

## Определение эффективного заряда плазмы по ее излучению в рентгеновской области спектра

© В.Ю. Горяинов, А.В. Воронин, В.А. Корнев, И.В. Мирошников, Д.Н. Ткаченко, В.В. Забродский, М.Ю. Кантор

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: vgoryainov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 3 мая 2024 г.  
В окончательной редакции 25 июля 2024 г.  
Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Предлагается метод определения эффективного заряда плазмы с помощью измерения тормозного излучения. С этой целью на токамаке ТУМАН-3М установлен рентгеновский детектор высокого временного разрешения. Получены первые значения эффективного заряда плазмы  $Z_{eff}$  для омического разряда, усредненные по объему области обзора детектора, в зависимости от времени.

**Ключевые слова:** эффективный заряд плазмы, тормозное излучение, рентгеновский детектор, токамак, бериллиевые фольги.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.24.59442.6628k

Эффективный заряд плазмы — один из наиболее важных параметров, характеризующих разряд и его протекание. Прежде всего значение эффективного заряда указывает на наличие примесей, которые негативно влияют на удержание плазмы. Однако точное определение данной величины до сих пор часто оказывается затруднительным. В настоящей работе представлен метод, который позволяет определить эффективный заряд с использованием данных рентгеновского излучения.

Детекторы рентгеновского излучения успешно применяются для измерения параметров плазмы токамака (электронной температуры, радиационных потерь) и позволяют регистрировать возмущения в плазме [1–4], в том числе определять эффективный заряд плазмы. В плазме токамака при температуре электронов больше 10 eV тормозное излучение преобладает над рекомбинационным и циклотронным излучениями, поэтому для расчета эффективного заряда  $Z_{eff}$  в водородной плазме допустима формула [5,6]:

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i n_i Z_i^2}{\sum_i n_i Z_i}, \quad Z_{eff} = \frac{AU}{CP},$$

$$P = \iint \Omega \frac{gn^2}{\lambda^2 \sqrt{T}} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda T}\right) d\lambda dV, \quad (1)$$

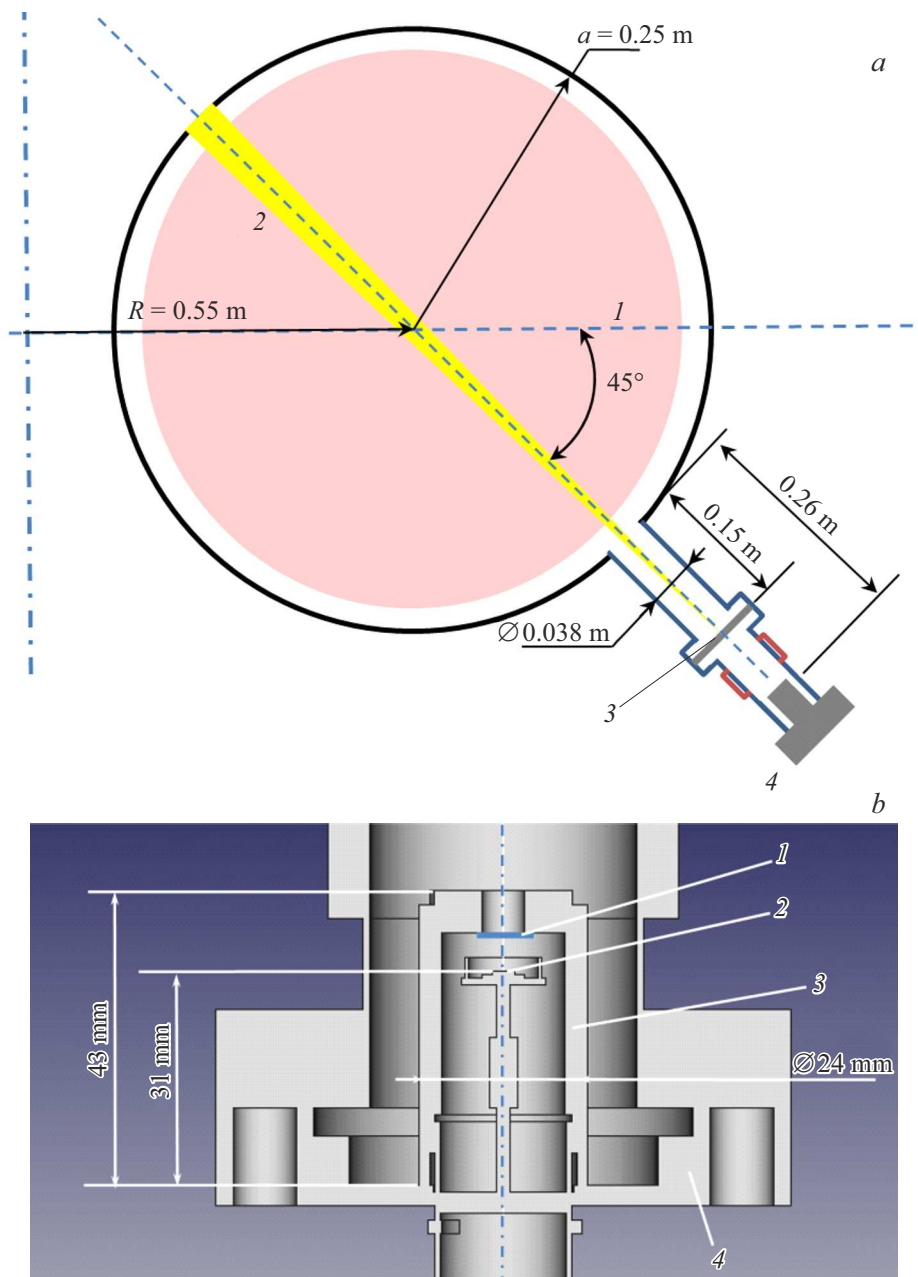
где  $CP$  — полная мощность тормозного излучения, собираемая детектором [W],  $n_i$  — концентрация примеси [ $\text{cm}^{-3}$ ],  $Z_i$  — ее заряд,  $C = 1.9 \cdot 10^{-28}$  — константа спектральной плотности мощности тормозного излучения, связанная с квазиклассическим приближением для водорода [6] (не имеет размерности),  $U$  — сигнал с детектора [V],  $\lambda$  — длина волны [Å],  $T$  — температура электронов [eV],  $g \approx 1$  — гаунт-фактор для свободновольных переходов в области энергий 0.5–10 keV,  $n$  — электронная плотность [ $\text{cm}^{-3}$ ],  $\Omega$  — телесный угол излучения плазмы, попадающего на датчик [sr],  $h$  — постоянная Планка [eV · s],  $c$  — скорость света

