

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

Высокоинтенсивный источник тормозного излучения для исследования радиационной стойкости оптических материалов окон эксимерных лазеров

А. С. Алимов^{1,a}, Б. С. Ишханов¹, В. И. Шведунов¹, В. Д. Зворыкин², А. О. Левченко²,
Н. Н. Устиновский², Н. Н. Могиленец³

¹ НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцина (НИИЯФ МГУ). Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

² Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, отделение квантовой радиофизики. Россия, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 53.

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», кафедра радиационной физики, биофизики и экологии. 115409, Россия, Москва, Каширское ш., д. 31.
E-mail: ^a alimov@depni.sinp.msu.ru

Статья поступила 21.10.2009, подписана в печать 31.10.2009

Разработан источник тормозного излучения ($h\nu \leq 600$ кэВ) на базе линейного ускорителя электронов непрерывного действия, обеспечивающий мощность поглощенной дозы тормозного излучения в испытываемых образцах ~ 30 Гр/с на площади ~ 2.5 см². Проведены исследования радиационной стойкости кварцевых стекол и кристаллов, перспективных для изготовления окон эксимерных лазеров с электронно-пучковой накачкой.

Ключевые слова: линейный ускоритель, тормозное излучение, эксимерный лазер.
УДК: 621.384.6, 621.373.826. PACS: 29.20.Ej, 42.55.Lt.

Введение

Основными материалами, используемыми для изготовления окон мощных эксимерных лазеров с электронно-пучковым возбуждением, являются кварцевые стекла и кристаллы, прозрачные в УФ области спектра. Радиационная стойкость материалов этих окон в значительной степени определяет работоспособность и соответственно перспективы использования этих лазеров, например в качестве драйверов в лазерном термоядерном синтезе (ЛТС) [1–4]. Ионизирующими излучениями, воздействующими на окна электронно-пучковых эксимерных лазеров, являются рассеянные из пучка накачки электроны с энергиями 300–600 кэВ, и сопутствующее тормозное излучение, которые при поглощении в выходном окне лазера приводят к образованию центров окраски, меняющих оптические свойства окон и существенно снижающих эффективность лазера. В настоящей работе описан высокоинтенсивный источник тормозного излучения ($h\nu \leq 600$ кэВ) для исследования радиационной стойкости оптических материалов, обеспечивающий поглощенную в образцах дозу более 1 МГр за время облучения ~ 10 ч.

1. Описание экспериментальной установки

Источник тормозного излучения разработан на основе двухсекционного линейного ускорителя электронов непрерывного действия с максимальной энергией пучка 1.2 МэВ, максимальной мощностью пучка 60 кВт [5]. Блок-схема ускорителя приведена на рис. 1. В состав ускорителя входят электронная пушка 1, установленная без пространства дрейфа на входном фланце первой ускоряющей секции 4, вторая ускоряющая секция 5, два клистрона с максимальной выходной мощностью

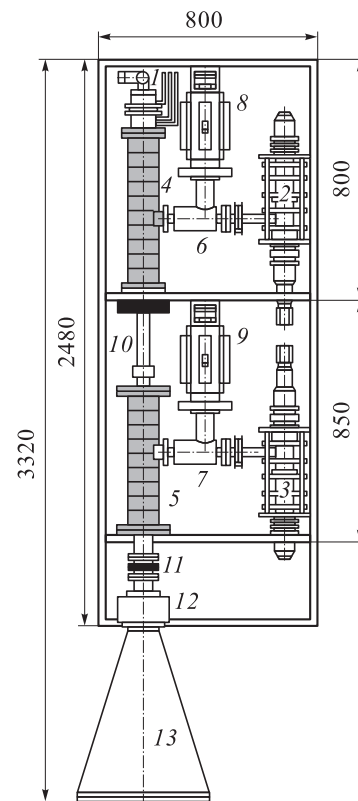


Рис. 1. Блок-схема двухсекционного линейного ускорителя электронов

50 кВт 2, 3, подводящие волноводы 6, 7 с вакуумными портами, через которые производится высоковакуумная откачка магнитоэлектрическими насосами НОРД-100 8, 9. В пространстве дрейфа между секциями 10 расположе-

ны соленоидальная фокусирующая линза, коллиматор и два корректора, сканирующие пучок в плоскости $xу$. Система вывода пучка включает магнит вертикальной (поперечной) развертки 11, магнит горизонтальной (продольной) развертки 12, камеру вывода пучка в атмосферу 13. Функционирование ускорителя обеспечивается системами: высокочастотного питания, высоковольтного питания, вакуумной, охлаждения, контроля и управления. После первой ускоряющей секции пучок имеет энергию 600 кэВ, после второй — на выходе ускорителя — энергию 1.2 МэВ. Средний ток пучка за счет изменения потенциалов фокусирующих электродов электронной пушки варьируется в пределах от 0 до 50 мА (максимальная мощность пучка 60 кВт).

