

# Квазитрехуровневый Nd : GdVO<sub>4</sub>-лазер на $\lambda = 456$ нм с диодной накачкой

Ю.Д.Заварцев, А.И.Загуменный, Ф.Зероук, С.А.Кутовой,  
В.А.Михайлов, В.В.Подрешетников, А.А.Сироткин, И.А.Щербаков

*Представлены результаты исследований Nd : GdVO<sub>4</sub>-лазера с диодной накачкой, работающего по квазитрехуровневой схеме на переходе иона неодима  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$  с длиной волны излучения  $\lambda = 912$  нм, и внутривибрационной генерацией второй гармоники в кристаллах KNbO<sub>3</sub> в голубой области ( $\lambda = 456$  нм) спектра. Получена максимальная мощность излучения 2.96 Вт на основной частоте и эффективность преобразования до 48 %. На удвоенной частоте достигнута мощность излучения 220 мВт при эффективности преобразования 15 %.*

**Ключевые слова:** Nd : GdVO<sub>4</sub>, диодная накачка, внутривибрационная генерация второй гармоники.

## 1. Введение

Простые и компактные твердотельные лазеры, работающие в голубой области спектра, могут найти применение в различных устройствах, где в настоящее время используются аргоновые лазеры (устройства записи информации, дисплеи, медицинские приборы и др.). Возможно, что в будущем в этой области полупроводниковые лазеры найдут широкое применение, но сегодня квазитрехуровневые лазеры на неодимсодержащих кристаллах с удвоением частоты являются основными твердотельными источниками излучения в голубой области спектра, особенно при высоких мощностях.

Первыми такими источниками были работающие по квазитрехуровневой схеме лазеры на кристаллах Nd : YAG [1] с  $\lambda = 946$  нм, позволяющие после удвоения частоты получить излучение с  $\lambda = 473$  нм. Для генерации более коротковолнового излучения можно использовать такие кристаллы, как Nd : YAlO<sub>3</sub> ( $\lambda = 930$  нм) [2], Nd : YVO<sub>4</sub> (915 нм) [3] и Nd : GdVO<sub>4</sub> (912 нм) [4]. Наиболее коротковолновым излучением на переходе  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$  иона неодима обладает лазер на кристалле Nd : GdVO<sub>4</sub> [5]. Кроме того, известно, что при работе на  $\lambda = 1063$  и 1340 нм данный кристалл имеет высокую эффективность как на основной частоте, так и на частоте второй гармоники [6, 7].

Целью настоящей работы было исследование возможности создания мощного высокоэффективного лазера на кристалле Nd : GdVO<sub>4</sub> ( $\lambda = 912$  нм) с диодной накачкой, а также изучение условий реализации эффективного преобразования излучения в голубую (456 нм) область спектра.

Ю.Д.Заварцев, А.И.Загуменный, С.А.Кутовой, В.А.Михайлов, В.В.Подрешетников, А.А.Сироткин, И.А.Щербаков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38  
F.Zerrouk. Zecotek Inc., 1620 Sherbrooke Str. West, Suites C&D, Quebec N3H 1C9, Canada

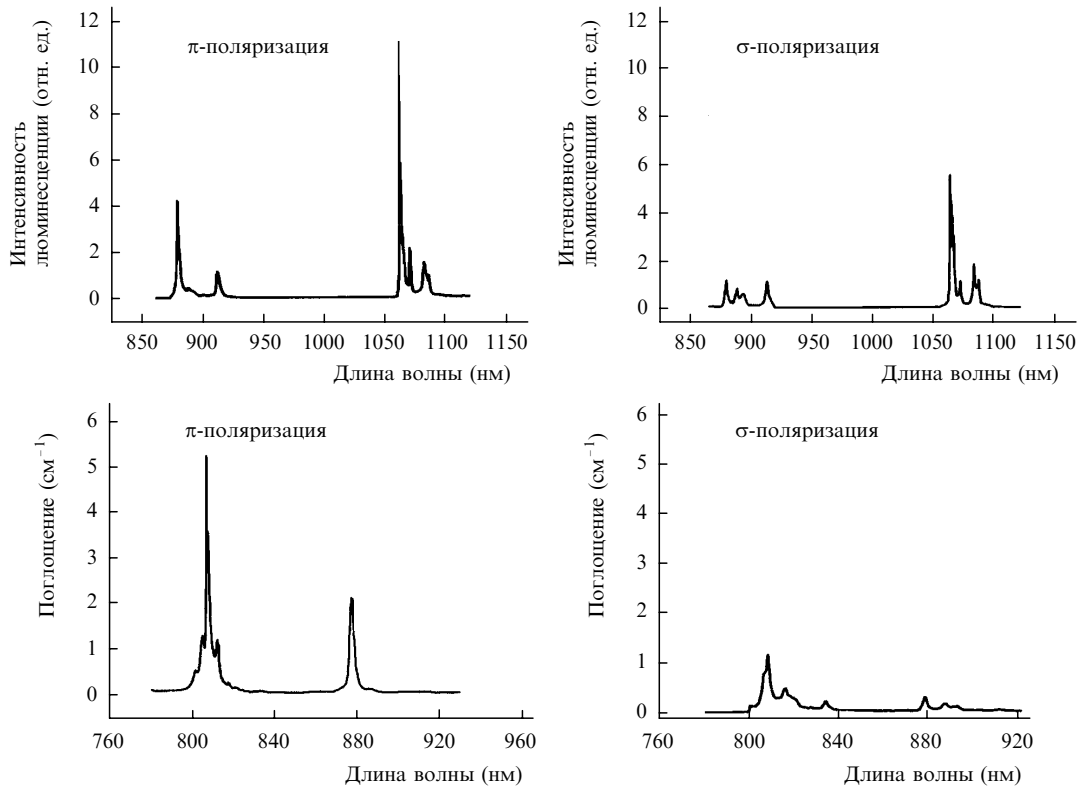
Поступила в редакцию 28 января 2003 г.

