

Минимально возможная длительность лазерного импульса при ВКР

А.В.Конященко, П.В.Кострюков, Л.Л.Лосев, В.С.Пазюк

Показано, что ограничение минимальной длительности лазерного импульса при нестационарном вынужденном комбинационном рассеянии является следствием процессов нелинейной фазовой модуляции лазерной и стоксовых волн. При этом минимальная длительность лазерного импульса определяется отношением нелинейного показателя преломления к сечению спонтанного комбинационного рассеяния.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние, фемтосекундный лазер, фазовая самомодуляция, фазовая кросс-модуляция.

1. Введение

Хорошо известно, что энергетическая эффективность преобразования лазерного излучения в процессе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) резко падает для импульсов длительностью в сотни фемтосекунд [1–3]. Поэтому для ВКР-преобразователей фемтосекундных лазерных импульсов были разработаны специальные схемы, в которых на первом этапе осуществляется увеличение длительности исходного фемтосекундного лазерного импульса до нескольких пикосекунд посредством частотного чирпирования, а затем реализуются ВКР-преобразование чирпированного импульса и временная компрессия стоксова импульса [4, 5].

Можно выделить основные физические процессы, которые, в принципе, могут привести к снижению эффективности преобразования, вплоть до полного подавления процесса ВКР субпикосекундных лазерных импульсов. Это нелинейная фотоионизация активной среды, самофокусировка светового пучка и нелинейная фазовая модуляция. (Эффекты, связанные с дисперсией активной среды, можно не учитывать для газовых активных сред и импульсов длительностью ~ 100 фс.) Что касается первых двух процессов, то они могут быть исключены путем использования длиннофокусной оптики и световодов, позволяющих снизить интенсивность излучения в области преобразования и обеспечить режим, при котором пороговая мощность ВКР будет ниже критической мощности самофокусировки. Нелинейную фазовую модуляцию полностью исключить не удается, поскольку она, как и инкремент усиления при ВКР, зависит от интенсивности лазерного излучения и длины активной среды [6]. Следует также отметить, что экспериментально наблюдалось резкое снижение эффективности преобразования в стоксово излучение при наличии уширения спектра накачки на выходе активной среды [3]. Таким образом, существуют сви-

детельства в пользу того, что именно процесс фазовой модуляции и, следовательно, уширения спектра излучения накачки приводит к падению эффективности преобразования. В нашей предыдущей работе [7] мы дали качественное описание влияния нелинейной фазовой модуляции на процесс ВКР.

Целями настоящей работы были более детальное описание механизма подавления процесса ВКР при нелинейной фазовой модуляции излучения накачки, оценка минимальной возможной длительности импульса лазерного излучения при ВКР и экспериментальная проверка теоретических выводов.

2. Оценка минимальной длительности импульса накачки при ВКР

Рассмотрим процесс развития волны стоксова излучения в поле накачки с уровня спонтанного рассеяния при незначительном превышении порога ВКР. В этом случае на всей длине активной среды L выполняется соотношение $I_p(z) \gg I_s(z)$, где $I_p(z)$ и $I_s(z)$ – интенсивности волны накачки и стоксова излучения соответственно.

Модуль волнового вектора излучения накачки k_p можно представить в виде суммы линейной и нелинейной частей: $k_p(z) = k_p^0 + k_p^{NL} = 2\pi n_p/\lambda_p + 2\pi n_2 I_p(z)/\lambda_p$, где λ_p – длина волны лазерного излучения, а n_p и n_2 – линейная и нелинейная части показателя преломления. Зависимость интенсивности и, следовательно, волнового вектора от времени приводит к фазовой самомодуляции. Для стоксовой волны модуль волнового вектора записывается в следующем виде: $k_s(z) = k_s^0 + k_s^{NL} = 2\pi n_s/\lambda_s + 4\pi n_2 I_p(z)/\lambda_s$, где λ_s – длина волны стоксова излучения, а n_s – линейная часть показателя преломления стоксовой волны. Нелинейная часть волнового вектора стоксова излучения малой интенсивности определяется процессом кросс-модуляции, вызванным сильной лазерной волной [8].

