

Мощные непрерывные лазеры видимого диапазона с накачкой излучением волоконных ВКР-лазеров

А.А.Сурин, С.В.Ларин, Т.Е.Борисенко, К.Ю.Прусаков, Ю.С.Стирманов

В работе представлены непрерывные лазеры видимого диапазона с выходной мощностью излучения более 10 Вт на длинах волн 561, 589 и 623 нм. Предложен подход для получения видимого непрерывного одномодового лазерного излучения мощностью более 10 Вт на любой длине волны из диапазона 560–660 нм.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние, ВКР-лазер, генерация второй гармоники, кристаллы с регулярной доменной структурой, лазер видимого диапазона.

1. Введение

Мощные непрерывные лазеры видимого диапазона на фиксированных длинах волн с хорошим качеством пучка востребованы для создания лазерных проекторов и лазерных шоу, в голографии и адаптивной оптике, а также для различных медицинских и научных применений. Тем не менее до сих пор такие источники трудно найти среди широко известных лазеров видимого диапазона. Полупроводниковые лазеры имеют ограничения по уровню выходной мощности (несколько ватт) и низкое качество пучка, лазеры на красителях сложны в производстве и нуждаются в постоянном обслуживании, что затрудняет их широкое применение, а газовые лазеры на парах металлов громоздки и неэффективны. Другим вариантом получения лазерного излучения видимого диапазона является генерация гармоник в нелинейно-оптических кристаллах при накачке излучением лазеров ИК диапазона. Однако, как правило, для эффективного преобразования требуется использование либо импульсного излучения с пиковыми мощностями несколько киловатт [1], либо резонаторной схемы, требующей для стабильной работы высокой точности позиционирования оптических компонентов.

В работе [2] был предложен простой с точки зрения исполнения подход для получения мощного непрерывного видимого лазерного излучения на любой заданной длине волны в диапазоне 560–770 нм. Этот подход основан на однопроходной ГВГ излучения волоконного ВКР-лазера в кристаллах с периодической доменной структурой. В работе [2] наблюдалось значительное уширение спектральной линии излучения ВКР-лазера, которое ограничивало рост мощности второй гармоники и эффектив-

ности преобразования. Поэтому максимальная полученная мощность желтого излучения на длине волны 589 нм составила всего 3 Вт при эффективности ГВГ 12%. В итоге относительно дешевые и простые в изготовлении одномодовые непрерывные лазеры видимого диапазона с выходной мощностью более 10 Вт оставались предметом научного и технического поиска. Мы продолжили разработку подхода авторов [2] с целью получения больших мощностей и эффективностей. В результате достигнута мощность желтого излучения на длине волны 589 нм превысила 14 Вт с эффективностью ГВГ 24% [3, 4]. Позднее наряду с лазером на $\lambda = 589$ нм были продемонстрированы мощные лазеры, излучающие на длинах волн 561 нм (зеленый лазер) и 623 нм (красный) [5, 6]. Настоящая работа посвящена обзору этой линейки цветных лазеров.

2. ВКР-лазер накачки

Волоконные лазеры с активной средой, легированной ионами иттербия, позволяют получать рекордные мощности излучения с высоким качеством пучка ($M^2 < 1.1$) при высокой эффективности (более 35%) и компактной конструкции [7]. Однако длины волн, перекрываемые оптическими переходами активных ионов иттербия, ограничиваются диапазоном 1.03–1.15 мкм. Чтобы получить излучение в более длинноволновой области, предлагалось использовать фотонно-кристаллические волокна [8], волокна, легированные висмутом [9], материалы, легированные хромом [10]. Однако самым простым и эффективным методом остается преобразование при ВКР [11].

Типичная оптическая схема волоконных ВКР-лазеров состоит из волоконного лазера накачки и вложенных резонаторов на одну или несколько последовательных длин волн (рис.1), соответствующих сдвигу частоты при комбинационном рассеянии. Активной средой в случае ВКР-преобразования является обычное пассивное волокно, а зеркалами резонатора – волоконные брэгговские решетки. Схема лазера, излучающего на $\lambda = 1178$ нм, приведена на рис.1.

