Когерентный суперконтинуум среднего ИК диапазона в световоде с полой сердцевиной, заполненной смесью дейтерия и азота

Ю.П.Яценко, А.В.Гладышев, И.А.Буфетов

Численно исследовано преобразование энергии в область среднего ИК диапазона (более 2.2 мкм) при накачке чирпированными пикосекундными импульсами на длине волны 1.56 мкм газонаполненного револьверного световода с полой сердцевиной. Показано, что комбинированный каскадный ВКР-процесс на колебательно-вращательных уровнях в смеси D_2–N_2 повышает степень когерентности суперконтинуума и максимальные значения квантовой эффективности ВКР-преобразования по сравнению с однокаскадным процессом в дейтерии. Продемонстрирована возможность получения в трехмикрометровом диапазоне волн суперконтинуума с шириной спектра 1800 нм и с максимальной квантовой эффективностью преобразования 48% в области парциальных давлений D_2 и N_2 до 50 атм.

Ключевые слова: *когерентный суперконтинуум, вынужденное комбинационное рассеяние, колебательно-вращательные уровни, газонаполненный световод с полой сердцевиной, чирпированные пикосекундные импульсы.*

1. Введение

Источники когерентного суперконтинуума, генерирующие мощные фемтосекундные импульсы порядка одного периода световой волны в области 3–5 мкм среднего ИК диапазона, востребованы в когерентной томографии и во многих приложениях молекулярной спектроскопии высокого разрешения [1–4]. Из-за отсутствия в этой области спектра мощных лазеров ультракоротких импульсов (УКИ) при разработке таких источников используются, как правило, лазеры ближнего ИК диапазона, спектр излучения которых затем преобразовывается в область среднего ИК в различных нелинейных средах [5–9]. В последнее время существенный прогресс на пути к получению одноперiодных импульсов в этом диапазоне достигнут при использовании параметрической генерации в нелинейных кристаллах для преобразования спектра с последующим уширением преобразованного спектра импульса в газонаполненном антирезонансном световоде револьверного типа [5, 6, 9]. Преимуществом такого подхода, несомненно, является возможность получения от параметрического генератора перестраиваемых спектрально-ограниченных УКИ в среднем ИК диапазоне, спектр которых относительно легко дополнительно уширить в световоде, заполненном инертным газом, с использованием только керровской нелинейности. В работе [5] от параметрического источника были получены импульсы длительностью 97 фс с энергией 131 мкДж на длине волны 3.25 мкм. Импульсы затем подавались в антирезонансный световод, состоящий из одного слоя капилляров толщиной 1.2 мкм, с сердцевиной 80 мкм, заполненной аргоном под давлением 14 бар. При длине световода 16.9 см получено не только уширение спектра фазовой самомодуляцией, но и сжатие импульса в солитонном режиме до 14.5 фс.

В другом альтернативном подходе для передачи энергии лазерных импульсов из ближнего ИК диапазона в более длинноволновый диапазон используется механизм вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в самом антирезонансном световоде, заполненном легкими газами, обладающими большими стоксовыми сдвигами колебательных уровней (H_2, D_2, N_2, CH_4) [10–15]. Этот метод технически более прост, однако для эффективного ВКР-преобразования широкого спектра фемтосекундных импульсов требуется предварительное их чирпирование [12–15]. Кроме того, получение когерентного суперконтинуума на стоксовых сдвигах при уширении спектра в газонаполненном световоде затруднено из-за сложного взаимодействия между ВКР и керровскими нелинейными процессами [14]. В работе [13] спектрально-ограниченные импульсы длительностью 250 фс от иттербиевого лазерного источника на длине волны 1.03 мкм были линейно чирпированы с увеличением длительности до 10 пс. В револьверном световоде, заполненном дейтерием под давлением 5 атм, в результате двухкаскадного процесса 1.03 → 1.49 → 2.68 мкм на длине волны 2.68 мкм получены импульсы длительностью 920 фс с энергией 10 мкДж. В работе [14] численно показано, что максимальные квантовые эффективности преобразования во второй стокс для процесса 1.03 → 1.49 → 2.68 мкм в световоде, заполненном дейтерием, достигаются в области параметров, где сильное влияние оказывают фазовая кросс-модуляция, фазовая самомодуляция и четырехволновое смешение, уширяющие спектр в области длин волн накачки и в стоксовых областях. При этом когерентные свойства суперконтинуума определяются длительностью импульса, величиной его чирпа и дисперсионными характеристиками в каждой зоне пропускания световода. При оптимизации этих параметров возможно получение в среднем ИК диапазоне сжатого одиночного импульса длительностью 20 фс с энергией 1.9 мкДж. Однако область параметров,

Ю.П.Яценко, А.В.Гладышев, И.А.Буфетов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М.Дианова, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: yuriya@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 3 февраля 2023 г.

где возможно выделение одиночного импульса, достаточно узкая из-за модуляционной неустойчивости, связанной с четырехволновыми параметрическими процессами, которая ухудшает когерентность суперконтинуума.

В работах [16–20] для передачи энергии в длинноволновый диапазон используются комбинированные каскадные процессы ВКР в газонаполненных световодах с участием колебательных и вращательных переходов одного газа [16, 18, 19] или смеси газов [17, 20].

При накачке на длине волны 1.56 мкм колебательного перехода в дейтерии и вращательных переходов в дейтерии и водороде в смеси D_2-H_2 получена генерация на новых длинах волн (2.9, 3.3, 3.5 мкм) в среднем ИК диапазоне [17]. В этой же D_2-H_2-смеси, но при других давлениях газов и накачке на 1.03 мкм получена генерация на длине волны 3.9 мкм в комбинированном двухкаскадном процессе с участием колебательных переходов в дейтерии (2987 см$^{-1}$) и водороде (4155 см$^{-1}$).

Кроме получения новых длин волн, представляется перспективным использование комбинированных каскадных процессов ВКР с участием колебательных и вращательных уровней для улучшения когерентных свойств суперконтинуума. Вращательные переходы в газах имеют относительно малые стоксовы сдвиги. При накачке импульсами с длительностями меньше периода молекулярных колебаний для вращательного перехода генерация каскадного процесса с участием колебательного и вращательного переходов будет когерентным процессом, способным при достаточной эффективности подавлять шумовые керровские параметрические процессы.

