

02;04;07;12

Измерение мощности и спектрального распределения излучения плазменных лайнеров

© С.А. Сорокин, С.А. Чайковский

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 6 ноября 1998 г.)

Для измерения мощности и спектрального распределения импульсов мягкого рентгеновского излучения в диапазоне энергий квантов 70–1500 eV разработан и опробован диагностический комплекс на базе болометров и вакуумных рентгеновских диодов. В качестве рентгеновских фильтров наряду с тонкими пленками применялись и фильтры, формируемые импульсным напуском газа в трубу диагностического тракта. Эксперименты проводились на сильноточном генераторе при токе в нагрузке до 2 МА. Импульсы мягкого рентгеновского излучения мощностью ~ 1 TW и длительностью ~ 40 ns формировались сжатием криптоновых лайнеров.

Введение

Магнитное сжатие цилиндрических плазменных лайнеров широко применяется как источник мощных импульсов мягкого рентгеновского излучения (МРИ) [1,2]. Эффективность преобразования электрической энергии генератора, переданной в вакуумный диод, в энергию излучения может превышать 50%. Основная часть энергии излучения приходится, как правило, на диапазон энергий квантов 100–700 eV. Для измерения мощности и полного за импульс выхода излучения наибольшее распространение получили вакуумные рентгеновские диоды (ВРД) [3] и фольговые болометры [4]. Спектральный отклик канала регистрации определяется кривой пропускания излучения фильтром и (для ВРД) квантовой эффективностью фотокатода. Открытый (без фильтра) болометр имеет постоянную по спектру функцию отклика и может быть использован для измерения полной по спектру мощности излучения. В общем случае сигнал одного канала регистрации не дает информации ни о полной по спектру мощности излучения, ни о спектральном распределении энергии излучения. Применение набора датчиков с различными, частично перекрывающимися спектральными функциями отклика позволяет в принципе восстановить форму спектра излучения [5–7]. Задача восстановления спектра по сигналам набора датчиков относится к классу математически некорректных задач. Точность восстановления спектра во многом зависит от выбора комбинаций материалов фотокатодов (ВРД) и фильтров, а также точности определения массовой толщины фильтров. Промышленность не выпускает пленки толщиной $1 \mu\text{m}$ и менее, имеющие высокий коэффициент пропускания в области менее 100 eV. Кустарное изготовление таких пленок сталкивается с проблемами контроля их толщины и однородности, сохранности в процессе монтажа и эксплуатации. Также ограничен выбор материалов, из которых могут быть изготовлены тонкие пленки без применения сложных, дорогостоящих технологий. Как правило, это углеродосодержащие пленки, имеющие низкий коэффициент пропускания излучения в области 290–400 eV (выше K -края углерода),

что создает определенные трудности при восстановлении этого участка спектра. Существенно упростить ситуацию может применение газовых фильтров. Применение газовых фильтров позволяет существенно расширить возможности составления комбинаций материалов катода и фильтра. Однажды изготовленная и отлаженная система формирования газового фильтра позволяет избежать процедур изготовления, измерения толщины и сохранности в процессе эксплуатации тонких пленок (0.1 – $1 \mu\text{m}$). Массовая толщина газового фильтра может легко варьироваться и практически может быть сколь угодно малой, т. е. чувствительность ВРД легко расширяется в область низких энергий.

В данной работе для измерения полного за импульс выхода, мощности и спектрального распределения МРИ в диапазоне 70–1500 eV применялись болометр из медной фольги и набор из пяти ВРД. Наряду с тонкопленочными фильтрами применялись и газовые фильтры, которые формировались импульсным напуском газа в трубу диагностического тракта с помощью быстрого электродинамического клапана. Эксперименты проводились на сильноточном генераторе МИГ [8] при токе в нагрузке до 2 МА. Длительность нарастания тока около 80 ns. Импульсы МРИ длительностью 30–40 ns и мощностью ~ 1 TW формировались сжатием криптоновых лайнеров. Исходный лайнер с начальным диаметром 20 mm и длиной 35 mm создавался с помощью быстрого клапана и сопла Лавала.

