

02;04;12

Регистрация мягкого рентгеновского излучения из плазмы взрывающегося проводника в сильном продольном магнитном поле

© Ю.Э. Адамьян, Г.А. Шнеерсон

С.-Петербургский государственный технический университет
E-mail: integr@delfa.net

Поступило в Редакцию 29 декабря 2002 г.

В работах [1,2] были представлены результаты экспериментов по электрическому взрыву проводников в сильном (50 Т) продольном магнитном поле. Экспериментально зафиксировано образование вокруг центральной части канала взрыва области плазмы сравнительно низкой плотности, которая расширяется со скоростью порядка 10–20 км/с. Расширение плазмы сопровождается вытеснением магнитного поля из канала разряда, которое регистрировалось в виде диамагнитного сигнала.

Анализ энергобаланса плазмы затрудняется отсутствием надежной информации о потерях энергии на излучение. В данной работе показано, что периферийная область плазмы является источником интенсивного излучения в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена. Здесь приводятся первые результаты, содержащие информацию о временных характеристиках импульса излучения и оценки излучаемой энергии.

Экспериментальная установка. Экспериментальная установка содержит массивный одновитковый соленоид для получения продольного магнитного поля, запитываемый от генератора импульсных токов с максимальной энергией 800 кп, модуль для электрического взрыва проводника и вакуумную камеру, помещаемую в рабочую полость соленоида. Период изменения внешнего поля — $32 \mu\text{s}$ [1,2]. Взрыв проводника происходил в момент вблизи первого максимума продольного поля. Параметры контура электрического взрыва; емкость $4 \mu\text{F}$, индуктивность — 240 нН, зарядное напряжение — 10 кВ. Схематическое изображение экспериментальной установки приведено на рис. 1. Вывод излучения осуществляется вдоль оси взрывающегося проводника через окна в системе токоподвода. Приемники излучения, представляющие

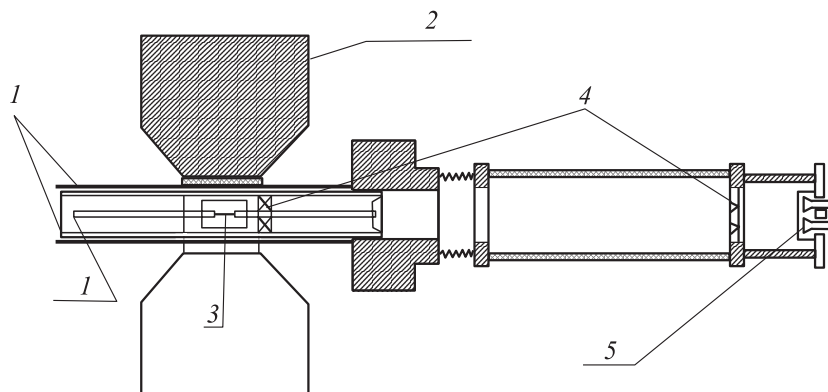


Рис. 1. Схема расположения элементов установки: 1 — подвод тока, 2 — соленоид, 3 — проводник, 4 — диафрагма, 5 — вакуумные диоды.

собой вакуумные диоды с алюминиевыми катодами, располагаются в конце вакуумированного канала на расстоянии 0,6 м от взрываемого проводника. Выбранное расстояние исключает воздействие частиц плазмы на приемники излучения в течение времени процесса взрыва.

Калибровка датчиков излучения осуществлялась с помощью вакуумного электрического взрыва проводника в капилляре. В основу метода калибровки была положена близость излучательных свойств капиллярного разряда в области ультрафиолета и дальнего ультрафиолета характеристикам абсолютно черного тела. Поскольку последние определяются только температурой плазмы, основной задачей в данном методе является определение температуры плазмы в капилляре.

Для калибровки датчиков использовалось излучение, возникающее при электрическом взрыве медного проводника диаметром $80\ \mu\text{m}$, во фторопластовом капилляре диаметром 2 мм. Спектр этого излучения имеет максимум при длинах волн порядка $1000\ \text{Å}$, которые находятся в диапазоне чувствительности алюминиевого фотокатода. Конкретный вид спектра может быть определен по известной температуре плазмы. Последняя могла быть рассчитана по измеренной экспериментально проводимости канала с использованием известных зависимостей (модель электропроводности Бакулина–Лучинского [3]). При этом распределение плотности частиц и проводимости по сечению капилляра предполагалось равномерным.

