

## Активная и пассивная синхронизация мод в Nd:Gd<sub>0.7</sub>Y<sub>0.3</sub>VO<sub>4</sub>-лазере с диодной накачкой

Ю.Д.Заварцев, А.И.Загуменный, Ю.Л.Калачев, С.А.Кутовой, В.А.Михайлов, А.А.Сироткин, И.А.Щербаков, Р.Реннер-Эрни, В.Люти, Т.Ферер

*Представлены результаты исследования лазеров с диодной накачкой на основе кристаллов смешанного ванадата Nd:Gd<sub>0.7</sub>Y<sub>0.3</sub>VO<sub>4</sub>. Получена непрерывная лазерная генерация с дифференциальным КПД 71% при средней мощности выходного излучения до 8.2 Вт. Исследованы режимы активной синхронизации мод с акустооптическим модулятором, пассивной синхронизации мод на керровской нелинейности и гибридной синхронизации мод. Получены пикосекундные импульсы генерации с наименьшей длительностью лазерных импульсов 1.7 пс при средней мощности выходного излучения 340 мВт и частоте повторения 140 МГц.*

**Ключевые слова:** смешанный ванадат Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub>, синхронизация мод, акустооптический модулятор, керровская линза, диодная накачка.

### 1. Введение

Твердотельные лазеры с диодной накачкой находят широкое применение для решения различных прикладных проблем. Использование лазеров с ультракороткими импульсами излучения является перспективным при обработке материалов высокой твердости, таких как сапфир, алмаз, а также различных металлов и диэлектриков в электронной промышленности и прецизионной механике. Применение пикосекундных лазеров позволяет повысить качество и точность обработки материалов и достичь результатов, значительно превосходящих полученные с использованием других лазеров, которые работают в режиме модуляции добротности с наносекундными длительностями излучения. Для практического решения подобных задач требуется, с одной стороны, высокая эффективность лазера, а с другой – меньшая длительность импульсов.

Поскольку предельно короткая длительность импульсов генерации лазера определяется шириной спектра усиления, то активные среды с широкой линией люминесценции являются наиболее перспективными для получения сверхкоротких импульсов излучения. Активные среды на основе кристаллов ванадатов Nd:GdVO<sub>4</sub> и Nd:YVO<sub>4</sub> в настоящее время находят самое широкое применение в различных лазерах с диодной накачкой вследствие наличия у кристаллов ванадатов оптимального сочетания спектроскопических, лазерных и теплофизических свойств. По сравнению с кристаллами Nd:YAG и Nd:YLF активные среды на основе Nd:YVO<sub>4</sub> или Nd:GdVO<sub>4</sub> имеют более широкий спектр люминесцен-

ции и, как следствие, позволяют получать более короткие импульсы излучения [1].

Еще более широким спектром люминесценции обладают смешанные ванадаты – разориентированные кристаллы с неоднородно уширенной спектральной линией. В ванадатах разупорядоченная кристаллическая решетка возникает в результате изоморфного замещения ионов Y<sup>3+</sup> в YVO<sub>4</sub> на ионы Gd<sup>3+</sup>, La<sup>3+</sup> или Lu<sup>3+</sup> или комбинацию этих ионов. Аналогично осуществляется замещение ионов Gd<sup>3+</sup> в GdVO<sub>4</sub> на ионы Y<sup>3+</sup>, La<sup>3+</sup> или Lu<sup>3+</sup>. Такое изоморфное замещение позволяет создавать кристаллы смешанных ванадатов, физические и оптические характеристики которых близки по своим свойствам ванадату иттрия и ванадату гадолиния. При этом варьирование соотношений концентраций Y, Gd, La, Lu позволяет изменять такие параметры, как сечение индуцированного перехода, сечение поглощения, ширина линии поглощения и излучения, длина волны генерации, время жизни уровней и т. п.

