



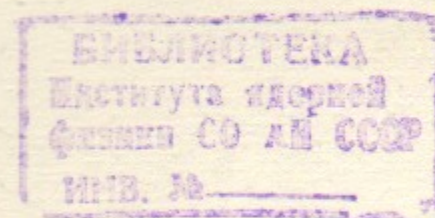
A.91
1985

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

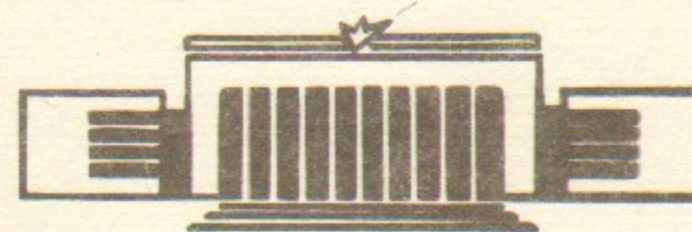
48

В.Т.Астрелин

РАСЧЕТ ИСТОЧНИКОВ
СИЛЬНОТОЧНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ
ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ
ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



ПРЕПРИНТ 84-94



НОВОСИБИРСК

Методами численного моделирования решается задача расчета бесфольговых диодов для формирования электронных пучков с токами до 100 кА, энергией 1 МВ во внешнем магнитном поле, имеющих малый эмиттанс. Рассматриваются системы с холодными и подогретыми катодами.

Одним из исследуемых способов нагрева плазмы в открытых системах является нагрев с помощью мощных электронных пучков. Перспективность использования электронного пучка для этой цели была показана в экспериментах на установках ИНАР и ГОЛ-1 [1]. В этих экспериментах электронный пучок с малым угловым разбросом $\langle \theta^2 \rangle^{1/2} < 0.1$ рад теряет в плазме значительную долю своей энергии $\Delta Q/Q_0 \sim 30-35\%$. Эксперименты проводились с пучком, имеющим сравнительно небольшой энергозапас $Q_0 \sim 1$ кДж. Для нагрева плазмы до субтермоядерных температур в открытых системах необходимо увеличить энергию пучков до 1 МДж и более. Создание пучков с таким энергозапасом позволит, в частности, проверить принцип стеночного удержания плазмы в многопробочной ловушке и справедливость законов подобия для него [2]. С этой целью в ИЯФ СО АН СССР проектируется установка ГОЛ-3 со следующими параметрами: средний диаметр плазменного столба 6 см, длина 20 м, магнитное поле 60 кЭ, пробочное отношение ~ 2 , количество пробкотронов ~ 30 . Температура и плотность плазмы составят $T \sim 1$ кэВ и $n_0 \sim 10^{17}$ см $^{-3}$, соответственно.

Предполагается реализовать двухступенчатый нагрев плазмы: область взаимодействия пучка с плазмой с плотностью $n \sim 10^{15}$ см $^{-3}$ расположена между областями плазмы $n_0 \sim 10^{17}$ см $^{-3}$, предназначенными для транспортировки пучка электронов. При взаимодействии пучка с плазмой низкой плотности энергия пучка передается, в основном, в ускорение «хвоста» функции распределения электронов плазмы до энергий порядка 10 кэВ. При торможении этих электронов на кулоновских столкновениях в плотной плазме происходит ее разогрев до температуры $T \sim 1$ кэВ.

Для реализации такой схемы предполагается сформировать электронный пучок со следующими параметрами: энергией 1 МэВ, током до 100 кА, длительностью 10 мксек и диаметром, не превышающим 6 см. Угловой разброс электронов пучка по скоростям не должен превышать 0.1 рад. В настоящей работе рассматриваются вопросы формирования пучка с такими или приближающимися к ним параметрами и приведены результаты расчета различных вариантов диодных узлов ускорителей РЭП. Часть расчетов была проведена по программе КСИ-БЭСМ [3], модифицированной для корректного учета азимутального магнитного поля пучка [4]. Основная часть расчетов проводилась с использованием пакета прикладных программ POISSON-2 [5]. Результаты расчетов использовались для анализа и последующих изменений с целью получения необходимых параметров пучка. Ниже будут приведены не только окончательные, но

и промежуточные расчеты для возможности их использования при конструировании диодов различных типов.

ДИОДЫ С ВЗРЫВОЭМИССИОННЫМИ КАТОДАМИ

Рассмотрим диодный узел ускорителя с холодным катодом. При больших плотностях электронного тока на катоде возникает плазма, эмиттирующая электронный поток. Плотность потока ограничивается пространственным зарядом электронов. На формирование пучка оказывают влияние следующие эффекты:

1. Наличие собственного азимутального магнитного поля пучка приводит к тому, что полное магнитное поле в системе направлено под углом к электрическому полю в зоне ускорения электронов;
2. При наличии в аноде выпускного отверстия для пучка могут возникать электронно-оптические эффекты, связанные с образованием рассеивающей электростатической линзы;
3. Оптика и импеданс диода могут изменяться со временем вследствие расширения катодной плазмы;
4. Длительность пучка ограничивается временем закорачивания диодного зазора катодной (и анодной, возникающей при попадании пучка на анод) плазмой;

Первые три эффекта могут приводить к появлению углового разброса скоростей электронов относительно силовых линий магнитного поля. Величину и характер углового разброса в пучках можно определить методами численного моделирования. Ниже приводятся результаты численного расчета диодов с взрывоэмиссионными катодами большого диаметра.

Рассматривается кольцевой диод с диаметром катода $2R_k = 210$ см и шириной 3 см, находящийся в однородном магнитном поле $H = 3.4$ кЭ. Анод представляет собой две кольцевые пластины толщиной 1 см с щелью между ними шириной 4 см. Разность потенциалов электродов диода составляет 1 МВ.

Счетные параметры: число траекторий пучка — 16, сетка для расчета потенциалов и объемного заряда 80×81 интервалов, кусочно-равномерная, количество итераций — около 20.

В I варианте рассматривается плоский эмиттер, шириной 3 см, выступающий на 1 мм над скруглением с радиусом 5 мм (рис.1). Расстояние до анода 4.5 см. Получен установившийся ток катода $I_k \sim 210$ кА. Результат траекторного анализа и распределение плотности тока по радиусу показаны на рис. 1 и 2. Угловой разброс край-

