

ВКР-лазер на алмазе с генерацией на длинах волн 1194, 1419 и 597 нм

В.П.Пашинин, В.Г.Ральченко, А.П.Большаков, Е.Е.Ашкинази, В.И.Конов

На кристалле синтетического алмаза создан ВКР-лазер (накачка наносекундными импульсами Yb:YAG-лазера на длине волны 1030 нм), генерирующий в ИК области спектра на 1-й и 2-й стоксовых компонентах с длинами волн 1194 и 1419 нм соответственно. Получена эффективность преобразования 34% при дифференциальной эффективности 50%, средняя мощность на длине волны 1194 нм составила 1.1 Вт, а на длине волны 1419 нм – 0.52 Вт. При удвоении частоты 1-й стоксовой компоненты в нелинейном кристалле ВВО достигнута генерация в оранжевой области спектра на длине волны 597.3 нм с энергией в импульсе 0.15 мДж, средней мощностью 0.22 Вт и максимальной эффективностью 20%.

Ключевые слова: ВКР-лазер, алмаз, оранжевый лазер, генерация второй гармоники.

1. Введение

Лазеры на вынужденном комбинационном рассеянии (рамановские лазеры) на алмазе благодаря уникальному сочетанию оптических, теплофизических и механических свойств этого материала привлекают в последнее время большое внимание вследствие возможности получения высокой мощности в различных, от УФ до среднего ИК, спектральных диапазонах [1–8]. Алмаз обладает рекордно высокой теплопроводностью среди всех объемных материалов – до 2300 Вт/мК при комнатной температуре [9] и до 3300 Вт/мК (для алмазов, обогащенных по изотопу ^{12}C [10, 11]), прозрачностью в диапазоне от ультрафиолета (225 нм) до радиоволн [12], малым коэффициентом температурного расширения ($0.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при $T = 273 \text{ K}$), химической стойкостью и рекордно высокой твердостью (80 ГПа). Большая величина сдвига спектра комбинационного рассеяния (КР) алмаза ($\nu = 1332 \text{ см}^{-1}$) позволяет варьировать длину волны ВКР-генерации в широких пределах, в том числе за счет использования стоксовых и антистоксовых компонент (СК и АСК) высоких порядков [2, 13, 14]. Большой коэффициент усиления ВКР в алмазе, в частности $g = 42 \text{ см/ГВт}$ при накачке на длине волны $\lambda_p = 532 \text{ нм}$ и $12 - 17 \text{ см/ГВт}$ при $\lambda_p = 1064 \text{ нм}$ [15, 16], позволяет создавать ВКР-лазеры высокой мощности даже при использовании кристаллов небольших, обычно менее

10 мм, размеров. Выходная средняя мощность имеющихся ВКР-лазеров на традиционных кристаллах ограничена уровнем примерно 5 Вт из-за проблем с отводом тепла и, как следствие, возникновением тепловой линзы, потерей качества пучка и даже механическим разрушением материала. Благодаря высокой теплопроводности алмаза в ВКР-лазерах на его основе эти проблемы в значительной степени снимаются, позволяя радикально повысить мощность излучения.

В настоящее время технология синтеза алмаза из газовой фазы (CVD) обеспечивает получение монокристаллов высокой чистоты, пригодных для применения в оптике и лазерной технике [17–21], поэтому практически все достижения в области ВКР-лазеров на алмазе реализованы именно на CVD-алмазах. В работе [22] продемонстрирован алмазный ВКР-лазер мощностью 24.5 Вт, генерирующий (без признаков возникновения тепловой линзы) на длине волны 1193 нм с накачкой импульсным излучением криогенного Yb:YAG-лазера ($\tau_p = 75 \text{ нс}$, $\lambda_p = 1030 \text{ нм}$). Еще большие мощности были получены в квазинепрерывном режиме – при накачке микросекундными импульсами Nd:YAG-лазера достигнуты мощности ВКР-лазера свыше 100 Вт на длине волны 1240 нм (1-я СК) [23] и 114 Вт в непрерывном режиме на длине волны 1490 нм (2-я СК) с эффективностью конверсии 44% [24].

