

04;07;12

МЯГКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ В КОНФИГУРАЦИИ ВЗРЫВАЮЩАЯСЯ ПРОВОЛОЧКА В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ

© А.А.Сорокин, Л.А.Шмаенок, В.П.Белик, С.В.Бобашев,
Б.Этлишер, С.Ателан, Ф.Байол

Исследование мягкого рентгеновского (МР) излучения плотной горячей плазмы, широко практикуемое последние годы на плазменных установках различного типа, демонстрирует высокую информативность и полезность получаемых результатов для целей диагностики параметров плазмы. Спектральный диапазон МР излучения охватывает область энергий фотонов от 100 эВ до 2–3 кэВ, в которую попадают наиболее яркие линии излучения ионов, образующихся при пинчевании плотной плазмы в мощных разрядах. В последнее десятилетие существенный рост экспериментальных исследований в области МР излучения связан, в частности, с созданием широкого спектра многослойных рентгеновских зеркал — новых и эффективных элементов рентгеновской оптики [1–3]. Другим, также немаловажным обстоятельством является прогресс в совершенствовании методов абсолютной калибровки полупроводниковых детекторов, обладающих достаточно высоким временным разрешением (~ 1 нс) и, таким образом, пригодных для абсолютных измерений с временным разрешением импульсных интенсивных потоков МР излучения [4,5]. В результате этого были созданы спектральные приборы для регистрации МР излучения различного назначения [5–7]. Настоящая работа посвящена исследованию МР излучения плотной плазмы, создаваемой разрядом в конфигурации взрывающаяся медная проволочка в окружающей ее плазменной алюминиевой струе, с помощью нового 5-канального полихроматора.

Эксперимент проводился на сильноточном генераторе тока GAEL (Ecole Polytechnique) с током 250 кА, длительностью импульса 50 нс, напряжением 0.5 МВ и мощностью 0.1 ТВт. В качестве нагрузки использовалась комбинация из медной проволочки диаметром 20 мкм с погонной массой 45 мг/см, помещенной в 20-миллиметровый разрядный промежуток между катодом и анодом, и окружающей ее плазменной струи, создаваемой взрывом алюминиевой фольги толщиной 5 мкм в 9-миллиметровом зазоре между анодом и

дополнительным электродом. Плазменная струя со скоростью 2 Маха формировалась соплом диаметром 3 мм, расположенным на аноде. Погонная масса плазменной струи могла варьироваться в пределах 15–30 мг/см путем изменения времени задержки между взрывом фольги и разрядом генератора. Используемая конфигурация нагрузки позволяла получать достаточно стабильный, устойчивый и равномерный по плотности вдоль разрядного промежутка плазменный шнур, являвшийся источником МР излучения [8].

Полихроматор для абсолютных измерений потоков МР излучения представлял собой пять идентичных по конструкции спектральных каналов, каждый из которых состоял из трех элементов: плоского многослойного рентгеновского зеркала (МРЗ), отражающего излучение в узком спектральном интервале, тонкопленочного фильтра для подавления длинноволнового излучения и абсолютно прокалбированного полупроводникового $p-i-n$ -диода. Фрикционное устройство типа $\varphi - 2\varphi$ позволяло настраивать каждый канал без нарушения вакуума на определенную длину волны излучения. Типы и некоторые параметры зеркал и фильтров представлены в табл. 1. Для абсолютных измерений МР излучения были использованы $p-i-n$ -диоды коммерческого типа MRD510 (Motorola), обладающие временным разрешением 0.8 нс и площадью чувствительной области 0.25 мм^2 [4]. Абсолютная чувствительность диодов измерялась с помощью фотоионизационного квантометра с точностью 25% [4,9].

Все спектральные каналы были смонтированы в одном блоке и расположены симметрично относительно оси полихроматора. Оптические оси каналов были ориентированы таким образом, что сходились в точке пересечения оси источника излучения и оси полихроматора. Ось симметрии полихроматора была перпендикулярна оси плазменного шнура, а расстояние от источника излучения до детекторов составляло 30 см. Рентгеновское излучение собиралось с центральной части плазменного шнура, размер которой ограничивался диафрагмой шириной 8 мм, расположенной на расстоянии 2 см от оси разряда (рис. 1, а).

