

предположить, что это отличие связано с разной колебательно-вращательной структурой молекул H_2 и D_2 при комнатной температуре, не учитываемой в выражении для $K_{теор}$ и приводящей, например, к разным эффективным радиусам молекул H_2 и D_2 .

Список литературы

- [1] Дмитриев С.П., Доватор Н.А. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 7. С. 198-200.
- [2] Доватор Н.А., Дмитриев С.П. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 13. С. 64-68.
- [3] Доватор Н.А., Житников Р.А. // Письма в ЖЭТФ. 1980. Т. 31. Вып. 2. С. 92-96.
- [4] Бэррер Р. Диффузия в твердых телах. М.: ИЛ, 1948. 450 с.
- [5] Hahn E.L. // Phys. Rev. 1950. Vol. 80. P. 580.
- [6] Вашман А.А., Пронин И.С. Ядерная магнитная релаксация и ее применение в химической физике. М.: Наука, 1979. 236 с.
- [7] Доватор Н.А. А.С. № 1709260. БИ. 1992. № 4.
- [8] Mason E.A., Marrero T.P. // Adv. Mol. Phys. 1970. Vol. 6. P. 56.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе

Поступило в Редакцию
21 июля 1993 г.

07;12
© 1994 г.

Журнал технической физики, т. 64, в. 3, 1994

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАПИЛЛЯРНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИНЗЫ ДЛЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.В.Бессараб, М.В.Губарев, А.И.Зарецкий, Н.В.Жидков,
А.И.Коломийцев, М.А.Куматов, А.В.Кукин, Г.Ф.Насыров,
И.Ю.Пономарев, В.Г.Рогачев, Н.Н.Рукавишников, Н.А.Суслов,
С.А.Сухарев, В.А.Токарев

Введение

В настоящее время широко обсуждается возможность использования таких мощных источников мягкого рентгеновского излучения (РИ), как высокотемпературная лазерная плазма и Z-пинч, для решения проблем микроэлектроники, материаловедения, биологии и медицины.

При этом зачастую из соображений сохранности исследуемые объекты не могут находиться вблизи таких источников, поскольку их РИ сопровождается мощными тепловыми и корпускулярными потоками, а также интенсивными магнитными и электрическими полями. В то же время для ряда применений требуется не только высокая интенсивность, но и локализация РИ в достаточно малом объеме.

В связи с этим представляет большой интерес предложенная авторами работы [1] капиллярная рентгеновская линза, в которой используется эффект полного внешнего отражения. Сравнительно недавно первые испытания подобного устройства при использовании лазерно-плазменного источника мягкого РИ проведены авторами работы [2].

Настоящая работа представляет результаты совместных исследований эффективности фокусирующей рентгеновской линзы, изготовленной сотрудниками Института атомной энергии им. И. В. Курчатова для мягкого ($h\nu < 2$ кэВ) РИ высокотемпературной лазерной плазмы. Под эффективностью понимается величина выигрыша в плотности энергии в фокусе линзы по сравнению с плотностью энергий в той же точке пространства в случае ее отсутствия. Эксперименты проведены на мощной лазерной установке "Искра-4" Российского федерального ядерного центра.

Условия проведения экспериментов

Исследуемая линза собрана из 5000 стеклянных капилляров длиной $L = 550$ мм с внутренним диаметром 0.36 мм и толщиной стенки 0.03 мм. Концы капилляров на входе и выходе линзы собраны в плотные упаковки диаметром ~ 30 мм. При этом точки пересечения осей капилляров на входе и выходе линзы, определяющие положение рентгеновского источника и плоскости концентрации (фокусировки) РИ, находились на равных расстояниях $l = 43$ мм от соответствующих торцов.

Для получения пятна фокусировки круглой формы и наименьшего размера необходимо довольно тщательно проводить юстировку оси линзы относительно источника РИ. Мы проводили эту юстировку перед опытом с помощью "мишени", подсвечиваемой гелий-неоновым лазером.

Следует отметить существенный недостаток данной линзы: при ее сборке были использованы капилляры из стекла двух различных марок. При этом центральная часть линзы была собрана из капилляров одного сорта (примерно треть от их общего количества), а внешние слои — в основном из другого. Из рис. 1, а, на котором представлен выходной торец линзы в свете гелий-неонового лазера, видно, что ее внешние слои транспортируют излучение гораздо хуже внутренних.

Лазерная установка "Искра-4" [3] с длиной волны $\lambda \simeq 1.315$ мкм и энергией на мишени до 500 Дж при длительности импульса в диапазоне 0.3–7 нс обеспечивала интенсивность облучения плоской мишени из золота $q \sim 10^{13} - 10^{14}$ Вт/см².

