

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

УДК 621.373.826

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР НА ВЫНУЖДЕННОМ КОМБИНАЦИОННОМ РАССЕЯНИИ, ИЗЛУЧАЮЩИЙ ВТОРУЮ СТОКСОВУ КОМПОНЕНТУ, КАК ЗАДАЮЩИЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ СИСТЕМЫ УСИЛИТЕЛЕЙ НА АТОМАРНОМ ЙОДЕ

© 2014 г. В. И. Анненков^{**}, канд. техн. наук; П. С. Иванов^{*}, студент;
С. Г. Гаранин^{**}, доктор физ.-мат. наук; Н. А. Калмыков^{**};
И. В. Мочалов^{*}, доктор физ.-мат. наук; А. В. Сандуленко^{*}, канд. физ.-мат. наук;
С. В. Сандыга^{*}, студент

^{*} Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

^{**} Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Российский федеральный ядерный центр, г. Саров, Нижегородская обл.

E-mail: Al_sand@mail.ru

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 $KY(WO_4)_2$ и 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.

Ключевые слова: лазер на вынужденном комбинационном рассеянии, задающий генератор, усилитель на атомарном йоде.

Коды OCIS: 140.3550

Поступила в редакцию 22.07.2013

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.

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 $CeF_3:Nd$ ($\lambda \approx 1,313$ мкм) и $SrF_2-LaF_3:Nd$ ($\lambda \approx 1,316$ мкм) [1]. Однако,

во-первых, эти генерационные переходы происходят при температуре жидкого азота (≈ 77 К) [1] и, 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, а 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.

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.

Еще одна возможность получения излучения с длиной волны 1,315 мкм осуществляется при использовании эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). 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 стоксова 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 из-

лучения второй стоксовой 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.

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

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

где λ_{sp} – заданная длина волны 1,3152 мкм, λ_{pump} – искомая длина волны накачки в мкм, Ω_R – стоксов сдвиг в cm^{-1} .

В табл. 1 приведены табличные значения стоксовых сдвигов некоторых кристаллов и рассчитанные по формуле (1) значения требуемой длины волны накачки.

Из данных, приведенных в табл. 1, 2, в качестве лазерной и ВКР-активной сред были выбраны следующие две пары кристаллов: $LaF_3:Nd + KGd(WO_4)_2$ и $Gd_3Ga_5O_{12}:Nd + KY(WO_4)_2$.

Использование второго варианта (с парой кристаллов $Gd_3Ga_5O_{12}:Nd + KY(WO_4)_2$) позволяет, заменяя в ВКР-активном кристалле $KY(WO_4)_2$

Таблица 1. Значения стоксовых сдвигов и соответствующие длины волн накачки ВКР-кристаллов

ВКР-кристалл	Значение стоксова сдвига, cm^{-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_2WO_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
$Y_3Al_5O_{12}:Nd$ (ИАГ-Nd)	1,0615
$Gd_3Ga_5O_{12}:Nd$ (ГГГ-Nd)	1,0621
$Y_3Ga_5O_{12}:Nd$	1,0620
$CaF_2-YF_3:Nd$	1,0632
$LaF_3:Nd$ (ЛаФ-Nd)	1,0631

часть ионов иттрия на ионы иттербия, управлять стоксовым сдвигом, что дает возможность осуществлять более точную настройку заданной длины волны излучения. В настоящей работе для решения поставленной задачи была исследована 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 измерению энергии. Форма и длительность импульса регистрировались с помощью запоминающего осциллографа, подключенного к лавинному фотодиоду. При исследованиях степени поляризации излучения использовалась призма Глана.

Основными объектами исследования были кристаллы, предназначенные для использования как в качестве лазерной среды, так 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 ГТГ-Nd имеет эффективность, приблизительно вдвое меньшую по сравнению с КГВ-Nd. Этот эффект, по-видимому, обусловлен образованием центров окраски в кристаллах ГТГ-Nd под воздействием ультрафиолетового (УФ) излучения, что является характерной особенностью кристаллов гранатов, выращенных методом Чохральского. Для предупреждения этого эффекта активный элемент ГТГ-Nd помещался в кварцевую трубку марки КЛЖ, осуществляющую отсечку части спектра лампы накачки в УФ области.

Результаты, полученные на лазерных кристаллах ГТГ-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.

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 "ГТГ-Nd – КИВ" была получена генерация второй стоксовой компоненты, энергия импульса которой составила 3,5 мДж при длительности 7 нс (рис. 5).

