

ЛАЗЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ С БЕЗОПАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ

*Докт. физ.-мат. наук, проф. КРУГЛИК Г. С., докт. физ.-мат. наук СТАВРОВ А. А.,
инж. ПОЗДНЯКОВ М. Г.*

Белорусский национальный технический университет

Способы реализации пригодного для импульсной дальнометрии и одновременно безопасного для органов зрения лазерного излучения могут базироваться практически лишь на двух обстоятельствах: снижении энергетических параметров генерируемого светового потока и вариации его спектрального состава. Очевидно, что при прочих равных условиях уменьшение интенсивности лоцирующих оптических сигналов неизбежно приводит к снижению главного параметра импульсного лазерного дальномера (ИЛД) – дальности его действия. Причем попытки компенсировать данное снижение наращиванием чувствительности приемного тракта имеют принципиальные ограничения, обусловленные внутренними шумами ФПУ и внешними (фоновыми) засветками. По этим причинам весьма перспективным представляется путь, связанный с переходом к лазерным источникам излучения, генерирующим в спектральном диапазоне 1,5...1,6 мкм [1].

Один из эффективных способов реализации лазерного излучения в данном диапазоне длин волн – метод нелинейного оптического преобразования света [2]. При этом наибольший практический интерес представляют твердотельные нелинейные среды, обеспечивающие максимальную стойкость аппаратуры к внешним воздействующим факторам, характерным для условий эксплуатации ИЛД.

При использовании оптической среды, обладающей кубической нелинейностью, возможна реализация вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР-преобразования) света в кристаллах $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, NaNO_3 , CaCO_3 , $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ и др. [3]. Одним из наиболее эф-

фективных твердотельных ВКР-преобразователей является кристалл $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, частота собственных колебаний которого составляет 1046 см^{-1} . Длина волны излучения 1,54 мкм реализуется с помощью данного кристалла при возбуждении его лазерным излучением с $\lambda = 1,32 \text{ мкм}$.

В наших экспериментах использовался лазер накачки с плоскопараллельным резонатором, образованным широкополосными зеркалами, и затвором, использующим эффект нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Активный элемент из кристалла ИАГ: Nd^{3+} размером $\text{Ø}5 \times 50 \text{ мм}$ возбуждался излучением импульсной лампы типа ИИП-5/60. В качестве спектрального селектора использовалась пластинка толщиной 3 мм, изготовленная из стекла, имеющего полосу поглощения в спектральной области 1,05...1,08 мкм и прозрачного для $\lambda = 1,32 \text{ мкм}$. Энергия $E_{\text{ген}}$, генерируемая лазером накачки, составляла до 55 мДж в импульсе при длительности импульсов 20 нс и расходимости излучения 1,5 мрад.

Излучение лазера накачки ($E_{\text{лн}} = E_{\text{ген}}$) с помощью линзы, имеющей фокусное расстояние 0,2 м, концентрировалось в центре преобразователя. Длина кристалла $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ была равна 80 мм. Пороговая энергия возбуждения ВКР составляла 6 мДж. На рис. 1 представлены результаты экспериментов.

При работе лазера в режиме однократных импульсов КПД преобразования составлял от 23,5 ($E_{\text{лн}} = 17 \text{ мДж}$) до 32,7 % ($E_{\text{лн}} = 55 \text{ мДж}$). При частоте следования импульсов $F = 12,5 \text{ Гц}$ и $E_{\text{лн}} = 40 \text{ мДж}$ величина КПД была равна 30 %. Повышение частоты следования до 25 Гц при-

водило к снижению КПД в связи с ростом расходимости излучения накачки. Сохранение эффективности преобразования излучения в импульсно-периодическом режиме возможно путем компенсации термической линзы, формирующейся в активном элементе лазера накачки.

