

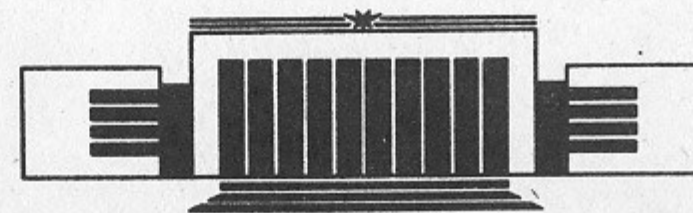


15
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

В.С. Бурмасов, С.Г. Воропаев, Б.А. Князев,
В.С. Койдан, В.В. Конюхов, С.В. Лебедев,
К.И. Меклер, В.В. Чикунов, М.А. Щеглов

ЭЛЕКТРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ
МИКРОСЕКУНДНОМ ДИОДЕ

ПРЕПРИНТ 87-27



НОВОСИБИРСК

Материал, изложенный в настоящем препринте,
представлен в качестве доклада на XVIII Между-
народную конференцию по явлениям в ионизиро-
ванных газах, Англия, июль 1987 г.
(ICPIG XVIII, Swansea, 13-17 July, 1987).

ЭЛЕКТРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ МИКРОСЕКУНДНОМ ДИОДЕ

Бурмасов В.С., Воропаев С.Г., Князев Б.А., Койдан В.С.,
Конюхов В.В., Лебедев С.В., Меклер К.И., Чикунов В.В.,
Щеглов М.А.

Время генерации мощного релятивистского электронного пучка (РЭП) микросекундной длительности в диоде с холодным катодом ограничивается, как правило, замыканием диодного промежутка. Считается, что это замыкание происходит вследствие образования на электродах диода катодной и (или) анодной плазмы.

На установке У-1 в ИЯФ СО АН СССР электронный пучок генерируется в квазиплоском вакуумном диоде с графитовым катодом диаметром 20 см и имеет следующие параметры: $E_{\text{макс}} \approx 1$ МэВ, $I_{\text{макс}} \approx 80$ кА, $\tau \approx 5$ мкс, $Q_1 = 130$ кДж, $j_{\text{макс}} \approx 0,3$ кА/см² [1-3]. За анодной фольгой диода может устанавливаться система сжатия пучка в продольном нарастающем (от 5 до 100 кГс) магнитном поле [4-8]. В сжатом пучке плотность тока достигает 5 кА/см², энергосодержание составляет $Q_2 = 100$ кДж за импульс.

В настоящей работе сообщается о результатах экспериментов на установке У-1 по исследованию динамики заполнения диода плазмой. Генерируемый пучок является макроскопически однородным. Это было установлено специальной системой коллекторов, а также с помощью рентгеновского электронно-оптического преобразователя и камеры обскуры с временным разрешением 0,1-0,3 мкс [1,4,7]. В то же время, будучи макроскопически однородным, пучок имеет характерную микроструктуру [1,4]. Осциллограммы тока, прошедшего через отверстия диаметром 0,3-10 мм в коллекторе, расположенном сразу за анодной фольгой, имеют изрезанную форму. Изрезанность сигналов усиливается

к концу импульса, но сглаживается с ростом диаметра отверстия. Такая структура пучка сохраняется и после его транспортировки через систему сжатия при давлении остаточного газа в ней $P = 10^{-4}-10^{-3}$ Тор.

Анализ вольтамперных характеристик диода без системы сжатия (в этом случае за анодной фольгой ставится приемник пучка - калориметр) показывает [1], что уже к моменту времени $t \approx 1$ мкс величина тока диода превышает даже биполярный ток и может объясняться только движением плазмы в диоде. Скорость изменения эффективного зазора составляет $V = (1,7+2,6) 10^6$ см/с. Появление плазмы в диоде регистрировалось первоначально с помощью ЭОПа [1], а затем более подробно - лазерным интерферометром [9] в режиме генерации пучка с энергосодержанием $Q \approx 50$ кДж. Свечение, регистрируемое ЭОПом, начинает появляться на катоде через $t \approx 1,5$ мкс от начала импульса, а на аноде - через 3 мкс. В спектре свечения, снятом интегрально за импульс, наблюдаются линии ряда атомов и ионов (Al, O, N, C...). При регистрации контуров спектральных линий с временным разрешением те же самые линии удалось наблюдать только после замыкания диода, а их интенсивность до замыкания на 1-2 порядка меньше и находится ниже порога регистрации.

