

Лазер на $Nd:YVO_4$ с внутрирезонаторным ВКР в кристалле $BaWO_4$ для безопасного для глаз спектрального диапазона

П.Г.Зверев, Л.И.Ивлева

Создан компактный лазер на основе $Nd:YVO_4$ с возбуждением лазерным диодом, акустооптическим модулятором добротности и внутрирезонаторным ВКР-преобразователем на кристалле $BaWO_4$, работающий в безопасном для глаз спектральном диапазоне. Мощность излучения лазера на длине волны 1536 нм при частоте следования импульсов 20 кГц равна 0.6 Вт, дифференциальный КПД преобразования излучения лазерного диода в стоксово достигает 44%. При частоте следования импульсов 15 кГц получены импульсы излучения с энергией 35 мкДж и длительностью 10 нс.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние, ВКР-лазер, безопасный для глаз спектральный диапазон, лазер на $Nd:YVO_4$, кристалл $BaWO_4$.

1. Введение

Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) является эффективным нелинейно-оптическим процессом третьего порядка, преобразующим длину волны лазерного излучения [1–3]. В последнее время наблюдается большой интерес к созданию твердотельных ВКР-лазеров, что обусловлено получением новых высокоэффективных нелинейных кристаллов [4, 5]. Кристаллические ВКР-среды обладают преимуществом по сравнению с газовыми благодаря большой концентрации рассеивающих центров, хорошим тепловым и механическим свойствам, что позволяет создавать на их основе компактные, надежные и полностью твердотельные лазерные системы, работающие на требуемых длинах волн. В современных лазерах для возбуждения активной среды все чаще используются лазерные диоды (ЛД); диодная накачка повышает эффективность работы лазеров и значительно уменьшает их размеры по сравнению с лазерами с ламповой накачкой. Ранее были исследованы ВКР-лазеры с диодной накачкой, использующие дополнительный резонатор для ВКР [6, 7] и внутрирезонаторную схему [8–11]. Основными отличиями внутрирезонаторного ВКР-преобразования является высокая плотность мощности возбуждающего излучения в лазере и многократные проходы излучения накачки и стоксова излучения внутри резонатора, что приводит к снижению порога ВКР и увеличивает эффективность оптического преобразования.

Кристалл $BaWO_4$ известен как один из наиболее эффективных ВКР-материалов, имеющих высокие стационарный и нестационарный коэффициенты ВКР-усиления. Частота ВКР-моды составляет 925 см^{-1} , а ее ширина при комнатной температуре – 1.6 см^{-1} . Стационарный коэффициент ВКР-усиления на длине волны 1064 нм равен

$8.5\text{ см}^2/\text{ГВт}$ [12]. Это значение несколько ниже, чем в кристалле $Ba(NO_3)_2$, но выше, чем в остальных кристаллах вольфраматов и молибдатов [13]. Кристалл $BaWO_4$ негигроскопичен, у него высокий порог пробоя и хорошие теплофизические характеристики. Теплопроводность $BaWO_4$ составляет $2.7\text{ Вт}\cdot\text{м}\cdot\text{К}^{-1}$, что выше, чем в кристалле $Ba(NO_3)_2$, но несколько ниже, чем в $KGd(WO_4)_2$ [14].

Источники лазерного излучения в безопасном для глаз спектральном диапазоне требуются для различных медицинских и лидарных применений. Проблема создания таких лазеров заключается в том, что коэффициент ВКР-усиления уменьшается с увеличением длины волны, а следовательно, необходима большая плотность мощности излучения накачки, которая может приводить к оптическому пробое кристалла. Оценка коэффициента ВКР-усиления на длине волны 1300 нм по данным работы [15] дает $5.8\text{ см}^2/\text{ГВт}$. Недавно сообщалось о ВКР-преобразовании в кристалле $BaWO_4$ излучения $Nd:YAG$ -лазера (1 Гц, 8 нс, 1319 нм) в безопасный для глаз спектральный диапазон [16]. Энергия импульсов на длине волны 1502 нм составила 8.5 мДж, а эффективность преобразования – 47%. В работе [17] с помощью ВКР-преобразователя на кристалле $BaWO_4$ с внешним резонатором получено 0.6 Вт с эффективностью преобразования 14.5%. Для накачки использовался $Nd:YAG$ -лазер (1319 нм) с ламповой накачкой и акустооптическим затвором (частота следования импульсов 1.7 кГц). В работе [18] внутрирезонаторная ВКР-генерация исследовалась в $Nd:YAG$ -лазере с ламповой накачкой при частоте следования импульсов 3 Гц. Получено излучение на длине волны 1.5 мкм с эффективностью преобразования до 60% и энергией в импульсе до 40 мДж.

