

КОМПАКТНАЯ ДИФФУЗИОННАЯ КАМЕРА В КАЧЕСТВЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2019 г. А. Н. Долгов^а, Н. А. Клячин^{б,*}, Д. Е. Прохорович^{а,б}

^а *Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова
Россия, 127055, Москва, ул. Суцневская, 22*

^б *Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31*

**e-mail: NAKlyachin@mephi.ru*

Поступила в редакцию 26.07.2018 г.

После доработки 26.07.2018 г.

Принята к публикации 13.09.2018 г.

Продемонстрировано, что компактная диффузионная камера является эффективным детектором рентгеновского излучения в спектральном диапазоне 0.17–0.20 нм. Камера обладает достаточно высокими пространственным разрешением и чувствительностью для исследования особенностей линейчатого спектра рентгеновского излучения короткоживущей плотной высокотемпературной плазмы методами дифракционной спектроскопии.

DOI: 10.1134/S003281621902006X

ВВЕДЕНИЕ

Выбор диагностических средств, используемых в физическом эксперименте, определяется компромиссом между качеством и объемом информации и затратами на ее получение. Высокая информативность является отличительной чертой трековых детекторов [1, 2]. Физическая основа действия конденсационной камеры в качестве трекового детектора (камера Вильсона, диффузионная и конвекционная камера) — конденсация пересыщенных паров жидкости на ионах, образованных заряженной частицей при ее торможении в газообразном веществе.

Существует две разновидности конденсационных камер, отличающихся способом получения пересыщенного пара. В камере Вильсона состояние пересыщения паров жидкости обеспечивается адиабатическим расширением смеси газа и насыщенного пара [3]. При этом условия, необходимые для формирования треков, сохраняются в течение 0.1–1 с после фазы расширения. Затем следует гораздо более продолжительное “мертвое время”, в течение которого камеру готовят к новому рабочему циклу.

Камера Вильсона обладает рядом недостатков, ограничивающих возможности метода: сложностью конструкции, большим временем нечувствительности после фазы расширения, чувствительностью к загрязнению незаряженными цен-

трами конденсации. Последнее обстоятельство существенно усложняет наладку и эксплуатацию камеры с расширением. Продолжительное “мертвое время” затрудняет использование камеры Вильсона совместно с импульсными источниками ионизирующего излучения.

Потребности в приборе, свободном от недостатков, свойственных камере Вильсона, обусловили поиск методов создания состояния пересыщения, отличающихся от адиабатического расширения. Наиболее просто проблема создания и поддержания пересыщения в парогазовой смеси решается в диффузионной камере — одной из разновидностей конденсационных камер непрерывного действия. В диффузионной камере пересыщение паров жидкости возникает в процессе переноса (диффузии) пара в газе, в котором создан достаточно значительный градиент температуры [4–6].

Малогобаритная диффузионная камера может оказаться очень удобным детектором ионизирующего излучения, в первую очередь рентгеновского излучения, для диагностики высокотемпературной плазмы. Такой способ регистрации излучения не связан с электронным преобразованием сигнала, нечувствителен к электромагнитным помехам, и поэтому обеспечивает надежность и достоверность регистрации излучения.

Целью настоящей работы было использование трекового детектора данного типа, характеризую-

