

Параметрическое усиление широкополосного излучения непрерывного суперлюминесцентного диода при пикосекундной накачке

К.А.Верещагин, С.Н.Ильченко, В.Б.Морозов, А.Н.Оленин, В.Г.Тункин, Д.В.Яковлев, С.Д.Якубович

Для получения широкополосных пикосекундных импульсов предложено использовать непрерывные суперлюминесцентные диоды с шириной спектра около 300 см^{-1} и высокой пространственной когерентностью в качестве источников затравочного излучения в параметрических усилителях с пикосекундной накачкой. Двухкаскадный параметрический усилитель на кристаллах ВВО накачивался импульсами длительностью 20 пс второй гармоники излучения Nd:YAG-лазера. При ширине спектра суперлюминесцентного диода 275 см^{-1} (центральная длина волны 790 нм) ширина спектра пикосекундных импульсов на выходе параметрического усилителя составила 203 см^{-1} . При суммарной энергии накачки кристаллов ВВО 7.2 мДж получена энергия усиленного излучения суперлюминесцентного диода 0.6 мДж.

Ключевые слова: параметрическое усиление, пикосекундная накачка, суперлюминесцентный диод.

1. Введение

Пикосекундные импульсы с шириной спектра в несколько сотен см^{-1} необходимы для решения целого ряда задач [1], например для реализации пикосекундной КАРС-спектроскопии газовых потоков (в том числе в двигателях различного типа) с целью определения температуры газов [2, 3]. В случае применения пикосекундной спектроскопии двойного чисто вращательного широкополосного КАРС для измерения температур на уровне 2000 К при использовании азота в качестве рабочей молекулы необходимы импульсы с шириной спектра $200\text{--}300 \text{ см}^{-1}$ [4]. Задержка зондирующего импульса относительно возбуждающих импульсов в пикосекундной КАРС-спектроскопии позволяет практически полностью избавиться от нерезонансного фона [5] и, благодаря этому, существенно повысить точность измерения температуры [6, 7]. В пикосекундных КАРС-спектрометрах использование безрезонаторных лазеров на красителе в качестве источников широкополосного затравочного излучения для пикосекундных параметрических усилителей позволяет получить излучение, лишенное модовой (продольные моды) структуры, с шириной спектра примерно 350 см^{-1} (что необходимо для равномерного возбуждения вращательных компонент молекул) и энергией на уровне 1 мДж [8]. Ширина полосы параметрических усилителей достигает нескольких сотен см^{-1} (или более при использовании кри-

сталлов длиной около 1 мм) за счет применения неколлинеарного взаимодействия [9, 10].

Стандартным способом получения широкополосного затравочного излучения при фемтосекундной накачке параметрических усилителей является генерация суперконтинуума за счет формирования филамента в поле сфокусированных (например, в сапфировую пластинку толщиной 2 мм) фемтосекундных импульсов небольшой энергии [11, 12]. Таким образом при накачке параметрического усилителя на кристалле LiIO_3 были получены фемтосекундные импульсы длительностью 30 фс с энергией 2 мкДж, перестраиваемые в диапазоне 3–4 мкм [11]. Аналогичным способом в параметрическом усилителе на кристалле ВВО толщиной 1 мм получены импульсы длительностью 20 фс, перестраиваемые в диапазоне 550–690 нм [12]. К сожалению, в поле пикосекундных импульсов формирование филаментов носит нестабильный характер. В то же время при пикосекундной накачке стабильными параметрами обладают безрезонаторные лазеры на красителе, которые и были использованы в [8] в качестве источников затравочного излучения. Однако использование безрезонаторного лазера на красителе означает, что оптическая схема перестает быть полностью твердотельной.

Для получения спектрально-ограниченных импульсов в схемах пико- или фемтосекундных параметрических усилителей успешно использовалось затравочное излучение диодных лазеров с достаточно узким спектром, а при необходимости – излучение одночастотных диодных лазеров. Впервые такие схемы реализованы в работах [13, 14]. В [13] создан однокаскадный пикосекундный параметрический усилитель непрерывного излучения PbS-лазера ($\lambda \approx 4000 \text{ нм}$), работавшего при азотной температуре. В [14] реализован двухкаскадный пикосекундный параметрический усилитель непрерывного излучения одночастотного GaAs-лазера с максимальной выходной мощностью 50 мВт, также работавшего при азотной температуре. При этом были получены спектрально-ограниченные импульсы с энергией 2 мДж и длительностью 17 пс, перестраиваемые в диапазоне 100 см^{-1} вблизи длины волны 850 нм. Этот двухкаскадный параметрический усилитель

К.А.Верещагин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, 119991 Москва, ул. Вавилова, д. 38

С.Н.Ильченко. ООО «Оптон», Россия, Москва 119330, ул. Московфильмовская, д. 17Б

В.Б.Морозов, А.Н.Оленин, В.Г.Тункин, Д.В.Яковлев. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; e-mail: vladimirtunkin@mail.ru

С.Д.Якубович. Московский технологический университет (МИРЭА), Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, д.78; e-mail: yakubovich@superlumdiodes.com

Поступила в редакцию 10 июня 2016 г.

