Письма в ЖЭТФ, том 120, вып. 6, с. 459 – 464

Исследование пространственного распределения излучения плазмы Х-пинчей с помощью кодирующей апертуры нового типа

Е. А. Болховитинов[+1)], *А. А. Рупасов*[+], *А. А. Кологривов*[+], *С. А. Пикуз*[+], *И. Н. Тиликин*[+], *Т. А. Шелковенко*[+], *О. П. Иванов*[*], *В. Н. Потапов*[*]

[+]*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия*

[*]*НИЦ Курчатовский институт, 123182 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 9 августа 2024 г.
После переработки 25 августа 2024 г.
Принята к публикации 25 августа 2024 г.

Для исследования пространственного распределения интенсивности источника рентгеновского излучения электроразрядной плазмы была применена кодирующая апертура нового типа, представляющая собой структуру пересекающихся взаимно-перпендикулярных прозрачных и непрозрачных полос, ширины которых подобраны с использованием генератора случайных чисел. Излучение, прошедшее сквозь кодирующую апертуру, давало сложную картину кодированного изображения, которая регистрировалась на флуоресцентную запоминающую пластину Fuji TR без защитного покрытия. Для восстановления из этой картины пространственного распределения интенсивности излучения плазмы была применена математическая процедура, основанная на итерационном методе решения некорректно поставленной задачи – интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода. Было показано, что использование кодирующей апертуры не только многократно увеличивает светосилу системы регистрации по сравнению с камерой-обскурой, но и позволяет получить пространственное разрешение по плазме разряда не хуже, чем разрешение камеры-обскуры. Продемонстрирована применимость разработанного итерационного метода как для источников, близких к точечным, так и для протяженных излучающих объектов.

DOI: 10.31857/S0370274X24090224, EDN: HVKPZD

Введение. Для получения изображения плазменного источника в рентгеновском диапазоне спектра обычно применяется камера-обскура (далее по тексту – обскура), представляющая собой отверстие малого диаметра в непрозрачном для рентгеновского излучения экране. Важнейшим достоинством обскуры является простота изготовления и применения. Однако, из-за низкой светосилы обскуры, энергии излучения, попавшего на детектор, часто оказывается недостаточно для получения качественного изображения. Одним из альтернативных средств такой диагностики является применение более светосильного инструмента – кодирующей апертуры (КА), которая в общем случае представляет собой структуру в виде маски с прозрачными и непрозрачными элементами [1] и требует последующего математического восстановления истинного пространственного распределения интенсивности излучения плазменного объекта.

Описание эксперимента. В наших экспериментах была применена разработанная ранее [2] КА нового типа, обладающая относительно простой структурой, состоящей из пересекающихся взаимно-перпендикулярных прозрачных и непрозрачных полосок. Для изготовления такой КА применялся шаблон (рис. 1a), в котором ширины непрозрачных полосок и прозрачных зазоров между ними рассчитывались с использованием генератора случайных чисел.

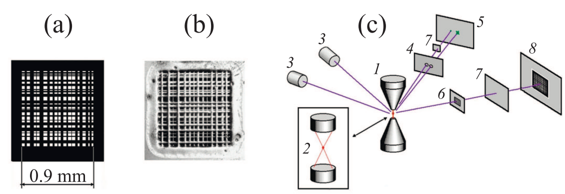

Рис. 1. (Цветной онлайн) Вид шаблона КА (a) и самой КА под микроскопом с 70-кратным увеличением (b); схематическое расположение диагностик относительно Х-пинча (c): *1* – схема гибридного Х-пинча; *2* – схема стандартного Х-пинча; *3* – фотодетекторы; *4* – камера обскура с двумя одинаковыми отверстиями; *5*, *8* – флуоресцентные запоминающие пластины; *6* – КА; *7* – Ве-фильтры, перекрывающие КА и одну из обскур

Изготовленная по такому шаблону методом ультрафиолетовой литографии КА (рис. 1b) представляла собой квадратную маску размером 0.9×0.9 мм

