

МОНОХРОМАТИЧЕСКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ СВЕРХПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ

С.А.Пикуз, Т.А.Шелковенко, Д.А.Хаммер[†], А.Я.Фаенов*, Т.А.Пикуз[□],
В.А.Дякин*, В.М.Романова

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН
117927 Москва, Россия

[†] Корнельский университет
Итака 14854, США

* НПО ВНИИФТРИ
141570 Менделеево, Московская обл. Россия

□ МГТУ им. Н.Э.Баумана
107095 Москва, Россия

Поступила в редакцию 6 марта 1995 г.

В работе приводятся результаты исследований сверхплотной плазмы взрывающейся проволоочки с помощью новой схемы монохроматического рентгеновского зондирования, позволяющей не только получать теневые изображения ярких плазменных объектов в отдельных спектральных линиях с высоким пространственным разрешением, но и существенно снизить требования к источнику излучения. В схеме использованы рентгеновские элементы с кристаллами слюды, изогнутыми по сферической поверхности с радиусом 100–250 мм. Получены изображения взрыва алюминиевой проволоочки в излучении спектральной линии из $1s^2 - 1s3p$ ($\lambda = 6,6343 \text{ \AA}$) He-подобного иона Al XII. Результаты экспериментов подтверждают наличие малоплотной плазменной короны, возникающей на начальной стадии разряда через проволоочку, и плотного ядра, существующего на оси пинча в процессе разряда.

Рентгеновское зондирование [1-3] плотной и сверхплотной плазмы является в настоящее время одним из наиболее эффективных методов диагностики состояния сжимаемой мишени как в задачах лазерного термоядерного синтеза, так и в исследованиях сжатия различных лайнерных систем с пинчевыми разрядами. Предложения о применении рентгеновских лазеров для этих целей (см., например, [4]) пока в жесткой области спектра не реализованы. В качестве источников просвечивающего излучения используются дополнительная мишень, облучаемая вспомогательным лазером (см., например, [5-7], а также обзор в монографии [8]) или X-пинч, параллельный основному разряду [3]. Для получения изображения исследуемого объекта при точечном источнике подсветки используется теневое проецирование, при протяженном источнике – различные схемы рентгеновской микроскопии. В большинстве опробованных ранее для рентгеновского зондирования схем применялось немонохроматическое излучение подсвечивающего источника, а высокое пространственное разрешение обеспечивалось использованием камер-обскур.

В последние годы для целей селекции зондирующего излучения на фоне интенсивного излучения исследуемого объекта стали применяться схемы, использующие различные кристаллы [5,9]. Однако во всех случаях для создания источников зондирующего излучения требовалась мощность, сравнимая с мощностью, затрачиваемой на нагрев исследуемой плазмы, а светосила системы резко падала при улучшении пространственного разрешения. Существенным недостатком большинства использованных ранее схем зондирования является

малое поле зрения, что делает их неприемлемыми в исследованиях крупных плазменных объектов, таких, например, как мощные пинчи с лайнерными нагрузками.

В настоящей работе приводятся результаты использования новой схемы монохроматического рентгеновского зондирования, позволяющей не только получать теневые изображения ярких плазменных объектов в отдельных спектральных линиях с высоким пространственным разрешением, но и существенно снизить требования к источнику излучения. Кроме того, схема обладает полем зрения, измеряемым сантиметрами, что дает возможность исследовать с ее помощью практически любые плазменные объекты.

Основным отличием предлагаемой схемы просвечивания является использование способности кристалла, изогнутого по сферической поверхности, формировать изображения объектов в рентгеновских лучах. При этом кристалл работает как обыкновенное оптическое сферическое зеркало, обладающее высокими спектрально-селективными отражающими свойствами.

