

Видимое излучение суперконтинуума световых пуль при фемтосекундной филаментации ИК импульсов в плавленом кварце

С.В.Чекалин, В.О.Компанец, А.Э.Докукина, А.Е.Дормидонов, Е.О.Сметанина, В.П.Кандидов

Экспериментально и численно исследована генерация суперконтинуума в видимой области спектра при формировании световых пуль в филаменте, создаваемом фемтосекундным импульсом ИК диапазона. При филаментации в плавленом кварце импульсного излучения на длинах волн 1700–2200 нм зарегистрированы яркие треки, которые образуются рекомбинационным свечением носителей в лазерной плазме, созданной последовательностью световых пуль, и рассеянием в кварце видимого излучения суперконтинуума, генерируемого световой пулей. Обнаружено, что формирование световой пули сопровождается выбросом определенной порции энергии суперконтинуума в видимой области. Выброс энергии одинаков для всех пуль в последовательности и уменьшается с увеличением длины волны воздействующего излучения.

Ключевые слова: филаментация, фемтосекундные импульсы, аномальная дисперсия, плазменные каналы, световые пули.

1. Введение

Световые пули (СП) являются результатом пространственно-временной компрессии оптического волнового пакета. Впервые концепция образования СП при нелинейно-оптическом взаимодействии волнового пакета и диспергирующей среды с кубической нелинейностью сформулирована в [1] на основе анализа уравнения квазиоптики в безабберационном приосевом приближении [2]. Для направляющих структур с управляемыми дисперсионными и нелинейными свойствами компрессия импульсов исследована в планарных волноводах [3–6] и фотонных кристаллах [7]. В объеме прозрачной диэлектрической среды уменьшение длительности высокоинтенсивного импульса наблюдалось при филаментации в условиях нормальной дисперсии групповой скорости в атомарных и молекулярных газах [8], а также в ячейках с инертными газами при оптимизации давления [9], параметров импульса [10] и протяженности филамента [11, 12]. В качестве физических моделей компрессии светового импульса при филаментации обсуждались запаздывание откликов керровской и плазменной нелинейностей [13], дефокусировка в наведенной лазерной плазме [14] и формирование ударной волны огибающей на хвосте импульса [15]. В диссипативной нелинейной среде образование СП возможно в результате непрерывной перекачки энергии в центральную область волнового пакета для восполнения нелинейных потерь [16].

Филаментация фемтосекундного лазерного излучения сопровождается сильной фазовой самомодуляцией светового поля и, как следствие, сверхширением частотно-углового спектра [17], что открывает возможности для эффективной компрессии волнового пакета в пространстве и во времени. Использование внешнего компрессора после ячейки с аргонном, в которой происходило уширение спектра при филаментации, позволило уменьшить длительность импульса до нескольких фемтосекунд [18, 19].

В условиях аномальной дисперсии групповой скорости роль компрессора выполняет непосредственно среда распространения, в которой происходит сжатие во времени импульса при фазовой самомодуляции, вызванной керровской нелинейностью. Возможность формирования квазипериодической последовательности СП при филаментации в условиях аномальной дисперсии групповой скорости рассмотрена численно в [20], где дана физическая интерпретация многократного коллапсирования мощных импульсов, зарегистрированного на длине волны $\lambda = 1550$ нм в образце стекла ВК7 [21]. Исследования формирования последовательности СП при филаментации импульса в условиях аномальной дисперсии групповой скорости, выполненные численно в [22], подтверждены экспериментально автокорреляционными измерениями [23, 24]. Длительность пули диаметром 50 мкм составила около двух периодов оптических осцилляций при филаментации в плавленом кварце излучения на длине волны 1800 нм. Возникновение последующих пуль происходит в результате подкачки энергии с переднего фронта импульса при фазовой самомодуляции светового поля в условиях аномальной дисперсии групповой скорости. На основе данных регистрации пространственно-временного распределения интенсивности при филаментации в сапфире импульсного излучения на $\lambda = 1800$ нм в [25] предложен сценарий, согласно которому СП состоит из высокоинтенсивного ядра и периферии низкой интенсивности, подобной беселевому пучку.

В настоящей работе экспериментально и численно исследовано изменение энергии суперконтинуума в види-

С.В.Чекалин, В.О.Компанец, Институт спектроскопии РАН, Россия, 142190 Москва, Троицк, ул. Физическая, 5; e-mail: chekalin@isan.troitsk.ru

А.Э.Докукина, А.Е.Дормидонов, Е.О.Сметанина, В.П.Кандидов, Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет и Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; e-mail: kandidov@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 29 января 2015 г., после доработки – 6 февраля 2015 г.

