

PACS numbers: 42.25.-p, 42.62.-b, 42.65.Re
DOI: 10.3367/UFNr.0185.201501h.0097

Субтеравадные фемтосекундные импульсы среднего инфракрасного диапазона: новые эффекты пространственно-временной динамики мощных электромагнитных полей

А.В. Митрофанов, Д.А. Сидоров-Бирюков,
А.А. Воронин, А. Пугжлис, Г. Андриякайтис,
Е.А. Степанов, С. Алишаускас, Т. Флёрри,
А.Б. Федотов, В.Я. Панченко,
А. Балтушка, А.М. Жёлтиков

Исследованы явления филаментации и генерации оптических гармоник в поле субтеравадных сверхкоротких импульсов среднего инфракрасного (ИК) диапазона, формируемых с помощью многоступенчатого оптического параметрического усиления чирпированных импульсов. Выявлены условия филаментационной компрессии субтеравадных импульсов среднего ИК-диапазона до длительностей, соответствующих нескольким периодам светового поля.

Ключевые слова: сверхкороткие лазерные импульсы, самофокусировка, лазерная филаментация, средний инфракрасный диапазон

1. Введение

Изучение новых физических явлений, возникающих при воздействии на вещество интенсивных сверхкоротких электромагнитных импульсов среднего инфракрасного (ИК) диапазона, является одной из наиболее интересных, актуальных и сложных задач современной оптической физики. В последние годы достигнут значительный прогресс в понимании фундаментальных закономерностей взаимодействия интенсивных сверхкоротких электромагнитных импульсов с веществом, благодаря чему выявлены важные особенности оптического отклика вещества на мощные сверхкороткие импульсы среднего

ИК-диапазона [1–3], предсказаны новые физические явления и необычные режимы быстропротекающих оптических процессов [2–5], проявления которых следует ожидать в присутствии мощных низкочастотных электромагнитных полей.

Сложность продвижения лазерных технологий в средний ИК-диапазон в значительной мере обусловлена тем, что в среднем ИК-диапазоне отсутствуют эффективные лазерные материалы с шириной полосы усиления, достаточной для генерации фемтосекундных импульсов, тогда как в ближнем ИК-диапазоне созданы и успешно используются в экспериментальных исследованиях лазерные источники мощных сверхкоротких импульсов. Выполненные в последние два-три года исследования, однако, показывают, что проблема создания источников сверхкоротких импульсов в среднем ИК-диапазоне может быть успешно решена на основе нелинейно-оптического параметрического преобразования частоты сверхкоротких импульсов. В частности, на основе технологии оптического параметрического усиления чирпированных импульсов в последние годы удалось осуществить генерацию сверхкоротких лазерных импульсов с длиной волны около 4 мкм [6] и энергией до 10 мДж. С использованием лазерных источников этого класса проведены первые эксперименты по исследованию оптических нелинейностей высокого порядка в атмосфере и инертных газах [7, 8], а также показана возможность генерации гармоник высокого порядка, позволяющей получать когерентное рентгеновское излучение с энергией фотонов вплоть до 1,3 кэВ [9]. Пиковая мощность сверхкоротких импульсов среднего ИК-диапазона, обеспечиваемая источниками этого класса, позволяет реализовать филаментацию пучка электромагнитного излучения в газах высокого давления [8, 10] и наблюдать в этих условиях возникновение лазерной генерации на молекулах азота [11]. Полученные в результате этих экспериментов данные, подкреплённые теоретическими работами [4, 12], указывают на существование новых режимов взаимодействия излучения с веществом, реализующихся в среднем ИК-диапазоне. Для наблюдения этих явлений, однако, требуются источники сверхкоротких импульсов среднего ИК-диапазона с субтеравадным уровнем пиковой мощности.

В настоящей работе на основе технологии оптического параметрического усиления чирпированных импульсов в поле пикосекундных импульсов лазерной накачки с энергией на уровне 1 Дж реализована генерация импульсов среднего ИК-диапазона с длительностью импульса менее 100 фс и пиковой мощностью свыше 0,3 ТВт. Экспериментальные исследования, выполненные с помощью фемтосекундных импульсов этого класса, демонстрируют возможность передачи через атмосферу импульсов электромагнитного излучения с энергией свыше 20 мДж в режиме одиночного лазерного филамента. В представленных экспериментах реализованы новые режимы генерации оптических гармоник, а также выяснены условия и предложены методы филаментационной компрессии субтеравадных импульсов среднего ИК-диапазона до длительностей, соответствующих нескольким периодам светового поля.