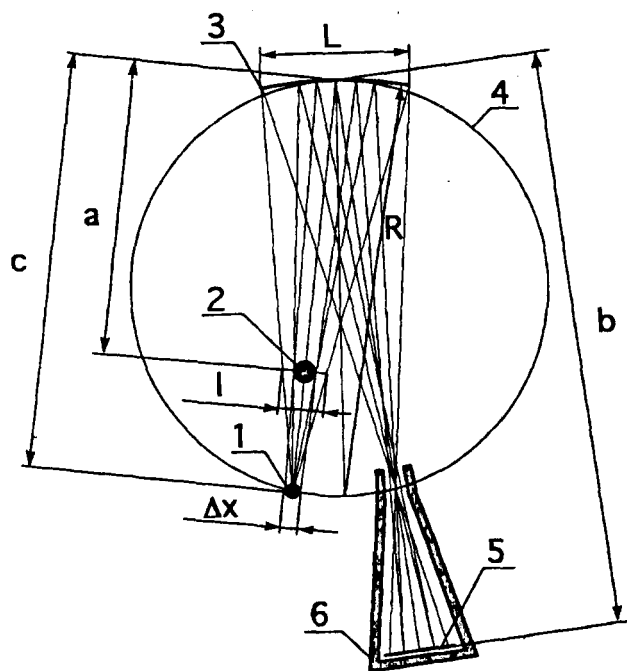


Рис.1. Схема монохроматического зондирования: 1 – источник излучения, 2 – исследуемый плазменный объект, 3 – сферически изогнутый кристалл, 4 – круг Роуланда, 5 – приемник излучения (фотопленка), 6 – защитный экран

Принципиальная схема эксперимента изображена на рис.1. Источник излучения 1 располагается на круге Роуланда 4 радиусом $R/2$ (R – радиус изгиба кристалла 3) таким образом, чтобы выполнялось условие Брэгга $2d \sin \theta = m\lambda$, где λ – длина волны излучения источника, d – межплоскостное расстояние кристалла, θ – угол скольжения излучения относительно поверхности кристалла. Объект исследования 2 располагается между источником и кристаллом на расстоянии $f < a < 2f$, где $f = c/2 = (R/2) \sin \theta$ – фокусное расстояние сферического зеркала в меридиональной плоскости. Теневое изображение объекта формируется в плоскости детектора или фотопленки 5 на расстоянии b от кристалла, определяемом формулой линзы $1/a + 1/b = 1/f$. При расположении источника вблизи оси изгиба кристалла сагиттальный фокус можно считать

совпадающим с меридиональным и равным радиусу круга Роуланда $R/2$ и $b = aR/(2a - R)$. Пространственное разрешение по объекту в этой схеме практически не зависит от размера источника и определяется только абберациями сферического зеркала и дифракционными свойствами кристалла.

Размер источника определяет диапазон длин волн излучения, участвующего в формировании изображения $\Delta\lambda/\lambda = (\Delta x/R)\cot\theta$. В силу того, что угол θ близок к нормальному, а реальные размеры источника Δx не превышают 1–2 мм, диапазон длин волн для кристаллов с $R \approx 100 - 500$ мм не превышает $(0,3-2) \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$, что находится в пределах ширины одной спектральной линии. При этом, естественно, выбор спектральной линии требует обеспечения угла θ в пределах $82-88^\circ$, что накладывает определенные ограничения на выбор излучающего вещества источника и его параметры. В настоящей работе использовались кристаллы слюды ($2d = 19,94 \text{ \AA}$), которая достаточно хорошо отражает излучение во многих порядках (практически от первого до более чем пятнадцатого), что существенно увеличивает выбор спектральных линий и расширяет возможности использования схемы. Кристаллы были изогнуты по сферическим поверхностям с радиусами 100, 186 и 250 мм по специальной технологии, обеспечивающей качество поверхности, близкое оптическому [10]. Следует отметить, что диапазон длин волн может быть расширен в длинноволновую сторону (30–100 \AA) путем использования в качестве оптического элемента многослойного зеркала, межплоскостное расстояние которого определяется технологией изготовления и может быть выбрано в соответствии с поставленной задачей.

Величина рабочего поля зрения l определяется взаимным расположением источника, объекта исследования, размером используемого кристалла и зависит от коэффициента увеличения k как $l = L/2(1 - 1/k)$, и при большом увеличении равна половине апертуры кристалла L . Использувавшиеся нами кристаллы имели размеры (10–15 × 35–50) мм, и поле зрения измерялось сантиметрами, по крайней мере в одном из направлений.