Диагностическая аппаратура

В качестве резистивного элемента болометра использовались медные полоски длиной 14 mm, шириной 1 mm и толщиной 2 и $15 \mu\text{m}$. Болометр собирается на базе стандартного высокочастотного разъема CP-75-167. Через резистивный элемент пропускается опорный ток амплитудой 100–200 А и длительностью около $10 \mu\text{s}$. Болометр с фольгой толщиной $15 \mu\text{m}$ позволяет измерять лишь полный за импульс выход излучения, так как характерное время выравнивания температуры по

толщине фольги за счет теплопроводности превышает длительность импульса излучения. Время выравнивания температуры для фольги толщиной $2 \mu\text{m}$ составляет около 10 ns , что позволяет в принципе отслеживать динамику поглощения излучения фольгой при длительности импульса излучения более 10 ns .

ВРД, так же как и болометр, изготавливается на базе разъема CP-75-167. Конструкция датчика проста, дешева и удобна в эксплуатации. Кроме деталей разъема необходимы лишь диск фотокатода диаметром 14 mm , поддерживающий фотокатод тефлоновый изолятор, и анодная металлическая сетка. Отрицательное напряжение 1 kV подается на фотокатод через сигнальный кабель в удаленную экранированную комнату регистрации. Сигнал с кабеля на осциллограф заводится через высокочастотный разделительный конденсатор. Время двойного пробега сигнала по кабелю ($\sim 300 \text{ ns}$) существенно превышает длительность импульса излучения, что позволяет избежать искажений сигнала, связанных с отражением от разделительного конденсатора. ВРД такой конструкции имеет субнаносекундное временное разрешение. Для реальной конструкции диода плотность тока насыщения объемным зарядом составляет около 100 A/cm^2 . Квантовая эффективность используемых фотокатодов такова, что требование линейной зависимости тока ВРД от потока излучения накладывает ограничение на поток излучения на поверхность фотокатода $W < 10^5 \text{ W/cm}^2$. При работе с изотропным источником МРИ мощностью $P > 10^{12} \text{ W}$ необходимо удалять ВРД от источника на $r > (P/4\pi W)^{0.5} \approx 10^3 \text{ cm}$. Большое удаление ВРД от источника излучения требует монтажа длинных вакуумных диагностических трактов и не всегда возможно в связи с ограниченными размерами лабораторного корпуса. Применение ослабителей потока излучения позволяет уменьшить длину измерительных трактов. В данной работе ослабление потока излучения производилось с помощью щели, установленной в трубе измерительного тракта перпендикулярно оси пинча. Прошедшее через щель излучение засвечивает на фотокатод ВРД площадь прямоугольной формы со сторонами $l_1 = Lb/a$ и $l_2 = h(a+b)/a$, где L — длина пинча, a и b — расстояние от щели до пинча и фотокатода, h — высота щели. Ослабление потока излучения на поверхности фотокатода составляет

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{a+b}{b} \frac{\Delta}{L},$$

W_1 и W_2 — потоки излучения на фотокатод без и с ослабительной щелью, Δ — ширина щели.

При выводе этого соотношения предполагалось, что излучательная способность пинча не зависит от координаты z и не учитывался конечный диаметр пинча при определении размера l_2 .

Схема диагностического канала с газовым фильтром показана на рис. 1. Импульсный клапан расположен по центру трубы. Время напуска газа в трубу должно быть меньше времени расширения газа в трубе до датчика МРИ и среза трубы. В этом случае массовая толщина фильтра может быть легко определена по известной мас-

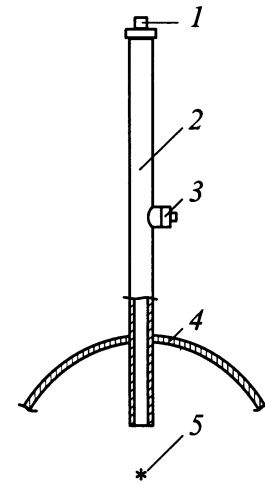


Рис. 1. Схема диагностического тракта с газовым фильтром: 1 — датчик излучения, 2 — труба канала регистрации излучения, 3 — импульсный клапан, 4 — стенка вакуумной камеры, 5 — источник излучения.