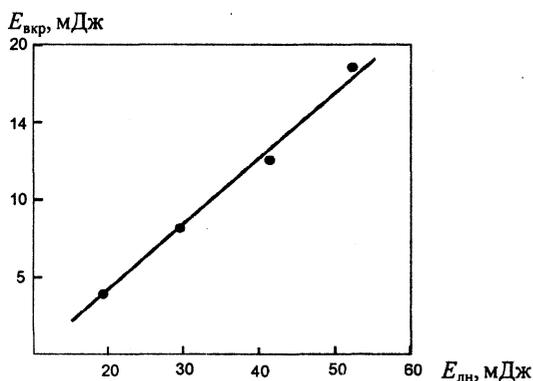


Рис. 1. Энергетические характеристики ВКР-преобразователя на основе кристалла $Va(NO_3)_2$: $E_{лн}$ – энергия накачки ($\lambda = 1,32$ мкм); $E_{вкр}$ – преобразованная энергия ($\lambda = 1,54$ мкм)

Достаточно высокий КПД генерации, достигнутый с ВКР-преобразователем, а также возможность реализации при этом весьма высокой частоты следования импульсов свидетельствуют о перспективности использования данного метода при создании источника безопасного излучения с приемлемыми энергетическими характеристиками для ИЛД. Однако относительно небольшой КПД генерации лазера накачки на спектральном переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$ обеспечивает сквозной КПД лазера с каскадом преобразования, не превышающий 0,05 %. В этой связи представляет интерес исследование альтернативного нелинейного способа реализации излучения требуемого спектрального состава – параметрической генерации света (ПГС) [2].

ПГС возможна в оптических средах, обладающих квадратичной нелинейностью. При этом КПД преобразования может достигать 50...60 % [4]. В настоящее время известно значительное число оптических кристаллических сред, обеспечивающих данный процесс, однако одним из наиболее перспективных признается кристалл $KTiOPO_4$ (КТР) [5]. Он обладает как высокими значениями нелинейных коэффициентов, так и повышенной стойкостью к излучению накачки. Кроме того, такой кристалл работоспособен в условиях некритичного фазового

синхронизма, что весьма важно с точки зрения его эксплуатационных характеристик: данное качество позволяет существенно снизить требования к источнику накачки. При использовании для накачки ПГС неодимсодержащего лазера с $\lambda = 1,06$ мкм может быть получено излучение с длиной волны 1,57 мкм.

В наших исследованиях использовались лазеры накачки с неодимсодержащими кристаллами типов КГВ и ИАГ. Первый из них характеризуется повышенной (до 10 %) концентрацией ионов Nd^{3+} при сохранении хорошего оптического качества и высокими теплофизическими характеристиками. Это позволяет существенно снизить энергию возбуждения лампы накачки и в ряде случаев отказаться от жидкостной системы охлаждения излучателя. Использование такого кристалла способствует росту КПД генерации и миниатюризации конструкции источника излучения. Второй кристалл способен обеспечивать практически все известные в настоящее время режимы генерации, в том числе имеющий важное значение для лазерной дальнометрии импульсно-периодический режим.

Характеристики лазера накачки на основе КГВ: Nd^{3+} составили: энергия генерации $E_{ген} = E_{лн} = 36$ мДж, КПД генерации – 0,9 %, длительность импульса – 6...7 нс, расходимость излучения – 6,5 мрад. Они обеспечивались активным элементом $\varnothing 4 \times 50$ мм, возбуждаемым лампой накачки типа ИНПЗ-3/45А. Резонатор состоял из глухого сферического зеркала с радиусом кривизны 1 м и плоского выходного с коэффициентом отражения $R = 0,4$. Длина резонатора составляла 180 мм. Модуляция добротности осуществлялась малочувствительным к температуре двухэлементным электрооптическим затвором, выполненным из кристалла $LiTaO_3$.

