



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

А.В. Аржанников, В.Т. Астрелин, В.А. Капитонов,
М.П. Лямзин, С.Л. Сеницкий, М.В. Юшков

**ГЕНЕРАЦИЯ ЛЕНТОЧНЫХ РЭП
В МАГНИТНО-ИЗОЛИРОВАННОМ ДИОДЕ
И ТРАНСПОРТИРОВКА ИХ
ПРИ ТОКЕ ИНЖЕКЦИИ
МЕНЬШЕ ВАКУУМНОГО ПРЕДЕЛА**

ПРЕПРИНТ 89-81



НОВОСИБИРСК

Генерация ленточных РЭП
в магнитно-изолированном диоде
и транспортировка их при токе инжекции
меньше вакуумного предела

А.В. Аржанников, В.Т. Астрелин, В.А. Капитонов,
М.П. Лямзин, С.Л. Сеницкий, М.В. Юшков

Институт ядерной физики

АННОТАЦИЯ

В работе приводятся результаты экспериментов по генерации ленточного пучка с энергией электронов около 1 МэВ, током до 20 кА и длительностью 5-10 мкс. Полный энергозапас в полученном пучке около 50 кДж. Использование катода из карботексти-ма, а также сходящегося магнитного поля позволило достигнуть для магнитно-изолированного диода величины произведения погонного тока на длительность пучка около 4 кА·мкс/см.

Экспериментально исследуется изменение сечения ленточного пучка с различной толщиной при транспортировке его в вакуумном канале с ведущим магнитным полем. Установлено, что устойчивость формы сечения пучка тем выше, чем больше степень заполнения пучком сечения канала и чем ниже его плотность тока.

На основе экспериментальных результатов в совокупности с теоретическими расчетами рассматривается возможность создания ленточных пучков с энергозапасом в несколько сотен килоджоулей при высокой плотности тока и малом угловом разбросе.

1. ВВЕДЕНИЕ

Применение ленточных электронных пучков мегавольтного диапазона энергий в термоядерных исследованиях по открытым соле-ноидальным ловушкам должно обеспечить переход к эксперимен-там с энергозапасом в плазменном столбе масштаба сотни кило-джоулей [1-3]. В первых же опытах с мощными ленточными РЭП, проведенными на установке У-2, было показано, что микросе-кундный пучок с сечением $0,6 \times 12$ см может устойчиво транспорти-роваться в щелевом вакуумном канале на расстояние $L \approx 1$ м в ведущем магнитном поле с индукцией $B \geq 0,8$ Т (см. [4]). В после-дующих экспериментах [5] была зарегистрирована зависимость эффективности транспортировки такого ленточного РЭП от вели-чины магнитного поля при изменении ее в интервале от 0,05 до 0,8 Т, а также прослежено влияние на этот процесс нейтрализации пучка по заряду. Процесс нейтрализации пучка играл в этих экспериментах существенную роль, поскольку ток инжекции пучка в канал превышал величину предельного вакуумного тока в нем.

В экспериментах [4, 5] ленточный РЭП был получен путем вырезания его щелевой диафрагмой из пучка, генерируемого в квазиплоском диоде. В схеме же последовательной инжекции пуч-ков в плазму (см. [2]) предполагается их генерация в магнитно-изолированных диодах (МИД) с тем, чтобы обеспечивать угловой разброс электронов на уровне нескольких градусов при длитель-ности пучка масштаба 10 мкс. Предполагается, что сечение ленточ-ного пучка в этой схеме будет иметь размеры 6×140 см. Посколь-

ку генерация пучков в ленточных МИД нигде ранее не изучалась, то на первом этапе исследований нами был поставлен модельный эксперимент, в котором толщина пучка была приблизительно такой же (4 см), а его ширина в несколько раз меньше (≈ 20 см). Результаты экспериментов по генерации такого РЭП в магнитно-изолированном диоде составляют значительную часть содержания данной работы.

Другим существенным вопросом, возникающим при рассмотрении возможности использования ленточных РЭП в схеме последовательной инжекции, является возможность реализации двумерного равновесия при транспортировке пучка внутри проводящей оболочки, когда система пучок—оболочка не обладает аксиальной симметрией. Такая задача о двумерном равновесии РЭП в ведущем магнитном поле была сформулирована в работе [6]. Здесь же были даны аналитические решения для ряда частных случаев. Что касается решения задач о равновесной форме сечения ленточного пучка в щелевом канале, то она была решена в работе [7] лишь численными методами и в приближении однородных по его сечению плотности электронов и их скоростей. Показано, что, по крайней мере, при этих предположениях равновесные формы сечения пучка существуют. Причем толщина пучка должна иметь определенное значение (составлять около $3/4$ от зазора канала; см. [7, 8]). Для проверки возможности осуществления транспортировки ленточных РЭП в условиях равновесного сечения была проведена серия экспериментов по инжекции в щелевой вакуумный канал пучков с токами меньше вакуумного предела и толщиной, варьируемой в пределах от 0,2 до 0,7 по отношению к зазору в канале. Результаты этих экспериментов и сопоставление их с теоретическими расчетами составляют содержание второй части данной работы.

2. ГЕНЕРАЦИЯ ЛЕНТОЧНЫХ РЭП В МАГНИТНО-ИЗОЛИРОВАННОМ ДИОДЕ

Схема генерации ленточного пучка в магнитно-изолированном диоде и транспортировки его в вакуумном канале приведена на рис. 1. Электронный пучок 3 эмиттируется холоднэмиссионным катодом 1, изготовленным из графитового волокнистого материала - карботекстима. Затем этот пучок, распространяясь по силовым

