

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Динамика световых пуль в однородных диэлектриках

(к 50-летию Института спектроскопии РАН)

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

В совместной работе, выполненной в Институте спектроскопии РАН и Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, экспериментально и численно показано, что световая пуля — экстремально сжатый во времени и пространстве волновой пакет в объеме прозрачного диэлектрика — в отличие от солитонов в направляющих структурах, представляет собой короткоожижающее образование, длина пробега которого не превышает нескольких сотен микрометров. Сверхуширение спектра суперконтинаума, генерируемого световой пулей, и возникновение в нем изолированного антистоксова крыла происходят при сжатии пули до близкого к одноцикловому волновому пакета и образовании плазменного канала. Это подтверждено численным моделированием и экспериментом по регистрации периодической модуляции плотности наведенных в LiF центров окраски из-за различия фазовой и групповой скорости волнового пакета в среде.

Ключевые слова: филаментация, световые пули, аномальная дисперсия групповой скорости, суперконтинаум

PACS numbers: 42.65.-k, 42.65.Jx, 42.65.Ky, 42.65.Re, 52.38.Hb DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.06.038419>

Содержание

1. Введение (299).
2. Регистрация световых пуль и сопровождающего их излучения суперконтинаума (300).
3. Измерение длины пробега световых пуль методом лазерной колорации (302).
4. Динамика образования световых пуль и излучения суперконтинаума. Некоторые результаты численного моделирования (303).
5. Заключение (305).

Список литературы (305).

1. Введение

Термин "световые пули" (СП) введён для самосогласованных нелинейных возбуждений с высокой локализацией светового поля как в пространстве, так и во времени. Концепция образования СП при совместной и согласованной компрессии лазерного излучения в пространстве и времени при самовоздействии волнового пакета в диспергирующей среде с кубической нелинейностью сформулирована в [1] на основе анализа уравнения квазиоптики в безабберационном приосевом при-

ближении [2]. В настоящее время исследования по данной проблеме разделились, по крайней мере, на два направления. Одно из них посвящено формированию устойчивых СП (трёхмерных солитонов), т.е. самосогласованных нелинейных возбуждений, локализованных в пространстве и во времени, распространяющихся в "направляющих" структурах, нелинейность которых принципиально отличается от чисто кубической, на значительные расстояния без расплывания и заметных искажений [3]. Реализация подобных самосогласованных структур в устойчивом виде является одной из наиболее сложных с точки зрения эксперимента и до сих пор не решённых задач современной нелинейной оптики.

Наша работа принадлежит другому направлению, в котором начиная с первых работ по самофокусировке и затем филаментации [4] рассматриваются однородные и изотропные среды с кубической нелинейностью, и процесс локализации светового поля происходит в объеме среды. В этом случае роль направляющей структуры играет филамент, формируемый при распространении мощного фемтосекундного излучения в нелинейной диспергирующей среде. Филаментация — явление локализации светового поля при распространении мощного фемтосекундного лазерного излучения в прозрачных диэлектриках, поддерживаемой динамическим балансом керровской самофокусировки в среде и дефокусировки в наведённой лазерной плазме в условиях дифракции и материальной дисперсии. Вследствие высокой концентрации энергии в филаменте, значительной его длины и стабильности параметров усиливается нелинейно-оптическое взаимодействие светового поля со средой и существенно трансформируются пространственно-временные и спектральные характеристики излучения. При филаментации происходит сверхуширение частотного и

С.В. Чекалин, В.О. Компанец. Институт спектроскопии РАН, ул. Физическая 5, 108840 Троицк, Москва, Российская Федерация
E-mail: chekalin@isan.troitsk.ru

А.Е. Дормидонов, В.П. Кандидов. Институт спектроскопии РАН, ул. Физическая 5, 108840 Троицк, Москва, Российская Федерация; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет,

Ленинские горы 1, стр. 2, 119991 Москва, Российская Федерация

Статья поступила 15 августа 2018 г.

углового спектра фемтосекундного импульса — генерация суперконтинуума (СК).

Материальная дисперсия среды оказывает значительное влияние на формирование филамента и пространственно-временное распределение интенсивности излучения в процессе филаментации. В области нормальной дисперсии групповой скорости (ДГС) импульс распадается на субимпульсы, в области нулевой ДГС происходит многократная керровская самофокусировка заднего фронта импульса, испытавшего дефокусировку в самонаведённой лазерной плазме. В условиях аномальной ДГС в филаменте формируются СП — экстремально сжатые волновые пакеты с высокой локализацией светового поля в пространстве и времени. При этом с увеличением энергии импульса образуется квазипериодическая последовательность световых пуль [5].

