

Внерезонаторная параметрическая генерация света на $\lambda = 1.5$ и 2 мкм с накачкой излучением лазеров на АИГ: Nd^{3+}

В.Л.Наумов*, А.М.Онищенко*, А.С.Подставкин**, А.В.Шестаков*

Исследованы генерационные характеристики внерезонаторных параметрических генераторов света (ПГС) на кристаллах КТР с длинами волн излучения 1.57 и 2.14 (2.19) мкм при накачке излучением многомодовых лазеров на АИГ: Nd^{3+} с длинами волн 1.064 и 1.32 (1.34) мкм соответственно. Проведено сравнение порогов, эффективности преобразования и расходимости выходного излучения для линейной и кольцевой схем ПГС с $\lambda_s = 1.57$ мкм. Показано, что в трехзеркальном кольцевом ПГС реализуются низкие пороги, высокая (до 40 %) эффективность преобразования и низкая (не более 3.5 мрад) расходимость выходного излучения при десятикратном превышении энергии накачки над пороговой. В трехзеркальном кольцевом ПГС получена параметрическая генерация на длине волны $\lambda_s = 2.14$ и 2.19 мкм при накачке излучением лазера на АИГ: Nd^{3+} с длиной волны 1.32 и 1.34 мкм соответственно и параметрами, представляющими практический интерес. Создана малогабаритная конструкция эффективного кольцевого параметрического преобразователя излучения лазеров на АИГ: Nd^{3+} в излучение диапазона 1.5–2 мкм.

Ключевые слова: кристаллы КТР, параметрический генератор света, безопасное лазерное излучение.

1. Введение

Лазерные источники света с длинами волн излучения в диапазоне 1.5–2 мкм представляют большой интерес для различных применений, поскольку их излучение безопасно для глаз и попадает в области прозрачности атмосферы. Одной из возможностей получения лазерного излучения в этом спектральном диапазоне является использование параметрических генераторов света (ПГС).

Одним из вариантов реализации ПГС является внерезонаторная параметрическая генерация с накачкой излучением лазеров с модулирующей добротности на АИГ: Nd^{3+} и других неодимсодержащих кристаллах. В качестве нелинейных элементов большой интерес представляют кристаллы КТР, которые обладают высокими нелинейными коэффициентами, хорошими прочностными и теплофизическими характеристиками и большой стойкостью к лазерному излучению. Важным преимуществом этих кристаллов является возможность получения параметрической генерации в условиях не критичного 90°-ного синхронизма при накачке излучением с длинами волн 1.06 и 1.3 мкм, характерными для генерации на переходах ионов Nd^{3+} в кристаллах.

Исследованию характеристик внерезонаторных ПГС на кристаллах КТР при накачке излучением лазеров с $\lambda_p = 1.06$ мкм посвящено множество работ [1–8]. Большинство исследований проведено для ПГС с линейными схемами резонаторов. Отмечена высокая эффективность таких ПГС и возможность получения большой выходной энергии. Однако расходимость выходного излучения при

высоких эффективностях преобразования также оказывается достаточно высокой [1–8].

Данные о параметрах ПГС, работающих на кристаллах КТР при накачке излучением лазеров с длиной волны 1.3 мкм, в литературе отсутствуют. Цель настоящей работы – создание низкопороговых высокоэффективных внерезонаторных параметрических преобразователей излучения лазеров на АИГ: Nd^{3+} в излучение с длинами волн в диапазоне 1.5–2 мкм, обладающее низкой расходимостью.

2. Экспериментальные исследования

Для выработки требований к размерам нелинейных элементов из КТР и для определения условий накачки, при которых достигаются низкий порог, высокая эффективность и надежная работа ПГС без деградации элементов резонатора, были проведены экспериментальные исследования генерационных характеристик ПГС с линейной схемой резонатора.

