

Новые возможности кристаллов ванадатов с неодимом как активных сред лазеров с диодной накачкой

В.И.Власов, С.В.Гарнов, Ю.Д.Заварцев, А.И.Загуменный,
С.А.Кутовой, А.А.Сироткин, И.А.Щербаков

Исследованы спектроскопические и генерационные характеристики кристаллов ванадатов $GdVO_4:Nd$, $YVO_4:Nd$ и $Gd_{0.7}Y_{0.3}VO_4:Nd$, вырезанных вдоль оси c . В неселективном резонаторе впервые получена лазерная генерация на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ с длиной волны излучения 1065.5 нм в кристалле $GdVO_4:Nd$. Реализована перестройка в диапазоне длин волн излучения 1062.3 – 1066.1 нм и получена двухчастотная генерация.

Ключевые слова: кристаллы $GdVO_4:Nd$, $YVO_4:Nd$, $Gd_{1-x}Y_xVO_4:Nd$, диодная накачка.

1. Введение

Создание высокоэффективных твердотельных лазеров, расширение их функциональных возможностей и методов управления режимами их генерации, получение двухчастотного и перестраиваемого излучения представляют большой научный и практический интерес. Прогресс в этом направлении лазерной физики обусловлен использованием для накачки полупроводниковых лазерных диодов, созданием новых активных сред, а также выявлением новых возможностей известных активных сред. Активные среды на основе кристаллов гадолиниевого $GdVO_4:Nd$ [1], иттриевого $YVO_4:Nd$ [2] и смешанных $Gd_{0.5}La_{0.5}VO_4:Nd$ [3] и $Gd_{1-x}Y_xVO_4:Nd$ [4, 5] ванадатов в настоящее время находят самое широкое применение в различных лазерах с диодной накачкой вследствие оптимального сочетания спектроскопических, лазерных и теплофизических свойств данных кристаллов.

Кристаллы смешанных ванадатов $Gd_{0.5}La_{0.5}VO_4:Nd$ и $Gd_{1-x}Y_xVO_4:Nd$ сохраняют свойства своих предшественников, но при этом варьирование соотношений концентраций Y, Gd и La позволяет изменять сечения люминесценции и поглощения, ширины линий поглощения и излучения, длины волн генерации, время жизни верхних лазерных уровней.

Кристаллы ванадатов обладают сильной анизотропией, поэтому их спектроскопические и теплофизические характеристики сильно зависят от ориентации вдоль различных кристаллографических осей. Спектры поглощения и люминесценции для кристаллов, вырезанных вдоль оси a (для σ - и π -поляризации) и вдоль оси c , в случае кристаллов ванадатов и смешанных ванадатов сильно различаются. Лазерная генерация наиболее эффективна для кристаллов, вырезанных вдоль оси a (π -поляризация), поэтому исследования ведутся в основном при такой ориентации кристалла. Вдоль других направлений сечения индуцированного перехода значительно меньше. Например, для кристаллов $GdVO_4:Nd$, вырезанных вдоль

осей a и c , эти сечения составляют 7.6×10^{-19} и 1.2×10^{-19} см² соответственно [6].

Использование кристаллов $GdVO_4:Nd$, вырезанных вдоль оси c , для режима модуляции добротности с помощью пассивных затворов на YAG:Cr⁴⁺ оказалось более предпочтительным в сравнении с использованием кристаллов обычной ориентации [6].

В настоящей работе выполнены экспериментальные исследования свойств кристаллов иттриевого, гадолиниевого и смешанных ванадатов, вырезанных вдоль оси c , а также возможности создания на основе этих кристаллов эффективных перестраиваемых по частоте и двухчастотных лазеров с диодной накачкой на переходах ионов неодима ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$.

2. Спектры люминесценции в области генерации кристаллов с различной ориентацией

Кристаллы ванадатов для исследований были выращены в Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН методом Чохральского на промышленных установках с индукционным нагревом «Кристалл-2» и «Кристалл-3М».