Вопрос об экспериментальной реализации трёхмерных солитонов в объёме прозрачной среды остаётся открытым по сей день, поскольку они неустойчивы и могут колапсировать или распадаться [6]. Тем не менее с созданием источников фемтосекундного излучения среднего инфракрасного (ИК) диапазона, в котором ДГС многих прозрачных диэлектриков является аномальной, что необходимо для формирования СП, начались исследования филаментации импульсов в этом диапазоне длин волн. Так как критическая мощность самофокусировки, при превышении которой развивается филаментация, возрастает пропорционально квадрату длины волны, то для экспериментов в ближнем и среднем ИК-диапазоне необходимо существенное увеличение энергии импульса. Экстремальная локализация светового поля в пространстве и времени, вплоть до нескольких длин волн в диаметре и длительностью в одно оптическое колебание, сопровождающая распространение волнового пакета с высокой пиковой интенсивностью в однородной среде в условиях аномальной ДГС, приводит к формированию СП. Это, в свою очередь, неразрывно связано с генерацией СК, спектральная полоса которого простирается от ультрафиолетового (УФ) до среднего ИК-диапазона и в спектре которого формируется изолированное антистоксово крыло в видимой области.

Пиковые мощности в фемтосекундных импульсах, генерируемых современными лазерами, могут достигать уровня в несколько петаватт, пиковые интенсивности — уровня $10^{13} - 10^{14}$ Вт см^{-2} . При этих условиях нелинейный вклад в показатель преломления среды становится значительным, и эффекты нелинейного самоиздействия, неизбежно сопровождающие распространение высоконтенсивного излучения в прозрачной среде, приводят к существенным изменениям пространственно-временных и спектральных параметров распространяющихся импульсов. Поэтому исследования сверхбыстрой динамики экстремально сжатых волновых пакетов длительностью в одну-две оптические осцилляции, с попечерным размером порядка длины волны и пиковой интенсивностью до 10^{14} Вт см^{-2} в объёме изотропных прозрачных диэлектриков становятся с появлением субтераваттных источников сверхкоротких импульсов в перспективном для многих приложений среднем ИК-диапазоне спектра [7] весьма актуальными для экстремальной лазерной оптики.

Одна из ключевых проблем в этой области состоит в выявлении основных закономерностей динамики волно-

вых пакетов и основных каналов диссипации энергии, что позволит определить параметры подобия и масштабировать полученные результаты на различные среды, в том числе газообразные.

2. Регистрация световых пуль и сопровождающего их излучения суперконтинуума

В нашей работе [8] СП длительностью около двух оптических циклов впервые наблюдались по измерению их автокорреляционной функции при филаментации в плавленом кварце фемтосекундных импульсов в области аномальной дисперсии на 1900 нм. При этом наблюдалось появление второй и третьей СП при увеличении энергии действующего импульса (рис. 1), что находилось в хорошем согласии с численными расчётами [9, 10]. По оценкам длины плазменного канала в этих экспериментах длина пробега СП не превышала нескольких миллиметров. Поэтому несколько неожиданным явилось утверждение авторов появившейся в это же время работы [11], проведённой в тех же условиях филаментации, о длине пробега в сантиметровом диапазоне, которое воспроизвело и в ряде последующих работ [12–14]. Главным основанием для такого вывода явились фотографии длинного светящегося трека плазменного канала и рассеянного излучения СК, зарегистрированного через боковую поверхность образца. Этот трек интерпретировался как результат люминесценции кварца при прохождении через него долгоживущего квазисолитона (СП), распространяющегося по образцу на несколько сантиметров. Согласно подобным экспериментам длина пробега СП в сапфире составляет 10 мм [12], а в [11] длина пробега в плавленом кварце оценена в несколько сантиметров, что существенно превышает величины, полученные в работах [8, 15].

Кроме времени жизни (или длины пробега) СП, весьма существенным является дискутируемый до настоящего времени вопрос о природе возникновения СП, а также сопровождающего их излучения СК. Некоторые авторы усматривали в этом явлении аналогию с так называемыми "волнами-убийцами" (rogue waves) [16], существование которых в мировом океане недавно подтверждено документально, правда, без объяснения причин их возникновения. При этом излучение, возникающее в видимой полосе СК, трактуется по аналогии с генерацией высоких частот в волоконных преобразователях как результат резонансного обмена энергией

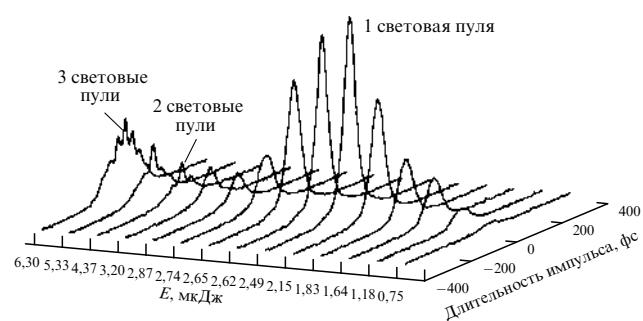


Рис. 1. Автокорреляционные функции СП в плавленом кварце (фс), зарегистрированные при увеличении энергии действующего импульса (мкДж).

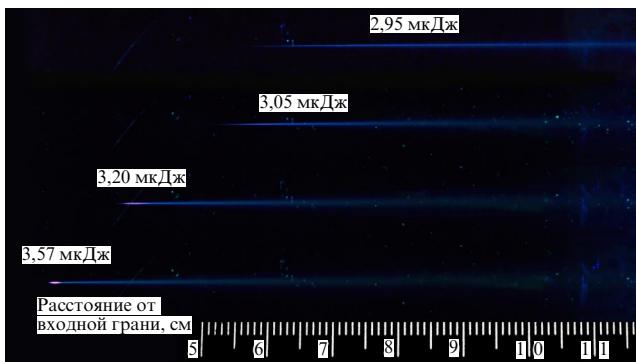


Рис. 2. (В цвете онлайн.) Изображения (за 10 тыс. импульсов) излучения СК, рассеянного в образце, и свечения плазмы, генерируемой в плавленом кварце при фокусировке импульса длительностью 50 фс на длине волны 1900 нм линзой с фокусом 0,585 м на входную грань образца в пятно диаметром 135 мкм (энергия импульса и масштаб указаны на рисунке).