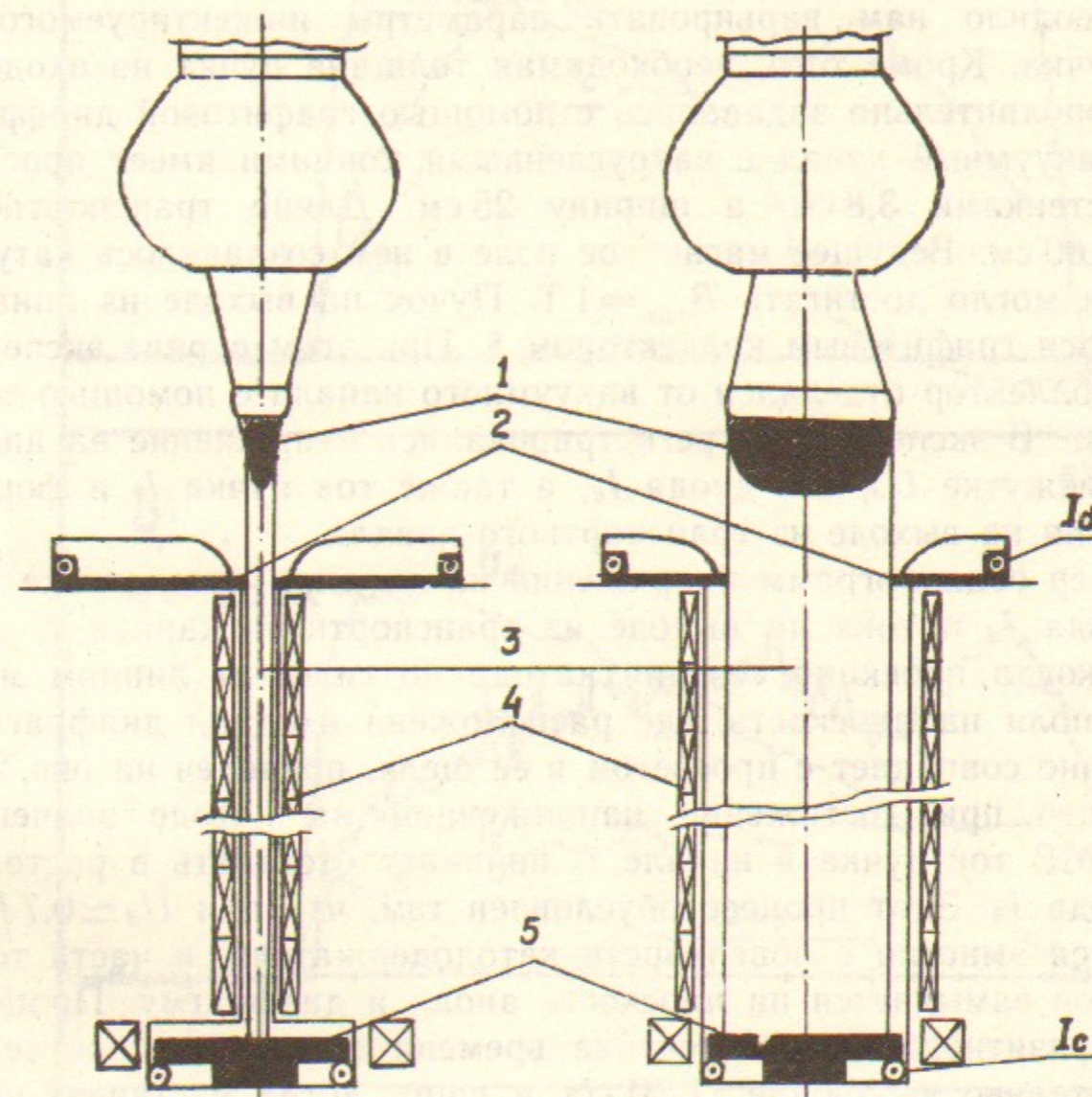


Рис. 1. Схема генерации и транспортировки ленточного пучка.

линиям ведущего магнитного поля, поджимается по толщине с 6 см на катоде до 3—4 см на входной диафрагме 2 и 2—3 см в транспортном канале, а по ширине с 24 см на катоде до 22 см на диафрагме и 18 см в канале. Вообще говоря, в ходе экспериментов можно было изменять форму катода, расстояние от него до анодной плоскости, а также ход силовых линий в диодном промежутке. Это позволило нам варьировать параметры инжектируемого в канал пучка. Кроме того, необходимая толщина пучка на входе в канал дополнительно задавалась с помощью графитовой диафрагмы 2. Вакуумный канал с закругленными концами имеет просвет между стенками 3,8 см, а ширину 25 см. Длина транспортного канала 100 см. Ведущее магнитное поле в нем создавалось катушками 4 и могло достигать $B_{\max} = 1$ Т. Пучок на выходе из канала принимался графитовым коллектором 5. При этом в ряде экспериментов коллектор отделялся от вакуумного канала с помощью тонких фольг. В эксперименте регистрировались напряжение на диодном промежутке U_d , ток диода I_d , а также ток пучка I_c и форма его сечения на выходе из транспортного канала.

Пример осциллограмм напряжения на диодном промежутке U_d , тока диода I_d и тока на выходе из транспортного канала I_c для случая, когда проекция сечения катода по силовым линиям магнитного поля на плоскость, где расположена входная диафрагма, по толщине совпадает с просветом в ее щели, приведен на рис. 2, а. Видно, что при достижении напряжением на катоде значений $U_d \approx 0,7$ МВ ток пучка в канале I_c начинает отставать в росте от тока диода I_d . Этот процесс обусловлен тем, что при $U_d \approx 0,7$ МВ начинается эмиссия с поверхности катододержателя, и часть тока электронов замыкается на плоскость анода и диафрагму. Процент этого паразитного тока в течение времени около 4 мкс остается приблизительно на уровне $(1/3) \cdot I_d$, и лишь, когда наступает пробой диодного промежутка, при $t > 4$ мкс его доля становится основной в диодном токе. Величина тока ленточного пучка в вакуумном канале в данном опыте имеет значение около 15 кА при длительности импульса около 5 мкс. Толщина пучка в канале в области однородного магнитного поля составляла $\Delta = 2,2$ см, а ширина $d = 17$ см. Таким образом, в магнитно-изолированном диоде удается получить пучок с погонным током $I'_c = I_c/d \approx \approx 15/17 \approx 1$ кА/см при длительности генерации $\tau_b \approx 5$ мкс, что дает оценку параметра $I'_c \cdot \tau_b \approx 4$ кА·мкс/см, которая существенно превышает его значение (~ 1 кА·мкс/см), полученное в [9—11] для коаксиальных МИД. При увеличении расстояния между катодом и

