

Генерация широкополосного оптического излучения при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе и жидкости

Д.В. Апексимов¹, Е.Е. Быкова¹, С.С. Голик², А.А. Землянов¹, А.М. Кабанов^{1,4},
О.И. Кучинская³, А.В. Петров¹

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, 634021, пл. Академика Зуева 1, Россия, apeximov@iao.ru, bee@iao.ru, zaa@iao.ru, kam@iao.ru

² Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, 690950, ул. Суханова 8, Россия, golic_s@mail.ru

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, 634050, ул. Ленина 36, Россия, olesyaTSU14@mail.ru

⁴ Сибирский физико-технический институт Томского государственного университета, г. Томск, 634050, пл. Новособорная, 1, Россия, kam@iao.ru

В работе представлены результаты экспериментального исследования трансформации спектров и пространственной структуры лазерных пучков при их филаментации в воздухе и в жидких средах. Отмечено, что уширение спектра в воде больше чем в воздухе. При значительном превышении критической мощности наблюдается повторная самофокусировка лазерного излучения.

The paper presents the results of experimental studies of transformation of spectra and the spatial structure of laser beams during their filamentation in air and liquid. It is noted that value of spectrum broadening for water is higher as compared to air. In case of considerable critical power excess the reiterated self-focusing of laser radiation is observed.

В задачах нелинейной фемтосекундной оптике атмосферы и океана наиболее интересным и перспективным для практического использования эффектом является филаментация лазерных пучков. В настоящем докладе представлены результаты экспериментального исследования трансформации спектров и пространственной структуры лазерных пучков при их филаментации в дистиллированной и морской воде, глицерине. Принципиальная схема эксперимента представлена на рисунке 1.

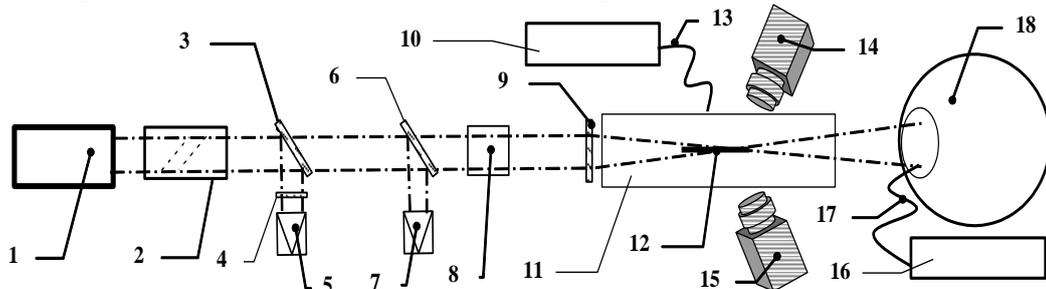


Рис.1. Схема эксперимента. 1 – лазерная система: $\lambda_{01} = 800$ нм, $E_{01} = 1$ мДж, $\lambda_{02} = 400$ нм, $E_{02} = 0,3$ мДж, частота следования импульсов 1 кГц, $t_u = 35$ фс, $d = 7$ мм (Spitfire Pro 40F, Spectra Physics); 2 – компрессор; 3,6 – поворотные пластины 4 – светофильтр; 5 – автокоррелятор PSCOUT PL-SP-LF, Spectra Physics; 7 – измеритель энергии Spectra Physics 407A; 8 – преобразующий кристалл бета барата бария ВВО (β -BaB₂O₄), 300 мкм; 9 – фокусирующая линза $f = 50,2$ мм (Plano-Convex Lens, BK7, $d \sim 6$ мм); 10 – спектрометр Maya; 11 – кювета с жидкостью $L = 10$ см, толщина входного окна 150 мкм; 12 – область филаментации; 13,17 – световоды; 14 – видеокамера JVC GZ-MG255, 15 – фотокамера SONY DSC-F828; 16 – спектрометр “Ocean optic” HR4000; 18 – интегрирующая сфера.