В комбинационно-активных средах при накачке импульсами субпикосекундной длительности процесс ВКР проходит в нестационарном режиме, когда длительность импульса излучения короче времени дефазировки T_2 когерентных колебаний возбужденных молекул активной среды (фононной волны). Поэтому можно считать, что

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

Поступила в редакцию 18 апреля 2017 г.

при нестационарном ВКР волновой вектор фоновой волны не меняется на протяжении лазерного импульса. В случае, когда изменяется разность волновых векторов стоковой волны и лазерной волны накачки, а волновой вектор ранее сформированной фоновой волны не изменяется, эффективность преобразования будет падать. Такая ситуация может возникнуть при наличии в волновом векторе взаимодействующих волн нелинейной части, зависящей от интенсивности. В этом случае появляется волновая расстройка между волнами при малом и максимальном значении интенсивности I_p^{\max} излучения накачки:

$$\begin{aligned} \Delta k(z) &= (k_p - k_S)_{I_p \approx I_p^{\max}} - (k_p - k_S)_{I_p \approx 0} \\ &= 2\pi n_2 I_p^{\max}(z) \left(\frac{1}{\lambda_p} - \frac{2}{\lambda_S} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Эффективность процесса преобразования будет падать, а порог ВКР резко возрастет при набеге нелинейной фазы [9]:

$$\Phi = \left| \int_0^L \Delta k(z) dz \right| \geq \pi.$$

Учитывая (1) и то, что в нестационарных условиях ВКР развивается с уровня спонтанного рассеяния при выполнении условия для комбинационного инкремента усиления $g(\tau/T_2) \int_0^L I_p^{\max}(z) dz > 80$ [10] (g – стационарный коэффициент усиления ВКР, τ – длительность импульса накачки), для того чтобы набег нелинейной фазы не превышал π и протекал процесс ВКР, необходимо выполнить следующее условие:

$$\tau \geq \frac{160 T_2 n_2}{g} \left(\frac{2}{\lambda_S} - \frac{1}{\lambda_p} \right). \quad (2)$$

Отметим, что поскольку $g \sim (d\sigma/d\Omega) T_2 N$ [9] ($d\sigma/d\Omega$ – дифференциальное сечение спонтанного комбинационного рассеяния, N – концентрация активных частиц), а в газах $n_2(N) \approx n_2(1)N/N(1)$ ($n_2(1)$ и $N(1)$ – значение нелинейного показателя преломления и концентрации частиц при единичном давлении), то, как следует из (2), минимальная длительность импульса накачки не зависит от давления газовой активной среды:

$$\tau_{\min} \sim n_2(1) \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)^{-1}. \quad (3)$$

Анализ комбинационно-активных сред на основе выражений (2) и (3) показал, что наиболее короткие импульсы накачки длительностью ~ 500 фс могут быть преобразованы при ВКР в водороде и метане. В метане примерно в три раза больше как сечение комбинационного рассеяния, так и нелинейный показатель преломления [11]. Эти оценки достаточно хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными [12]. Длительность наиболее коротких импульсов, которые были преобразованы в схеме с одночастотной накачкой, составила ~ 300 фс [2, 12]. При двухчастотной накачке, когда на вход активной среды подаются два фемтосекундных импульса на частотах с разностью равной частоте комбинационного перехода и со сравнимыми амплитудами, длительность импульсов накачки удается уменьшить, поскольку в этом случае требуется меньшее значение комбинационного

инкремента усиления по сравнению со случаем одночастотной накачки [13].

Для подтверждения определяющего влияния процесса нелинейной фазовой модуляции фемтосекундных импульсов на процесс ВКР были проведены эксперименты, в которых проводилось варьирование только длительности лазерного импульса накачки.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Эксперименты проводились с использованием лазерной системы на сапфире с титаном REUS-40F1K («Авеста-Проект»). Лазерная система была построена по принципу усиления chirпированного импульса и включала задающий генератор и регенеративный усилитель. Варьирование длительности лазерного импульса осуществлялось посредством изменения расстояния между дифракционными решетками временного компрессора на выходе лазерной системы. Таким образом было возможно плавно изменять длительность импульса от 30 фс до 4.5 пс. Энергия одиночного импульса составляла ~ 1 мДж при частоте следования импульсов 1 кГц. Центральная длина волны была равна 800 нм.

