

ющие параметры  $a$ ; 2. По достаточно длинным реализациям  $X(t, a)$  находятся стационарные распределения  $f(X, a)$ ; 3. По уравнению (9) определяется функция  $\tilde{D}(\Delta a)$ . Тем самым находится перенормированное распределение  $\tilde{f}_0$ ; 4. По формуле (8) или (6) определяется разность энтропий  $\tilde{S}_0 - S$  при любых выбранных значениях  $a = a_0$ ,  $a = a_0 + \Delta a$ .

Если  $\tilde{S}_0 > S$ , то выбор управляющих параметров  $a$  сделан правильно, и при переходе от состояния со значением  $a = a_0$  к состоянию со значением  $a = a_0 + \Delta a$  степень упорядоченности возрастает и, следовательно, происходит процесс самоорганизации.

В противном случае для нахождения более упорядоченных состояний надо изменить выбор управляющих параметров.

При наличии нескольких управляющих параметров по рассмотренному критерию возможен поиск наиболее упорядоченного состояния в пространстве управляющих параметров. Это может быть сделано, как уже отмечалось, по экспериментальным данным без использования математической модели системы.

## Л и т е р а т у р а

- [1] К л и м о н т о в и ч Ю.Л. - Письма в ЖТФ, 1983, т. 9, с. 109.
- [2] К л и м о н т о в и ч Ю.Л. - Письма в ЖТФ, 1984, т. 10, с. 80.
- [3] E b e l i n g W., K l i m o n t o v i c h Yu.L. Selforganization and Turbulence in Liquids. - Leipzig, Teubner, 1984.
- [4] K l i m o n t o v i c h Yu.L. - Z. Phys. B, 1987, v. 66, p. 125.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию  
27 января 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 7

12 апреля 1988 г.

АБСОЛЮТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ  
ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
И КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРОВ В ОБЛАСТИ  
ЭНЕРГИЙ ФОТОНОВ  $E_{\gamma} \approx 1$  кэВ

С.В. Б о б а ш е в, Г.С. В о л к о в, А.В. Г о л у б е в,  
В.И. З а й ц е в, В.Я. Ц а р ф и н, Л.А. Ш м а е н о к

В исследованиях высокотемпературной интерциальной плазмы важное место занимают абсолютные спектрально-селективные измерения потоков мягкого рентгеновского излучения в килоэлектронвольтовой области энергий квантов. Решение этой задачи в значи-

тельной степени зависит от возможности калибровки детекторов излучения. Роль стендовых калибровок и испытаний детекторов особенно заметна в условиях работы на крупномасштабной установке, оснащенной многоканальным комплексом рентгеновских датчиков различных типов.

Особенностью современных инерциально-плазменных источников является чрезвычайно высокая интенсивность рентгеновских потоков. Например, спектральная интенсивность излучения сжимающегося цилиндрического лайнера в области  $E_{\gamma} \approx 1$  кэВ, по данным работы [1], на расстоянии 3м превосходит  $10^5$  Вт·см<sup>-2</sup> кэВ<sup>-1</sup>. В связи с этим представляется весьма ценной возможность оперативного проведения калибровок при загрузках на входе детектора, приближающихся к реальным.

Впервые, по-видимому, калибровка детекторов на высокоинтенсивном рентгеновском пучке с наносекундной длительностью импульса, генерируемом в сильноточном диоде, выполнена в работе [2]. Абсолютное измерение потока производилось ионизационной камерой.

Определенными преимуществами перед ионизационной камерой обладает, на наш взгляд, фотоионизационный квантометр [3, 4], разработанный для абсолютных измерений импульсных потоков мягкого рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового излучения. Измерение потока прибором основано на сравнении выхода ионов газа с малой плотностью ( $n < 10^{12}$  см<sup>-3</sup>) при его фотоионизации и ионизации пучком электронов известной интенсивности. Результат измерения опирается на физические константы – сечения ионизации атомов фотонами и электронами. До последнего времени этот прибор использовался только в сочетании с лазерно-плазменным источником излучения [5].

В настоящей работе для калибровки детекторов диагностического комплекса установки „Ангара-5” создан фотометрический стенд, содержащий интенсивный импульсный источник характеристического рентгеновского излучения и фотоионизационный квантометр (рис. 1). Источником служит сильноточный диод со взрывной эмиссией  $I$  ( $U=50 \dots 200$  кВ,  $I=1.5 \dots 2.0$  кА,  $\tau \leq 80$  нс), построенный на базе восьмиступенчатого газового генератора импульсного напряжения. Излучение К-линии, отделяемое от тормозного излучения диода, как и в работе [2], парой сбалансированных фильтров 5, попадает в фотоионизационный квантометр 2, который обеспечивает измерение числа квантов в импульсном квазимонохроматическом пучке. Сравнение результата измерения с выходным сигналом испытуемого детектора 3 позволяет осуществить его калибровку.

