

В.75

44



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

С.Г. Воропаев, Б.А. Князев, А.В. Ларионов,
С.В. Лебедев, В.В. Чикунов, М.А. Щеглов

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ
ОБРАТНОГО ПЛАЗМЕННОГО ТОКА
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
ПО МАГНИТНОЙ КОМПРЕССИИ
МИКРОСЕКУНДНОГО РЭП**

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
физики СО АН СССР
ИЯФ. *Левин*

ПРЕПРИНТ 87-87



НОВОСИБИРСК

Определение профиля обратного плазменного тока
в экспериментах по магнитной компрессии
микросекундного РЭП

*С.Г. Воропаев, Б.А. Князев, А.В. Ларионов,
С.В. Лебедев, В.В. Чикунов, М.А. Щеглов*

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

Экспериментально реализован метод измерения распределения обратного плазменного тока в сечении релятивистского электронного пучка, основанный на измерении скорости азимутального вращения пучка, распространяющегося во внешнем магнитном поле. Проведены измерения профиля обратного тока в экспериментах по магнитной компрессии мощного микросекундного РЭП (1 МВ, 75 кА, 4 мкс, 100 кДж, 5 кА/см²). Получена информация о степени зарядовой нейтрализации пучка при низком давлении газа в дрейфовой камере.

Динамика образования обратного плазменного тока при инжекции сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП) в плазму или нейтральный газ исследовалась во многих экспериментальных работах и к настоящему времени достаточно хорошо изучена (см., например, [1]). Вместе с тем, вопрос о распределении обратного тока по сечению плазмы изучен еще недостаточно. В работе [2] были проведены измерения плазменного тока с помощью коллекторов, расположенных в плазменном столбе вне пучка. Для проведения подобных измерений внутри пучка можно использовать металлические коллекторы, напыленные на тонкие диэлектрические пленки, прозрачные для электронов пучка [3]. Однако при измерениях внутри пучков с большим энергосодержанием применение этого метода затруднено тем, что фольги полностью разрушаются уже в течение импульса.

В настоящей работе был реализован способ определения радиального профиля обратного плазменного тока, основанный на измерении скорости азимутального вращения пучка, распространяющегося во внешнем продольном магнитном поле. Идея метода описана в работе [4], где приведены основные соотношения, необходимые для расчетов.

Эксперименты были проведены на ускорителе У-1 [5], в системе (рис. 1), предназначенной для компрессии мощного микросекундного пучка в магнитном поле пробочной конфигурации [6]. Электронный пучок с энергосодержанием 100 кДж [7] генерируется в квазиплоском диоде с графитовым катодом 1, диаметром 20 см и через анодную фольгу 2 инжектируется в дрейфовую ка-