В настоящее время это направление исследовано недостаточно. Имеется лишь небольшое количество публикаций, показывающих перспективы использования колебательных и вращательных ВКР-переходов в газах для получения суперконтинуума с высокой степенью когерентности, однако полученные результаты относятся к коротковолновому диапазону длин волн – от УФ до ближнего ИК

В работе [18] при накачке антирезонансного световода, заполненного водородом под давлением до 10 атм, импульсами длительностью 40 фс на длине волны 1080 нм получена генерация рамановских солитонов на вращательном переходе S(1) орто-H_2 (587 см$^{-1}$) с самосдвигом в длинноволновую область вплоть до 1600 нм. При этом ВКР-процесс на колебательном переходе H_2 (4155 см$^{-1}$), обладающий большим коэффициентом усиления, отсутствовал. Высокая эффективность когерентного ВКР на вращательном переходе S(1) связана с тем, что этот процесс инициируется спектральными компонентами импульса накачки, перекрывающими частотный ВКР-сдвиг ($\tau_p < 1/\Omega_R = 56.8$ фс).

В антирезонансном световоде, заполненном азотом, авторы [19] продемонстрировали переход от частотного комба, состоящего из многочисленных стокс-антистоксовых компонент, образованных ВКР на колебательном переходе азота, к суперконтинууму, формируемому в каскадном процессе ВКР с участием вращательных уровней азота. При накачке импульсами длительностью 20 пс на длине волны 532 нм получен суперконтинуум, перекрывающий спектральные диапазоны 250–360 нм и 440–1200 нм. Авторы показали возможность синхронизации стокс-антистоксовых сдвигов комба, образованного процессом ВКР на колебательном уровне азота, и формирования последовательности УКИ длительностью 2.1 фс, повышающей степень когерентности суперконтинуума.

В настоящей работе численно исследована возможность получения когерентного суперконтинуума в среднем ИК диапазоне при использовании комбинированного каскадного ВКР с участием колебательного уровня дейтерия (2987 см$^{-1}$) и вращательных уровней азота при накачке чирпированными импульсами на длине волны 1.56 мкм револьверного антирезонансного световода, заполненного смесью дейтерия и азота. Для чирпированных гауссовых импульсов длительностью 1 пс с шириной спектра, соответствующей длительности спектрально-ограниченного импульса 100 фс (чирп $C = 10$), показано, что комбинированный каскадный ВКР-процесс в смеси D_2-N_2 повышает степень когерентности суперконтинуума и максимальные значения квантовой эффективности ВКР-преобразования в трехмикрометровую область длин волн по сравнению с однокаскадным процессом в дейтерии.

2. Метод

Для численного анализа преобразования ВКР в револьверном световоде использовалось обобщенное нелинейное уравнение Шредингера для комплексной спектральной огибающей импульса [21], в котором учитывались дисперсия высших порядков, керровская нелинейность и каскадное ВКР на колебательном переходе $Q_1(2)$ молекулы дейтерия и на 30 вращательных S_0-переходах азота. Суммарная функция рамановского отклика $R(t)$ имеет вид [16, 18, 19]

$$R(t) = R_{\rm vib}(t) + R_{\rm rot}(t), \tag{1}$$

где для нелинейной функции отклика дейтерия $R_{\rm vib}(t)$ использовалось выражение

$$R_{\rm vib}(t) = (1 - f_{\rm vib})\delta(t) + f_{\rm vib}h_{\rm vib}(t). \tag{2}$$

Здесь первое слагаемое с дельта-функцией ответственно за эффект Керра, второй член характеризует величину вклада более медленно релаксирующего колебательного отклика дейтерия ($Q_1(2) = 2987$ см$^{-1}$). Функция отклика $h_{\rm vib}(t)$ определялась как

$$h_{\rm vib}(t) = \Omega^2\tau_{\rm svib}\exp\left(-\frac{t}{\tau_{\rm dvib}}\right)\sin\left(\frac{t}{\tau_{\rm svib}}\right), \tag{3}$$

где $\Omega^2 = \tau_{\rm svib}^{-2} + \tau_{\rm dvib}^{-2}$; $\tau_{\rm svib} = 1/\omega_R$; $\omega_R = 5.626\times10^{14}$ с$^{-1}$ – циклическая частота ВКР-сдвига; $\tau_{\rm dvib} = T_2$; T_2 – время поперечной релаксации дипольного момента возбужденного колебательного уровня. При определении T_2 учитывалась зависимость ширины линии ВКР-перехода $\Delta\nu_R$ в дейтерии от плотности числа частиц ρ [22], $\Delta\nu_R$[MHz] = $101/\rho$[amg] + 120ρ[amg], где значение $\Delta\nu_R$ по полувысоте дано в мегагерцах, а ρ – в амагатах.

Коэффициент $f_{\rm vib}$, характеризующий вклад ВКР в величину нелинейного показателя преломления, и нелинейный показатель преломления N_2 определялись в соответствии с работой [23], в которой при 1 атм дейтерия в фемтосекундном диапазоне длительностей раздельно измерены вклады в нелинейный показатель преломления дейтерия электронной керровской нелинейности ($N_{2K} = 5.8\times$

10^{-24} м^2/Вт) и колебательной нелинейности (N_{2vib} = 1.2 × 10^{-24} м^2/Вт) ВКР. При изменении давления для N_{2K} использовалась линейная зависимость от давления p. Зависимость N_{2vib} от p определялась с учетом зависимости от давления ширины линии ВКР-перехода $\Delta\nu_R$ и населенности колебательного уровня.

Вклад вращательных компонент молекулы D_2 не учитывался. Это связано с тем, что из-за большего частотного сдвига ($S_0(3)$ = 529 см$^{-1}$) по сравнению с вращательными переходами N_2 ($S_0(8)$ = 75.6 см$^{-1}$) пороги их возбуждения из спонтанного шума гораздо выше порогов возбуждения вращательного ВКР в азоте, инициируемого спектральными компонетами используемых в данной работе импульсов накачки с шириной спектра 147 см$^{-1}$. Вклад колебательного ВКР в азоте (2330 см$^{-1}$) также не был учтен, поскольку потери в световоде на длине волны 2.45 мкм (2.3 дБ/м), соответствующей этому сдвигу, в 21 раз превышают потери на длине волны 2.92 мкм колебательного отклика дейтерия.

