

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ СКАНИРУЮЩЕГО ЛАЗЕРА С АКТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ $YAG:Nd^{3+}$ ПРИ ЕГО НАКАЧКЕ ЛИНЕЙКАМИ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ И ЧАСТОТЕ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ ДО 400 ГЦ

© 2009 г. В. Н. Алексеев, канд. физ.-мат. наук; В. Н. Котылев, канд. физ.-мат. наук; В. И. Либер

Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

E-mail: av@sbor.net

Приведены результаты исследования характеристик излучения лазера на  $YAG:Nd$  с внутривибраторным сканированием излучения с помощью электроуправляемого пространственно-временного модулятора света на основе прозрачной электрооптической керамики ЦТСЛ (цирконат-титанат свинца, легированный лантаном) и лазерной диодной накачки активного элемента при частоте следования импульсов до 400 Гц. Показано, что двулучепреломление и тепловая линза в активном элементе начинают сказываться на работе лазера при частоте следования 300 Гц.

*Ключевые слова:* внутривибраторное сканирование излучения, электрооптическая керамика, лазерная диодная накачка.

Коды OCIS: 140.3480, 140.5960

Поступила в редакцию 05.03.2009

### Введение

В работах [1–4] авторами настоящей статьи сообщалось о реализации лазеров с внутривибраторным электроуправляемым сканированием лазерного излучения на основе  $YAG:Nd^{3+}$ , лазера на парах меди и DF-лазера с помощью пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) на основе электрооптической керамики ЦТСЛ. Как ранее отмечалось, преимуществом метода внутривибраторного сканирования излучения является отсутствие двигающихся оптико-механических узлов. Основным достоинством ПВМС на основе ЦТСЛ является высокое быстродействие, высокий электрооптический отклик, большая лучевая прочность и широкий спектральный диапазон прозрачности (0,5–6,5 мкм). В работе [1] показана возможность получения высокочастотных пакетов импульсов излучения (до 100 кГц) в различных направлениях поля зрения лазера. ПВМС обеспечивает непрерывную работу лазера на частоте нескольких кГц. Использование лазерной диодной накачки, обеспечивающей большую частоту следования импульсов, позволяет более полно использовать возможности ПВМС.

В работе приведены результаты исследований однокоординатного сканирования излучения

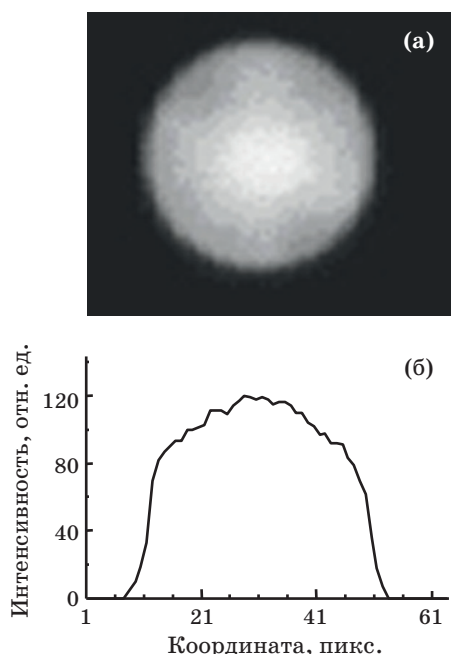
лазера, а также результаты исследования временных, угловых и энергетических характеристик излучения.

### Квантрон лазера и исследование усиления

Накачка активного элемента (диаметр 3,5 мм) осуществляется 6 стоваттными линейками лазерных диодов фирмы СЕО. Линейки расположены по две в линию с трех сторон от зеркально покрытой трубки диаметром 6 мм. Излучение линеек вводится через узкую щель в покрытии трубки и попадает на активный элемент. Длина активного элемента 54 мм, но освещается примерно 25 мм активного элемента (длина одной линейки 10 мм) в его центре. Перед проведением экспериментов было исследовано усиление квантрона и распределение в нем запасенной энергии. Для измерения интегрального по сечению усиления использовалась стандартная методика – измерение усиления слабого сигнала непрерывного лазера на один проход. Измерения проводились при 19–20 °С и импульсах тока 89 А, на частотах 1, 5 и 200 Гц при токе 88 А. Усиление на проход составило  $G = 2,3$ . Зависимости усиления от частоты не обнаружено. Было также измерено усиление по порогу генерации. Методика изме-