се газа в трубе и площади поперечного сечения трубы. Так как диаметр трубы значительно меньше ее длины, то распределение газа по сечению трубы практически однородно. Масса газа определяется и регулируется объемом газового клапана V и давлением газа в нем p , так как клапан работает в режиме полного опорожнения за один цикл срабатывания. Массовая толщина формируемого газового фильтра равна

$$D = m/S = m_a n V / S.$$

Здесь m — масса газа в форобъеме клапана, S — площадь поперечного сечения трубы, m_a — масса молекулы газа, n — плотность газа. Для азота при $V = 1.1 \text{ cm}^3$ и $S = 18 \text{ cm}^2$ в практических единицах имеем

$$D [\mu\text{g/cm}^2] = 76.7 p [\text{atm}].$$

Результаты эксперимента и обсуждение

В табл. 1 представлен набор из пяти применяемых в данной работе ВРД. Для вычисления функций отклика ВРД использовались данные о квантовой эффективности фотокатодов из [9] и о коэффициентах пропускания

Таблица 1.

Канал	Фильтр	Толщина	Фотокатод
1	Азот	10^{-3} kg/m^2	Алюминий
2	Полистирол	$0.4 \mu\text{m}$	Графит
3	Майдар	$2.5 \mu\text{m}$	Алюминий
4	"	$2.5 \mu\text{m}$	"
	Алюминий	$0.4 \mu\text{m}$	"
5	"	$0.8 \mu\text{m}$	"

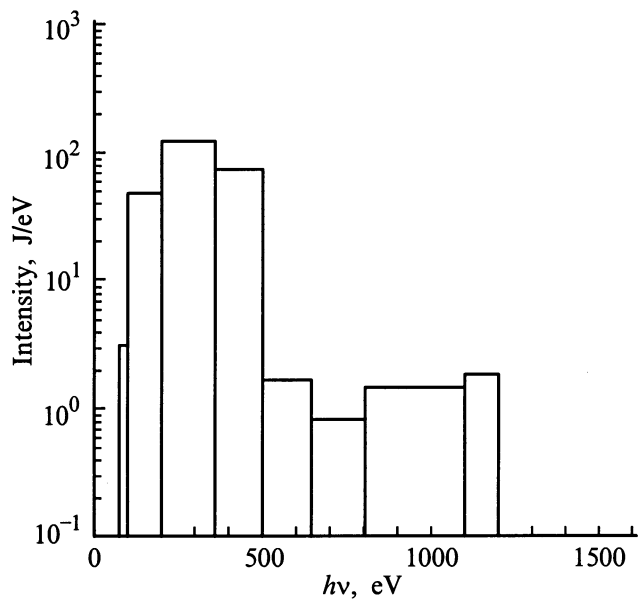


Рис. 2. Гистограмма спектра излучения криптонового лайнера.