Спектроскопические характеристики лазерных кристаллов исследовались с помощью спектрофотометра SHIMADZU UV-3101PC и спектрометра на основе автоколлимационной трубы УФ-90 (обратная линейная дисперсия 0.1 нм/мм) с линейным многоканальным фотоприемником TOSHIBA TCD130JK. Спектры поглощения кристаллов ванадатов, вырезанных вдоль оси a (π -поляризация) и оси c , различаются незначительно.

На рис.1 приведены нормированные на единицу фрагменты спектров люминесценции на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ кристаллов $GdVO_4:Nd$, $YVO_4:Nd$, а также $Gd_{0.7}Y_{0.3}VO_4:Nd$, вырезанных вдоль осей a и c . Видно, что спектры люминесценции этих кристаллов, вырезанных вдоль осей a или c , существенно различаются. Наблюдается смещение частот и перераспределение интенсивностей излучения межштарковских переходов. Для кристаллов $GdVO_4:Nd$ и $Gd_{0.7}Y_{0.3}VO_4:Nd$, вырезанных вдоль оси c , наблюдается перекрытие двух рядом лежащих подуровней. Особый интерес представляет кристалл $GdVO_4:Nd$, поскольку интенсивность линии с длиной волны $\lambda = 1065.5$ нм пре-

В.И.Власов, С.В.Гарнов, Ю.Д.Заварцев, А.И.Загуменный, С.А.Кутовой, 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

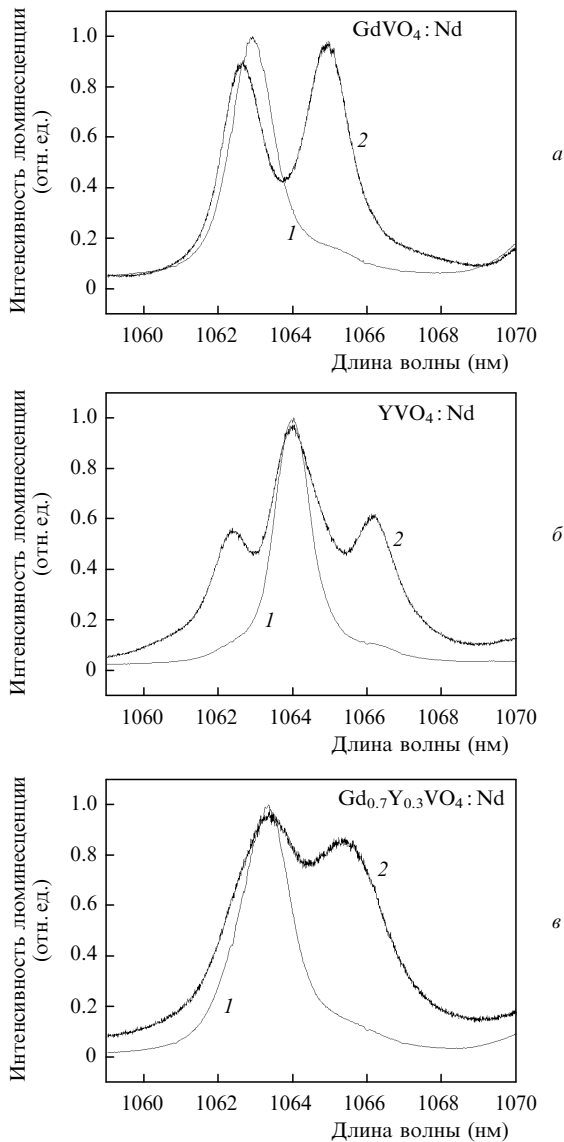


Рис.1. Фрагменты спектра люминесценции на лазерном переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ кристаллов $GdVO_4:Nd$ (а), $YVO_4:Nd$ (б), а также $Gd_{0.7}Y_{0.3}VO_4:Nd$ (в), вырезанных вдоль оси *a* (π -поляризация) (кривые 1) и вдоль оси *c* (кривые 2).