Лазерный источник, состоящий из иттербиевого лазера накачки и ВКР-преобразователя, позволяет получать излучение в диапазоне 1.1–2.2 мкм [12]. В работе [13] был представлен ВКР-лазер с рекордной выходной мощно-

А.А.Сурин, К.Ю.Прусаков, Ю.С.Стирманов. НТО «ИРЭ-Полус», Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: asurin@ntoire-polus.ru

С.В.Ларин, Т.Е.Борисенко. НТО «ИРЭ-Полус», Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1; e-mail: slarin@ntoire-polus.ru

Поступила в редакцию 30 сентября 2016 г., после доработки – 26 октября 2016 г.

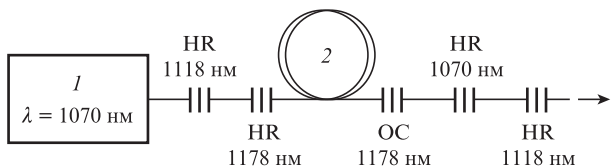


Рис.1. Схема ВКР-лазера на 1178 нм: 1 – непрерывный волоконный иттербиевый лазер накачки с линейно поляризованным излучением; 2 – пассивное волокно, поддерживающее поляризацию; HR – высокоотражающие брэгговские решетки; ОС – выходная брэгговская решетка.

стью 1.3 кВт на длине волны 1.12 мкм, а в работе [14] – ВКР-лазер мощностью 300 Вт на $\lambda = 1.48$ мкм.

Однако для эффективного нелинейного преобразования ИК излучения в нелинейно-оптическом кристалле (в том числе и в кристалле с периодической доменной структурой) важна не только мощность излучения. Излучение ВКР-лазера должно быть линейно поляризованным и его спектр должен быть уже, чем спектральная ширина синхронизма кристалла. У кристалла танталата лития с периодической доменной структурой (PPLT, periodically poled lithium tantalate) ширина синхронизма составляет 0.4 нм·см для преобразования во вторую гармонику с длиной волны 589 нм [15, 16]. Ограничения мощности и эффективности преобразования во вторую гармонику в работе [2] были связаны с хорошо известной проблемой уширения спектральной линии излучения волоконного ВКР-лазера [17–19].

В настоящей работе мы добились значительного повышения спектральной мощности и сужения спектра выходного излучения благодаря узким спектрам отражения волоконных брэгговских решеток (ВБР), образующих ВКР-резонатор на сигнальную длину волны. Ширины спектров отражения ВБР не превышали 0.05 нм, а точность их измерения ограничивалась разрешением нашего анализатора спектра. Для сравнения: в работе [2] при мощности излучения 23 Вт на $\lambda = 1178$ нм ширина спектральной линии $\Delta\lambda$ составляла 0.37 нм (на полувысоте), в работе [4] при мощности 60 Вт она была равна 0.1 нм. Хорошо известно, что ВБР при прохождении через них мощного излучения разогреваются, из-за чего спектр отражения сдвигается в длинноволновую область; производная этого сдвига составляет примерно 0.01 нм/°С. Таким образом, в нашем случае при разогреве одной из решеток относительно второй уже на 5°С происходит полное их рассогласование. Для решения этой проблемы решетки помещались в термостат, где поддерживалась постоянная температура.

На основе усовершенствованной схемы ВКР-преобразователя мы получили лазерное излучение на длинах волн 1122 нм (в результате однокаскадного ВКР-преобразования в германосиликатном волокне), 1178 нм (в результате двухкаскадного преобразования) и 1246 нм (в результате трехкаскадного преобразования). Зависимости мощности излучения этих лазеров от мощности излучения накачки приведены на рис.2, а их спектральные характеристики – на рис.3. Выходные мощности каждого из трех лазеров превышали 50 Вт. Ширины линий излучения на полувысоте при максимальной выходной мощности у лазеров на $\lambda = 1122$ и 1178 нм составляли менее 0.15 нм, у лазера на $\lambda = 1246$ нм – менее 0.25 нм.

