

Управление спектральными параметрами лазеров на кристаллах ванадатов*

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

Экспериментально установлено, что спектры люминесценции ионов Nd^{3+} на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ кристаллов ванадатов $Nd^{3+}:YVO_4$, $Nd^{3+}:GdVO_4$, $Nd^{3+}:Gd_{1-x}Y_xVO_4$ и $Nd^{3+}:Sc_{1-x}Y_xVO_4$ имеют ярко выраженные угловые зависимости от направления регистрации и поляризации по отношению к кристаллографическим осям. Использование угловых зависимостей спектров люминесценции позволяет управлять коэффициентом усиления для лазеров на основе кристаллов ванадатов, создавать широкие линии усиления для пико- и фемтосекундных лазеров и изменять длины волн излучения. Впервые продемонстрирована эффективная работа лазера с пассивной модуляцией добротности на основе кристалла $Nd^{3+}:GdVO_4$, вырезанного под углом к оси a ($\theta = 25^\circ$, $\varphi = 0$).

Ключевые слова: спектры люминесценции, кристаллы ванадатов, пассивная модуляция добротности, коэффициент усиления.

1. Введение

Кристаллы ванадатов $Nd^{3+}:YVO_4$ [1], $Nd^{3+}:GdVO_4$ [2], $Nd^{3+}:Gd_{1-x}Y_xVO_4$ [3] и $Nd^{3+}:Sc_{1-x}Y_xVO_4$ [4] – прекрасные материалы для создания лазеров с диодной накачкой. Они обладают большими сечениями поглощения и вынужденного излучения, широкими линиями поглощения излучения накачки. Сочетание спектральных и механических свойств этих кристаллов является основой для высокой эффективности лазеров, работающих в непрерывном и импульсном режимах. Анизотропия кристаллической решетки ванадатов дает возможность получать поляризованное излучение, а высокая теплопроводность способствует лучшему охлаждению активной среды.

Различие свойств кристаллов ванадатов вдоль разных кристаллографических осей позволяет при необходимости выбирать направления, вдоль которых изменяются сечения усиления. Большинство известных работ посвящено использованию кристаллов ванадатов, вырезанных вдоль оси a для π -поляризации ($E||c$) лазерного излучения, поскольку в этом случае имеет место наибольшее усиление. Для получения режима пассивной модуляции добротности на кристаллах $Cr^{4+}:YAG$ или $V^{3+}:YAG$ применяются кристаллы ванадатов, вырезанные вдоль оси c ($E \perp c$) [5, 6] или вырезанные вдоль оси a с использованием σ -поляризации излучения ($E \perp c$) [7, 8]. В этих случаях наблюдается минимальное усиление активных сред лазеров.

В работах [9, 10] предложены способы получения двухчастотной генерации (метод основан на балансе добротности резонатора на различных участках спектра) с управ-

лением усиления в активной среде за счет поворота кристалла ванадата. Однако детальных исследований угловых зависимостей усиления на различных участках спектра проведено не было.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование угловых зависимостей люминесценции кристаллов ванадатов $Nd^{3+}:YVO_4$, $Nd^{3+}:GdVO_4$, $Nd^{3+}:Gd_{1-x}Y_xVO_4$ и $Nd^{3+}:Sc_{1-x}Y_xVO_4$ на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$, а также изучение возможности использования этих зависимостей для создания новых лазерных сред. В качестве примера управления усилением в активной среде продемонстрирована эффективная работа лазера с пассивной модуляцией добротности на основе кристаллов гадолиниевого ванадата $Nd^{3+}:GdVO_4$, вырезанных под углом к оси a ($\theta = 25^\circ$, $\varphi = 0$), и кристаллов $Cr^{4+}:YAG$ как насыщающегося поглотителя.

2. Исследования поляризационно-угловых люминесцентных параметров кристаллов ванадатов

В работах [8–10] было показано, что форма спектров люминесценции на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ для кристаллов ванадатов $Nd^{3+}:YVO_4$ и $Nd^{3+}:GdVO_4$, а также $Nd^{3+}:Gd_{0.7}Y_{0.3}VO_4$ и $Nd^{3+}:Sc_{0.01}Y_{0.99}VO_4$, вырезанных вдоль оси a для σ -поляризации лазерного излучения совпадает с формой спектров для кристаллов, вырезанных вдоль оси c ($E \perp c$). При переходе от π - к σ -поляризации положения абсолютных максимумов в спектрах люминесценции смещаются в длинноволновую область. Поэтому длины волн генерации в лазерах на этих кристаллах для σ - и π -поляризаций различаются.