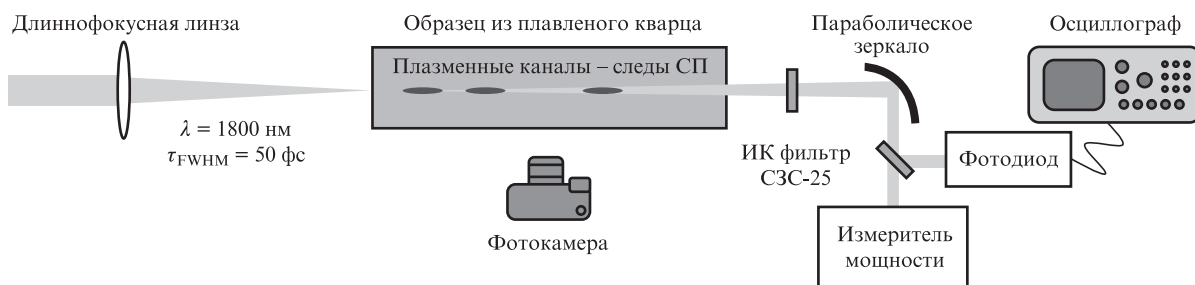


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

мой области (видимого СК), генерируемого СП в процессе филаментации в плавном кварце, при вариации энергии воздействующих импульсов и перестройке длины волны излучения из ближнего в средний ИК диапазон. Установлены основные закономерности трансформации наблюдаемого изображения плазменных каналов (ПК) и светящихся треков в филаменте, регистрируемых по свечению рекомбинации лазерной плазмы и рассеянию излучения СК. Показано, что энергия видимого СК, генерируемого СП, уменьшается с увеличением длины волны излучения входного импульса, но не зависит от положения пуля в последовательности.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования выполнены на спектроскопическом стенде ЦКП Института спектроскопии РАН. Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Установка состояла из источника лазерного излучения на основе фемтосекундного генератора Tsunami (Ti:сапфировый лазер) с непрерывным твердотельным лазером накачки Millennia Vs, регенеративного усилителя Spitfire Pro с накачкой излучением твердотельного лазера Eprpower 30 и перестраиваемого параметрического усилителя TOPAS. Использовалось импульсное излучение на длинах волн 1700–2200 нм, соответствующих области аномальной дисперсии в плавном кварце. На $\lambda = 1800$ нм длительность спектрально ограниченных импульсов по полувысоте составляла 50 фс, а частота их следования – 1 кГц, энергия в импульсе могла варьироваться от 0.2 до 100 мкДж с помощью градиентного ослабителя NDC-100С-2.

Лазерные импульсы фокусировались тонкой кварцевой линзой с фокусным расстоянием $F = 120$ см или зеркалом с $F = 50$ см на входную грань образца плавного кварца длиной 135 мм. Для измерения длительности импульсов использовался автокоррелятор ASF-20 фирмы «Авеста проект». При автокорреляционных измерениях длительности СП приосевая часть филамента, в котором происходило ее формирование, выделялась диафрагмой диаметром 50 мкм, установленной у выходной грани образца, и собиралась параболическим зеркалом на входном окне автокоррелятора. Энергия импульса регистрировалась чувствительным датчиком Fieldmax с детектором PS-10, а также фотодиодом Thorlabs PDB-210A, прокалиброванным с использованием того же датчика. Сигнал с фотодиода поступал на осциллограф, с помощью которого на выходе из образца измерялась энергия каждого импульса в последовательности. При измерении энергии видимого СК в полосе 300–700 нм выходное излучение фильтровалось двумя фильтрами СЗС 25 толщиной 2 мм.

Изображения ПК и светящихся треков в филаменте регистрировались соответственно по красному излучению рекомбинации лазерной плазмы и излучению СК, рассеянному в образце, через его боковую грань цифровой фотокамерой Canon EOS D800. Экспозиция этой фотокамеры при частоте следования импульсов 1 кГц была равна 10 с, а ISO камеры составляло 6400. Люминесценция плазмы не имеет направленности, поэтому вклад ее в регистрируемый спектр СК пренебрежимо мал и не мог быть зарегистрирован используемым в эксперименте спектрометром.

3. Результаты эксперимента

Наблюдение ПК, возникновение которых регистрируется по характерному красно-розовому свечению рекомбинации носителей, и светящихся треков рассеянного излучения СК (рис.2) обнаружило следующие закономерности. Свечение ПК появлялось у выходной грани образца для импульсов, энергия которых превышала некоторую величину, зависящую от длины волны и условий фокусировки. До возникновения первого ПК, длина которого не превышала нескольких миллиметров (рис.2, нижние строки), никаких светящихся треков не наблюдалось. При увеличении энергии импульса ПК становился ярче и короче, смещаясь навстречу направлению распространения импульса к входному окну образца. При этом в направлении распространения импульса за ПК появлялся слабо расходящийся трек, окраска которого зависела от длины

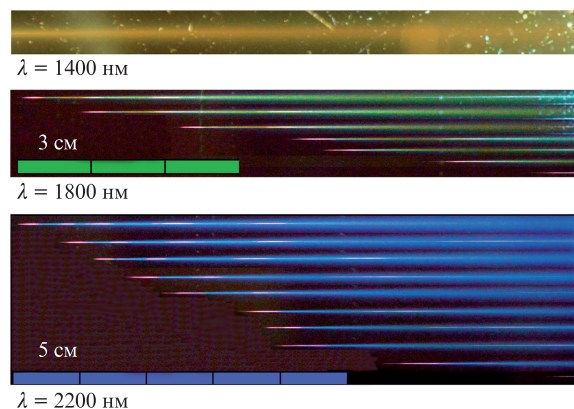


Рис.2. Изображения ПК (красного цвета) и треков рассеянного излучения видимого СК, которое имеет желтый цвет при филаментации излучения на $\lambda = 1400$ нм, зеленый – на $\lambda = 1800$ нм и синий – на $\lambda = 2200$ нм. На фотографиях треков энергия импульса увеличивается снизу вверх от 12.3 до 17.2 мкДж при $\lambda = 1800$ нм и от 37.8 до 56 мкДж при $\lambda = 2200$ нм. Цветной вариант рис.2 помещен на 3-й странице обложки, а также на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

