

УДК 539.2+621.373.8

В. Н. Иванов

АО НПО «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова»

## Способ увеличения предельной энергии генерации рамановского лазера, излучающего на безопасной для зрения длине волны

*Исследовался рамановский самоконверсионный лазер, разработанный для дальнометрии, работающий на безопасной для зрения длине волны излучения  $\lambda = 1.538$  мкм. Лазер собран на основе активного элемента из кристалла калий-гадолиниевого вольфрамата  $KGd(WO_4)_2 : Nd^{3+}$  (КГВ :  $Nd^{3+}$ ) и кристаллического пассивного лазерного затвора из кристалла АИГ :  $V^{3+}$ , накачка осуществлялась импульсной Хе-лампой в посеребренном трубчатом отражателе. Генерация самоконверсионного лазера осуществлялась на длине волны  $\lambda = 1.351$  мкм и преобразовывалась внутри активного элемента в первую рамановскую стоксовую компоненту  $\lambda = 1.538$  мкм. Величина сечения вынужденного излучения на  $\lambda = 1.351$  мкм в четыре раза ниже, чем величина сечения вынужденного излучения на длине волны  $\lambda = 1.067$  мкм, поэтому конкуренция процессов усиления на этих двух длинах волн оказывает определяющее значение на энергию генерации лазера. Впервые было обнаружено, что в режиме пассивной модуляции добротности полученные предельные значения энергии моноимпульса для четырех различных типоразмеров активных элементов КГВ :  $Nd^{3+}$  оказались пропорциональны объему активного элемента. Найденная пропорциональность определяется равным коэффициентом усиления, при котором во всех типоразмерах активных элементов начинается существенный сьем инверсии на конкурирующей длине волны  $\lambda = 1.067$  мкм. Для рамановского лазера предложен способ, уменьшающий конкурирующие процессы съема инверсии на  $\lambda = 1.067$  мкм и позволяющий снять ограничение по предельной энергии генерации.*

### Рамановский, самоконверсионный, лазер, безопасный для зрения

Импульсные лазерные дальнометры являются составной частью большинства наблюдательных приборов, приборов разведки и навигационных приборов. Лазеры для лазерной дальнометрии должны быть компактными, надежными, работающими в широком климатическом диапазоне (температура, влажность, давление атмосферы). Кроме того, импульсы излучения лазерного дальнометра должны отвечать следующим требованиям:

- иметь короткую длительность (от единиц до 50 нс) и гладкий, короткий передний фронт импульса;
- излучение должно быть безопасным для зрения как оператора, так и окружающих людей;
- излучение не должно существенно поглощаться и рассеиваться в атмосфере;
- на длине волны излучения лазера должны существовать чувствительные скоростные приемники излучения.

Наиболее соответствуют этим требованиям твердотельные лазеры, излучающие в ближнем ИК-диапазоне на участке длин волн  $\approx 1.52 \dots 1.75$  мкм.

Лазерное излучение на этих длинах волн попадает в «окно прозрачности» атмосферы, не пропускается оптическими средами глаза и поэтому не фокусируется на сетчатке глаза, и, кроме того, доступны отечественные миниатюрные приемники с максимумом чувствительности на  $\sim 1.54$  мкм.

Для создания лазеров, излучающих в этом диапазоне, может быть использовано несколько физических механизмов и применены различные конструктивные решения.

Первый часто используемый физический механизм – это прямая генерация на электронном переходе  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  иона  $Er^{3+}$  [2], излучающего на длине волны  $\lambda = 1.535$  мкм. При комнатной температуре генерация на этом переходе возможна только в сильно разупорядоченных средах. К ним относятся стекла [2] и некоторые кристаллы, такие как оксибораты [3]. Ион  $Er^{3+}$  в большинстве других кристаллических сред обладает сильной ап-конверсией, которая расселяет верхний лазерный уровень  ${}^4I_{13/2}$  и забрасывает энер-