Применительно к лазерам в желто-оранжевой области (570–625 нм), где создание лазерных источников с высокими мощностью и эффективностью представляет собой непростую задачу, сообщалось о генерации ВКР-лазера на алмазе на длине волны 573 нм (1-я СК) мощностью 1.2 Вт и об эффективности преобразования 63.5% при накачке наносекундными импульсами ($\lambda_p = 532 \text{ нм}$) [25], а также о на порядок меньшей мощности генерации на 620 нм (2-я СК) [25].

Приближение длины волны генерации к области 600 нм интересно с точки зрения нескольких применений. Во-первых, для формирования искусственной лазерной опорной звезды (ЛОЗ) с целью построения астрономической адаптивной оптики телескопов [26]. Лазер нужен,

В.П.Пашинин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: pash@nsc.gpi.ru

В.Г.Ральченко, А.П.Большаков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, P.R. China; e-mail: vg_ralchenko@mail.ru, bolshak@ran.gpi.ru

Е.Е.Ашкинази, В.И.Конов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: ashkinazi@nsc.gpi.ru, konov@nsc.gpi.ru

Поступила в редакцию 25 декабря 2017 г.

чтобы создать в небе светящуюся точку – ЛОЗ, заставляя светиться атомы натрия на высоте 90 км в атмосфере, где он присутствует в естественном состоянии. Данные измерений потока излучения от ЛОЗ позволяют корректировать размывание в земной атмосфере изображений настоящих звезд методами адаптивной оптики. Атомы натрия могут быть возбуждены лазерным пучком, настроенным на линию D2 (длина волны 589.2 нм), и излучать на той же длине волны, формируя, таким образом, яркий флуоресцентный световой источник на точно заданном расстоянии [27]. Во-вторых, оранжевый лазерный источник может быть использован для эффективного (резонансного) возбуждения фотолюминесценции (ФЛ) нового центра окраски германий–вакансия (GeV) в алмазе (с линией ФЛ на длине волны 602 нм), интересного для применения в оптических квантовых технологиях [28, 29].

Более тонкая подстройка длины волны возможна при использовании изотопически модифицированных алмазов, выращиваемых с заданным соотношением изотопов ^{12}C и ^{13}C (различие в частотах линии КР 1-го порядка между алмазами со 100%-ным содержанием изотопа ^{12}C и 100%-ным содержанием ^{13}C составляет 51 см^{-1}) [11, 30]. Наличие лазера, излучающего в оранжевом диапазоне, также актуально в биомедицинских исследованиях, в частности в цитометрии, поскольку ряд важных люминесцирующих протеинов наиболее эффективно возбуждается в диапазоне длин волн 590–595 нм [31].

В настоящей работе на монокристалле CVD-алмаза создан ВКР-лазер при накачке наносекундными импульсами Yb:YAG-лазера ($\lambda_p = 1030\text{ нм}$), генерирующий на 1-й и 2-й стоксовых частотах (длины волн 1194 и 1419 нм соответственно), а также в оранжевом диапазоне спектра на длине волны 597.3 нм путем удвоения частоты 1-й СК.

2. Оптическая схема ВКР-лазера

Оптическая схема ВКР-лазера на алмазе, аналогичная использованной нами ранее при накачке Nd:YAG-лазером [6], показана на рис.1. Накачка осуществлялась излучением иттербиевого лазера, созданного на кристалле Yb:YAG с размерами $5\times 5\times 1\text{ мм}$ и концентрацией Yb 10 мас.%, который накачивался, в свою очередь, диодным лазером FBLD-940-200-FC200 (Frankfurt Laser) с волоконным выводом излучения и следующими параметрами: максимальная выходная мощность 200 Вт, диаметр оптического волокна 200 мкм, числовая апертура 0.22, длительность импульса 300–350 мкс. Параметры излучения Yb:YAG-лазера: TEM₀₀ мода, длительность импульсов на полувысоте 12 нс, диаметр пучка на выходном зеркале 0.5 мм, расходямость 3 мрад. При увеличении частоты следования импульсов накачки их энергия снижалась от $E = 2.9\text{ мДж}$ на частоте $f = 100\text{ Гц}$ до 2.2 мДж на $f = 1500\text{ Гц}$. Максимальная средняя выходная мощность P_p этого лазера на $\lambda_p = 1030\text{ нм}$ составляла 3.2 Вт.