был встроен в пикосекундный КАРС-спектрометр как источник одного из возбуждающих импульсов, что позволило на два порядка поднять сигнал КАРС от сверхзвуковой струи азота [15].

Параметрическое усиление затравочного излучения одночастотных диодных лазеров с внешним резонатором мощностью около 1 мВт, перестраиваемых в диапазоне 1260–1630 нм, использовалось для получения спектрально-ограниченных пикосекундных импульсов (длительностью примерно 5 пс), перестраиваемых в диапазоне от 1260 до 1630 нм (холостая волна) и от 920 до 790 нм (сигнальная волна) [16]. Полученные импульсы применялись для исследования нелинейных эффектов в волноводах на основе кристаллов LiNbO_3 . Также была реализована схема фемтосекундного параметрического усиления на кристалле $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ затравочного излучения импульсного диодного InGaAs -лазера ($\lambda \approx 1064$ нм) с пиковой мощностью 2 Вт при накачке излучением титан-сапфирового лазера (30 фс) [17]. При двойном проходе через нелинейный кристалл толщиной 1 мм получены импульсы с энергией 2 мкДж, длительностью 50 фс и длиной волны в среднем ИК диапазоне (вблизи 3500 нм).

Затравочное излучение узкополосных диодных лазеров применялось и для получения достаточно узкополосных наносекундных импульсов с помощью оптических параметрических генераторов [18]. Использовался одночастотный диодный лазер с внешним резонатором мощностью 4.5 мВт, перестраиваемый в диапазоне 930–960 нм. Параметрический генератор накачивался второй гармоникой (180 мДж) мощного $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазера. В отличие от фемтосекундной и пикосекундной накачки, когда с успехом применяются параметрические усилители, при наносекундной накачке и, соответственно, существенно меньшем коэффициенте параметрического усиления приходится использовать параметрические генераторы. В этом случае становится необходимым подстраивать частоту моды генератора под частоту диодного лазера, например путем перемещения одного из зеркал генератора с помощью пьезоэлектрика. Получены перестраиваемые по частоте импульсы с энергией 40 мДж и шириной полосы 190 МГц, что обеспечило применение этого источника излучения для бортовых измерений содержания водяных паров в верхних слоях атмосферы.

Возникает вопрос, возможно ли использование затравочного излучения диодных источников для получения широкополосного спектра в пикосекундных параметрических усилителях. Переход к широкому спектру, лишенному структуры, связанной с продольными модами, достигается в случае диодных источников (как и в случае лазеров на красителе) за счет использования безрезонаторной схемы. Суперлюминесцентные диоды (СЛД) как раз и реализуют безрезонаторный вариант диодных источников. Имеются СЛД с высокой пространственной когерентностью и шириной спектра, достигающей $300\text{--}400\text{ см}^{-1}$ [19]. Соответственно, необходимо применять неколлинеарную геометрию параметрического взаимодействия в нелинейном кристалле для получения достаточно широкого спектра усиления. Однако с уширением спектра параметрического усиления возрастает интенсивность шумовой составляющей, обусловленной квантовыми шумами [20], что приводит к снижению контраста параметрически усиленного затравочного излучения. Цель настоящей работы заключалась в изучении возможности получения широкополосных ($200\text{--}300\text{ см}^{-1}$) пико-

секундных импульсов с высоким контрастом при усилении в двухкаскадном параметрическом усилителе с пикосекундной накачкой затравочного излучения непрерывного широкополосного суперлюминесцентного диода.

