

09

Фотодиссоционный иодный лазер с управляемой диаграммой направленности и выходной энергией 10 J

© Г.Н. Качалин,^{1,2} А.Д. Малахов,^{1,2} Е.А. Салатов,^{1,2} О.Л. Течко^{1,2}

¹Российский федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,

607188 Саров, Нижегородская обл., Россия

²Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Сарове,

607328 Саров, Нижегородская обл., Россия

e-mail: info@sarov.msu.ru

Поступило в Редакцию 6 августа 2024 г.

В окончательной редакции 12 мая 2025 г.

Принято к публикации 12 мая 2025 г.

Создан мощный фотодиссоционный иодный лазер с управляемой диаграммой направленности, работающий в режиме свободной генерации. В его конструкции применен сопряженный резонатор и устройство пространственно-временной модуляции света на основе электрооптической керамики состава цирконат-титанат свинца, легированный лантаном. Энергия генерации лазера составляла (9.1 ± 0.7) J при длительности импульса $175 \mu\text{s}$ и расходимости излучения $5 \cdot 10^{-4}$ rad. Показано, что внутрирезонаторный пространственно-временной модулятор света выдерживает лучевые нагрузки $6.8 \cdot 10^6$ W/cm².

Ключевые слова: иодный лазер, фотодиссоциация, режим свободной генерации, сопряженный резонатор, пространственно-временной модулятор.

DOI: 10.61011/JTF.2025.08.60905.250-24

Введение

В различных применениях лазеров актуальной является задача управления диаграммой направленности выходного излучения. Для решения этой задачи применяются внутрирезонаторные пространственно-временные модуляции света (ПВМС, STLM) [1–4]. Применение ПВМС на основе электрооптической керамики состава цирконат-титанат свинца, легированный лантаном (ЦТ-СЛ) в сопряженном резонаторе иодного лазера, впервые предложено и реализовано в работе [5]. Схема ПВМС на основе двух ортогональных полуволновых затворов позволяет эффективно управлять диаграммой направленности во всем поле зрения лазера [6], обеспечивая при этом требуемый пространственный контраст излучения [6]. В настоящей работе создан фотодиссоционный иодный лазер с внутрирезонаторной высококонтрастной схемой ПВМС, имеющий выходную энергию излучения (9.1 ± 0.7) J.

1. Оптическая схема лазера

Оптическая схема резонатора лазера и его фотография кварцевой кюветы в цилиндрическом осветителе с лампами накачки приведены на рис. 1. Технические характеристики иодного лазера приведены в таблице. Использовался сопряженный резонатор с изломом оптической оси. Он состоял из двух плоских зеркал R_b и R_f , расположенных в фокальных плоскостях софо-

кусных линз F_1 и F_2 . Вывод излучения из резонатора осуществлялся полупрозрачным плоским зеркалом.

Лазерная кварцевая кювета была помещена в цилиндрический осветитель. Окна кюветы были выполнены под углом Брюстера из стекла К8. Накачка активной среды осуществляется 20 откачными лампами, наполненными ксеноном при давлении 330 Torr и помещенными внутри осветителя. Вся конструкция крепилась на двух подставках высотой 950 mm. Для диэлектрической изоляции опорные детали были выполнены из капролона. Напуск ксенона в лампы происходил через разветвитель, соединенный с каждой лампой своим трубопроводом. Кювета посредством трубопроводов вентилей и клапанов подсоединена к системе откачки. В качестве рабочей смеси применялась смесь $n\text{-C}_3\text{F}_7\text{I}$ + аргон 1:10 при суммарном давлении 24 Torr. Данная смесь оптимальна по выходной энергии и однородности ближней зоны задающего генератора [7].

Эксперименты проводились в следующей последовательности: получение свободной генерации в резонаторе с угловым селектором в виде жесткой диафрагмы, получение свободной генерации в резонаторе с ПВМС.