С целью уточнения механизмов трансформации спектров люминесценции кристаллов ванадатов при повороте кристаллов от π - к σ -поляризации или при вариации угла θ между осью наблюдения и осью c (угол $\varphi = 0$) мы экспериментально исследовали угловые спектры люминесценции кристаллов ванадатов $Nd^{3+}:YVO_4$, $Nd^{3+}:GdVO_4$, $Nd^{3+}:Gd_{1-x}Y_xVO_4$ и $Nd^{3+}:Sc_{1-x}Y_xVO_4$ при комнатной температуре и 77 К (температура кипения жидкого азота).

Все исследуемые кристаллы были выращены в ИОФ РАН методом Чохральского. Спектроскопические харак-

* Доложена на конф. «Оптика лазеров», Россия, С.-Петербург, июнь 2012 г.

А.А.Сироткин, В.И.Власов, А.И.Загуменный, Ю.Д.Заварцев, С.А.Кутовой, И.А.Щербаков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: saa@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 17 июля 2013 г., после доработки 14 октября 2013 г.

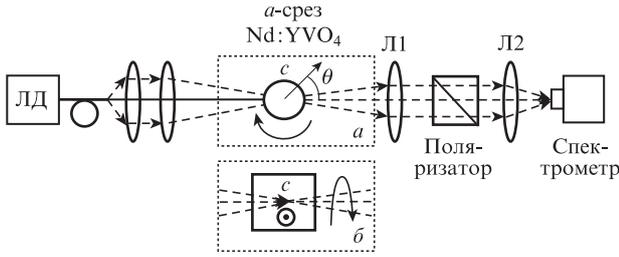


Рис.1. Схема измерения угловых параметров люминесценции ионов Nd^{3+} на цилиндрических кристаллах ванадатов, вырезанных вдоль оси a , при изменении угла θ (a) и угла поворота плоскости поляризации φ (b).

теристики лазерных кристаллов исследовались с помощью спектрометра на основе автоколлимационной трубы УФ-90 (обратная линейная дисперсия 0.1 нм/мм) с линейным многоканальным фотоприемником Toshiba TCD130JK. Для возбуждения кристаллов использовалась система лазерной диодной накачки LIMO HLU30F200 с волоконным выводом (деполяризованное излучение, максимальная мощность излучения до 30 Вт на длине волны $\lambda_p = 808$ нм). Излучение накачки фокусировалось в кристалле в пятно диаметром 200–600 мкм.

Измерения угловых параметров люминесценции проводились на кристаллах ванадатов цилиндрической формы, вырезанных вдоль оси a , при этом использовались две схемы (рис.1). Для первой (рис.1, a) кристалл вращался вокруг оси a , а излучение накачки проходило через по-

лированную цилиндрическую поверхность. Регистрировались спектры люминесценции для различных углов θ между направлением наблюдения и осью c ($\varphi = 0$). Во втором случае (рис.1, b) возбуждение осуществлялось через торец кристалла, который вращался вокруг оси наблюдения таким образом, чтобы реализовать плавный переход от π - ($E \parallel c$) к σ -поляризации ($E \perp c$) излучения ($\theta = 0$).

На рис.2 представлены энергетическая диаграмма уровней неодаима и спектры люминесценции кристаллов $Nd^{3+}:YVO_4$ и $Nd^{3+}:GdVO_4$ для σ - и π -поляризаций.

Особенностью кристаллов ванадатов, активированных ионами неодаима Nd^{3+} , является небольшое расщепление верхнего $^4F_{3/2}$ и нижнего $^4I_{11/2}$ уровней, в результате чего форма спектров состоит из перекрывающихся штарковских подуровней. В интересующей нас области длин волн 1060–1070 нм фрагмент спектра состоит из четырех подуровней: R_1-Y_1 , R_2-Y_1 , R_1-Y_2 и R_2-Y_2 .

Для гадолиниевого ванадата расщепление верхнего уровня $^4F_{3/2}$ очень мало и только при температуре жидкого гелия становится заметным. Поэтому в области длин волн 1060–1070 нм для σ -поляризации спектр имеет характерную двугорбую форму (длины волн на переходах $R_1-Y_{1,2}$ и $R_2-Y_{1,2}$ близки). Для иттриевого ванадата эта форма спектра трехгорбая (длины волн на переходах R_1-Y_1 и R_2-Y_2 близки). Расщепление уровней $^4F_{3/2}$ и $^4I_{11/2}$ иона неодаима в смешанных ванадатах ($Nd^{3+}:Gd_{1-x}Y_x$ или $Nd^{3+}:Sc_{1-x}Y_x$) зависит от соотношения концентраций Y , Gd и Sc . Изменение соотношения ($Gd_{1-x}Y_x$ или $Sc_{1-x}Y_x$) приводит к трансформации контура усиления в области

