

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

ВКР-преобразователь – временной компрессор фемтосекундных импульсов иттербиевого лазера

А.В.Конященко, Л.Л.Лосев, В.С.Пазюк

В режиме нелинейной фазовой модуляции фемтосекундных импульсов иттербиевого лазера с длиной волны 1.03 мкм осуществлено их ВКР-преобразование в сжатом водороде. Проведена временная компрессия частотно-чирпированных импульсов стокового излучения. В результате лазерные импульсы длительностью 400 фс преобразованы в стоковые импульсы длительностью 27 фс с длиной волны 1.8 мкм. Достигнута средняя мощность стокового излучения 0.6 Вт при средней мощности лазерного излучения 6.3 Вт и частоте следования импульсов 20 кГц.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние, фемтосекундный лазер, нелинейная фазовая модуляция, компрессия импульсов.

1. Введение

В работе [1] было показано, что преобразование по частоте фемтосекундных лазерных импульсов посредством вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) может быть осуществлено одновременно с процессом нелинейной фазовой модуляции лазерной и стоковой волн. В результате этих процессов на выходе комбинационно-активной среды возникает импульс широкополосного стокового излучения, модулированного по частоте (чирпированный стоков импульс). Компенсация частотного чирпа дисперсионными оптическими элементами, установленными после активной среды, позволяет осуществить временную компрессию стокова импульса. Выполнено ВКР-преобразование излучения иттербиевого лазера с длительностью импульсов 270 фс в сжатом водороде в стоково излучение с центральной длиной волны 1.8 мкм. Положительно чирпированный стоков импульс был сжат до длительности 35 фс в оптических элементах из плавляного кварца, обладающего отрицательной дисперсией второго порядка в области длин волн стокова излучения. Эффективность преобразования по энергии достигала 6% [1]. Применение такой достаточно простой схемы частотного преобразователя-компрессора, наряду с фемтосекундным иттербиевым лазером – одним из наиболее разработанных и широко используемых на сегодня лазеров, выглядит достаточно перспективным с точки зрения создания источника фемтосекундных (с длительностью в несколько периодов световой волны) импульсов среднего ИК диапазона высокой средней и пиковой мощности. В частности, такие источники с гигаваттной пиковой мощностью излучения могут найти применение в экспериментах по генерации в газовых средах высших гармоник и импульсов аттосекундной длительности [2].

А.В.Конященко, Л.Л.Лосев, В.С.Пазюк. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: lllosev@mail.ru

Поступила в редакцию 14 мая 2019 г., после доработки – 25 июня 2019 г.

В настоящей работе приводятся результаты детального исследования процессов ВКР и нелинейной фазовой модуляции в сжатом водороде излучения фемтосекундного иттербиевого лазера с целью получения наиболее коротких и мощных импульсов излучения с центральной длиной волны 1.8 мкм.

2. Экспериментальная установка

Оптическая схема экспериментальной установки показана на рис.1. В качестве источника излучения накачки ВКР-преобразователя использовалась фемтосекундная иттербиевая лазерная система ТЕТА-10 (Авеста). Лазерная система включает в себя задающий волоконный генератор фемтосекундных импульсов и регенеративный усилитель для усиления чирпированных импульсов. После решеточного компрессора, установленного на выходе регенеративного усилителя, длительность импульса сокращалась до 225 фс. Максимальная энергия одиночного импульса достигала 400 мкДж. Максимальная средняя мощность составляла 10 Вт, максимальная частота следования импульсов (ЧСИ) – 200 кГц. Ширина спектра излучения была равна 7 нм, центральная длина волны – 1030 нм. В данной лазерной системе существовала возможность варьирования длительности импульса выходного излучения от 225 фс до 10 пс посредством программированного изменения расстояния между решетками временного компрессора на выходе регенеративного усилителя. Диа-

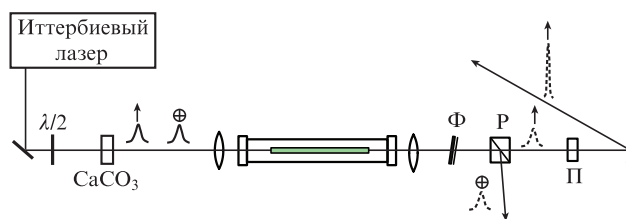


Рис.1. Оптическая схема экспериментальной установки: $\lambda/2$ – полуволновая фазовая пластина; CaCO_3 – кристалл кальцита; Φ – широкополосный фильтр; P – призма Рошона; Π – пластина из плавляного кварца.