2. Исследование характеристик излучения лазера с внутрирезонаторной модельной диафрагмой углового селектора

При постановке в фокальную плоскость линзы углового селектора модельной диафрагмы с

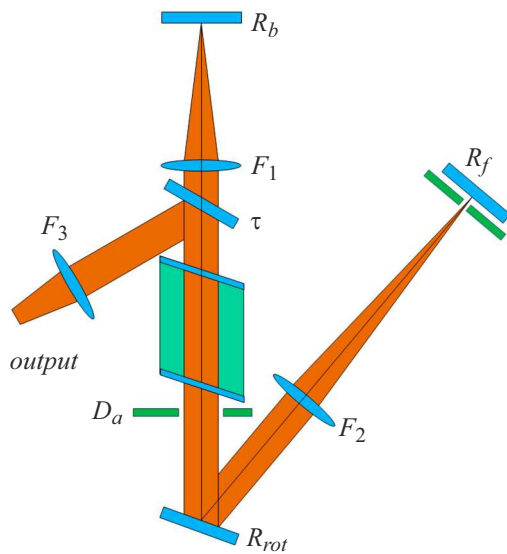


Рис. 1. Фотодиссоционный иодный лазер.

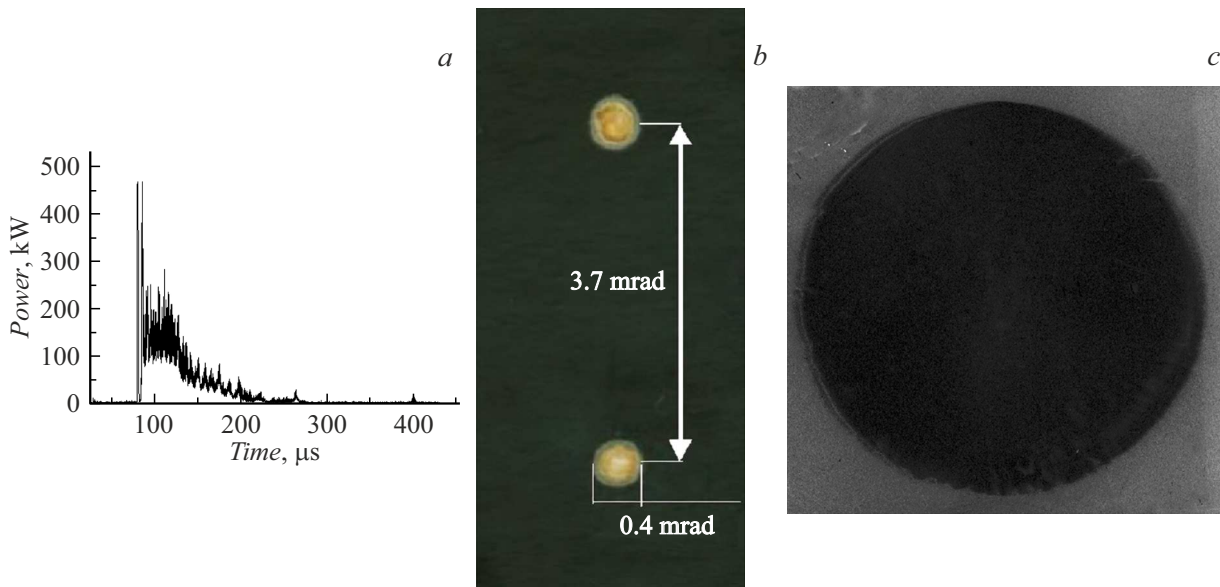


Рис. 2. Осциллограмма генерации (а), картина излучения в дальней зоне от двух последовательных импульсов при передвижении диафрагмы в фокальной плоскости линзы углового селектора (b) и картина излучения в ближней зоне (с).

диаметром $d = 4 \text{ mm}$ получена энергия генерации $E_{gen} = (11.0 \pm 0.3) \text{ J}$. Осциллограмма генерации приведена на рис. 2, а. По измеренной энергии генерации была определена запасенная в активной среде энергия и ее плотность в соответствии с соотношениями

$$E_{stor} = \frac{h\nu}{\sigma} S \ln\left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}\right) + \frac{E_{gen}}{R_{outp}} \left(1 - R_2 + (1 - R_1) \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}\right) = 41 \text{ J}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{stor} = E_{stor} \cdot \frac{4}{\pi D_a^2 L_a} = 10.4 \text{ mJ/cm}^3, \quad (2)$$

где $R_1 = 0.069$, $R_2 = 0.568$ — эффективные коэффициенты отражения заднего и переднего зеркал резонатора, $h\nu = 1.51 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ — энергия лазерного кванта, $R_{outp} = 0.6$ — эффективный коэффициент отражения выводящего зеркала, $E_{thresh} = \frac{h\nu}{\sigma} S \ln\left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}\right)$ — пороговая энергия развития генерации [8], $S = \frac{\pi D_a^2}{4}$ — площадь сечения активной среды, D_a — диаметр апертурной диафрагмы, L_a — активная длина кюветы, $\sigma = 4.69 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2$ — сечение усиления лазерной среды.