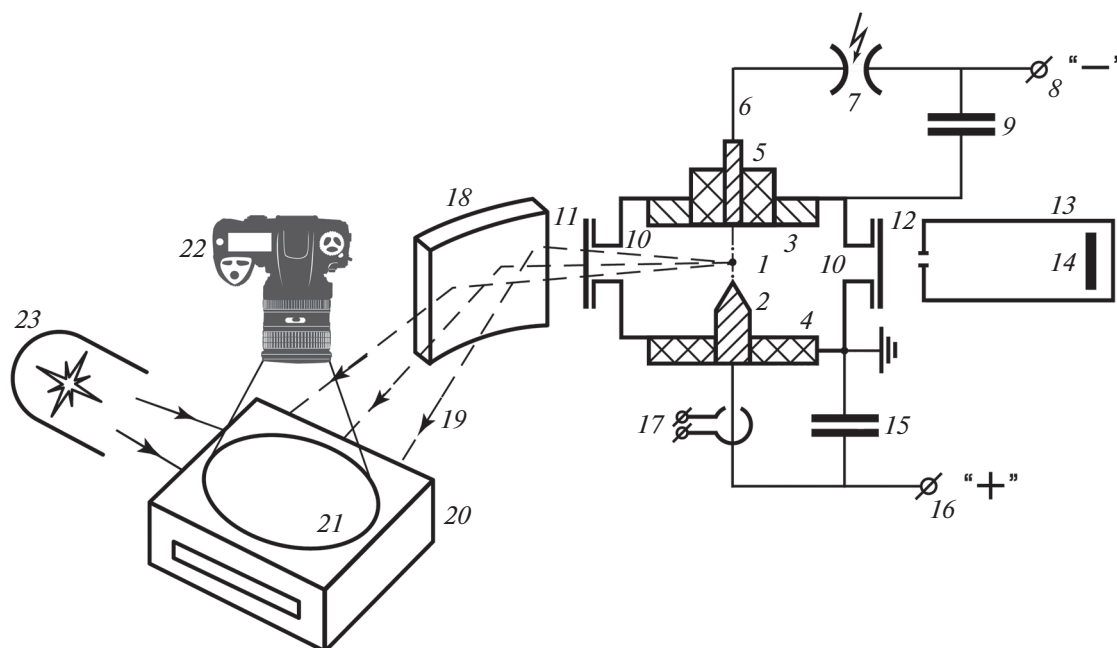


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 – микропинч; 2 – анод; 3 – катод; 4 – изолятор; 5 – фторпластовая втулка; 6 – поджигающий электрод; 7 – управляемый разрядник в цепи инициирования вакуумной искры; 8 – источник высокого напряжения в цепи инициирования; 9 – конденсатор в цепи инициирования; 10 – вакуумная камера; 11 и 12 – бериллиевые фильтры; 13 – камера-обскура; 14 – рентгеновская фотопленка; 15 – батарея низкоиндуктивных конденсаторов в цепи вакуумной искры; 16 – источник высокого напряжения в цепи вакуумной искры; 17 – магнитный зонд (пояс Роговского в режиме трансформатора тока); 18 – кристаллический анализатор рентгеновского излучения; 19 – диспергированное рентгеновское излучение; 20 – диффузионная камера; 21 – стеклянное окно диффузионной камеры; 22 – фотоаппарат; 23 – импульсная лампа.

щегося высокой чувствительностью, для исследования спектра рентгеновского излучения так называемого микропинчового разряда – Z-пинча в среде тяжелых элементов.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились с сильноточной вакуумной искрой, характерной особенностью которой является возможность формирования локальных (размером менее 0.1 мм) областей горячей, $T_e \approx 1$ кэВ, плотной, $n_e \approx 10^{22}$ см⁻³, плазмы, интенсивно излучающей в мягком рентгеновском диапазоне спектра. Указанные области – микропинчи – формируются в результате развития процесса обжатия плазменного канала тока собственным магнитным полем в условиях высокого уровня лучистых потерь энергии [7, 8]. В литературе эти области часто называют “плазменными точками” (п.т.).

Искровой разряд осуществлялся в вакуумной камере, откачанной до 10^{-5} – 10^{-4} Торр, в продуктах эрозии электродов разрядного устройства. Электроды – конический анод и плоский катод (рис. 1) – были изготовлены из стали марки Ст3. Таким образом, основным элементом, присутствующим в плазме разряда, было железо.

Угол раствора конической поверхности анода составлял изначально 60° – 90° , диаметр основания конуса – 4 мм. Диаметр обращенной к аноду плоской поверхности катода равен 20 мм. Расстояние между электродами составляло в ходе экспериментов 5–7 мм.

Разряд инициировался слаботочным пробоем по поверхности диэлектрика (материал – фторопласт), встроенного в катод, что вызывало инжекцию форплазмы с поверхности катода по оси симметрии системы в межэлектродное пространство. Описанная система инициирования разряда была призвана повысить вероятность успешного развития процесса пинчевания токового канала в разряде вплоть до образования яркого, практически точечного источника излучения плазмы железа в спектральном диапазоне K_α – K_β .

Достижимый в разряде ток составлял 120 кА при времени нарастания тока 1 мкс. Контроль режима разряда осуществлялся с помощью магнитного зонда, регистрировавшего производную тока в разряде. Показателем успешного развития процесса пинчевания являлось наличие особенности на осциллограмме сигнала с магнитного зонда [9] – резкого всплеска сигнала примерно в районе максимума тока.