в вакууме [Å/s]. Коэффициент  $A$  [W/V] вычислялся с помощью калибровки детектора на эталонном источнике рентгеновского излучения с энергией 12 keV.

Схема установки прибора на токамаке ТУМАН-3М (малый радиус  $a = 0.25$  m, большой радиус  $R = 0.55$  m, тороидальное магнитное поле  $B_T = 1.0$  T) и его конструкция показаны на рис. 1, *a* и *b*. Чувствительный элемент в корпусе с фланцем соединялся через керамическую развязку с одним из патрубков токамака. Установка диагностики располагалась под углом  $45^\circ$  ниже экватора и была направлена на центр камеры в полоидальном сечении без тангенциального уклона. С помощью диафрагмы 3 (рис. 1, *a*) диаметром 2.3 mm с расстоянием до чувствительной области 110 mm угол раствора обзора детектора уменьшался до  $\alpha = 2.6^\circ$ , что позволяло собирать излучение с небольшой области плазмы и использовать радиальные профили плотности и температуры для вычислений интеграла (1). Малость угла раствора сбора излучения позволяет представить телесный угол как константу  $\Omega = 2\pi(1 - \cos(\alpha/2)) \approx 1.67 \cdot 10^{-3}$  sr. Значение  $Z_{eff}$  из формулы (1) получается усредненным по области сбора.

Перед чувствительным элементом (2 на рис. 1, *b*) установлена бериллиевая фольга толщиной  $15 \mu\text{m}$  (1 на рис. 1, *b*) [7] для устранения излучения с энергией менее 0.5 keV. Чувствительный элемент представлял собой SPD-фотоприемник (SPD — silicon photodiode) [8] с диаметром активной области 3.2 mm, временным разрешением менее  $0.1 \mu\text{s}$ .

Измерение плотности электронов проводилось по десяти каналам с помощью СВЧ-интерферометра. Температура электронов в центре плазменного шнура определялась с помощью фольгового рентгеновского спектрометра через отношение сигналов от каналов с различной толщиной бериллиевых фольг (50 и  $100 \mu\text{m}$ ) [1]. Фольговый метод позволял определять максимальную



**Рис. 1.** *a* — схема установки детектора на токамаке ТУМАН-3М, полоидальное сечение. 1 — плазменный шнур, 2 — область обзора детектора, 3 — диафрагма, 4 — детектор. *b* — внутреннее устройство детектора. 1 — бериллиевая фольга, 2 — чувствительный элемент, 3 — колпачок, 4 — фланец.