Излучение Yb:YAG-лазера с помощью зеркала M1 и линзы L1 ($F = 100\text{ мм}$) фокусировалось в кристалл находящегося в резонаторе CVD-алмаза, образованного вогнутым зеркалом M2 ($R = 100\text{ мм}$) и плоским выходным зеркалом M_{out}. Полированная со всех сторон пластинка CVD-алмаза с размерами $7.8\times 7.8\times 1.0\text{ мм}$ (кристалл выращен в СВЧ плазме, концентрация примесного азота около 1 ppm) имела ориентацию больших граней (100) и ориентацию остальных (узких) граней (110). Излучение накачки распространялось вдоль длинной стороны кристалла в направлении (110). На грани алмазной пластины было нанесено просветляющее покрытие на диапазон 1020–1440 нм с коэффициентом отражения менее 0.3%.

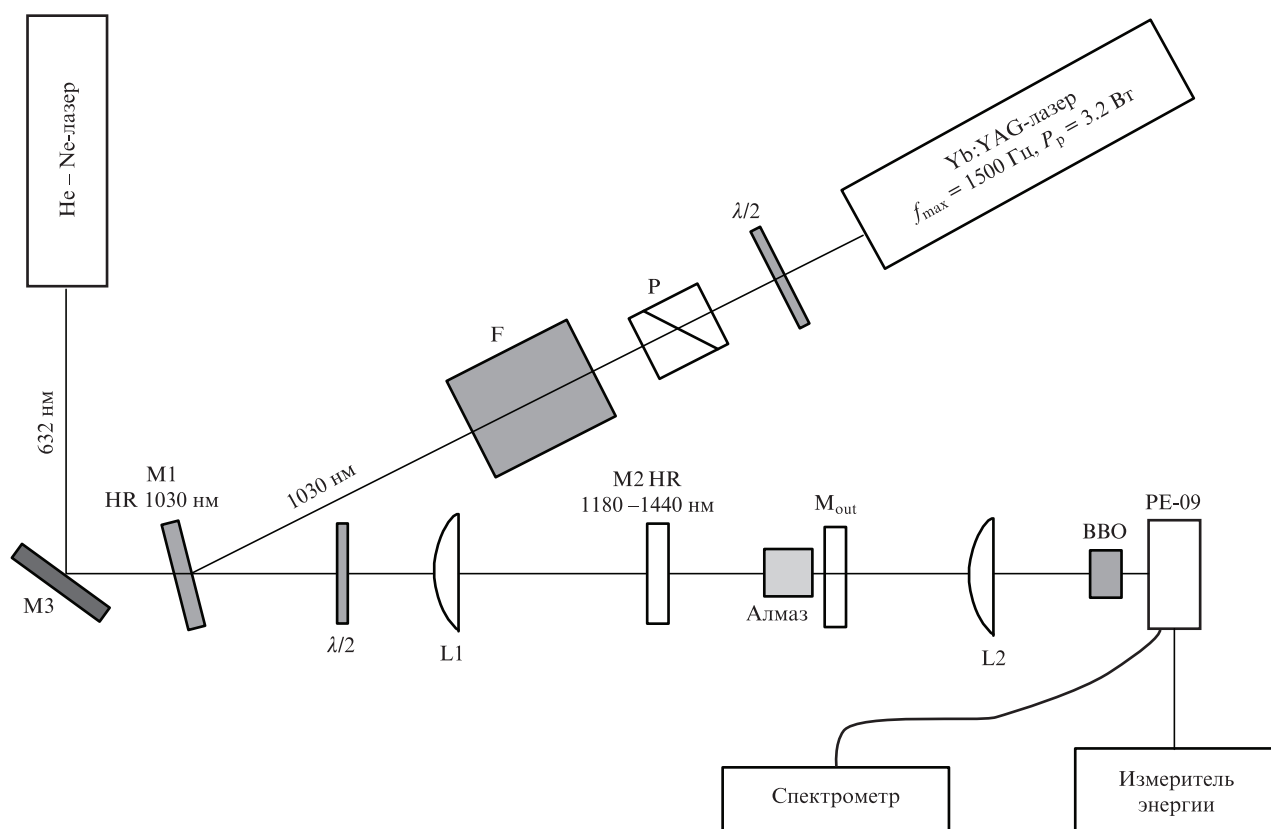


Рис.1. Оптическая схема ВКР-лазера с накачкой Yb:YAG-лазером.

