

ВКР-генерация фемтосекундных импульсов в полой револьверном волоконном световоде, заполненном метаном

А.В.Гладышев, М.С.Астапович, Ю.П.Яценко, А.Ф.Косолапов, А.Г.Охримчук, И.А.Буфетов

Исследовано влияние длительности импульсов накачки ($\lambda_p = 1.026$ мкм) на ВКР-генерацию фемтосекундных импульсов в полой световоде, сердцевина которого заполнена метаном. Длительность импульсов накачки регулировалась путем их пропускания через оптическую систему с изменяемой дисперсией и, следовательно, внесением в импульс линейной частотной модуляции (чирпа). Экспериментально продемонстрированы режимы как преимущественной ВКР-генерации фемтосекундных импульсов на стоксовой длине волны ($\lambda_{st} = 1.464$ мкм), так и генерации многозонного суперконтинуума. В режиме ВКР-генерации $1.026 \rightarrow 1.464$ нм получена квантовая эффективность 41% и длительность импульса на стоксовой длине волны 590 фс.

Ключевые слова: волоконный лазер, световод с полой сердцевиной, револьверный световод, ультракороткий импульс, вынужденное комбинационное рассеяние.

1. Введение

Фемтосекундные лазеры находят применение при решении многих научных и прикладных задач [1, 2], поэтому расширение спектрального диапазона, в котором доступны лазерные источники фемтосекундного излучения, представляет большой интерес. В частности, существует потребность в переходе от хорошо освоенного диапазона длин волн $\lambda \approx 1$ мкм (иттербиевые фемтосекундные лазеры) в более длинноволновую область спектра с перспективной освоения среднего ИК диапазона.

Одним из методов преобразования излучения в длинноволновую область является вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР). Однако этот метод сталкивается с трудностями в случае фемтосекундных импульсов накачки. ВКР обладает определенной инерционностью, и при переходе к фемтосекундным импульсам его эффективность подавляется практически безынерционными нелинейными эффектами, обусловленными электронной поляризуемостью. В частности, известно, что основными нелинейными эффектами, конкурирующими с ВКР, являются фазовая самомодуляция (ФСМ) и самофокусировка [3].

Метод подавления нелинейных процессов, конкурирующих с ВКР, при накачке фемтосекундными импульсами был впервые продемонстрирован в работе [4]. В основе метода лежит линейная частотная модуляция (чирп), преобразующая длительность импульсов накачки из фемтосекундного в пикосекундный диапазон, после чего реализуется эффективное ВКР, при котором линейный чирп импульсов накачки передается стоксовым импульсам. На финальной стадии импульс на стоксовой длине волны может быть снова сжат до фемтосекундной длительности. Описанный метод получил развитие в ряде работ, в

которых исследовались как твердотельные [5], так и газовые комбинационно-активные среды [6–9]. Также было продемонстрировано ВКР-усиление чирпированных пикосекундных импульсов с их последующим сжатием до субпикосекундной длительности [10].

ВКР на колебательных переходах легких молекулярных газов представляет особый интерес, поскольку обеспечивает большие стоксовы сдвиги (4155 , 2991 и 2917 см^{-1} для молекул H_2 , D_2 и CH_4 соответственно). Количество работ, посвященных преобразованию излучения в газовых средах, многократно возросло после создания световодов с полой сердцевиной (СПС). Благодаря малому диаметру поля моды (~ 5 – 50 мкм) и большой длине взаимодействия (~ 1 – 10 м), полые световоды позволили снизить пороги нелинейных эффектов на несколько порядков по сравнению со случаем фокусировки излучения в объеме газа. Кроме того, важным отличием световодов от объемной среды является наличие волноводной дисперсии, которая может существенным образом влиять на режим преобразования фемтосекундных импульсов в газонаполненном световоде.

