

## ВКР-лазер с внутриврезонаторным преобразованием лазерного излучения на длине волны 1.34 мкм в кристалле $BaWO_4$

А.В.Гаврилов, М.Н.Ершков, А.В.Федин

*Исследованы режимы генерации излучения на длине волны 1.53 мкм при однокаскадном внутриврезонаторном ВКР-преобразовании в кристалле  $BaWO_4$  излучения YAG:Nd-лазера на длине волны 1.34 мкм. При пассивной модуляции добротности YAG:Nd-лазера получена генерация ВКР-излучения со средней мощностью 0.28 Вт, энергией импульса в цуге до 5 мДж и длительностью импульса 19 нс при частоте следования импульсов накачки 15 Гц. При электрооптической модуляции добротности YAG:Nd-лазера получена генерация ВКР-излучения со средней мощностью 0.85 Вт, энергией импульса до 28 мДж и длительностью отдельного импульса 20 нс при частоте следования импульсов накачки 30 Гц.*

**Ключевые слова:** вынужденное комбинационное рассеяние, кристалл  $BaWO_4$ , YAG:Nd-лазер, модуляция добротности.

Создание компактных и надежных лазерных генераторов с длиной волны излучения  $\lambda = 1.5$  мкм и более является актуальной задачей лазерной физики [1–9], поскольку такое излучение практически неопасно для зрения и имеет малые потери при распространении в атмосфере и оптоволокне. Одним из перспективных способов получения генерации в данной области спектра является преобразование излучения широко распространенных и коммерчески доступных Nd-лазеров методом вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в кристаллических средах [10–15]. Применение кристалла  $Ba(NO_3)_2$  при оптической накачке излучением с  $\lambda = 1.064$  мкм позволяет получить ВКР-излучение третьей стоксовой компоненты с  $\lambda = 1.598$  мкм и средней мощностью 0.22 Вт при частоте следования импульсов 20 Гц [11]. Невысокие теплофизические параметры кристалла  $Ba(NO_3)_2$  ограничивают его применение в лазерных системах, работающих при высокой средней мощности излучения. Используя ВКР-среды с лучшими термооптическими свойствами, а также уменьшая количество каскадов преобразования, можно добиться существенного увеличения средней мощности ВКР-излучения. В [12] исследовано двухкаскадное ВКР-преобразование в кристалле искусственного алмаза при накачке излучением YAG:Nd-лазера на  $\lambda = 1.064$  мкм. При этом получено излучение второй стоксовой компоненты на  $\lambda = 1.485$  мкм со средней мощностью 1.63 Вт при частоте следования импульсов 5 кГц. Энергия отдельного импульса составила  $\sim 0.33$  мДж при его длительности  $\sim 10$  нс. Основным недостатком многокаскадных схем преобразования являются потери на каждом этапе преобразования, поэтому для увеличения энергии и мощности ВКР-излучения более перспективной представляется

однокаскадная схема преобразования [13–15]. В этом случае в качестве излучения накачки используется излучение неосновного перехода  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  ионов  $Nd^{3+}$  на  $\lambda \approx 1.3$  мкм.

В работе [13] при внешнерезонаторном ВКР-преобразовании излучения YAG:Nd-лазера получена генерация на  $\lambda = 1.53$  мкм с энергией цуга из трех импульсов до 40 мДж при длительности отдельного импульса  $\sim 40$  нс. Применение внутриврезонаторной схемы преобразования позволяет максимально эффективно использовать излучение лазерной накачки и получать ВКР-генерацию с наибольшей энергетической эффективностью. В работе [14] реализовано внутриврезонаторное ВКР-самопреобразование излучения лазера на кристалле  $KGW:Nd^{3+}$  с  $\lambda = 1.531$  мкм. Энергия отдельного импульса излучения на  $\lambda = 1.538$  мкм составила 8–14 мДж при его длительности 15–25 нс. Внутриврезонаторное ВКР-преобразование излучения Nd:YVO<sub>4</sub>-лазера с помощью кристалла  $BaWO_4$  было исследовано в [15]. При высокочастотной диодной накачке (20 кГц) и акустооптической модуляции добротности резонатора на основной длине волны 1.342 мкм получена ВКР-генерация на  $\lambda = 1.536$  мкм со средней мощностью 0.6 Вт. При частоте следования импульсов накачки 15 кГц энергия ВКР-импульса составила 35 мкДж при его длительности 10 нс.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований генерации излучения на  $\lambda = 1.53$  мкм при внутриврезонаторном однокаскадном ВКР-преобразовании в кристалле  $BaWO_4$  излучения YAG:Nd-лазеров на  $\lambda = 1.34$  мкм при пассивной и электрооптической модуляции добротности резонатора.