вышает интенсивность линии люминесценции с $\lambda = 1063.2$ нм, на которой обычно наблюдается лазерная генерация в кристалле, вырезанном вдоль оси *a*. Это указывает на возможность генерации на кристаллах $GdVO_4:Nd$, вырезанных вдоль оси *c*, с $\lambda = 1065.5$ нм в неселективном резонаторе.

Интенсивность линии люминесценции в смешанном ванадате зависит от соотношения концентраций Y и Gd в кристалле. Изменение этого соотношения приводит к трансформации контура усиления в области $\lambda = 1063 - 1064$ нм. При этом линии штарковских переходов уширяются более чем в 1.5 раза по сравнению с шириной линий в $GdVO_4$ и YVO_4 .

Для кристалла $Gd_{0.7}Y_{0.3}VO_4:Nd$, который использовался в наших экспериментах, длина волны линии люминесценции в области генерации составляет 1063.4 нм, а ее полуширина – 5.1 нм. Для кристаллов $YVO_4:Nd$, вырезанных вдоль оси *c*, наблюдается перекрытие трех межштарковских переходов в области генерации, при этом полуширина общего контура усиления составляет 4.7 нм.

Такие уширенные полосы люминесценции позволяют обеспечить новые функциональные возможности лазеров на основе кристаллов ванадатов, вырезанных вдоль оси *c* – это и получение перестраиваемого по частоте лазерного излучения, и создание двухчастотного лазера, и генерация субпикосекундных импульсов излучения [7, 8].

3. Генерация кристаллов $GdVO_4:Nd$ различной ориентации

В качестве активных лазерных элементов использовались вырезанные вдоль оси *a* и оси *c* кристаллы $GdVO_4:Nd$ с атомной концентрацией ионов неодима 0.5 % и размерами $4 \times 4 \times 6$ или $4 \times 4 \times 8$ мм.

Лазерный кристалл монтировался с помощью индийской фольги в медный блок, охлаждаемый водой. Для накачки использовалась система лазерных диодов LIMO HLU25F400 с волоконным выводом (диаметр волокна 400 мкм, числовая апертура $NA = 0.22$) и максимальной мощностью излучения до 30 Вт. Излучение накачки фокусировалось в активном элементе в пятно диаметром от 250 до 400 мкм. Для перестройки излучения лазера внутрь резонатора помещались эталон Фабри – Перо или фильтр Лيو. Эталон Фабри – Перо служила плоскопараллельная пластинка толщиной 120 мкм из кристалла YAG без покрытий. Использовались также одноступенчатый ($h = 1.2$ мм) или трехступенчатый фильтры Лео в виде пластин кристаллического кварца, установленные под углом Брюстера к оси резонатора.

Схема лазерной установки представлена на рис.2. Резонатор лазера образован глухим сферическим зеркалом (диэлектрическое покрытие с высоким коэффициентом отражения на $\lambda = 1064$ нм, просветленное на длину волны излучения накачки 808 нм) и плоским (коэффициент пропускания $T = 4.8\%$ или 8% на основной частоте) или сферическим выходным зеркалом (радиус кривизны 52 мм, $T = 5\%$ или 8%). Обе стороны активного элемента были просветлены на $\lambda = 1064$ нм. Излучение накачки фокусировалось в пятно диаметром 400 мкм. Для плоских зеркал устойчивость резонатора обеспечивалась термической линзой, образующейся в кристалле под действием накачки. Уровень пассивных потерь определялся прежде всего качеством лазерных кристаллов и оптических элементов, используемых в конструкции лазеров.

Генерационные эксперименты с кристаллами $GdVO_4:Nd$, вырезанными вдоль осей *a* (π -поляризация) и *c*, показали, что в неселективном резонаторе (как следует из рис.1,а) лазер на кристалле $GdVO_4:Nd$, вырезанном вдоль оси *c*, генерирует излучение на $\lambda = 1065.5$ нм в отличие от кристалла, вырезанного вдоль оси *a*, который генерирует на $\lambda = 1063.2$ нм.

