

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ Z-ПИНЧА, ИНИЦИИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

*А. А. Дроздовский^{а,1}, А. В. Богданов^а, Р. О. Гаврилин^а,
С. А. Дроздовский^а, А. В. Канцырев^{а,б}, В. А. Панюшкин^а,
И. В. Рудской^а, С. М. Савин^а, П. В. Сасоров^б, В. В. Яненко^{а,б}*

^а Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

^б Национальный исследовательский ядерный университет, Москва

Активно ведутся работы по созданию компактных лазерных ускорителей. Для них актуально решение вопросов транспортировки и фокусировки пучков в разрядах Z-пинчевого типа, а это требует тщательного исследования способов формирования таких разрядов. Для исследования динамики плазмы Z-пинча с инициацией разряда электронным пучком в ИТЭФ была создана экспериментальная установка. Первые результаты экспериментальных и численных исследований показали, что процесс развития разряда, инициированного пучком электронов, значительно отличается от такового для обычного способа образования Z-пинча.

There are many projects working on construction of compact laser accelerators. To realise these projects, it is necessary to solve the problem of transportation and focusing the beams in the Z-pinch type discharge, which demands the thorough study of the methods of forming such discharges. To study the dynamics of the Z-pinch plasma when the discharge is initiated by the electron beam, the experimental setup was built at ITEP. The preliminary results of experimental and numerical studies demonstrated that the process of discharge development initiated by the electron beam was substantially different from the ordinary process of the Z-pinch formation.

PACS: 29.27.Eg; 29.20.Ej

ВВЕДЕНИЕ

Обычно процесс разряда после подачи высокого напряжения на разрядную трубку начинается с пробоя по поверхности трубки. Но возможна также инициация разряда по оси разрядной трубки. Соответствующие эксперименты позволят осуществить более полное исследование физики сжатия плазмы в Z-пинчах, а также лучше понять динамику распределения разрядного тока при различных условиях формирования разряда. Это необходимо для решения актуальных задач создания плазменных линз с определенными фокусирующими свойствами. Какие распределения тока в разряде отвечают определенным типам фокусировки пучков заряженных частиц, было подробно исследовано нами [2]. Сейчас активно ведутся работы по созданию компактных лазерных ускорителей (электронных и протонных) [3]. Для них актуально решение вопросов транспортировки и фокусировки пучков в разрядах Z-пинчевого типа.

¹E-mail: drozdovsky@itep.ru

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из собственно электронной пушки, на выходе которой расположены две аксиально-симметричные магнитные линзы, камеры наблюдения с помещенными в них сцинтилляторами, и из адиабатической плазменной линзы и камеры формирования Z-пинча. Амплитуда тока пучка — 50 А и длительность пучка на вершине — 60 нс. Структура установки по сравнению с первоначальной [1] получила существенные дополнения.

