

ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ИСТОЧНИК ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ ИОНОВ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ

*К. И. Козловский^{а,1}, Е. А. Морозова^а, Е. Д. Вовченко^а,
А. М. Алехин^а, А. А. Исаев^б, А. П. Мелехов^а,
С. М. Полозов^а, А. Е. Шиканов^а*

^а Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

^б Российский технологический университет МИРЭА, Москва

Сообщается о начале экспериментального исследования ионного источника на основе быстрого сильноточного разряда в вакууме длительностью ≤ 100 нс, инициированного лазерной плазмой. Приводятся результаты коллекторных измерений ионных потоков и соответствующих разрядных токов. Основное внимание уделяется режиму пинчевания, для которого в первом полупериоде разрядного тока наблюдаются провалы глубиной до 30% от его полной амплитуды.

It is reported about the beginning of an experimental study of a high-current discharge in a vacuum with a duration of less than 100 ns initiated by laser plasma. Measurements of the discharge current, neutron output, and ion fluxes by collector technique are given. The main attention is paid to the pinching mode, for which in the first half-cycle of the discharge current, dips with a depth of up to 30% of its full amplitude are observed.

PACS: 07.77.Ka

ВВЕДЕНИЕ

Одно из первых исследований вакуумного искрового разряда связано с именем Роберта Милликена, всемирную известность которому принес эксперимент по определению заряда электрона. За эту работу, как известно, ему была присуждена Нобелевская премия по физике за 1923 г. Однако значительно раньше, примерно с 1905 г., Милликен начал эксперименты с высоковольтным разрядом в вакууме, изучая ВУФ-спектры различных элементов. Результаты этих исследований были опубликованы только в 1918 г. [1]. Позже с помощью подобного искрового разряда Милликен и Боуэн исследовали спектры «ободранных» атомов для первых 20 элементов в интервале длин волн 13,6–186,2 нм [2].

Следующий значимый этап в развитии вакуумного искрового разряда связан с переходом от схем с напряжениями ≥ 100 кВ к схемам с рабочими напряжениями 20–50 кВ, в которых за счет уменьшения индуктивности разрядного контура достигалась более высокая мгновенная сила тока в разряде. В таком разряде, известном

¹E-mail: cozlowskij2013@yandex.ru

как низкоиндуктивная вакуумная искра (НВИ), стали возможными получение очень высоких степеней ионизации и генерация излучения с длинами волн короче 50 нм [3].

Применение рентгеновской диагностики показало, что в мощных сильноточных НВИ высокоионизованные частицы с зарядовым состоянием вплоть до He- и H-подобных ионов образуются в области разрядного промежутка, представляющей собой сверхплотное высокотемпературное плазмообразование микрометровых размеров — плазменную точку (ПТ), которая формируется при глубоком сжатии плазмы за счет пинч-эффекта, а ее физические свойства и механизм образования подробно рассмотрены в обзорах [4, 5].

Исторически для исследования НВИ первым стал применяться мощный сильноточный разряд с микросекундным временем нарастания тока (см., например, [6]). Однако в таких НВИ при токах ≥ 100 кА из разрядного объема выходят только ионы низкой зарядности, а эмиссии многозарядных ионов, вероятно, препятствует плотная периферийная плазма, окружающая ПТ. Другое, альтернативное направление развития НВИ связано с разработкой «быстрого» лазерно-индуцируемого искрового разряда средней мощности с током до 10 кА и субмикросекундным временем его нарастания [7–9]. Он выгодно отличается от мощной сильноточной НВИ эмиссией ионов более высокой зарядности (Zn^{21+} , Cu^{20+} , Fe^{18+}) [10].

В данной работе представлена компактная сильноточная (до 40 кА) разрядная система типа НВИ с лазерным инициированием и временем нарастания тока ~ 100 нс и результаты первых экспериментов с регистрацией ионных потоков и соответствующих разрядных токов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Малогобаритная разрядно-плазменная установка типа НВИ с лазерным инициированием (рис. 1) спроектирована и реализована на базе компактного вакуумного объема, представляющего собой кубик из нержавеющей стали с внутренним ребром 13 см. В центре каждой из его граней находятся отверстия диаметром 9 см, закрытые фланцами. На первом фланце смонтирован низкоиндуктивный (32 нГн) сильноточный электрический ввод, на втором — элементы вакуумного оборудования. Остальные че-

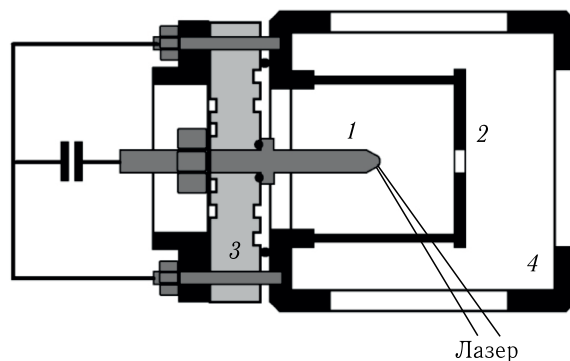


Рис. 1. НВИ с лазерным инициированием: 1 — внутренний высоковольтный электрод; 2 — внешний электрод; 3 — изолятор; 4 — вакуумная камера (кубик)

тыре фланца предназначены для ввода лазерного импульса и размещения средств лазерной, рентгеновской и корпускулярной диагностики.