Для комбинационного преобразователя была выбрана оптическая схема с кварцевым капилляром. Использовался капилляр с внутренним диаметром 150 мкм и длиной 60 см, помещенный в камеру длиной 1.2 м. Выбор схемы с газонаполненным капилляром был обусловлен тем, что она позволяет снизить пороговую энергию ВКР и обеспечить режим работы, при котором мощность импульса накачки будет ниже критической мощности самофокусировки. Таким образом в проведенных экспериментах исключалось влияние самофокусировки на процесс ВКР.

Лазерное излучение фокусировалось на вход капилляра линзой с фокусом 1 м. Пропускание капилляра составляло $\sim 30\%$. Эксперименты проводились при давлении водорода 10 атм. Спектр излучения на выходе камеры с водородом регистрировался спектрометром ASP-75 («Авеста-Проект»). Для измерения энергии импульс стокова излучения с длиной волны ~ 1.2 мкм выделялся с помощью цветного стекла.

На рис.1 показана зависимость энергии стокова импульса от длительности отрицательно chirпированного импульса накачки. Видно, что энергия стокова импульса

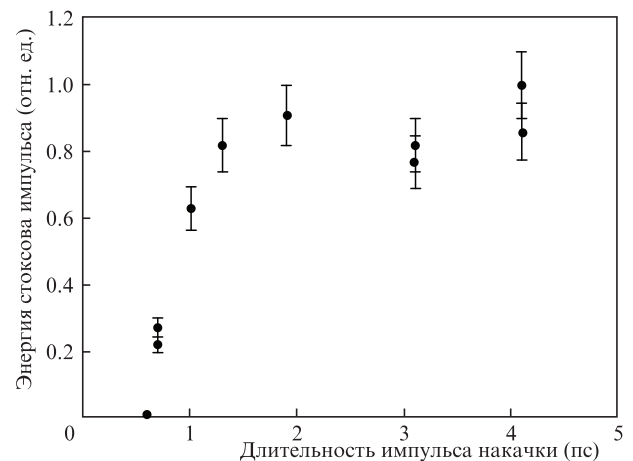


Рис.1. Зависимость энергии импульса стокова излучения от длительности лазерного импульса накачки.