Интерферометрические измерения показали, что плазма с $n > 2 \cdot 10^{13}$ см⁻³ образуется сначала на катоде (в момент $t \approx 1$ мкс), а в момент $t = 3+4$ мкс - и на аноде. Скорость движения катодной плазмы с $n \approx 10^{14}$ см⁻³ составляет (3+4) 10^6 см/с. В момент замыкания плотность плазмы в диоде $\leq 10^{15}$ см⁻³. В работе [1] отмечалось, что регистрируемая ЭОПом граница свечения может не совпадать с границей эмиттирующей поверхности плазмы, однако сопоставление результатов измере-

ний ЭОПом с интерферометрическими измерениями показывает, что основные закономерности заполнения диода плазмой могут быть установлены с помощью ЭОПа достаточно правильно. Как уже упоминалось, таковые измерения свидетельствуют о наличии микро-неоднородности пучка в течение практически всей длительности импульса, а из оптических измерений следует, что уже в начале импульса (при $t \leq 1$ мкс) катод покрыт плазмой. Поэтому можно предположить, что указанная микроструктура пучка связана с неустойчивостью эмиттирующей поверхности плазмы [4].

По осциллограммам напряжения на диоде и тока пучка можно оценить удельную энергию \mathcal{E} , поглощенную анодной фольгой, и плотность прошедшего заряда q к моменту появления анодной плазмы. Полученные оценки составляют: $\mathcal{E} = 0.05 \div 1 \frac{\text{эВ}}{\text{атом}}$,

$$q \approx 2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{К}}{\text{см}^2} \quad (N = \frac{q}{e} \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}).$$

При таких величинах \mathcal{E} и q в результате, соответственно, термической и электронно-стимулированной десорбции из фольги может выделиться количество газа, достаточное для того, чтобы вследствие его ионизации как непосредственно релятивистскими электронами, так и образовавшимися в этом газе ионами диод начал заполняться анодной плазмой [10]. Изменением темпа энерговыклада можно регулировать длительность импульса пучка. Например, использование в качестве анода материала с большим атомным номером (замена Al-фольги на танталовую) приводит к увеличению темпа энерговыклада в 5 раз. В результате происходит более быстрое газовыделение и образование анодной плазмы и, как следствие, сокращение длительности импульса примерно в 2 раза [8]. Уменьшение плазмообразующей поверхности путем замены Ta-фольги на Ta-сетку приводит к восстановлению длительности импульса до прежней величины.

Другим способом повышения темпа вклада энергии в анодную фольгу является увеличение её толщины, в случае, когда за этой фольгой расположена система сжатия пучка. При наличии этой системы часть электронов пучка отражается от сильного магнитного поля (пробки) обратно в диод. В дальнейшем отраженные электроны колеблются между катодом и магнитной пробкой до тех пор, пока полностью не поглотятся в анодной фольге. Изменяя толщину анодной фольги и, соответственно, начальный угловой разброс электронов, можно менять число отраженных частиц, и, следовательно, энергию, выделяющуюся в фольге. В экспериментах при увеличении толщины фольги с 10 мкм алюминированного лавсана до 30 мкм Al длительность импульса пучка до замыкания диода уменьшалась с 5 до 1,5 мкс [7]. При работе с фольгой 30 мкм Al через $t \approx 0.5$ мкс после начала импульса в диоде появляются ионы, и он переходит в режим "коллапса импеданса" [7-8]. Оценка величины энерговыклада \mathcal{E} в фольгу от однопролетных и осциллирующих электронов до момента появления ионов в диоде составляет $\mathcal{E} = 0.07 \frac{\text{эВ}}{\text{атом}}$ [8]. Соответствующая величина вычисляется, как $q = q_1 (1 + \alpha N)$, где q_1 - плотность прошедшего через фольгу заряда однопролетных электронов,