Табл.1. Коэффициенты пропускания T (%) выходных зеркал M_{out} для разных длин волн.

Номер зеркала	Длина волны (нм)		
	1030	1194	1419
1	<0.1	77	84
2	0.15	0.4	92

Направление вектора поляризации излучения накачки изменялось с помощью полуволновой пластинки. Кристалл помещался на медный теплоотвод, тепловой контакт обеспечивался термопастой.

Пропускание зеркала M_2 на длине волны $\lambda_p = 1030$ нм составляло 90%. Диаметр пятна накачки в фокусе линзы примерно совпадал с диаметром TEM_{00} моды резонатора (280 мкм). Моделирование в программе LasCAD показало, что выбранная конфигурация резонатора, близкая к полуконфокальной, дает более стабильный диаметр основной моды в случае возникновения термолинзы в кристалле алмаза, чем в полусферическом резонаторе. Между $Yb:YAG$ -лазером и резонатором ВКР-лазера были расположены вращатель Фарадея F и поляризатор P , что предотвращало попадание обратно отраженного излучения накачки в резонатор $Yb:YAG$ -лазера. В качестве выходного зеркала использовалось зеркало M_{out} с диэлектрическим покрытием, имевшее различные спектры пропускания в области 1030–1419 нм. Коэффициенты пропускания выходных зеркал на длинах волн накачки, 1-й и 2-й СК в алмазе представлены в табл.1.

Энергии импульсов накачки и импульсов, генерируемых ВКР-лазером, измерялись пироэлектрическим датчиком OrphirPE-09, подключенным к компьютеру через USB интерфейс Orphir Juno. Формы импульсов лазера накачки и ВКР-лазера регистрировались с помощью осциллографа Teledyne LeCroy Wave Surfer 10R (полоса пропускания 1 ГГц) и фотодиода Thorlabs DET 025A (время отклика 150 пс). Спектральные характеристики излучения накачки и ВКР исследовались с помощью монохроматора M150-III и линейного InGaAs-датчика UC-16H914 (Солар ЛС). Излучение доставлялось ко входной щели монохроматора с помощью оптического волокна. Паспортное спектральное разрешение монохроматора при использовании дифракционной решетки 600 штр./мм составляло 0.6 нм, а решетки 1200 штр./мм – 0.3 нм (для регистрации излучения 2-й гармоники ВКР-лазера).

3. Генерация в ИК области

Зависимости энергии импульсов и выходной мощности ВКР-лазера на длине волны 1194 нм (1-я СК, зеркало M_{out} №1) от энергии импульсов и средней мощности накачки $Yb:YAG$ -лазера представлены на рис.2. Пороговая энергия накачки составила около 0.7 мДж, максимальная энергия в импульсе – 0.75 мДж, максимальная эффективность преобразования $\eta = 34\%$, дифференциальная эффективность $\eta_d = 50\%$ (рис.2,а). Максимальное значение η достигалось при поляризации излучения накачки под углом 45° к граням кристалла алмаза, т.е. когда вектор поляризации лежал в плоскости (111).