2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Для получения пикосекундных импульсов длительностью 25 пс с энергией 1.3 мДж и длиной волны 1064 нм использовался задающий пикосекундный $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазер с диодной накачкой («СинхроТех», Москва), работавший с частотой следования импульсов 3 Гц. Импульсы усиливались в двухпроходном усилителе с ламповой накачкой и затем преобразовывались в импульсы второй гармоники ($\lambda = 532$ нм) в кристалле DKDP . Энергия импульсов второй гармоники, используемая для накачки неколлинеарных параметрических усилителей на кристаллах ВВО , изменялась вплоть до 10 мДж. С помощью зеркала 31 пучок второй гармоники разделялся на два: отраженный от этого зеркала пучок служил для накачки кристалла ВВО-1 , а прошедший – для накачки кристалла ВВО-2 . Кристаллы были вырезаны для взаимодействия $oo-e$ под углом 22.5° к оптической оси. Соотношение энергий отраженного и прошедшего пучков составляло 1:5. Пучок накачки кристалла ВВО-2 формировался с помощью расходящегося посредством линз Л1 с фокусным расстоянием $F = +300$ мм и Л2 с $F = -100$ мм. Для формирования пучка накачки в канале накачки кристалла ВВО-1 использовался телескоп на линзах Л3 с $F = +300$ мм и Л4 с $F = -100$ мм. В канале накачки кристалла ВВО-2 располагалась линия задержки на призмах П1 и П2 для выравнивания времени прохода пикосекундных импульсов в обоих каналах. Кристаллы ВВО-1 и ВВО-2 имели апертуру 4×6 мм и длину 10 мм. Входные поверхности кристаллов были просветлены для излучения второй гармоники, а выходные – для излучения СЛД со средней длиной волны 790 нм.

В качестве источника затравочного излучения для параметрических усилителей использовался светоизлучающий модуль на основе высокоэффективного квантово-размерного СЛД с гребневидным пространственно-одномодовым активным каналом («Суперлюминесцентные диоды», Москва) [21]. Мощность его непрерывного выходного излучения составляла 70 мВт при максимальном токе 300 мА (по калибровочной кривой). Выходная апертура СЛД составляла 1×4 мкм, причем по «быстрой» оси

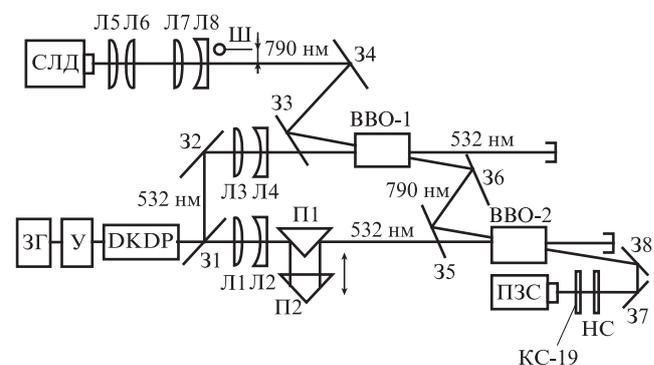


Рис.1. Схема экспериментальной установки: ЗГ – задающий пикосекундный $\text{Nd}:\text{YAG}$ -лазер; У – усилитель; СЛД – суперлюминесцентный диод; 33 и 35 – дихроичные зеркала; Ш – шторка для перекрытия излучения СЛД; ПЗС – матричный регистратор.

излучение СЛД было сильно расходящимся и не попадало полностью в апертуру конденсора, состоящего из линз Л5 и Л6. В результате в излучении СЛД после конденсора наряду с центральным пятном наблюдалась дифракционная структура. С помощью линз Л7 ($F = +90$ мм) и Л8 ($F = -75$ мм) на поверхности ВВО-1 формировалось центральное пятно этой структуры с диаметром 2 мм, что обеспечивало согласование диаметра затравочного излучения с диаметром пучка накачки (1.5 мм) этого кристалла.

Мощность затравочного излучения при токе инжекции СЛД 260 мА после зеркала 33 (т. е. практически перед кристаллом ВВО-1), измеренная с помощью измерителя мощности Field Master (Coherent) с входной апертурой 8 мм, составила 15.2 мВт. Все эксперименты, выполненные в данной работе, проводились при этой мощности. Расстояние между выходной апертурой СЛД и зеркалом 33 было 950 мм. После линзы Л8 устанавливалась шторка, перекрывающая при необходимости излучение СЛД. С помощью зеркала 34 и дихроичного зеркала 33, просветленного для длины волны 532 нм и отражающего для длины волны 790 нм, осуществлялось совмещение пучков второй гармоники и СЛД в кристалле ВВО-1 при внутреннем угле неколлинеарности 2° , обеспечивающем ширину полосы параметрического усиления $200\text{--}300\text{ см}^{-1}$ (что типично для нелинейных кристаллов длиной 10 мм [8]). Выходящее из кристалла ВВО-1 усиленное излучение СЛД попадало в кристалл ВВО-2 под углом, обеспечивающим тот же внутренний угол неколлинеарности 2° . Диаметр пучка накачки на поверхности кристалла ВВО-2 был 3 мм. Оптический путь излучения с длиной волны 790 нм между кристаллами ВВО-1 и ВВО-2 составлял 110 мм.

