

04;07;12

©1993 г.

СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

*В.А.Болотин, В.В.Гаврилов, А.Ю.Гольцов, М.О.Кошевой,
А.А.Рупасов, А.С.Шиканов*

Для исследования мягкого рентгеновского излучения лазерной плазмы со спектрально-временным разрешением создан спектрограф на основе комбинации рентгеновской пропускающей решетки и электронно-оптической камеры. Разработана методика обработки экспериментальных данных. Сообщается о результатах эволюции рентгеновской эмиссии плазмы, образующейся при взаимодействии мощного лазерного излучения с тонкими медными мишенями ограниченного размера.

Введение

Мощные лазерно-плазменные источники рентгеновского излучения представляют большой интерес для целого ряда задач научного и прикладного характера. Широкое развитие в настоящее время получили работы по созданию источников когерентного рентгеновского излучения на основе лазерной плазмы [1-4], перспективных, в частности, для применения в биологических исследованиях. Предпринимаются попытки использования некогерентного рентгеновского излучения лазерной плазмы в микролитографии [5]. В экспериментах по программе лазерного термоядерного синтеза изучению рентгеновской эмиссии плазмы традиционно уделяется большое внимание как в связи с тем, что радиационный перенос энергии играет большую роль в различных вариантах облучения мишеней (особенно в схемах с так называемым "непрямым облучением"), так и ввиду высокой степени информативности рентгеновского излучения и, следовательно, возможности его использования для измерения параметров плазмы и изучения протекающих в ней процессов. Несмотря на то что уже накоплен достаточно обширный экспериментальный и теоретический материал по конверсионной эффективности в широком диапазоне изменения условий облучения, конструкции и материала мишеней (см., например, работы [6-11], составляющие лишь малую часть публикаций по этой тематике), ряд принципиальных физических вопросов еще требует дальнейшего изучения. Например, недостаточно исследован процесс формирования так называемой переизлучающей зоны [11],

расположенной между высокотемпературной плазменной короной, в которой происходит поглощение лазерного излучения, и холодной частью мишени. Состояние вещества в переизлучающей зоне характеризуется температурой $10^5 - 10^6$ К и электронной плотностью $10^{21} - 10^{22}$ см $^{-3}$, время существования этой зоны порядка длительности греющего лазерного импульса, а спектр излучения из нее формируется в результате многократного поглощения и переизлучения фотонов, приближаясь к спектру черного тела. Исходя из вышесказанного, ясно, что для диагностики процессов, протекающих в переизлучающей зоне, необходима спектроанализирующая аппаратура, работающая в диапазоне мягкого рентгеновского излучения и обладающая высоким временным разрешением. Описание прибора, удовлетворяющего этим требованиям, а также некоторых экспериментальных результатов, полученных с его помощью при лазерном облучении тонких мишеней, и составляет содержание настоящей работы.

Описание установки и диагностической аппаратуры

Эксперименты проводились на установке с неодимовым лазером ("Мишень"), подробно описанной в работе [12]. Лазерная схема установки включает в себя два канала, на выходе которых формируются лазерные пучки со следующими параметрами основного пучка: энергия излучения в импульсе длительностью ~ 3 нс составляет 100–200 Дж, $\lambda = 1.054$ мкм, расходимость $2 \cdot 10^{-4}$ рад, контраст $\sim 10^{-6}$, плотность мощности излучения на поверхности мишени — $\sim 10^{13} - 10^{14}$ Вт/см 2 ; диагностического пучка (создающего вспомогательный плазменный источник рентгеновского излучения): энергия излучения в импульсе длительностью ~ 0.3 нс составляет 10–20 (при $\lambda = 1.054$ мкм) и ~ 10 Дж (при $\lambda = 0.53$ мкм), расходимость $\sim 10^{-4}$ рад, плотность мощности излучения на поверхности мишени $\sim 10^{13} - 10^{14}$ Вт/см 2 .

