

2

И Н С Т И Т У Т  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И Я Ф 78-3

А.В.Бурдаков, В.С.Койдан, Ё.Мацукава

ИЗМЕРЕНИЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ СИСТЕМЫ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ  
ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК-ПЛАЗМА

Новосибирск

1978

ИЗМЕРЕНИЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
СИСТЕМЫ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК-ПЛАЗМА

А.В.Бурдаков, В.С.Койдан, Е.Мацукава<sup>ж)</sup>

А Н Н О Т А Ц И Я

Описывается методика измерений мягкого рентгеновского излучения плазмы, нагреваемой релятивистским электронным пучком (РЭП). Особенностью измерений является наличие мощного импульса жесткого рентгеновского излучения во время инжекции РЭП в плазму, высокий уровень электромагнитных помех, быстрота процесса. Для регистрации и анализа мягкого рентгеновского излучения разработан малогабаритный многоканальный датчик, позволяющий регистрировать рентгеновское излучение плазмы с плотностью  $n \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$  с временным разрешением  $\sim 10$  нсек. Анализ энергетического распределения излучения ведется методом поглотителей, начиная с энергией квантов  $\sim 400$  эВ. Это позволяет измерять температуру электронов плазмы  $T_e \approx 40$  эВ.

---

<sup>ж)</sup> Сотрудник университета г.Осака, Япония.

Особенностью экспериментов по нагреву плазмы релятивистским электронным пучком (РЭП) является наличие мощного импульса  $\gamma$ -излучения во время срабатывания ускорителя, высокий уровень электромагнитных помех, быстрота процесса. Поэтому к системе для регистрации и анализа мягкого рентгеновского излучения плазмы, нагретой РЭП, предъявляются жесткие требования. В настоящей работе описывается методика измерений мягкого рентгеновского излучения, используемая на установке "ИНАР" [1,2] для исследования нагрева электронной компоненты плазмы.

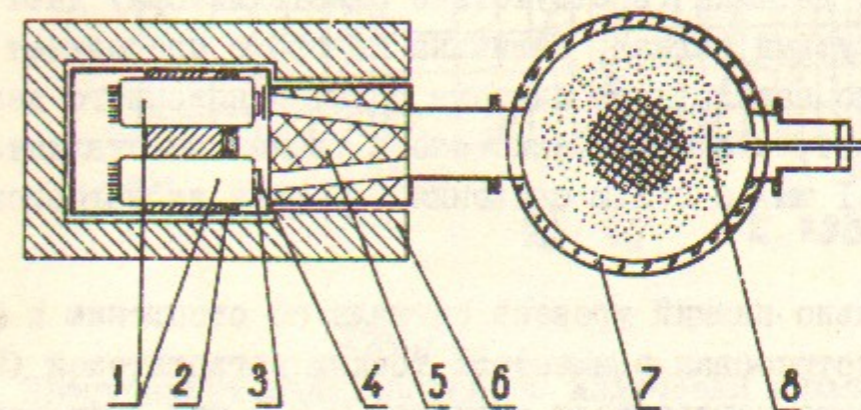


Рис. I.

Схема измерений: 1 - фотоумножитель, 2 - вакуумное уплотнение, 3 - сцинтиллятор, 4 - поглотитель, 5 - коллиматор, 6 - свинцовая защита, 7 - разрядная камера, 8 - мишень

Схема измерений представлена на рис. I. Регистрация и анализ мягкого рентгеновского излучения проводятся с помощью малогабаритного четырехканального датчика методом поглотителей [3]. Каждый канал представляет собой сцинтилляционный детектор, в состав которого входит фотоумножитель ФЭУ-54 (1), пластмассовый сцинтиллятор (3) и поглотитель (4). Использование световодов в условиях мощного  $\gamma$ -фона является нежелательным из-за их собственной флуоресценции, поэтому сцинтилляторы с помощью оптической замазки крепятся непосредственно к торцу фотоумножителя, а вакуумное уплотнение (2) осуществляется на баллонах ФЭУ. Тол-

шина сцинтиллятора должна быть такой, чтобы эффективность регистрации мягкого рентгеновского излучения плазмы была близка к 100%. В то же время для уменьшения паразитного сигнала от  $\gamma$ -излучения ускорителя сцинтиллятор следует делать минимально возможной толщины. В условиях экспериментов максимальная величина энергии отсечки поглотителя составляет  $\sim 1$  КэВ. Для полного поглощения излучения проходящего через такой фильтр, необходимо, чтобы энергия отсечки сцинтиллятора была, по крайней мере, в 3 раза больше. Исходя из этих требований, толщина сцинтиллятора была выбрана равной 0,4 мм. Заметим, что в наших экспериментальных условиях под действием  $\gamma$ -излучения ускорителя фотоумножители датчика (в отсутствие сцинтиллятора) дают собственный паразитный сигнал, величина которого составляет  $10 \pm 20\%$  от полного паразитного сигнала сцинтилляционного детектора. Это означает, что применение очень тонких сцинтилляторов (толщиной 0,1 мм) с целью снижения  $\gamma$ -фона не является целесообразным.