Излучение накачки через прозрачное для $\lambda = 1,06$ мкм (и глухое для $\lambda = 1,57$ мкм) зеркало параметрического генератора направлялось непосредственно на кристалл КТР размером $5 \times 5 \times 15$ мм³ без применения фокусирующих элементов. Длина резонатора ПГС составляла 40 мм. Второе (выходное) зеркало резонатора ПГС было полупрозрачным для преобразованного излучения. В процессе экспериментов использовались выходные зеркала с коэф-

коэффициентами отражения 0,74, 0,81 и 0,86. Максимальная энергия $E_{\text{пгс}}$, равная 14,6 мДж, получена с первым из них. При этом КПД преобразования достигал 41 %, а расходимость излучения – 8 мрад. Для других значений R величина $E_{\text{пгс}}$ была равна соответственно 12,5 и 11,2 мДж.

Исследования показали также, что допустимое время непрерывной работы такого лазера (без системы принудительного охлаждения) составляет до 4...5 мин при $F = 1$ Гц и около 1...2 мин при $F = 2$ Гц. Критерием служило изменение величины $E_{\text{пгс}}$, не превышающее 10 %. Последующее падение $E_{\text{пгс}}$ обусловлено в основном снижением параметров лазера накачки: нагрев в тепловой камере кристалла КТР изменений в коэффициент преобразования излучения практически не вносил. Несмотря на заметную зависимость генерационных параметров лазера накачки от температуры, его использование в составе ИЛД при относительно небольших тепловых нагрузках (например, в режиме генерации однократных импульсов) весьма перспективно. Кроме того, такой лазер достаточно миниатюрен и имеет относительно небольшое энергопотребление.

Один из лазеров накачки на основе ИАГ:Nd³⁺ содержал активный элемент Ø4×65 мм, размещенный в плоскопараллельном резонаторе, и лампу накачки типа ИНПЗ-3/45А. Выходное зеркало резонатора имело коэффициент отражения $R \approx 0,2$. Использовались те же блок возбуждения лампы накачки и электрооптический затвор, которые применялись в лазере на основе КГВ:Nd³⁺. Наличие в составе лазера одноконтурной (накопительной) жидкостной системы охлаждения позволяло реализовать его устойчивую работу в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов до 10 Гц в течение 1,5...2 мин. Энергетические характеристики лазера накачки представлены на рис. 2а (кривая 1). Длительность импульса его генерации не превышала 7 нс, расходимость излучения при $F = 10$ Гц была равна 11 мрад.

Для реализации ПГС использовался тот же кристалл КТР, что и в случае накачки КГВ-лазером. Наиболее эффективное преобразование излучения обеспечивалось при $R = 0,6$. Излучение накачки в кристалле КТР не фокусировалось. На рис. 2а (кривая 2) представлены полученные значения $E_{\text{пгс}}$. Достигнутый КПД

преобразования составил 49 % при максимальном значении энергии накачки. Расходимость преобразованного излучения ($\lambda = 1,57$ мкм), измеренная по уровню $0,9E_{\text{пгс}}$, не превышала 7 мрад.