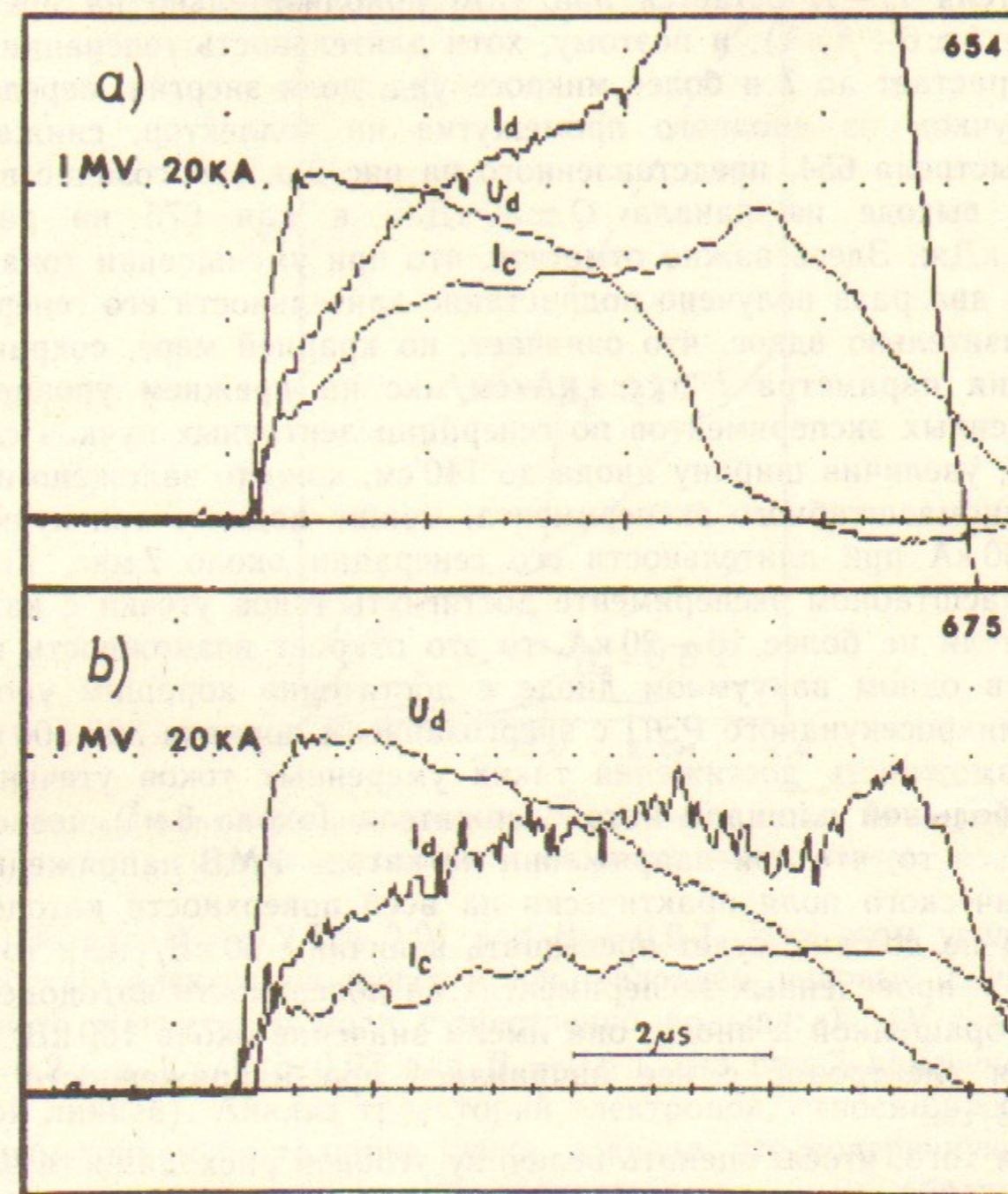


Рис. 2. Осциллограммы, характеризующие генерацию ленточного РЭП в магнитно-изолированном диоде.

плоскостью анода с 73 до 90 мм величина тока пучка, соответственно, снижается (см. рис. 2, *b*). Ток утечки электронов с катододержателя $I_d - I_c$ остается при этом приблизительно на прежнем уровне ($\approx 6 \div 8$ кА), и поэтому, хотя длительность генерации пучка возрастает до 7 и более микросекунд, доля энергии, передаваемой пучком из диодного промежутка на коллектор, снижается. Для выстрела 654, представленного на рис. 2, *a*, энергозапас в пучке на выходе из канала $Q \approx 50$ кДж, а для 675 на рис. 2, *b* $Q \approx 40$ кДж. Здесь важно отметить, что при уменьшении тока пучка I_c в два раза получено подрастание длительности его генерации приблизительно вдвое, что означает, по крайней мере, сохранение значения параметра $I_c \cdot \tau_b \approx 4$ кА·см/мкс на прежнем уровне. Из проведенных экспериментов по генерации ленточных пучков следует, что, увеличив ширину диода до 140 см, как это заложено в схеме полномасштабного эксперимента, можно поднять ток пучка до 50—100 кА при длительности его генерации около 7 мкс. Если в полномасштабном эксперименте достигнуть токов утечки с катододержателя не более 15—20 кА, то это откроет возможность получения в одном вакуумном диоде с достаточно хорошим уровнем КПД микросекундного РЭП с энергозапасом порядка 300-500 кДж. На возможность достижения таких умеренных токов утечки при столь большой площади катододержателя (около 8 м^2) позволяет надеяться то, что при напряжении на катоде 1 МВ напряженность электрического поля практически на всей поверхности катододержателя не должна будет превышать величины 50 кВ/см, в то время как в проведенных экспериментах на поверхности катододержателя, обращенной к аноду, она имела значение около 150 кВ/см, а эмиссия электронов с нее начиналась при напряженности поля ≥ 80 кВ/см.

Для того, чтобы оценить величину угловой расходимости электронов в пучке и понять, какими факторами она обусловлена, были проведены модельные расчеты параметров пучка, генерируемого в диоде. Расчеты проводились на ЭВМ с использованием пакета программ POISSON-2 [12]. Зависимости отношения компоненты скорости, перпендикулярной к оси канала v_r , к скорости, параллельной его оси v_z , от расстояния x от плоскости симметрии пучка до точки, где расположен электрон, для случаев, когда ведущее магнитное поле в канале имеет значения 0,2 Т и 0,6 Т, представлены на рис. 3 непрерывной линией. Видно, что в плоскости симметрии пучка ($x=0$) отношение v_r/v_z близко к нулю и затем практически линейно растет, достигая на границе пучка $x=2$ см величи-

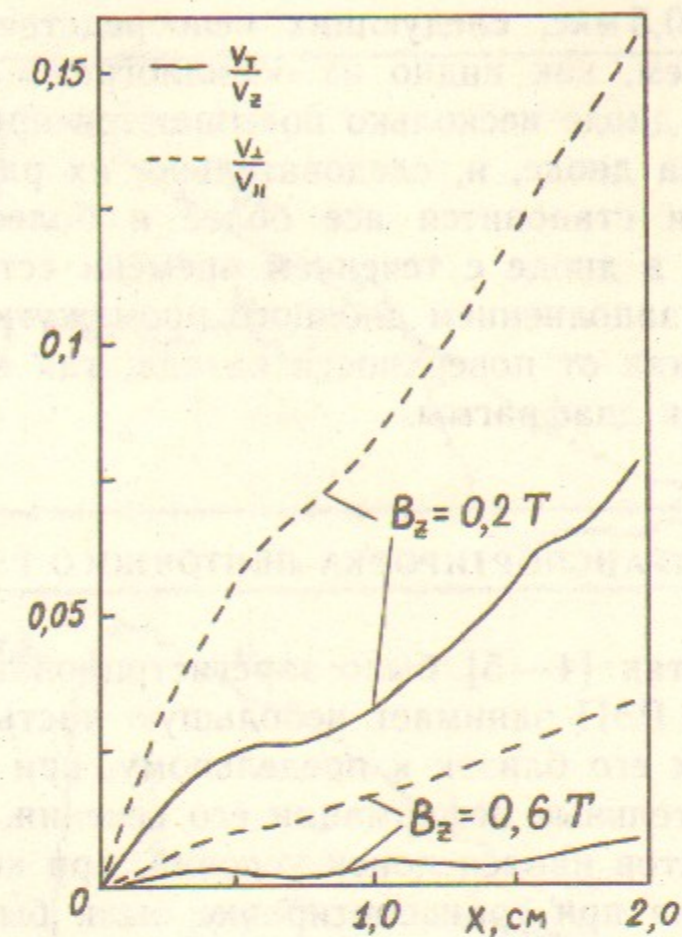


Рис. 3. Угловые характеристики электронов в различных точках по толщине ленточного пучка при различных магнитных полях в канале.

