

Генерация широкополосного суперконтинуума в телекоммуникационном волокне с накачкой наносекундным Тм, Но: YVO₄-лазером*

Чжоу Рен-Лай, Рен Цзянь-Кань, Лу Шу-Ли, Ю Ву-Лунь, Ван Ю-Чжу

Получена генерация широкополосного суперконтинуума (СК) в телекоммуникационном одномодовом волоконном световоде (ОВС) 8/125 мкм и многомодовом волоконном световоде (МВС) 50/125 мкм при прямой накачке волокон наносекундным Тм, Но: YVO₄-лазером с модуляцией добротности. При частоте следования импульсов (ЧСИ) 7 кГц достигнута выходная средняя мощность 0.53 Вт в спектральной полосе 1.95–2.5 мкм и 3.51 Вт в спектральной полосе 1.9–2.6 мкм в ОВС и МВС соответственно (эффективности преобразования по оптической мощности для ОВС и МВС составили 34.6% и 73.7%). Выходные спектры излучения имеют практически плоские участки в диапазонах 2070–2390 и 2070–2475 нм при вариациях интенсивности менее 2%. Средняя мощность СК возрастает от 2.1 до 4.2 Вт при увеличении ЧСИ от 5 до 15 кГц и неизменной мощности накачки. Ширина выходного излучения СК больше, чем у входного импульса накачки и не имеет расщепления. Стабильность выходной мощности СК контролировалась в течение недели, флуктуации составили менее 6%.

Ключевые слова: генерация суперконтинуума, телекоммуникационное оптическое волокно, Тм, Но: YVO₄-лазер, наносекундный импульс.

1. Введение

В последние годы генерация суперконтинуума (СК) в оптических волокнах стала предметом обширных исследований в связи с огромным фундаментальным интересом и потенциальными приложениями (особенно в средней ИК области спектра) для анализа атмосферы, в спектроскопии, космической связи, биологии и медицине [1–3]. С помощью различных специальных оптических волокон, включая микроструктурированные волокна (МВ) [4–6], конусные волокна [7], высоколинейные волокна (HNL) [8, 9], фторидные [10–12], теллуридные [13] и халькогенидные [14] волокна, можно создать эффективный широкополосный источник СК с накачкой от импульсных лазеров высокой мощности (фемтосекундные, пикосекундные и наносекундные импульсы) или даже от непрерывных лазеров.

Согласно литературным данным в последние годы генерация СК осуществлялась различными способами, причем в качестве источников накачки всегда использовались лазеры с синхронизацией мод или усилители коротких импульсов, позволяющие получать высокую пиковую мощность СК. Однако из-за ограничений, накладываемых энергией импульса накачки и размером сердцевинны волокна, трудно получить СК с высокой выходной энергией, например СК мощностью до 25.7 Вт на основе

усилителя на волокне, легированном тулием (ТВУ). Лазерное излучение в диапазоне примерно от 2 до 2.5 мкм, недавно продемонстрированное в [15], имело энергию в импульсе только ~23.4 мкДж при частоте следования импульсов (ЧСИ) ~1.1 МГц. Кроме того, из-за высокой нелинейности и материальной дисперсии в специальных оптических волокнах выходной импульс СК всегда разбит на серии более коротких импульсов, по которым энергия импульса рассредоточена. Отметим, что большинство исследователей, занимающихся генерацией СК с помощью специальных волокон, уделяли мало внимания генерации СК в среднем ИК диапазоне с использованием дешевого и доступного телекоммуникационного волокна, накачиваемого наносекундными импульсами твердотельных лазеров с длиной волны 2000 нм и более.

