## ЛАЗЕРЫ

PACS 42.55.Rz; 42.70.Hj; 42.25.Ja

# Двухчастотный пикосекундный лазер на композитных кристаллах ванадатов с σ-поляризацией излучения

А.А.Сироткин, С.П.Садовский, С.В.Гарнов

Проведены экспериментальные исследования двухчастотного пикосекундного лазера на основе композитного кристалла ванадата Nd: YVO<sub>4</sub>–YVO<sub>4</sub>, вырезанного вдоль оси а, для σ-поляризации излучения на переходе <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>–<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> с возможностью перестройки длин волн излучения при использовании эталонов Фабри–Перо различных толщин. Реализована перестройка разности длин волн излучения в пределах 1.2–4.4 нм. В режиме синхронизации мод мощность двухчастотного излучения при поглощенной мощности накачки 12 Bm составила 280 мBm.

Ключевые слова: двухчастотный лазер, композитный кристалл Nd: YVO4-YVO4, терагерцевое излучение.

### 1. Введение

Двухчастотные лазеры с возможностью перестройки частоты излучения представляют научный и практический интерес в таких областях, как локация, спектроскопия, системы слежения и контроля. В настоящее время ведутся интенсивные исследования по созданию терагерцевых (ТГц) источников с получением разностной частоты от двухчастотного лазерного излучения на нелинейных кристаллах [1-3] или оптоэлектронных антеннах [4,5]. Главным преимуществом двухчастотной лазерной системы по сравнению с использованием двух отдельных лазеров для получения разностной частоты является полное совмещение лазерных пучков как в пространстве, так и во времени. Использование перестраиваемого лазерного источника на двух длинах волн позволит создавать узкополосное ТГц излучение в окне прозрачности паров воды в воздухе.

Поскольку эффективность преобразования в ТГц диапазон длин волн невысока, требуются лазерные источники с высокой пиковой мощностью. Для получения максимальной пиковой мощности излучения двухчастотного лазера в настоящей работе был реализован пикосекундный  $Nd^{3+}$ :  $YVO_4-YVO_4$ -лазер с продольной диодной накачкой, работающий в комбинированном режиме – с 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.

Главной целью наших исследований было получение перестраиваемого двухчастотного лазерного излучения пикосекундной длительности с использованием эталонов Фабри–Перо разных толщин.

Поступила в редакцию 14 декабря 2012 г., после доработки – 12 февраля 2013 г..

#### 2. Экспериментальная установка

Схема лазерной системы с возможностью перестройки по двум частотам излучения представлена на рис.1.

Как было показано в работах [6, 7], ширина линии люминесценции излучения для кристалла Nd:  $YVO_4$ , вырезанного вдоль оси *a* ( $\sigma$ -поляризация), сравнима с шириной линии люминесценции кристалла, вырезанного вдоль оси *c*, что позволяет перестраивать лазерное излучение по всему профилю усиления.

Особенностью работы с  $\sigma$ -поляризованным излучением является необходимость использования селектирующих устройств для его отделения от излучения с  $\pi$ -поляризацией, для которой сечение люминесценции в пять раз больше. Для разделения  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризаций в наших экспериментах использовалась схема [7,8], основанная на двулучепреломлении кристаллов ванадатов.

Преобразование частоты в нелинейных кристаллах и эффективность работы лазера сильно зависят от наведенной в активном элементе (АЭ) термической линзы. Для снижения ее влияния обычно используются накачка в основное состояние [9, 10], композитные кристаллы [11, 12], модуляция излучения накачки [13].

В качестве лазерного АЭ нами использовался вырезанный вдоль оси *а* композитный (с допированной и недопированной неодимом областями) кристалл ванадата Nd:  $YVO_4$ – $YVO_4$  с атомной концентрацией ионов неодима 0.5% и размерами 4×4×(2+6) мм. Длина недопированной части композитного кристалла составляла 2 мм.



Рис.1. Схема двухчастотного пикосекундного Nd: YVO<sub>4</sub>-YVO<sub>4</sub>лазера:

АЭ – активный элемент; 31–34 – зеркала; AOM1, AOM2 – акустооптические модуляторы; ФП – эталон Фабри–Перо.