Для регистрации картин излучения в дальней и ближней зонах применялась дополнительная внерезонаторная

линза с фокусным расстоянием $F_3 = 5.12$ м (рис. 1) и калиброванный набор светофильтров. Отпечатки излучения в дальней зоне при передвижении диафрагмы углового селектора в крайние положения, разнесенные на $\Delta L = 37$ мм, ограничиваемые размером рабочего поля ПВМС $D_{STLM} = 40$ мм, регистрировались в виде ожогов на фотобумаге (рис. 2, *b*). Картина излучения в ближней зоне регистрировалась на ИК фотопленку (рис. 2, *c*).

Зависимость нормированной энергии от смещения диафрагмы от оси резонатора приведена на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что на краю рабочего поля, ограниченного размером ПВМС, спад энергии генерации составляет менее 11 %.

Внутрирезонаторное сканирование направления излучения лазера осуществлялось посредством передвижения квадратной диафрагмы 5×5 мм в фокальной плоскости линзы углового селектора с $F_2 = 10.02$ м без переюстировки резонатора. Картины излучения в дальней зоне представлены на рис. 4.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод, что все оптические элементы, входящие в резонатор, выдерживают лучевые нагрузки при энергии генерации ~ 10 J при сканировании всего поля зрения лазера [6]. Энергия генерации незначительно снижается при работе на краях рабочего поля ПВМС, что связано с эффектами виньетирования. Схема измерения углового распределения энергии излучения приведена на рис. 5.

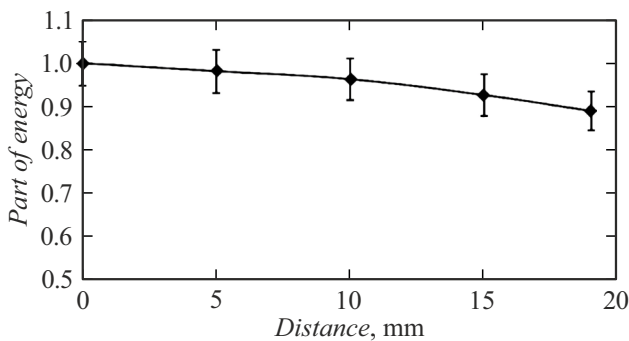


Рис. 3. Зависимость нормированной энергии от положения селектирующей диафрагмы по отношению к оси резонатора.

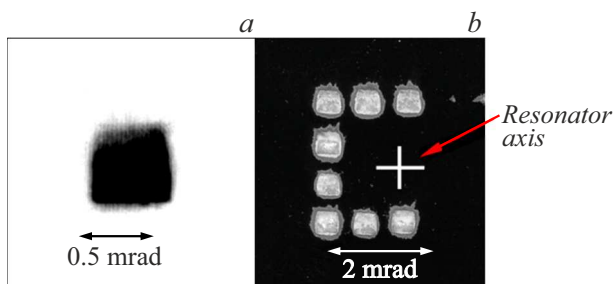


Рис. 4. Картины излучения в дальней зоне: *a* — одиночный импульс, *b* — восемь последовательных импульсов без переюстировки резонатора.

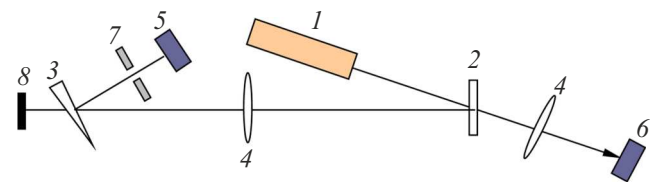


Рис. 5. Оптическая схема измерения углового распределения энергии: 1 — иодный лазер, 2 — светоделительное зеркало, 3 — клин, 4 — перестраивающие линзы, 5 — калориметр, 6 — опорный калориметр, 7 — квадратная диафрагма (2.5×2.5 мм, 7.5×7.5 мм), 8 — регистрация дальней зоны.