В силу того, что все излучение источника фокусируется в достаточно малое пятно вблизи круга Роуланда, детектор излучения может быть эффективно защищен от собственного излучения исследуемого объекта и от других излучений, присутствующих в экспериментах, например, в сильноточных Z-пинчах, установкой экрана с отверстием диаметром порядка размера источника.

В рассматриваемой схеме осуществляется эффективная спектральная и пространственная фильтрация собственного излучения исследуемой плазмы, поэтому источник просвечивающего излучения может иметь суммарную интенсивность, существенно меньшую интенсивности исследуемого объекта. Необходимо только, чтобы поверхностная яркость источника превышала поверхностную яркость объекта в пределах одной спектральной линии. Учитывая то, что источник просвечивающего излучения может быть весьма мал, для его создания будет необходима мощность, на несколько порядков меньшая мощности, затрачиваемой на нагрев исследуемой плазмы.

Эксперименты по рентгеновскому зондированию плазмы были выполнены на сильноточном импульсном генераторе ХР из Корнельского университета (Итака, США) [3] с током через нагрузку 350 кА в пике импульса длительностью 100 нс. Источником излучения служил X-пинч, образующийся при взрыве скрещенных алюминиевых проволочек диаметром 37,5 мкм в вакуумном диоде генератора (рис.2а). Схема зондирования с кристаллом слюды, изогнутым по

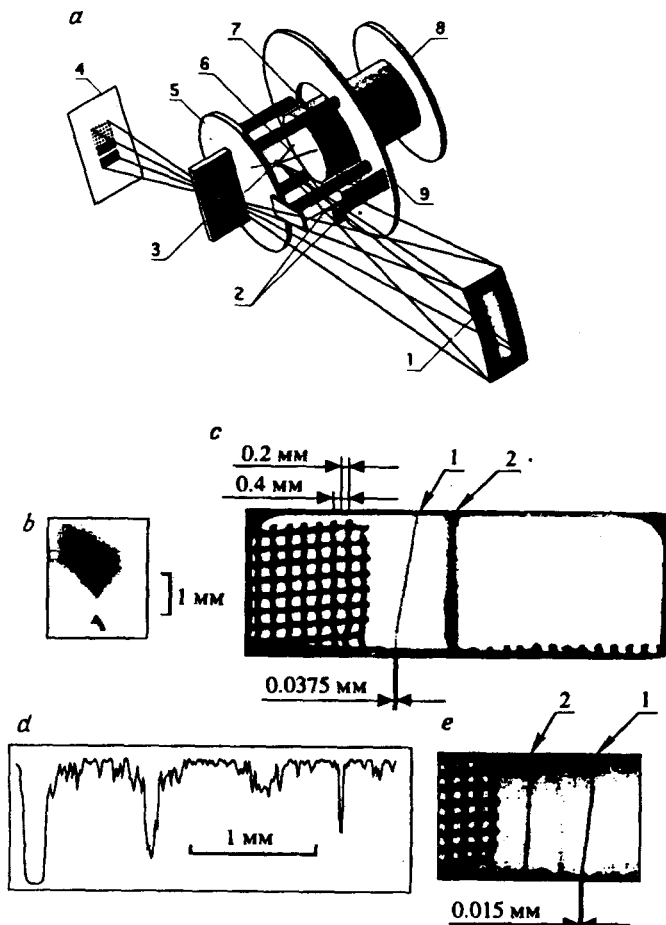


Рис.2. *a* – Схема эксперимента с использованием в качестве источника излучения X-пинча: 1 – сферически изогнутый кристалл слюды, 2 – объект (сетка, взрывающаяся проволочка и проволочка, не подключенная к цепи разряда), 3 – экран, 4 – фотопленка, 5 – анод, 6 – нагрузка X-пинча (скрещенные проволочки), 7 – катод, 8 – высоковольтный электрод, 9 – земляной электрод; *b* – изображение источника в излучении линии $1s^2 - 1s3p$ He-подобного иона алюминия, полученное с помощью рентгеновского микроскопа; *c* и *e* – теневые изображения объекта при взрыве проволочек диаметрами 37,5 мкм и 15 мкм; *d* – денситограмма теневого изображения при взрыве проволочки диаметром 15 мкм