В настоящей работе продемонстрирована генерация широкополосного лазерного СК в обычном телекоммуникационном волокне, накачиваемом наносекундным Тм, Но: YVO₄-лазером с модуляцией добротности. Ранее для генерации лазерного СК в среднем ИК диапазоне с помощью ОВС или МВС использовалась накачка на 1550 нм импульсным волоконным лазером или усилителем [16–20], при этом максимальная выходная мощность составляла всего 1.1 Вт при $\lambda > 1650$ нм и ЧСИ 200 кГц [18]. Максимальная выходная мощность Тм, Но: YVO₄-лазера, излучающего на длине волны 2.054 мкм, составляет ~9.2 Вт при ЧСИ 7 кГц и минимальной длительности импульса ~25 нс. Длина волны излучения лазерного СК превышает 1900 нм, максимальная достигнутая средняя мощность и энергия импульса равны 4.2 Вт и ~0.5 мДж соответственно.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка для генерации СК в телекоммуникационном волокне показана на рис.1. Лазерные диоды с волоконным выходом и максимальной вы-

* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

Zhou Ren-Lai, Ren Jian-Cun, Lou Shu-Li. Department of Control Engineering, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, People's Republic of China; e-mail: zrlhit@126.com
Ju You-Lun, Wang Yue-Zhu. National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, No. 2, Yi kuang Street, Nan gang District, Harbin 150080, People's Republic of China

Поступила в редакцию 22 июня 2014 г., после доработки – 20 сентября 2014 г.

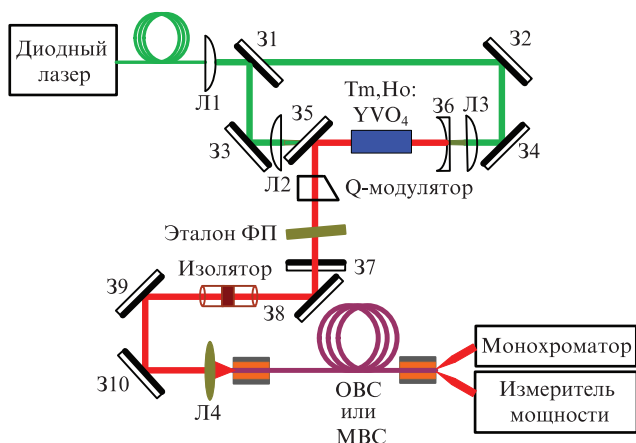


Рис.1. Экспериментальная установка для генерации СК в телекоммуникационном волокне.

ходной мощностью 35 Вт служили для накачки с длиной волны в диапазоне 798–802 нм. Диаметр выходного волокна был 400 мкм, а числовая апертура $NA = 0.22$. Геометрия резонатора $Tm, Ho:YVO_4$ -лазера была выбрана плоско-вогнутой, физическая длина резонатора составляла около 300 мм. Плоское зеркало 37 имело коэффициент пропускания 40% в диапазоне 1.9–2.2 мкм. Фокусное расстояние линзы связи Л1 равно 25 мм. Линзы Л2 и Л3 служили для согласования мод (фокусное расстояние обеих линз 50 мм). Дихроичное зеркало 31 имело коэффициент отражения $R = 50\%$ в окрестности длины волны 800 нм, а коэффициент отражения R дихроичных зеркал 32, 33 и 34 на $\lambda \sim 800$ нм был более 99.5%. Использовался кристалл $Tm, Ho:YVO_4$ a -среза (размеры $3 \times 3 \times 8$ мм) с концентрациями ионов Tm^{3+} 4 ат.% и Ho^{3+} 0.4 ат.%. На оба торца кристалла наносились просветляющие покрытия для длин волн лазера (~ 2 мкм) и накачки (~ 800 нм). Лазерный кристалл помещался в непосредственной близости от фокусов линз Л2 и Л3, измеренный размер фокального пятна излучения накачки на торцах кристалла составлял примерно 0.75 мм.

