

Двухчастотные лазеры на кристаллах ванадатов со взаимно параллельной и ортогональной поляризациями генерируемого излучения

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

Экспериментально исследованы люминесцентные и генерационные свойства кристаллов ванадатов $Nd:YVO_4$, $Nd:GdVO_4$, $Nd:Gd_{1-x}Y_xVO_4$ и $Nd:Sc_{1-x}Y_xVO_4$, вырезанных вдоль оси a , для π - и σ -поляризаций на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$. Получен двухчастотный режим генерации со взаимно ортогональной и параллельной поляризациями излучения в непрерывном режиме, с модуляцией добротности и синхронизацией мод. Реализована схема генератор-усилитель двухчастотных импульсов.

Ключевые слова: двухчастотные лазеры, кристаллы ванадатов, поляризация.

1. Введение

Излучение терагерцевого диапазона лежит в диапазоне частот от сотен терагерц до сотен гигагерц. Это интересный, достаточно широкий и информативный спектральный диапазон для большого количества объектов (твердые тела, жидкости, биологические объекты). Терагерцевое излучение не обладает ионизирующим свойством, в отличие от радиоактивного (рентгеновского) излучения, замена которого безвредным терагерцевым может существенно изменить рынок диагностического медицинского оборудования. Излучение терагерцевого диапазона может найти применение там, где необходим непрерывный мониторинг живых объектов, например при томографических исследованиях, в системах безопасности, в контрольно-измерительном оборудовании.

За последние годы было разработано и предложено несколько различных методов генерации электромагнитных импульсов микро- и миллиметрового диапазонов длин волн [1–5]. Однако, несмотря на успешное использование фемтосекундных лазерных импульсов для генерации терагерцевого излучения в широком частотном диапазоне (от десятков и сотен гигагерц до терагерц), такие источники не нашли широкого применения, главным образом из-за большой сложности и высокой стоимости фемтосекундных лазеров.

В настоящее время работы по дальнейшему совершенствованию источников терагерцевого излучения ведутся в различных направлениях. Одним из перспективных и быстро развивающихся путей генерации терагерцевого излучения является создание двухчастотных лазеров с последующим использованием разностной частоты в нели-

нейных кристаллах или в оптоэлектронных терагерцевых эмиттерах.

Методика использования двух лазеров с последующим получением разностной частоты уже применялась ранее для генерации терагерцевого излучения [6–10]. Другой подход заключается в том, что две длины волны генерируются не двумя различными лазерами, а одним и тем же. Тем самым отпадает необходимость в синхронизации частот двух отдельных лазеров и в дальнейшем совмещении лазерных пучков во времени и пространстве, в результате чего система получается более компактной и надежной. В перспективе это должно привести к появлению малогабаритных, перестраиваемых по частоте терагерцевых источников, более дешевых, чем существующие в настоящее время системы на основе фемтосекундных лазеров.

Твердотельные лазеры с диодной накачкой обладают большими преимуществами перед газовыми и твердотельными лазерами с ламповой накачкой. Они могут работать как в импульсном (модуляция добротности или синхронизация мод), так и в непрерывном режиме генерации, обеспечивая высокие КПД, обладают высокой стабильностью частоты излучения при малых массогабаритных параметрах, имеют низкое энергопотребление и большой срок службы. Нелинейные преобразования обеспечивают расширение спектрального диапазона работы лазеров, а также позволяют реализовать более широкие возможности их применения.

Кристаллы ванадатов YVO_4 [11], $GdVO_4$ [12], $Nd:Gd_{1-x}Y_xVO_4$ [13] и $Nd:Sc_{1-x}Y_xVO_4$ [14] – прекрасные материалы для создания лазеров с диодной накачкой. По сравнению с другими распространенными в настоящее время кристаллами, $Nd:YAG$ и $Nd:YLF$, они обладают рядом преимуществ: большими сечениями поглощения и вынужденного излучения, а также широкими линиями поглощения излучения накачки. Сочетание спектральных и механических свойств этих кристаллов приводит к высокой эффективности лазеров, работающих в непрерывном и импульсном режимах. Анизотропия кристаллической решетки ванадатов позволяет получать поляризованное излучение, а высокая теплопроводность способствует лучшему охлаждению активной среды. Большинство из-

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

Поступила в редакцию 28 ноября 2011 г., после доработки – 12 марта 2012 г.

вестных работ посвящено использованию кристаллов ванадатов, вырезанных вдоль оси *a*, для π -поляризации ($E \parallel c$) лазерного излучения, поскольку в этом случае наблюдается наибольшее усиление. Различие свойств кристаллов ванадатов вдоль разных осей позволяет при необходимости выбирать направления, вдоль которых происходит трансформация спектров люминесценции и изменяются сечения усиления [15, 16].

Широкое использование анизотропных свойств ванадатов требует уточнения их спектральных свойств. Характерной особенностью многих из них является положение абсолютных максимумов в спектрах люминесценции на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ для π - и σ -поляризаций. В [15–17] показано, что форма спектров люминесценции для кристаллов ванадатов, вырезанных вдоль оси *a* для σ -поляризации, 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 и, таким образом, становится возможной реализация простых схем получения двухчастотной генерации с ортогональными поляризациями [18, 19].

Цель настоящей работы – экспериментальные исследования люминесцентных параметров кристаллов $Nd:YVO_4$, $Nd:GdVO_4$, $Nd:Gd_{1-x}Y_xVO_4$ и $Nd:Sc_{1-x}Y_xVO_4$, вырезанных вдоль оси *a*, для π - и σ -поляризаций излучения на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ для получения двухчастотной генерации со взаимно ортогональной и параллельной поляризациями излучения.