фильтров из [10,11]. Сигналы ВРД регистрировались с помощью цифрового осциллографа Tetronix 640A. Наличие сигналов в оцифрованном виде существенно упрощает процедуру восстановления спектра и мощности излучения. Для восстановления спектра применялся итерационный алгоритм Тараско [7]. На рис. 2 показана гистограмма усредненного по времени спектра для одного из выстрелов на криптоновый лайнер. Полный по спектру выход излучения составляет 34 кДж. При восстановлении спектра в качестве нулевого приближения была выбрана постоянная спектральная плотность излучения. Выбор в качестве нулевого приближения планковского спектра с температурой 100 эВ не изменяет существенно форму спектра. В спектральном интервале 200–350 эВ, где заключена половина энергии излучения, изменение не превышает 1%. В прилежащих интервалах 100–200 и 350–500 эВ спектральная функция изменяется в пределах 6%. Изменение полного по спектру выхода излучения также не превышает 1%. Показание болометра из медной фольги толщиной $2 \mu\text{m}$ за азотным фильтром с массовой плотностью $3.8 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2$ в этом выстреле соответствовало энергии излучения 20 кДж. Такая величина прошедшего через фильтр излучения для спектра, показанного на рис. 2, соответствует полной энергии излучения 27 кДж. Меньшее значение выхода излучения, полученное с помощью болометра, возможно связано с частичным остыванием фольги за счет теплопроводности оттока энергии в поддерживающую фольгу диэлектрическую подложку.

ВРД с графитовым катодом и фильтром из полистирола толщиной $0.4 \mu\text{m}$ имеет слабоизменяющуюся функцию отклика в диапазоне 70–900 эВ и позволяет непосредственно измерять мощность излучения с ошибкой около 30%. Использование усредненной функции отклика этого датчика в диапазоне 70–600 эВ для изме-

рения выхода излучения в вышерассмотренном выстреле дает 32 кДж. Мощность излучения показана на рис. 3. Ошибка измерения этим датчиком существенно уменьшается, если он прокалиброван в одном из выстрелов по измеренной другим способом мощности излучения, и предполагается, что спектр излучения существенно не изменяется от выстрела к выстрелу.

Необходимо отметить, что использование газовых фильтров позволяет грубо построить спектр по сигналам ВРД с квазипостоянными функциями отклика в определенных спектральных интервалах. На рис. 4 показаны функции отклика F_ν четырех ВРД для измерения спектра излучения в диапазоне 100–870 эВ. Во избежание наложения кривых отклика и удобства представления на рисунке массовые толщины фильтров немного разбалансированы. Информация о фильтрах и фотокатодах этих ВРД представлена в табл. 2. Мощность излучения в определенном спектральном интервале может быть определена либо непосредственно по сигналу датчика, либо вычитанием сигнала одного датчика из сигнала другого. Например, вычитание сигнала четвертого канала из сигнала первого канала дает мощность излучения в

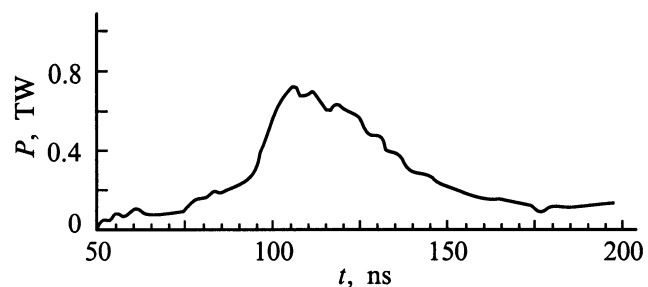


Рис. 3. Сигнал ВРД с квазипостоянной функцией отклика в диапазоне 70–900 эВ.

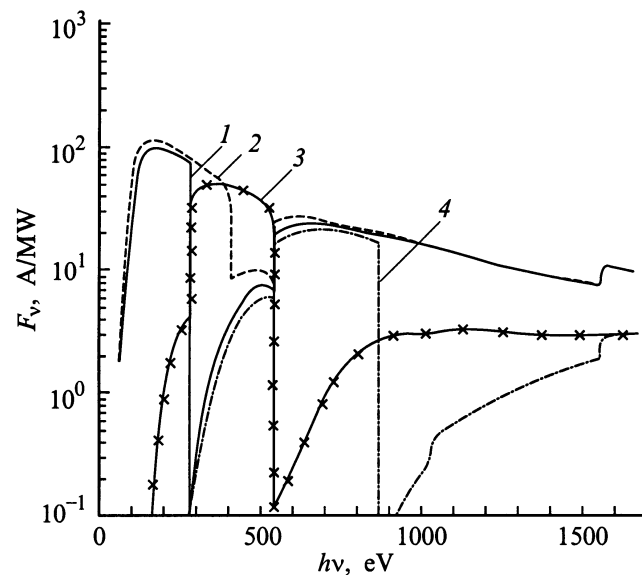


Рис. 4. Функции отклика F_ν четырех ВРД с газовыми фильтрами для измерения спектра излучения в диапазоне 100–870 эВ.