2.1. ПГС с линейным резонатором

2.1.1. Схема эксперимента

Для накачки ПГС использовалось излучение многомодового лазера на АИГ: Nd^{3+} с активным элементом размерами $\varnothing 5 \times 50$ мм, работающего в режиме модуляции добротности с длительностью импульсов генерации 10 нс и частотой следования импульсов 12.5 Гц. Длина волны излучения лазера λ_p составляла 1.064 мкм, энергия импульса накачки варьировалась в широких пределах и достигала 70 мДж. Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

С помощью оптической системы 2 излучение накачки фокусировалось в кристалл КТР, что обеспечивало в нелинейной среде необходимую плотность мощности излучения накачки. Диаметр пучка накачки на входе в нелинейный кристалл составлял 1.8 мм. Параметрическая

*ФГУП «НИИ "Полус" им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3; e-mail: avshest@polus.msk.su

**ООО Научно-производственный центр «ЭЛС», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3

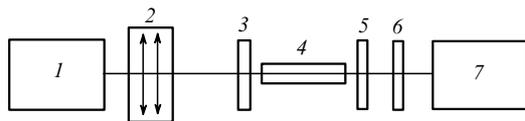


Рис.1. Схема экспериментальной установки для получения внрезонаторной параметрической генерации:

1 – лазер на АИГ: Nd^{3+} с $\lambda_p = 1.064$ мкм; 2 – фокусирующая система; 3 – зеркало с $R_p < 5\%$ и $R_s = 100\%$; 4 – элемент из КТР; 5 – зеркало с $R_s = 60-70\%$; 6 – зеркало с $R_p = 100\%$ и $R_s = 10\%$; 7 – контрольно-измерительная система.

генерация осуществлялась в условиях некритичного 90° -ного синхронизма. Излучение волны накачки, сигнальной и холостой волн распространялось вдоль оси x кристалла КТР, поляризация волны накачки и сигнальной волны была направлена вдоль оси y , а холостой волны – вдоль оси z кристалла. Торцы кристалла КТР были просветлены в области 1.5–1.6 мкм.

Резонатор ПГС был образован двумя плоскими зеркалами 3 и 5, одно из которых (зеркало 3) прозрачно для излучения накачки с $\lambda_p = 1.064$ мкм и является глухим ($R_s = 100\%$) для сигнальной волны параметрической генерации с $\lambda_s = 1.57$ мкм. Прозрачность выходного зеркала 5 для сигнальной волны варьировалась. Поскольку зеркала наносились на стеклянные подложки, поглощающее излучение с длинами волн более 2.5 мкм, холостая волна с $\lambda_i = 3.29$ мкм, возникающая при параметрической генерации, практически полностью поглощалась в материале подложек зеркал. При измерении энергии генерации на $\lambda_s = 1.57$ мкм в случае однопроходовой схемы усиления для подавления излучения накачки с $\lambda_p = 1.064$ мкм, для которого выходное зеркало ПГС прозрачно, использовалось зеркало 6 с $R_p = 100\%$ (на длине волны 1.06 мкм) и $R_s = 10\%$ (на длине волны генерации).

Контрольно-измерительная система состояла из calorиметрического измерителя мощности ИМО-2Н, скоростного фотоприемника ФД24-03 и осциллографа С7-19. Длительности импульсов измерялись по уровню 0.5. Для изучения спектрального состава излучения использовался монохроматор МДР-2 с решеткой 600 штр./мм. Диаметры лазерных пучков определялись по диаметру диафрагмы, сквозь отверстие которой проходило 86.5% полной энергии пучка. Расходимость излучения определялась по диаметру пучка в фокусе метровой линзы.

2.1.2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Эксперименты с использованием кристаллов длиной до 23 мм показали, что при длинах резонатора ПГС свыше 5 см и прозрачности выходного зеркала более 40% порог генерации существенно возрастает. В этом случае получение представляющих практический интерес выходных параметров требует значительного увеличения мощности накачки, что может привести к лазерному повреждению кристаллов КТР и диэлектрических зеркал резонатора.

Эффективная параметрическая генерация была получена при длинах резонатора ПГС $L_{\text{res}} = 23-30$ мм и прозрачности выходного зеркала 30–40%. На рис.2 представлены зависимости выходной энергии импульса E_s с длиной волны $\lambda_s = 1.57$ мкм от энергии импульса накачки E_p для ПГС с кристаллами КТР разной длины l_{cr} , разной прозрачностью выходного зеркала R_s и небольшой вариацией длины резонатора.