При увеличении средней мощности накачки за счет увеличения частоты следования импульсов (при неизменной энергии импульса накачки 2.2 мДж) выходная мощность ВКР-лазера растет линейно с мощностью накачки (рис.2,б). При таком способе варьирования мощности на-

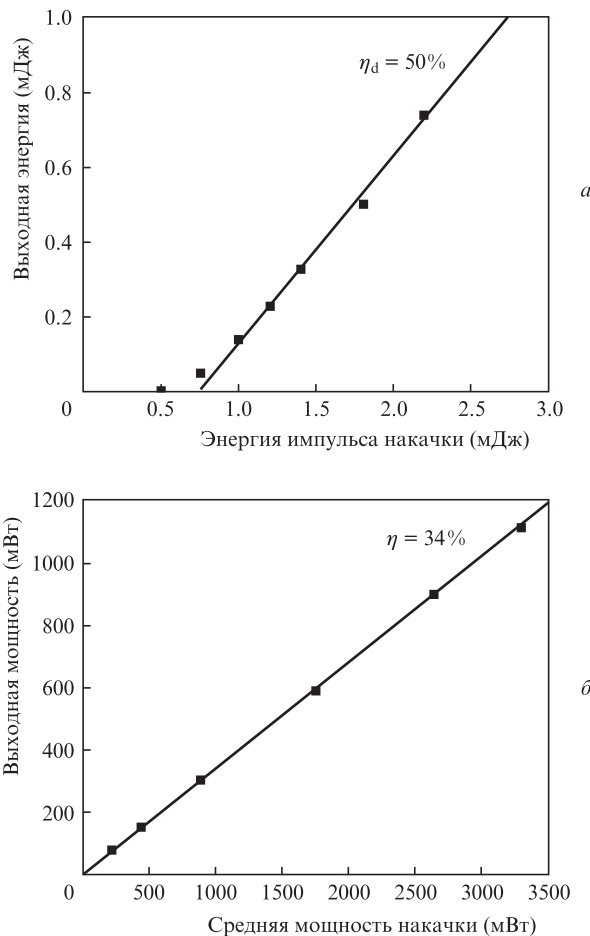


Рис.2. Зависимости выходной энергии импульсов (а) и выходной средней мощности (б) ВКР-лазера на длине волны 1194 нм (1-я СК) от энергии импульсов и мощности накачки $Yb:YAG$ -лазера (при постоянной энергии импульса накачки 2.2 мДж).

качки пороговая мощность ВКР-лазера формально была близка к нулю. Максимальная выходная средняя мощность лазерной генерации на длине волны 1194 нм составила 1.1 Вт при эффективности преобразования $\eta = 34\%$. Длина волны ВКР-излучения в максимуме составила 1193.6 ± 0.6 нм, что соответствует величине 1-го стоксова сдвига в алмазе (1332 см^{-1}), ширина спектра по полувысоте была равна ~ 1 нм (рис.3). Длительность импульса (на полувысоте) составила около 10 нс (рис.4).

При использовании выходного зеркала M_{out} №2 с высоким ($R > 99\%$) коэффициентом отражения на длине волны 1194 нм генерация ВКР-лазера проходила на частоте 2-го стоксова сдвига (1419 нм) (рис.3). Ширина линии излучения на длине волны 1419 нм по полувысоте составила 1.2 нм. Зависимость энергии импульсов ВКР-лазера ($\lambda = 1419$ нм) от энергии импульсов накачки представлена на рис.5. При увеличении частоты следования импульсов накачки вплоть до 1500 Гц выходная мощность ВКР-лазера ($\lambda = 1419$ нм) с ростом мощности накачки растет линейно, без признаков насыщения. Дифференциальная эффективность η_d составляла 25%, максимальная выходная средняя мощность лазерной генерации на 2-й СК достигала 0.52 Вт. Дальнейшее увеличение выходной мощности ВКР-лазера возможно при увеличении частоты следования импульсов, что достижимо в случае улучшения схемы охлаждения активного элемента лазера накачки. Оптимизация добротности резонатора лазера

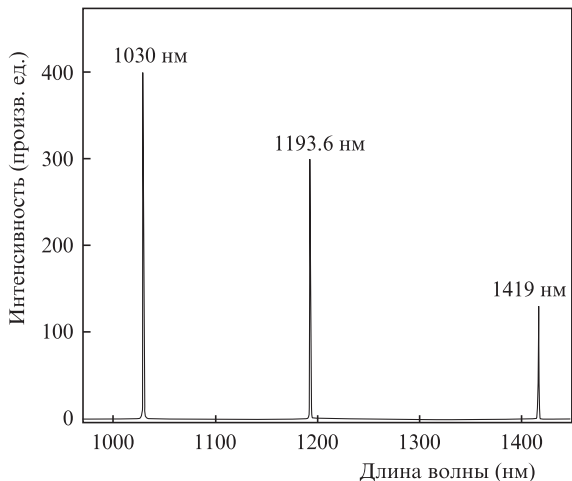


Рис.3. Спектры генерации накачки ($\lambda = 1030$ нм) и ВКР-лазера на 1-й (1193.6 нм) и 2-й (1419 нм) стоксовой линиях.