рений – введение в резонатор фиксированных потерь до исчезновения генерации. Наличие генерации вблизи порога дополнительно контролировалось прибором ночного видения и с помощью фотодиода и осциллографа. Усиление на пороге генерации определяется как  $G = [1/(R_1 R_2 T_1^2 T_2^2)]^{0,5}$ , где –  $R_1$  и  $R_2$  отражение зеркал резонатора,  $T_1$  и  $T_2$  – пропускание внутрирезонаторных элементов. Генерация не прекратилась при выходном зеркале с отражением  $R_2 = 87\%$  и с введенным в резонатор наклоненным зеркалом с  $R = 50\%$  ( $T_1 = 0,5$ ) и пластиной из стекла К8 ( $T_2 = 0,92$ ). Таким образом, усиление, полученное на пороге генерации, превышает  $G = 2,33$ , что близко совпадает с результатами измерения усиления на проход.

Энергия импульса генерации, измеренная с помощью калориметра ИКТ-1М в плоском коротком резонаторе в режиме свободной генерации, равна 30 мДж, энергия моноимпульсной генерации с кристаллом LiF ( $T_n = 60\%$ ) равна 4 мДж, энергия моноимпульсов с электрооптическим затвором – 15 мДж при частоте следования 200 Гц. Измерение распределения инверсной населенности в активном элементе проводилось с помощью фотографирования торца активного элемента на ПЗС матрицу цифровой камеры,



**Рис. 1.** Фотография распределения люминесценции в поперечном сечении активного элемента (а) и зависимость интенсивности излучения люминесценции в относительных единицах от номера пиксела ПЗС матрицы камеры (б).

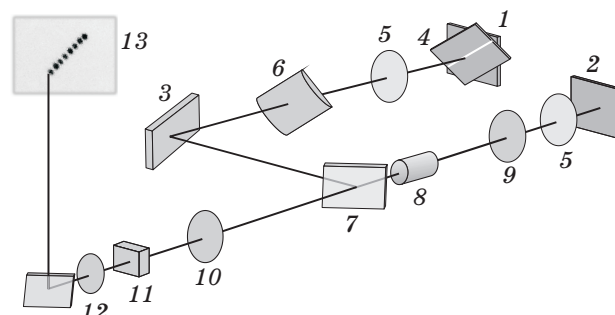
управляемой компьютером, за фильтром ИКС-7, который отсекал излучение накачки с длиной волны 0,808 мкм. Фотография распределения приведена на рис. 1а, а распределение интенсивности люминесценции – на рис. 1б.

Как видно из рисунка, распределение инверсии имеет максимум вблизи оси активного элемента.

Произведение тока, прошедшего через линейку лазерных диодов накачки, на напряжение дает электрическую мощность накачки. Она равна 1082 Вт. Учитывая, что КПД лазерных диодов в импульсном режиме 53%, находим, что импульсная световая мощность равна 574 Вт.

### Схема резонатора и результаты исследования характеристик излучения

Схема использованного резонатора приведена на рис. 2. В сопряженном резонаторе используется сферическая и цилиндрическая линзы [5, 6], а также поляризационный вывод излучения. Использование такой схемы позволяет увеличить выходную энергию лазерного импульса излучения до 10 мДж при длительности 200–250 нс. На базе данной схемы с ламповой накачкой был создан промышленный маркер [6, 7], позволяющий дистанционно (до 3–5 м) маркировать движущиеся на конвейере изделия. Использование импульса накачки с длительностью 1 мс позволило излучать сразу 7 импульсов генерации по одной координате и изображать на объекте символ за 1 с



**Рис. 2.** Схема лазера с диодной лазерной накачкой и внутрирезонаторным управлением диаграммы направленности. 1, 2, 3 – 100% зеркала резонатора, 4 – пластина ПВМС, 5 – фазовые четвертьволновые пластинки, 6, 9 – линзы резонатора  $f = 50$  см, 7 – поляризатор, 8 – активный элемент, 10 – линза  $f = 50$  см, 11 – кристалл КТР, 12 – линза  $f = 15$  см, 13 – экран.

при частоте следования импульсов накачки 5 Гц, т. е. частота следования импульсов генерации была равна 35 Гц. Второй координатой являлось движение объекта маркировки. Для реализации возможности маркировки неподвижных изделий использовалось дополнительное зеркало, управляемое шаговым двигателем.