Кроме того непрерывное линейно поляризованное излучение на $\lambda = 1246$ нм было получено с использованием однокаскадного резонатора при ВКР в фосфоросиликат-

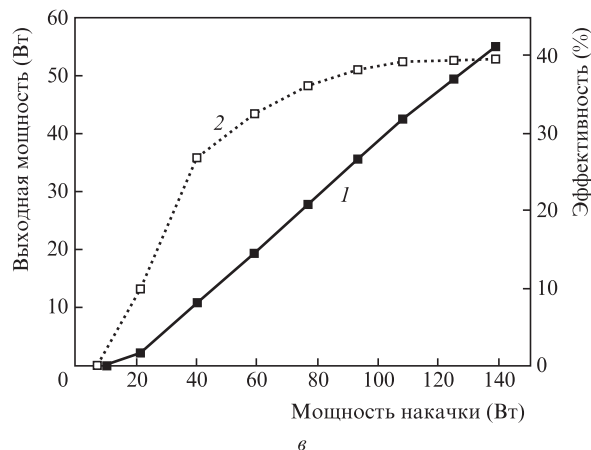
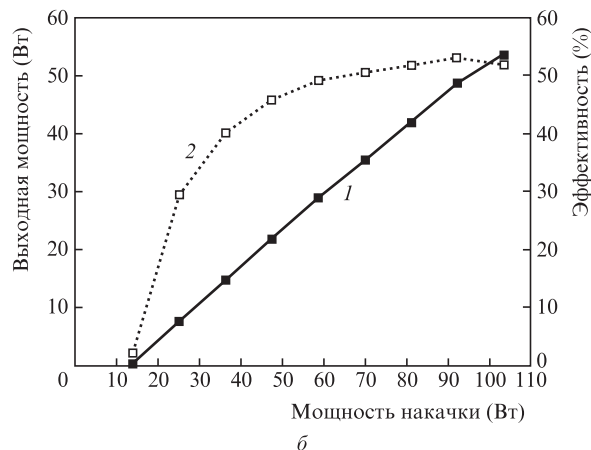
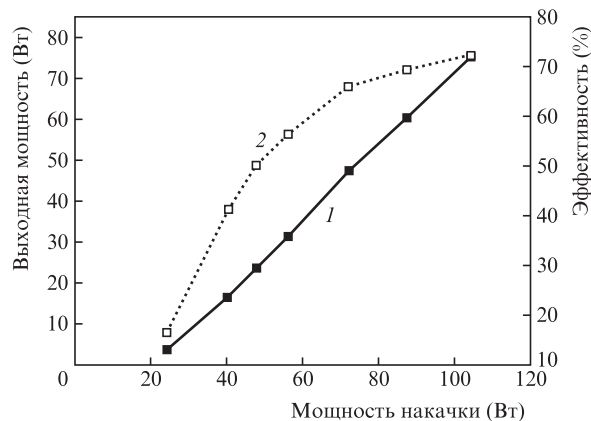


Рис.2. Зависимости от мощности излучения накачки на $\lambda = 1070$ нм выходной мощности излучения (1) и эффективности (2) ВКР-лазеров на германосиликатном волокне, излучающих на $\lambda = 1122$ (а), 1178 (б) и 1246 нм (в).

ном волокне [11]. Эффективность в этом случае увеличилась незначительно, а вот ширина спектральной линии при выходной мощности 50 Вт составила всего 0.15 нм. На рис.4. приведены мощностные и спектральные характеристики ВКР-лазера на фосфоросиликатном волокне, излучающего на $\lambda = 1246$ нм.

3. Преобразование во вторую гармонику

Среди хорошо известных кристаллов с периодической доменной структурой (PPLN, PPLT, PPKTP) кристалл стехиометрического танталата лития, легированный MgO,