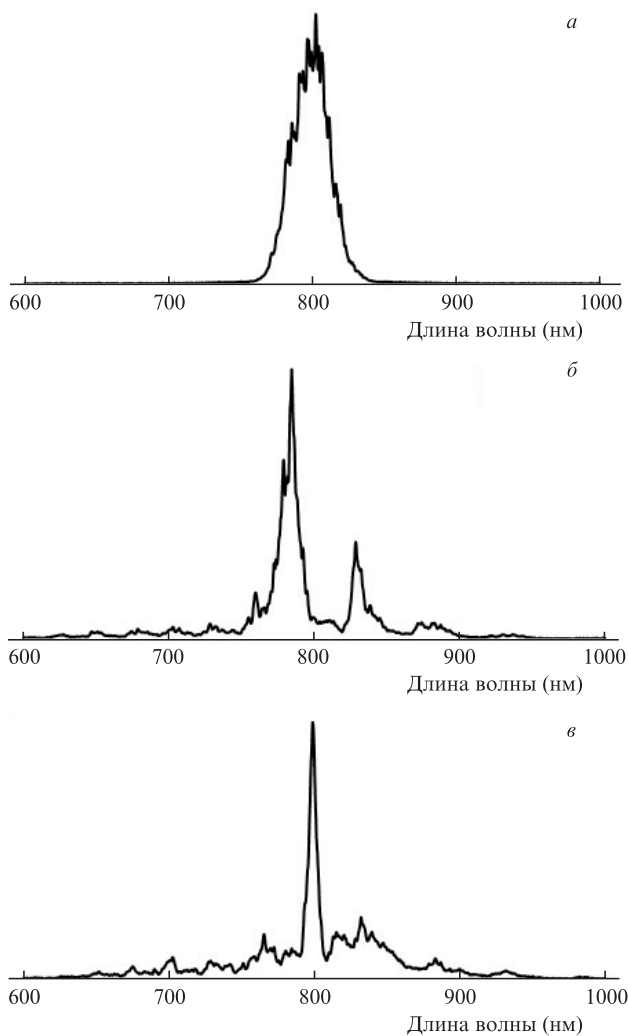


Рис.2. Спектр лазерного излучения на входе в капилляр (а) и на выходе при длительности импульса накачки 4.5 (б) и 0.7 пс (в).

и, следовательно, эффективность преобразования резко падают при длительности импульса накачки короче 1 пс, что достаточно хорошо согласуется с оценками, сделанными выше. При этом измеренное значение пропускания капилляра не менялось при варьировании длительности импульса накачки в пределах 0.5 – 5 пс, что свидетельствует об отсутствии процесса самофокусировки лазерного излучения. Отметим также, что в нашей предыдущей работе [14] наблюдалось аналогичное снижение эффективности преобразования для импульсов накачки короче

1 пс, несмотря на существенно отличающиеся условия эксперимента – энергия импульса накачки ~100 мкДж и давление водорода 130 атм.

Влияние нелинейной фазовой модуляции импульса накачки на эффективность генерации стоксова излучения подтверждается также результатами измерения спектра накачки на выходе капилляра (рис.2). Для импульса накачки длительностью ~4 пс, при котором происходит эффективная генерация стоксова излучения, не наблюдается уширения спектра накачки (рис.2,б). Спектр накачки становится более узким по сравнению со спектром на входе в капилляр (рис.2,а). (Пик в районе 830 нм связан с генерацией вращательной стоксовой компоненты.) Сужение спектра связано с преобразованием спектральных компонент, находящихся на заднем фронте спектрально chirпированного импульса, в стоксово излучение при нестационарном ВКР. В случае импульса накачки с отрицательным chirпом преобразуются длинноволновые спектральные компоненты накачки. При сокращении длительности импульса накачки до 0.7 пс эффективность генерации стоксова излучения падает, и наблюдается уширение спектра накачки на выходе капилляра (рис.2,в). При этом возникает узкий пик на центральной длине волны излучения накачки, что характерно для процесса нелинейной фазовой самомодуляции импульса с отрицательным частотным chirпом. Этот эффект известен как спектральная компрессия [15].

Как следует из выражения (1), при выполнении условия $\lambda_s \approx 2\lambda_p$ влияние нелинейной фазовой модуляции на процесс развития стоксовой волны снижается – нелинейная волновая расстройка стремится к нулю, и возможна генерация стоксова излучения при более коротком импульсе накачки по сравнению с накачкой на других длинах волн. С целью проверки данного вывода был проведен эксперимент по ВКР-преобразованию излучения иттербиевого лазера с центральной длиной волны 1030 нм. В соответствии с (2), в этом случае при ВКР в сжатом водороде предельная длительность импульса накачки может быть сокращена примерно в 2 раза по сравнению с длительностью импульса при накачке излучением титансапфирового лазера. Использовалась лазерная система ТЕТА («Авеста – Проект») с энергией импульса 100 мкДж. В такой лазерной системе не представлялось возможным менять длительность импульса излучения. Поэтому эксперименты проводились при фиксированной длительности спектрально-ограниченного лазерного импульса, равной 300 фс, и ширине спектра излучения 8 нм. ВКР-преобразование осуществлялось по схеме, описанной выше. Давление водорода составляло 25 атм.