В настоящей работе сообщается (по нашим сведениям впервые) о создании компактного лазера на основе $Nd:YVO_4$ с диодной накачкой, акустооптическим затвором и внутрирезонаторным ВКР-преобразователем на кристалле $BaWO_4$, работающем на длине волны 1536 нм с низким порогом и высоким КПД преобразования. Максимальная мощность лазерного излучения составила 0.6 Вт, а дифференциальная эффективность преобразования излучения ЛД в стоксово достигала 44%.

П.Г.Зверев, Л.И.Ивлева. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: zverev@lst.gpi.ru

Поступила в редакцию 5 сентября 2011 г.

2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Лазер был создан на основе активного элемента Nd:YVO₄ с размером 3 × 3 × 17 мм, который имел композитную структуру: центральную часть из Nd:YVO₄ (0.3 ат.%, *a*-срез), а торцы (толщина 3 мм) из чистого YVO₄, что способствовало уменьшению тепловой линзы. В качестве ВКР-элемента использовались кристаллы BaWO₄ длиной 30 и 45 мм. Активный элемент и нелинейный кристалл, обернутые в индиевую фольгу, устанавливались в медные блоки с водяным охлаждением, температура которых стабилизировалась около 20 °С. Длина волны первой Stokesовой компоненты при возбуждении на 1342 нм составляет 1536 нм. Торцы активного элемента и ВКР-кристаллов были просветлены на длине волны генерации и Stokesового излучения (коэффициент отражения $R_{1342, 1536} < 0.5\%$). Вогнутое входное дихроичное зеркало с радиусом кривизны 1000 мм, прозрачное для длины волны излучения ЛД (пропускание $T_{808} > 94\%$), отражало генерируемое излучение ($R_{1342, 1536} > 99\%$). Два плоских зеркала с $R_{1342} > 98\%$ и $R_{1536} = 86\%$ и 70% использовались в качестве выходных зеркал.

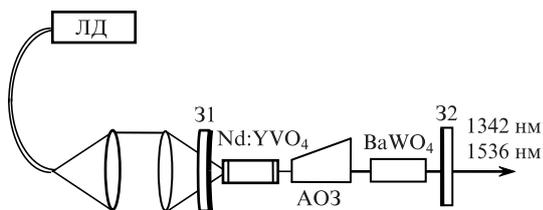


Рис.1. Оптическая схема лазера на Nd:YVO₄ с накачкой лазерным диодом ЛД, акустооптическим затвором АОЗ и внутрирезонаторным ВКР-преобразователем на кристалле BaWO₄; 31 и 32 – входное и выходное зеркало соответственно.

Источником накачки служил лазерный диод (длина волны генерации 808 нм, мощность до 25 Вт) с волоконным выводом излучения (диаметр волокна 600 мкм, числовая апертура 0.22). Двухлинзовая оптическая система фокусировала излучение накачки в лазерный элемент, диаметр области возбуждения был около 600 мкм. Для модуляции добротности использовался акустооптический затвор (QS041-1H/J-AP5) длиной 35 мм с основной частотой 41 МГц и энергией 15 Вт. Использовались частоты модуляции 15, 20 и 25 кГц. Все оптические элементы лазера были просветлены на длине волны 1064 нм и располагались на минимальном расстоянии друг от друга, что позволяло уменьшить длину резонатора до 110 мм.