2. Исследования люминесцентных параметров кристаллов ванадатов, вырезанных вдоль оси *a*, для σ -поляризации

С целью уточнения длин волн генерируемого излучения лазеров на кристаллах ванадатов, в которых используется σ -поляризация, в [17] нами были выполнены экспериментальные исследования спектров люминесценции кристаллов $Nd:YVO_4$, $Nd:GdVO_4$, $Nd:Gd_{1-x}Y_xVO_4$ и $Nd:Sc_{1-x}Y_xVO_4$, вырезанных вдоль оси *a*, для π - и σ -поляризаций излучения на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$.

Все исследуемые кристаллы были выращены в Институте общей физики РАН методом Чохральского. Их спектроскопические характеристики 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 пользовалась система лазерной диодной накачки LIMO HLU30F200 с волоконным выводом (деполяризованное излучение) и максимальной мощностью излучения до 30 Вт на длине волны 808 нм. Излучение накачки фокусировалось в кристалле в пятно диаметром 200 – 600 мкм.

На рис. 1 приведены фрагменты нормированных спектров люминесценции кристаллов ванадатов, вырезанных вдоль оси *a*, для π - и σ -поляризаций. Приведены также спектры генерации для различных поляризаций излучения в неселективном резонаторе. У кристаллов $Nd:YVO_4$, $Nd:GdVO_4$, $Nd:Gd_{0.7}Y_{0.3}VO_4$ и $Nd:Sc_{0.03}Y_{0.97}VO_4$ при

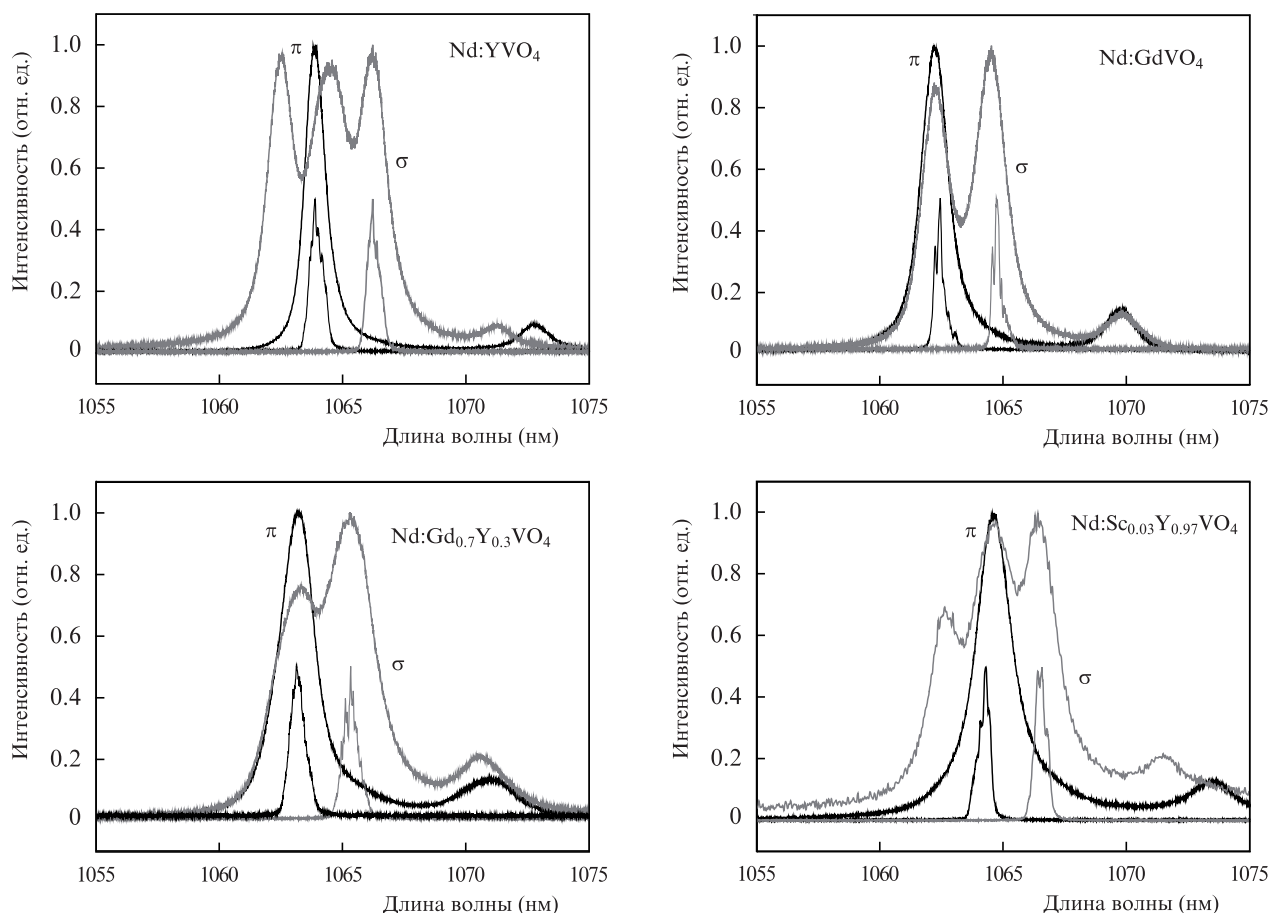


Рис. 1. Фрагменты спектров люминесценции на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ кристаллов ванадатов, вырезанных вдоль оси *a*, для π - и σ -поляризаций и спектры лазерной генерации в неселективных резонаторах.

σ -поляризации наблюдается перераспределение абсолютных максимумов люминесценции в длинноволновую область, поэтому длины волн излучения лазеров на этих кристаллах для π - и σ -поляризаций различаются.

