

УДК 537.862:535–15

## ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОНАПРАВЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЕЛОГО СВЕТА В ВОЗДУШНОМ ФИЛАМЕНТЕ

© 2020 г. Д. М. Лубенко<sup>1</sup>\*, Н. Г. Иванов<sup>1</sup>, С. В. Алексеев<sup>1</sup>, В. Е. Прокопьев<sup>1</sup>, В. Ф. Лосев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

\*E-mail: lubenkodm@gmail.com

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 27.03.2020 г.

Экспериментально исследованы физические процессы и параметры излучения и плазмы в области филаментации при осесимметричном и абберрационном распространении лазерного излучения накачки с фемтосекундной длительностью импульса в воздухе. Показаны условия формирования высоконаправленного излучения суперконтинуума белого света.

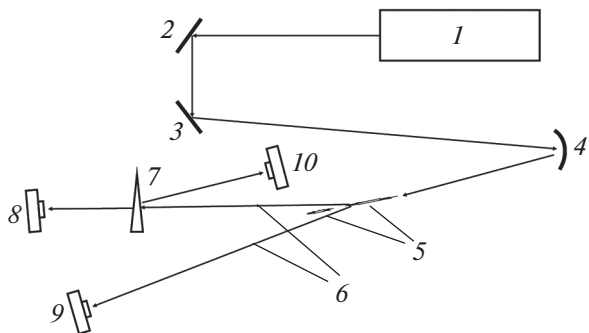
DOI: 10.31857/S0367676520070145

### ВВЕДЕНИЕ

Появление фемтосекундных лазерных источников излучения привело к возникновению многих новых физических явлений при их воздействии на различные среды. Одно из таких явлений связано с созданием “белого лазера”. Генерация белого света, или высоконаправленного суперконтинуума (ВСК) в тонкой протяженной слабосветящейся плазменной нити, возникающей вблизи фокальной перетяжки – филаменте, заключается в получении оптического излучения со спектром, охватывающим область от УФ до ИК. Такое спектральное уширенное излучение накачки, как правило, является результатом нелинейного преобразования сверхкоротких лазерных импульсов с высокой интенсивностью в диэлектрических средах с большими значениями нелинейных восприимчивостей  $\chi^{(2)}$  и  $\chi^{(3)}$ . Для изотропных центросимметричных газовых сред, в том числе и воздуха, основной вклад в нелинейные эффекты дают кубическая нелинейность и параметрические процессы. В работах [1, 2] нами была продемонстрирована возможность генерации ВСК в условиях абберрационной фокусировки фемтосекундного импульса излучения в воздухе.

Первые эксперименты по формированию направленного (осевого) и приосевого конического суперконтинуума (СК) в воздухе показали, что наиболее устойчиво он возникает при малой числовой апертуре фокусирующей системы. Эти условия реализуются при уменьшении диаметра пучка с использованием зеркального телескопа, либо за счет применения сферических зеркал с фокусным расстоянием  $F \geq 1$  м. Уменьшение числовой апертуры приводит к уменьшению концентрации плазмы в филаменте и увеличению длины области баланса керровской нелинейности и рефракции излучения

на электронах. В этих условиях появляется возможность возникновения осевого СК. Тем не менее, как показали эксперименты, диапазон условий, при которых эта возможность реализуется, довольно узок. Так, например, при фокусировке излучения сферическим зеркалом с  $F = 12.2$  м красные компоненты СК, направленные по оси накачки, начинали появляться при энергии излучения порядка 10 мДж. Однако уже при энергии накачки 15 мДж спектральные компоненты осевого белого света приобретали угловую дисперсию, кроме того, она менялась от импульса к импульсу [1]. Спектральный состав СК был также крайне нестабилен. При числовой апертуре  $N_A \geq 0.01$  возникает только лишь конический СК, который распространяется под небольшим углом к оси лазерного пучка [3]. При малой длине фокусировки геометрический и нелинейный фокусы близки друг к другу и значительная часть излучения проходит область филаментации, в которой велика роль рефракции на электронах образующейся плазмы. В направлении оси распространения накачки после филамента излучение СК практически отсутствует, а вокруг оси формируется цветной ореол, возникающий в результате интерференции излучения СК от отдельных филаментов, возникающих при множественной мелкомасштабной филаментации. Одновременно, при острой фокусировке фемтосекундного импульса, из зоны фокусировки наряду с излучением СК возникает генерация излучения на собственных электронных переходах молекулярного иона азота распространяющаяся в приосевой области [4, 5]. Однако, как было обнаружено в работе [6], при небольшом наклоне линзы, т.е. в условиях астигматизма, возникает два высоконаправленных пучка



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – Ti:Sapphire лазер, 2, 3 – зеркала, 4 – фокусирующее зеркало, 5 – лазерный филамент, 6 – пучки белого света, 7 – оптический клин, 8 – спектрометр, 9 – измеритель энергии, 10 – профилометр.