Лазерный кристалл был завернут в индиевую фольгу, зажат в медном радиаторе и помещен в сосуд Дьюара, который служил резервуаром для жидкого азота. Модуляция добротности достигалась с помощью акустооптического затвора из плавленого кварца длиной 46 мм. Максимальная ВЧ мощность составляла 50 Вт, а ЧСИ могла непрерывно регулироваться от 1 Гц до 100 кГц. Для получения генерации на одной длине волны использовался эталон Фабри–Перо толщиной 0.1 мм, с помощью которого определялась выходная длина волны лазера (2.054 мкм). Дихроичные зеркала 38, 39 и 310 имели $R \geq 97\%$ на длине волны 2.05 мкм и коэффициент пропускания $T \geq 90\%$ на длине волны 800 нм. В эксперименте использовались световоды со ступенчатым профилем показателя преломления и диаметрами сердцевина/оболочка 8/125 или 50/125 мкм. Торцы световодов были сколоты перпендикулярно оси волокна и зажаты в медном радиаторе. Излучение лазера (2.054 мкм) вводилось в сердцевину световода с помощью фокусирующей линзы Л4 ($f = 9$ мм), измеренная эффективность ввода составила $\sim 29\%$ (ОВС) и $\sim 70\%$ (МВС). Для защиты $Tm, Ho:YVO_4$ -лазера от излучения обратной связи, отраженного от торца волокна, и сигнала нелинейного рассеяния в тракт накачки световода помещался оптический изолятор.

3. Результаты и их обсуждение

Спектральные измерения проводились с помощью монохроматора (фокусное расстояние 300 мм, дифракционная решетка 600 линий/мм на $\lambda = 2.0$ мкм), InGaAs-детектора (время нарастания/спада менее 23 нс, спектральный диапазон 1.2–2.6 мкм) и синхронного усилителя SR830, используемого для выделения сигнала. Эволюция спектров лазерного СК на выходе ОВС и МВС длиной 15 м каждый проиллюстрирована на рис.2. Отметим, что ширина спектра определяется мощностью инжектируемого излучения, которая ограничена сверху порогом разрушения торцов волокна, а в эксперименте максимальные мощности инжектируемого излучения для ОВС и МВС составляли 1.53 и 4.76 Вт соответственно. В случае ОВС спектр СК простирается примерно от 1950 до 2500 нм при выходной мощности 0.53 Вт (рис.2,а), причем форма спектра практически плоская в интервале длин волн 2070–2390 нм (вариации интенсивности менее 2%). При замене ОВС на МВС спектр СК лежит в области примерно 1920–2600 нм при выходной мощности 3.51 Вт (см. рис.2,б), и плоский спектр наблюдается в интервале длин волн 2070–2475 нм. Однако следует подчеркнуть, что чрезвычайно стабильный выходной спектр является результатом усреднения по многим лазерным импульсам, и основная причина этого может быть связана с медленным детектором, использованным в эксперименте.

Основными физическими механизмами генерации СК являются модуляционная неустойчивость (МН), которая играет важную роль на начальной стадии генерации, и солитонный самосдвиг частоты за счет комбинационного рассеяния, который приводит к сдвигу спектров СК в