волны излучения, формирующего филамент. При длине волны $\lambda = 1400$ нм трек приобретал желтый цвет, при $\lambda = 1800$ нм – зеленый и при $\lambda = 2200$ нм – синий (рис.2). Такое изменение цвета наблюдаемого трека полностью соответствует существующим представлениям о процессе генерации видимого СК и формировании СП.

Действительно, СП является короткоживущим образованием с высокой пространственно-временной локализацией светового поля. В сильном поле СП с интенсивностью $\sim 10^{13}$ Вт/см² происходит генерация в среде низкотемпературной лазерной плазмы, рекомбинация которой регистрируется по красному свечению ПК. Очевидно, что плазма генерируется только во время существования СП, оцениваемое по длине ПК в несколько десятков пикосекунд. Абберационная дефокусировка излучения в лазерной плазме, генерация которой при большом порядке многофотонности имеет практически пороговый характер, вызывает резкое снижение интенсивности в образующейся СП. Задний фронт СП с сильным градиентом интенсивности во времени является источником антистоксова крыла СК [26]. Крутизна заднего фронта огибающей импульса зависит только от порядка многофотонности при генерации плазмы и возрастает с увеличением длины волны излучения [27], что, в свою очередь, приводит к значительному смещению спектра видимого излучения антистоксова крыла СК, генерируемого СП, в коротковолновую область.

Рассеяние этого излучения в образце регистрируется в виде длинного цветного трека, слабо расходящегося и простирающегося от короткого ПК, возникающего при образовании СП с высокой интенсивностью [28], практически до выходной грани (рис.2).

Неожиданным оказалось появление внутри некоторых из наблюдаемых треков светящейся нити, гораздо более тонкой и длинной (свыше 3 см), предшествующей возникновению очередного ПК и связанной с ним СП (рис.2, первый трек сверху для $\lambda = 1800$ нм, второй сверху для $\lambda = 2200$ нм). К сожалению, экспозиция полученных фотографий ($\sim 10^4$ импульсов) слишком велика, чтобы однозначно документировать это событие и точно определить параметры нити. Однако можно утверждать, что нить регистрируется только благодаря рассеянию видимой полосы антистоксова крыла СК на наведенной световым полем неоднородности показателя преломления. При этом интенсивность поля еще не достигает порога образования СП и, следовательно, ПК со светящейся плазмой. Источником видимого СК в этом случае является предшествующая СП. Именно поэтому такая светящаяся нить не наблюдается до образования первого ПК, т.к. отсутствует источник СК, свет которого рассеивался бы на возникшей неоднородности в филаменте. Однако следует отметить, что в люминесцирующих средах, таких как стекла, растворы красителей, а также воздух, возможно появление видимого свечения вследствие многофотонного поглощения и последующей люминесценции [29] при распространении импульса, в котором СП не образуется и интенсивность сохраняется ниже порога генерации лазерной плазмы. В [30] такие люминесцирующие треки, зарегистрированные при распространении импульсов излучения на $\lambda = 1800$ нм, ошибочно интерпретировались как долгоживущие СП, длительность которых не меняется на расстоянии нескольких сантиметров. По утверждению авторов [30], средой служил кварц, который, как хорошо известно, в отличие от стекла не люминесцирует в

голубой области, что широко используется на практике, чтобы отличить его от стекла.

Увеличение интенсивности импульса до возникновения СП и плазмообразования в среде непосредственно подтверждает следующий эксперимент. При малой интенсивности (менее 10^{12} Вт/см²) входной импульс длительностью 50 фс ($\lambda = 1800$ нм) растягивается при прохождении через образец до импульса длительностью 370 фс вследствие дисперсии в кварце, и его интенсивность уменьшается. При увеличении энергии входного импульса до 2 мкДж длительность импульса на выходе становится менее 200 фс (автокорреляционная функция измерялась по всему сечению пучка). При этом регистрировалось увеличение расходимости центральной части пучка. До образования плазмы при увеличении мощности входного импульса наблюдался плавный рост доли энергии излучения, проходящего через диафрагму диаметром 50 мкм на выходе образца, что свидетельствовало о концентрации энергии на оси пучка, т.е. о начале филаментации (рис.3). Одновременно по измерениям длительности импульса излучения, прошедшего через диафрагму, зарегистрировано уменьшение длительности импульса в приосевой области до 50–90 фс. Однако ни возникновения ПК, ни генерации видимого СК в этом диапазоне энергий импульса не наблюдалось. Данный режим распространения импульса можно определить как пространственно-временную компрессию волнового пакета при доплазменной филаментации. При дальнейшем увеличении энергии импульсов наблюдалось одновременное появление ПК и скачкообразное возрастание сигнала, соответствующего энергии видимого СК, что обусловлено образованием первой СП в филаменте, которое имело пороговый характер (рис.4). При этом с увеличением длины волны излучения пороговая энергия, при которой происходит образование СП (что регистрируется по появлению первой «ступеньки») и, следовательно, генерация видимого СК, растет, поскольку увеличивается критическая мощность самофокусировки. Энергия видимого СК, генерируемого первой СП, одинакова в области 1600–1900 нм, но заметно уменьшается для больших длин волн вследствие увеличения поглощения в образце (рис.5).