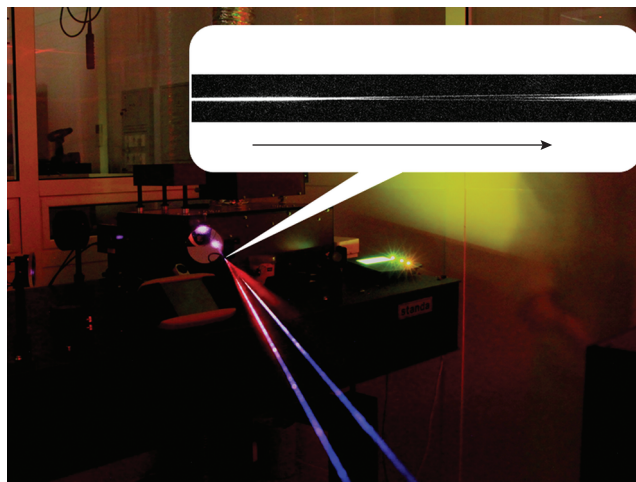
СК. Как можно увидеть из представленных выше работ, условия появления направленного СК видимого диапазона при фемтосекундном взаимодействии излучения с воздухом существенно отличаются у разных авторов.

Настоящая работа посвящена нахождению условий устойчивого возникновения высоконаправленного белого СК в воздухе в условиях астигматической фокусировки фемтосекундного импульса излучения и определению параметров данного излучения.

### АППАРАТУРА И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на фемтосекундном стартовом лазерном комплексе “Старт-480М”. Стартовый комплекс состоит из задающего генератора, стретчера, регенеративного и двух многопроходных усилителей, компрессора на дифракционных решетках. Параметры комплекса: длина волны  $\lambda = 940$  нм, длительность импульса  $\tau = 60$  фс, энергия в импульсе  $E = 10\text{--}15$  мДж, диаметр пучка 10 мм, частота следования импульсов 10 Гц. Спектральные параметры излучения регистрировались спектрометрами OceanOptics HR4000 с разрешением 0.03 нм (диапазон измеряемых длин волн 250–430 нм) и 0.75 нм (диапазон 200–1100 нм). Измерение мощности и энергии проводились посредством GentecMaestro и Ophir Nova II. Для определения длительности лазерных импульсов применялся автокоррелятор ASF-20, а изображение профиля пучка строилось при помощи профилометра Ophir SP620U.

Излучение лазера фокусировалось в воздухе сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 750 мм. Это излучение падало на зеркало под углом в диапазоне 8°–30°, таким образом, плазма филамента создавалась в условиях аберрации. При малых углах (менее 10°) реализовывалась накачка, близкая к осесимметричной, а при боль-



**Рис. 2.** Фотография картины формирования двух направленных пучков белого света при угле падения пучка накачки на фокусирующее зеркало 15°.

ших (более 10°) – абберационная. Для определения распределения интенсивности излучения пучка накачки на различном удалении от филамента, в эту область устанавливался клин, отражение от которого регистрировалось профилометром. При этом учитывалась дифракция излучения. Кроме этого, распределение интенсивности излучения регистрировалось по отпечаткам излучения на фотобумаге.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведена схема эксперимента. Исследования показали сильную зависимость спектральных характеристик СК и его направленности от угла падения излучения на фокусирующее зеркало.

При минимальном угле падения излучения на фокусирующее зеркало за филаментом наблюдался лишь конический СК. С увеличением угла падения интенсивность свечения плазмы филамента уменьшалась, и он распадался на две части, расположенные на одной оси. Первая из них была более яркой и соответствовала меридиональному фокусу, вторая сагиттальному (рис. 1). Расстояние между меридиональным и сагиттальным фокусами, найденное экспериментально, совпадало с рассчитанным по формуле  $X = f \sin \theta \tan \theta$ , где  $f$  и  $\theta$  фокальная длина и угол наклона сферического зеркала [7]. Для наклона оси сферического зеркала относительно оси пучка накачки 15° это расстояние составляло 5.4 см. При определенном угле падения лазерного луча на фокусирующее зеркало в горизонтальной плоскости за первой областью филаментации возник луч белого света высокой направленности, а с дальнейшим увеличением угла до 15° появлялся и второй луч (рис. 2), далее они исчезали в обратном порядке.

