

Нелинейные оптические явления в прозрачных средахД.Н. Воронкевич

Научный руководитель: м.н.с., Д.М. Лубенко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30. 634050,

e-mail: dnv4@tpu.ru**Nonlinear optical phenomena in transparent media**D.N. Voronkevich

Scientific Supervisor: D.M. Lubenko

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

e-mail: dnv4@tpu.ru

Abstract: *experimentally studied the broadening of the spectrum in the post-filamentation channel of femtosecond laser pulses with a central wavelength of 940 nm. Preliminary estimates and experiments show that the main process leading to the broadening of the spectrum was four-wave mixing of the original pulse components. The process of phase self-modulation was also considered. The spectrum width in the experiment was 400–1000 nm. The possibility of creating a white supercontinuum source for atmospheric sounding has been demonstrated.*

Key words: *femtosecond laser, laser filament, supercontinuum, spectrum broadening.*

Введение

На сегодняшний день, нелинейные процессы, происходящие при распространении мощного фемтосекундного излучения в различных средах, привлекают внимание как своей физикой, так и широкими возможностями для применений. Фемтосекундные лазеры обеспечивают высокую плотность мощности излучения, которая приводит к различным нелинейным эффектам, среди которых стоит отметить такие как филаментация излучения как в твердых или жидких средах, так и на открытом воздухе, а также генерацию широкополосного (белого) суперконтинуума (СК), зачастую сопровождающего этот процесс [1].

Источники белого СК находят применение для задач спектроскопии. Так, например, промышленностью выпускаются компактные лабораторные источники суперконтинуума с диапазоном 400–4000 нм (Leukos, Франция). Однако существует задача определения примесей в атмосфере, в том числе и вредных, для этих целей требуются генераторы СК, способные зондировать протяженные атмосферные трассы. Возможности такого зондирования показаны в работах [2, 3]. Группа проекта Teramobile с помощью мощного фемтосекундного лазера создавала протяженные филаменты белого свечения в атмосфере [4].

Механизмы создания такого белого СК могут быть различны. Наиболее часто в литературе рассматриваются фазовая самомодуляция (ФСМ) и четырехволновое параметрическое преобразование (ЧПП) [1, 5, 6]. Анализ литературных данных показывает, что при филаментации фемтосекундного импульса в газовых средах возможно получить оба механизма преобразования, однако наибольшей эффективностью будет обладать процесс четырехволнового смешения. В работе [7] авторы искажали спектр фемтосекундного лазера таким образом, чтобы получить 2 интенсивных пика, способствующих запуску каскадного ЧПП. Отдельно стоит отметить работу [8] демонстрирующую более интенсивную генерацию СК при использовании излучения с круговой поляризацией. Таким образом целью данной работы было определено создание эффективного источника белого СК для зондирования атмосферы. Отдельные эффекты, позволяющие создать такой источник уже описаны в литературе, однако готовых решений нигде не приводится, а наиболее близкий вариант – установка Teramobile слишком дорог и сложен.

Методы и методы исследования

Эксперименты проводились на фемтосекундном комплексе «Старт-480М» (Авеста-проект, Россия). Комплекс состоит из задающего генератора на Ti:Sapphire лазере, стретчера, регенеративного и двух многопроходовых усилителей и компрессора на дифракционных решетках. Выходные параметры излучения комплекса, следующие: длина волны $\lambda = 940$ нм, длительность импульса $\tau = 60 \pm 10$ фс, энергия одного импульса $E = 5\text{--}10$ мДж. Энергетические параметры пучка регистрировались при помощи измерителя мощности и энергии Gentec Maestro (Gentec, Канада) с измерительной головкой QE50LP-H-MB-D0. Длительность лазерных импульсов определялась при помощи автокоррелятора Avesta ASF-20 (Авеста-проект, Россия). Для исследования спектральных параметров использовался спектрометр Ocean Optics HR 4000 (Ocean Optics, США) с разрешением 0,75 нм и диапазоном 200–1100 нм. Схема эксперимента приведена на рис. 1а.

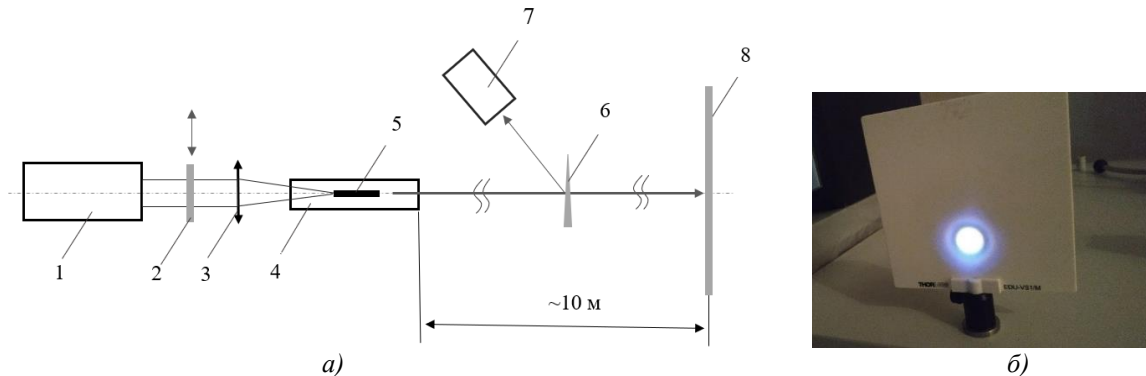


Рис. 1. Схема эксперимента (а). Цифрами показаны: 1 – фемтосекундный лазерный комплекс, 2 – четвертьволновая пластинка, 3 – фокусирующая линза, 4 – кювета с газом, 5 – лазерный филамент, 6 – оптический клин, 7 – спектрометр, 8 – экран. б) фотография пучка белого СК