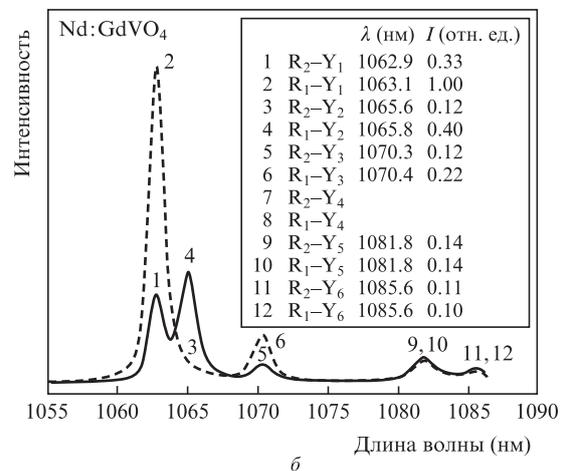
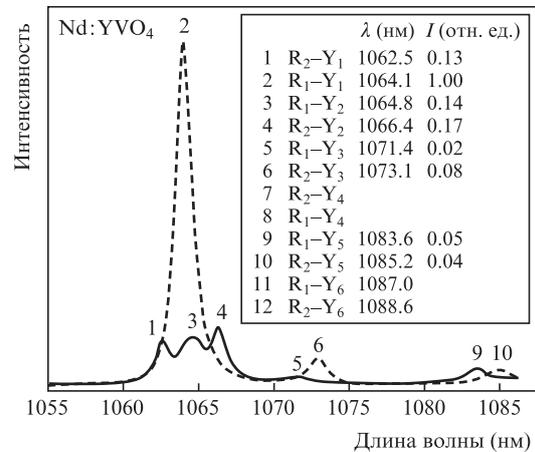
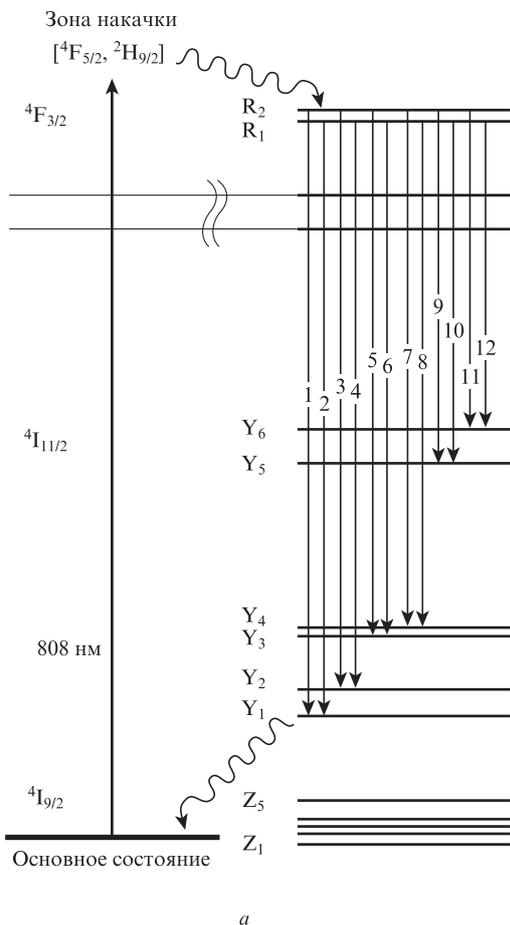


Рис.2. Схема энергетических уровней неодаима Nd^{3+} (a) и спектры люминесценции иттриевого ($Nd^{3+}:YVO_4$) и гадолиниевого ($Nd^{3+}:GdVO_4$) ванадатов на переходе $^4F_{3/2}-^4I_{11/2}$ для π - и σ -поляризаций (соответственно сплошная и штриховая линия) (b).

длин волн 1060–1070 нм, в результате спектр для σ -поляризации в общем случае имеет четырехгорбую форму. При этом в смешанных ванадатах изменяются длины волн люминесценции для обеих поляризаций.

Для спектров люминесценции ионов Nd^{3+} в кристаллах ванадатов характерны ярко выраженные угловые зависимости от направления наблюдения и поляризации по отношению к кристаллографическим осям. У кристаллов ванадатов, поворачиваемых по схемам на рис.1, наблюдается трансформация формы спектров люминесценции.

Эволюция изменения спектров люминесценции кристаллов $Nd^{3+}:YVO_4$ и $Nd^{3+}:GdVO_4$ при разных углах поворота плоскости поляризации показана на рис.3а, б.