Необходимо отметить, что спектры люминесценции кристаллов ванадатов для σ -поляризации в точности совпадают со спектрами кристаллов, вырезанных вдоль оси c , которые были измерены нами в [15,16]. Поэтому все возможности для лазеров на основе кристаллов ванадатов, вырезанных вдоль оси c , могут быть реализованы и для σ -поляризации генерируемого излучения. Это и получение новых длин волн излучения, и непрерывная перестройка по частоте, и получение двухчастотного излучения для терагерцевых приложений, и сокращение длительности импульсов излучения до сотен фемтосекунд. Кроме того, различие в длинах волн для π - и σ -поляризаций позволяет создать двухчастотные лазеры со взаимно ортогональными поляризациями излучения, что важно для последующего преобразования его частот в терагерцевый диапазон длин волн, например в кристаллах GaSe.

3. Исследования генерационных свойств активных сред на основе кристаллов ванадатов для σ -поляризации излучения

В наших экспериментах исследовалась лазерная генерация в кристаллах Nd:YVO_4 , Nd:GdVO_4 , $\text{Nd:Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4$ и $\text{Nd:Sc}_{0.03}\text{Y}_{0.97}\text{VO}_4$ для π - и σ -поляризаций излучения на переходе ${}^4\text{F}_{3/2} - {}^4\text{I}_{11/2}$ как в непрерывном режиме, так и в режимах с пассивной и активной модуляцией добротности.

При работе с излучением с σ -поляризацией необходимо использовать селективирующие устройства, подавляющие генерацию излучения с π -поляризацией, для которого сечение люминесценции в пять раз выше. Для пространственного разделения пучков излучения с π - и σ -поляризациями в наших экспериментах использовалась схема [17], основанная на двулучепреломлении кристаллов ванадатов и представленная на рис.2. Активный элемент лазера изготавливался в виде призмы со скошенной на $1.5 - 2^\circ$ передней гранью.

Из-за различия показателей преломления n_o и n_e (для Nd:YVO_4 $n_o = 1.9573$, $n_e = 2.1652$ на длине волны 1064 нм) направления распространения обыкновенной и необыкновенной волн вне кристалла различаются на величину $\Delta\alpha \approx \alpha(n_o - n_e)$, где α – угол наклона передней грани. Генерация необыкновенной или обыкновенной волны соответствует π - или σ -поляризации генерируемого излучения. В резонаторе с плоскими зеркалами и со скошенной гранью кристалла достаточно повернуть выходное зерка-

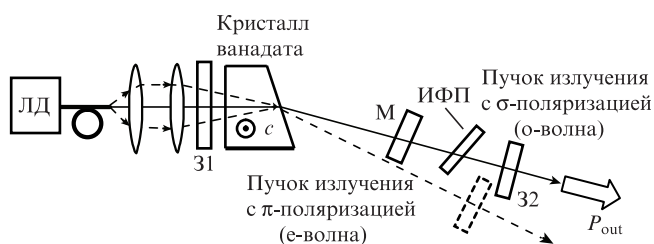


Рис.2. Схема резонатора с пространственным разделением пучков излучения с π - и σ -поляризациями лазера на основе кристаллов ванадатов вырезанных вдоль оси a (М – модулятор, ИФП – интерферометр Фабри–Перо, ЛД – лазерный диод).

ло на угол $\Delta\alpha$, чтобы изменить поляризацию генерируемого излучения.

В качестве активных элементов лазеров нами использовались вырезанные вдоль оси a кристаллы Nd:YVO_4 , Nd:GdVO_4 , $\text{Nd:Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4$ и $\text{Nd:Sc}_{0.03}\text{Y}_{0.97}\text{VO}_4$ с атомной концентрацией ионов неодима 0.5% и размерами $4 \times 4 \times 6$ мм или $4 \times 4 \times 8$ мм. Одна из граней активного элемента была скошена на угол $1.5 - 2^\circ$ и обе грани просветлены для длин волн 1064 и 808 нм ($R \approx 0.02\%$).

Лазерный кристалл был вмонтирован в медный блок, охлаждаемый водой. Для накачки кристалла использовалась система лазерной диодной накачки LIMO HLU30F200 с волоконным выводом (диаметр волокна 200 мкм, числовая апертура $NA = 0.22$) и максимальной мощностью излучения до 30 Вт. Излучение накачки фокусировалось в активном элементе в пятно диаметром от 200 до 400 мкм.

Резонатор лазера был образован глухим плоским зеркалом 31 (диэлектрическое покрытие с высоким отражением на длину волны 1064 нм и с просветлением на длину волны излучения накачки 808 нм) и плоским выходным зеркалом 32 (пропускание $T = 10\%$ на основной частоте). Две стороны активного элемента были просветлены на длины волн 808 и 1064 нм.

В неселективном резонаторе генерируется излучение, соответствующее максимуму усиления, поэтому, как следует из рис.1, лазер на кристалле Nd:GdVO_4 , вырезанном вдоль оси a , генерирует излучение с σ -поляризацией на длине волны 1065.5 нм, с π -поляризацией – на длине волны 1063.2 нм. Для кристаллов Nd:YVO_4 и $\text{Nd:Sc}_{0.03}\text{Y}_{0.97}\text{VO}_4$ (см. рис.1), вырезанных вдоль оси a , излучение с σ -поляризацией генерируется на длине волны 1066.1 нм (в случае π -поляризации – на 1064.1 нм). Для кристалла $\text{Nd:Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4$ длина волны генерации при σ -поляризации составляет 1065.4 нм. При повороте зеркала изменялась как поляризация, так и длина волны генерируемого излучения.