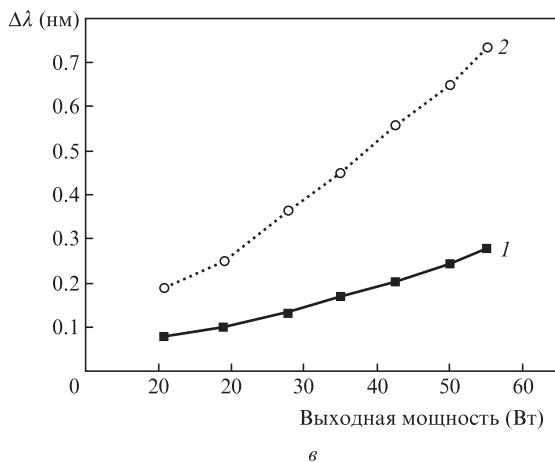
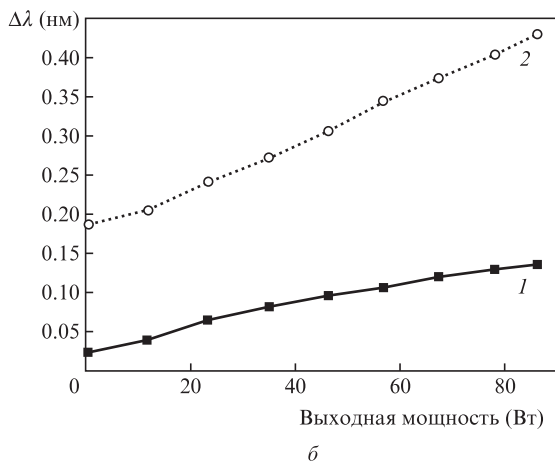
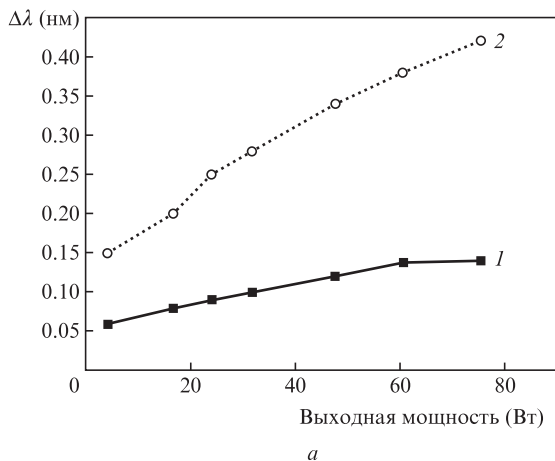


Рис.3. Зависимости ширин спектральных линий $\Delta\lambda$ излучения ВКР-лазеров по уровню 3 (1) и 10 дБ (2) от мощности выходного излучения на $\lambda = 1122$ (а), 1178 (б) и 1246 нм (в).

наиболее подходит для эффективного преобразования мощного ИК излучения во вторую гармонику [20–23]. Наряду с относительно высоким эффективным коэффициентом нелинейности ($d_{\text{эф}} \approx 10$ пм/В) он обладает малым оптическим поглощением и высокой теплопроводностью ($K = 8.4 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$) [24]. Эти свойства являются определяющими для получения высоких мощностей и эффективностей преобразования, т. к. поглощение лазерного излучения и последующий неоднородный разогрев кристалла ведут к тепловой расфазировке и к замедлению роста эффективности преобразования [25–28]. В работе [29] предложен метод оценки качества теплоотвода термостата, в кото-

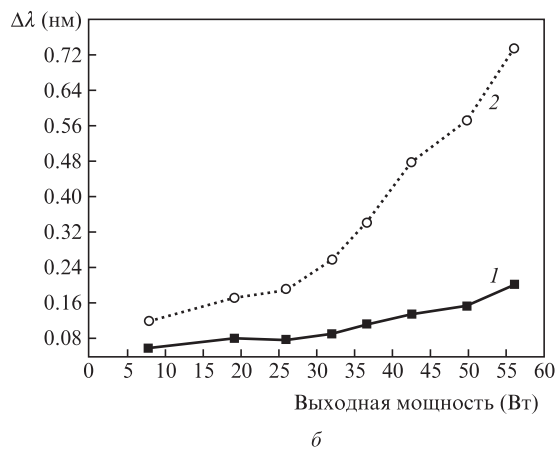
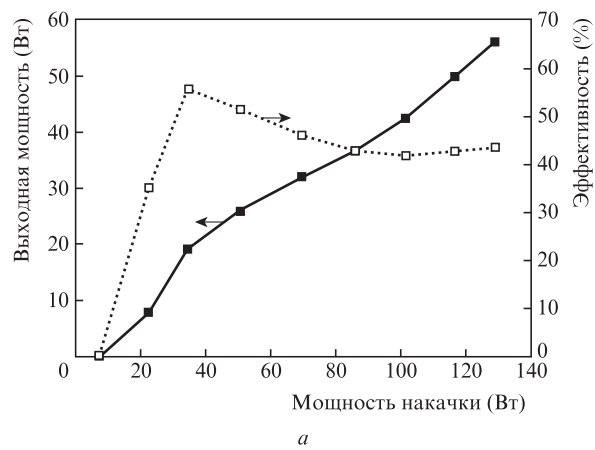


Рис.4. Зависимости выходной мощности излучения на $\lambda = 1246$ нм и эффективности ВКР-лазера на фосфоросиликатном волокне от мощности излучения накачки на $\lambda = 1069$ нм (а), а также зависимости ширины спектральной линии излучения ВКР-лазера по уровню 3 (1) и 10 дБ (2) от мощности выходного излучения на $\lambda = 1246$ нм (б).

