

УДК 544.032.65  
EDN: HPQQNV

PACS: 79.20.Eb

**Регистрация спектров излучения плазмы гадолиния  
при воздействии лазерами на твердотельную мишень**© Д. О. Чернов\*, А. С. Гасин, М. Е. Дворниченко, А. Д. Михайлов, А. С. Никифоров,  
Н. Э. Саркаров, А. И. Иванов*АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»,  
Московская обл., г. Троицк, 142190, Россия  
\* E-mail: chernov.d@triniti.ru**Статья поступила в редакцию 28.11.2024; после доработки 6.02.2025; принята к публикации 7.04.2025  
Шифр научной специальности: 1.3.9***Приведены исследования по воздействию мощного лазерного излучения на твердотельные мишени из редкоземельного элемента Gd в качестве плазмообразующего рабочего вещества с целью получения излучения на длине волны 6,7 нм.***Ключевые слова:* плазмообразование; гадолиниевая мишень; лазер; спектры.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-3-47-52

**Введение**

Востребованность в развитии производственной базы микроэлектроники послужила причиной роста интереса к исследованиям и разработкам в области спектра экстремального ультрафиолета (ЭУФ), где в том числе интерес представляют источники мягкого рентгеновского излучения на основе редкоземельных элементов с длиной волны менее 13,5 нм, таких как гадолиний (Gd) и тербий (Tb), которые и в текущий момент являются предметом исследований – как теоретических, так и экспериментальных [1, 2]. Однако существуют и нерешённые проблемы, среди которых стоит задача по созданию прототипа источника ЭУФ-излучения типа LPP, генерирующего на длине волны 6,7 нм с целью уменьшения геометрических размеров микроэлектроники.

В работе [1] изучено временное поведение гадолиниевой (Gd) плазмы, созданной лазером, с использованием спектрометра ISAN в диапазоне от 5 до 15 нм. Обнаружено, что ЭУФ-излучение соответствует временному характеру лазерного импульса при самой высокой плотности мощности лазера  $4,4 \times$

$\times 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>, при котором длительность импульса мягкого рентгеновского излучения составляет 7,5 нс, тогда как при  $5,4 \times 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> и  $7,6 \times 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup> импульс длится всего 4 нс и 2,5 нс соответственно, что оказывается меньше, чем длительность самого лазерного импульса из-за более низкой температуры электронов, достигаемой при генерации плазмы.

В работе [2] представлены исследования лазерной плазмы, которая была получена путём воздействия наносекундного лазерного излучения управляемой пространственной когерентности на различные мишени из металлического гадолиния, оксида гадолиния, алюминия, а также сплава гадолиния и алюминия. Отмечается, что мишень из гадолиния даёт больший выход, чем мишень из сплава.

В настоящей работе представлены расчетные параметры для двух типов лазеров. Проведены исследования спектра излучения Gd плазмы, образующейся в результате воздействия на твердотельную мишень лазерами с расчетными параметрами. Рассмотрена целесообразность использования двух типов лазеров для создания источника ЭУФ-излучения.

### Расчет модели взаимодействия лазерного излучения с твердотельной мишенью гадолиния

В данном разделе представлены результаты моделирования воздействия двух типов лазеров на твердотельные мишени из гадолиния (Gd) с характеристиками, представленными в таблице 1. При расчете вариация мощности воздействия на мишень осуществляется только путём изменения диаметра фокального пятна, остальные параметры лазеров в рамках данного расчета фиксированы. Для твердотельной плоской мишени из гадолиния были проведены расчёты для лазеров № 1 и № 2 с диаметрами фокального пятна от 100 до 500 мкм и от 150 до 700 мкм, соответственно.