Для спектральной селекции ВКР-излучения использовалось дихроичное зеркало, отражающее излучение накачки ($R_{1342} > 99.8\%$) и частично пропускающее Stokesовое излучение ($T_{1536} = 30\%$). Энергетические измерения проводились с помощью измерителя Molectron EPM2000. Временная форма импульсов регистрировалась германиевым *p-i-n*-фотодиодом и осциллографом Tektronix TDS-5052 с временным разрешением лучше 0.5 нс.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

ВКР-преобразователь, запирающий все излучение накачки внутри резонатора, позволяет получить высокую эффективность преобразования излучения в Stokesовое.

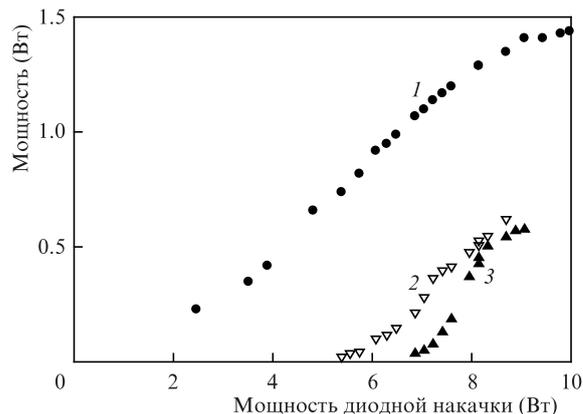


Рис.2. Зависимости мощности излучения лазера с кристаллом BaWO₄ длиной 45 мм и выходным зеркалом с $R_{1342} = 90\%$ (частота следования импульсов 20 кГц) (1) и мощности Stokesового излучения на длине волны 1536 нм, полученной с выходными зеркалами с $R_{1536} = 86\%$ (2) и 70% (3), от мощности диодной накачки.

Чтобы определить максимальную мощность, которую может дать лазер на основной длине волны 1342 нм, в схеме, представленной на рис.1, использовалось выходное зеркало с коэффициентом отражения $R_{1342} = 90\%$, близким к оптимальному. ВКР-преобразование в лазере в этом случае отсутствовало. В режиме модулированной добротности при частоте следования импульсов 20 кГц и непрерывной диодной накачке мощностью 10 Вт лазер излучал 1.5 Вт средней мощности на длине волны 1342 нм (рис.2, кривая 1). Дифференциальная эффективность генерации достигала 20%. Импульсы лазерного излучения имели гладкий временной профиль с длительностью около 80 нс на полувысоте.

При использовании выходных зеркал, отражающих на длине волны 1342 нм, на выходе лазера наблюдалось интенсивное Stokesовое излучение. На рис.2 представлены зависимости мощности Stokesового излучения от мощности диодной накачки для лазера с кристаллом BaWO₄ длиной 45 мм при частоте следования импульсов 20 кГц для двух выходных зеркал. Использование выходного зеркала с большим коэффициентом отражения на длине волны 1536 нм приводит к понижению порога ВКР-генерации с 7 Вт ($R_{1536} = 70\%$) до 5.2 Вт (86%). Максимальная средняя мощность 0.6 Вт при мощности диодной накачки 9 Вт, что соответствует 46% энергетической и 53% квантовой эффективности преобразования по отношению к мощности на 1342 нм, была получена для выходного зеркала с $R_{1536} = 70\%$. Максимальный дифференциальный КПД преобразования излучения ЛД в Stokesовое при этом достигал 44%. Поляризация излучения во всех случаях была горизонтальной (в плоскости рисунка), что соответствовало минимальным потерям в акустооптическом затворе.

Использование кристалла BaWO₄ длиной 30 мм в лазере с частотой следования импульсов 20 кГц и зеркалом с $R_{1536} = 70\%$ привело к росту порога ВКР и снижению эффективности преобразования (рис.3). Это объясняется уменьшением коэффициента ВКР-усиления, который прямо пропорционален длине кристалла. Использование более длинных ВКР-кристаллов может привести к дальнейшему повышению КПД, однако их получение является сложной технологической задачей.