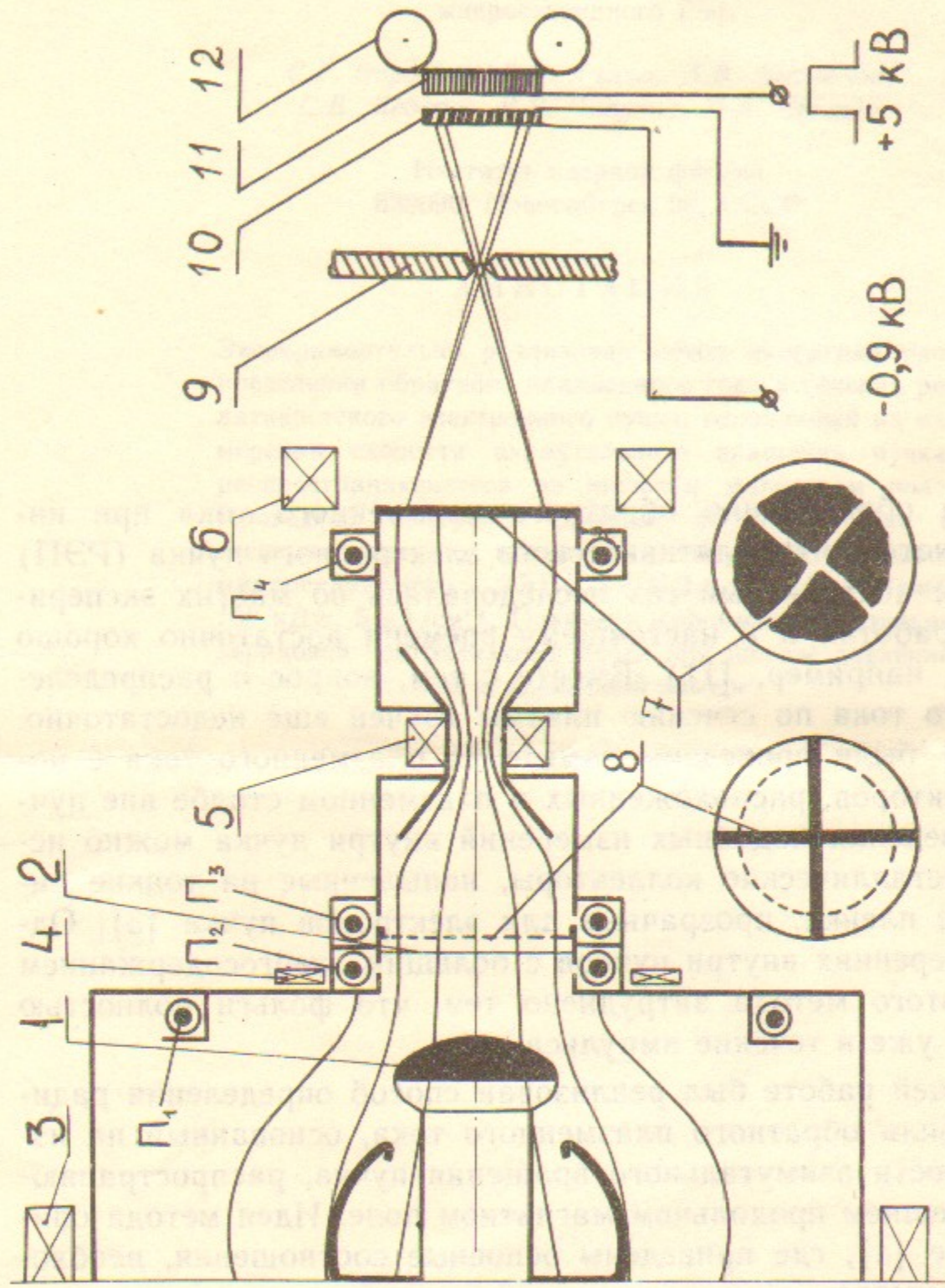


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — катод ускорителя; 2 — анодная фольга; 3 — 6 — катушки магнитного поля; 7 — коллектор пучка; 8 — маска; 9 — камера-обскура; 10 — микроканальная пластина; 11 — стекловолоконная шайба; 12 — фото-пленка. Π_1 — Π_4 — пояса Роговского. Тонкие линии — силовые линии магнитного поля.

меру. Камера заполняется нейтральным газом (в описываемых экспериментах — воздухом) при давлении $5 \cdot 10^{-5} - 1$ Торр.

В дрейфовой камере осуществляется адиабатическое сжатие пучка при транспортировке в нарастающем магнитном поле, создаваемом катушками 3—6. Величина поля нарастает от 5 кГс в диоде до 100 кГс в области максимума поля, а затем вновь снижается до 5 кГс в плоскости, где пучок принимается коллектором. Диаметр пучка на анодной фольге (лавсан толщиной 10 мкм с двусторонним алюминиевым покрытием) составляет 17 см, а в области максимального сжатия ≈ 4 см. Энергосодержание и ток прошедшего через камеру сжатия пучка регистрировались графитовым коллектором-калориметром, располагавшимся за выходной фольгой камеры (см. рисунки в [6—8]). В экспериментах, описанных ниже, приемником пучка служил диск из нержавеющей стали толщиной 5—7 мм.

Ток пучка перед анодной фольгой регистрируется поясами Роговского Π_1 и Π_2 , а полный ток в камере, складывающийся из тока РЭП и обратного тока в образующейся плазме, поясами Π_3 и Π_4 (обозначения соответствующих токов: $I_1 - I_4$). Предыдущие эксперименты [6—8] показали, что во всем диапазоне давлений газа через магнитную пробку проходит пучок с током до 75 кА, что примерно на порядок превышает предельный вакуумный ток. Это означает, что даже при низких давлениях газа наблюдается эффективная зарядовая нейтрализация пучка.

При достаточно высоком ($\geq 10^{-4}$ Торр) давлении газа наблюдается частичная компенсация тока пучка обратным током, генерирующимся в плазме, образующейся в камере сжатия. Вопрос о локализации этого тока приобретает особое значение именно для экспериментов по магнитной компрессии пучка, поскольку распределение обратного тока по радиусу может оказывать влияние на величину дополнительного питч-угла, приобретаемого электроном из-за излома силовых линий магнитного поля на анодной фольге [9].

Измерение скорости вращения пучка в наших экспериментах проводилось следующим образом. Непосредственно за анодной фольгой 2 устанавливалась маска, выполненная, как правило, в виде креста с шириной полосы 1 см. Толщина маски была больше длины пробега электронов пучка. Изображение маски 8 переносится электронами пучка на выходной коллектор 7. Из-за вращения пучка при его транспортировке через дрейфовую камеру это изображение оказывается повернутым на некоторый угол $\varphi(r)$ по от-

ношению к исходному положению маски. Расстояние между маской и коллектором 55 см.