На сегодняшний день в полых световодах продемонстрированы разнообразные режимы распространения фемтосекундных импульсов. В частности, много работ посвящено таким режимам, как генерация дисперсионных волн в УФ диапазоне [11–13], нестационарное ВКР на переходах молекулярных газов [14], а также генерация суперконтинуума [15]. В последнее время наблюдается интерес к исследованию влияния длительности импульсов накачки на ВКР в газонаполненных полых световодах с целью генерации фемтосекундных импульсов на стоксовой длине волны [16, 17]. Тем не менее режимы ВКР-генерации фемтосекундных импульсов, при которых подавлены конкурирующие нелинейные процессы, в газонаполненном световоде остаются недостаточно изученными.

В настоящей работе мы исследовали влияние длительности импульсов накачки ($\lambda_p = 1.026$ мкм), регулируемой с помощью линейной частотной модуляции, на ВКР-генерацию фемтосекундных импульсов в полой световоде с сердцевиной, заполненной метаном. Показано, что для

А.В.Гладышев, М.С.Астапович, Ю.П.Яценко, А.Ф.Косолапов, А.Г.Охримчук, И.А.Буфетов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: alexglad@fo.gpi.ru

спектрально ограниченных импульсов длительностью около 200 фс, растянутых во времени до длительности τ более 1.5 пс, ВКР является доминирующим нелинейным эффектом, позволяющим целенаправленно преобразовывать излучение накачки в излучение на стоксовой длине волны. В режиме $\tau \geq 1.5$ пс продемонстрировано преобразование 1.026 \rightarrow 1.464 нм с квантовой эффективностью 41%. Минимальная длительность импульса на стоксовой длине волны составила 590 фс. С другой стороны, при $\tau < 1.5$ пс доминирующим эффектом становится ФСМ, которая совместно с ВКР, четырехволновой параметрической генерацией и фазовой кросс-модуляцией приводит к генерации многозонного суперконтинуума.

2. Образцы и методика исследований

Схема экспериментальной установки, с помощью которой исследовалось влияние длительности chirпированных импульсов накачки на ВКР-генерацию фемтосекундных импульсов в газонаполненном световоде с полой сердцевиной, показана на рис.1. Источником излучения накачки служил фемтосекундный лазер («PHAROS», Light Conversion), генерирующий на длине волны $\lambda_p = 1.026$ мкм спектрально ограниченные импульсы длительностью $\tau_0 \approx 210$ фс и энергией до 200 мкДж. Длительность импульсов τ могла изменяться в пределах 0.2–10 пс встроенным компрессором, который обеспечивал как положительную, так и отрицательную частотную модуляцию с коэффициентом $|C| = \sqrt{(\tau/\tau_0)^2 - 1} \leq 50$.

Управление мощностью излучения осуществлялось внешним аттенуатором, после которого излучение вводилось в световод с полой сердцевиной с помощью линзы Л1 ($f = 200$ мм). Эффективность ввода составляла 94%. Используемый световод (см. вставку на рис.1) имел длину 3.5 м (в бухте диаметром 50 см) и представлял собой СПС револьверного типа [18], сердцевина которого была заполнена метаном под давлением 15 атм. Диаметр сердцевины составлял 80.7 мкм, что соответствует диаметру поля основной моды 58.2 мкм на длине волны накачки. Оболочка световода была образована десятью капиллярами из кварцевого стекла, их толщина стенки и внешний диаметр составляли 1.3 и 22.2 мкм соответственно. Концы световода были герметично вклеены в миниатюрные вакуумные камеры (кюветы). Входная и выходная кюветы имели окошки из кварцевого стекла (с пропусканием $T_{\text{SiO}_2} = 0.92$) и сапфира ($T_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0.844$) соответственно для ввода/вывода излучения. Излучение с выходного торца световода подавалось на оптический анализатор спектра,

