

04; 07; 12

© 1991

ПОЛУЧЕНИЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ПЛАЗМЫ БЫСТРОГО Z-ПИНЧА С ПОМОЩЬЮ
СФЕРИЧЕСКИ ИЗОГНУТОГО КРИСТАЛЛА СЛЮДЫБ.А. Б р ю н е т к и н, Г.В. И в а н е н к о в,
С.А. П и к у з, А.Я. Ф а е н о в,
Т.А. Ш е л к о в е н к о

Для понимания физической картины процесса сжатия плазмы в быстром Z-пинче, например, при взрыве тонких проводников в сильноточном диоде, очень важно экспериментально определить параметры и минимальный размер сжатых областей – так называемых „горячих точек“, образующихся в перетяжках пинча [1, 2]. В типичных экспериментальных условиях (амплитуда тока ~ 200 кА, длительность ~ 100 нс) значительная часть энергии „горячих точек“ излучается на переходах многозарядных ионов в рентгеновском диапазоне спектра (0.5–5 кэВ); это может быть использовано для диагностики плазмы пинча рентгеноспектральными методами.

Однако характерной особенностью быстрых Z-пинчей является наличие жесткой компоненты рентгеновского излучения, возникающей при торможении электронного пучка, который генерируется при обрыве тока в перетяжках пинча. Это в значительной мере затрудняет интерпретацию полихроматических изображений, получаемых, например, с помощью камер–обскур с краевыми фильтрами. При работе со спектрографами с плоскими, выпуклыми или изогнутыми по Иоганну кристаллами для получения пространственного разрешения приходится использовать щель, параллельную направлению дисперсии. В этом случае приемлемая светосила получается только при ширине щели > 100 мкм, что опять же не решает проблему.

Высокое спектральное и пространственное разрешение может быть получено с помощью спектрографов с кристаллами, изогнутыми по сферической поверхности [3]. Такого рода приборы впервые были использованы для задач диагностики лазерной плазмы, однако не нашли широкого распространения во многом из-за того, что до сих пор не удавалось изготовить кристаллы с радиусом изгиба менее 300 мм [4]. Это ограничивало диапазон регистрации прибора, его светосилу, увеличивало размеры. В настоящей работе нам удалось изготовить сферические анализаторы на основе кристаллов слюды (двойное межплоскостное расстояние $2d = 19.84$ Å) с радиусом изгиба $R = 100$ мм и диаметром D до 30 мм. Важной особенностью слюды является ее высокое отражение в I, II, III и IV порядках, что в сочетании с большой обзорностью при $D/R = 0.3$ позволяет с помощью одного кристалла перекрыть большую часть спектрального диапазона 3–19 Å.

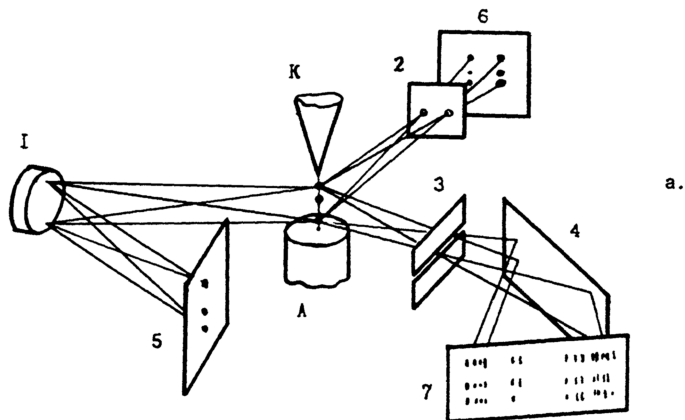
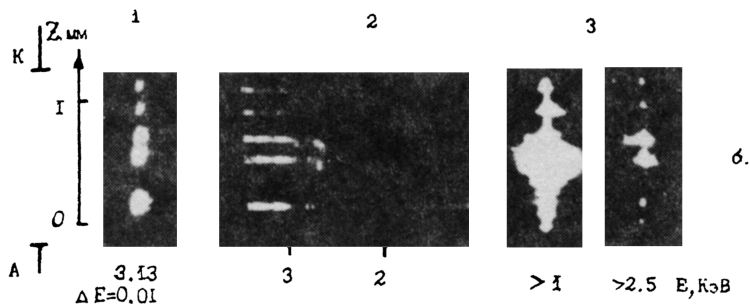