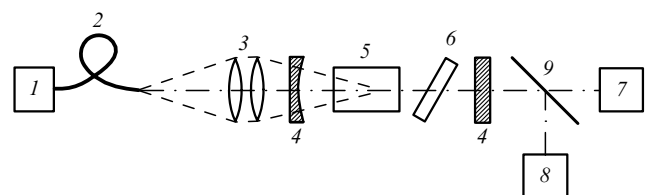


Рис.2. Схема лазера с перестройкой частоты: 1 – источник накачки LIMO SYSTEM; 2 – оптоволокно $\varnothing 400$ мкм; 3 – коллиматор; 4 – зеркала резонатора; 5 – активный элемент; 6 – интерферометр Фабри – Перо; 7 – измеритель мощности; 8 – спектрометр; 9 – зеркало.

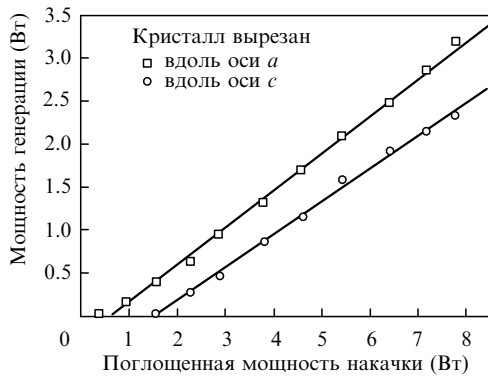


Рис.3. Выходная мощность Nd:GdVO₄-лазера на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ для кристаллов, вырезанных вдоль оси a (π -поляризация) и вдоль оси c , в зависимости от поглощенной мощности накачки.

На рис.3 показана зависимость выходной мощности лазера на основе кристаллов GdVO₄:Nd, вырезанных вдоль оси a ($\lambda = 1063.2$ нм) и оси c ($\lambda = 1065.5$ нм) от поглощенной мощности накачки в непрерывном режиме. Поскольку сечения индуцированного перехода для этих кристаллов, вырезанных вдоль оси c , значительно меньше, чем для вырезанных вдоль оси a (π -поляризация), то и пороги генерации различаются. Порог генерации для первых составил 1.45 Вт, а для вторых – 0.46 Вт.

Эффективность преобразования в кристаллах GdVO₄:Nd, вырезанных вдоль осей a и c , составила 41 % и 33 % при дифференциальном КПД 43 % и 41.5 % соответственно.

4. Перестройка длины волны излучения

Перекрытие линий люминесценции (см. рис.1) позволяет реализовать непрерывную перестройку лазерного излучения в пределах общего контура усиления. На рис.4 представлены перестроечные кривые лазера на основе кристаллов GdVO₄:Nd, вырезанных вдоль оси c , при использовании эталона Фабри–Перо в качестве селективного элемента внутри резонатора.

При поглощенной мощности накачки $P_p = 5.4$ Вт длина волны лазерного излучения плавно перестраивалась в пределах от 1062.3 до 1066.1 нм. При $P_p = 2.5$ Вт наблюдались два отдельных участка генерации.

Для кристаллов GdVO₄:Nd, вырезанных вдоль оси a (π -поляризация), перестройка осуществлялась только в пределах 1.2 нм вблизи длины волны 1063.2 нм.

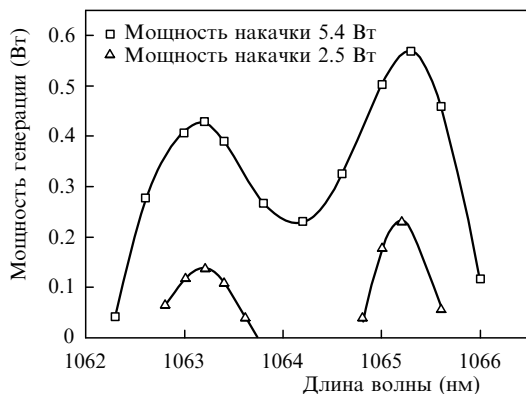


Рис.4. Перестроечные кривые Nd:GdVO₄-лазера на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ для кристаллов, вырезанных вдоль оси c .