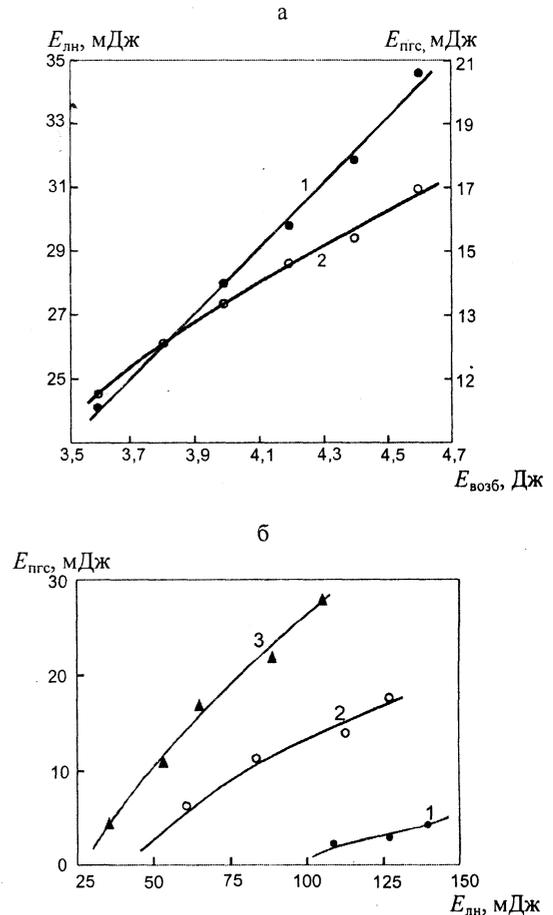


Рис. 2: Энергетические характеристики лазеров с ПГС: а – зависимость энергии накачки $E_{\text{лн}}$ (1) от энергии возбуждения $E_{\text{возб}}$ для лазера на основе ИАГ:Nd³⁺ и соответствующие им значения $E_{\text{пгс}}$ (2); б – зависимость энергии преобразования $E_{\text{пгс}}$ от энергии накачки $E_{\text{лн}}$ при плотности мощности излучения $G_{\text{лн}} = 115$ (1), 165 (2) и 230 (3) МВт/см²

Второй лазер накачки на основе ИАГ:Nd³⁺ обеспечивал импульсно-периодический режим генерации при следующих параметрах излучения: энергия $E_{\text{ген}}$ – до 200 мДж, длительность импульса – 7 нс, частота следования импульсов – 20 Гц, расходимость излучения – около 3 мрад. С помощью диафрагмы выделялась наиболее однородная часть светового пучка диаметром 5 мм ($E_{\text{лн}} < E_{\text{ген}}$). Для увеличения плотности мощности накачки $G_{\text{лн}}$ использовались телескопы, уменьшающие диаметр пучка до 3,3 или 2,8 мм.

Кристалл КТР размером $8 \times 8 \times 20$ мм³ помещался в плоскопараллельный резонатор длиной 40 мм. Лучшие результаты по КПД преобразования были получены с выходным зеркалом $R = 0,9$. На рис. 26 представлены энергетические зависимости преобразования при различных значениях $G_{\text{лн}}$. Максимальный КПД преобразования был достигнут при $G_{\text{лн}} = 230$ МВт/см² и составил 32 %. Это заметно ниже, чем в предыдущем случае, что связано с более низким оптическим качеством кристалла КТР, а также выраженным многомодовым составом излучения накачки.

Из рис. 26 следует также тенденция увеличения с ростом $G_{\text{лн}}$ как интегрального, так и дифференциального КПД преобразования, а также снижения порога параметрической генерации света. Однако дальнейшее повышение плотности мощности излучения накачки приводило к деструкции зеркал ПГС и грозило вывести из строя кристалл КТР. Тем не менее, параметры обоих лазеров на основе ИАГ:Nd³⁺ обеспечивают создание ИЛД, способных работать на значительных расстояниях при весьма высоких частотах обновления информации.

Вторым перспективным способом реализации источников безопасного излучения для лазерной дальнометрии является использование активных элементов на основе стекол, содержащих генерирующие ионы Er³⁺. Их достоинство по сравнению с эрбийсодержащими кристаллическими средами состоит в относительно небольшом времени жизни энергетического уровня ⁴I_{13/2} [6]. Это обеспечивает выгодные условия для спектрального перехода ⁴I_{13/2} – ⁴I_{15/2} ($\lambda = 1,54$ мкм), препятствуя одновременно генерации на сильном конкурирующем переходе ⁴I_{11/2} – ⁴I_{13/2} [7].

Однако эрбийсодержащие стекла имеют весьма бедный спектр поглощения, требующий сенсibilизации активного элемента, трехуровневую схему генерации, вызывающую поглощение генерируемого излучения невозбужденными ионами Er³⁺, а также значительное (до 7 нс) время жизни возбужденного состояния, затрудняющее создание эффективной системы возбуждения лазера [8]. Кроме того, имеются трудности с реализацией режима модуляции добротности резонатора, что вызвано как относительно невысоким коэффициентом усиления активной среды, так и недостаточной степенью обработки активных и пассивных средств мо-

дуляции для данного спектрального диапазона [9–11]. Наконец, относительно низкая теплопроводность стекла ограничивает достижение высоких частот следования импульсов генерации.