Пространственные распределения интенсивности усиленного излучения СЛД и излучения параметрической суперлюминесценции (ПСЛ) измерялись с помощью матричного регистратора SDU-415 («Спецтелетехника», Москва), отстоящего от ВВО-2 на расстоянии 150 мм. Перед регистратором при этом помещались фильтр КС-19 и необходимый набор нейтральных светофильтров (НС). При регистрации энергии усиленного излучения СЛД в центральной части пучка этого излучения помещался фотодиод с диаметром чувствительной площадки 200 мкм, отстоящий от кристалла ВВО-2 на 630 мм. Сигнал с фотодиода наблюдался на осциллографе Tektronix DPO 4104.

3. Результаты и их обсуждение

Существенным параметром, характеризующим параметрическое усиление затравочного излучения, является отношение K плотности мощности (энергии) усиленного излучения СЛД к плотности мощности (энергии) ПСЛ, которая является следствием усиления квантовых шумов. Экспериментально это отношение должно определяться на ненасыщенном участке параметрического усиления, когда коэффициенты параметрического усиления затравочного излучения и квантовых шумов одинаковы [14].

На рис.2 показана зависимость сигнала с фотодиода (т. е. энергии в центральной части пучка усиленного излучения СЛД) от энергии накачки кристалла ВВО-2. Эта зависимость выходит на насыщение при энергии накачки 6 мДж (этой энергии соответствовала энергия накачки кристалла ВВО-1 1.2 мДж). При этом энергия усиленного излучения СЛД составила 0.6 мДж. Энергии накачки и усиленного излучения СЛД определялись с помощью из-

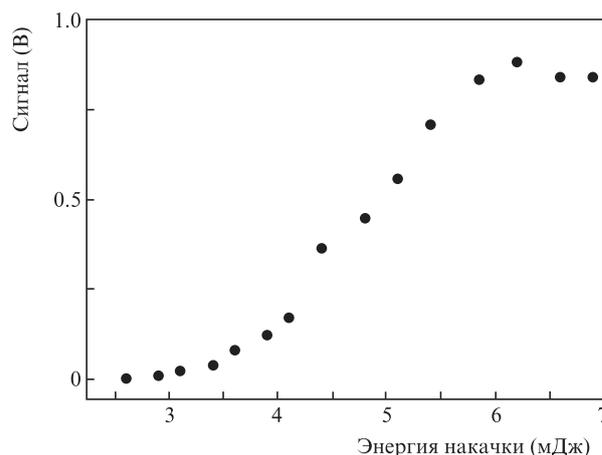


Рис.2. Зависимость сигнала с фотодиода, пропорционального энергии усиленного излучения суперлюминесцентного диода, от энергии накачки кристалла ВВО-2 при мощности излучения диода перед кристаллом ВВО-1, равной 15.2 мВт.

мерителя Labmaster Ultima (Coherent). В соответствии с зависимостью, представленной на рис.2, величина K измерялась нами при энергии накачки кристалла ВВО-2 3.5 мДж. Сигналы, измерявшиеся с помощью матричного регистратора в присутствии излучения СЛД и при его прекращении шторкой, отличались примерно в 100 раз. Динамический диапазон матричного регистратора составлял два порядка, поэтому для того чтобы оба сигнала уверенно попадали в этот динамический диапазон, усиленное излучение СЛД ослаблялось двумя фильтрами НС с общим коэффициентом пропускания 0.032. При этом сигнал усиленного излучения СЛД превышал сигнал суперлюминесценции в три раза. Отсюда получаем, что $K = 93$.

При увеличении энергии накачки сигнал усиленного излучения СЛД насыщался. В то же время более слабый сигнал ПСЛ еще не достигал насыщения. Поэтому измеренная при этом величина K_{sat} должна быть меньше K . На рис.3 представлены пространственные распределения интенсивности пучков усиленного излучения СЛД и ПСЛ при энергии накачки кристалла ВВО-2 6.3 мДж. Для удобства обозрения интенсивности профилей выравнивались, для чего сигнал ПСЛ умножался на 17. С учетом пропускания нейтрального светофильтра 0.47, ослаблявшего усиленное излучение СЛД, $K_{\text{sat}} = 36$. Вытянутое по вертикали излучение ПСЛ представляет собой часть кольца ПСЛ. Это кольцо без труда наблюдается на выходе одиночного параметрического кристалла [8].