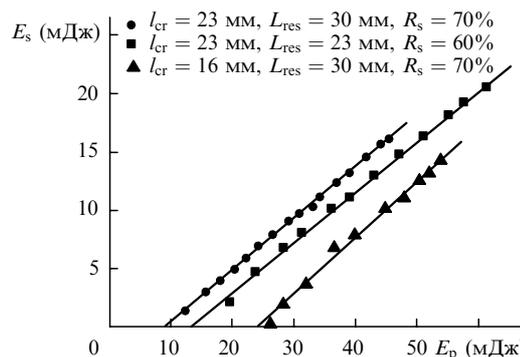


Рис.2. Зависимости выходной энергии импульса E_s с длиной волны $\lambda_s = 1.57$ мкм от энергии импульса накачки E_p при разных l_{cr} , L_{res} и R_s .

Рассмотрение зависимостей, приведенных на рис.2, показывает, что при внрезонаторной параметрической генерации может быть получено эффективное преобразование излучения лазера на АИГ: Nd^{3+} , работающего на длине волны $\lambda_p = 1.064$ мкм, в излучение с $\lambda_s = 1.57$ мкм. При этом эффективность преобразования энергии импульса с $\lambda_p = 1.064$ мкм в излучение с $\lambda_s = 1.57$ мкм достигала 40%. Следует отметить, что при изменении частоты следования импульсов в диапазоне 1–12.5 Гц зависимости не меняются. Лазерного повреждения активного элемента и зеркал резонатора ПГС в этих условиях не наблюдается.

Рассмотрение энергетических характеристик ПГС, представленных на рис.2, позволяет оптимизировать размеры нелинейных элементов из КТР. Как видно из рис.2, на элементах длиной 23 мм (размер по оси x) пороги генерации составляют порядка 10 мДж при соответствующей плотности энергии накачки 0.4 Дж/см² и выходная энергия ПГС достигает 15 мДж при энергии накачки 40–45 мДж. При этом максимальная интенсивность накачки не превышает 180 МВт/см².

Учитывая, что накачка осуществляется излучением многомодового лазера, для которого характерная неоднородность поля излучения, определяемая отношением локальной плотности энергии к средней по сечению пучка, составляет 2.5–3, предельная интенсивность не превышает 540 МВт/см². Это обеспечивает надежную работу нелинейных элементов, поскольку стойкость кристаллов КТР к воздействию лазерного излучения с длиной волны 1.06 мкм составляет порядка 1 ГВт/см² [9].

Уменьшение длины элементов из КТР, как следует из рис.2, потребует увеличения энергии накачки, что может привести к разрушению нелинейных элементов лазерным излучением. Апертура кристаллов КТР 4×4 мм по осям y и z была выбрана из соображений удобства юстировки ПГС.

Для ПГС, параметры которых представлены на рис.2, длительность импульса параметрической генерации составила 8 нс при длительности импульса накачки 10 нс. Длина сигнальной волны излучения по нашим измерениям составляет 1573 ± 1 нм, что хорошо согласуется с расчетом. При длинах резонатора ПГС $L_{\text{res}} = 30$ мм измеренная расходимость была равна 7 мрад. Некоторого снижения расходимости можно добиться путем увеличения длины резонатора ПГС, однако при увеличении длины резонатора необходимо существенно повышать энергию накачки. Таким образом, при достаточно высоких энергетических характеристиках ПГС с линейным резонатором обладает значительной расходимостью излуче-

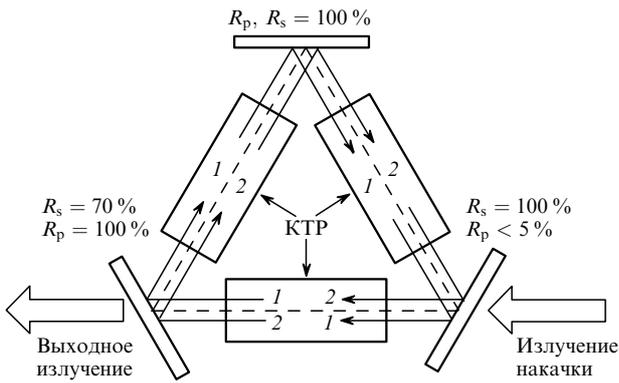


Рис.3. Оптическая схема трехзеркального кольцевого параметрического преобразователя; штриховая линия – оптическая ось пучка генерации.