А.А.Сироткин, С.П.Садовский, С.В.Гарнов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: spsadovskiy@gmail.com



Рис.2. Осциллограмма излучения цуга лазерных импульсов.

Для разделения излучений с  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризациями одна грань АЭ была скошена на угол  $\sim 2^{\circ}$ .

Лазерный кристалл был вмонтирован с индиевой фольгой в медный блок, охлаждаемый водой. Накачка кристалла осуществлялась лазерной диодной системой 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 АЭ в пятно диаметром 250–400 мкм.

Резонатор лазера имел Z-образную форму из соображений компактности и устойчивости генерации излучения. Он был образован глухим плоским зеркалом 31 (высокоотражающее диэлектрическое покрытие на длину волны 1064 нм с просветлением на длину волны излучения накачки 808 нм) на грани АЭ и плоским выходным зеркалом 34 (пропускание T = 5% на основной частоте). Другая сторона АЭ была просветлена на длины волн 808 и 1064 нм ( $R \approx 0.02\%$ ). Между плоскими зеркалами находились сферические зеркала 32 и 33 с радиусом кривизны 340 мм, расстояние между которыми составляло 460 мм. Такая конфигурация и использование композитных кристаллов Nd: YVO<sub>4</sub> – YVO<sub>4</sub> обеспечивали более устойчивую работу лазера, чем ранее применяемая схема [6].

Для работы лазера в режиме модуляции добротности использовался AOM1 (M3-321M), управляемый генератором синусоидального напряжения ГСН 50-30И с мощностью высокочастотного сигнала до 30 Вт. Синхронизация мод совместно с модуляцией добротности достигались в результате введения в резонатор дополнительного модулятора АОМ2 (АС-1) с мощностью высокочастотного сигнала 1.5-8 Вт. АОМ2 помещался рядом с выходным зеркалом и термостабилизировался с помощью элемента Пельтье с точностью 0.1 °С. Частота модуляции равнялась 50.139 МГц, что соответствует геометрической длине резонатора 1440 мм и частоте следования лазерных импульсов 100.278 МГц. Излучение цуга лазерных импульсов детектировалось приемником на основе лавинного фотодиода ЛФД-2а и осциллографом Tektronix TDS3052. На рис.2 представлена осциллограмма выходного излучения.

### 3. Двухчастотная генерация

В наших экспериментах для получения двухчастотного излучения использовалась методика [14], основанная на внесении в резонатор дополнительных спектральноселективных потерь, которые выравнивают добротность резонатора лазера на разных участках спектра люминесценции АС. Для этой цели селектирующими элементами служили эталоны ФП.

Разность длин волн максимумов пропускания эталонов ФП определяется областью дисперсии интерферометра:  $\lambda_1 - \lambda_2 = \lambda^2/(2nd)$ , где n - коэффициет преломления; d – толщина эталона;  $\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$ . Изменение угла наклона эталона ФП приводит к смещению максимумов пропускания. Лазер будет генерировать излучение одновременно на двух длинах волн, когда добротность резонатора на них будет одинакова.

Двухчастотное излучение наблюдалось в непрерывном режиме работы лазера и в режимах модуляции добротности и синхронизации мод.

#### 4. Экспериментальные результаты

Применение эталонов ФП разной толщины позволяет изменять и контролировать разность генерируемых лазером частот. Нами использовались эталоны, выполненные из кристаллов YAG в форме плоскопараллельных пластин с толщинами 80, 97, 130 и 270 мкм без покрытий.

На рис.3 приведены спектры выходного лазерного излучения при внесении в резонатор эталонов ФП в режиме непрерывной генерации. Разность длин волн зависит от толщины и угла наклона пластинок.

Зависимость разности длин волн при изменении угла наклона эталона представлена на рис.4 на примере пластинки толщиной 290 мкм. Реализована перестройка раз-



Рис.3. Спектры двухчастотного излучения  $Nd: YVO_4-YVO_4-$ лазера с эталонами  $\Phi\Pi$  разных толщин.



Рис.4. Спектры двухчастотного излучения Nd: YVO<sub>4</sub>-YVO<sub>4</sub>-лазера с эталоном ФП толщиной 290 мкм при разных углах наклона эталона.