2. Субтеравадный источник фемтосекундных импульсов среднего инфракрасного диапазона

Для формирования мощных сверхкоротких электромагнитных импульсов среднего ИК-диапазона в настоящей работе используется лазерная система (рис. 1, 2), состоящая из твердотельного иттербиевого задающего лазера с

А.В. Митрофанов. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, РФ;
Российский квантовый центр, Сколково, Московская обл., РФ;
Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура, Московская обл., РФ;
Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, РФ
Д.А. Сидоров-Бирюков, А.А. Воронин, Е.А. Степанов, А.Б. Федотов. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, РФ;
Российский квантовый центр, Сколково, Московская обл., РФ
А. Пугжлис, Г. Андриякайтис, С. Алишаускас, Т. Флёрри, А. Балтушка. Vienna University of Technology, Vienna, Austria
В.Я. Панченко. Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура, Московская обл., РФ;
Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, РФ
А.М. Жёлтиков. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, РФ;
Российский квантовый центр, Сколково, Московская обл., РФ;
Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, РФ
Texas A&M University, College Station, USA
E-mail: zheltikov@physics.msu.ru

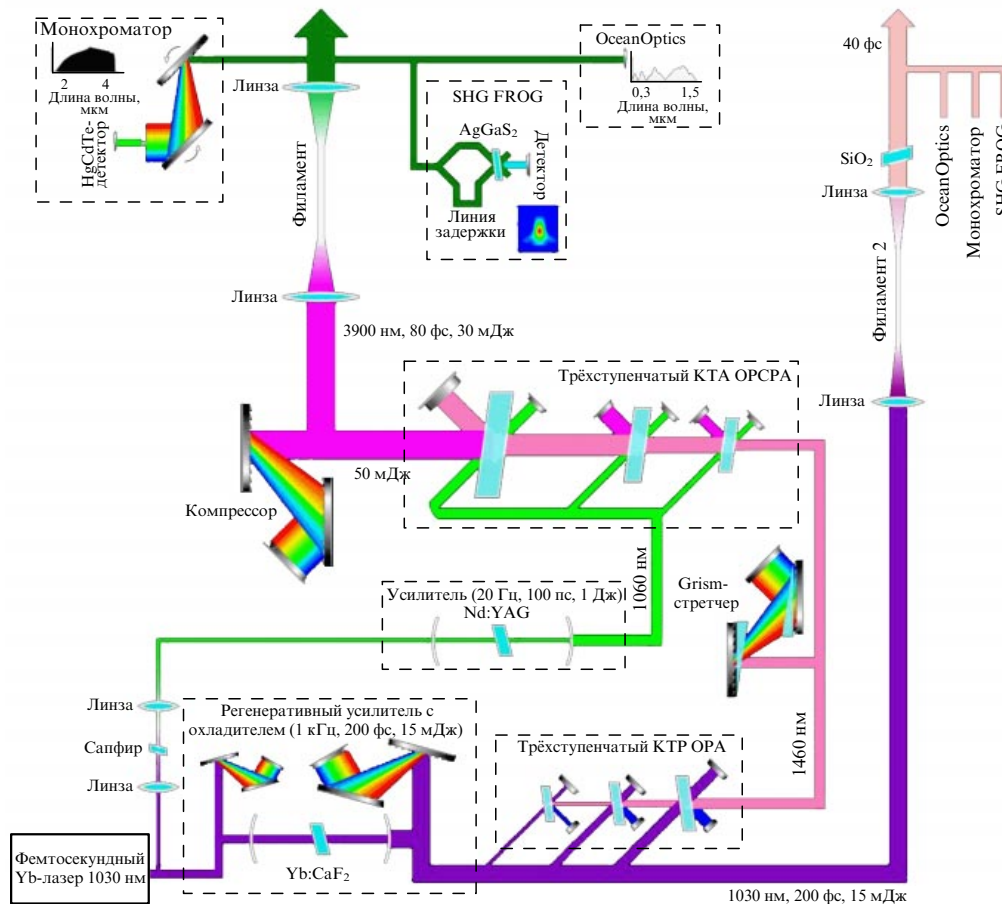


Рис. 1. Схема источника мощных сверхкоротких электромагнитных импульсов среднего ИК-диапазона на основе твердотельного иттербиевого задающего лазера, промежуточного трёхступенчатого оптического параметрического усилителя и трёхступенчатого оптического параметрического усилителя chirпированных импульсов (Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification, OPCPA). (SHG — Second-Harmonic Generation — генерация вторых гармоник.)

регенеративным усилителем, промежуточного трёхступенчатого оптического параметрического усилителя и трёхступенчатого оптического параметрического усилителя chirпированных импульсов. В качестве задающего источника используется твердотельный Yb:CaF₂-лазер [6], формирующий сверхкороткие импульсы с центральной длиной волны около 1030 нм. Методом регенеративного усиления [13] энергия этих импульсов в нашей системе может быть увеличена до 15 мДж при длительности импульсов менее 200 фс и частоте повторения 1 кГц [14]. Импульсы излучения с центральной длиной волны 1030 нм, длительностью менее 200 фс и энергией, варьируемой в диапазоне 3–12 мДж, использовались в представленных ниже экспериментах по исследованию филаментов в ближнем ИК-диапазоне.