Нелинейная функция для вращательного ВКР в азоте имеет вид, аналогичный (2):

$$R_{rot}(t) = (1 - f_{rot})\delta(t) + f_{rot}h_{rot}(t). \quad (4)$$

Здесь функция $h_{rot}(t)$, характеризующая суммарный вклад от 30 S_0-компонент вращательного ВКР в нелинейный показатель преломления, определяется как [16, 18, 19]

$$h_{rot}(t) = \sum_J A_J \exp\left(-\frac{t}{\tau_{drot}(J)}\right)\sin\left(\frac{t}{\tau_{srot}(J)}\right), \quad (5)$$

где

$$A_J = (N_{J+2} - N_J)q_J\frac{(J+2)(J+1)}{(2J+3)}$$

характеризует интенсивность вращательного перехода $\omega_J = 2Bc(2J + 3)$, определяемого правилами отбора $\Delta J = \pm 2$, с энергией $E_J = J(J + 1)Bhc$;

$$N_J = \exp\left[-\frac{hcBJ(J+1)}{KT}\right]$$

– населенность молекул азота на уровне J; K – константа Больцмана; T – температура газа; B = 1.99 см$^{-1}$ – вращательная константа азота; h – постоянная Планка; $q_J = 1, 2$ соответственно для нечетных и четных J; $\tau_{srot}(J) = [4\pi Bc(2J + 3)]^{-1}$; $\tau_{drot}(J)$ – время поперечной релаксации уровня J, зависящее от температуры и давления газа. Для коэффициента f_{rot}, характеризующего суммарный вклад вращательного ВКР в нелинейный показатель преломления, использовалось значение 0.5 [24].

Численный анализ проводился в среде MATLAB для фундаментальной моды световода с учетом спектральных зависимостей эффективной площади моды $A_{eff}(\omega)$, волноводных потерь $\alpha(\omega)$ и эффективного показателя преломления $n_{eff}(\omega)$. Спектральный диапазон (0.8–4.9 мкм) содержал три первых зоны пропускания, максимальный временной интервал составлял 90 пс с минимальным размером сетки 0.7 фс. В расчетах основные результаты получены для входных положительно чирпированных гауссовых импульсов с амплитудой $E(t) = \sqrt{P}\exp\{-0.5[(t + iC)/T_0]^2\}$, у которых мощность P = 50 МВт, длительность по полувысоте $\tau_{FWHM} = 1.665T_0$ = 1 пс и чирп C = 10 (спектральная ширина таких импульсов соответствует спектрально-ограниченному импульсу 100 фс).

3. Световод

Параметры 10-капиллярного револьверного световода с полой сердцевиной (СПС) с диаметром сердцевины 75 мкм и толщиной стенки капилляров 1.15 мкм соответствуют изготовленному СПС, который использовался в работе [13]. Волноводные и дисперсионные характеристики были рассчитаны методом конечных элементов с использованием стандартного пакета COMSOL. На рис.1 (черные кривые) показаны теоретические потери фундаментальной моды для спектрального интервала, соответствующего первым трем зонам пропускания. Длины волн накачки (1.56 мкм) и первого стоксова сдвига в дейтерии (2.92 мкм) находятся в области минимальных потерь соответственно во 2-й и 1-й зонах световода. Теоретические потери на длинах волн накачки и стокса составили соответственно 0.0024 и 0.11 дБ/м. На длине волны первого антистокса в дейтерии 1.064 мкм (3-я зона пропускания) потери составили 0.001 дБ/м. Длина волны второго антистокса (808 нм) попадает в полосу поглощения (потери больше 40 дБ/м), что значительно снижает эффективность передачи энергии в антистоксову область за счет когерентных четырехфотонных процессов.

При расчете дисперсионных свойств световода учитывался вклад волноводной дисперсии, дисперсии дейтерия [25] и дисперсии азота [26]. На рис.1 (красные кривые) показано, как изменяется квадратичная дисперсия основной моды в области длин волн накачки, первого стокса и первого антистокса в смеси D_2–N_2 при давлении дейтерия 50 атм и азота 30 атм. Дисперсия на длинах волн накачки и первых стокс-антистоксовых сдвигов имеет отрицательные значения, которые составили соответственно –0.6, –2.4 и –0.56 пс^2/км.

4. Результаты численного анализа и их обсуждение

Численный анализ комбинированного ВКР-процесса на колебательном уровне Q(2) дейтерия 1.56–2.92 мкм с

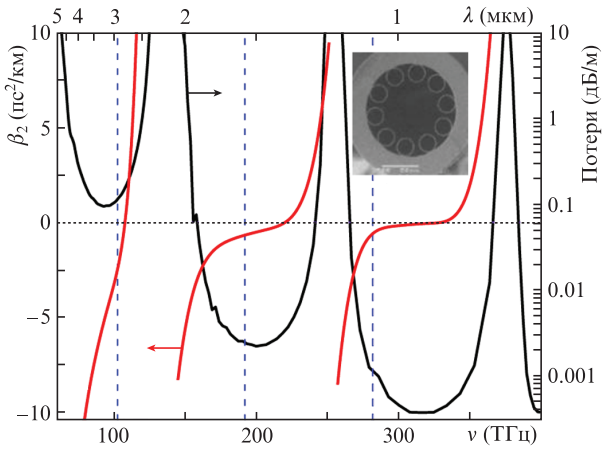

Рис.1. Волноводные потери основной моды полого световода в области 0.8–5 мкм (черные кривые) и дисперсия основной моды в зависимости от длины волны при давлении дейтерия 50 атм и азота 30 атм для первых трех зон пропускания (красные кривые); на вставке – электронная фотография поперечного сечения световода. Вертикальными штриховыми линиями обозначены длины волн накачки (1.56 мкм), стоксовой (2.92 мкм) и антистоксовой (1.064 мкм) компонент, пунктирная линия соответствует нулевому значению дисперсии.

участием 30 вращательных стоксовых сдвигов S_0-ветви азота в газонаполненном полом световоде выполнен для фиксированной энергии 50 мкДж входных чирпированных импульсов длительностью 1 пс (чирп $C = 10$) при различных давлениях газа в области 5–100 атм. Для каждого давления газа осуществлялся поиск оптимальной длины световода, на которой квантовая эффективность преобразования в спектральный диапазон более 2.2 мкм (по отношению к входной энергии импульсов на длине волны накачки 1.56 мкм) достигала максимального значения. Чтобы определить оптимальное соотношение парциальных давлений смеси $D_2 - N_2$, были исследованы эффективность преобразования в область длин волн, превышающих 2.2 мкм, и когерентные свойства суперконтинуума в зависимости от давления отдельно для дейтерия и азота.