ны 0,08 для $B_z=0,2$ Т и 0,01 для $B_z=0,6$ Т. При этом угол между скоростью электронов пучка и направлением силовых линий суммарного магнитного поля существенно больше: $V_{\perp}/V_{\parallel} \approx 0,15$ для $B_z=0,2$ Т и $V_{\perp}/V_{\parallel} \approx 0,03$ для $B_z=0,6$ Т (на рис. 3 нанесено штриховой линией). Анализ траекторий электронов, относящихся к различным точкам по толщине пучка, показал, что поперечную компоненту скорости электроны приобретают, главным образом, при переходе из диодного промежутка в щелевой канал. Это объясняется тем, что в прианодной области диода энергия электронов становится численно близкой к приложенному напряжению ($eU_d \approx 1$ МэВ), ларморовский радиус, вычисленный по их полной энергии, становится соизмерим с характерными пространственными масштабами изменения электрического и магнитного полей, и тем самым нарушается требование, необходимое для адиабатичности движения электронов. Что касается расчетного значения погонного тока пучка, то его величина, полученная с помощью пакета

POISSON-2, неплохо совпадает с измеренным значением лишь в течение первых 0,5 мкс, следующих непосредственно за фронтом напряжения. Затем, как видно из осциллограмм, представленных на рис. 2, токи в диоде несколько повышаются при уменьшающемся напряжении на диоде, и, следовательно, их различие с расчетными значениями становится все более и более существенным. Нарастание тока в диоде с течением времени естественным образом объясняется заполнением диодного промежутка ионами и движением плазмы как от поверхности катода, так и от поверхности обрезавшей пучок диафрагмы.

3. ТРАНСПОРТИРОВКА ЛЕНТОЧНОГО РЭП

В экспериментах [4—5] было зарегистрировано, что в случае, когда ленточный РЭП занимает небольшую часть зазора в щелевом канале и ток его близок к предельному, при транспортировке возникают значительные деформации его сечения. Задачей данной серии экспериментов явился поиск условий, при которых деформации сечения пучка при транспортировке были бы несущественными. Параметров, вариация которых в реальном эксперименте позволила бы этого достигнуть, по существу можно указать лишь три: повышение ведущего магнитного поля, снижение погонного тока пучка в канале и увеличение степени заполнения сечения канала электронным потоком. Максимальная величина ведущего магнитного поля ограничена на уровне 0,6—0,8 Т необходимостью последующего сжатия магнитного потока при введении пучка в соленоидальную плазменную ловушку. По этой причине в этих экспериментах выбор величины магнитного поля был остановлен на значении $B_z = 0,6$ Т, после чего было проведено последовательное от одной серии опытов к другой увеличение толщины пучка в канале. Ограничением на минимальное расстояние от границы пучка до стенки канала является ларморовский радиус его электронов, а также возможное продвижение поперек магнитного поля пристеночной плазмы.

На рис. 4 представлены осциллограммы напряжения на диоде U_d и токи пучка на выходе из вакуумного канала I_c , а на рис. 5 — отпечатки поперечного сечения пучка на выходе из канала. Видно (см. выстрел 473), что, если пучок занимает лишь 1/6 зазора в вакуумном канале, и ток его настолько велик, что приближа-