метр выходного лазерного пучка с гауссовым распределением интенсивности составлял 3 мм по уровню e^{-2} .

При выборе оптической схемы ВКР-преобразователя мы исходили из условия получения максимальной ширины спектра лазерного импульса, возникающего при нелинейной фазовой самомодуляции в комбинационно-активной среде. В этом случае можно ожидать также достижения максимальной ширины спектра стокового импульса в процессе ВКР-преобразования и нелинейной фазовой кросс-модуляции и, соответственно, минимальной длительности стокового импульса после временной компрессии. При фиксированной энергии и мощности лазерного импульса, которая не должна превышать критическую мощность самофокусировки в сжатом водороде, этого можно достигнуть, изменяя длительность и форму импульса, например, при разделении лазерного импульса на два с примерно одинаковыми энергиями и длительностями вдвое короче исходного импульса. Пиковая мощность импульса при этом сохраняется в обоих случаях: когда энергия импульса равна E и длительность составляет 2τ , а также если имеются два импульса с энергиями $E/2$ и длительностями τ . При этом величина инкремента комбинационного усиления не будет изменяться, поскольку при нестационарном ВКР она определяется только энергией импульса [3]. Поскольку ширина спектра $\Delta\nu$ импульса длительностью τ в результате процесса нелинейной фазовой самомодуляции определяется выражением $\Delta\nu \propto P/\tau$ [4], где P – мощность импульса, то в первом случае (один импульс длительностью 2τ) она будет в два раза меньше, чем при двойном импульсе. Более того, величина частотного чирпа, равная отношению ширины спектра импульса к его длительности, для двойного импульса будет в четыре раза больше этой величины для одиночного импульса. Это обстоятельство позволяет использовать для временной компрессии оптические элементы с меньшим значением отрицательной дисперсии, что упрощает оптическую схему и повышает качество сжатого импульса. Исходя из этого, была выбрана оптическая схема с формированием двойного импульса накачки комбинационного преобразователя.

Двойной импульс накачки ВКР-преобразователя получался путем пропускания импульса излучения иттербиевого лазера через двулучепреломляющий кристалл кальцита CaCO_3 толщиной 1 см. В результате возникали два импульса излучения с ортогональными поляризациями, разделенные во времени на 5 пс. Изменение соотношения энергий между этими импульсами осуществлялось посредством вращения фазовой полуволновой пластины $\lambda/2$. При этом эффективность преобразования задержанного импульса была такой же, как и в случае двух импульсов с одинаковыми поляризациями, поскольку при ВКР на колебательных уровнях водорода, которое относится к скалярному типу ВКР, задержанный импульс рассеивается на решетке поляризуемости, созданной первым импульсом [5].

Лазерное излучение фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 30 см на вход кварцевого капилляра длиной 80 см с внутренним диаметром 250 мкм, помещенного в камеру из нержавеющей стали длиной 1 м. Толщина окон из плавленого кварца составляла 5 мм. Расстояние от входа в капилляр до входного окна камеры было равно 12 см. Камера заполнялась сжатым водородом. Оптические элементы на входе в преобразователь (полуволновая фазовая пластина, кристалл кальцита, фо-

кусирующая линза и входное окно камеры) имели просветляющее покрытие на длине волны иттербиевого лазера.

Стоково излучение на выходе камеры отделялось от излучения накачки широкополосным фильтром Φ (см. рис.1). Для разделения стоковых импульсов с ортогональными поляризациями использовалась поляризационная призма Рошона. Пластина из плавленого кварца Π , установленная после призмы Рошона, выполняла функцию временного компрессора чирпированного стокового импульса.

Длительность сжатого стокового импульса измерялась автокоррелятором ASF-15 (Авеста). Спектры импульсов регистрировались сканирующим спектрометром среднего ИК диапазона ASR-IR-2,6 (Авеста).