При торможении пучка в коллекторе возникает тормозное рентгеновское излучение с интенсивностью, пропорциональной плотности тока пучка в данном месте мишени. Изображение сечения пучка регистрировалось с помощью камеры-обскуры 9 и рентгеновского электронно-оптического преобразователя [10], изготовленного ВНИИОФИ на базе оконечного усилительного каскада ЭОП ПИМ-104В [11]. Детектирующим и одновременно усиливающим элементом является микроканальная пластина 10. Длительность экспозиции τ кадра определяется длительностью прямоугольного импульса, подаваемого на зазор между выходом МКП и люминофорным экраном, нанесенным на торец волоконно-оптической шайбы 11. Изображение регистрировалось на фотопленке РФ-3 12, прижатой к выходу волоконно-оптической шайбы. В данных экспериментах величина τ составляла 0,3 мкс, а пространственное разрешение определялось отверстием камеры-обскуры и составляло 1 см при диаметре пучка на выходе ≈ 20 см.

Распределение полного тока по радиусу пучка r определялось по измеренной величине угла поворота $\varphi(r)$ с помощью соотношения (см. [4])

$$\frac{d\varphi(r)}{dz} = \frac{v_\varphi}{rv_z} = \frac{H_\varphi}{rH_z} = \frac{2I(r)}{r^2cH_z}. \quad (1)$$

Здесь v_φ — скорость вращения пучка, v_z — продольная скорость электронов пучка, H_φ и H_z — азимутальное и продольное магнитные поля, соответственно, а $I(r)$ — полный ток, протекающий внутри окружности с радиусом r . Величина $\frac{d\varphi}{dz}$ практически постоянна вдоль силовой линии магнитного поля, поскольку в сильном магнитном поле величина тока внутри силовой трубки постоянна, а изменения величины $H_z r^2$ малы в силу сохранения магнитного потока. Для условий нашего эксперимента величина угла поворота на границе пучка связана с полным током, протекающим внутри сечения пучка, следующим образом:

$$\varphi(\text{в градусах}) = 2I(\text{кА}). \quad (2)$$

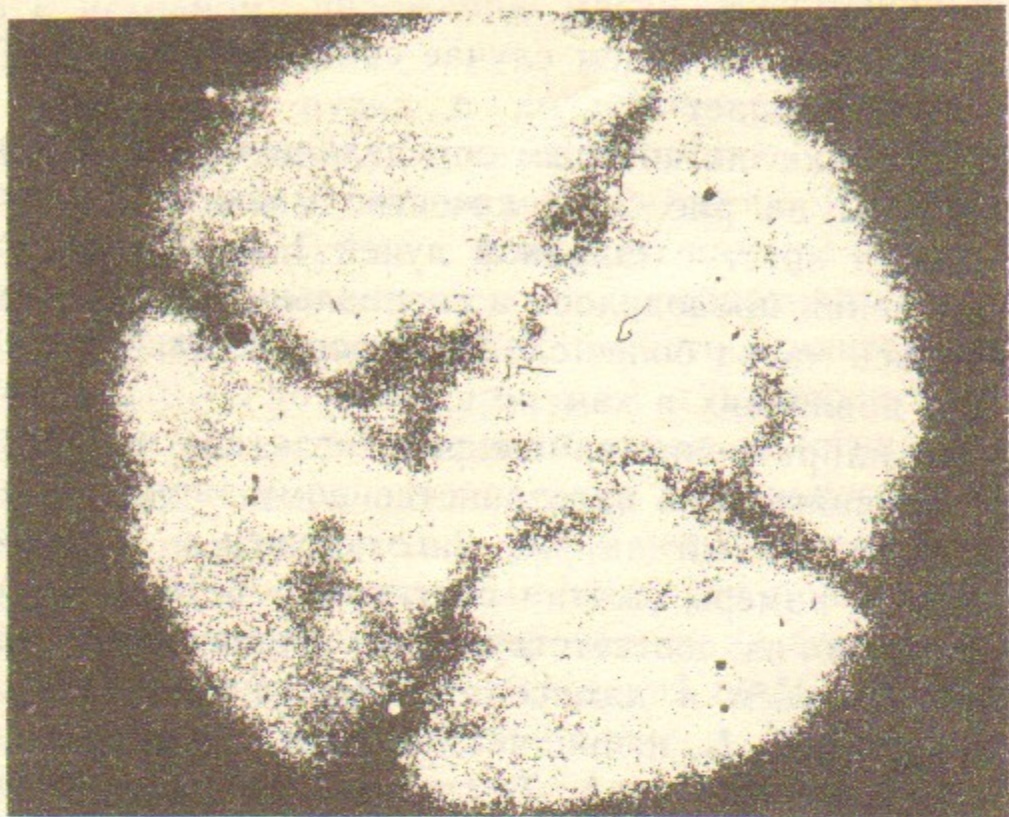
Видно, что при характерной величине тока ~ 50 кА угол поворота составляет 100° и легко может быть измерен. Заметим, что поскольку магнитное поле неоднородно вдоль траектории, то имеется дополнительное вращение пучка вследствие градиентного и цен-

тробежного дрейфов. В нашем случае соответствующий угол поворота пучка не превышает 3° .