Поперечный размер плазменного источника РИ определялся с помощью камеры-обскуры и составлял 0.6–0.8 мм. Поток энергии РИ в единицу телесного угла E/Ω измерялся с помощью рентгеновских калориметров за различными фильтрами. До 90% энергии РИ отвечало квантам с энергиями $h\nu$ в диапазоне 0.1–1.5 кэВ. За фильтром

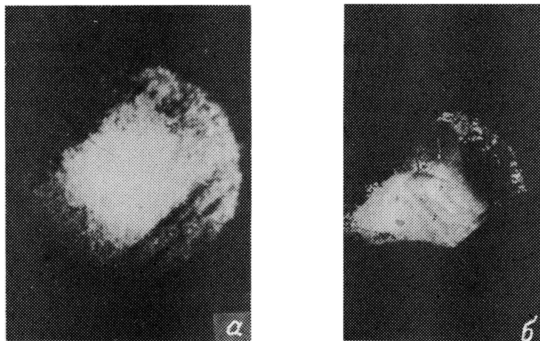


Рис. 1.

из Al толщиной 1 мкм поток энергии РИ изменялся в опытах от 1.5 до 5 Дж/ср.

Для защиты линзы от рассеянного лазерного излучения и потоков плазмы в большинстве опытов вблизи ее входного торца устанавливался фильтр из лавсановой пленки толщиной 3 мкм с нанесенным на нее слоем алюминия толщиной 0.36 мкм.

Для определения эффективности α_{ef} линзы использовались фотокассеты, снабженные фильтрами из алюминия одинаковой толщины ~ 50 мкм, расположенные у входа и на выходе в фокальной плоскости линзы соответственно. Величина α_{ef} определялась путем сравнения плотностей почернения фотопленки в этих кассетах. Фильтры выделяли из всего спектра РИ плазмы диапазон энергий квантов 1.4–1.5 кэВ вблизи K-окна пропускания Al. Характеристическая кривая рентгеновской фотопленки в указанном диапазоне энергий квантов определялась с помощью рентгеновской трубки, работающей на K_{α} -линии Al. Наряду с этим проводился контроль характеристической кривой и в эксперименте с помощью фотокассет за фильтрами из Al различной толщины.

Согласно определению, величина α_{ef} находится с помощью выражения

$$\alpha_{\Phi} = \left(\frac{l_1}{l_2} \right)^2 \cdot 10^{\frac{D_f - D_{in}}{\gamma}}, \quad (1)$$

где D_f и D_{in} — плотности почернения фотопленки на кассетах, расположенных в фокусе и у входа в линзу; $l_1 = L + 2l$ и l_2 — расстояния этих кассет от источника РИ соответственно; γ — контрастность пленки.

Из этого выражения видно, что для получения приемлемой (~ 10 –20%) точности определения величины α_{ef} необходимо использовать фотопленку с большей контрастностью и стремиться получить в опыте близкие значения плотностей почернения. Поэтому нами для регистрации РИ была выбрана фотопленка “Микрат”.

Результаты опытов и их обсуждение

Контактная фотография выходного торца линзы в рентгеновском излучении показана на рис. 1,б. Картина свечения торца близка к полученной в видимом свете. В транспортировке РИ участвует приблизительно треть капилляров.

На рис. 2 приведена характеристическая кривая фотопленки “Микрат”, полученная в одном из экспериментов, которая оказалась практически идентичной кривой, полученной при калибровке на рентгеновской трубке. В этом опыте длительность лазерного импульса составляла $\tau_{0.5} \simeq 7$ нс, а интегральный по времени поток энергии РИ, измеренный за фильтром из Al толщиной ~ 0.3 мкм на лавсановой пленке ~ 3 мкм, составлял $E/\Omega = 2.3$ Дж/ср. Стрелками показаны плотности почернения D_{in} и D_f , зарегистрированные на соответствующих кассетах.

Подстановка в выражение (1) численных значений входящих в него величин приводит к значению эффективности $\alpha_{ef} = 3000 \pm 400$.

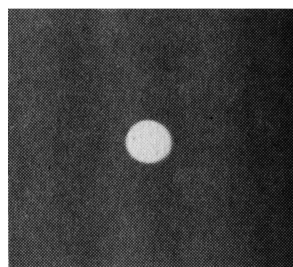
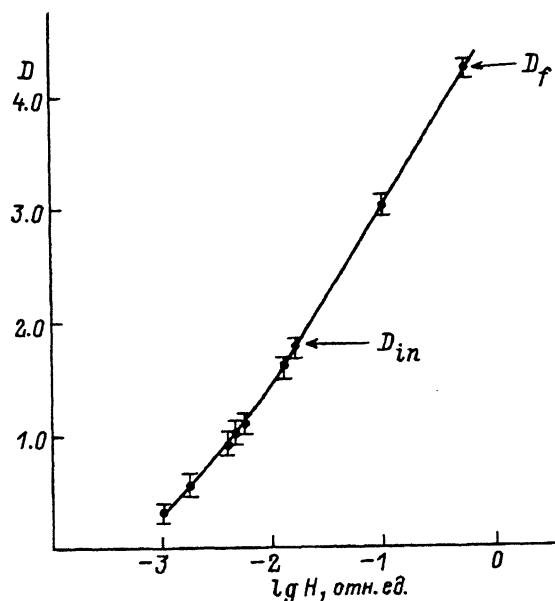


Рис. 2.