Рис. 1. а) Схема рентгеновских диагностик: 1 - сферический кристалл слюды в режиме микроскопа, 2 - камеры-обскуры, 3 - щель пространственного разрешения, 4 - кристалл *GsAP*, 5, 6, 7 - фотошленка, А - анод, К - катод.

б) Результаты, полученные при взрыве проволоки из *Pd*: 1 - монохроматическое изображение плазмы ($E_0 = 3.13$ кэВ, $\Delta E = 0.01$ кэВ) в U порядке отражения кристалла слюды; 2 - спектр плазмы в диапазоне 1.5-3.5 кэВ, полученный с помощью спектрографа с плоским кристаллом и щелью; 3 - изображения, полученные с помощью обскур различной жесткости.

Кристаллы были использованы в схемах рентгеновского микроскопа и светосильного спектрографа [3] для исследования плазмы быстрого Z -пинча при взрыве проводников в сильноточном диоде установки БИН физического института АН СССР (ток до 200 кА, длительность импульса 100 нс). Один из вариантов расположения диагностической аппаратуры с необходимыми пояснениями приведен на рис. 1, а. На рис. 1, б (поз. 1) представлена фотография монохроматического изображения плазмы, образующейся при взрыве про-

волочки из Pd , полученная в У порядке отражения при угле падения на кристалл, близком к нормам, т.е. в режиме рентгеновского микроскопа. Излучение, отраженное в I-III порядках, отрезалось фильтром из Be толщиной 70 мкм, к более жесткому излучению использованная фотопленка (RAR 2490) была малочувствительна.

Для оценки спектральной ширины отраженного от кристалла излучения, используя соотношения, приведенные в [3], можно получить в нашем случае $\Delta E \approx 0.01$ кэВ, так что для $E_0 = 3.13$ кэВ (соответствующей $2d/5$) спектральное разрешение составило $\Delta E/E_0 \approx 3 \cdot 10^{-3}$. Такое высокое разрешение позволяет уверенно утверждать, что наблюдаемое изображение сформировано излучением на переходах $2p^6 - 2p^5 3l$ Ne - подобного иона Pd XXXVП.

На рис. 2, а приведена схема использования сферического кристалла в режиме фокусирующего спектрографа с пространственным разрешением. В этом случае в саггитальной плоскости спектр образуется на окружности Роуанда, а пространственное разрешение обеспечивается фокусировкой в меридиональном направлении [3]. Коэффициент увеличения в этом случае дается выражением:

$$k = \frac{b}{a} = \cos 2\varphi = 2m^2 \left(\frac{\lambda}{2d} \right)^2 - 1, \quad (1)$$

где φ - угол падения излучения на кристалл, $a = R \cos \varphi / \cos 2\varphi$ и $b = R \cos \varphi$ - расстояние от источника до кристалла и от кристалла до фотопленки соответственно.

Коэффициент вертикальной фокусировки, который характеризует выигрыш в светосиле по сравнению со спектрографом. Иоганна определяется формулой:

$$K = \left(1 - \frac{2a \cos^2 \varphi}{a + R \cos \varphi} \right)^{-1} \quad (2)$$

и в случае полной фокусировки в саггитальной плоскости (при $a = R \cos \varphi / \cos 2\varphi$) стремится к ∞ . Однако в реальной ситуации значения K ограничены aberrациями сферического зеркала и качеством кристалла, и в нашем случае $K \sim 10^2$.