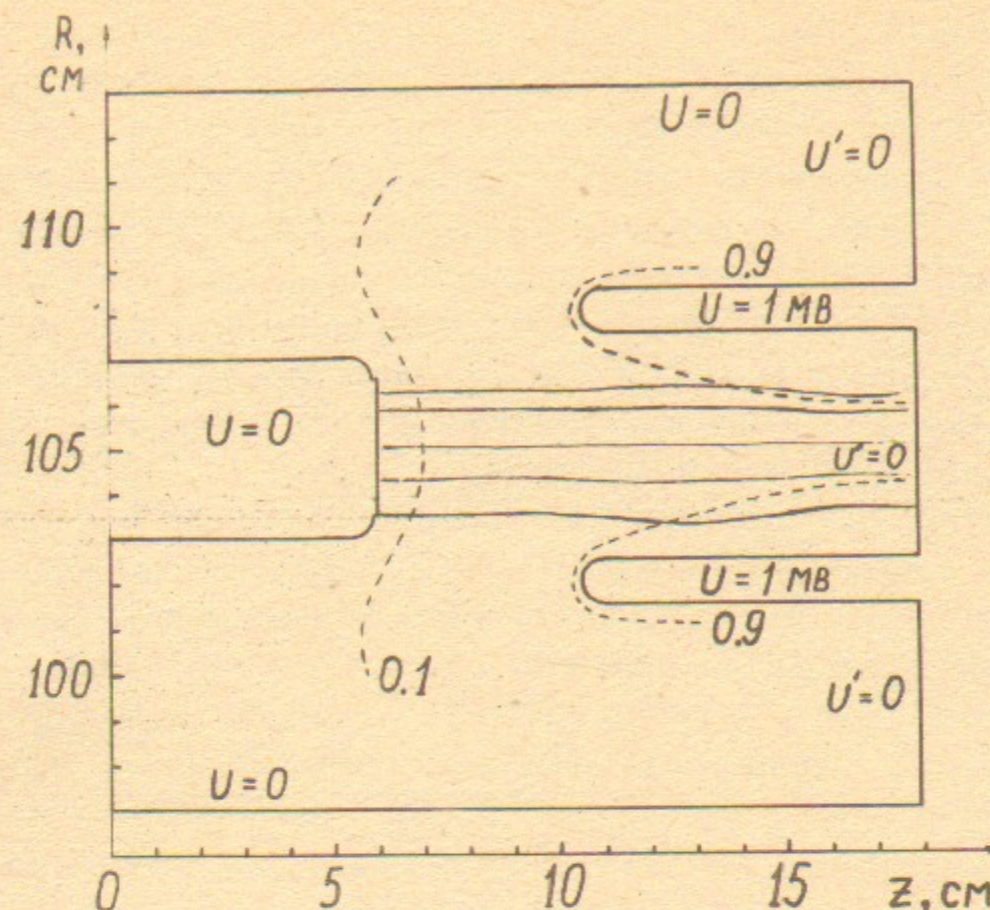


Рис.1

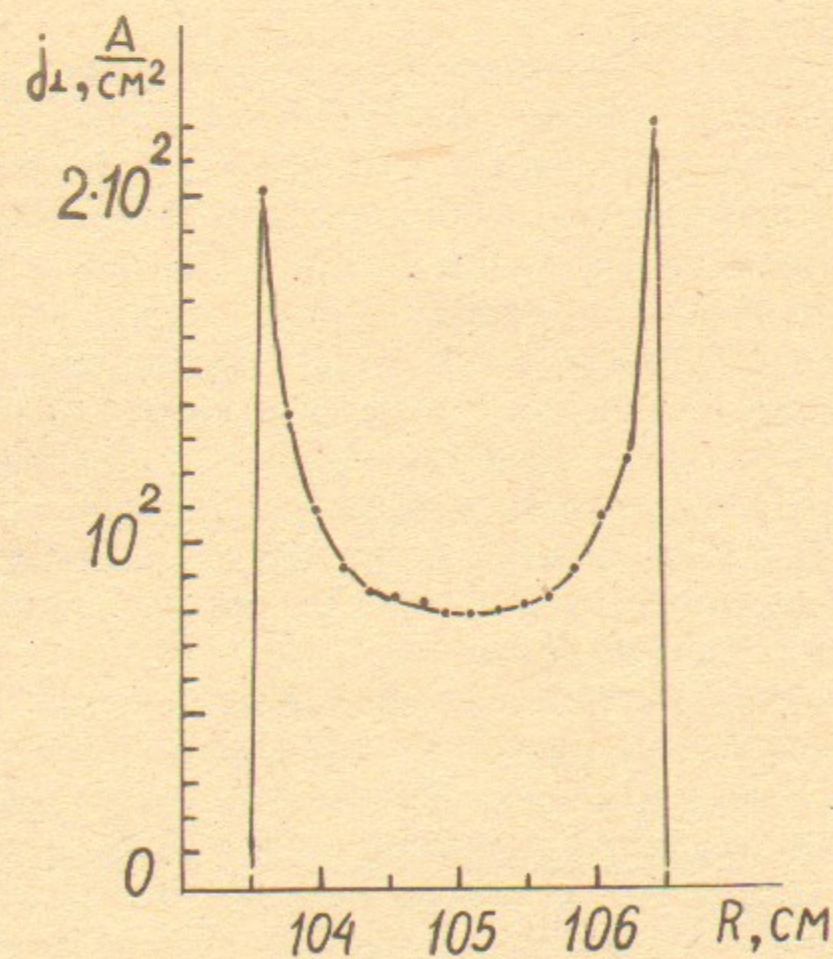


Рис.2

них траекторий (точнее, питч-углы, т.е. углы между векторами скорости и магнитного поля) достигает 0.1 рад. Плотность тока максимальна на краях пучка. Отметим, что локализовать эмиссию тока на плоском участке катода можно, например, покрыв его поверхность острыми. На рис.1 пунктиром приведены также отдельные эквипотенциальные кривые. Из них можно получить напряженности электрических полей на поверхностях скруглений катода и анода. Они составляют 190 кВ/см и 650 кВ/см, соответственно. Очевидно, напряженность поля на катоде недопустимо велика. Поэтому в следующем варианте этот участок был устранен.

В варианте II эмиттирующая поверхность имеет форму полукруга. Ток катода составляет также 210 кА. Результат приведен на рис. 3 и 4. Плотность тока по радиусу стала более однородной (заметим, что на рисунках приводится плотность тока j_{\perp} , нормального к поверхности катода, то есть истинная плотность тока на периферии пучка в поперечном его сечении больше этого значения). Питч-углы крайних траекторий возросли до 0.2 рад. Напряженность поля на анодных кромках сохранилась высокой. Как видно из рис.3, крайние траектории пучка проходят в непосредственной близости от поверхности анода. Для уменьшения их плотности тока произведена дальнейшая деформация формы катода.

В варианте III участок эмиттирующей поверхности в сечении имеет форму отрезка параболы $(R-R')^2 = -A(Z-Z')$, где $R' = 105$ см, $Z' = 6$ см, $A = 1$ см. Получен ток катода 190 кА. Из рис.5 и 6, где показаны результаты расчета, видно, что угловой разброс крайних траекторий еще более возрос до 0.2—0.3 рад. Плотность тока максимальна в середине пучка, где угловой разброс также велик—0.1 рад.

Из сравнения рисунков 1, 3 и 5 видно, что угловой разброс по скоростям изменяется при изменении формы катода следующим образом: для выпуклых катодов он приобретает, в основном, в прикатодной области, для плоского катода—на анодной электростатической линзе. При рассмотренных значениях магнитного поля и плотности тока эмиссии угловой разброс скоростей электронов в пучке оказывается недопустимо большим.

Для улучшения характеристик диода воспользуемся тем обстоятельством, что полученный расчетный ток диода превышает требуемое значение в 2 раза и изменим геометрию диода следующим образом. Большой радиус катода уменьшим до $R = 50$ см, а малый радиус—до 1 см. Диодный зазор увеличим до 8 см. Это должно привести к уменьшению полного тока диода при увеличении плотности тока электронной эмиссии. Внешнее магнитное поле увеличим для уменьшения скорости распространения катодной плазмы поперек магнит-

