

Твердотельный лазер на вынужденном комбинационном рассеянии, излучающий вторую стоксову компоненту, как задающий генератор для системы усилителей на атомарном йоде*

**В. И. Анненков, П. С. Иванов,
С. Г. Гаранин, Н. А. Калмыков,
И. В. Мочалов, А. В. Сандуленко,
С. В. Сандыга**

Введение

Целью настоящей работы явилось создание твердотельного лазера, предназначенного для применения в качестве задающего генератора для системы усилителей на атомарном йоде с длиной волны генерации 1,3152 мкм.

Рассмотрены различные варианты создания задающего лазерного излучателя на длине волны 1,315 мкм и выбрана оптимальная схема его построения, основанная на получении эффективного излучения второй стоксовой компоненты в твердотельном лазере на вынужденном комбинационном рассеянии. Проведен анализ активных кристаллов и предложены две твердотельные пары: лазерный кристалл $Gd_3Ga_5O_{12}:Nd$ + кристалл $KY(WO_4)_2$; лазерный кристалл $LaF_3:Nd$ + кристалл $KGd(WO_4)_2$. Рассмотрен вариант схемы с уменьшенными потерями на стоксовых компонентах с одновременным подавлением паразитного сброса инверсии на переходе неодима в области 1,3 мкм. Получено усиление лазерного сигнала в каскаде предварительного усиления на парах йода, коэффициент усиления составил 150, получена выходная энергия до 60 мДж.

* Оптический журнал, 2014, т. 81, № 2, с. 10–15.

Поиск кристаллической лазерной среды, генерирующей на длине волны 1,315 мкм

Наиболее простым решением поставленной задачи могла явиться разработка лазера, генерирующего на длине волны дополнительного перехода иона неодима ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ($\lambda \approx 1,3$ мкм). Наиболее близко к искомой длине волны $\lambda \approx 1,3152$ мкм лежат длины волн генерации кристаллов $\text{CeF}_3:\text{Nd}$ ($\lambda \approx 1,313$ мкм) и $\text{SrF}_2\text{-LaF}_3:\text{Nd}$ ($\lambda \approx 1,316$ мкм) [1]. Однако, во-первых, эти генерационные переходы происходят при температуре жидкого азота (≈ 77 К) [1], во-вторых, поперечное сечение вынужденного излучения этих переходов иона неодима в 3 – 3,5 раза меньше, чем у «основного» перехода ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$. Поэтому одна из основных трудностей получения генерации на этом переходе связана с проблемой возможного сброса инверсии населенности метастабильного уровня ${}^4F_{3/2}$ за счет суперлюминесценции на основном переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$. При масштабировании такого лазера в область больших выходных энергий, значит, и больших энергий накачки, эта проблема становится труднопреодолимой. К тому же из всей совокупности содержащих неодим лазерных сред [1] ни одна не обеспечивает генерацию на длине волны 1,3152 мкм.

Оценка возможности использования параметрического лазерного излучателя, генерирующего на $\lambda \sim 1,315$ мкм

Другой возможностью получения генерации на $\lambda \approx 1,3152$ мкм могла бы явиться разработка лазера с использованием параметрического преобразования. Однако существенным его недостатком является высокая чувствительность этого устройства к изменению внешних параметров, в частности, температуры. Другим недостатком является сложность получения заданного излучения с достаточно высокой энергией. Поскольку специфика поставленной задачи требовала высокой стабильности длины волны излучения лазера и энергии излучения порядка нескольких десятков миллиджоулей, такой подход также представлялся достаточно трудно применимым.