Сравнительно низкий уровень сигнала по отношению к фону  $\gamma$ -излучения потребовал применения тонких поглотителей (К-фильтров). Алюминиевые поглотители толщиной  $0,6 \pm 2$  мкм напылялись в вакууме на поверхность сцинтилляторов. Технология напыления позволяла получить однородные пленки. Толщина их контролировалась микроскопом-интерферометром МИИ-11. Использовались также фольги алюминия толщиной  $3 \pm 5,6$  мкм. Экспериментально было установлено, что изготовленные поглотители толщиной больше 0,5 мкм непрозрачны для светового излучения плазмы. Пропускание поглотителей в зависимости от энергии рентгеновского излучения показана на рис.2. Массовые коэффициенты поглощения для алюминия взяты из хорошо известных источников (см. напр., [4,5,6]). Используемый набор поглотителей давал возможность регистрировать мягкое рентгеновское излучение с энергией квантов  $\geq 400$  эВ.

Все детекторы с помощью коллиматоров (5) просматривают один и тот же объем плазмы. В ходе экспериментов было установлено, что  $\gamma$ -излучение ускорителя попадает в детекторы через коллиматоры, а не сквозь свинцовую защиту (6) толщиной 10 см. Амплитуда паразитного сигнала уменьшается с уменьшением толщины анодной фольги ускорителя. Это означает, что регистрируются

$\gamma$ -кванты, отраженные от деталей установки. При уменьшении толщины анодной фольги ускорителя диаграмма направленности  $\gamma$ -излучения становится уже, интенсивность его уменьшается и, в результате, меньшая доля этого излучения попадает на чувствительные элементы детектора.

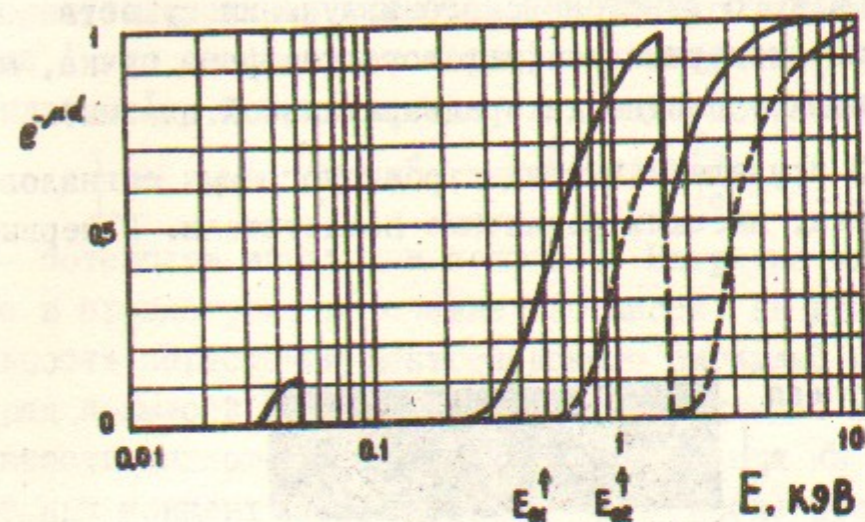


Рис.2

Пропускание рентгеновского излучения алюминиевыми поглотителями.  $E$  - энергия рентгеновского излучения,  $E_{01}$ ,  $E_{02}$  - энергии отсечки поглотителей толщиной 0,59 и 3,5 мкм

В некоторых экспериментах на стенке разрядной камеры (7), находящейся в поле зрения датчика, устанавливалась специальная ловушка, предназначенная для исключения влияния излучения со стенок камеры, а также для ослабления рассеянного  $\gamma$ -излучения. Ловушка представляет собой стакан, стенки которого сделаны последовательно из бериллия, алюминия, меди и свинца.

Для определения области, занимаемой нагретыми электронами, в плазму могла вводиться подвижная мишень (8) из бериллия или вольфрама. В этом случае датчик регистрирует тормозное излучение электронов плазмы с поверхности мишени. Калибровка датчика проводилась с помощью радиоактивных источников, светодиодов и  $\gamma$ -излучения ускорителя электронов. Датчик имеет габаритные размеры  $10 \times 10 \times 10$  см<sup>3</sup>. Временное разрешение составляет 10 нсек.