между солитоном и дисперсионной волной, индуцируемой дисперсией высших порядков (резонансное излучение). Наблюдавшийся авторами [16] сильный разброс энергии видимой полосы СК, генерируемого при образовании СП в сапфире, представлен как экспериментальное подтверждение такой концепции.

Анализ экспериментов, проведённых в наших работах [17, 18], позволяет пролить свет на оба эти вопросы. Для регистрации светящихся треков плазменных каналов и рассеянного СК принципиально необходимо накопление сигнала от достаточно большого количества лазерных импульсов. Та же проблема возникает и в используемом рядом зарубежных групп методе трёхмерного изображения [19]. Невоспроизводимость параметров лазерного импульса от выстрела к выстрелу приводит к существенному искажению получаемой информации. Это демонстрирует рис. 2, на котором приведены в качестве примера светящиеся треки, зарегистрированные в плавленом кварце при различной энергии создающих их импульсов, соответствующей образованию первой СП в филаменте. Рассеянное излучение суперконтигума появляется при энергии 2,95 мкДж, что соответствует пиковой мощности 53 МВт, пороговой для

образования СП. Видно, что при энергии лазерных импульсов, близкой к порогу филаментации, даже при экспозиции в 10 тыс. импульсов не удаётся зарегистрировать плазменный канал, тогда как длина трека рассеянного излучения СК в этом случае максимальна и составляет более 5 см. Это связано с большим разбросом стартовой точки на пороге филаментации. Стабилизация положения стартовой точки при увеличении энергии даёт возможность зарегистрировать плазменный канал, длина которого, как и трека рассеянного СК, заметно сокращается при превышении порога устойчивого образования первой СП (см. рис. 2).

При фотографировании цветных треков, возникающих в плавленом кварце с ростом энергии импульса при образовании одной, двух, трёх и т.д. СП (до семи, в соответствии с количеством возникших плазменных каналов), зарегистрированы треки длиной более 10 см (рис. 3). Однако при перестройке действующей длины волны от ближнего к среднему ИК-диапазону их цвет изменялся в полном соответствии с цветом видимой полосы генерируемого СК. Это однозначно показывает, что наблюдаемые цветные треки связаны не с люминесценцией образца, а с рассеянием СК в нём и поэтому никак не отражают длину пробега СП. Измерение энергии антистоксова крыла СК показало, что образование СП в фемтосекундном филаменте сопровождается выбросом дискретной порции энергии в видимой полосе спектра СК. Зависимость энергии видимого СК от энергии действующего импульса имеет характерный вид "ступенек", при этом возникновение каждой следующей ступеньки связано с образованием очередной СП в филаменте. В последовательности СП каждая пуля выбрасывает энергию видимого СК равной величины. Существенно, что, в отличие от [16], величина этой энергии, регистрируемая в каждом лазерном импульсе, остаётся неизменной даже при повышении энергии действующего импульса вплоть до образования следующей СП (рис. 4). Таким образом, появление изолированного антистоксова крыла суперконтигума, впервые зарегистрированного в [20] и в дальнейшем более детально изученного в [21], связано с образованием СП [8]. На основании полученных экспериментальных данных, а также проведённых ранее спектральных измерений сделано заключение, что энергия СП практически полностью преобразуется в

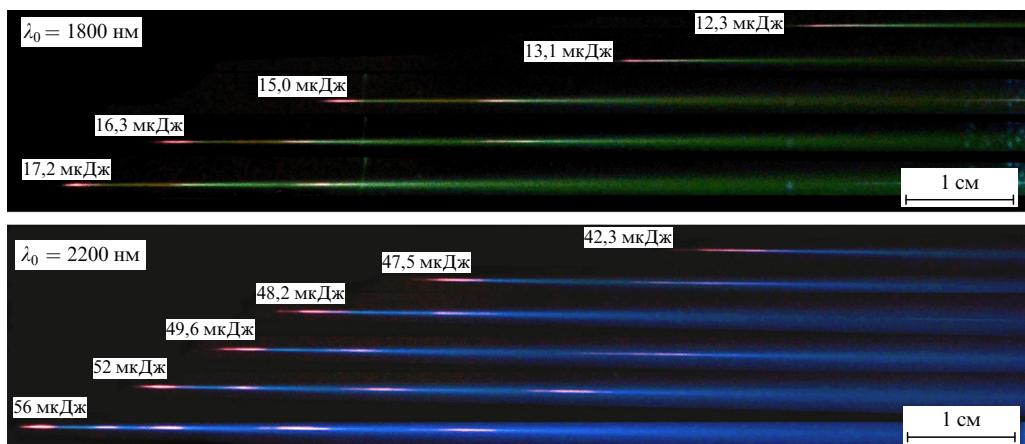


Рис. 3. (В цвете онлайн.) Треки плазменных каналов и рассеянного излучения СК, зарегистрированные в плавленом кварце при филаментации фемтосекундных импульсов разных энергий и длин волн (указаны на рисунке).

