

Исследование двухчастотного Nd³⁺:YAG-лазера*

Ю.Д.Арапов, А.Ф.Иванов, И.В.Касьянов, Л.Э.Магда

Реализован импульсно-периодический двухчастотный лазерный генератор. Проведено исследование импульсного режима работы лазера на основе кристаллической активной среды YAG:Nd³⁺ с одновременным усилением излучения на двух длинах волн в однопроходном усилителе.

Ключевые слова: генерация двухчастотного излучения, импульсно-периодический режим.

1. Введение

В качестве активной среды мощных импульсно-периодических лазерных усилительных систем в настоящее время наиболее часто используют кристалл YAG:Nd³⁺. В данной среде вынужденный излучательный переход с верхнего лазерного уровня ⁴F_{3/2} возможен на несколько уровней, в том числе на уровни ⁴I_{13/2} и ⁴I_{11/2}. Длины волн излучения, генерируемого на этих переходах, равны 1.33 и 1.06 мкм соответственно. Поскольку наибольшее сечение вынужденного излучения имеет переход ⁴F_{3/2} → ⁴I_{11/2}, чаще всего лазерную генерацию получают с использованием этого перехода. Сечение для перехода ⁴F_{3/2} → ⁴I_{11/2}, соответствующего длине волны излучения λ = 1.06 мкм для разных партий кристаллов варьируется от 1.8 × 10⁻¹⁹ до 8.8 × 10⁻¹⁹ см² [1], а сечение для перехода ⁴F_{3/2} → ⁴I_{13/2} достигает 1.5 × 10⁻¹⁹ см² [1]. Сечения вынужденного излучения для переходов на других длинах волн в кристалле YAG:Nd³⁺ значительно меньше, поэтому создание лазерного излучателя, генерирующего излучение одновременно на двух длинах волн, является достаточно сложной научно-технической задачей.

Рассмотрим несколько примеров реализации такой системы. В работе [2] сообщается о создании твердотельного лазера с диодной накачкой в торец активного элемента, генерирующего в непрерывном режиме излучение на двух длинах волн, а также показано, что при работе лазера на длинах волн 1.064 и 1.112 мкм, которые соответствуют разным верхним лазерным энергетическим уровням, генерация в двухзеркальном резонаторе происходит с высокой эффективностью. Авторы работы [3] для создания импульсно-периодического лазера с модуляцией добротности использовали внутрирезонаторное спектральное разделение генерируемых частот с синхронизацией импульсов за

счет варьирования длин плеч резонаторов, примененная ими схема достаточно сложна в юстировке и характеризуется значительными внутрирезонаторными потерями вследствие большого числа использованных оптических элементов.

Цель данной работы – создание простого в юстировке импульсно-периодического лазера с одновременной генерацией излучения на λ = 1.06 и 1.33 мкм для реализации на его основе мультчастотной лазерной системы. Такой лазер существенно расширит возможности и повысит точность измерительных методик, применяющихся при оптическом зондировании атмосферы и для создания комплексов экологического мониторинга и медико-биологического экспресс-анализа биологических объектов.

2. Двухчастотный лазерный генератор

Для генерации лазерного излучения одновременно на двух длинах волн была предложена и реализована схема, приведенная на рис.1. Двухчастотный генератор включает в себя два резонатора с общим выходным зеркалом 8, модулятором добротности 7 и глухими зеркалами 1 (плечо II) и 3 (плечо I). В плече II расположен активный элемент 2, обеспечивающий генерацию на λ = 1.33 мкм, а в плече I – активный элемент 4, обеспечивающий генерацию на λ = 1.06 мкм. Диафрагма 5 диаметром 3 мм предназначена для согласования апертур пучков излучения с λ = 1.06 и 1.33 мкм. Поворотное зеркало 6 имеет коэффициент отражения R = 99% на λ = 1.06 мкм при угле падения излучения 45°, при этом его коэффициент пропускания при таком же угле падения на λ = 1.33 мкм составляет 90%. Коэффициент отражения выходного зеркала генератора равен ~20% на λ = 1.06 мкм и ~70% на λ = 1.33 мкм. По оценкам, проведенным с использованием выражения [4]

$$R_{\text{opt}} = \exp\left[-2\gamma L\left(\sqrt{\frac{GA}{\gamma L}} - 1\right)\right]$$

(γ – коэффициент внутренних потерь, L – длина активной зоны, G – коэффициент усиления, A – превышение накачки над порогом), данное зеркало является близким к оптимальному для обеих длин волн.