4. Перестройки частоты излучения с σ -поляризацией лазеров на основе кристаллов ванадатов

Для плавной перестройки частоты излучения с σ -поляризацией лазеров на кристаллах ванадатов в качестве селективирующего элемента использовался внутррезонаторный интерферометр Фабри–Перо (см. рис.2) в виде плоскопараллельной пластинки толщиной 80 мкм из кристалла YAG с нанесенными на ее поверхность отражающими покрытиями ($R = 60\%$). Аналогично [15, 16] в настоящей работе была впервые реализована перестройка излучения для кристаллов иттриевого (Nd:YVO_4), гадолиниевого (Nd:GdVO_4) и смешанных ($\text{Nd:Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4$ и $\text{Nd:Sc}_{0.03}\text{Y}_{0.97}\text{VO}_4$) ванадатов с σ -поляризацией, а также реализована двухчастотная генерация.

Например, для кристалла Nd:YVO_4 при поглощенной мощности излучения накачки $P_p = 8$ Вт лазерное излучение с σ -поляризацией плавно перестраивалось по длинам волн от 1062.3 до 1067.4 нм; для π -поляризации перестройка осуществлялась только в пределах 0.9 нм вблизи длины волны 1064.2 нм.

Аналогичный характер перестройки наблюдался для кристаллов гадолиниевого и смешанных ванадатов. Максимальный диапазон перестройки 5.4 нм был достигнут для кристалла $\text{Nd:Sc}_{0.03}\text{Y}_{0.97}\text{VO}_4$.

5. Методы получения двухчастотной генерации

Существуют три способа реализации режима двухчастотной генерации на кристаллах ванадатов: 1) внесение в резонатор дополнительных спектрально-селективных потерь; 2) управление усилением активной среды; 3) использование двойного резонатора для поляризационно-го разделения излучения.

5.1. Режим двухчастотной генерации, реализуемый путем внесения в резонатор дополнительных спектрально-селективных потерь

В кристаллах со сравнительно широкими спектрами усиления (например, Nd:YVO_4 , Nd:GdVO_4 , а также смешанные кристаллы $\text{Nd:Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4$ и $\text{Nd:Sc}_{1-x}\text{Y}_x\text{VO}_4$) можно получать двухчастотную генерацию, внося в резонатор селектирующие элементы, которые выравнивают добротность резонатора лазера для разных участков спектра люминесценции активной среды за счет дополнительных потерь. В качестве таких элементов мы использовали фильтр Лию, эталон Фабри–Перо и брюстеровскую призму.

Если добротность резонатора Q на длине волны λ_1 больше, чем на длине волны λ_2 , лазер будет генерировать на λ_1 , в противном случае – на λ_2 . Если же добротности резонатора на этих двух длинах волн будет одинаковы, $Q(\lambda_1) = Q(\lambda_2)$, лазер будет генерировать излучение одновременно на двух длинах волн.

5.1.1. Исследование непрерывной двухчастотной генерации в кристаллах ванадатов с σ -поляризацией. В настоящей работе для получения двухчастотного излучения, так же как и в работах [15, 16], использовались эталоны Фабри – Перо в виде плоскопараллельных пластинок (толщиной 120 и 83 мкм) из кристалла YAG без покрытий. Такие селекторы позволили получить двухчастотное излучение на длинах волн, разности которых составляли 2.3 и 3.7 нм соответственно. В данной схеме лазера (см. рис.2) поляризации пучков излучения на двух длинах волн были параллельны. Двухчастотная генерация в кристаллах Nd:YVO_4 , Nd:GdVO_4 и в смешанных кристаллах $\text{Nd:Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4$ и $\text{Nd:Sc}_{1-x}\text{Y}_x\text{VO}_4$ с σ -поляризацией излучения реализована впервые.

Зависимости мощности непрерывного выходного излучения от мощности накачки показана на рис.3. Максимальная выходная мощность для непрерывного режима генерации 1.5 Вт была получена при мощности накачки 12 Вт. На рис.4 представлен спектр полученного двухчастотного излучения, а также спектр излучения его вторых гармоник и суммарной частоты.

5.1.2. Пассивный и активный режимы модуляции добротности двухчастотных лазеров. С целью повышения эффективности преобразования излучения двухчастотного лазера в терагерцевый диапазон длин волн были исследованы режимы пассивной и активной модуляции добротности. Оптическая схема импульсного двухчастотного $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ -лазера представлена на рис.2. Активный элемент $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ -лазера, система накачки и эталон Фабри – Перо описаны выше.

Модуляция добротности осуществлялась пассивным затвором на основе кристалла YAG:Cr^{4+} (начальное пропускание 80%, толщина 2 мм), расположенным около выходного зеркала 32 (коэффициент пропускания 85%). Ис-

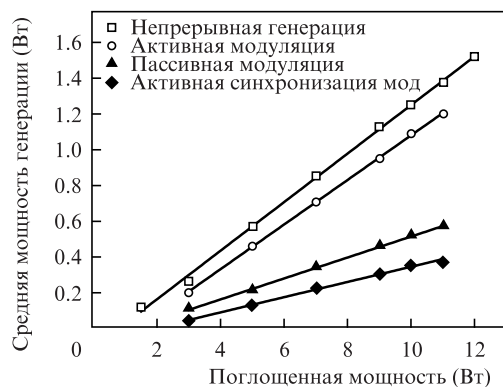


Рис.3. Зависимости выходной мощности излучения лазера на кристалле $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$, вырезанном вдоль оси a , с σ -поляризацией от мощности накачки в непрерывном режиме, а также в режимах активной и пассивной модуляции добротности и синхронизации мод.

