

04.2

Пучки аномально ускоренных электронов, эмитируемые плазмой вакуумного разряда с лазерным поджигом

© И.В. Романов¹, В.Л. Паперный^{2,¶}, А.А. Кологривов¹, Ю.В. Коробкин^{1,3}, А.А. Рупасов¹¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия² Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия³ МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

¶ E-mail: paperny@math.isu.runnet.ru

Поступило в Редакцию 16 марта 2021 г.

В окончательной редакции 7 апреля 2021 г.

Принято к публикации 7 апреля 2021 г.

Экспериментально показано, что вакуумный пинчевый разряд малой мощности с лазерным поджигом может эмитировать пучок аномально ускоренных электронов с максимальными энергиями на единицу заряда, почти на порядок превышающими напряжение на разрядном промежутке. Установлено, что интенсивность рентгеновского излучения, генерируемого при воздействии пучка на мишень, существенно уменьшается при увеличении энергии лазерного импульса. Максимальная энергия рентгеновских квантов обратно пропорциональна массе вещества катода, аблированного лазерным излучением при поджиге разряда. Обсуждаются возможные механизмы процесса генерации электронного пучка.

Ключевые слова: вакуумный разряд, лазерный поджиг, рентгеновское излучение, электронный пучок, пинч.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.13.51122.18769

Потоки энергичных электронов, движущиеся вблизи оси разряда в направлении анода, регистрировались еще в ранних экспериментах с высоковольтными вакуумными разрядами в моменты срыва разрядного тока [1,2]. Позднее пучки ускоренных электронов с энергией на единицу заряда, превышающей напряжение на разрядном промежутке („аномально“ ускоренные электроны), неоднократно регистрировались в пинчевых разрядах разного типа: мощных Z- и X-пинчах с проволочными нагрузками [3,4], а также сильноточных вакуумно-искровых разрядах [5]. Возможный механизм формирования пучков быстрых электронов связывался с формированием в плазменном столбе микропинчевых структур и ускорением электронов в электрическом поле, генерируемом при развале микропинча, либо вследствие развития аномального сопротивления плазмы при пинчевании плазмы разряда [6,7]. Следует подчеркнуть, что эффекты пинчевания плазменного столба и эмиссия аномально ускоренных электронов наблюдались в этих разрядах при токах порядка сотен килоампер и выше.

Ранее в вакуумном разряде малой мощности с лазерным поджигом (ток ~ 10 кА, напряжение до 20 кВ) авторами были обнаружены эффекты формирования микропинчевых структур, генерации пучков электронов [8], а также зарегистрированы пучки аномально ускоренных ионов [9]. В настоящей работе впервые проведены измерения характеристик эмитируемых разрядом электронных пучков в широком диапазоне энергий лазерного импульса с целью выяснения возможности реализации механизма аномального ускорения электронов в данных экспериментальных условиях и установления особенно-

стей этого механизма, в частности связи характеристик пучков с условиями инициирования разряда.

Исследования проводились на лабораторном стенде, состоящем из вакуумного диода с остаточным давлением в рабочем объеме менее 10^{-4} Па, неодимового лазера, излучающего на длине волны $1.06 \mu\text{m}$ и рентгеновской диагностики на основе электронного умножителя ВЭУ-7. Схема эксперимента приведена на рис. 1. Разряд инициировался на плоском Fe-катоде лазерным пучком с длительностью на полувысоте 6 ns и размером фокального пятна $\sim 80 \mu\text{m}$, падающим под углом 45° относительно нормали к поверхности. Пиковые плотности мощности излучения на поверхности катода для импульсов с энергией $J = 2$ и 300 мДж составляли 10^{10} и 10^{12} Вт/см² соответственно. Ток в разрядном контуре с индуктивностью 63 нГн поддерживался емкостью $0.22 \mu\text{F}$ и измерялся поясом Роговского, установленным в катодной цепи. В режиме короткого замыкания полупериод колебаний тока равнялся $0.4 \mu\text{s}$, а амплитудное значение тока при напряжении на накопителе -10 кВ составляло ~ 17 кА. Расстояние между катодом и заземленным стальным анодом составляло 7 мм. Эмитированный плазмой пучок электронов проходил через отверстие в аноде диаметром 9 мм и падал на соединенную с анодом Та-пластину, ориентированную под углом 45° к оси пучка. Под воздействием электронного пучка пластина эмитировала рентгеновское излучение, которое через окно, вакуумно-плотно закрытое Be-фольгой толщиной $400 \mu\text{m}$, и воздушный промежуток попадало в закрытый такой же фольгой вакуумный объем, где помещался регистратор рентгеновского излучения. Минимальная энергия рентгеновских квантов, регистрируемых в от-