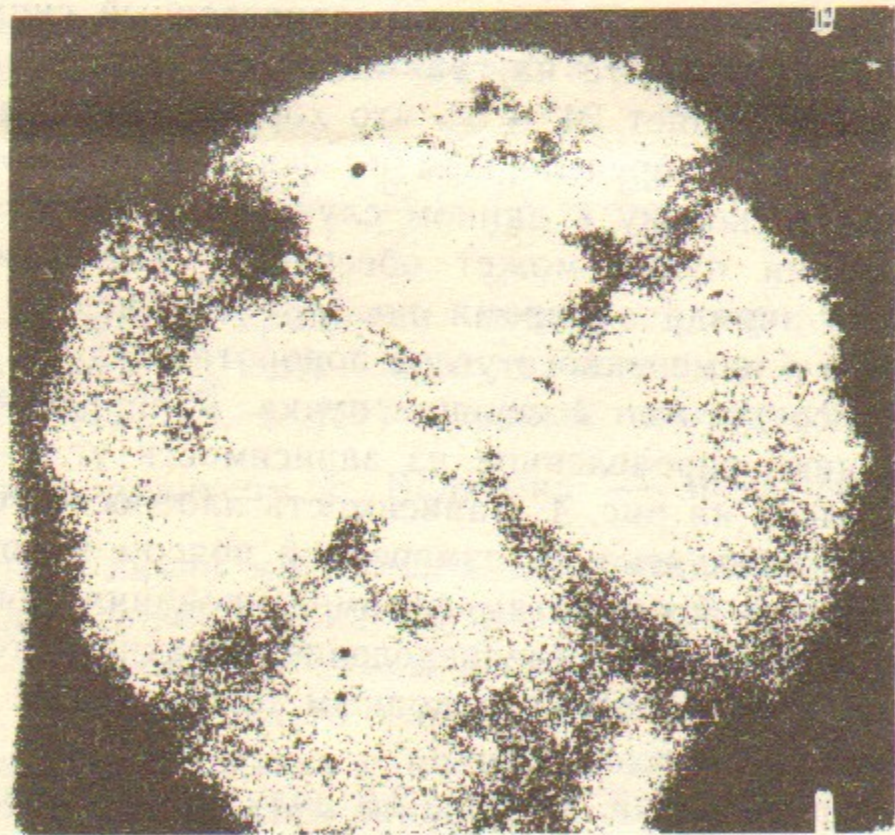
Типичные снимки, по которым определялась скорость вращения пучка, приведены на рис. 2. В качестве маски в данном случае был использован крест с шириной лучей 1 см. Определение направления вращения проводилось в специальных выстрелах, в которых применялась маска более сложной формы. Эксперименты, проведенные при давлениях в камере сжатия от $5 \cdot 10^{-5}$ до 10^{-1} Торр показали, что направление вращения всегда соответствовало случаю нейтрализованного по пространственному заряду пучка [4].

Снимок, приведенный на рис. 2,а, получен в условиях, когда давление газа в камере сжатия составляло $8 \cdot 10^{-3}$ Торр. В этом случае, как видно из соответствующих осциллограмм (рис. 3), в плазме образующейся в камере сжатия, генерируется обратный ток, и полный ток I_3, I_4 , начиная с $t \approx 0,3$ мкс, практически не меняется и составляет ≈ 14 кА. Ток пучка, прошедшего через магнитную пробку на коллектор, равен току пучка на входе I_2 и в момент $t \approx 0,6$ мкс, когда был получен приведенный снимок, составляет 25 кА. Угол поворота на границе пучка, измеренный по данному снимку, составляет $24^\circ \pm 5^\circ$, что хорошо совпадает с расчетным значением 28° , определенным по формуле (1) для величины полного тока. Поскольку в данном случае уже прямая ионизация газа электронами пучка может обеспечить нейтрализацию пространственного заряда за время $\tau \approx 1n\sigma v \approx 50$ нс, то из совпадения расчетного и измеренного углов поворота следует, что весь обратный ток сосредоточен в сечении пучка. Распределение полного тока по сечению, определенное из зависимости угла поворота от радиуса, показано на рис. 4. Зависимость плотности тока пучка от радиуса была определена по измеренной поясом Роговского величине тока пучка и результатам фотометрирования снимка рис. 2,а вне изображения маски. Распределение обратного тока, равного разности между током пучка и полным током, также показано на рис. 4.

Снимок, приведенный, на рис. 2,б получен при давлении газа в камере сжатия $5 \cdot 10^{-4}$ Торр. При таком давлении обратный ток отсутствует [6] и полный ток совпадает с током пучка, достигающим в максимуме 60 кА. В момент времени 0,7 мкс, когда был получен данный снимок, ток пучка составлял 25 кА, т.е. существенно превосходил предельный вакуумный ток (~ 6 кА для сплошного пучка, [12]). Хорошее совпадение измеренного ($\varphi = 45^\circ \pm 5^\circ$) и рассчитанного по формуле (1) ($\varphi = 50^\circ$) углов поворота свиде-



a



b

Рис. 2. Обскурограммы пучка на выходе из дрейфовой камеры. Длительность экспозиции 0,3 мкс. Давление газа в камере сжатия: $8 \cdot 10^{-3}$ Торр (a); $5 \cdot 10^{-4}$ Торр (b).