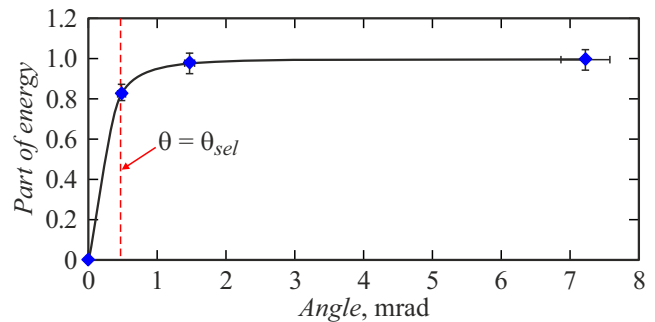


Рис. 6. Угловое распределение энергии генерации лазера с жесткой диафрагмой 5×5 мм углового селектора.

По результатам серии импульсов калориметры 5 и 6 прикалибровывались друг к другу. Затем перед калориметром 5 в фокальной плоскости линзы 4 устанавливались диафрагмы различного диаметра, и посредством измерений и пересчета определялась доля энергии, попадающая в определенный угол. Угловое распределение энергии генерации лазера с сопряженным резонатором и жесткой диафрагмой 5×5 мм в фокальной плоскости линзы углового селектора представлено на рис. 6.

По результатам измерений в угле, ограниченном размером углового селектора, лежит (83 ± 2) % энергии.

3. Исследование характеристик излучения иодного лазера с внутрирезонаторным ПВМС

Экспериментальное исследование работы иодного лазера проводилось по схеме, представленной на рис. 7. В резонатор лазера устанавливалась высококонтрастная схема ПВМС с двойным поворотом плоскости поляризации на 90° , состоящая из двух ортогональных полуволновых затворов [6]. Управление ПВМС осуществлялось блоком электронных ключей, аппаратно связанным с компьютером. Фотография внутрирезонаторного ПВМС приведена на рис. 8.

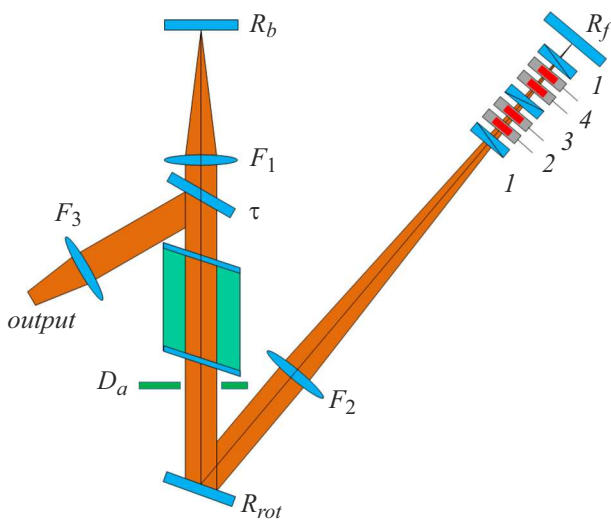


Рис. 7. Схема иодного лазера с внутрирезонаторным ПВМС: 1 — поляризаторы с азимутом пропускания $+45^\circ$, 2 — спаренные пластины из электрооптической керамики по координате x (четвертьволновое напряжение на каждой), 3 — поляризатор с азимутом пропускания -45° , 4 — спаренные пластины из электрооптической керамики по координате y (четвертьволновое напряжение на каждой).

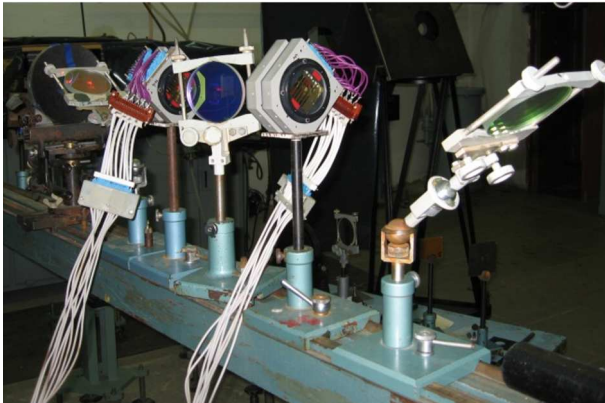


Рис. 8. Фотография ПВМС с двойным поворотом плоскости поляризации на 90° .