пользование такого затвора делало лазер предельно компактным (длина резонатора ~ 40 мм). При такой геометрии резонатора средняя мощность двухчастотного излучения $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ -лазера достигала 560 мВт (см. рис.3), длительность импульсов была равна 15–20 нс при частоте их следования 8–14 кГц. Замена пассивного затвора активным акустооптическим модулятором МЛ-321 привела к увеличению длины резонатора до 90 мм. При оптимизации параметров зеркал и данной геометрии резонатора с активной модуляцией добротности средняя мощность двухчастотного излучения лазера достигала 1.2 Вт, длительность импульсов – 25 нс, частота следования – 12 кГц (рис.3).

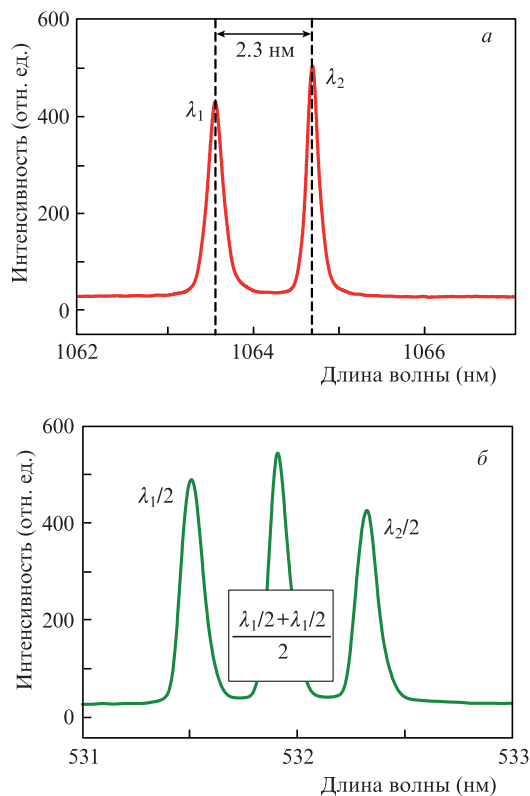


Рис.4. Спектр двухчастотного излучения, полученного в непрерывном режиме на кристалле $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$, вырезанном вдоль оси a , для σ -поляризации (а), а также спектр вторых гармоник этого излучения (б).

С точки зрения энергетических параметров и удобства работы (независимое управление частотой следования импульсов) в дальнейших экспериментах по преобразованию излучения в терагерцевый диапазон частот использовались двухчастотные наносекундные $\text{Nd}^{3+}:\text{VO}_4$ и $\text{Nd}^{3+}:\text{GdVO}_4$ -лазеры с активной модуляцией добротности. Однако наиболее дешевые и компактные источники терагерцевого излучения могут быть созданы на основе таких лазеров с пассивной модуляцией добротности. Их можно использовать в качестве задающих генераторов для твердотельных или волоконных усилителей.

Была проверена синхронность генерации импульсов излучения на двух длинах волн (рис.4) с помощью генератора второй гармоники на кристалле КТР. Зарегистрировано три пика излучения с длинами волн $\lambda_1/2$, $\lambda_2/2$ и $(\lambda_1/2 + \lambda_2/2)/2$. Существование излучения на суммарной частоте $(\lambda_1/2 + \lambda_2/2)/2$ свидетельствует о синхронности генерации импульсов на двух длинах волн.

5.1.3. Комбинированный режим работы двухчастотных лазеров с одновременными активной акустооптической синхронизацией мод и активной модуляцией добротности. Для получения максимальной пиковой мощности излучения твердотельного двухчастотного лазера с диодной накачкой был исследован пикосекундный $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ -лазер с поперечной диодной накачкой активной среды, работающий в комбинированном режиме – с одновременными активной модуляцией добротности и активной синхронизацией мод. Такой режим работы лазера позволяет почти на два порядка увеличить его выходную пиковую мощность по сравнению с мощностью квазинепрерывного пикосекундного лазера.

Оптическая схема $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ -лазера представлена на рис.5. Его активный элемент помещался вблизи глухого зеркала, через которое осуществлялась накачка. Излучение накачки фокусировалось в активном элементе в пятно радиусом ~ 400 мкм. Для того чтобы исключить паразитные отражения, все грани внутрирезонаторных оптических элементов разворачивались под углом Брюстера к оси резонатора или использовались клиновидные подложки. Резонатор (Z-образный) был образован четырьмя зеркалами: плоским выходным 34 с коэффициентом отражения 95%, плоским 31 и сферическими 32, 33 с большим отражением на длине волны 1.064 мкм. Ирисовая диафрагма диаметром 1 мм, размещенная внутри резонатора, обеспечивала работу лазера в режиме генерации основной TEM_{00} -моды.

Для активной модуляции добротности $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ -лазера использовался акустооптический модулятор МЛ-321, торцы которого были просветлены для длины волны генерации 1.064 мкм. Управление модулятором осуществлялось генератором синусоидальных напряжений ГСН 50-30и с максимальной мощностью высокочастотного сигнала 30 Вт. Для синхронизации мод применялся акустооптический модулятор АОМ СМ(АС-1) длиной 45 мм, который находился вблизи выходного зеркала, стабилизировался по температуре помощью элемента Пельтье и работал на частоте 50.139 МГц, что соответствовало геометрической длине резонатора 1440 мм (оптической длине 1495 мм); частота следования импульсов составляла при этом 100.278 МГц. Мощность высокочастотного сигнала генератора ГСН 50-2 варьировалась в пределах 1.5–8 Вт.

