Письма в ЖЭТФ, том 113, вып. 11, с. 723 – 726

Экспериментальное исследование самокомпрессии волнового пакета при полном внутреннем отражении в прозрачном диэлектрике

С. В. Чекалин[1], *В. О. Компанец*

Институт спектроскопии РАН, 108840 Троицк, Москва, Россия

Поступила в редакцию 21 апреля 2021 г.
После переработки 22 апреля 2021 г.
Принята к публикации 22 апреля 2021 г.

Впервые экспериментально исследовано формирование и самовосстановление одноцикловой световой пули после полного внутреннего отражения фемтосекундного импульса в прозрачном диэлектрике в области аномальной дисперсии групповой скорости.

DOI: 10.31857/S123456782111001X

1. Введение. Локализация светового поля при филаментации мощного фемтосекундного лазерного излучения в прозрачных диэлектриках вызывает сильный рост нелинейно-оптического взаимодействия светового поля со средой [1–3], приводя к изменениям пространственно-временных и спектральных параметров распространяющихся импульсов. Наиболее существенным это оказывается при филаментации в условиях аномальной дисперсии групповой скорости (АДГС), когда формируются световые пули (СП) – экстремально сжатые волновые пакеты с высокой локализацией светового поля не только в пространстве, но и во времени [1, 4]. Наибольший интерес в исследованиях СП связан с динамикой их формирования и распада, а также с их робастностью при распространении в различных условиях. В ряде работ продемонстрировано, что СП являются исключительно робастными образованиями, параметры которых определяются только нелинейными и дисперсионными свойствами среды [4–6]. Полная пространственно-временная реконструкция волнового пакета длительностью около одного оптического периода (одноцикловой СП) в нелинейной диспергирующей среде после свободной дифракции в воздушном промежутке величиной до 1 мм зарегистрирована в недавних работах [7, 8]. При этом наблюдался рост дистанции реконструкции как с увеличением зазора, так и с увеличением длины пробега СП до зазора.

В настоящей работе впервые экспериментально исследованы особенности формирования СП и ее восстановления после полного внутреннего отражения (ПВО). Основная проблема при ПВО связана с возникновением на отражающей поверхности эванесцентной волны, через которую проходит вся отражаемая энергия [9]. С существованием этой волны связан сдвиг отраженного пучка по отношению к предсказываемой геометрической оптикой траектории распространения – так называемый сдвиг Гуса–Хенхен [10]. При прохождении этого сдвига световая волна становится непоперечной, вектор Умова–Пойнтинга ведет себя довольно сложным образом [9, 11], а интенсивность растет за счет интерференции падающей и отраженной волн. Трудность экспериментального исследования этого явления состоит, во-первых, в том, что величина сдвига порядка длины волны излучения, а, во-вторых, в практической невозможности поместить туда любое регистрирующее устройство, не нарушив полностью исходную картину явления. В ряде теоретических работ [12, 13] предсказывались серьезные искажения пространственной и временной структуры пространственно-ограниченного импульсного (в том числе фемтосекундного) излучения после ПВО. Поэтому оставался открытым вопрос как о возможности формирования, так и реконструкции СП после прохождения этого сдвига фемтосекундным импульсом. В нашей недавней работе [14] регистрация СП после ПВО позволила измерить продольный сдвиг Гуса–Хенхен при изменении угла падения вблизи критического угла ПВО. В описываемых ниже экспериментах детально изучено формирование и реконструкция СП в этих условиях.

2. Эксперимент. Исследование проводилось методом лазерной колорации (подробно описан в [15]), позволяющем получить информацию после воздействия единичного лазерного импульса, избегая тем самым неизбежных ошибок эксперимента из-за раз-

[1]e-mail: schekalin@yandex.ru

броса параметров импульсов от выстрела к выстрелу. Объектом исследования в этом методе является люминесценция структуры из долгоживущих центров окраски (ЦО) в LiF, созданная в филаменте при многофотонном воздействии фемтосекундного лазерного импульса и отражающая распределение светового поля в волновом пакете. Люминесценция этих ЦО в LiF столь интенсивна, что состоящие из них долгоживущие микроструктуры, созданные при филаментации всего одного лазерного импульса, могут быть легко зарегистрированы и исследованы при последующей подсветке в полосе их поглощения слабым излучением уже намного позже записи этих структур.