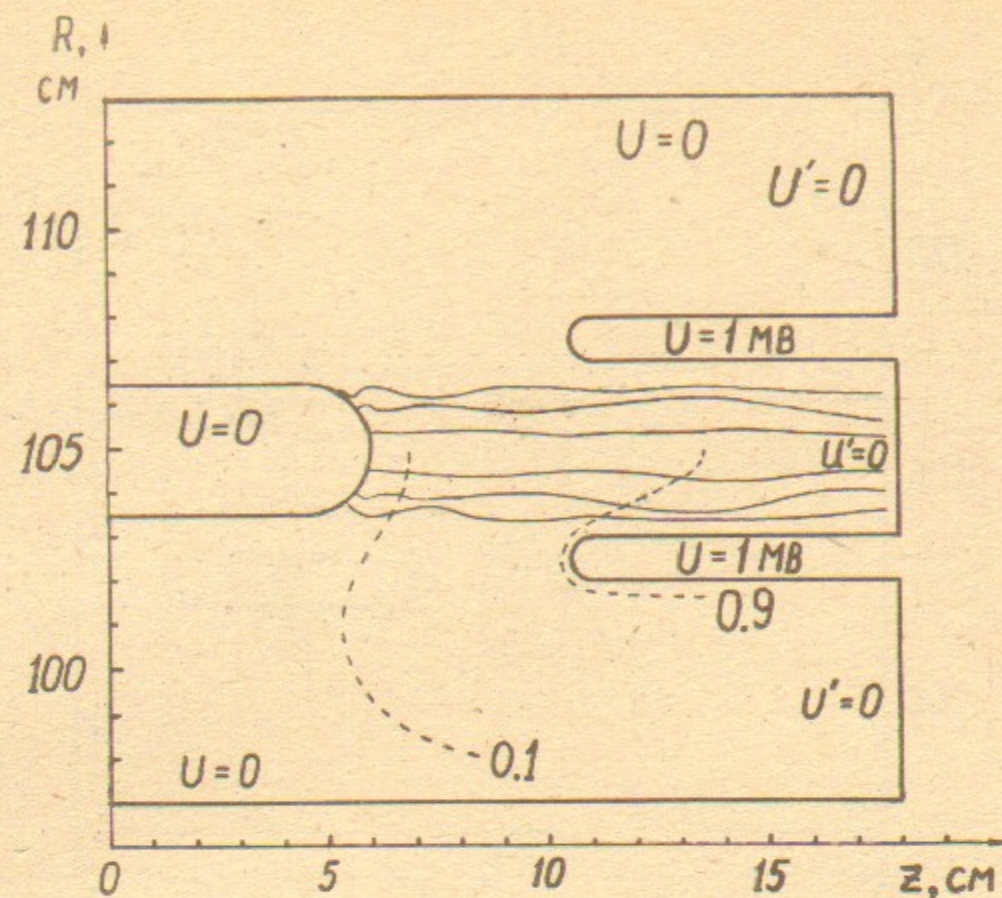


Рис.3

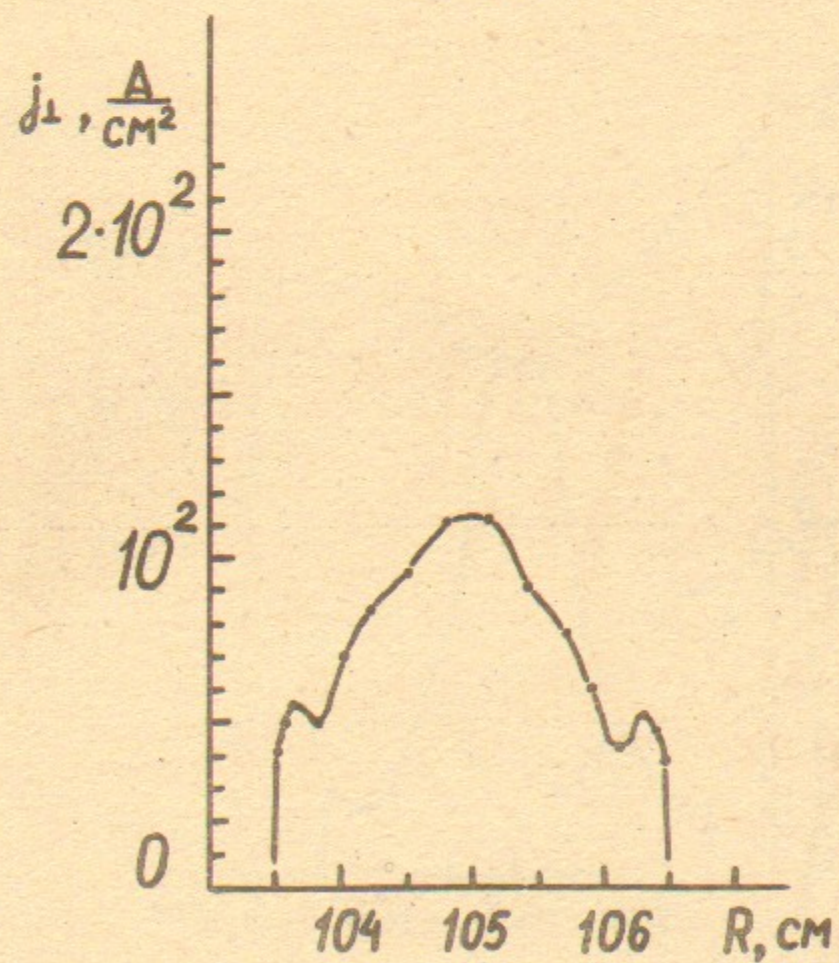


Рис.4

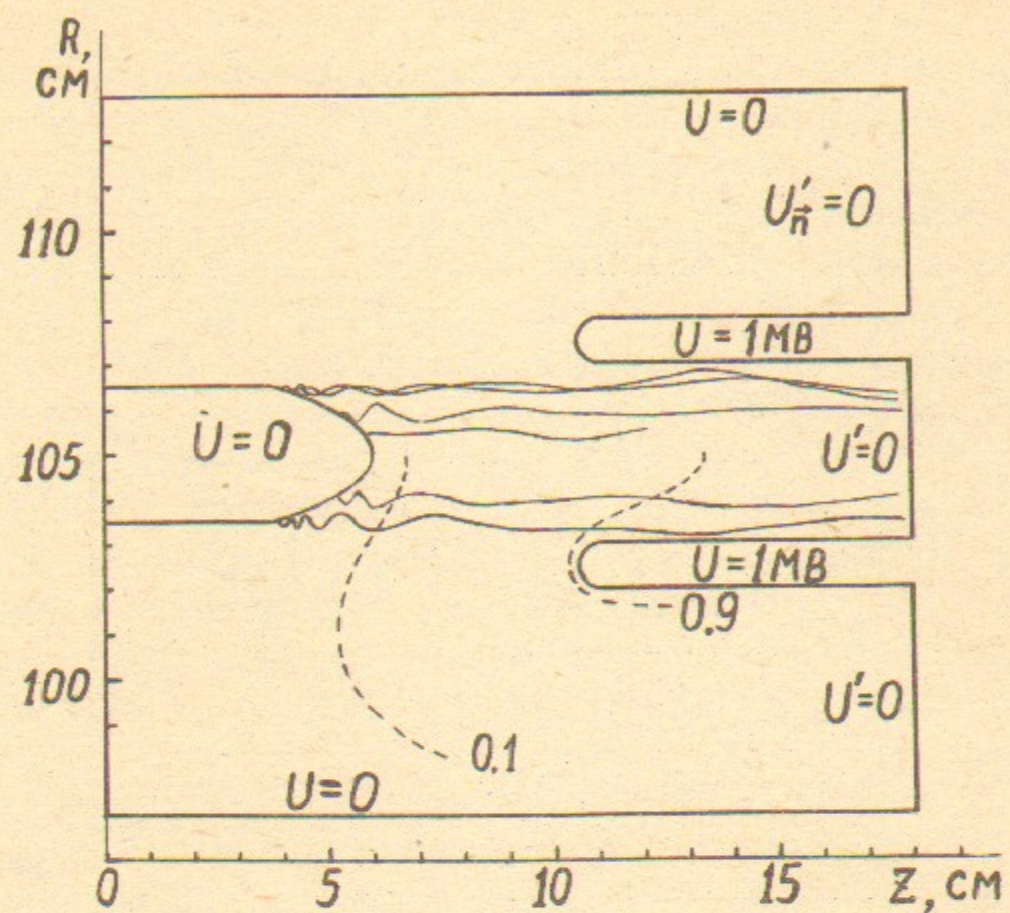


Рис.5

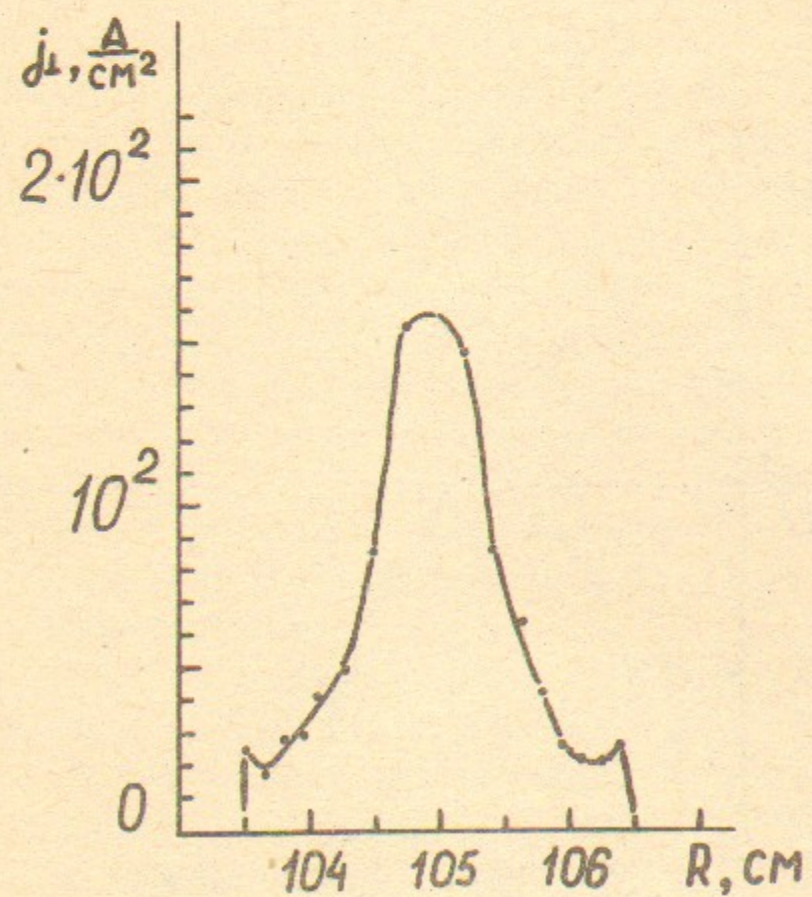


Рис.6

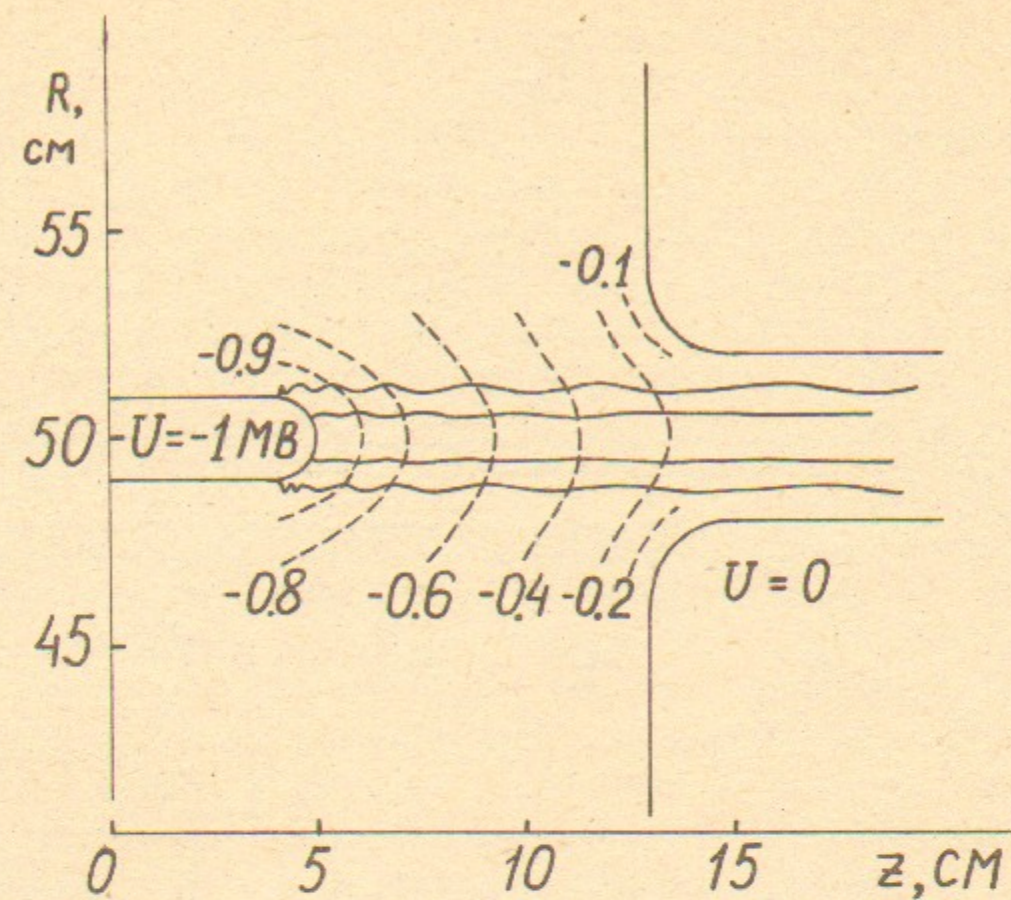


Рис.7

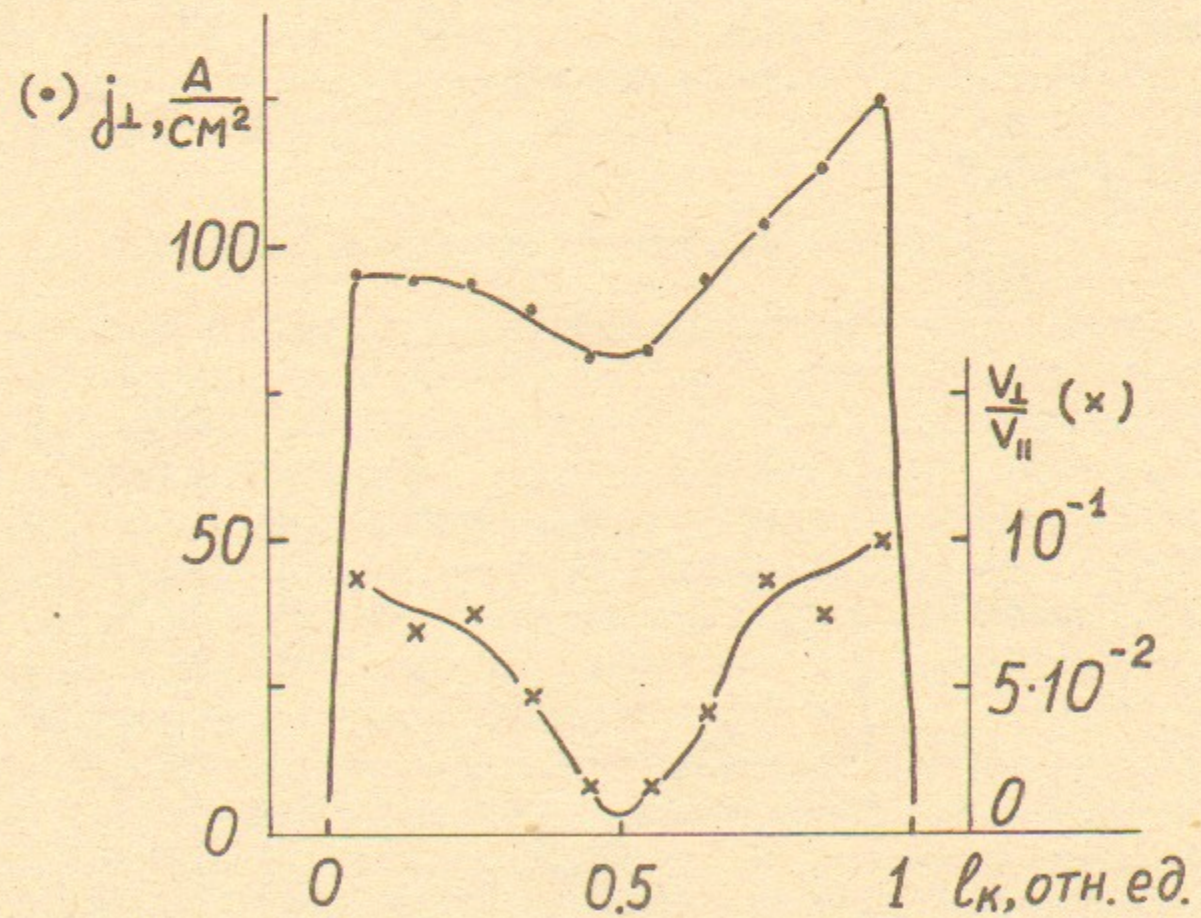


Рис.8

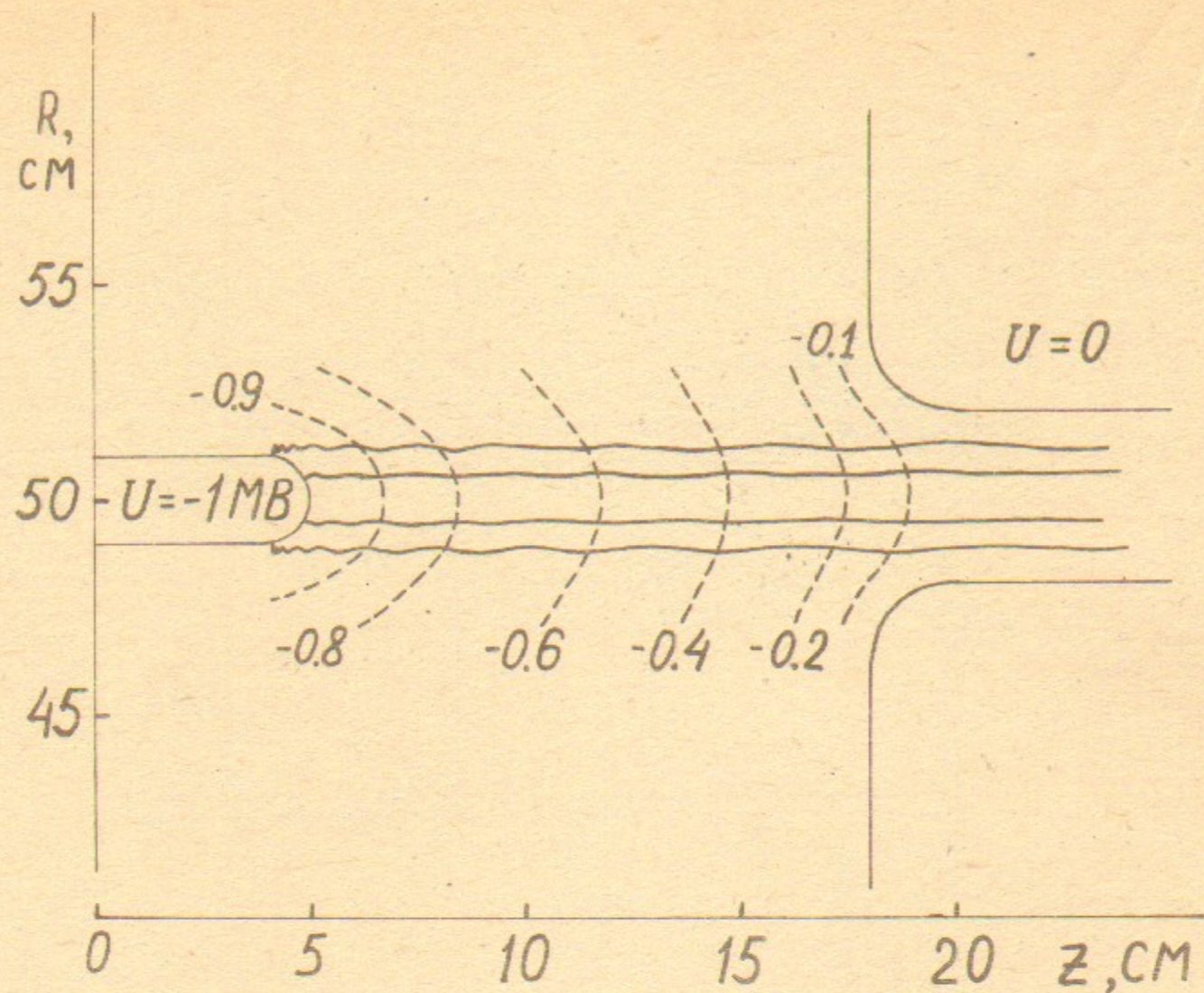


Рис.9

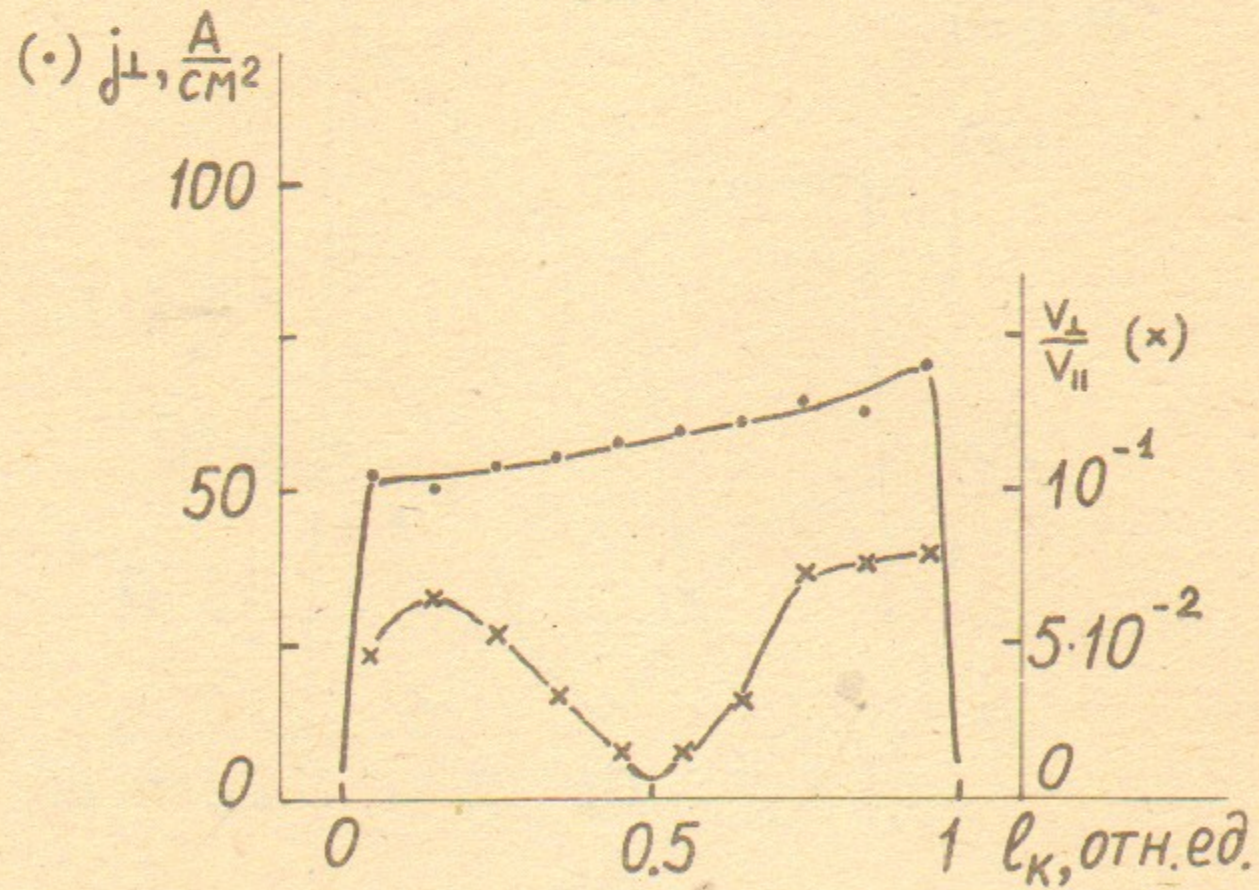


Рис.10

ного поля и углового разброса электронов до 6 кэ. Соответствующая геометрия диода (вариант IV) показана на рис.7. Здесь потенциал катода составляет $U = -1000$ кВ, анод заземлен. Распределение плотности тока по длине катодной поверхности приведено на рис.8. Там же приведены пич-углы, полученные для соответствующих траекторий в анодном зазоре. Полный ток диода составил ~ 90 кА, максимальный угловой разброс не превышает 0.1 рад для крайних траекторий, что значительно меньше, чем в варианте II. Максимальная напряженность электрического поля на поверхности анода составляет ~ 200 кВ/см.

При полученной плотности тока ~ 100 А/см² возникновение катодной плазмы будет приводить к изменению геометрии диода и уменьшению импеданса. Для увеличения длительности работы диода можно увеличить диодный зазор, что должно привести к уменьшению начальной плотности тока и скорости нарабатывания плазмы. Результаты расчета варианта V с увеличенным зазором приведены на рис.9, 10. Плотность тока уменьшилась до ~ 50 А/см², полный ток диода составил ~ 55 кА. Напряженность электрического поля на аноде достигает ~ 150 кВ/см.

Варианты IV и V диодов с взрывоэмиссионными катодами могут рассматриваться далее в плане экспериментального исследования для определения изменения импеданса во времени, времени закорачивания диода и динамики катодной плазмы.

ДИОДЫ С ТЕРМОЭМИССИОННЫМИ КАТОДАМИ

Альтернативой рассмотренному выше варианту может быть путь в сторону уменьшения плотности тока на катоде за счет увеличения размеров катода и последующего сжатия пучка в магнитном поле. Уменьшение плотности тока позволит перейти к термоэмиссионным катодам. В этом случае значительно облегчаются условия работы катода: уменьшение напряженностей электрического поля на поверхностях позволит устранить появление плазмы на электродах и повысит надежность системы. Диоды такого типа более перспективны в плане увеличения длительности пучка.