Основные результаты по исследованию рентгеновской эмиссии плазмы в спектральном диапазоне 10–100 Å, изложенные в настоящей работе, получены с помощью пропускающей рентгеновской дифракционной решетки из золота размером 1×0.1 мм с периодом 1 мкм и отношением ширины зазора к периоду, равным 1/3 (такая же решетка использовалась в работе [13]). Для исследования спектрального распределения мягкого рентгеновского излучения лазерной плазмы с временным разрешением нами был применен спектрограф на основе комбинации этой пропускающей решетки и рентгеновской электронно-оптической камеры (РЭОК) с временным разрешением 20 пс. Прибор регистрировал излучение, выходящее из плазмы под углом 45° относительно нормали к мишени. Условия эксперимента позволили реализовать спектральное разрешение ~ 3 Å. Принцип работы и характерные особенности спектрографов такого типа описаны в работах [14–16] (в том числе в комбинациях с РЭОК [15]).

Описанная выше решетка, а также решетки из вольфрама диаметром 25 мкм с периодом штрихов 1 мкм и отношением ширины зазора к периоду 1/2 использовались и для интегральных по времени измерений с фотоупленкой УФ-ШС или МКП в качестве регистраторов. При этом в случае использования решеток с круглой апертурой обеспечивалось пространственное разрешение в направлении, перпендикулярном дисперсии.

В состав рентгеновского диагностического комплекса установки "Мишень" также входят термопарные калориметры, камеры-обскуры, снаб-

женные щелями спектрографы с плоскими и изогнутыми кристаллами, вакуумные рентгеновские диоды. РЭОК используется и с наборами щелевых диафрагм, фильтров, плоских кристаллов, что позволяет реализовать пространственно-временное разрешение или регистрировать временной ход интенсивности линейчатого излучения многозарядных ионов.

Процедура восстановления спектрального распределения интенсивности рентгеновского излучения

Как известно, при регистрации излучения спектрографом с пропускающей дифракционной решеткой происходит переналожение излучения в различных порядках дифракции, что приводит к существенному искажению вида спектрограммы. Для получения истинного спектра необходима специальная математическая обработка экспериментальных данных.

В общем случае суть процедуры восстановления спектрального распределения излучения заключается в решении системы, полученной из линейного интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода $FX = Y$, где F — интегральный оператор (либо система уравнений), X — искомого спектрального распределения интенсивности, Y — экспериментальные данные. Как известно, уравнение Фредгольма 1-го рода с неточно заданной правой частью относится к классу некорректно поставленных задач. Для решения задачи восстановления спектрального распределения интенсивности рентгеновского излучения плазмы нами был реализован метод, основанный на применении прямого и обратного преобразований Фурье с использованием принципа решения некорректных задач такого типа, описанного, например, в работе [17]. Следует отметить, что при решении описываемой задачи учитывались спектральная чувствительность фотокатода (по данным работы [18]) и характеристическая кривая фотопленки, используемой на выходе РЭОК.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В экспериментах нами в основном использовались мишени, изготовленные следующим образом: на лавсановые подложки толщиной 2 мкм напылялись слой меди толщиной 0.025–0.8 мкм и диаметром 300, 500 мкм и 3 мм (диаметр фокального пятна составлял ~ 250 мкм). Такие мишени представляют интерес для возможного применения их в качестве конверторов лазерного излучения в рентгеновское, эмиттируемое приблизительно равномерно в угол 4π . Мишени облучались со стороны напыления. Облучались также мишени в виде плоских фольг из других материалов.

На рис. 1 в качестве примера приведены зарегистрированная при помощи пропускающей решетки с круглой апертурой интегральная по времени спектрограмма излучения плазмы, образовавшейся при взаимодействии лазерного излучения с медной мишенью, и соответствующая денситограмма этого спектра. Спектрограмма с временным разрешением приведена на рис. 2 совместно с распределениями почернения для двух моментов времени 0.5 и 2.0 нс от начала лазерного импульса. В дальнейшем подобные экспериментальные данные проходили описанную выше процедуру математической обработки. В результате были получены данные о временной эволюции спектральных распределений мягкого рентгеновского излучения плазмы, образующейся при облучении мишеней из алюминия, свинца и других материалов.