гию на уровень  $4I_{9/2}$  и более высокие уровни, откуда потом происходит интенсивная люминесценция. Кроме того, ионы  $Er^{3+}$  приходится сенсублизовать ионами  $Yb^{3+}$ , единственный, но очень интенсивный переход которого  $2F_{5/2} \rightarrow 2F_{7/2}$  хорошо подходит для диодной накачки, и возбуждение с уровня  $2F_{5/2}$  попадает на уровень  $4I_{11/2}$  иона  $Er^{3+}$ , с которого безызлучательно переходит на  $4I_{13/2}$ . Для обеспечения короткой длительности импульсов, необходимой в лазерной дальнометрии, применяются различные модуляторы добротности резонатора. Для лазеров на основе  $Yb : Er$  фосфатного стекла чаще всего применяются НПВО-затворы (на принципе нарушенного полного внутреннего отражения), но возможно также применение акустооптического либо электрооптического затвора. Предпринимались попытки использования пассивного затвора (на основе алюмомагниевого шпинели, активированной ионами  $Co^{2+}$ , причем как в виде монокристаллов, так и в виде оптической керамики, или затворов на основе кристаллов ГСАГ :  $V^{3+}$ ), но применение пассивных затворов совместно с активными элементами из активированного ионами  $Yb : Er$  стекла затруднено в связи с низким коэффициентом усиления, а также с возможным возникновением самосинхронизации мод и лучевым разрушением оптических внутрирезонаторных элементов. Дальнометры с лазерами на иттербий-эрбиевом стекле получили широкое распространение, поскольку обладают некоторыми достоинствами, такими как прямая генерация на полумикронном переходе, большое ( $\sim 7$  мс) время жизни верхнего лазерного уровня, позволяющее осуществлять эффективную лазерную диодную накачку. Однако активные элементы из иттербий-эрбиевого стекла имеют и ряд существенных недостатков. Это уже упоминавшаяся трехуровневая схема генерации, определяющая высокий порог генерации и требующая низкой концентрации ионов  $Er^{3+}$ , кроме того, низкая теплопроводность стекол не позволяет осуществлять генерацию на высокой частоте повторения импульсов и способствует возникновению самофокусировки.

Вторым физическим механизмом, используемым для получения импульсов излучения в требуемом диапазоне длин волн, является параметрическое преобразование на базе кристалла КТР

(коэффициент термического расширения). Под действием излучения лазера на АИГ :  $Nd^{3+}$  с модуляцией добротности электрооптическим затвором, в кристалле КТР генерируются два кванта света, один на длине волны 1.57 мкм, другой на длине волны 3.33 мкм (который поглощается внутри резонатора) [4]. Данные лазеры хорошо работают с лазерной диодной накачкой, могут генерировать на большой частоте повторения импульсов, но имеют достаточно сложную конструкцию и требуют создания дополнительного резонатора для параметрической генерации (часто это кольцевой резонатор с тремя кристаллами КТР).

Другой тип импульсных лазеров, используемых в дальнометрии, – это полупроводниковые лазеры, излучающие на длине волны около 1.54 мкм [5]. В связи с крайне малой энергией каждого импульса ( $\sim 10$  мкДж) дальнометры, собранные на лазерных диодах, работают по схеме с накоплением сигнала. При такой схеме обработки информации каждое измерение осуществляется на протяжении 0.5...1 с, в течение которых лазер излучает цуг импульсов с килгерцовой частотой, что делает невозможным измерение расстояния до быстро движущейся цели. Пока дальность такого дальнометра ограничивается примерно 2 км.

Можно использовать и некоторые другие физические принципы, на которых можно создать лазерные излучатели, работающие в полумикронном диапазоне, но пока лазеры, созданные на их основе, не являются достаточно эффективными. Это резонансная накачка активного элемента АИГ :  $Er^{3+}$  непосредственно в коротковолновый край полосы люминесценции верхнего лазерного уровня, осуществляемая при помощи волоконного  $Er^{3+}$ -лазера или диодного лазера на 1.533 мкм [6]. Целью создания таких лазеров является прямая резонансная накачка лазерными диодами, но на данный момент энергия импульсов генерации достигает 0.5...1.5 мДж и генерация нестабильна.

Еще одним физическим принципом, при помощи которого можно получить требуемые по длительности и энергии импульсы излучения на необходимой длине волны, – это рамановское рассеяние. В военных приборах стран НАТО применяются излучатели на основе лазера АИГ :  $Nd^{3+}$  ( $\lambda = 1.064$  мкм), с фокусировкой излучения в кювету со сжатым метаном, находящимся под давлением около 15 атм. [7]. Первая стоксовая компонента рамановского излучения примерно соответствует 1.54 мкм. Использование габаритной ячейки со сжатым газом не является абсолютно безопасным.

И, наконец, применение рамановской самоконверсионной схемы. В этой схеме излучателя также применяется рамановская конверсия излучения, однако происходит она непосредственно в том же активном элементе, в котором происходит генерация излучения на первоначальной длине волны.

В лазерах, сконструированных на этом принципе, применяется активный элемент из калий-гадолиниевого вольфрамата с неодимом (КГВ : Nd<sup>3+</sup>) и пассивный затвор из кристалла АИГ : V<sup>3+</sup>. Эти лазеры оказались наиболее востребованными в отечественной лазерной дальнометрии в связи с простотой конструкции, надежностью и миниатюрностью по сравнению с другими аналогами, особенно при ламповой накачке, хотя в последние годы интенсивно проводятся работы по созданию лазеров на основе КГВ : Nd<sup>3+</sup> с накачкой лазерными диодными модулями.