рый помещен кристалл. Авторы использовали кристалл малой толщины (300 мкм) и помещали его в термостат, изготовленный из меди, тем самым оптимизировав теплоотвод от кристалла. В этой работе было получено излучение мощностью 19 Вт на $\lambda = 532$ нм с эффективностью преобразования 26.5% в кристалле $\text{MgO}:\text{PPcLT}$ длиной 10 мм.

Во всех упомянутых работах исследовалась генерация на длине волны 532 нм. В нашей работе, используя накачку излучением ВКР-лазеров, мы продемонстрировали генерацию на трех длинах волн: 561, 589 и 623 нм. Использовались кристаллы конгруэнтного танталата лития, легированного оксидом магния, $\text{MgO}:\text{PPcLT}$ (содержание MgO 8 мол.%), с геометрическими размерами $20 \times 3 \times 0.5$ мм (НС Photonics) с периодами доменной структуры 9.09, 10.43 и 12.13 мкм для каждой длины волны соответственно. Оптические схемы для ГВГ приведены на рис.5. ИК излучение на $\lambda = 1122, 1178$ и 1246 нм фокусируется в центр кристалла в перетяжки диаметрами 47, 48 и 49 мкм соответственно.

Экспериментально полученные зависимости мощности излучения второй гармоники от мощности излучения ВКР-лазеров накачки приведены на рис.6. Максимальные мощности, полученные для длин волн 561, 589 и 623 нм, составили 8, 14 и 12 Вт соответственно.

Максимальная эффективность ГВГ непрерывного излучения узкополосного ВКР лазера составила 22% для

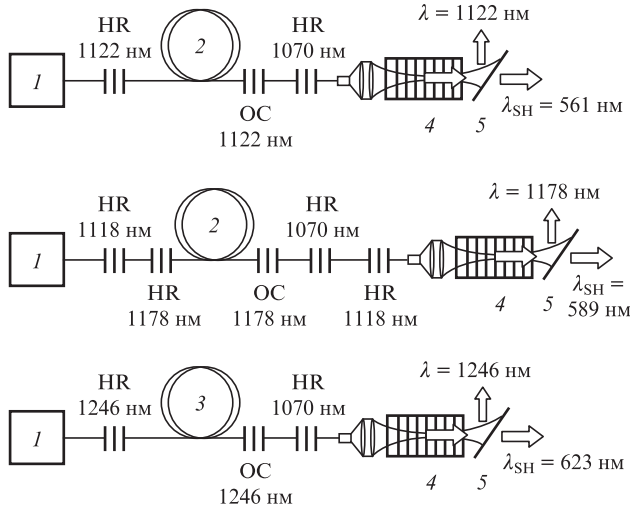


Рис.5. Оптические схемы преобразования излучения ВКР-лазеров с $\lambda = 1122, 1178$ и 1246 нм во вторую гармонику: 1 – иттербиевый волоконный лазер ($\lambda = 1070$ нм); 2 – волокно, поддерживающее поляризацию; 3 – фосфатное волокно, поддерживающее поляризацию; 4 – MgO:PPcLT в термостате; 5 – дихроичное зеркало.

$\lambda_{SH} = 561$ нм, а для $\lambda_{SH} = 589$ и 623 нм она превысила 25%. Также на рис.6 приведены теоретические зависимости для ГВГ, рассчитанные с использованием укороченных уравнений для ГВГ. Во всех случаях хорошее совпадение экспериментальных и теоретических зависимостей наблюдается при малых мощностях накачки (до ~ 25 Вт). Отметим, что при расчетах коэффициент эффективной нелинейной восприимчивости d_{eff} варьировался для согласования теоретических и экспериментальных данных, поскольку в литературе коэффициент нелинейной восприимчивости кристалла PPcLT широко известен в основном только для ГВГ излучения с $\lambda = 1064$ нм (9 пм/В), а данные о спектральной зависимости d_{eff} неполны [30, 31]. При этом все остальные параметры, влияющие на эффективность ГВГ в эксперименте, выбраны оптимальными и известны с хорошей точностью. Принятые значения d_{eff} для каждой λ_{SH} таковы: $d_{eff} = 10$ пм/В для $\lambda_{SH} = 561$ нм, 10.5 пм/В для 589 нм и 12 пм/В для 623 нм.