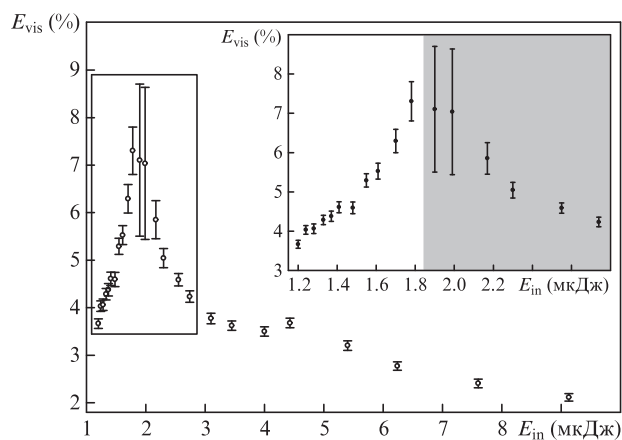


Рис.3. Зависимость доли энергии E_{vis} импульса излучения, прошедшего через диафрагму диаметром 50 мкм на выходе образца, от энергии E_{in} входного импульсного излучения на $\lambda = 1800$ нм. На вставке в увеличенном виде приведена та же зависимость при изменении энергии импульса в диапазоне 1.2–2.8 мкДж, на которой серым цветом выделена область, где наблюдалась генерация видимого СК.

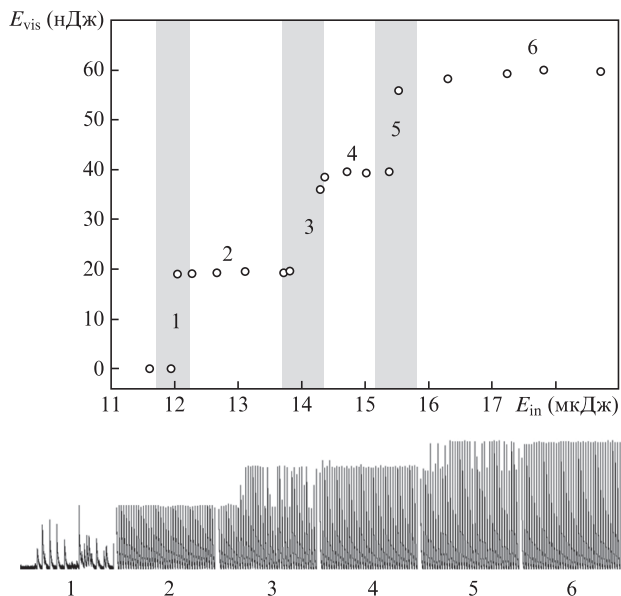


Рис.4. Зависимость энергии E_{vis} видимого СК от энергии E_{in} входного импульсного излучения на $\lambda = 1800$ нм. Внизу – осциллограммы сигнала фотодиода, измеряющего энергию каждого импульса в видимой области. Цифрами 1, 3, 5 обозначены выделенные серым цветом окрестности пороговых значений энергии, при которых возникают 1-й, 2-й и 3-й ПК и соответственно 1-я, 2-я и 3-я СП в филаменте.

При энергии импульса, близкой к порогу образования первой СП, амплитуда сигнала с фотодиода при измерении энергии видимого СК сильно флуктуировала от импульса к импульсу (рис.4, область 1). В этом режиме доля энергии импульса, проходящего после образца через диафрагму диаметром 50 мкм, близка к максимальной и составляла более 7% для излучения на $\lambda = 1800$ нм при фокусировке зеркалом с $F = 50$ см (рис.3) и $\sim 6\%$ при фокусировке длиннофокусной линзой. При энергии воздействующего импульса, превышающей порог образования СП, энергия видимого СК в некотором интервале оставалась неизменной (рис.4, область 2). В этом случае СК генерируется единственной СП, смещающейся к входному окну образца с увеличением энергии импульса. Вместе с очевидным уменьшением эффективности преобразования лазерного импульса в видимый СК наблюдалось также снижение относительной энергии импульса, проходящего через диафрагму диаметром 50 мкм, что связано с увеличением расходимости излучения на выходной грани образца при смещении СП внутрь образца (рис.3). Это снижение продолжалось вплоть до достижения энергией входного импульса следующего порога, при котором возникла вторая СП, регистрируемая по возникновению следующего ПК (рис.2) и по увеличению доли энергии излучения, проходящего через диафрагму (рис.3, энергия 4.4 мкДж). При образовании второй СП энергия видимого СК скачком увеличивалась почти вдвое (рис.4, область 3).