Лазеры на кристалле КГВ : Nd<sup>3+</sup>, генерирующие на длине волны  $\lambda = 1.067$  мкм, много лет успешно применяются [8] в дальнометрии, так как обладают следующими преимуществами по сравнению с другими лазерами на неодимовых средах:

- поляризованное генерируемое излучение дает возможность не использовать поляризатор при электрооптической модуляции добротности;

- возможность высокой концентрации активатора (до 10 %);

- сравнительно высокое сечение вынужденного излучения на переходе  $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2}$ ;

- два предыдущих пункта приводят к особенно низким порогам генерации, сопоставимым только с пороговыми энергиями накачки лазеров на кристаллах ГСГГ : Cr : Nd, но без сопутствующих проблем термооптики, вызванных тепловыделением иона Cr [9] в кристалле ГСГГ;

- теплопроводность кристалла КГВ : Nd<sup>3+</sup> ниже, чем у кристалла АИГ примерно в 3 раза, но существенно выше, чем у лазерных стекол;

- недостатком КГВ : Nd<sup>3+</sup> как лазерной среды является относительно короткое время жизни активатора на метастабильном уровне (от 80 до 120 мкс, в зависимости от концентрации активатора Nd<sup>3+</sup>). Этот недостаток не проявляется при ламповой накачке, но становится существенным при накачке лазерными диодами и модулями. Так, например, время жизни активатора в АИГ : Nd<sup>3+</sup> больше примерно в 2.5 раза, а время жизни Er<sup>3+</sup> в стекле в десятки раз больше. Соответственно, во столько же раз можно снизить мгновенную мощ-

ность накачивающих лазерных модулей. Следовательно, для лазеров на КГВ : Nd<sup>3+</sup> по сравнению с конкурирующими схемами повышается цена лазерных модулей и блоков накачки.

Важным преимуществом лазера на КГВ : Nd<sup>3+</sup> стало наличие эффективных пассивных лазерных затворов для работы в режиме модулированной добротности. Для длины волны  $\lambda = 1.067$  мкм применяется затвор, изготовленный из кристалла гадолиний-галлий-скандиевого граната ГСГГ : Cr<sup>4+</sup> из алюмоиттриевого граната с хромом АИГ : Cr<sup>4+</sup>. В этих кристаллах четырехвалентный ион хрома находится в тетраэдрической позиции и обеспечивает интенсивную полосу поглощения с максимумом в районе  $\lambda = 1.06$  мкм. На длине волны  $\lambda = 1.351$  мкм разработан и серийно выпускается пассивный лазерный затвор из алюмоиттриевого граната с ванадием АИГ : V<sup>3+</sup>. Ванадий, обеспечивающий полосу поглощения с максимумом на длине волны  $\lambda = 1.34$  мкм, в кристалле также занимает тетраэдрическую позицию. Основными достоинствами пассивных затворов являются их компактность (толщина пассивного затвора обычно составляет от долей миллиметра до единиц миллиметра), кроме того, отсутствие каких-либо систем управления затвором, отнимающих пространство внутри дальнометра, отсутствие высокого напряжения, необходимого для электрооптического затвора, а следовательно, и электрических наводок в сетях дальнометра. Эти существенные преимущества пассивных затворов в сочетании с высокими значениями коэффициентов усиления в активных элементах из кристаллов КГВ : Nd<sup>3+</sup> делают лазеры с пассивными кристаллическими пассивными затворами высококонкурентоспособными.

Но самой важной особенностью КГВ : Nd<sup>3+</sup> является возможность получения при помощи рамановской самоконверсии генерации на безопасной для зрения  $\lambda = 1538$  нм. Если обеспечить условия генерации в режиме модулированной добротности на длине волны излучения  $\lambda = 1.351$  мкм, то можно добиться почти полной конверсии этого излучения в излучение первой стоксовской компоненты рамановского рассеяния с максимумом на  $\lambda = 1.538$  мкм (частота рамановских колебаний  $901 \text{ см}^{-1}$ ) [1]. Причем лазер, излучающий на длине волны  $\lambda = 1.067$  мкм, может быть переделан в лазер, излучающий на  $\lambda = 1.538$  мкм простой сменой зеркал и пассивного затвора, все