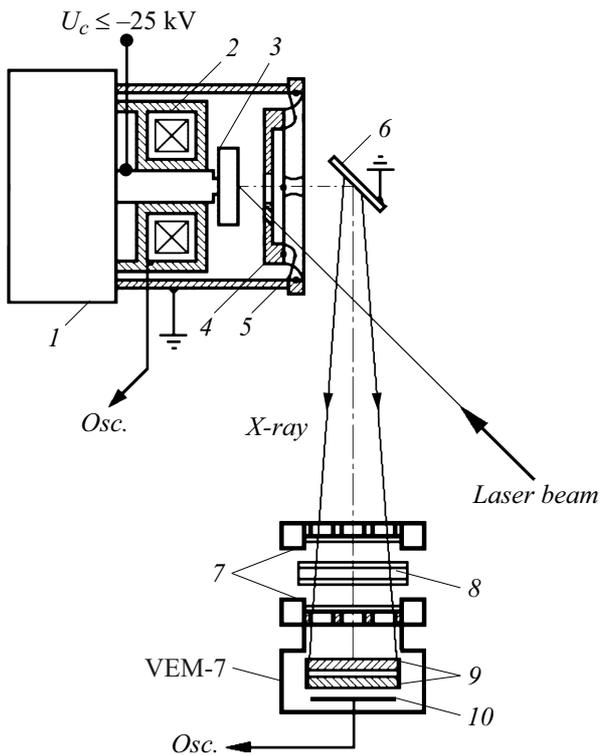


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 — конденсатор, 2 — пояс Роговского, 3 — катод, 4 — анод, 5 — гибкая токопроводящая шина, 6 — Та-пластина, 7 — Ве-окна, 8 — блок дополнительных поглотителей, 9 — микроканальные пластины, 10 — коллектор электронов.

существование дополнительных поглотителей, определялась по уровню 0.1 кривой пропускания Ве-фильтров суммарной толщиной $800 \mu\text{m}$ и составляла 3 keV . Максимальные энергии рентгеновских квантов также оценивались по кривым пропускания набора дополнительных поглотителей, подобранных так, чтобы сигнал при их пропускании по уровню 0.1 не превышал 50 mV при максимальном коэффициенте усиления ВЭУ-7, соответствующем величине $6.7 \cdot 10^6$, что было обусловлено оптимально допустимым соотношением сигнал/шум. Сигналы датчиков регистрировались осциллографом TDS 5054B с полосой пропускания 500 MHz .

На рис. 2 приведены осциллограммы производных тока и импульсов рентгеновского излучения с энергией квантов свыше 3 keV при различных значениях энергии лазерного импульса. Из рисунка следует, что на производной тока наблюдается особенность, в момент достижения амплитудного значения которой регистрируется рентгеновский импульс, означающий эмиссию в этот момент разрядной плазмой пучка ускоренных электронов в направлении анода. По мере увеличения энергии лазера J сигналы сдвигаются в область больших токов разряда, при этом амплитуда особенности на производной тока уменьшается. Количественно этот эффект в широком диапазоне энергий лазерного импульса