Разработка лазерного излучателя с ВКР-преобразованием, генерирующего на $\lambda \sim 1,315$ мкм

Еще одна возможность получения излучения с длиной волны 1,315 мкм осуществляется при использовании эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [2]. В этом случае в лазерной активной среде происходит генерация излучения на некоторой исходной длине волны λ , которая затем, в результате ВКР-преобразования за счет частотного стоковса сдвига с частотой Ω_R , преобразуется в заданную λ_{sp} . Если в качестве исходного излучения использовать генерацию на основном переходе неодима ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ($\lambda \approx 1,06$ мкм), тогда выбором ВКР-активной среды можно добиться излучения второй стоковсой компоненты как раз на заданной длине волны в области 1,315 мкм. Для точного попадания в заданную длину волны было необходимо подобрать пару, состоящую из лазерного кристалла, содержащего неодим (стекло не подходит, так как спектральная полуширина линии усиления паров йода, как и у других газов, достаточно узкая), и соответствующей кристаллической ВКР-активной среды.

Расчет параметров лазерного кристалла и ВКР-активной среды

Для подбора пары «лазерный кристалл – ВКР-активная среда» был проведен расчет необходимой длины волны накачки, обеспечивающей требуемую длину волны генерации по известному табличному значению стокова сдвига ВКР-активной среды, определяемому из выражения

$$\lambda_{pump} = 10^4 / \left(10^4 / \lambda_{sp} + 2\Omega_R \right), \quad (1)$$

где λ_{sp} – заданная длина волны 1,3152 мкм, λ_{pump} – искомая длина волны накачки в мкм, Ω_R – стоков сдвиг в см⁻¹.

В табл. 1 приведены величины стокова сдвига некоторых ВКР-активных кристаллов и рассчитанные по формуле (1) значения требуемой длины волны накачки.

Из данных, приведенных в табл. 1 и 2, в качестве лазерной и ВКР-активной сред были подобраны следующие две пары кристаллов: LaF₃:Nd + KGd(WO₄)₂ и Gd₃Ga₅O₁₂:Nd + KY(WO₄)₂.

Таблица 1

Величины стоковых сдвигов и соответствующие длины волн накачки ВКР-кристаллов

ВКР-кристалл	Величина стокова сдвига, см ⁻¹	Требуемая длина волны накачки, мкм
KGd(WO ₄) ₂ (КГВ)	901	1,0631
KY(WO ₄) ₂ (КИВ)	905,6	1,0621
KYb(WO ₄) ₂	908	1,0616
Na ₂ WO ₄	929,2	1,0569

Таблица 2

Точные значения длин волн генерации в области 1 мкм кристаллических активных сред, содержащих неодим

Лазерный кристалл	Длина волны генерации при 300 К, мкм
SrF ₂ -YF ₃ :Nd	1,0568
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Nd (ИАГ-Nd)	1,0615
Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂ :Nd (ГТГ-Nd)	1,0621
Y ₃ Ga ₅ O ₁₂ :Nd	1,0620
CaF ₂ -YF ₃ :Nd	1,0632
LaF ₃ :Nd (ЛаФ-Nd)	1,0631

Использование второго варианта (с парой кристаллов Gd₃Ga₅O₁₂:Nd + KY(WO₄)₂) позволяет, заменяя в ВКР-активном кристалле KY(WO₄)₂ часть ионов иттрия на ионы иттербия, управлять стоковым сдвигом, что дает возможность осуществлять более точную настройку заданной длины волны излучения. В настоящей работе для решения поставленной задачи была исследована воз-

возможность применения такой схемы с генерацией второй стоксовой компоненты в ВКР-активном кристалле при накачке излучением неодимового лазера на основном переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ иона неодима. Для предварительных экспериментов использовалась схема с ламповой накачкой. Однако для достижения требуемой длительности импульсов (около 1 нс) необходимо использование коротких (порядка 1 см) резонаторов, характерных для лазеров с диодной накачкой. В таких лазерах также обеспечивается более стабильная синхронизация лазерного импульса относительно импульса запуска.

Основным критерием сравнения оптимальности различных схем служили данные по изменению энергии. Форма и длительность импульса регистрировалась с помощью запоминающего осциллографа, подключенного к лавинному фотодиоду. При исследованиях степени поляризации излучения использовалась призма Глана.

Полученные результаты и их анализ

Основными объектами исследования были кристаллы, предназначенные для использования в качестве лазерной среды и в качестве ВКР-активного элемента. Определялись характеристики свободной генерации лазерных элементов. Энергия импульса измерялась калориметрическим измерителем мощности ИМО-2Н. По полученным данным были построены графики (рис. 1, 2).