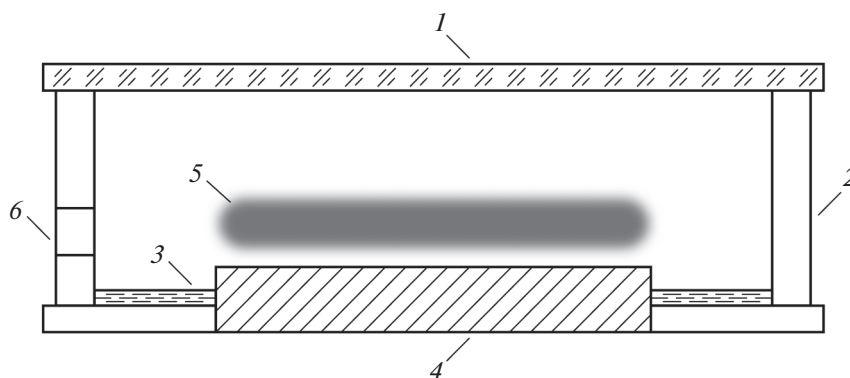


Рис. 2. Конструкция диффузионной камеры. 1 – стеклянное окно (крышка); 2 – боковая диэлектрическая стенка; 3 – испаритель; 4 – охлаждаемое дно; 5 – чувствительный слой; 6 – входное окно для ионизирующего излучения.

Предварительно выполненное обскурографирование плазмы разряда показало следующее. Во-первых, в спектральном диапазоне $\lambda < 0.4$ нм наиболее ярким источником излучения является микропинч, во-вторых, в условиях проводимого эксперимента сжатие плазмы разряда собственным магнитным полем приводит к формированию микропинча с вероятностью около 90–95%.

Обскурография осуществлялась путем выведения рентгеновского излучения за пределы вакуумной камеры через вакуумно-плотное бериллиевое окно толщиной 100 мкм. Изображение формировалось отверстием диаметром 0.2 мм, выполненным в свинцовой диафрагме толщиной также 0.2 мм. В качестве детектора была использована медицинская рентгеновская фотопленка.

Регистрация рентгеновского излучения в эксперименте осуществлялась с помощью компактной диффузионной камеры (рис. 2) следующей конструкции. Вертикальные стенки камеры выполнены из диэлектрического материала, обладающего низкой теплопроводностью, горизонтальное стеклянное окно (крышка) и массивное металлическое дно снабжены каналами для транспортировки хладагента.

В периферийной части дна камеры расположен испаритель – ткань, пропитанная рабочей жидкостью при температуре, близкой к комнатной. Температура дна камеры примерно на 80°C ниже температуры крышки и стенок камеры, что обеспечивается присутствием хладагента – сжиженного азота.

Рабочая среда детектора – смесь воздуха при атмосферном давлении и паров этилового спирта. Насыщенные пары спирта диффундируют в область низких температур и постепенно становятся все более пересыщенными. В результате вблизи дна формируется горизонтальный чувствительный слой парогазовой смеси – область диаметром 100 мм и толщиной примерно 3 мм – с

пересыщением, достаточным для конденсации пара на ионах.

Прошедшая через чувствительный слой заряженная частица оставляет на своем пути цепочку центров конденсации – ионов, на которых вырастают капли размером до 30 мкм за время порядка 300 мс. Заряженными частицами в нашем случае являются вторичные электроны, рождающиеся при прохождении квантов рентгеновского излучения через парогазовую смесь. Под действием силы тяжести капли сконденсировавшейся жидкости, образующие трек, падают на дно камеры за время порядка 0.5 с [4].

На рис. 3 и рис. 4 приведены зависимости эффективности регистрации рентгеновских квантов и пробега вторичных электронов от энергии квантов. Рисунки наглядно демонстрируют высокую эффективность регистрации для квантов с энергиями до нескольких килоэлектронвольт, при этом пространственное разрешение, определяемое пробегом вторичных электронов, составляет доли миллиметра. Диапазон линейности отклика детектора на количество пронизывающих рабочий объем камеры квантов рентгеновского излучения составляет 10^0 – 10^5 квантов/см² [4].

Для изучения спектрального состава рентгеновского излучения разряда в области *K*-спектра железа в диапазоне 0.17–0.20 нм использовался фокусирующий спектрограф по схеме Иоганна на кристалле LiF ($2d = 0.4026$ нм) с радиусом изгиба 300 мм и дисперсией $\sim 10^{-3}$ нм/мм. Пучок излучения плазмы, прошедший через бериллиевое окно в стенке вакуумной камеры разрядного устройства, направлялся в чувствительный слой диффузионной камеры после отражения от диспергирующего кристалла.