сферической поверхности с радиусом 186 мм, была настроена на линию излучения $1s^2 - 1s3p$ He-подобного иона Al XII с длиной волны $\lambda = 6,6343 \text{ \AA}$ (угол $\theta \approx 86^\circ$ в III порядке отражения). Размеры и форма источника излучения контролировались рентгеновским микроскопом [11] со сферическим кристаллом слюды с $R = 250 \text{ мм}$. На рис.2*b* приведено изображение источника в свете той же спектральной линии, на которую была настроена схема зондирования.

Исследовался взрыв одиночной проволочки, включенной в цепь разряда параллельно токопроводу обратного тока. Доля тока, протекающего через эту проволочку, была невелика и не превышала нескольких килоампер. Этот ток примерно соответствует начальной стадии взрыва проволочки в сильноточном наносекундном Z-пинче [12]. На рис.2*c, e* приведены экспериментально полученные тенеграммы взрыва алюминиевых проволочек диаметром 37,5 и 15 мкм (отмечены стрелками 2). Для настройки и контроля фокусировки в плоскости объекта помещалась сетка с шагом 400 мкм и проволочка, аналогичная исследуемой, но не включенная в цепь разряда (отмечены стрелками 1). При взрыве проволочки диаметром 37,5 мкм наблюдался плазменный шнур диаметром $\approx 400 \text{ мкм}$ с плотным ядром меньшего диаметра. Подобная структура шнура может быть обусловлена наличием "шубы" из испаренного вещества,

адсорбированного поверхностью проволоочки и всегда присутствующего в эксперименте, если не приняты специальные меры. Плотное ядро, по-видимому, соответствует собственно материалу проволоочки, причем профиль поглощения говорит о том, что испаряется только его малая часть. В экспериментах с более тонкой проволоочкой (диаметр 15 мкм) удалось наблюдать вещество, испаренное с поверхности на начальной стадии разряда и разлетевшееся к моменту зондирования (50 нс от начала импульса тока) на расстояние порядка 1 мм от проволоочки. При этом диаметр плазменного шнура, образовавшегося при взрыве проволоочки, соответствует диаметру плотного ядра на рис.2с.

Полученные результаты подтверждают наличие малоплотной плазменной короны, возникающей на начальной стадии разряда через проволоочку и оказывающей существенное влияние на процессы формирования плотного пинча. Впервые подобное влияние было обнаружено при сопоставлении результатов наблюдения конечной стадии пинча при взрыве проволоочек в "естественном" состоянии и проволоочек, специально очищенных перед взрывом [13]. Прямых доказательств существования короны тогда получено не было, так как плотность короны мала, и она не регистрируется обычными оптическими методами.

