



A.91

1985

8

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

В.Т.Астрелин, С.В.Лебедев

ФОРМИРОВАНИЕ И ВАКУУМНАЯ  
ТРАНСПОРТИРОВКА СИЛЬНОТОЧНОГО РЭП  
НА УСТАНОВКЕ У-1  
ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

ПРЕПРИНТ 85-94

БИБЛИОТЕКА  
Института ядерной  
Физики СО АН СССР  
ИНВ. № \_\_\_\_\_



НОВОСИБИРСК

Для нагрева плазмы в открытых ловушках могут быть эффективно использованы мощные релятивистские электронные пучки (РЭП) микросекундного диапазона с плотностью тока (1—10) кА/см<sup>2</sup> с энергозапасом в десятки и сотни килоджоулей [1]. Одним из способов получения таких пучков является генерация их в плоском, либо бесфольговом диоде при низкой плотности тока с последующей магнитной компрессией. Эксперименты, в которых реализуется данный способ, проводятся в ИЯФ СО АН СССР на установке У-1 [2]. В квазиплоском диоде получен РЭП с энергией электронов до 900 кэВ, током  $\lesssim 50$  кА, максимальной плотностью тока 200 А/см<sup>2</sup>, длительностью импульса 5 мкс и энерго содержанием в выведенном из диода пучке 105 кДж [3]. В экспериментах по магнитной компрессии достигнута плотность тока в пучке более 3 кА/см<sup>2</sup> [4].

В настоящей работе приводятся результаты численных расчетов параметров пучков, получаемых в диодах с квазиплоским и кольцевым катодом во внешнем магнитном поле. Основная часть этих расчетов проведена для плоского диода с конфигурацией электродов, применявшихся в экспериментах [2—4]. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными. Сравнение проводится для начальных моментов времени ( $t \lesssim 0,4$  мкс), когда изменение ускоряющего зазора за счет заполнения диода плазмой еще незначительно. Методом численного моделирования рассмотрен также вопрос о влиянии неоднородности эмиссии с катода на величину тока плоского диода. Проведена численная оценка величины предельного вакуумного тока для геометрии, использовавшейся в экспериментах по сжатию пучка.

Расчеты проводились с использованием пакета прикладных программ «POISSON-2» [5] на ЭВМ ЕС-1040 и ЕС-1061. Пакет программ позволяет решить самосогласованную стационарную задачу расчета формирования электронных пучков с учетом внешних и собственных электрических и магнитных полей пучка в двумерном (здесь—осесимметричном) случае. Для расчета электрических полей используется метод интегральных уравнений со сплайновой аппроксимацией поверхностного заряда. Решение релятивистских уравнений движения в импульсной форме находится методом Рунге—Кутты 3-го порядка, для определения пространственного заряда применяется метод трубок тока. Самосогласованное решение находится методом итераций с использованием релаксации по пространственному заряду пучка. Результатом расчета является форма траекторий, распределение потенциала в системе и плотности тока по сечению пучка.

### КВАЗИПЛОСКИЙ ДИОД

Ниже приводятся результаты численных расчетов плоского диода с различными катодами, применявшимися в экспериментах. Диаметры катодов составляют 17,8, 20 и 31 см, а их профили показаны на рис. 1—3. Величины потенциалов на катоде выбирались равными экспериментальным значениям для моментов времени 0,3—0,4 мкс от начала импульса. Эмиссионная способность катода

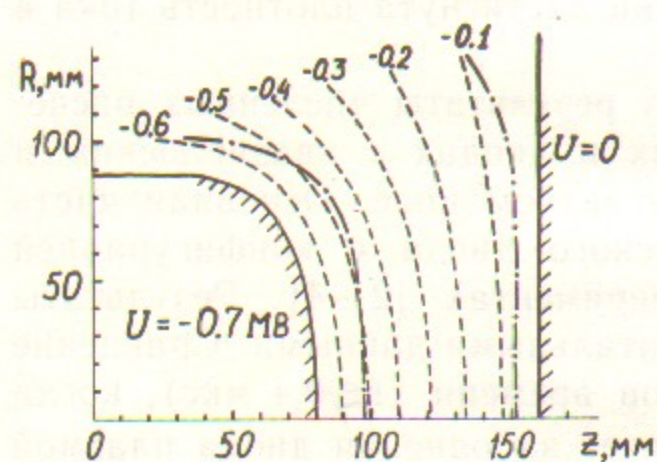


Рис. 1. Конфигурация диода с катодом  $D=17,8$  см; пунктир—эквипотенциальные линии без пучка, штрих-пунктир—с пучком.