[1)]e-mail: bolhovitinovea@lebedev.ru

из золотой фольги толщиной 10 мкм, состоящую из взаимно-перпендикулярных полосок шириной от 7 до 50 мкм. Для изготовления КА использовалось золото, поскольку непрозрачная часть КА из золота обладает свойством задерживать более жесткое излучение по сравнению с другими материалами и, таким образом, расширяет эффективный спектральный диапазон работы КА. Кроме того, этот материал технологичен с точки зрения изготовления такой самоподдерживающейся структуры. Прозрачность такой КА составляла $\sim 30\,\%$, что в геометрии описываемого эксперимента по светосиле соответствовало бы обскуре диаметром ~ 0.56 мм. Однако при таком эквивалентном диаметре обскуры и геометрических параметрах применявшейся схемы диагностики пространственное разрешение по объекту было бы ~ 0.7 мм, что явно недостаточно для определения пространственных характеристик исследуемых плазменных источников, которые имели размер меньше миллиметра. При этом использование КА, как будет показано далее, не только существенно увеличивает светосилу системы по сравнению с обскурой, но и позволяет получить более высокое пространственное разрешение.

Описанная выше КА была применена в экспериментах по исследованию пространственных характеристик излучения плазмы гибридных и стандартных Х-пинчей в спектральном диапазоне мягкого рентгеновского излучения (МРИ) на электроразрядной установке КИНГ (ток 190–200 кА, напряжение 40 кВ, время нарастания тока 190–200 нс) [3–5]. Схемы указанных Х-пинчей приведены на рис. 1c, *1* и *2*. В качестве нагрузок для пинчевого разряда использовались проволочки диаметром 20–25 мкм из трех различных металлов – Mo, Al, Cu. Для построения теневых изображений плазменного источника использовалась КА, перекрытая Be фильтром толщиной 6.5 мкм (пропускающим кванты с энергией > 0.5 кэВ), установленная в вакуумный диагностический канал. Регистрация изображения плазмы пинча осуществлялась на флуоресцентную запоминающую пластину (ФЗП) без защитного слоя, образуя на ней скрытое изображение. Эти теневые изображения оцифровывались на специальном визуализирующем сканере Карат КР-35ВР с шагом сканирования 15 или 25 мкм. В наших экспериментах расстояние от плазменного источника до КА составляло 365 мм, а от КА до плоскости регистрации – 1085 мм.

Для регистрации рентгеновского излучения Х-пинча применялось несколько диагностик, схема расположения которых относительно Х-пинча приведена на рис. 1c. Одновременно с КА для вспомогательной визуализации плазмы пинча изображения регистрировались с помощью двух обскур, установленных в другой вакуумный канал, расположенный под малым углом к диагностическому каналу с КА. Расстояние от плазменного источника до обскур составляло 365 мм, а от обскур до плоскости регистрации 550 мм. Использовались обскуры одинакового диаметра 130 мкм, одна – открытая, а другая – перекрытая Be фильтром (таким же, как и КА) для выделения спектра МРИ. Они располагались близко одна от другой на одной линии, которая перпендикулярна пинчу, ориентированному вертикально (рис. 1c), что позволяло точно установить местоположение ярких излучающих точек на пинчевом разряде.

Для регистрации импульсов МРИ во всех выстрелах применялись два алмазных фотодетектора с фильтрами из Be толщиной 6.5 микрон с энергией отсечки 0.5 кэВ (рис. 1c, *3*). Сигналы с детекторов регистрировались осциллографом Tektronics с полосой пропускания 1 ГГц, так что система регистрации, включающая детектор, осциллограф и подводящие кабели давала временное разрешение около 1 нс.

Излучение, прошедшее сквозь КА, давало сложную картину кодированного изображения, поэтому требовалось использование математической процедуры восстановления истинного двумерного пространственного распределения МРИ плазмы пинча. По структуре и корреляционным свойствам эта КА близка к известной ранее КА типа PnP [1], однако все же отличается от нее и требует несколько другого алгоритма математического восстановления изображения, поскольку известный алгоритм для PnP структур хорошо работает для точечных источников, но для протяженных источников дает артефакты. Такой алгоритм, подходящий и для протяженных источников, был разработан в [2] и представляет собой реализацию итерационного метода решения некорректно поставленной задачи, который описан ниже.