Для целей генерации сверхкоротких импульсов в среднем ИК-диапазоне используются регенеративно усиленные импульсы с центральной длиной волны 1030 нм, энергией около 1 мДж и длительностью около 190 фс, служащие излучением накачки в схеме трёхступенчатого оптического параметрического усиления. На выходе оптического параметрического усилителя формируются импульсы с центральной длиной волны 1460 нм и длительностью около 200 фс. После увеличения их длительности с помощью гризменного стретчера (grism stretcher) эти импульсы используются в качестве сигнальной волны в схеме трёхступенчатого оптического параметрического усиления chirпированных импульсов, реализуе-

мого в трёх установленных последовательно кристаллах КТА (KTiOAsO₄). Поле накачки для этого процесса служат импульсы излучения Nd:YAG-лазера длительностью 100 пс, формируемые в трёх пучках с энергиями 50, 250 и 700 мДж, обеспечивающих оптическую накачку трёх кристаллов КТА. Энергия излучения холостой волны на выходе оконечного каскада оптического параметрического усилителя chirпированных импульсов превышает 50 мДж. Посредством сжатия с помощью решётчатого компрессора формируются импульсы с центральной длиной волны 3,9 мкм, энергией до 30 мДж и длительностью от 80 до 200 фс.

Спектральные измерения в среднем ИК-диапазоне выполнялись с помощью сканирующего монохроматора, специально сконструированного для этой цели в нашей лаборатории, и ИК-детектора на основе HgCdTe с термоэлектрическим охлаждением. Для спектральных измерений в видимой области и ближнем ИК-диапазоне использовались стандартные спектрометры OceanOptics. Временная характеристика импульса с восстановлением фазы поля производилась методом оптического стробирования с разрешением по частоте (Frequency-Resolved Optical Gating, FROG) на основе генерации второй гармоники в кристалле AgGaS₂ толщиной 0,5 мм.

Характерный спектр мощного сверхкороткого импульса холостой волны, формируемой на выходе оптического параметрического усилителя chirпированных импульсов, показан штриховой линией с заливкой на

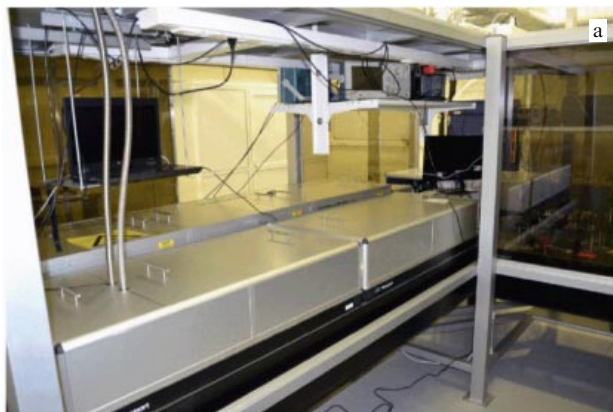


Рис. 2. Лазерный источник субтераваттных сверхкоротких импульсов среднего ИК-диапазона. Фотографии сделаны в лаборатории фотоники Российского квантового центра.

рис. 3. Характерная FROG-спектрограмма этого импульса представлена на рис. 4а. Временная огибающая и фаза импульса, извлечённые из этой FROG-спектрограммы, приведены на рис. 4б.

3. Лазерная филаментация в среднем инфракрасном диапазоне

Реализованная технология оптического параметрического усиления позволяет достичь качественно нового уровня пиковой мощности фемтосекундных импульсов в среднем ИК-диапазоне. В представленных эксперимен-

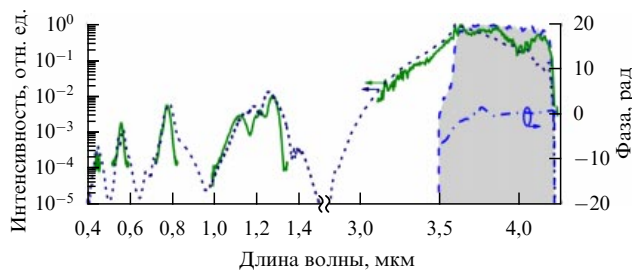


Рис. 3. Спектр (штриховая линия с заливкой) и спектральная фаза (штрихпунктирная линия) холостой волны, формируемой на выходе оптического параметрического усилителя chirпированных импульсов, а также экспериментальный (сплошная линия) и рассчитанный с помощью численного моделирования (пунктирная кривая) спектр излучения на выходе филамента, сформированного в атмосфере импульсами излучения с центральной длиной волны 3,9 мкм, длительностью 90 фс и энергией 22 мДж при фокусировке линзой с фокусным расстоянием 75 см.

тах впервые достигнуты пиковые мощности фемтосекундных импульсов среднего ИК-диапазона, достаточные для формирования лазерных филаментов при нормальных атмосферных условиях. Для возникновения лазерного филамента в среде с коэффициентом оптической нелинейности n_2 и показателем преломления n_0 пиковая мощность сверхкороткого лазерного импульса должна быть заметно выше критической мощности самофокусировки для данной среды, $P_{cr} = C(8\pi n_0 n_2)^{-1} \lambda^2$, где λ — длина волны, C — численный множитель ($3,72 < C < 6,4$), определяемый поперечным профилем интенсивности в лазерном пучке. В выполненных ранее экспериментах удавалось реализовать филаментацию сверхкоротких лазерных импульсов среднего ИК-диапазона в газах с высоким (на уровне нескольких атмосфер) давлением. Для формирования лазерных филаментов среднего ИК-излучения в атмосферных условиях пиковая мощность имевшихся ранее лазерных систем была недостаточна.

