напряжения. Они хорошо ложатся на кривые вида $A+B/\sqrt{U}$. Значение второго слагаемого совпадает с r_1 из (4.1).

Итак, оценки и измерения показывают, что для использованных линз при $r_l > 3$ мм минимальный размер $r_m \geq 100$ мкм и определяется уже сферической aberrацией линзы. Это означает, что в принципе минимальный размер может быть дополнительно уменьшен применением линзы еще больших размеров. Однако, как показано в разделе 5, с ростом r_l растут искажения пучка при отклонении, и диаметр в линзе более 5 мм неприемлем. В то же время возрастает мощность, потребляемая линзой. Поэтому в качестве основного варианта выбрана линза с $D=S=60$ мм.

4.3. Эффекты компенсации пространственного заряда пучка

Как оказалось, размер пучка на мишени меняется в течение импульса, вызывая нежелательные эффекты при обработке.

Во избежание отравления катода, давление в технологической камере при существующей системе откачки не должно превышать $(1 \div 3) \cdot 10^{-3}$ Па в зависимости от сорта обрабатываемого материала. Как показали эксперименты, это специфическое условие приводит к заметной длительности переходных процессов, в течение которых изменяется размер пучка на мишени. Изменение размера связано с компенсацией пространственного заряда за счет накопления в пучке ионов, образующихся при ионизации электронами атомов остаточного газа. Эффекты такой компенсации можно оценить в модели, предполагающей, что все ионы находятся внутри пучка, а компенсация эквивалентна просто уменьшению тока пучка при его неизменной геометрии в области линзы.

Как видно из рис. 4.1, 4.2, при оптимальном размере пучка в линзе минимальный размер r_m определяется не пространственным зарядом, а тепловым фазовым объемом пучка и aberrациями ЭОС и слабо меняется при компенсации. В то же время из (4.4) следует, что угол сходимости, при котором размер пучка на мишени минимален, существенно зависит от тока. При угле сходимости, оптимальном для полного тока, кроссовер полностью компенсированного пучка находится от мишени на расстоянии $L_n/2\chi$ и радиус пучка на мишени вырастает до

$$r = \sqrt{r_m^2 + (r_n/2\chi)^2}. \quad (4.7)$$

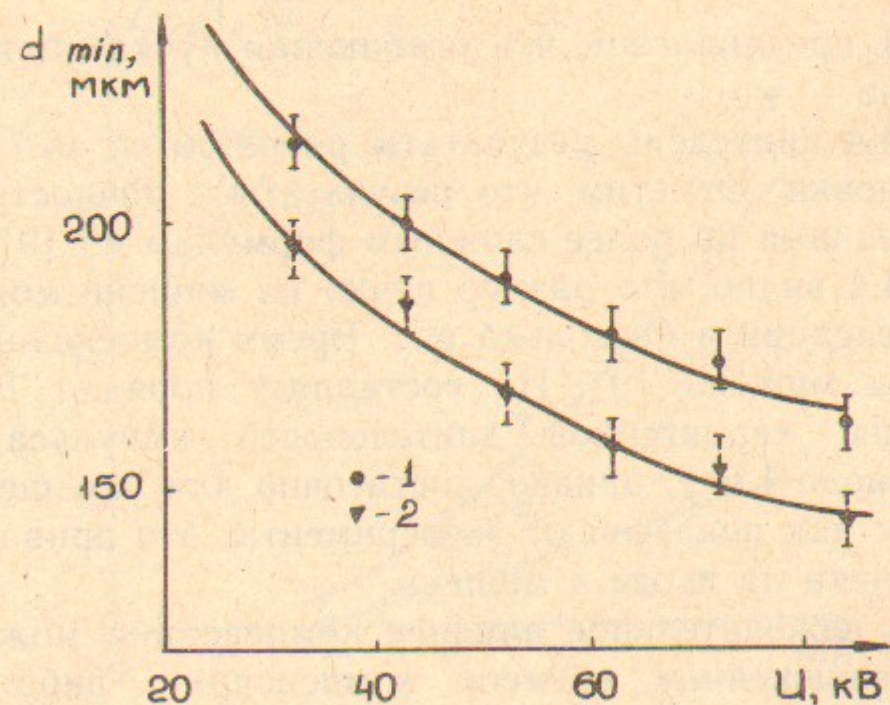


Рис. 4.3. Зависимость минимального размера пучка на мишени от ускоряющего напряжения.

$U_m=0$. Длительность импульса 15 мкс (1), 50 мкс (2). Сплошные кривые — $F(U) = A + B/\sqrt{U}$, коэффициент B имеет одинаковое значение для обеих кривых.

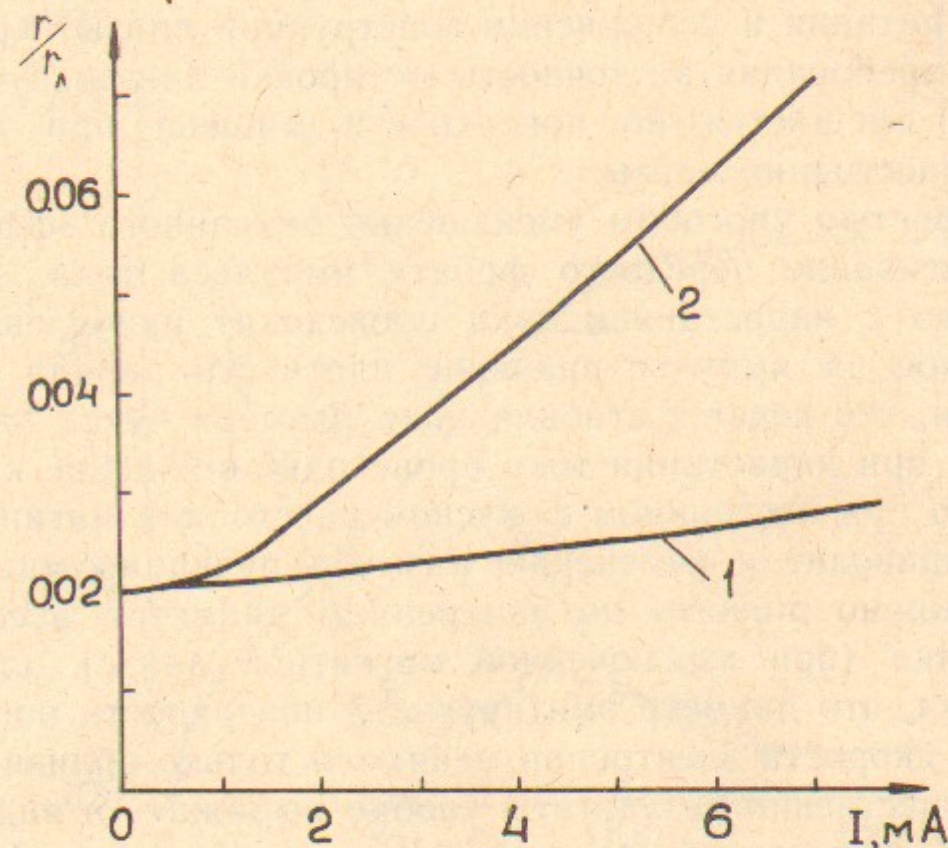


Рис. 4.4. Зависимость размера пучка на мишени от тока:

1 — минимальный размер; 2 — размер при неизменной фокусировке. Расчет для энергии 100 кэВ, $r_0=2.5$ мм, $L=360$ мм и минимального размера, обусловленного тепловым разбросом скоростей, 0.1 мм.

Оценка (4.7) предполагает, что огибающая пучка вблизи минимума — парабола.

На рис. 4.4 приведены результаты расчетов по (4.7) для параметров установки. Отметим, что результаты с точностью 5% совпадают с оценками по более сложным формулам из [9].

Из рис. 4.4 видно, что размер пучка на мишени может меняться при компенсации в несколько раз. Время компенсации для давления вблизи мишени 10^{-3} Па составляет порядка 100 мкс. Это много меньше характерной длительности импульса прошивки отверстия (около 1 мс), однако, достаточно для ухудшения качества отверстия: как показывают эксперименты, это приводит к образованию воронки на входе в мишень.

Ослабить нежелательное влияние компенсации можно, очевидно, либо уменьшением времени компенсации, либо фиксацией каким-то способом кроссовера на мишени. Уменьшение времени компенсации возможно лишь за счет повышения давления остаточного газа, но, как отмечалось, это противоречит условиям стабильной работы катода. Фиксация кроссовера подстройкой фокусного расстояния магнитной линзы требует быстродействующих источников питания и усложнения конструкции линзы. Кроме того, возрастают требования на точность юстировки линзы: пучок, вообще говоря, смещается по поверхности мишени при изменении фокусного расстояния линзы.