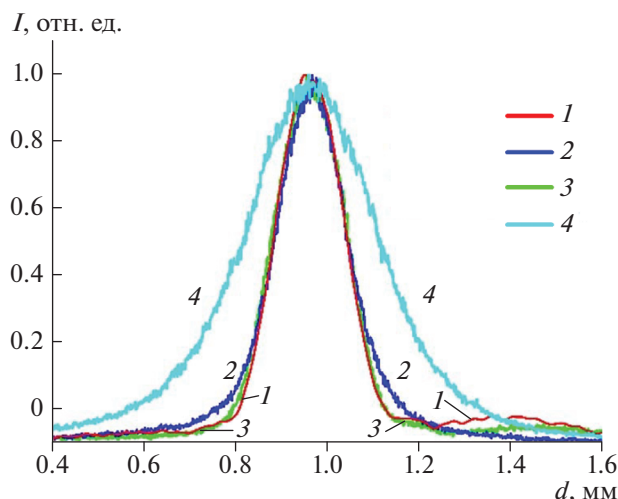


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения лазерного пучка на разных расстояниях от конца филамента: 35 (1), 45 (2), 132 (3), 183 см (4).

На рис. 3 представлены распределения интенсивности излучения пучка накачки на различном удалении от филамента. То же самое поведение в распределении пучка накачки за филаментом получалось исходя из обработки отпечатков излучения на фотобумаге.

Согласно нашим измерениям, лазерный пучок на дистанции 35–132 см не меняет своего диаметра (~0.3 мм по основанию) и интенсивности, хотя за счет линейной дифракции в конце этого участка он должен иметь диаметр 4 мм. Измерение спектра на этом участке показало, что в его начале присутствовали только ИК компоненты, а к его концу спектральный контур расширялся от ИК до 0.35 мкм (рис. 4). Т.е. на экране наблюдалось излучение белого света. Таким образом, на данном участке возникает и существует устойчивая структура, подобная пространственному солитону, обусловленная балансом керровской самофокусировки и дифракционного расплывания пучка накачки. Именно в этой области происходит преобразование излучения пучка накачки в видимую и УФ области спектра СК.

В ходе экспериментов нами также проводилось определение концентрации электронов  $n_e$  в этой области. Согласно результатам измерений и проведенным оценкам  $n_e$  находится в диапазоне  $10^{12}$ – $10^{13}$  см<sup>-3</sup> на всем протяжении от конца филамента до 1.5 м удаления от него. Известно, что

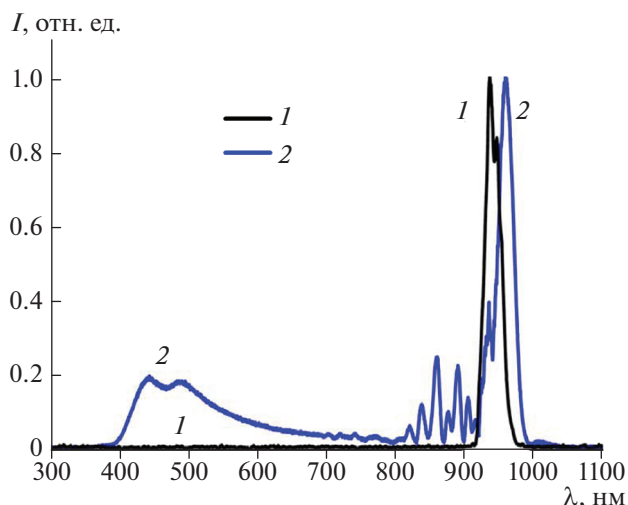


Рис. 4. Спектр лазерного излучения (1), спектр СК на расстоянии 80 см от филамента (2).

вклад в изменение коэффициента преломления на электронной плотности определяется по формуле  $\Delta n_e = 0.5(\omega_p/\omega_n)^2$ , где  $\omega_p$  – плазменная частота,  $\omega_n$  – частота излучения накачки. Для наших условий данное соотношение не превышает  $4 \cdot 10^{-9}$ , в то время как вклад от керровской нелинейности ( $\Delta n_{\text{керр}} = \gamma I$ , где  $\gamma$  – нелинейный коэффициент преломления, а  $I$  – интенсивность лазерного излучения) составляет  $\Delta n_{\text{керр}} = 10^{-5}$ . Данный положительный вклад в  $\Delta n$  может компенсировать по нашим оценкам дифракционное расплывание пучка диаметром 150 мкм ( $\Delta n_{\text{дифр}} = (1.22\lambda)^2/8\pi n_0 r^2$ , где  $\lambda = 940$  нм,  $n_0$  – показатель преломления воздуха), которое дает  $\Delta n_{\text{дифр}} = 10^{-5}$ .