Из графика рис. 1 видно, что кристалл ГГГ-Nd имеет эффективность, приблизительно вдвое меньшую по сравнению с КГВ-Nd. Этот эффект, по-видимому, обусловлен образованием центров окраски в кристаллах ГГГ-Nd под воздействием ультрафиолетового (УФ) излучения, что является характерной особенностью кристаллов гранатов, выращенных методом Чохральского. Для предупреждения этого эффекта активный элемент ГГГ-Nd помещался в кварцевую трубку марки КЛЖ, осуществляющую отсечку части спектра лампы накачки в УФ области.

Результаты, полученные на лазерных кристаллах ГГГ-Nd, помещенных в трубку КЛЖ, и на кристаллах LaF_3 , представлены на рис. 2. Осциллограмма моноимпульсной генерации лазерного кристалла КГВ-Nd на основном переходе иона неодима в области 1,06 мкм приведена на рис. 3. Длительность импульса составляла около 25 нс.

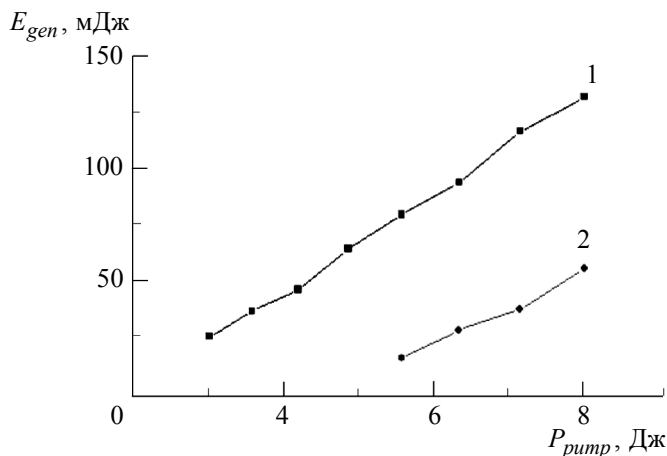


Рис. 1. Зависимости выходной энергии (E_{gen}) от энергии накачки (P_{pump}) в режиме свободной генерации кристаллов КГВ-Nd (1) и ГГГ-Nd (2)

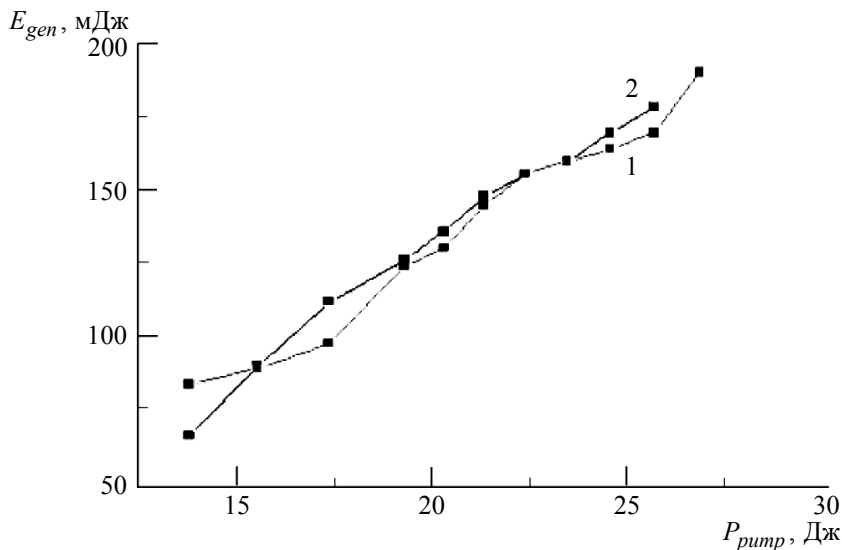


Рис. 2. Характеристики свободной генерации кристаллов ГГГ-Nd в трубке КЛЖ (1) и LaF_3-Nd (2)