Вначале были исследованы параметры ВКР-излучения при пассивной модуляции добротности резонатора лазера на  $\lambda = 1.34$  мкм. Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Лазер содержит два активных YAG:Nd-элемента ( $I$  и  $2$ ) диаметром 6.3 мм и длиной 130 мм каждый. Оптическая накачка осуществлялась лампами ДНП-6/90А, установленными вместе с активными элементами в квантовых с диффузионными отражателями и подключенными к

А.В.Гаврилов, М.Н.Ершков, А.В.Федин. Ковровская государственная технологическая академия им. В.А.Дегтярева, Россия, Владимирская обл., 60191 Ковров ул. Маяковского, 19; e-mail: ershkovm@yandex.ru

Поступила в редакцию 13 мая 2013 г., после доработки – 26 июля 2013 г.

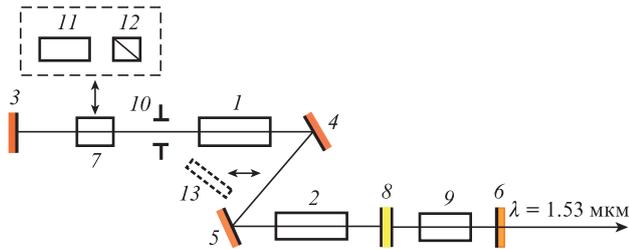


Рис.1. Оптическая схема лазера с внутриврезонаторным ВКР-преобразованием:

1, 2 – активные YAG:Nd-элементы; 3, 4, 5 – глухие зеркала; 6, 8 – зеркала ВКР-резонатора; 7 – ПЛЗ; 9 – кристалл  $\text{BaWO}_4$ ; 10 – диафрагма; 11 – электрооптический затвор; 12 – призма Глана; 13 – внутриврезонаторное зеркало.

электрическому блоку питания ГНД-13. Первоначально емкости накопительных конденсаторов, накачивающих каждый квантрон, выбирались равными 75 мкФ. Длительность импульса накачки составляла 250 мкс. Частота следования импульсов накачки изменялась в диапазоне 1–30 Гц. Для исключения развития генерации на  $\lambda = 1.064$  мкм применялась Z-образная схема резонатора с плоскими селектирующими зеркалами 4 и 5 (коэффициенты отражения  $R_{1,34} > 98\%$  на  $\lambda = 1.34$  мкм и  $R_{1,064} < 2\%$  на  $\lambda = 1.064$  мкм). Концевые плоские зеркала 3 и 6 имели большие коэффициенты отражения ( $\sim 99\%$ ) на  $\lambda = 1.34$  мкм. Пассивная модуляция добротности осуществлялась с помощью пассивного лазерного затвора (ПЛЗ) 7 на кристалле YAG:V диаметром 6.3 мм и длиной 4 мм. Торцы активных элементов и ПЛЗ были просветлены на длину волны 1.064 мкм. ВКР-резонатор, внутри которого размещался кристалл  $\text{BaWO}_4$  9 длиной 8 см, был образован плоскими зеркалами 6 ( $R_{1,34} > 98\%$ ,  $R_{1,53} = 55\%$ ) и 8 ( $R_{1,34} = 30\%$ ,  $R_{1,53} > 99\%$ ). Коэффициент отражения зеркал ВКР-резонатора на длине волны второй стоксовой компоненты 1.78 мкм не превышал 5%, что практически полностью исключало ее генерацию. Между активным элементом и оптическим модулятором устанавливалась апертурная диафрагма 10 диаметром 5 мм. Энергетические характеристики ВКР-излучения регистрировались измерителем мощности и энергии Orphig. Временные параметры измерялись лавинным фотодиодом ЛФД-2А, подключенным к осциллографу Agilent с полосой частот 350 МГц.