Основные результаты, полученные при заполнении полого световода только дейтерием приведены на рис.2–4. Из рис.2,*а* следует, что максимальные значения квантовой эффективности преобразования в область длин волн свыше 2.2 мкм (25%–35%) при накачке на 1.56 мкм находятся в области давлений дейтерия 15–50 атм. На рис.3 приведены денситограмма прохождения импульса по световоду и распределение квантовой эффективности преобразования на длине 2 м при давлении дейтерия 50 атм. На начальных длинах происходит уширение спектра накачки фазовой самодуляцией, которое после 0.7 м сопровождается перекачкой энергии в процессе ВКР в стоксову область (2.9 мкм) из коротковолновой части спектра накачки, находящейся на заднем фронте положительно чирпированного импульса. После прохождения длины световода 1 м развивается антистоксово излучение на длине волны 1.064 мкм в результате когерентного четырехфотонного процесса $\omega_{1.064} = 2\omega_{1.56} - \omega_{2.92}$. Модуляционная неустойчивость, вызываемая четырехфотонными процессами в области отрицательной дисперсии, приводит к распаду временной огибающей на многочисленные солитоноподобные импульсы и значительному уширению спектра после 1.2 м. Когерентные свойства суперконтинуума зависят от того, какой вклад в модуляционную неустойчивость вносят некогерентные четырехфотонные процессы [27], возникающие в области отрицательной дисперсии на длине световода $L_{sp} \approx 16L_{nl}$. Для импульсов длительностью 1 пс с энергией 50 мкДж, рас-

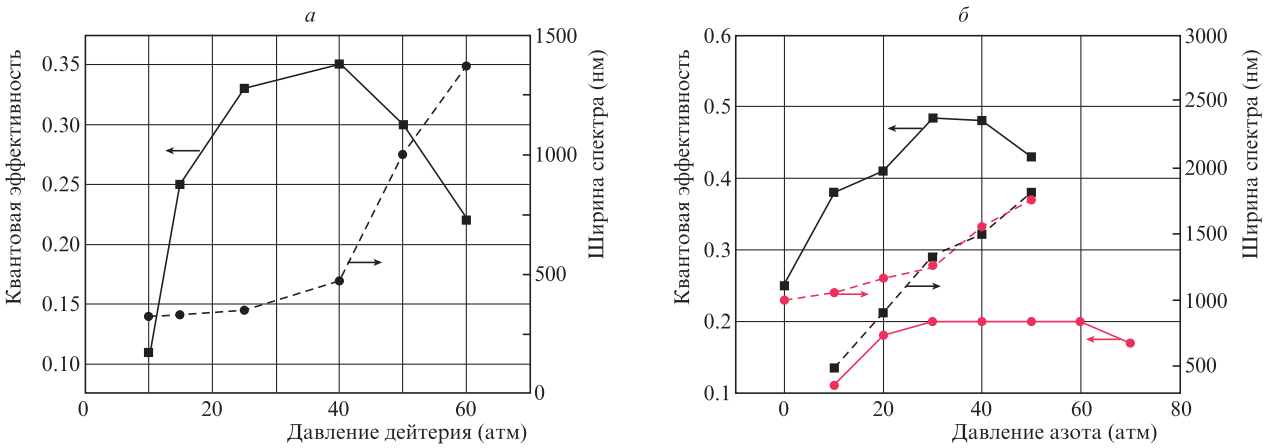

Рис.2. Квантовая эффективность преобразования спектра в область длин волн свыше 2.2 мкм и ширина спектра в среднем ИК диапазоне при накачке 1.56 мкм в зависимости от давления дейтерия (*а*) и азота (*б*). Кривые на рис.2,*а* получены при заполнении световода только дейтерием; на рис.2,*б* красные кривые получены при заполнении световода только азотом, а черные кривые – смесью $D_2 - N_2$ при неизменном давлении дейтерия 50 атм. Энергия входных импульсов 50 мкДж, длительность 1 пс (чирп $C = 10$).

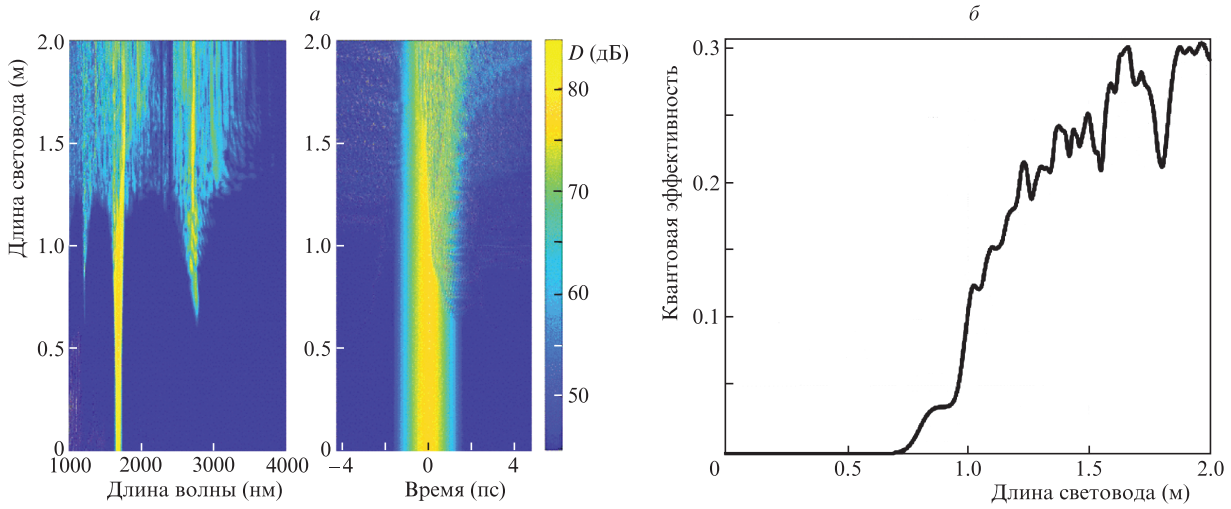

Рис.3. Денситограмма прохождения импульса по световоду (*а*) и квантовая эффективность преобразования в область среднего ИК диапазона (более 2.2 мкм) (*б*) при накачке чирпированными импульсами длительностью 1 пс (чирп $C = 10$) на длине волны 1.56 мкм. СПС заполнен дейтерием при давлении 50 атм; энергия накачки 50 мкДж.

пространяющихся в револьверном световоде, заполненном дейтерием под давлением 50 атм, нелинейная длина $L_{nl} = 1/(\gamma_p P_p)$, где γ_p – коэффициент нелинейности и P_p – мощность накачки, составляет 4.2×10^{-2} м ($\gamma_p = 2\pi N_{2K} \times (\lambda_p A_{eff})^{-1} \approx 4.73 \times 10^{-7}$ м$^{-1}\cdot$Вт$^{-1}$, $A_{eff} = 2470$ мкм^2, $\lambda_p = 1.56$ мкм, $N_{2K} = 5.8 \times 10^{-24}$ м^2/(Вт$\cdot$атм), $P_p = 50$ МВт). Развитие модуляционных четырехволновых процессов из спонтанного шума происходит на длине световода $L_{sp} = 0.69$ м практически одновременно с достижением порога ВКР (рис.3).

Отсюда следует, что при заполнении полой сердцевины только дейтерием усиливающие спонтанный шум четырехволновые процессы могут оказывать существенное негативное влияние на когерентные свойства уширенного спектра. Это подтверждают результаты исследования когерентности суперконтинуума, приведенные на рис.4.