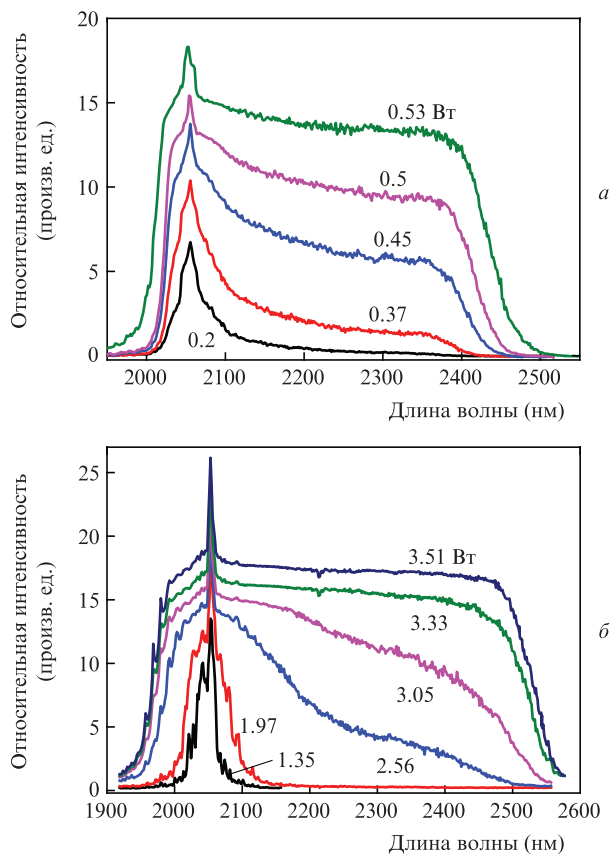


Рис.2. Спектры излучения СК в ОВС (а) и МВС (б) при разных выходных мощностях СК.

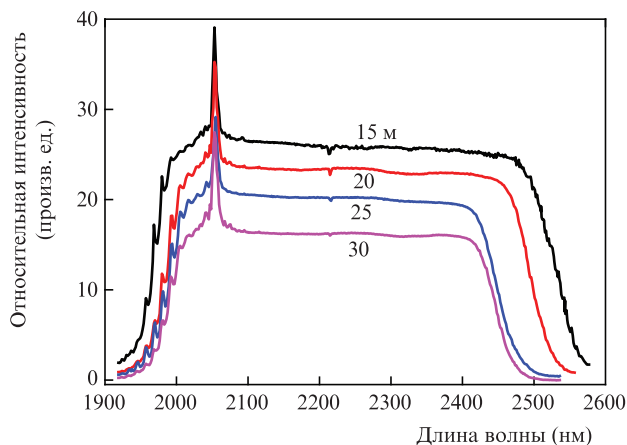


Рис.3. Эволюция спектра СК для МВС разной длины.

длинноволновую сторону [21]. Симметричные боковые полосы МН можно видеть на обеих сторонах спектра (см. рис.2,б), когда выходная мощность СК равна 1.97 Вт, а боковые полосы отделены примерно на 13, 26 и 39 нм от линии лазера накачки 2054 нм. Сдвиг частоты пиков усиления МН от частоты лазера накачки может быть рассчитан по формуле $\Delta\nu_n = n(2\gamma P_0/|\beta_2|)^{1/2}/2\pi$ ($n = \pm 1, 2, 3, \dots$), где γ – коэффициент нелинейности, P_0 – пиковая мощность накачки и β_2 – параметр дисперсии групповой скорости в волокне на длине волны накачки. Если мощность СК составляет 1.97 Вт, то оцениваемая пиковая мощность накачки $P_0 = 12.61$ кВт. Тогда при $\gamma = 8 \times 10^{-2} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$ и $\beta_2 = -56 \text{ пс}^2/\text{км}$ расчетный сдвиг частоты $\Delta\nu_n = 0.955n$ (ТГц) и $\Delta\lambda_n = 13.5n$ (нм), что близко к экспериментально наблюдаемому значению.

Спектры СК изучались при максимальной мощности накачки и разных длинах МВС (рис.3). С уменьшением длины МВС от 30 до 15 м длинноволновый край СК сдвигается примерно с 2500 до 2600 нм при одновременном увеличении общей спектральной плотности. Поскольку причиной генерации широкого спектра являются нелинейные процессы, происходящие на первых нескольких метрах МВС, то дальнейшее распространение излучения лишь «обрезает» спектр из-за высоких потерь на поглощение кварцевого стекла за пределами 2.4 мкм. Таким образом, для получения самого широкого спектра требуется такая длина волокна, при которой нелинейность преобладает над потерями.

Средняя выходная мощность СК, измеренная измерителем мощности PM30 (Coherent) с диапазоном отклика теплового сенсора 0.15–11 мкм, как функция мощности накачки показана на рис.4. Как видно, максимальные выходные мощности СК, полученные с помощью ОВС и МВС, включая пик на 2054 нм, составили 0.53 и 3.51 Вт при ЧСИ 7 кГц, соответствующие эффективности преобразования по оптической мощности (с учетом эффективности связи) – 34.6% и 73.7%. Максимальные энергии импульсов СК E_p составили 75.7 и 500 мкДж в ОВС и МВС. Из рис.4 также видно, что при мощности накачки МВС более 5.21 Вт выходная мощность СК начинает насыщаться и дальнейший рост мощности накачки не приводит к линейному увеличению выходной мощности СК. Насыщение мощности СК мы объясняем потерями мощности его длинноволнового (свыше 2.4 мкм) края, обусловленными сильным многофонным поглощением в кварцевом волокне.