Поскольку в спектральном диапазоне 1060–1070 нм в кристаллах ванадатов расположены четыре штарковских перехода иона Nd^{3+} , то для обработки экспериментальных данных спектры представлялись в виде суммы четырех пиков, спектральное положение которых фиксировалось, и рассчитывались их амплитуды для каждого угла поворота. Зависимости амплитуды излучения каж-

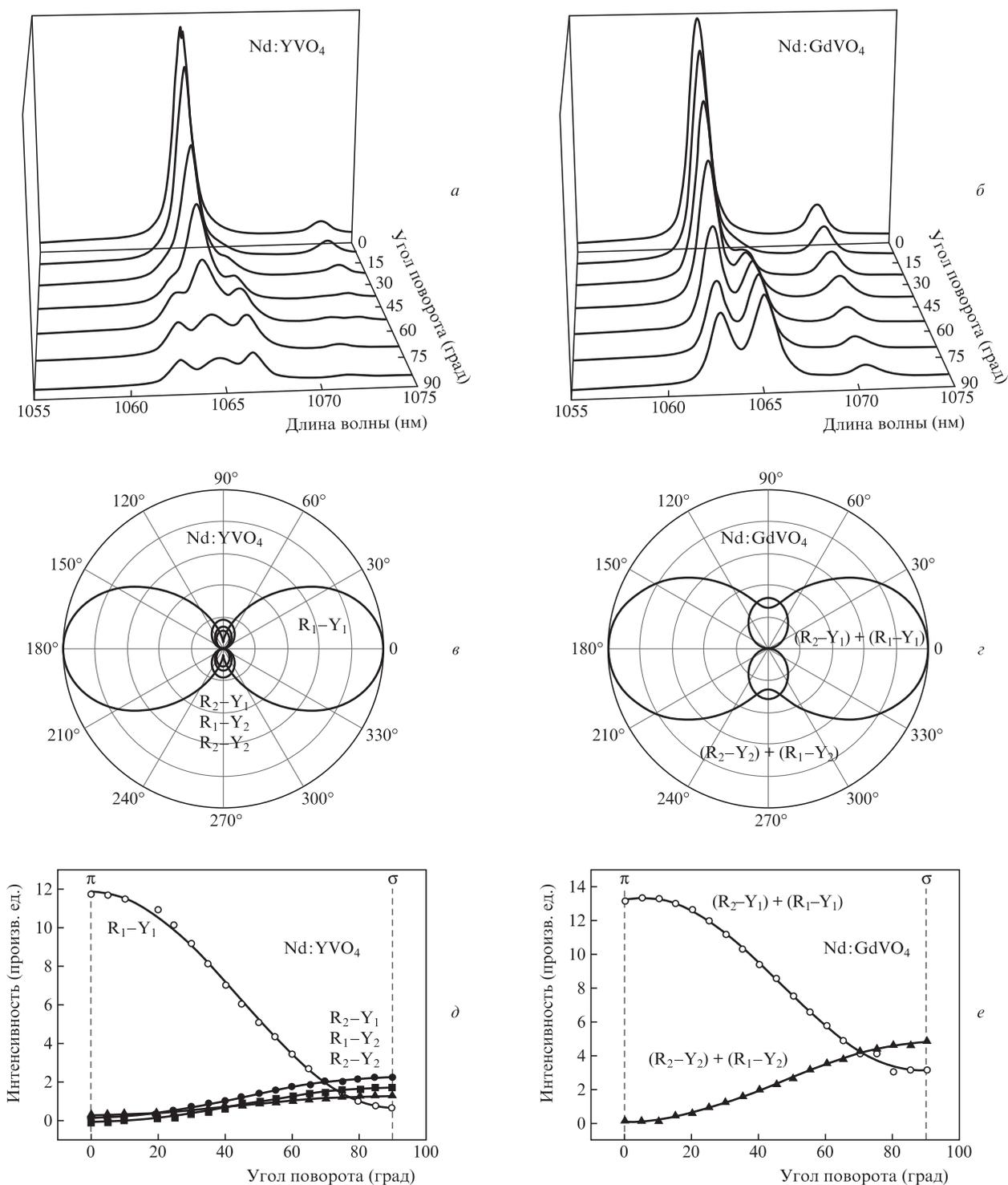


Рис.3. Изменения параметров люминесценции в зависимости от угла поворота плоскости поляризации для кристаллов $Nd^{3+}:YVO_4$ (а, в, д) и $Nd^{3+}:GdVO_4$ (б, з, е).