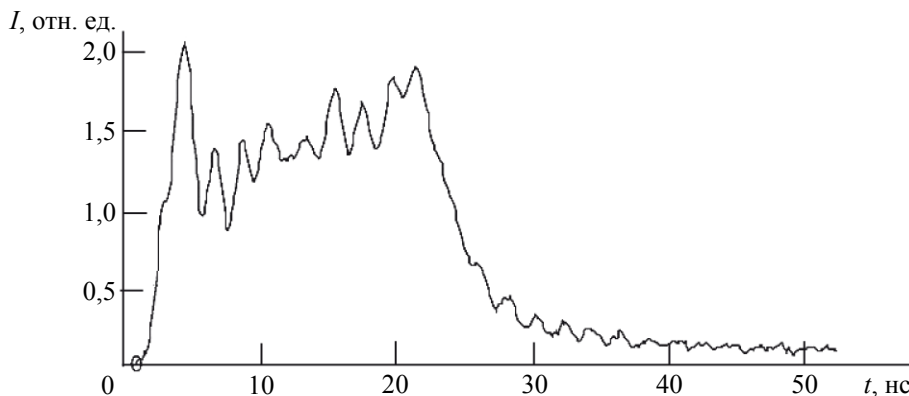


Рис. 3. Осциллограмма моноимпульсной генерации КГВ-Nd на длине волны 1,06 мкм при пропускании затвора 30 % и длине резонатора 30 см

Лазерный кристалл КГВ-Nd позволяет получать генерацию и ВКР-преобразование в одном и том же кристалле (режим ВКР-самопреобразования), поэтому он был использован в качестве нелинейно-оптического элемента, на котором было осуществлено ВКР-преобразование в режиме моноимпульса (рис. 4).

Моноимпульс, получаемый в кристаллах КГВ-Nd, имел энергию 8 мДж. В паре «ГГГ-Nd – КИВ» была получена генерация второй стоксовой компоненты, энергия импульса которой составила 3,5 мДж при длительности 7 нс (рис. 5).

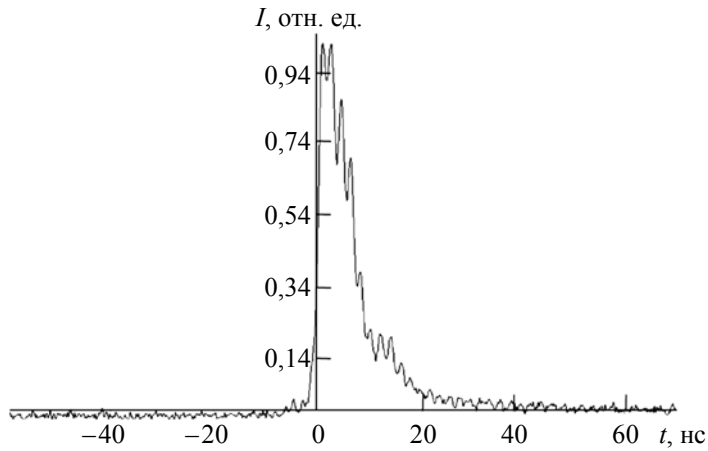


Рис. 4. Осциллограмма моноимпульса второй стоксовой компоненты на длине волны 1,32 мкм в лазерном кристалле КГВ-Nd