Максимальное значение температуры плазмы капиллярного разряда составляло 4.2 eV. Далее, зная энергетическое распределение интенсивности излучения r_λ , определяемое формулой Планка, можно было найти коэффициент передачи измерительного тракта

$$K = \frac{2\pi R^2 U}{S \int_0^\infty r_\lambda (\chi_\lambda / \chi_{\max}) d\lambda},$$

где U — напряжение на входе осциллографа, S — площадь излучателя, R — расстояние от излучателя до фотоприемника, r_λ — энергетическое распределение интенсивности излучения абсолютно черного тела, χ_λ — спектральная чувствительность фотокатода при длине волны λ , χ_{\max} — максимальное значение спектральной чувствительности [4].

На стадии калибровки чувствительность приемников излучения адаптировалась к характеристикам измерительного тракта с помощью щелевых диафрагм (в экспериментах со взрывом проводника излучение экранировалось с помощью дополнительных диафрагм). С использованием данных о температуре плазмы, геометрических размерах системы и спектральных характеристиках алюминиевого катода определена энергетическая чувствительность тракта регистрации излучения. Она составляет приблизительно 50 и $25 \mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$ соответственно для каналов 1 и 2.

После выполнения калибровки была проведена серия экспериментов со взрывом проводников при отсутствии и наличии продольного магнитного поля. Для грубого определения полной энергии излучения ЭВП с учетом его спектрального распределения датчик излучения канала 1 закрывался фильтром с границей пропускания 1 keV.

С учетом значительно более высокой интенсивности излучения плазмы ЭВП по сравнению с калибровочным источником, в экспериментах со взрываемым проводником излучение ослаблялось в 100 раз с помощью дополнительных диафрагм, устанавливаемых в непосредственной близости от взрываемого проводника. Излучение из центральных районов взрыва не фиксировалось, так как в поле зрения датчиков попадало излучение из области с радиусом более 4 mm. При этом чувствительность тракта в экспериментах составляет в среднем 0.5 и $0.25 \mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2$ соответственно для каналов с фильтром и без фильтра.

Результаты экспериментов. В рамках данной работы были проведены сравнительные эксперименты в следующих режимах.

А. Электрический взрыв медного проводника без наложения внешнего магнитного поля. Осциллограммы тока и сигналы датчиков излучения для этого случая приведены на рис. 2, *a*.

Как следует из осциллограмм, в начале взрыва фиксируется всплеск длинноволнового излучения, сигнал с датчика за фильтром практически отсутствует. В момент прохождения тока через «0» имеет место импульс коротковолнового излучения (ослабление в лавсановом фильтре не заметно).

Б. Электрический взрыв медного проводника диаметром 0.2 mm при наложении внешнего магнитного поля амплитудой 50 Т (период 32 μ s). Взрыв проводника происходит вблизи максимума поля. Осциллограммы тока и сигналы датчиков излучения для этого случая приведены на рис. 2, *b*.

В этом случае начальная фаза взрыва проводника сопровождается всплеском коротковолнового излучения периферийной плазмы и, в отличие от предыдущего режима, отсутствием какого-либо сигнала с датчиков излучения в момент перехода тока в проводнике через «0». Появление излучения на более поздних стадиях процесса может быть связано с повторным зажиганием азимутального разряда при смене полярности внешнего поля.

Обсуждение экспериментальных результатов. При взрыве проводника диаметром 0.2 mm в продольном магнитном поле датчики излучения зарегистрировали интенсивный пик излучения в коротковолновой области и более длительную фазу свечения, начинающуюся после перехода внешнего магнитного поля через ноль.

Как следует из осциллограмм сигналов датчиков излучения (с учетом разницы чувствительностей каналов приблизительно в 2 раза), для первого пика излучения в начальной фазе взрыва проводника ослабление излучения в фильтре составляет 1.5, что соответствует средней энергии квантов 1.7 keV (длина волны — 7 Å).