В эксперименте выбор спектральных рабочих точек каналов полихроматора определялся задачей наблюдения спектральных линий ионов алюминия и меди с целью изучения динамики взаимодействия компонентов нагрузки: алюминиевой плазменной струи и плазмы, образуемой при взрыве медной проволоки. В соответствии с этим каналы 1 и 2 полихроматора регистрировали водородоподобную ($2p-1s$) и гелиеподобные ($1s2p^1P_1-1s^2$; $1s2p^3P_1-1s^2$) линии алюминия, а каналы 3 и 4 были настроены на спектраль-

Таблица 1. Параметры элементов каналов полихроматора*

Номер канала	Тип структуры МРЗ, период, нм	Рабочий диапазон МРЗ, E , кэВ (λ , нм)	Тип фильтра (толщина)
1	W/B ₄ C 2.15	1.5–3.5 (0.83–0.35)	Al(0.3 мкм) + лавсан (1.5 мкм) на сетке прозрачностью 40%
2	W/Si 2.31	0.525–1.5 (2.36–0.83)	Al(0.3 мкм) + лавсан (1.5 мкм) на сетке прозрачностью 40%
3	W/Sb 3.03	0.395–0.525 (3.14–2.36)	Al(0.3 мкм) + лавсан (1.5 мкм) на сетке прозрачностью 40%
4	Fe/Sc 5.03	0.277–0.395 (4.47–3.14)	Cu(0.3 мкм) на Ni сетке с прозрачностью 30%
5	Fe/C 5.01	0.183–0.277 (6.76–4.47)	Ag (0.3 мкм) на Ni сетке с прозрачностью 30%

* МРЗ изготовлены и прокалиброваны в Институте физики микроструктур (г. Н.Новгород).

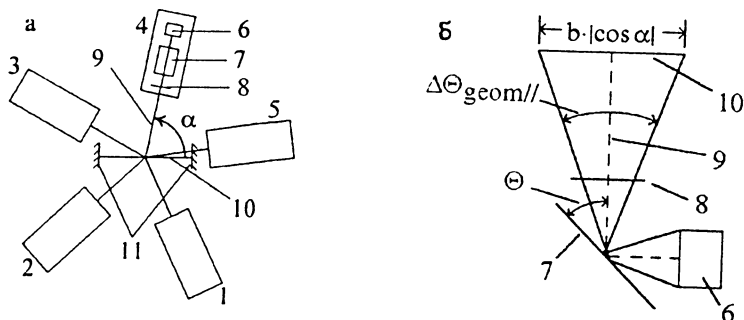


Рис. 1. Геометрия расположения каналов полихроматора относительно источника излучения: *a* — проекция на плоскость, проходящую через ось источника излучения и перпендикулярную оси полихроматора; *b* — проекция на плоскость, проходящую через ось канала полихроматора и перпендикулярную плоскости МРЗ. На рисунке схематически изображены: 1–5 — каналы полихроматора, 6 — детектор, 7 — МРЗ, 8 — фильтр, 9 — оптическая ось канала, 10 — источник излучения, 11 — ограничивающая диафрагма.

ные интервалы, в которых наблюдался квазинепрерывный спектр, состоящий преимущественно из большого числа линий ионов меди различной зарядности. Канал 5 был настроен на спектральный интервал, в который попадает большое число линий как ионов меди, так и ионов алюминия различной зарядности (табл. 2). Кроме того, в некоторых разрядах канал 2 перестраивался на спектральный интервал (1450 эВ), в котором наблюдался тормозной спектр. Измерение спектра в этих разрядах подтвердило результаты, полученные в [10] о том, что в области энергий фотонов ниже 5 кэВ излучение линейчатого спектра доминировало над непрерывным.

Сигнал с *p-i-n*-диодов регистрировался осциллографом Tektronix с полосой пропускания 1 ГГц. Измерявшийся электрический заряд Q_d [Кл] был связан с величиной спектрального потока в единичный телесный угол с единицы длины источника I_f [Дж · см⁻¹ · ср⁻¹ · эВ⁻¹] для случая непрерывного и квазинепрерывного спектра соотношением

$$Q_d = I_f \cdot L_s \cdot a_d^{-1} \cdot \Omega \langle \Delta E_m \rangle \cdot \langle S_{ch} \rangle, \quad (1)$$

где L_s [см] есть линейный размер плазменного шнура, с которого излучение попадало в детектор; a_d [см²] — площадь чувствительной области детектора; $\Omega = 2.8 \cdot 10^{-6}$ ср — телесный угол, в пределах которого излучение с элемента dL_s регистрировалось детектором; $\langle \Delta E_m \rangle$ [эВ] — спектральная ширина МРЗ, усредненная по спектральной ширине канала полихроматора ΔE ; $\langle S_{ch} \rangle$ [Кл · см² · Дж⁻¹] — усредненная