остальное, включая систему накачки и блок питания, оказывается полностью унифицированным. Поэтому были разработаны и запущены в серию дальнометры, излучающие на безопасной для зрения волне излучения. Однако была необходимость в проведении дополнительных исследований, вызванных спецификой работы лазера, собранного из активного элемента КГВ :  $\text{Nd}^{3+}$  и пассивного затвора АИГ :  $\text{V}^{3+}$ , в режиме пассивной модулированной добротности [9]. Коэффициент усиления слабого сигнала в активном элементе при пассивной модуляции добротности во время накачки растет, пока не достигает значения, равного суммарному коэффициенту потерь в резонаторе. После этого начинается свободная генерация и затвор начинает поглощать генерируемые кванты излучения. После поглощения некоторой световой энергии, определяемой произведением концентрации поглощающих центров на энергию квантов на длине волны генерируемого излучения, затвор открывается и начинается генерация моноимпульса. Для затвора из кристалла АИГ :  $\text{V}^{3+}$  энергия, необходимая для открывания затвора, оказывается существенной по сравнению с энергией генерации. Вызвано это прежде всего коротким временем жизни иона ванадия  $\text{V}^{3+}$  в возбужденном состоянии. По некоторым оценкам оно достигает от 8 до 25 нс [9], что сравнимо с длительностью генерации лазера (около 25...30 нс по полувысоте импульса). Поэтому для поддержания затвора в открытом состоянии расходуется дополнительная энергия генерируемого светового импульса. Кроме того, в кристаллических пассивных лазерных затворах наблюдается существенная анизотропия насыщения поглощения излучения [9]. Она заключается в том, что поглощающие диполи  $\text{V}^{3+}$  выстраиваются в кубическом кристалле АИГ вдоль трех основных кристаллографических осей. Поэтому участие в поглощении генерируемого плоскополяризованного излучения в зависимости от ориентации кристалла относительно направления движения волны и вектора  $E$  электрической напряженности могут принимать диполи всех трех групп, расположенных в кристалле, либо только двух из них, либо только одной. Последний случай наблюдается, если вектор  $E$  окажется направлен вдоль одной из кристаллографических осей, а направление движения волны – строго вдоль другой оси. Важно отметить, что анизотропия насыщения поглоще-

ния проявляется только с интенсивным, насыщающим сигналом, а для слабого сигнала кубический кристалл АИГ остается изотропным и пропускание его во всех направлениях одинаково. Явление анизотропии насыщения поглощения позволяет определить энергию, необходимую для просветления затвора и поддержания его в открытом состоянии. Если пассивный затвор установить в резонатор так, чтобы кристаллографическая ось [100] была сонаправлена с оптической осью резонатора, а ось [010] с плоскостью поляризации генерируемого излучения (определяемого кристаллом КГВ), то лазер будет генерировать максимальную энергию. Если повернуть затвор вокруг оптической оси резонатора на угол  $45^\circ$ , то в поглощении энергии на длине волны 1.351 мкм будут принимать участие две группы поглощающих диполей из трех, и энергия генерации уменьшится на величину, равную энергии, поглощенной второй группой диполей.

Зеркала резонатора для рамановского лазера, излучающего на безопасной для зрения длине волны  $\lambda = 1.538$  мкм, должны соответствовать следующим требованиям:

- для глухого зеркала: HR для  $\lambda = 1.351$  мкм, AR для  $\lambda = 1.067$  мкм, HR для  $\lambda = 1.538$  мкм;
- для выходного зеркала: HR для  $\lambda = 1.351$  мкм, AR для  $\lambda = 1.067$  мкм и  $R \sim 40\%$  для  $\lambda = 1.538$  мкм.

Другими словами, зеркала должны составлять глухой резонатор на  $\lambda = 1.351$  мкм и быть максимально просветленными на  $\lambda = 1.067$  мкм, чтобы избежать генерации или суперлюминесценции на конкурирующем оптическом переходе  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ . Неодим в матрице КГВ на переходе  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  имеет сечение вынужденного излучения ( $\sigma = 3.8 \cdot 10^{-19}$  см<sup>2</sup>) в 4 раза выше, чем на переходе  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  ( $\sigma = 0.95 \cdot 10^{-19}$  см<sup>2</sup>) [10].

**Экспериментальные результаты.** При оптимизации генерационных и эксплуатационных параметров лазера [1] была обнаружена необычная зависимость энергии генерации в режиме пассивной модуляции добротности от коэффициента начального пропускания затвора. Эта зависимость для трех различных типоразмеров активных элементов КГВ :  $\text{Nd}^{3+}$   $\varnothing 3 \times 50$ ,  $\varnothing 3.5 \times 50$  и  $\varnothing 4 \times 50$  с одинаковыми параметрами резонатора и схожими условиями накачки (импульсная ксеноновая лампа ИНП-3/35 в кварцевой посеребренной трубке) показала наличие ярко выражен-

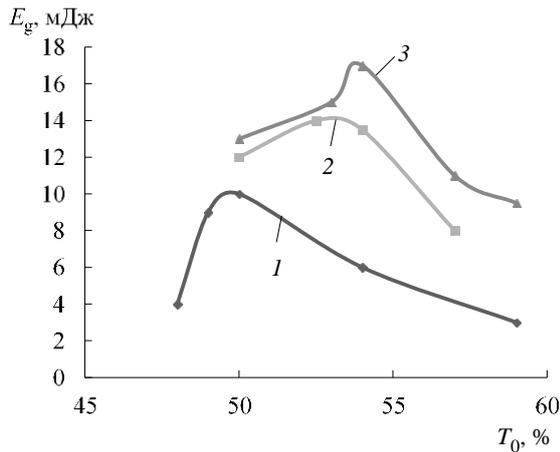


Рис. 1

ных максимумов (рис. 1: кривая 1 – КГВ Ø3 × 50 мм; кривая 2 – КГВ Ø3.5 × 50 мм; кривая 3 – КГВ Ø4 × 50 мм).