ния при накачке многомодовыми лазерами, что ограничивает его практическое применение.

2.2. ПГС с кольцевым трехзеркальным резонатором

2.2.1. Резонатор ПГС

Для решения проблемы высокой расходимости параметрического излучения нами была выбрана трехзеркальная схема кольцевого резонатора, показанная на рис.3. Как видно из рис.3, в таком резонаторе после каждого обхода внешние лучи пучка генерации переходят во внутренние и наоборот. Это заметно компенсирует неоднородность поперечной структуры поля генерации и существенно ослабляет влияние оптических неоднородностей и качества пучка накачки на поперечную структуру поля генерации, что в итоге приводит к меньшей расходимости параметрического излучения. Режим генерации бегущей волны позволяет достигать более высоких интенсивностей в резонаторе без повреждения кристаллов и диэлектрических покрытий зеркал.

Кристаллы КТР, выбранные нами для работы, имели размеры $4 \times 4 \times 20$ мм по осям y, z, x соответственно, излучение накачки и генерации в них распространялось вдоль оси x , поляризация излучения накачки и сигнальной волны была перпендикулярна оси z , а поляризация холостой волны – параллельна оси z . Торцы кристаллов были просветлены в области 1.5–1.6 мкм. Выходное зеркало имело коэффициент отражения на длине сигнальной волны $R_s = 70\%$.

2.2.2. Генерация в области 1.57 мкм

Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис.4. Лазер накачки и контрольно-измерительная система были полностью аналогичны используемым при исследовании ПГС с линейными резонаторами. Излучение накачки фокусировалось на вход ПГС в пятно диаметром 1.6 мм.

На рис.5,а представлена зависимость выходной энергии импульса E_s от энергии импульса накачки E_p . Пороговая энергия накачки составляет 2.5 мДж, что соответствует плотности энергии 0.12 Дж/см^2 , эффективность преобразования достигает 40%. Расходимость излучения ПГС во всем диапазоне энергий накачки не превышает 3.5 мрад. Длительность импульса излучения ПГС составляет 8 нс. Таким образом, использование кольцевой трехзеркальной схемы ПГС позволило существенно снизить порог генерации и расходимость излучения.

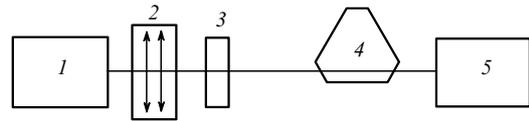


Рис.4. Схема экспериментальной установки по получению параметрической генерации:

1 – лазер на АИГ : Nd³⁺ с $\lambda_p = 1.064$ (1.3) мкм; 2 – фокусирующая система; 3 – ослабитель; 4 – кольцевой преобразователь; 5 – контрольно-измерительная система.

2.2.3. Генерация в области 2 мкм

Для получения параметрической генерации в области 2 мкм при накачке излучением с $\lambda_p = 1.3$ мкм мы использовали трехзеркальную кольцевую схему резонатора. При этом длина резонатора, коэффициент отражения выходного зеркала и геометрические размеры кристаллов КТР были такими же, как при получении параметрической генерации в области 1.57 мкм. Торцы кристаллов КТР были просветлены для излучения с длиной волны в области 2.1–2.2 мкм. Холостая волна с $\lambda_i = 3.45$ мкм, возникающая при параметрической генерации, практически полностью поглощалась в материале зеркал.

Эксперименты проводились по схеме, представленной на рис.4. Источником накачки служил лазер на кристалле АИГ : Nd³⁺ с размерами активного элемента $\varnothing 5 \times 50$ мм, работающий в режиме модуляции добротности и излучающий в области 1.3 мкм. Без дисперсионного элемента, помещенного в резонатор лазера накачки, излучение происходило на длинах волн $\lambda_{p1} = 1.319$ и $\lambda_{p2} = 1.338$ мкм, т. к. для АИГ : Nd³⁺ сечения генерационных переходов для этих длин волн довольно близки и составляют $0.95 \times 10^{-19} \text{ см}^{-1}$ и 10^{-19} см^{-1} соответственно [10]. Фильтр Лيو, помещенный в резонатор, позволил осуществлять генерацию на любой из этих волн независимо. Длительность импульса генерации составляла 26 нс, частота следования импульсов – 12.5 Гц. Излучение накачки фокусировалось на входное зеркало ПГС в пятно диаметром 1.35 мм. Максимальная энергия импульса накачки была равна 50 мДж.