При филаментации импульса с длиной волны $\lambda = 800$ нм в дистиллированной воде наблюдается уширения спектра, связанное с фазовой самомодуляцией, и смещение его центра тяжести в коротковолновую область, обусловленное плазменной

нелинейностью, которые тем значительнее, чем больше мощность исходного импульса (рис. 2а). Так, при энергии импульса 1 мДж, что составляет ~ 15 ГВт, т.е. $\eta = P/P_{кр} \sim 2,5 \cdot 10^3$ (для воды при воздействии $\lambda = 800$ нм, нелинейная добавка показателя преломления $n_2 = 2,0 \cdot 10^{-16}$ см²/Вт, критическая мощность самофокусировки $P_{кр} = 6,5$ МВт) спектр перекрывает практически весь видимый диапазон и часть ближнего ИК.

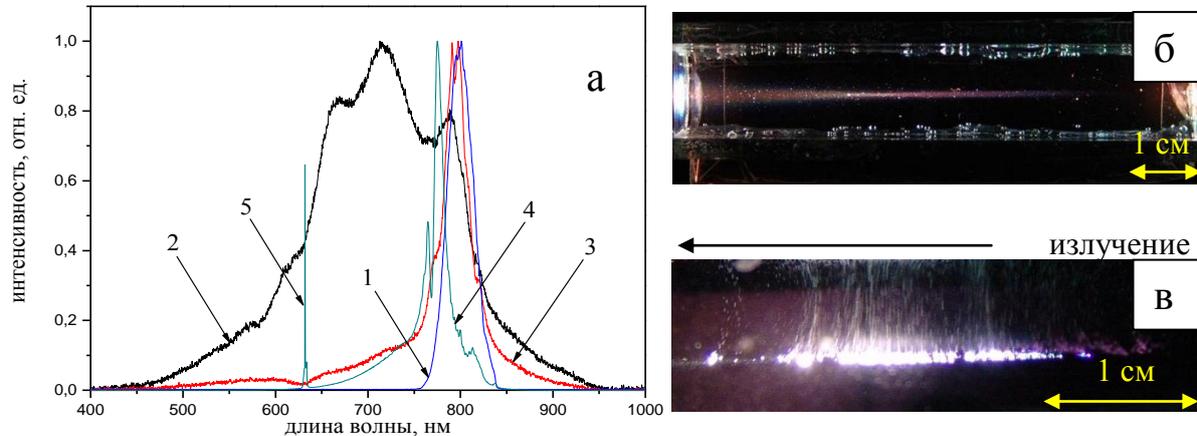


Рис. 2. а) Спектры основной гармоники фемтосекундного лазерного импульса ($\lambda = 800$ нм) после филаментации: 1 - спектр исходного импульса (отражение от рассеивающей керамической поверхности); 2 – филаментация импульса $t_u = 35$ фс, $E = 1$ мДж в дистиллированной воде; 3 - филаментация импульса $t_u = 700$ фс, $E = 1$ мДж в дистиллированной воде; 4 - филаментация импульса $t_u = 35$ фс, $E = 1$ мДж в воздухе (2, 3, 4 измерены спектрометром HR4000 в интегрирующую сферу в направлении вперед); 5 – спектр непрерывного HeNe-лазера (для сравнения). Здесь и далее нормировка на максимум интенсивности. Фотографии филаментации импульсов $t_u = 35$ фс, $E = 1$ мДж (б), вид сверху, и $t_u = 700$ фс, $E = 1$ мДж (в), вид сбоку.