Вакуумная система откачки обеспечивает в разрядном объеме остаточное давление $\sim 10^{-5}$ Торр и состоит из безмасленного мембранного насоса и турбомолекулярного насоса фирмы Pfeiffer. Разрядные электроды выполнены в геометрии «острие-плоскость». Внутренний высоковольтный электрод имеет форму конуса с полусферой ~ 2 мм на вершине и отделен от стенок разрядной камеры высоковольтным изолятором. Внешний электрод изготовлен из плоскопараллельной пластины толщиной 5 мм, имеет центральное осевое отверстие 3 мм и соединяется с корпусом с помощью 6 шпилек, образующих геометрию «белые колесо» и охватывающих разрядный промежуток.

В качестве накопителя, вкладывающего основную энергию в разряд, используется низкоиндуктивный (~ 20 нГн) конденсатор с емкостью 0,22 мкФ и рабочим напряжением до 25 кВ. Источник высокого напряжения позволяет подавать на внутренний высоковольтный электрод напряжение любой полярности. При положительной полярности имеет место анодное иницирование, а при отрицательной — катодное.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальное исследование начато с коллекторных измерений ионов в режиме анодного иницирования с одновременной регистрацией разрядного тока поясом Роговского. Материал анода — Си, катода — Fe. Схема измерений показана на рис. 2. Пояс Роговского работал в режиме трансформатора тока. Коллектор установлен на расстоянии $L = 50$ см от разрядного промежутка. На него подавалось отрицательное напряжение 90 В относительно сетки, которая заземлялась.

Характерные сигналы с коллектора и разрядного тока при энергии иницирующего лазерного импульса 0,6 Дж показаны на рис. 3. Видно, что с ростом разрядного тока в эмиссионном пакете увеличивается доля быстрых ионов.

На рис. 3, а показан сигнал с коллектора без разрядного тока. Он достигает максимума через 8,5 мкс, что соответствует скорости $0,6 \cdot 10^7$ см/с. При токе 14 кА (рис. 3, б) сигнал на коллекторе увеличивается в ~ 12 раз и отчетливо наблюдается «быстрая» компонента ионов (скорость $\sim 1,5 \cdot 10^7$ см/с). При разрядном токе 18 кА (рис. 3, в)

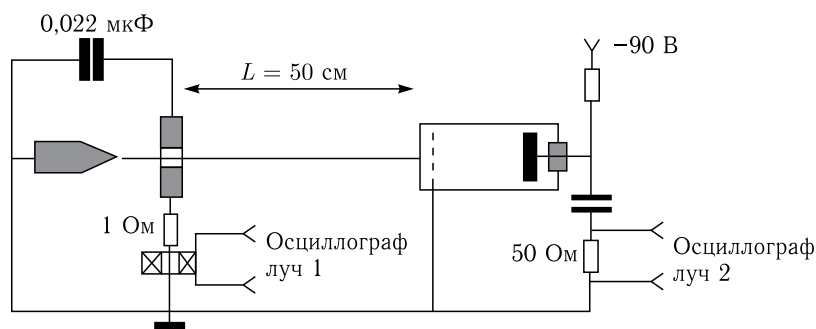
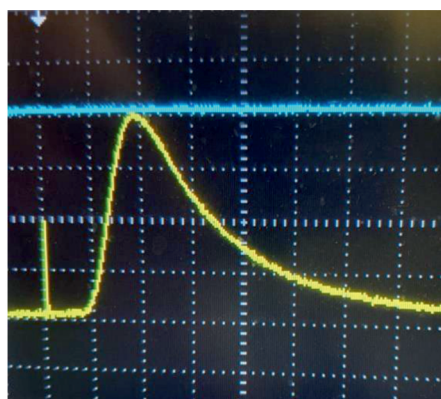
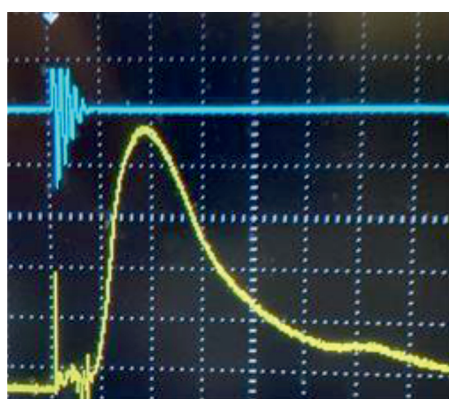