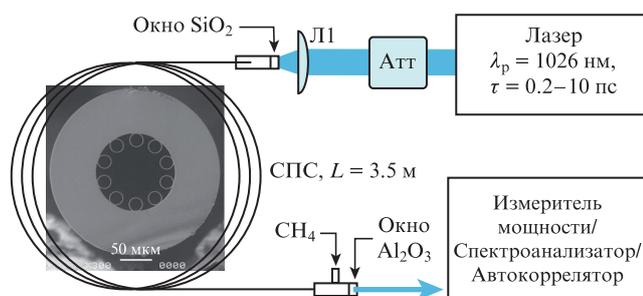


Рис.1. Схема экспериментальной установки: АТТ – аттенуатор; Л1 – фокусирующая линза; СПС – световод с полой сердцевиной. Указаны входное (SiO_2) и выходное (Al_2O_3) окна, а также узел подачи газа (CH_4) в световод. На вставке показано SEM-изображение торца световода.

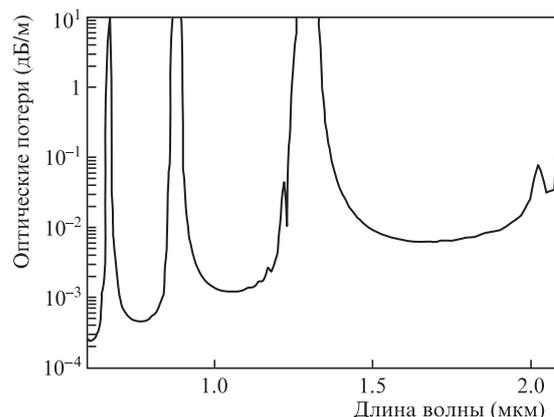


Рис.2. Спектр оптических потерь исследуемого револьверного световода, рассчитанный методом численного моделирования. Поглощение, обусловленное наличием метана, не показано.

автокоррелятор или измеритель мощности. При измерении мощности стоксовой компоненты ($\lambda_{st} = 1.464$ мкм) излучение накачки ($\lambda_p = 1.026$ мкм) отфильтровывалось кремниевой пластинкой.

Спектр оптических потерь для основной моды световода рассчитывался с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics. Теоретические оценки потерь основной моды составили 1.2 и 12 дБ/км на длине волны 1.026 и 1.464 мкм соответственно (рис.2). Материальные потери, обусловленные поглощением на колебательно-вращательных переходах молекул метана при температуре $T = 296$ К и давлении $p = 15$ атм, составляли 0.15 ($\lambda_p = 1.026$ мкм) и 0.53 дБ/м ($\lambda_{st} = 1.464$ мкм) [19].

3. Результаты и их обсуждение

Для выявления нелинейных эффектов, доминирующих при распространении chirпированных импульсов в заполненном метаном световоде, был исследован спектральный состав излучения на выходе световода.

В случае спектрально ограниченных импульсов входного излучения ($\tau_0 = 207$ фс, $\lambda_p = 1.026$ мкм) повышение энергии входного импульса до $E_p \geq 1$ мкДж, что соответствует интенсивности $I_p \geq 2 \times 10^{11}$ Вт/см², приводило, в первую очередь, к уширению выходного спектра на длине волны накачки (рис.3,а–в). Когда энергия в импульсе E_p достигала уровня порядка 1 мкДж, наблюдался порог ВКР, сопровождающийся генерацией стоксова излучения в спектральной области около 1.464 мкм (рис.3,в). Длина волны $\lambda_{st} = 1.464$ мкм соответствует рассеянию излучения накачки ($\lambda_p = 1.026$ мкм) на симметричных колебаниях C–H-связей в молекулах метана ($\Omega_R = 2917$ см⁻¹). Видно, что спектр стоксова излучения заметно уширен уже на пороге ВКР. При дальнейшем росте энергии входного импульса E_p наблюдалось более значительное уширение спектра, которое переходило в режим генерации многозонного суперконтинуума при $E_p \geq 5$ мкДж ($I_p \geq 10^{12}$ Вт/см²) (рис.3,з) [20]. Отметим, что провалы в выходном спектре, наблюдающиеся в областях $\lambda \approx 0.9$ и 1.3 мкм в режиме генерации суперконтинуума (рис.3,з), соответствуют областям высоких оптических потерь в спектре пропускания полого световода (см. рис.2). Длинноволновая граница суперконтинуума ($\lambda \approx 1.62$ мкм) объясняется поглощением в метане, молекулы которого в спектральной области $\lambda \approx 1.62 - 1.84$ мкм обладают дипольно-активными переходами с коэффициентами поглощения