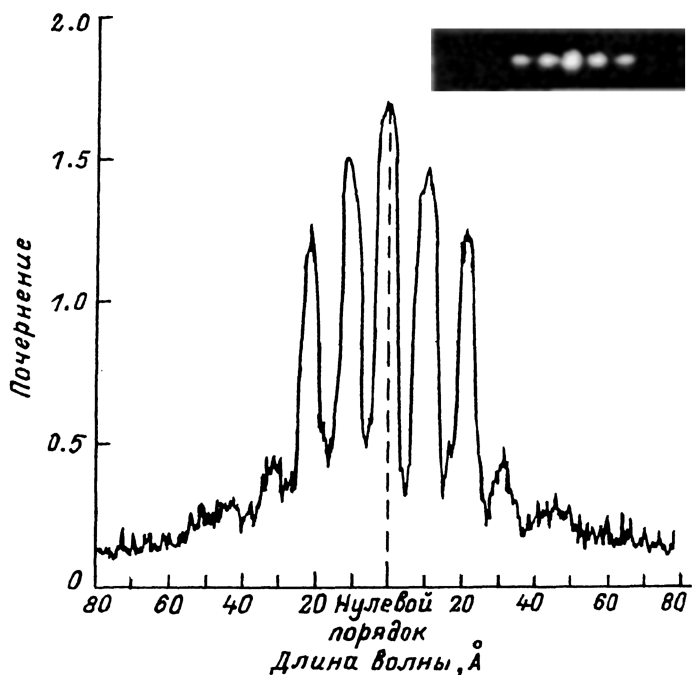


Рис. 1. Интегральная по времени спектрограмма свечения плазмы, полученная при помощи пропускающей дифракционной решетки с круглой апертурой при взаимодействии лазерного излучения с медной мишенью, и соответствующая ей денситограмма.

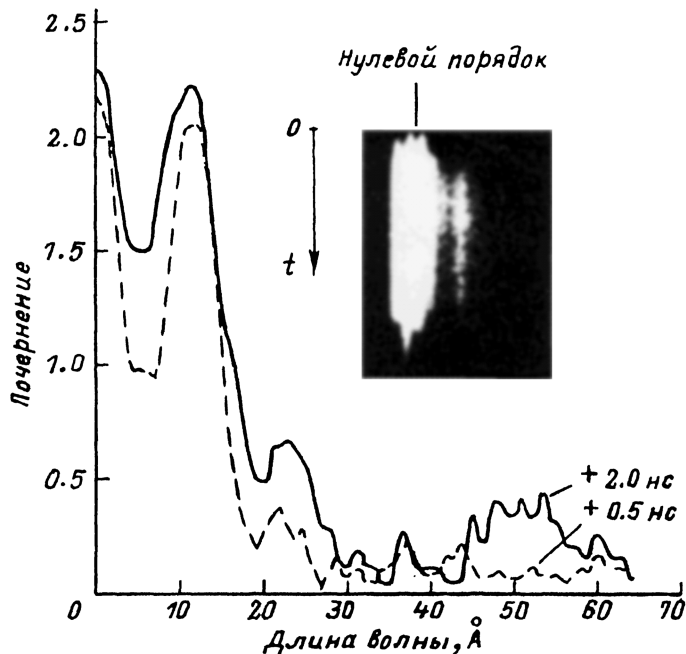


Рис. 2. Временная развертка свечения медной плазмы, зарегистрированная при помощи пропускающей дифракционной решетки и рентгеновской электронно-оптической камеры, а также соответствующие ей денситограммы в два момента времени после начала лазерного импульса.