Кристаллы Nd:Gd<sub>0.5</sub>La<sub>0.5</sub>VO<sub>4</sub> [2] были первыми смешанными ванадатами, на которых получена лазерная генерация. Для этих кристаллов ширина спектра люминесценции составила 5.3 нм для σ-поляризации и 4.8 нм для π-поляризации.

Режим пассивной модуляции добротности в лазерах с диодной накачкой и спектроскопические характеристики в кристаллах смешанных ванадатов Nd:Gd<sub>x</sub>Y<sub>1-x</sub>VO<sub>4</sub> были исследованы в [3, 4]. Режим пассивной синхронизации мод (СМ) с помощью SESAM был продемонстрирован на кристалле Nd:Gd<sub>0.5</sub>Y<sub>0.5</sub>VO<sub>4</sub> [5]. Полученная длительность импульсов генерации составила 4 пс.

В настоящей работе впервые исследовались три режима СМ в лазере с диодной накачкой на основе кристаллов смешанного ванадата Nd:Gd<sub>0.7</sub>Y<sub>0.3</sub>VO<sub>4</sub>: активная СМ с акустооптическим модулятором (АСМ), пассивная СМ на керровской нелинейности (ПСМК) и гибридная СМ (ГСМ) при одновременном использовании АСМ и ПСМК.

Ю.Д.Заварцев, А.И.Загуменный, Ю.Л.Калачев, С.А.Кутовой, В.А. Михайлов, А.А.Сироткин, И.А.Щербаков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: saa@kapella.gpi.ru  
R.Renner-Erny, W.Lüthy, T.Feurer. Institute of Applied Physics, University of Bern, Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern, Switzerland

## 2. Спектроскопические исследования

В Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН была разработана уникальная технология выращивания высококачественных кристаллов  $GdVO_4$ ,  $YVO_4$ , а также  $Gd_xY_{1-x}VO_4$  с различными активаторами для создания активных элементов лазеров с диодной и ламповой накачкой, работающих в широком диапазоне длин волн. Технология развита на базе современных промышленных установок «Кристалл-2» и «Кристалл-3М» с индукционным нагревом для выращивания кристаллов методом Чохральского в автоматическом режиме.

Выращивание кристаллов  $Nd:Gd_{0.7}Y_{0.3}VO_4$  (атомная концентрация  $Nd$  0.5 %) длиной 70 мм с сечением  $15 \times 15$  мм проводили методом Чохральского из иридиевого тигля диаметром 60 мм. Для предотвращения взаимодействия расплава с тиглем применялась защитная слабо окислительная атмосфера. В процессе роста скорость вытягивания и вращения кристаллов составляли 0.8–2 мм/ч и 10–15 об./мин соответственно. Кристаллические були  $Nd:Gd_{0.7}Y_{0.3}VO_4$  с атомной концентрацией  $Nd$  0.5 % обладают высоким оптическим качеством по всей длине, поэтому весь объем були использовали для изготовления лазерных элементов.

Спектроскопические характеристики лазерных кристаллов исследовались с помощью спектрофотометра SHIMADZU UV-3101PC и спектрометра на основе автоколлимационной трубы УФ-90 с разрешением 0.1 нм/мм.

Исследования показали, что спектры линий поглощения ионов  $Nd^{3+}$  в смешанных ванадатах лишь незначительно уширены и практически не сдвинуты по сравнению со спектрами поглощения традиционных кристаллов  $Nd:GdVO_4$ ,  $Nd:YVO_4$  в диапазоне длин волн 740–840 нм, который используется для накачки полупроводниковыми лазерными диодами.

На рис.1 приведены спектры линий люминесценции кристаллов  $YAG$ ,  $GdVO_4$ ,  $YVO_4$ , а также  $Gd_{0.7}Y_{0.3}VO_4$ , активированных ионами неодима на переходах  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$  для р-поляризации. Видно, что пик люминесценции ионов  $Nd^{3+}$  в смешанном ванадате находится между пиками люминесценции для  $GdVO_4$  и  $YVO_4$  и зависит от соотношения концентраций  $Y$  и  $Gd$  в кристалле. Изменение этого соотношения ( $Gd_xY_{1-x}$ ) приводит к перестройке длины волны лазера в пределах 1063–1064 нм.