иллюстрирует рис. 3. Из рисунка следует, что при малой величине энергии $J = 1.8 \text{ mJ}$ разряд эмитирует относительно интенсивный пучок электронов с максимальной энергией E около 90 keV . С увеличением J

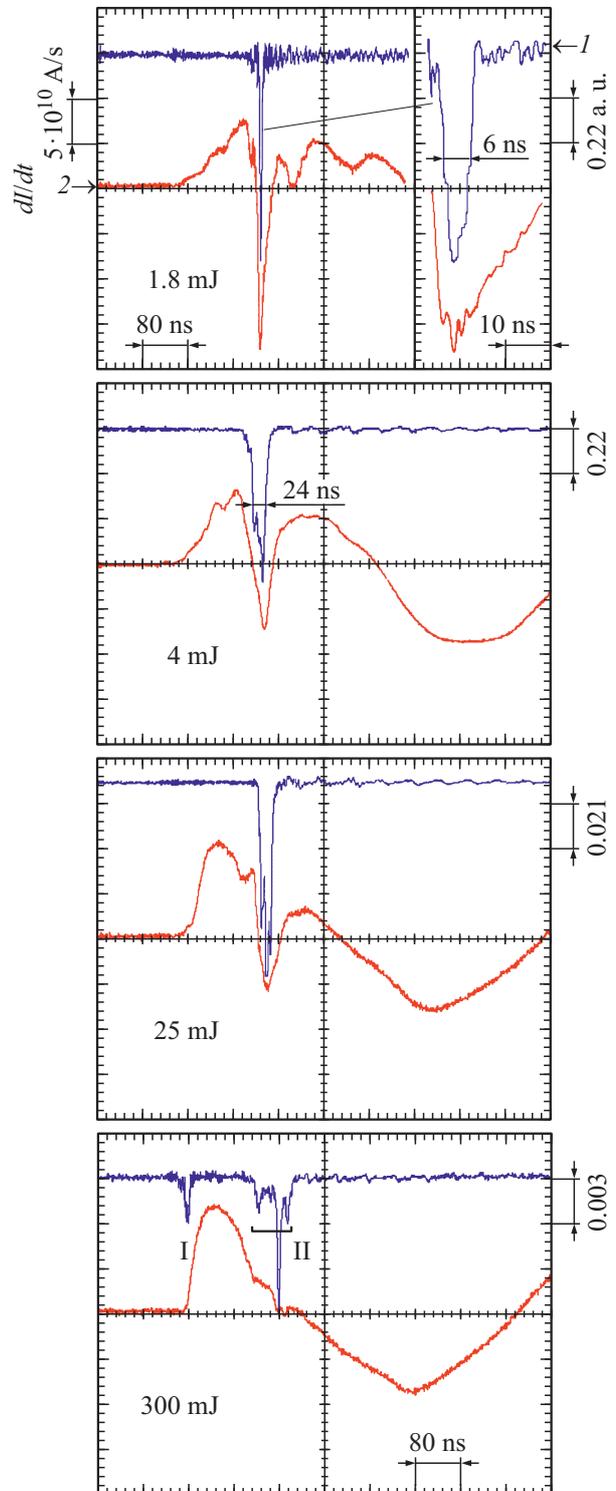


Рис. 2. Осциллограммы импульсов рентгеновского излучения с энергией квантов свыше 3 keV (луч 1) и производных тока (луч 2) при различных значениях энергии лазерного импульса J .

