

УДК 621.378.33, 535.621.33

Д.В. АПЕКСИМОВ\*, О.А. БУКИН\*\*, Е.Е. БЫКОВА\*, Ю.Э. ГЕЙНЦ\*, С.С. ГОЛИК\*\*\*, А.А. ЗЕМЛЯНОВ\*,  
А.А. ИЛЬИН\*\*, А.М. КАБАНОВ\*, О.И. КУЧИНСКАЯ\*\*\*\*, Г.Г. МАТВИЕНКО\*, В.К. ОШЛАКОВ\*, А.В. ПЕТРОВ\*,  
Е.Б. СОКОЛОВА\*\*

### ФИЛАМЕНТАЦИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ Ti:Sa-ЛАЗЕРА НА ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ ГАРМОНИКАХ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

Представлены результаты экспериментального исследования трансформации спектров и пространственной структуры лазерных пучков при их филаментации в дистиллированной и морской воде, глицерине. Отмечено, что уширение спектра в воде больше, чем в воздухе. При значительном превышении критической мощности наблюдается повторная самофокусировка лазерного излучения.

**Ключевые слова:** фемтосекундное лазерное излучение, самофокусировка, филаментация, фазовая самомодуляция, фотоионизация, оптический пробой, спектры.

Среди нелинейных явлений, сопровождающих распространение мощного лазерного излучения ультракороткой длительности (УКИ) в газовых и жидких средах, наиболее масштабным является филаментация лазерного пучка.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования трансформации спектров и пространственной структуры лазерных пучков при их филаментации в дистиллированной и морской воде, глицерине. Воздействующий лазерный пучок диаметром 7 мм максимальной энергией в импульсе 1 мДж, длительностью импульса 35 фс, частотой следования импульсов 1 кГц фокусировался линзой с фокусным расстоянием 50,2 мм в кювету длиной 100 мм, толщиной входной стенки – 0,15 мм.

При филаментации импульса с длиной волны 800 нм в дистиллированной воде наблюдается уширение спектра, связанное с фазовой самомодуляцией в среде с кубической нелинейностью керровского типа, и смещение его центра тяжести в коротковолновую область, обусловленное плазменной нелинейностью, которые тем значительнее, чем больше мощность исходного импульса (рис. 1, а). Так, при энергии импульса 1 мДж, что составляет  $\sim 15$  ГВт, т.е.  $\eta = P/P_{кр} \sim 2,5 \cdot 10^3$ , спектр перекрывает практически весь видимый диапазон и часть ближнего ИК [1].

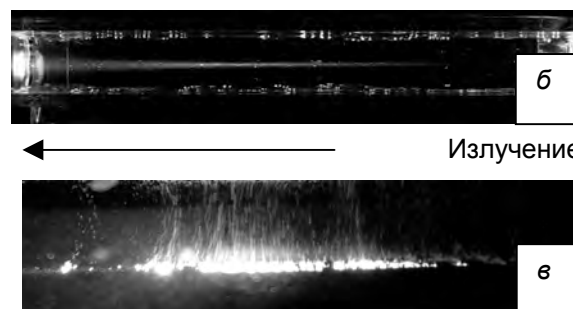
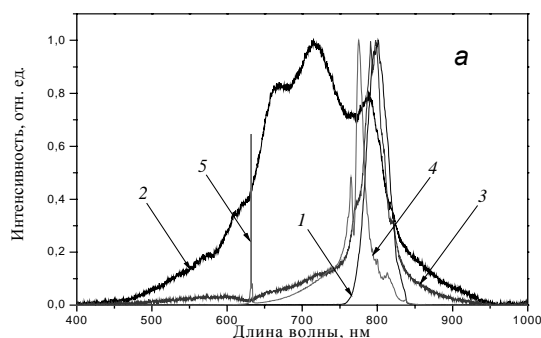


Рис. 1. Спектры основной гармоники фемтосекундного лазерного импульса после филаментации: кр. 1 – спектр исходного импульса; кр. 2 – филаментация импульса  $t_n = 35$  фс,  $E = 1$  мДж в дистиллированной воде; кр. 3 – филаментация импульса  $t_n = 700$  фс,  $E = 1$  мДж в дистиллированной воде; кр. 4 – филаментация импульса  $t_n = 35$  фс,  $E = 1$  мДж в воздухе; кр. 5 – спектр непрерывного HeNe-лазера (для сравнения). Здесь и далее нормировка на максимум интенсивности (а). Фотографии филаментации импульсов  $t_n = 35$  фс,  $E = 1$  мДж (б), вид сверху, и  $t_n = 700$  фс,  $E = 1$  мДж (в), вид сбоку

На фотографии (рис. 1, б) 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 рефокусируется – стягивается вблизи геометрического фокуса линзы и затем опять расходится. При уменьшении параметра  $\eta$  в 20 раз, т.е. при  $\eta \sim 123$  (рис. 1, в) филаментация пучка реализуется вблизи геометрического фокуса и сопровождается

формированием четочной структуры, ярким свечением и бурным парообразованием. При значении параметра  $\eta = 2,5 \cdot 10^3$  кипения воды не наблюдается ни в одной из перетяжек пучка.