В наших экспериментах по исследованию лазерной генерации использовался кристалл смешанного ванадата

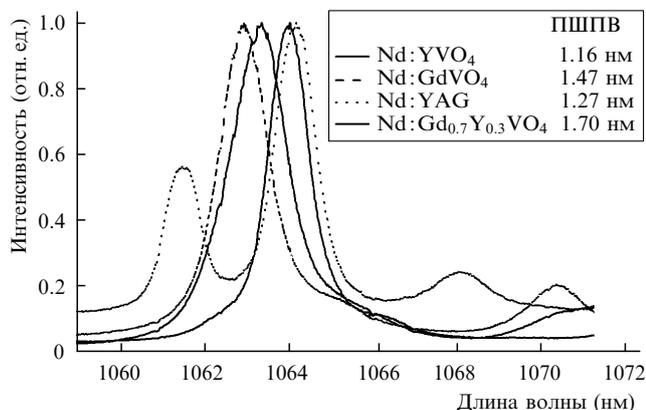


Рис.1. Спектры люминесценции лазерных кристаллов  $GdVO_4$ ,  $YVO_4$ ,  $Gd_{0.7}Y_{0.3}VO_4$  и  $YAG$ , активированных ионами неодима на переходах  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ .

$Nd:Gd_{0.7}Y_{0.3}VO_4$ . Для данного кристалла длина волны генерации лазера составляет 1063.3 нм при полуширине линии люминесценции 1.7 нм.

## 3. Режим непрерывной генерации лазера

Для того чтобы оценить качество активных лазерных элементов на основе кристаллов смешанных ванадатов  $Nd:Gd_{0.7}Y_{0.3}VO_4$  на переходе  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ , были проведены эксперименты с непрерывным режимом генерации лазера при использовании короткого плоского резонатора.

Лазерный кристалл  $Nd:Gd_{0.7}Y_{0.3}VO_4$  с атомной концентрацией  $Nd$  0.5 % размером  $4 \times 4 \times 6$  мм был вырезан вдоль оси  $a$ . Диэлектрическое зеркало 31 было непосредственно нанесено на одну из поверхностей кристалла и имело высокие отражение ( $R > 99.9\%$ ) на длине волны 1064 нм и пропускание ( $T > 90\%$ ) на длине волны накачки 808 нм. Вторая сторона активного элемента была просветлена для  $\lambda = 1064$  нм. Плоское выходное зеркало имело пропускание  $T = 8\%$  для  $\lambda = 1064$  нм. Общая длина резонатора составляла 15 мм.

Накачка активного элемента осуществлялась линейкой лазерных диодов LIMO HLU25F200 с волоконным выводом (числовая апертура  $NA = 0.22$ , диаметр сердцевин 200 мкм) и максимальной мощностью излучения до 25 Вт на длине волны 808 нм. Фокусировка излучения накачки осуществлялась системой объективов, которые позволяли получать диаметр пятна перетяжки в кристалле от 150 до 400 мкм. В наших экспериментах активные элементы монтировались с помощью индиевой фольги в медных блоках, охлаждаемых элементами Пельтье или потоком воды.

На рис.2 показана зависимость выходной мощности излучения лазера от поглощенной мощности излучения накачки. Порог генерации составлял 510 мВт. Максимальная выходная мощность 8.2 Вт была получена для поглощенной мощности 15 Вт. Дифференциальный КПД достигал 71 % при общей эффективности 56 %. Необходимо отметить, что полученные лазерные характеристики находятся на уровне лучших результатов, полученных на кристаллах  $Nd:YAG$ ,  $Nd:GdVO_4$  и  $Nd:YVO_4$ .