Для оценки степени когерентности использовалась корреляционная функция первого порядка $|g^{(1)}(\lambda)|$ [27]. Среднее по ансамблю из 200 независимых пар спектральных амплитуд определялось по 20 спектрограммам, полученным с учетом случайного фазового шума. В качестве основного шумового процесса, влияющего на модуляционную неустойчивость, использовался квантовый шум, который вводился аддитивно к амплитуде входного импульса с амплитудой, соответствующей одному фотону в исследуемом частотном интервале, и случайной фазой.

Когерентность спектра оценивалась на длинах световода, соответствующих области максимальной эффективности преобразования в средний ИК диапазон. При этом было выявлено значительное различие в когерентности спектра на длинах световода, меньших оптимальной длины L_{opt}, соответствующей максимальному значению эффективности преобразования ($L < L_{opt}$), и на больших длинах ($L \geqslant L_{opt}$), где по достижении максимума эффективность преобразования снижается. Это являлось характерной особенностью для всей исследуемой области давлений дейтерия и азота.

При заполнении световода только дейтерием оптимальная длина, соответствующая максимальной эффективности преобразования в средний ИК диапазон (30%), для исследуемой области параметров накачки и давления газа составила 1.7 м (рис.3,*б*).

В начале развития суперконтинуума на длине световода 1.1 м, где квантовая эффективность ВКР-преобразования составила 15%, спектр имеет высокую степень когерентности в области длин волн накачки и в узкой области (~300 нм) вблизи длины волны стоксова сдвига 2.92 мкм (рис.4,*а*). На длине световода 1.7 м высокая степень когерентности сохраняется только в узкой области вблизи длины волны накачки (рис.4,*б*).

Таким образом, можно полагать, что снижение эффективности ВКР-преобразования в средний ИК диапазон на длинах, превышающих оптимальную длину, сопровождающееся ухудшением когерентности спектра, вызвано развивающимися из спонтанного шума четырехволновыми процессами, которые начинают играть доминирующую роль в распределении энергии накачки между ВКР-преобразованием в средний ИК диапазон и перекачкой энергии в коротковолновую антистоксову область спектра.

На рис.2, 5 и 6 показаны результаты численного анализа, полученные при заполнении световода только азотом. При изменении давления азота в пределах 10–70 атм квантовая эффективность преобразования в средний ИК диапазон не превышает 20% (рис.2,*б*). Денситограмма прохождения имульса по длине световода, заполненного азотом при 30 атм, показанная на рис.5, имеет заметные различия с денситограммой на рис.3. Можно видеть значительно большее уширение спектра накачки фазовой самомодуляцией на начальном участке 0.7 м световода. Это связано с тем, что уже здесь развивается эффективный каскадный процесс ВКР-преобразования на вращательных сдвигах, попадающих в спектральную полосу импульса накачки, который приводит к смещению спектра в длинноволновую область накачки и образованию рамановских солитонов [28].

Вращательные уровни азота обладают малым частотным сдвигом ($S_0(30) = 250.7$ см$^{-1}$), гораздо меньшим ширины полосы потерь (на границе 1-й зоны пропускания ширина полосы потерь по уровню –10 дБ составляет 24 ТГц (800 см$^{-1}$)). Передача энергии из 2-й зоны пропускания световода, в которой находится накачка, в длинноволновую 1-ю зону пропускания среднего ИК диапазона, а также в более коротковолновые зоны антистоксовой области длин волн осуществляется межзонными каскадными четырехволновыми процессами и генерацией рамановскими солитонами дисперсионных волн [29]. Оценка длины световода, заполненного азотом при дав-

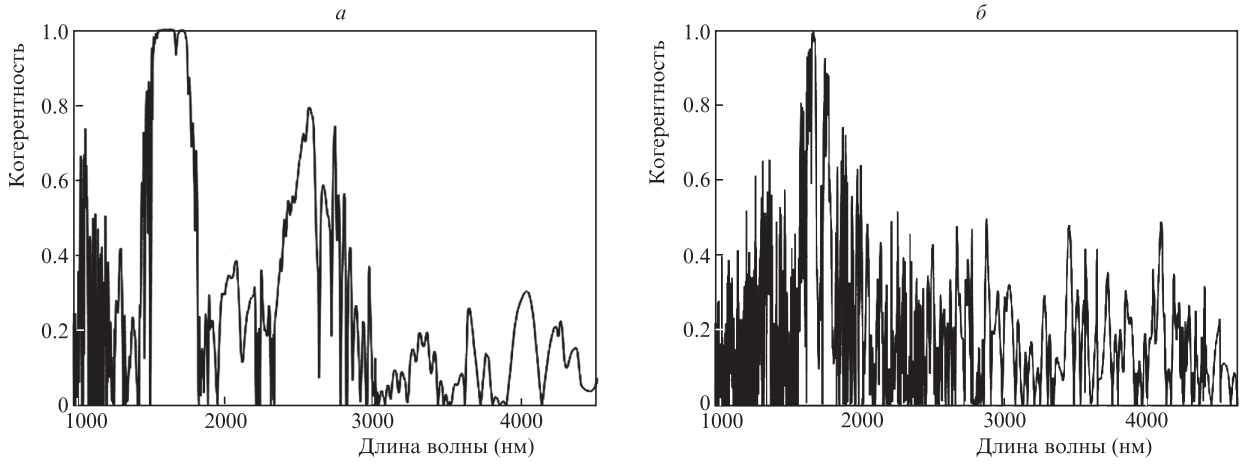

Рис.4. Степень когерентности спектра в области длин волн накачки 1560 нм и среднем ИК диапазоне (более 2.2 мкм) для входных импульсов длительностью 1 пс ($C = 10$) на длине световода 1.1 (*а*) и 1.7 м (*б*). СПС заполнен дейтерием при давлении 50 атм; энергия накачки 50 мкДж.