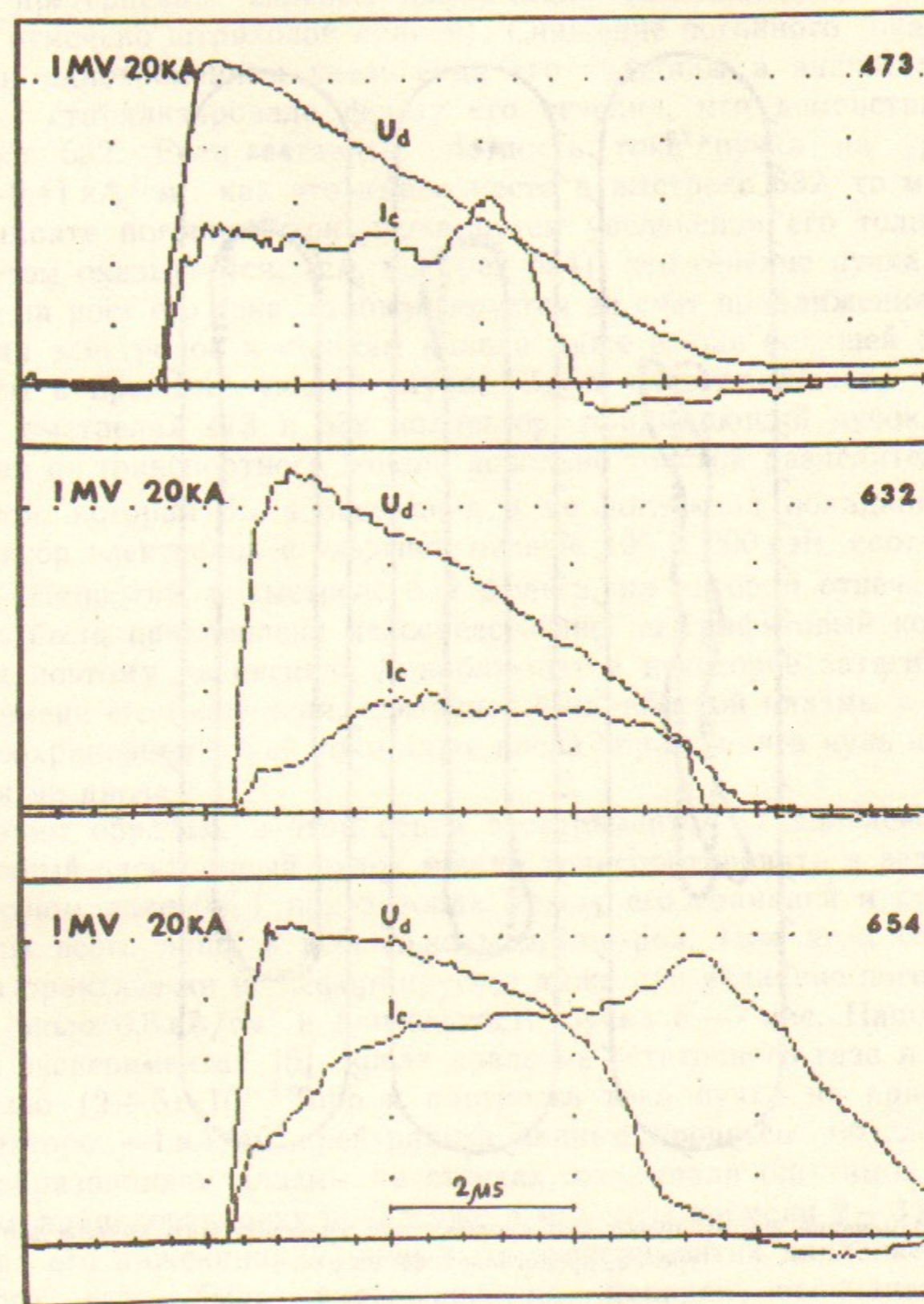


Рис. 4. Осциллограммы, характеризующие транспортировку в вакуумном канале ленточного пучка толщиной 6, 15 и 22 мм.

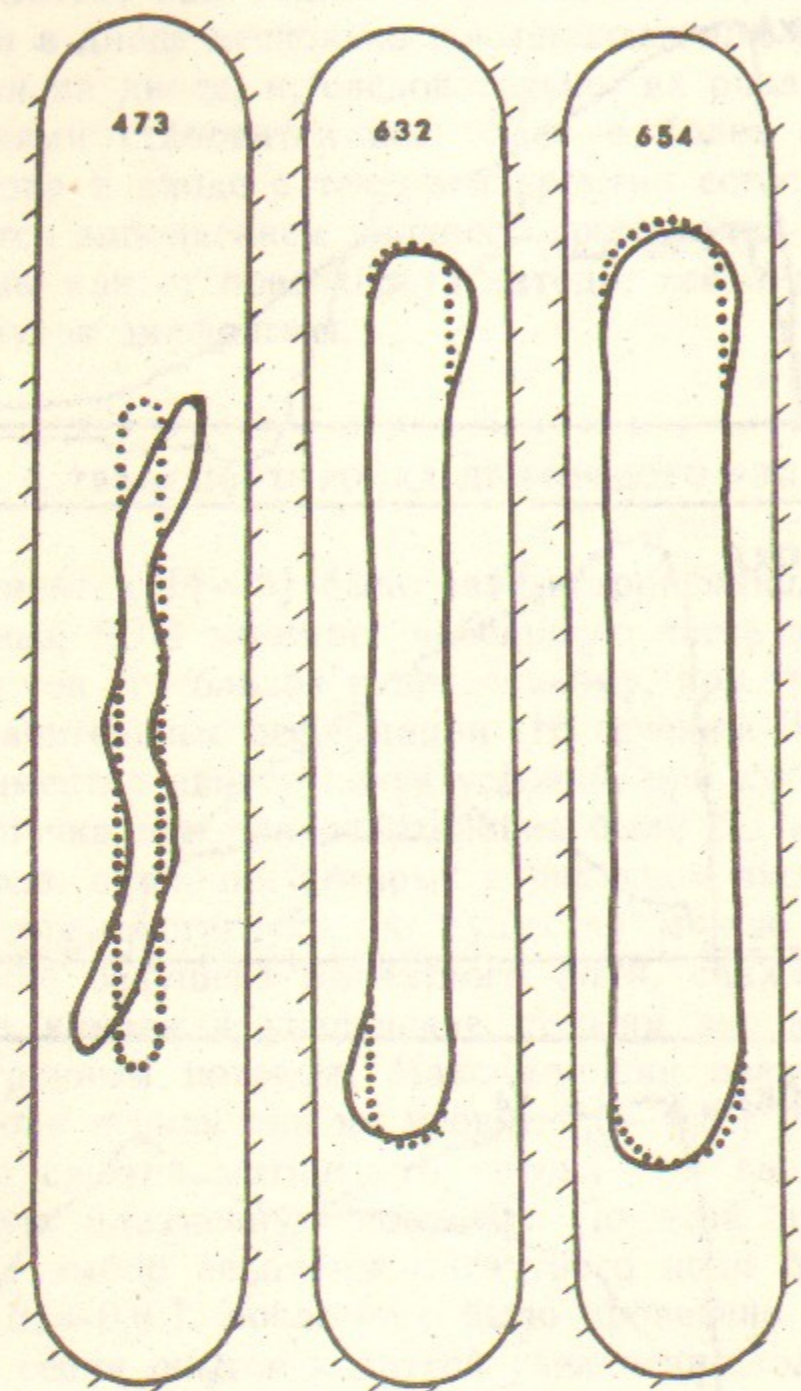


Рис. 5. Изменение формы пучка при прохождении транспортного канала для выстрелов, представленных на рис. 4.

ется к вакуумному пределу, то сечение пучка при его транспортировке претерпевает сильные деформации (неискаженное сечение пучка отмечено штриховой линией). Снижение погонного тока пучка при одновременном увеличении его толщины в значительной степени стабилизировало форму его сечения, что демонстрирует выстрел 632. Если оставить плотность тока пучка на уровне $(0,3-0,4) \text{ кА/см}^2$, как это имело место в выстреле 632, то можно наращивать погонный ток пучка путем увеличения его толщины. При этом оказывается, (см. выстрел 654), что сечение пучка, несмотря на рост его тока, стабилизируется за счет приближения траекторий электронов к стенкам канала даже в еще большей степени, чем в предшествующем случае. Здесь следует указать на то, что в выстрелах 473 и 632 коллектор, принимающий пучок, был отделен от транспортного канала довольно толстой разделительной фольгой, которая была заземлена и не допускала попадания на коллектор электронов с энергией меньше 100 и 200 кэВ, соответственно. Напротив, в выстреле 654 фольга, на которой отпечатался пучок, была прикреплена непосредственно на графитовый коллектор, и поэтому на сигнале I_c наблюдается некоторое затягивание по времени его окончания, связанное с наработкой плазмы в канале и сохранением в ней тока даже после обращения в нуль напряжения на диоде.