Важным параметром направленного СК в видимой области является эффективность преобразования в него лазерного пучка. В табл. 1 представлена динамика изменения энергии пучка накачки и СК в видимой области для одного из двух лучей. Измерения проводили на расстоянии 2 м от филамента. Для того чтобы отсечь ИК составляющую с большой расходимостью, перед измерителем энергии устанавливали диафрагму диаметром 5 мм. За диафрагмой под углом 45° устанавливали зеркало полного отражения для лазерного пучка.

Согласно данным в табл. 1 эффективность преобразования излучения в видимую область

Таблица 1. Распределение энергии до и после филамента

Энергия до филамента, мДж	Энергия после филамента, мДж	Энергия после диафрагмы, мДж	Энергия в СК, мкДж
11	3	0.66	33

спектра СК составляет порядка 5% относительно энергии лазерного пучка накачки, измеренной за диафрагмой и 0.5% относительно первоначальной энергии (с учетом двух расходящихся пучков).

Крайне важным с точки зрения понимания механизма образования, направленного СК и с практической точки зрения, является информация о длительности преобразованных компонент света. Наши попытки измерить длительность излучения СК в области 470 нм с помощью автокоррелятора ASF-20, к сожалению, были неудачными, скорее всего из-за недостаточной интенсивности. Тем не менее, удалось установить длительность для излучения накачки, измеряемой в дальней зоне. Была измерена автокорреляционная функция исходного пучка с  $\lambda_n = 940$  нм на расстоянии 10 м от филамента. Из этих измерений следует, что происходит уменьшение длительности импульса накачки с 60 до 25 фс. Можно ожидать, что и спектральные компоненты СК имеют подобную или меньшую длительность импульса.

Другим значимым параметром возникающего СК, с точки зрения его применения, является расходимость пучка СК. Измеренная нами расходимость СК в дальней зоне на длине волны  $\lambda = 500$  нм была близка к дифракционной. Измерение поляризации излучения для направленного СК показало, что оно, как и накачка, линейно поляризовано. Степень поляризации составляет 95%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе приведены экспериментальные условия устойчивого формирования высоконаправленного СК в видимой области спектра, возникающего при абберационной фокусировке излучения с длиной волны 940 нм, длительностью импульса 60 фс и энергией 10–15 мДж. Излучение СК белого цвета формируется после ви-

димого филамента в устойчивой пространственной структуре размером 0.3 мм, образующейся в области с малой концентрацией плазмы вследствие баланса между керровской самофокусировкой и дифракционным расплыванием излучения накачки. Данное излучение существенно отличается от конической эмиссии, генерируемой в безабберационном филаменте: оно имеет расходимость, близкую к дифракционному пределу, линейную поляризацию и более коротковолновое крыло спектра вплоть до  $\lambda_{min} = 0.35$  мкм. Длительность импульса излучения СК не превышает 25 фс. Анализ литературных и наших экспериментальных данных показал, что при формировании такого излучения важную роль играют каскадные четырехфотонные параметрические процессы и фазовая самомодуляция в областях до филамента, в самом филаменте и после него.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-48-703027-р\_мол\_a и № 19-48-700016-р\_a.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ivanov N.G., Losev V.F., Prokop'ev V.E., Sitnik K.A.* // Opt. Commun. 2017. V. 387. P. 322.
2. *Ivanov N.G., Losev V.F., Lubenko D.M. et al.* // Proc. SPIE. 2017. V. 10228. Art. № 1022809.
3. *Maioli P., Salame R., Lascoux N. et al.* // Opt. Expr. 2009. V. 17. № 6. P. 4726.
4. *Прокопьев В.Е., Иванов Н.Г., Кривоносенко Д.А., Losev В.Ф.* // Изв. вузов. Физ. 2013. Т. 56. № 11. С. 60; *Prokopyev V.E., Ivanov N.G., Krivonosenko D.A., Losev V.F.* // Russ. Phys. J. 2014. V. 56. № 11. P. 1274.
5. *Chin S.L., Hosseini S.A., Liu W. et al.* // Can. J. Phys. 2005. V. 83. № 9. P. 863.
6. *Xu Z., Zhu X., Yu Y. et al.* // Sci. Rep. 2014. V. 4. Art. № 3892.
7. *Sreeja S., Shuvan Prashant T., Leela Ch. et al.* // Proc. SPIE. 2012. V. 8434. Art. № 84340T.