Чувствительность квантометра была повышена в десятки раз по сравнению с приведенной в [4] благодаря применению для регистрации ионов микроканальных пластин 2, 6 размером 70x90 мм (вместо ВЭУ) и соответствующему увеличению объема ионизационной камеры 2, а.

Основная часть измерений выполнена на излучении линии  $Al-K_{\alpha}$  ( $E_{\gamma}=1.49$  кэВ) с использованием ксенона в качестве рабочего газа. Минимальное число квантов с такой энергией, достаточное

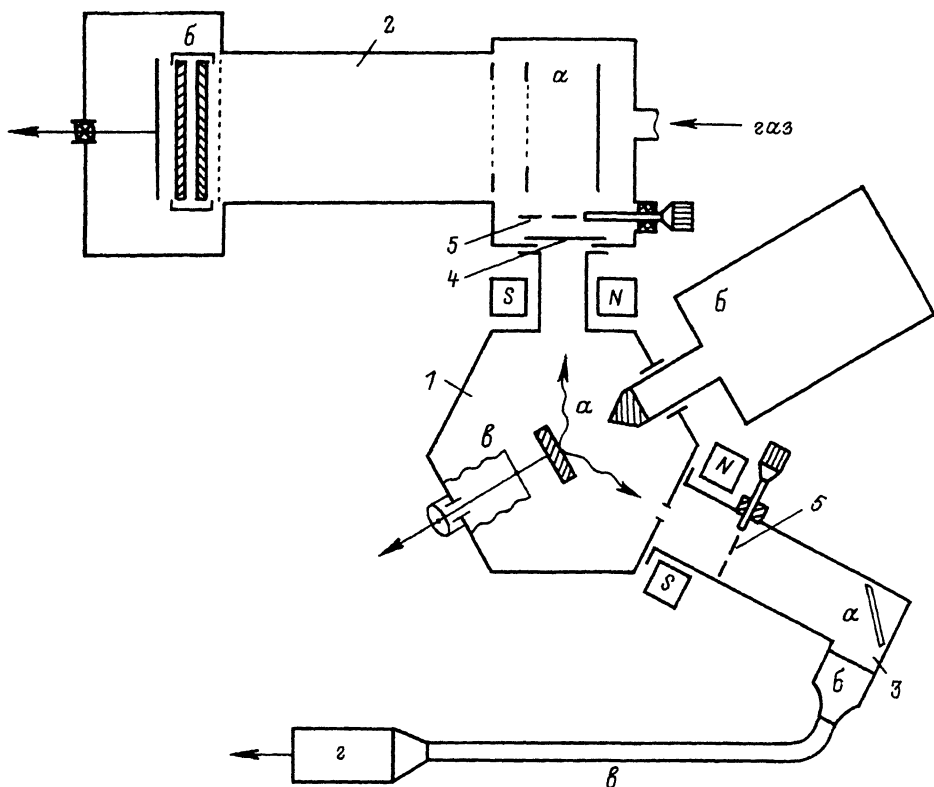


Рис. 1. Схема калибровочного стенда: 1 - источник импульсного рентгеновского излучения: а - диод со взрывной эмиссией, б - генератор импульсного напряжения, в - измерительный шунт; 2 - фотоионизационный квантометр: а - ионизационная камера, б - детектор ионов на МКП; 3 - калибруемый сцинтилляционный детектор: а - сцинтиллятор, б - фокон, в - световод, г - ФЭУ; 4 - лавсановый фильтр; 5 - сбалансированные фильтры.

для измерения в одном импульсе, составляет  $3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ . Рентгеновское излучение, генерируемое в источнике (рис. 1) на поверхности плоского анода, удаленного от острия катода на расстояние 3–4 мм, попадало в рабочий объем квантометра, распространяясь в телесном угле  $\Omega = 1.6 \cdot 10^{-3}$  стер вдоль оси, расположенной под углом  $30^\circ$  к плоскости анода. Благодаря такой геометрии происходила предварительная „очистка“ рентгеновского пучка от тормозного излучения, диаграмма направленности которого, как известно, стянута к оси электронного пучка диода. Окончательное выделение линии  $Al-K_{\alpha}$  осуществлялось разностным методом: путем попеременного введения в пучок излучения фильтров из алюминия (5,6 мкм)

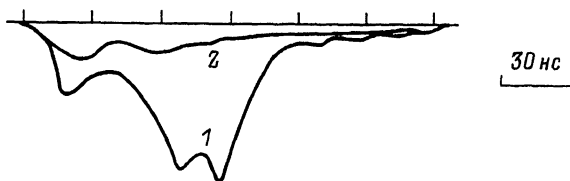


Рис. 2. Осциллограммы сигналов сцинтилляционного детектора: 1 - с алюминиевым фильтром, 2 - с магниевым фильтром.