Для генерации тормозного излучения ($h\nu \leq 600$ кэВ) использовался электронный пучок на выходе первой ускоряющей секции с энергией 600 кэВ без дополнительной пространственной развертки, что обеспечивало большую плотность электронного тока при меньшей площади облучаемой поверхности по сравнению с режимом сканирования пучка. Это позволило существенно увеличить интенсивность рентгеновского излучения из тормозной мишени и накапливать за достаточно короткое время облучения ~ 10 ч высокую поглощенную дозу рентгеновского излучения в оптических образцах ~ 1 МГр, сравнимую с той, которую могут получить окна K_rF лазерных драйверов энергетической установки на основе ЛТС за два года непрерывной работы с частотой повторения импульсов ~ 5 Гц.

В предложенной конструкции источника рентгеновского тормозного излучения использовалась тормозная мишень из вольфрама толщиной 0.3 мм, превышающей пробег электронов. Мишень размещалась в вакууме на выходе первой ускоряющей секции 10 (см. рис. 1). Схема такого рентгеновского конвертера показана на рис. 2. Поскольку большая часть поглощенной мощности электронного пучка в тормозной мишени идет на ее нагрев и может сопровождаться ухудшением вакуума и снижением эмиссии катода электронной пушки, с внутренней (вакуумной) стороны тормозной мишени предусмотрены дополнительная откачка с использованием компактного магниторазрядного насоса производительностью 5 л/мин и принудительное охлаждение тормозной мишени. Для этого в прижимном фланце выходного окна ускорителя из нержавеющей стали сделана полость толщиной 3 мм, через которую прокачивается вода из системы охлаждения. Стальная диафрагма толщиной 2 мм отделяет воду от атмосферы и, таким образом, служит выходным окном

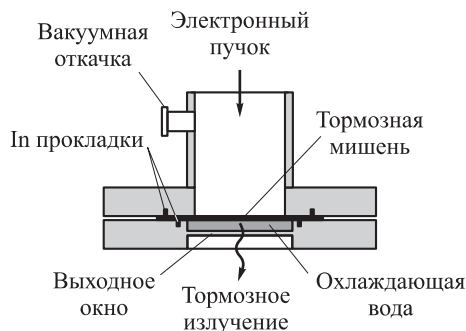


Рис. 2. Схематическая конструкция тормозной мишени

конвертера. Вакуумное уплотнение тормозной мишени обеспечивается индиевыми прокладками. Облучаемые образцы могут размещаться на различном расстоянии от тормозной мишени в пределах от 0.55 см до 5.9 см.

2. Измерение характеристик пучка тормозного излучения

Калибровка поглощенной дозы рентгеновского тормозного излучения проводилась с использованием стандартных калиброванных твердотельных дозиметров ДТС-0,01/1 [6] из кремниевого стекла, активированного никелем, которые располагались непосредственно на месте облучаемых образцов. Дозиметры ДТС-0,01/1 представляют собой параллелепипеды размером $15 \times 15 \times 5$ мм. Центры окраски, образующиеся под действием рентгеновского тормозного излучения, изменяют их спектры пропускания. Эти спектры имеют два максимума на длинах волн 745 и 360 нм. Первый максимум, менее чувствительный к излучению, использовался для измерения поглощенной дозы в диапазоне 1.5–10 кГр с точностью 12%. Второй максимум использовался для измерения поглощенной дозы в диапазоне 0.1–0.6 кГр с точностью 7%.

