

Генерация когерентных пучков белого цвета в азоте

В.Ф. Лосев, И.А. Зятиков, Д.М. Лубенко, С.В. Алексеев

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, Томск, Россия, пр. Академический, 2/3, losev@ogl.hcei.tsc.ru*

В докладе приводятся результаты экспериментального исследования условий формирования высоконаправленного суперконтинуума (ВСК) в газообразном азоте при накачки импульсом излучения на длине волны 950 нм с длительностью 70 фс и энергией до 7 мДж. Излучение накачки фокусировалось в газовую камеру сферическим зеркалом с $F = 75$ см в условиях абберации (угол падения излучения на зеркало – 150). Показывается, что существует оптимальная энергия накачки 4,5 мДж и давление газа 3 атм. Спектральный состав ВСК охватывает диапазон от 350 до 1000 нм. Расходимость излучения ВСК является дифракционной и для всего пятна белого цвета составляет ~ 1 мрад. Максимальная энергия излучения ВСК составляла 17 мкДж.

Ключевые слова: филамент, суперконтинуум, абберационная фокусировка, импульс излучения, длина волны, расходимость; *filament, supercontinuum, aberration focusing, radiation pulse, wavelength, divergence.*

Введение

С развитием фемтосекундных лазеров повысился интерес исследователей к изучению нелинейных процессов в газовых средах, происходящих при коллимированном или сфокусированном взаимодействии лазерного излучения со средой. Одним из таких процессов является филаментация, которая представляет собой устойчивую динамическую световую структуру, существующую за счет баланса между керровской фокусировкой излучения и его дефокусировкой на создаваемой плазме. В результате распространения такой структуры формируется плазменный канал (плазменная нить, филамент) с диаметром 50–100 мкм, который может распространяться на большие расстояния. Баланс керровской фокусировки с дифракционными и рефракционными процессами на плазме ограничивают и стабилизируют в филаменте интенсивность излучения (10^{13} – 10^{14} Вт/см²) и концентрацию электронов (10^{14} – 10^{16} см⁻³). Благодаря тому, что филамент позволяет транспортировать высокоинтенсивные лазерные импульсы на большие расстояния, к нему проявляется большой интерес исследователей. Этот интерес обусловлен возможностью применения этого явления в областях дистанционного зондирования атмосферы, генерации ТГц излучения, запуском разрядников и многих других.

Волновое распространение излучения накачки в филаменте приводит к эффективной генерации конического суперконтинуума (СК) и высоконаправленного ВСК. Первый связан с многообразием нелинейно-оптических механизмов, задействованных в формировании широких спектров излучения ВСК и определяющих совокупность его свойств. Второй связан с использованием излучения ВСК в различных приложениях дистанционного мониторинга окружающей среды и исследованиях быстропротекающих процессов.

Большинство экспериментальных и теоретических работ, посвященных этим явлениям, относится к случаю филаментации коллимированных и сфокусированных осесимметричных гауссовых пучков [1–6]. В работах [7–22] было показано, что внесение фазовых искажений при фокусировке фемтосекундного лазерного излучения, может приводить к различным полезным и вредным эффектам при филаментации. Наиболее простой метод создания фазовых искажений заключается во внесении аббераций при фокусировке за счет наклона фокусирующей линзы или сферического зеркала. В большинстве этих работ изучаются характерные особенности и параметры филамента, обусловленные распределением светового поля на основной частоте. При этом отмечается, что филамент распадается на две части, расстояние между которыми зависит от угла падения пучка накачки на линзу или фокусирующее зеркало [11]. И только в некоторых работах [17–22] указывается на то, что в определенных условиях происходит формирование двух филаментов, распространяющиеся под углом друг к другу, в которых может возникать ВСК белого цвета. В работах [18–22] при абберационной фокусировке фемтосекундного лазерного пучка в атмосферном воздухе были найдены условия для устойчивого формирования двух пучков белого света. Было показано, что формирование излучения ВСК происходит за основным филаментом в дополнительном слабо светящемся филаменте (постфиламенте) с длиной ~ 100 см и поперечным размером ~ 0,3 мм. На этом участке происходит постепенная трансформация спектрального состава излучения от длинноволновой накачки до коротковолновой части спектра ~ 350 нм. После этого участка излучение ВСК распространяется без изменения спектрального состава по закону дифракционно ограниченного пучка. Данное излучение существенно отличается от конического СК, возникающего в безабберационном филаменте: оно имеет расходимость близкую к дифракционному пределу, линейную поляризацию и более короткую длительность относительно исходного излучения накачки [18].