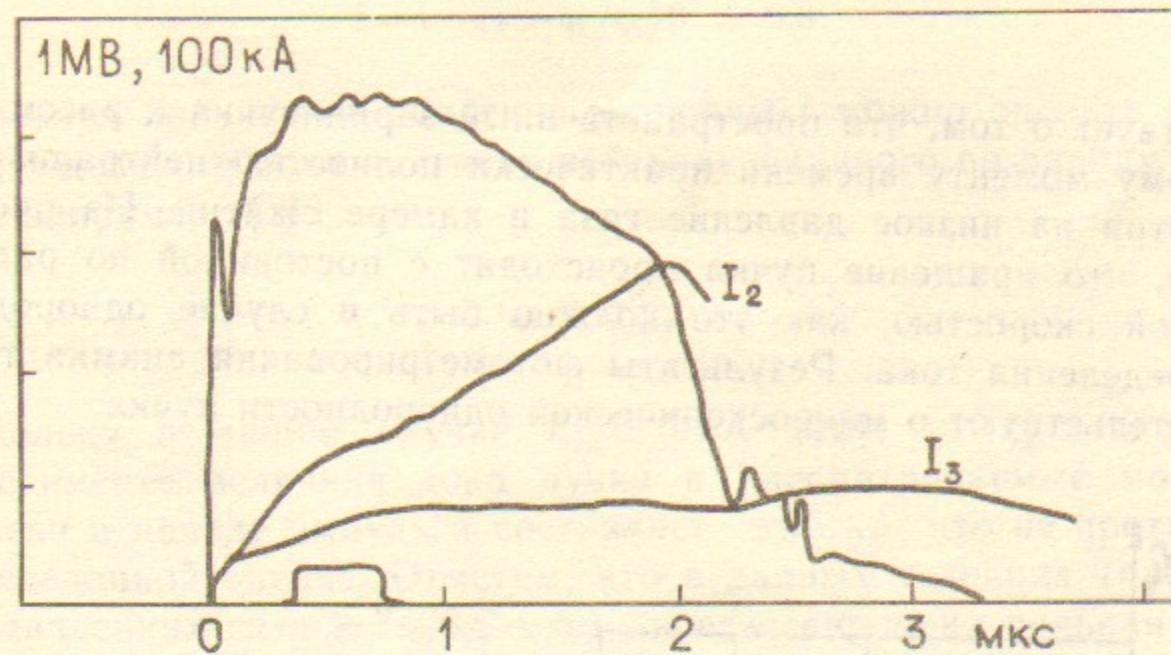


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на диоде, тока пучка I_2 и полного тока I_3 , соответствующие обскурограмме, приведенной на рис. 2,а. Прямоугольный сигнал — отпирающий импульс ЭОП.

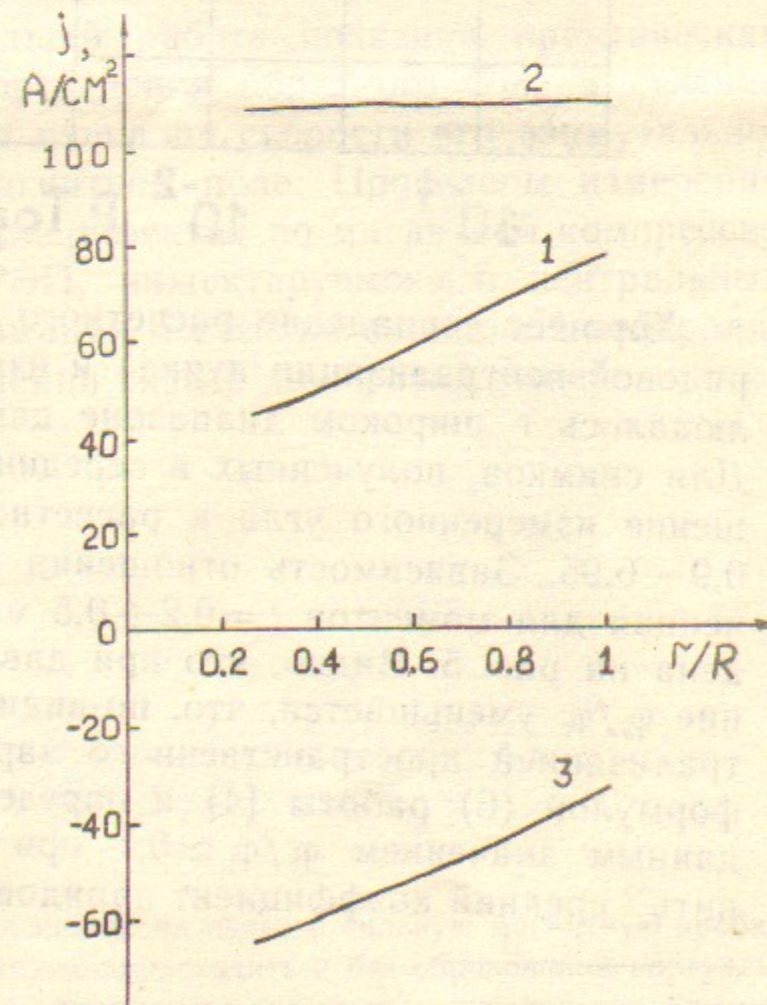


Рис. 4. Радиальные профили полного тока (1), тока пучка (2) и обратного тока (3), определенные по обскурограмме рис. 2,а.