Оптическая плотность дозиметров $A = \lg(100/T)$, где T — пропускание дозиметров после облучения (%), рассчитывалась из измеренных спектров пропускания на заданной длине волны. Соответствующая поглощенная доза рентгеновского излучения рассчитывалась из эмпирических калибровочных формул:

$$D = 28.2 \times A^{2.32} \text{ кГр} \quad \text{в диапазоне } \lambda = 745 \text{ нм,}$$

$$D = (464.6 \times A - 33.1) \text{ кГр} \quad \text{в диапазоне } \lambda = 360 \text{ нм.}$$

Отметим, что низкоэнергетическая часть спектра тормозного излучения, для которой резко возрастает коэффициент поглощения [7], поглощалась тормозной мишенью, охлаждающей водой и выходным окном конвертера.

Поглощенная в дозиметрах доза тормозного излучения как функция заряда электронного пучка, падающего на тормозную мишень, измеренная на расстоянии 1.7 см от тормозной мишени, приведена на рис. 3, а. Доза меняется линейно с изменением заряда со средним коэффициентом пропорциональности 7.1 кГр/Кл. С использованием твердотельных дозиметров были проведены измерения поглощенной дозы тормозного излучения в зависимости от расстояния от тормозной мишени в диапазоне 0.55–5.9 см. Нормализованная на электронный заряд поглощенная доза тормозного излучения в зависимости от расстояния от мишени показана на рис. 3, б. Измеренная доза спадает по закону $D \sim 1/R^{1.5}$, слабее чем для точечного источника $D \sim 1/R^2$. Это связано с конечным размером электронного пучка на тормозной мишени (~ 10 мм) и вкладом рассеянного γ -излучения. Максимальная мощность поглощенной дозы тормозного излучения на минимальном расстоянии 0.55 см от тормозной мишени на площади около 2.5 см^2 составила приблизительно 30 Гр/с при токе электронного пучка около 5 мА. Дальнейшее увеличение тока пучка приводило к нагреву тормозной мишени, ухудшению вакуума в ускорителе и снижению эмиссии катода электронной пушки. При токе электрон-

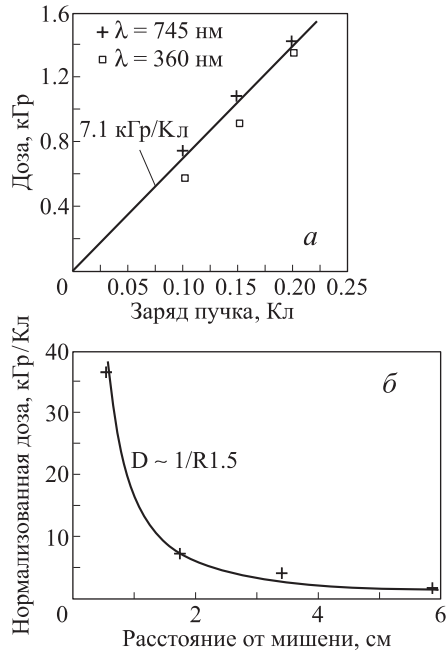


Рис. 3. Зависимость поглощенной дозы тормозного излучения от электронного заряда на расстоянии 1.7 см от тормозной мишени (а) и нормализованной поглощенной дозы тормозного излучения от расстояния (б)

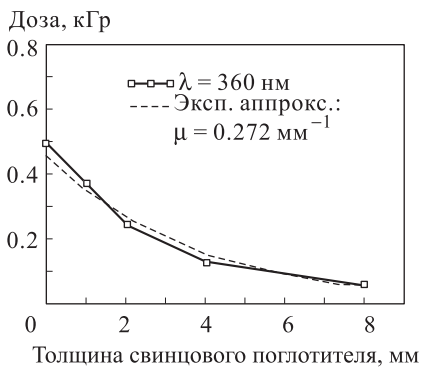


Рис. 4. Зависимость поглощенной дозы от толщины свинцового поглотителя

ного пучка, не превышающем 5 мА, поддерживалась стабильная работа ускорителя в течение десятков часов.

Для оценки спектра рентгеновского тормозного излучения была измерена зависимость поглощенной дозы от толщины свинцового поглотителя, за которым помещались дозиметры. Измеренная зависимость поглощенной дозы от толщины свинцового поглотителя для максимума на длине волны $\lambda = 360$ нм показана на рис. 4. Коэффициент поглощения, полученный путем экспоненциальной аппроксимации экспериментальных данных, равен $\mu = 2.72 \text{ см}^{-1}$, что соответствует эффективной средней энергии тормозного спектра $h\nu \approx 400$ кэВ при максимальной энергии $h\nu \approx 600$ кэВ.