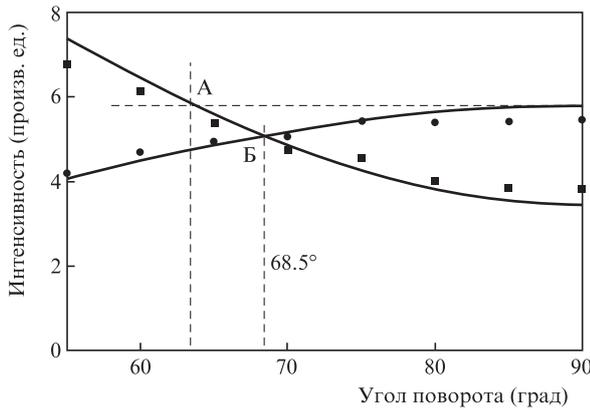


Рис.4. Особые точки на кривой угловой зависимости интенсивностей излучения штарковских переходов кристалла $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$.

дого штарковского перехода от угла поворота плоскости поляризации φ задавались функцией $A = A_0 \sin(\varphi + \phi)$, где A_0 и ϕ – параметры приближения.

В результате были получены зависимости интенсивностей излучения четырех штарковских переходов от угла поворота кристалла (рис.3,б,з). Отметим, что для части штарковских уровней (R_1-Y_1 , R_1-Y_3 и R_1-Y_5) излучение имеет одинаковую поляризацию, а для остальных – ортогональную. При повороте кристаллов на 90° сечение люминесценции изменяется почти в пять раз (рис.3,д,е).

Интересны точки пересечения кривых для уровней R_1-Y_1 и R_2-Y_1 (см. рис.3,д), где интенсивности излучения штарковских переходов равны (точки А и Б на рис.4). Точка Б соответствует схеме измерения на рис.1,б, в этом случае правее точки лазер работает на длине волны перехода R_2-Y_1 , а левее – на длине волны перехода R_1-Y_1 той же поляризации. Для точки А (схема измерения на рис.1,а) и в этом случае правее ее лазер работает на длине волны R_2-Y_1 , а левее – на длине волны R_1-Y_1 , но ортогональной поляризации.

Кроме того, в этих точках реализуется двухчастотная генерация как с параллельной, так и с ортогональной поляризацией. Способ получения двухчастотной генерации основан на балансе добротности резонатора на различных участках спектра, что обеспечивается равенством усиления в активной среде при повороте кристалла.

Таким образом, вырезая кристаллы под тем или иным углом и используя угловые зависимости интенсивностей излучения штарковских переходов, можно формировать активные среды лазеров с требуемыми параметрами, управлять в широком диапазоне коэффициентом усиления лазеров, изменять форму спектров люминесценции и изменять длины волн излучения.

3. Формирование активных сред на основе кристаллов ванадатов

Мы предлагаем две схемы создания активных сред (АС) с равномерными широкими полосами люминесценции, используя либо составной активный элемент (АЭ), состоящий из кристаллов $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ и $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$, а также смешанных кристаллов ванадатов ($\text{Nd}^{3+}:\text{Gd}_{1-x}\text{Y}_x$ или $\text{Nd}^{3+}:\text{Sc}_{1-x}\text{Y}_x$), либо изменение соотношения ($\text{Gd}_{1-x}\text{Y}_x$ или $\text{Sc}_{1-x}\text{Y}_x$) в смешанных ванадатах ($\text{Nd}^{3+}:\text{Gd}_{1-x}\text{Y}_x\text{VO}_4$ или $\text{Nd}^{3+}:\text{Sc}_{1-x}\text{Y}_x\text{VO}_4$).

Комбинация кристаллов ванадатов. Из спектров люминесценции ионов Nd^{3+} на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ иттрие-

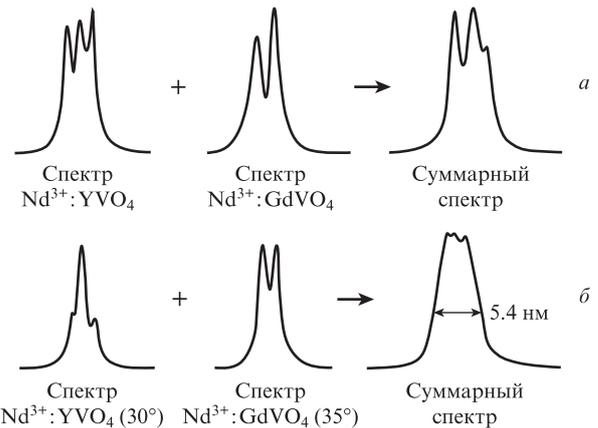


Рис.5. Суммарный спектр люминесценции ионов Nd^{3+} в составном элементе из кристаллов иттриевого ($\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$) и гадолиниевого ($\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$) ванадатов, вырезанных вдоль оси a ($\theta = 0$, $\varphi = 0$) (а), и из кристаллов $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ с углом среза $\theta = 30^\circ$, $\varphi = 0$ и смешанного ванадата $\text{Nd}^{3+}:\text{Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4$ ($\theta = 35^\circ$, $\varphi = 0$) (б).