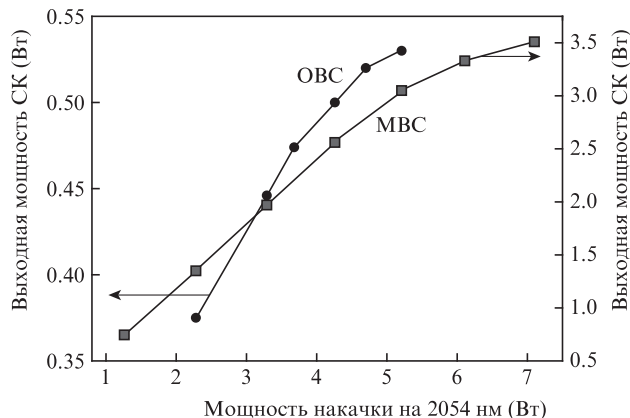


Рис.4. Зависимости выходной мощности СК от мощности накачки для ОВС и МВС.

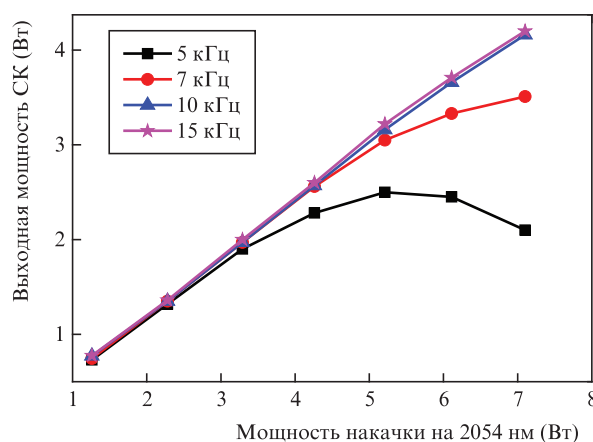


Рис.5. Зависимости выходной мощности СК от мощности накачки МВС для разных ЧСИ.

На рис.5 показано поведение выходной мощности СК при различных ЧСИ. Видно, что при мощности накачки 7.1 Вт выходная мощность СК увеличилась с 2.1 до 4.2 Вт при росте ЧСИ с 5 до 15 кГц, а соответствующий коэффициент преобразования по оптической мощности увеличился с 44.1% до 88.2%.

Для измерения длительности импульса СК использовался быстродействующий InGaAs-фотодиод и 350-мегагерцевый цифровой осциллограф WaveJet 332 (Lecroy). Типичные временные профили импульсов СК при максимальной выходной мощности показаны на рис.6. Хотя форма импульсов СК несколько отличается от формы импульса накачки, импульс СК не разбит на серии коротких импульсов, так что энергия СК по-прежнему сосредоточена в одном импульсе. Полная ширина на половине максимума (FWHM) импульса СК длительностью t_{sc} для ОВС составляет ~ 42.1 нс (против 29 нс у импульса накачки), а для МВС t_{sc} – примерно 35.7 нс (против 25 нс). Главной причиной уширения мы считаем МН, которая вовлечена в процесс генерации СК и может вызывать модуляцию выходного импульса, вплоть до его расщепления.

Пиковая мощность импульса СК $P_{sc} = E_{sc}/t_{sc}$, для ОВС $P_{sc} \approx 1.8$ кВт, для МВС $P_{sc} \approx 14$ кВт.