тельствует о том, что пространственный заряд пучка к рассматриваемому моменту времени практически полностью нейтрализован, несмотря на низкое давление газа в камере сжатия. Из рис. 2,б видно, что вращение пучка происходит с постоянной по радиусу угловой скоростью, как это должно быть в случае однородного распределения тока. Результаты фотометрирования снимка также свидетельствуют о макроскопической однородности пучка.

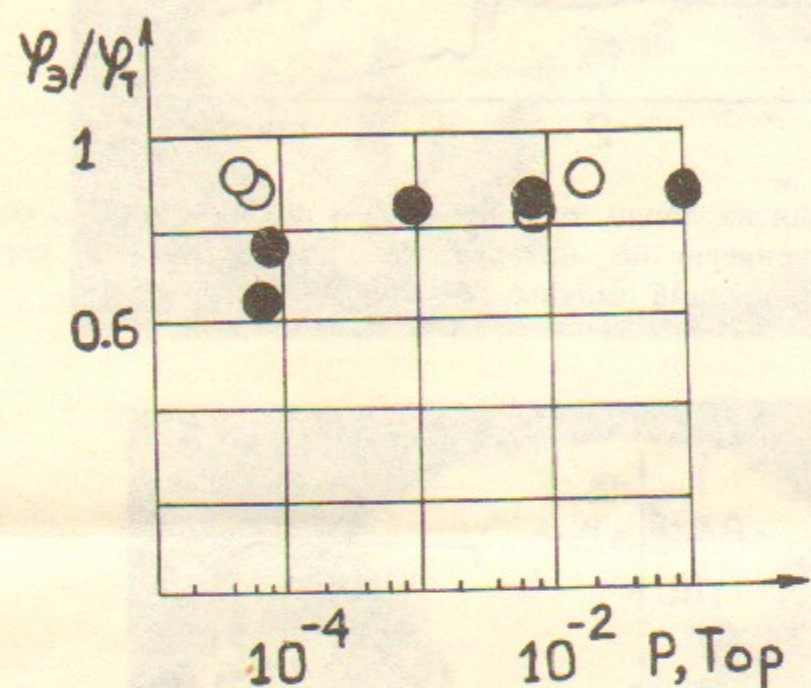


Рис. 5. Зависимость отношения измеренного угла поворота φ_3 к расчетному φ_t от давления в камере сжатия
 ● — в момент $t=0,6$ мкс от начала импульса, ○ — в $t=1,5 \div 2$ мкс.

Хорошее совпадение расчетного (в предположении полной зарядовой нейтрализации пучка) и измеренного углов поворота наблюдалось в широком диапазоне давлений газа в камере сжатия. Для снимков, полученных в середине или в конце импульса отношение измеренного угла к расчетному (φ_3/φ_t) всегда составляло 0,9—0,95. Зависимость отношения φ_3/φ_t от давления газа, полученная для моментов $t=0,2 \div 0,5$ мкс от начала импульса, приведена на рис. 5. Видно, что при давлениях $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ Торр отношение φ_3/φ_t уменьшается, что, по-видимому, связано с неполной нейтрализацией пространственного заряда пучка. Воспользовавшись формулой (6) работы [4] и определенным по экспериментальным данным значением $\varphi_3/\varphi_t \simeq 0,7$ при $P=5 \cdot 10^{-5}$ Торр, можно оценить*) средний коэффициент зарядовой нейтрализации f :

*) Величина β^2 в приведенной оценке взята равной $\beta_0^2 = (\gamma_0^2 - 1)/\gamma_0^2$, где $\gamma_0 = 1 + eU/mc^2$, а eU — кинетическая энергия электронов на анодной фольге. Истинное значение β при $f < 1$ меняется вдоль траектории и должно быть несколько меньше β_0 из-за провисания потенциала пучка.