При мощностях накачки свыше 25 Вт наблюдаются отклонения экспериментальных зависимостей от теоретических. Это связано, во-первых, со спектральными особенностями излучения ВКР-лазеров: при больших мощностях ширины спектральных линий становятся сравнимыми с шириной спектрального синхронизма кристалла (ширина линии ВКР-излучения по уровню 10 дБ становится больше 0.2 нм), и, во-вторых, с неоднородным разогревом кристалла, вызванным поглощением излучения накачки и второй гармоники. В перспективе использование более спектрально узких ВБР, образующих резонатор ВКР-лазера, позволит создать еще более узкополосные волоконные ВКР-лазеры, а более узкая линия ВКР-лазеров накачки даст возможность использовать для ГВГ кристаллы большей длины и фокусировать излучение накачки в перетяжку большего диаметра. Увеличение длины кристалла будет способствовать увеличению эффективности ГВГ и мощности второй гармоники, ограниченной на данный момент спектральными и тепловыми эффектами, а менее острая фокусировка излучения накачки – повышению ресурса работы кристалла.

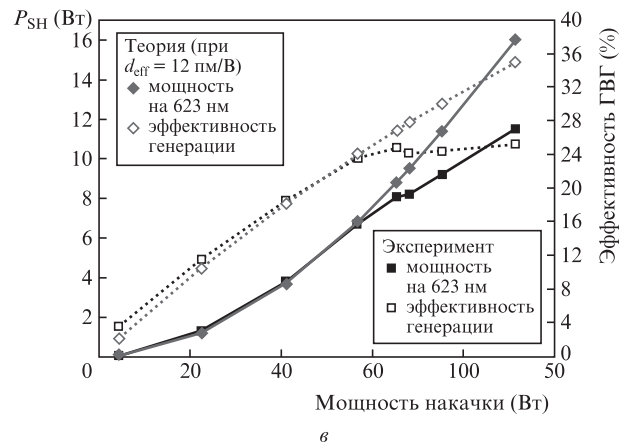
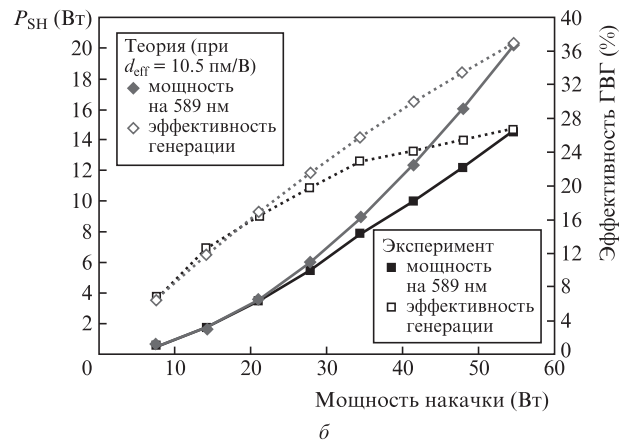
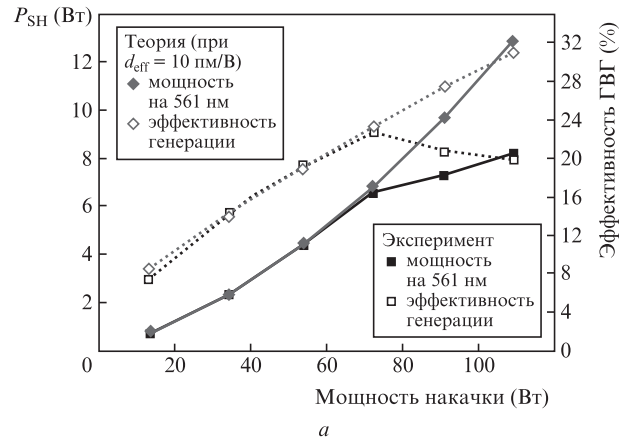


Рис.6. Экспериментальные и теоретические зависимости мощности второй гармоники P_{SH} и эффективности ГВГ от мощности излучения ВКР-лазеров накачки с длинами волн излучения 1122 нм (а), 1178 нм (б) и 1246 нм (в).