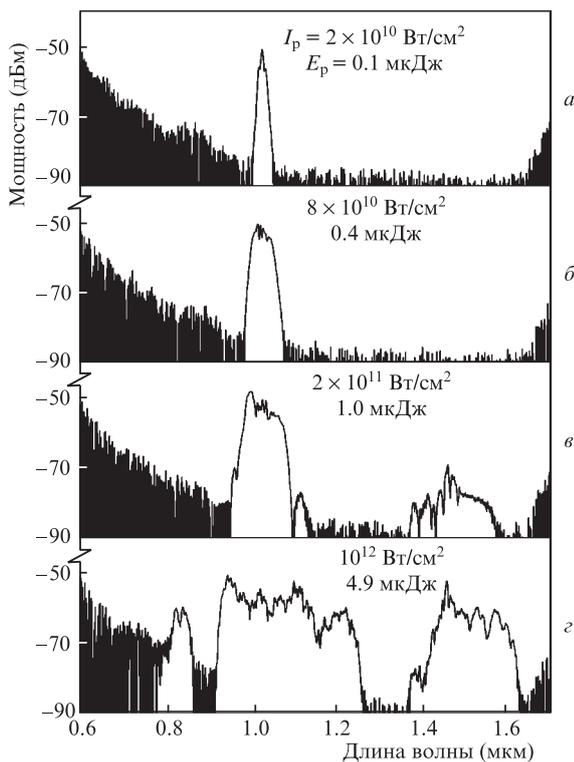


Рис.3. Спектры, измеренные на выходе револьверного световода, заполненного метаном при комнатной температуре и давлении $p = 15$ атм, при накачке спектрально ограниченными импульсами ($\tau_0 = 207$ фс, $\lambda_p = 1.026$ мкм) с различными энергиями и интенсивностями.

4 – 440 дБ/м (при давлении $p = 15$ атм и температуре $T = 296$ К) [19].

Влияние длительности частотно-модулированных (чирпированных) импульсов накачки на режим их распространения изучалось при $E_p = 2$ мкДж, введенной в заполненный метаном световод. Спектры выходного излучения выявили наличие двух режимов распространения (рис.4). При длительности чирпированных импульсов $\tau \geq 1.5$ пс ($I_p \leq 5 \times 10^{10}$ Вт/см²) преобладает колебательное ВКР, что справедливо как для отрицательных, так и для положительных значений коэффициента частотной модуляции C (рис.4,а,д). С уменьшением длительности чирпированных импульсов накачки ($\tau < 1.5$ пс) ВКР сопровождается заметным уширением спектра, которое наблюдается в области как длины волны накачки, так и стоксовой волны (рис.4,б,з). Мы связываем это уширение спектра, в первую очередь, с влиянием фазовой самомодуляции, вклад которой становится максимальным для случая спектрально ограниченных входных импульсов накачки (рис.4,в).

Таким образом, исследование спектрального состава выходного излучения показало, что увеличение длительности импульсов накачки с $\tau_0 = 207$ фс ($I_p \approx 4 \times 10^{11}$ Вт/см²) до значений, превышающих 1.5 пс ($I_p \approx 0.5 \times 10^{11}$ Вт/см²), позволяет целенаправленно преобразовывать излучение накачки в излучение на стоксовой длине волны за счет ВКР на колебаниях молекул метана.