Несмотря на изложенные обстоятельства, привлекательными качествами такого лазера являются прямое (без дополнительного преобразования) получение когерентного излучения безопасного спектрального состава ($\lambda = 1,54$ мкм), возможность вариации в широких пределах физических параметров активной среды путем подбора состава стекла, характера и степени его сенсibilизации, геометрии активного элемента, выбора оптимального источника возбуждения и конфигурации резонатора, ряда других характеристик [8]. Достоинством такого лазера является возможность его комплексной миниатюризации, что делает его привлекательным при создании переносных энергетически экономичных ИЛД.

В наших исследованиях использовались эрбийсодержащие стекла ЛГС–Х и ЛГС–ХМ, активированные Er³⁺ и сенсibilизированные Cr³⁺ и Yb³⁺. Отличие этих стекол заключается в различной концентрации сенсibilизаторов, что несколько меняет их оптико-физические параметры. Активные элементы имели следующие размеры: $\varnothing 2 \times 35$ мм (ЛГС–Х) и $\varnothing 2,5 \times 35$ мм (ЛГС–ХМ). Они размещались в кварцевом посеребренном отражателе и возбуждались лампой накачки типа ИНП-2/35. Использовался плоскопараллельный резонатор с выходным зеркалом соответственно $R = 0,7$ и $0,78$. Модуляция добротности резонатора осуществлялась с помощью вращающейся призмы (скорость вращения – 6000 об/мин), затвора на НПВО, электрооптического затвора на основе кристалла LiNbO₃ (поляризатор – призма Глана или пленочный диэлектрический), пассивного кристаллического из MgAl₂O₄:Co²⁺.

На рис. 3 представлены значения энергии генерации $E_{\text{ген}}$ в зависимости от энергии возбуждения лампы накачки $E_{\text{возб}}$ для электромеханических (кривые 1, 2) и пассивного (кривая 3) затворов. Длительность импульсов генерации в однократном режиме составила 50...80 нс (ЛГС–Х, вращающаяся призма), ~ 50 нс (ЛГС–ХМ, НПВО), ~ 35 нс (ЛГС–ХМ, пассивный затвор). При размещении в резонаторе электрооптического затвора реализована длительность импульса ~ 50 нс (ЛГС–Х) и 40...50 нс (ЛГС–ХМ).

Однако лучевая стойкость просветляющих покрытий в имевшемся образце электрооптического затвора оказалась недостаточно высокой, что приводило к их повреждению.

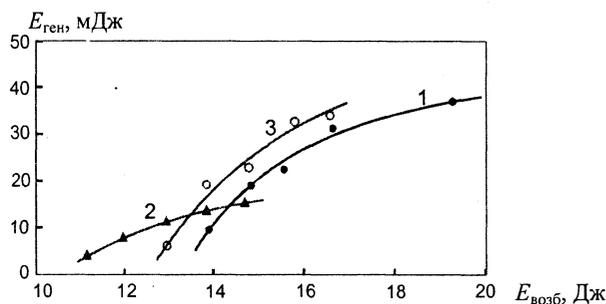


Рис. 3. Зависимость энергии генерации $E_{\text{ген}}$ от энергии возбуждения $E_{\text{возб}}$ лазера на хром-иттербий-эрбиевом стекле ЛГС-Х (1) и ЛГС-ХМ (2, 3) при модуляции добротности резонатора вращающейся призмой (1), затвором НПВО (2) и пассивным затвором (3)

В целом генерационные характеристики исследованных эрбийсодержащих лазеров приемлемы для создания ИЛД с безопасным излучением. Основные перспективы заключаются в оптимизации способов возбуждения активной среды и модуляции добротности резонатора. В частности, помимо традиционного способа возбуждения газоразрядной лампой в настоящее время активно развиваются системы оптической накачки подобных источников с помощью полупроводниковых лазеров [9, 12]. Наряду с обеспечением условий миниатюризации данный способ возбуждения позволяет отказаться от сенсibilизации активного элемента ионами Cr^{3+} , что существенно улучшает его термооптические свойства.