Таким образом, в этой серии экспериментов установлено, что ленточный электронный пучок можно транспортировать в ведущем магнитном поле 0,6 Т при зазорах между его границей и стенкой камеры всего лишь в несколько миллиметров. При этом сечение пучка практически не деформируется даже при величине погонного тока около $0,8 \text{ кА/см}^2$ и длительности пучка 5—7 мкс. Напомним, что в экспериментах [5], когда давление остаточного газа в канале было $(2 \div 5) \cdot 10^{-4} \text{ Торр}$ и плотность тока пучка на приемном коллекторе $\sim 1 \text{ кА/см}^2$, нейтрализационные процессы, обусловленные образованием плазмы на стенках, оказывали ощутимое влияние на транспортировку пучка уже в моменты времени 2—3 мкс от начала его инъекции. В данных же экспериментах давление остаточного газа было уменьшено на порядок величины (до $(2 \div 5) \cdot 10^{-5} \text{ Торр}$), а плотность тока снижена в несколько раз, и таким образом удалось избежать влияния процессов нейтрализации РЭП на его транспортировку.

Для оценки влияния нейтрализационных процессов на транспортировку пучка важно установить соотношение между током пучка, наблюдаемым в эксперименте, и предельным вакуумным

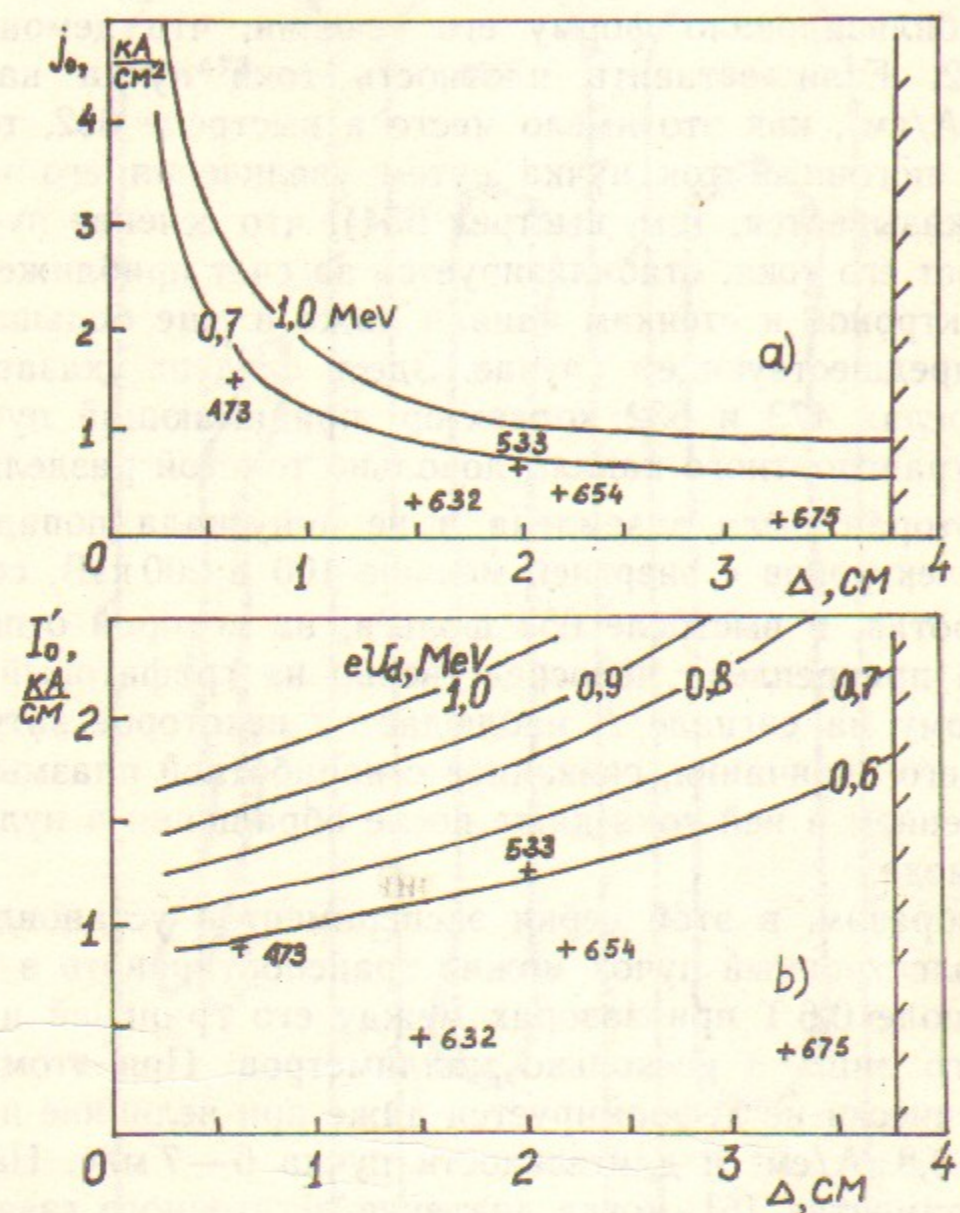


Рис. 6. Сравнение расчетного и экспериментально полученных значений плотности тока и погонного тока для пучков разной толщины.

током для транспортного канала. С этой целью были проведены расчеты*) величины предельного погонного тока и плотности тока ленточного пучка с различной толщиной Δ в щелевом канале с зазором между стенками $a=3,8$ см. Сопоставление экспериментальных результатов с теоретическими расчетами приведено на рис. 6. При этом как при обработке результатов эксперимента, так и при проведении расчетов на ЭВМ предполагалось, что плотность тока электронов распределена однородно по сечению пучка. Как видно из рис. 2 и 4, ток пучка в канале I_c в течение нескольких микросекунд остается приблизительно на одном уровне. По этой причине при сопоставлении погонного тока с расчетными значениями из осциллограмм тока пучка бралось всего лишь по одному значению, соответствующему этому уровню. Из рис. 6,а видно, что зарегистрированные в эксперименте значения в два-три раза ниже расчетного вакуумного предела и, следовательно, влияние собственных электрических полей пучка на его движение должно быть незначительным. Погонное значение I_0' предельного вакуумного тока является слабой функцией толщины пучка Δ , вследствие чего оказывается, что плотность предельного вакуумного тока довольно сильно растет при уменьшении толщины пучка (см. рис. 6,а). Это могло бы открыть путь получения ленточных пучков с высокой плотностью тока. Однако, в условиях конечного ведущего магнитного поля существуют ограничения снизу на толщину пучка из-за возможности развития в нем неустойчивостей. Так, для гарантированного отсутствия диокотронной неустойчивости вне зависимости от магнитного поля необходимо, чтобы толщина пучка занимала, по крайней мере, не менее половины зазора в щелевом канале. Кроме того, согласно работе [13], для обеспечения устойчивости его равновесного сечения для всякого значения погонного тока пучка требуется вполне определенная величина ведущего магнитного поля.