Излучение цуга лазерных импульсов детектировалось лавинным фотодиодом ЛФД-2а и осциллографом Tektronix TDS3052. Длительность импульсов излучения из-

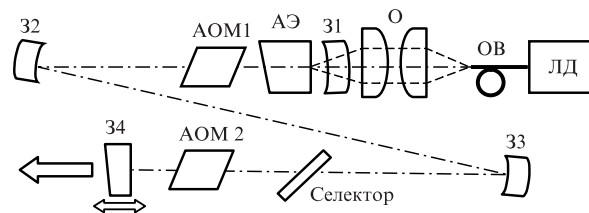


Рис.5. Схема пикосекундного $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ -лазера с одновременными активной модуляцией добротности и активной синхронизацией мод: ЛД – источник накачки LIMO30-F200-DL808; ОВ – оптическое волокно диаметром 200 мкм; О – объектив; 31–34 – зеркала резонатора; АЭ – активный элемент; Селектор – интерферометр Фабри–Перо или фильтр Лию; АОМ1 – акустооптический модулятор для модуляции добротности; АОМ2 – акустооптический модулятор для синхронизации мод.

мерялась с помощью стрик-камеры (GPI Photoelectronics Dept. Mod. PN-01/s20, разрешение 0.7 пс).

Была также исследована зависимость мощности выходного излучения от мощности накачки (см. рис.3). Максимальная мощность излучения, равная 360 мВт, была получена при мощности накачки 11 Вт. При этом генерировались цуги импульсов (частота следования цугов 10 кГц) длительностью 80–120 нс, которые содержали около 14–20 отдельных пикосекундных (30–40 пс) импульсов, следующих с частотой ~ 100 МГц.

5.2. Двухчастотная генерация с управлением усилением активной среды

Метод получения двухчастотной генерации с управлением усилением активной среды подобен предыдущему, однако в этом случае равенство усиления на двух участках спектра обеспечивается не вносимыми потерями, а изменением усиления в активной среде. В настоящей работе впервые предложены два способа управления усилением: для кристаллов ванадатов, вырезанных вдоль оси c (рис.6,а) и вдоль оси a (рис.6,б).

Для кристаллов ванадатов, вырезанных вдоль оси c , при повороте активного элемента в плоскости рисунка (рис.6,а) наблюдается трансформация формы спектров люминесценции. При этом усиление на различных участках спектра меняется. Лазер генерирует излучение одновременно на двух длинах волн, если добротность резонатора на двух участках спектра одинакова.

Аналогичная угловая зависимость усиления на различных участках спектра наблюдается и при повороте вокруг оси резонатора активного элемента, вырезанного вдоль оси a , при переходе от π - к σ -поляризации (рис.6,б). В данной схеме необходимо фиксировать поляризацию с помощью устройств, подобных призме Глана. Можно вращать только поляризатор.

Двухчастотная генерация была реализована на кристаллах $\text{Nd}:\text{YVO}_4$, $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$, $\text{Nd}:\text{Gd}_{1-x}\text{Y}_x\text{VO}_4$ и $\text{Nd}:\text{Sc}_{1-x}\text{Y}_x\text{VO}_4$.

5.3. Двухчастотная генерация со взаимно ортогональной поляризацией излучения

Различие в длинах волн излучения с π - и σ -поляризациями (см. рис.1) позволяет создать двухчастотные лазеры со взаимно ортогональными поляризациями генерируемого излучения, для чего необходимо осуществить их пространственное разделение. На рис.7 представлены

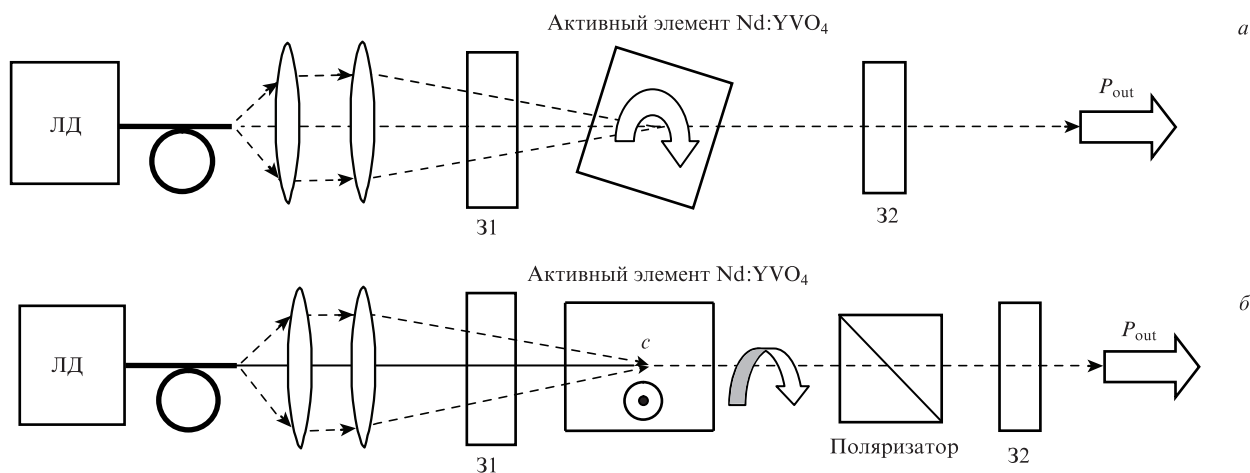


Рис.6. Схемы двухчастотных лазеров на основе кристаллов ванадатов, вырезанных вдоль оси c (а) и оси a (б) с управлением усилением активной среды.

схемы резонаторов, которые реализуют такие возможности.

Самый простой способ (рис.7,а) – это использование двулучепреломления по аналогии со схемой рис.2. Активный элемент лазера изготавливался в виде призмы со скошенной на $1.5 - 2^\circ$ передней гранью. Накачка осуществлялась через зеркало 31, наклоненное к оси резонатора под углом 45° (оно же обеспечивало совмещение двух пучков). Зеркала 32 и 33, имеющие большие коэффи-

циенты отражения на длине волны ~ 1066 нм, являются глухими зеркалами резонаторов, генерирующих излучение с π - и σ -поляризациями соответственно. Двухчастотное излучение выводилось через зеркало 34.