Диапазон оптимальных значений коэффициентов пропускания затворов для каждого типоразмера активных элементов был очень узким и составлял примерно 1%. Это создавало определенные трудности при изготовлении затворов из иттрий-алюминиевого граната с ионами ванадия в качестве активатора. При дальнейшем повышении плотности затвора наблюдался резкий спад энергии генерации, что является нетипичным для аналогичных зависимостей при работе в режиме пассивной модуляции добротности на длине волны  $\lambda = 1.067$  мкм. Поэтому возможность дальнейшего увеличения энергии генерации лазера простым увеличением плотности пассивного затвора в разрабатываемых лазерах отсутствовала. Возможность варьирования коэффициента выходного зеркала на длине волны 1.351 мкм также отсутствует – на этой длине волны резонатор «глухой» и коэффициенты отражения приближаются к 100%. Единственной возможностью оставалось увеличение объема активного элемента, но изменение его типоразмера существенно изменяет геометрию осветителя и требует изменения концентрации активатора.

Кроме того, была исследована зависимость предельных для четырех типоразмеров активного элемента значений энергии генерации рамановских самоконверсионных лазеров. Оказалось, что эти значения прямо пропорциональны объему активной среды (рис. 2). Эта зависимость, насколько известно автору, замечена впервые. Если три активных элемента отличались только диаметром (3, 3.5, 4 мм) и имели длину 50 мм, то четвертый элемент имел другую длину Ø3 × 32 мм. Между тем значения предельной вы-

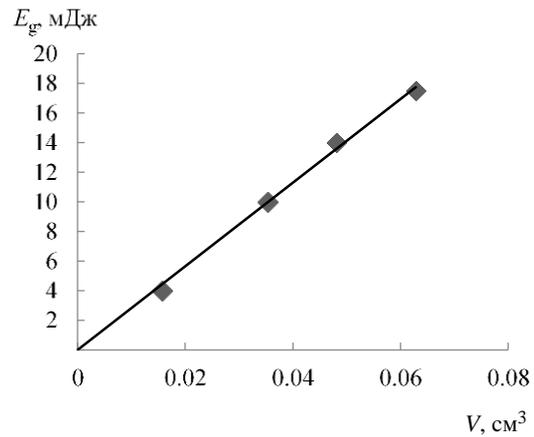


Рис. 2

ходной энергии с высокой точностью ложились на общую прямую зависимости от объема активного элемента.

Для того чтобы объяснить обнаруженные зависимости, был проанализирован пороговый коэффициент усиления, при котором достигается максимальная энергия генерации в режиме модулированной добротности. Коэффициент усиления на пороге генерации равен пороговому коэффициенту потерь в резонаторе [11]. Резонатор на длине волны  $\lambda = 1.351$  мкм в случае рамановского самоконверсионного лазера – «глухой», поэтому полезные потери в момент возникновения генерации на этой длине волны отсутствуют. Следовательно, уровень порогового коэффициента усиления  $k_{th}$  в основном определяется потерями, вносимыми пассивным затвором в закрытом состоянии, и может быть найден исходя из его начального пропускания по формуле

$$k_{th} = \frac{1}{l} \ln \left( \frac{1}{T_0} \right),$$

где  $l$  – длина активного элемента;  $T_0$  – начальное пропускание пассивного затвора.

Остальные составляющие порогового коэффициента потерь – неактивные потери в активном элементе, потери на остаточное отражение от просветленных поверхностей внутрирезонаторных элементов и потери на зеркалах для длинны волны генерации оказываются примерно равными для всех типоразмеров активных элементов и существенно меньше, чем потери в закрытом пассивном затворе. Зависимость порогового коэффициента усиления для максимальной энергии монопulsesа от пороговой энергии накачки для четырех типоразмеров активных элементов показана на рис. 3.