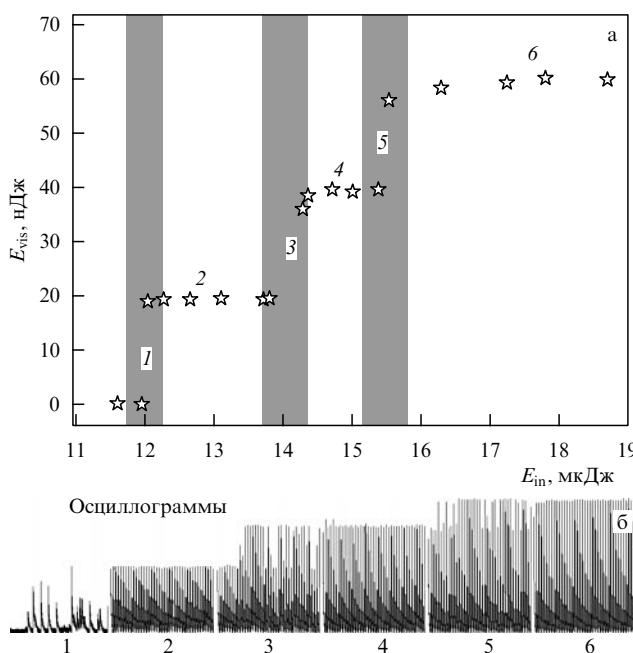


Рис. 4. (а) Зависимость энергии E_{vis} видимого СК от энергии E_{in} входного импульсного излучения на 1800 нм. (б) Осциллограммы сигнала фотодиода, измеряющего энергию каждого импульса в видимой области. Цифрами 1, 3, 5 обозначены выделенные серым цветом на рис. а окрестности пороговых значений энергии, при которых возникают 1-й, 2-й и 3-й плазменный канал и соответственно 1-я, 2-я и 3-я СП в филаменте.

СК во всей его спектральной полосе, и это является основным каналом диссиpации пули.

3. Измерение длины пробега световых пуль методом лазерной колорации

Измерение длины пробега СП представляет значительный практический интерес, в частности для задач атмосферной оптики, для которых возможно масштабирование результатов, полученных для твердотельных диэлектриков. Метод лазерной колорации [22–24] позволяет провести измерения, во-первых, без накопления сигнала, т.е. с использованием всего одного лазерного импульса, что полностью исключает ошибку измерений, связанную с разбросом энергии импульса, и, во-вторых, при полном отсутствии паразитных излучений СК, конической эмиссии и плазменного канала. Динамика возникновения и развития СП при филаментации одиночных фемтосекундных импульсов среднего ИК-диапазона в LiF изучается по изменению плотности долгожи-

вущих центров окраски (ЦО), возникающих в световом поле за счёт многофотонных процессов в образующейся СП. В этом случае состоящие из ЦО долгоживущие структуры, созданные всего одним лазерным импульсом, могут быть легко зарегистрированы и исследованы при последующей подсветке образца непрерывным лазером в полосе их поглощения вблизи 450 нм. Это позволяет подробно исследовать трёхмерную структуру оптического поля СП на всей длине её пробега внутри материала с пространственным разрешением, превышающим 1 мкм (определенным исключительно разрешающей способностью используемого микроскопа).

Полученные в наших экспериментах фотографии люминесценции ЦО, наведённых в LiF при одноимпульсной филаментации фемтосекундных импульсов в области сильной аномальной ДГС, показаны на рис. 5, а на рис. 6 приведены профили плотности люминесценции ЦО, наведённых импульсами на длине волны среднего и ближнего ИК-диапазонов, варьируемой от 800 до 3500 нм. Видно, что при воздействии одиночного импульса на длине волны, соответствующей нормальной ДГС в LiF, протяжённость области с высокой интенсивностью светового поля (т.е. длина филамента) увеличивается с длиной волны от 70 мкм на 800 нм до 120 мкм на 1240 нм (область нулевой ДГС) и далее до 250 мкм на 2100 нм (область слабой аномальной ДГС). При этом профили наведённых в филаменте структур из ЦО довольно гладкие. При достаточно большой аномальной ДГС (начиная с 2600 нм) в профилях появляется регулярная структура из центров окраски, которая непосредственно воспроизводит влияние абсолютной фазы светового поля экстремально сжатого волнового пакета на нелинейно-оптическое взаимодействие (см. рис. 5, 6). Хорошо известно, что при распространении в диспергирующей среде светового импульса длительностью порядка одного цикла оптических колебаний (так называемые одноцикловые импульсы) за счёт разницы скоростей огибающей импульса и его несущей частоты происходит циклическая периодическая модуляция максимальной амплитуды светового поля импульса [25]. Этот процесс характерен только для одноцикловых импульсов, с увеличением числа периодов эффект модуляции практически исчезает. Поэтомуявление наблюдаемой регулярной модуляции профиля плотности ЦО, наведённых при филаментации в LiF (см. рис. 5), свидетельствует о формировании одноцикловой СП.