Таблица 2. Характеристики каналов полихроматора

№	$E, \text{эВ}$ ($\lambda, \text{нм}$)	$\Theta,$ град	$\alpha,$ град	$\Delta\Theta_m,$ град	$\Delta E,$ эВ	$\langle \Delta E_m \rangle,$ эВ	$\langle R_m \rangle$	$\langle T_f \rangle$	$L_s,$ см	$\langle S_d \rangle,$ мКл · см ² / Дж	$\langle S_{ch} \rangle,$ мКл · см ² / Дж
1	1728.5 (0.717)	9.7	293	0.18	122	32	0.08	0.27	0.24	0.66	0.014
2	1550 (0.8)	10	221	0.15	199	22	0.23	0.29	0.1	0.665	0.044
3	490 (2.53)	24.2	149	0.68	31	13	0.09	0.028	0.8	0.36	0.0009
4	385 (3.22)	18.5	77	0.9	19	18	0.38	0.012	0.08	0.235	0.0011
5	264 (4.7)	28.7	5	0.88	16	7.4	0.21	0.028	0.8	0.063	0.00035
2a	1450 (0.855)	10.5	221	0.16	177	21	0.23	0.31	0.8	0.66	0.047

по ΔE абсолютная чувствительность канала, определяемая как произведение пропускания фильтра ($\langle T_f \rangle$), пикового значения коэффициента отражения МРЗ ($\langle R_m \rangle$) и чувствительности детектора ($\langle S_d \rangle$).

В случае линейчатого спектра при регистрации спектральной линии с энергией фотона E_0 связь между Q_d и I_f записывалась в виде:

$$Q_d = I_f \cdot L_s \cdot a_d^{-1} \cdot \Omega \cdot \Delta E_L \cdot S_{ch}, \quad (2)$$

где S_{ch} — чувствительность канала при E_0 , а ΔE_L — спектральная ширина линии.

При наблюдении излучения в геометрии, представленной на рис. 1, а, существенным обстоятельством являлось то, что спектральная ширина канала ΔE заметно зависела от угла ориентации оси канала относительно оси плазменного шнура α и для некоторых каналов существенно превышала спектральную ширину зеркала ΔE_m . Величина ΔE при регистрации излучения с энергией фотона E выражалась через угол скольжения зеркала Θ и угловую дисперсию $\Delta\Theta$ как $\Delta E = E \cdot \text{ctg } \Theta \cdot \Delta\Theta$. Угловая дисперсия в свою очередь определялась как

$$\Delta\Theta = \left(\Delta\Theta_m^2 + \Delta\Theta_{\text{geom}_{\parallel}}^2 + \Delta\Theta_{\text{geom}_{\perp}}^2 \right)^{1/2}. \quad (3)$$

В выражении (3) $\Delta\Theta_m$ — угловая дисперсия зеркала, $\Delta\Theta_{\text{geom}_{\perp}}$ — угловая дисперсия, обусловленная поперечным размером источника и в нашем случае $\Delta\Theta_{\text{geom}_{\perp}} \ll \Delta\Theta_m$, а $\Delta\Theta_{\text{geom}_{\parallel}}$ — угловая дисперсия, определяемая геометрией наблюдения и связанная с углом α расстоянием от детектора до ограничивающей диафрагмы d , шириной диафрагмы b и радиусом чувствительной области детектора r_d (рис. 1, б) выражением

$$\Delta\Theta_{\text{geom}_{\parallel}} = 2 \cdot \text{arctg} \left[d^{-1} \cdot (r_d + |\cos \alpha| \cdot b/2) \right]. \quad (4)$$

В связи с тем что спектральная ширина канала ΔE существенно превышала спектральную ширину зеркала ΔE_m , при регистрации линейчатого спектра в каналах 1 и 2 эффективный линейный размер источника L_s оказывался меньше ширины ограничивающей диафрагмы. В этом случае эффективный размер источника L_s определялся угловой дисперсией МРЗ $\Delta\Theta_m$, углом α и расстоянием x между детектором и источником излучения:

$$L_s = 2 \cdot |\cos \alpha|^{-1} \cdot x \cdot \text{tg}(\Delta\Theta_m/2). \quad (5)$$