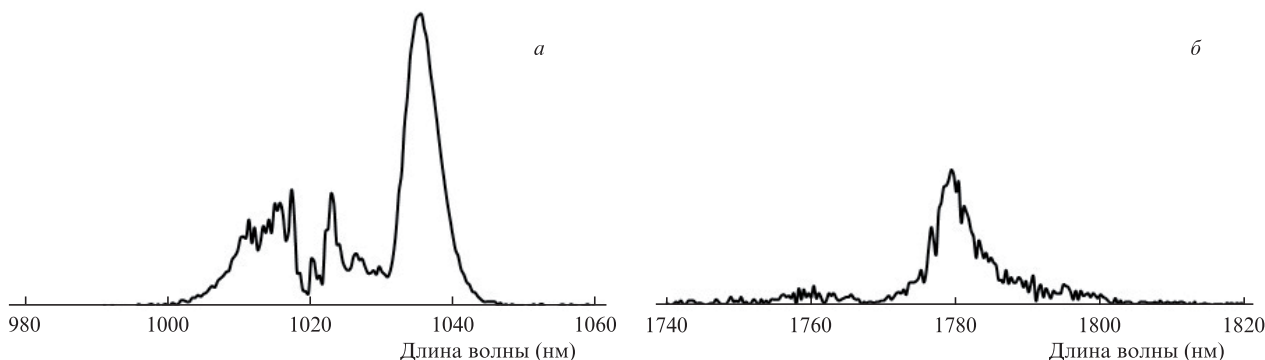


Рис.3. Спектры лазерного (а) и стоксова (б) излучения на выходе капилляра при накачке излучением иттербиевого лазера.

На рис.3 показаны спектры лазерного и стоксова излучения. Спектр импульса лазерного излучения на выходе капилляра уширялся по отношению к спектру импульса накачки на входе в активную среду вследствие фазовой самомодуляции. Тем не менее, в этих условиях наблюдалась генерация стоксова излучения, что было невозможным при накачке импульсами титан-сапфирового лазера такой же длительности.

Таким образом, в результате проведенного теоретического анализа и экспериментальных исследований показано, что предельно короткая длительность импульса накачки, при которой возможен процесс нестационарного вынужденного комбинационного рассеяния, определяется процессами нелинейной фазовой модуляции лазерной и стоксовых волн. При этом значение минимальной длительности импульса накачки зависит от отношения нелинейного показателя преломления активной среды к сечению спонтанного комбинационного рассеяния.

1. Wang J.-K., Siegal Y., Lu C., Mazur E., Reintjes J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **11**, 1031 (1994).
2. Krylov V., Rebane A., Ollikainen O., Erni D., Wild U., Bespalov V., Staselko D. *Opt. Lett.*, **21**, 381 (1996).
3. Losev L.L., Song J., Xia J.F., Strickland D., Brukhaniv V.V. *Opt. Lett.*, **27**, 2100 (2002).
4. Zhavoronkov N., Noack F., Petrov V., Kalosha V.P., Herrmann J. *Opt. Lett.*, **26**, 47 (2001).
5. Konyashchenko A.V., Losev L.L., Tenyakov S.Yu. *Opt. Express*, **15**, 11855 (2007).
6. Pinault S.C., Potasek M.J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **2**, 1318 (1985).
7. Конященко А.В., Кострюков П.В., Лосев Л.Л., Пазюк В.С. *Квантовая электроника*, **47**, 1 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 1 (2017)].
8. Кицак М.А., Кицак А.И. *Квантовая электроника*, **38**, 365 (2008) [*Quantum Electron.*, **38**, 365 (2008)].
9. Шен И.П. *Приципы нелинейной оптики*, (М.: Наука, 1989, с. 95).
10. Carman R.L., Shimizu F., Wang C.S., Bloembergen N. *Phys. Rev. A*, **2**, 60 (1970).
11. Hahn J.W., Lee F.S. *J. Opt. Soc. Am. B*, **12**, 1021 (1995).
12. Krylov V., Ollikainen O., Wild U.P., Rebane A., Bespalov V.G., Staselko D.I. *J. Opt. Soc. Am. B*, **15**, 2910 (1998).
13. Sali E., Mendham K.J., Tish J.W.G., Halfmann T., Marangos J.P. *Opt. Lett.*, **29**, 495 (2004).
14. Konyashchenko A.V., Losev L.L., Pazyuk V.S., Tenyakov S.Yu. *Appl. Phys. B*, **93**, 455 (2008).
15. Washburn B.R., Buck J.A., Ralph S.E. *Opt. Lett.*, **25**, 445 (2000).