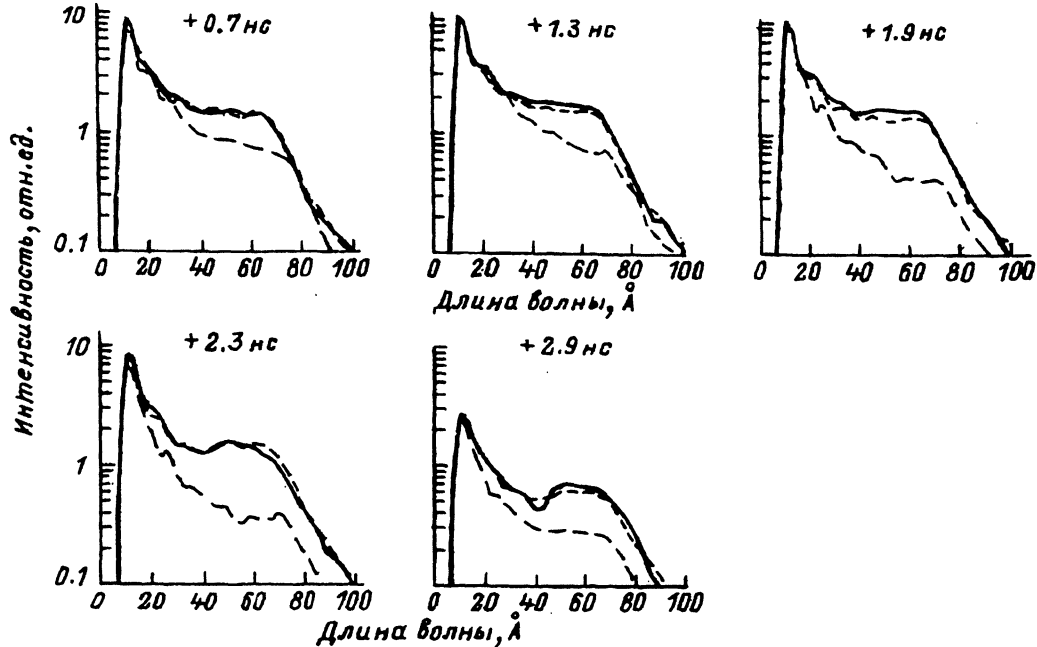


Рис. 3. Эволюция во времени спектральных распределений интенсивности мягкого рентгеновского излучения плазмы, образовавшейся при облучении мишеней с толщинами медного слоя 0.05 (штриховая линия), 0.2 (пунктир) и 0.4 мкм (сплошная линия).

Диаметр медного слоя 300 мкм. Стартовая точка отсчета времени — начало лазерного импульса.

Остановимся более подробно на результатах экспериментов, в которых облучению подвергались слои меди разной толщины. На рис. 3 приведена временная эволюция спектрального распределения интенсивности излучения плазмы при толщинах меди 0.05, 0.2 и 0.4 мкм (диаметр мишеней составлял 300 мкм). Обращает на себя внимание различие временного хода интенсивности излучения в диапазоне длин волн 40–70 Å для мишеней с различной толщиной напыленного слоя: через 1–1.5 нс после начала импульса в этом спектральном диапазоне в случае мишени с толщиной медного слоя 0.2 мкм наблюдается некоторое увеличение интенсивности по сравнению со спектральным распределением интенсивности излучения при толщине слоя 0.05 мкм. В более поздние моменты времени возрастание интенсивности в вышеназванном диапазоне длин волн становится ярко выраженным (как в сравнении с данными для меньшей толщины меди, так и по отношению к близлежащим участкам спектра с меньшей и большей длиной волны). Дальнейшее увеличение толщины мишени не приводит к каким-либо заметным изменениям в характере спектрального распределения интенсивности рентгеновского излучения (заметим, что в работе [19], в которой при облучении слоев золота различной толщины регистрация рентгеновского излучения осуществлялась с помощью пропускающих решеток интегрально по времени, подобный эффект не наблюдался). Так как в более коротковолновой области спектра не наблюдаются какие-либо эффекты, подобные отмеченной выше особенности, то

можно заключить, что последняя не связана непосредственно с процессами, протекающими в высокотемпературной плазменной короне. На наш взгляд, рост интенсивности излучения в диапазоне 40–70 Å в случае относительно толстой мишени следует идентифицировать с эмиссией из переизлучающей зоны с менее нагретой и более плотной плазмой. Время формирования этой зоны, как следует из приведенных экспериментальных данных, в наших условиях составляет 1–1.5 нс. При толщине медного слоя 0.025–0.1 мкм образование такой зоны затруднено вследствие дефицита материала, обусловленного процессом абляции и выносом вещества мишени в плазменную корону. Действительно, при плотности мощного лазерного излучения $5 \cdot 10^{13}$ Вт/см² скорость абляции вещества мишени в наших экспериментах составляет $\sim 10^{-7}$ г/нс [20] и все вещество медного слоя толщиной, например, 0.05 мкм должно поступить в корону и нагреться до температуры порядка 0.5 кэВ за время 0.2–0.3 нс (после начала облучения). При уменьшении плотности мощности следует ожидать и уменьшения толщины слоя, необходимого для формирования переизлучающей зоны.