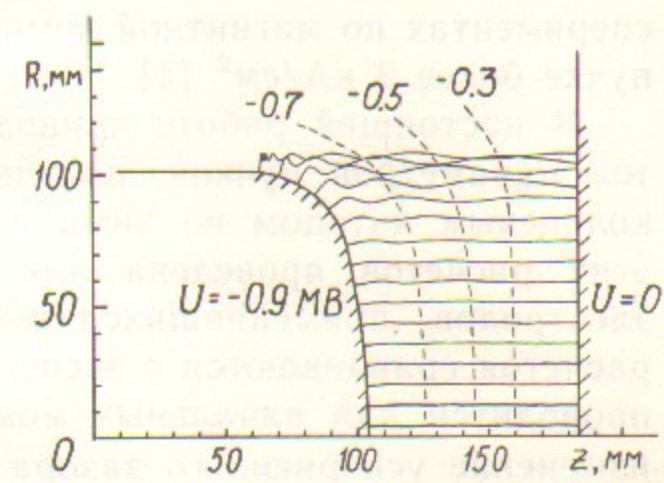


Рис. 2. Конфигурация диода с катодом  $D=20$  см; сплошные линии—траектории токовых трубок, пунктир—эквипотенциальные линии с пучком.

считалась неограниченной. Часть расчетов проводилась в предположении эмиссии ионов (протонов) с анода. В этих случаях эмиссионная способность анода также считалась неограниченной в области, подвергающейся воздействию электронного пучка.

Счетные параметры модели: число траекторий (трубок тока)—от 16 до 31; число узлов прямоугольной сетки для расчета компонент электрического поля и пространственного заряда—441; величина однородного магнитного поля—3 кГс; количество итераций, обеспечивающее сходимость расчета с точностью  $\approx 5\%$  по току пучка—около 20.

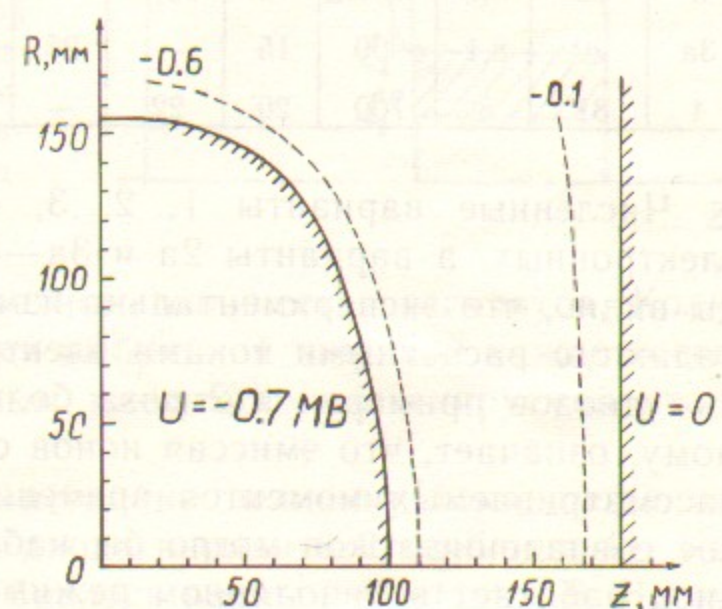


Рис. 3. Конфигурация диода с катодом  $D=31$  см; пунктир—эквипотенциальные линии без пучка.

Контроль точности счета проводился несколькими способами. Так, точность интегрирования уравнения движения определялись по сохранению полной энергии. Точность расчета электрических полей и потенциалов контролировались сравнением расчетной плотности тока на оси диода, где геометрия близка к плоской одномерной, с плотностью тока, рассчитанной по релятивистскому аналогу «закона 3/2» [6]. Степень самосогласованности решения определялась по характеру установления тока пучка в процессе итераций.

Расчетные и экспериментальные результаты для плоского диода приведены в таблице 1. Здесь  $D$ —диаметр катода,  $d$ —диодный зазор,  $U$ —напряжение на диоде,  $I_p$ —экспериментально измеренный ток пучка,  $V_1$ —расчетный ток для электронного и  $I_2$ —полный ток для биполярного диода,  $j_0$ —расчетная плотность тока в центре диода,  $j_{3/2}$ —плотность тока, вычисленная по релятивистскому анало-

гу «закона 3/2»,  $E_K^0$  и  $E_A^0$  — напряженность электрического поля на катоде и аноде в отсутствие пучка,  $E_A$  — поле на аноде для диода с электронным пучком.