Оценка ожидаемой энергии генерации дает значение

$$E_{gen} = \frac{R_{out} \left(E_{stor} - \frac{h\nu}{\sigma} S \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \right)}{1 - R_2 + (1 - R_1) \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}} = 10.7 \text{ J}, \quad (3)$$

где $E_{stor} = 41 \text{ J}$ — запасенная энергия (см. формулу (1)), R_{out} — коэффициент отражения выводящего зеркала, $S = \frac{\pi D_a^2}{4}$ — площадь сечения активной среды с диаметром D_a , $\sigma = 4.69 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2$ — сечение усиления лазерной среды, R_1, R_2 — эффективные коэффициенты отражения переднего и заднего зеркал резонатора, определяемые по соотношениям

$$R_1 = \tau_0^2 R_{rot}^2 \tau_1^2 \tau_{O1}^2 R_f = 0.144, \quad (4)$$

$$R_2 = \tau_0^2 \tau_{out}^2 \tau_1^2 R_b = 0.0689, \quad (5)$$

$$R_{outp} = \tau_0 R_{out} = 0.599, \quad (6)$$

где R_b, R_f — коэффициенты отражения заднего и переднего зеркал резонатора (см. таблицу), $\tau_{O1} = 0.503$ — пропускание ячейки ПВМС, $\tau_0 = 0.921$ — пропускание окна кюветы, $\tau_1 = 0.909$ — пропускание линзы, $R_{rot} = 0.96$ — коэффициент отражения поворотного зеркала, $R_{out} = 0.65$, $\tau_{out} = 0.32$ — коэффициент отражения и пропускания выходного зеркала.

Всего проведено порядка 350 экспериментов с открытием различных ячеек во всем рабочем поле ПВМС. Средняя энергия генерации составила $E_{gen} = (9.1 \pm 0.7) \text{ J}$, что близко к расчетному значению.

Были проведены измерения доли энергии, лежащей в различных углах регистрации. Оптическая схема расположения калориметров аналогична показанной на рис. 5. Угловое распределение энергии излучения лазера с сопряженным резонатором, содержащим ПВМС с двойным поворотом плоскости поляризации на 90° , представлено на рис. 9.

По результатам измерений в угле, ограниченном размером углового селектора, лежит $(81 \pm 3) \%$ энергии.

Осциллограмма генерации представлена на рис. 10. На рис. 11 представлены картины излучения при последовательном включении ячеек ПВМС в нескольких опытах.

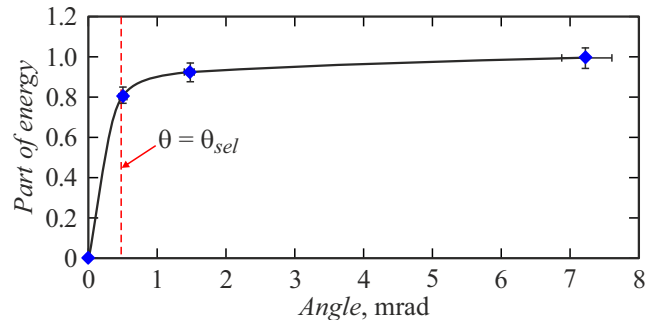


Рис. 9. Угловое распределение энергии излучения лазера с сопряженным резонатором, содержащим ПВМС с двойным поворотом плоскости поляризации на 90° .

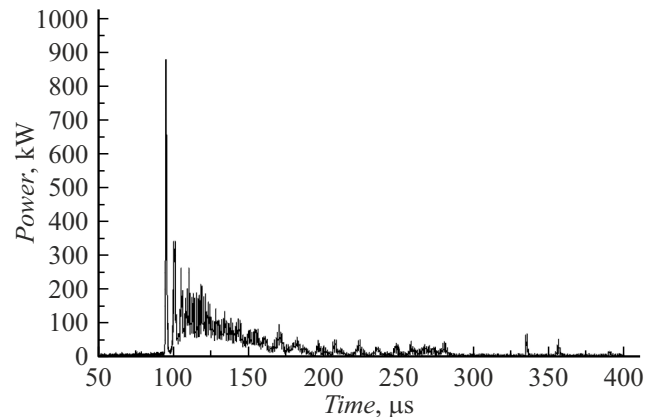


Рис. 10. Осциллограмма генерации лазера.