Более простым способом уменьшения описанного эффекта оказалось затягивание переднего фронта импульса тока. При этом одновременно с нарастанием тока происходит накопление ионов. Максимальное за импульс значение плотности заряда при этом уменьшается, что ведет к стабилизации размера пучка на мишени. Кроме того, при нарастании тока происходит смещение кроссовера в пушке, что при постоянном фокусном расстоянии магнитной линзы также приводит к изменению размера пучка на мишени. Это смещение можно оценить по измерениям диаметра нефокусированного пучка (при выключенной магнитной линзе) для разных токов, считая, что диаметр эмитирующей поверхности постоянен, а радиальные скорости электронов меняются только вблизи катода и анода. Количественно результаты удобно выражать в виде зависимости тока оптимальной настройки магнитной линзы I_L от тока пучка при условии полной компенсации его пространственного заряда. Рассчитанная таким образом зависимость $\Delta I_L / I_L$ от тока показана на рис. 4.5: ток линзы увеличивается с ростом тока пучка. Компенсация же приводит к изменению I_L противоположного

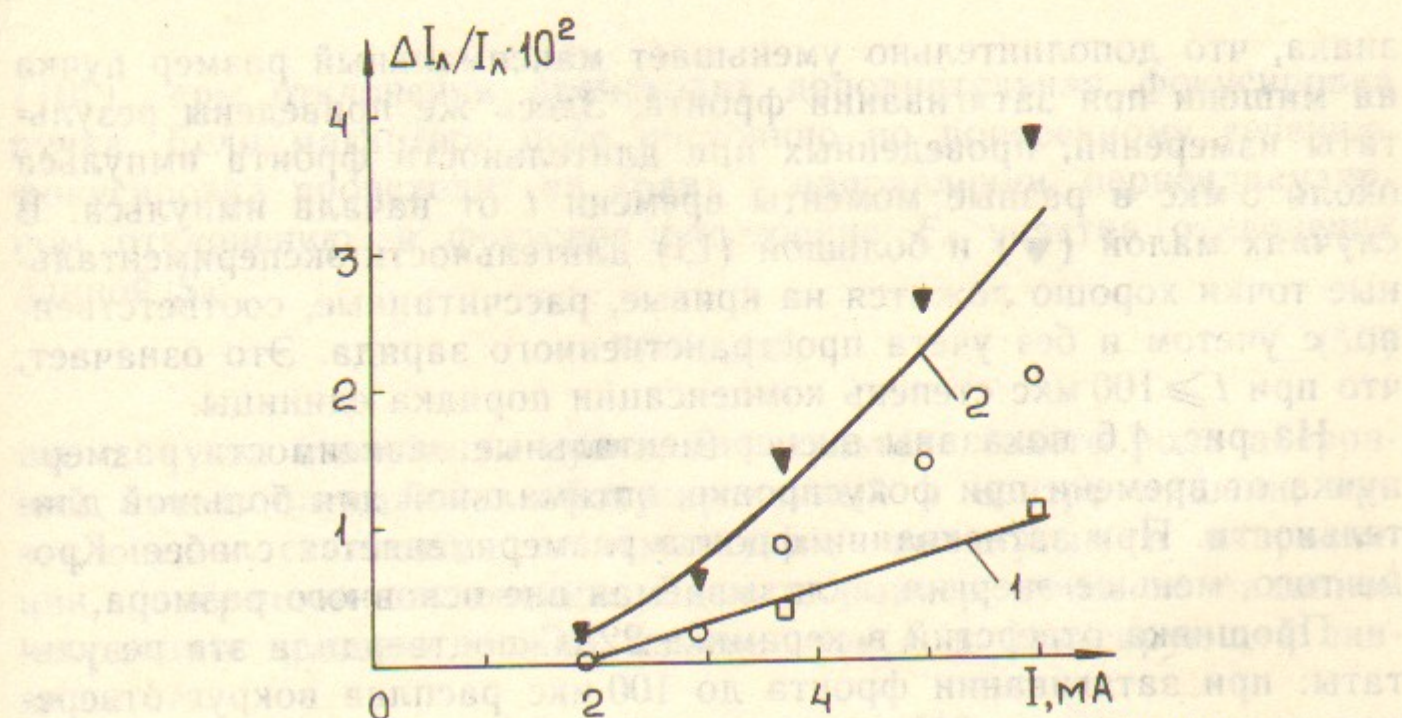


Рис. 4.5. Зависимость оптимального тока линзы от тока пучка:

кривые 1 и 2 — расчет без учета пространственного заряда и его учетом соответственно. ▼ — экспериментальные точки для $t = 15$ мкс, ○ — 50 мкс, □ — 100 мкс. При расчете учтено изменение с током размера пучка в линзе. Энергия 75 кэВ.

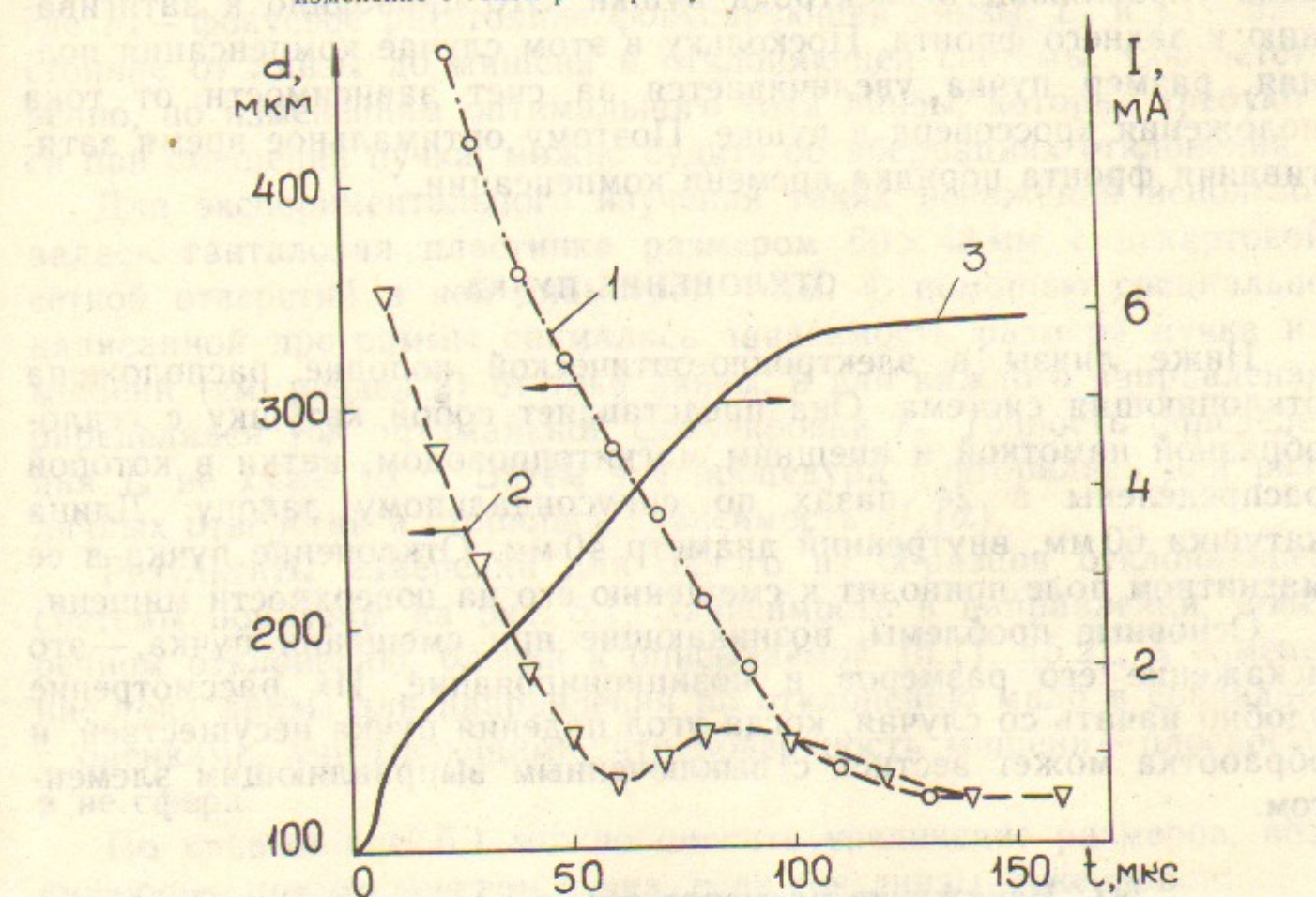


Рис. 4.6. Изменение размера пучка во времени при оптимальной для большой длительности настройке линзы:

кривая 1 — длительность фронта импульса 5 мкс; 2 — фронт затянут; 3 — форма импульса тока при затягивании фронта. Энергия 75 кэВ, давление 10^{-2} Па.

знака, что дополнительно уменьшает максимальный размер пучка на мишени при затягивании фронта. Здесь же приведены результаты измерений, проведенных при длительности фронта импульса около 5 мкс в разные моменты времени t от начала импульса. В случаях малой (\blacktriangledown) и большой (\square) длительности экспериментальные точки хорошо ложатся на кривые, рассчитанные, соответственно, с учетом и без учета пространственного заряда. Это означает, что при $t \geq 100$ мкс степень компенсации порядка единицы.

На рис. 4.6 показаны экспериментальные зависимости размера пучка от времени при фокусировке, оптимальной для большой длительности. При затягивании фронта размер меняется слабее. Кроме того, меньше энергия, вкладываемая вне основного размера.

Прошивка отверстий в керамике 22ХС подтвердила эти результаты: при затягивании фронта до 100 мкс расплав вокруг отверстия уменьшился с 200 до 150 мкм, уменьшилась и конусность отверстия.

Затягивание фронта производилось включением RC-цепочки в цепь управляющего электрода пушки. Это приводило к затягиванию и заднего фронта. Поскольку в этом случае компенсация полная, размер пучка увеличивается за счет зависимости от тока положения кроссовера в пушке. Поэтому оптимальное время затягивания фронта порядка времени компенсации.