При этом существенно возрастает сложность изготовления катода, обеспечения равномерной эмиссии электронов с его поверхности, возникает необходимость обеспечения его энергетике. Жесткие условия предъявляются к оптике ускорительного тракта, который должен обеспечивать малый угловой разброс по скоростям в полном диапазоне изменения потенциала катода.

Можно показать, что при увеличении радиуса катода R_k вариант кольцевого катода предпочтительнее сплошного, поскольку для него характеристики углового разброса возрастают в меньшей степени, чем для сплошного. В этом случае полная схема получения пучка выглядит следующим образом: кольцевой катод (плоский, или имеющий форму сегмента тора) в магнитном поле, ускорительная структура, обеспечивающая малый угловой разброс электронов пучка и участок фокусировки пучка. Магнитное поле источника обеспечивает формирование и компрессию пучка с возможно более полным использованием магнитного потока. Для его создания используются как активные, так и пассивные элементы (токовые витки и вытеснители магнитного поля на основе скин-эффекта). Ослабления резонансных эффектов, связанных с ларморовским вращением электронов в магнитном поле, можно добиться, сформировав силовые линии магнитного поля вдоль траекторий электронов (или близкими к ним, по крайней мере, для наибольших значений потенциалов катода).

Оценим габариты источника пучка. Для получения на выходе пучка с током 100 кА, радиусом 3 см, в магнитном поле 100 кЭ при плотности тока на катоде 50 А/см^2 надо использовать катод с площадью 2000 см^2 в магнитном поле $\sim 1.4 \text{ кЭ}$. Для катода радиусом 100 см ширина его должна составлять около 3 см. Дальнейшее увеличение радиуса катода делает его неудобным для использования. Уменьшение радиуса нецелесообразно, так как сопровождается уширением катода, затрудняющим обеспечение равномерности его нагрева, и возрастанием величины магнитного поля пучка H_0 .

Приводимая ниже серия расчетов относится к случаю простого (содержащего только катодный и анодный электроды) диода в однородном магнитном поле. Радиус плоского катода 100 см, ширина 3 см, величина магнитного поля 1000 э. Параметры счета [5]: число узлов разбиений поверхности—89, число узлов гауссовских квадратур при интегрировании по каждому разбиению—6, сетка полей и пространственного заряда содержит 20×31 интервалов по R и Z , 20 траекторий (токовых трубок), шаг интегрирования траекторий методом Рунге-Кутты 3 порядка—0.2 шага сетки, коэффициент релаксации тока траекторий—0.2, число итераций до установления тока и формы траекторий—9—10.