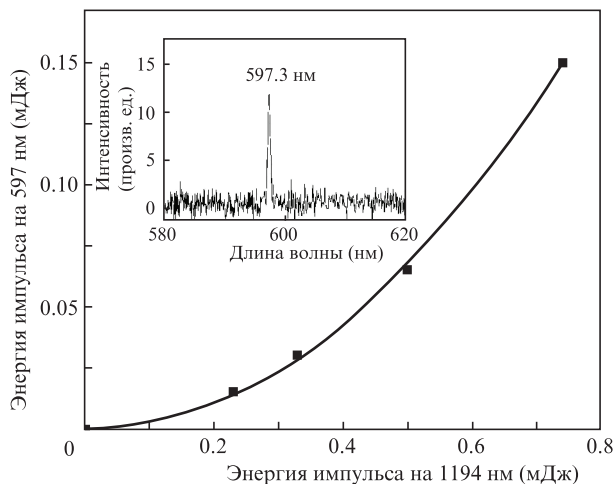


Рис.6. Зависимость энергии импульсов при генерации 2-й гармоники ВКР-лазера на $\lambda = 597$ нм от энергии импульса накачки на $\lambda = 1194$ нм. На вставке – спектр генерации на $\lambda = 597.3$ нм.

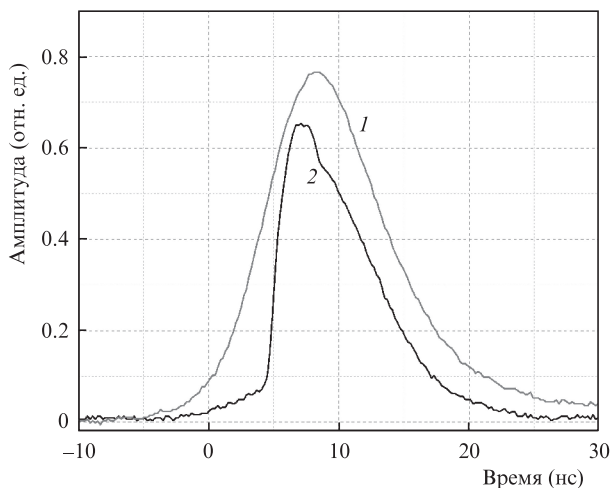


Рис.4. Формы импульсов накачки (1) и ВКР-излучения на $\lambda = 1194$ нм (2). Выходное зеркало M_{out} №1.

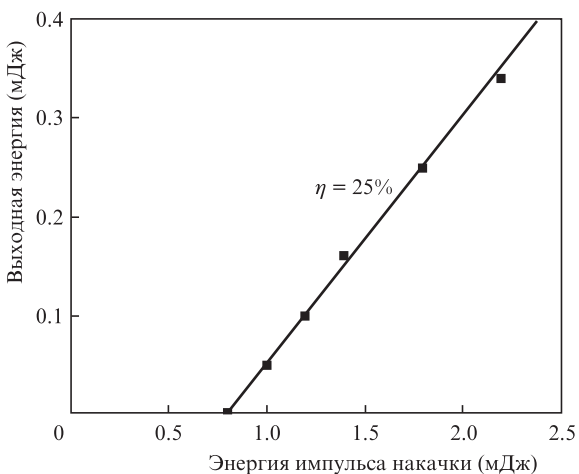


Рис.5. Зависимость энергии импульсов ВКР-лазера на $\lambda = 1419$ нм от энергии импульсов накачки.