Ориентируясь на изложенные выше результаты, состоящие в том, что при токе пучка, раза в два меньшем предельного вакуумного тока, при транспортировке пучка его сечение сохраняет свою форму, можно предложить следующий путь повышения плотности тока ленточных РЭП (см. рис. 7). В исходной точке по длине канала электронный пучок с плотностью тока, равной половине плотности предельного вакуумного тока j_0 , занимает половину зазора в вакуумном канале ($\Delta=a/2$) с расстоянием между стенками

*) Подробное описание методики расчетов будет дано в работе [13].

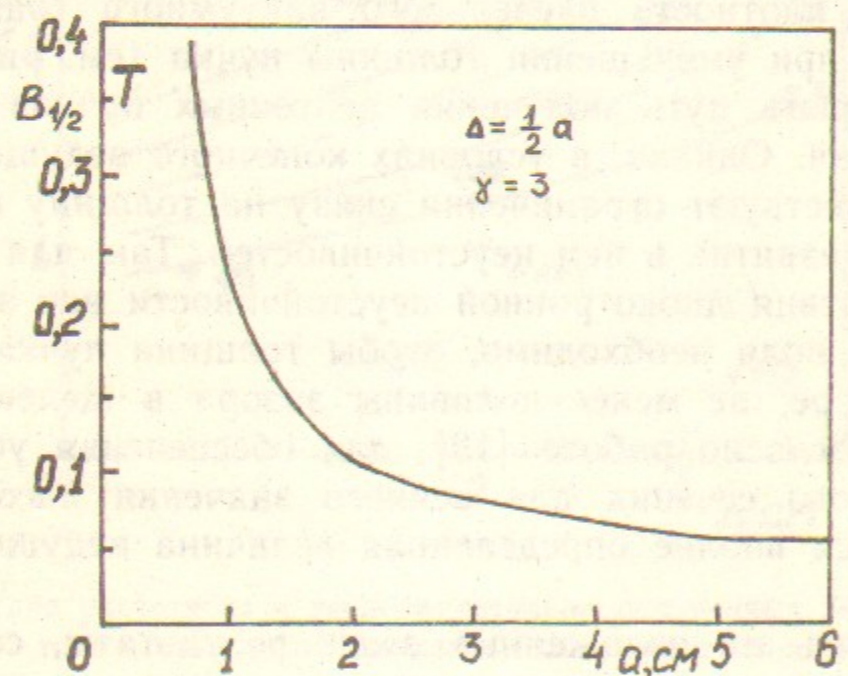
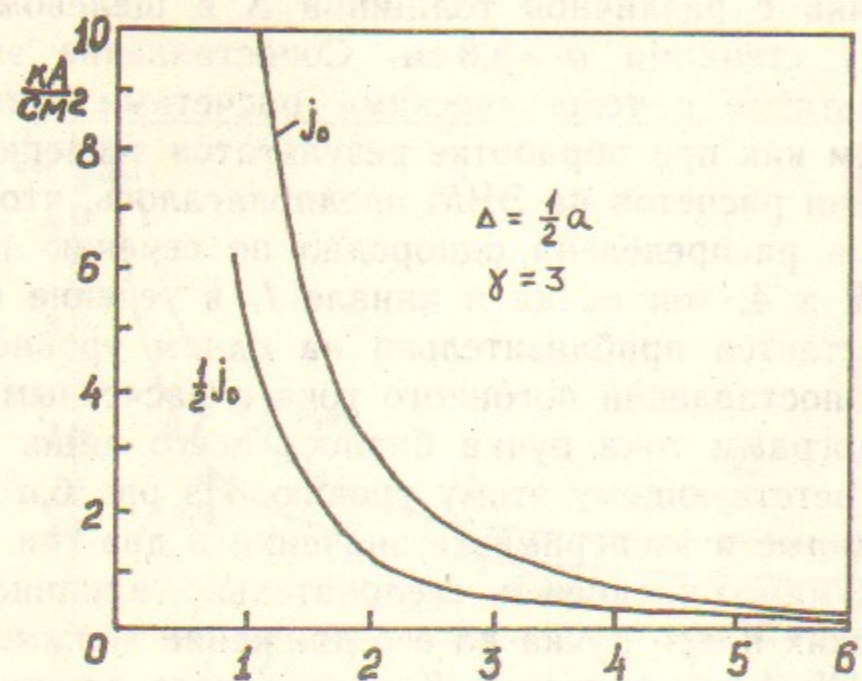


Рис. 7. Зависимости плотности предельного вакуумного тока и магнитного поля, необходимого для устойчивости пучка с $j = j_0/2$, заполняющем половину канала, от его толщины.

$a = 3$ см. При этом для устойчивости его сечения достаточно магнитного поля $B_z \approx 0,1$ Т. Далее, по мере продвижения пучка вдоль оси канала происходит одновременно с повышением в нем ведущего магнитного поля также и уменьшение расстояния между его стенками. При зазоре канала $a = 1$ см половина критического вакуумного тока при условии $\Delta = a/2$ обеспечивает величину плотности тока $5-6 \text{ кА}/\text{см}^2$, что в $7-8$ раз превышает исходную плотность тока электронов. При этом требуемая для устойчивости формы сечения пучка величина магнитного поля достигает всего лишь $0,4$ Т (см. рис. 7, б). Поэтому, выбрав в начальной точке значение ведущего магнитного поля с двойным запасом ($B_H = 0,2$ Т), а в конечной, соответственно, $B_K = 1,0 \div 1,2$ Т, можно в сходящемся канале достигнуть плотности тока в ленточном РЭП масштаба $5 \text{ кА}/\text{см}^2$.

Указанная оценка возможной плотности тока ленточного пучка имеет двойной запас по отношению к предельному вакуумному току. Однако, как показали эксперименты, этот запас не является столь необходимым, если не беспокоиться об угловом разбросе пучка. Оказалось, что пучок может сохранять форму своего сечения и при токе, близком к предельному. Этот факт демонстрирует выстрел 533, который представлен на рис. 8. В этом эксперименте напряжение на диоде имело пониженное значение, а длительность генерации пучка составляла 6 мкс. При этом, как видно из рисунка, в течение первых 3 микросекунд ток в вакуумном канале меньше предельного тока, а затем из-за движения плазмы в диодном промежутке ток инжекции выходит на уровень предельного (расчетные значения предельного вакуумного тока нанесены на осциллограмму I_c штриховой линией; на рис. 6 экспериментальная точка 533 относится к моменту времени, соответствующему максимуму тока I_c). Таким образом, в последующие три микросекунды ток пучка в канале имеет величину, даже несколько превышающую вакуумный предел. Тем не менее, как видно из приведенного отпечатка пучка, его сечение не претерпевает сильной деформации при транспортировке. Это позволяет надеяться на возможность достижения высокой плотности тока в ленточных РЭП.

