

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 смонтирован 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 АОМ1 (МЗ-321М), 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 спектрально-

селективных потерь, которые выравнивают добротность резонатора лазера на разных участках спектра люминесценции АС. Для этой цели селективными элементами служили эталоны ФП.

Разность длин волн максимумов пропускания эталонов ФП определяется областью дисперсии интерферометра:  $\lambda_1 - \lambda_2 = \lambda^2 / (2nd)$ , где  $n$  – коэффициент 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-

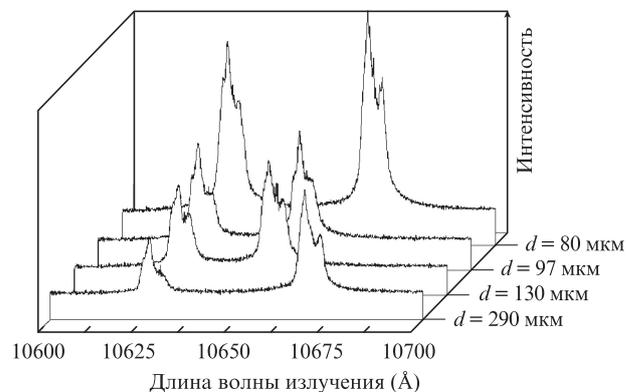


Рис.3. Спектры двухчастотного излучения Nd:YVO<sub>4</sub>-YVO<sub>4</sub>-лазера с эталонами ФП разных толщин.

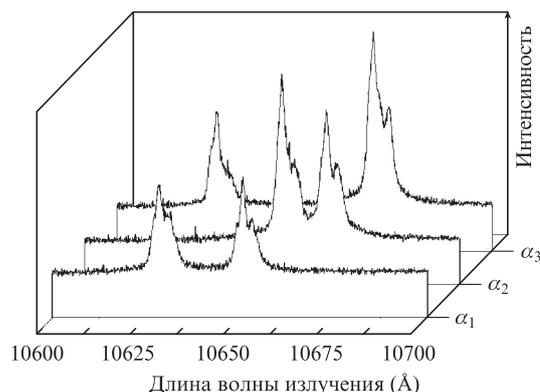


Рис.4. Спектры двухчастотного излучения Nd:YVO<sub>4</sub>-YVO<sub>4</sub>-лазера с эталоном ФП толщиной 290 мкм при разных углах наклона эталона.

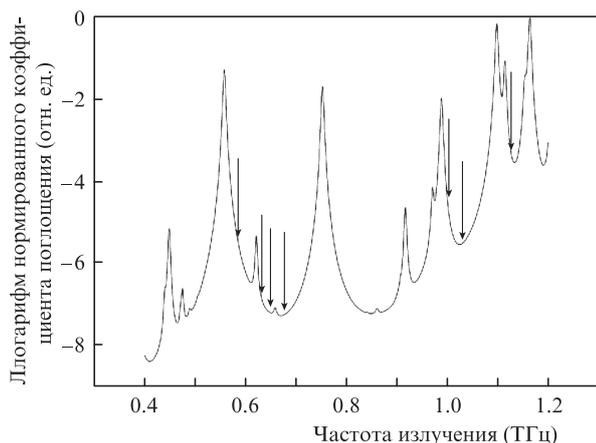


Рис.5. Спектр поглощения ТГц излучения в парах воды в атмосфере при нормальных условиях.

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 HITRAN). 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 практи-

чески 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  $\text{Nd:YVO}_4\text{-YVO}_4$ , вырезанных вдоль оси  $a$ , для  $\sigma$ -поляризации излучения на переходе  ${}^4F_{3/2}\text{-}{}^4I_{11/2}$ . 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.

1. 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).
3. Sato A., Imaia K., Kawase K., Minamide H., Wadac S., Itoa H. *Opt. Commun.*, **207**, 353 (2002).
4. Gouet J., Morvan L., Alouini M., Bourderionnet J., Dolfi D., Huignard J.P. *Opt. Lett.*, **32**, 9 (2007).
5. Pallas F., Herault E., Roux J.F., Kevorkian A., Coutaz J.L., Vitrant G. *Opt. Lett.*, **37**, 14 (2012).
6. 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).
7. 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).
12. Weber R., Neuenschwander B., Weber H. P., in *Techn. Digest Conf. on Lasers and Electro-Optics Europe* (Hamburg: OSA, 1996, paper CMA4).
13. 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).
14. 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).