Результаты моделирования были получены в RZLINE с помощью РГД кода в  $r-Z$  геометрии. При моделировании лазерное излучение (ЛИ) было направлено вдоль оси  $Z$ ,

а поверхность мишени устанавливалась в координате  $Z = 0$ . Чтобы избежать прохождения лазерного излучения мимо мишени, рабочее вещество в радиальном направлении заполняло всю область. Эффект сквозного прожигания был исключен из расчетов за счет задания избыточной толщины мишени. Эффективность конверсии лазерного излучения в коротковолновое излучение (КИ) плазмы была оценена в узком интервале вокруг длины волны 6,77 нм. Радиационные и термодинамические свойства материалов мишеней были получены с использованием кода THERMOS с использованием ряда приближений.

На основании полученных данных по моделированию были выбраны оптимальные режимы работы лазеров, представленные в таблице 2. При данных режимах наблюдается максимальный коэффициент конверсии лазерного излучения в коротковолновое излучение.

Таблица 1

#### Характеристики лазерных установок

№	Обозначение	Активная среда	Длина волны, мкм	Энергия в импульсе, мДж	Длительность импульса, нс	Диаметр фокального пятна, мкм
1	Лазер № 1	Газовый CO <sub>2</sub>	10,64	600	100	100–500
2	Лазер № 2	Твердотельный Nd:YAG	1,064	1400	11	150–700

Таблица 2

#### Интегральные результаты серии расчётов с твердотельной гадолиниевой мишенью

№ Лазера	Диаметр фокального пятна, мкм	Пиковая интенсивность ЛИ, Вт/см <sup>2</sup>	Поглощение ЛИ, %	Отражение ЛИ, %	Коэффициент конверсии ЛИ в излучение, %	Энергия в импульсе КИ, мДж	Спектральная чистота, %	Радиальный размер источника КИ, мкм	Аксиальный размер источника КИ, мкм	Доля энергии на быстрых ионах, %	Толщина испаренного слоя, мкм
1	150	1,38E+12	99,35	0,53	46,87	0,80	1,35	301,8	200,0	33,05	21,11
2	300	1,61E+10	66,69	33,19	16,92	0,24	1,09	439,1	219,7	25,62	1,30

Было выявлено, что для CO<sub>2</sub> наиболее оптимальной интенсивностью является значение  $I_{\max} \approx 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>. Для Nd:YAG-лазеров наиболее оптимальной интенсивностью является значение  $I_{\max} \approx 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Доля поглощённого ЛИ для Nd:YAG-лазеров оказалась близка к 100 %, в то время как для CO<sub>2</sub>-лазера в оптимальном режиме около 20 % энергии лазера отражается, что легко объяснить более низкой критической

плотностью и, соответственно, меньшей глубиной проникновения для 10,64 мкм излучения (критическая плотность электронов  $N_{\text{Ce}} \sim 10^{19}$  см<sup>-3</sup>) по сравнению с лазерным излучением на длине волны 1,064 мкм, для которого  $N_{\text{Ce}} \sim 10^{21}$  см<sup>-3</sup>.

Параметр спектральной чистоты в данной работе характеризует отсутствие побочных спектров излучения вне малой области ( $\delta$ ) вокруг длины волны 6,7 нм. При моделирова-

нии было замечено, что воздействие лазера № 1 (CO<sub>2</sub>) генерирует более чистый спектр в окрестности целевого интервала, хотя в целом спектральная чистота Gd плазмы при воздействии данного типа лазера уступает Nd:YAG-лазерам. Это может быть связано с высокой плотностью мощности излучения Nd:YAG-лазера на мишени. Таким образом, при моделировании, несмотря на то, что в спектре излучения Gd от лазеров в более широком диапазоне длин волн присутствуют нежелательные гармоники, в узком интервале спектр Gd при воздействии Nd:YAG-лазером может быть более контрастным и, с точки зрения обсуждаемого параметра, более «чистым» (рис. 1).