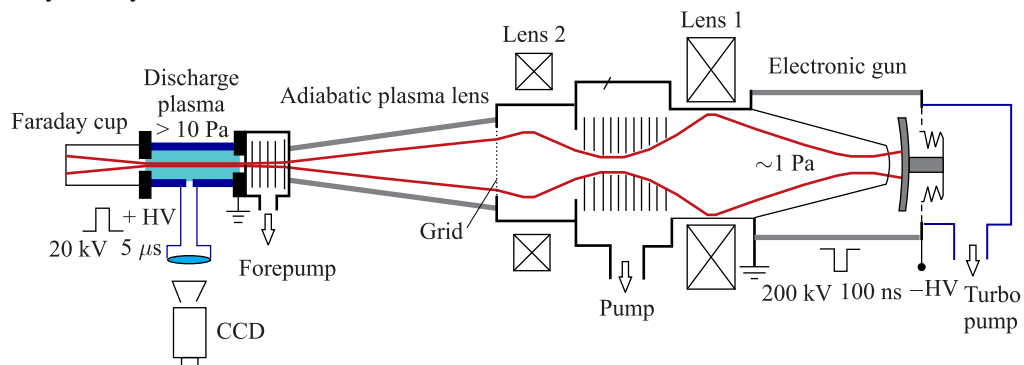


Рис. 1. Исследовательский стенд

Исследования предполагаются в широком диапазоне давлений, от 0,1 до 10 мбар. Сложность состоит в том, что давление в электронной пушке не должно превышать 0,05 мбар. Самый простой способ — установка разделительной пленки. Было разработано динамическое устройство разделения объемов с помощью тонкой майларовой ленты. При малой величине энергии электронов пучка толщина майларовой пленки должна быть не больше 10 мкм, что усложняет работу устройства и замедляет проведение экспериментов, особенно на первом этапе исследований, когда происходит отладка экспериментальных методик и аппаратуры. Для исследований в области малых давлений, до 0,5 мбар, можно обойтись без разделительной пленки за счет градиента давления, создаваемого путем применения системы дифференциальной откачки. В местах кроссоверов электронного пучка располагаются пакеты диафрагм и там же устанавливаются дополнительные откачные посты. Вакуумная откачка электронной пушки производится турбомолекулярным насосом, перед разрядной камерой — двумя форвакуумными насосами, а на выходе электронной пушки — двоящим агрегатом АД-50/16. В результате было достигнуто отношение давлений в разрядной трубке и в пушке, равное 7 при давлении в первой до 0,3 мбар.

2. РАЗРЯДНАЯ КАМЕРА И УСТРОЙСТВО НАБЛЮДЕНИЯ Z-ПИНЧА

Для полного разделения по вакууму разрядной камеры Z-пинча от канала подводки и фокусировки электронного пучка создана динамическая система разделения объемов с помощью тонкой майларовой ленты. На фото (рис. 2) это — диск с цилиндрами по бокам с правой стороны. Слева большой диск с кабелями — система токоподводов и крепления разрядной трубки. Выходящая влево керамическая трубка с окном — выводной канал излучения плазмы. На рис. 2 также схематично показан горизонтальный разрез

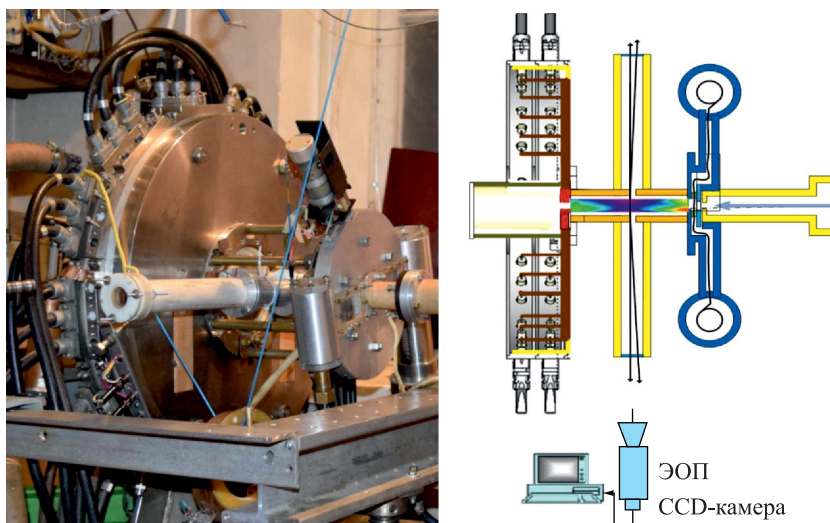


Рис. 2. Устройство разрядной камеры и схема наблюдения собственного излучения плазмы

данной установки с элементами регистрации излучения Z-пинча. В каждом импульсе формирования Z-пинча плазма пробивает в ленте отверстие, но к следующему импульсу производится протяжка ленты (смена кадра) и вакуумная изоляция объемов специальным прижимным устройством.