Зависимости энергии Stokesового излучения для частот следования импульсов 15, 20 и 25 кГц и выходных зеркал с $R_{1536} = 86\%$ и 70% представлены на рис.4. Как видно из

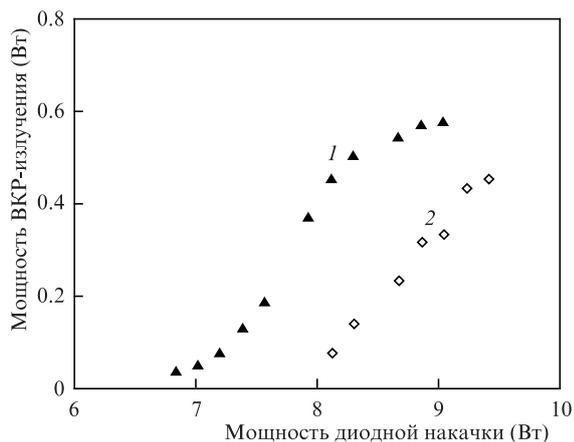


Рис.3. Зависимости мощности стокова излучения лазера с внутрирезонаторным ВКР (выходное зеркало с $R_{1536} = 70\%$, частота следования импульсов 20 кГц) от мощности диодной накачки для кристаллов BaWO₄ длиной 45 (1) и 30 мм (2).

рисунка, при меньшей частоте (15 кГц) энергия в импульсе достигает 35 мкДж при мощности диодной накачки 8 Вт. Более редкое следование импульсов обеспечивает накопление большей инверсии населенности в активной среде, что увеличивает общую энергию излучения в генерируемых импульсах.

Компактный Nd:YVO₄-лазер с акустооптическим затвором, непрерывной диодной накачкой и выходным зеркалом с $R_{1342} = 90\%$ генерировал импульсы излучения на

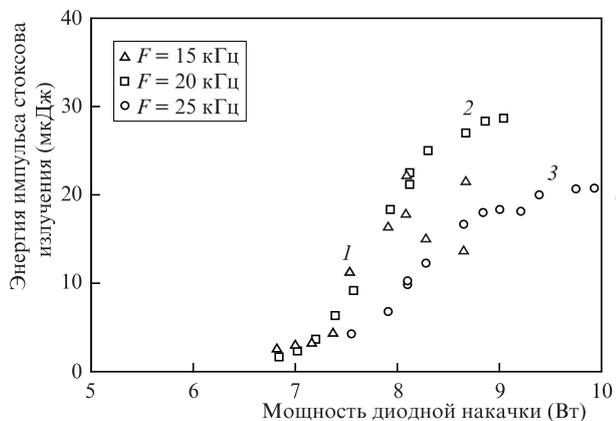
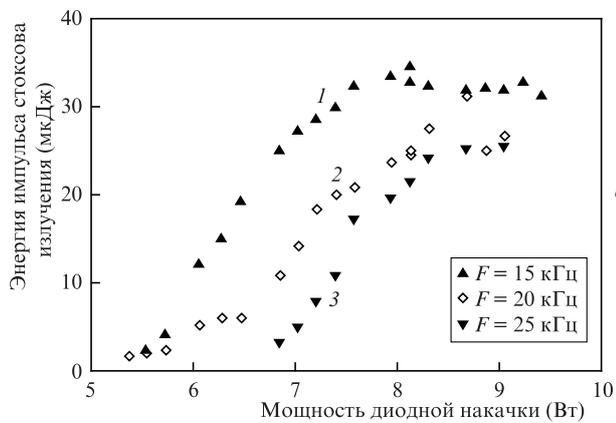


Рис.4. Зависимости энергии импульсов стокова излучения лазера с ВКР-кристаллом BaWO₄ длиной 45 мм от мощности диодной накачки для частот следования импульсов 15 (1), 20 (2) и 25 кГц (3) при использовании выходного зеркала с $R_{1536} = 86\%$ (а) и 70% (б).