Проведенный контроль стабильности выходной мощности СК в световодах выявил наличие существенных вариаций выходной мощности в ОВС, главной причиной которых является малость сердцевины ОВС и влияние внешних факторов на эффективность ввода мощности на-

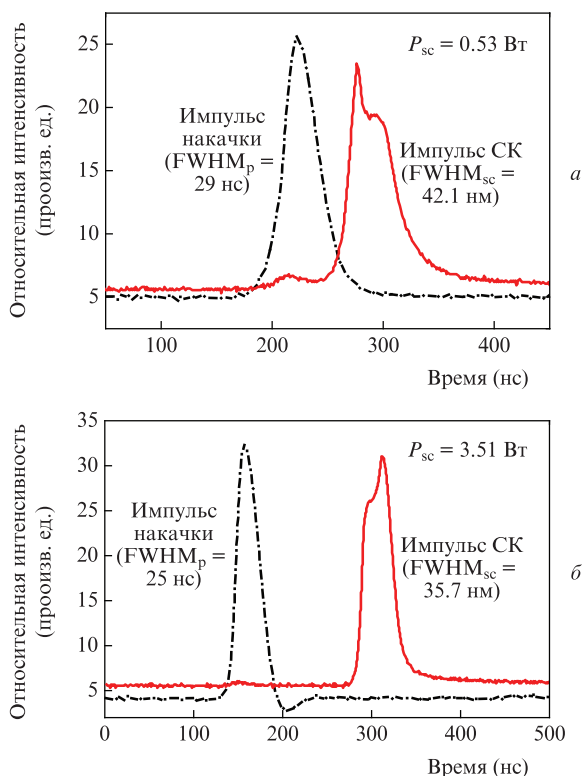


Рис.6. Форма выходного импульса СК для ОВС (а) и МВС (б).

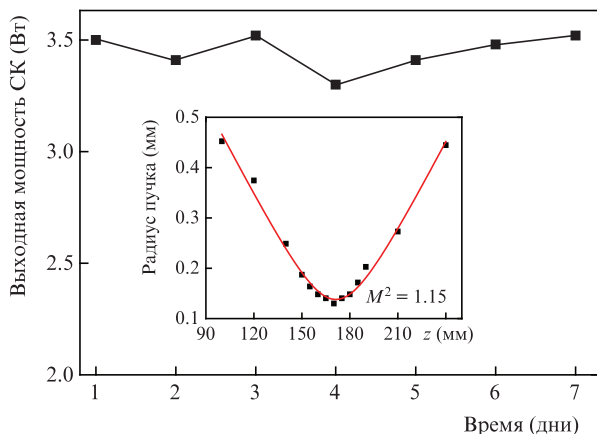


Рис.7. Флуктуации выходной мощности СК за семь дней. Центральная длина волны – 2.1 мкм.

качки. На рис.7 показаны флуктуации мощности СК в МВС в течение недели. Максимальная флуктуация выходной мощности составила 0.2 Вт, а удельный вклад флуктуаций был менее 6%. Оценивалось также качество пучка СК в МВС. Выделенное с помощью наклонного дихроичного зеркала ($R \geq 90\%$ при ~ 2.1 мкм) излучение СК фокусировалось линзой ($f = 150$ мм), профиль интенсивности пучка измерялся вблизи фокального пятна с помощью лезвия ножа (90/10),двигающегося поперек пучка. Значение M^2 оценивалось подгонкой формы пучка к гауссову профилю; по оценке $M^2 = 1.15$ при мощности 3.51 Вт (см. вставку на рис.7).

4. Заключение

Итак, сообщается о получении широкополосного СК на основе телекоммуникационного оптического во-