Таблица 1

$N$	$D$ , см	$d$ , см	$U$ , кВ	$I_0$ , кА	$I_1$ , кА	$I_2$ , кА	$j_0$ , А/см <sup>2</sup>	$j_{3/2}$ , А/см <sup>2</sup>	$E_K^0$ , кВ/см	$E_1$ , кВ/см	$E_A$ , кВ/см
1	17,8	8	700	9	9,4	—	20	19	100—140	75	120
2	17,8	5	700	15	16	—	48	50	160—170	130	200
2a	17,8	5	700	15	—	27	100	95	160—170	130	—
3	20	8,1	900	15	16,7	—	35	—	130—170	100	—
3a	20	8,1	900	15	—	25	70	—	130—170	100	—
4	31	8	700	20	22	—	20	19	100	75	—

Численные варианты 1, 2, 3, 4 представляют собой расчет электронных, а варианты 2a и 3a — биполярных диодов. Из таблицы видно, что экспериментально измеренные токи практически совпадают с расчетными токами электронных диодов. Токи биполярных диодов примерно в 2 раза больше измеренных. Это, по-видимому, означает, что эмиссия ионов с анода в реальных диодах для рассматриваемых моментов времени отсутствует. В принципе, такое совпадение токов могло бы наблюдаться и в том случае, если диод работает в биполярном режиме, но эмитирует не вся поверхность катода, либо эмиссионная способность катода ограничена. Численное решение модельной задачи о влиянии неоднородности эмиссии на величину тока диода приведено ниже.

#### КВАЗИПЛОСКИЙ ДИОД С НЕОДНОРОДНОЙ ЭМИССИЕЙ

Для выяснения влияния неоднородности эмиссии на величину тока диода была проведена серия расчетов с использованием следующей модели эмиссии с катода. Поверхность катода разбивалась на  $K$  кольцевых сегментов (рис. 4) с практически одинаковой шириной  $\Delta l$ . Координаты границ сегментов обозначим через  $l_m$ , где  $m=0, 1, \dots, K$  и  $l_0=0$ , а расстояние  $l$  отсчитывается вдоль поверхности катода от его оси. Эмиссия электронов с поверхности каждого сегмента задавалась неоднородной: в зоне  $[l_m^* < l < l_m]$  плот-

ность тока  $j$  ограничивалась пространственным зарядом, а в зоне  $[l_{m-1} < l < l_m^*]$   $j=0$ . Для всех сегментов ширина эмитирующего участка  $(l_m - l_m^*)$  выдерживалась одинаковой. Таким образом, эмитирующая часть поверхности катода имеет вид соосных колец одинаковой ширины, разделенных кольцами без эмиссии, также одинаковой ширины.

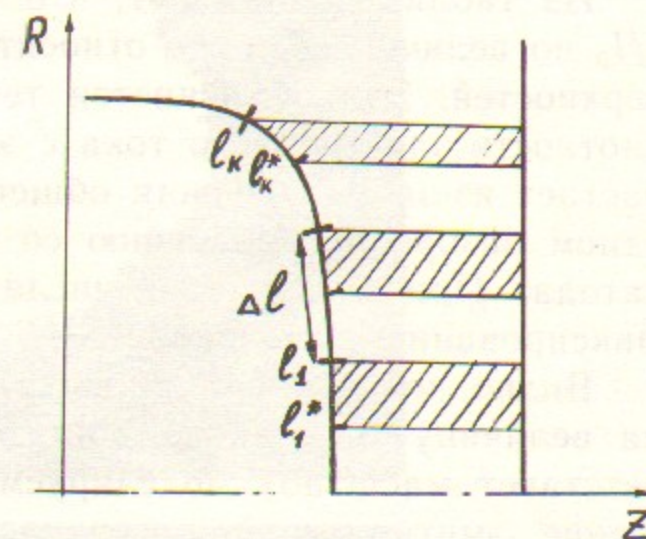


Рис. 4. Расчетная двумерная модель квазиплоского диода с неоднородной эмиссией.  $l_1, \dots, l_K$  — границы зон. Внутри каждой зоны эмитирующими являются участки  $(l_1^*, l_1), \dots, (l_K^*, l_K)$ .  $\Delta l$  — характерный размер моделируемой неоднородности.

Расчеты проводились для разного количества сегментов. Количество сегментов  $K$  определяется выбранной шириной каждого сегмента  $\Delta l$ , т. е. пространственным масштабом моделируемой неоднородности эмиссии.