Мощность излучения, падающего на датчик, оценивается с помощью значений чувствительности, полученных для капиллярного разряда, с поправкой на снижение чувствительности датчика в области энергий квантов порядка 1.7 eV, а также ослабления в целевых диафрагмах. Результирующая величина амплитуды удельной мощности — $6 \cdot 10^7$ W/m². В расчете на телесный угол 4π при радиусе сферы 0.6 m

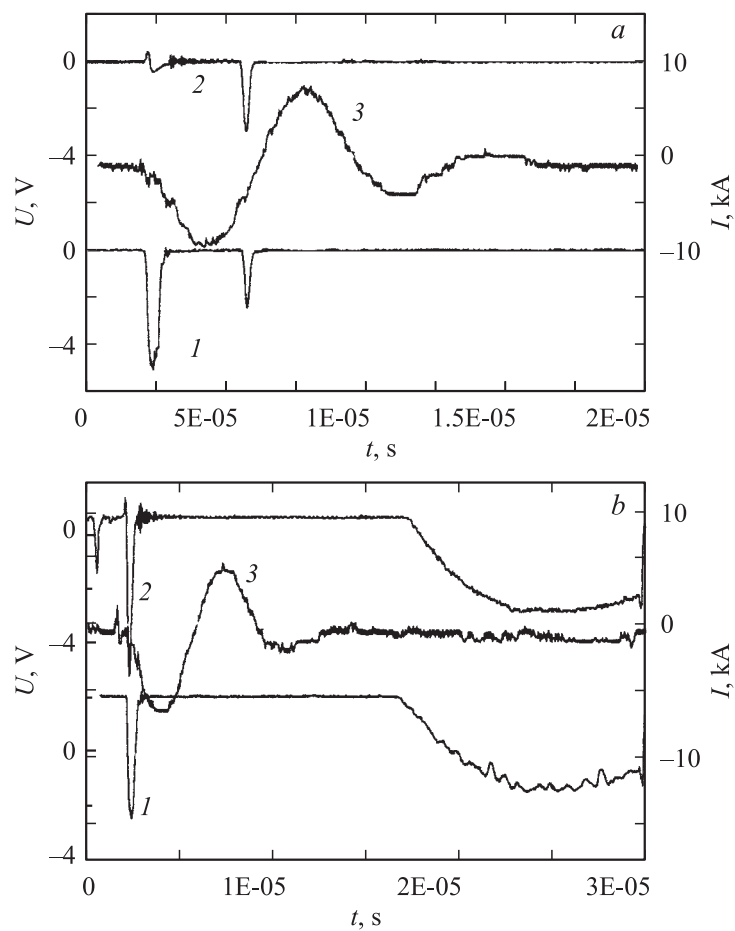


Рис. 2. Осциллограммы тока и сигналы датчиков излучения для взрыва медного проводника диаметром 0.2 mm без продольного поля (*a*) и при наложении продольного магнитного поля с амплитудой 50 Т (*b*): 1 — сигнал с датчика без фильтра, 2 — сигнал с датчика с лавсановым фильтром $10 \mu\text{m}$, 3 — ток через взрываемый проводник.

(расстояние от плазмы до датчика) полная мощность, излучаемая плазмой, $P \sim (2-3) \cdot 10^8$ W. Измеренная с помощью осциллограмм тока и активной составляющей напряжения [2] максимальная мощность, вкладываемая в проводник, составляет около $5 \cdot 10^7$ W. Столь значительное несоответствие вкладываемой и излучаемой мощностей выходит за рамки погрешностей измерения и может свидетельствовать о сильной пространственной анизотропии излучения.

Следует также отметить появление второго, гораздо более длительного импульса излучения с эффективной жесткостью порядка 1.5 keV, появляющегося после перехода через «0» индукции внешнего поля. Вероятно, в этом случае имеет место эффект, сходный с тета-пинчем, при котором плазма канала ЭВП нагревается за счет сжатия нарастающим продольным полем. Излучаемая при этом энергия имеет порядок 1.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 02-02-16157-а).

Список литературы

- [1] Адамьян Ю.Э., Кривошеев С.И., Василевский В.М., Колгатин С.Н., Шнеерсон Г.А. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 23. С. 43–46.
- [2] Адамьян Ю.Э., Василевский В.М., Колгатин С.Н., Шнеерсон Г.А. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 5. С. 121–127.
- [3] Бакулин Ю.Д., Куропатенко В.Ф., Лучинский А.В. // Советская Физика — Техническая Физика. 1976. Т. 20. С. 1963–1968.
- [4] Веребенников В.А. Экспериментальные исследования мягкого рентгеновского излучения микропинчевого разряда. Канд. дис. М., 1988.