В генераторе применялась активная модуляция добротности на основе эффекта нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Время переключения затво-

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

Ю.Д.Арапов, А.Ф.Иванов, И.В.Касьянов, Л.Э.Магда. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИТФ им. Е.И.Забабихина, Россия, Челябинская обл., 456770 Снежинск, ул. Васильева, 13, а/я 245; e-mail: a.f.ivanov@vniitf.ru

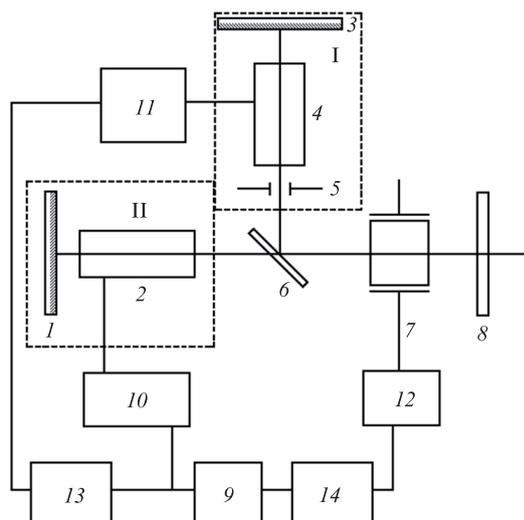


Рис.1. Общая схема двухчастотного генератора с модуляцией добротности и общим выходным зеркалом:
 1 – заднее зеркало резонатора для $\lambda = 1.33$ мкм ($R = 99\%$); 2 – активный элемент диаметром 3 мм; 3 – заднее зеркало резонатора для $\lambda = 1.06$ мкм ($R = 98\%$); 4 – активный элемент диаметром 5 мм; 5 – диафрагма диаметром 3 мм; 6 – поворотное зеркало для $\lambda = 1.06$ мкм ($R = 99\%$); 7 – модулятор добротности; 8 – выходное зеркало резонаторов; 9 – задающий генератор; 10, 11 – блоки накачки лазера; 12 – блок управления затвором; 13, 14 – блоки задержки.

ра из закрытого состояния в открытое согласно паспорту составляло 600 нс. Накачка активных элементов осуществлялась матрицами лазерных диодов. Синхронизацию работы блоков накачки лазера 10, 11 и блока управления затвором 12 обеспечивал задающий генератор 9 и блоки задержки 13, 14.

Энергия излучения измерялась на выходе генератора с помощью измерителя Ophir PE50 как отдельно для каждого резонатора, так и при одновременной работе двух резонаторов. Результаты измерений приведены в табл.1.

Табл.1. Энергия генерации лазера в различных режимах работы.

Режим работы	Энергия (мДж)		
	Плечо I	Плечо II	Одновременная работа плеч
Свободная генерация	45 ± 2	30 ± 2	75 ± 3
Модуляция добротности	34 ± 2	15 ± 1	49 ± 2

Также были определены временные характеристики излучения на выходе генератора. Импульсы излучения лазера регистрировались фотоприемником ФЭК-15 и осциллографом TDS 6604 как отдельно для каждого резонатора, так и при одновременной работе двух резонаторов. На рис.2 приведены осциллограммы импульсов излучения в случае раздельной работы двух резонаторов. Видно, что длительности импульсов излучения на двух длинах волн примерно одинаковы. Это можно объяснить невыполнением в затворе условия быстрого включения модуляции добротности [5].