В настоящей работе впервые реализован режим филаментации импульсов среднего ИК-диапазона в атмосферных условиях. Выполненные эксперименты показывают возможность формирования лазерных филаментов в атмосфере при использовании сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения с центральной длиной волны 3,9 мкм, длительностью 80–130 фс и пиковой мощностью 0,2–0,3 ТВт. При мягкой фокусировке импульсного излучения среднего ИК-диапазона с такими

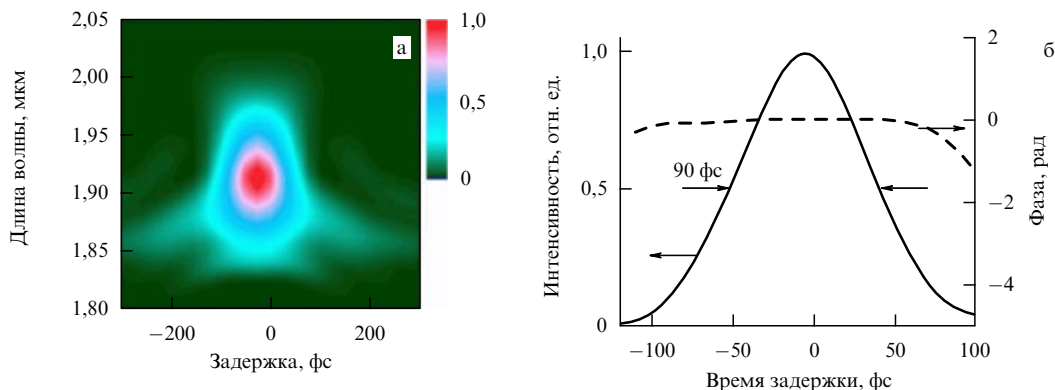


Рис. 4. (а) FROG-спектрограмма и (б) извлечённые из FROG-спектрограммы временная огибающая и фаза холостой волны, формируемой на выходе оптического параметрического усилителя chirпированных импульсов.

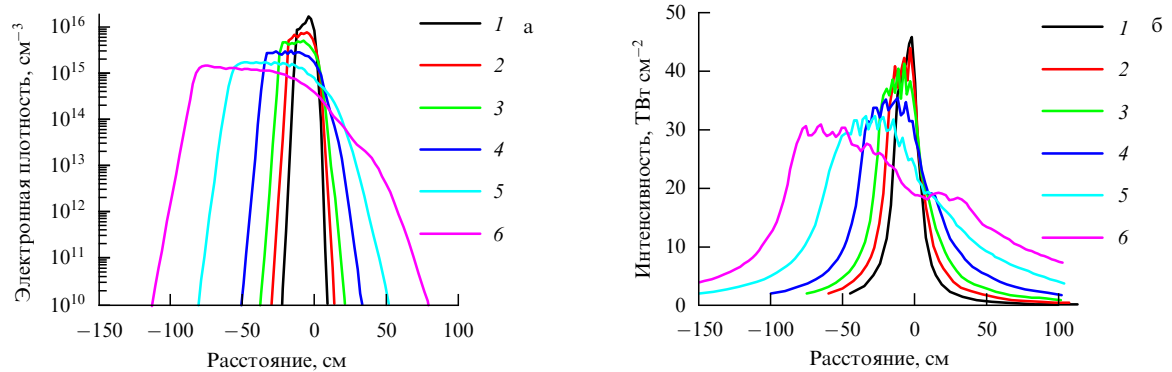


Рис. 5. (В цвете онлайн.) Динамика (а) электронной плотности на заднем фронте импульса и (б) максимальной интенсивности на оси пучка в филаменте, формируемом импульсом излучения с центральной длиной волны 3,9 мкм, длительностью 100 фс и энергией 20 мДж при фокусировке пучка линзой с фокусным расстоянием 45 см (1), 60 см (2), 75 см (3), 100 см (4), 150 см (5), 200 см (6).

параметрами в атмосфере с помощью набора линз, изготовленных для целей наших экспериментов из фторида кальция, наблюдались яркая протяжённая искра, свидетельствующая об эффективной ионизации атмосферного воздуха, и значительное уширение спектра ИК-импульса (см. рис. 3).

Явление филаментации в атмосфере наблюдается в наших экспериментах в широком диапазоне фокусных расстояний линзы, фокусирующей излучение среднего ИК-диапазона. При заданных пиковой мощности и длительности импульса длина филамента, максимальная интенсивность электромагнитного поля в филаменте, а также плотность электронов в филаменте определяются жёсткостью фокусировки (рис. 5). Как показывают численные расчёты, выполненные на основе модели филаментации сверхкоротких импульсов среднего ИК-диапазона [7, 8, 10], при увеличении фокусного расстояния линзы, фокусирующей ИК-излучение, от 45 до 200 см максимальная плотность электронов уменьшается более чем на порядок (рис. 5а). При этом протяжённость ионизированной области увеличивается от нескольких сантиметров до 1,5 м.