Приведем здесь же приемлемые для реализации условия работы диода. Величина «рабочего» значения плотности тока с катода в квазистационарном режиме $j_{\perp} \leq 20 \text{ А/см}^2$, в режиме с длительностью пучка $t \lesssim 1 \text{ мкс}$ потребуем $j_{\perp} \leq 50 \text{ А/см}^2$. Напряженность электрического поля вблизи поверхности катода и на электродах вблизи пучка не должна превышать 30—40 кВ/см, вдали от пучка на электродах и

по поверхности изоляторов не более 60 кВ/см.

На рис.11 и 12 приведены геометрия и результаты расчета для диода с диодным зазором 5 см. Полный ток системы составил 137 кА. Напряженности на фокусирующих электродах превышают 300 кВ/см, что явно недопустимо. Плотность тока катода $\sim 70 \text{ А/см}^2$ превышает возможности большинства типов подогревных катодов [6]. На рис.11 наблюдается влияние двух эффектов: возникновения начального угла из-за наличия азимутального магнитного поля $H_0 \sim 280 \text{ Э}$, проявляющегося в синхронных осцилляциях траекторий относительно силовых линий магнитного поля и влияния анодной электростатической линзы, приводящей к рассеянию траекторий пучка. Часть пучка попадает на внутреннюю поверхность анодного электрода. Угловой разброс по скоростям относительно силовых линий полного магнитного поля составляет $V_{\perp}/V_{\parallel} \sim 0.16—0.23$. Распределение плотности тока по поверхности катода (рис.12) близко к однородному. Отметим, что наблюдаемые на рис.12 колебания тока связаны с дискретностью модели: с дискретностью объемного заряда и разбиения поверхности электродов на отрезки, в узлах которых вычисляется плотность поверхностных зарядов. Величина этих колебаний характеризует локальную точность вычисления $j_{\perp}(R)$.

Рассматриваемый вариант диода неудовлетворителен из-за большой напряженности электрического поля на поверхности фокусирующих электродов и большого углового разброса электронов по скоростям.

В следующем варианте диодный зазор увеличен до 7 см. Полученный ток диода составляет 87 кА, угловой разброс $\sim 0.11—0.23$ несколько уменьшился, но остался недопустимо большим, так что пучок продолжает попадать на анодный электрод. Напряженность поля на фокусирующем и анодном электродах превышает 200 кВ/см.