Измеренные спектры излучения СЛД и параметрически усиленного излучения СЛД представлены на рис.4. Для измерения использовались монохроматор МДР-6 в однопроходном варианте и матричный регистратор SDU-415. Спектр усиленного излучения измерялся в тех же условиях, что и пространственные распределения интенсивности на рис.3. Из рис.4 видно, что при ширине спектра СЛД 17.2 нм (275 см^{-1}) спектр усиленного излучения сужается при параметрическом усилении до 12.7 нм (203 см^{-1}). Уменьшить влияние этого сужения можно, применив кристаллы ВВО несколько меньшей длины, что приведет к уширению спектра параметрического усиления. Длительность пикосекундных импульсов усиленного излучения СЛД была измерена с помощью стрик-камеры Агат-СФ (разрешение 2 пс) и оказалась равной 21 пс.

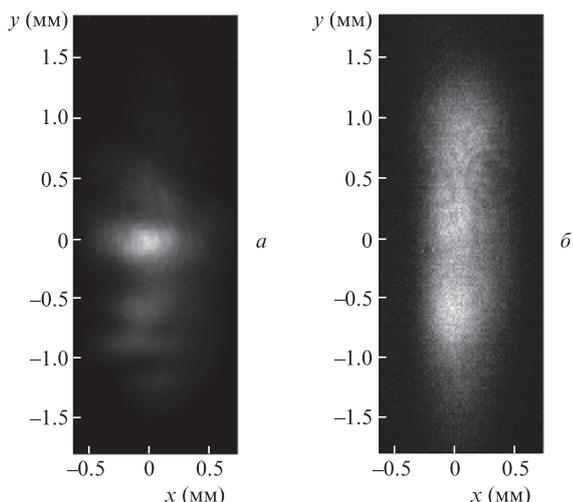


Рис.3. Пространственные распределения интенсивности усиленного излучения суперлюминесцентного диода (а) и параметрической суперлюминесценции (б) (для удобства сравнения амплитуда сигнала в случае параметрической суперлюминесценции умножена на 17). Энергия накачки кристалла ВВО-1 равна 6.3 мДж, мощность излучения диода перед кристаллом ВВО-1 составляет 15.2 мВт.

Плотность мощности затравочного излучения СЛД необходимо сравнивать с плотностью мощности квантовых шумов. Согласно оценке, при мощности излучения СЛД перед кристаллом ВВО-1 15.2 мВт и при диаметре пятна излучения диода на поверхности кристалла ВВО-1 0.2 см плотность мощности затравочного излучения равна 380 мВт/см². Спектральная плотность мощности квантовых шумов определялась по формулам, приведенным в работе [20], и составила при длине волны 790 нм 5800 мВт·см⁻²·см⁻¹·ср. С учетом ширины полосы параметрического усиления, равной примерно 200 см⁻¹, и телесного угла, под которым из центра пятна усиленного излучения СЛД (см. рис.3) видна площадь пучка накачки

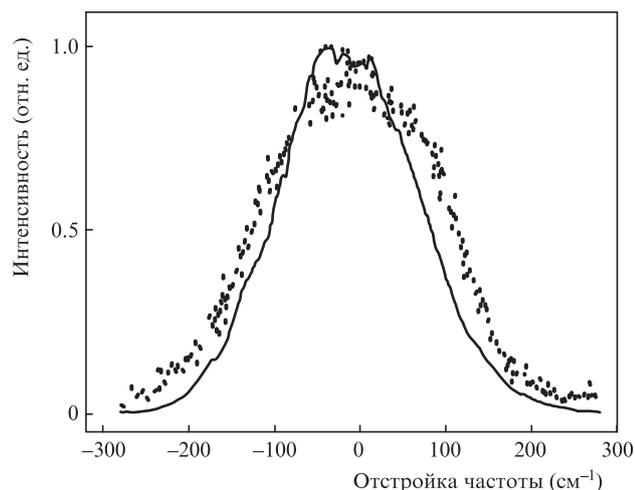


Рис.4. Спектры излучения суперлюминесцентного диода (точки) и параметрически усиленного излучения диода (сплошная кривая) при усреднении по 30 вспышкам лазера. Мощность излучения диода перед кристаллом ВВО-1 равна 15.2 мВт.