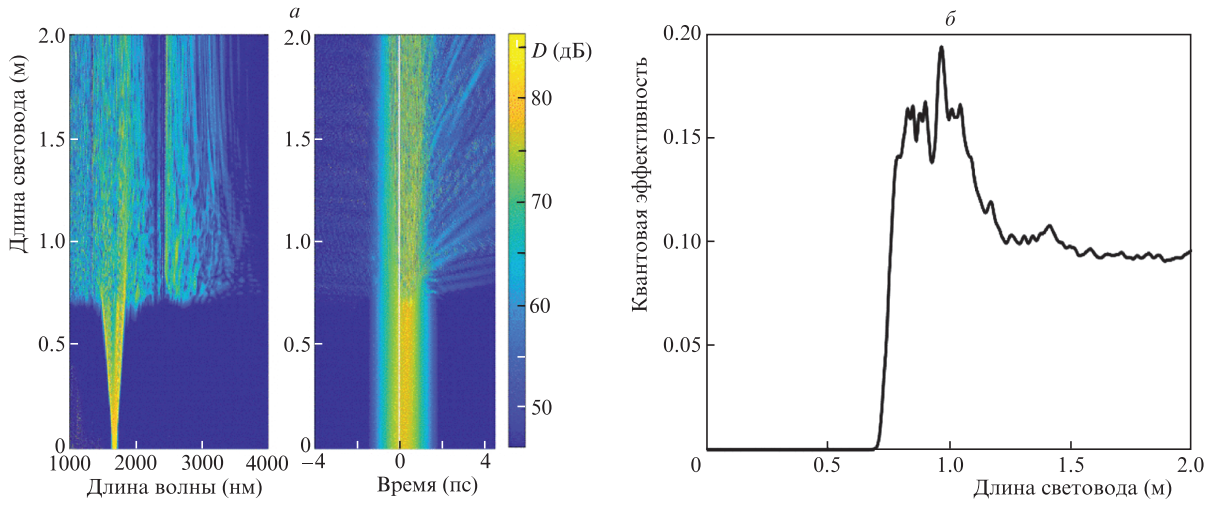

Рис.5. Денситограмма прохождения импульса по световоду (*а*) и квантовая эффективность преобразования в область среднего ИК диапазона (более 2.2 мкм) (*б*) при накачке чирпированными импульсами длительностью 1 пс (чирп $C = 10$) на длине волны 1.56 мкм. СПС заполнен азотом при давлении 30 атм; энергия накачки 50 мкДж.

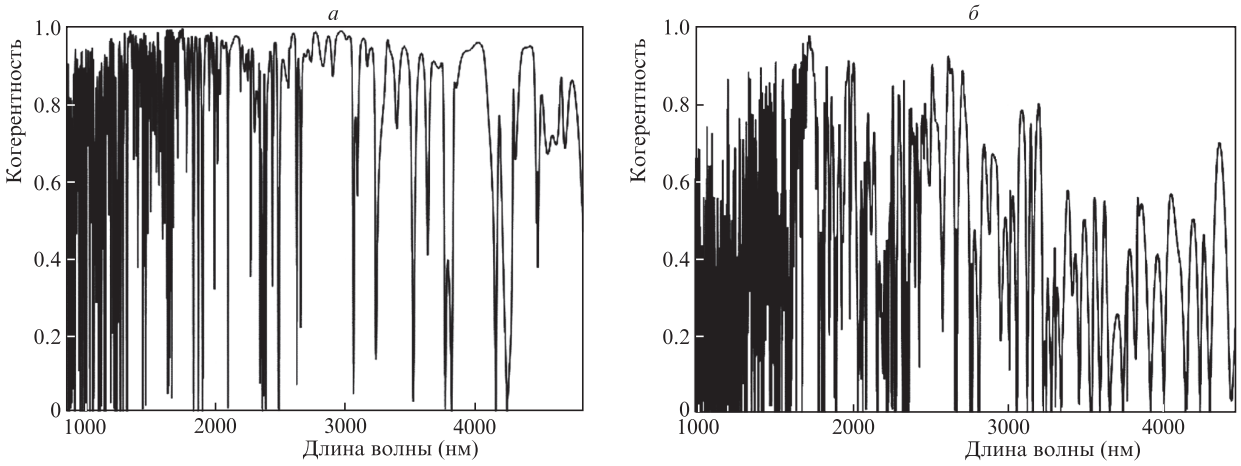

Рис.6. Степень когерентности спектра в области длин волн накачки 1560 нм и среднем ИК диапазоне (более 2.2 мкм) для входных импульсов длительностью 1 пс ($C = 10$) на длине световода 0.8 (*а*) и 0.85 м (*б*). СПС заполнен азотом при давлении 30 атм; энергия накачки 50 мкДж.

лении 30 атм, на которой может развиваться модуляционная неустойчивость, приводящая к разрушению временной структуры и понижению когерентности четырехволновых процессов световода, дает величину $L_{sp} = 0.3$ м ($L_{nl} = 1.78 \times 10^{-2}$ м, $N_{2K} = 2.3 \times 10^{-23}$ м^2/(Вт·атм), $\gamma_p \approx 1.125 \times 10^{-6}$ м$^{-1}\cdot$Вт$^{-1}$, $P_p = 50$ МВт). Из денситограммы (рис.5,*а*) следует, что разрушение огибающей импульса и одновременное сильное уширение спектра происходят на большей длине (свыше 0.7 м), что свидетельствует о меньшем влиянии некогерентных процессов на начальном этапе развития суперконтинуума. Когерентные свойства суперконтинуума при заполнении световода только азотом, оцененные на длинах световода 0.8 и 0.85 м, соответствующих максимальной эффективности преобразования в средний ИК диапазон (более 2.2 мкм), показаны на рис.6. Полученные значения максимальной квантовой эффективности (0.17–0.2) для азота (рис.5,*б*) ниже, чем для дейтерия (рис.3,*б*), однако степень когерентности суперконтинуума для азота гораздо выше (см. рис.4). На длине световода 0.8 м она близка к 100% практически во всем исследуемом диапазоне длин волн. На большей длине (0.85 м) степень когерентности снижается из-за возрастающей роли усиливающих спонтанный шум четырехфотонных процессов, оставаясь все же больше 70% в спектральном диапазоне 2.2–3.2 мкм.

На рис.2, 7 и 8 показаны результаты, полученные при заполнении световода смесью дейтерия и азота с парциальными давлениями 50 и 30 атм соответственно. В диапазоне парциальных давлений азота 10–50 атм при неизменном парциальном давлении дейтерия 50 атм квантовые эффективности преобразования в средний ИК диапазон для смеси D_2–N_2 превышают квантовые эффективности для каждого газа в отдельности (см. рис.2,*б*) и достигают 48% при 30 атм N_2. На рис.7 показано, как развивается суперконтинуум по длине световода при парциальных давлениях дейтерия 50 атм и азота 30 атм.