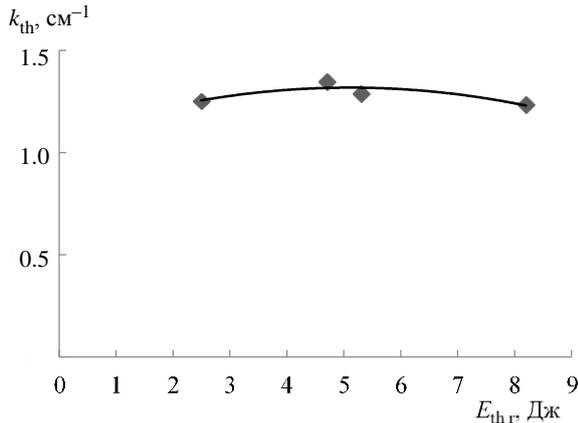


Рис. 3

Как видно из рис. 3, пороговый коэффициент усиления для максимальной энергии генерации рамановского лазера практически не зависит от пороговой энергии накачки для четырех типоразмеров активных элементов. Небольшое отличие в значении коэффициентов усиления может быть объяснено разницей в профиле прокачки активных элементов из-за различных концентрации активатора и геометрии осветителя. Энергия генерации лазера в режиме модулированной добротности может быть записана как

$$E_g = \alpha_R \frac{h\nu}{\sigma} V \left( \frac{k_{th} - k_k}{k_k} \right), \quad \frac{k_{th}}{k_k} = K,$$

где  $E_g$  – энергия генерации;  $\alpha_R$  – полезные потери;  $V$  – объем активного элемента;  $h\nu$  – энергия кванта генерации;  $\sigma$  – сечение вынужденного излучения;  $k_{th}$  и  $k_k$  – начальный (пороговый) и конечный коэффициенты усиления. Конечный коэффициент усиления зависит прежде всего от величины пропускания затвора в открытом состоянии и связан с начальным пропусканием затвора через контраст  $\frac{k_{th}}{k_k} = K$ . Контраст определяется только

свойствами кристалла АИГ:  $V^{3+}$  (в основном поглощением из возбужденного состояния иона  $V^{3+}$ ) и для всех затворов одинаков ( $K \approx 8$ ). Прочие составляющие коэффициента потерь в резонаторе (неактивные потери в активном элементе, потери на отражение от просветленных внутрирезонаторных элементов, потери на зеркалах, дифракционные потери и пр.) примерно одинаковы для всех лазеров с разными типоразмерами активных элементов. Поэтому, если пороговые коэффициенты усиления примерно одинаковы, то энергия генерации действительно должна быть пропорциональна объему активного элемента. Итак, можно резюмировать:

1. Предельно достижимая энергия рамановского лазера должна быть пропорциональна объему активного элемента.

2. Инверсия, начиная с определенного коэффициента усиления, достигаемого в процессе накачки в активном элементе, начинает сниматься в результате некоего конкурирующего процесса и при дальнейшем увеличении плотности затвора становится настолько мала, что достичь порога генерации не удается.

**Обсуждение результатов и предложение способа увеличения предельной энергии.** Ответственность за сьем инверсии в активном элементе может быть возложена на усиленную люминесценцию на длине волны  $\lambda = 1.067$  мкм. Коэффициент усиления слабого сигнала в активном элементе на длине волны  $\lambda = 1.067$  мкм выше, чем на длине волны  $\lambda = 1.351$  мкм примерно в 4 раза:  $k = N_{инв} \sigma$ , где  $N_{инв}$  – число инвертированных ионов  $Nd^{3+}$ ;  $\sigma$  – сечение вынужденного излучения на переходах  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  и  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ . Так как верхний лазерный уровень для этих переходов – общий, в случае максимума энергии генерации коэффициент усиления на  $\lambda = 1.067$  мкм для всех типоразмеров активных элементов составляет примерно  $k_{1.067} \approx 4.8$  см<sup>-1</sup>. При уменьшении коэффициента отражения зеркал резонатора для длины волны  $\lambda = 1.067$  мкм с  $R_{ост} \approx 0.5\%$  на  $R_{ост} \approx 0.15\%$  удавалось увеличить максимальную энергию генерации примерно на 20–25%. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что инверсия снимается при помощи усиленной в резонаторе люминесценции на длине волны  $\lambda = 1.067$  мкм.

Для того чтобы уменьшить влияние процессов усиления люминесценции на длине волны  $\lambda = 1.067$  мкм, конкурирующих с генерацией на  $\lambda = 1.351$  мкм, был предложен [12] дополнительный элемент резонатора – отражающий фильтр для излучения на  $\lambda = 1.067$  мкм. Он выполнен в виде плоскопараллельной пластины, установленной под углом  $45^\circ$  к оптической оси лазера, с покрытием, позволяющим выводить из резонатора излучение на  $\lambda = 1.067$  мкм и являющимся просветлением для длин волн  $\lambda = 1.351$  мкм и  $\lambda = 1.538$  мкм. Так как кристалл КГВ:  $Nd^{3+}$  генерирует плоскополяризованное излучение, то параметры просветляющего покрытия необходимо обеспечить только для одной поляризации, что существенно облегчает задачу нанесения покрытия. Фильтр может быть выполнен также в виде зеркала, отражающего под  $90^\circ$  излучение на длинах волн  $\lambda =$