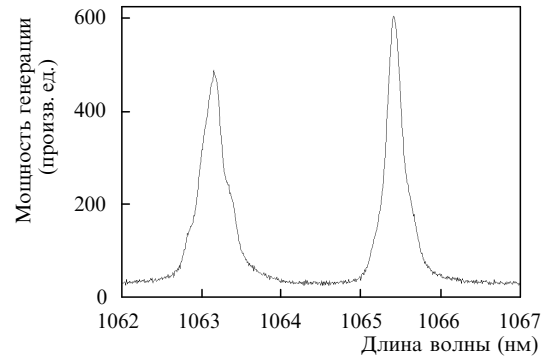


Рис.5. Спектр генерации двухчастотного Nd:GdVO₄-лазера.

В лазере на основе кристаллов GdVO₄:Nd, вырезанных вдоль оси c , при использовании фильтра Лио наблюдался скачкообразный переход от $\lambda = 1063.2$ нм на $\lambda = 1065.5$ нм (эти длины волн соответствуют двум максимумам спектра люминесценции (см. рис.1,а)). При тонкой подстройке фильтра Лио реализовывался режим одновременной генерации излучения лазера на двух длинах волн ($\lambda = 1063.2$ и 1065.5 нм). Данный режим работы лазера (рис.5) может найти широкое применение в научных и практических приложениях. Одним из таких перспективных применений является создание эффективных источников излучения в терагерцовом диапазоне длин волн [9].

5. Заключение

Исследованы спектроскопические и лазерные характеристики активных сред на основе кристаллов ванадатов GdVO₄:Nd, YVO₄:Nd, а также Gd_{0.7}Y_{0.3}VO₄:Nd, вырезанных вдоль оси c . Показано, что в кристалле GdVO₄:Nd, вырезанном вдоль оси c , в неселективном резонаторе наблюдается лазерная генерация на переходе ионов неодима ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ с длиной волны излучения 1065.5 нм. Реализована перестройка излучения лазера в диапазоне длин волн 1062.3–1066.1 нм. На кристалле GdVO₄:Nd получена двухчастотная генерация с расстоянием между линиями 2.3 нм. Продемонстрированы новые возможности ванадатов с добавками неодима в качестве активных сред лазеров с диодной накачкой. Так, полученную двухчастотную генерацию предложено использовать в качестве источника излучения терагерцового диапазона.

1. Загуменный А.И., Остроумов В.Г., Щербаков И.А., Енсен Т., Мейн И., Хубер Г. *Квантовая электроника*, **19** (12), 1149 (1992).
2. Zeller P., Peuser P. *Opt. Lett.*, **25** (1), 34 (2000).
3. Ostroumov V.G., Huber G., Zagumennyi A.I., Zavartsev Yu.D., Studenikin P.A., Shcherbakov I.A. *Opt. Commun.*, **124**, 63 (1996).
4. Liu J., Wang Z., Meng X., Shao Z., Ozygus B., Ding A., Weber H. *Opt. Lett.*, **28** (23), 2330 (2003).
5. Liu J., Meng X., Shao Z., Jiang M., Ozygus B., Ding A., Weber H. *Appl. Phys. Lett.*, **83** (7), 1289 (2003).
6. Jie Liu, Jimen Yang, Jingliang He. *Opt. Commun.*, **219**, 317 (2003).
7. He J., Fan Y., Du J., Wang J., Liu S., Wang H., Zhag L., Hang Y. *Opt. Lett.*, **29** (24), 2803 (2004).
8. Заварцев Ю.Д., Загуменный А.И., Калачев Ю.Л., Кутовой С.А., Михайлов В.А., Сироткин А.А., Щербаков И.А., Реннер-Эрни Р., Люти В., Ферер Т. *Квантовая электроника*, **37** (4), 315 (2007).
9. Willer U., Wilk R., Schippers W., Böttger S., Nodop D., Schossig T., Schade W., Mikulics M., Koch M., Walther M., Niemann H., Güttler B. *Appl. Phys. B*, **87**, 13 (2007).