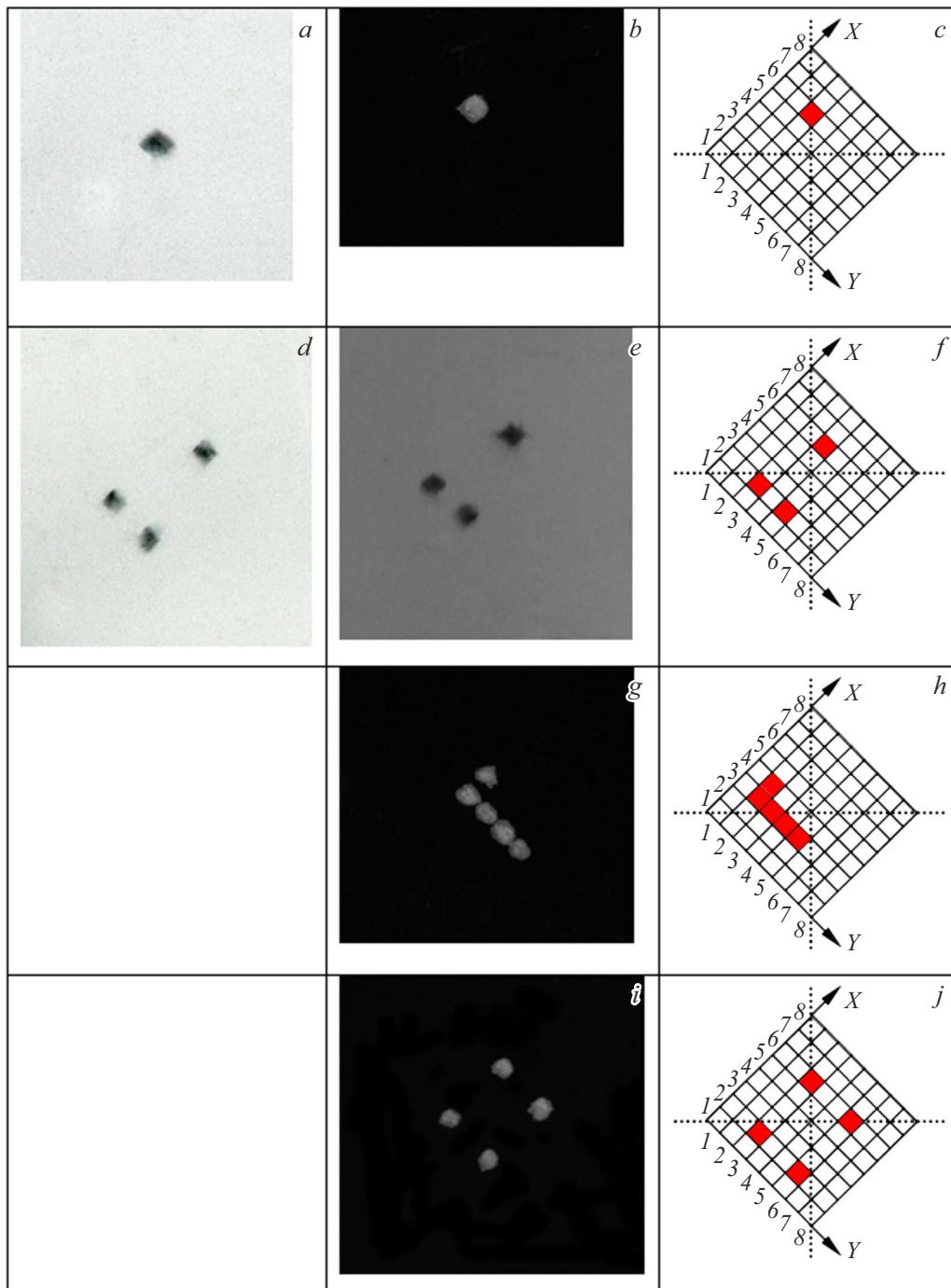


Рис. 11. Распределения плотности почернения или ожогов в дальней зоне при включении различных ячеек ПВМС.

В результате фотометрирования изображений *d* и *e* (рис. 11) получено значение пространственного контраста $\gamma \approx 625$ включенной ячейки ПВМС по отношению к остальному рабочему полю. Средняя интенсивность лазерного излучения на ПВМС в приближении баланса встречных волн в резонаторе составила

$$I = \frac{E_{gen}}{t} \sqrt{\frac{R_1}{R_2} \frac{\tau_0 \tau_l R_{rot}}{R_{out} S_c}} = 4.3 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2, \quad (7)$$

где $R_1 = 0.144$, $R_2 = 0.0689$ — эффективные коэффициенты отражения заднего и переднего зеркал резонатора, $\tau_0 = 0.921$ — пропускание окна кюветы, $\tau_l = 0.909$ — пропускание линзы, $R_{rot} = 0.96$ — коэффициент отражения поворотного зеркала, $R_{out} = 0.65$ — коэффициент отражения выходного зеркала, t — длительность генерации, $S_c = 0.25 \text{ cm}^2$ — площадь элементарной ячейки ПВМС.