Эксперименты показали, что при инжекции РЭП ( $E \approx 0,8 \text{ МэВ}$ ),  $J = 20 \text{ кА}$ ,  $\tau = 50 \text{ нсек}$ ) в водородную плазму с плотностью  $n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$  возникает интенсивное мягкое рентгеновское излучение. Это излучение появляется в момент инжекции пучка и длится  $\sim 10 \text{ мксек}$ . Уровень сигнала является достаточным для его анализа методом поглотителей в динамическом диапазоне  $\sim 10^3$ . Интенсивность мягкого рентгеновского излучения существенно зависит от условий эксперимента (углового разброса пучка, магнитного поля установки, плотности предварительной плазмы).

На рис.3 приведены типичные осциллограммы сигналов с двух каналов датчика, имеющих различные поглотители. В первые 70 нсек

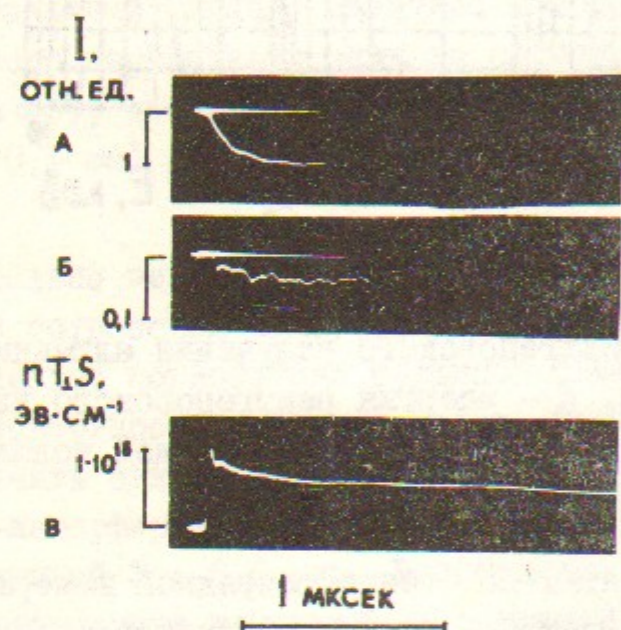


Рис.3

а, б — рентгеновские сигналы с детекторов, имеющих поглотители 0,59 и 1,77 мкм алюминия; в — диамагнитный сигнал. Режим  $n = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ;  $H = 25 \text{ кЭ}$ .

после начала инжекции пучка на сигналах с детекторов, имеющих относительно толстые поглотители (или при некоторых условиях эксперимента) может наблюдаться пик, связанный с  $\gamma$ -излучением РЭП. Затем на всех каналах наблюдается только мягкое рентгеновское излучение. На рис.3в представлена осциллограмма диамагнитного сигнала с зонда, расположенного в районе рентгеновского

датчика. Длительность диамагнитного сигнала совпадает со временем существования мягкого рентгеновского излучения. Более медленное нарастание рентгеновского сигнала по сравнению с диамагнитным связано, по всей вероятности, с возрастанием тормозного и рекомбинационного излучения примесей (например, кислорода, азота и др.) в процессе их ионизации. При этом, если в плазме присутствует  $n_z$  примесных ионов, то интенсивность их излучения  $I$  по отношению к тормозному излучению чистой водородной плазмы  $I_0$ , определяется следующим соотношением [7]:

$$\frac{I}{I_0} = 1 + \frac{n_z}{n} z^2 \left( 1 + 2 \frac{E_z}{T_e} \exp \frac{E_z}{T_e} \right),$$

где  $E_z$  — потенциал ионизации примесей. Нагретые электроны, удерживаемые в пробкотроне в течение  $\sim 10 \text{ мксек}$ , за время  $0,5 + 1 \text{ мксек}$  (длительность нарастания рентгеновского сигнала) могут увеличить заряд примесей до  $z = 3 + 4$  [8]. Это приведет к возрастанию интенсивности мягкого рентгеновского излучения из плазмы в  $5 + 10$  раз при концентрации примесей  $\sim 1\%$ . После прохождения РЭП остывание нагретых электронов происходит достаточно медленно, о чем свидетельствует существование рентгеновского излучения в течение  $\sim 10 \text{ мксек}$ .