3. Энергетические характеристики ВКР-преобразователя

В работе [6] было показано, что начиная с определенной длительности фемтосекундного импульса эффективность ВКР-преобразования начинает резко падать при сокращении длительности импульса накачки вследствие процессов нелинейной фазовой модуляции лазерной и стоковых волн, причем для газовых комбинационно-активных сред длительность фемтосекундного импульса, соответствующая началу падения эффективности преобразования, не зависит от давления среды. Для определения длительности импульса при ВКР излучения иттербиевого лазера в водороде измерялась эффективность преобразования в зависимости от длительности лазерного импульса. Результаты измерений представлены на рис.2. Использовалась схема накачки двойным лазерным импульсом с равными энергиями ортогонально-поляризованных импульсов. Эксперимент проводился при давлении водорода 27 атм, ЧСИ 10 кГц и энергии двойного импульса 250 мкДж. Минимальная длительность импульсов в двойном импульсе накачки составляла 225 фс. В этом случае максимальная пиковая мощность в условиях эксперимента достигала 0.56 ГВт, а критическая мощность самофокусировки для излучения иттербиевого лазера в водороде ($P_{cr}[\text{ГВт}] = 20/p_H[\text{атм}]$ [7], где p_H – давление водорода) была выше и составляла 0.74 ГВт.

Длительности одиночных импульсов в двойном импульсе синхронно изменялись за счет изменения расстояния между решетками в компрессоре на выходе регенеративного усилителя иттербиевого лазера. Увеличение длительности импульсов осуществлялось посредством поло-

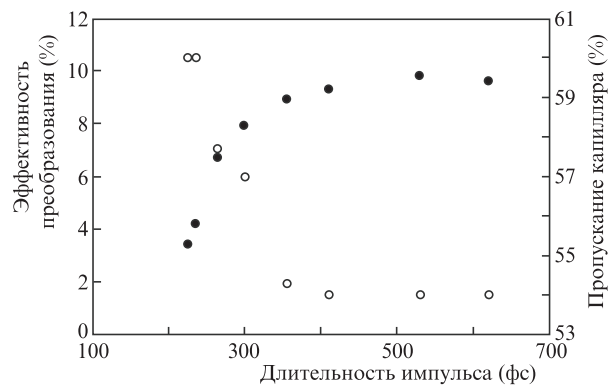


Рис.2. Зависимости эффективности преобразования (●) и пропускания капилляра (○) от длительности одиночного импульса в схеме с двухимпульсной накачкой.

жительного частотного chirпирования (мгновенная частота нарастает от переднего фронта импульса). Как видно из рис.2, эффективность преобразования насыщается на уровне $\sim 9\%$ для импульсов длиннее 400 фс. При этом в задержанном импульсе стокова излучения содержится более 90% энергии для всего исследованного диапазона длительностей импульсов накачки. Этот результат согласуется с оценками, приведенными в работе [1]. Измерения пропускания капилляра также подтвердили влияние фазовой модуляции, а не самофокусировки, на процесс преобразования, поскольку, как известно [8], при начале самофокусировки пучка накачки пропускание капилляра резко падает. В нашем случае при сокращении длительности импульса (росте мощности) пропускание капилляра возрастает. Наблюдаемое же незначительное падение пропускания при увеличении длительности импульса связано с потерями энергии при ВКР и с ростом коэффициента ослабления волны в кварцевом капилляре при увеличении длины волны излучения. Исходя из полученных данных, дальнейшие эксперименты проводились при длительности импульса накачки 400 фс, при которой можно ожидать максимально широкого спектра стокова импульса одновременно с высокой эффективностью преобразования.

Для выбора оптимального режима преобразования измерялась зависимость эффективности преобразования в задержанном импульсе от давления водорода (рис.3). Максимальная эффективность преобразования $\sim 10\%$ достигается при $p_H = 27-30$ атм. Энергия двойного импульса накачки с равными энергиями одиночных импульсов при этом составляет 320 мкДж, ЧСИ – 10 кГц. Падение эффективности преобразования при давлениях водорода выше оптимального связано с тем, что с увеличением давления водорода и, соответственно, инкремента усиления максимум эффективности преобразования смещается к входу капилляра, и в дальнейшем стоково излучение ослабляется при распространении в капилляре.