Дискретное увеличение энергии видимого СК повторялось с появлением каждой следующей СП в последовательности. В результате наблюдались ступеньки в зависимостях энергии СК от энергии входного импульса. Ступеньки, т.е. области стабильной энергии видимого СК, в которых практически отсутствует разброс амплитуд сигнала от импульса к импульсу (рис.4, область 6), соответствуют существованию в филаменте последовательности

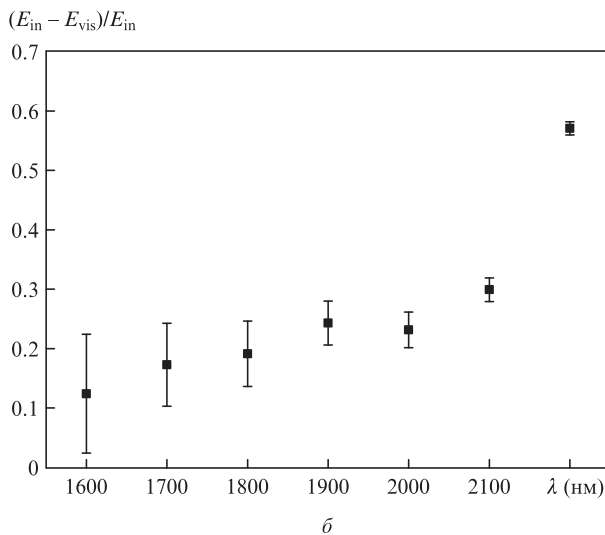
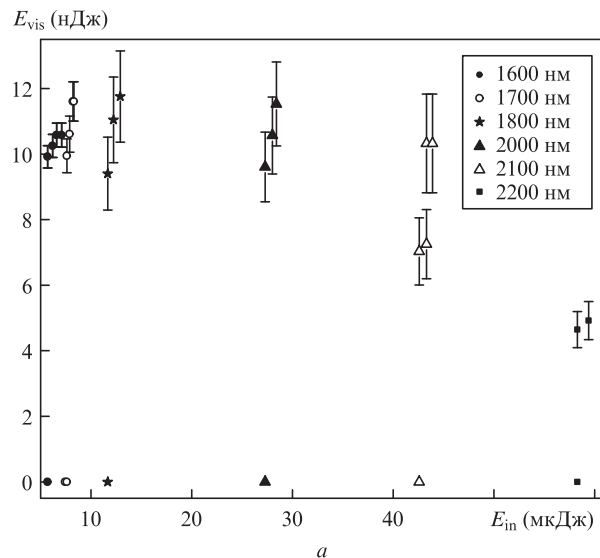


Рис.5. Скачок в зависимости энергии E_{vis} видимого СК при возникновении первой СП (см. рис.4) от энергии E_{in} падающего импульса (а) и доля поглощенной в образце энергии на разных длинах волн (б).

с неизменным количеством СП и, следовательно, соосных ПК – одного, двух, трех (рис.2). При входной энергии, близкой к пороговой для появления очередного ПК, наблюдался переходный режим, при котором энергия видимого СК сильно менялась от импульса к импульсу (рис.4, области 1, 3, 5), что связано с флуктуациями энергии лазерных импульсов, когда появление или отсутствие следующей СП, а значит и ПК, является случайным. В эксперименте наблюдалось до семи соосных ПК, при дальнейшем увеличении энергии режим их формирования становился нестабильным, что связано с сильным влиянием флуктуаций лазерного излучения, а также с тепловыми искажениями в среде. «Выброс» видимого СК наблюдался при филаментации импульсов излучения различной длины волны, лежащей в области аномальной дисперсии групповой скорости (рис.6). При этом энергия видимого СК, который генерирует СП, уменьшается с увеличением длины волны входного излучения, но не зависит от положения СП в последовательности.

Эффективность преобразования СП в СК можно оценить, исходя из следующих соображений. Фазовая моду-