3. Измерение радиационной стойкости оптических материалов

Для исследования деградации пропускания УФ оптическими материалами под действием тормозного излучения были выбраны кварцевые стекла (SiO_2) раз-

личных производителей (российские кварцевые стекла КУ-1 и КС-4В, кварцевые стекла «Корнинг 7980» фирмы «Corning Incorporated»), а также высокочистые кристаллы фтористого кальция (CaF_2) и лейкоапфита (Al_2O_3), исследовавшиеся ранее при облучении электронным пучком [7]. Пропускание образцов в области 200–1000 нм перед облучением и после облучения измерялось на спектрофотометре «Genesys-2» фирмы «Spectronics». Спектры пропускания измерялись в течение 1–2 дней после облучения. Для контроля релаксации радиационных дефектов спектр для каждого из образцов был измерен через две недели после облучения. Из измеренных спектров пропускания определялись спектры оптической плотности OD образцов. Значение OD на длине волны λ вычислялось по формуле

$$OD = \ln(T_0/T),$$

где T_0 и T — пропускание образца до и после облучения различными дозами тормозного излучения.

Энергия тормозного излучения равномерно поглощается в исследуемых образцах, поскольку их толщина порядка нескольких миллиметров существенно меньше глубины проникновения рентгеновского излучения, которая для всех исследованных образцов составляет $l_R = 1/\mu \sim 2.5\text{--}5.0$ см. Массовый коэффициент поглощения $\mu/\rho \sim 0.1 \text{ см}^2/\text{г}$ для $h\nu \sim 400$ кэВ примерно одинаков для всех образцов при их плотностях $\rho = 2.2$; 3.2 и 4 г/см³ для SiO_2 , CaF_2 и Al_2O_3 соответственно. Кроме того, эти показатели близки к параметрам твердотельных дозиметров, что позволяет оценивать поглощенную дозу в этих образцах по показаниям дозиметров. В связи с этим универсальной характеристикой вносимых потерь, практически не зависящей от толщины образца, является коэффициент наведенного поглощения α , определяемый как отношение оптической плотности к толщине образца:

$$\alpha = \frac{\ln(T_0/T)}{d}.$$

Образцы оптических материалов облучались в нескольких последовательных сериях. Наряду с длительностью в каждом облучении с помощью ионизационной камеры ИДМД-1 контролировалась мощность дозы. Камера располагалась за образцами и свинцовым экраном толщиной 1.8 см на расстоянии 7.5 см от тормозной мишени. Ее показания предварительно калибровались в измерениях с твердотельными дозиметрами.

Наибольшая поглощенная доза $D \approx 1400$ кГр набрана к настоящему времени для кварцевого стекла марки КУ-1. Коэффициенты наведенного поглощения α на длине волны 248-нм, определенные из измеренных спектров пропускания при различных поглощенных дозах D , показаны на рис. 5, а (в диапазоне поглощенных доз 0–100 кГр) и 5, б (в диапазоне поглощенных доз 100–1400 кГр).

С увеличением поглощенной дозы D до ~ 20 кГр коэффициент наведенного поглощения α растет от 0 до $\sim 0.035 \text{ см}^{-1}$. Это означает, что для крупногабаритных лазерных окон толщиной $l \sim 5$ см ослабление излучения КгF-лазеров будет $\sim 15\%$ при условии отсутствия релаксации центров окраски при работе лазера. С дальнейшим ростом D коэффициент наведенного

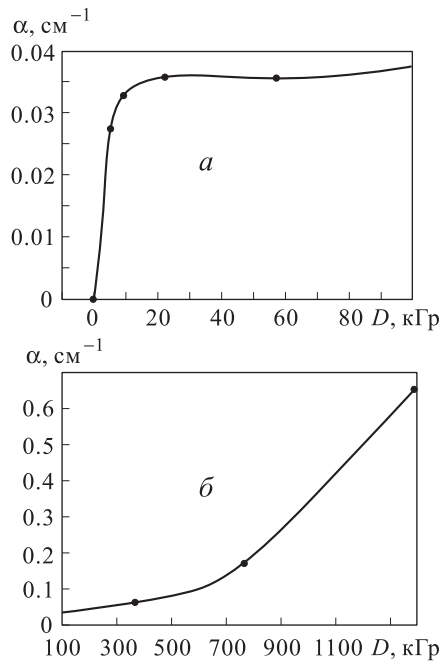


Рис. 5. Зависимости коэффициентов наведенного поглощения от поглощенной дозы на длине волны $\lambda = 248$ нм для кварцевого стекла КУ-1: а — в диапазоне поглощенных доз 0–100 кГр; б — в диапазоне поглощенных доз 100–1400 кГр