Разрядная камера применяется в двух вариантах: керамическая трубка (длиной 16 см, внутренним диаметром 3 см, толщиной стенки 5 мм) и кварцевая трубка (длиной 14 см, внутренним диаметром 3,9 см, толщиной стенки 3 мм). Для наблюдения пинчевания разряда в керамической трубке в ее середине сделана радиальная в 3 мм щель, через которую излучение плазмы выходит и через оптический канал проходит в регистрирующую ПЗС-камеру ВІFO К-008. Во избежание электро магнитных наводок камера помещена в железный шкаф и подключена к специальному помехозащищенному источнику питания. Информация с камеры поступает на ПК по оптоволоконному кабелю.

3. ПРОВОДКА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Для получения изображения распределения плотности тока пучка используются сцинтилляторы компании Kuraray, свечение которых регистрируются матричными ПЗС-телекамерами. Для предотвращения эффекта насыщения интенсивным электронным пучком сцинтилляторы закрываются последовательно расположенными алюминиевыми фольгой толщиной 0,2 мм и 4-мм пластиной с набором отверстий диаметром 2 мм. Плотность потока электронов существенно снижается в результате сильного рассеяния в фольге и последующей коллимации в тонких отверстиях. Такое устройство избавило от проявления эффекта насыщения, сильно осложнявшего процесс настройки ускорителя. На рис. 3 показан такой сцинтиллятор, который использовался в процедуре совмещения оси канала прохождения пучка с осью пучка.

Ось электронного пучка определялась в одном импульсе путем одновременного наблюдения двух сцинтилляторов. На оси первого по ходу пучка (рис. 3, а) было отверстие диаметром 1 см, благодаря чему центральная часть пучка отображалась на последующем

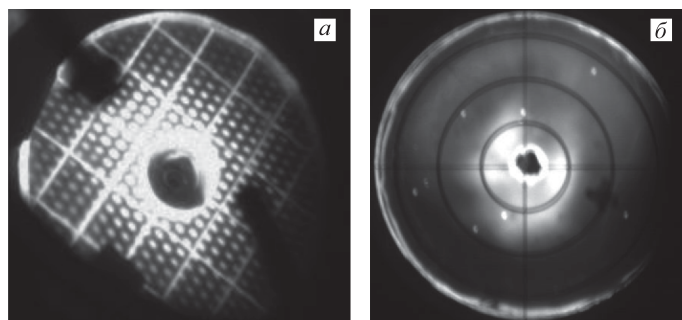


Рис. 3. а) Свечение первого по ходу пучка сцинтиллятора, наклоненного под углом 45° к пучку. б) Свечение второго по ходу пучка сцинтиллятора, перпендикулярного к пучку

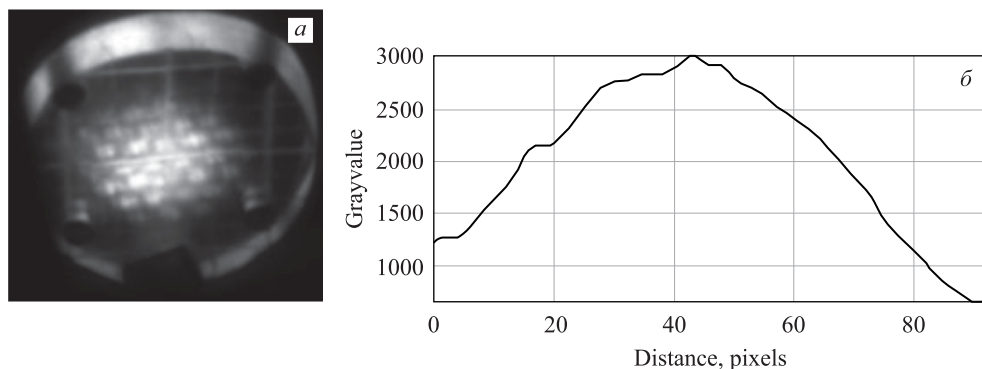


Рис. 4. Свечение сцинтиллятора в разрядной трубке

сцинтилляторе (рис. 3, б). Оси изображений совмещались с смещением канала транспортировки пучка.

Была проведена настройка фокусирующей системы для получения равномерного прохождения электронного пучка через разрядную трубку с помощью перемещаемого вдоль ее оси сцинтиллятора. При этом металлический экран сцинтиллятора выполнял роль цилиндра Фарадея.