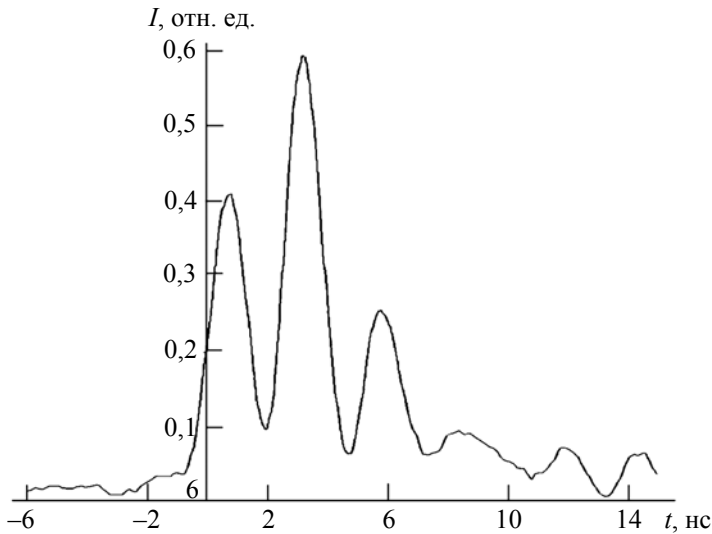


Рис. 5. Осциллограмма генерации второй стоксовой компоненты на длине волны 1,315 мкм пары кристаллов «ГТГ-Nd – КИВ»

В ходе экспериментов было установлено, что при использовании кристаллов КИВ с непрозрачными торцами в случае плотных затворов (пропускание $T < 20\%$) и выходного полупрозрачного зеркала ($T = 50\%$ на длине волны 1,3 мкм) порог свободной генерации на дополнительном переходе иона неодима ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ оказывается меньше, чем порог моноимпульсной генерации на длине волны 1,06 мкм. Выходное излучение с длиной волны в области 1,3 мкм получается не в результате ВКР-преобразования моноимпульсного излучения с длиной волны 1,0621 мкм, а как свободная генерация на дополнительном переходе иона неодима ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$. Это можно предотвратить, используя зеркала с высоким пропусканием, имеющие коэффициент отражения на длине волны 1,3 мкм не более 6%. Также для подавления свободной генерации на переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ можно использовать оптическую схему, представленную на рис. 6.

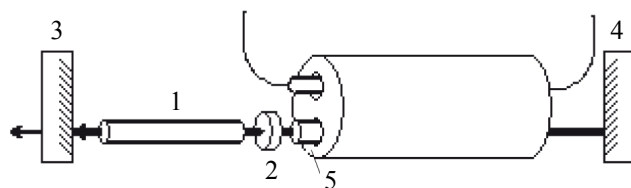


Рис. 6. Оптимизированная оптическая схема ВКР-лазера: 1 – ВКР-элемент; 2 – пассивный затвор с просветляющим покрытием с обеих сторон на длину волны 1,06 мкм и высокоотражающим покрытием (> 99 %) на длины волн 1,18 и 1,315 мкм на поверхности, ближней к активному элементу 5; 3 – выходное зеркало, полупрозрачное на длине волны 1,315 мкм и высокоотражающее (> 99 %) на длинах волн 1,18 и 1,06 мкм; 4 – высокоотражающее зеркало (> 99 %) на длине волны 1,06 мкм, просветленное на длину волны 1,3 мкм; 5 – активный элемент на основе кристалла, активированного неодимом

Главным отличием схемы является установка затвора между активной средой и ВКР-элементом. На затвор с обеих сторон нанесено просветляющее покрытие на излучение, соответствующее длине волны 1,06 мкм, и высокоотражающее покрытие ($R > 99\%$) на длинах волн $\lambda \approx 1,18$ мкм и $\lambda \approx 1,315$ мкм на поверхности, ближней к ВКР-элементу. Это должно привести к следующим изменениям в принципе работы схемы:

- активная среда, содержащая неодим, будет находиться вне резонатора на $\lambda = 1,3$ мкм, и свободная генерация в области 1,3 мкм на переходе неодима ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ будет исключена;
- объем пассивного затвора оказывается вне ВКР-резонатора, при этом остаточные потери пассивного затвора не будут давать отрицательного вклада в добротность ВКР-резонатора.

Для оценки полуширины линии излучения были проведены исследования контура спектральной линии второй стоксовой компоненты описываемого ВКР-лазера. Измеренная полуширина линии (рис. 7) составляла примерно $1,4 \text{ см}^{-1}$. Такое значение свидетельствует о наличии нескольких продольных мод в излучении лазера и может быть уменьшено переходом к одномодовому режиму, например, путем введения внутрь резонатора лазера для узкополосной фильтрации задающего излучения интерферометра Фабри–Перо или трехмерной брегговской структуры.