Длина пробега СП, судя по данным эксперимента, несколько возрастает с увеличением длин волны (см. рис. 6), но, в отличие от данных [11, 12], не превышает нескольких сотен микрометров, что соответствует времени жизни порядка единиц пикосекунд. Вид трека СП не



Рис. 5. Треки люминесценции ЦО, наведённых в LiF при одноимпульсной филаментации фемтосекундных импульсов на длине волны, варьируемой от 2500 до 3900 нм.

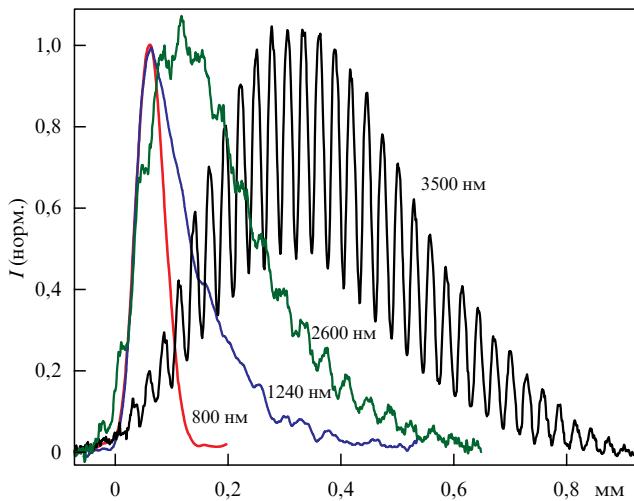


Рис. 6. Нормированные плотности люминесценции ЦО, зарегистрированные после одноимпульсной филаментации на различных длинах волн (указаны на рисунке), в зависимости от расстояния от точки старта филамента (мм).

меняется при увеличении энергии лазерного импульса от порога появления филамента до возникновения второй СП, структура которой в точности совпадает со структурой первой СП, что свидетельствует об устойчивости пуль [26].

4. Динамика образования световых пуль и излучения суперконтинуума. Некоторые результаты численного моделирования

Для детального анализа эволюции светового поля при формировании одноцикловой СП и её дальнейшего распространения в LiF осуществлено решение однодimensionalного уравнения распространения [27], наиболее полно описывающего филаментацию фемтосекундного

лазерного импульса, с помощью компьютерного кода, разработанного в [28]. Аналогичная картина трансформации импульса и его спектра получена в [29] при филаментации в воздухе излучения на длине волны 4 мкм. При формализации рассматриваемой задачи учитывались дифракция и дисперсия волнового пакета, керровская самофокусировка, фото- и лавинная ионизация среды, дефокусировка и поглощение света в индуцируемой плазме. В качестве начального условия при моделировании был задан волновой пакет с гауссовым распределением амплитуды напряжённости электрического поля по времени и пространству, параметры которого согласуются с экспериментальными данными: длительность волнового пакета 100 фс (по половине высоты), диаметр пучка 100 мкм, энергия 20 мкДж, центральная длина волны 3500 нм, что соответствует пиковой мощности около 1,5 критических мощностей самофокусировки в LiF. Рассчитанные временные профили светового поля в СП на рис. 7 и 8 приведены в локальной системе отсчёта импульса $\tau = t - z/v_g$, где v_g — групповая скорость импульса. На рисунке 7а, г представлены начальный временной профиль светового поля и спектр импульса на оси пучка соответственно.

Под действием керровской нелинейности и аномальной ДГС происходит сжатие светового импульса в пространстве и во времени, амплитуда светового поля возрастает в несколько раз (рис. 7б). При этом из-за нелинейной фазовой модуляции спектр импульса начинает уширяться (рис. 7д). Дальнейшее сжатие импульса до одноцикловой СП приводит к росту интенсивности выше 10^{14} Вт см⁻² (рис. 7в) и началу эффективной фото- и лавинной ионизации и генерации экситонов в среде. В этот момент спектр становится монотонно уширенным в антистоксовой области и перекрывает весь видимый диапазон — происходит генерация СК (рис. 7е). Частота коротковолновой отсечки СК определяется отношением ширины запрещённой зоны среды к энергии фотона на центральной длине волны импульса [30].