На рис.3 показана осциллограмма импульсов при совместной генерации излучения на двух длинах волн. Видно, что генерация импульсов излучения с различными длинами волн происходит в разные моменты времени. Задержка между импульсами составляет ~380 нс, что мож-

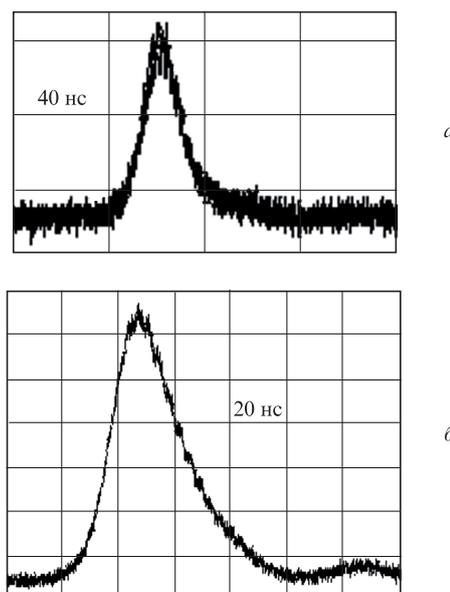


Рис.2. Характерные осциллограммы импульсов излучения на $\lambda = 1.06$ мкм при длительности импульса на полувысоте ~20 нс (а) и на $\lambda = 1.33$ мкм при длительности импульса на полувысоте ~27 нс (б).

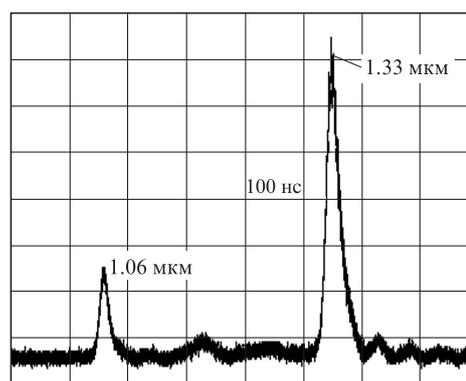


Рис.3. Осциллограмма импульсов излучения при совместной работе двух резонаторов лазера.

но объяснить различием условий возникновения генерации в резонаторах I и II.

Для синхронизации импульсов генерации в каналах осуществлялась задержка электрического сигнала, управляющего блоком накачки 11 (рис.1) с помощью блока задержки 13. На рис.4 приведена временная диаграмма электрических сигналов, управляющих блоками накачки, за-

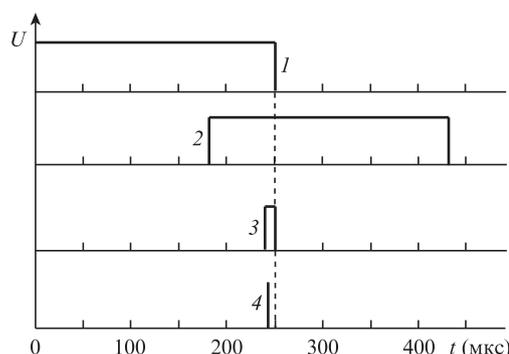


Рис.4. Временные диаграммы сигналов U , управляющих блоком накачки 10 (1), блоком накачки 11 (2), затвором 12 (3) и ФЭК-15 (4).

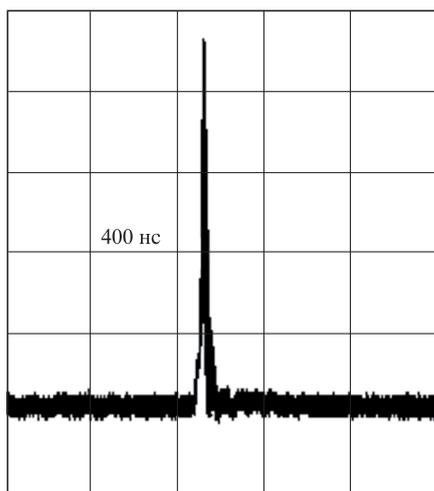


Рис.5. Осциллограмма импульса при одновременной генерации излучения на двух длинах волн.

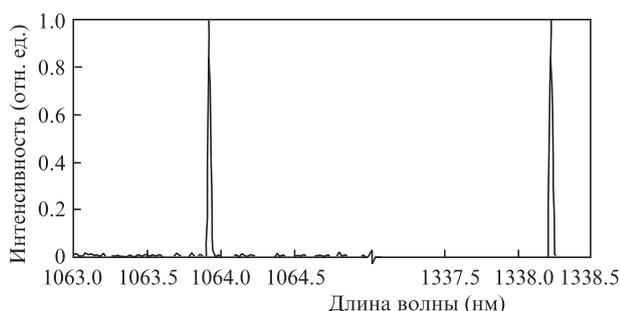


Рис.6. Спектр излучения двухчастотного лазерного генератора.