С целью получения максимальной энергии одиночного стокова импульса была исследована зависимость энергии стокова импульса E_{st} с длиной волны 1.8 мкм от энергии импульса накачки E_p . Давление водорода составляло 27 атм, ЧСИ – 10 кГц. Длительность chirпированного импульса была 400 фс. Эксперименты проводились с одиночным (из оптической схемы убирался кристалл кальцита) и двойным импульсами накачки. Для одиночного импульса накачки максимальная энергия $E_{st} = 12$ мкДж при $E_p \approx 200$ мкДж. С ростом E_p величина E_{st} падала вследствие приближения мощности импульса

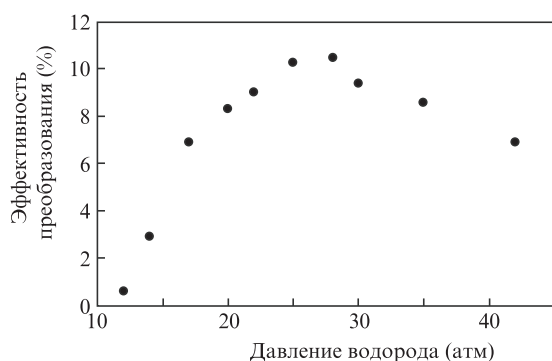


Рис.3. Зависимости эффективности преобразования в задержанный стоков импульс от давления водорода. Энергия двойного импульса накачки составляет 320 мкДж, ЧСИ – 10 кГц.

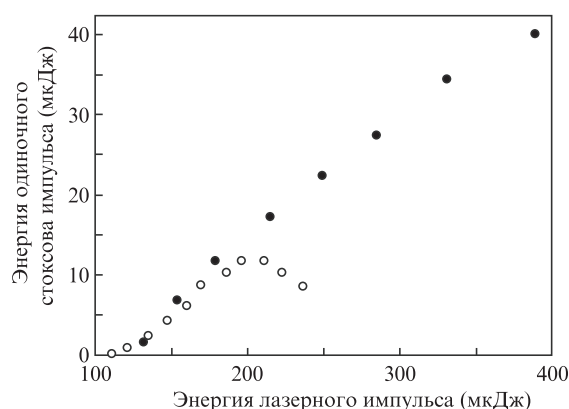


Рис.4. Зависимость энергии одиночного (задержанного) стокова импульса от энергии импульса накачки при моноимпульсной (○) и двухимпульсной (●) накачке.

накачки к критической мощности самофокусировки. Использование двойного импульса накачки позволило существенно повысить энергию E_{st} . Это связано с увеличением энергии импульса накачки и, соответственно, комбинационного инкремента усиления при сохранении мощности импульса ниже критической мощности самофокусировки. На рис.4 показана зависимость энергии задержанного стокова импульса от энергии двойного импульса накачки. Доля энергии, содержащаяся в первом стоковом импульсе, не превышала 10% от энергии задержанного стокова импульса во всем исследованном диапазоне энергий импульса накачки. Максимально достигнутая энергия $E_{st} = 40$ мкДж при энергии $E_p = 390$ мкДж, что соответствует эффективности преобразования более 10%.

Важной характеристикой нелинейных преобразователей лазерного излучения является максимальная средняя мощность преобразованного излучения, которая существенно влияет на область применения преобразователя. Измеренная зависимость эффективности преобразования от ЧСИ иттербиевого лазера при фиксированной, максимально возможной для данного лазера, энергии импульса представлена на рис.5. Давление водорода равно 27 атм, энергия двойного лазерного импульса на входе капилляра – 320 мкДж. Как видно из рисунка, при увеличении ЧСИ и, соответственно, средней мощности лазерного излучения наблюдается спад эффективности преобразования. Максимальная эффективность преобразования 14% достигалась при ЧСИ 1 кГц (более низкие ЧСИ не были возможны в используемой лазерной системе). С увеличе-

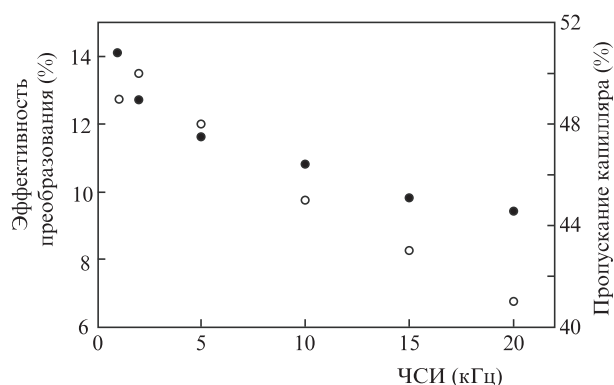


Рис.5. Зависимости эффективности преобразования (●) и пропускания капилляра (○) от ЧСИ накачки.

