

12

Транспортировка в вакуумном канале электронного пучка, формируемого в диоде Плотто—Люса

© П. Глумац, М.В. Журавлев, А.А. Бухаркин, Г.Н. Курапов, Р.К. Хертек, Г.Е. Ремнев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
E-mail: gr05@tpu.ru

Поступило в Редакцию 29 декабря 2025 г.

В окончательной редакции 16 февраля 2026 г.

Принято к публикации 17 февраля 2026 г.

Рассматриваются результаты экспериментального исследования транспортировки сильноточного электронного пучка, формируемого в диодной системе Плотто—Люса (27 кА, 270 кВ, 90 нс) и транспортируемого в вакуумном канале диаметром 90 мм при давлении $2 \cdot 10^{-4}$ Торр. Ток электронного пучка регистрировался на разных расстояниях (20–150 см) от диодной системы. Зарегистрировано запаздывание прихода электронного пучка, зависящее от расстояния до диода, и плавное снижение полного заряда, переносимого электронным пучком, коррелирующее с временем запаздывания. Пучок распространялся на расстояние до 150 см, а с током, значительно превышающим предельный ток в вакууме, на расстояние 55 см.

Ключевые слова: сильноточный электронный пучок, диод Плотто—Люса, транспортировка пучка, предельный вакуумный ток, компенсация пространственного заряда.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.11.62858.20616

Электронный пучок наносекундной длительности, пронизывающий локальное плазменное образование, используется для коллективного ускорения ионов. Такая система впервые была применена в работах Плотто и сотрудников [1]. Далее идея развивалась в работах Люса [2] и др., где для образования плазменного облака использовался пробой по поверхности диэлектрической вставки в аноде либо напуск газа [3]. Обзор более поздних работ можно найти в [4]. Величина электронного тока, распространяющегося в вакуумной камере, ограничивается пространственным зарядом электронного пучка [5] с образованием виртуального катода, локализованного вблизи диодной системы. При этом в ряде экспериментальных работ [3,5–9] показано, что при соответствующей компенсации заряда пучка ионами электронный пучок распространяется на значительное расстояние с током, превышающим предельный вакуумный ток (I_{lim}) в рабочей камере. Компенсация пространственного заряда обеспечивается в основном ускоренными ионами из прианодной плазмы и ионизацией остаточного газа. Ионизацию вызывают как электроны пучка, замедляющиеся в поле виртуального катода или осциллирующие между виртуальным и реальным катодом, так и сами ускоренные ионы. Эта компенсация приводит к увеличению предельного тока в промежуточной области и, как следствие, к продвижению виртуального катода и распространению электронного пучка на большее расстояние. При этом наблюдается коллективное ускорение ионов перемещающимся электрическим полем виртуального катода [7]. Важным является установление линейных потерь заряда электронного пучка при таком распространении пучка в вакуумных каналах дрейфа, так как это определяет коллективное ускорение ионов

в диоде Плотто—Люса. Этим вопросам и посвящена настоящая работа.

Эксперименты проведены на ускорителе ТЕМП-4 в режиме работы с электронным диодом, подобном описанному в работах [8,9]. Величина ускоряющего напряжения в данных экспериментах с острым катодом и диэлектрической вставкой в аноде составляла 270 кВ, длительность на полувысоте 90 нс, амплитуда полного тока в диоде 27 кА.

Система диагностики пучка состояла из двух поясов Роговского, жидкостного делителя напряжения и коллектора с отсечкой медленных электронов. Первый из поясов находился в диодном пространстве и измерял полный ток диода (I_{diode}), второй располагался со стороны вакуумной камеры и измерял ток, инжектированный в камеру (I_{inj}). Для отсечки медленных электронов плазмы перед коллектором устанавливалась алюминиевая фольга толщиной 10 мкм.

Обратим внимание (рис. 1) на выброс напряжения на переднем фронте осциллограммы ускоряющего напряжения и достаточно высокую скорость нарастания напряжения, приблизительно равную $3.4 \cdot 10^{13}$ В/с. Это связано с работой генератора на диодную систему в режиме, близком к холостому ходу, когда происходит зарядка диэлектрической вставки электронами пучка и фактически запирается диод. При работе генератора на планарный диод без диэлектрической вставки эта величина составляла $0.5 \cdot 10^{13}$ В/с.