$$f = 1 - (1 - \varphi_3/\varphi_t) \beta^2 \simeq 0,8.$$

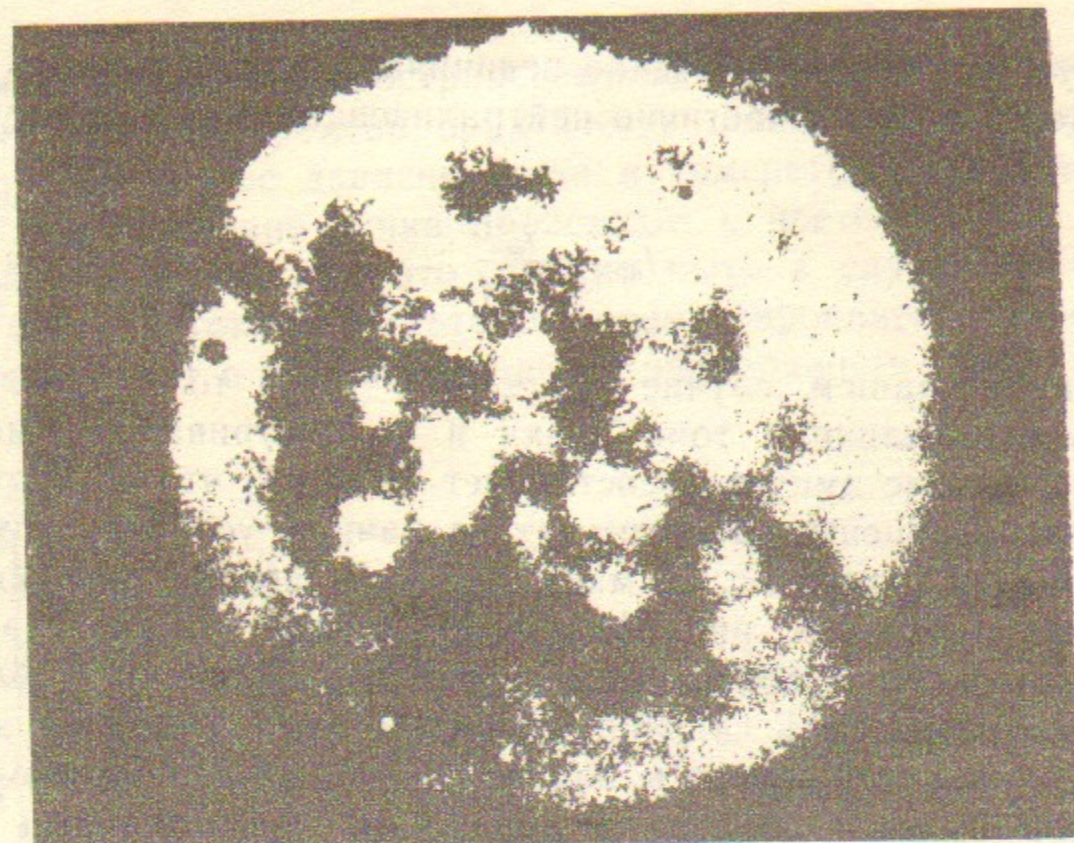
Используя полученное значение величины f можно оценить значение предельного тока частично нейтрализованного по заряду пучка (см., например, [1]):

$$I_{пр} = \frac{I_{вак}}{1-f}.$$

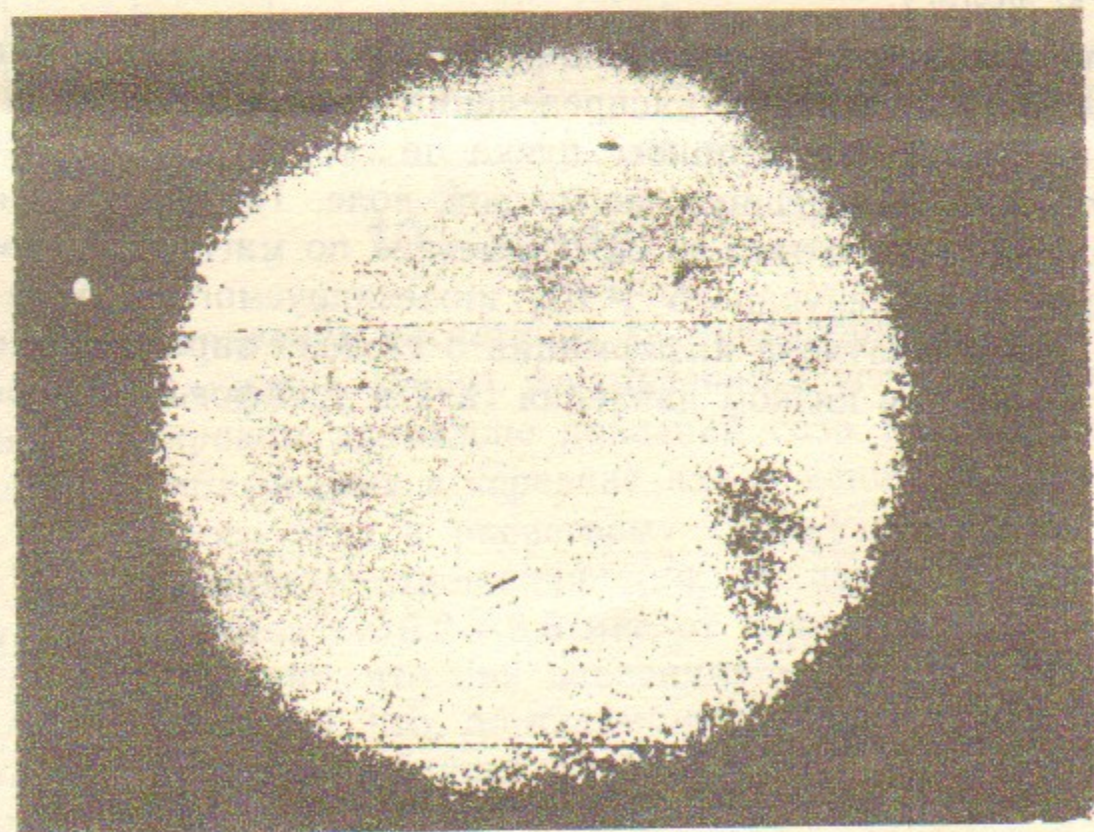
Поскольку в нашем случае $I_{вак} \simeq 6$ кА [12], то $I_{пр} \simeq 30$ кА. В эксперименте величина тока пучка в рассматриваемые моменты времени в начале импульса составляет $\simeq 25$ кА, что не противоречит сделанной оценке. Отметим, что в данных условиях (при низких давлениях газа и $t \leq 0,5$ мкс) зарегистрирована сильная неоднородность пучка (см. рис. 6), отсутствующая при более высоких давлениях газа и в более поздние моменты времени. Наблюдающаяся неоднородность связана, по-видимому, с неполной зарядовой нейтрализацией пучка в начале импульса, отражением части электронов пучка**) обратно в диод и их осцилляциями сквозь анодную фольгу.