α - коэффициент отражения электронов от пробки, N - число осциллирующих электронов до торможения. Такой способ определения q обусловлен тем, что, согласно литературным данным (см. [10]), коэффициент электронно-стимулированной десорбции слабо меняется в широком диапазоне энергий. Величины N и α , рассчитанные по напряжению на диоде, толщине фольги и пробочному отношению, приведены в работе [8]. Вычисления дают значения

$$\alpha N \approx 15, \text{ а } q \approx 2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{К}}{\text{см}^2}. \text{ Точность определения } \mathcal{E} \text{ и } q \text{ в данном случае сравнительно невелика, потому что вы-}$$

числения этих величин делались в пренебрежении возможными радиальными потерями электронов поперек магнитного поля за счет их диффузии при осцилляциях сквозь анодную фольгу. Тем не менее, следует отметить хорошее согласие полученных оценок с приведенными выше цифрами для диода без системы сжатия.

Образование анодной плазмы должно приводить к переходу диода в биполярный режим, при котором наряду с электронным через диод протекает и ионный ток. При интерферометрических измерениях [9] обнаружено, что после появления анодной плазмы наблюдается быстрый рост плотности катодной плазмы, вызванный, скорее всего, бомбардировкой катода ускоренными ионами, и в результате, образованием и ионизацией газовой катодной "подушки".

Наличие в диоде ускоренных в сторону катода быстрых ионов подтверждается их непосредственной регистрацией методом β - β совпадений. Этим методом (см., например, [II]) измерялось количество радиоактивных ядер ^{13}N , образующихся на катоде в результате ядерных реакций $^{12}\text{C}(p, \beta)^{13}\text{N}(\beta^+)^{13}\text{C}$ и $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}(\beta^+)^{13}\text{C}$. Такие реакции происходят при энергии быстрых протонов (дейтронов) выше 500 кэВ. Эксперименты по регистрации быстрых ионов проводились при параметрах пучка, приведенных в работе [I]. В качестве анода использовались алюминиевые либо лавсановые фольги. Измеренное число быстрых ионов ($3 \cdot 10^{14}$) было примерно в 30 раз меньше величины, рассчитанной для биполярного диода, и слабо зависело от материала анода. Возможно, что в этих измерениях количество регистрируемых ионов занижалось из-за потери части радиоактивных ядер ^{13}N вследствие разрушения и осыпания поверхностного слоя катода под действием тока дуги, после окончания импульса напряжения. Не исключено,

кроме того, что ионный ток переносится, в основном, не протонами, а более тяжелыми или молекулярными ионами.

Предпринимались попытки снизить газовыделение из электродов диода путем их термического обезгаживания с целью увеличения длительности и энергозапаса пучка. Катод и анод нагревались до температур 700–800°C. Обезгаживание проводилось до тех пор, пока газовыделение из электродов не переставало влиять на величину давления остаточного газа в диоде ($P = 3 \cdot 10^{-5}$ Тор). На рис. I приведены осциллограммы напряжения U и тока диода I , иллюстрирующие влияние прогрева электродов на работу диода и полученные в двух последовательных импульсах. Эти осциллограммы получены при величине диодного зазора $d = 5$ см, энергия электронов составляла $E_{\text{макс}} \approx 700$ кэВ, длительность без прогрева $\tau \approx 3$ мкс. Энергозапас пучка, полученного без прогрева электродов, составлял $Q_1 = 67$ кДж (пунктирные кривые). Повторяемость в разных импульсах $\frac{\Delta Q_1}{Q_1}$ лучше 5%. В результате обезгаживания электродов диода энергозапас возрос до $Q_2 = 86$ кДж (сплошные кривые), т.е. увеличение энергозапаса $\frac{Q_2 - Q_1}{Q_1}$ составило $\sim 30\%$. Не исключено, что этот эффект может усиливаться при улучшении вакуумных условий в диоде.

Таким образом, в проведенных экспериментах показано, что в плоском вакуумном диоде при генерации РЭП микросекундной длительности в течение импульса появляется сначала катодная, а затем – анодная плазма, в результате чего происходит замыкание диода. Образование анодной плазмы оказывает весьма существенное влияние на длительность пучка. Зарегистрировано наличие в диоде быстрых ионов, бомбардирующих катод, а также влияние обезгаживания электродов на работу диода.