Передача энергии в область среднего ИК диапазона (2.92 мкм) на колебательном переходе дейтерия и рождение антистоксова излучения (1.064 мкм) начинается уже на длине световода менее 0.4 м при меньшем уширении спектра накачки фазовой самомодуляцией. Сравнение денситограмм на рис.7,*а* и 3,*а* показывает значительно более быстрое уширение спектра в стокс-антистоксовых областях на начальных стадиях ВКР, свидетельствующее о подключении второго ВКР-процесса с участием вращательных переходов в азоте. Модуляционная неустойчи-

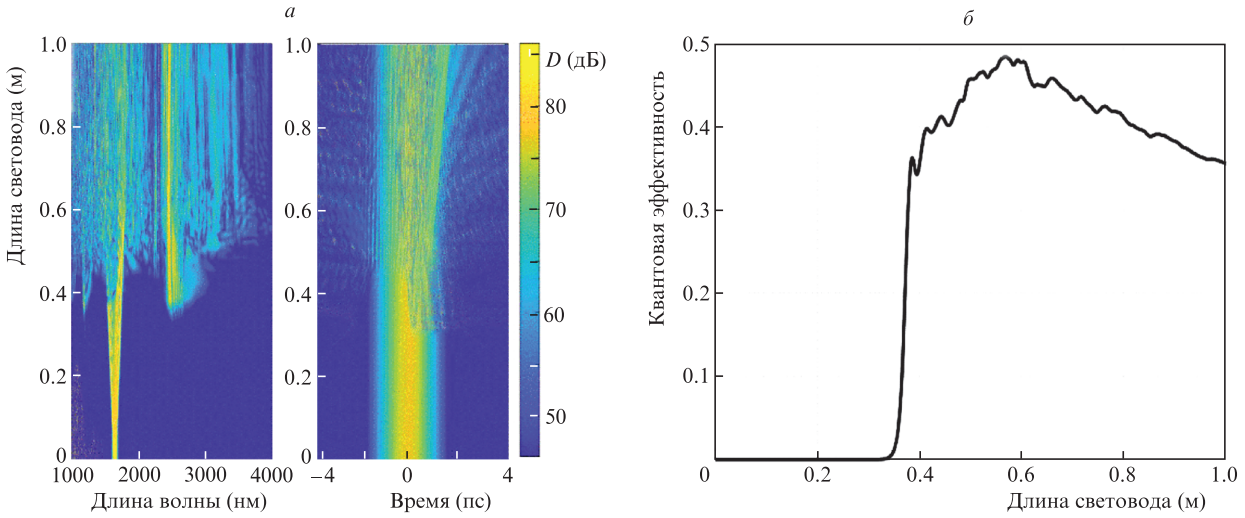

Рис.7. Денситограмма прохождения импульса по световоду (*а*) и квантовая эффективность преобразования в область среднего ИК диапазона (более 2.2 мкм) (*б*) при накачке чирпированными импульсами длительностью 1 пс (чирп $C = 10$) на длине волны 1.56 мкм. СПС заполнен дейтерием при давлении 50 атм и азотом при давлении 30 атм; энергия накачки 50 мкДж.

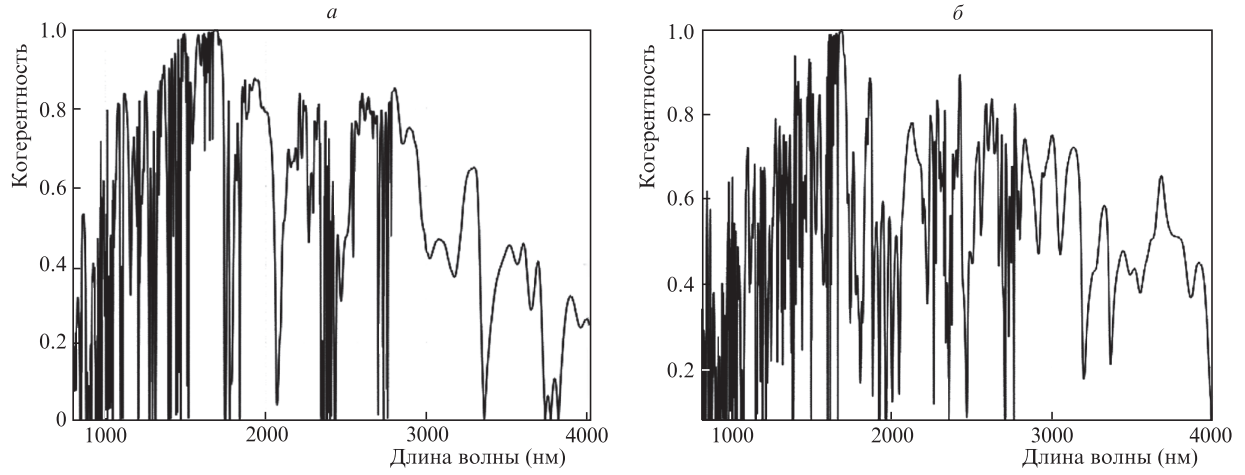

Рис.8. Степень когерентности спектра в области длин волн накачки 1560 нм и среднего ИК диапазона (более 2.2 мкм) для входных импульсов длительностью 1 пс ($C = 10$) на длине световода 0.45 (*а*) и 0.5 м (*б*). СПС заполнен дейтерием и азотом при давлении 50 и 30 атм соответственно; энергия накачки 50 мкДж.

вость приводит к распаду огибающей импульса накачки на рамановские солитоны и превращению спектра в суперконтинуум на длине световода 0.5 м. На длине световода 0.6 м достигается максимум квантовой эффективности преобразования в средний ИК диапазон, при этом суперконтинуум в среднем ИК диапазоне имеет ширину 1258 нм по уровню –20 дБ, перекрывая диапазон длин волн 2200–3550 нм.

Когерентные свойства суперконтинуума исследовались на длинах световода 0.45 и 0.5 м, где квантовые эффективности составляют 0.41 и 0.46 соответственно (рис.8). Степень когерентности для смеси D_2–N_2 более высокая, чем при использовании только дейтерия, достижимые значения в области длин волн среднего ИК диапазона 2.2 – 3.2 мкм превышают 70%–80%. Следует отметить, что повышение когерентности уширенного спектра связано именно с когерентными колебательно-вращательными каскадными процессами, успешно конкурирующими со стохастическими шумовыми четырехволновыми процессами в распаде импульса накачки на солитоны низшего порядка. Оценка, выполненная с учетом используемых параметров накачки и световода, заполненного смесью D_2–N_2, показывает, что эти два процесса имеют сравнимые длины взаимодействия. Так, для когерентного процесса распада солитона высокого порядка с участием высших дисперсионных членов требуется длина взаимодействия $L_{fis} = L_d/N = 0.26$ м, где солитонный параметр $N = (L_d/L_{nl})^{1/2} = 22.7$, $L_d = \tau^2_{FWHM}/[(1.665)^2|\beta_2|(1 + C^2)] = 6$ м, $L_{nl} = 1.2 \times 10^{-2}$ м. Для распада огибающей импульса вследствие модуляционной неустойчивости, вызываемой четырехволновыми процессами, усиливающими спонтанный шум, длина взаимодействия $L_{sp} = 0.18$ м.