вого ($\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$), гадолиниевого ($\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$) кристаллов, а также кристаллов ванадатов для σ -поляризации ($E \perp c$) излучения ($\theta = 0$, $\varphi = 0$) (см. рис.3) позволяет заключить, что их суммарный спектр может иметь контур с пятью пиками (рис.5,а). К сожалению, вершина такого спектра сильно изрезана. Для получения более гладкого спектра воспользуемся угловыми зависимостями его составляющих. Так, если взять спектр люминесценции иттриевого кристалла, вырезанного под углом ($\theta = 30^\circ$, $\varphi = 0$), и спектр кристалла смешанного ванадата $\text{Nd}^{3+}:\text{Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4$ ($\theta = 35^\circ$, $\varphi = 0$), то получим почти идеальный спектр (рис.5,б) с полушириной 5.4 нм и плоской вершиной для реализации, например, генерации фемтосекундных импульсов.

Кристаллы смешанных ванадатов. Еще более широкие возможности дает использование смешанных ванадатов, поскольку длины волн всех штарковских уровней иона неодима в ванадатах $\text{Nd}^{3+}:\text{Gd}_{1-x}\text{Y}_x\text{VO}_4$ или $\text{Nd}^{3+}:\text{Sc}_{1-x}\text{Y}_x\text{VO}_4$ зависят от соотношения концентраций Y, Gd и Sc, а каждый подуровень уширен. Это позволяет корректировать в той или иной степени амплитуды штарковских уровней, используя различные углы среза кристаллов.

Формирование АС на смешанных ванадатах можно выполнить по следующей схеме: подбирается соотношение концентраций Y, Gd так, чтобы расстояние между четырьмя штарковскими переходами (R_1-Y_1 , R_2-Y_1 и R_1-Y_2 , R_2-Y_2) было одинаковым, а затем выбором угла среза обеспечивается выравнивание амплитуд люминесценции штарковских уровней.

В наших экспериментах наиболее подходящим с точки зрения равенства расстояний между четырьмя штарковскими подуровнями является кристалл смешанного ванадата $\text{Nd}^{3+}:\text{Gd}_{0.45}\text{Y}_{0.55}\text{VO}_4$ с углом среза $\theta = 20^\circ$, $\varphi = 0$.

4. Непрерывный лазер на кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ с углами среза $\theta = 18^\circ$ и 90° , $\varphi = 0$

Исследовался непрерывный режим генерации лазера на кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$, вырезанном под углами ($\theta = 18^\circ$, $\varphi = 0$) и ($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0$). Эти срезы кристалла дают возможность реализовать лазерную генерацию слева и справа от точек А и Б (рис.4). Схема экспериментов приведена на рис.6.

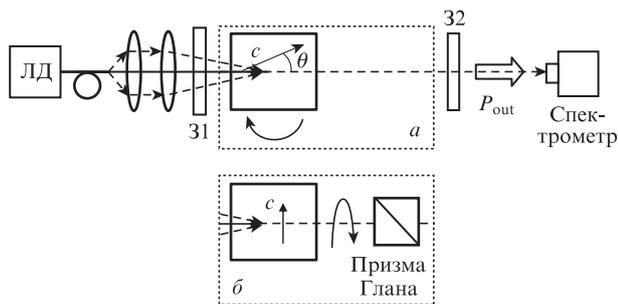


Рис.6. Схема непрерывного $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ -лазера с использованием кристаллов, вырезанных под углом $\theta = 18^\circ$, $\varphi = 0$ (а) и $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0$ (б).

Использовались кристаллы $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ с размерами $4 \times 4 \times 8$ мм и концентрацией ионов неодима 0.5 ат.%. Лазерный кристалл монтировался в медный блок, охлаждаемый водой, с прокладкой из индиевой фольги.

Резонатор лазера был образован глухим плоским зеркалом 31 (диэлектрическое покрытие с высоким отражением на длине волны $\lambda_{\text{ген}} = 1064$ нм и с просветлением на $\lambda_p = 808$ нм) и плоским выходным зеркалом 32 (с отражением $R = 10\%$ на основной частоте). Обе стороны активного элемента (АЭ) были просветлены на длины волн 808 и 1064 нм ($R \approx 0.02\%$).

Для кристалла $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$, вырезанного под углом $\theta = 18^\circ$, $\varphi = 0$, поворот АЭ в плоскости рисунка (см. рис.6,а) вызывает трансформацию формы спектров люминесценции и изменение усиления на различных участках спектра. В результате лазер генерирует излучение сначала на $\lambda = 1063.2$ нм, затем одновременно на длинах волн 1063.2 и 1065.5 нм и далее на $\lambda = 1065.5$ нм. При этом генерируется излучение сначала одной поляризации, затем одновременно двух ортогональных поляризаций и далее другой поляризации.