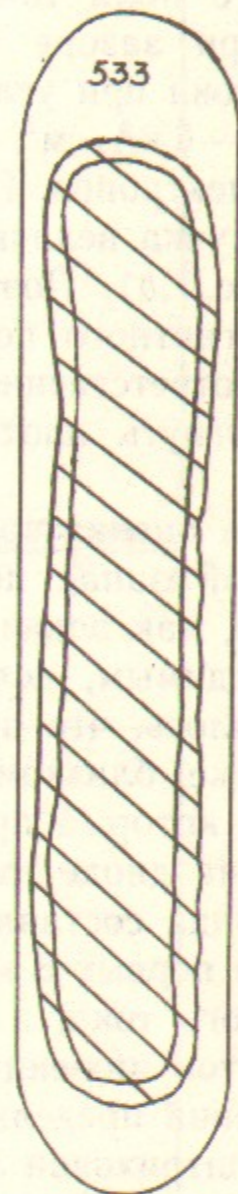
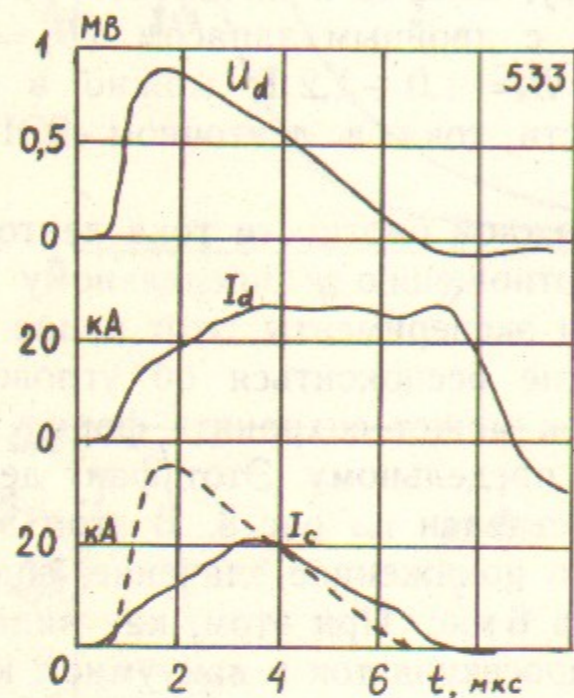


Рис. 8. Осциллограммы напряжения, тока диода, тока коллектора и форма сечения пучка для случая, когда ток пучка достигает вакуумного предела.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге проведенных исследований можно выделить следующие основные результаты.

1. Экспериментально доказана возможность генерации в магнитно-изолированных диодах ленточных РЭП микросекундной длительности. В магнитном поле $B \approx 0.5$ Т получен ленточный пучок с погонным током масштаба 1 кА/см и длительностью $\tau_b \approx 5$ мкс, что существенно превышает параметры, достигнутые для коаксиальных диодов; полный энергозапас в пучке $Q_b \approx 50$ кДж.

2. Численным моделированием на ЭВМ прослежено влияние геометрии диодного промежутка и входа в вакуумный канал на угловую расходимость электронов, генерируемых в ленточном МИД. Показано, что в таком диоде можно получать пучки с угловой расходимостью электронов порядка 1° при плотности тока 0.5 кА/см² даже в относительно слабом (~ 0.5 Т) магнитном поле.

3. Экспериментально выявлены условия, при которых транспортировка сильноточных ленточных РЭП в вакуумных каналах осуществляется с сохранением формы и размеров их поперечного сечения. Показано, что в вакуумном канале с ведущим магнитным полем $B \approx (0.5 \div 1.0)$ Т можно транспортировать такие пучки с сохранением формы и размеров поперечного сечения при величине погонного тока $I' \sim 1$ кА/см, по крайней мере, в течение времени $5 - 7$ мкс.

4. Проведен теоретический анализ, который с учетом полученных экспериментальных результатов указывает на достижимость в вакуумных каналах с магнитным полем $B \sim 1$ Т плотности тока ленточных пучков около 5 кА/см².

Выражаем признательность Д.Д. Рютову за постоянную поддержку данной работы и В.С. Койдану за содействие ее выполнению. Мы благодарны В.В. Конюхову, А.Г. Макарову и А.Д. Хильченко за помощь в автоматизации эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рютов Д.Д. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез. М., 1978, вып.1, с.96.
2. Воропаев С.Г., Князев Б.А., Койдан В.С. и др. Доклад на 3-й конференции по инженерным проблемам УТС, Ленинград, 1984.
3. Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Avrorov A.P. et al., XI-th Conference Proceeding Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research. 1986, v.2, p.323-336. IAEA, Vienna, 1987.
4. Arzhannikov A.V., Avrorov A.P., Lyamzin M.P., Sinitsky S.L., Yushkov M.V. Proc. XIII Int. Symp. on Discharges and Electr. Insulation in Vacuum. Paris, 1988, p.671.
5. Аржанников А.В., Лямзин М.П., Сеницкий С.Л., Юшков М.В. Эксперименты по транспортировке мощного микросекундного ленточного РЭП в вакуумном канале. В печати.
6. Рютов Д.Д. Двумерные равновесия электронного пучка в ведущем магнитном поле. Рукопись, 1984.
7. Астрелин В.Т., Ерофеев В.И. Труды VI Всесоюзной конференции по сильноточной электронике, Томск, 1986, т.1, с.160.
8. Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Sinitsky S.L. Proc. of XVIII Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Swansea, UK, 1987, p.206.
9. Бакшаев Ю.Л., Блинов П.И., Долгачев Г.И., Закатов Л.П., Скорюпин В.А. Вopr. атом. науки и техн. Сер. Термояд. синтез. М., 1983, вып.3(13), с.37.
10. Басманов А.Б., Горбулин Ю.М., Долгачев Г.И. и др. Физика плазмы, 1986, т. 12, вып.11, с.1319.
11. Бастриков А.Н., Бугаев С.П., Киселев И.Н. и др. Журнал технической физики, 1988, т.58, вып.3, с.483.
12. Астрелин В.Т., Иванов В.Я. Автометрия, 1980, № 3, с.92.
13. Аржанников А.В., Сеницкий С.Л. Равновесие и устойчивость ленточного электронного пучка в вакуумном канале с магнитным полем. — XXI Всесоюзная конференция по физике плазмы и УТС. Звенигород, 1989.

А.В. Аржанников, В.Т. Астрелин, В.А. Капитонов,
М.П. Лямзин, С.Л. Сеницкий, М.В. Юшков

Генерация ленточных РЭП в магнитно-изолированном диоде и транспортировка их при токе инжекции меньше вакуумного предела

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 16.03.1989 г.
Подписано в печать 5.06.1989 г. МН 10247
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,8 печ.л., 1,5 уч.-изд.л.
Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 81

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.