При накачке ПГС излучением с длиной волны $\lambda_{p1} = 1.319$ мкм длина волны параметрической генерации составляла 2.14 мкм, а при накачке излучением с $\lambda_{p2} = 1.338$ мкм – 2.19 мкм, что хорошо согласуется с расчетными длинами волн параметрической генерации. Следует отметить, что при накачке ПГС излучением лазера на АИГ : Nd³⁺, не содержащего в резонаторе фильтра Лيو, наблюдалась одновременная генерация на длинах волн 2.14 и 2.19 мкм.

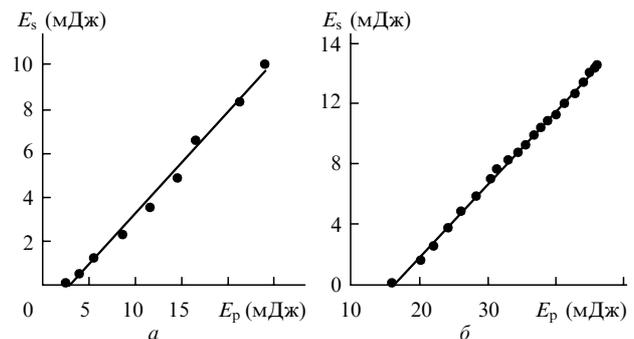


Рис.5. Зависимости выходной энергии импульса E_s параметрического излучения с длиной волны 1.57 (а) и 2.14 мкм (б) нм от энергии импульса накачки E_p .

Зависимость выходной энергии E_s импульса излучения на $\lambda_s = 2.14$ мкм от энергии E_p импульса накачки на $\lambda_p = 1.318$ мкм представлена на рис.5,б. Порог генерации составил 16 мДж, что соответствует плотности энергии 1.1 Дж/см². Расходимость параметрического излучения во всем диапазоне не превышала 4.5 мрад. Характерная длительность импульса параметрической генерации была равна 25 нс. Результаты измерений на $\lambda_s = 2.19$ мкм при накачке излучением с $\lambda_p = 1.338$ мкм полностью аналогичны.

Следует отметить, что стекло К8, из которого была изготовлена подложка выходного зеркала, обладает заметным поглощением сигнальной волны генерации (порядка 10 %). Измеренные энергии сигнальной волны ПГС, представленные на рис.5,б, приведены без учета потерь на выходном зеркале.

2.3. Обсуждение результатов

Экспериментальные данные по параметрической генерации на длине волны $\lambda_s = 1.57$ и 2.14 (2.19) мкм показывают, что предложенная нами трехзеркальная схема ПГС позволяет достичь низкой расходимости излучения и получить стабильную параметрическую генерацию с высоким КПД преобразования при малых пороговых плотностях энергии накачки.

Следует обратить внимание на большую разницу пороговых плотностей энергии при генерации на длинах волн 1.57 и 2.14 (2.19) мкм. На пороговую плотность энергии могут оказывать влияние несколько факторов: длительность импульса накачки, дисперсия нелинейных коэффициентов и коэффициент поглощения холостой волны в нелинейном кристалле, который в нашем случае значителен. Теоретическая оценка пороговой плотности энергии по формуле, предложенной в работе [11], дает 0.09 Дж/см² для параметрической генерации на длине волны 1.57 мкм и 0.22 Дж/см² – для генерации на длине волны 2.14 мкм. Однако эта формула не позволяет учесть влияние поглощения холостой волны на порог генерации.