Данный способ получения двухчастотной генерации основан на балансе добротности резонатора, но равенство добротностей резонатора на двух участках спектра обеспечивается одинаковым усилением в активной среде. Хотя в резонаторе отсутствуют какие-либо селекционирующие элементы, работа лазера на двух частотах была очень устойчивой.

Аналогичная угловая зависимость усиления на различных участках спектра наблюдается и при повороте АЭ, вырезанного вдоль оси a ($\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0$), сопровождаемом переходом от π - к σ -поляризации (рис.6,б). Вращение осуществляется вокруг оси резонатора. В данной схеме можно фиксировать поляризацию и вращать только призму Глана. В этой схеме лазера, как и в предыдущей, наблюдается переход от одной длины волны к другой и реализуется двухчастотная генерация. Однако двухчастотный режим работы лазера был менее устойчив по сравнению с первым вариантом.

5. Лазер на кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ с углом среза $\theta = 25^\circ$, $\varphi = 0$ в режиме с пассивной модуляцией добротности

В работе [8] исследованы поляризационные зависимости генерации кристаллов ванадатов с ионами неодима лазеров на переходе ${}^4\text{F}_{3/2} - {}^4\text{I}_{11/2}$ для π - и σ -поляризаций в режиме пассивной модуляции и показано, что наилучшие

результаты имеют место для этих лазеров с затворами $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ в случае σ -поляризованного излучения или при использовании кристаллов ванадатов, вырезанных вдоль оси c . Однако в последних случаях длина волны генерации не совпадает с длиной волны для π -поляризации, при которой усиление в среде максимально. Чтобы использовать усилитель с π -поляризацией необходима среда, у которой, с одной стороны, требуемая длина волны генерации, а с другой стороны, АЭ, способный работать в режиме пассивной модуляции добротности. Выполнить эти условия можно при соответствующем выборе угла среза кристалла.

Кристалл $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ с углом среза $\theta = 25^\circ$, $\varphi = 0$ имеет такое же усиление, что и кристалл, вырезанный вдоль оси a ($\theta = 0$, $\varphi = 0$) для σ -поляризации; при этом его длина волны генерации совпадает с длиной π -поляризованной волны.

Резонатор такого лазера образован диэлектрическим покрытием с высоким отражением на $\lambda_{\text{ген}} = 1064$ нм и с просветлением на $\lambda_p = 808$ нм, нанесенным на внешнюю грань АЭ, и плоским выходным зеркалом ($R = 15\%$ на $\lambda_{\text{ген}}$). Внутренняя грань АЭ была просветлена на длины волн 808 и 1064 нм ($R \approx 0.02\%$).

В качестве пассивного затвора $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ -лазера ($\theta = 25^\circ$, $\varphi = 0$) использовались кристаллы $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$. Оптимальные начальное пропускание модулятора T_0 и отражение выходного зеркала на длине волны 1.06 мкм составили 80% и 75% соответственно. Длина резонатора была около 12 мм. Временные параметры импульсов из-

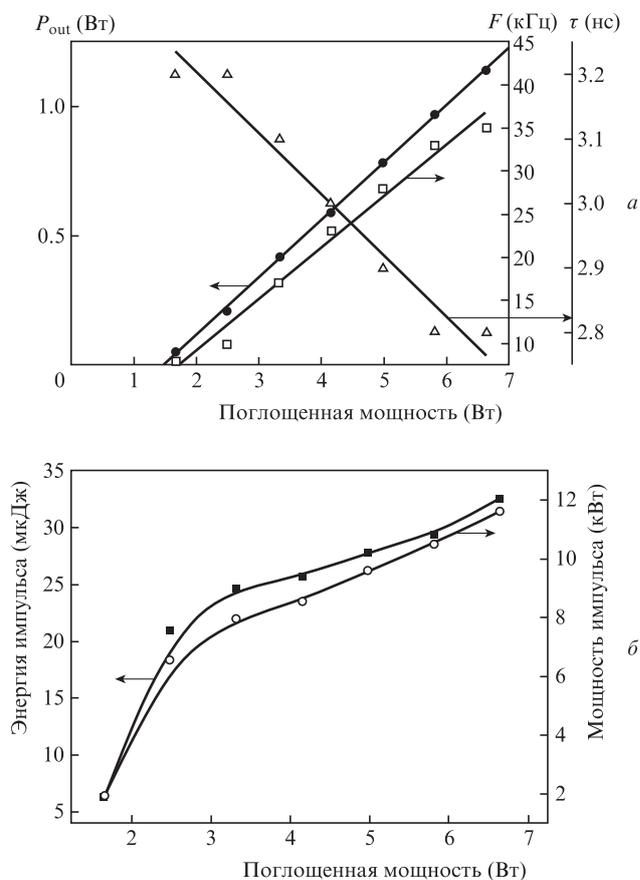


Рис.7. Зависимости средней мощности P_{out} , длительности импульса τ и частоты следования импульсов F (а), а также энергии в импульсе и пиковой мощности (б) от поглощенной мощности накачки для $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ -лазера ($\theta = 25^\circ$, $\varphi = 0$).