накачки также позволит увеличить общую эффективность генерации и повысить среднюю мощность.

4. Генерация в оранжевой области спектра

Генерация оранжевого ВКР-лазера была реализована путем удвоения частоты 1-й СК в нелинейном кристалле. Для получения генерации второй гармоники (ГВГ) ВКР-лазера использовался кристалл BaV_2O_4 (ВВО) с размерами $6 \times 6 \times 3$ мм, ориентированный для ГВГ 1-го типа ($\theta = 21.2^\circ$). Излучение на длине волны 1194 нм мощностью до 1 Вт фокусировалось линзой L2 с фокусным расстоянием 50 мм (см. рис.1) в пятно диаметром 0.3 мм в центре кристалла ВВО. Исследование энергетических и спектральных характеристик выходного излучения проводили с тем же метрологическим оборудованием, что и для лазеров накачки и стоксова ВКР-излучения, при этом в монохроматоре М150-III дифракционная решетка 600 штр./мм с длиной волны блеска 1000 нм была заменена решеткой 1200 штр./мм с длиной волны блеска 400 нм.

Спектр ГВГ и квадратичная зависимость выходной энергии ВКР-импульсов от энергии импульса накачки показаны на рис.6. Максимальная полученная энергия на длине волны 597.3 нм составила 0.15 мДж, максимальная средняя мощность – 220 мВт, максимальная эффективность – 20%. Измеренная спектральная ширина излучения оранжевого лазера была равна 0.5 нм, что близко к разрешению спектрометра (0.3 нм).

5. Заключение

Изготовлен ВКР-лазер на монокристалле синтетического алмаза длиной около 8 мм. При накачке наносекундными импульсами Yb:YAG-лазера (длина волны 1030 нм, средняя мощность до 3.2 Вт, длительность импульса около 10 нс) получена генерация на 1-й и 2-й стоксовых компонентах с длинами волн 1194 и 1419 нм соответственно. Выходная средняя мощность на $\lambda = 1194$ нм достигала 1.1 Вт при эффективности преобразования 34% и дифференциальной эффективности 50%. На длине волны 1419 нм выходная средняя мощность составила 0.52 Вт. При удвоении частоты 1-й стоксовой компоненты на нелинейном кристалле ВВО получена генерация в оранжевом диапазоне спектра на длине волны 597.3 нм с энергией в импульсе 0.15 мДж и средней мощностью 0.22 Вт. Ни на одной из трех частот генерации в ИК и ви-

димой областях признаков насыщения выходной мощности с повышением средней мощности накачки не зарегистрировано. Это предполагает возможность дальнейшего увеличения выходной мощности ВКР-лазера при более мощной накачке и оптимизации резонатора, причем рекордно высокая теплопроводность (около 2000 Вт/мК) алмаза способствует снижению возникающих температурных градиентов в кристалле.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-12-01403-П).