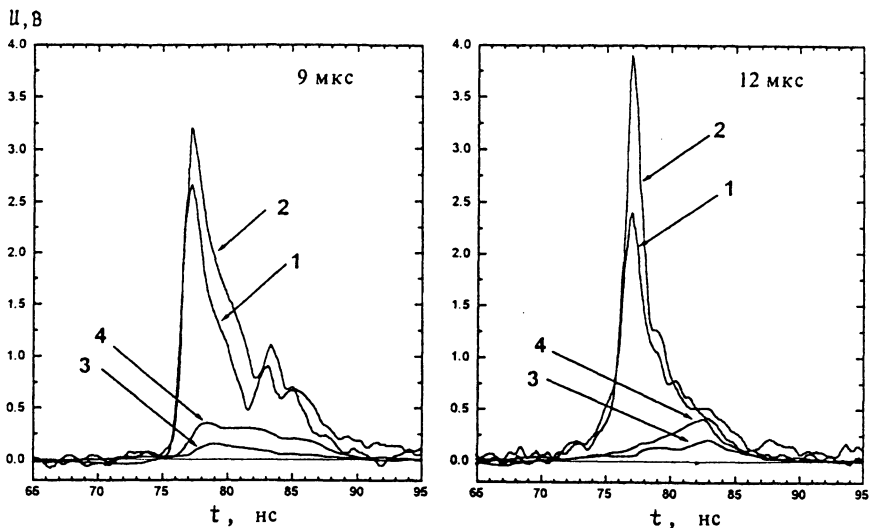


Рис. 2. Осциллограммы сигналов с четырех каналов полихроматора (1-4), полученные для двух значений 9 и 12 мкс времени задержки между взрывом алюминиевой фольги и разрядом генератора.

Все характеристики каналов полихроматора (Θ , α , $\Delta\Theta_m$, ΔE , $\langle \Delta E_m \rangle$, L_s , $\langle S_{ch} \rangle$) в рабочих спектральных точках представлены в табл. 2.

В эксперименте выход МР излучения из плазмы изменялся при различных временах задержки между взрывом алюминиевой фольги и разрядом генератора GAEL через нагрузку. Во всех разрядах удалось зарегистрировать сигналы с четырех каналов (1-4) полихроматора, сигнал с канала 5 в силу низкой чувствительности детектора в данном спектральном диапазоне (табл. 2) зарегистрировать не удалось. На рис. 2 представлены типичные осциллограммы сигналов с четырех каналов полихроматора для двух значений временной задержки 9 и 12 мкс. Анализ этих осциллограмм показывает, что с увеличением времени задержки наблюдался заметный временной сдвиг (~ 5 нс) между высвечиванием линий алюминия (каналы 1 и 2) и линий меди (каналы 3 и 4). Это обстоятельство, а также тот факт, что все МР излучение высвечивалось в одном импульсе, явилось дополнительным доказательством правильности концепции о динамике разряда в используемой конфигурации, развиваемой в работе [10]. Согласно данной концепции наличие алюминиевой плазменной струи препятствует хаотическому взрыву проволоочки и созданию большого числа

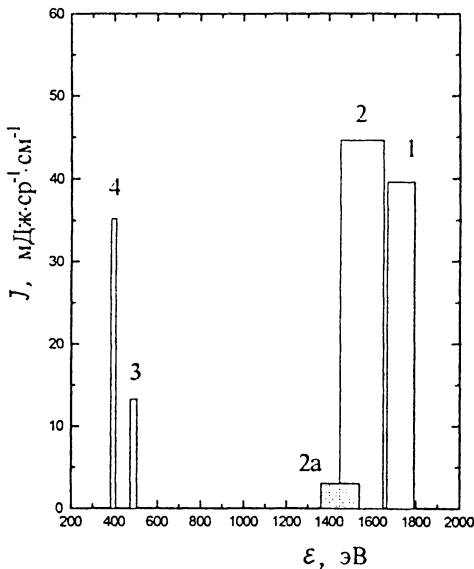


Рис. 3. Абсолютный интегральный по времени выход МР излучения с 1 см плазменного шнура в единичный телесный угол в пределах спектральных интервалов, выделяемых каналами полихроматора.