Для второй гармоники (400 нм,  $n_2 \sim 5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{Вт}$  [2]) спектр при филаментации в воде также уширяется (рис. 2, *a*) в сравнении с исходным импульсом, наблюдается его смещение в длинноволновую область. Такой же стоксовый сдвиг наблюдался и при филаментации на второй гармонике в воздухе.

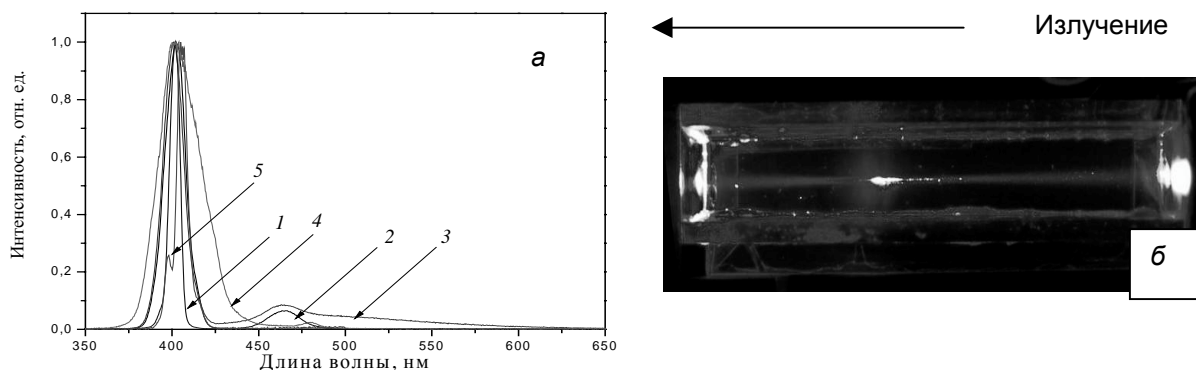


Рис. 2. Спектры второй гармоники фемтосекундного лазерного импульса после филаментации: кр. 1 – спектр исходного импульса; кр. 2 – филаментация в дистиллированной воде импульса  $E = 0,3$  мДж; кр. 3 – филаментация в морской воде импульса  $E = 0,3$  мДж; кр. 4 – филаментация импульса  $E = 0,3$  мДж в дистиллированной воде; кр. 5 – филаментация импульса  $E = 0,3$  мДж в воздухе (*a*). Фотография филаментации импульса  $E = 1$  мДж в воде, вид сверху (*б*)

При регистрации спектра из зоны филаментации в направлении, перпендикулярном распространению пучка, появляется свечение с максимумом в области 460 нм, связанное с комбинационным рассеянием излучения на молекулах воды. Интенсивность этого свечения при филаментации в морской воде (рис. 2, *a*, кривая 3) накладывается на флуоресценцию органических включений (клеточные стенки) в естественной воде. При регистрации спектра в направлении вперед, при тех же условиях, ширина спектра больше, а свечение с максимумом 464 нм слабее (рис. 2, *a*, кривая 4). Появление максимума на смещенной длине волны может быть связано с несколькими причинами. Первая – тепловое свечение плазмы. Однако в соответствии с правилом смещения Вина ( $\Delta T \sim \sim 0,003$ , где  $T$  – температура в К) температура плазмы  $> 5000$  К, что маловероятно для плазмы филамента. Вторая – стоксовая компонента комбинационного рассеяния (КР) в воде. Максимум компоненты совпадает, но возбуждение колебаний молекул воды за время действия импульса тоже маловероятно. К тому же ширина спектральной компоненты значительно превышает ранее регистрируемые КР спектры воды. Третья – флуоресценция органических включений, а именно их клеточных стенок. По ширине спектра это более разумная трактовка. Но следует допустить присутствие органики в дистиллированной воде.