Схема эксперимента полностью аналогична описанной в [14]. В качестве образца использовалась призма ПВО из фторида лития размером 30×30 мм, внутрь которой с помощью серебряного зеркала с фокусом 200 мм фокусировался 130 фс лазерный импульс мощностью $\sim 1.5\, P_{\rm cr}$ ($P_{\rm cr}$ – критическая мощность самофокусировки) на длине волны 3200 нм, принадлежащей спектральному диапазону, наиболее благоприятному для формирования одноцикловых СП [4]. В эксперименте использовался импульс с поляризацией в плоскости падения (ТМ), который направлялся на входную грань призмы под таким углом, чтобы угол падения на отражающую грань составлял 49 градусов, что немного превышает критический угол ПВО. При этом, как показано в [14] при тех же условиях, сдвиг Гуса–Хенхен был максимальным (около 6 мкм). В экспериментах проведено сравнение микроструктуры треков ЦО, сформированных при филаментации одиночного лазерного импульса на разных расстояниях от отражающей грани призмы: задолго до ПВО, намного после ПВО и в процессе ПВО в непосредственной близости от отражающей грани (рис. 1a–e).

Для этого призма передвигалась вдоль ребра ее входной грани (левого на схемах в рис. 1), что приводило к соответствующему перемещению точки старта филамента в исследуемую область без изменения длины самофокусировки.

3. Экспериментальные результаты.

3.1. Филамент сформирован задолго до области, где происходит ПВО (рис. 1a). Структура трека люминесцирующих ЦО типична для образованной одноцикловой СП. Наблюдаемые периодические изменения интенсивности сигнала люминесценции микроструктур из ЦО, наведенных за счет многофотонных процессов, демонстрируют изменения концентрации ЦО, возникающие при регулярном изменении амплитуды светового поля СП на длине ее пробега вследствие различия между групповой скоростью огибающей СП и фазовой скоростью световой волны. Это является результатом компрессии ИК-импульса в пулю длительностью, близкой к периоду оптических колебаний [4, 16], т.е. свидетельствует о формировании одноцикловой СП. Характерный быстрый рост огибающей сигнала люминесценции в начале пробега СП связан с ростом интенсивности ее светового поля вследствие продолжающейся временной и пространственной компрессии пули. Последующий медленный спад связан с преобразованием энергии пули на пути ее пробега в излучение суперконтинуума во всей его спектральной полосе, что является основным каналом диссипации СП [6].

3.2. Филамент сформирован намного после области, где происходит ПВО (рис. 1b). Расстояние до старта филамента с точностью до ошибок измерения не изменилось и осталось равным 10 мм. Структура трека люминесцирующих ЦО тоже осталась неизменной. Из этого эксперимента следует, что предсказываемые искажения пространственной и временной структуры импульса при ПВО не препятствуют образованию одноцикловой СП.

3.3. Филамент формируется в непосредственной близости от отражающей грани:

3.3.1. После области, где происходит ПВО (рис. 1c). При приближении старта филамента (т.е. положения, при котором должна возникнуть СП) к отражающей грани растет интенсивность импульса вследствие его пространственной и временной компрессии. Усиление поля при ПВО из-за конструктивной интерференции разных частей волнового пакета еще не сформировавшейся, но уже достаточно интенсивной СП приводит к образованию тонкого слоя плазмы вблизи отражающей поверхности (или прямо на ней). В результате в этой области возникают ЦО, люминесцирующее пятно которых наблюдается в эксперименте при отсутствии трека от СП. Связанные с генерацией плазмы нелинейные потери в формирующейся пуле задерживают ее образование, поэтому трек СП никогда не наблюдается сразу после области, где происходит ПВО вплотную к отражающей грани. Минимальное расстояние формирования (хотя этот процесс можно уже называть реконструкцией) СП в этом случае составляло ~ 170 мкм. В структуре трека люминесцирующих ЦО в этом режиме также не наблюдалось существенных изменений, что свидетельствует о малости потерь, связанных с образованием плазмы в этом режиме.