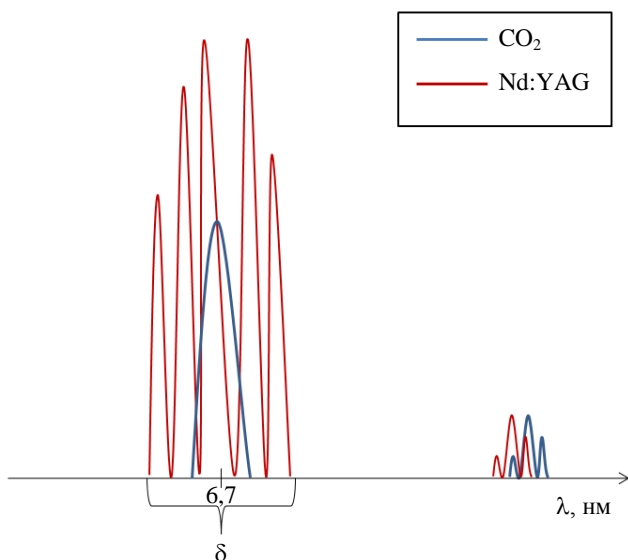


Рис. 1. Схематичный вид спектра при моделировании взаимодействия лазеров с мишенью Gd

### Экспериментальные исследования

#### Плотность мощности излучения лазеров в фокальной плоскости

Экспериментальный стенд (рис. 2) содержит вакуумную камеру с окнами для ввода лазерного излучения и наблюдения, со съемной подставкой для установления мишеней, и аппаратурой для измерения оптических и электрических параметров излучения, электрическими вводами для энергообеспечения мишенной зоны. В экспериментальных исследованиях использовали проточный импульсный CO<sub>2</sub>-лазер с замкнутым контуром (лазер № 1 на рис. 2) и твердотельный импульсный лазер Nd:YAG (лазер № 2 на рис. 2).

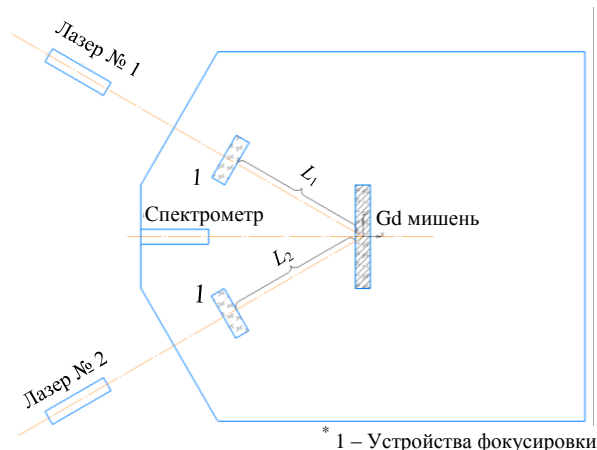


Рис. 2. Схема экспериментального стенда

Излучение CO<sub>2</sub>-лазера пропускали в вакуумную камеру через окно из KCl, а твердотельного импульсного Nd:YAG-лазера через окно из кварца. Для фокусировки излучения CO<sub>2</sub>-лазера на образец использовалась просветленная линза из ZnSe с фокусным расстоянием примерно 30,5 мм, в то время как излучение твердотельного импульсного лазера Nd:YAG фокусировалось линзой с фокусным расстоянием около 100 мм. В качестве мишеней для лазерного воздействия использовались пластины из гадолиния. Излучение, возникающее в фокальной плоскости линз при взаимодействии лазерного излучения с материалом мишени, регистрировалось с помощью спектрометра скользящего падения – GIS.

В экспериментах лазеры использовались в следующих режимах:

CO<sub>2</sub>-лазер в режиме:

- энергия генерации в диапазоне 0,18–0,22 Дж/импульс,
- длительность головной части импульса излучения – 100 нс,
- частота повторения импульсов до 1–300 Гц.

Твердотельный Nd:YAG-лазер в режиме:

- энергия генерации – 1,7 Дж/импульс,
- длительность импульса лазерного излучения – 9 нс,
- частота повторения импульсов до 10 Гц.