Расчеты простых диодов, состоящих из катодного и анодного электродов, показывают, что в таких системах ограничение на напряженность электрического поля на поверхности фокусирующих электродов не допускает увеличения плотности тока до требуемых значений. Это приводит к необходимости увеличить эмиттирующую поверхность катодного электрода с соответствующим уменьшением значения внешнего магнитного поля на катоде (вытекающего из условия сохранения потока Φ вдоль пучка). А это, в свою очередь, приводит к усилению влияния собственного азимутального магнитного поля пучка и к ухудшению условия адиабатичности траекторий при переходе от области однородного магнитного поля к области сжатия пучка. Кроме того, для уменьшения объема транспортного канала, можно произвести предварительную компрессию пучка в ускоритель-

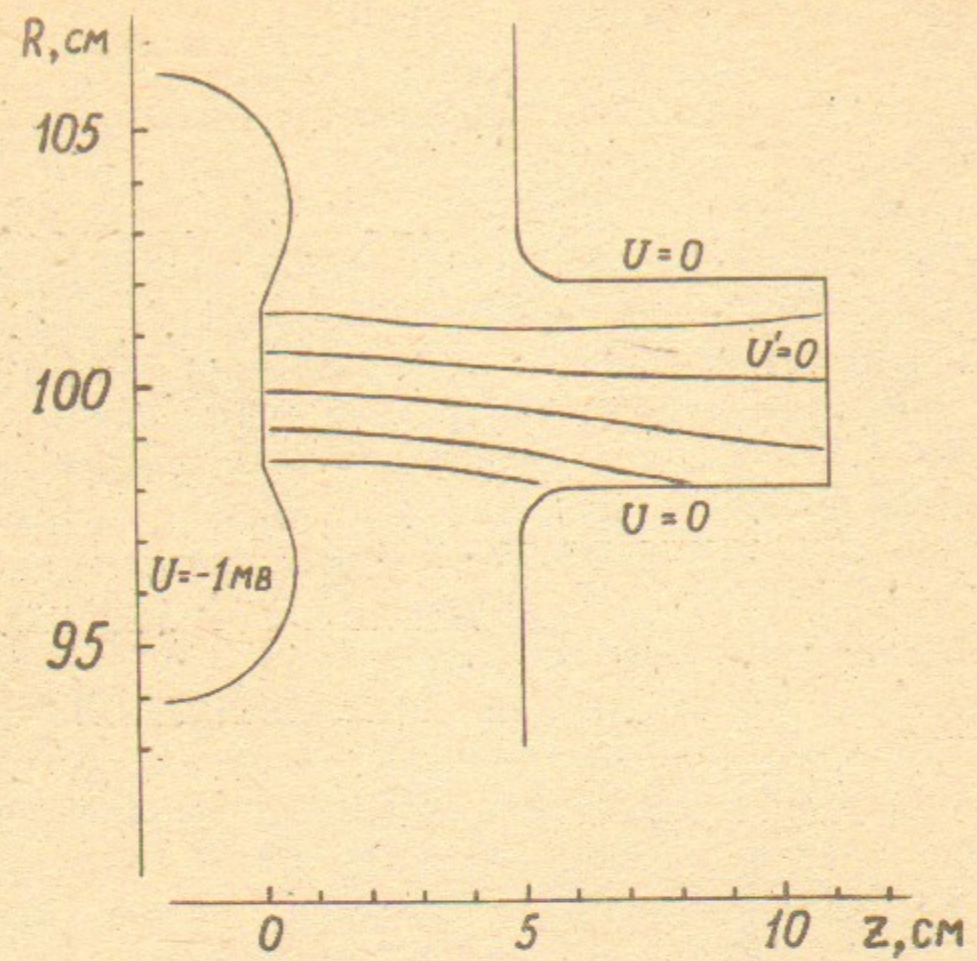


Рис.11

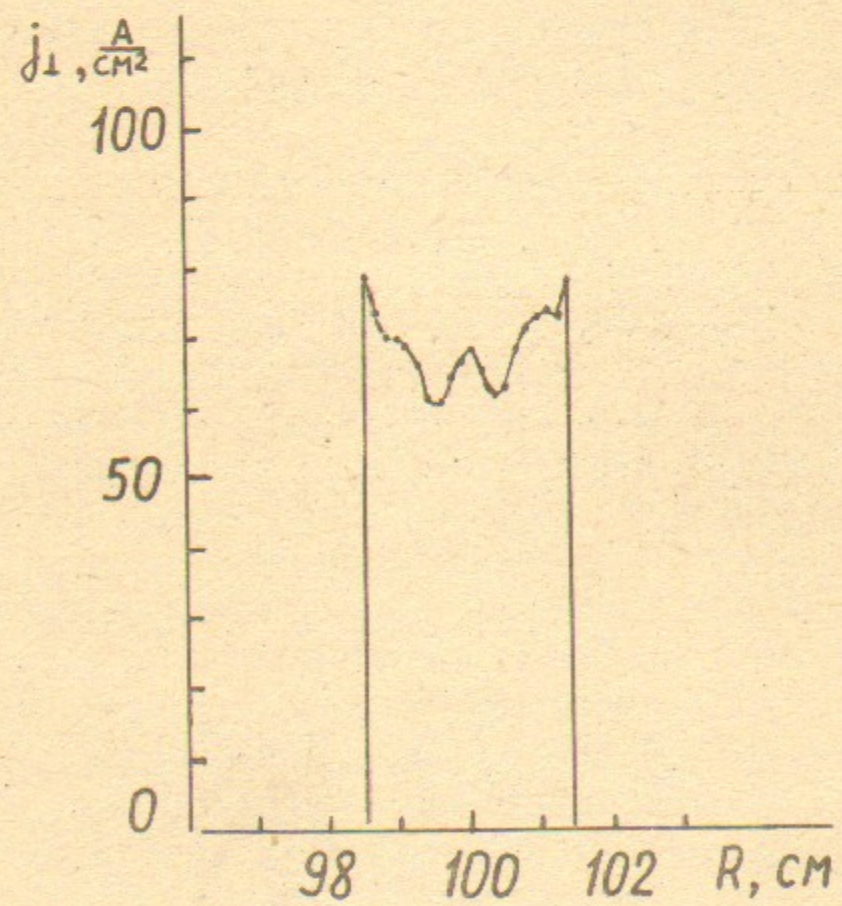


Рис.12

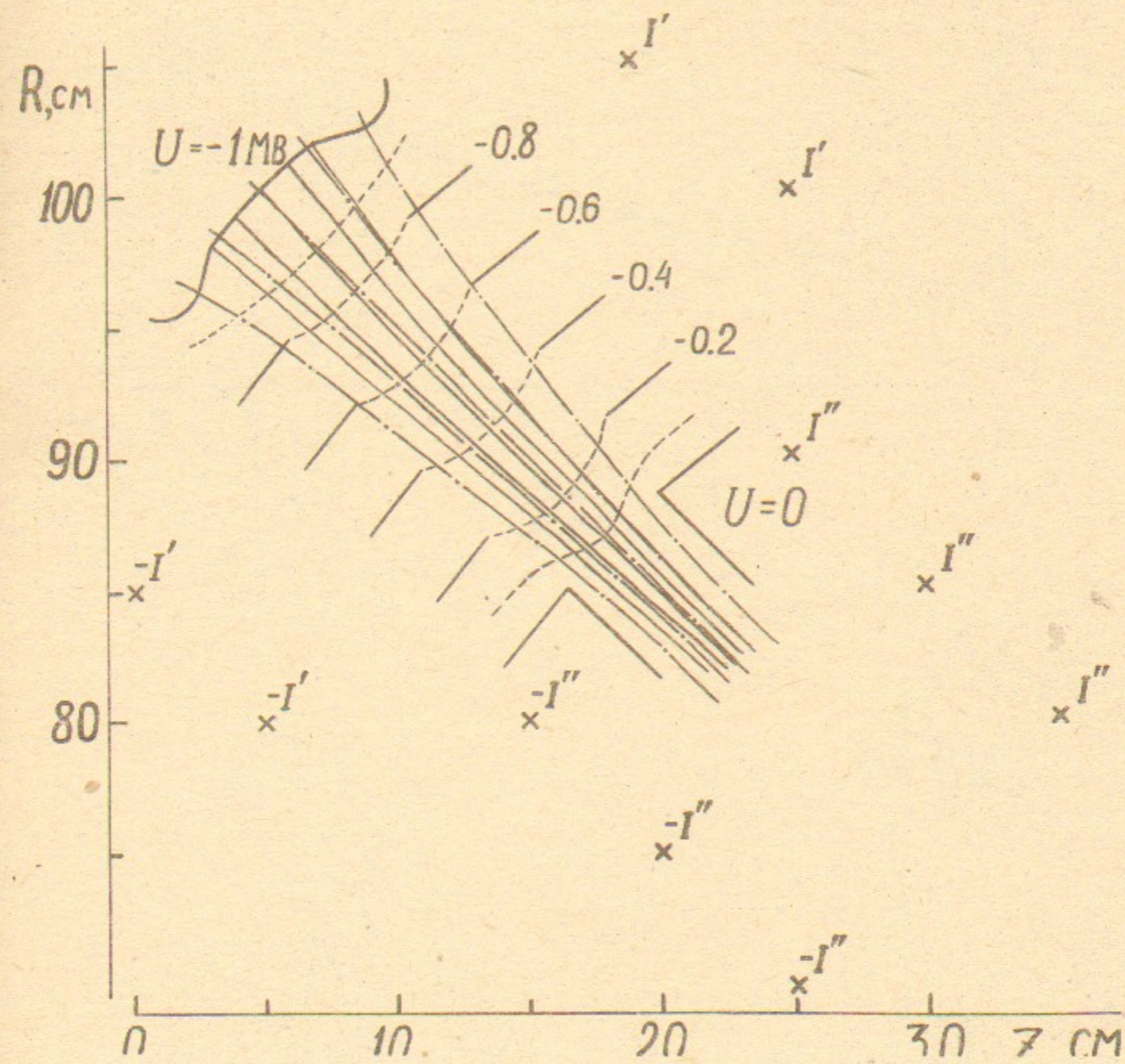


Рис.13

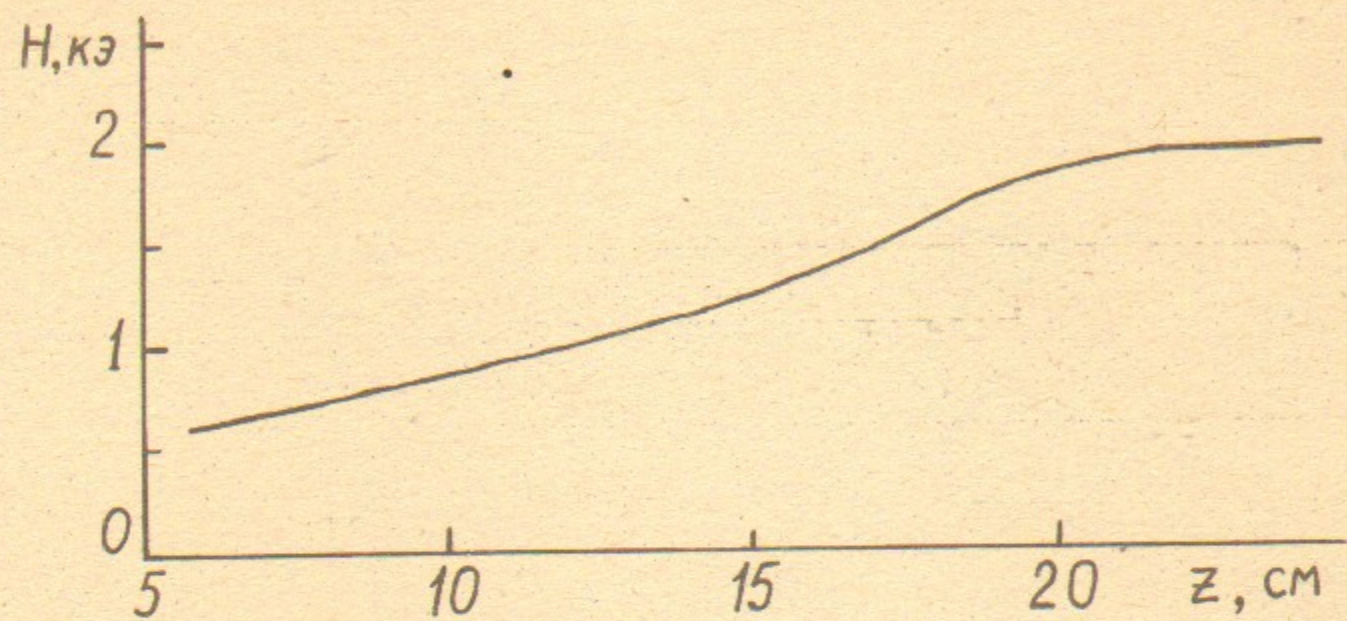


Рис.14

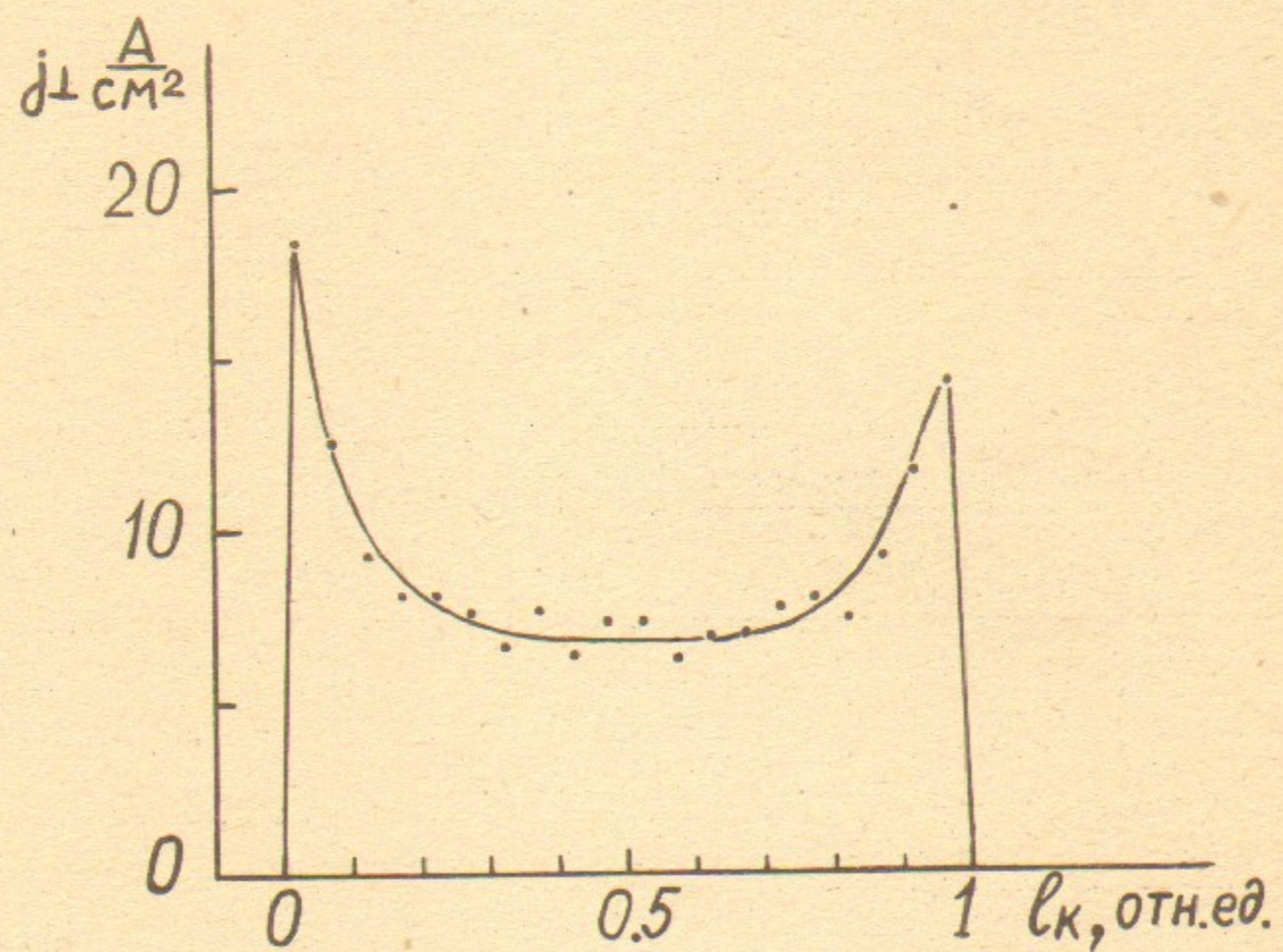


Рис.15

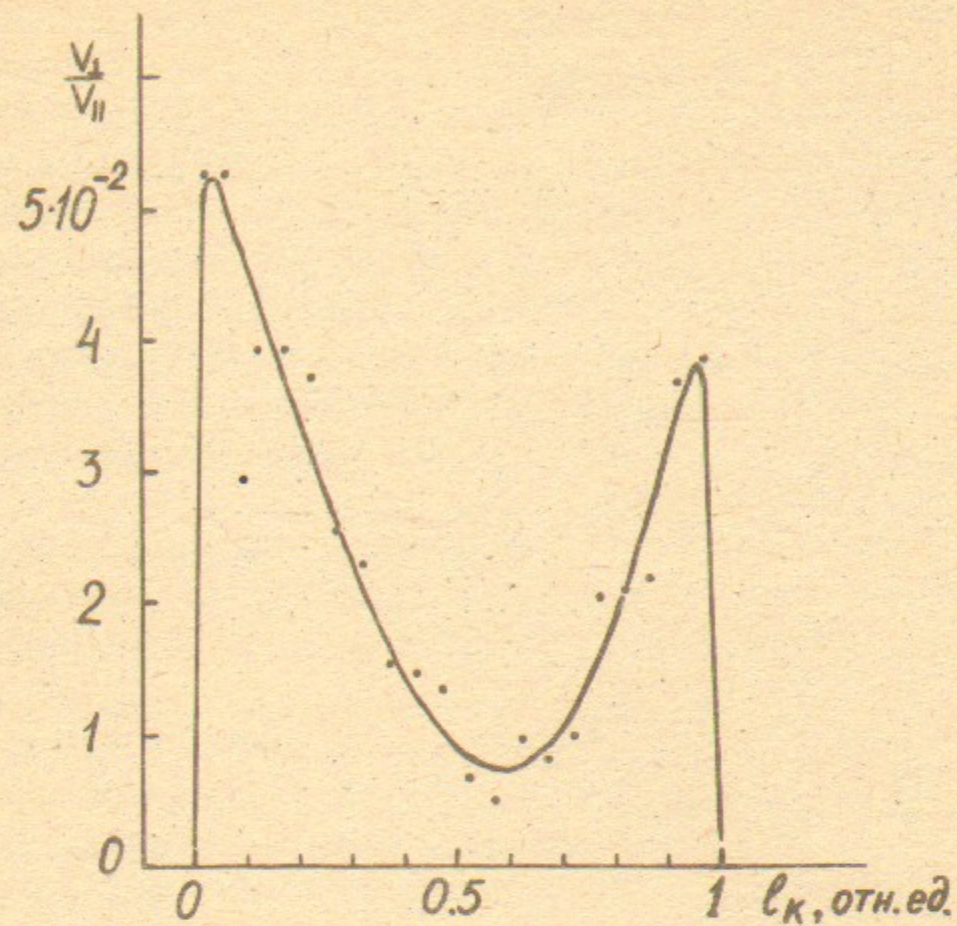


Рис.16

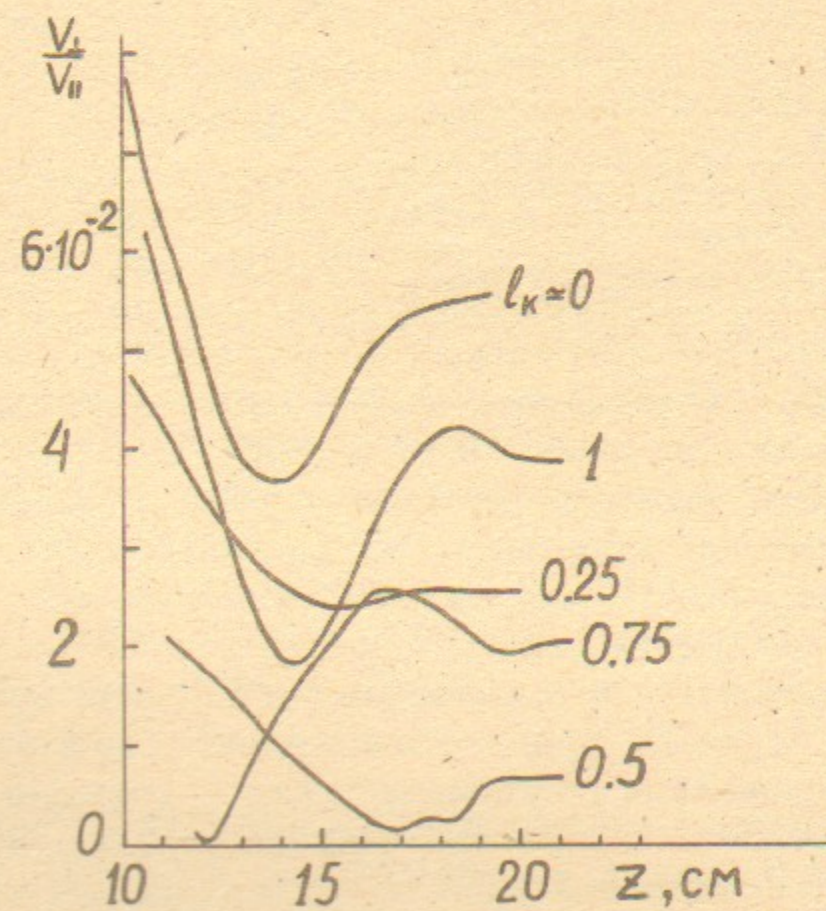


Рис.17

ном тракте, совмещая направление силовых линий магнитного поля с траекториями электронов.

Поэтому представляется необходимым рассмотреть систему такого вида: диод с промежуточными электродами, вогнутый кольцевой катод, эмиттирующий электронный поток под большим углом к оси системы и магнитное поле требуемой конфигурации, создаваемое токовыми витками. Расстояние между промежуточными электродами подбирается таким, чтобы ослабить электростатическую линзу ближнего к катоду электрода (оказывающую наибольшее влияние на траектории электронов), в то же время не превышая предельных напряженностей электрических полей.

Результат расчета такой системы приведен на рис. 13, где косыми крестами показаны токовые витки и указан их ток, штрих-пунктирными линиями — силовые линии магнитного поля и сплошными — некоторые траектории токовых трубок.

Величины токов в токовых витках составляют $I' = 12$ кА, $I'' = 15$ кА. Знак тока на рисунке указывает на направление тока ($I > 0$ — по часовой стрелке, $I < 0$ — против часовой; центры токовых витков находятся на оси системы). Распределение магнитного поля по силовой линии, проходящей через середину катодного сегмента, показано на рис. 14. На поверхности катода поле составляет 0.6 кЭ, в начале транспортного канала — около 2 кЭ. Для создания такого поля можно использовать как активные витки, так и заменить внутренние витки канала металлическим экраном, используя скин-эффект для фиксирования магнитного потока в канале.