Влияние неоднородности эмиссии на величину тока диода исследовалась для конфигурации диода варианта 2 (таблица 1). Количество сегментов в расчетах бралось равным  $K=1; 4$  и  $6$ . В случае  $K=4$  расчет тока диода проводился для двух различных значений эмитирующей площади катода. Результаты расчета сведены в таблицу 2, где  $S_0$  — полная площадь катода,  $S_s$  — площадь эмити-

Таблица 2

$N$	$K$	$(S_s/S_0)$	$(S_s/S_0)_A$	$I/I_0$
5	1	0,65	0,54	0,72
6	4	0,31	0,28	0,58
7	4	0,57	0,50	0,80
8	6	0,47	0,43	0,81

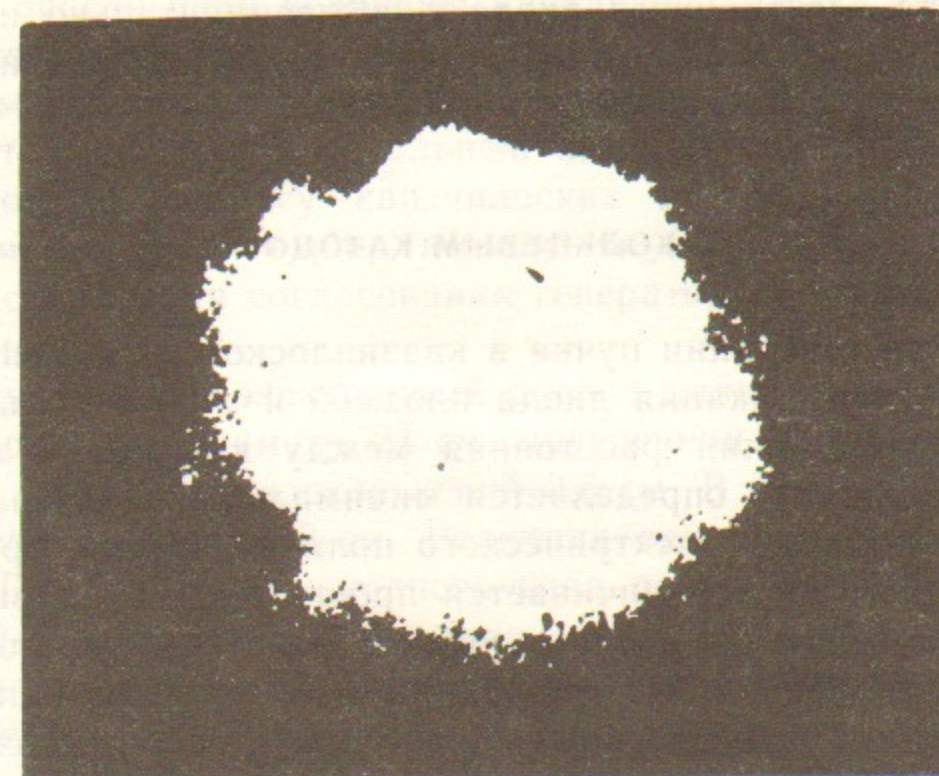
рующей поверхности,  $(S_s/S_0)_A$  — отношение площадей их проекций на анодную плоскость,  $I/I_0$  — отношение расчетного значения тока к току диода с однородно эмитирующим катодом. Различие отношений  $(S_s/S_0)$  и  $(S_s/S_0)_A$  в таблице связано с тем, что эмитирующие зоны проецируются на анодную плоскость под большим углом, чем соответствующие им неэмитирующие зоны (см. рис. 4).

Из таблицы 2 следует, что во всех случаях отношение токов  $I/I_0$  по величине больше относительной площади эмитирующих поверхностей. Это объясняется тем, что при неоднородной эмиссии плотность электронного тока с эмитирующих участков катода возрастает из-за уменьшения общего пространственного заряда в диодном зазоре по сравнению со случаем однородно эмитирующего катода. При увеличении числа разбиений поверхности ток для фиксированного значения  $(S_s/S_0)$  возрастает.

Видно, что влияние макроскопической неоднородности эмиссии на величину тока диода достаточно слабое. Для  $K=6$ , что соответствует масштабу моделируемой неоднородности  $\sim 2$  см, уменьшение эмитирующей поверхности катода вдвое ( $(S_s/S_0)=0,47$ ) приводит к уменьшению тока всего на 20%. При увеличении масштаба неоднородности зависимость тока диода от  $S_s/S_0$  становится более выраженной. В предельном случае  $K=1$  (не эмитирует центральная часть катода) зависимость тока от площади эмиссии для данной геометрии близка к пропорциональной:  $I/I_0 \approx (S_s/S_0)$ .