5. ОТКЛОНЕНИЕ ПУЧКА

Ниже линзы в электронно-оптической колонне расположена отклоняющая система. Она представляет собой катушку с седлообразной намоткой и внешним магнитопроводом, витки в которой распределены в 24 пазах по синусоидальному закону. Длина катушки 60 мм, внутренний диаметр 40 мм. Отклонение пучка в ее магнитном поле приводит к смещению его на поверхности мишени.

Основные проблемы, возникающие при смещении пучка, — это искажение его размеров и позиционирование. Их рассмотрение удобно начать со случая, когда угол падения пучка несуществен, и обработка может вестись с выключенным выправляющим элементом.

5.1. Искажение размеров пучка при отклонении

Основная причина искажений размеров пучка при его отклонении — аберрации отклоняющей системы. Как известно (например,

[10]), при отклонении происходит дополнительная фокусировка пучка. Если магнитное поле постоянно по поперечному сечению, фокусировка происходит на краях в направлении, перпендикулярном отклонению, и фокусное расстояние F_d участка отклонения длиной S_d :

$$F_d = S_d / \alpha^2, \quad (5.1)$$

где α — угол отклонения пучка. В результате такого рода аберраций пучок, оптимально сфокусированный в центре мишени, при отклонении становится астигматичным — вытянутым в направлении, поперечном отклонению. Сделать размер пучка по заданной координате прежним можно, изменив ток I_l в фокусирующей линзе на δI_l :

$$\delta I_l / I_l = \frac{1}{2} \cdot F_l \cdot (1 - C_1 / L_l)^2 / F_d, \quad (5.2)$$

где F_l — фокусное расстояние фокусирующей линзы, L_l и C_1 — расстояние от линзы до мишени и отклоняющей системы. Соответственно, по изменениям оптимального тока линзы, которые требуются при смещении пучка, можно судить об аберрациях отклонения.

Для экспериментального изучения таких искажений использовалась танталовая пластинка размером 60×48 мм с декартовой сеткой отверстий в ней диаметром 1 мм. С помощью специально написанной программы снималась зависимость размера пучка на мишени (см. раздел 2) от тока линзы, и для каждого направления определялся ток оптимальной фокусировки I_l . Точность определения I_l не хуже 10^{-3} . Затем эта процедура повторялась для различных отверстий и строилась зависимость $\delta I_l(\alpha)$.

Результаты измерений для одного из образцов отклоняющей системы показаны на рис. 5.1. Зависимость в направлении, поперечном отклонению, близка к описываемой (5.1), (5.2), а изменение тока линзы для направления по отклонению мало и совпадает с оценками, учитывающими, что поверхность мишени — плоскость, а не сфера.

По кривым рис. 5.1 можно оценить увеличение размеров, возникающее при отклонении пучка, если ток линзы фиксирован:

$$\delta r = \sqrt{r_m^2 + \left(\frac{2\delta I_l}{I_l} \cdot \frac{L_l}{F_l} \cdot r_l \right)^2} - r_m, \quad (5.3)$$

где r_l — радиус пучка в линзе. Для параметров установки

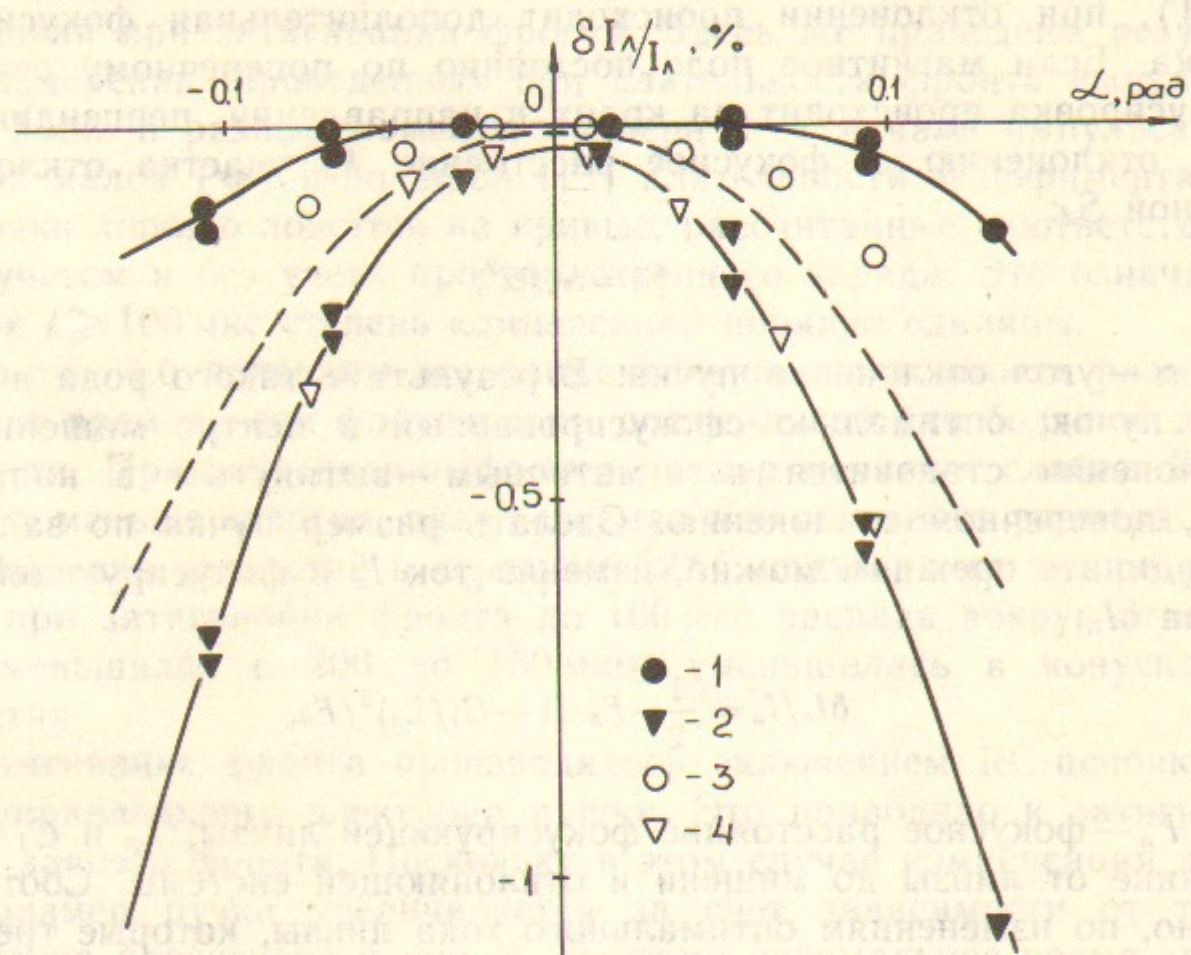


Рис. 5.1. Изменение оптимального тока линзы при отклонении:

1, 2 — выправляющая система включена; 3, 4 — выключена; 1, 3 — для фокусировки в направлении отклонения; 2, 4 — в поперечном направлении. Штриховая линия показывает изменение тока линзы при динамической фокусировке.

($r_l = 2.5$ мм, $2r_m = 0.15$ мм, $L_l = 350$ мм, $F_l = 120$ мм) искажения малы ($\delta r/r_m \leq 0.2$) при $\delta I_l/I_l \leq 3.5 \cdot 10^{-3}$. Из рис. 5.1 видно, что при постоянной фокусировке это позволяет использовать отклонения до $\alpha = \pm 0.12$. В задачах, где обработка может вестись с выключенным выправляющим элементом, описанный эффект ограничивает размер площади обработки диаметром 65 мм (при расстоянии между отклоняющей системой и мишенью 270 мм).

5.2. Позиционирование пучка

В установке требуется реализовать возможность точного перемещения пучка между двумя любыми точками на мишени. Для этого должна быть обеспечена, во-первых, соответствующая зависимость величины токов в катушках отклоняющей системы от требуемых координат на мишени и, во-вторых, воспроизводимость положения пучка при заданных отклоняющих токах и энергии

электронов. Первая часть задачи усложняется тем, что реальная отклоняющая система имеет нелинейную зависимость отклонения от тока в катушке, и на периферии вклад нелинейности достигает до 100 мкм. Эти искажения удается компенсировать усложнением управляющей программы: подбором отклоняющих токов, вычисляемых как полином третьей степени по величинам отклонений. Такой коррекции достаточно для позиционирования с точностью 20 мкм. Отметим также сложность, наиболее важную именно при работе с наклонно падающим пучком: реальная точность позиционирования оказывается чувствительной к перпендикулярности поверхности мишени оси системы. Простые геометрические оценки показывают, что при наклоне мишени на угол φ отклонение в положении пучка δx на расстоянии x от центра:

$$\delta x/x = \alpha \varphi, \quad (5.4)$$

где α — угол отклонения пучка. В принципе, этот эффект может быть скорректирован квадратичными членами в аппроксимирующем полиноме. В этом случае недопустим лишь разброс в углах наклона от изделия к изделию. Для указанных выше параметров разброс не должен превышать $3 \cdot 10^{-3}$ рад.

Проблема воспроизводимости связана, в основном, с существованием внешних переменных магнитных полей и гистерезисом в сердечнике отклоняющей системы. Как показали измерения, существенными оказались внешние поля, создаваемые самой установкой. Они имеют частоту 50 Гц и приводят к колебаниям пучка с амплитудой до 1 мм. Применение экрана, закрывающего весь электронно-оптический тракт, сложно с конструктивной точки зрения и пока не реализовано. Достаточной оказалась синхронизация импульсов тока с сетью и выбор фазы, соответствующей минимальной скорости перемещения пучка по мишени.