В последнее время в литературе [12] рассматривается параметрическая генерация при наличии сильного поглощения холостой волны. В наших случаях коэффициент поглощения холостой волны довольно велик – 0.5 см⁻¹ для $\lambda_i = 3.29$ мкм и 1.2 см⁻¹ для $\lambda_i = 3.45$ мкм [13]. Оценка по формуле, предложенной в [12], показывает, что при учете поглощения холостой волны пороги должны возрасти на 18 % в случае генерации на $\lambda_s = 1.57$ мкм и на 44 % в случае генерации на $\lambda_s = 2.14$ мкм, составив в итоге 0.11 и 0.32 Дж/см² соответственно.

В результате расчетный порог для параметрической генерации на длине волны 2.14 мкм оказался в три раза меньше экспериментального, в то время как для генерации на длине волны 1.57 мкм расчетные оценки порога очень близки к экспериментальным. Подробное рассмотрение результатов работы [12] показывает, что в расчетах использовалось решение укороченных уравнений для трехволнового взаимодействия в приближении слабого

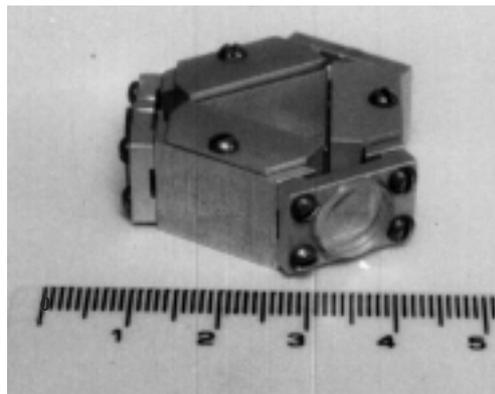


Рис.6. Параметрический преобразователь.

изменения сигнальной волны, т.е. $d\epsilon_s/dx = 0$, где ϵ_s – напряженность поля сигнальной волны; x – направление распространения излучения. Пороговые условия генерации получались путем экстраполяции параметрического усиления. Такой подход представляется нам не вполне корректным. По нашему мнению, этот вопрос требует дополнительного анализа.

3. Заключение

На основе результатов данной работы нами была создана конструкция внерезонаторного ПГС, внешний вид и габариты которой представлены на рис.6. Такая конструкция была использована для преобразования излучения лазеров на АИГ: Nd³⁺ в излучение безопасного диапазона спектра с параметрами, указанными выше.

Разработанный преобразователь представляет практический интерес и может быть адаптирован к работе с приборами на основе твердотельных лазеров на АИГ: Nd³⁺ для работы в диапазоне спектра 1.5–2 мкм, в том числе для накачки параметрических генераторов света, излучающих в более длинноволновой области.

1. Marshall L.R., Hay A.D., Kaminskii J.J., Burnham R. In: *Tech. Dig. Adv. Solid State Lasers* (1990).
2. Kaminskii J.J., Burnham R. *Tech. Dig. Paper CLEO'90* (1990).
3. Marshall L.R., Hay A.D., Burnham R. *Tech. Dig. Papers Adv. CLEO'90 postdeadline paper CDPD 35-1* (1990).
4. Marshall L.R., Kaz A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **10**, 1730 (1993).
5. Rines G.A., Rines D.M., Moulton P.F. *Tech. Dig. Paper CLEO'93 postdeadline paper CPD 16-1/33* (1993).
6. Stultz R.D., Ehrhitz M.E. *Adv. Solid State Lasers XI Top Meet* (1996, WF17-1/156).
7. Gakhovich D.E., Grabchikov A.S., Orlovich V.A., Pesotskij V.I., Sevruck B.B., Kamach Yu. E., Shapiro L.L., Dvornikov S.S., Tugbaev V.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2772**, 54 (1995).
8. Smith A.V., Alford W.J., Raymond T.D., Bowers M.S. *J. Opt. Soc. Am. B*, **12**, 2253 (1995).
9. Burnham R., Dlabal M.L., Koehner W., Stolzenberger R., Pinto A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1104**, 33 (1989).
10. Каминский А.А. *Лазерные кристаллы* (М.: Наука, 1975).
11. Brosnan S.J., Byer R.L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **15**, 415 (1979).
12. Lowenthal D.D. *IEEE J. Quantum Electron.*, **34**, 1356 (1998).
13. Jacco J.C., Loiacono G.M. *Appl. Phys. Lett.*, **58**, 560 (1991).