Все это открывает новые возможности применения данных лазеров и для записи голограмм, и для адаптивной оптики, а также для создания мощных лазерных проекторов.

Использованная в настоящей работе оптическая схема позволяет расширить диапазон получаемых длин волн видимого диапазона и до 660 нм (длина волны, перспективная для создания лазерных проекторов). ВКР-лазер накачки на 1320 нм можно реализовать по четырехкаскадной схеме на основе кварцевого волокна с германатной жилой или по двухкаскадной схеме на основе фосфоросиликатного волокна, задействовав одновременно два

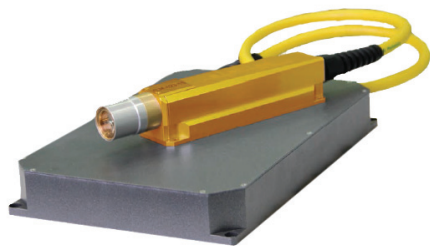


Рис.7. Внешний вид лазера линейки VLM.

пика ВКР-усиления – фосфатный и силикатный [11]. Преобразование излучения с $\lambda = 1320$ нм во вторую гармонику ($\lambda_{SH} = 660$ нм) в кристалле MgO:PPcLT должно быть не менее эффективным: спектральная ширина синхронизма кристалла на эти длины волн будет больше и ограничивающие тепловые эффекты будут слабее благодаря уменьшению коэффициента оптического поглощения с увеличением длины волны в видимом диапазоне [32]. Граница 660 нм условна, ничто не мешает получать генерацию видимого излучения и в более длинноволновой области (ограничения на ГВГ по-прежнему смягчаются), основным вопросом останется возможность создания непрерывного мощного (более 30 Вт) узкополосного ВКР-лазера с линейно поляризованным излучением на нужную длину волны. Здесь возможные трудности создания волоконного ВКР-лазера большой мощности могут быть связаны с хорошо известным пиком поглощения воды в волокне на $\lambda = 1385$ нм.

В случае создания таких узкополосных лазеров накачки на длины волн ИК диапазона появится другая интересная перспектива – генерация третьей гармоники в кристаллах с периодической доменной структурой. На настоящий момент суммарных мощностей излучений первой и второй гармоник уже достаточно для генерации третьих гармоник с мощностью более 5 Вт на длинах волн 374, 392 и 415 нм от излучений на $\lambda = 1122, 1178$ и 1246 нм соответственно. Отдельным вопросом здесь остается стойкость кристаллов к такому излучению, лежащему в УФ области спектра.

На основе описанной оптической схемы была разработана конструкция лазерного модуля, универсальная для трех длин волн выходного излучения: 561, 589 и 623 нм. Были продемонстрированы опытные образцы и проведены их квалификационные испытания. Характеристики готовых приборов линейки VLM приведены ниже, внешний вид лазера показан на рис.7.

Ширина спектральной линии (нм)	0.1
Выходная мощность (Вт) на длинах волн λ_{SH}	
561 нм	8
589 нм	15
623 нм	15
Долговременная стабильность (%)	± 2
Эффективность «от розетки» (%)	> 4
Размеры корпуса ВКР-лазера (мм)	325×43×217
Размеры корпуса преобразователя (мм)	233×50×45.6
Вес прибора (кг)	4.5

4. Заключение

Предложен способ подавления уширения спектральной линии волоконного ВКР-лазера: использование узко-

полосных волоконных брэгговских решеток на сигнальную длину волны, размещенных в термостате. Продemonстрирована его работоспособность на однокаскадном, двухкаскадном и трехкаскадном ВКР-лазерах. Впервые продемонстрирована эффективная (более 25%) ГВГ мощностью более 10 Вт на длинах волн 561, 589 и 623 нм в кристаллах танталата лития с периодической доменной структурой от непрерывного излучения узкополосных волоконных ВКР-лазеров.