электронную температуру в области обзора (здесь это центр шнура). Электронная температура и плотность на периферии шнура для задания непрерывного радиального профиля измерялись зондами Ленгмюра. Погрешность измерений эффективного заряда составляет  $\sim 30\%$ . Основной вклад в погрешность измерений связан с небольшим полезным сигналом относительно шума.

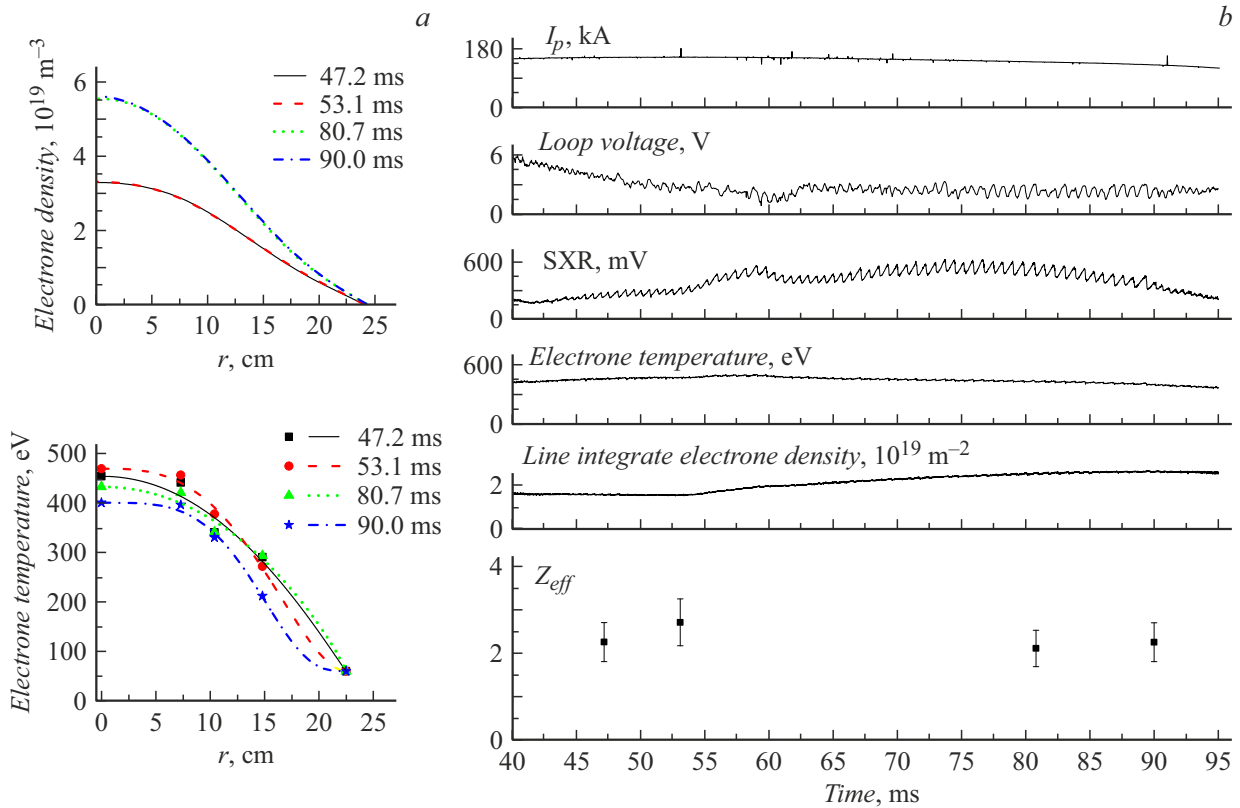
На рис. 2, *a* представлены радиальные профили плотности  $n(r)$  и температуры  $T(r)$ , построенные на основе измеренных точек и интерполированные в нескольких

временных отрезках. Формулы для интерполяции сводились к следующему виду:

$$n(r) = n_a + (n_0 - n_a) \left(1 - \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha\right)^\beta,$$

$$T(r) = T_a + (T_0 - T_a) \left(1 - \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha\right)^\beta, \quad (2)$$

где  $a$  — малый радиус токамака,  $r$  — переменная координата,  $n_a$ ,  $T_a$  — граничные значения электронных плотностей и температуры соответственно,  $n_0$ ,  $T_0$  —