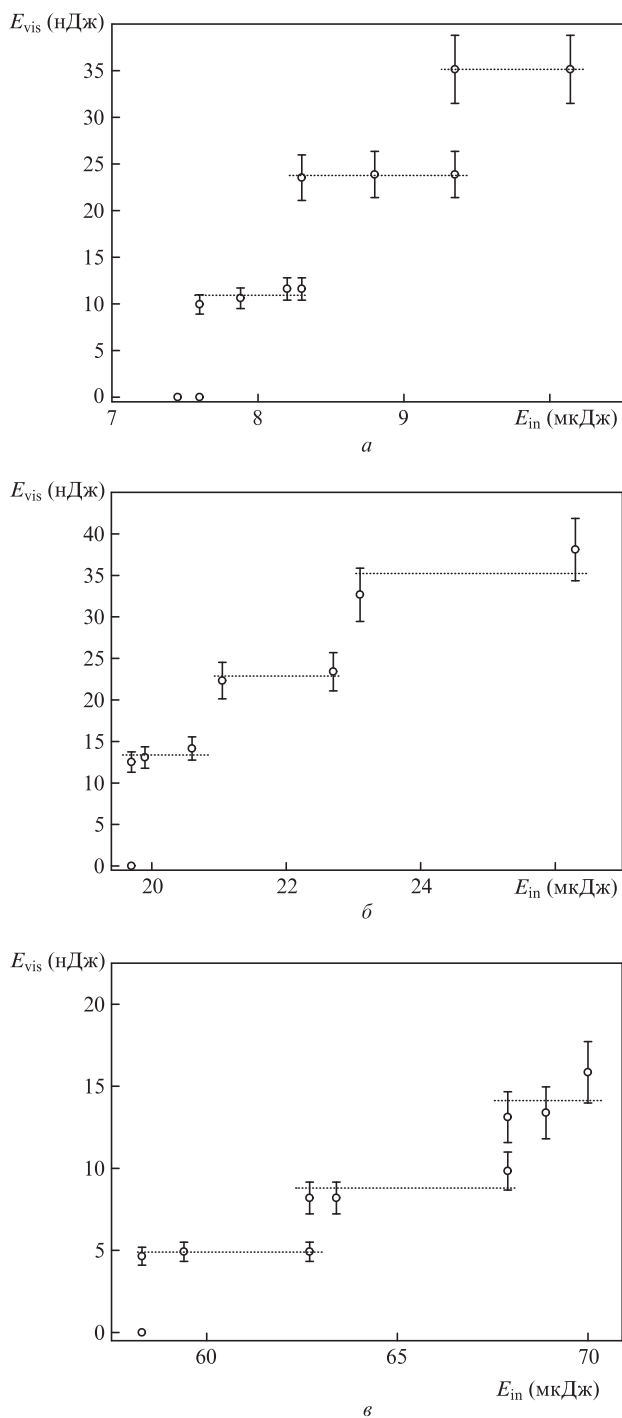


Рис.6. Изменение энергии E_{vis} видимого СК в области $\lambda = 300-700$ нм при увеличении энергии E_{in} входного импульсного излучения на $\lambda = 1700$ (а), 1900 (б) и 2200 нм (в).

ляция светового поля и, следовательно, генерация видимого СК импульсом, развиваются в приосевой области филамента диаметром ~ 10 мкм. Согласно результатам численного моделирования [27, 31] для излучения на $\lambda = 1800$ нм доля энергии СК в спектральном диапазоне $300-1100$ нм E_{vis} составляет $\sim 1.6\%$ от всей его энергии E_{SC} . Измеренная в настоящем эксперименте доля энергии видимого СК первой ступеньки E_{vis} на этой длине волны (рис.4–6) равна $\sim 0.1\%$ от энергии падающего излучения E_{in} . С другой стороны, весь СК образуется в филаменте или, точнее, в СП, энергия которой E_{bul} , согласно нашим измерениям

с использованием диафрагмы диаметром 50 мкм (рис.3), не превышает 7% от E_{in} . Таким образом, имеем

$$E_{vis} \sim 10^{-3} E_{in} \sim 0.016 E_{SC}, \quad E_{bul} \sim 7 \times 10^{-2} E_{in}.$$

Путем несложных арифметических действий получаем $E_{bul} \sim E_{SC}$, т.е. энергия СП близка к энергии СК во всей спектральной полосе. Из этого легко заключить, что практически вся энергия СП преобразуется в энергию СК, что и является основной причиной ее диссипации и «гибели».

4. Численное моделирование

Сценарий образования последовательности СП и ПК при филаментации импульса в условиях аномальной дисперсии групповой скорости наглядно иллюстрируют результаты численного исследования. Моделирование выполнено в приближении медленно меняющейся волны [32], в котором в рассматриваемой постановке задачи [22] учитываются дифракция и дисперсия волнового пакета, его керровская самофокусировка, фото- и лавинная ионизация среды, абберационная дефокусировка и поглощение волнового пакета в наведенной лазерной плазме, а также эффект самоукручения фронта огибающей импульса. В численной модели дисперсия кварца определялась по формуле Селлмейера [33, 34], а скорость фотоионизации – по формуле Келдыша [35]. Поскольку в эксперименте использовалась слабая фокусировка на входную грань образца (практически коллимированный пучок), форма спектрально ограниченного импульса входного излучения и распределение интенсивности в сечении коллимированного пучка предполагались гауссовыми:

$$I(r, t, z=0) = I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2} - \frac{t^2}{t_0^2}\right).$$

При численном решении самосогласованной нелинейно-оптической задачи определялись трансформация вдоль филамента распределения интенсивности светового поля $I(r, t, z)$ в пространстве и во времени, изменение концентрации электронов на оси ПК $N_e(z)$ и энергия спектра импульса $E_{vis}(z)$ в видимой полосе $500-1100$ нм. В качестве примера на рис.7 приведены результаты, полученные для импульсного излучения на $\lambda = 2200$ нм с параметрами, близкими к экспериментальным: энергия $E_{in} = 10.8$ мкДж, радиус пучка $w_0 = 160$ мкм, длительность $2t_0 = 60$ фс (по уровню e^{-1}), что соответствует длительности 50 фс, определяемой на полувысоте. При рассматриваемых параметрах пиковая интенсивность входного импульса $I_0 = 2.5 \times 10^{11}$ Вт/см², пиковая мощность $P_0 = 201.6$ МВт и отношение $P_0/P_{cr} = 10$, где $P_{cr} = 20.16$ МВт – критическая мощность самофокусировки на $\lambda = 2200$ нм в плавленом кварце.