Однородность выходных параметров лазера при использовании различных участков по поперечному сече-

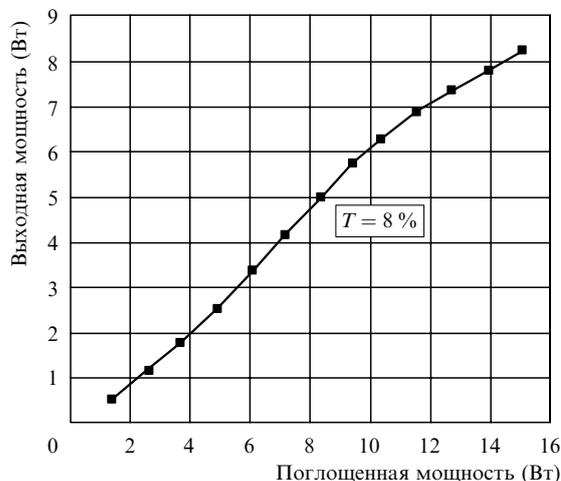


Рис.2. Зависимость мощности выходного излучения лазера на  $Nd:Gd_{0.7}Y_{0.3}VO_4$  на переходах  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$  с длиной волны 1063.3 нм от поглощенной мощности накачки.

нию активного элемента доказывает высокое качество Nd:Gd<sub>0.7</sub>Y<sub>0.3</sub>VO<sub>4</sub> – лазерных кристаллов смешанных ванадатов, используемых в экспериментах.

#### 4. Режим синхронизации мод

Для наших экспериментов по исследованию режимов активной и пассивной СМ в лазере с продольной диодной накачкой была выбрана схема Z-образного резонатора, аналогичная [6]. Она представлена на рис.3.

Активный элемент помещался около глухого зеркала, через которое осуществлялась накачка. Излучение накачки фокусировалось в активный элемент в пятно радиусом приблизительно 100 мкм. Для формирования керровской линзы использовалась пластина из стекла SF57 (Schott) толщиной 5 мм (нелинейный показатель преломления  $n_2 = 2.6 \times 10^{-15}$  см<sup>2</sup>/Вт), которая располагалась между сферическими зеркалами под углом Брюстера к оси резонатора. Для того чтобы исключить эталонный эффект, все грани внутрирезонаторных оптических элементов или разворачивались под углом Брюстера, или использовались клиновидные подложки.

Активный элемент был аналогичен описанному выше, но вторая поверхность была наклонена на угол 1.5° и просветлена ( $R \approx 0.02\%$ ). Z-образный резонатор состоял из диэлектрического зеркала 31, напыленного на входном торце активного элемента, двух сферических зеркал 32 и 33 (радиус кривизны 100 мм) и клиновидного (угол 1.5°) выходного зеркала 34 ( $T = 5\%$ ). Расстояние между зеркалами 31 и 32 составляло 380 мм, между 32 и 33 – 108 мм, между 33 и 34 – 549 мм. Зеркала 32 и 33 были развернуты на угол  $\sim 16^\circ$  для компенсации астигматизма сферических зеркал.

Акустооптический модулятор (АОМ) МЛ-202 имел брюстеровские грани и располагался около выходного зеркала 34. АОМ термостабилизировался с помощью микрохолодильника Пельтье с точностью 0.1 °С. Частота модуляции АОМ равнялась 70 МГц, что соответствовало геометрической длине резонатора 1037 мм (оптической длине 1071 мм), частота следования импульсов составляла при этом 140 МГц. Мощность высокочастотного сигнала варьировалась в пределах 1.5–8 Вт.

Излучение цуга лазерных импульсов детектировалось быстродействующим приемником на лавинном фотодиоде ЛФД-2 и осциллографом Tektronix TDS3052 (полоса пропускания 500 МГц). Длительность импуль-

сов излучения измерялась с помощью стрик-камеры с разрешением 0.7 пс (GPI Photoelectronics Dept. Mod. PN-01/s20).