Весьма перспективным, на наш взгляд, является также совершенствование электрооптических методов модуляции добротности резонатора эрбийсодержащих лазеров с помощью термокомпенсированных затворов (например, на основе кристалла КТР). Важным практическим результатом станет также доведение пассивных затворов на основе алюмомагниево-шпинели с кобальтом до технологического уровня, обеспечивающего гарантированные параметры излучения в жестких условиях эксплуатации.

Таким образом, изученные варианты лазеров с безопасным излучением свидетельствуют

об их пригодности для создания импульсных лазерных дальномеров различного назначения. Практическая реализация таких лазеров не представляет принципиальных затруднений, а имеющиеся пути их развития позволяют рассчитывать на улучшение как конструктивных, так и эксплуатационных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Johnson A. Modular hand-held eyesafe laser range-finder // Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. – 1986. – V. 610. – P. 72–80.
2. Цернике Ф., Мидвинтер Дж. Прикладная нелинейная оптика / Пер. с англ. под ред. С. А. Ахманова. – М.: Мир, 1976. – 261 с.
3. Карпунин С. Н., Степанов А. И. Генерация в резонаторе при ВКР в кристаллах $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, NaNO_3 , CaCO_3 // Квантовая электроника. – 1986. – Т. 13, № 8. – С. 1571–1577.
4. Преобразование частоты лазерного излучения с предельной эффективностью / А. А. Гуламов, Э. А. Ибрагимов, В. И. Редкоречев, Т. Б. Усманов. – Ташкент: Фан, 1990. – 148 с.
5. Высокоэффективный параметрический преобразователь на кристаллах КТР / В. Л. Наумов, А. М. Онищенко, А. С. Подставкин, А. В. Шестаков // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30, № 7. – С. 632–634.
6. Лазеры на эрбиевом стекле с пассивной модуляцией добротности резонатора эрбийсодержащим элементом / Б. И. Денкер, Г. В. Максимова, В. В. Осико и др. // Квантовая электроника. – 1991. – Т. 18, № 7. – С. 855–858.
7. Erbium glass lasers and their applications / V. P. Gapontsev, S. M. Matitsin, A. A. Isineev, V. B. Kravchenko // Opt. and Laser Technol. – 1982. – V. 14, № 4. – P. 189–196.
8. Лазерные фосфатные стекла / Н. Е. Алексеев, В. П. Гапонцев, М. Е. Жаботинский и др.; Под ред. М. Е. Жаботинского. – М.: Наука, 1980. – 352 с.
9. Миниатюрные диодно-накачиваемые лазеры на иттербий-эрбиевых стеклах с модуляцией добротности оптическими затворами на нарушенном полном внутреннем отражении / С. В. Гагарский, Б. И. Галаган, Б. И. Денкер и др. // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30, № 1. – С. 10–12.
10. Ebberts C. A., Velsko S. P. High average power KTiOPO_4 electro-optic Q-switch // Appl. Phys. Lett. – 1995. – V. 67, № 7. – P. 593–595.
11. Эффективный просветляющийся фильтр на основе кристаллов $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Co}^{2+}$ для модуляции добротности лазеров с $\lambda = 1,54$ мкм на эрбиевом стекле / Б. И. Галаган, Е. А. Годовикова, Б. И. Денкер и др. // Квантовая электроника. – 1999. – Т. 26, № 3. – С. 189–190.
12. Diode-Pumped and FTIR Q-Switched Laser Performance of Novel Yb–Er Glass / В. I. Denker, A. A. Korchagin, V. V. Osico e. a. // OSA Proceeding on Advanced Solid-State Lasers. – 1994. – V. 20. – P. 148–150.