Настоящая работа посвящена поиску условий формирования излучения ВСК при абберационной фокусировке фемтосекундного лазерного излучения с длиной волны 950 нм в газообразном азоте при повышенном давлении.

Аппаратура и методика экспериментов

В экспериментах использовалась Ti:Sa лазерная система, которая формировала излучения фемтосекундной длительности. В состав комплекса входят Ti:Sa задающий генератор с непрерывным лазером накачки, оптический стретчер, один регенеративный и два многопроходных усилителя с импульсными лазерами накачки на длине волны 532 нм, компрессор на двух дифракционных решетках. Параметры выходного излучения были следующими: центральная длина волны 940 нм, длительность импульса 70 фс, энергия до 7 мДж, диаметр пучка 15 мм. Лазерная система работала с частотой следования импульсов 10 Гц. Выходное излучение было линейно поляризовано (горизонтально).

Лазерный пучок фокусировался в металлическую газовую камеру с внутренним диаметром 3 см, наполненную после ее откачки азотом при давлении от 1 до 4 атм. Окна камеры закрывались пластинами из плавленого кварца, установленными под углом 10° . В экспериментах использовались две камеры с внутренней длиной 83 и 298 см. Фокусировка пучка осуществлялась сферическим зеркалом с фокусным расстоянием $F = 75$ см. Для создания абберационных условий пучок направлялся на зеркало под углом падения 15° , так же как в наших предыдущих работах на воздухе [17–21]. На выходе из камеры исследовались параметры одного белого луча ВСК. Луч проходил через диафрагму диаметром 3 мм, который точно соответствовал размеру белого пятна. Для отсека накачки выходное излучение из камеры обрезалось оптическим фильтром СЗС–24, либо диэлектрическим зеркалом с областью пропускания 400–850 нм.

Для измерения спектральных параметров излучения использовался спектрометр HR4000 фирмы Ocean Optics, работающий в диапазоне 193–1100 нм со спектральным разрешением 0.75 нм. Энергия пучка накачки и преобразованного излучения ВСК измерялись измерителями мощности и энергии Gentec и Ophir. Размеры пучка белого цвета определялись по фотографиям на экране на различных расстояниях от выходного окна камеры. Пространственное распределение интенсивности излучения ВСК и пучка накачки в дальней зоне определялось с помощью профилометра SP620U.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Как было ранее отмечено, при абберационной фокусировке лазерного пучка в воздухе формировались два аналогичных белых пучка ВСК, расходящихся под углом $1,4^\circ$ относительно друг друга [18–22]. В данной работе, в азоте так же было возможно формировать два пучка, однако наличие камеры создавало трудность для одновременного их вывода. Поэтому исследовался только один пучок.

На первом этапе были исследованы пороговые условия возникновения пучка белого цвета при изменении энергии накачки. Было показано, что в длинной камере с давлением азота 3 атм при повышении энергии накачки до 3,5 мДж появлялось пятно красного цвета. Затем при достижении энергии 3,7 мДж в этом пятне на оси возникало пятно белого цвета с диаметром в 4 раза меньше красного (рис., *а*). С дальнейшим ростом энергии накачки до 3,9 мДж диаметр пятна белого цвета увеличивался в два раза, а красное пятно вокруг переходило в желтое (рис., *б*). И наконец, при энергии 4,2 мДж все пятно становилось белым (рис., *в*).