Итерационный метод восстановления изображения источника из теневых изображений, полученных с помощью кодирующей апертуры нового типа. Для восстановления изображений протяженных источников с использованием маски нового типа был применен подход, связанный с решением интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода:

$$F(\mathbf{r}) = \int\limits_{\Delta S} G(\mathbf{r}, \mathbf{R}) S(\mathbf{R}) d\mathbf{R}, \tag{1}$$

где $F(\mathbf{r})$ – функция, описывающая теневое изображение источника, сформированное КА в плоскости экрана *8* на рис. 2; $S(\mathbf{R})$ – функция истинного распределения интенсивности излучения в плоскости расположения источника; $G(\mathbf{r}, \mathbf{R})$ – инструментальная функция кодирующей апертуры (формально соответствует теневому изображению кодирующей апертуры от точечного источника единичной интенсивности, расположенного в точке $\mathbf{R}$ в плоскости источника, и определяется апертурной матрицей КА); ΔS – область интегрирования в плоскости источника в пределах его геометрических размеров.

Задача о решении интегрального уравнения (1), т.е. нахождения $S(\mathbf{R})$, относится к классу некорректных задач. Существуют устойчивые численные методы решения таких задач, один из которых был разработан М. З. Тараско и называется методом максимального правдоподобия [6], который позже стал широко известен как метод Ричардсона–Люси [7, 8]. Указанный выше метод был реализован в виде алгоритма и соответствующей программы для персонального компьютера (ПК) при использовании КА нового типа [2]. Компьютерная реализация алгоритма тестировалась и проверялась на рассчитанных теневых изображениях, моделирующих изображения от различных источников излучения, что показало правильность данного подхода. Впоследствии этот алгоритм был применен к нашим экспериментальным результатам.

Экспериментальные результаты и расчетное восстановление пространственной структуры ярких точек X-пинчей. Ниже будут приведены экспериментальные результаты, полученные на электоразрядной установке КИНГ с нагрузками в виде гибридных и стандартных X-пинчей, а именно теневые изображения плазмы, полученные в диапазоне МРИ за КА, и математически восстановленные пространственные распределения излучения плазмы и их сопоставление с изображениями плазмы, полученными с помощью обскур.

Из рисунка 2c видно, что, на изображении, даваемом обскурой с таким же фильтром, как и на КА (которая регистрирует излучение с энергией квантов выше 0.5 кэВ), в гибридном X-пинче с Mo проволочкой зарегистрированы два близко расположенных источника мягкого рентгеновского излучения (МРИ) с разной интенсивностью излучения. В пинчах такие интенсивные источники МРИ называются яркими точками [3, 4]. Информация о ярких точках – их количестве, интенсивности и локализации в плазме пинча является очень важной для понимания физики электродинамических процессов сжатия плазмы разряда как источника рентгеновского излучения. Отметим, что близко расположенные излучающие яркие точки дают на ФЗП перекрывающиеся теневые кодированные изображения. Разработанный алгоритм восстановления истинного изображения излучающей плазмы позволяет обрабатывать такие кодированные изображения целиком, если теневые картины от каждой яркой точки перекрываются или расположены близко одна от другой. В случае если теневые картины от каждой яркой точки располагались удаленно между собой, то такие картины обрабатывалась по отдельности для уменьшения объема обрабатываемых данных.

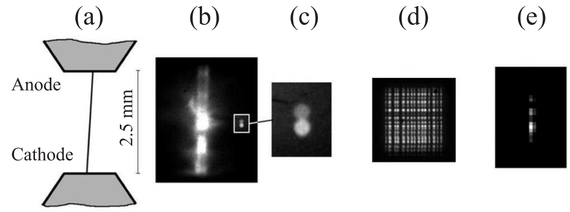

Рис. 2. Схема центральной части гибридного X-пинча (a); обскурограммы излучающей области гибридного пинча (выстрел 230427) с Mo проволочкой, зарегистрированные обскурами – открытой (b) и перекрытой Be фильтром (c); теневое кодированное изображение плазмы пинча, полученное через КА (d); изображение источников излучения X-пинча,восстановленное по теневому кодированному изображению (e)

На восстановленном изображении видны три точки разной интенсивности (рис. 2e). При этом верхняя точка имеет столь низкую интенсивность, что не дала изображения на обскуре. Расстояние между крайними точками в восстановленном изображении примерно 100 мкм.