## 2. Кристалл Nd : GdVO<sub>4</sub> и его свойства

Для получения лазерной генерации по квазитрехуровневой схеме на переходе иона неодима  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$  в наших экспериментах использовались кристаллы Nd : GdVO<sub>4</sub>, выращенные методом Чохральского в Научном центре лазерных материалов и технологий ИОФ РАН. Активные элементы были вырезаны перпендикулярно оси *a*. На рис. 1 представлены спектры поглощения и люминесценции кристалла Nd : GdVO<sub>4</sub>, демонстрирующие сильную поляризационную зависимость. Сравнительные спектроскопические и лазерные характеристики кристаллов Nd : YAG, Nd : YAlO<sub>3</sub>, Nd : YVO<sub>4</sub> и Nd : GdVO<sub>4</sub> для лазеров, работающих по квазитрехуровневой схеме, приведены в табл. 1.

Видно, что использование гадолиниевого ванадата имеет ряд преимуществ по сравнению с использованием других кристаллов. Этот кристалл позволяет получить на переходе  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$  излучение с наименьшей длиной волны. Теплопроводность кристаллов Nd : GdVO<sub>4</sub> вдвое превышает таковую для Nd : YVO<sub>4</sub> и сравнима с теплопроводностью Nd : YAG в направлении  $\langle 110 \rangle$ . Лазерное излучение линейно поляризовано, что особенно важно для дальнейшего удвоения частоты. Кристаллы Nd : GdVO<sub>4</sub> могут быть получены с концентрацией неодима до 3 % практически без снижения эффективности генерации.

Одним из недостатков кристалла Nd : GdVO<sub>4</sub> является относительно небольшое расщепление нижнего уровня ( $409 \text{ см}^{-1}$ ) по сравнению с кристаллом Nd : YAG ( $857 \text{ см}^{-1}$ ). Больцмановский фактор нижнего лазерного уровня при комнатной температуре для Nd : GdVO<sub>4</sub> составляет  $\sim 5$  % (для Nd : YAG он равен 0.7 %). Поскольку нижний лазерный уровень является верхним подуровнем мультиплета  ${}^4I_{9/2}$ , то этот подуровень термически связан с основным состоянием и при повышении температуры должен интенсивно заселяться. Это, в свою очередь, приводит к возрастанию потерь на поглощение из основного состояния, увеличению пассивных внутривибрационных потерь и, соответственно, уменьшению выходной энергии лазера и повышению порога генерации.

Рис.1. Спектры люминесценции и поглощения кристалла Nd:GdVO<sub>4</sub> для π- и σ-поляризации.

### 3. Системы накачки

В связи с относительно малым сечением индуцированного перехода  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$  и значительными внутрирезонаторными потерями из-за реабсорбции порог генерации в таких лазерах достаточно высок. Поэтому для получения эффективной генерации по квазитрехуровневой схеме на кристаллах Nd:GdVO<sub>4</sub> необходимо использовать мощный источник накачки с высокой яркостью и обеспечить низкий уровень пассивных потерь внутри резонатора. Эти потери, определяются в основном качеством используемых оптических элементов, а также степенью охлаждения активных элементов.