В наших экспериментах, как уже выше говорилось, наряду с толщиной медного слоя менялся также и диаметр этого слоя. На рис. 4 приведена временная эволюция спектрального распределения интенсивности рентгеновского излучения плазмы при диаметрах медного слоя 300 и 500 мкм (толщина слоя составляла 0.1 мкм). Видно, что увеличение диаметра мишени также приводит к росту интенсивности излучения в спектральном диапазоне 40–70 Å через 1–1.5 нс после начала лазерного импульса. По нашему мнению, это вызвано притоком вещества из периферийных областей мишени, что способствует эффективному формированию переизлучающей зоны.

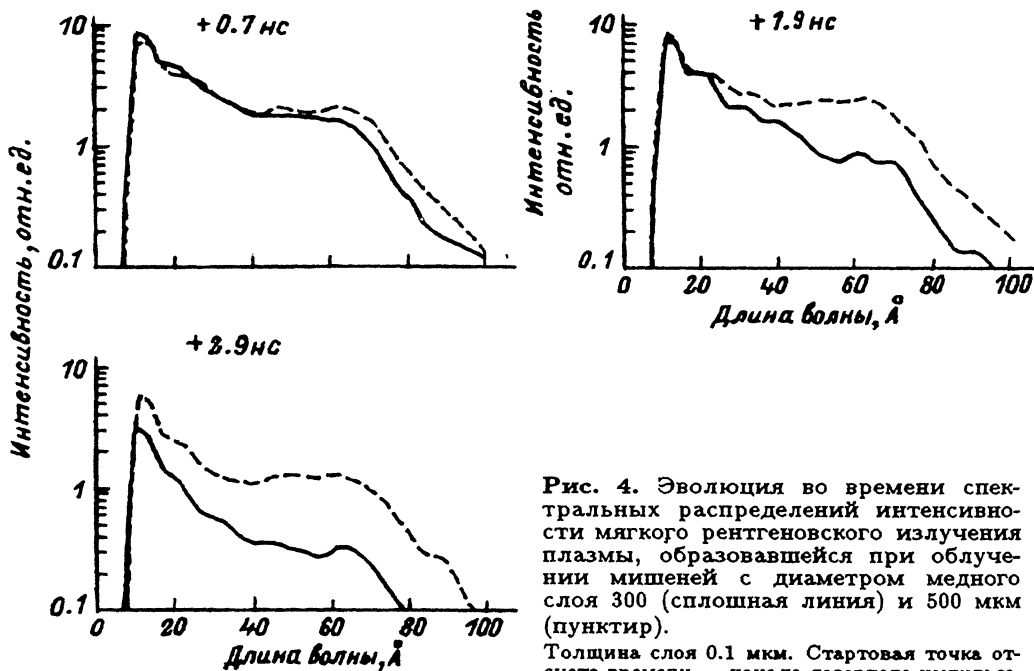


Рис. 4. Эволюция во времени спектральных распределений интенсивности мягкого рентгеновского излучения плазмы, образовавшейся при облучении мишеней с диаметром медного слоя 300 (сплошная линия) и 500 мкм (пунктир).

Толщина слоя 0.1 мкм. Стартовая точка отсчета времени — начало лазерного импульса.

Для регистрации мягкого рентгеновского излучения лазерной плазмы в диапазоне $10\text{--}100 \text{ \AA}$ со спектральным и временным разрешением создан спектрограф на основе пропускающей рентгеновской дифракционной решетки и рентгеновской электронно-оптической камеры. Разработан метод математической обработки экспериментальных данных. С помощью этого прибора произведен спектрально-временной анализ излучения плазмы, образующейся при взаимодействии мощного лазерного излучения ($10^{13}\text{--}10^{14} \text{ Вт/см}^2$) с тонкими медными мишенями. Получены экспериментальные данные о процессе формирования переизлучающей зоны, оказывающей существенное влияние на спектральный состав излучения плазмы и конверсионную эффективность в мягком рентгеновском диапазоне. Показано, что в наших экспериментальных условиях при диаметре мишени, приблизительно равном диаметру фокального пятна, для образования переизлучающей зоны требуется определенная толщина медного слоя (не менее 0.2 мкм), а необходимое для этого время составляет $1\text{--}1.5 \text{ нс}$.