Влияние гистерезиса можно грубо оценить по отпечаткам на металлической фольге, оставленным пучком при перемещении по периметру площадки 60×48 мм. Выяснилось, что требования к сердечнику оказываются достаточно жесткими. Так, прецизионные отклоняющие системы, созданные во ВНИИ телевидения для работы в режиме телевизионной развертки, в нашей системе обнаруживают гистерезис положения пучка на мишени более 100 мкм. Поэтому оказалось необходимым использовать сердечники, разработанные специально для систем с «дисплейной» разверткой, т. е. обеспечивающих перемещение пучка по произвольной траектории.

Для более точной оценки влияния гистерезиса использовался следующий прием. Пучок отклонялся на заданный угол α , затем возвращался в нулевое положение и находились точные значения токов в обмотках, которые приводят пучок в центр отверстия, расположенного на оси ЭОС. Далее то же проводилось для отклонения на $(-\alpha)$, снова на α и т. д. Через 2-3 цикла разница в значениях токов, найденных для отклонений на α и $(-\alpha)$, устанавливается. Эта величина, пересчитанная через известную чувствительность отклоняющей системы в смещение δx , и принималась в качестве характеристики гистерезиса положения пучка при отклонении на угол α . На рис. 5.2 приведены результаты измерений $\delta x(\alpha)$ для двух отклоняющих систем, отличающихся магнитопроводом. При сходном характере зависимости $\delta x(\alpha)$ численные значения отличаются в 3 раза. Отклоняющая система №2 удовлетворяет требованиям по гистерезису.

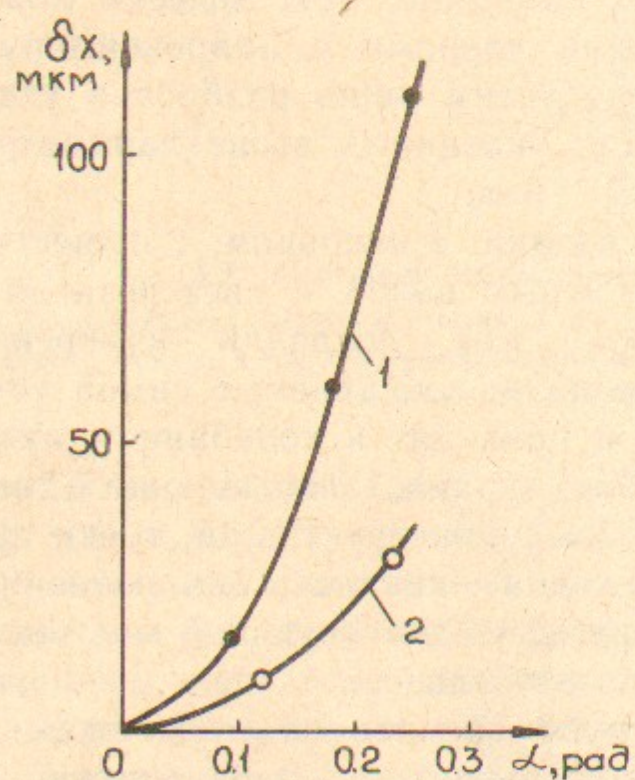


Рис. 5.2. Зависимость смещения пучка, обусловленного гистерезисом в сердечнике отклоняющей системы, от угла отклонения для двух образцов.

Одна из проблем, связанных с позиционированием пучка, — заметное время установления магнитного поля в отклоняющей системе. Это время определяется как быстродействием источников, так и физическими процессами в самой отклоняющей системе — в основном скин-эффектом в опорной трубке. Для его измерения использовалась следующая процедура. По команде от ЭВМ в отклоняющую систему задавались токи, приводящие пучок в центр

одного из отверстий. Предыдущие значения токов были таковы, что изменение соответствовало перемещению пучка на известное расстояние x . Затем через время t_d подавалась команда на открывание пушки и измерение тока пучка, прошедшего через отверстие. Задержка t_d подбиралась так, чтобы в отверстие проходила половина тока. Это соответствует положению пучка на краю отверстия, т. е. «недовыставлению» на $\delta x = 0.5$ мм. Зависимость $t_d(x)$ хорошо аппроксимируется формулой

$$t_d = t_1 + t_2 \ln \left(\frac{x}{\delta x} \right). \quad (5.5)$$

Постоянная задержка t_1 определяется конкретными решениями в электронике и программе и равна 0.8 мс; время нарастания t_2 для опорной трубки из нержавеющей стали равно 0.5 мс. Минимально допустимое время задержки команды на открывание пушки можно оценить по (5.5), принимая в качестве δx точность 20 мкм, а x — размер диагонали площадки 80 мм: $t_d = 5$ мс. Благодаря низкой рабочей частоте (50 Гц) реализовать такую задержку достаточно просто.

Таким образом, проблемы, связанные с отклонением пучка оказываются достаточно сложными. Тем не менее, если выправление угла необязательно, оказалось возможным обрабатывать всю площадку 60×48 мм слабоискаженным пучком с диаметром 0.1 — 0.15 мм, спозиционированным с точностью 20 мкм.

Отметим, что для получения таких параметров необходима, во-первых, высококачественная отклоняющая система. Так, в одном из циклов измерений использовалась отклоняющая система с магнитопроводом, склеенным из нескольких ферритовых колец. Неточности в их сборке порядка миллиметра оказалось достаточно, чтобы площадь, где размер и форма пучка изменяются слабо, сократилась до 30×30 мм. Во-вторых, пучок должен быть хорошо выставлен по отклоняющей системе (не хуже миллиметра). Кроме того, поскольку абберрации определяются углом отклонения, область с малыми искажениями симметрична относительно положения неотклоненного пучка. Поэтому система используется неэффективно, если центр мишени смещен относительно оси ЭОС больше, чем на несколько миллиметров.

6. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ПЕРЕНОС ПУЧКА ПО МИШЕНИ

В ряде задач необходим параллельный перенос пучка по мишени, так чтобы изготавливаемые отверстия были перпендикулярны поверхности по всей площади обработки. Например, при прошивке отверстий в керамических платах для гибридных схем наклонное падение пучка приводит к смещению центра выходного отверстия и, как следствие, к технологическим сложностям при многослойном монтаже.

В литературе описаны ЭОС с параллельным переносом пучка в электронно-лучевой литографии [11] и сварке [12], в телевизионных передающих трубках [8]. Характерной особенностью установки УРОК является большой диаметр пучка в элементах ЭОС: до 5 мм. Как уже говорилось, это связано с необходимостью получения высокой плотности мощности в пятне обработки при значительном расстоянии от фокусирующей линзы до мишени. Из-за большого диаметра пучка оказывается, что aberrации, возникающие при его переносе, могут заметно искажать размер и форму пятна на мишени, в то время как для получения требуемой плотности мощности этот размер должен быть близок к минимальному, определяемому тепловыми скоростями электронов. Поэтому минимизация электронно-оптических aberrаций при параллельном переносе решает успех в разработке ЭОС. Другая важная проблема связана с точным позиционированием: пучок должен выставляться в любую заданную точку с высокой (20 мкм) точностью. Для этого необходимо подобрать задаваемые от ЭВМ токи отклоняющей системы так, чтобы компенсировать нелинейности смещения пучка на мишени. Корректирующая программа должна быть приемлемой по сложности, поэтому дополнительное требование к ЭОС — малость таких нелинейностей. Отметим также, что сочетание высокой энергии и большой площади обработки не позволяет использовать электростатические системы отклонения.

В установке УРОК задача параллельного переноса решена дополнением уже рассмотренной ЭОС отклоняющей системой, расположенной вблизи мишени.

6.1. ЭОС с дополнительной отклоняющей системой

Дополнительная отклоняющая система включалась встречно основной, так что пучок приобретал в ней угол той же величины, что и в отклоняющей системе, но противоположного знака. Поле-

речное магнитное поле в этой «выправляющей» системе формировалось седлообразной обмоткой без магнитопровода с витками, распределенными в 36 пазах по синусоидальному закону, и было однородным на большей части апертуры катушки. Токи в отклоняющей и выправляющей системах изменялись пропорционально. Как выяснилось, при надлежащем выборе отношения токов пропорциональной связи достаточно для выправления угла по всей поверхности с требуемой точностью.

Конфигурации магнитных полей отклонения и выправления подобны, поэтому при выправлении возникают aberrации, аналогичные aberrациям отклонения (см. (5.1)). Искажения, возникающие при отклонении и выправлении, складываются. Анализировать их также удобно на языке изменений оптимального тока линзы. Показанные на рис. 5.1 экспериментальные кривые $\delta I_L / I_L(\alpha)$, снятые для случая с выправлением угла, также имеют параболический вид и по порядку величины согласуются с оценками, аналогичными (5.1); преобладает вклад aberrаций отклоняющей системы. Поэтому, как и в случае без выправления угла, максимальный угол при постоянной фокусировке $\alpha = \pm 0.12$, так что при расстоянии между отклоняющей и выправляющей системами 170 мм можно обрабатывать площадку с диаметром 40 мм. Для увеличения размера, доступного обработке, была введена динамическая фокусировка: ток линзы уменьшался квадратично со смещением (штриховая кривая рис. 5.1). При этом форма пучка оставалась близкой к круглой. Увеличение его диаметра также можно оценивать по (5.3), подставляя в качестве δI_L полуразность между токами оптимальной фокусировки по обеим координатам. Диаметр площадки вырастает до 80 мм.