В дальнейшем (спустя приблизительно 20–30 нс) происходит поверхностный пробой диэлектрической вставки, формирование плазменного сгустка и формирование электронного пучка, инжектируемого уже в рабочую камеру. Ток диода при этом нарастает со скоростью

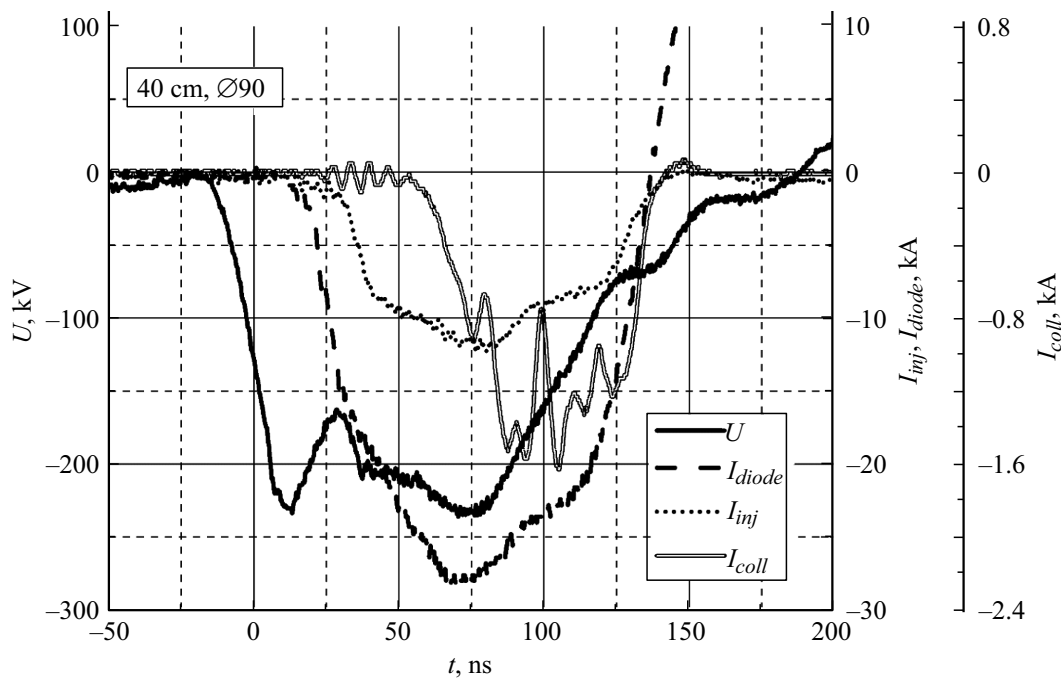


Рис. 1. Осциллограммы ускоряющего напряжения (U), тока диода (I_{diode}), тока на входе в трубу дрейфа (I_{inj}), тока коллектора (I_{coll}) на расстоянии 40 см от анодной плоскости.

$\sim 5 \cdot 10^{12}$ А/с. Запаздывание формирования тока в диоде относительно напряжения около 25 нс. На рис. 1 приведены также осциллограммы тока электронного пучка, измеренного коллектором на расстоянии 40 см от анода, а также инжектированный ток электронного пучка. Диаметр вакуумного канала для этого случая составлял 90 мм, давление остаточного газа как в диоде, так и в рабочей камере составляло $2 \cdot 10^{-4}$ Торр. Эта величина давления была оптимальной для коллективного ускорения ионов в такой конфигурации диодной системы [7].

Наблюдается запаздывание тока пучка на коллекторе с увеличением расстояния от анода и снижение его амплитуды (рис. 1 и 2). Это может быть объяснено формированием виртуального катода в направлении распространения электронного пучка. Ионы, ускоренные из анодной плазмы, ионизируют остаточный газ. Дополнительный вклад в ионизацию вносят осциллирующие электроны пучка, которые замедляются в области виртуального катода, увеличивая ионизационную способность остаточного газа. В результате происходит перемещение локализованной части виртуального катода и ускорение ионов в движущемся электрическом поле. Перемещение виртуального катода в направлении распространения электронного пучка ранее регистрировалось установкой петель магнитного поля [5], поперечных токовых коллекторов [7]. Далее нами были проведены эксперименты по распространению электронного пучка в удлиненной камере дрейфа диаметром 90 см и длиной до 150 см с использованием диода Плотто—Люса.