На рис. 4 показано отображение электронного пучка в середине разрядной трубки. Полный размер пучка на полувывоте составил ~ 10 мм.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведены первые наблюдения процесса пинчевания плазменного разряда в керамической и кварцевой трубках.

4.1. Разряд в керамической трубке диаметром 3 см. Эксперимент проведен при следующих условиях. Разрядный ток ~ 40 кВ, время разряда — 5 мкс; параметры пучка: ток ~ 1 А, длительность — 100 нс. Газ по составу атмосферный, остаточный, давление — 2 Торр.

На рис. 5 показана временная развертка излучения плазмы Z-пинча в среднем сечении трубки для исследуемого и традиционного вариантов инициации разряда. Полная развертка — 4,5 мкс.

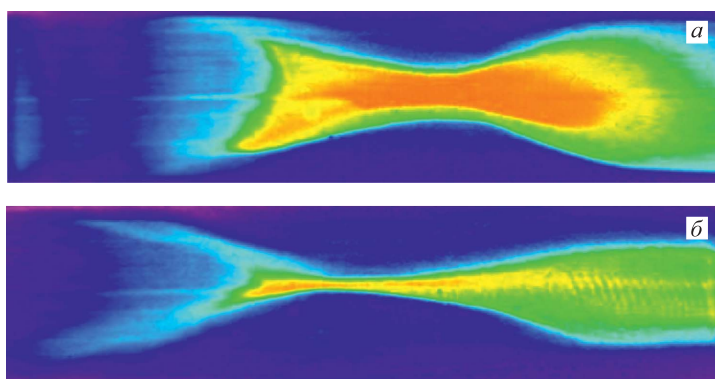


Рис. 5. Свечение разряда при его инициации электронным пучком (а) и при его традиционном образовании (б). Полная развертка — 4,5 мкс

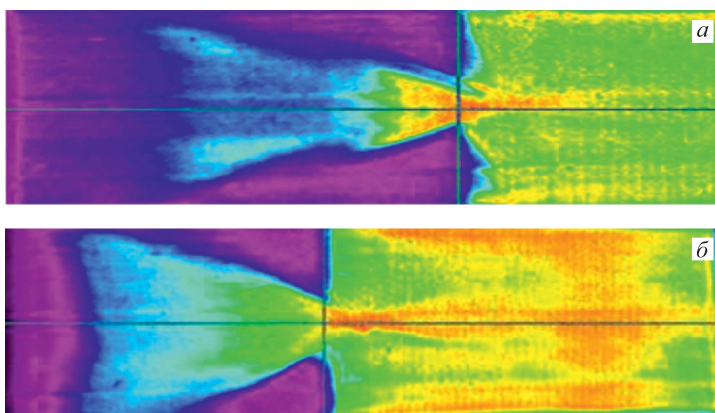


Рис. 6. Свечение разряда при его инициации электронным пучком (а) и при его традиционном образовании (б). Полная развертка — 2 мкс

4.2. Разряд в кварцевой трубке диаметром 4 см. Разрядная трубка наполняется аргоном при давлении 0,2 Торр. Разрядный ток ~ 40 кА, время разряда — 4 мкс. Параметры пучка: ток ~ 1 А, длительность — 100 нс, диаметр пучка ~ 1 см.

На рис. 6 показана временная развертка излучения плазмы Z-пинча в среднем сечении трубки для исследуемого и традиционного вариантов инициации разряда. Полная развертка — 2 мкс.

5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ

Для случая разряда в керамической трубке диаметром 3 см при прохождении пучка релятивистских электронов были проведены расчеты в гидродинамическом приближении с помощью МГД-кода NPINCH [4]. Результаты иллюстрируются рис. 7 и 8.