В настоящей работе представлены две серии экспери-

ментов с двумя источниками накачки. В первой серии применялась система диодной накачки (производство фирмы Polaroid) с оптоволоконным выводом (диаметр сердцевины волокна 120 мкм, числовая апертура NA = 0.22) и мощностью излучения до 3 Вт на  $\lambda = 808$  нм. Фокусирующая система давала возможность получать диаметр перетяжки пучка в кристалле в пределах 80–200 мкм. Во второй серии экспериментов использовалась мощная система накачки LIMO HLU25F200 с оптоволоконным выводом (диаметр сердцевины 200 мкм, NA = 0.22) и максимальной мощностью излучения до 25 Вт. Для фокусировки излучения применялись объективы, позволяющие получать диаметр перетяжки в кристалле от 150 до 400 мкм.

Табл.1. Основные характеристики лазерных кристаллов [8].

Параметры лазеров	Nd:GdVO <sub>4</sub>	Nd:YVO <sub>4</sub>	Nd:YAG	Nd:YAIO <sub>3</sub>
Длина волны излучения на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$ (нм)	912	915	946	930
Сечение индуцированного перехода ( $10^{-19}$ см <sup>2</sup> )	0.7 (π)	0.5 (π)	0.64	0.53
	0.6 (σ)	0.4 (σ)	–	–
Сечение поглощения ( $10^{-19}$ см <sup>2</sup> )	5.2 (π)	2.7 (π)	0.7	0.5
	1.3 (σ)	–	–	–
Теплопроводность (Вт/мК)	11.7 (  c)	5.23 (  c)	11.1	9.1
	9.63 (⊥c)	5.10 (⊥c)	–	–
Время жизни верхнего лазерного уровня при концентрации неодима 1 % (мс)	94	110	220	150
Длина волны накачки (нм)	808.4	808.5	807.5	794.5
Коэффициент поглощения при концентрации неодима 1 % (см <sup>-1</sup> )	57	40.7	8	7
Поляризация	c	c	–	c
Ширина линии поглощения на уровне 75 % (см <sup>-1</sup> )	13.5	15.7	2.5	3.1
Расщепление нижнего уровня (см <sup>-1</sup> )	409	439	857	670

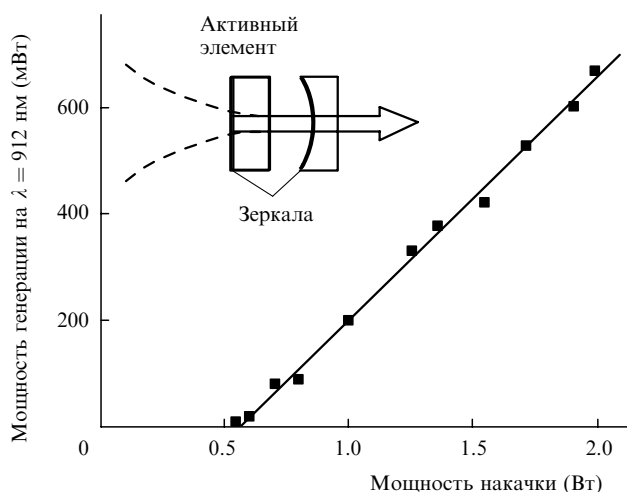


Рис.2. Зависимость мощности генерации на  $\lambda = 912$  нм от мощности накачки для схемы лазера, показанной на вставке.

В наших экспериментах активные элементы и нелинейные кристаллы монтировались с помощью индиевой фольги в медных блоках, температура которых контролировалась термоэлектрическими микрохолодильниками Пельтье или водяным охлаждением.

#### 4. Экспериментальные результаты

Результаты первой серии экспериментов приведены на рис.2, 3. В качестве активного элемента использовались кристаллы Nd:GdVO<sub>4</sub> с атомной концентрацией ионов неодима 0.6 %, длиной 2 мм и сечением 3 × 3 мм. Резонатор был образован диэлектрическим зеркалом, нанесенным непосредственно на активный элемент, и вогнутым выходным зеркалом (радиус кривизны  $R = 52$  мм) с коэффициентом отражения  $r = 96$  % на основной частоте. Другая сторона активного элемента была просветлена на  $\lambda = 912, 1064$  и  $1340$  нм и имела отражающее покрытие для излучения накачки с  $\lambda = 808$  нм. Обратное отражение прошедшего через активный элемент излучения накачки позволило увеличить поглощенную мощность, снизить потери на поглощение из основного состояния в кристалле, сформировать более однородную активную среду и, как следствие, повысить эффективность лазерной системы. Все элементы резонатора в данных и последующих экспериментах были просветлены на  $\lambda = 1064$  и  $1340$  нм, чтобы подавить генерацию на этих длинах волн. Излучение накачки фокусировалось в пятно диаметром 100 мкм.