Авторы благодарны Д.Д.Рятову за постоянный интерес к работе и полезные обсуждения.

Л и т е р а т у р а

1. Воропаев С.Г., Койдан В.С., Лебедев С.В., Николаев В.С., Чикунов В.В., Щеглов М.А. Мощный релятивистский электронный пучок микросекундной длительности для нагрева плазмы. - ДАН СССР, 1984, т.276, вып.1, с.111, препринт ИЯФ СО АН СССР 83-72, Новосибирск, 1983.
2. Воропаев С.Г., Лебедев С.В., Чикунов В.В., Щеглов М.А. Получение микросекундного РЭП на двухмодульном LC - генераторе - Письма в ЖТФ, 1985, т.11, вып.5, с.267.
3. Воропаев С.Г., Князев Б.А., Койдан В.С., Конюхов В.В., Лебедев С.В., Меклер К.И., Николаев В.С., Смирнов А.В., Чикунов В.В., Щеглов М.А. Получение мощного микросекундного РЭП с высокой плотностью тока. - Препринт ИЯФ СО АН СССР 86-177, Новосибирск, 1986.
4. Воропаев С.Г., Князев Б.А., Койдан В.С., Конюхов В.В., Лебедев С.В., Меклер К.И., Николаев В.С., Рятов Д.Д., Чикунов В.В., Щеглов Н.А. Мощные электронные пучки микросекундной длительности для нагрева плазмы в соленоидах. - В кн.: Доклады III Всес.конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов. Ленинград, 1984, М., 1984, т.1. с.298.
5. Chikunov V.V., Knyazev B.A., Koidan V.S., Konyukhov V.V., Lebedev S.V., Mekler K.I., Shcheglov M.A., Voropajev S.G. Magnetic focusing of an intense microsecond relativistic electron beam. - Laser and Particle Beams, 1985, vol.3, pt. 3, p.259.
6. Chikunov V.V., Knyazev B.A., Koidan V.S., Lebedev S.V., Shcheglov M.A., Voropajev S.G. Magnetic focusing of 80 kJ microsecond electron beam for plasma heating in solenoids.

- 12th European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Phys.,
Budapest, 1985; Europhys., Conf. Abstracts, 1985, vol.9F,
pt.1, p.508.

7. Воропаев С.Г., Князев Б.А., Койдан В.С., Конюхов В.В.,
Лебедев С.В., Меклер К.И., Чикунов В.В., Щеглов М.А. Ис-
следование транспортировки РЭП через магнитную пробку. -
Препринт ИЯФ СО АН СССР 86-82, Новосибирск, 1986.
8. Воропаев С.Г., Князев Б.А., Койдан В.С., Конюхов В.В.,
Лебедев С.В., Меклер К.И., Чикунов В.В., Щеглов М.А. Ра-
бота мегавольтного микросекундного диода при инжекции РЭП
в магнитную пробку. - Препринт ИЯФ СО АН СССР 87-2, Ново-
сибирск, 1987.
9. Бурмасов В.С., Воропаев С.Г., Добрицкий А.Л., Лебедев
С.В., Щеглов М.А. Измерение плотности плазмы в вакуумном
диоде микросекундной длительности методом оптической ин-
терферометрии. - Физика плазмы, 1986, т.12, вып.4, с.435.
10. Чикунов В.В. Влияние процессов на анодной фольге на появ-
ление плазмы в релятивистском микросекундном диоде. -
Препринт ИЯФ СО АН СССР 84-140, Новосибирск, 1984.
11. Бурдаков А.В., Койдан В.С., Rogozin A.M., Чикунов В.В..
Эксперименты по коллективному ускорению ионов облаком
релятивистских электронов. - ЖЭТФ, 1981. т.80, с.1391.