= 1.351 мкм и  $\lambda = 1.538$  мкм и пропускающей излучение на длине волны  $\lambda = 1.067$  мкм. В этом случае в резонатор можно поставить еще один осветитель, причем оба активных элемента могут иметь предельный коэффициент усиления, но энергия генерации будет иметь удвоенное значение и ее не будет касаться ограничение, налагаемое сроком инверсии на конкурирующей длине волны излучения. Более длинный резонатор улучшит расходимость лазера, а соответствующей ориентацией в пространстве активных элементов относительно оптической оси лазера можно скомпенсировать оптические термодлинны, вызванные неравномерной накачкой. Так, импульсную лампу накачки или лазерный диодный модуль можно расположить слева от активного элемента, а для другого активного элемента справа. В результате при одинаковом нагреве элементов их температурные поля и вызванные градиентом теплового поля термодлинновые набеги фазы в резонаторе будут скомпенсированы на каждом проходе резонатора. Это даст возможность повысить либо частоту повторения импульсов, либо энергию накачки, а следовательно, и энергию генерации.

Другое использование предложенного отражающего фильтра позволило создать двухчастотный лазер [13], способный попеременно пере-

ключаться для работы на двух различных длинах волн:  $\lambda = 1.067$  мкм и  $\lambda = 1.538$  мкм. Уникальность этого излучателя в том, что и резонаторные зеркала, и осветитель со всей системой накачки и активным элементом остаются теми же. В резонатор вводятся только дополнительные фильтры или дополнительный пассивный затвор, при этом юстировка лазера не нарушается. В качестве механизма, обеспечивающего быстрое позиционирование фильтров и пассивных затворов, может быть применен шаговый двигатель.

На основании изложенного можно сделать выводы:

1. Определены физические процессы, ограничивающие предельную энергию генерации рамановского самоконверсионного лазера. Впервые обнаружена прямая зависимость между предельной энергией генерации и объемом активного элемента. Ограничение предельной энергии генерации вызвано снятием инверсии, усиленной люминесценцией на конкурирующей длине волны излучения.

2. Предложены способы в виде внутррезонаторных отражающих фильтров, уменьшающие влияние процессов съема инверсии на конкурирующем оптическом переходе и увеличивающие предельную энергию генерации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parameter optimization for serial Raman's eye-safe passive Q-switched laser / V. N. Ivanov, A. N. Titov, O. B. Storosthuk, V. N. Vetrov, B. A. Ignatenkov, K. V. Dukelskiy // SPIE--The International Society for Optical Engineering. 2013. Vol. 10, № 1. P. 015301.

2. Тепловой баланс в малогабаритных импульсных лазерах на эрбиевых стеклах с диодной накачкой / Ю. Н. Батов, А. Б. Губин, Ю. Б. Пирожков, Л. Л. Шапиро // Оптический журн. 2002. Т. 69, № 9. С. 5–10.

3. Spectroscopic properties of Er and Eu doped acentric LaBO<sub>3</sub> and GdBO<sub>3</sub> / H. Giesber, J. Ballato, G. Chumanov, J. Kolis, M. Deineka // J. of Appl. Physics. 2003. Vol. 93, № 11. P. 8987–8994.

4. Твердотельные лазеры ближнего ИК-диапазона с диодной накачкой / М. О. Искандаров, А. А. Никитичев, М. А. Свердлов, А. Л. Тер-Мартirosян // Науч. приборостроение. 2015. Т. 25, № 4. С. 67–70.

5. 1.5  $\mu\text{m}$  Diode Laser Rangefinder DLEM 20. URL: <http://www.jenoptik.com> (дата доступа 23.04.18).

6. Kudryashov I., Garbuzov D., Dubinskii M. Latest developments in resonantly diode-pumped Er:YAG lasers Laser Source Technology for Defense and Security III / Ed. by Gary L. Wood, Mark A. Dubinskii // Proc. of SPIE. 2007. Vol. 6552. P. 65520K.

7. Shang L., Chou I-Ming, Burruss R. Raman spectroscopic characterization of CH<sub>4</sub> density over a wide range of temperature and pressure. USA: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.

8. Малогабаритный твердотельный лазер с частотой повторения до 100 Гц / В. М. Волюнкин,

А. В. Лукин, С. Е. Саховский, С. И. Ханков // Оптический журн. 2000. Т. 67, № 8. С. 74–79.

9. Механизм просветления пассивных лазерных затворов АИГ:V<sup>3+</sup> при ВКР преобразовании в кристаллах КГВ:Nd<sup>3+</sup> / А. Н. Титов, В. Н. Иванов, В. Н. Ветров, Б. А. Игнатенков, О. Б. Сторощук, Л. И. Сторощук, К. В. Дукельский, В. В. Медоволкин, Е. В. Урбанович, Д. В. Иванов // Оптический журн. 2008. Т. 75, № 1. С. 49–52.