Зависимость мощности выходного излучения на  $\lambda = 912$  нм от поглощенной мощности накачки показана на рис.2. Максимальная выходная мощность лазерного излучения 670 мВт была достигнута при поглощенной мощности накачки 2 Вт. Порог генерации составлял 510 мВт. При этом дифференциальный КПД достигал 48 % (общая эффективность была равна 33 %). Следует отметить, что полученная эффективность генерации на  $\lambda = 912$  нм оказалась сравнима с максимальной эффективностью для кристаллов Nd:YAG [9, 10].

Для внутррезонаторного преобразования излучения во вторую гармонику использовался преобразователь частоты на основе кристалла KNbO<sub>3</sub>. Преобразователь размещался на месте выходного зеркала (рис.3). Нелинейный кристалл длиной 1.3 мм и сечением 3 × 3 мм был

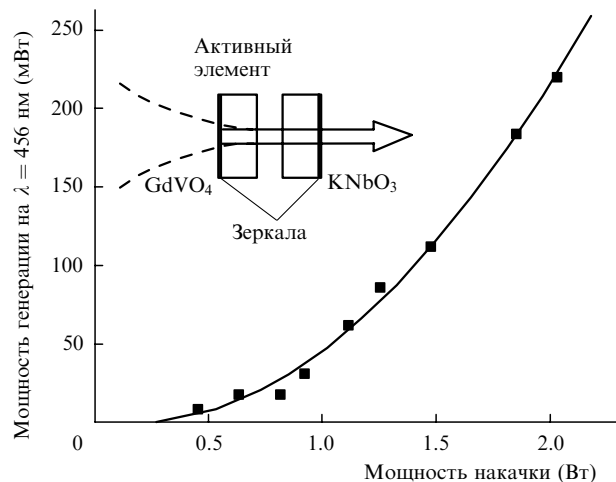


Рис.3. Зависимость мощности генерации на длине волны второй гармоники (456 нм) от мощности накачки для схемы лазера, показанной на вставке.

вырезан так, что фазовый синхронизм достигался при комнатной температуре. Подстройка под синхронизм осуществлялась с помощью термостабилизатора. Выходная поверхность кристалла имела диэлектрическое покрытие с высокими отражением на  $\lambda = 912$  нм и пропусканием на  $\lambda = 456$  нм. Другая сторона нелинейного преобразователя была просветлена на  $\lambda = 912, 1064$  и  $1340$  нм. Выходное излучение выводилось в одну сторону.

На рис.3 представлена зависимость выходной мощности излучения на длине волны второй гармоники (456 нм) от поглощенной мощности накачки. При поглощенной мощности 2 Вт была зарегистрирована мощность излучения 225 мВт при эффективности преобразования 15 %. Порог генерации составил 300 мВт.

Исследования лазера с мощной накачкой проводились на кристаллах Nd:GdVO<sub>4</sub> длиной от 1 до 5 мм и сечением 3 × 3 мм с концентрацией ионов неодима от 0.15 до 2 %. Лучшие результаты были получены для активных элементов длиной 3.5 мм с концентрацией ионов неодима 0.3 %. Схема лазера приведена на вставке к рис.4. Резонатор был образован плоским входным зеркалом с

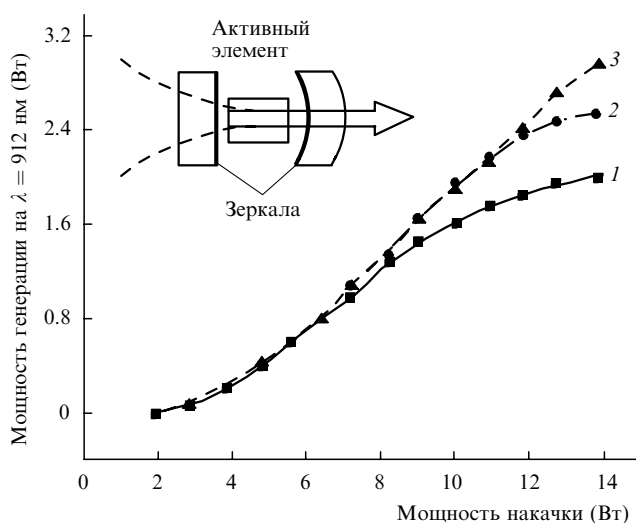


Рис.4. Зависимости мощности генерации на  $\lambda = 912$  нм от мощности накачки при непрерывном излучении (1) и излучении со скважностью 50 % (2) и 33 % (3) для схемы лазера, показанной на вставке.