В ходе экспериментальных исследований проводились работы, направленные на изучение возможности достижения необходимых параметров лазерного излучения в фокальной плоскости оптической системы как для длины волны  $\lambda = 10,6$  мкм, так и для  $\lambda = 1,06$  мкм.

Диаметр пучка в фокальной плоскости оптической схемы для  $\text{CO}_2$ -лазера определялся методом прожига на мишени из оргстекла, а для Nd:YAG-лазера – по прожигу на мишени из гетинакса, так как известны пороговые значения воздействия излучения на эти материалы.

Экспериментально было получено, что для  $\text{CO}_2$ -лазера площадь пятна, с увеличением расстояния от плоскости фокусирующей линзы примерно до  $L_1 = 32$  мм, монотонно убывает до порядка  $0,02 \text{ мм}^2$  в каустике фокусированного луча оптической схемы после чего практически не меняется на интервале (32–33,5 мм). При этом плотность мощности, напротив, возрастает до максимума при  $L_1 = 33$  мм.

Для Nd:YAG-лазера площадь пятна убывает на интервале 98–101 мм (от  $7 \times 10^{11} \text{ Вт/см}^2$  до  $0,5 \times 10^{11} \text{ Вт/см}^2$ ), после чего монотонно возрастает. Плотность мощности возрастает до максимального значения при  $L_2 = 100$  мм, после чего убывает.

Таким образом, использованная оптическая схема фокусировки позволяет достичь пиковой плотности мощности в фокальном пятне для излучения  $\text{CO}_2$ -лазера  $J \sim 10^{10} \text{ Вт/см}^2$ , при использовании Nd:YAG-лазера –  $J \sim 10^{12} \text{ Вт/см}^2$ . В экспериментальных исследованиях в соответствии с вышеописанными рассуждениями мишени воздействия лазерного излучения устанавливали на расстояниях 32 мм от плоскости фокусирующей линзы при длине волны  $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$  и на расстояниях 98–100 мм при длине волны  $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ .

### Экспериментальные результаты

Для регистрации спектра в диапазоне от 2,5 нм до 1300 нм использовались решетки 20 шт./мм, 150 шт./мм, 300 шт./мм, 600 шт./мм, 1200 шт./мм. Основные спектральные линии в диапазоне от 2,5 нм до 30 нм получали с дифракционной решеткой 1200 шт./мм и при воздействии на материалы мишеней двумя лазерными пучками с длинами волн  $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$  и  $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ . Несмотря на то, что воздействие двух лазеров было малоэффективно из-за отсутствия синхронизации импульсов, излучение  $\text{CO}_2$ -лазера в данном случае играет роль в подогреве мишеней

в режиме работы с частотами 100–300 Гц и средней выходной мощностью 22 Вт.

Главным результатом экспериментов являются характерные спектры, возникающие при воздействии лазерного излучения в фокальной плоскости на мишени из гадолиния в диапазоне от 2,5 нм до 30 нм, показаны на рисунках 3 и 4.

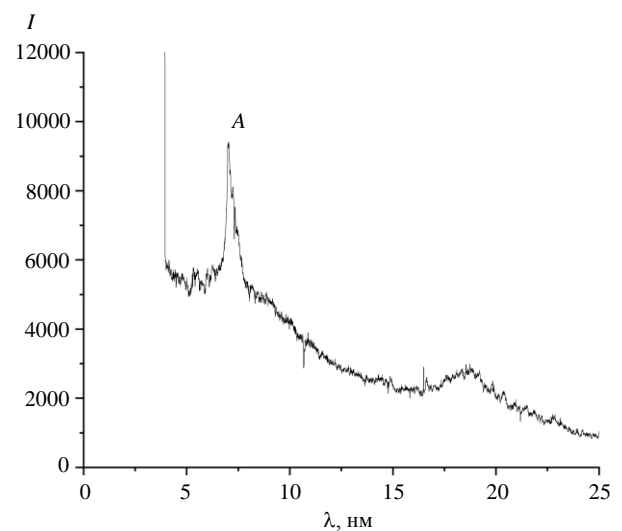


Рис. 3. Экспериментальный спектр при воздействии излучения на мишень из гадолиния (Gd)