Анализ рентгеновского излучения методом поглотителей проводился в интервале энергий отсечки  $E_0 = 500 + 1000 \text{ эВ}$ . Обработка результатов велась по методике, описанной в работе [9]. Эксперименты показали, что с помощью разработанного датчика при плотности плазмы  $n \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$  можно определять температуру электронов, начиная с величины  $T_e \approx 40 \text{ эВ}$ . Минимальный полезный сигнал, регистрируемый датчиком, ограничивается паразитным сигналом  $\gamma$ -излучения электронов пучка. Причем, воздействие  $\gamma$ -излучения на сцинтиллятор сказывается не только во время инжекции РЭП, но и после неё. Известно [10], что помимо быстрой компоненты высвечивания (с характерным временем  $2 + 3 \text{ нсек}$ ), пластмассовые сцинтилляторы имеют медленные компоненты, длительности которых составляют от 20 нсек до нескольких минут, а суммарная интенсивность — около 10% от полной интенсивности свечения. Экспериментально было установлено, что после окончания РЭП сигнал от медленной компоненты свечения сцинтиллятора существенно превышает уровень шумов ФЭУ. Эти обстоятельства и определяют нижнюю границу измеряемой температуры и максимальную величину энер-

гии отсечки поглотителей (их толщину).

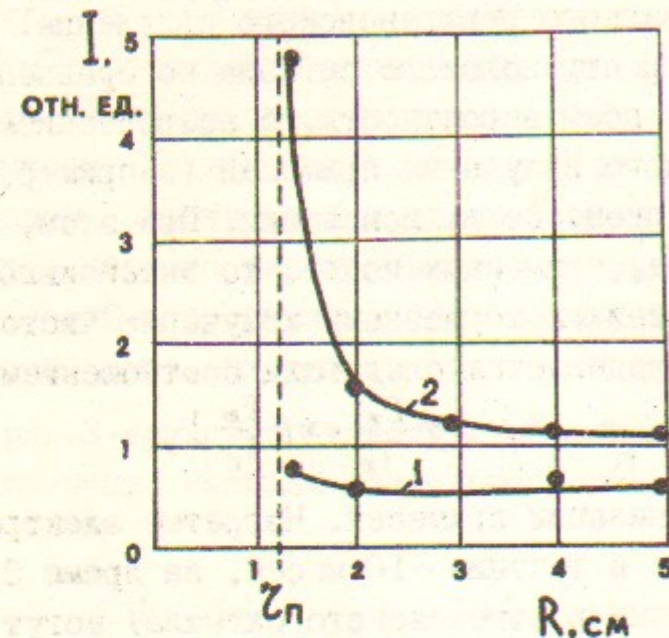


Рис. 4

Зависимость величины рентгеновского сигнала от положения мишени в плазме.  $R$  — расстояние от центра камеры,  $z_p$  — радиус РЭП

Измерения с мишенью позволяют определить область, занятую нагретыми электронами. На рис. 4 приведены зависимости уровня сигнала с датчика от положения мишени в плазме. Кривая (1) соответствует начальной плотности плазмы  $n = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , кривая (2) —  $7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Видно, что в первом случае горячие электроны находятся в области, занимаемой пучком. Такие измерения служат также доказательством того, что наблюдаемое излучение идет не со стенок разрядной камеры. При меньших плотностях предварительной плазмы горячие электроны могут занимать весь плазменный объем. В этом случае излучение со стенок удастся подавить с помощью ловушки.

Таким образом, в работе экспериментально показана возможность регистрации и анализа рентгеновского излучения плазмы в экспериментах с мощными релятивистскими электронными пучками.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.С.Койдан, В.М.Лагунов, В.Н.Лукьянов, К.И.Меклер, О.П.Соболев. Труды У Европейской конференции по физике плазмы и УТС. Гренобль, I, 161, 1972.
2. Ю.И.Абрашитов, В.С.Койдан, В.В.Коняхов, В.М.Лагунов, В.Н.Лукьянов, К.И.Меклер, Д.Д.Рятов. ЖЭТФ, 66, 1324, 1974.
3. F.C.Jahoda, E.M.Little, W.E.Quinn, G.A.Sawyer and Stratton. Phys. Rev., 119, 843, 1960.
4. E.Storm and H.I.Israel, Nuclear Data Tables, 7A, NO.6, 1970.
5. A.J.Bearden, J.of Appl. Phys., 37, 1681, 1966.
6. В.А.Фомичев, А.П.Лукирский, Оптика и спектроскопия, 19, 800, 1965.
7. H.R.Griem, A.C. Kolb, W.H.Lupton, D.T.Phillips, Nuclear Fusion, Suppl. 2, 543, 1962.
8. А.П.Васильев, Г.Г.Долгов-Савельев, В.И.Коган. Nuclear Fusion, Suppl. 2, 655, 1962.
9. А.В.Бурдаков, Ё.Мацукава. Препринт ИЯФ СО АН СССР 77-3, Новосибирск, 1977.
10. М.Н.Медведев, Сцинтилляционные детекторы, М.1977.