Из представленных результатов видно, что вдоль филамента образуется последовательность ПК, расстояние между которыми составляет $5-10$ мм. Каждому ПК соответствует резкое увеличение энергии видимого СК $E_{vis}(z)$, тогда как в отсутствие ПК энергия $E_{vis}(z)$ остается постоянной. ПК возникают вследствие ионизации среды в сильном световом поле при пространственно-временной компрессии волнового пакета. Увеличение концентрации электронов в ПК имеет практически пороговый характер, т.к. в плавленом кварце на $\lambda = 2200$ нм порядок многофотон-

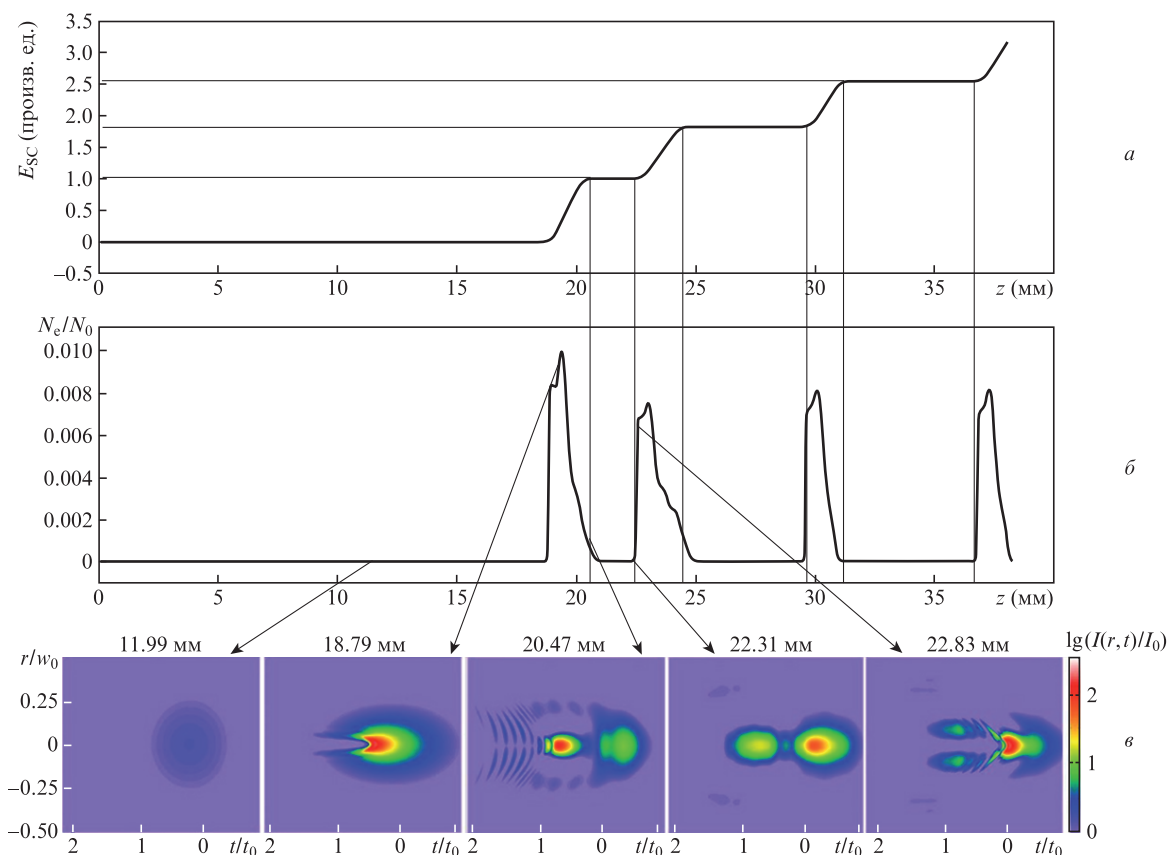


Рис.7. Изменение вдоль филамента энергии видимого СК $E_{\text{vis}}(z)$ (а), концентрации электронов на оси $N_e(z)/N_0$, где $N_0 = 2.1 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$ – концентрация нейтралов (б), и тоновые картины пространственно-временного распределения интенсивности $I(r, t, z)/I_0$ для нескольких характерных расстояний вдоль филамента (в). Параметры входного импульсного излучения: длина волны 2200 нм, энергия 10.8 мкДж, длительность $2t_0 = 60$ фс (по уровню e^{-1}), радиус пучка $w_0 = 160$ мкм, пиковая интенсивность $I_0 = 2.5 \times 10^{11} \text{ Вт/см}^2$, пиковая мощность превышает в десять раз критическую мощность самофокусировки.