Открытая обскура пропускала все длины волн, поэтому на детекторе регистрировалось яркое изображение всего разряда (рис. 2b). Это изображение не позволяло выделить на нем яркие точки, излучающие МРИ, тогда как перекрытая Be фильтром обскура позволяла визуализировать такие яркие точки, однако пространственное разрешение, даваемое этой обскурой, было недостаточным (180 мкм).

К сожалению, попытка экспериментального применения обскуры с диаметром 25–30 мкм (которая наиболее адекватна для геометрии плазмы исследуемого разряда и позволила бы получить лучшее пространственное разрешение) не была успешной ввиду недостаточной чувствительности системы диагностики при таком диаметре обскуры и слабом сигнале МРИ от плазменного источника на установке КИНГ. Решением проблемы получения высокого пространственного разрешения одновременно с высокой светосилой системы регистрации стало использование КА.

Полученные восстановленные изображения ярких точек (при размере пикселя на этих изображениях порядка 10 мкм) (рис. 2e) позволяют сделать вывод о том, что применяемая КА может давать пространственное разрешение, сравнимое с расчетным разрешением, которое могла бы обеспечить обскура диаметром 25–30 мкм. При этом расчеты показывают, что светосила КА превышала бы светосилу такой обскуры на 2–3 порядка.

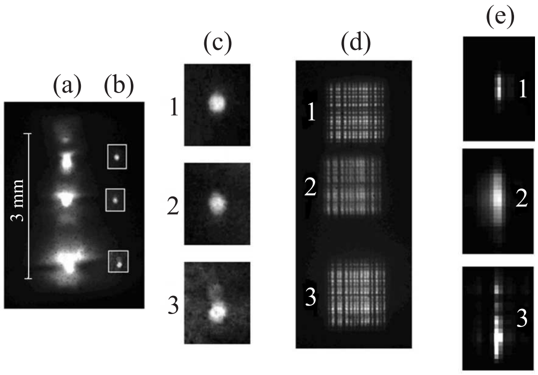

Рис. 3. Обскурограмма источников излучения гибридного Х-пинча с Cu проволочкой (выстрел 230601), зарегистрированного открытой (a) и перекрытой Be фильтром (b) обскурами; увеличенные изображения ярких точек из рис. 3b (c); тенеграмма кодированного изображения излучающих областей Х-пинча, зарегистрированная с помощью КА (d); восстановленные из тенеграммы (d) изображения излучающих МРИ областей плазмы (e)

На рисунке 3 приведены обскурограммы излучающей области гибридного Х-пинча с медной проволочкой, полученные с помощью обскуры без фильтра (рис. 3a) и с Be фильтром (рис. 3b). В данном выстреле обскура с фильтром зарегистрировала три раздельных источника излучения, расположенные на расстоянии примерно 500–700 мкм друг от друга. Структура каждой яркой точки видна на восстановленном изображении (рис. 3e), полученном из тенеграммы кодированного изображения (рис. 3d).

На осциллограмме (рис. 4) видны три интенсивных импульса, соответствующие трем зафиксированным на рис. 3 ярким точкам. Было установлено, что импульс 1 соответствует точке 1 с рис. 3c. Такой вывод можно сделать, поскольку восстановленная точка 1 (рис. 3e) состоит из двух очень близкорасположенных точек малого размера (примерно по 10 мкм каждая и расстояние между ними также примерно 10 мкм) и при этом импульс 1 с детекторов излучения тоже двойной. Разница во времени между пиками этого двойного импульса примерно 1.5 нс, поэтому эти пики плохо разрешены во времени. Отметим при этом, что обскурой регистрируются одна яркая точка. Восстановленная яркая точка 2 (рис. 3e) имеет большой размер и высокую интенсивность излучения, поэтому можно считать, что ей соответствует импульс излучения 2. Яркая точка 3 на обскурограмме (рис. 3c) и восстановленная точка 3 (рис. 3e) состоит из двух (возможно, даже трех) точек разной интенсивности, и поэтому ее можно соотнести двойному импульсу излучения 3 на осциллограмме.