нием ЧСИ до 20 кГц эффективность преобразования падала до 9.5%. В результате была достигнута средняя мощность стокового излучения 0.6 Вт при средней мощности лазера накачки 6.3 Вт. Уменьшение эффективности преобразования при росте ЧСИ мы связываем с нагревом газа в капилляре. При средней мощности накачки в 6 Вт и эффективности преобразования 9% в используемом капилляре с внутренним объемом $4 \times 10^{-2} \text{ см}^3$ удельная мощность энерговыделения вследствие стоковых потерь составляет 10 Вт/см^3 . Нагрев водорода высокого давления, который происходит в основном вблизи оси капилляра в области максимума интенсивности пучка накачки, может привести к неоднородному распределению плотности газа по сечению капилляра, а это, в свою очередь, приведет к неоднородному распределению показателя преломления по поперечному сечению капилляра и, как следствие, к возбуждению мод высших порядков с большим значением коэффициента ослабления для излучения накачки в капилляре. В результате уменьшается комбинационный инкремент усиления и падает эффективность преобразования. Это предположение подтверждается измеренной зависимостью пропускания капилляра от ЧСИ (см. рис.5), которое падает одновременно с эффективностью преобразования при увеличении ЧСИ накачки, хотя в отсутствие каких-либо дополнительных (кроме квантовых) потерь при комбинационном рассеянии пропускание капилляра должно возрастать при снижении эффективности процесса ВКР. К примеру, это наблюдалось при исследовании влияния длительности импульса накачки на эффективность преобразования (см. рис.2).

Для оценки стабильности работы комбинационного преобразователя было проведено измерение относительной дисперсии распределения по энергии одиночных импульсов стокового излучения (отношение ширины распределения к средней энергии импульса). Относительная дисперсия рассчитывалась для последовательности из 10^4 импульсов, и во всем исследованном диапазоне параметров она составила 10%.

4. Спектр и длительность стокового импульса

На рис.6 показаны спектры стоковой компоненты, снятые при разных длительностях импульса накачки. В обоих случаях использовался двойной импульс накачки с энергией 320 мкДж. Длительность одиночного импульса изменялась от 400 до 600 фс. Давление водорода равно 27 атм. Спектр стокового импульса имеет форму, характерную для спектров, уширенных в процессе нелинейной фазовой модуляции [8]. Как отмечалось выше, ширина спектра при нелинейной фазовой самомодуляции определяется выражением $\Delta\nu \propto P/\tau \propto E/\tau^2$. Поэтому при увеличении длительности импульса в 1.5 раза спектр должен сузиться в 2.25 раза. Экспериментально наблюдалось сужение, близкое к расчетному. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что стоковая компонента возникает в процессе ВКР спектрально-уширенного в процессе фазовой самомодуляции излучения накачки.

Положительный частотный чирп стокового импульса, возникающий при нелинейной фазовой модуляции, может быть скомпенсирован (стоковый импульс сжат до спектрально-ограниченного импульса с соответствующим спектром) при распространении стокового импульса в плавленом кварце, который обладает отрицательной дисперсией второго порядка на длине волны стокового излучения.

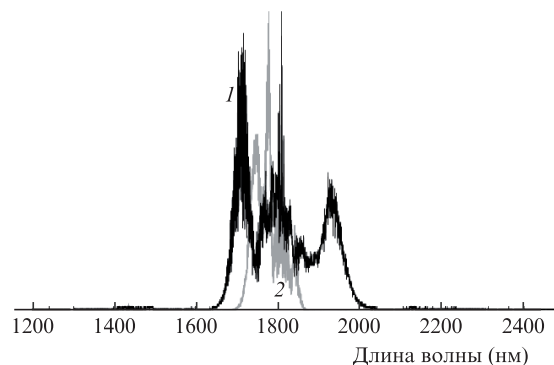


Рис.6. Спектры импульса стокового излучения при длительности лазерного импульса 400 (1) и 600 фс (2).

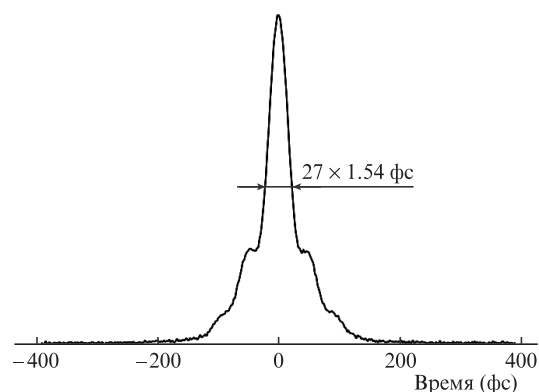


Рис.7. Автокорреляционная функция импульса стокового излучения длительностью 27 фс (в предположении формы импульса sech^2). ЧСИ равна 10 кГц, энергия стокового импульса – 40 мкДж.