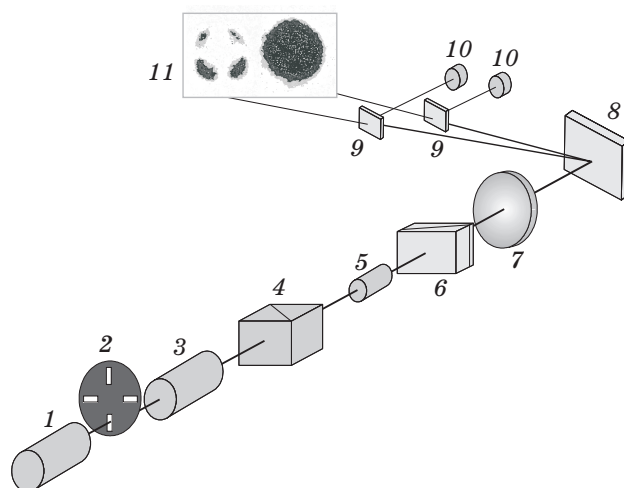
Использование диодной накачки активного элемента позволяет на порядок увеличить быстроедействие маркера.

При длительности импульса накачки 280 мкс были получены импульсы излучения с длительностью 200 нс с энергией 6–8 мДж. Путем регулировки напряжения на ПВМС получены по три импульса излучения в течение одного импульса накачки с интервалом 40 мкс и с энергией 2–3 мДж. Получена генерация на 22 пикселях ПВМС (столько пикселей помещалось на апертуре кристалла преобразователя во вторую гармонику КТР\*) с частотой следования до 250 Гц. При больших частотах повторения импульсов (300–350 Гц) генерация становилась нестабильной (генерировали только отдельные пиксели) и она исчезала совсем. Причиной исчезновения генерации может быть как тепловая линза, так и деполяризация излучения за счет возникновения наведенной анизотропии, вызванной термооптическими искажениями в активном элементе.

Результаты измерения фокусного расстояния тепловой линзы активного элемента следующие:  $F = 2,5$  м (частота 100 Гц), 1,66 м (200 Гц) и 1,2 м (300 Гц). Тепловую линзу легко учесть, используя матрицу теплового градана [8] и рассчитав новые параметры сопряженного резонатора, как это сделано в работе [1] для случая непрерывной ламповой накачки. При установке зеркала 2 резонатора на расстоянии  $\approx 30$  см от линзы, тепловая линза была скомпенсирована, и на частоте 300 Гц получена устойчивая генерация практически с такой же энергией импульсов генерации, как и в однократном импульсном режиме. Поляризатор 7 имеет малую величину  $R_p \approx 1\%$ , а деполяризованное излучение выводится из резонатора вместе с полезным излучением и его трудно измерить. Поэтому зависимость деполяризации излучения от частоты следования импульсов исследовалась в схеме, показанной на рис. 3.

Излучение He-Ne-лазера расширялось с помощью теодолита и приходило на активный элемент через призму Глана. За активным элементом был установлен поляризатор клина из исландского шпата с клином из стекла К8, компенсирующим

\* КТР – кристалл титанил-фосфата калия.



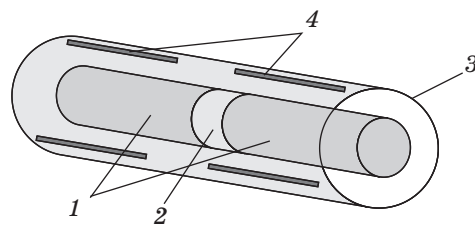
**Рис. 3.** Схема исследования деполяризации излучения в активном элементе. 1 – He-Ne-лазер, 2 – механический прерыватель пучка, 3 – теодолит для расширения пучка, 4 – призма Глана, 5 – активный элемент, 6 – клин из исландского шпата с клином из стекла К8 для отклонения необыкновенного луча, 7 – линза для передачи изображения торца активного элемента на экран, 8, 9 – зеркала, 10 – фотодиоды ФД24К, 11 – пучки на экране.