На рис. 2 приведены зависимости тока электронного пучка на коллекторе и полного заряда пучка от длины распространения электронного пучка (вплоть до 150 см). Каждая из точек усреднена по пяти измерениям. Эффективность переноса заряда пучка оценивалась как отношение зарегистрированного заряда на коллекторе к полному заряду пучка, инжектированного в вакуумную камеру.

Как видно из рис. 2, на расстоянии 150 см от диода Плотто—Люса был зарегистрирован электронный ток $I_{coll} \approx 2.5$ А, что соответствует заряду, равному $2.5 \cdot 10^{-3}$ % от инжектированного заряда.

Ток пучка и заряд с ростом расстояния монотонно уменьшаются по экспоненциальному закону, причем ток и заряд на коллекторе уменьшаются с одинаковым темпом на близких расстояниях. Однако на расстояниях свыше 60 см заряд, фиксируемый коллектором, убывает более интенсивно, чем ток, что свидетельствует о сокращении длительности электронного сгустка. Данный эффект может быть вызван тем, что на таких расстояниях на пучок сильнее действуют расфокусировка и отсутствие распавшегося виртуального катода. Сгусток теряет плотность и успеваает условно разделиться на менее протяженные группы электронов разных энергий. Затем сквозь фольгу, установленную на коллектор, проходят только короткие в продольном направлении сгустки с достаточной энергией. Следовательно, заряд рассчитывается как интеграл тока за более короткое время, чем для случая меньших расстояний. Важно отметить, что на показания с коллектора и скорость их изменения влияют три основных фактора: 1) длительность распространения

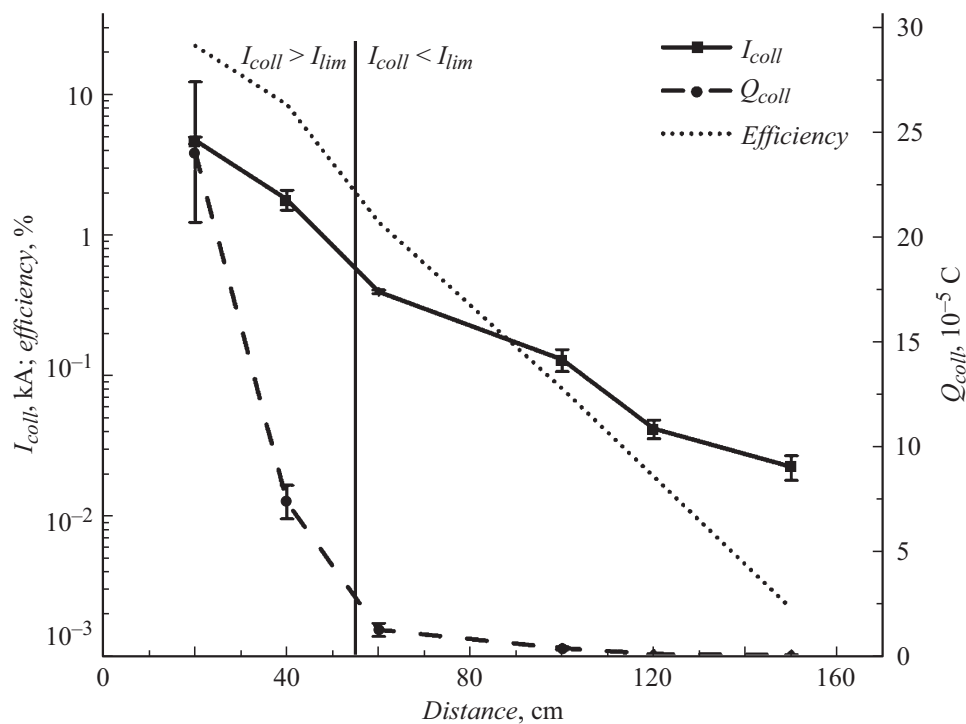


Рис. 2. Зависимости тока коллектора (I_{coll}), заряда переносимого пучком (Q_{coll}) и эффективности переноса ($Efficiency$) от расстояния. Вертикальная ось разделяет области переноса пучка с током, превышающим предельный ($I_{coll} > I_{lim}$), и с током меньше предельного ($I_{coll} < I_{lim}$).