Рис.5. Спектр поглощения ТГц излучения в парах воды в атмосфере при нормальных условиях.

ности длин волн излучения в пределах 1.2–4.4 нм. Перестройка в этих пределах возможна в дискретном наборе областей с плавной перестройкой внутри каждой области. Приведённые спектры наблюдались и при работе лазера в режимах модуляции добротности и синхронизации мод.

С использованием имеющегося набора интерферометров Фабри–Перо продемонстрирована генерация двухчастотного излучения с возможностью получения разностной частоты на нелинейных кристаллах вблизи 0.58, 0.63, 0.64, 0.71, 1, 1.02, 1.12 ТГц.

На рис.5 представлен спектр поглощения ТГц излучения в парах воды в атмосфере при нормальных условиях (данные взяты из базы HITRUN). В этом спектральном диапазоне существуют области, где поглощение излучения в атмосфере минимально и, следовательно, необходима подстройка разностной частоты именно к этим участкам спектра. Стрелками обозначены частоты в ТГц области спектра, которые можно получить при преобразовании реализованных в настоящей работе разностных частот в нелинейных кристаллах.

Мощность излучения при работе лазера в двухчастотном режиме на разных спектральных пиках оставалась практически неизменной и составляла 360 мВт в непрерывном режиме, 300 мВт при частоте следования импульсов 12 кГц и длительности 40–60 нс в режиме модуляции добротности, 280 мВт при частоте следования лазерных импульсов 100 МГЦ и длительности 40–60 пс в режиме синхронизации мод при поглощенной мощности накачки 12 Вт.

Таким образом, нами продемонстрирована работа твердотельного двухчастотного пикосекундного лазера на основе композитных кристаллов ванадатов Nd:  $YVO_4$ – $YVO_4$ , вырезанных вдоль оси *a*, для  $\sigma$ -поляризаций излучения на переходе  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ . Проведены экспериментальные исследования возможности перестройки длин волн излучения с использованием эталонов Фабри–Перо различных толщин.

Реализована плавная перестройка двухчастотного излучения с разностью длин волн между пиками от 1.2 до 4.4 нм.

- 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).
- 2. Zhao P., Ragam S., Ding Y.J., Zotova I.B. Opt. Lett., 35, 23 (2010).
- Satoa A., Imaia K., Kawasea K., Minamidea H., Wadac S., Itoa H. Opt. Commun., 207, 353 (2002).
- Gouet J., Morvan L., Alouini M., Bourderionnet J., Dolfi D., Huignard J.P. Opt. Lett., 32, 9 (2007).
- Pallas F., Herault E., Roux J.F., Kevorkian A., Coutaz J.L., Vitrant G. Opt. Lett., 37, 14 (2012).
- Сироткин А.А., Гарнов С.В., Загуменный А.И., Заварцев Ю.Д., Кутовой С.А., Власов В.И., Щербаков И.А. Квантовая электроника, **39** (9), 802 (2009).
- Сироткин А.А., Власов В.И., Загуменный А.И., Заварцев Ю.Д., Кутовой С.А. Квантовая электроника, 41 (7), 584 (2011).
- 8. Agnesi A., Dell'acqua S. Appl. Phys. B, 76, 351 (2003).
- 9. Sato Y., Taira T., Pavel N., Lupei V. Appl. Phys., 82, 844 (2003).
- 10. Lupei V., Pavel N., Sato Y., Taira T. Opt. Lett., 28, 2366 (2003).
- 11. Tsunekane M., Taguchi N., Inaba H. Electron. Lett., 32, 40 (1996).
- Weber R., Neuenschwander B., Weber H. P., in *Techn. Digest Conf.* on Lasers and Electro-Optics Europe (Hamburg: OSA, 1996, paper CMA4).
- Wang B., Qi Y., Zhang G., Fang T., Yan B.X., Wang Y.W., Bi Y., Sun M.Y., Zang C.H. *Laser Phys.*, **21**, 656 (2011).
- Власов В.Л., Гарнов С.В., Заварцев Ю.Д., Загуменный А.И., Кутовой С.А., Сироткин А.А., Щербаков И.А. Квантовая электроника, 37, 938 (2007).