Зависимость длительности входных и выходных импульсов от коэффициента чирпа импульсов накачки $|C| = \sqrt{(\tau/\tau_0)^2 - 1}$ представлена на рис.5. Видно, что длительности импульсов на длине волны накачки на выходе и на входе в полый световод практически не различаются. Это говорит о том, что при длинах световода около 3.5 м волноводная дисперсия практически не влияет на распро-

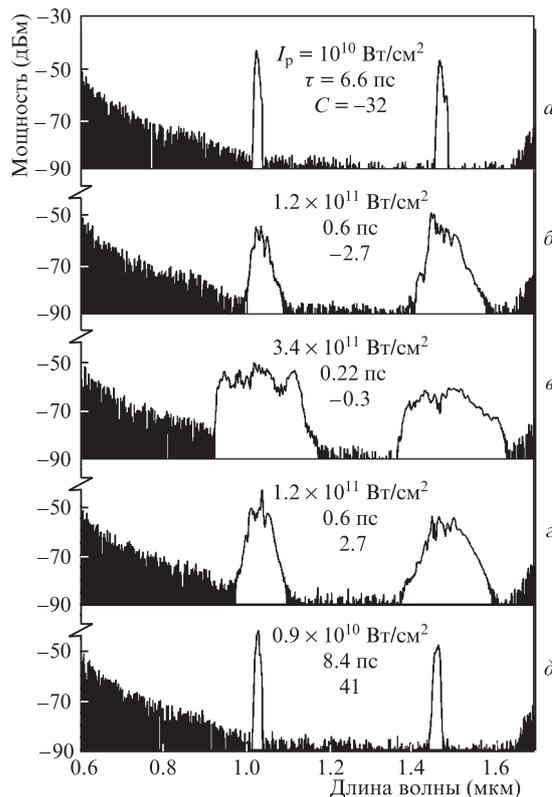


Рис.4. Спектры, измеренные на выходе револьверного световода, заполненного метаном при комнатной температуре и $p = 15$ атм, при накачке линейно чирпированными импульсами ($\lambda_p = 1.026$ мкм, $E_p = 2$ мкДж) с различными интенсивностями.

странение импульсов на длине волны 1.026 мкм. В то же время длительность выходных импульсов на стоксовой длине волны примерно в 2.5 раза меньше длительности импульсов накачки. По-видимому, это связано с тем, что энергия переднего фронта импульсов накачки уходит на раскачку молекулярных колебаний и, таким образом, не преобразуется в импульсы на стоксовой длине волны.

Необходимо отметить, что в случае чирпированных импульсов накачки уменьшение длительности импульса при ВКР-преобразовании сопровождается сужением ширины спектра на стоксовой длине волны. Этот эффект препятствует последующему сжатию стоксова импульса

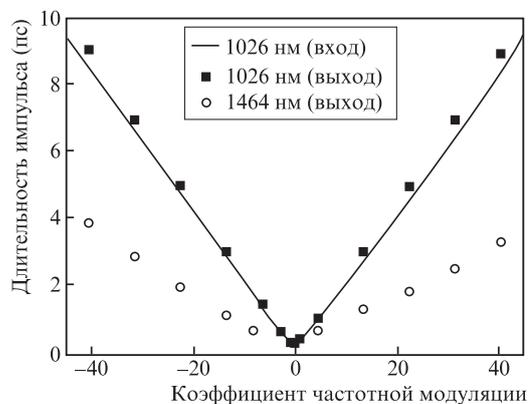


Рис.5. Зависимости длительности импульсов от коэффициента частотной модуляции импульсов накачки: входных (сплошная линия) и выходных импульсов накачки (квадраты), а также выходных импульсов на стоксовой длине волны (кружки).