локна, непосредственно накачиваемого наносекундным Тм,Но:YVO₄-лазером с модуляцией добротности. Общая выходная мощность СК для ОВС длиной 15 м достигает 0.53 Вт в полосе примерно от 1950 до 2500 нм, причем спектр СК характеризуется «плоским» распределением интенсивности (разброс менее 2%) в интервале длин волн 2070–2390 нм. При накачке МВС той же длины получена выходная мощность СК 3.51 Вт в спектральном диапазоне 1900–2600 нм, при этом форма спектра плоская с незначительными вариациями интенсивности в полосе 2070–2475 нм. Измерена временная форма импульсов СК, никакого расщепления импульса не обнаружено. Выходная мощность СК для МВС стабильна (флуктуации менее 6%). Из-за высокого поглощения кварцевого волокна в области длин волн $\lambda > 2.4$ мкм выходной спектр СК и его средняя мощность ограничены длиной МВС. В дальнейшем мы исследуем взаимодействие излучения лазера накачки ($\lambda = 2$ мкм) с волокном с низкими потерями в среднем ИК диапазоне, таким как фторидное волокно ZBLAN, благодаря чему выходной спектр СК может быть расширен в сторону больших длин волн.

1. Powers M.A., Davis C.C. *Appl. Opt.*, **51**, 1468 (2012).
2. Sych Y., Engelbrecht R., Schmauss B., Kozlov D., Seeger T., Leipertz A. *Opt. Express*, **18**, 22762 (2010).
3. Waynant R.W., Ilev I.K., Gannot I. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **359**, 635 (2001).
4. Buczynski R., Pysz D., Martynkien T., Lorenc D., Kujawa I., Nasilowski T., Berghmans F., Thienpont H., Stepien R. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 575 (2009).
5. Lehtonen M., Genty G., Ludvigsen H., Kaivola M. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 2197 (2003).
6. Lin J.H., Lin K.H., Hsu C.C., Yang W.H., Hsieh W.F. *Laser Phys. Lett.*, **4**, 413 (2007).
7. Brambilla G., Koizumi F., Finazzi V., Richardson D.J. *Electron. Lett.*, **41**, 795 (2005).
8. Moghaddam M.R.A., Harun S.W., Akbari R., Ahmad H. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 369 (2011).
9. Abeeluck A.K., Headley C., Jorgensen C.G. *Opt. Lett.*, **29**, 2163 (2004).
10. Liao M.S., Yan X., Qin G.S., Chaudhari C., Suzuki T., Ohishi Y. *Opt. Express*, **17**, 15481 (2009).
11. Swiderski J., Michalska M., Kieleck C., Eichhorn M., Maz G. *IEEE J. Photon. Tech. Lett.*, **26**, 150 (2014).
12. Kulkarni O.P., Alexander V.V., Kumar M., Freeman M.J., Islam M.N., Terry F.L., Neelakandan M., Chan A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **28**, 2486 (2011).
13. Qin G., Yan X., Kito C., Liao M., Chaudhari C., Suzuki T., Ohishi Y. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 161103 (2009).
14. El Amraoui M., Gadret G., Jules J.C., Fatome J., Fortier C., Désévéday F., Skripatchev I., Messaddeq Y., Troles J., Brilland L., Gao W., Suzuki T., Ohishi Y., Smektala F. *Opt. Express*, **18**, 26655 (2010).
15. Alexander V.V., Shi Z.N., Islam M.N., Ke K., Freeman M.J., Ifarraguerri A., Meola J., Absi A., Leonard J., Zadnik J., Szalkowski S.A., Boer G.J. *Opt. Lett.*, **38**, 13 (2013).
16. Курков А.С., Камынин В.А., Цветков В.Б., Садовникова Я.Э., Маракулин А.В., Минашина Л.А. *Квантовая электроника*, **42**, 778 (2012).
17. Kamynin V.A., Kurkov A.S., Mashinsky V.M. *Laser Phys. Lett.*, **9**, 219 (2012).
18. Swiderski J., Maciejewska M. *Appl. Phys. B*, **12**, 513-1 (2012).
19. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Sadovnikova Y.E. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 598 (2011).
20. Камынин В.А., Курков А.С., Цветков В.Б. *Квантовая электроника*, **41**, 986 (2011).
21. Xia C.N., Kumar M., Cheng M.Y., Kulkarni O.P., Islam M.N., Galvanauskas A., Terry F.L., Freeman M.J., Nolan D.A., Wood W.A. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13**, 789 (2007).