отклонение обыкновенного луча, при отклонении необыкновенного луча в сторону. При отсутствии накачки активный элемент имел малую степень деполяризации. Интенсивность необыкновенного луча составляет 0,2% от падающего. До частоты следования импульсов 100 Гц доля деполяризованного излучения незначительно увеличивается, а при изменении частоты от 100 до 350 Гц она достигает 7% от падающего излучения за один проход активного элемента. Распределение интенсивности деполяризованного излучения имеет вид “креста”. Такое же распределение наблюдалось авторами в работе [9], посвященной изучению деполяризации в лазерах с активными элементами из неодимового стекла для распределения температурного поля по параболическому закону. Активный элемент с точки зрения поляризации начинает представлять собой фазовую пластинку с переменными по сечению направлениями главных осей и фазовым сдвигом, зависящим от текущего радиуса точки в активном элементе. В областях вертикального и горизонтального диаметров цилиндрического активного элемента азимут поляризации падающего света близок к главным осям фазовых пластинок. Состояние поляризации падающего на активный элемент излучения не изменяется, поэтому в этих зонах отсутствует деполяризо-

ванное излучение и возникает темный крест в картинке ближнего поля деполяризованного компонента. Для аморфных материалов и YAG (при  $Z \parallel [111]$ ) главные оси фазовых пластинок совпадают с направлениями главных напряжений в данной точке, а фазовый сдвиг определяется разностью нормальных напряжений в данной точке [10]. Используя полученную в предыдущей работе авторов [9] или в работе [10] матрицу активного элемента Джонса, можно произвести количественные оценки деполяризации. В работе [9] это сделано для случая плоского и телескопического неустойчивого резонатора. Отметим, что сопряженный резонатор близок к случаю плоского резонатора.

Таким образом, из проведенных исследований лазера с управляемой диаграммой направленности с диодной накачкой следует, что деполяризация излучения, вызванная анизотропией активного элемента вследствие стоксовых потерь, начинает заметно влиять на работу лазера при средней мощности оптической накачки  $P = P_u \tau_u f \approx 49$  Вт, где  $P_u$  – импульсная мощность накачки (580 Вт),  $\tau_u$  – длительность импульса накачки ( $0,28 \times 10^{-3}$  с),  $f$  – частота следования импульсов ( $300 \text{ с}^{-1}$ ). И если тепловую линзу можно скомпенсировать расстоянием между линзами сопряженного резонатора, то деполяризацию можно устранить только улучшением равномерности накачки или уменьшением стоксовых потерь (приблизив длину волны излучения лазерных диодов накачки к длине волны генерации, что не всегда возможно). Использование активного элемента в виде набора дисков, установленных под углом Брюстера, позволит существенно увеличить частоту следования импульсов лазера. На это указывают результаты работы авторов настоящей статьи [11] и работы [10], в которых показано, что в таких активных элементах достигается высокая равномерность накачки, а небольшой градиент температур между поверхностями дисков компенсируется практическим совпадением хода излучения и градиента температур.

В двухпроходных двухкаскадных усилителях возможно использование  $90^\circ$  вращающейся пластины между каскадами для устранения деполяризации [12]. В исследуемом резонаторе устранить деполяризацию можно, используя пару идентичных квантронов с  $90^\circ$  вращающейся пластиной между ними. В этом случае фазовую пластинку 9 нулевого порядка (рис. 2) необходимо устанавливать со стороны поляризатора перед квантронами и учитывать, что пластинка

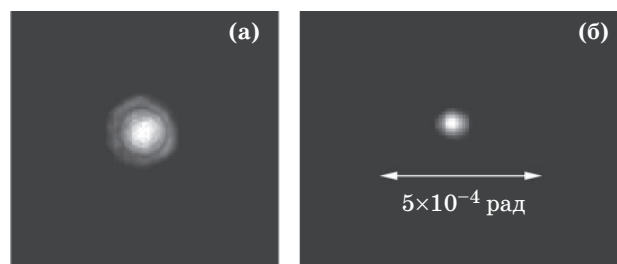


**Рис. 4.** Конструкция активного элемента с компенсацией термооптических искажений. 1 – цилиндрические активные элементы, 2 –  $90^\circ$ -вращатель из кварца, 3 – прозрачная трубка с зеркальным покрытием, 4 – линейки лазерных диодов.