Излучение лазерного комплекса на выходе имело линейную поляризацию. Для создания циркулярной поляризации использовалась четвертьволновая пластинка. Далее излучение фокусировалось линзой ($F = 750$ мм) в кювете с газом таким образом, чтобы получить филамент длиной 4–6 см. Режим работы установки, фокусное расстояние линзы и давление газа подбирались таким образом, чтобы на выходе из кюветы получить белый широкополосный суперконтинуум с минимальной расходимостью излучения. Перед началом эксперимента было подтверждено, что изменение длительности лазерного импульса при прохождении окон кюветы незначительно, а сами стекла не вносят искажений в спектральный состав импульса и не способствуют генерации суперконтинуума.

Результаты

Основываясь на результатах [7] и [8], был поставлен эксперимент по созданию СК в плазме филамента. Для более интенсивной генерации поляризация пучка менялась с линейной на круговую, а лазерная система была настроена таким образом, чтобы обеспечивалась 3–4 высокоинтенсивных пика в спектре выходного излучения. Однако для создания СК при фокусировке на открытом воздухе энергии в 10 мДж оказалось недостаточно. Ожидаемый результат был получен при фокусировке в кювете, заполненной чистым азотом под давлением 3 атм. Эффективность преобразования по предварительным оценкам составила 12 %. При изменении давления в диапазоне 2,5–3,5 атм. зависимость порога генерации белого СК от энергии импульса была близка к квадратичной. Такое поведение согласуется с формулой, описанной в [5]:

$$I_{FWRM} = \frac{9\omega_{AS}^2 N^2}{(2c)^4 \varepsilon_0 2n_{AS} n_S n_L^2} \cdot |\chi_{FWRM}^{(3)}|^2 \cdot l^2 \cdot I_S I_L^2 \sin^2 c^2 \left(\frac{\Delta k l}{2} \right),$$

где N – плотность рамановской среды, n_S , n_{AS} и n_L – показатели преломления среды на частотах первого стокса, первого антистокса и основного пучка соответственно, ε_0 – диэлектрическая проницаемость для вакуума, $\chi^{(3)}$ – нелинейная восприимчивость, которая включает не резонансные вклады и разности частоты, Δk – фазовая расстройка. Интенсивность первого антистоксова пика пропорциональна I_S и I_L . Концентрация частиц рамановской среды N определяется известным соотношением:

$$N = \frac{pV}{kT},$$

где p – давление газа, V – объем, k – постоянная Больцмана, T – температура газа. Такие зависимости позволяют сделать вывод о экспериментальной реализации каскадного ЧПП. Полученный при этом спектр генерации составил 350–1100 нм. Расходимость наблюдаемого СК на расстоянии 12 м (рис. 1б) составила $2\varphi = 2$ мрад. Так как атмосфера преимущественно состоит из азота (~78 %), то можно оценить, что для генерации белого СК на открытом воздухе для используемой установки потребуется энергия в импульсе 15–20 мДж.

Заключение

В ходе работы экспериментально продемонстрирована возможность создания источника узконаправленного белого суперконтинуума в среде, содержащий азот. Проведенные оценки показывают, что генерация суперконтинуума осуществляется с высоким КПД, что соответствует четырехволновому параметрическому преобразованию в среде. Полученные результаты демонстрируют возможность создания такого источника и на открытом воздухе.

Список литературы

1. Кандидов В.П., Голубцов И.С., Косарева О.Г. Источники суперконтинуума в мощном фемтосекундном лазерном импульсе при распространении в жидкости и газе // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34, № 4. – С. 348–354.
2. Букин О.А. и др. Лидарное зондирование атмосферы с использованием гигаваттных лазерных импульсов фемтосекундной длительности // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44, № 6. – С. 563–569.
3. Голик С.С. и др. Разработка методов лидарного зондирования атмосферы фемтосекундными импульсами // Международный научно-исследовательский журнал. – 2018. – № 9 (75). – Ч. 1. – С. 12–16.
4. Kasparian J. et al. White-light filaments for atmospheric analysis // Science. – 2003. – V. 301, № 5629. – P. 61–64.
5. Kawano H., Hirakawa Y., Imasaka T. Generation of high-order rotational lines in hydrogen by four-wave Raman mixing in the femtosecond regime // IEEE journal of quantum electronics. – 1998. – V. 34, № 2. – P. 260–268.
6. Théberge F. et al. Ultrabroadband continuum generated in air (down to 230 nm) using ultrashort and intense laser pulses // Applied Physics B. – 2005. – V. 80. – P. 221–225.
7. Théberge F. et al. Efficient spectral-step expansion of a filamenting laser pulse // Optics Letters. – 2013. – V. 38, № 9. – P. 1576–1578.
8. Shi Z. et al. The dependence of external focusing geometries and polarization in generation of supercontinuum by femtosecond laser pulse in air // Optik. – 2018. – Vol. 164. – P. 390–394.