твором и ФЭК-15. Через ~ 180 мкс после начала накачки активного элемента в канале, где происходит генерация на $\lambda = 1.33$ мкм (сигнал 1), начинается накачка активного элемента в канале, где происходит генерация на $\lambda = 1.06$ мкм (сигнал 2). Спустя ~ 240 мкс происходит открытие затвора (сигнал 3) и появление лазерной генерации (сигнал 4).

Осциллограмма сигнала с ФЭК-15 при синхронизации импульсов генерации на двух длинах волн представлена на рис.5.

Спектр излучения двухчастотного лазерного генератора был исследован с помощью спектр-анализатора. Полученные данные приведены на рис.6.

3. Однопроходная двухчастотная усилительная система

В эксперименте был исследован однопроходный лазерный усилитель. В качестве задающего генератора использовался описанный выше двухчастотный излучатель, а в качестве усилителя – квантрон «Игла-М2-6.3» с активным элементом YAG:Nd^{3+} диаметром 6.3 мм. Усиление

слабого сигнала за один проход через активный элемент равнялось ~ 4 на $\lambda = 1.06$ мкм и ~ 1.5 на $\lambda = 1.33$ мкм.

Энергия излучения с $\lambda = 1.06$ мкм в отсутствие генерации на $\lambda = 1.33$ мкм на выходе усилителя составила 134 ± 7 мДж, а энергия излучения с $\lambda = 1.33$ мкм в отсутствие генерации на $\lambda = 1.06$ мкм была равна 24 ± 1 мДж. При одновременном усилении излучения на двух длинах волн энергия на выходе усилителя составила 158 ± 7 мДж.

Плотность энергии насыщения активной среды можно определить по формуле $E_s = hv/\sigma$, где σ – сечение вынужденного излучения. Для используемого активного элемента $E_s = 1.04$ Дж/см² для излучения на $\lambda = 1.06$ мкм и 4.26 Дж/см² для излучения на $\lambda = 1.33$ мкм.

4. Заключение

Предложенная конфигурация лазера позволила получить генерацию в режиме модулированной добротности на двух длинах волн с синхронизацией импульсов излучения по времени с точностью до длительности импульса. Более точную синхронизацию можно осуществить при спектральном разделении выходного пучка и применении двухканальной схемы регистрации длительности импульсов лазерного излучения. В исследованном лазере использовалось общее выходное зеркало для обоих плеч резонатора. Предполагается, что это способствует согласованию диаграмм направленности излучения с разными длинами волн, однако данное утверждение требует дополнительного исследования.

Проведено исследование одновременного усиления лазерного излучения на двух длинах волн в кристалле YAG:Nd^{3+} . Сравнив полученные результаты с результатами исследования усиления на отдельных длинах волн, можно сделать вывод о том, что усилитель работает в насыщенном режиме на $\lambda = 1.06$ мкм и в ненасыщенном на $\lambda = 1.33$ мкм.

В дальнейшем лазерное излучение с полученными параметрами можно использовать для генерации суммарных и разностных частот, а также для параметрической генерации света. Следует отметить, что генерация разностной частоты при использовании исследованного в настоящей работе двухчастотного лазера приведет к получению излучения с частотой ~ 1823 см⁻¹, попадающей в окно прозрачности атмосферы [6], что может найти применение в коммуникационных технологиях (линиях лазерной связи).

1. Зверев Г.М., Голяев Ю.Д., Шалаев Е.А., Шокин А.А. *Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом* (М.: Радио и связь, 1985).
2. Lijuan Chen, Zhengping Wang, Shidong Zhuang, et al. *Opt. Lett.*, **36** (13), 2554 (2011).
3. Walsh В.М. *Laser Phys.*, **20** (3), 622 (2010).
4. Микаэлян А.Л., Тер-Микаэлян М.Л., Турков Ю.Г. *Оптические генераторы на твердом теле* (М.: Сов. радио, 1967).
5. Звелто О. *Принципы лазеров* (М.: Мир, 1990).
6. Зуев В.Е. *Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере* (М.: Сов. радио, 1970).