Из выражения (1) видно также, что полная фокусировка может осуществляться только в диапазоне углов падения $0-45^\circ$ (что соответствует длинам волн от $\sqrt{2}d/m$ до $2d/m$). С учетом нескольких порядков отражения с помощью одного кристалла слюды можно перекрыть следующие участки спектра: 2.81-3.97 Å (У); 4.68-6.61 Å (Ш); 7.05-9.97 Å (П); 14.03-19.84 Å (I).

На рис. 2, б, в (поз. 1) приведены спектрограммы, полученные при проволочек из Pd и Al соответственно в У и Ш порядках отражения. Из денситограмм, полученных при прописывании этих спектров, мы нашли, что в наших экспериментах пространственное разрешение было не хуже 100 мкм, а спектральное $\Delta \lambda / \lambda \sim 5 \cdot 10^{-4}$. Легко достижимыми являются величины ~ 30 мкм и 10^{-4} соответственно.

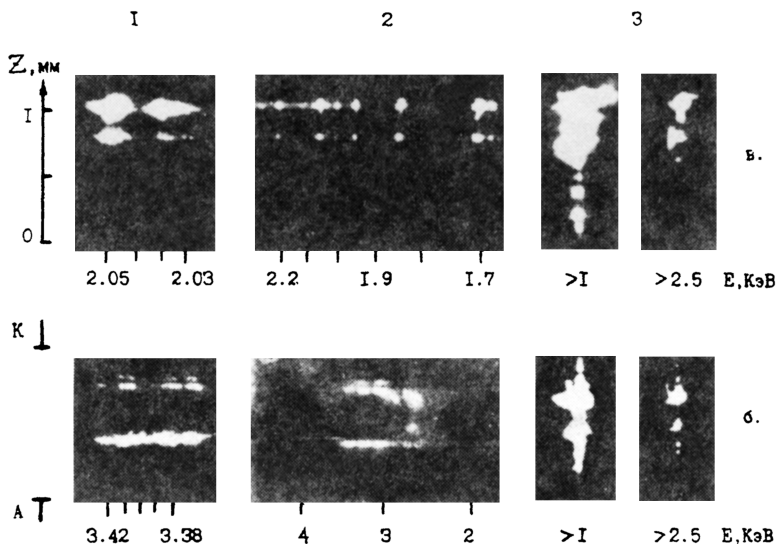


Рис. 2. а) Схема установки сферического кристалла в режиме спектрографа: А - анод, К - катод. б) Спектры плазмы при взрыве проволоки из Pt : 1 - сферический кристалл слюды в У порядке отражения, 2 - плоский кристалл, 3 - камеры-обскуры. в) Спектры плазмы при взрыве проволоки из Al : 1 - сферический кристалл в Ш порядке, 2 - плоский кристалл, 3 - камеры-обскуры.

Таким образом, в настоящей работе показано, что кристаллы слюды, изогнутые по сфере радиусом 100 мм, могут быть с успехом использованы в экспериментах по диагностике плотной плазмы рентгеноспектральными методами. Экспериментально реализованные высокое спектральное и пространственное разрешение дают возможность использования этих кристаллов для весьма тонких экспериментов, например, для измерения параметров уширения переходов в рентгеновском диапазоне и определения параметров плазмы при плотностях $10^{22}-10^{23}$ см⁻³ и температурах 0.5-5 кэВ.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Захаров С.М., Иваненков Г.В., Коломенский А.А., Пикуз С.А., Самохин А.И. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. № 3. С. 469.
- [2] Ivanenkov G.V., Lebedev A.N., Pikuз S.A. // Preprint / FIAN. M., 1989. N 120.
- [3] Boiko V.A., Vinogradov A.V., Pikuз S.A., Skobelev I.Yu., Faenov A.Ya. J.Sov.Laser Reseach. 1985. V. 6. N 2. P. 85-290.
- [4] Вилльямс М. и др. Препринт ФИАН. М., 1990. № 1.
- [5] Аглицкий Е.В., Бойко В.А., Захаров С.М., Пикуз С.А., Фаенов А.Я. // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. С. 908.

Поступило в Редакцию
23 августа 1991 г.