высоким отражением на  $\lambda = 912$  нм и вогнутым выходным зеркалом ( $R = 52$  мм) с  $r = 94\%$  на  $\lambda = 912$  нм. Торцы активного элемента были просветлены. Оптическая система фокусировала излучение с диаметром перетяжки внутри кристалла 250 мкм.

На рис.4 (кривая 1) показана зависимость выходной мощности лазера на  $\lambda = 912$  нм от поглощенной мощности накачки в непрерывном режиме. Видно, что зависимость имеет нелинейный характер: при мощности накачки свыше 10 Вт наступает насыщение. При поглощенной мощности 13.8 Вт выходная мощность достигала наибольшего значения 2.06 Вт. По-видимому, насыщение определяется термической линзой и нагревом активной среды. Для снижения влияния термооптических искажений был использован импульсный режим накачки. Кривые 2 и 3 соответствуют режиму с отношением длительностей паузы и импульса (скважностью) 10 : 10 и 20 : 10 мс соответственно. Видно, что при меньшей скважности начало насыщения смещается в сторону больших мощностей накачки, а при большей скважности наблюдается практически линейный рост выходной мощности. При этом мощность излучения составила 2.96 Вт, а дифференциальный КПД – 24.3 %. Необходимо отметить, что полученная эффективность преобразования была значительно меньше, чем в первой серии экспериментов. По-видимому, это связано с применением в данных экспериментах кристаллов большей длины, что приводило к увеличению внутрирезонаторных пассивных потерь. Кроме того, не было вторично использовано излучение накачки, прошедшее через кристалл.

Таким образом, для дальнейшего увеличения выходной мощности лазера необходима оптимизация способов накачки и параметров резонатора, а также поиск эффективных способов уменьшения влияния термической линзы в кристаллах.

## 5. Заключение

Проведенные исследования показали, что кристаллы Nd : GdVO<sub>4</sub> являются хорошими лазерными элементами для получения генерации по квазитрехуровневой схеме на  $\lambda = 912$  нм. Несмотря на малое расщепление нижнего лазерного уровня, энергетические параметры и эффективность преобразования, достигнутые в наших экспериментах на кристаллах Nd : GdVO<sub>4</sub>, сравнимы с результатами, полученными на Nd : YAG. Максимальная мощность выходного излучения составила 2.96 Вт, дифференциальный КПД на основной частоте достигал 48 %. Первые эксперименты с внутрирезонаторным преобразованием частоты продемонстрировали перспективность применения кристаллов Nd : GdVO<sub>4</sub> для генерации излучения в голубой части спектра. Выходная мощность излучения на  $\lambda = 456$  нм была равна 225 мВт.

1. Fan T.Y., Byer R. *Opt. Lett.*, **12** (10), 809 (1987).
2. Zarrabi J.H., Gavrilovic H., Sungh S. *Appl. Phys. Lett.*, **67** (17), 2439 (1995).
3. Сычугов В.А., Михайлов В.А., Кондратюк В.А., Линдин Н.М., Фрам Ю., Загуменный А.И., Заварцев Ю.Д., Студеникин П.А. *Квантовая электроника*, **13** (1), 13 (2000).
4. Schmidt M., Heumann E., Cztranzovsky C., Huber G., Kutovoi S.A., Zavartsev Y. In: *Advanced Solid-State Lasers. V.50*. Ed. by C. Marshall (Seattle: OSA, 2001, p.470).
5. Загуменный А.И., Остроумов В.Г., Щербаков И.А., Йенсен Т. и др. *Квантовая электроника*, **19** (12), 1149 (1992).
6. Liu J., Shao Z., Zhang H., Meng X., Zhu L., Jiang M. *Opt. Laser Technol.*, **31**, 459 (1999).
7. Wang C.Q., Chow Y.T., Reekie L., Gambling W.A., Zhang H.J., Zhu L., Meng X.L. *Appl. Phys. B*, **70**, 769 (2000).
8. Zagumennyi A.I. *Laser Phys.*, **13** (3), 1 (2003)
9. Wang C.Q., Chow Y.T., Reekie L., Gambling W.A. *Opt. Commun.*, **167**, 155 (1999).
10. Abraham M., Bar-Lev A., Epshtein H., Goldring A., Zimmerman Y., Lebiush E., Lavi R. *Techn. Dig. ASSL-2001* (2001, WB8-1, p.357).



Заседание кафедры лазерной физики Московского физико-технического института (2001 г.)