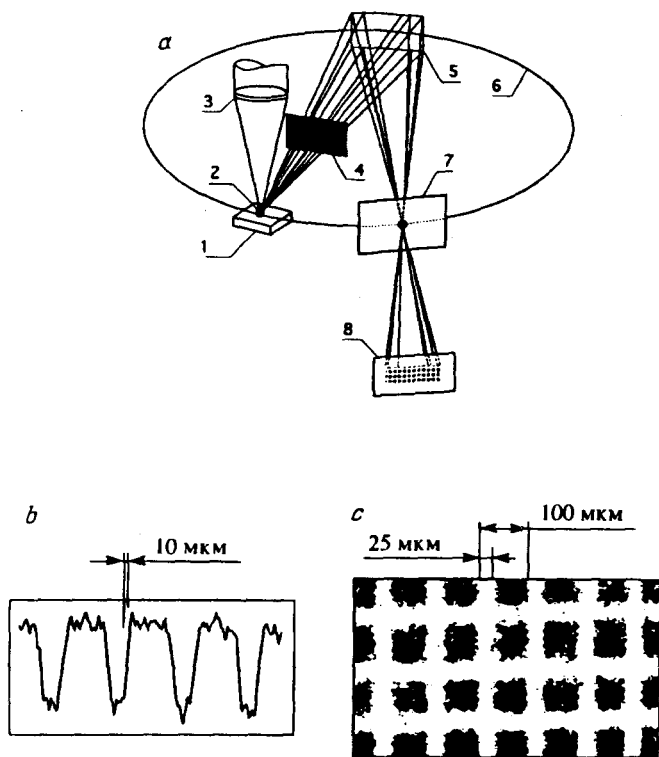


Рис.3. а - Схема эксперимента по проверке пространственного разрешения с использованием в качестве источника излучения лазерной плазмы: 1 - мишень, 2 - плазма, 3 - линза, 4 - тест-объект, 5 - сферически изогнутый кристалл слюды, 6 - круг Роуланда, 7 - экран, 8 - фотопленка; б и с - денситограмма и теневое изображение тест-объекта

Следует отметить, что в рассматриваемой схеме достаточно удобным источником просвечивающего излучения может служить лазерная плазма. В тестовых экспериментах для проверки пространственного разрешения нагрев плазмы осуществлялся при облучении алюминиевой мишени неодимовым лазером (10 Дж, 2 нс). На рис.3 приведена тенеграмма сетки с периодом 100 мкм в излучении $1s^2 - 1s3p$ линии He-подобного Al XII. Величина пространственного

разрешения оценивалась по резкости края сетки и была лучше 10 мкм при поле зрения 3×7 мм.

Предложенная и испытанная в настоящей работе схема высокоразрешающего монохроматического рентгеновского зондирования плазмы может во многих случаях быть альтернативой использованию коротковолновых лазеров. Полученные в экспериментах значения пространственного разрешения не уступают достигнутым в других схемах, по другим же параметрам схема имеет несомненные преимущества.

Работа частично финансировалась Национальной лабораторией Сандиа (Альбукерки, США), контракт AJ6400, Российским Фондом фундаментальных исследований (грант 93-02-15410) и Международным научным фондом (грант MJB000).

-
1. M.H.Key, R.G.Evans, and D.J.Nicholas, Preprint/Rutherford Lab. NRL-78-020, 1978, p.21.
 2. D.T.Attwood, IEEE J., Quantum Electronics QE-14, 12, 909 (1978).
 3. D.H.Kajantar and D.A.Hammer, Phys. Rev. Lett. 71, 3806 (1993).
 4. A.G.MacPhee, G.F.Cairns, M.H.Key et al., In: *Central Laser Facility of Rutherford Appleton Laboratory, Annual report 1994*, RAL-94-042.
 5. G.Bayer, D.Billon, M.Decroisette et al., In: *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena*, Eds. H.Schwarz, H.Hora, M.Lubin, B.Yaakobi, N.Y.: Plenum Press, 5, 595 (1981).
 6. C.Yamanaka, S.Nakai, Y.Kato et al., *ibid*, p.541.
 7. D.T.Attwood, N.M.Ceglio, E.M.Campbell et al., *ibid*, p. 432.
 8. Н.Г.Басов, Ю.А.Захаренков, А.А.Рупасов и др., *Диагностика плотной плазмы*, М.: Наука, 1989, гл.7, 10.
 9. D.A.Goodman, A.Ridgeley, A.MacPhee, T.A.Hall, In: *Annual report to the laser facility committee 1991*, RAL-91-025, p.27.
 10. А.Я.Фаенов, S.A.Pikuz, A.I.Erko et al., *Physica Scripta* 50, 333 (1994).
 11. А.Я.Фаенов, S.A.Pikuz, T.A.Pikuz et al., *X-ray Science and Technology*, 1995, в печати.
 12. А.Бартник, Г.В.Иваненков, Л.Карпинский и др., *Физика плазмы* 16, 1482 (1990).
 13. А.Бартник, Г.В.Иваненков, Л.Карпинский и др., *Квантовая электроника* 21 (2), 181 (1994).