- Granados E., Spence D.J., Mildren R.P. *Opt. Express*, **19**, 10857 (2011).
- Reilly S., Savitski V.G., Liu H., Gu E., Dawson M.D., Kemp A.J. *Opt. Lett.*, **40**, 930 (2015).
- Jelínek M., Kitzler O., Jelínková H., Šulc J., Němec M. *Laser Phys. Lett.*, **9**, 35 (2012).
- Feve J.P.M., Shortoff K.E., Bohn M.J., Brasseur J.K. *Opt. Express*, **19**, 913 (2011).
- McKay A., Liu H., Kitzler O., Mildren R.P. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 105801 (2013).
- Pashinin V.P., Ralchenko V.G., Bolshakov A.P., Ashkinazi E.E., Gorbashova M.A., Yurov V.Y., Konov V.I. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 065001 (2016).
- Murtagh M., Lin J., Mildren R.P., McConnell G., Spence D.J. *Opt. Express*, **23**, 15504 (2015).
- Sabella A., Piper J.A., Mildren R.P. *Opt. Lett.*, **39**, 4037 (2014).
- Bolshakov A.P., Ralchenko V.G., Yurov V.Y., Popovich A.F., Antonova I.A., Khomich A.A., Ashkinazi E.E., Ryzhkov S.G., Vlasov A.V., Khomich A.V. *Diamond Relat. Mater.*, **62**, 49 (2016).
- Wei L., Kuo P.R., Thomas R.L., Anthony T.R., Banholzer W.F. *Phys. Rev. Lett.*, **70**, 3764 (1993).
- Каминский А.А., Ральченко В.Г., Ёнеда Х., Большаков А.П., Инюшкин А.В. *Письма в ЖЭТФ*, **104**, 356 (2016).
- Mildren R.P., in *Optical Engineering of Diamond* (New York: Wiley, 2013, p.1).
- Lux O., Ralchenko V.G., Bolshakov A.P., Konov V.I., Sharonov G.V., Shirakawa A., Yoneda H., Rhee H., Eichler H.J., Mildren R.P., Kaminskii, A.A. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 086101 (2014).
- Kaminskii A.A., Lux O., Ralchenko V.G., Bolshakov A.P., Rhee H., Eichler H.J., Shirakawa A., Yoneda H. *Phys. Stat. Solidi (RRL)-Rapid Res. Lett.*, **10**, 471 (2016).
- Savitski V.G., Reilly S., Kemp A.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **49**, 218 (2013).
- Kaminskii A.A., Hemley R.J., Lai J., Yan C.S., Mao H.K., Ralchenko V.G., Eichler H.J., Rhee H. *Laser Phys. Lett.*, **4**, 350 (2007).
- Balmer R.S., Brandon J.R., Clewes S.L., Dhillon H.K., Dodson J.M., Friel I., Inglis P.N., Madgwick T.D., Markham M.L., Mollart T.P., Perkins N., Scarsbrook G.A., Twitchen D.J., Whitehead A.J., Wilman J.J., Woollard S.M. *J. Phys.: Cond. Matter*, **21**, 364221 (2009).
- Optical Engineering of Diamond* (New York: Wiley, 2013).
- Конов В.И. *Квантовая электроника*, **45**, 1043 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 1043 (2015)].
- Ивакин Е.В., Киселев И.Г., Ральченко В.Г., Большаков А.П., Ашкинази Е.Е., Шаронов Г.В. *Квантовая электроника*, **44**, 1055 (2014) [*Quantum Electron.*, **44**, 1055 (2014)].
- Комленок М.С., Володкин Б.О., Князев Б.А., Кононенко В.В., Кононенко Т.В., Конов В.И., Павельев В.С., Сойфер В.А., Тукмаков К.Н., Чопорова Ю.Ю. *Квантовая электроника*, **45**, 933 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 933 (2015)].
- Feve J.P.M., Shortoff K.E., Bohn M.J., Brasseur J.K. *Opt. Express*, **19**, 913 (2011).
- Williams R.J., Spence D.J., Lux O., Mildren R.P. *Opt. Express*, **25**, 749 (2017).
- Mildren R.P., Butler J.E., Rabeau J.R. *Opt. Express*, **16**, 18950 (2008).
- Mildren R.P., Sabella A. *Opt. Lett.*, **34**, 2811 (2009).
- Большасова Л.А., Лукин В.П. *Оптика атмосферы и океана*, **22**, 807 (2009).
- Bland-Hawthorn J., Kern P. *Opt. Express*, **17**, 1880 (2009).
- Ральченко В.Г., Седов В.С., Хомич А.А., Кривобок В.С., Николаев С.Н., Савин С.С., Власов И.И., Конов В.И. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, №6, 15 (2015).
- Iwasaki T., Ishibashi F., Miyamoto Y., Doi Y., Kobayashi S., Miyazaki T., Tahara K., Jahnke K.D., Rogers L.J., Naydenov B., Jelezko F., Yamasaki S., Nagamachi S., Inubushi T., Mizuochoi N., Hatano M. *Sci. Rep.*, **5**, 12882 (2015).
- Vogelgesang R., Ramdas A.K., Rodriguez S., Grimsdich M., Anthony T.R. *Phys. Rev. B*, **54**, 3989 (1996).
- Telford W.G., Illy E., Karlsson H., Prabhat P. *Biophoton. Intern.*, **17**, 26 (2010).