В данной конфигурации резонатора максимальная энергия электрической накачки была ограничена оптической стойкостью просветляющих покрытий ПЛЗ и составила 75 Дж, при этом оптического пробоя кристалла  $\text{BaWO}_4$  не наблюдалось. При начальном пропускании ПЛЗ  $T_0 = 47\%$ , 59% и 74% была исследована зависимость средней мощности ВКР-излучения от частоты следования импульсов накачки (рис.2). Было установлено, что при изменении частоты от 2 до 5 Гц и использовании ПЛЗ с  $T_0 = 59\%$  наблюдался существенный линейный рост средней мощности ВКР-излучения до 0.2 Вт, что соответствует максимальному значению зарегистрированной на  $\lambda = 1.53$  мкм энергии 40 мДж цуга из четырех импульсов. При дальнейшем увеличении частоты следования импульсов накачки происходит насыщение средней мощности ВКР-излучения, что объясняется значительными остаточными потерями излучения в кристалле YAG:V, приводящими к существенному нагреву используемых ПЛЗ и визуально наблюдаемому резкому ухудшению структуры лазерного пучка. Максимальное значение средней мощности ВКР-

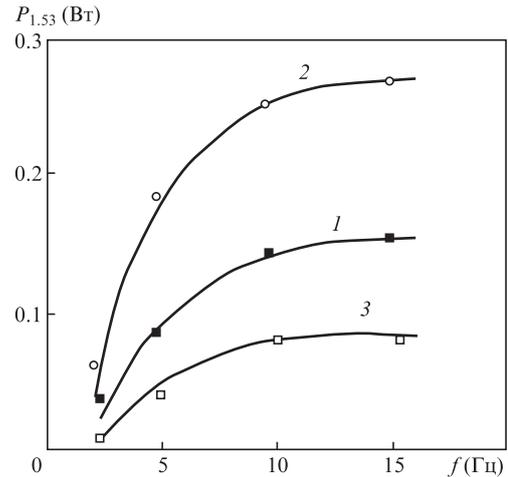


Рис.2. Зависимости мощности ВКР-излучения  $P_{1,53}$  на  $\lambda = 1.53$  мкм от частоты следования импульсов накачки  $f$  при начальном пропускании ПЛЗ  $T_0 = 47\%$  (1), 59% (2) и 74% (3).

излучения 0.28 Вт было зарегистрировано при использовании ПЛЗ с  $T_0 = 59\%$  и частоте следования импульсов накачки 15 Гц. Соответствующие зависимости временных параметров излучения от энергии импульсов накачки представлены на рис.3. При максимальной энергии импульсов накачки 75 Дж и частоте их следования 15 Гц на  $\lambda = 1.53$  мкм излучался цуг из четырех импульсов с общей энергией до 19 мДж, периодом повторения 20 мкс и длительностью отдельного импульса  $\sim 19$  нс.

Исследование ВКР-преобразования при электрооптической модуляции добротности резонатора лазера на  $\lambda = 1.34$  мкм проводилось по схеме, также представленной на рис.1. В качестве модулятора использовались кристалл  $\text{LiNbO}_3$  11 и призма Глана 12. При этом в схему был внесен ряд изменений. Для уменьшения воздействия интенсивного внутриврезонаторного излучения на кристалл  $\text{LiNbO}_3$  в резонатор вводилось зеркало 13 ( $R_{1,34} = 70\%$ ,  $R_{1,064} < 2\%$ ). С этой же целью емкость конденсаторов разрядного контура квантрона 1 была уменьшена с 75 мкФ до 50 мкФ. Максимальная энергия электрической накачки при этом составила 63 Дж и была ограничена оптической стойкостью кристалла  $\text{LiNbO}_3$ . При частоте  $f = 5$  Гц средняя мощность ВКР-излучения была равна  $\sim 0.1$  Вт при