Недостатком данной схемы является необходимость использования достаточно длинного резонатора из-за малого различия в углах распространения обыкновенной и необыкновенной волн вне кристалла. Более простым решением является использование поляризатора для про-

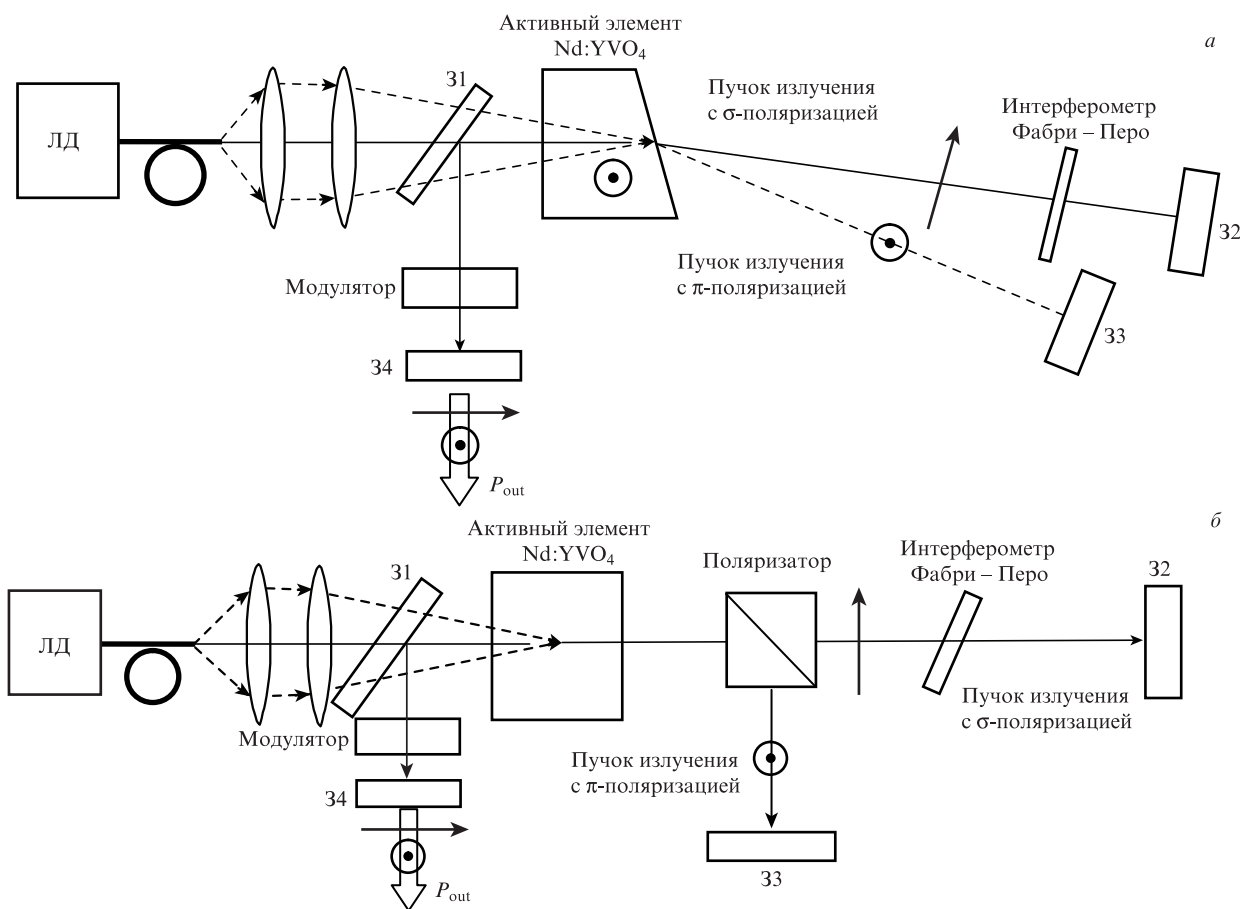


Рис.7. Схемы двухчастотного лазера на основе кристаллов ванадатов, вырезанных вдоль оси a , для π - и σ -поляризаций (а) и вдоль оси c или a (б).

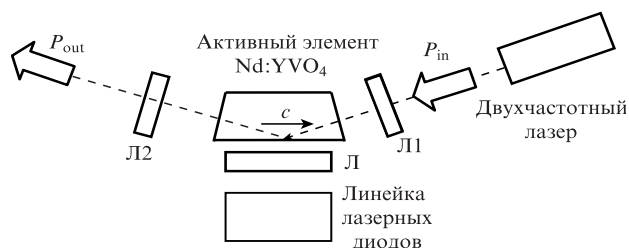


Рис.8. Схема усилителя двухчастотного излучения на основе кристаллов ванадатов, вырезанных вдоль оси c .

странственного разделения излучений с π - и σ -поляризациями (рис.7,б).

В настоящей работе был впервые реализован двухчастотный режим работы лазеров со взаимно ортогональной поляризацией генерируемого излучения с перестройкой разности частот. В такой схеме резонатора (рис.7,б) использовались кристаллы ванадатов, вырезанные вдоль как оси c , так и оси a . Причем на кристаллах, вырезанных вдоль оси c , был реализован большой диапазон перестройки частоты излучения. Размещение эталона Фабри–Перо в одном из плеч резонатора (рис.7,б) позволило изменять величину $\lambda_1 - \lambda_2$ для генерируемого излучения. Такой подход в перспективе позволит создать источник узкополосного перестраиваемого терагерцевого излучения.