работает в поле сканирования, не превышающем  $1,5^\circ$ . Неудобство данной схемы заключается в уменьшении поля зрения сканирования. Одним из достоинств поперечной диодной накачки является возможность пространственного разнесения линеек лазерных диодов вдоль активного элемента. Появляется возможность использования секционированного активного элемента (рис. 4) без снижения эффективности осветителя. Удобно разместить между секциями активного элемента также и внутрирезонаторную апертурную диафрагму. Размещение ее в центре активного элемента почти в два раза увеличивает поле сканирования лазера.

Для длины волны  $1,064$  мкм толщина  $90^\circ$ -вращателя из кварца примерно равна  $14$  мм, что может быть не всегда удобным. Как следует из анализа матриц Джонса, еще одним элементом, эквивалентным  $90^\circ$  вращающейся пластине (оптическая активность), является комбинация двух четвертьволновых пластинок, оси  $Z$  которых ортогональны и ориентированы под углом  $45^\circ$  к азимуту максимального пропускания поляризатора. Достоинством их является малая толщина ( $1-2$  мм).

На рис. 5 приведено ближнепольное и дальнепольное распределение пучка, полученное на выходе лазера с диафрагмой  $2,5$  мм в резонаторе.



**Рис. 5.** Ближнепольное (а) и дальнепольное (б) распределение пучка на выходе лазера.

## Заключение

Исследованы характеристики лазера с внутрирезонаторным сканированием, активный элемент которого накачивается линейками лазерных диодов. Экспериментально показано, что при частоте следования импульсов 300 Гц деполяризация излучения начинает влиять на работу лазера. Установлен параболический вид теплового поля в активном элементе. Предложены варианты устранения двулучепреломления в активном элементе.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить А.Д. Старикова за поддержку данной работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев В.Н., Котылев В.Н., Либер В.И.* Исследование характеристик излучения YAG:Nd-лазера с внутрирезонаторным пространственно-временным модулятором света на основе электрооптической керамики ЦТСЛ // Квант. электрон. 1999. Т. 27. № 3. С. 233–238.
2. *Alekseev V.N., Blinov S.V., Vitsinskii S.A., Divin V.D., Isakov V.K., Kotylev V.N., Liber V.I., Lovchii I.L.* Cu-vapor laser with intracavity radiation scanning by STLM based on PLZT ceramics // Journal of Russian Laser Research. 1996. V. 17. P. 418–421.
3. *Алексеев В.Н., Котылев В.Н., Либер В.И., Фомин В.М.* Исследование внутрирезонаторного сканирования излучения электроразрядного DF-лазера // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 4. С. 15–19.
4. *Алексеев В.Н., Котылев В.Н., Либер В.И.* Двухкоординатное управление диаграммой направленности химического нецепного электро-разрядного DF-лазера с помощью пространственно-временных модуляторов света // Квант. электрон. 2008. Т. 38. № 7. С. 670–672.
5. *Алексеев В.Н., Либер В.И.* Сканирующий лазер // Патент РФ № 2142664. 1998.
6. *Alekseev V., Kotilev V.N., Liber V.I.* YAG:Nd scanning laser with intracavity PLZT-based spatiotemporal light modulator // Proc. SPIE. 2003. V. 5123. “Advanced optical devices”. P. 22–24.
7. *Алексеев В.Н.* Лазерный маркер упаковок с радиоактивными веществами // Экологические вести № 6. Специальный выпуск работ стипендиатов именных научных стипендий Губернатора Ленинградской области. 2002–2004 г. “Экологическая безопасность хранения радиоактивных отходов”.
8. Справочник по лазерам / под ред. Прохорова А.М. М.: Советское Радио, 1978. Т. 2. С. 12.
9. *Алексеев В.Н., Горохов А.А.* Энергетические и поляризационные характеристики ОКГ на неодимовом стекле при использовании плоского и неустойчивого резонаторов // Квант. электрон. 1975. Т. 2. № 4. С. 733–737.
10. *Мезенов А.В., Сомс Л.Н., Степанов А.И.* Термооптика твердотельных лазеров // Л.: Машиностроение, Л. О., 1986. 199 с.
11. *Алексеев В.Н., Мак А.А., Пивинский Е.Г., Седов Б.М., Стариков А.Д., Цветков А.Д.* Оконечные дисковые усилительные каскады // Квант. электрон. 1978. Т. 5. № 11. С. 2369.
12. *Мак А.А., Сомс Л.Н., Фромзель В.А., Яшин В.Е.* Лазеры на неодимовом стекле. М.: Наука, 1990. 288 с.