3.3.2. До области, где происходит ПВО (рис. 1d, e). В этом случае наблюдается темный "провал" в треке люминесценции сразу после отра-

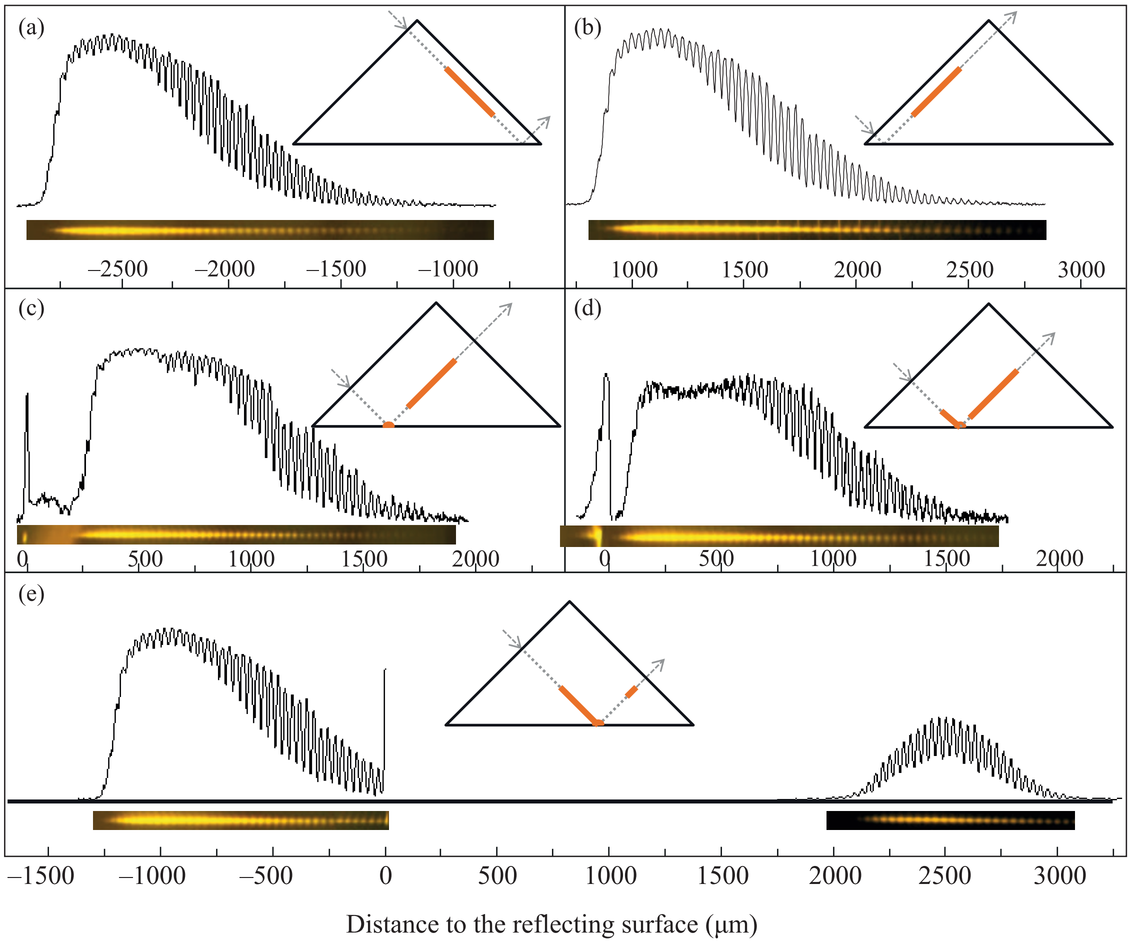

Рис. 1. (Цветной онлайн) Вид треков и профили интенсивности люминесценции ЦО, наблюдаемых при формировании филаментов в разных частях призмы (a)–(e). Положения треков ЦО, наведенных при филаментации в призме, схематически изображены на вставках красными линиями для каждого случая. Для изменения точки старта филамента призма передвигалась вдоль ребра левой грани. Для простоты сдвиг Гуса–Хенхен на схемах не показан. Лазерное излучение распространяется слева направо. По горизонтальной шкале отложено расстояние до отражающей грани призмы ПВО. Период модуляции интенсивности люминесценции ЦО вдоль трека – 30 мкм. При минимальной длине реконструкции (положение d) пятно ЦО, образованное вблизи отражающей поверхности при конструктивной интерференции прямого и отраженного пучков, настолько яркое, что "паразитная" засветка трека не дает возможности должным образом прописать его профиль ("зашкал" интенсивности люминесценции)