На фотографии (рис. 2б) видно, что при $\eta \sim 2,5 \cdot 10^3$ филамент формируется в начале кюветы, о чем свидетельствует регистрируемое камерой расходящееся свечение в видимой области спектра (суперконтинуальное свечение), которое стягивается вблизи геометрического фокуса линзы и затем опять расходится. При уменьшении параметра η в 20 раз, т.е. при $\eta \sim 123$ (рис. 2в) филаментация пучка реализуется вблизи геометрического фокуса и сопровождается формированием четочной структуры, ярким свечением и бурным парообразованием с характерным размером зоны тепловыделения $\sim 2,5$ -3 см. При значении параметра $\eta = 2,5 \cdot 10^3$ кипения воды не наблюдается ни в одной из перетяжек пучка. Для второй гармоники (400 нм, $n_2 \sim 5 \cdot 10^{-16}$ см²/Вт) спектр при филаментации в воде также уширяется (рис. 3а) в сравнении с исходным импульсом, но наблюдается его смещение в длинноволновую область. Такой же стоковый сдвиг наблюдался при филаментации на второй гармонике в воздухе.

При регистрации спектра из зоны филаментации в направлении перпендикулярном распространению пучка (рис. 1(10, 13)) появляется свечение с максимумом в области ~ 464 нм, связанное с комбинационным рассеянием на молекулах воды. В морской воде (рис. 3а, кривая 3) этот максимум приобретает длинноволновой хвост, который обусловлен флуоресценцией растворенных органических веществ, а именно клеточными стенками. При регистрации спектра в направлении вперед, при тех же условиях, ширина спектра больше, а плазменное свечение слабее (рис. 3а, кривая 4). Сравнивая результаты филаментации на длинах волн 800 и 400 нм в воздухе, полученные авторами ранее, и воде (рис. 2а, кривые 1,4 и рис. 3а, кривые 4,5) можно заключить, что уширение спектра в воде значительнее, а смещение спектрального максимума больше в воздухе на обеих гармониках.

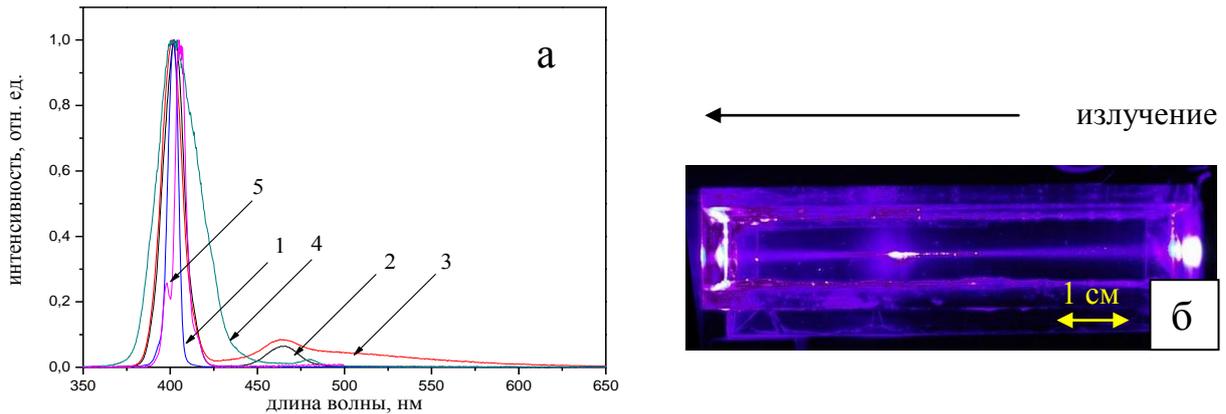


Рис. 3. а) Спектры второй гармоники фемтосекундного лазерного импульса ($\lambda = 400$ нм) после филаментации: 1 – спектр исходного импульса (отражение от рассеивающей керамической поверхности); 2 – филаментация в дистиллированной воде импульса $E = 0,3$ мДж; 3 - филаментация в морской воде импульса $E = 0,3$ мДж, (2, 3 измерены из области филаментации спектрометром Maya под углом 90° к пучку); 4 - филаментация импульса $E = 0,3$ мДж в дистиллированной воде; 5 - филаментация импульса $E = 0,3$ мДж в воздухе (4, 5 измерены спектрометром HR4000 в интегрирующую сферу в направлении вперед). **б)** – фотография филаментации импульса $E = 1$ мДж в воде, вид сверху.