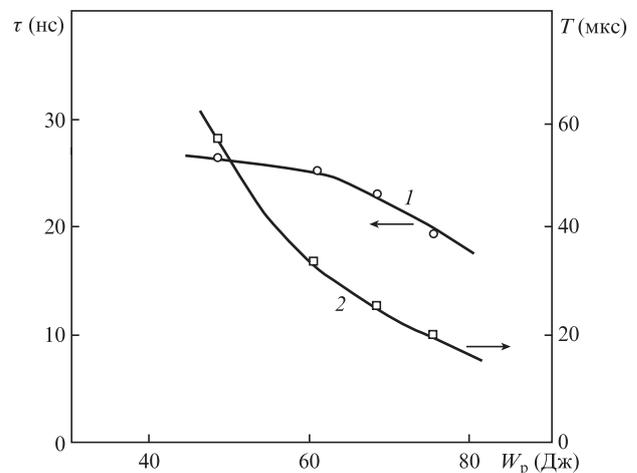


Рис.3. Зависимости длительности  $\tau$  (1) и периода повторения  $T$  (2) ВКР-импульсов от энергии импульсов накачки  $W_p$  при частоте их следования  $f = 15$  Гц и начальном пропускании ПЛЗ  $T_0 = 59\%$ .

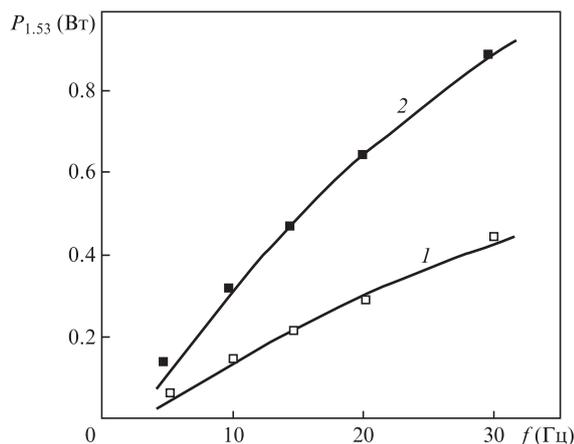


Рис.4. Зависимости мощности ВКР-излучения  $P_{1.53}$  от частоты следования импульсов накачки  $f$  для схем с LiNbO<sub>3</sub> (1) и LiTaO<sub>3</sub> (2).

энергии импульса 19.6 мДж. Частоту следования импульсов накачки в данной схеме удалось увеличить до 30 Гц, что соответствовало мощности электрической накачки 1.9 кВт. При этом средняя мощность ВКР-излучения достигла 0.44 Вт (рис.4, кривая 1). Возрастающие при увеличении мощности накачки термические нагрузки на кристалл LiNbO<sub>3</sub> привели к уменьшению энергии ВКР-импульса на 25%: от 19.6 до 14.7 мДж (рис.5, кривая 1). Пиковая мощность ВКР-импульса при этом уменьшилась с 0.98 до 0.74 МВт при неизменной длительности импульса 20 нс.

С целью повышения средней мощности ВКР-излучения вместо LiNbO<sub>3</sub> использовался оптически более стойкий кристалл LiTaO<sub>3</sub>, остальные элементы в схеме оставались прежними. Энергию электрической накачки при этом удалось увеличить до 75 Дж. При частоте следования импульсов накачки 30 Гц средняя мощность ВКР-излучения была равна 0.85 Вт (рис.4, кривая 2). В данной схеме было зарегистрировано появление второй стоксовой компоненты ВКР-излучения на  $\lambda = 1.78$  мкм. Максимальное значение средней мощности этой компоненты не превышало 9% от мощности первой стоксовой компоненты и составляло 75 мВт. С увеличением мощности электрической накачки до 2.3 кВт энергия импульса ВКР-излучения на  $\lambda = 1.53$  мкм изменялась менее существенно (менее чем на 18%): от 34 до 28 мДж (рис.5, кривая 2). При длительности импульса  $\sim 20$  нс пиковая мощность ВКР-импульса изменялась от 1.7 до 1.4 МВт. Данные параметры почти в два раза превышают полученные при использовании схемы с LiNbO<sub>3</sub>. Поскольку в рассматриваемом случае рост средней мощности происходит практически линейно и насыщения не наблюдается, то дальнейшее увеличение мощности ВКР-излучения можно осуществить за счет повышения частоты следования импульсов накачки.