Динамика формирования излучения ВСК в зависимости от энергии накачки в камере с длиной 298 см: $E_n = 3,7$ мДж (*а*), $E_n = 3,9$ мДж (*б*), $E_n = 4,2$ мДж (*в*). $P = 3$ атм

Дальнейшее повышение энергии накачки показало, что существует ее оптимальная величина 4,5 мДж. После прохождения оптимальной энергии накачки энергия излучения ВСК снижалась и на экране наблюдалась обратная картина – от белого цвета к красному вплоть до исчезновения ВСК. Максимальная энергия излучения ВСК составляла 17 мкДж. Для короткой камеры оптимальная энергия накачки была 3,9 мДж, при этом наибольшая энергия излучения ВСК составляла 8 мкДж.

Исследование энергии излучения ВСК в длинной камере для различных давлений азота показало, что генерация ВСК возникала при давлении более 1,5 атм, затем достигала наибольшей величины при 3 атм и постепенно снижалась до 4 атм. Отметим, что для короткой камеры наибольшая энергия ВСК так же достигалась при давлении азота 3 атм.

Исследование спектрального состава ВСК показало, что в оптимальных условиях спектр занимает всю область от накачки до 350 нм, при этом наблюдается его глубокая амплитудная модуляция.

Исследование пространственной структуры пучка ВСК в дальней зоне показало, что его расходимость находится в области дифракционного предела для гауссова пучка

Заключение

В работе проведены экспериментальные исследования энергетических, спектральных и пространственных параметров излучения ВСК в газообразном азоте при абберационной фокусировке фемтосекундного пучка накачки в зависимости от энергии накачки, давления газа и условий зажигания филамента в газовой камере. Основным выводом работы является то, что для формирования излучения ВСК существуют достаточно узкие области давления азота и энергии накачки лазерного пучка. Показано, что при фокусировке лазерного пучка сферическим зеркалом с $F = 75$ см в камеру длиной 83 см наибольшая энергия излучения ВСК составляла 8 мкДж. Увеличение длины камеры до 298 см привело к повышению энергии излучения ВСК до 17 мкДж. Мы считаем, что это связано с увеличением длины постфиламентационного канала, в котором происходит формирование ВСК. Однако для обеих камер коротковолновое крыло спектра излучения ВСК доходило до 350 нм. Расходимость излучения ВСК для всего белого пятна в дальней зоне составляет 1 мрад.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ (FWRM-2021-0014).