Таблица 2.

Канал	Фильтр	Толщина, kg/m^2	Фотокатод
1	Ацетилен	$1.2 \cdot 10^{-3}$	Алюминий
2	Азот	$6 \cdot 10^{-4}$	”
3	Кислород	$3 \cdot 10^{-3}$	Графит
4	Неон	$6 \cdot 10^{-3}$	Алюминий

интервале 100–290 eV. Измеренные в спектральных интервалах мощности излучения могут быть использованы в качестве нулевого приближения для итерационного алгоритма восстановления спектра. Измерения спектра этим методом в данной работе не проводились, так как по техническим причинам в эксперименте была возможность установить только один измерительный канал с газовым фильтром.

Заключение

Проведены измерения мощности, полного за импульс выхода и спектрального распределения МРИ в экспериментах по сжатию плазменных лайнеров на сильноточном генераторе МИГ при токе в нагрузке до 2 МА. Мощность и спектральное распределение излучения в диапазоне 70–1500 eV восстанавливалось с помощью итерационного алгоритма Тараско по сигналам пяти ВРД с различными, частично перекрывающимися спектральными функциями отклика. Разработана и опробована конструкция диагностического канала с газовым фильтром. Применение газовых фильтров существенно расширяет возможности составления комбинаций фотокатод/фильтр, позволяет легко расширять спектральную функцию отклика ВРД в область низких энергий квантов. Величина потока излучения на фотокатод ВРД, обеспечивающая линейную зависимость тока ВРД от потока излучения, устанавливается с помощью целевого ослабителя излучения. Мощность и полный за импульс выход излучения измерялись также фольговым болометром и ВРД с квазипостоянной спектральной функцией отклика. Рассмотрен вариант набора ВРД с газовыми фильтрами, которые имеют квазипостоянные функции отклика в спектральных интервалах, перекрывающих диапазон 100–870 eV. Такой набор датчиков позволяет непосредственно измерять мощность излучения в определенных спектральных интервалах, не прибегая к процедуре итерационного восстановления спектра.

Список литературы

- [1] *Turchi P.J., Baker W.J.* // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. N 11. P. 4936.
- [2] *Pereira N.R., Davis J.* // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 64. N 3. P. R1–R27.
- [3] *Kornblum H.N., Slivinsky U.W.* // Rev. Sci. Instr. 1978. Vol. 49. N 8. P. 1204–1206.

- [4] *Degnan J.H.* // Rev. Sci. Instr. 1979. Vol. 50. N 10. P. 1223–1225.
- [5] *Burns E.J.T.* // Adv. X-Ray Anal. 1974. Vol. 18. P. 117.
- [6] *Bailey J., Fisher A., Rostoker N.* // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60. N 6. P. 1939.
- [7] *Басов Н.Г., Захаренков Ю.А., Рупасов А.А.* и др. Диагностика плотной плазмы. М.: Наука, 1989. 368 с.
- [8] *Лучинский А.В., Ратахин Н.А., Федущак В.Ф.* и др. // Изв. вузов. Физика. 1997. Т. 40. № 12. С. 67–75.
- [9] *Day R.H., Lee P., Saloman E.B.* et al. // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. N 11. P. 6965–6975.
- [10] *Veigele W.J.* // Atomic Data. 1973. Vol. 5. N 1. P. 52–101.
- [11] *Henke B.L., Ebisu E.S.* // Adv. X-Ray Anal. 1974. Vol. 17. P. 150.