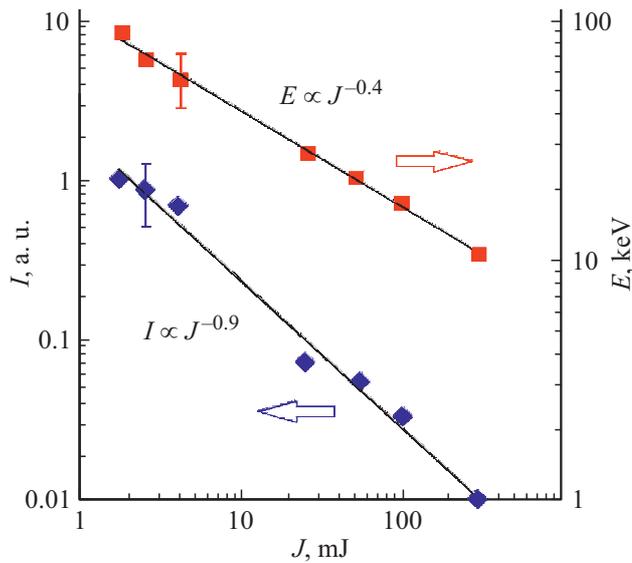


Рис. 3. Зависимости максимальной энергии электронного пучка и интенсивности рентгеновского излучения мишени от энергии лазерного импульса.

величина E падает согласно скейлингу $E \propto J^{-0.4}$ и при $J = 300 \text{ mJ}$ незначительно превышает 10 keV . Поскольку масса/плотность аблированного лазерным излучением материала мишени-катода, согласно [10], связана с энергией лазерного импульса зависимостью $M \propto J^{0.56}$, можно заключить, что с ростом M максимальная энергия электронного пучка уменьшается примерно пропорционально $1/M$. Кроме того, с ростом энергии лазерного пучка уменьшается также амплитуда и растет длительность рентгеновского импульса. Так, при увеличении J в диапазоне $1.8\text{--}4 \text{ mJ}$ длительность рентгеновского импульса увеличивается с 6 до 24 ns (рис. 2).

Заметим, что при больших энергиях лазерного импульса помимо излучения, связанного с эмиссией электронных пучков в моменты возникновения особенностей на производной тока (соответствующие сигналы отмечены цифрой II на нижнем фрагменте рис. 2), регистрируется также импульс рентгеновского излучения, генерируемого при воздействии на мишень электронного пучка, эмитированного лазерной плазмой (сигнал отмечен цифрой I) на искровой стадии развития разряда.

Предыдущие эксперименты авторов [11] показали, что увеличение плотности плазмы в разрядном промежутке, например, вследствие увеличения J приводит к формированию плазменной „шубы“, окружающей катодную струю, увеличению тока пинчевания и более медленному развитию неустойчивости перетяжки с образованием микропинчевой структуры. Аналогичные тенденции наблюдаются для временных параметров особенности на сигнале производной тока и сигнала рентгеновского детектора (рис. 2), что позволяет сделать заключение о наличии связи процесса пинчевания струи с эмис-

сией пучков anomalно ускоренных электронов. При этом в случае увеличения J величина разрядного тока, вероятно, оказывается недостаточной для реализации финальной стадии процесса пинчевания и разрыва токового канала, при этом плотность плазмы в перетяжке растет [12], амплитуда особенностей на токовых сигналах уменьшается, ускорение электронов/ионов падает. При малой энергии J плазменная шуба практически отсутствует, и величина разрядного тока оказывается достаточной для формирования микропинча, последующий развал которого приводит к частичному обрыву токового канала и ограничению токопереноса.

Согласно другому подходу, развиваемому в [13], при возрастании разрядного тока вещества для его пропускания оказывается недостаточно и формируется двойной электрический слой, приводящий к частичному срыву тока и формированию пучка ускоренных электронов. Это не противоречит возможности формирования перетяжки в плазменной струе. Пинчевание плазмы при этом увеличивает степень ионизации, но не является определяющим механизмом ускорения.