мерялись германиевым лавинным фотодиодом ЛФД-2 и осциллографом Tektronix TDS 3052.

Зависимости лазерных параметров (в том числе энергии и мощности импульса) представлены на рис. 7.

Пороговая мощность накачки и дифференциальная эффективность лазера достигали 1.45 Вт и 22% в импульсном режиме. При поглощенной мощности накачки 5.9 Вт средняя мощность излучения составила 0.92 Вт. Минимальная длительность импульса 2.8 нс была получена при частоте следования импульсов 35 кГц. Максимальная импульсная мощность составила более 12 кВт, а энергия в импульсе – выше 32 мкДж.

Таким образом, показано, что $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ -лазер ($\theta = 25^\circ$, $\varphi = 0$) с пассивной модуляцией добротности имеет высокие временные и энергетические параметры, которые сравнимы или превосходят лучшие известные из литературы результаты для лазеров на кристаллах ванадатов, вырезанных вдоль оси c ($\mathbf{E} \perp c$) [5, 6] или вырезанных вдоль оси a с использованием σ -поляризации излучения ($\mathbf{E} \perp c$) [7, 11]. Кроме того, описанный выше лазер работает на длине волны 1063.2 нм, совпадающей с длиной волны $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ -лазера для π -поляризации (излучение линейно поляризованное). Это идеальная среда для системы генератор–усилитель и для дальнейшего нелинейного преобразования излучения.

6. Заключение

Впервые проведены экспериментальные исследования угловых зависимостей люминесцентных параметров на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ для кристаллов ванадатов $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$,

$\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$, $\text{Nd}^{3+}:\text{Gd}_{1-x}\text{Y}_x\text{VO}_4$ и $\text{Nd}^{3+}:\text{Sc}_{1-x}\text{Y}_x\text{VO}_4$. Показано, что использование этих зависимостей для кристаллов ванадатов позволяет управлять коэффициентом усиления лазеров, создавать максимально широкие линии усиления для пико- и фемтосекундных лазеров или управлять длиной волны генерации. Впервые продемонстрирована эффективная работа $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ -лазера ($\theta = 25^\circ$, $\varphi = 0$) с пассивной модуляцией добротности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (госконтракт № 14.740.11.1022 от 23 мая 2011 г.).

1. O'Connor J.R. *Appl. Phys. Lett.*, **9**, 407 (1966).
2. Загуменный А.И., Остроумов В.Г., Щербаков И.А., Йенсен Т., Мейен Я.-П., Хубер Г. *Квантовая электроника*, **19** (12), 1149 (1992).
3. Qin L., Meng X., Du Ch., Zhu L., Xu B., Shao Z., Liu Zh., Fang Q., Cheng R. *J. Alloys Compd.*, **354**, 259 (2003).
4. Zagumennyi A.I., Kutovoi S.A., Sirotkin A.A., Kutovoi A.A., Vlasov V.I., Iskhakova L.D., Zavartsev Y.D., Luthy W., Feurer T. *Appl. Phys. B*, **99**, 159 (2010).
5. Chen Y.F., Lan Y.P. *Appl. Phys. B*, **74**, 415 (2002).
6. Jie L., Yang J., He J. *Opt. Commun.*, **219**, 317 (2003).
7. Agnesi A., Dell'acqua S. *Appl. Phys. B*, **76**, 351 (2003).
8. Сироткин А.А., Власов В.И., Загуменный А.И., Заварцев Ю.Д., Кутовой С.А. *Квантовая электроника*, **41** (7), 584 (2011).
9. Власов В.И., Гарнов С.В., Заварцев Ю.Д., Загуменный А.И., Кутовой С.А., Сироткин А.А., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, **37**, 938 (2007).
10. Сироткин А.А., Гарнов С.В., Власов В.И., Загуменный А.И., Заварцев Ю.Д., Кутовой С.А., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, **42**, 420 (2012).
11. Ng S.P., Tang D.Y., Qin L.J., Meng X.L., Xiong Z.J. *Appl. Opt.*, **45**, 6792 (2006).