Электронный пучок обеспечивает небольшую начальную ионизацию по всему объему и инициацию разряда при относительно слабом напряжении. Согласно расчетам начальное напряжение получается около 30 В/см. Это уже после пробоя. Потом оно растет

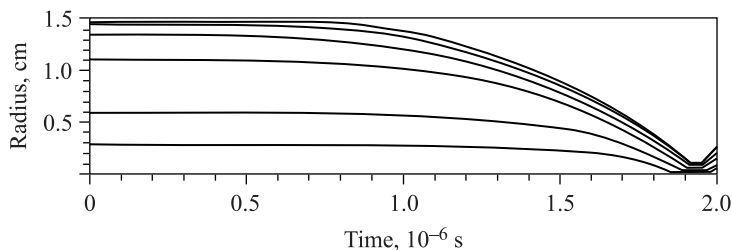


Рис. 7. Траектории движения элементов плазмы

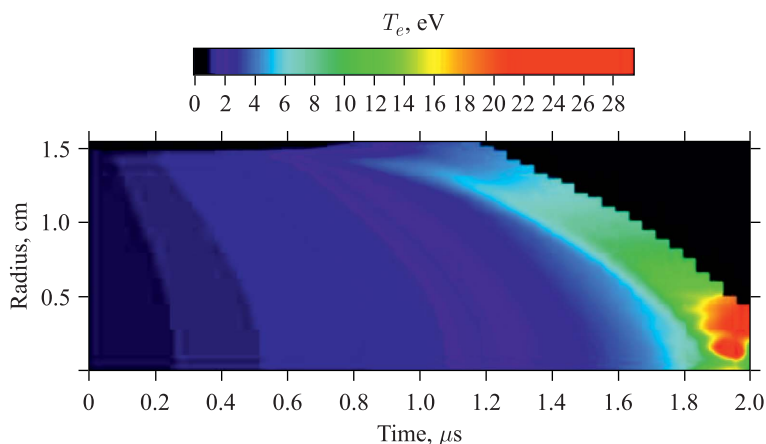


Рис. 8. Зависимость температуры электронной компоненты плазмы от времени и радиуса

из-за начала движения плазмы и роста из-за этого индуктивности разряда. При таких параметрах разряда нет испарения стенок изолятора. При отрыве плазмы от изолятора и пинчевании разряда образуется вакуумная область вне сжимающейся плазмы. Это учитывалось в этом расчете путем использования соответствующей версии кода NPINCH.

Как видно из приведенных изображений, результаты расчета и эксперимента не сильно отличаются друг от друга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана, изготовлена и испытана динамическая система разделения вакуумных объемов разрядной камеры формирования Z-пинча и примыкающего канала подвода и фокусировки электронного пучка.

2. Создана система дифференциальной откачки, обеспечивающая семикратное уменьшение давления в электронной пушке по сравнению с разрядкой в камере.

3. Созданы устройства диагностики электронного пучка, которые были использованы в проведенных экспериментальных работах.

4. Первые эксперименты в области низких давлений в разрядной трубке продемонстрировали значительное отличие динамики разряда, что качественно подтверждается расчетами в гидродинамическом приближении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Drozdovsky A. A., Bogdanov A. V., Gavrilin R. O., Golubev A. A., Drozdovsky S. A., Roudskoy I. V., Savin S. M., Yanenko V. V.* Installation for Studying the Plasma of Z-Pinch Initiated by an Electron Beam // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2016. V. 13, No. 7. P. 816–821.
2. *Drozdowskiy A., Drozdowskiy S., Sasorov P., Savin S., Yanenko V.* Conversion of Beams in the Plasma Lens and Investigation of Z-Pinch Dynamics // *Probl. Atom. Sci. Tech.* 2013. No. 6. P. 39–42.
3. *van Tilborg J., Geddes C. G. R., Matlis N. H., Gonsalves A. J., Huijts J. V., Nakamura K., Daniels J., Bulanov S. S., Bobrova N. A., Sasorov P. V., Leemans W. P.* Active Plasma Lensing for Relativistic Laser-Plasma-Accelerated Electron Beams // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 115. P. 184802.
4. *Bobrova N. A., Bulanova S. V., Razinkova T. L., Sasorov P. V.* Dynamics of a Pinch Discharge in Capillaries // *Plasma Phys. Rep.* 1996. V. 22. P. 349.