поглощения возрастает до величины $\alpha = 0.17$ см⁻¹ при поглощенной дозе $D = 766$ кГр, что соответствует увеличению ослабления излучения лазера до ~43%. При поглощенных дозах более 1 МГр кварцевые стекла КУ-1 становятся практически непрозрачными на длине

волны $\lambda = 248$ нм. Таким образом, для снижения оптических потерь и сохранения достаточно высокой эффективности лазера в процессе долговременной работы необходим температурный отжиг окон, уменьшающий концентрацию центров окраски.

Авторы выражают благодарность А. П. Сергееву за проведение измерений спектров пропускания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (контракт 02.740.11.0242 по мероприятию 1.1 «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров» и грант поддержки ведущих научных школ 02.120.21.485-НШ), а также РФФИ (грант 08-02-01331).

Список литературы

1. Сергеев П.Б., Ермоленко Т.А., Евлампиев И.К. и др. // Оптический журнал. 2004. **71**, № 6. С. 93.
2. Zvorykin V.D., Arlantsev S.V., Gaynutdinov R.V. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2008. **112**. P. 32055. IOP Publishing.
3. Zvorykin V.D., Arlantsev S.V., Vakaev V.G. et al. // J. de Physique IV. 2006. **133**. P. 567.
4. Zvorykin V.D., Arlantsev S.V., Vakaev V.G. et al. // Inertial Fusion Sciences and Applications 2003. American Nuclear Society, 2004. P. 548.
5. Алимов А.С., Ермаков Д.И., Ишханов Б.С. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 5. С. 114.
6. Брискман Б.А., Генералов В.В., Крамер-Агеев В.А., Трошин В.С. // Внутриреакторная дозиметрия: Практ. руководство. М., 1985.
7. Сергеев П.Б., Сергеев А.П., Зворыкин В.Д. // Квантовая электроника. 2007. **37**, № 8. С. 706.

High-intensity bremsstrahlung source for investigating radiation stability of optical samples for eximer laser windows

A. S. Alimov^{1,a}, B. S. Ishkhanov¹, V. I. Shvedunov¹, V. D. Zvorykin², A. O. Levchenko², N. N. Ustinovskiy², N. N. Mogilenets³

¹D. V. Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

²P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Division of Quantum Radiophysics, Leninskij prospekt 53, Moscow 119991, Russia.

³Moscow Engineering Physics Institute (State University), Kashirskoe shosse 31, Moscow 115409, Russia. E-mail: ^aalimov@depni.sinp.msu.ru.

X-Ray bremsstrahlung source ($h\nu > 600$ keV) on the basis of a CW electron LINAC has been developed. It provides absorbed dose rate of ~ 30 Gy/s within the area of ~ 2.5 cm². Radiation stability of quartz glasses and crystals for eximer lasers windows has been investigated.

Keywords: linear accelerator, bremsstrahlung, eximer laser.

PACS: 29.20.Ej, 42.55.Lt.

Received 21 October 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 2(2010).

Сведения об авторах

1. Алимов Андрей Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.; тел.: (495) 939-56-62, e-mail: alimov@depni.sinp.msu.ru.
2. Ишханов Борис Саркисович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. отделом; тел.: (495) 939-50-95, e-mail: bsi@depni.sinp.msu.ru.
3. Шведунув Василий Иванович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-24-51, e-mail: shved@depni.sinp.msu.ru.
4. Зворыкин Владимир Дмитриевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., вед. науч. сотр.; тел.: (499) 132-67-39, e-mail: zvorykin@sci.lebedev.ru.
5. Левченко Алексей Олегович — мл. науч. сотр.; тел.: (499) 132-67-39, e-mail: levchenk@sci.lebedev.ru.
6. Устиновский Николай Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; тел.: (499) 132-66-60, e-mail: ustin@sci.lebedev.ru.
7. Могиленец Николай Николаевич — ст. преподаватель; тел.: (495) 323-94-67, e-mail: nnmogilenets@mephi.ru