Аналогичные изменения наблюдаются в продольном профиле интенсивности электромагнитного поля (рис. 5б). При увеличении фокусного расстояния фокусирующей ИК-излучения линзы от 45 до 200 см максимальная интенсивность поля в филаменте уменьшается от 46 до 30 ТВт см^{-2} . При этом протяжённость области, в которой фиксируется высокая интенсивность поля, соответствующая сформированному филаменту, возрастает, достигая 1,5 м при фокусном расстоянии $f = 200$ см.

4. Спектральная эволюция субваттватных импульсов среднего инфракрасного диапазона: мощное излучение суперконтинуума в среднем инфракрасном диапазоне и оптические гармоники

Ввиду того что филаментация сверхкоротких импульсов среднего ИК-диапазона сопровождается многими новыми эффектами, не наблюдающимися в случае лазерных филаментов в ближнем ИК-диапазоне, представляется полезным сравнить физическую картину филаментации в среднем ИК-диапазоне с хорошо изученным сценарием лазерной филаментации в ближнем ИК-диапазоне [15–17]. С этой целью на рис. 6, 7 представлены результаты экспериментального исследования лазерных филаментов, формируемых импульсами излучения ближнего ИК-диапазона с центральной длиной волны 1030 нм, длительностью около 200 фс и энергией

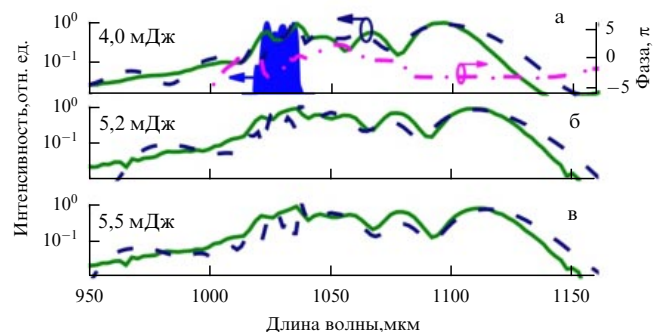


Рис. 6. Спектры излучения суперконтинуума, генерируемого в филаменте, формируемом в атмосфере импульсами, снимаемыми с регенеративного усилителя иттербиевого лазера. Длина волны 1030 нм, длительность импульса 200 фс, энергия импульса 4,0 мДж (а), 5,2 мДж (б), 5,5 мДж (в). Спектр лазерных импульсов показан заливкой. Сплошной кривой показаны результаты измерений, штриховой кривой — результаты численного моделирования. Штрихпунктирной кривой показана спектральная фаза, извлечённая из FROG-спектрограмм.

4–10 мДж, генерируемыми на выходе твердотельного иттербиевого регенеративного усилителя (см. рис. 1).

Как и в случае лазерной филаментации в среднем ИК-диапазоне, для филаментов, формируемых сверхкороткими импульсами ближнего ИК-излучения, наблюдается эффективное уширение спектра (см. рис. 6), вызванное нелинейно-оптическими взаимодействиями, существенно усиленными в условиях лазерной филаментации благодаря подавлению на протяжённых участках оптической длины дифракционной расходимости лазерного пучка. Однако спектральное уширение в длинноволновой части спектра для импульсов с центральной длиной волны 3,9 мкм ограничивается молекулярными полосами поглощения атмосферы. В результате этого эффекта ярко выраженное для филаментов в ближнем ИК-диапазоне интенсивное красное крыло, испытывающее усиление при увеличении энергии лазерного импульса (см. рис. 6), оказывается сильно подавленным в случае филаментов среднего ИК-излучения (см. рис. 3).

В высокочастотной части спектра имеет место обратная ситуация. Высокочастотное крыло спектра излучения из лазерных филаментов в среднем ИК-диапазоне оказывается существенно усиленным за счёт процесса генерации оптических гармоник (см. рис. 3). Благоприятные условия для генерации оптических гармоник в поле на-