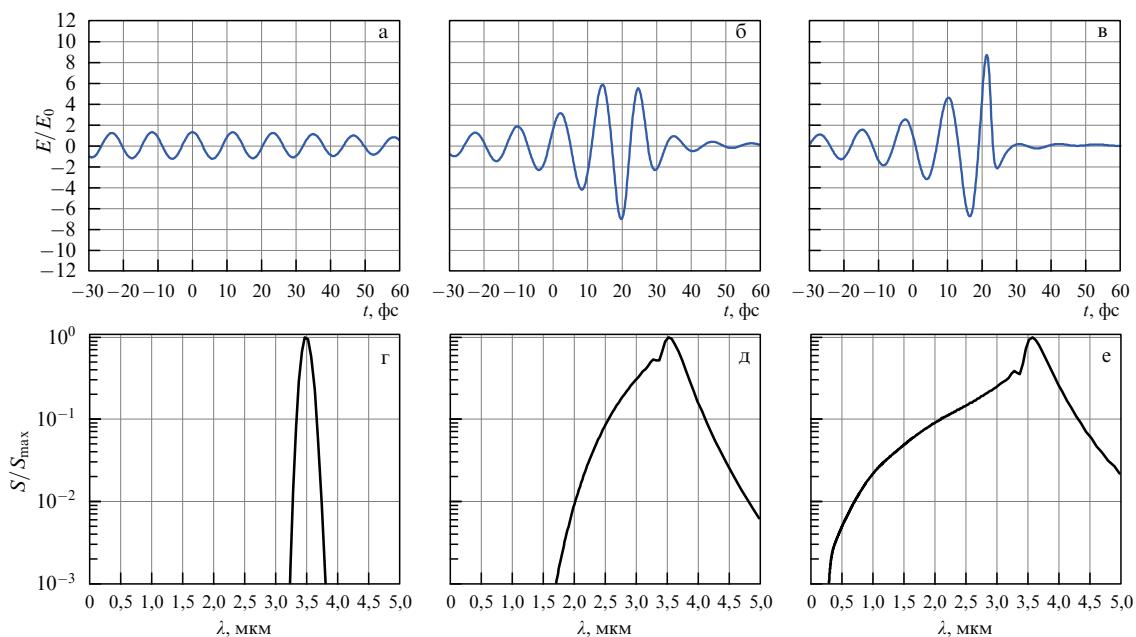


Рис. 7. Профили светового поля на оси волнового пакета (а – в) и соответствующие спектры (г – е) на нескольких расстояниях z от входа в среду распространения: (а, г) $z = 0$ — начальный волновой пакет; (б, д) $z = 6,64$ мм; (в, е) $z = 6,72$ мм — этап формирования СП.

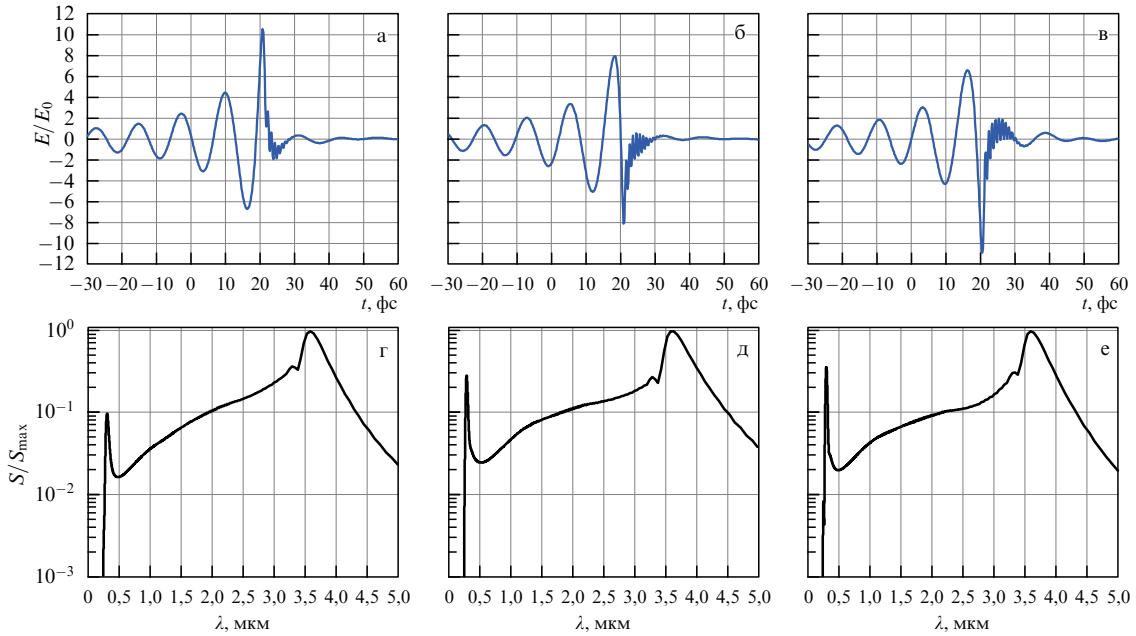


Рис. 8. Профили светового поля на оси СП (а–в) и соответствующие спектры (г–е) на нескольких расстояниях z от входа в среду распространения: (а, г) $z = 6,778$ мм — максимум огибающей волнового пакета СП совпадает с максимумом несущей волны; (б, д) $z = 6,795$ мм — максимум огибающей волнового пакета СП совпадает с нулём несущей волны; (в, е) $z = 6,808$ мм — максимум огибающей волнового пакета СП совпадает с минимумом несущей волны.