Прошивка отверстий подтвердила эти оценки, отверстия требуемого диаметра надежно прошиваются на площадке 60×48 мм.

В ЭОС с дополнительной отклоняющей системой удалось реализовать требуемую точность позиционирования. Для этого использовалось вычисление величин токов в отклоняющей системе как многочленов третьей степени от координат.

Отработка точного позиционирования пучка проводилась на реперной пластинке размером 60×48 мм с сеткой из 35 отверстий. Координаты центров всех отверстий предварительно измерялись с точностью 3 мкм под микроскопом. Затем с помощью ЭВМ по специально разработанной программе определялись значения токов отклоняющей системы, приводящие пучок в центр каждого отверстия (точность измерений при этом соответствовала 5 мкм), и по

полученным значениям подбирались коэффициенты многочлена. Эта процедура позволила добиться точности позиционирования 20 мкм по всей площади.

Таким образом, в схеме с дополнительной отклоняющей системой удалось сформировать пучок с мощностью 500 Вт, сфокусированный в пятно диаметром не более 0.15 мм при параллельном переносе его по площадке 60×48 мм, и прошить с его помощью отверстия, позиционированные с точностью 20 мкм. Важное достоинство такой ЭОС — малая величина aberrаций, возникающих при выправлении угла. Они заметно меньше искажений, связанных с отклонением.

В то же время заметно уменьшить размер пучка на мишени в такой схеме уже нельзя. Поэтому была предложена и исследована система, использующая в качестве выправляющего элемента магнитную линзу.

6.2. Система с дополнительной магнитной линзой

Известно, что все траектории, выходящие из фокуса идеальной линзы, за линзой движутся параллельно оси. Можно попытаться использовать это, расположив перед мишенью дополнительную («выправляющую») магнитную линзу большого диаметра и подобрав ее фокусное расстояние равным расстоянию от этой линзы до отклоняющей системы (рис. 6.1). Отметим, что в такой схеме

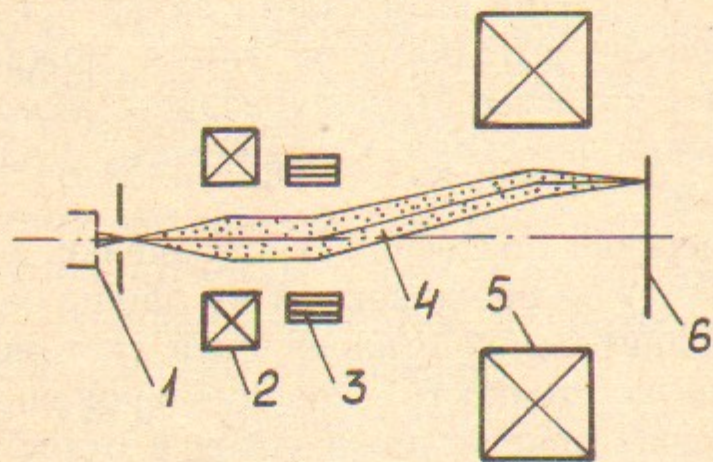


Рис. 6.1. Схема параллельного переноса пучка с выправляющей линзой:
1 — пушка; 2 — фокусирующая линза; 3 — отклоняющая система; 4 — электронный пучок;
5 — выправляющая линза; 6 — мишень.

пучок испытывает в выправляющей линзе дополнительную фокусировку. Благодаря этому при включении выправляющей линзы минимальный размер пятна на мишени уменьшается. Так, если

размер пучка определяется его тепловым фазовым объемом, уменьшение происходит в $(1 + B/A)$ раз, где B — расстояние мишень — выправляющая линза, A — расстояние выправляющая линза — отклоняющая система. При заданном же минимальном размере пучка это позволяет, например, использовать катод с большей эмитирующей поверхностью.

Основные проблемы, которые нужно решить при параллельном переносе — это обеспечение перпендикулярности падения пучка, сохранение его размеров и точное позиционирование.

Отклонение угла падения от прямого может быть связано с несколькими причинами. Одна из них — ошибки в выставлении линзы на ось системы — устраняется юстировкой. Другая — aberrации магнитной линзы — не приводит к сильным отклонениям для линз с параметрами, приемлемыми по искажениям размеров пучка. Наиболее принципиально присутствие вблизи мишени магнитного поля выправляющей линзы и, как следствие [3], наличие у электронов азимутальной компоненты скорости. Этот эффект накладывает ограничение на минимальное расстояние между выправляющей линзой и мишенью.

Сложной проблемой в этой системе оказалось искажение размеров пучка при больших смещениях. Одна из причин таких искажений — aberrации отклоняющей системы (5.1). Другая — aberrации выправляющей линзы. Для их описания достаточно точной и удобной является модель тонкой линзы с фокусным расстоянием F_c , зависящим от радиуса r . При этом под фокусным расстоянием понимается расстояние от центра линзы до точки пересечения с осью траектории электрона, входящего в линзу параллельно оси. Как показывают расчеты, зависимость $F_c(r)$ оказывается близкой к параболической на большей части апертуры линзы:

$$F_c(r) = F_0(1 - \gamma r^2), \quad (6.1)$$

а коэффициент γ уменьшается с ростом отношения длины линзы S_c к ее диаметру D_c . Пучок, оптимально сфокусированный в центре мишени, при отклонении попадает на участки выправляющей линзы с меньшим фокусным расстоянием, в результате чего кроссовер пучка смещается. Зависимость $F_c(r)$ приводит к тому, что фокусировка в радиальном направлении оказывается сильнее, чем в азимутальном, и минимальный размер по каждому направлению достигается на разных расстояниях от мишени δB_r и δB_ϕ . В приближении тонкой линзы и прямолинейных траекторий найдем, учи-

тывая (5.1), (6.1),

$$\frac{\delta B_r}{B} = \frac{3B}{A} \gamma r^2, \quad \frac{\delta B_\varphi}{B} = \left(\frac{B}{A} \gamma + \frac{1}{B} S_d \right) \cdot r^2. \quad (6.2)$$

Соответственно, размеры пятна на мишени вырастают на δr_r и δr_φ :

$$\frac{\delta r_r}{r_m} = \sqrt{1 + \left(\frac{r_c \delta B_r}{B} \right)^2} - 1, \quad \frac{\delta r_\varphi}{r_m} = \sqrt{1 + \left(\frac{r_c \delta B_\varphi}{B} \right)^2} - 1, \quad (6.3)$$

где r_m — минимальный радиус пучка на мишени, r_c — радиус пучка в выправляющей линзе.

В принципе, эти искажения можно ослабить, уменьшая r_c . Однако, с уменьшением размера пучка в выправляющей линзе растет диаметр пятна на мишени за счет влияния фазового объема и особенно пространственного заряда пучка. Другая возможность — уменьшение расстояния B (мишень — выправляющая линза) и величины коэффициента γ . Уменьшить абберационный коэффициент можно за счет увеличения длины выправляющей линзы, но при этом растет B . Расстояние мишень — выправляющая линза выбирается минимально допустимым из требований малости магнитного поля на мишени. В итоге оптимальной оказалась геометрия, в которой $B = 130$ мм, а размеры линзы $S_c = 70$ мм, $D_c = 100$ мм.

Зависимость фокусного расстояния выправляющей линзы от радиуса приводит к заметным искажениям масштаба. С ростом угла отклонения нелинейно возрастает величина смещения пучка от центра мишени и увеличивается угол его поворота в линзе. При смещениях порядка 40 мм такие искажения имеют величину около миллиметра. Тем не менее, по оценкам при отсутствии асимметрии в ЭОС для получения требуемой точности достаточна аппроксимация отклоняющих токов в виде многочлена третьей степени по координатам на мишени.

Эксперименты в целом подтвердили приведенные выше оценки. Угол падения пучка не превышал 0.01 рад по всей площади, минимальный размер пятна в центре мишени уменьшался в полтора раза при включении выправляющей линзы.

Функция $F_c(r)$ анализировалась по зависимости координат отпечатков пучка на мишени от токов отклоняющей системы, так как отклонение этой зависимости от линейной связано в основном с изменением F_c . Зависимость $F_c(r)$ действительно оказывается параболической и в пределах точности измерений совпадает с расчетной.

При оптимальной фокусировке заметные (более 20%) искажения размеров пучка отсутствуют на площадке 20×20 мм. Здесь были прошиты отверстия с требуемыми параметрами. При больших смещениях пучок увеличивается в размере и становится вытянутым в направлении отклонения. Искажения, можно заметно уменьшить, подстраивая при отклонении ток фокусирующей линзы (динамическая фокусировка). Измерения, проведенные в статическом режиме, показали, что при этом площадь обработки расширяется до 50×50 мм. Одно из препятствий для динамической фокусировки — асимметрия aberrаций, возникающих при переносе пучка. Она связана как с погрешностями изготовления, так и с неточностью совмещения осей элементов ЭОС.

Достоинства рассматриваемого варианта — дополнительная фокусировка, позволяющая уменьшить размер пучка на мишени, и простота конструкции. В отличие от предыдущего случая, для питания выправляющей линзы используется статический источник тока, а необходимый при динамической фокусировке дополнительный источник имеет малую мощность и низкие требования к точности. Однако, aberrации выправляющей линзы достаточно велики, так что при таком выправлении угла возникающие искажения пучка больше, чем при отклонении; сложным оказывается и позиционирование. Поэтому при фиксированных токах в линзах ЭОС с дополнительной отклоняющей системой позволяет обрабатывать большую площадь. При введении динамической фокусировки размеры площади обработки для обеих систем сближаются. По всей видимости, ЭОС с выправляющей линзой предпочтительна для случаев, где необходим меньший размер пучка, а площадь обработки невелика.