**Рис. 2.** *a* — радиальные профили плотности  $n(r)$  (вверху) и температуры электронов  $T(r)$  (внизу) для разных отрезков времени. *b* — параметры плазмы (сверху вниз): ток, напряжение на обходе, рентгеновское излучение, максимальная электронная температура в центре, усредненная по хорде плотность электронов, эффективный заряд. Разряд № 24032706. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

плотность и температура электронов в центре плазменного шнура. С помощью параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  профили (2) были приближены к экспериментальным точкам. Полученные значения  $Z_{eff}$  для омического водородного разряда показаны на рис. 2, *b*. Видно, что величина  $Z_{eff}$  незначительно меняется со временем (составляет порядка 2.2–2.8), при этом на 80–90 ms она оказывается немного меньше, чем в начале разряда (на 40–50 ms).

Таким образом, в работе продемонстрированы первые результаты измерений эффективного заряда плазмы, полученные с помощью тормозного излучения для омического разряда на токамаке ТУМАН-3М. Диагностика включает в себя рентгеновский детектор, фильтр, диафрагму. Область сбора излучения с малым углом раствора и чувствительность прибора совместно с быстродействием позволяют определить усредненные по области значения  $Z_{eff}$ . В дальнейшем планируется проведение измерений с разрядами с нейтральной инжекцией, а также верификация значений с результатами кода ASTRA.

### Финансирование работы

Изготовление быстродействующего детектора поддержано ФТИ им. А.Ф. Иоффе в рамках госконтракта № 0034-2021-0001. Эксперименты проведены на УНУ

„Сферический токамак Глобус-М“, входящей в состав ФЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0021) в рамках госзадания 0040-2024-0028.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] А.В. Воронин, В.Ю. Горяинов, В.В. Забродский, Е.В. Шерстнев, В.А. Корнев, П.Н. Аруев, Г.С. Курский, Н.А. Жубр, А.С. Тукачинский, ЖТФ, **91** (12), 1922 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.12.51758.188-21 [A.V. Voronin, V.Yu. Goryainov, V.V. Zabrodsky, E.V. Sherstnev, V.A. Kornev, P.N. Aruev, G.S. Kurskiy, N.A. Zhubr, A.S. Tukachinsky, Tech. Phys., **67** (15), 2377 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.15.55263.188-21].
- [2] Е.А. Тухменева, Н.Н. Бахарев, В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев, Н.С. Жильцов, Е.О. Киселев, Г.С. Курский, В.Б. Минаев, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, А.Д. Сладкомедова, А.Ю. Тельнова, С.Ю. Толстяков, П.Б. Щеголев, Письма в ЖТФ, **47** (2), 9 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.02.50537.18471 [E.A. Tukhmeneva,

- N.N. Bakharev, V.I. Varfolomeev, V.K. Gusev, N.S. Zhiltsov, E.O. Kiselev, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, A.D. Slakomedova, A.Yu. Telnova, S.Yu. Tolstyakov, P.B. Shchegolev, *Tech. Phys. Lett.*, **47** (1), 56 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021010272].
- [3] K. Chen, L. Xu, L. Hu, Y. Duan, X. Li, Y. Yuan, J. Zhao, *Rev. Sci. Instrum.*, **87** (6), 063504 (2016). DOI: 10.1063/1.4953837
- [4] B. Alper, S. Dillon, A. Edwards, R. Gill, R. Robins, D. Wilson, *Rev. Sci. Instrum.*, **68** (1), 778 (1997). DOI: 10.1063/1.1147645
- [5] J.V. Hofmann, *Visible spectroscopy in ASDEX* (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, 1991), IPP III/174, p. 16–21.
- [6] С.Ю. Лукьянов, *Горячая плазма и управляемый ядерный синтез* (Наука, М., 1975), с. 154.
- [7] П.Н. Аруев, С.В. Бобашев, А.М. Красильщиков, А.В. Николаев, Д.Ю. Петров, Е.В. Шерстнев, ПТЭ, № 1, 98 (2021). DOI: 10.31857/S003281622006018X [P.N. Aruev, S.V. Bobashev, A.M. Krassilchtchikov, A.V. Nikolaev, D.Yu. Petrov, E.V. Sherstnev, *Instrum. Exp. Tech.*, **64** (1), 93 (2021). DOI: 10.1134/S0020441220060147].
- [8] <http://technoexan.ru/en/products/sildet.php>