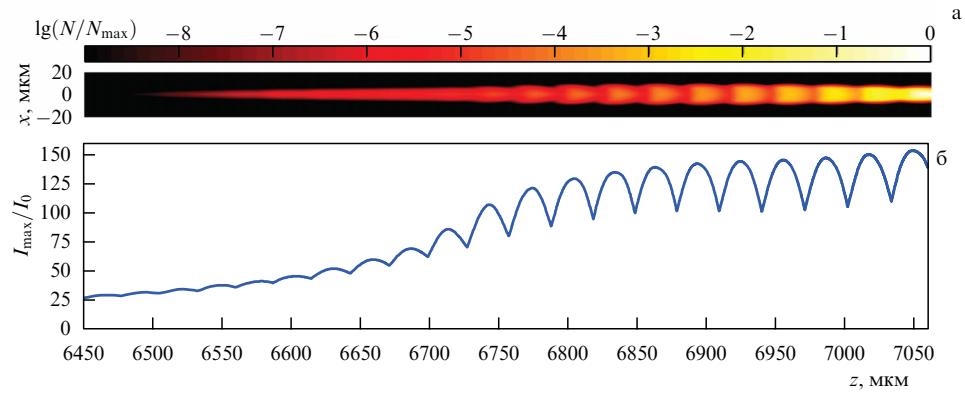


Рис. 9. Расчётное распределение плотности электронов (для сопоставления с экспериментальной картиной проинтегрировано по одной из поперечных координат) в среде при прохождении одноцикловой СП (а) и соответствующая максимальная интенсивность СП (б).

Дефокусировка светового поля в сформировавшейся плазме приводит к укорочению заднего фронта импульса (рис. 8а). Длительность СП на половине высоты интенсивности становится менее 10 фс, что составляет около 10 % от начальной длительности импульса. Вследствие разности фазовой и групповой скоростей световая волна перемещается быстрее, чем огибающая волнового пакета. Видно, что при $z_1 = 6,778$ мм (рис. 8а) максимум огибающей волнового пакета СП совпадает с максимумом световой волны, а при $z_2 = 6,795$ мм (рис. 8б) световая волна смещается на четверть периода, и результатирующая пиковая амплитуда напряжённости светового поля в СП уменьшается более чем на 20 %. При $z_3 = 6,808$ мм (рис. 8в) максимум огибающей волнового пакета СП совпадает с минимумом световой волны. Модуль амплитуды напряжённости электрического поля вновь становится максимальным. Таким образом, при распространении СП как волнового пакета, состоящего

из одного периода световой волны, амплитуда поля периодически меняется из-за разности групповой и фазовой скоростей. Такие колебания пиковой амплитуды электрического поля с периодом около 30 мкм продолжаются в течение всего времени существования СП и зарегистрированы в эксперименте в виде наблюдаемой регулярной структуры из ЦО (см. рис. 5). Вследствие многофотонного процесса генерации ЦО, при котором порядок многофотонности составляет около 30, изменение амплитуды электрического поля на 20 % приводит к однозначно регистрируемой модуляции плотности ЦО при распространении СП [23, 24]. На рисунке 9 приведено рассчитанное распределение плотности плазмы в канале при прохождении одноцикловой СП, хорошо согласующееся с экспериментальными данными по измерению плотности ЦО в LiF (см. рис. 5).

В спектре СП выделяется изолированный антистоксов пик (рис. 8г–е), положение максимума определяется

условием конструктивной интерференции, из которого следует дисперсионное уравнение [31]. Высокочастотные колебания светового поля на частоте, соответствующей коротковолновой отсечке СК, видны на заднем фронте временных профилей СП (рис. 8а – в).

5. Заключение

СП является результатом самоорганизации светового поля волнового пакета в нелинейной диспергирующей среде в условиях аномальной ДГС. В отличие от солитонов в направляющих структурах, СП в объёме прозрачного диэлектрика представляет собой короткоживущее образование, длина пробега которого составляет не сколько сотен микрометров. Длина пробега СП однозначно и надёжно определена в одноимпульсном режиме филаментации методом лазерной колорации, который свободен от погрешностей других методов, использующих накопление сигнала при многоимпульсном режиме измерений. СП, формируемая в прозрачном диэлектрике при филаментации фемтосекундного излучения в условиях аномальной ДГС, сжимается до одноциклового волнового пакета. Длительность СП в один период оптических осцилляций подтверждена экспериментально методом лазерной колорации по регистрации наведённой ею структуры с модуляцией плотности центров окраски в LiF, возникающей вследствие периодического изменения амплитуды светового поля из-за различия фазовой скорости светового поля и групповой скорости огибающей волнового пакета при распространении СП. Экспериментально и численно показано, что в условиях проведённых экспериментов сверхширение СК и возникновение в нём изолированного антистоксова крыла происходит при сжатии СП до одноциклового волнового пакета и образовании плазменного канала. При этом длина пробега СП и соответственно время её жизни определяются потерей энергии за счёт преобразования энергии пули в энергию широкополосного СК и поглощения плазмой.

При филаментации излучения ближнего ИК-диапазона, длина волны которого лежит в области нормальной ДГС, отсутствует компрессия волнового пакета во времени, одноцикловая СП не образуется и плотность центров окраски, наведённая в LiF, меняется монотонно вдоль филамента.