При филаментации в глицерине на обеих гармониках также наблюдается уширение спектров с увеличением мощности импульса (рис. 3, *a*) и смещение центра тяжести в коротковолновую область для первой гармоники и в длинноволновую для второй (рис. 4, *a*). Для мощности импульса

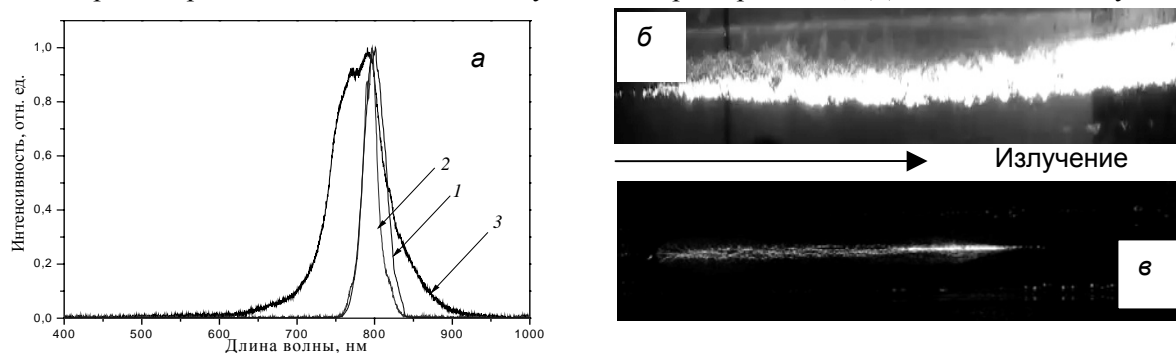


Рис. 3. Спектры основной гармоники фемтосекундного лазерного импульса после филаментации в глицерине: кр. 1 – спектр исходного импульса; кр. 2 – филаментация импульса  $t_n = 700$  фс,  $E = 1$  мДж; кр. 3 – филаментация импульса  $t_n = 35$  фс,  $E = 1$  мДж (*a*). Фотографии филаментации импульса  $E = 1$  мДж, 700 фс, в глицерине, вид сбоку (*б*) и импульса  $E = 1$  мДж, 700 фс, в глицерине, вид сверху (*в*)

~ 10 ГВт появляется максимум в свечении в области 460 нм (рис. 3, а, кривая 2), характерный для воды и морской воды. При этом наблюдается (рис. 3, б и 4, б) формирование парового ореола в области филаментации, приводящего к искривлению траектории пучка.

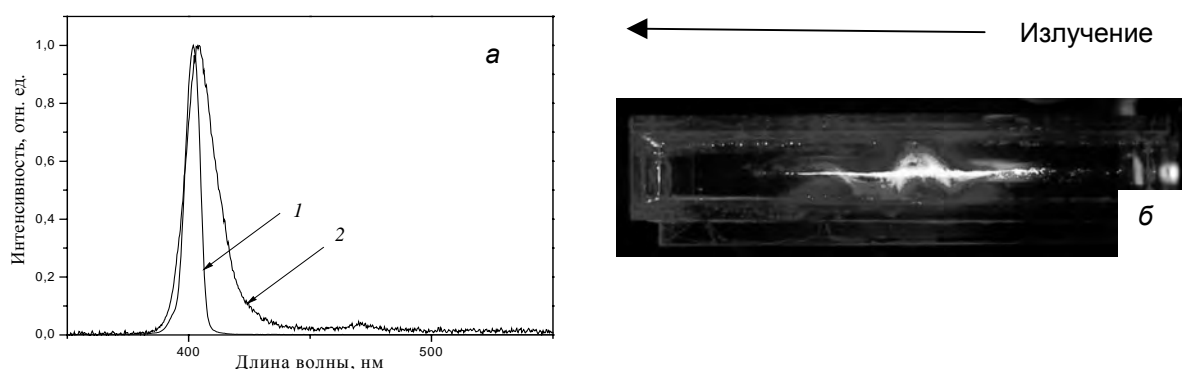


Рис. 4. Спектры второй гармоники фемтосекундного лазерного импульса ( $\lambda = 400$  нм) после филаментации в глицерине: кр. 1 – спектр исходного импульса; кр. 2 – филаментация импульса  $E = 0,3$  мДж (а). Фотография филаментации импульса  $E = 0,3$  мДж в глицерине, вид сверху (б)

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).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А. // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23. – № 9. – С. 749–756.
2. Букин О.А., Быкова Е.Е., Гейнц Ю.Э. и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – № 5. – С. 351–358.

\*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 20.07.12.

\*\*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

\*\*\*Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

\*\*\*\*Национальный исследовательский Томский государственный университет,

г. Томск, Россия

E-mail: OlesyaTSU14@mail.ru

Апексимов Дмитрий Владимирович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;

Букин Олег Алексеевич, д.ф.-м.н., зав. лабораторией;

Быкова Елена Евгеньевна, науч. сотр.;

Гейнц Юрий Эльмарович, д.ф.-м.н., гл. науч. сотр.;

Голик Сергей Сергеевич, к.ф.-м.н., зав. лабораторией;

Землянов Александр Анатольевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией;

Ильин Алексей Анатольевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;

Кабанов Андрей Михайлович, д.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр.;

Кучинская Олеся Ивановна, студентка;

Матвиенко Геннадий Григорьевич, д.ф.-м.н., директор;

Ошлаков Виктор Константинович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;

Петров Алексей Вадимович, аспирант;

Соколова Екатерина Борисовна, инженер-программист.