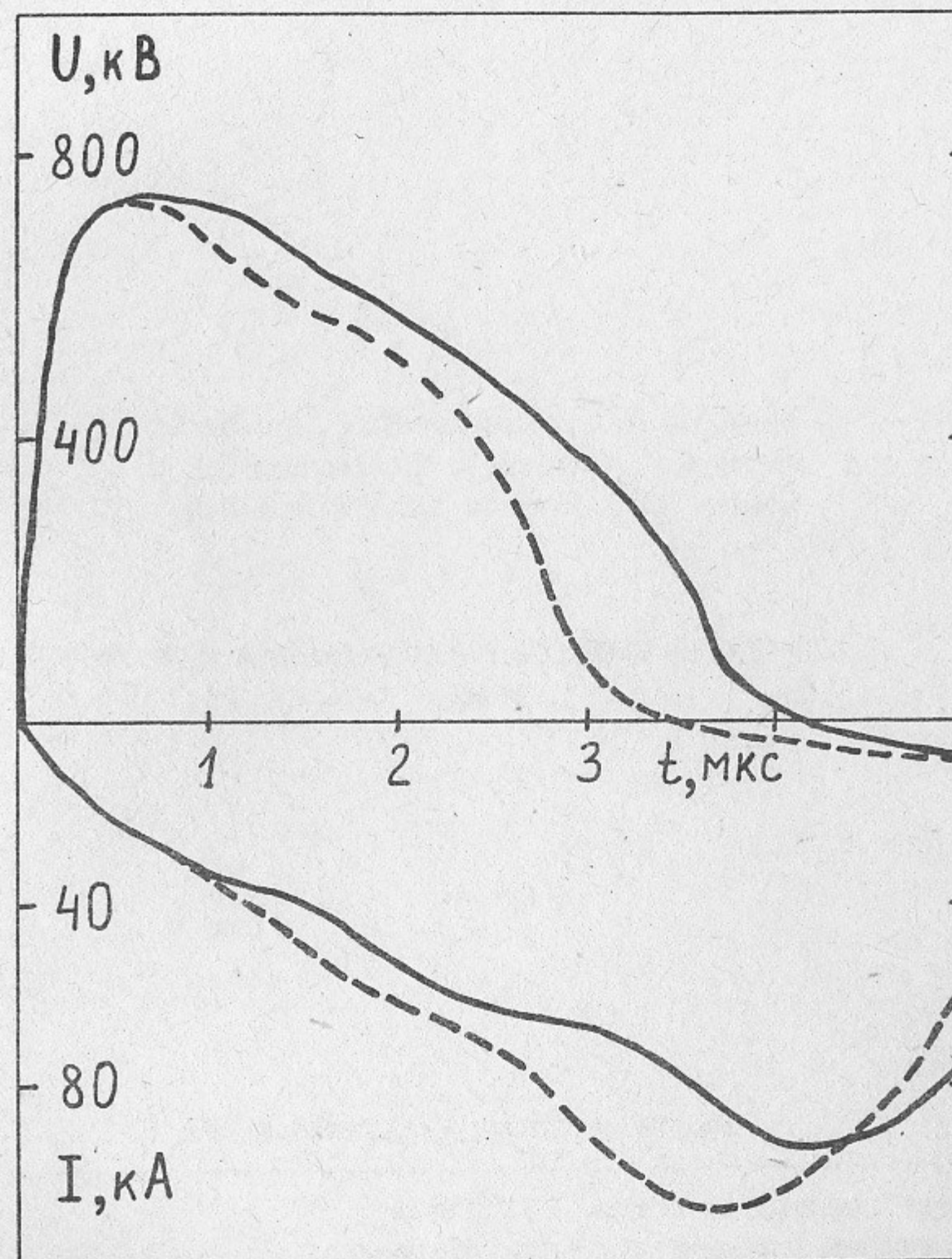


Рис.1.

Бурмасов В.С., Воропаев С.Г., Князев Б.А.,
Койдан В.С., Конохов В.В., Лебедев С.В.,
Меклер К.И., Чикунов В.В., Щеглов М.А.

ЭЛЕКТРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ МИКРОСЕКУНДНОМ
ДИОДЕ

Препринт
№ 87-27

Работа поступила - 30 декабря 1986 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 25.03.87г. МН 08663
Формат бумаги 60x90 I/16 Усл.0,9 печ.л., 0,8 учетно-изд.л.
Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ №27

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90