на поверхности кристалла ВВО-1 ($\sim 0.6 \times 10^{-6}$ ср), получаем плотность мощности квантовых шумов 0.7 мВт/см². Таким образом, отношение плотностей мощности затравочного излучения и квантовых шумов $K = 540$. В эксперименте было зарегистрировано $K = 93$. Расхождение может быть обусловлено тем, что определенная часть мощности излучения СЛД, содержащаяся в дифракционной структуре, попадает в апертуру измерителя мощности FieldMaster (8 мм), но находится вне центрального пятна (диаметр 2 мм) этой структуры и поэтому не участвует в формировании пучка усиленного излучения СЛД.

Таким образом, в настоящей работе показано, что непрерывные суперлюминесцентные диоды с шириной спектра излучения около 300 см⁻¹ и мощностью на уровне нескольких десятков мВт могут с успехом применяться в качестве источников затравочного излучения в двухкаскадных параметрических усилителях с пикосекундной накачкой для получения широкополосных пикосекундных импульсов. При общей энергии накачки кристаллов ВВО 7.2 мДж энергия широкополосных пикосекундных импульсов составила 0.6 мДж.

1. Аракчеев В.Г., Верещагин А.К., Верещагин К.А., Морозов В.Б., Тункин В.Г., Яковлев Д.В. *Квантовая электроника*, **44** (4), 335 (2014).
2. Eckbreth A.C. *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species* (Amsterdam: Gordon and Breach, 1996).
3. Roy S., Gord J.R., Patnaik A.K., in *Progress in Energy and Combustion Science*, **36**, 280 (2010).
4. Eckbreth A.C., Anderson T.J. *Opt. Lett.*, **11**, 496 (1986).
5. Djidjoev M.S., Magnitskii S.A., Saltiel S.M., Tarasevich A.P., Tunkin V.G., Kholodnikh A.I. *Квантовая электроника*, **8** (5), 1136 (1981).
6. Roy S., Meyer T.R., Gord J.R. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 264103 (2005).
7. Seeger T., Kiefer J., Gao Y., Patterson B.D., Kliever C.J., Settersten T.B. *Opt. Lett.*, **35**, 2040 (2010).
8. Vereshchagin A.K., Vereshchagin K.A., Morozov V.B., Tunkin V.G. *J. Raman Spectroscopy*, **45**, 507 (2014).
9. Dubietis A., Jonusauskas G., Piskarskas A. *Opt. Commun.*, **88**, 437 (1992).
10. Gerullo G., Nisoli M., Stagira S., De Silvestri S. *Opt. Lett.*, **23**, 1283 (1998).
11. Brida A., Manzoni C., Cirmi G., Marangoni M., De Silvestri S., Cerullo G. *Opt. Express*, **15**, 15035 (2007).
12. Shirakawa A., Kobayashi T. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 147 (1998).
13. Boichenko V.I., Zasavitskii I.I., Kosichkin Yu.V., Tarasevich A.P., Tunkin V.G., Shotov A.P. *Квантовая электроника*, **11** (1), 203 (1984).
14. Magnitskii S.A., Malachova V.I., Tarasevich A.P., Tunkin V.G., Yakubovich S.D. *Opt. Lett.*, **11**, 18 (1986).
15. Akhmanov S.A., Koroteev N.I., Magnitskii S.A., Morozov V.B., Tarasevich A.P., Tunkin V.G. *J. Opt. Soc. Amer.*, **2** (4), 640 (1985).
16. Homann C., Breuer M., Setzpfandt F., Pertsch T., Riedle E. *Opt. Express*, **21**, 730 (2013).
17. Rotermond F., Petrov V., Noack F., Wittmann M., Korn G. *J. Opt. Soc. Amer.*, **16**, 1539 (1999).
18. Ehret G., Fix A., Weiss V., Poberaj G., Baumert T. *Appl. Phys. B*, **67**, 427 (1998).
19. Андреева Е.В., Ильченко С.Н., Ладугин М.А., Лобинцов А.А., Мармалюк А.А., Шраменко М.В., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **43** (11), 994 (2013).
20. Клышко Д.Н. *Фотоны и нелинейная оптика* (М.: Наука, 1980, с. 20, 21).
21. Андреева Е.В., Ильченко С.Н., Костин Н.О., Якубович С.Д. *Квантовая электроника*, **44** (10), 903 (2014).