Подбор оптимальной отрицательной дисперсии для компрессии осуществлялся путем варьирования толщины кварцевой пластины, установленной на выходе камеры с капилляром (пластина П на рис.1). Наиболее короткие стоковые импульсы были получены при общей длине оптического пути в кварцевых элементах на выходе камеры преобразователя (окошко камеры, линза, широкополосный фильтр, призма Рошона, кварцевая пластина), равной 3 см. При этом длительность стокового импульса изменялась в пределах 25–30 фс в диапазоне ЧСИ 1–20 кГц.

Автокорреляционная функция (АКФ) сжатого стокового импульса представлена на рис.7. Расчеты показали, что для получения импульса длительностью 27 фс при компрессии в кварце толщиной 3 см длительность исходного chirпированного импульса должна составлять ~ 200 фс, т.е. стоковый импульс на выходе капилляра должен быть примерно в два раза короче импульса накачки, что является типичным для процессов ВКР. Из формы АКФ следует, что сжатый импульс включает центральный пик и субимпульс с большей длительностью, в котором содержится $\sim 30\%$ энергии импульса. Возникновение субимпульса связано с нелинейностью частотного chirпа и неточной компенсацией chirпа в плавленом кварце. С учетом формы АКФ пиковая мощность стокового импульса после компрессии достигала 1 ГВт.

5. Выводы

В результате проведенных исследований получены следующие результаты.

1. Разработана схема двухимпульсной накачки комбинационно-активной среды. Показано, что при ВКР в водороде излучения фемтосекундного иттербиевого лазера максимальная эффективность преобразования достигается для импульсов с длительностью более 400 фс.

2. Получена эффективность преобразования в стоксово излучение с центральной длиной волны 1.8 мкм 14% при частоте следования импульсов 1 кГц и 9.5% – при 20 кГц. Максимальная средняя мощность стоксова излучения составила 0.6 Вт.

3. Осуществлено сжатие импульса стоксова излучения до длительности менее 30 фс в оптических элементах из плавленого кварца на выходе комбинационно-активной среды. Пиковая мощность излучения достигала 1 ГВт.

Следует также отметить, что данная схема комбинационного преобразователя представляется перспективной и для других типов лазеров, в частности для хром-форстеритного фемтосекундного лазера [9] с длиной волны излучения 1.24 мкм. В этом случае длина волны стоксовой компоненты равна 2.6 мкм, причем, как показывают проведенные исследования [1], нелинейная фазовая

модуляция не будет значительно снижать эффективность преобразования при таком соотношении длин волн накачки и стоксова излучения.

1. Konyashchenko A.V., Losev L.L., Pazyuk V.S. *Opt. Lett.*, **44**, 1646 (2019).
2. Schmidt B.E., Shiner A.D., Giguere M., Lassonde P., Trallero-Herrero C.A., Kieffer J-C, Corkum P.B., Villeneuve D.M., Legare F. *J. Phys. B.: At. Mol. Opt. Phys.*, **45**, 074008 (2012).
3. Шен И.Р. *Принципы нелинейной оптики* (М.: Наука, 1989).
4. Pinault S.C., Potasek M.J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **2**, 1318 (1985).
5. Konyashchenko A.V., Losev L.L., Tenyakov S.Y. *Opt. Express*, **15**, 11855 (2007).
6. Колященко А.В., Кострюков П.В., Лосев Л.Л., Пазюк В.С. *Квантовая электроника*, **47**, 593 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 593 (2017)].
7. Shelton D.P. *Phys. Rev. A*, **42**, 2578 (1990).
8. Колященко А.В., Кострюков П.В., Лосев Л.Л., Теняков С.Ю. *Квантовая электроника*, **41**, 989 (2011) [*Quantum Electron.*, **41**, 989 (2011)].
9. Агранат М.Б., Ашитков С.И., Иванов А.А., Колященко А.В., Овчинников А.В., Подшивалов А.А. *Квантовая электроника*, **34**, 1018 (2004) [*Quantum Electron.*, **34**, 1018 (2004)].