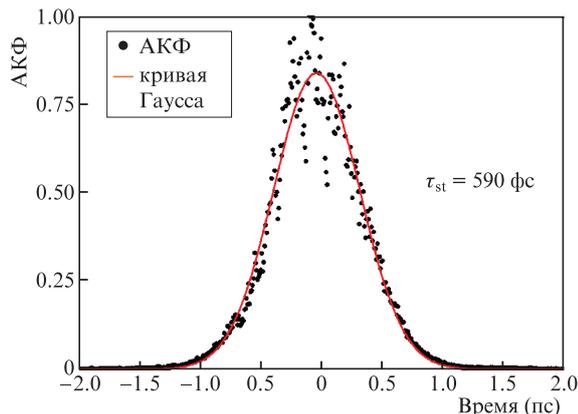


Рис.6. Автокорреляционная функция выходных импульсов на $\lambda_{st} = 1.464$ мкм при накачке полого световода chirпированными импульсами длительностью $\tau = 1.7$ пс ($\lambda_p = 1.026$ мкм, $I_p \approx 4.4 \times 10^{10}$ Вт/см², $C = -8$).

до длительности, соответствующей исходному спектрально ограниченному импульсу накачки. Для решения этой проблемы при неволноводном распространении излучения в объемной среде приходится разрабатывать специальные приемы [7]. Однако, как видно на рис.4,б,з, в полых световодах может осуществляться режим совместного действия ВКР и ФСМ, при котором ширина спектра стоксовых импульсов превышает ширину спектра накачки, что может быть использовано для последующего сжатия таких импульсов.

Отметим, что при длительности импульсов накачки более 1.5 пс ($\lambda_p = 1.026$ мкм, $I_p < 5 \times 10^{10}$ Вт/см²), когда доминирующим нелинейным эффектом является ВКР, автокорреляционная функция (АКФ) стоксовых импульсов ($\lambda_{st} = 1.464$ мкм) хорошо описывается функцией Гаусса. Характерная АКФ для случая $\tau_1 = 1.7$ пс ($I_p \approx 4.4 \times 10^{10}$ Вт/см², $C = -8$) показана на рис.6. Длительность стоксовых импульсов составила 590 фс.

Наиболее эффективное преобразование 1.026 → 1.464 мкм наблюдалось в том случае, когда длительность chirпированных импульсов накачки на $\lambda_p = 1.026$ мкм соответствовала режиму доминирования ВКР над ФСМ ($\tau \geq 1.5$ пс, $|C| \geq 7$). Характерная зависимость квантовой эффективности от энергии импульсов накачки, удовлетворяющая этому условию, представлена на рис.7 для длительности импульсов накачки $\tau = 3.6$ пс ($C = -17$). Максимальное значение квантовой эффективности составило 41% и достигалось при накачке световода импульсами с энергией 6 мкДж ($I_p \approx 6 \times 10^{10}$ Вт/см²). При дальнейшем росте энергии импульсов накачки наблюдалось снижение квантовой эффективности, которое мы связываем с погло-

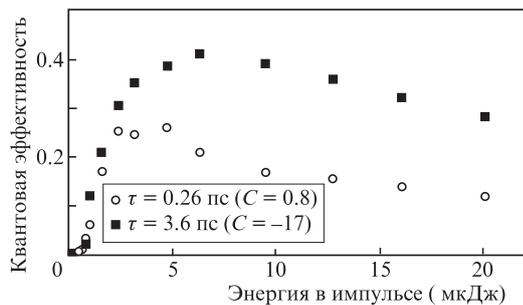


Рис.7. Зависимость квантовой эффективности ВКР в световоде, заполненном метаном при давлении 15 атм, от энергии в chirпированном импульсе накачки ($\lambda_p = 1.026$ мкм) длительностью 0.26 и 3.6 пс.

щением молекулами метана на стоксовой длине волны (поглощение 0.53 дБ/м при давлении $p = 15$ атм). В тех случаях, когда длительность импульсов накачки была существенно меньше 1.5 пс, квантовая эффективность ВКР заметно снижалась. Этот факт объясняется влиянием фазовой самомодуляции, которая значительно уширяет спектр, что приводит к потерям энергии в областях сильного поглощения полого световода (см. рис.2), а также в области полос поглощения метана (при $\lambda > 1.62$ мкм).