Авторы глубоко признательны М.И.Пергаменту и Н.Г.Ковальскому за постоянный интерес к работе и ее поддержку, И.Н.Бурдонскому, Е.В.Жужукало, С.В.Завяльцу и В.Н.Кондрашову за помощь в проведении экспериментов, С.В.Ильиной за участие в обработке и оформлении экспериментальных результатов, А.С.Скрябину за изготовление мишеней.

Список литературы

- [1] *Jamelot G., Jaegle P., Carillon A. et al.* // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1988. Vol. 16. N 5. P. 497–504.
- [2] *Yaakoby B., Shvarts D., Boehly T. et al.* // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1988. Vol. 16. N 5. P. 505–511.
- [3] *Skinner C.H., Diccico D., Kim D. et al.* // IEEE Trans on Plasma Sci. 1988. Vol. 16. N 5. P. 512–519.
- [4] *Herman P.R., Tachi T., Shihoyama K. et al.* // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1988. Vol. 16. N 5. P. 520–528.
- [5] *Autonomov V.P., Geonjian Yu.G., Orlov A.V. et al.* // Microelectronic Engineering. 1985. Vol. 3. N 3. P. 623–629.
- [6] *Виноградов А.В., Шляпцев В.Н.* // Квантовая электрон. 1987. Т. 14. № 1. С. 5–26.
- [7] *Бурдонский И.Н., Гаврилов В.В., Гольцов А.Ю. и др.* // Физика плазмы. 1987. Т. 13. № 7. С. 819–825.
- [8] *Mallozzi P.J., Epstein H.M., Jung R.G. et al.* // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 46. N 4. P. 1891–1895.
- [9] *Mochizuki T., Yabe T., Okada K. et al.* // Phys. Rev. A. 1986. Vol. 33. N 1. P. 525–538.
- [10] *Eidmann K., Schmaiz R.F., Sigel R.* // Phys. Fluids B. 1980. Vol. 2. N 1. P. 208–217.
- [11] *Sigel R., Eidmann K., Lavarenne F. et al.* // Phys. Fluids B. 1990. Vol. 2. N 1. P. 199–207.
- [12] *Волотин В.А., Бурдонский И.Н., Гольцов А.Ю. и др.* Препринт ИАЭ № 4967/7. М., 1989. 28 с.
- [13] *Aleksandrov Yu.M., Koshevoi M.O., Murashova V.A. et al.* // Lazer and Particle Beams. 1988. Vol. 6. Pt 3. P. 561–567.
- [14] *Eidmann K., Kishimoto T., Herrman R. et al.* // Laser and Particle Beams. 1986. Vol. 4. Pt 3,4. P. 521–536.
- [15] *Ceglio N.M., Kauffman R.L., Hawryluk A.M., Medeski H.* // Appl. Opt. 1983. Vol. 22. N 2. P. 318–327.
- [16] *Pina L., Fiedorovich H., Koshevoi M.O. et al.* // Laser and Particle Beams. 1991. Vol. 9. N 2. P. 379.
- [17] *Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В. и др.* Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М., 1983. 198 с.

- [18] *Henke B.L., Knauer J.P., Premaratne K.* // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. N 3. P. 1509–1520.
- [19] *Celliers P., Eidmann K.* // Phys. Rev. A. 1990. Vol. 41. N 6. P. 3270–3280.
- [20] *Большов Л.А., Бурдонский И.Н., Великович А.Л. и др.* // ЖЭТФ. 1987. Т. 92. Вып. 6. С. 2060–2075.

Троицкий институт инновационных
и термоядерных исследований
Физический институт им.П.Н.Лебедева
Москва

Поступило в Редакцию
27 октября 1992 г.