Выше отмечалось, что экспериментально измеренный ток диода совпадает с расчетным током электронного диода при однородно эмитирующем катоде. Результаты расчета диода с неоднородной эмиссией указывают на то, что предположение о наличии ионной эмиссии с анода допустимо только в том случае, если эмитирует меньше половины площади катода и неоднородность носит крупномасштабный характер. Измерения тока пучка секционированными коллекторами [2], а также регистрация тормозного излучения с анода, производившаяся рентгеновским ЭОП (время экспозиции 0,3 мкс) с камерой обскуры [7], показали, что в случае использования чистого графитового катода такая крупномасштабная неоднородность отсутствует<sup>1)</sup> (см. рис. 5,а). Таким образом, совпадение

<sup>1)</sup> Заметим, что в повторном импульсе, сделанном без очистки катода от продуктов испарения материала анода (в данном случае нерж. сталь), наблюдается сильная неоднородность эмиссии (рис. 5,б). При данной степени неоднородности эмиссии, однако, полный ток диода практически не отличается от случая однородно эмитирующего катода, что качественно согласуется с результатами численного моделирования.



а



б

Рис. 5. Изображение пучка, полученное рентгеновским ЭОП ( $\Delta t=300$  нс): а — чистый графитовый катод, б — повторный импульс, сделанный в тех же условиях без очистки катода от продуктов испарения анода (нерж. сталь).

расчетного тока электронного диода с экспериментально измеренным означает, что в начале импульса поведение диода описывается моделью электронного диода.

### ДИОД С КОЛЬЦЕВЫМ КАТОДОМ

Длительность генерации пучка в квазиплоском диоде определяется скоростью переключения диода плазмой и может быть увеличена за счет увеличения расстояния между катодом и анодом. Предельное расстояние определяется минимальным значением начальной напряженности электрического поля на катоде, при которой диодный ток еще ограничивается пространственным зарядом, а не эмиссионной способностью катода. В работе [8] было экспериментально определено, что указанная минимальная напряженность поля для графитового катода составляет  $\approx 130$  кВ/см. Следовательно, для квазиплоского диода при ускоряющем напряжении  $0,7 \div 1$  МВ диодный зазор может быть не более  $8 \div 10$  см (см. табл. 1).

Увеличить диодный зазор и, таким образом, длительность генерации пучка можно, например, применив кольцевой катод. В этом случае напряженность поля на катоде определяется в основном кривизной поверхности катода и может быть сделана достаточно высокой.

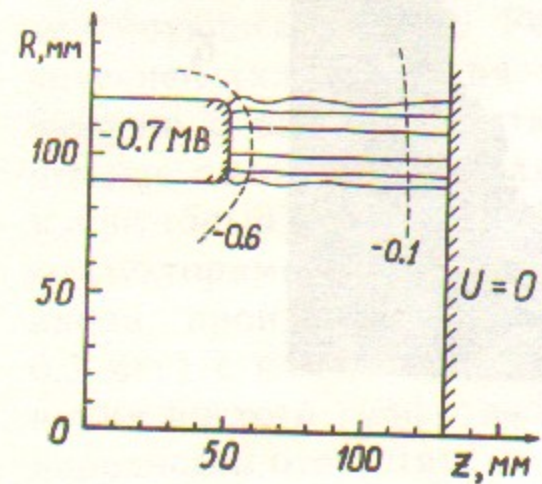


Рис. 6. Конфигурация диодного узла с кольцевым катодом. Пунктир—эквипотенциали в отсутствие пучка. Показана расчетная форма траекторий.

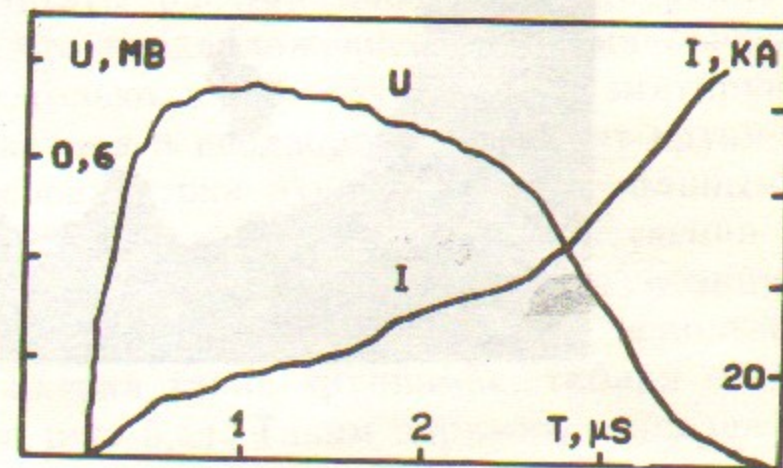


Рис. 7. Осциллограммы напряжения на диоде и тока пучка, полученные с кольцевым катодом в геометрии диодного узла, показанной на рис. 6.