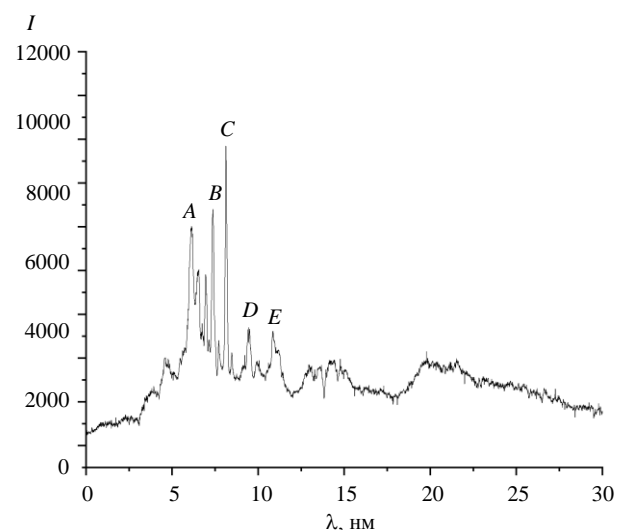


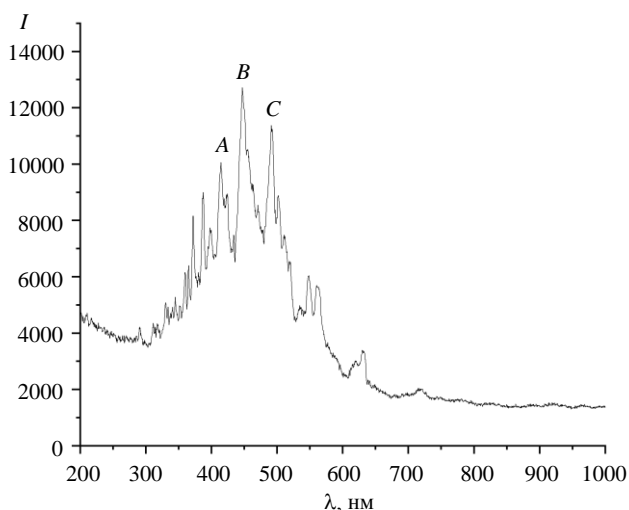
Рис. 4. Экспериментальный спектр при воздействии излучения на мишень из алюминия (Al)

При воздействии лазерного излучения на мишень из гадолиния (Gd) было зафиксировано излучение лазерной плазмы с длиной волны 6,7 нм (обозначено буквой A на рис. 3). Для проверки и сопоставления полученных результатов в диапазоне от 2,5 нм до 30 нм были проведены исследования спектра алю-

миния (Al), так как в этом спектральном диапазоне алюминий демонстрирует ярко выраженные линии излучения. На рисунке 4 хорошо видно характерные длины волн лазерной плазмы алюминия (Al): *A* – 6,7 нм; *B* – 7,7 нм; *C* – 8,1 нм; *D* – 9,5 нм; *E* – 12,5 нм.

Для регистрации широкого диапазона длин волн от 2,5 нм до 1300 нм, как было отмечено ранее, в спектрометрах необходимо использовать решетки с разными числами штрихов на миллиметр.

На рисунке 5 показан спектр Gd, полученный при использовании дифракционной решетки с 20 шт./мм. При воздействии на образец было зафиксировано излучение лазерной плазмы следующих длин волн: *A* – 391,3 нм; *B* – 447,6 нм; *C* – 493,0 нм.