Таким образом, в настоящей работе показана практическая возможность измерения распределения обратного тока в сечении релятивистского электронного пучка по скорости его азимутально-го вращения во внешнем магнитном поле. Проведены измерения профиля обратного тока в экспериментах по магнитной компрессии мощного микросекундного РЭП, инжектируемого в нейтральный газ, а также получена информация о степени зарядовой нейтрализации пучка при низком давлении газа в дрейфовой камере.

**) Отметим, что в этом случае при инжекции пучка в сильную магнитную пробку отражение части электронов пучка может происходить и без образования виртуального катода вследствие значительного провисания потенциала пучка и уменьшения полного импульса электронов при сохранении адиабатического инварианта $p_{\perp}^2/2H$.



а



б

Рис. 6. Обскурограмма пучка:
 а — давление в камере сжатия $5 \cdot 10^{-5}$ Торр, $t = 0,5$ мкс от начала импульса; б — давление 10^{-4} Торр, $t = 1$ мкс; маска на выходе не устанавливалась.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1984.
2. Arzhannikov A.V., Koidan V.S. XII Intern. Conf. on Phen. in Ionized Gases, Eindhoven, 1975, v.1, p.278.
3. Bondar Yu.F., Mkhaidze G.P., Savin A.A. VIII Europ. Sect. Conf. on Atom. Molec. Phys. of Ionized Gases, Greifswald, 1986, p.218.
4. Лебедев С.В. Препринт ИЯФ СО АН СССР 86-178. Новосибирск, 1986.
5. Воропаев С.Г., Койдан В.С., Лебедев С.В., Николаев В.С., Чукунов В.В., Щеглов М.А. ДАН СССР, 1984, т.276, с.111.
6. Chikunov V.V., Knyazev B.A., Koidan V.S., Lebedev S.V., Shcheglov M.A. XII Europ. Conf. on Contr. Fusion. and Plasma Phys., Budapest, 1985, v.9F. pt 1, p.508.
7. Воропаев С.Г., Князев Б.А., Койдан В.С., Конюхов В.В., Лебедев С.В., Меклер К.И., Николаев В.С., Смирнов А.В., Чукунов В.В., Щеглов М.А. Препринт ИЯФ СО АН СССР 86-177. Новосибирск, 1986; Письма в ЖТФ, 1987, т.13, с.431.
8. Воропаев С.Г., Князев Б.А., Койдан В.С., Конюхов В.В., Лебедев С.В., Меклер К.И., Чукунов В.В., Щеглов М.А. Препринт ИЯФ СО АН СССР 87-2. Новосибирск, 1987.
9. Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Breizman B.N., Burmasov V.S., Vyacheslavov L.N., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Kornilov V.A., Kruglyakov Eh.P., Lukyanov V.N., Mekler K.I., Podymnogin A.A., Rogozin A.I., Ryutov D.D. Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res. IAEA, Vienna, 1979, v.2, p.623.
10. Горбулин Ю.М., Злотников Д.М., Калинин Ю.Г., Скорюпин В.А., Шашков А.Ю. Физика плазмы, 1984, т.10, с.282.
11. Борисенко И.Р., Лебедев В.Б., Степанов Б.М., Сырцов В.Н., Фельдман Г.Г. ПТЭ, 1985, № 1, с.240.
12. Астрелин В.Т., Лебедев С.В. Препринт ИЯФ СО АН СССР 85-94. Новосибирск, 1985; ПМТФ, 1987, № 1, с.3.

*С.Г. Воропаев, Б.А. Князев, А.В. Ларионов,
С.В. Лебедев, В.В. Чикун, М.А. Щеглов*

**Определение профиля обратного плазменного тока
в экспериментах по магнитной компрессии
микросекундного РЭП**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 10 апреля 1987 г.
Подписано в печать 26.06. 1987 г. МН 09820
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,3 печ.л., 1,0 уч.-изд.л.
Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 87

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