10. Spectroscopic properties at 1.351  $\mu\text{m}$  of Nd<sup>3+</sup>-doped KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> and KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> single crystals for Raman conversion / F. Bourgeois Brenier, G. Metrat, N. Muhlstein, G. Boulon // Optical Materials. 2001. № 16. P. 207–211.

11. Лазеры на неодимовом стекле / А. А. Мак, Л. Н. Сомс, В. А. Фромзель, В. Е. Яшин. М.: Наука, 1990.

12. Пат. 2 545 687 С1 (РФ). Импульсный твердотельный лазер с преобразованием длины волны излучения на вынужденном комбинационном рассеянии / Л. В. Московченко, О. Б. Сторощук, В. Н. Иванов, А. Л. Московченко, А. Н. Титов; правообладатель – Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение "Карат"» (ОАО «НПО КАРАТ») (RU); заявл. 11.12.2013; опубл. 27.03.2015.

13. Пат. 2 548 592 С2 (РФ) Импульсный двухрежимный твердотельный лазер / Л. В. Московченко, О. Б. Сторощук, В. Н. Иванов; правообладатель – Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение "Карат"» (ОАО «НПО КАРАТ») (RU); заявл. 11.12.2013; опубл. 20.04.2015.

V. N. Ivanov  
JSC NPO «Vavilov's State Optical Institute»

## METHOD OF INCREASING THE MAXIMUM LASING ENERGY OF A RAMAN LASER EMITTING AT A WAVELENGTH SAFE FOR VISION

*The author investigated Raman self-conversion laser, designed for rangefinder, operating at eye safe diapason at  $\lambda = 1.538 \mu\text{m}$ . The laser is consist of on the active element from a potassium gadolinium tungsten crystal  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2 : \text{Nd}^{3+}$  and a crystal passive laser Q-switcher made from YAG :  $\text{V}^{3+}$  crystal, pumped by a pulsed Xe-lamp placed in a silvered tubular reflector. The laser generation was beginning at the wavelength of  $\lambda = 1.351 \mu\text{m}$  and was converted inside the active element at the first Roman Stokes component  $\lambda = 1.538 \mu\text{m}$ . The cross-section of the stimulated radiation at  $\lambda = 1.351 \mu\text{m}$  is four times lower than the cross-section of the stimulated radiation at the wavelength  $\lambda = 1.067 \mu\text{m}$ , so the competition of the amplification processes at these two wavelengths has a determining value on the energy of the laser generation. In the passive Q-switched mode, the maximum values obtained for four different sizes of active elements of  $\text{KGW} : \text{Nd}^{3+}$ . The value of the obtained maximum generation energy was proportional to the volume of the active element (as far as the author knows, it was noticed for the first time) and was determined by the gain coefficient, at which a significant removal of inversion at a competing wavelength  $\lambda = 1.067 \mu\text{m}$  began. The method reducing competing processes of the inversion removal at  $\lambda = 1.067 \mu\text{m}$  was proposed.*

**Raman, self-conversion, laser, eye safe**

УДК 681.786.23:725.945.025.4

А. А. Галушкин, С. Л. Гонобоблева  
СПбФ АРАН

А. А. Журавлев, В. А. Парфенов, Ю. В. Филатов  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Применение 3D-сканирования и аддитивных технологий для документирования и создания физических копий эстампажей из собрания СПбФ АРАН

*Рассмотрено создание 3D-архива и физических копий эстампажей. Предложен оригинальный способ реставрации эстампажей, основанный на создании специальной матрицы, получаемой в результате комбинированного использования техники 3D-сканирования и аддитивных технологий. Для оцифровки эстампажа использовался оптический 3D-сканер, работа которого основана на использовании структурированного света. Подробно рассмотрена методика компьютерной обработки полученной при сканировании 3D-модели, необходимой для ее загрузки в микропроцессор 3D-принтера. Для создания реплики эстампажа и реставрационной матрицы использовались лазерные 3D-принтеры, принцип действия которых основан на технологии лазерной стереолитографии. Проведена оценка точности репродуцирования эстампажа сравнением его 3D-модели с 3D-моделями реплик, полученных с помощью 3D-принтеров. Проведенные экспериментальные исследования доказали принципиальную возможность создания 3D-архивов и репродуцирования эстампажей. Предложенный подход к сохранению данного вида памятников истории и культуры является принципиально новым в практике отечественной музейной и архивной работы.*

### Лазерное 3D-сканирование, 3D-печать, эстампаж, репродуцирование, памятники истории и культуры

На протяжении XIX–XX вв. техника эстампажа являлась наиболее достоверным и распространенным способом документирования (фиксации) и сохранения находящихся в труднодоступных местах памятников, в первую очередь таких,

которым угрожает полное уничтожение в результате стихийных бедствий, войн, актов вандализма и разрушающих факторов окружающей среды. Эстампаж – это изготовленный из бумаги (иногда ткани) прямой оттиск рельефного изображения