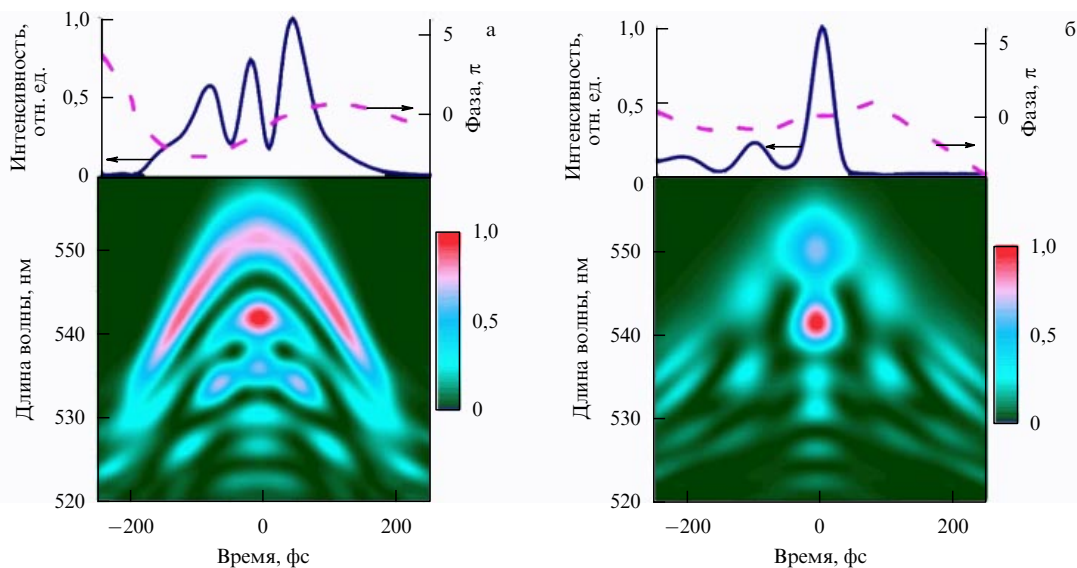


Рис. 7. (В цвете онлайн.) FROG-спектрограммы для (а) импульса за областью филаментации и (б) импульса, сжатого в блоке плавленного кварца толщиной 6 см, для импульса накачки с центральной длиной волны 1030 нм и начальной энергией 4 мДж. Над спектрограммами приведены временная огибающая и фаза импульса, извлечённые из этой спектрограммы.

качки среднего ИК-диапазона возникают вследствие слабости дисперсии атмосферного воздуха в данном диапазоне. Благодаря этому обстоятельству фазовые расстройки для процессов генерации группы оптических гармоник нескольких низких порядков в случае поля накачки среднего ИК-диапазона существенно меньше аналогичных фазовых расстроек для генерации гармоник полем накачки ближнего ИК-диапазона. Важный дополнительный фактор усиления генерации оптических гармоник поля накачки среднего ИК-диапазона связан с тем, что целая группа гармоник (включая третью, пятую, седьмую и девятую гармоники) поля накачки среднего ИК-диапазона попадает в полосу прозрачности атмосферы.

Явление филаментации, как показывает теоретический анализ, приводит к усилению процесса генерации гармоник излучения среднего ИК-диапазона за счёт подавления дифракционной расходимости пучка накачки, приводящего к увеличению области эффективного нелинейного взаимодействия накачки и оптических гармоник, в пределах которой поддерживается высокая эффективность поля накачки. В спектрах излучения, регистрируемых на выходе филаментов, формируемых мощными сверхкороткими импульсами среднего ИК-диапазона, наблюдаются соответствующие гармоникам поля накачки интенсивные пики (см. рис. 3), уширенные за счёт процесса фазовой кросс-модуляции и сдвинутые в результате прохождения через быстро ионизируемый газ [15, 18].

5. Пространственно-временная динамика субтераваттных сверхкоротких импульсов среднего инфракрасного диапазона в атмосфере

Для более ясного понимания картины филаментации сверхкоротких импульсов среднего ИК-диапазона на рис. 8 построены распределения интенсивности поля в филаменте на фронте (рис. 8а, б), в центральной части (рис. 8в, г) и на спаде (рис. 8д, е) фронта импульса. Как видно из представленных результатов, динамика пучка различна для разных частей импульса. Это различие связано с динамикой электронной плотности, возрастающей от фронта импульса к его спаду. Передний фронт

импульса вызывает ионизацию воздуха, формируя поперечный профиль электронной плотности, спадающий от центра пучка к его периферии. Такой профиль электронной плотности приводит к дефокусировке центральной части пучка и особенно его спада. Эти явления хорошо видны на картах интенсивности поля, представленных на рис. 8. Рассеяние ИК-излучения на формируемой полем плазме, которое становится особенно сильным на спаде импульса, приводит в случае достаточно протяжённых филаментов (кривая б на рис. 5б) к заметному истощению поля накачки вдоль филамента.

Белой сплошной линией на рис. 8 отмечен диаметр пучка d , определённый по половине максимума интенсивности поля. Изменение размера пучка d вдоль оптического пути ИК-импульса позволяет определить длину образующегося в эксперименте филамента как расстояние между точками вдоль оптического пути импульса, в которых диаметр пучка оказывается равен удвоенному минимальному диаметру пучка. При излишне жёсткой фокусировке пучка (рис. 8а, в, д) сильное рассеяние центральной части (рис. 8в) и спада (рис. 8д) импульса на профиле электронной плотности, создаваемом передним фронтом импульса, ограничивает протяжённость филамента. При надлежащем выборе условий фокусировки (рис. 8б, г, е) удаётся достичь правильного баланса между самофокусировкой пучка и его дефокусировкой на поперечном профиле электронной плотности. В этом режиме длина филамента, как видно из рис. 8е, может составлять несколько метров, открывая уникальные возможности для дистанционного зондирования атмосферы и передачи мощных лазерных импульсов на большие расстояния.