Установившееся значение тока диода составляет 30 кА. Распределение нормальной плотности тока по поверхности катода приведено на рис. 15 (от $l_k = 0$ — внутренней кромки катода до $l_k = 1$ — наружной). Увеличение плотности тока у кромок катода, повидимому, связано с тем, что угол наклона фокусирующих электродов к нормали катода был взят пирсовским — 67.5° , что пригодно для нерелятивистского случая. В релятивистском случае ограничение скорости электронов приводит к уменьшению плотности эмиттируемого тока вблизи середины катода. Сказывается также, видимо, наличие щели в промежуточных электродах.

Характер распределения электрического поля по длине ускорения можно видеть из рис. 13. Видно, что выбранное соотношение расстояний между электродами обеспечивает малую расходимость силовых линий электрического поля в прикатодной области. Напряженность электрического поля на поверхности промежуточных электродов составляет около 60 кВ/см.

Распределение электронов по углам после прохождения участка

ускорения приведено на рис. 16. Угловой разброс от 0.01 до 0.05 рад минимален в середине пучка и максимален на краях. Это означает, что он определяется неидеальностью оптики ускорительного тракта. Различие значений V_{\perp}/V_{\parallel} для внутренних электронов пучка ($l_k \sim 0$) и наружных ($l_k \sim 1$) может быть связано с тем, что электроны, эмиттируемые с внешнего края катода, стягиваются к оси системы собственным магнитным полем пучка. При этом они оказываются ближе к середине кольцевой щели, чем внутренние электроны пучка, и поэтому приобретают меньший угловой разброс. Начальный угол вылета частиц, определяемый углом между электрическим и магнитным полем пучка вблизи поверхности катода и составляющий до 0.1 рад, в процессе ускорения падает до 0.01 рад.

Это иллюстрируется рисунком 17, где показано изменение отношения V_{\perp}/V_{\parallel} в процессе ускорения для некоторых траекторий пучка. Отметим сразу, что уменьшение углового разброса при ускорении затрудняется противодействующим эффектом сохранения адиабатического инварианта p_{\perp}^2/H в неоднородном магнитном поле.

Исследование влияния величины внешнего магнитного поля на угловой разброс в пучке проводилось изменением тока в токовых витках. При увеличении поля в 3.33 раза (токи $I' = 40$ кА, $I'' = 50$ кА) угловой разброс упал до уровня 0.01 рад по всему сечению. При уменьшении поля в 1.5 раза ($I' = 8$ кА, $I'' = 10$ кА) угловой разброс в конце ускорительного тракта составил от 0.02 до 0.1 рад.