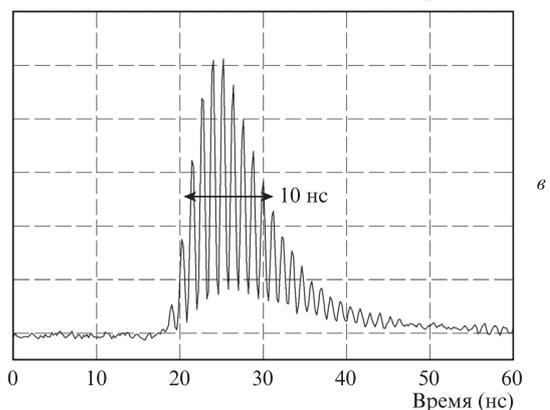
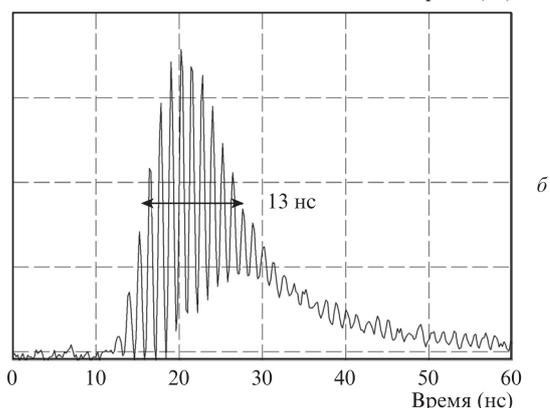
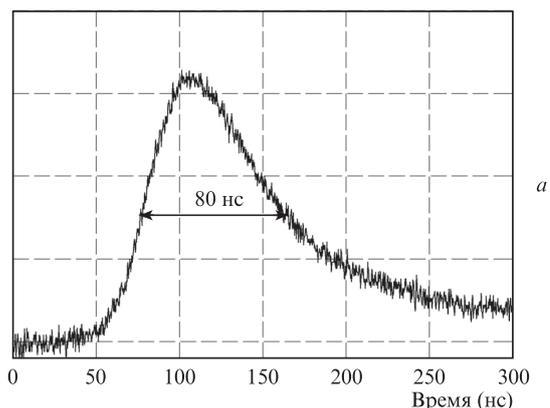


Рис.5. Осциллограммы импульсов генерации лазера с ВКР-кристаллом BaWO₄ длиной 45 мм (частота следования импульсов 20 кГц на длине волны 1342 нм, выходное зеркало с $R_{1342} = 90\%$) (а), а также стокова излучения при использовании выходного зеркала с $R_{1536} = 86\%$ (б) и 70% (в).

длине волны 1342 нм с плавной временной структурой (рис.5,а), что свидетельствует об одномодовом режиме генерации. Спектральная ширина оптического перехода $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ в кристалле Nd:YVO₄ примерно в три раза шире, чем в Nd:YAG [19]. Использование высокочастотного резонатора на длину волны 1342 нм при внутрирезонаторном ВКР приводит к многомодовой генерации. ВКР как быстрый нелинейный процесс может модулировать лазерное излучение, приводя к синхронизации мод в лазере, результатом чего является генерация ультракоротких временных импульсов. Осциллограммы импульсов лазера (рис.5,б и в) демонстрируют генерацию цугов пикосекундных импульсов в стоковом излучении. Длительность цугов составила 13 и 10 нс при использовании выходных зеркал с $R_{1536} = 86\%$ и 70%. Расстояние между отдельными импульсами было около 0.6 нс, что определялось дли-

ной резонатора лазера. Временного разрешения системы регистрации оказалось недостаточно, чтобы определить длительность отдельных импульсов, которые были короче 500 пс. Использование более прозрачного на 1536 нм выходного зеркала приводит к укорочению генерируемых цугов и повышению пиковой интенсивности генерации. Режим синхронизации мод не позволил нам определить пиковую интенсивность полученного лазерного излучения. Заметим, что при использовании активных твердотельных сред с более узкими лазерными переходами внутрирезонаторный ВКР-лазер работает в одномодовом режиме и синхронизация мод не наблюдается [20]. Таким образом, использование активных лазерных сред с определенными спектральными параметрами, а также спектрально селективных элементов внутри резонатора позволяет контролировать число генерируемых мод в ВКР-лазере и выбирать генерацию в режиме синхронизации мод или режиме модулированной добротности.