7. ЭОС С МАГНИТНЫМ СОПРОВОЖДЕНИЕМ

Очевидно, что требование перпендикулярности падения пучка на мишень резко усложняет задачу. Поэтому рассматривалось и принципиально иное решение: ЭОС, в которой пучок на всей его длине погружен в продольное магнитное поле.

На рис. 7.1,а показана схема варианта с магнитным сопровождением в его предельном случае, когда электроны «вморожены» в магнитное поле. Ведущее поле наложено по всей длине от катода до мишени, смещение пучка производится включением на части траектории поперечного магнитного поля. При достаточно большой напряженности ведущего поля H_0 , когда ларморовский радиус ρ

меньше минимального радиуса кривизны силовой линии R_{cur} :

$$\rho = \frac{p_e \cdot c}{e H_0} < R_{cur}, \quad (7.1)$$

где p_e — импульс электронов, электроны следуют по силовым линиям. Для того, чтобы пучок падал перпендикулярно поверхности мишени, достаточно отсутствия на ней поперечных компонент магнитного поля.

Вообще говоря, в такой схеме можно получить непульсирующий электронный пучок, радиус r которого постоянен от катода до мишени. Для этого нужно использовать пушку, формирующую

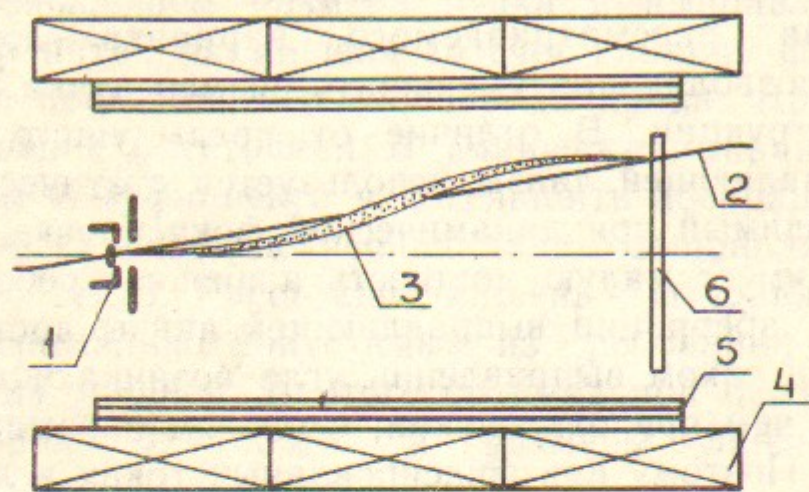


Рис. 7.1. Схема ЭОС с параллельным переносом пучка с фокусировкой продольным магнитным полем:

1 — электронная пушка; 2 — силовая линия магнитного поля; 3 — электронный пучок; 4 — соленоид; 5 — отклоняющая система; 6 — мишень.

пучок без заметных поперечных скоростей [13]. Основные факторы, которые могут увеличивать размер пучка — его пространственный заряд и тепловые скорости электронов.

Электрическое поле пучка с током I приводит к увеличению его радиуса за счет дрейфового движения на

$$\delta r_1 = \frac{2I}{r H_0^2} \cdot \frac{m c^2}{e} \sqrt{\frac{m}{2eU_0}}, \quad (7.2)$$

где e , m — заряд и масса электрона; c — скорость света. Чтобы такое увеличение было мало ($\delta r/r < 0.2$), при параметрах табл. 1 необходимо $H_0 > 400$ Гс.

Увеличение радиуса за счет тепловых скоростей

$$\delta r_2 = \sqrt{\frac{2T}{m}} \frac{2mc}{eH_0} \quad (7.3)$$

($T = 0.1$ эВ — температура катода) мало при $H_0 > 1.2$ кГс. Условие (7.1) при таком поле легко выполняется.

Привлекательность такой системы в отсутствии требований на стабильность высокого напряжения, стабильным (для позиционирования) должно быть лишь отношение отклоняющего и ведущего полей. Это делает возможным использование простых высоковольтных источников: например, просто высоковольтного трансформатора. Кроме того, для перпендикулярности падения пучка достаточно обеспечить однородность поля вблизи мишени. К сожалению, для реализации системы с «вмороженным» пучком необходимо использовать катод с диаметром, равным размеру пятна обработки. Для параметров табл. 1 это означает трудно реализуемую плотность тока эмиссии (около 25 А/см²). Отметим, что снижение напряженности магнитного поля на катоде для уменьшения диаметра пучка вблизи мишени оказывается неэффективным из-за адиабатического нагрева электронов и увеличения δr_2 в (7.3).

Другая модификация ЭОС с магнитным сопровождением показана на рис. 7.1, б. Пушка формирует расходящийся пучок, расстояние от нее до мишени L_1 примерно равно циклотронной длине:

$$L_1 = 2\pi r, \quad (7.4)$$

так чтобы кроссовер пучка находился на мишени. Как показывают оценки, aberrации фокусировки однородного поля [8] малы, поэтому угол расходимости β пучка, выходящего из пушки, может быть сделан достаточно большим. В этом случае можно считать, что силы пространственного заряда не оказывают существенного влияния на величину минимального размера пучка r_m , и он определяется радиусом катода r_k и тепловыми скоростями электронов. Оценить этот размер можно, предположив длину пушки малой по сравнению с расстоянием до мишени и максимальный размер пучка в канале транспортировки много больше диаметра катода ($2\rho\beta \gg r_k$):

$$r_m = \frac{e}{\pi\beta} \cdot \sqrt{\frac{r_k}{2\rho\beta}}, \quad (5)$$

где $\beta_T = \sqrt{T/eU_0}$, $\epsilon = \pi r_k \beta_T$ — эмиттанс пучка. Видно, что при большом β радиус катода r_k может быть сделан заметно больше r_m .

Отклоняющее поле накладывается по всей длине пучка. Электроны выходят из пушки параллельно оси системы и при включе-

нии отклоняющего поля их скорость оказывается направленной под углом к силовой линии полного (суммарного) поля. В результате, электрон совершает вокруг нее оборот и входит в мишень примерно перпендикулярно ее поверхности. Для строгой перпендикулярности необходимо точное выполнение равенства (7.4), а условия фокусировки могут несколько отличаться. Тем не менее, по оценкам для разумных углов отклонения (до 0.2 рад) угол неперпендикулярности не превышает требуемых 0.02 рад. В таком варианте уровень высокого напряжения должен уже быть стабилизирован, но с точностью лишь около процента.

В ЭОС рис. 7.1 были проведены эксперименты при расстоянии пушка — мишень 200 — 400 мм и напряженности $H_0 = 150 \div 500$ Гс, т. е. $L_1/2\pi r = 1 \div 3$ и получен пучок с диаметром 0.1 — 0.15 мм.

Система с сопровождающим магнитным полем имеет меньшие aberrации по сравнению с ЭОС с сосредоточенными элементами, низкими оказываются требования на стабильность высокого напряжения. В то же время потребляемая мощность, вес устройства, индуктивность отклоняющей системы в таком варианте выше. Решающими же недостатками такой ЭОС для технологической установки оказываются сложность в согласовании ее с технологической камерой (поскольку магнитное поле на мишени должно быть достаточно однородным) и ограничение набора обрабатываемых изделий требованием немагнитности. Поэтому достаточно подробно такой вариант не изучался.

8. ЭКСПЛУАТАЦИЯ УСТАНОВКИ

К настоящему времени установка изготовлена в трех экземплярах. В ходе разработки установки проводились многочисленные пробные обработки различных материалов. Поэтому можно говорить о некотором опыте эксплуатации установки. Он относится, конечно, к лабораторным условиям, но заметная часть проблем та же, что возникнет и при использовании в технологических процессах.

8.1. Настройка установки после сборки

После сборки установки и устранения вакуумных течей, производилась обработка пушечного объема тлеющим разрядом. Для этого катод соединялся через сопротивление с управляющим электродом, на который подавалось постоянное напряжение 600 В.

Затем с помощью натекаателя, расположенного в пушечном объеме, давление в нем увеличивалось до 1 — 10 Па и зажигался разряд с током 100 — 300 мА. Такая обработка при одновременной откачке форвакуумным насосом проводилась в течение нескольких часов при обеих полярностях напряжения.

После получения в пушке вакуума около 10^{-4} Па начинался подъем высокого напряжения с тренировкой изолятора. Первоначальный подъем продолжался несколько часов, при последующих вскрытиях на атмосферу тренировка (заканчивавшаяся подъемом до 120 кВ) занимала около получаса.

Следующим шагом была юстировка катода. Для этого анодная диафрагма изготавливалась первоначально с отверстием 1 мм. Обычно при первом включении токопрохождение было малым: пучок, положение которого устанавливалось по отпечатку на аноде, оказывался смещенным на 1 — 1.5 мм. При вскрытии катодный узел смещался как целое на юстировочных винтах (рис. 8.1) на необходимое расстояние и после сборки вновь повторялась операция включения и «нанесения» отпечатка пучка. Через 1-2 таких попытки около половины тока удавалось провести в отверстие, а отпечаток вокруг него был симметричен. На этом юстировка завершалась и отверстие рассверливалось до 3 мм.