Для определения величины начального тока в диоде с кольцевым катодом и плоским анодом были проведены численные расчеты. Размеры катода и величина ускоряющего промежутка подбирались такими, чтобы начальный импеданс диода был близким к начальному импедансу квазиплоских диодов, применявшихся в эксперименте. Этот выбор импеданса был обусловлен необходимостью сохранения согласования генератора импульсных напряжений с диодом.

Рассчитывался электронный диод с кольцевым катодом, имеющим наружный диаметр 24 см, внутренний—18 см. Торцы катода плоский, с радиусами скруглений 0,5 см. В первом варианте диодный зазор составлял 8 см. Величина однородного магнитного поля—3 кГс. Геометрия диодного узла показана на рис. 6, там же приведена расчетная форма траекторий. Величина потенциала катода была взята из экспериментов, проведенных на установке У-1 с кольцевым катодом данной конфигурации. Осциллограммы напряжения на диоде и тока пучка приведены на рис. 7. Видно, что для моментов  $0,3 \div 0,5$  мкс от начала импульса напряжение на диоде составляет 700 кВ, а ток пучка—15 кА.

Расчетное значение тока диода 16,5 кА находится в хорошем согласии с экспериментально измеренным. На рис. 8 показано расчетное распределение плотности тока  $j$  по радиусу. Видно, что плотность тока для данной формы катода максимальна на краях пучка. Среднее по сечению пучка значение  $j$  составляет  $80$  А/см<sup>2</sup>.

При увеличении диодного зазора до 15 см расчетная величина тока уменьшилась до 8 кА, а экспериментально измеренное значение для момента времени 0,5 мкс от начала импульса составило 7 кА. При диодном зазоре 15 см начальная напряженность электрического поля на катоде составляет  $100 \div 160$  кВ/см при напряжении на диоде 700 кВ. Из сравнения расчетных и экспериментальных значений тока диода видно, что при данной величине напряженности поля ток диода еще ограничивается пространственным зарядом, а не эмиссионной способностью катода.

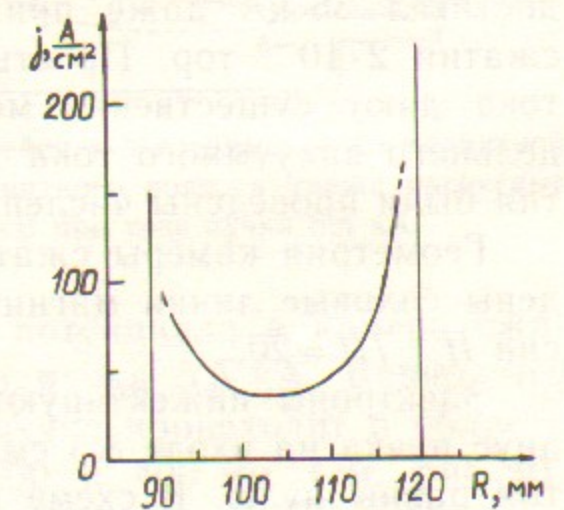


Рис. 8. Расчетное распределение плотности тока по радиусу для диода с кольцевым катодом.

Из результатов расчета приведенной конфигурации следует, что при размерах катода, незначительно превышающих размеры квазиплоского катода, удастся сохранить начальную величину тока диода. Применение кольцевого катода позволяет при одинаковых с квазиплоским диодом зазорах увеличить начальную плотность тока пучка примерно в 2 раза (либо при одинаковых начальных плотностях тока увеличить длительность импульса).

#### ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО ВАКУУМНОГО ТОКА ДЛЯ СИСТЕМЫ МАГНИТНОЙ КОМПРЕССИИ РЭП

Для получения требуемой для нагрева плазмы плотности тока на установке У-1 проводятся эксперименты по магнитной компрессии пучка [4]. Пучок электронов генерируется в квазиплоском диоде (геометрия варианта 2 таблицы 1) в продольном магнитном поле 5 кГс. Сжатие пучка осуществляется адиабатически в квазистационарном магнитном поле пробочной конфигурации. Величина поля в пробке составляет 100 кГс. Давление нейтрального газа в камере сжатия менялось от  $2 \cdot 10^{-5}$  до 1 тор.

В экспериментах было обнаружено, что при напряжении на диоде 0,7–0,5 МВ ток пучка, проходящий через магнитную пробку, достигал 35 кА даже при давлении остаточного газа в камере сжатия  $2 \cdot 10^{-5}$  тор. Простые оценки для предельного вакуумного тока дают существенно меньшие значения. Для уточнения предельного вакуумного тока для данной конфигурации камеры сжатия были проведены численные расчеты.

Геометрия камеры сжатия показана на рис. 9. Там же приведены силовые линии магнитного поля для коэффициента компрессии  $H_{\max}/H = 20$ .