5. Заключение

Из результатов численного анализа следует, что при накачке револьверного световода, заполненного смесью D_2–N_2, положительно чирпированными импульсами, ширина спектра которых перекрывает частотные сдвиги вращательного ВКР в азоте, возможно повышение эффективности ВКР-преобразования в средний ИК диапазон на колебательном переходе $Q_1(2)$ в дейтерии. При накачке на длине волны 1.56 мкм импульсами длительностью 1 пс (чирп $C = 10$) с энергией 50 мкДж в области

парциальных давлений смеси D_2-N_2 до 50 атм численно получен суперконтинуум, перекрывающий диапазон 800–4500 нм, при этом ширина спектра в области длин волн более 2.2 мкм составила 1800 нм. Квантовые эффективности преобразования в средний ИК диапазон достигают 48 % на длинах световода до 2 м при давлении дейтерия 50 атм и азота 30 атм, что существенно превышает квантовые эффективности, полученные в одинаковых условиях при использовании только дейтерия. Проведенный сравнительный анализ когерентных свойств суперконтинуума показал увеличение степени когерентности в среднем ИК диапазоне в смеси D_2-N_2 до значения выше 0.8 в полосе частот ~1000 нм, что делает эту смесь особенно перспективной для получения однопериодных импульсов в среднем ИК диапазоне.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-12-00361).

1. Su R., Kirillin M., Chang E.W., Sergeeva E., Yun S.H., Mattsson L. *Opt. Express*, **22**, 1584 (2014).
2. Hartl I., Li X.D., Chudoba C., Ghanta R.K., Ko T.H., Fujimoto J.G. *Opt. Lett.*, **26**, 608 (2001).
3. Nagarajan V., Johnson E., Schellenberg P., Parson W., Windeler R. *Rev. Sci. Instrum.*, **73**, 4145 (2002).
4. Grassani D., Tagkoudi E., Guo H., Herkommer C., Yang F., Kippenberg T.J., Brès C.-S. *Nat. Commun.*, **10**, 1553 (2019).
5. Elu U., Baudisch M., Tani F., Frosz M.H., Kottig F., Ermolov A., Russel P.St.J., Biegert J. *Optica*, **4**, 1024 (2017).
6. Elu U., Maidment L., Vamos L., Tani F., Novoa D., Frosz M., Badikov V., Badikov D., Petrov V., Russel P.St.J., Biegert J. *Nat. Photon. Lett.*, 14 Dec. (2020); https://doi.org/10.1038/s41566-020-00735-1 [*Nat. Photonics*, **15**, 277 (2021)].
7. Mitrofanov A.V., Sidorov-Biryukov D.A., Nazarov M.M., Voronin A.A., Rozhko M.V., Shutov A.D., Ryabchuk S.V., Serebryannikov E.E., Fedotov A.V., Zheltikov A.M. *Optica*, **7**, 15 (2020).
8. Hasan M.I., Akhmediev N., Chang W.W. *Opt. Lett.*, **41**, 5122 (2016).
9. Adamu A.J., Habib M.S., Peterson C.R., Lopez J.E.A., Zhou B., Schulzgen A., Bache M., Amezcua-Correa R., Bang O., Marcos C. *Sci. Rep.*, **9**, 4446 (2019).
10. Гладышев А.В., Косолапов А.Ф., Колядин А.Н., Астапович М.С., Прямиков А.Д., Лихачев М.Е., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **47**, 1078 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 1078 (2017)].
11. Li Z., Huang W., Cui Y., Wang Z. *Opt. Lett.*, **43**, 4671 (2018).
12. Гладышев А.В., Астапович М.С., Яценко Ю.П., Косолапов А.Ф., Охримчук А.Г., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **49**, 1089 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 1089 (2019)].
13. Gladyshev A., Yatsenko Yu., Kolyadin A., Kompanets V., Bufetov I. *Opt. Mater. Express*, **10**, 3081 (2020).
14. Яценко Ю.П., Гладышев А.В., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **51**, 1068 (2021) [*Quantum Electron.*, **51**, 1068 (2021)].
15. Крылов А.А., Гладышев А.В., Сенаторов А.К., Яценко Ю.П., Колядин А.Н., Косолапов А.Ф., Худяков М.М., Лихачев М.Е., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **52**, 685 (2022) [*Quantum Electron.*, **52**, 685 (2022)].
16. Mousavi S.A., Mulvad H.C.H., Wheeler N.V., Horak P., Hayes J., Chen Y., Bradley T.D., Alam S., Sandoghchi S.R., Fokoua E.N., Richardson D.J., Poletti F. *Opt. Express*, **26**, 8866 (2018).
17. Gladyshev A.V., Kosolapov A.F., Khudyakov M.M., Yatsenko Y.P., Kolyadin A.N., Krylov A.A., Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Likhachev M.E., Bufetov I.A., Dianov E.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **24**, 1 (2018).
18. Chen Y., Sidorenko P., Antonio-Lopez E., Amezcua-Correa R., Wise F. *Optica Publishing Group*, **10**, 12360 (2021).
19. Gao S.-F., Wang Y.-Y., Belli F., Brahms C., Wang P., Travers J.C. *Laser Photonics Rev.*, **16**, 2100426 (2022).
20. Гладышев А.В., Дубровский Д.С., Журавлева Е.Е., Косолапов А.Ф., Яценко Ю.П., Буфетов И.А. *Автометрия*, **59**, 1 (2023).
21. Dudley J., Taylor R. *Supercontinuum Generation in Optical Fibers* (Cambridge: University Press, 2010).
22. Ottush J.J., Rockwell D.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 2076 (1988).
23. Wahlstrand J.K., Zahedpour S., Cheng Y.-H., Palastro J.P., Mildberg H.M. *Phys. Rev. A*, **92**, 063828 (2015).
24. Nibbering E.T.J., Grillon G., Franco M.A., Prade B.S., Mysyrowicz A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **14**, 650 (1997).
25. Larsen T. *Z. Phys.*, **100**, 543 (1936); https://doi.org/10.1007/BF01336710.
26. Börzsönyi Á., Heiner Z., Kovács A.P., Kalashnikov M.P. Osvay K. *Appl. Opt.*, **47**, 4856 (2008).
27. Dudley J. M., Genty G., Coen S. *Rev. Mod. Phys.*, **78**, 1135 (2002).
28. Яценко Ю.П., Крылов А.А., Прямиков А.Д., Косолапов А.Ф., Колядин А.Н., Гладышев А.В., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **46**, 617 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 617 (2016)].
29. Яценко Ю.П., Плетенева Е.Н., Охримчук А.Г., Гладышев А.В., Косолапов А.Ф., Колядин А.Н., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **47**, 553 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 553 (2017)].