Рис. 3.

Сравним полученное в эксперименте значение с величиной α_i для идеальной (как в смысле сборки и юстировки, так и качества внутренней поверхности капилляров) линзы для квантов с энергиями $h\nu \approx 1.5$ кэВ.

Легко показать, что средняя плотность энергии в фокусе ε_f такой линзы с хорошим приближением равна

$$\varepsilon_f = \frac{nR^m E}{4l^2 \Omega}, \quad (2)$$

где n — число капилляров; R — коэффициент отражения РИ, зависящий от энергии квантов; m — число отражений при прохождении РИ по капилляру.

При выводе выражения (2) учтено, что для указанной линзы диаметр фокального пятна должен быть равен удвоенному значению внутреннего диаметра капилляра.

Очевидно, что плотность энергий в той же точке пространства в отсутствие линзы составляет

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{(L + 2l)^2} \frac{E}{\Omega}. \quad (3)$$

Отсюда для эффективности α (называемой иногда “коэффициентом усиления”) имеем

$$\alpha_i = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_0} = \frac{n \cdot R^m}{4} \left(\frac{L + 2l}{l} \right)^2 \approx 2.7 \cdot 10^5 \cdot R^m.$$

Коэффициент отражения РИ от кварцевых стенок капилляра при угле скольжения $\sim 0.5^\circ$, согласно работе [4], составляет ~ 0.9 . Число

возможных отражений, исходя из геометрии линзы, в зависимости от расположения капилляра в пуске составляет от 5 до 10. Тогда предельная эффективность идеальной линзы в случае точечного источника РИ с энергией квантов $h\nu \approx 1.5$ кэВ составит $\alpha_i \approx 10^5$, что почти на два порядка выше экспериментального значения.

Следует отметить несколько причин, которыми можно объяснить столь значительное расхождение эксперимента с расчетными оценками. Прежде всего в транспортировке РИ участвует лишь около трети капилляров, составляющих линзу. Среди других причин укажем недостаточно высокое (для квантов данной энергии) качество внутренней поверхности капилляров, возможное отклонение центра рентгеновского источника оси линзы, наличие примесей в составе стекла капилляров, понижающих коэффициент отражения РИ от их стенок.

На рис. 3 приведена фотография пятна РИ в фокусе капиллярной линзы. Размер пятна фокусировки, полученный в наших экспериментах, составил ~ 1.3 мм. Он оказался лишь вдвое больше расчетного размера пятна для идеальной линзы, что свидетельствует о достаточно хорошем качестве сборки испытанного образца.

В проведенных опытах наблюдалось оплавление алюминиевого фильтра толщиной 8 мкм, расположенного вблизи фотопленки, размещенной в фокальной плоскости линзы. Зная поток энергии источника РИ ($E/\Omega \approx 2.3$ Дж/ср) и значение эффективности α_{ef} линзы из эксперимента, получим для плотности энергии в фокусе линзы значение $\epsilon_f \approx 1.7$ Дж/см², что достаточно для расплавления алюминиевой фольги толщиной ~ 5 мкм на диаметре ~ 1.5 мм.

В заключение заметим, что даже при далеко не полном использовании капилляров в испытанном образце линзы плотность потока РИ в ее фокусе составила в эксперименте $\sim 2 \cdot 10^8$ Вт/см². При устранении отмеченных выше недостатков конструкции капиллярная линза в сочетании с лазерно-плазменным источником мягкого ($h\nu \lesssim 1.5$ кэВ) РИ, образующимся при действии излучения установки "Искра-4" на мишень из золота, способна обеспечить в наносекундном диапазоне длительностей плотность энергии в пятне облучения ~ 1.5 мм порядка 10 Дж/см², достаточную для проведения широкого круга исследований.

Список литературы

- [1] Аркадьев В.А., Коломийцев А.И., Куматов М.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 2 С. 97-98.
- [2] Ананьин О.Б., Быковский Ю.А., Журавлев А.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 2. С. 55-58.
- [3] Корнер С.Б. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1980. Т. 44. С. 2002.
- [4] Henke B.L., Lee P., Tanaka T.S. et al. // Low Energy X-ray Diagnostics-1981' (Montetey). New York, 1981. P. 340-388.

Поступило в Редакцию
11 августа 1993 г.