Электроны инжектируются с начальной энергией 700 кэВ, радиус пучка на входе 8,5 см. Потенциалы всех границ камеры сжатия равны нулю. В схеме расчета возможное отражение электронов от магнитной пробки не учитывалось и считалось, что электроны движутся по силовым линиям магнитного поля. Самосогласованное решение находилось методом итераций с использованием релаксации по току пучка. Счетные параметры модели: число трубок тока—9; сетка для расчета потенциалов и объемного заряда— $15 \times 40$ , кусочноравномерная.

В первом варианте расчет проводился для сплошного пучка с однородным распределением тока по сечению. Сходимость решения

критически зависела от величины задаваемой плотности тока в пучке. При плотности тока  $\leq 25$  А/см<sup>2</sup> (что соответствует току через камеру сжатия  $\leq 6,5$  кА) итерационный процесс сходил. При 20–25 итерациях обеспечивалась сходимость расчета с точностью  $\approx 5\%$ . Если же плотность тока превышала 25 А/см<sup>2</sup>, то, начиная с некоторой итерации, электроны в приосевой области переставали проходить через камеру сжатия, отражаясь от потенциального барьера, созданного объемным зарядом пучка. В этом случае итерационный процесс не сходил.

Таким образом, в качестве верхней оценки предельного вакуумного тока через систему магнитной компрессии для сплошного пучка может быть взято значение 6,5 кА при энергии электронов 700 кэВ. Аналогичные расчеты, проведенные для трубчатого пучка, дали значение предельного вакуумного тока около 10 кА.

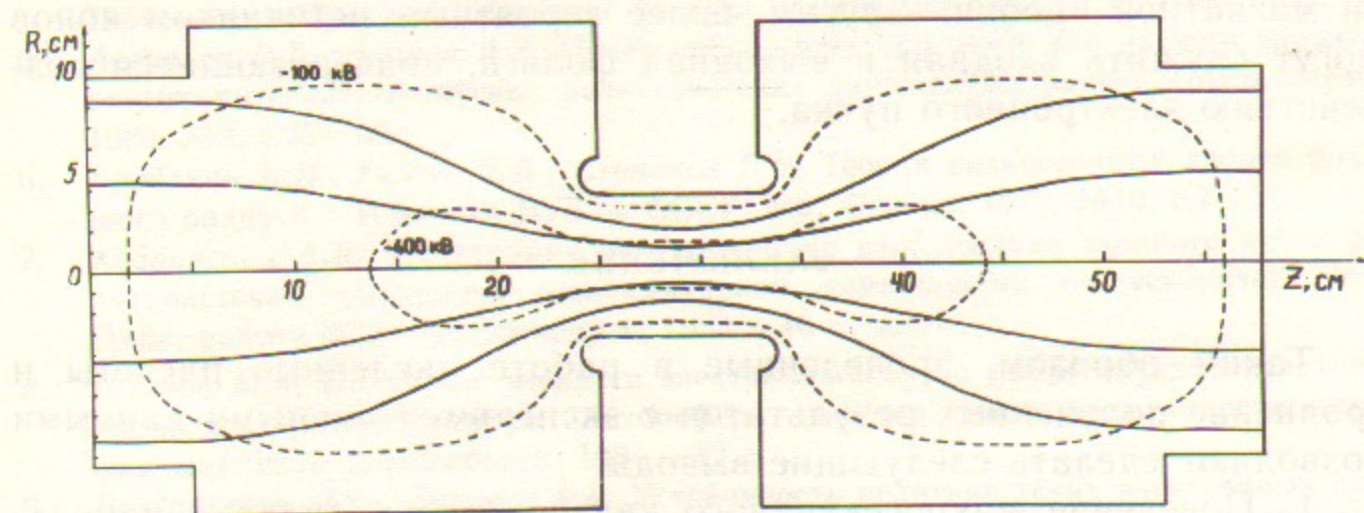


Рис. 9. Геометрия камеры сжатия, использовавшейся в эксперименте по магнитной компрессии РЭП. Показаны силовые линии магнитного поля, а также расчетные эквипотенциали с  $U = -100$  кВ и  $-400$  кВ при токе пучка 5,5 кА.

На рис. 9 показано распределение потенциала в камере сжатия, рассчитанное для тока сплошного пучка 5,5 кА. Видно, что максимальное провисание потенциала пучка происходит в области магнитной пробки, а также при  $z \approx 200$  и 400 мм (см. рис. 9). Максимальная напряженность электрического поля на стенках вакуумной камеры достигает 350 кВ/см.