Диффузионная камера располагалась таким образом, чтобы круг Роуланда проходил внутри ее рабочего объема в плоскости чувствительного слоя. Входное окно в стенке диффузионной каме-

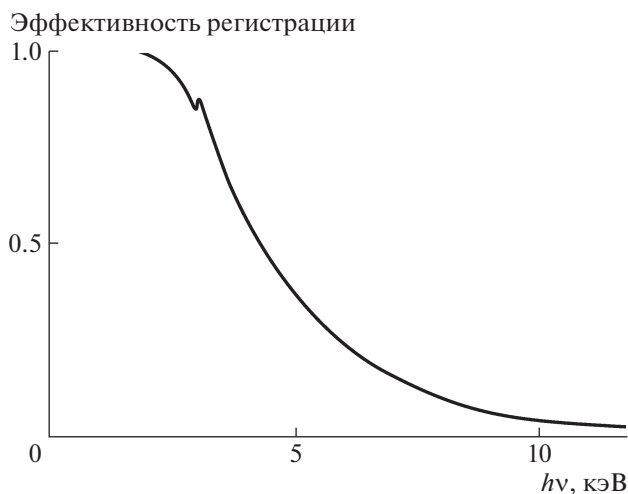


Рис. 3. График зависимости эффективности регистрации квантов рентгеновского излучения от энергии квантов.

ры, предназначенное для транспортировки регистрируемого излучения и имеющее ширину 50 мм (по горизонтали, т.е. в направлении дисперсии) и высоту 20 мм, закрывалось пленкой лавсана толщиной 12 мкм. Треки освещались импульсной лампой с временем свечения 1 мс и задержкой относительно момента разряда 300 мс и фиксировались фотоаппаратом. В дальнейшем при обработке снимков осуществлялось их фотометрирование.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Компактная диффузионная камера показала себя эффективным детектором рентгеновского излучения в спектральном диапазоне 0.17–0.20 нм, обладающим достаточно высоким пространственным разрешением для исследования особенностей линейчатого спектра рентгеновского излучения плотной высокотемпературной плазмы методами дифракционной спектроскопии (рис. 5 и 6).

Благодаря высокой чувствительности используемого детектора в единичном разряде удалось в виде отдельных линий в спектре зарегистрировать характеристическое излучение K_{α} и K_{β} железа и излучение многозарядных ионов FeXVIII–FeXXV.

Излучение водородоподобного иона железа FeXXVI, вероятно, в силу малости сигнала на фоне тормозного излучения высокотемпературной плазмы зарегистрировать не удалось. Линии излучения низкозарядных ионов сливались и не были различимы. Причина данного обстоятельства — значительное ударное уширение контуров линий в плазме высокой плотности.

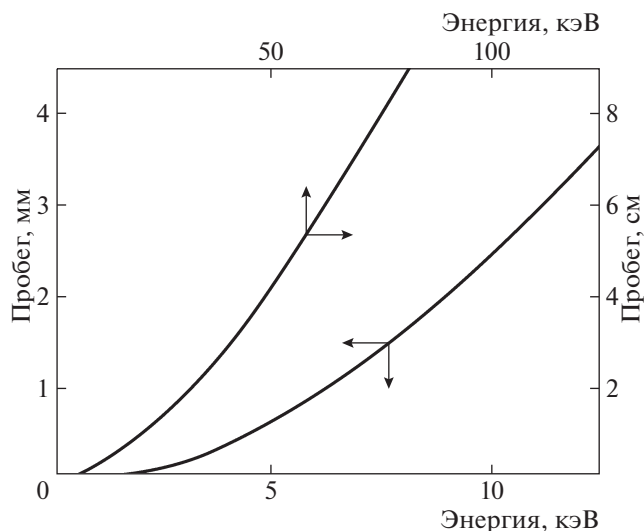


Рис. 4. Зависимости длины пробега вторичных электронов от энергии кванта рентгеновского излучения для разных масштабов энергии квантов.

Идентификация наблюдаемых в спектре линий характеристического излучения и линий излучения многозарядных ионов осуществлялась путем сравнения денситограмм зарегистрированных нами спектров с денситограммами спектров излучения микропинчевых разрядов в плазме железа, приводимых в научной литературе авторами, качество работ которых не вызывает сомнений [10–12].

Удалось зафиксировать регулярное смещение от среднего положения, определяемого по положению пиков, соответствующих K_{α} и K_{β} , линий

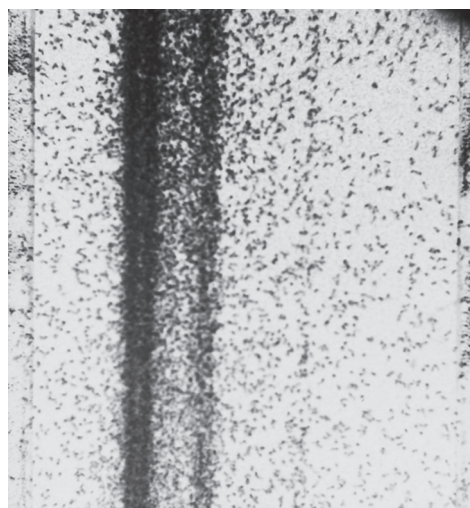


Рис. 5. Фотография регистрируемой в диффузионной камере картины треков.