Создана линейка лазеров видимого диапазона на основе разработанных узкополосных волоконных ВКР-лазеров накачки. Получено непрерывное излучение с выходной мощностью более 10 Вт на длинах волн 561, 589 и 623 нм.

1. Avdokhin A., Gapontsev V., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **9347**, 934704 (2015).
2. Georgiev D., Gapontsev V.P., et al. *Opt. Express*, **13** (18), 6772 (2005).
3. Surin A.A., Larin S.V. *Technical Program of the 16th Intern. Conf. «Laser Optics 2014»* (St. Petersburg, 2014, TuSy1-12, 52).
4. Surin A.A., Borisenko T.E., Larin S.V. *Opt. Lett.*, **41** (11), 2644 (2016).
5. Сурин А.А., Ларин С.В., Борисенко Т.Е., Прусаков К.Ю., Стирманов Ю.С. *Материалы 7-го Российского семинара по волоконным лазерам* (Новосибирск, 2016, с. 120).
6. Surin A. *Laser Display and Lighting Conf.* (Jena, Germany, 2016).
7. http://www.ipgphotonics.com/group/view/8/Lasers%2FHigh_Power_CW_Fiber_Lasers.
8. Fan X., Chen M., et al. *Opt. Express*, **20** (13), 14471 (2012).
9. Dianov E.M. *J. Lightwave Technol.*, **31** (4), 681 (2013).
10. Sharonov M., Bykov A., et al. *Opt. Lett.*, **32** (24), 3489 (2007).
11. Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **34** (10), 881 (2004).
12. Dianov E.M., Prokhorov A.M. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **6** (4), 1022 (2000).
13. Zhang L., Liu C., et al. *Opt. Express*, **22** (15), 18483 (2014).
14. Supradeepa V.R., Nicholson J.W. *Opt. Lett.*, **38** (14), 2538 (2013).
15. Fejer M.M., Magel G.A., Jundt D.H., Byer R.L. *JEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **28** (11), 2631 (1992).
16. Dolev I., Ganany-Padowicz A., et al. *Appl. Phys. B*, **96** (2), 423 (2009).
17. Babin S.A., Churkin D.V., et al. *Opt. Lett.*, **31** (20), 3007 (2006).
18. Bonner G.M., Lin J., et al. *Opt. Express*, **22** (7), 7492 (2014).
19. Suret P., Randoux S. *Opt. Commun.*, **237**, 201 (2004).
20. Louchev O.A., Yu N.E., et al. *App. Phys. Lett.*, **87** (13), 131101 (2005).
21. Kontur F.J., Dajani I., Lu Y., Knize R.J. *Opt. Express*, **15** (20), 12882 (2007).
22. Kumar S.C., Samanta G.K., Ebrahim-Zadeh M. *Opt. Express*, **17** (16), 13711 (2009).
23. Yu N.E., Kurimura S., Nomura Y., Kitamura K. *Mat. Sci. Eng. B*, **120** (1–3), 146 (2005).
24. Sinha S., Hum D.S., et al. *J. Lightwave Technol.*, **26** (24), 3866 (2008).
25. Tovstonog S.V., Kurimura S., et al. *Opt. Express*, **16** (15), 11294 (2008).
26. Yu N.E., Jung C., et al. *J. Korean Phys. Sci.*, **49** (2), 528 (2006).
27. Lim H.H., Kurimura S., Noguchi K., Shoji I. *Opt. Express*, **22** (15), 18268 (2014).
28. Kumar S.C., Sabouri S.G., Khorsandi A., Ebrahim-Zadeh M. *Techn. Digest CLEO: 2014* (OSA, 2014, paper SM4I.5).
29. Lim H.H., Katagai T., et al. *Opt. Express*, **19** (23), 225887 (2011).
30. Meyn J.P., Fejer M.M. *Opt. Lett.*, **22** (16), 1214 (1997).
31. Shoji I., Kondo T., Kitamoto A., Shirane M., Ito R. *J. Opt. Soc. Am. B*, **14** (9), 2268 (1997).
32. Борисенко Т.Е., Сурин А.А., Заблоцкая Е.Ю., Рябушкин О.А. *Материалы 7-го Российского семинара по волоконным лазерам* (Новосибирск, 2016, с. 122).