жающей грани, связанный с потерями при ПВО, в результате которых самовосстановление СП происходит после прохождения ей некоторого расстояния, необходимого для перекачки энергии из периферии импульса в центральную область. Интенсивность люминесценции ЦО вдоль трека восстановленной СП промодулирована таким же образом, как и до области, где происходит ПВО. Это означает, что одноцикловая СП, испытавшая потери при ПВО, осталась одноцикловой после восстановления. В результате измерений установлено, что длина реконструкции (расстояние от отражающей грани до начала трека восстановленной СП по уровню e^{-2} от максимальной интенсивности люминесценции в треке) возрастает от ~ 60 мкм до нескольких мм при увеличении расстояния, пройденного СП до ПВО. Наблюдалась трансформация формы огибающей трека ЦО в более симметричную, а также уменьшение длины пробега восстановленных СП при увеличении расстояния, пройденного пулей до ПВО (рис. 1e). Это может быть связано с потерей энергии СП на ее пути до области, где происходит ПВО.

Люминесцирующие пятна в местах пересечения лазерного пучка с отражающей поверхностью, связанные с возникновением здесь тонкого плазменного слоя и центров окраски за счет возрастания интенсивности при конструктивной интерференции падающего и отраженного пучков, в этом режиме намного ярче, чем в случае 3.3.1 (ср. рис. 1c и d), что связано с существенным ростом интенсивности в сформировавшейся СП по сравнению со случаем 3.3.1. Яркость этих пятен максимальна при минимальных значениях длины пробега СП до области, где происходит ПВО (рис. 1d), и заметно уменьшается одновременно с ее увеличением (рис. 1e). Как уже упомянуто выше, это связано с потерями энергии пули на пути ее пробега на излучение суперконтинуума.

4. Заключение. Проведенные эксперименты еще раз подтвердили, что световые пули являются исключительно устойчивыми образованиями, обнаружив их способность к полной пространственно-временной реконструкции в нелинейной диспергирующей среде после полного внутреннего отражения.

В настоящее время готовятся к публикации теоретические оценки и численный счет, проведенные по результатам эксперимента. Они включают оценки потерь СП на излучение широкополосного суперконтинуума, а также потерь в плазме, образующейся вблизи отражающей поверхности при конструктивной интерференции прямого и отраженного пучков.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда #18-12-00422, https://rscf.ru/project/18-12-00422.

1. A. Couairon and A. Mysyrowicz, Phys. Rep. **441**, 47 (2007).
2. S. L. Chin, *Femtosecond Laser Filamentation. Springer Series on Atomic, Optical and Plasma Physics*, Springer, N.Y., Dordrecht, Heidelberg London (2010), v. 55; DOI 10.1007/978-1-4419-0688-5.
3. С. В. Чекалин, В. П. Кандидов, УФН **183**, 133 (2013).
4. С. В. Чекалин, В. О. Компанец, А. Е. Дормидонов, В. П. Кандидов, УФН **189**, 299 (2019).
5. S. V. Chekalin, A. E. Dokukina, A. E. Dormidonov, V. O. Kompanets, E. O. Smetanina, and V. P. Kandidov, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **48**, 094008 (2015).
6. С. В. Чекалин, А. Е. Докукина, А. Е. Дормидонов, О. Е. Сметанина, В. П. Кандидов, Квантовая электроника **45**, 401 (2015).
7. S. V. Chekalin, A. E. Dormidonov, V. P. Kandidov, and V. Kompanets, Opt. Lett. **45**, 1511 (2020).
8. S. V. Chekalin, V. Kompanets, A. Dormidonov, and V. Kandidov, Laser Phys. Lett. **17**, 085401 (2020).
9. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK (1999).
10. F. Goos and H. Hanchen, Ann. Phys. **436**, 333 (1947).
11. Г. С. Ландсберг, *Оптика*, ФИЗМАТЛИТ, М. (2003).
12. K. P. Cheung and D. H. Auston, Opt. Lett. **10**, 218 (1985).
13. X. Liu and Q. Yang, J. Opt. Soc. Am. B **27**, 2190 (2010).
14. V. Kompanets, A. Melnikov, and S. Chekalin, Laser Phys. Lett. **18**, 015302 (2021).
15. S. V. Chekalin and V. O. Kompanets, Optics and Spectroscopy **127**, 88 (2019).
16. S. V. Chekalin, V. O. Kompanets, A. V. Kuznetsov, A. E. Dormidonov, and V. P. Kandidov, Laser Phys. Lett. **13**, 065401 (2016).