Список литературы

1. Braun A., Korn G., Liu X., et al. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air // Optics Letters. 1995. V. 20, N 1. P. 73–75.
2. Kandidov V.P., Shlenov S.A., Kosareva O.G. Filamentation of high-power femtosecond laser radiation // Quantum Electron. 2009. V. 39, N 3). P. 205–228.
3. Geints Yu., Zemlyanov A.A., Kabanov A.M., Matvienko G.G. Nonlinear Femtosecond Atmospheric Optics. 2010. 212 p. Publishing House of the IAO SB RAS, Tomsk.
4. Geints Y.E., Zemlyanov A.A. Self-focusing of a focused femtosecond laser pulse in air // Applied Physics B. 2010. V. 101, N 4. P. 735–742. DOI: 10.1007/s00340-010-4098-3.
5. Geints Y.E., Bulygin A.D., Zemlyanov A.A. Model description of intense ultra-short laser pulse filamentation: multiple foci and diffraction rays // Applied Physics B. 2012. V. 107, N 1. P. 243–255.
6. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Ионин А.А., Мокроусова Д.В., Селезнев Л.В., Симицын Д.В., Сунчугашева Е.С. Постфиламентационное распространение мощных лазерных импульсов в воздухе в режиме узконаправленных световых каналов // Квантовая электроника. 2016. Т. 46, № 11. С. 1009–1014.
7. Wille H., Rodriguez M., Kasparian J. et al. Teramobile: A mobile femtosecond-terawatt laser and detection system // The European Physical Journal AP. 2002. V. 20. P. 183–190.
8. Kasparian J., Rodriguez M., Mejean G. and et al. White-light filaments for atmospheric analysis // Science. 2003. V. 301, N 5629. P. 61.
9. Theberge F., Liu W., Luo Q., Chin S.L. Ultrabroadband continuum generated in air (down to 230 nm) using ultrashort and intense laser pulses // Applied Physics B. 2005. V. 80, N 2. P. 221–225.
10. Bejot P., Bonacina L., Extermann J. et al. 32 TW atmospheric white-light laser // Applied Physics Letters. 2007. V. 90. P. 151106.
11. Mechain G., Couairon A., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A. Organizing Multiple Femtosecond Filaments in Air // Physical Review Letters. 2004. V. 93, N 3. P. 035003-(1-4).
12. Fibich G., Eisenmann S., Ilan B., Zigler A. Control of multiple filamentation in air // Optics letters. 2004. V. 29, N 15. P. 427 – 431.
13. Kamali Y., Sun Q., Daigle J.-F., Azarm A., Bernhardt J., Chin S.L. Lens tilting effect on filamentation and filament-induced fluorescence // Optics Communications. 2009. V. 282. P. 950–954.
14. Alonso B., Borrego-Varillas R., Sola H.J., and et al. Enhancement of filamentation postcompression by astigmatic focusing // Optics Letters. 2011. V. 36, N 19. P. 3867–3868.
15. Fu Y., Gao H., Chu W., and et al. Control of filament branching in air by astigmatically focused femtosecond laser pulses // Appl Phys B. 2011. V. 103. P. 435–439.
16. Дергачев А.А., Ионин А.А., Кандидов и др. Плазменные каналы при филаментации в воздухе фемтосекундного лазерного излучения с астигматизмом волнового фронта // Квантовая электроника. 2014. Т. 44, № 12. С. 1085–1093.
17. Xu Z., Zhu X., Yu Y., Zhang N. and Zhao J. Super-luminescent jet light generated by femtosecond laser pulses // Scientific Reports. 2014. 4:3892.
18. Ivanov N.G., Losev V.F., Prokop'ev V.E., Sitnik K.A. Generation of a highly directional supercontinuum in the visible spectrum range // Optics commun. 2017. V. 387. P. 322–327.
19. Ivanov N.G., Losev V.F., Lubenko D., Prokopiev V.E., Sitnik K.A. Forming of supercontinuum in the visible upon filamentation of a femtosecond pulse in air // Proc. SPIE. 2017. V. 10228, N 10228-8.

20. Иванов Н.Г., Лосев В.Ф. Влияние керровской нелинейности на филаментацию фемтосекундного импульса излучения в воздухе // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 3. С. 198–203.
21. Ivanov N.G., Losev V.F., Lubenko D.M., Prokop'ev V.E. Features of laser air filamentation at aberration focusing // Proceedings of SPIE. 2018. V. 10614. P. 06141D.
22. Прокопьев В.Е., Лубенко Д.М. Трансформация спектральных характеристик фемтосекундного лазерного импульса при распространении в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37, № 8. С. 648–652.

V.F. Losev, I.A. Zyatikov, D.M. Lubenko, S.V. Alekseev. **Generation of coherent white beams in nitrogen.**

The report presents the results of experimental study of conditions for formation of a highly directional supercontinuum (HDS) in nitrogen gas when pumping by radiation pulse at wavelength of 950 nm with duration of 70 fs and energy of up to 7 mJ. The pumping radiation was focused into gas chamber by spherical mirror with $F = 75$ cm under aberration conditions (the incidence angle of radiation on the mirror was 15°). It is shown that there is optimal pumping energy of 4.5 mJ and gas pressure of 3 atm. The HDS spectral composition covers the range from 350 to 1000 nm. The HDS radiation divergence is diffractive and for the entire white spot is ~ 1 mrad. The HDS maximum radiation energy was 17 μ J.