Как отмечалось, для получения полной эмиссии не должно быть выпадания тока на анод. Контролировать выпадание можно было по уровню рентгеновского излучения из области пушки. Надежно различалось выпадание среднего тока около 10 мкА, однако, такие измерения могли проводиться только при снятой защите. Более удобно сравнивать токи катода и коллектора. Для этого нужно знать коэффициент захвата цилиндра Фарадея. Для его определения коллектор был выполнен составным: в дне основного цилиндра выполнено отверстие диаметром 5 мм, закрытое дополнительным коллектором. При сканировании дна цилиндра сфокусированным пучком прохождение отверстия сопровождалось ростом коллекторного тока. По величине этого роста можно оценить коэффициент захвата, считая, что дополнительный коллектор имеет его единичным. Для используемого цилиндра такое измерение дает коэффициент 0.8.

После получения тока проводилось более точное выставление диска в технологической камере, так чтобы неотклоненный сфокусированный пучок попадал как можно ближе к центру обрабатываемой пластинки. Затем под пучок выставлялась уже упоминавшаяся реперная пластинка с 35 отверстиями. При выключенной

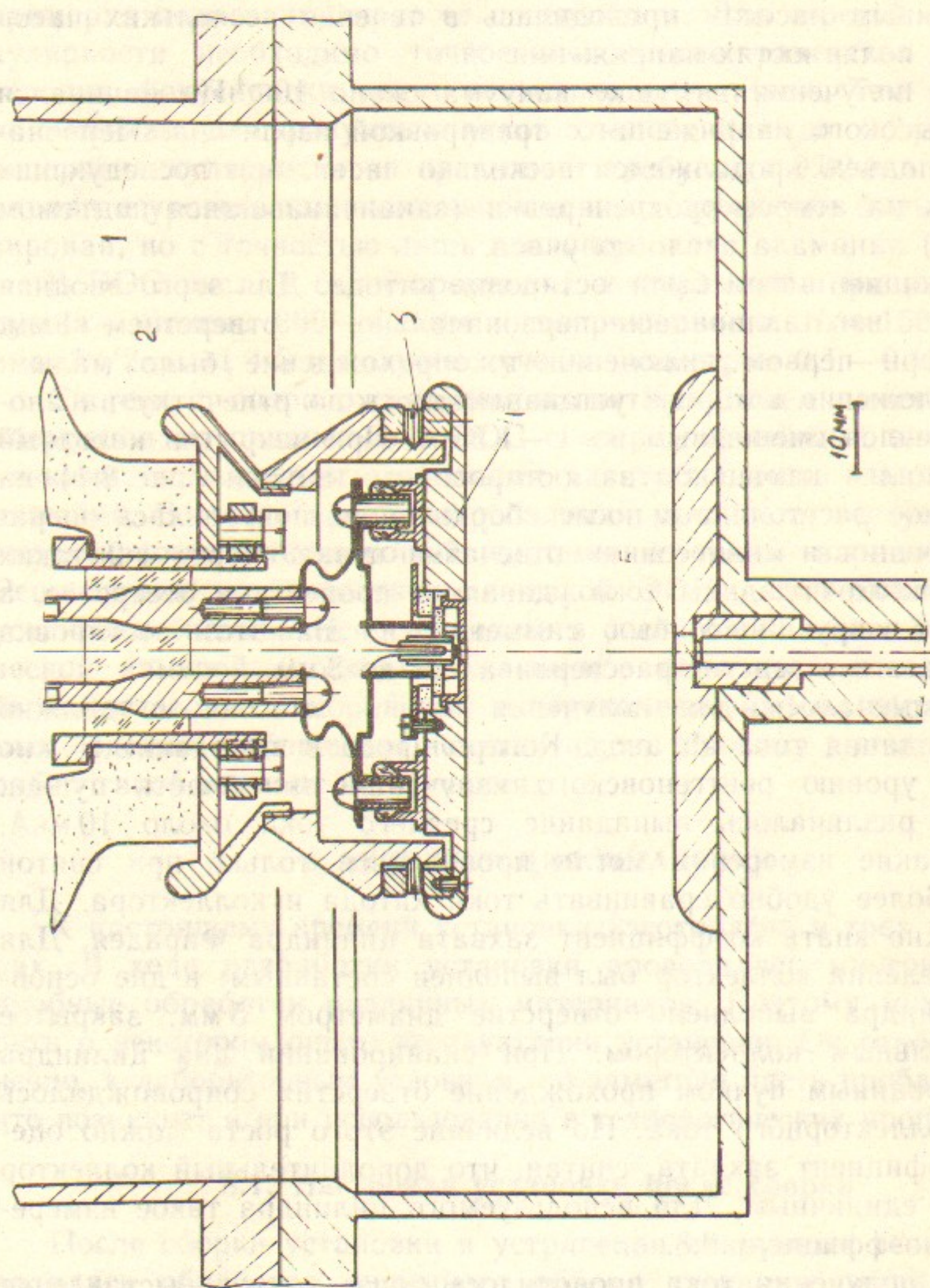


Рис. 8.1. Эскиз электронной пушки:
 1 — стенка вакуумной камеры; 2 — высоковольтный изолятор; 3 — юстировочные винты; 4 — диск со смонтированными катодным узлом; 5 — анодная диафрагма.

выправляющей катушке отклоняющая поворачивалась так, чтобы при изменении тока в одной из обмоток пучок шел вдоль линии отверстий. Потом то же повторялось дляправляющей системы. В итоге угол между осями двух систем выставлялся с точностью около 1 мрад. Далее подбирался коэффициент в соотношении токов отклонения и выправления. Подбор осуществлялся сравнением чувствительностей отклонения для случая включенной и выключеннойправляющей катушки. При точном выправлении эти чувствительности должны относиться как расстояния от центра отклоняющей системы до центраправляющей и до мишени. Для точного контроля коэффициента использовалась мишень из двух расположенных друг под другом на расстоянии 20 мм пластин с парой миллиметровых отверстий на каждой. Расстояния между отверстиями на каждой пластине совпадали. Критерием параллельности переноса было совпадение измеренного (в единицах тока отклоняющей системы) расстояния между отверстиями.

Далее следовал поиск реперов, калибровка по напряжению и измерения минимального размера сфокусированного пучка. Зачастую пучок был сильно астигматичным. Чрезвычайно существенным оказалось астигматичное воздействие паразитных магнитных полей, возникающих из-за остаточной намагниченности деталей, изготовленных из нержавеющей стали. В ряде случаев это приводило к увеличению минимального размера в несколько раз. Наиболее существен этот эффект вблизи анода из-за малого диаметра отверстия в нем, и в районе линзы, вероятно, из-за больших значений магнитных полей. Чтобы ослабить такое нежелательное влияние, детали электронно-оптической колонны подвергались контролю на магнитную проницаемость, апертуры были максимально увеличены, анодная диафрагма изготовлена из молибдена. Появление астигматизма неотклоненного пучка связано также с aberrациями в элементах ЭОС (неточность юстировки, неидеальность элементов). Основной вклад вносит, как правило, осевой астигматизм линзы: от 20 до 100 мкм (выделить его можно, измеряя изменение астигматизма при повороте линзы относительно всей колонны).

Полностью устранить астигматизм юстировкой и подбором материалов не удастся, поэтому частично он компенсируется выбором оптимального угла поворота линзы, а оставшаяся часть — стигматором.

Отметим, что для формирования нужного минимального размера достаточно точно должен быть выдержан диаметр пучка в линзе, а распределение плотности тока должно быть близко к одно-

родному. Поэтому при настройке проводился контроль этих параметров по распределениям плотности тока в несфокусированном пучке.

8.2. Смена катода

За время работы было использовано около 30 катодов. Как правило, причиной замены катода было снижение эмиссионных свойств после нескольких вскрытий его на атмосферу. Без вскрытий катоды работали от месяца до полугода (т. е. до тысячи часов). Несколько катодных узлов были сняты из-за появления утечек по катодному изолятору. Случаев выхода из строя подогревателей не было.

Для смены катода узел предварительно монтируется на диске (рис. 8.1, 3.10), выводы накала привариваются точечной сваркой к токоподводам, а эмитирующая поверхность визуально выставляется в центре отверстия в управляющем электроде. После вскрытия пушки диск с новым катодом устанавливается по посадке и закрепляется. В итоге воспроизводимость положения эмиттера в пушке около 0.2 мм.

После откачки и тренировки изолятора по достижению вакуума в пушке 10^{-4} Па включается накал. При напряжении накала 6 В катод прогревается в течение 15 минут. За это время давление, несколько повышающееся при включении накала, восстанавливается до прежнего уровня. Затем накал увеличивается до 7 В, подается высокое напряжение и подаются сигналы открывания пушки. Первоначально ток пушки не превышает долей миллиампера и медленно растет. К сожалению, выход на полный ток (6 мА) занимает пока значительное время: от смены до нескольких (8—30 часов).

8.3. Обработка

Первые образцы установки предназначены для прошивки отверстий в керамике. Соответствующее программное обеспечение состоит из двух программных модулей. Один из них обеспечивает подготовку данных для обработки, второй непосредственно управляет работой установки.