6. Компрессия мощных сверхкоротких импульсов среднего инфракрасного диапазона

Эффективное спектральное уширение мощных сверхкоротких импульсов, усиленное явлением филаментации, открывает широкие возможности для временного сжатия импульсов и формирования сверхмощных всплесков электромагнитного излучения длительностью несколько периодов светового поля. Основанные на филаментации методы компрессии мощных световых импульсов ближ-

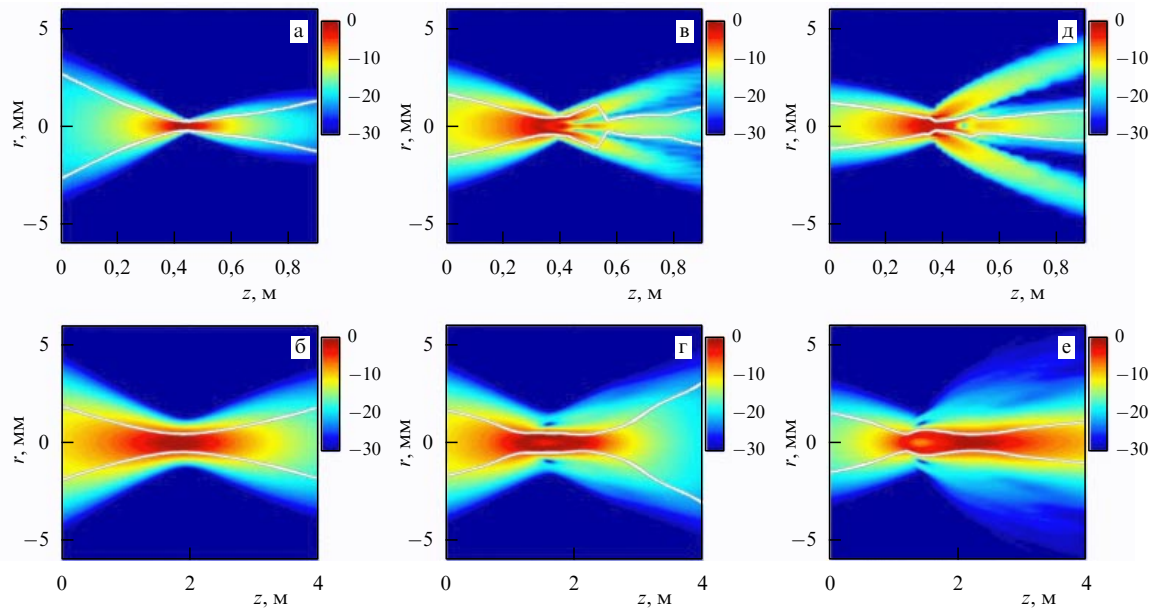


Рис. 8. Пространственно-временная динамика интенсивности субваттватного сверхкороткого импульса среднего ИК-диапазона в атмосфере (а, б) на фронте, (в, г) в центральной части и (д, е) на спаде импульса. Пучок фокусируется линзой с фокусным расстоянием 45 см на рис. а, в, д и 200 см на рис. б, г, е. Начальная энергия импульса 20 мДж, длительность импульса 100 фс. Сплошной линией показан диаметр пучка, определённый по уровню половины максимальной интенсивности в поперечном сечении пучка.

ного ИК-диапазона широко используются в современных оптических технологиях. Методы филаментационной компрессии импульсов среднего ИК-диапазона пока не изучены.

Различия физических механизмов и сценариев спектрального уширения импульсов ближнего и среднего инфракрасных диапазонов в режиме филаментации обуславливают различия в подходах, позволяющих на основе усиленного филаментацией спектрального уширения формировать сверхкороткие импульсы длительностью несколько периодов светового поля. Как показывают эксперименты и теоретический анализ (см. рис. 6, 7), временная компрессия широкополосных полей, генерируемых филаментами в ближнем ИК-диапазоне, может осуществляться с помощью стандартных методов компенсации фазовых сдвигов в пластинах из материала с надлежащим образом подобранной дисперсией. На рисунке 7 представлены результаты экспериментов, демонстрирующие возможность филаментационной компрессии импульсов с начальной длительностью около 200 фс и центральной длиной волны 1030 нм до длительности около 40 фс за счёт спектрального уширения в лазерном филаменте с последующей компенсацией фазы в блоке плавленого кварца толщиной 6 см.

Новые возможности для сжатия широкополосного излучения, получаемого в филаментах, формируемых сверхкороткими импульсами среднего ИК-диапазона, обусловлены интенсивной коротковолновой частью спектра, связанной с процессом усиленной в филаменте генерации оптических гармоник (см. рис. 3). Трудность практической реализации временного сжатия такого широкополосного сигнала связана с необходимостью компенсации фазы в полосе частот, ширина которой соответствует нескольким октавам. Для решения этой задачи потребуется разложение спектра на несколько полос с последующей параллельной компенсацией дисперсии для этих частотных полос и их сложением в схеме синтеза сверхкороткого импульса электромагнитного излучения. Временная огибающая импульса широкопо-

лосного излучения на выходе филамента, создаваемого импульсами с центральной длиной волны 3,9 мкм, длительностью 90 фс и пиковой мощностью около 0,3 ТВт, представлена на рис. 9а. Спектрально ограниченный импульс, соответствующий полному спектру, получаемому в экспериментах с импульсами, обладающими указанными выше параметрами (рис. 9б), имеет длительность по полувысоте, равную 27 фс, и состоит из