При филаментации в глицерине (пропантриол, трехатомный спирт, $\text{CH}_2(\text{OH})\text{-CH}(\text{OH})\text{-CH}_2\text{OH}$, плотность $\rho = 1,24$ г/см³, вязкость 9,5 Пуаз, $n_0 = 1,45$, $n_2^{800\text{нм}} \approx 2 \cdot 10^{-16}$ см²/Вт, $n_2^{400\text{нм}} \approx 4,7 \cdot 10^{-16}$ см²/Вт) на обеих гармониках также наблюдается уширение спектров с увеличением мощности импульса (рис. 4а) и смещение центра тяжести в коротковолновую область для первой гармоники и в длинноволновую для второй (рис. 5а), для мощности импульса ~ 10 ГВт появляется максимум в свечении в области 460 нм (рис. 5а, кривая 2), характерный для воды и морской воды. При этом наблюдается (рис. 4бв, 5б) формирование парового ореола в области филаментации, приводящего к искривлению траектории пучка.

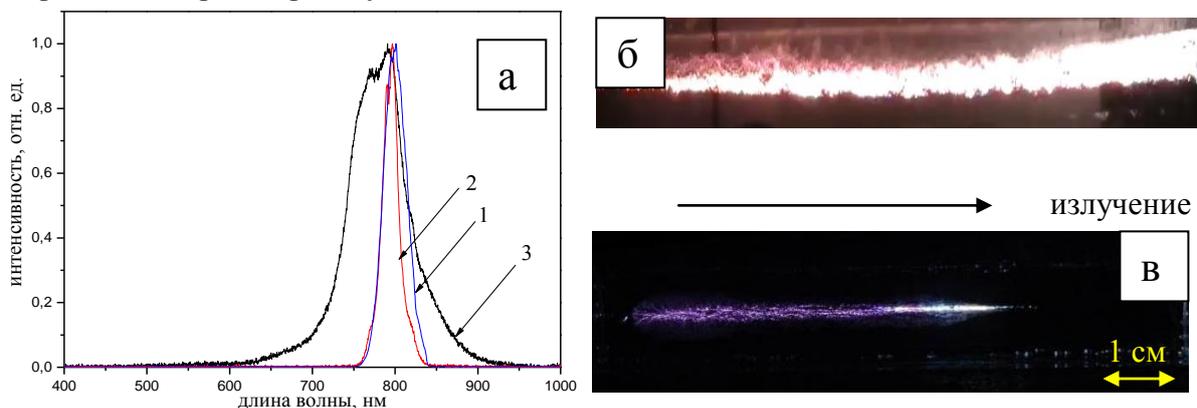


Рис. 4. а) Спектры основной гармоники фемтосекундного лазерного импульса ($\lambda = 800$ нм) после филаментации в глицерине: 1 – спектр исходного импульса (отражение от рассеивающей керамической поверхности (спектрометр Maya)); 2 - филаментация импульса $t_u = 700$ фс, $E = 1$ мДж измерен спектрометром HR4000 в интегрирующую сферу в направлении вперед; 3 - филаментация импульса $t_u = 35$ фс, $E = 1$ мДж измерен спектрометром HR4000 в интегрирующую сферу в направлении вперед. **б)** Фотография филаментации импульса $E = 1$ мДж, 35 фс, в глицерине, вид сбоку. **в)** Фотография филаментации импульса $E = 1$ мДж, 700 фс, в глицерине, вид сверху.