пинчевых образований, разнесенных по времени и пространству. В силу того, что сопротивление алюминиевой плазменной струи существенно меньше сопротивления медной проволоочки, ток разряда вначале протекает по алюминиевой плазме. По мере нагрева и сжатия алюминиевой плазменной оболочки ее кинетическая энергия испаряет и ионизует медную проволоочку, создавая плазменный шнур с температурой несколько сотен эВ, состоящий из центральной медной и внешней алюминиевой компонент. В момент, когда сопротивление медной компоненты становится меньше сопротивления алюминиевой оболочки, ток разряда переключается с внешней на центральную область плазменного шнура, что приводит к ее дополнительному нагреву. Сравнение сигналов, полученных для двух значений задержки (рис. 2), в рамках развиваемой выше концепции показывает, что задержка 12 мкс соответствовала созданию более горячей и плотной алюминиевой плазменной струи на момент разряда генератора. Это приводило к увеличению времени, необходимого для достижения максимального сжатия и разогрева медной компоненты.

Из рис. 2 видно также, что длительность сигналов в каналах 3 и 4 существенно превышала длительность сигналов в каналах 1 и 2. Это связано с тем, что, в то время как

сигналы 1 и 2 отвечали отдельным линиям ионов алюминия одной зарядности, сигналы 3 и 4 отвечали большому числу линий ионов меди, которые образовывались в разное время по мере развития разряда.

Измерения выхода МР излучения показали, что вид спектра и абсолютные величины потоков, зарегистрированных в каналах 1–4, практически не зависели от времени задержки. На рис. 3 представлены типичные значения абсолютных потоков в различных спектральных интервалах. Как видно из рис. 3, абсолютная величина потока в непрерывном спектре (канала 2, а) примерно на порядок меньше, чем излучение в линиях ионов алюминия (каналы 1 и 2). Это доказывает, что каналы 1 и 2, несмотря на значительную спектральную ширину, измеряли практически только излучение линий гелие- и водородоподобных ионов алюминия. Дополнительное подтверждение этому мы видим в том, что спектры излучения при взрыве алюминиевого и медного лайнеров, полученных с большим разрешением в работе [11], показывают, что в спектральном интервале 0.7–0.8 нм линии ионов алюминия являются доминирующими. На этом основании можно сказать, что суммарный абсолютный поток МР излучения с разрядного промежутка (20 мм) в 4πsr в линиях Al XIII 2p – 1s и Al XII 1s2p¹P₁ – 1s², 1s2p³P₁ – 1s² составлял приблизительно 2 Дж.

Таким образом, в настоящей работе с помощью 5-канального полихроматора в различных спектральных интервалах с временным разрешением измерены абсолютные значения интенсивности МР излучения плотной плазмы, создаваемой в конфигурации взрывающаяся медная проволока в окружающей ее плазменной алюминиевой струе. Обнаружено существенное влияние на параметры излучения временной корреляции между генерацией плазменной струи и разрядом генератора.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 93-02-16904 и гранта DGA/CEG/4093-002-00.

Список литературы

- [1] Vinogradov A. V., Zeldovich B. Y. // Appl. Opt. 1977. V. 16. P. 89.
- [2] Spiller E. // AIP Conf. Proc. / Ed. by D.T. Attwood and B.L. Henke. New York, 1981. V. 75. P. 124.
- [3] Гапонов С.В. и др. // ЖТФ. 1984. Т. 54. С. 747 [Sov. Phys. Tech. 1984. V. 29. С. 442].
- [4] Golubev A. V., Sorokin A. A. // 17th Symposium on plasma physics and technology. Prague, 1995. P. 95.
- [5] Bobashev S. V. et al. // Physica Scripta. 1991. V. 43. P. 356.
- [6] Hebach M. et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 1993. V. 2. P. 296.
- [7] Moos W. et al. // Rev. Sci. Instr. 1990. V. 61. P. 2733.
- [8] Wesse F. J. et al. // Phys. Rev. Lett. 1992, V. 69. P. 3181.

- [9] *Bobashev S.V., Shmaenok L.A.* // Rev. Sci. Instrum. 1981. V. 52. P. 16.
[10] *Edison N.S. et al.* // Phys. Rev. E. 1993. V. 48. P. 3893.
[11] *Вухарев В.Д. и др.* // ЖЭТФ. 1991. Т. 99. С. 1133.

**Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН
С.-Петербург**

**LPMI, Laboratoire du CNRS,
Ecole Polytechnique,
91128 Palaiseau, France**

**Centre d'Etudes de Gramat,
46500 Gramat, France**

**Поступило в Редакцию
8 февраля 1996 г.**