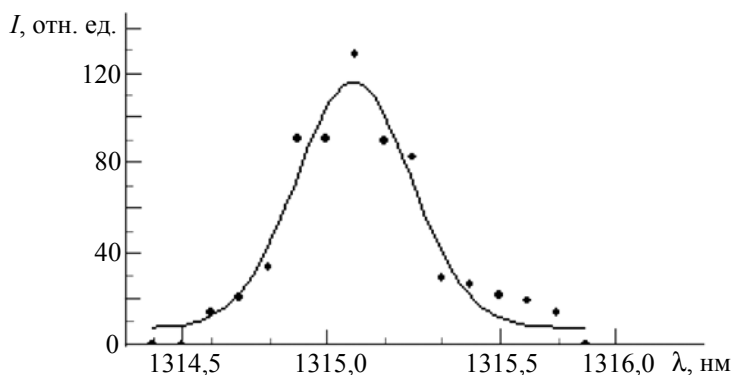


Рис. 7. Форма спектральной линии второй стоксовой компоненты ВКР-лазера

Для оценки возможности усиления в газовой среде паров йода был использован каскад предварительного усиления (КПУ), имеющий коэффициент усиления по слабому сигналу при работе с йодным задающим генератором порядка 1000. Давление рабочей смеси ($i\text{-C}_3\text{F}_7\text{I} : \text{SF}_6 = 1 : 48$) в усилителе составляло 1,8 абс. атм. По пути следования излучения после твердотельного

задающего генератора (ЗГ-ТТ) на расстоянии 1 м от выходного зеркала устанавливалась коллимирующая линза с фокусным расстоянием 1 м. Оптическая схема проведения экспериментов представлена на рис. 8.

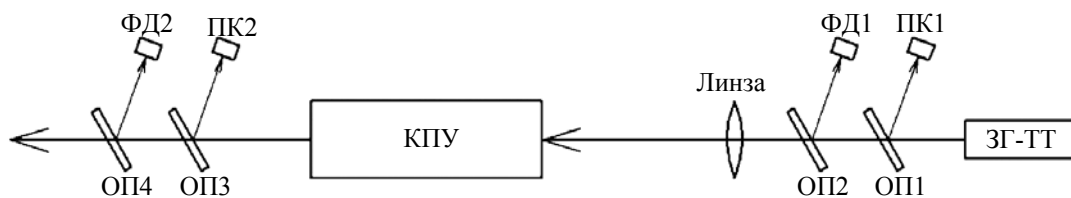


Рис. 8. Оптическая схема тракта усиления: ЗГ-ТТ – задающий твердотельный генератор; ОП1–ОП4 – отводящие пластины; ПК1, ПК2 – пирокалориметры; ФД1, ФД2 – фотодиоды; КПУ – каскад предварительного усиления, коллимирующая линза имеет фокусное расстояние 1 м

Исследования осуществлялись по следующему алгоритму:

1. Работает только ЗГ-ТТ. При этом измерялись энергия импульса его излучения (калориметр ПК1) и энергия, которая проходит через неработающий, но полностью подготовленный к работе каскад предварительного усиления КПУ (калориметр ПК2). Определялись как абсолютное значение энергии импульса на выходе КПУ, так и доля энергии системы задающего генератора ЗГ-ТТ, проходящая через усилитель. Доля энергии, проходящая сквозь усилитель, составляла 0,2–0,25, что соответствует 0,2–0,5 мДж.

2. Работает ЗГ-ТТ + КПУ. По результатам предварительного срабатывания и измерению энергии импульса ЗГ-ТТ оценивалась энергия входного импульса. По измерению выходной энергии и оценке входной энергии вычислялся коэффициент усиления.

3. Работает только КПУ при полностью съюстированном оптическом тракте усиления. По измеренной выходной энергии КПУ делался вывод о том, наблюдался ли в предшествующем срабатывании эффект усиления либо измеренная энергия определялась самовозбуждением усилительного тракта.