При исследовании активной синхронизации мод пластинка SF57 выводилась из перетяжки между сферическими зеркалами и служила только для компенсации астигматизма. Согласование длины резонатора с частотой АОМ осуществлялось с помощью прецизионного юстировочного узла. При отстройке длины резонатора от оптимальной более чем на 2–3 мм реализовывался только непрерывный режим работы. Уменьшение рассогласования приводило сначала к пиковому режиму модуляции добротности, далее на этих пиках возникала СМ, а затем наблюдалась система нескольких стохастических цугов импульсов. Настройка длины резонатора осуществлялась по минимальной длительности импульсов. Устойчивый режим генерации пикосекундных импульсов наблюдался в диапазоне расстройки 50–70 мкм. В режиме АСМ в наших экспериментах наименьшая достигнутая длительность импульсов составила 9.4 пс. Средняя мощность при этом достигала 640 мВт.

Реализован также режим пассивной синхронизации мод на керровской нелинейности. Режим ПСМК достигался при соответствующем подборе расстояния между сферическими зеркалами 32 и 33, а также положением пластинки SF57 между ними. Наблюдались две зоны устойчивой генерации пикосекундных импульсов в зависимости от расстояния между зеркалами 32 и 33. Оптимальное положение пластинки из SF57 при этом находилось в пределах  $52 \pm 1$  мм от зеркала 32. При этом положении режим ПСМК возникал самостоятельно, без каких-либо дополнительных воздействий. При оптимизации положения оптических элементов первоначально наблюдался переход от непрерывного режима к регулярному пиковому режиму, далее на этих пиках возникла СМ [7], а затем следовал режим стабильной СМ. Долговременная стабильность работы лазера в режиме ПСМК зависела от стабильности источника накачки. Измеренная длительность импульсов излучения в этом режиме была порядка 2 пс при средней мощности 310 мВт.

Для стабилизации работы лазера на основе кристаллов смешанного ванадата Nd:Gd<sub>0.7</sub>Y<sub>0.3</sub>VO<sub>4</sub> была реализована ГСМ при одновременном использовании акустооптического модулятора и керровской линзы. В этом режиме наблюдалось расширение области работы керровской нелинейности (по положению пластинки из SF57 и расстоянию между зеркалами 32 и 33), что позволило несколько упростить настройку лазера и получить наиболее короткие импульсы излучения.

При мощности накачки 3 Вт наблюдался стабильный цуг лазерных импульсов с минимальной длительностью до 1.7 пс и средней выходной мощностью 340 мВт. На рис.4 показана развертка такого импульса, полученная с помощью стрик-камеры. Ширина спектра излучения составляла около 0.9 нм. Произведение ширины спектра  $\Delta\nu$  на длительность импульса  $\Delta t$  ( $\Delta t \Delta\nu = 0.46$ ) в данном случае практически совпадает с минимально возможным значением в предположении о гауссовой форме импульса излучения ( $(\Delta t \Delta\nu)_{\min} = 0.44$ ) и близка к минимально возможному в предположении о  $\text{sech}^2$ -форме импульса ( $(\Delta t \Delta\nu)_{\min} = 0.32$ ), что указывает на отсутствие чирпа в частотном спектре излучения лазера и на то, что компенсация дисперсии групповой скорости не является необходимой.

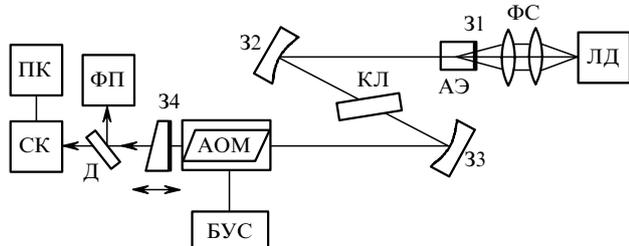


Рис.3. Экспериментальная схема лазера с СМ:

АЭ – активный элемент; ЛД – линейка лазерных диодов накачки; ФС – фокусирующая оптика; 31–34 – зеркала резонатора; КЛ – стеклянная пластина SF57; АОМ – акустооптический модулятор; БУС – высокочастотный генератор с системой термостабилизации; Д – делитель пучка; СК – стрик-камера; ПК – компьютер; ФП – фотоприемник.