В гибридном Х-пинче с Al проволочками (рис. 5) интенсивность и жесткость излучения ярких точек настолько мала, что изображения через обскуру с фильтром не было зарегистрировано. При этом с помощью КА были получены отчетливые пригодные для математического восстановления теневые кодированные изображения (рис. 5b). В результате была восстановлена картина, содержащая три яркие излучающие точки (рис. 5c).

Приведенные выше исследования излучения плазмы касались гибридных Х-пичей. Вместе с тем эта методика с применением КА была успешно реализована для стандартных Х-пинчей. Так, на рисунке 6a, b представлена обскурограмма стандартного Х-пинча из 4-х Cu проволочек в качестве нагрузки. На зарегистрированных в данном выстреле обскурограммах невозможно различить количество ярких точек, образующихся в перекрестии Х-пинча. Однако данный вопрос позволяет прояснить описанная выше методика, основанная на восстановлении изображения, полученного через КА. Восстановленное изображение (рис. 6e) показывает, что в перекрестии Х-пинча сформировалась одна яркая точка большого размера и слабая точка на расстоянии примерно 30–40 мкм в поперечном направлении, что подтверждает наши предыдущие исследования стандартных Х-пинчей на генераторе КИНГ [5].

Заключение. В экспериментах с электроразрядной пинчевой плазмой применена кодирующая апертура нового типа, разработанная с использованием генератора случайных чисел, для улучшения чувствительности и разрешающей способности детектирования получаемых изображений плазмы. Кодирующая апертура применялась в комплексе с двумя обскурами и алмазными фотодетекторами для исследования источников излучения в гибридных и стандартных Х-пинчах. Применен разработанный ранее итерационный метод восстановления изображений плазменных источников излучения для таких кодирующих апертур и доказана его работоспособность в экспериментах с электроразрядной плазмой. По-

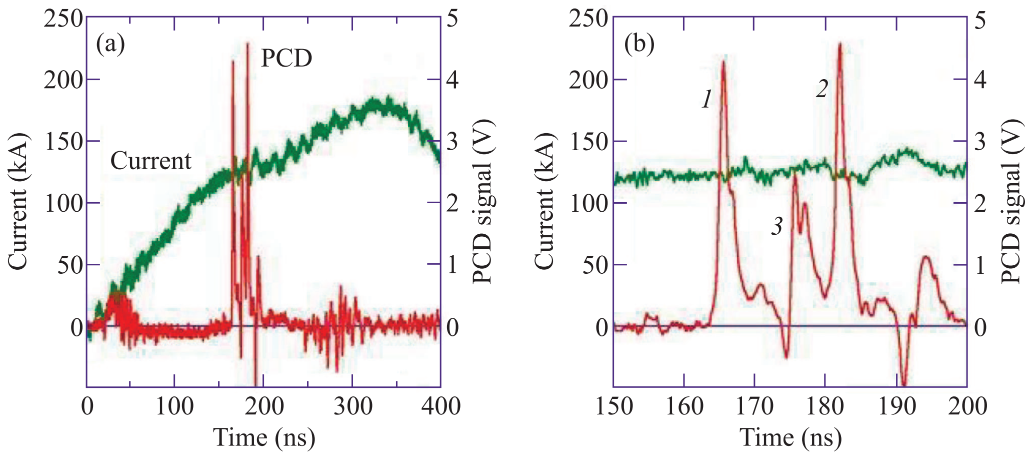

Рис. 4. (Цветной онлайн) Осциллограммы тока разряда и сигнала с алмазного фотодетектора, зарегистрированные в гибридном Х-пинче с Cu проволочкой (a) и увеличенный фрагмент этих осциллограмм (b) для выстрела 230601, для которого изображения источников излучения приведены на рис. 3