Light bullet dynamics in uniform dielectrics

S.V. Chekalin⁽¹⁾, V.O. Kompanets⁽¹⁾, A.E. Dormidonov^(1,2), V.P. Kandidov^(1,2)

⁽¹⁾ Institute of Spectroscopy, Russian Academy of Sciences, ul. Fizicheskaya 5, 108840 Troitsk, Moscow, Russian Federation

⁽²⁾ Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, bld 2, 119991 Moscow, Russian Federation

E-mail: chekalin@isan.troitsk.ru

The experiments and numerical simulations performed jointly by the Institute of Spectroscopy, Russian Academy of Sciences and Lomonosov Moscow State University have shown that, unlike solitons in guiding structures, the light bullet, a wave packet compressed to the extreme in space and time in the transparent dielectric volume, is a short-lived formation whose free path is not over several hundred micrometers. The supercontinuum spectrum experiences superbroadening due to the light bullet and an isolated anti-Stokes wing emerges there if the bullet is compressed to the state of a wave packet close to single-cycle one and a plasma channel develops. These findings have been confirmed by numerical simulation and experiments demonstrating periodic density modulation of the color centers induced in LiF that occurs due to the difference between the wave packet's envelope and frequency-carrier velocities in a medium.

Keywords: filamentation, light bullets, anomalous group velocity dispersion, supercontinuum

PACS numbers: 42.65.–k, 42.65.Jx, 42.65.Ky, 42.65.Re, 52.38.Hb

Bibliography — 31 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **189** (3) 299–305 (2019)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.06.038419>

Эксперименты выполнены на уникальной научной установке "Многоцелевой фемтосекундный лазерно-диагностический спектрометрический комплекс" Института спектроскопии РАН. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 18-12-00422).

Список литературы

1. Silberberg Y *Opt. Lett.* **22** 1282 (1990)
2. Ахманов С А, Сухоруков А П, Хохлов Р В *УФН* **93** 19 (1967); Akhmanov S A, Sukhorukov A P, Khokhlov R V *Sov. Phys. Usp.* **10** 609 (1968)
3. Kartashov Y V, Malomed B A, Torner L *Rev. Mod. Phys.* **83** 247 (2011)
4. Чекалин С В, Кандидов В П *УФН* **183** 133 (2013); Chekalin S V, Kandidov V P *Phys. Usp.* **56** 123 (2013)
5. Smetanina E O, Dormidonov A E, Kandidov V P *Laser Phys.* **22** 1189 (2012)
6. Kuznetsov E A, Dias F *Phys. Rep.* **507** 43 (2011)
7. Alisauskas S et al., in *CLEO 2013, QELS-Fundamental Science, 9 June–14 June 2013, San Jose, CA, USA* (OSA Technical Digest) (Washington, DC: Optical Society of America, 2013) QW1E.6, https://doi.org/10.1364/CLEO_QELS.2013.QW1E.6
8. Smetanina E O et al. *Laser Phys. Lett.* **10** 105401 (2013)
9. Сметанина Е О и др. *Квантовая электроника* **42** 913 (2012); Smetanina E O et al. *Quantum Electron.* **42** 913 (2012)
10. Bergé L, Skupin S *Phys. Rev. E* **71** 0165601(R) (2005)
11. Durand M et al. *Phys. Rev. Lett.* **110** 115003 (2013)
12. Majus D et al. *Phys. Rev. Lett.* **112** 193901 (2014)
13. Gražulevičiūtė I et al. *J. Opt.* **18** 025502 (2016)
14. Brée C et al. *Phys. Rev. Lett.* **118** 163901 (2017)
15. Чекалин С В и др. *Квантовая электроника* **43** 326 (2013); Chekalin S V et al. *Quantum Electron.* **43** 326 (2013)
16. Roger T et al. *Phys. Rev. A* **90** 033816 (2014)
17. Чекалин С В и др. *Квантовая электроника* **45** 401 (2015); Chekalin S V et al. *Quantum Electron.* **45** 401 (2015)
18. Chekalin S V et al. *J. Phys. B* **48** 094008 (2015)
19. Potenza M A C et al. *Opt. Commun.* **229** 381 (2004)
20. Saliminia A, Chin S L, Vallée R *Opt. Express* **13** 5731 (2005)
21. Smetanina E O et al. *Opt. Lett.* **38** 16 (2013)
22. Мартынович Е Ф и др. *Квантовая электроника* **43** 463 (2013); Martynovich E F et al. *Quantum Electron.* **43** 463 (2013)
23. Кузнецов А В и др. *Квантовая электроника* **46** 379 (2016); Kuznetsov A V et al. *Quantum Electron.* **46** 379 (2016)
24. Chekalin S V et al. *Laser Phys. Lett.* **13** 065401 (2016)
25. Xu L et al. *Opt. Lett.* **21** 2008 (1996)
26. Чекалин С В и др. *Квантовая электроника* **48** 372 (2018); Chekalin S V et al. *Quantum Electron.* **48** 372 (2018)
27. Kolesik M, Moloney J V *Phys. Rev. E* **70** 036604 (2004)
28. Fedorov V Yu et al. *Phys. Rev. Lett.* **117** 043902 (2016)
29. Panagiotopoulos P et al. *Nature Photon.* **9** 543 (2015)
30. Кандидов В П, Компанец В О, Чекалин С В *Письма в ЖЭТФ* **108** 307 (2018); Kandidov V P, Kompanets V O, Chekalin S V *JETP Lett.* **108** 287 (2018)
31. Дормидонов А Е и др. *Письма в ЖЭТФ* **104** 173 (2016); Dormidonov A E et al *JETP Lett.* **104** 175 (2016)

Received 15 August 2018

Physics – Uspekhi **62** (3) (2019)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.06.038419>