Для контроля достоверности полученной оценки предельного вакуумного тока были проведены расчеты по описанной выше схеме для сплошного пучка, распространяющегося в длинной цилиндрической дрейфовой камере. Аналитическое выражение для предельного тока в этом случае дается формулой [9]

$$I_n = \frac{mc^3}{e} \frac{(\gamma^{2/3} - 1)^{3/2}}{1 + 2 \ln(R/r)},$$

где  $R$  — радиус камеры,  $r$  — радиус пучка.

При энергии электронов 700 кэВ и  $R/r=2$ ,  $I_n=5$  кА. Численный расчет, проведенный для камеры длиной  $l=15R$ , дал значение предельного тока 5,5 кА, что согласуется с вычисленной величиной  $I_n$ .

Сравнение результатов расчета критического тока для системы магнитной компрессии РЭП с измеренной величиной тока, проходящего через камеру сжатия ( $\sim 35$  кА), позволяет сделать вывод, что в экспериментах происходит нейтрализация пространственного заряда пучка. Появление нейтрализующих ионов при давлении остаточного газа  $\sim 10^{-5}$  тор может быть связано с высокой напряженностью электрического поля на стенке вакуумной камеры вблизи магнитной пробки. Другим, более вероятным источником ионов могут служить входная и выходная фольги, подвергающиеся воздействию электронного пучка.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные в работе численные расчеты и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными позволяют сделать следующие выводы:

1. Поведение микросекундного квазиплоского диода с начальной плотностью тока  $\sim 50$  А/см<sup>2</sup> до  $t \simeq 0,5$  мкс вполне описывается моделью электронного диода. Переход в биполярный режим работы, если он реализуется, происходит не в начале импульса.

2. В экспериментах по магнитной компрессии РЭП наблюдается прохождение через камеру сжатия пучка с током, существенно превышающим критический вакуумный ток, что свидетельствует о появлении нейтрализующих ионов в камере сжатия.

3. Получены численные результаты, позволяющие оценивать влияние неоднородности эмиссии на ток диода.

В заключение авторы выражают благодарность М.А. Щеглову за полезные обсуждения полученных результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рютов Д.Д. Исследования по открытым термоядерным системам в Новосибирском институте ядерной физики. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 1978, вып.1—2, с.96—112.
2. Мощный релятивистский электронный пучок микросекундной длительности для нагрева плазмы/С.Г. Воропаев, В.С. Койдан, С.В. Лебедев, В.С. Николаев, В.В. Чикунов, М.А. Щеглов. — Новосибирск, 1983. — 14 с. — (Препринт/Институт ядерной физики СО АН СССР; ИЯФ 83-72. Докл. АН СССР, 1984, т.276, №1, с.111—115).
3. Получение микросекундного РЭП на двухмодульном LC-генераторе/С.Г. Воропаев, С.В. Лебедев, В.В. Чикунов, М.А. Щеглов. — Новосибирск, 1984. — 6 с. — (Препринт/Институт ядерной физики СО АН СССР; ИЯФ 84-132). ЖТФ. Письма, 1985, т.11, вып.5, с.267.
4. Магнитная компрессия мощного релятивистского электронного пучка микросекундной длительности/С.Г. Воропаев, Б.А. Князев, В.С. Койдан, В.В. Конюхов, С.В. Лебедев, К.И. Меклер, В.В. Чикунов, М.А. Щеглов. — Новосибирск, 1984. — 8с. — (Препринт/Институт ядерной физики СО АН СССР; ИЯФ 84-121).
5. Астрелин В.Т., Иванов В.Я. Пакет прикладных программ для расчета характеристик интенсивных пучков релятивистских заряженных частиц. — Автометрия, 1980, №3, с.92—99.
6. Брейзман Б.Н., Рютов Д.Д., Ступаков Г.В. Теория сильноточных диодов большого радиуса. — Известия ВУЗ'ов СССР, сер. Физика, 1979, №10, с.7—26.
7. Кедринский А.В. Регистрация рентгеновского изображения мощного пучка релятивистских электронов микросекундной длительности на ускорителе У-1: Дипл. работа. НГУ. — Новосибирск, 1984. — 40 с., ил.
8. Щеглов М.А. Получение мощного электронного пучка микросекундной длительности для нагрева плазмы: Автореферат дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук. — Новосибирск, 1984. — 12 с.
9. Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Устойчивость релятивистских электронных пучков в плазме и проблема критических токов. — УФН, 1971, т.103, №4, с.609—640.



*В.Т.Астрелин, С.В.Лебедев*

**Формирование и вакуумная транспортировка  
сильноточного РЭП на установке У-1:  
численные расчеты**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 22 мая 1985 г.

Подписано в печать 23 июля 1985 г. МН 05840

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,5 печ.л., 1,2 уч.-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 94

*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.*