После включения установки происходит автоматическая загрузка ЭВМ с гибких дисков и перезапись на электронный диск операционной системы (RT-11SJ) программ и файлов данных. Вся дальнейшая работа идет с электронным диском. С помощью про-

граммы подготовки записываются данные о координатах требуемых отверстий. Затем запускается вторая программа. Она считывает параметры, подобранные при настройке (коэффициенты многочленов для вычисления токов отклоняющей системы, координаты реперных отверстий, коэффициент динамической фокусировки и т. д.), проверяет готовность установки к работе: положение шиберов, вакуум, напряжение, режим стабилизации, делает пробное нацеливание, измеряет ток пучка. При отсутствии отклонений от нормы дается разрешение на обработку. Оператор вводит требуемый ток фокусирующей линзы, длительность импульса, частоту, число выстрелов в одно отверстие, имя файла данных. Далее автоматически происходит нацеливание, вычисление требуемых токов всех элементов и обработка. В случае прошивки сквозных отверстий процесс обработки можно контролировать с помощью осциллографа по величине проходящего тока. При ухудшении давления в пушке выше 10^{-4} Па или при увеличении среднего тока пучка выше 1 мА срабатывает аналоговая схема защиты, отключающая высокое напряжение и накал.

Большая часть пробных обработок относилась к керамике 22ХС. По технологии, разработанной в НПО «Авангард», ее поверхность покрывалась перед обработкой графитом с органической связкой. Это снимало проблемы с зарядкой поверхности керамики и снижало прилипание расплавленных капель. При толщине пластины 0.5 мм обработка идет надежно. Пучок с током 6 мА и энергией 100 кВ, сфокусированный в диаметр 0.13 мм, пробивает такую керамику при длительности импульса 0.8 мс за один выстрел, однако заметная часть отверстий заплывает. При 5 выстрелах в одно отверстие надежность прошивки (доля полностью пробитых отверстий) составляет 99.99%. Обработка проводится на частоте 50 Гц.

После прошивки проводится отжигание керамики, при котором удаляется графитовое покрытие и с ним кольцевой наплыв вокруг отверстий. Отношение диаметров входного и выходного отверстий составляет примерно 1.2.

С увеличением толщины материала конусность отверстий растет (так же, как в [14]), а надежность прошивки падает. Это связано с самим механизмом обработки. Нетрудно оценить, что энергия, требуемая для прошивки отверстия, находится между необходимой для расплавления выносимого вещества и его испарения. Как отмечалось во многих работах (например, [1]), обработка происходит путем последовательных микровзрывов с выносом

вещества в жидком состоянии. Часть вещества остается в виде жидкости на стенках отверстия и при завершении выстрела стремится схлопнуться. Вероятность такого процесса растет с калибром (отношением длины отверстия к его диаметру). Заметное увеличение диаметра пучка неприемлемо как с точки зрения технологии, так и из-за падения плотности мощности в пятне обработки. Для указанных выше параметров пучка при увеличении диаметра пятна выше 0.15 мм эффективность обработки резко падает. Поэтому предельная толщина керамики, обрабатываемой в нашей установке, по-видимому, 1 мм. Надежность прошивки практически не меняется при увеличении числа выстрелов выше 10 в одно отверстие и составляет 99.5%. Для многих задач такая надежность неприемлема. Была сделана попытка повысить эффективность обработки, контролируя с помощью ЭВМ величину токопрохождения в конце последнего выстрела и продолжая прошивку при малом прохождении. Ситуация, однако, изменилась слабо. Такой критерий оказался недостаточным: заплавление отверстия может происходить и после выстрела. По-видимому, более эффективно контролировать наличие отверстия импульсами малой длительности, не приводящими к расплавлению, и затем прочищать длинным выстрелом обнаруженные дефекты.

Другая проблема при обработке миллиметровой керамики — вакуум. Вынос вещества настолько велик, что производительность насоса НОРД-100 недостаточна, и давление в пушке повышается. В итоге снижается эмиссия. Этот эффект ограничивает возможную частоту выстрелов величиной 25 Гц.

Вынос расплавленного вещества приводит к снижению надежности при прошивке близко расположенных отверстий (менее 0.5 мм). В этом случае более эффективным оказывается обрабатывать все отверстия с многократным повторением обходов в соответствии с выбранным числом импульсов на отверстие.

Примерно также идет обработка других сортов керамики, кварца. При обработке металла эффекты заплавления выражены заметно сильнее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы:

1. Создана электронно-лучевая технологическая установка, позволяющая проводить в вакууме размерную обработку различных материалов. В частности, возможна прошивка отверстий диамет-

ром 0.1—0.15 мм в керамике толщиной до 1 мм на площадке 60×48 мм.

2. Разработаны два варианта оптики пушки, позволяющие формировать пучок с эмиттансом, близким к минимально возможному — тепловому.

3. Определены факторы, ограничивающие минимальный размер пучка на мишени, и оптимизирован размер пучка в фокусирующей линзе.

4. Исследовано влияние компенсации пространственного заряда пучка в течение импульса тока на процесс прошивки отверстия. Указан простой способ уменьшения отрицательных проявлений этого эффекта.

5. Разработаны варианты электронно-оптических систем, позволяющие осуществить параллельный перенос пучка с высокой плотностью мощности по площадке в несколько десятков квадратных сантиметров. Проведено сравнение схем с выправляющим элементом в виде магнитной линзы и дополнительной отклоняющей системы.

6. Разработаны методики определения размеров и формы пучка с высокой плотностью мощности, его положения относительно изделия, энергии электронов.

Авторы благодарят Ю.В. Гуркова, В.Н. Дмитриеву, Б.П. Ковалева, Н.В. Пароль, Н.А. Иофиса, Ю.М. Хашеватского за предоставленные катодные узлы, Т.Н. Андрееву за помощь в численных расчетах, С. Дужникова, Р.М. Лапика, П.И. Немытова, В.К. Овчара, Ю.И. Ощепкова за разработку электроники, С.Б. Горячева и С.И. Дагман за участие в конструкторских разработках, В.С. Зиновьева за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. — М.: Энергия, 1980, 528 с.
2. Горнаков И.В., Мешков И.Н., Немытов П.И., Оленьков А.Н., Шарапа А.Н., Шемякин А.В. Шестое Всесоюзное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Тез. докл. — Л., 1988, с.87-88; Вопросы авиационной науки и техники, сб., ч.1. Сер. «технология авиационного приборо- и агрегатостроения». — Саратов, 1988, вып.2, с.12—13.
3. Кельман В.М., Явор С.Я. Электронная оптика. Л.: Наука, 1968, 485 с.
4. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. — М.: Советское радио, 1966, 456 с.
5. Пирс Дж.Р. Теория и расчет электронных пучков. — М.: Советское радио, 1956.

6. *Кирштейн П.Т., Кайно Г.С., Уотерс У.Е.* Формирование электронных пучков. М.: Мир, 1970, 600 с.
7. *Жигарев А.А.* Электронно-лучевые приборы. — М.-Л.: Энергия, 1965.
8. *Бонштедт Б.Э., Маркович М.Г.* Фокусировка и отклонение пучков в электронно-лучевых приборах. — М.: Советское радио, 1967, 270 с.
9. *Бахрах Л.Э., Медокс В.Г.* Радиотехника и электроника, 1962, т.7, вып.1, с.120—125.
10. *Васьков С.Т., Мамонтов Г.М., Поташиников А.К., Ткач С.Е.* Сканирующие устройства на ЭЛТ высокого разрешения. — Новосибирск: Наука, 1978, 136 с.
11. *Чанг, Хатцакис, Уилсон, Броэрс.* Электроника, 1977, т.50, № 10, с.24—37
12. *Boston M.E.* Welding and Metal Fabrication, 1965, v.33, N 9, p.336—371.
13. *Андреева Т.Н., Мешков И.Н., Шарана А.Н., Шемякин А.В.* Труды 13 Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Новосибирск, 1986, с.351—352.
14. *Зиновьев В.С.* Электронная техника, сер.7, 1983, Вып.2(17), с.15—18. Вопросы радиоэлектроники, сер. Технология производства и оборудование, 1983, вып.3, с.104—113.

Содержание

Введение	3
1. Общее описание установки	4
1.1. Электронно-оптическая колонна	5
1.2. Технологическая камера	7
1.3. Вакуумная система	7
1.4. Высоковольтный источник	8
1.5. Система управления	9
2. Экспериментальные методики	10
3. Электронная пушка	15
3.1. Эксперименты с различными типами катодов	16
3.2. Варианты оптики пушки	18
3.3. Пушка на основе модифицированного узла КПУ-45	24
3.4. Условия надежной эмиссии металлопористого катода	27
4. Формирование минимального размера пучка	30
4.1. Оценки минимального размера	30
4.2. Измерения минимального размера	32
4.3. Эффекты компенсации пространственного заряда пучка	34
5. Отклонение пучка	38
5.1. Искажение размеров пучка при отклонении	38
5.2. Позиционирование пучка	40
6. Параллельный перенос пучка по мишени	44
6.1. ЭОС с дополнительной отклоняющей системой	44
6.2. Система с дополнительной магнитной линзой	46
7. ЭОС с магнитным сопровождением	49
8. Эксплуатация установки	52
8.1. Настройка установки	52
8.2. Смена катода	56
8.3. Обработка	56
Заключение	58
Литература	59

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

**Технологическая
электронно-лучевая установка
для размерной обработки материалов**

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 6.12.1989 г.
Подписано в печать 28.12.1989 г. МН 10618
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 3,7 печ.л., 3,0 уч.-изд.л.
Тираж 230 экз. Бесплатно. Заказ № 179

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*