и магния (10.9 мкм). Подбор толщин фольг, рассчитанных предварительно по табличным коэффициентам поглощения [6], с целью достижения минимальной разницы в поглощении фольг вне интервала между  $K$ -краями  $Al$  и  $Mg$  (1.30–1.56 кэВ) производился по измерению их прозрачности  $T$  на линии  $Ca-K_{\alpha}$  ( $E_{\gamma}=3.69$  кэВ) на рентгеновской установке БАРС-1. Влияние флуктуаций интенсивности источника от импульса к импульсу на точность разностного измерения потока квантометром уменьшалось благодаря нормировке на выходной сигнал детектора излучения, расположенного во втором канале.

Постоянные магниты, установленные вблизи выходных отверстий камеры диода (рис. 1), предотвращали попадание электронов, отраженных от поверхности анода, в каналы рентгеновских пучков.

В итоге величина сигнала с выхода детектора ионов фотоионизационного квантометра при введении в пучок магниевых фильтра, непрозрачного для линии  $Al-K_{\alpha}$  ( $T=0.8\%$ ), составила лишь несколько процентов от величины сигнала с фильтром из алюминия ( $T=55\%$ ). Столь большая величина разностного сигнала свидетельствует об определяющем вкладе излучения линии  $Al-K_{\alpha}$  в фотоионизацию рабочего газа. Малый вклад тормозного излучения обусловлен, очевидно, сходством зависимостей от энергии кванта сечения фотоионизации газа и коэффициента поглощения фильтра. Поток квантов, испускаемых источником в линии  $Al-K_{\alpha}$  в импульсе длительностью 80 нс, составил  $2 \cdot 10^{18}$  фот.стер $^{-1}$ .с $^{-1}$ .

В работе проведена абсолютная калибровка быстрого сцинтилляционного детектора на основе ФЭУ типа СНФТ-3 [7]. В детекторе (рис. 1) сцинтиллятор 3, а расположен под углом  $45^{\circ}$  к падающему рентгеновскому излучению. Излучение сцинтиллятора через фотон 3, б и световод 3, в попадает на фотокатод ВЭУ 3, г. Ось телесного угла сбора рентгеновского излучения на детектор ( $\Omega=8 \cdot 10^{-3}$  стер) расположена симметрично оси пучка излучения, регистрируемого квантометром. В канале калибруемого детектора использована идентичная описанной выше пара сбалансированных фильтров  $Al-Mg$ . Идентичность геометрии и элементов обоих каналов обеспечила надежность и простоту калибровочного эксперимента. Толщина пленочного полистирольного сцинтиллятора была близкой к оптимальной для линии  $Al-K_{\alpha}$  и равнялась 20 мкм. На рис. 2 показаны осцил-

лограммы тока детектора при введении в пучок фильтров из  $Al$  и  $Mg$ , зарегистрированные широкополосным осциллографом СРГ-5. Видно, что как и в канале фотоионизационного квантометра, достигается значительная величина разностного сигнала. Чувствительность данного детектора на линии  $Al-K_{\alpha}$  составляет  $S = (1.0 \pm 0.15) \cdot 10^{-17} \text{ А} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{кэВ}^{-1}$ . Следует подчеркнуть, что калибровка детектора выполнена при длительности импульса 80 нс и потоке энергии на входе, превосходящем  $10 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ , т. е. при параметрах рентгеновского пучка, характерных для экспериментов с плазмой сжимающегося лайнера [1].

Очевидно, что описанная в статье методика наиболее пригодна для калибровки детекторов с высокой степенью дискриминации жесткой (по отношению к выбранной  $K$ -линии) компоненты рентгеновского излучения, необходимой для достижения, как в рассмотренном случае, заметного разностного сигнала.

Авторы выражают благодарность В.П. Смирнову за стимулирующий интерес к работе, Л.Е. Аранчуку - за инициативную помощь в ее организации, Д.М. Симановскому - за участие в наладке аппаратуры.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Spielman R.B., Matzen M.K. et al. - J. Appl. Phys., 1985, v. 57, N 2, p. 830-833.
- [2] Спарроу Дж., Дик Ч. - Атомная техника за рубежом, 1978, в. 2, с. 41-48.
- [3] Бобашев С.В., Шмаенок Л.А. - А. с. № 519663, Бюллетень ИО № 24, 1976.
- [4] Bobashev S.V., Shmaenok L.A. - Rev. Sci. Instr., 1981, v. 52, p. 16-20.
- [5] Белик В.П., Бобашев С.В. и др. - Письма в ЖТФ, 1980, т. 6, в. 20, с. 1273-1278.
- [6] Henke B.L., Lee P. et al. Atomic Data and Nucl. Data Tables, 1982, v. 27.
- [7] Берковский А.Г., Веретенников А.И., Губанов Ю.И., Сущенко А.Н. - ПТЭ, 1976, № 2, с. 152-155.

Поступило в Редакцию  
3 февраля 1988 г.