Рассмотренный выше вариант кольцевого диода на основе термоэмиссионного катода можно рассматривать как первое промежуточное решение с током 30 кА. Для получения рабочего варианта на 100 кА требуется, увеличив площадь эмиттера, усовершенствовать оптику для дальнейшего уменьшения углового разброса пучка.

Таким образом, проведенные расчеты показали, что удовлетворительные результаты при формировании мощного электронного пучка можно получить как с взрывоэмиссионным, так и с подогревным катодом. Для холодного катода получены расчетные параметры: ток пучка $I \sim 50-90$ кА при потенциале 1 МВ и диаметре катода $2R_k \sim 100$ см с угловым разбросом $V_{\perp}/V_{\parallel} \lesssim 0.1$ в магнитном поле 6 кЭ, и для подогревного катода: $I \sim 30$ кА, $U = 1$ МВ, $2R \sim 200$ см, $V_{\perp}/V_{\parallel} \lesssim 5 \cdot 10^{-2}$, $H \sim 2$ кЭ.

Автор выражает искреннюю благодарность за постановку задачи и постоянное внимание Д.Д.Рютову, а также В.М.Лагунову и В.М.Федорову за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. V.S.Koidan et al. Proc. 4th Int. Conf. on High-Power Electron and Ion-Beam Research and Technology. Palaiseau (1981), v.2, p.531.
2. D.D.Ryutov. Magnetic mirrors. Preprint 82-114, Institute of Nuclear Physics. Novosibirsk (1982).
3. И.М.Блейвас, Б.И.Голубцов, В.П.Ильин, Г.С.Попова, В.М.Свешников. Комплекс программ для решения на БЭСМ-6 широкого класса задач статической электроники (компилирующая система КСИ-БЭСМ). — В кн.: Методы расчета электронооптических систем, ч.П. Новосибирск, изд. ВЦ СО АН СССР, 1973. В.П.Ильин. Численные методы решения задач электрооптики. Новосибирск, «Наука», 1974.
4. В.Т.Астрелин, В.М.Свешников. Расчет движения релятивистских пучков заряженных частиц в электромагнитных полях. — ПМТФ (1979), № 3, 3—8.
5. В.Т.Астрелин, В.Я.Иванов. Пакет программ для расчета характеристик интенсивных пучков релятивистских заряженных частиц. — Автометрия (1980), N 3, 92-99.
6. К.П.Рыбас. Электронные пушки и термоэлектронные катоды, используемые в ускорителях электронов. — Препринт В-0313, НИИЭФА Ленинград (1977).

В.Т.Астрелин

Расчет источников сильнооточных релятивистских электронных пучков для термоядерных исследований

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Подписано в печать 5 июля 1984 г. МП 04421
Формат бумаги 60×90. Объем 2,2 печ.л., 1,8 уч.-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 94

Набрано в автоматизированной системе на базе фотонаборного автомата ФА 1000 и ЭВМ (Электроника) и отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.