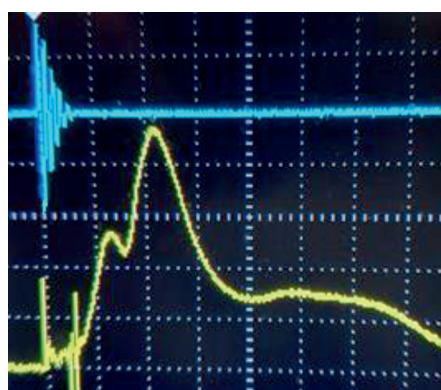
Рис. 2. Схема измерений



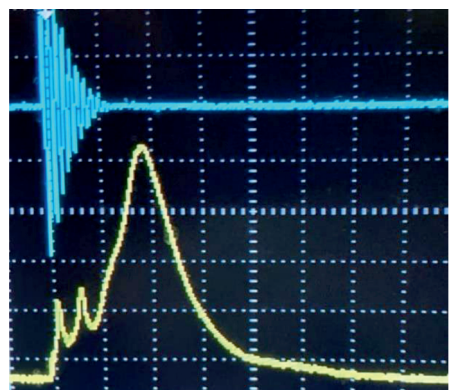
Верхний луч: без разряда,
нижний луч: 5 В/деление



Верхний луч: ток 14 кА,
нижний луч: 20 В/деление



Верхний луч: ток 18 кА,
нижний луч: 20 В/деление



Верхний луч: ток 42 кА,
нижний луч: 50 В/деление

Рис. 3. Разрядный ток (верхний луч) и коллекторные измерения ионов (нижний луч), развертка 5 мкс/деление, энергия лазерного импульса до 0,6 Дж

на сигнале с пояса Роговского появляется характерная особенность в виде «провала тока», что соответствует пинчеванию и началу формирования быстрых ионов. С ростом тока до 42 кА (рис. 3, г) глубина провала достигает 30% от амплитуды тока. При этом энергия ионов меди достигает 3 МэВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спроектирован и осуществлен физический пуск компактного ионного источника на основе быстрого сильноточного разряда в вакууме длительностью ≤ 100 нс, инициированного лазерной плазмой. В отличие от лазерно-индуцируемой плазмы основная энергия ~ 40 Дж, расходуемая на формирование плазмы, запасается в емкостном накопителе. Результаты первых исследований указывают на возможность получения потока быстрых ионов при достижении режима глубокого пинчевания разряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Millican R. A., Sawyer R. A.* Extreme Ultra-Violet Spectra of Hot Sparks in High Vacua // *Phys. Rev.* 1918. V. 12, Iss. 2. P. 167–170.
2. *Millican R. A., Bowen I. S.* Extreme Ultra-Violet Spectra // *Phys. Rev.* 1924. V. 23, Iss. 1. P. 1–34.
3. *Cohen L., Feldman U., Swartz M., Underwood J. H.* Study of the X-Rays Produced by a Vacuum Spark // *J. Opt. Soc. Am.* 1968. V. 58, Iss. 6. P. 843–846.
4. *Короб Е. Д., Мейерович Б. Э., Сидельников Ю. В., Сухоруков С. Т.* Микропинч в сильно-точном диоде // *УФН.* 1979. Т. 129, № 1. С. 87–112.
5. *Koshelev K. N., Pereira N. R.* Plasma Points and Radiative Collapse in Vacuum Sparks // *J. Appl. Phys.* 1991. V. 69, No. 10. P. R21–R44.
6. *Negus C. R., Peacock N. J.* Local Regions of High-Pressure Plasma in a Vacuum Spark // *J. Phys. D. Appl. Phys.* 1979. V. 12, No. 1. P. 91–112.
7. *Коробкин Ю. В., Романов И. В., Рупасов А. А., Шиканов А. С.* Неустойчивости вакуумного разряда при лазерном инициировании катодного пятна // *ЖТФ.* 2005. Т. 75, вып. 9. С. 34–39.
8. *Korobkin Yu. V., Paperny V. L., Romanov I. V., Rupasov A. A., Shikanov A. S.* Micropinches in Laser Induced Moderate Power Vacuum Discharge // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2008. V. 50. P. 065002.
9. *Романов И. В., Паперный В. Л., Коробкин Ю. В., Киселев Н. Г., Рупасов А. А., Шиканов А. С.* Влияние параметров лазерного импульса на характеристики источника многозарядных ионов металлов на основе лазерно-индуцируемого искрового разряда средней мощности // *Письма в ЖТФ.* 2013. Т. 39, вып. 8. С. 62–70.
10. *Alkhimova M. A., Vovchenko E. D., Melekhov A. P., Ramakoti R. S., Savelov A. S., Krapi-va P. S., Moskalenko I. N.* The Source of X-Rays and High-Charged Ions Based on Moderate Power Vacuum Discharge with Laser Triggering // *Nukleonika.* 2015. V. 60, No. 2. P. 221–227.

Получено 15 сентября 2023 г.