4. Заключение

Экспериментально показано, что длительность фемто- и пикосекундных импульсов накачки, регулируемая с помощью линейной частотной модуляции, позволяет контролировать конкуренцию нелинейных эффектов ВКР и ФСМ в газонаполненных световодах с полой сердцевинной. На примере револьверного световода, заполненного метаном при давлении 15 атм, продемонстрированы режимы преобразования chirпированных импульсов ($\lambda_p = 1.026$ мкм), такие как ВКР-генерация фемтосекундных импульсов на стоксовой длине волны ($\lambda_{st} = 1.464$ мкм) и генерация многозонного суперконтинуума. В режиме ВКР-генерации 1.026 → 1.464 мкм получена квантовая эффективность 41% и минимальная длительность стока импульса 590 фс. Эти результаты свидетельствуют о перспективах газонаполненных револьверных световодов для эффективной ВКР-генерации фемтосекундных импульсов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-12-00361).

1. Sugioka K., Cheng Y. *Light Sci. Appl.*, **3**, e149 (2014).
2. Jiang L., Wang A.-D., Li B., et al. *Light Sci. Appl.*, **7**, 17134 (2018).
3. Krylov V., Ollikainen O., Wild U., Rebane A., Bepalov V.G., Staselko D.I. *J. Opt. Soc. Am. B*, **15**, 2910 (1998).
4. Jordan C., Stankov K.A., et al. *Appl. Phys. B*, **59**, 471 (1994).
5. Zhavoronkov N., Noack F., Petrov V., et al. *Opt. Lett.*, **26**, 47 (2001).
6. Konyashchenko A.V. et al. *Opt. Express*, **15**, 11855 (2007).
7. Диденко Н.В., Конященко А.В., Кострюков П.В., Лосев Л.Л., Пазюк В.С., Теняков С.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **45** (12), 1101 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (12), 1101 (2015)].
8. Vicario C., Shalaby M., et al. *Opt. Lett.*, **41**, 4719 (2016).
9. Конященко А.В., Кострюков П.В., Лосев Л.Л., Пазюк В.С. *Квантовая электроника*, **47** (7), 593 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (7), 593 (2017)].
10. Дианов Е.М., Мамышев П.В., Прохоров А.М., Фурса Д.Г. *Письма в ЖЭТФ*, **46** (10), 383 (1987).
11. Köttig F., Tani F., Biersach C.M., et al. *Optica*, **4** (10), 1272 (2017).
12. Ermolov A., Mak K.F., Frosz M.H., Travers J.C., Russell P.St.J. *Phys. Rev. A*, **92**, 033821 (2015).
13. Mak K.F., Travers J.C., et al. *Opt. Express*, **21**, 10942 (2013).
14. Zhavoronkov N., Korn G. *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 203901 (2002).
15. Belli F., Abdolvand A., Chang W., Travers J.C., Russell P.St.J. *Optica*, **2**, 292 (2015).
16. Kergoustin D., Amrani F., Debord B., G r me F., Benabid F. *Proc. 2019 Conf. Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conf.* (Optical Society of America, 2019, OSA Techn. Dig., paper cd_3_5).
17. Kergoustin D., Amrani F., Debord B., G r me F., Benabid F. *Proc. 2019 Conf. Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conf.* (Optical Society of America, 2019, OSA Techn. Dig., paper cd_9_6).
18. Bufetov I.A., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Gladyshev A.V., Kolyadin A.N., Krylov A.A., et al. *Fibers*, **6**, 39 (2018).
19. Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C., et al. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **203**, 3 (2017).
20. Яценко Ю.П., Плетенева Е.Н., Охримчук А.Г. и др. *Квантовая электроника*, **47** (6), 553 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (6), 553 (2017)].