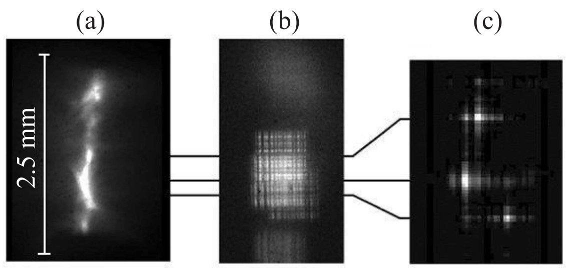

Рис. 5. Обскурограмма излучающей области гибридного Х-пинча с Al проволочкой (выстрел 230530), зарегистрированная с помощью обскуры без фильтра (a); теневое кодированное изображение центральной части излучающей области гибридного пинча (b); истинное изображение, восстановленное по теневому кодированному изображению (c)

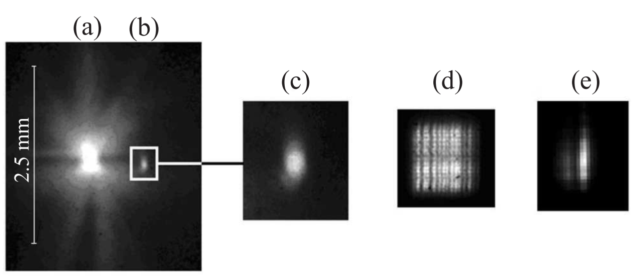

Рис. 6. Обскурограммы излучающей области стандартного Х-пинча из 4-х медных проволочек в двух каналах – открытом (a) и с Be фильтром (b); увеличенные изображения яркой точки (c); теневое кодированное изображение яркой точки этого гибридного пинча (d); истинное изображение, восстановленное по теневому кодированному изображению (e)

лучены восстановленные изображения как близких к точечным, так и протяженных источников, которые для пинчевой плазмы оказались состоящими из нескольких точечных источников.

Экспериментальные исследования и расчеты показали, что светосила КА значительно (в 18 раз) превышает светосилу применявшихся обскур с диаметром 130 мкм. Установлено, что пространственное разрешение КА оказалось значительно выше, чем пространственное разрешение этих обскур, что вместе с высокой светосилой КА позволило разрешить отдельные, даже близко расположенные яркие точки в тех случаях, когда обскуры не позволяли это сделать.

Дополнительные диагностики (обскурография и рентгеновское фотодетектирование), применяемые в данных экспериментах, позволили показать, что проведенные расчеты по восстановлению пространственной структуры источников излучения, исследуемых посредством КА, согласуются с результатами, полученными с помощью обскур и фотодетекторов, так что предложенная КА нового типа является подходящим инструментом для исследований плазмы пинчевого разряда.

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. S. R. Gottesman and E. J. Schneid, IEEE Trans. Nucl. Sci. **33**(1), 745 (1986).

2. A. Iltis, Z. Hmissi, A. Kologrivov, A. Rupasov, E. Bolkhovitinov, V. Potapov, and O. Ivanov, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **1049**, 168121 (2023).
3. С. А. Пикуз, Т. А. Шелковенко, Д. А. Хаммер, Физика плазмы **41**(4), 319 (2015).
4. Т. А. Шелковенко, И. Н. Тиликин, Г. В. Иваненков, В. Степниевски, А. Р. Мингалеев, В. М. Романова, А. И. Агафонов, А. Д. Кахилл, К. Л. Хойт, П. А. Гордан, Д. А. Хаммер, С. А. Пикуз, Физика плазмы **41**(1), 54 (2015).
5. Т. А. Шелковенко, С. А. Пикуз, Д. А. Хаммер, Физика плазмы **42**(3), 234 (2016).
6. M. Z. Tarasko, Preprint FEI-156, Leypunsky Institute for Physics and Power Engineering, Obninsk, Russia (1969) [in Russian].
7. W. H. Richardson, J. Opt. Soc. Am. **62**, 55 (1972).
8. L. B. Lucy, Astron. Journ. **79**, 745 (1974).