4. Заключение

Создан компактный лазер, работающий на длине волны 1536 нм, на кристалле Nd:YVO₄ с диодной накачкой, акустооптическим затвором и внутрирезонаторным ВКР-преобразователем на кристалле ВаWO₄. Выходная энергия лазера при частоте следования импульсов 20 кГц и использовании кристалла ВаWO₄ длиной 45 мм составила 0.6 Вт с дифференциальным КПД преобразования излучения диодной накачки в стоксово 44%. Импульсы с энергией 35 мкДж и длительностью 10 нс получены при частоте следования импульсов 15 кГц. Лазер работал в режиме синхронизации мод и генерировал цуги из 20–30 пикосекундных импульсов длительностью менее 500 пс.

Работа частично поддержана РФФИ (грант № 09-02-01364). Авторы благодарят X.Y.Zhang и Z.J.Liu из Shandong University (Китай) за помощь в проведении экспериментов.

1. Eckhardt G., Bortfeld D. P., Geller M. *Appl. Phys. Lett.*, **3**, 137 (1963).
2. Kaiser W., Maier M., in *Laser Handbook*. Eds F.T.Arecchi, E.O. Shultz-Dubois (Amsterdam: North-Holland, 1972, v. 11, p. 1077).
3. Грасюк А.З. *Квантовая электроника*, **1**, 485 (1974).
4. Басиев Т.Т., Осико В.В. *Успехи химии*, **75** (10), 939 (2006).
5. Pask H.M. *Progr. Quantum Electron.*, **27**, 3 (2003).
6. Zverev P.G., Basiev T.T., Prokhorov A.M. *Opt. Mater.*, **11**, 335 (1999).
7. Pask H.M., Myers S., Piper J.A., Richards J., McKay T. *Opt. Lett.*, **28**, 435 (2003).
8. Pask H.M., Piper J.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36**, 949 (2000).
9. Chen Y.F. *Opt. Lett.*, **29**, 1915 (2004); **29**, 2632 (2004).
10. Li S.T., Zhang X.Y., Wang Q.P., Zhang X.L., Cong Z.H., Zhang H.J., Wang J.Y. *Opt. Lett.*, **32**, 2951 (2007).
11. Chen X., Zhang X., Wang Q., Li P., Li S., Cong Z., Jia G., Tu C. *Opt. Lett.*, **33**, 705 (2008).
12. Зверев П.Г., Басиев Т.Т., Соболев А.А., Скорняков В.В., Ивлева Л.И., Полозков Н.М., Осико В.В. *Квантовая электроника*, **30**, 55 (2000).
13. Basiev T.T., Sobol A.A., Zverev P.G., Osiko V.V., Powell R.C. *Appl. Opt.*, **38**, 594 (1999).
14. Ran D.G., Xia H.R., Sun S.Q., Ling Z.C., Ge W.W., Zhang H.J. *Mater. Sci. Eng. B*, **130**, 206 (2006).
15. Lisinetskii V.A., Rozhok S.V., Bus'ko D.N., Chulkov R.V., Grabtchikov A.S., Orlovich V.A., Basiev T.T., Zverev P.G. *Laser Phys. Lett.*, **2**, 396 (2005).
16. Wang Z.P., Hu D.W., Fang X., Zhang H.J., Xu X.G., Wang J.Y., Shao Z.S. *Chin. Phys. Lett.*, **25**, 532 (2008).
17. Zong N., Cui Q.J., Ma Q.L., Zhang X.F., Lu Y.F., Li C.M., Cui D.F., Xu Z.Y., Zhang H.J., Wang J.Y. *Appl. Opt.*, **48**, 7 (2009).
18. 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).
19. Krennrich D., Knappe R., Henrich B., Wallenstein R., Huillier J.A. *Appl. Phys. B*, **92**, 165 (2008).
20. Chen Y.F., Su K.W., Zhang H.J., Wang J.Y., Jiang M.H. *Opt. Lett.*, **30**, 3335 (2005).