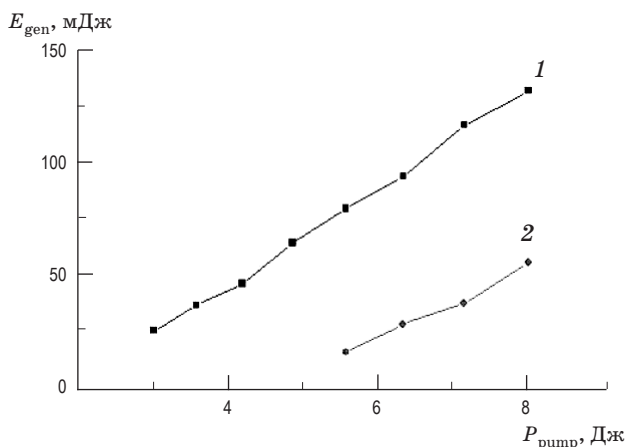


Рис. 1. Зависимости выходной энергии (E_{gen}) от энергии накачки (P_{pump}) в режиме свободной генерации кристаллов КГВ-Nd (1) и ГТГ-Nd (2).

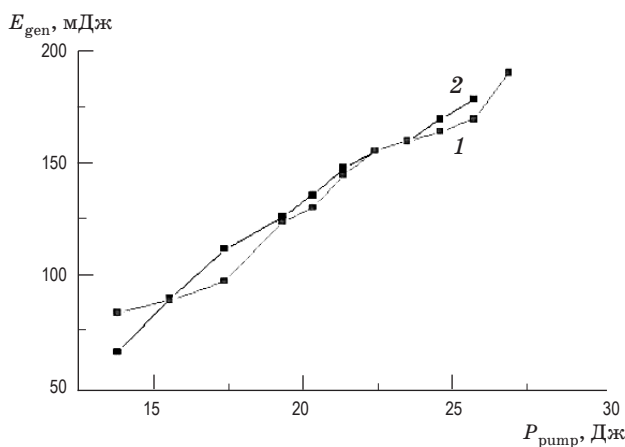


Рис. 2. Характеристики свободной генерации кристаллов ГТГ-Nd в трубке КЛЖ (1) и LaF_3 -Nd (2).

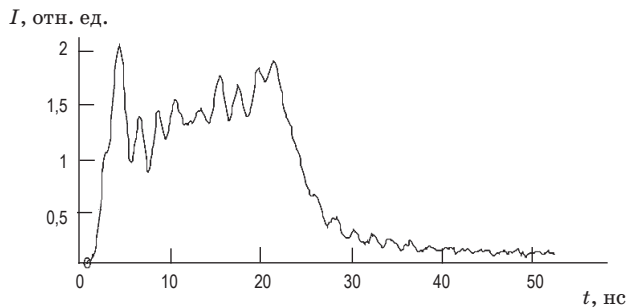


Рис. 3. Осциллограмма моноимпульсной генерации КГВ-Nd на длине волны 1,06 мкм при пропускании затвора 30% и длине резонатора 30 см.

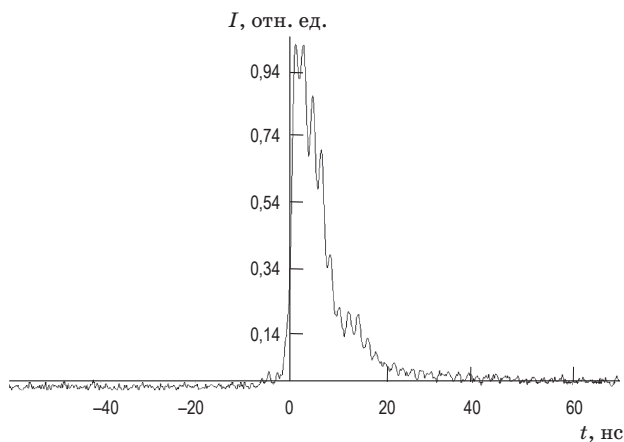


Рис. 4. Осциллограмма моноимпульса второй стоксовой компоненты на длине волны 1,32 мкм в лазерном кристалле КГВ-Nd.