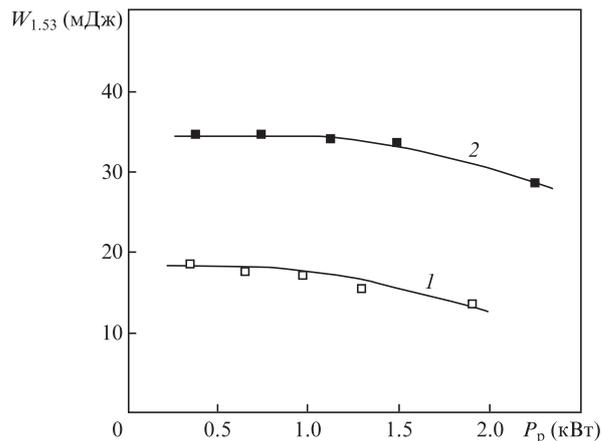


Рис.5. Зависимости энергии ВКР-импульса  $W_{1.53}$  от мощности электрической накачки  $P_p$  для схем с LiNbO<sub>3</sub> (1) и LiTaO<sub>3</sub> (2).

Таким образом, в результате проведенных исследований реализована лазерная генерация безопасного для зрения излучения на  $\lambda = 1.53$  мкм при однокаскадном ВКР в кристалле BaWO<sub>4</sub>. С использованием внутррезонаторной схемы преобразования при пассивной и электрооптической модуляции добротности резонатора YAG:Nd-лазера на  $\lambda = 1.34$  мкм достигнута средняя мощность ВКР-излучения 0.28 и 0.85 Вт соответственно, что перспективно для практических применений.

1. Коновалов В.А., Павлович В.Л., Раевский Е.В. *Квантовая электроника*, **32**, 192 (2002).
2. Быков В.Н., Садовой А.Г. *Квантовая электроника*, **32**, 202 (2002).
3. Абазадзе А.Ю., Быков В.Н., Зверев Г.М., Плешков А.А., Симмаков В.А. *Квантовая электроника*, **32**, 210 (2002).
4. Наумов В.Л., Онищенко А.М., Подставкин А.С., Шестаков А.В. *Квантовая электроника*, **32**, 225 (2002).
5. Устименко Н.С., Гулин А.В. *Квантовая электроника*, **32**, 229 (2002).
6. Абазадзе А.Ю., Зверев Г.М., Колбацков Ю.М., Устименко Н.С. *Квантовая электроника*, **34**, 20 (2004).
7. Рудницкий Ю.П., Шачкин Л.В., Дурманов С.Т., Смирнов Г.В. *Квантовая электроника*, **35**, 1113 (2005).
8. Галаган Б.И., Денкер Б.И., Сверчков С.Е., Кулешов Н.В., Кисель В.Э., Левченко В.И. *Квантовая электроника*, **37**, 351 (2007).
9. Дашкевич В.И., Орлович В.А., Шкадаревич А.П. *ЖПС*, **76**, 725 (2009).
10. Basiev T.T., Powell R.C., in *Handbook of Laser Technology and Applications* (Bristol – Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2004).
11. Takei N., Suzuki S., Kannari F. *Appl. Phys. B*, **74** (6), 521 (2002).
12. Sabella A., Piper J.A., Mildren R.P. *Opt. Express*, **19** (23), 23554 (2011).
13. Басиев Т.Т., Басиева М.Н., Гаврилов А.В., Ершков М.Н., Ивлева Л.И., Осико В.В., Сметанин С.Н., Федин А.В. *Квантовая электроника*, **40**, 710 (2010).
14. Дашкевич В.И., Орлович В.А., Шкадаревич А.П. *ЖПС*, **77**, 377 (2010).
15. Зверев П.Г., Ивлева Л.И. *Квантовая электроника*, **42**, 27 (2012).