Ранее выполненные в этих же экспериментальных условиях исследования показали, что уменьшение энергии лазерного импульса соответствует режиму anomalного ускорения также ионов материала катода [9]. Это позволяет полагать, что ионы захватываются и ускоряются полем объемного заряда anomalно ускоренного электронного пучка [14]. Данный вывод согласуется с тем фактом, что эмиссия пучков anomalно ускоренных электронов/ионов наблюдалась ранее в моменты выбросов тока в высоковольтном вакуумно-искровом разряде [1,2]. Вместе с тем авторы работы [15] связывали эти эффекты с захватом и ускорением частиц электрическим полем каверны плотности, формирующейся на нелинейной стадии бунемановской неустойчивости.

Таким образом, эксперимент показывает, что вакуумный разряд с лазерным поджигом и умеренной энергетикой в широком диапазоне энергий лазерного импульса эмитирует пучок anomalно ускоренных электронов, максимальная энергия которых почти на порядок превышает напряжение на разрядном промежутке. Заметим, что эта энергия сопоставима с энергией электронных пучков, эмитированных сильноточными пинчевыми разрядами [5].

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 19-02-00761, 20-02-00322).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Е.Д. Короп, А.А. Плюгто, *ЖТФ*, **40** (12), 2534 (1970).
- [2] Г.П. Мхеидзе, А.А. Плюгто, Е.Д. Короп, *ЖТФ*, **41** (5), 952 (1971).
- [3] A. Robledo, I.M. Mitchell, R. Aliaga-Rossel, J.P. Chittenden, A.E. Dangor, M.G. Haines, *Phys. Plasmas*, **4** (2), 490 (1997). DOI: 10.1063/1.872107
- [4] V.L. Kantsyrev, D.A. Fedin, A.S. Shlyaptseva, S. Hansen, D. Chamberlain, N. Ouart, *Phys. Plasmas*, **10** (6), 2519 (2003). DOI: 10.1063/1.1572489
- [5] А.А. Горбунов, М.А. Гулин, А.Н. Долгов, О.В. Николаев, А.С. Савелов, *Письма в ЖЭТФ*, **50** (7), 320 (1989).
- [6] Е.Д. Короп, Б.Э. Мейерович, Ю.В. Сидельников, С.Т. Сухоруков, *УФН*, **129** (1), 87 (1979).
- [7] С.А. Пикюз, Т.А. Шелковенко, Д.А. Хаммер, *Физика плазмы*, **41** (4), 319 (2015).
- [8] Yu.V. Korobkin, V.L. Paperny, I.V. Romanov, A.A. Rupasov, A.S. Shikanov, *Phys. Lett. A*, **372** (8), 1292 (2008). DOI: 10.1016/j.physleta.2007.09.016
- [9] И.В. Романов, В.Л. Паперный, Ю.В. Коробкин, Н.Г. Киселев, А.А. Рупасов, А.С. Шиканов, *Письма в ЖТФ*, **39** (8), 62 (2013).
- [10] R.A. Burdt, S. Yuspeh, K.L. Sequoia, Y. Tao, M.S. Tillack, F. Najmabadi, *J. Appl. Phys.*, **106** (3), 033310 (2009). DOI: 10.1063/1.3190537
- [11] I.V. Romanov, V.L. Paperny, Yu.V. Korobkin, V.A. Podvaznikov, A.A. Rupasov, V.K. Chevokin, A.S. Shikanov, *Phys. Plasmas*, **23** (2), 023112 (2016). DOI: 10.1063/1.4942029
- [12] I.V. Romanov, I.P. Tsygvintsev, A.A. Kologrivov, V.L. Paperny, I.Yu. Vichev, A.S. Grushin, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **61** (9), 095011 (2019). DOI: 10.1088/1361-6587/ab362e
- [13] Д.Л. Шмелев, Г.А. Месяц, С.А. Баренгольц, *Письма в ЖТФ*, **33** (10), 19 (2007).
- [14] С.А. Баренгольц, Г.А. Месяц, Э.А. Перельштейн, *ЖЭТФ*, **118** (6), 1358 (2000).
- [15] С.В. Буланов, П.В. Сасоров, *Физика плазмы*, **12** (1), 24 (1986).