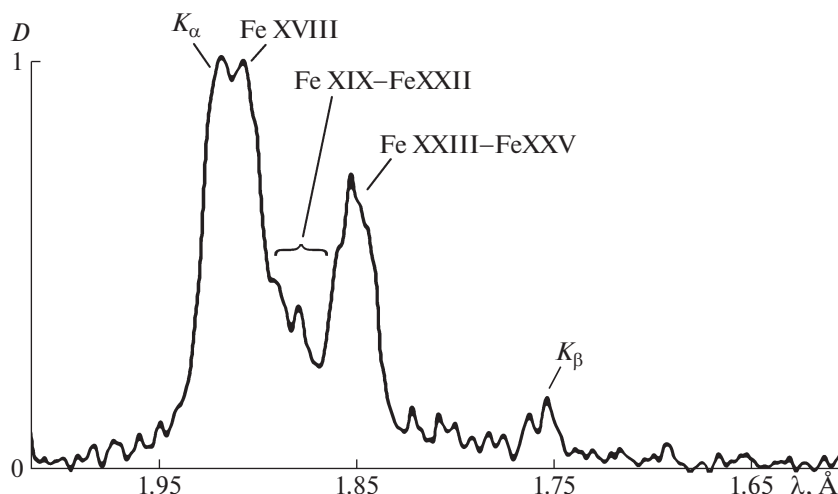


Рис. 6. Фотометрическая пропись изображения, полученного в рабочем объеме камеры, — денситограмма характеристического спектра излучения плазмы железа. D — плотность почернения фотопленки (негатив).

излучения ионов FeXXIII–FeXXV. Величина смещения составила примерно $(2-3) \cdot 10^{-4}$ нм.

Возможность регистрации спектра в единичном разряде позволила обнаружить следующую закономерность. Появление в разряде “плазменных точек”, регистрируемых по изображениям на рентгеновских обскурорамах, во всех без исключения случаях сопровождается регистрацией в спектре излучения линий K_{α} и линий излучения иона FeXXIII.

В то же время появление линий K_{α} и излучения иона FeXVIII не всегда сопровождается появлением в спектре излучения ионов высокой кратности FeXXIII–FeXXV, что ранее считалось признаком реализации радиационного сжатия, продуктом которого и являются “плазменные точки” [9].

Полученные экспериментальные данные позволяют выдвинуть гипотезу о существовании механизма распада микропинча, отличающегося от ранее предложенного и обычно принимаемого во внимание перегревного механизма [7].

Таким образом, на практике показаны достоинства использования компактной диффузионной камеры как детектора рентгеновского излучения в экспериментах по исследованию высокотемпературной плазмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ишиханов Б.С., Капитонов И.М., Кэбин Э.И. Частицы и ядра. М.: Изд-во Либроком, 2013.
2. Полухина Н.Г. // УФН. 2012. Т. 182. № 6. С. 656.
3. Ляпидевский В.К. // УФН. 1958. Т. 66. № 1. С. 111.
4. Веретенников В.А., Клячин Н.А., Крохин О.Н., Ляпидевский В.К., Семенов О.Г. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 8. С. 993.
5. Клячин Н.А., Ляпидевский В.К., Максимов В.Ю. // ПТЭ. 1991. № 2. С. 77.
6. Калашиников Н.П., Клячин Н.А., Повалев О.А., Хоменко С.В. // Физическое образование в вузах. 2011. Т. 17. № 3. С. 42.
7. Вихрев В.В., Иванов В.В., Кошелев К.Н. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. № 6. С. 1211.
8. Блинников С.И., Имшенник В.С. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. С. 193.
9. Веретенников В.А., Грибков В.А., Кононов Э.Я., Семенов О.Г., Сидельников Ю.В. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. № 2. С. 455.
10. Гольц Э.Я., Житник И.А., Кононов Э.Я., Мандельштам С.Л., Сидельников Ю.В. // ДАН СССР. 1975. Т. 22. Вып. 3. С. 560.
11. Кононов Э.Я., Кошелев К.Н., Сидельников Ю.В. // Физика плазмы. 1977. Т. 3. С. 663.
12. Burkhalter P.G., Dozier C.M., Stalling C., Cowan R.D. // J. Appl. Phys. 1978. V. 49. P. 1092.