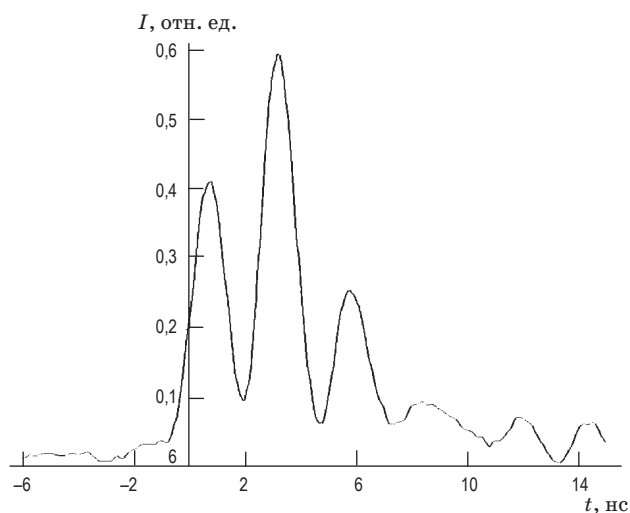


Рис. 5. Осциллограмма генерации второй стоксовой компоненты на длине волны 1,315 мкм пары кристаллов "ГГГ-Nd - КИВ".

В ходе экспериментов было установлено, что при использовании кристаллов КИВ с непросветленными 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.

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 (>99%) на длинах волн $\lambda \approx 1,18$ и 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,

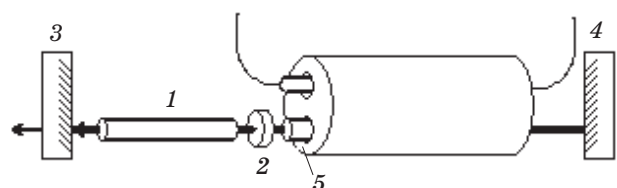


Рис. 6. Оптимизированная оптическая схема ВКР-лазера. 1 - ВКР-элемент, 2 - пассивный затвор с просветляющим покрытием с обеих сторон на длину волны 1,06 мкм и высокоотражающим покрытием (>99%) на длинах волн 1,18 и 1,315 мкм на поверхности, ближней к активному элементу 5, 3 - выходное зеркало, полупрозрачное 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.

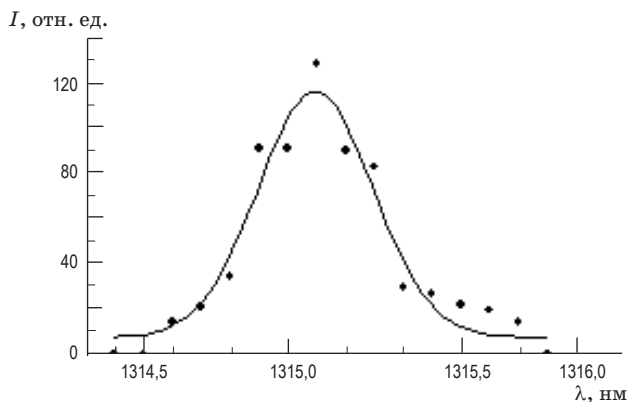


Рис. 7. Форма спектральной линии второй стоксовой компоненты ВКР-лазера.

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.

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 установ-

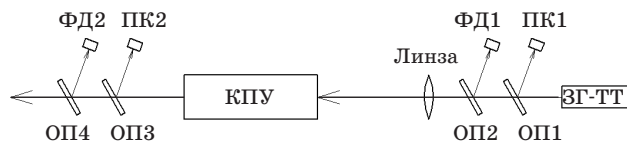


Рис. 8. Оптическая схема тракта усиления. ЗГ-ТТ – задающий твердотельный генератор, ОП1–ОП4 – отводящие пластины, ПК1, ПК2 – пиррокалориметры, ФД1, ФД2 – фотодиоды, КПУ – каскад предварительного усиления, коллимирующая линза имеет фокусное расстояние 1 м.

ливалась коллимирующая линза с фокусным расстоянием 1 м. Оптическая схема проведения экспериментов приведена на рис. 8.

Исследования осуществлялись по следующему алгоритму:

1. Проводилось срабатывание 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. Проводилось срабатывание 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. Проводилось срабатывание только КПУ при полностью съюстированном 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.

Таблица 3. Результаты исследования работы ЗГ-ТТ на основе пары кристаллов "ГГГ-Nd – $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ " 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

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.

Заклучение

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, по литературным данным, точную настройку длины волны излучателя

на требуемую длину волны 1,315 мкм. Это пары лазерный кристалл $Gd_3Ga_5O_{12}:Nd$ + ВКР-активный кристалл $KY(WO_4)_2$ и 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 на 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.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

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