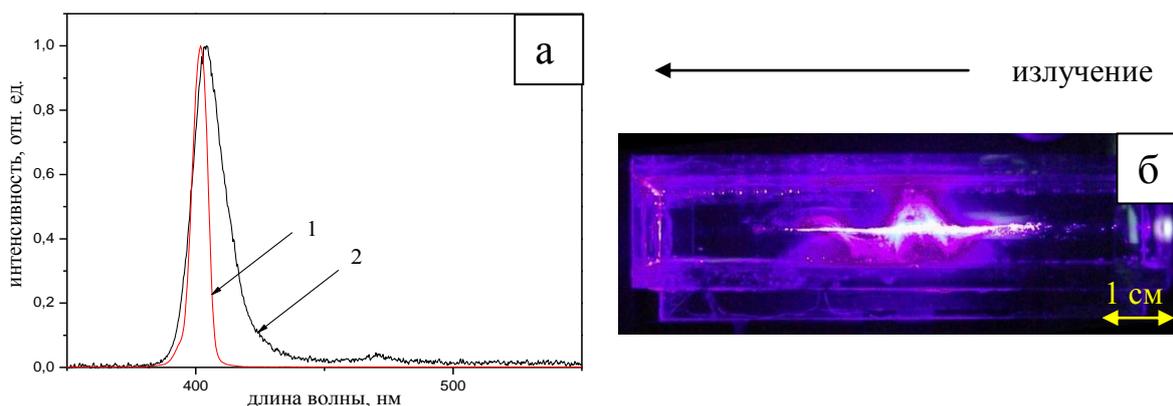


Рис. 5. а) Спектры второй гармоники фемтосекундного лазерного импульса ($\lambda = 400$ нм) после филаментации в глицерине: 1 – спектр исходного импульса (отражение от рассеивающей керамической поверхности (спектрометр Maya); 2 - филаментация импульса $E = 0,3$ мДж, измерен спектрометром HR4000 в интегрирующую сферу в направлении вперед. б) Фотография филаментации импульса $E = 0,3$ мДж в глицерине, вид сверху.

При филаментации в воздухе, можно реализовать диагностику аэрозолей по методике многочастотного зондирования, с помощью так называемого лазера белого света, источником которого является суперконтинуальное свечение из области филаментации. На рис. 6 представлен сигнал обратного рассеяния (зарегистрирован под углом 163°) от аэрозоля, облученного суперконтинуальным свечением филамента, сформированного на расстоянии 10 см от аэрозольного облака. Видно, что сигнал содержит весь спектр суперконтинуального свечения, сформированный филаментом.

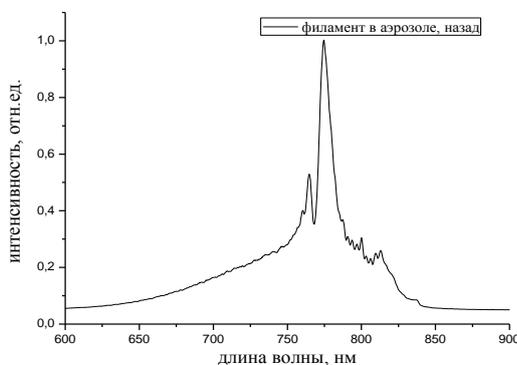


Рис. 6. Спектр обратно-рассеянного аэрозодем лазерного импульса.

Таким образом, в экспериментах по филаментации лазерных пучков в жидких средах показано, что уширение спектра в воде больше чем в воздухе, при значительном превышении критической мощности наблюдается повторная самофокусировка. При филаментации как в воздухе так и в жидких средах для первой гармоники наблюдается смещение центра тяжести и максимума спектра в коротковолновую область (blue shift), а для второй гармоники в длинноволновую область (red shift). В воде, при измерениях под 90° , в стоксовой области относительно лазерного импульса регистрируется первая положительная система молекулярного азота. При филаментации в воде наблюдается максимум в области 464 нм, связанный с комбинационным рассеянием валентных колебаниях молекул воды. В морской воде уширение данного максимума в длинноволновую область связано с наложением КР на флюоресценцию РОВ в воде.