сгустка, определяющая амплитуду тока; 2) кулоновское рассывание пучка при недостаточной компенсации пространственного заряда; 3) фокусировка пучка. Скорость спада величины электронного тока пучка выше скорости спада плотности заряда, определяемой расходимостью электронного пучка (рис. 2).

Нами подтверждена возможность переноса тока свыше 100 А на расстояние до 150 см и тока, превышающего предельный ток в вакууме (570 А в данной геометрии вакуумного канала), на расстояние 55 см. На всех расстояниях электронный пучок сопровождался ионным сгустком, что подтверждалось регистрацией мгновенных гамма-квантов из реакции $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ на фторопластовой мишени. Данный факт подтверждает взаимную связь электронного и компенсирующего его ионного сгустка при их распространении на значительные расстояния.

Результаты настоящей работы в дальнейшем могут использоваться для фундаментального описания и исследования динамики виртуального катода и компенсации пространственного заряда мощных импульсных пучков. Они также могут быть применены в практических задачах, требующих уменьшения абляции мишеней за счет плазмы из диода или подвода большой импульсной мощности к мишени. Примерами таких задач являются элементный активационный анализ поверхности образца или накачка других установок большой импульсной мощностью.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Наука FSWW-2025-0002 „Импульсный ускоритель легких ионов для реализации ядерно-физических технологий“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.А. Плютто, К.В. Суладзе, С.М. Темчин, Е.Д. Короп, Атомная энергия, **27** (5), 418 (1969). [A.A. Plyutto, K.V. Suladze, S.M. Temchin, E.D. Korop, Sov. Atom. Energy, **27** (5), 1197 (1969). DOI: 10.1007/BF01164972].
- [2] J.S. Luce, H. Sahlin, N.R. Crites, IEEE Trans. Nucl. Sci., **20**, 336 (1973). DOI: 10.1109/TNS.1973.4327115
- [3] W.W. Destler, P.G. O'Shea, Z. Segalov, IEEE Trans. Nucl. Sci., **32** (5), 3481 (1985). DOI: 10.1109/TNS.1985.4334402
- [4] А.Е. Дубинов, И.Ю. Корнилова, В.Д. Селемир, УФН, **172** (11), 1225 (2002). DOI: 10.3367/UFN.0172.200211a.1225 [A.E. Dubinov, I.Yu. Kornilova, V.D. Selemir, Phys. Usp., **45** (11), 1109 (2002). DOI: 10.1070/PU2002v045n11ABEH001255].
- [5] C.N. Boyer, W.W. Destler, H. Kim, IEEE Trans. Nucl. Sci., **24** (3), 1625 (1977). DOI: 10.1109/TNS.1977.4329031
- [6] А.Л. Ипатов, Г.П. Мхеидзе, А.А. Савин, Письма в ЖТФ, **10** (11), 681 (1984).

- [7] V.A. Ryzhkov, I.N. Pyatkov, G.E. Remnev, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **1042**, 167436 (2022). DOI: 10.1016/j.nima.2022.167436
- [8] В.А. Рыжков, Г.Е. Ремнев, И.Н. Пятков, М.В. Журавлев, Письма в ЖТФ, **46** (8), 7 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.08.49299.18147 [V.A. Ryzhkov, G.E. Remnev, I.N. Pyatkov, M.V. Zhuravlev, Tech. Phys. Lett., **46** (4), 361 (2020). DOI: 10.1134/s1063785020040252].
- [9] V.A. Ryzhkov, M.V. Zhuravlev, P. Glumac, G.E. Remnev, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **1080**, 170821 (2025). DOI: 10.1016/j.nima.2025.170821