6. Усилитель для двухчастотного лазера

Недостатком представленных выше схем двухчастотных лазеров является необходимость как стабилизации блока питания лазера, так и термостабилизации резонатора. Любое изменение параметров накачки приводит к необходимости подстройки резонатора для получения двухчастотного режима. Поэтому представляется важным создание системы задающий генератор–усилитель для повышения энергетических параметров двухчастотных лазеров. Активные среды усилителя должны обеспечивать согласование спектров излучения, а также возможность работы с ортогональной и параллельной поляризациями излучения. Таким требованиям удовлетворяют активные среды на кристаллах ванадатов, вырезанных вдоль оси c .

В настоящей работе впервые исследован усилитель на кристалле $YVO_4:Nd^{3+}$, вырезанном вдоль оси c (рис.8). Была выбрана схема усилителя на слэбе скользящего падения [20]. Слэб из $YVO_4:Nd^{3+}$ с размерами $20 \times 5 \times 2$ мм накачивался излучением линейки лазерных диодов мощностью до 45 Вт с помощью цилиндрической линзы Л (фокусное расстояние 15 мм). Поверхности граней 5×2 мм были просветлены на длину волны 1066 нм, а граней 20×2 мм – на 808 нм. Такая схема с использованием цилиндрических линз Л1 и Л2 (фокусные расстояния 45 мм) позволяет согласовать каустики излучения задающего генератора и усилителя. В однопроходной схеме усилителя достигнута средняя мощность 1.6 Вт при использовании задающего генератора на основе двухчастотного $YVO_4:Nd^{3+}$ -лазера с пассивной модуляцией добротности (максимальная мощность 0.2 Вт, длительность импульса 25 нс).

7. Заключение

В настоящей работе показано, что спектры люминесценции кристаллов $Nd:YVO_4$, $Nd:GdVO_4$, $Nd:Gd_{1-x}Y_xVO_4$ и $Nd:Sc_{1-x}Y_xVO_4$ вырезанных вдоль осей c и a , для σ -поляризации совпадают. Показано, что длины волн генерируемого излучения для π - и σ -поляризаций различны. Впервые для σ -поляризации осуществлена перестройка частоты лазерного излучения и реализована двухчастотная генерация со взаимно ортогональными и параллельными поляризациями излучения. Устойчивая двухчастотная генерация на кристаллах ванадатов для σ -поляризации излучения достигнута в следующих режимах:

- в непрерывном режиме (максимальная средняя мощность 1.5 Вт);
- в режиме пассивной и активной модуляции добротности (максимальная средняя мощность 0.56 и 1.2 Вт соответственно);
- в режиме активной синхронизации мод совместно с активной модуляцией добротности (максимальная средняя мощность 355 мВт).

Впервые исследована система генератор – усилитель на кристаллах $YVO_4:Nd^{3+}$, вырезанных вдоль оси c .

Статья написана по материалам доклада на Международной конференции Advanced Laser Technologies 2011 (ALT'11).

1. Greene B.I., Saeta P.N., Douglas R.D., Chuang S.L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **28**, 2302 (1992).
2. Planken C., Nuss M.C., Knox W.H., Miller D.A., Goossen K. W. *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 2009 (1992).
3. Benicewicz K., Roberts J.P., Taylor A.J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **12**, 2533 (1994).
4. McIntosh K.A., Brown E.R., Nichols K.B., McMahon O.B., DiNatale W.F., Lyszczarz T.M. *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 3844 (1995).
5. Sarukura N., Ohtake H., Izumida S., Liu. *Z. J. Appl. Phys.*, **84**, 654 (1998).
6. Hyodo M., Tani M., Matsuura S., Sakai K. *Electron. Lett.*, **32**, 1589 (1996).
7. Li M., Zhang X.C. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3616**, 126 (1999).
8. Ding Y.J. *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.*, **13** (3), 705 (2007).
9. Hyodo M., Tani M., Matsuura S., Onodera N., Sakai K. *Electron. Lett.*, **32** (17) (1996).
10. Willer U., Wilk R., Schippers W., Bottger S., Nodop D., Schossig T., Schade W., Mikulics M., Koch M., Walther M., Niemann H., Uttler B.G. *Appl. Phys. B*, **87**, 13 (2007).
11. O'Connor J.R. *Appl. Phys. Lett.*, **9**, 407 (1966).
12. Загуменный А.И., Остроумов В.Г., Щербаков И.А., Йенсен Т., Мейен Я.П., Хубер Г. *Квантовая электроника*, **19**, 1149 (1992).
13. Qin L., Meng X., Du Ch., Zhu L., Xu B., Shao Z., Liu Zh., Fang Q., Cheng R. *J. Alloys Comp.*, **354**, 259 (2003).
14. 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).
15. Власов В.И., Гарнов С.В., Заварцев Ю.Д., Загуменный А.И., Куговой С.А., Сироткин А.А., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, **37**, 938 (2007).
16. Sirotkin A.A., Garnov S.V., Zagumennyi A.I., Zavartsev Yu.D., Kutovoi S.A., Vlasov V.I., Labio L.Di, Luthy W., Feurer T., Shcherbakov I.A. *Laser Phys.*, **19** (5), 1083 (2009).
17. Сироткин А.А., Власов В.И., Загуменный А.И., Заварцев Ю.Д., Куговой С.А. *Квантовая электроника*, **41** (7), 584 (2011).
18. Tan W.D., Tang D.Y., Xu C.W., Zhang J., Yu H.H., Zhang H.J. *Appl. Phys. B*, **102**, 775 (2011).
19. Wu B., Jiang P., Yang D., Chen T., Kong J., Shen Y. *Opt. Express*, **17**, 6004 (2009).
20. Bernard J.E., Alcock A.J. *Opt. Lett.*, **18**, 968 (1993).