ности процесса ионизации составляет 18. Интенсивность в образующейся СП на два порядка превышает пиковую величину I_0 входного импульса и достигает $4 \times 10^{13} \text{ Вт/см}^2$. На хвосте волнового пакета происходит абберационная дефокусировка в наведенной лазерной плазме, в результате которой сильно возрастает временной градиент интенсивности. Энергия видимого СК накапливается с расстоянием, т.к. его генерация происходит на интервале, где существует СП с высоким градиентом поля. В дальнейшем СП диссипирует, и на переднем фронте импульса зарождается следующая СП при увеличении интенсивности светового поля вследствие компрессии его во времени при керровской фазовой модуляции в условиях аномальной дисперсии групповой скорости. Таким образом, в филаменте формируется последовательность короткоживущих СП с высокой интенсивностью, которые генерируют видимый СК и регистрируются в эксперименте по свечению рекомбинации плазмы. В интервале между СП в последовательности интенсивность поля мала, и энергия видимого СК не меняется с расстоянием. Поэтому образуется последовательность ступенек при изменении с расстоянием энергии видимого СК, что соответствует экспериментальным результатам.

5. Заключение

Образование СП в фемтосекундном филаменте сопровождается выбросом определенной порции энергии видимого СК. Зависимость энергии видимого СК от энергии

воздействующего импульса имеет характерный вид ступенек, при этом возникновение каждой следующей ступеньки связано с образованием очередной СП в филаменте. В последовательности СП каждая пуля выбрасывает одинаковую энергию видимого СК, которая уменьшается с увеличением длины волны излучения, создающего филамент. В экспериментах по филаментации в плавленом кварце образование СП в филаменте регистрируется по возникновению свечения рекомбинации лазерной плазмы, наведенной СП с высокой интенсивностью, и по скачку энергии видимого СК. Визуально излучение видимого СК, которое генерирует СП, регистрируется по его рассеянию при распространении вдоль филамента. Пороговая энергия воздействующего импульса излучения, при которой возникает первая СП, зависит от условий фокусировки и возрастает с увеличением его длины волны. На основе полученных ранее экспериментальных данных, а также проведенных ранее спектральных измерений можно заключить, что энергия СП практически полностью преобразуется в энергию СК во всей его спектральной полосе и это является основным каналом диссипации СП.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-22-02025-офи-м) и гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ № НШ-3796.2014.2.

1. Silberberg Y. *Opt. Lett.*, **15**, 1282 (1990).
2. Ахманов С.А., Сухоруков А.П., Хохлов Р.В. *УФН*, **93** (1), 19 (1967).
3. Fibich G., Ilan B. *Opt. Lett.*, **29**, 887 (2004).

4. Lobanov V.E., Kartashov Y.V., Torner L. *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 033901 (2010).
5. Minardi S. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 263901 (2010).
6. Eilenberger F. et al. *Phys. Rev. A*, **84**, 013836 (2011).
7. Mihalache D. et al. *Phys. Rev. E*, **70**, 055603(R) (2004).
8. Koprinkov G. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 3847 (2000).
9. Stibenz G., Zhavoronkov N., Steinmeyer G. *Opt. Lett.*, **31**, 274 (2006).
10. Skupin St. et al. *Phys. Rev. E*, **74**, 056604 (2006).
11. Uryupina D. et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, **27**, 667 (2010).
12. Brée C., Demircan A., Steinmeyer G. *Phys. Rev. A*, **83**, 043803 (2011).
13. Couairon A. *Eur. Phys. J. D*, **27**, 159 (2003).
14. Berge L., Skupin S. *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 113902 (2008).
15. Gaeta A.L. *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 3582 (2000).
16. Porras M., Parola A., Trapani P. *J. Opt. Soc. Am. B*, **22**, 1406 (2005).
17. Kandidov V.P. et al. *Appl. Phys. B*, **77**, 149 (2003).
18. Hauri C.P. et al. *Appl. Phys. B*, **79**, 673 (2004).
19. Xiaowei Chen et al. *Opt. Lett.*, **32**, 2402 (2007).
20. Bergé L., Skupin S. *Phys. Rev. E*, **71**, 065601(R) (2005).
21. Moll K.D., Gaeta A. *Opt. Lett.*, **29**, 995 (2004).
22. Smetanina E.O., Dormidonov A.E., Kandidov V.P. *Laser Phys.*, **22**, 1189 (2012).
23. Smetanina E.O. et al. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 105401 (2013).
24. Чекалин С.В. и др. *Квантовая электроника*, **43** (4), 326 (2013).
25. Majus G. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 193901 (2014).
26. Сметанина Е.О. и др. *Квантовая электроника*, **42** (10), 913 (2012).
27. Сметанина Е.О. и др. *Квантовая электроника*, **42** (10), 920 (2012).
28. Chekalin S.V. et al. *Program 23st Int. Laser Physics Workshop* (Sofia, Bulgaria, 2014, rep. 5.4.7, p. 35).
29. Schroeder H., Chin S.L. *Opt. Commun.*, **234**, 399 (2004).
30. Durand M. et al. *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 115003 (2013).
31. Smetanina E.O. et al. *Opt. Lett.*, **38**, 16 (2013).
32. Brabec T., Krausz F. *Phys. Rev. Lett.*, **78**, 3282 (1997).
33. Malitson I.H. *J. Opt. Soc. Am.*, **55**, 1205 (1965).
34. Sellmeier W. *Annalen der Physik und Chemie*, **219**, 272 (1871).
35. Келдыш Л.В. *ЖЭТФ*, **47**, 1945 (1964).