**Рис. 5.** Экспериментальный спектр при воздействии излучения на мишень из гадолиния (Gd)

Необходимо отметить, что зарегистрированное в ходе ряда экспериментов излучение с длиной волны 6,7 нм имело нестабильные параметры сигнала и его формы от серии к серии. Чтобы параметры оптической плазмы не успевали меняться от импульса к импульсу желательно использовать лазерные источники частотой импульсов не менее 10 кГц:

– и на длине волны излучения  $\lambda = 1,064$  мкм, длительностью импульса в диапазоне 1–3 нс при средней величине выходной мощности не менее 400 Вт;

– и на длине волны излучения  $\lambda = 10,6$  мкм, длительностью импульса в диапазоне 70–100 нс, средней величине выходной мощности не менее 80 Вт.

### Заключение

Приведенное в настоящей работе моделирование взаимодействия излучения двух типов лазеров с твердотельными мишенями позволило выбрать режимы работ для лазеров CO<sub>2</sub> и Nd:YAG, которые позволяют получить спектр излучения с длиной волны  $\lambda = 6,7$  нм при воздействии лазерного излучения в фокальной плоскости на мишени из гадолиния.

В ходе проведения экспериментальных работ по воздействию излучения лазеров CO<sub>2</sub> и Nd:YAG на мишени из гадолиния были получены спектры излучения в оптической плазме из Gd с длиной волны  $\lambda = 6,7$  нм.

Исследования спектра показали, что одновременное воздействие на мишени из гадолиния лазеров CO<sub>2</sub> и Nd:YAG было недостаточно эффективным из-за отсутствия синхронизации импульсов. Однако излучение CO<sub>2</sub>-лазера в данных экспериментах играло роль, в основном, подогрева мишеней. Для эффективного использования режима одновременного воздействия двух лазеров необходимо реализовать синхронизацию их импульсов.

Для обеспечения стабильного источника излучения на твердотельной мишени необходимо использовать лазерные источники с частотой следования импульсов не менее 10 кГц, длительностью импульса единицы и десятки наносекунд и мощностью в сотни ватт в зависимости от типа лазера.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kambali I. / Atom Indonesia. 2014. Vol. 40. № 2. P. 57–61.
2. Фроня А. А., Пузырёв В. Н., Стародуб А. Н., Якушев О. Ф. / Краткие сообщения по физике ФИАН. 2015. № 4. С. 38–45.

## Registration of Gd plasma spectra when exposed to lasers on solid target

D. O. Chernov<sup>\*</sup>, A. S. Gasin, M. E. Dvornichenko, A. D. Mikhaylov, A. S. Nikiforov,  
N. E. Sarkarov and A. I. Ivanov

*SRC «RF Trinitiy JSC», Troitsk, Moscow Region, 142190 Russia*

*\* E-mail: chernov.d@trinitiy.ru*

*Received 28.11.2024; revised 6.02.2025; accepted 7.04.2025*

*This paper presents studies on the impact of high-power laser beam on a solid target made of gadolinium as a plasma-forming working substance in order to obtain radiation at a wavelength of 6.7 nm.*

*Keywords:* plasma-forming; gadolinium target; laser; spectrum.

### REFERENCES

1. Kambali I., Atom Indonesia 40 (2), 57–61 (2014).
2. Fronya A. A., Puzyrev V. N., Starodub A. N. and Yakushev O. F., Bulletin of the Lebedev Physics institute, № 4, 38–45 (2015).

### Об авторах

**Чернов Дмитрий Олегович**, младший научный сотрудник, АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (142190, Россия, Московская обл., г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12). E-mail: chernov.d@trinitiy.ru

**Гасин Александр Сергеевич**, стажер. АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (142190, Россия, Московская обл., г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12).

**Дворниченко Марина Евгеньевна**, научный сотрудник. АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (142190, Россия, Московская обл., г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12).

**Михайлов Александр Дмитриевич**, начальник лаборатории. АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (142190, Россия, Московская обл., г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12).

**Никифоров Андрей Сергеевич**, стажер. АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (142190, Россия, Московская обл., г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12).

**Саркаров Ниджеф Экбербубаевич**, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (142190, Россия, Московская обл., г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12). Author ID 22645

**Иванов Алексей Игоревич**, ведущий инженер, АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (142190, Россия, Московская обл., г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12).