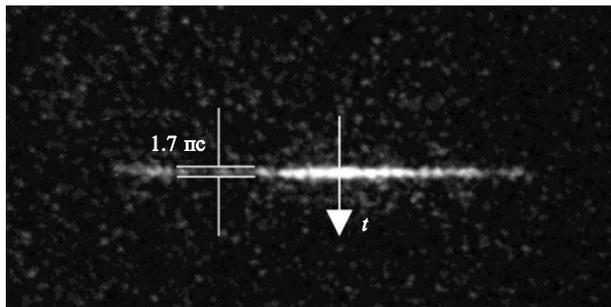


Рис.4. Развертка импульса лазерного излучения на стрик-камере.

## 5. Заключение

В настоящей работе показана перспективность использования активных сред на основе кристаллов смешанного ванадата  $\text{Nd}^{3+}:\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$  для создания пикосекундных лазеров с диодной накачкой. Выращены кристаллы  $\text{Nd}:\text{Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4$  (атомная концентрация Nd 0.5 %) высокого оптического качества и исследованы их спектральные характеристики. В режиме непрерывной генерации максимальная выходная мощность 8.2 Вт была достигнута при поглощенной мощности 15 Вт, дифференциальный КПД был равен 71 % (общая эффективность – 56 %), при этом порог генерации составлял 510 мВт. Исследованы различные режимы синхронизации мод: активная синхронизация, пассивная синхрони-

зация с керровской линзой и гибридная синхронизация. Получены стабильные пикосекундные импульсы генерации с длительностями 9.4 пс и средней мощностью 640 мВт для АСМ. Минимальная длительность импульсов излучения 1.7 пс была достигнута в режиме ГСМ при средней выходной мощности 340 мВт. Оптимизацией соотношения Gd и Y ( $\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}$ ) в кристаллах смешанного ванадата можно добиться получения еще более коротких длительностей лазерных импульсов излучения.

Данная работа была частично поддержана РФФИ (грант № 05-02-17330) и Swiss National Science Foundation (грант № IB7420-110873/1). Авторы выражают благодарность Н.А.Воробьеву и В.И.Лозовому за помощь в измерении длительности импульсов и А.А.Иванову за полезные обсуждения.

1. Sorokin E., Sorokina I., Winter E., Zagumennyi A.I., Shcherbakov I.A. *OSA Proc. Advanced Solid-State Lasers*, **15**, 238 (1993).
2. Ostroumov V.G., Huber G., Zagumennyi A.I., Zavartsev Yu.D., Studenikin P.A., Shcherbakov I.A. *Opt. Commun.*, **124**, 63 (1996).
3. Liu J., Wang Z., Meng X., Shao Z., Ozygus B., Ding A., Weber H. *Opt. Lett.*, **28** (23), 2330 (2003).
4. Liu J., Meng X., Shao Z., Jiang M., Ozygus B., Ding A., Weber H. *Appl. Phys. Lett.*, **83** (7), 1289 (2003).
5. He J., Fan Y., Du J., Wang J., Liu S., Wang H., Zhag L., Hang Y. *Opt. Lett.*, **29** (24), 2803 (2004).
6. Maldonado E.P., Vieira N.D. Jr. *Revista de Fisica Aplicada e Instrumenta*, **12** (3), 102 (1997).
7. Honninger C., Paschotta R., Morier-Genoud F., Mozer M., Keller U. *J. Opt. Soc. Am. B*, **16**, 46 (1999).