Всего было сделано две серии таких измерений, результаты которых представлены в табл. 3. Различия в коэффициентах усиления объясняются прежде всего различными моментами прохождения импульса сквозь усилитель относительно его импульса тока накачки. Измерения энергии дополнялись определениями формы импульсов как до, так и после усиления. Проведенные исследования свидетельствуют о попадании линии генерации в полосу усиления усилителя на атомарном йоде.

Таблица 3

Результаты исследования работы ЗГ-ТТ на основе пары кристаллов «ГГГ-Nd – KY(WO₄)₂» с КПУ на парах йода

№ эксперимента	Энергия импульса ЗГ-ТТ, мДж	Энергия импульса после КПУ, мДж	Коэффициент усиления	Наличие самовозбуждения
1	2,4	55	150	Нет
2	4,8	61	60	Нет

Заключение

В результате проведенной работы были рассмотрены различные варианты создания задающего лазерного излучателя на длине волны 1,315 мкм и выбрана оптимальная схема его построения, основанная на получении эффективного ВКР-излучения второй стоксовой компоненты в твердотельном лазере.

Проанализирована совокупность известных лазерных и ВКР-активных кристаллов и предложены две твердотельные пары «лазерный кристалл – ВКР-активный кристалл», обеспечивающих точную настройку длины волны излучателя на требуемую длину волны 1,315 мкм. Это пары: лазерный кристалл $Gd_3Ga_5O_{12}:Nd$ + ВКР-активный кристалл $KY(WO_4)_2$; лазерный кристалл $LaF_3:Nd$ + ВКР-активный кристалл $KGd(WO_4)_2$.

Осуществлен выбор ВКР-активных сред таким образом, чтобы в обоих случаях была обеспечена возможность точной подстройки излучателя под заданную длину волны путем частичного изменения состава ВКР-активного кристалла (например, частичная замена ионов Y на ионы Yb в кристаллах $KY(WO_4)_2$).

Рассмотрен вариант схемы с уменьшенными потерями на стоксовых компонентах с одновременным подавлением паразитного сброса инверсии на переходе неодима в области 1,3 мкм.

Получено усиление лазерного сигнала в каскаде предварительного усиления на парах йода: коэффициент усиления составил 150, получена выходная энергия до 60 мДж. Показана перспективность использования твердотельного ВКР-лазера, излучающего вторую стоксову компоненту на длине волны 1,3152 мкм, в качестве задающего генератора для системы усилителей на атомарном йоде.

Список литературы

1. Каминский А. А. Лазерные кристаллы. – М.: Наука, 1973.
2. Ярив А. Квантовая электроника и нелинейная оптика. – М.: Советское радио, 1973.
3. Реди Дж. Промышленные применения лазеров. – М.: Мир, 1981. 638 с.
4. Крылов К. И., Прокопенко В. Т., Тарлыков В. А. Основы лазерной техники. – Л.: Машиностроение, 1990. 315 с.
5. Звелто О. Принципы лазеров. – М.: Мир, 1990. 560 с.
6. Ищенко Е., Климков Ю. Оптические квантовые генераторы. – М.: Советское радио, 1968. 472 с.

Solid-state Raman laser emitting second Stokes component as master oscillator for system of amplifiers on atomic iodine

V. I. Annenkov, P. S. Ivanov, S. G. Garanin, N. A. Kalmikov, I. V. Mochalov,
A. V. Sandulenko, S. V. Sandyga

Various embodiments of master oscillator at a wavelength of 1.315 μm have been considered and optimal layout of its construction based on effective radiation of the second Stokes component in the solid-state stimulated Raman scattering laser has been selected. The analysis of active crystals has been conducted and two solid-state couples have been offered: laser crystal $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}$ + crystal $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ and laser crystal $\text{LaF}_3:\text{Nd}$ + crystal $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$. A variant of the scheme with reduced losses in the Stokes components with simultaneous suppression of parasitic inversion dumping on transition of neodymium in 1.3 μm has been considered. An amplification of the laser signal in a preamplification cascade on vapor iodine and output energy up to 60 mJ have been obtained.