Наибольшее пиковое значение мощности генерации лазера с управляемой ПВМС диаграммой направленности

сти составило $P_{\max} = 878 \text{ kW}$ (рис. 10) и максимальная интенсивность падающего на ПВМС излучения достигала

$$I_{\max} = P_{\max} \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \frac{\tau_0 \tau_1 R_{\text{rot}}}{R_{\text{out}} S_c} = 6.8 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2. \quad (8)$$

Полученное значение максимальной интенсивности излучения на элементах ПВМС не превышает порога разрушения просветляющего диэлектрического покрытия на электрооптической керамике, который составляет $I_{\text{mod}}^{\text{bloom}} \approx 10^7 \text{ W/cm}^2$.

Выводы

Таким образом, в результате исследований создан мощный фотодиссоционный иодный лазер с управляемой диаграммой направленности и экспериментально показано, что постановка ПВМС в резонатор позволяет получить выходное излучение с пространственным контрастом $\gamma \approx 625$. Выходная энергия лазера составила $(9.1 \pm 0.7) \text{ J}$ при расходимости излучения $5 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$ и длительности импульса генерации $175 \mu\text{s}$. Отметим, что данные результаты получены в условиях лучевых нагрузок, близких к тем, которые реализуются в задающем генераторе на основе кварцевого варианта ВФДЛ [9,10].

Фотодиссоционный иодный лазер с электроуправляемым ПВМС, благодаря простоте сопряжения с компьютером или специализированным микропроцессором, может найти широкое применение в задачах локации объектов и в различных технологических установках [3,11]. Описанный лазер с внутрирезонаторным управлением диаграммой направленности может быть использован в качестве задающего генератора лазерных систем, в том числе и с устройствами обращения волнового фронта [2,12].

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.А. Васильев, Д. Касасент, И.Н. Компанец, А.В. Парфенов. *Пространственные модуляторы света* (Радио и связь, М., 1987)
- [2] В.Н. Алексеев, Д.И. Дмитриев, А.Н. Жилин, В.И. Решетников, А.Д. Стариков. *Квантовая электроника*, **21** (8), 753 (1994).
- [3] В.Н. Алексеев, В.Н. Котылев, В.И. Либер. *Квантовая электроника*, **27** (3), 233 (1999).
- [4] В.Н. Алексеев, В.И. Либер, А.Д. Стариков. Патент РФ №2040090 (1995).
- [5] Г.Н. Качалин, А.Ф. Шкапа. *Сборник докладов второй научной конференции „Молодежь в науке“* (Саров, 2003), с. 437–440.
- [6] Г.Н. Качалин, С.Н. Певный, Д.Н. Пивкин, А.С. Сафронов. *Квантовая электроника*, **42** (7), 677 (2012).
- [7] А.М. Дудов, С.М. Куликов, А.В. Ряднов, А.Б. Смирнов, С.А. Сухарев. *Сборник тезисов докладов второго всесоюзного симпозиума по радиационной плазмодинамике* (М., 1991), ч. 3, с. 114–115.
- [8] Г. Бредерлов, Э. Филл, К. Витте. *Мощный иодный лазер* (Энергоатомиздат, М., 1985)
- [9] В.П. Аржанов, Б.Л. Борович, В.С. Зуев, В.М. Казанский, В.А. Катулин, Г.А. Кириллов, С.Б. Кормер, Ю.В. Куратов, А.И. Куряпин, О.Ю. Носач, М.В. Сеницин, Ю.Ю. Стойлов. *Квантовая электроника*, **19** (2), 118 (1992).
- [10] S.G. Garanin, Y.V. Dolgoplov, G.N. Kachalin, A.V. Kopalkin, S.M. Kulikov, S.N. Pevnyi, F.A. Starikov, S.A. Sukharev. *Quant. Electron.*, **52** (3), 289 (2022).
- [11] В.Н. Алексеев. *Экологические вести №6. Специальный выпуск работ стипендиатов именных научных стипендий Губернатора Ленинградской области за 2002–2004 г. „Экологическая безопасность хранения радиоактивных отходов“*.
- [12] В.Н. Алексеев, Д.И. Дмитриев, В.И. Решетников. *Квантовая электроника*, **18** (1), 111 (1991).