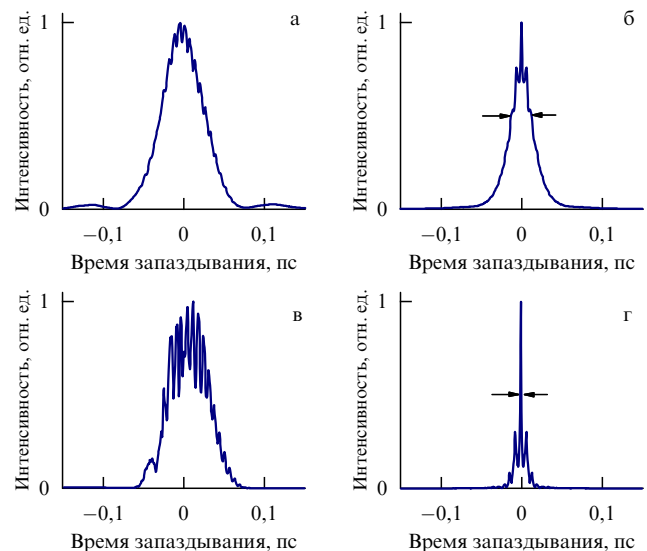


Рис. 9. (а) Временная огибающая импульса широкополосного излучения на выходе филамента, индуцируемого импульсами с центральной длиной волны 3,9 мкм, длительностью 90 фс и пиковой мощностью около 0,3 ТВт. (б) Спектрально ограниченный импульс, соответствующий полному спектру этого широкополосного излучения. (в) Временная огибающая излучения на выходе филамента после фильтра, отрезающего излучение с длинами волн, большими 2 мкм. (г) Спектрально ограниченный импульс, соответствующий широкополосному излучению из филамента после такой фильтрации.

педестала, сформированного длинноволновой частью спектра, и предельно короткого импульса, соответствующего излучению гармоник. Фильтрация, отсекающая длинноволновую часть спектра, позволяет выделить излучение оптических гармоник с огибающей, показанной на рис. 9в. Спектрально ограниченный импульс, получаемый посредством идеальной компенсации фазы для излучения филамента после такой спектральной фильтрации, имеет длительность (рис. 9г) около 2 фс, что соответствует примерно половине периода поля для центральной длины волны электромагнитного излучения (1,1 мкм), образуемого после фильтрации всплеска.

7. Заключение

На основе технологии оптического параметрического усиления chirпированных импульсов в поле пикосекундных импульсов лазерной накачки с энергией на уровне 1 Дж реализована генерация импульсов среднего ИК-диапазона с длительностью менее 100 фс и пиковой мощностью свыше 0,3 ТВт. Экспериментальные исследования, выполненные с помощью фемтосекундных импульсов этого класса, демонстрируют возможность передачи через атмосферу импульсов электромагнитного излучения с энергией свыше 20 мДж в режиме одиночного лазерного филамента. В представленных экспериментах реализованы новые режимы генерации оптических гармоник, а также выяснены условия и предложены методы филаментационной компрессии субтераваттных импульсов среднего ИК-диапазона до длительностей, соответствующих нескольким периодам светового поля.

Работа поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 13-02-01465, 13-02-92115, 14-02-00784, 14-29-07182) и фонда Роберта Уелча (грант А-1801). Исследование свойств быстропротекающих нелинейно-оптических процессов в поле сверхкоротких импульсов среднего ИК-диапазона выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект 14-12-00772). А.А.В. благодарит фонд "Династия" за поддержку.

Список литературы

- Colosimo P et al. *Nature Phys.* **4** 386 (2008)
- Agostini P, DiMauro L F *Contemp. Phys.* **49** 179 (2008)
- Shiner A D et al. *Phys. Rev. Lett.* **103** 073902 (2009)
- Serebryannikov E E, Zheltikov A M *Phys. Rev. Lett.* **113** 043901 (2014)
- Voronin A A, Zheltikov A M *Phys. Rev. A* **90** 043807 (2014)
- Andriukaitis G et al. *Opt. Lett.* **36** 2755 (2011)
- Kartashov D et al. *Opt. Lett.* **37** 2268 (2012)
- Kartashov D et al. *Opt. Lett.* **37** 3456 (2012)
- Popmintchev T et al. *Science* **336** 1287 (2012)
- Kartashov D et al. *Opt. Lett.* **38** 3194 (2013)
- Kartashov D et al. *Phys. Rev. A* **86** 033831 (2012)
- Bergé L *Opt. Express* **16** 21529 (2008)
- Pugžlys A et al. *Opt. Lett.* **34** 2075 (2009)
- Mitrofanov A V et al. *Opt. Lett.* **39** 4659 (2014)
- Bergé L et al. *Rep. Prog. Phys.* **70** 1633 (2007)
- Желтиков А М *УФН* **176** 623 (2006); Zheltikov A M *Phys. Usp.* **49** 605 (2006)
- Желтиков А М *УФН* **181** 33 (2011); Zheltikov A M *Phys. Usp.* **54** 29 (2011)
- Коротеев Н И, Желтиков А М *УФН* **169** 385 (1999); Zheltikov A M *Phys. Usp.* **42** 321 (1999)

PACS numbers: **12.20.-m**, 42.65.Re, 52.65.Rr
DOI: 10.3367/UFNr.0185.201501i.0103

Квантово-электродинамические каскады в интенсивном лазерном поле

Н.Б. Нарожный, А.М. Федотов

Показано, что в интенсивном лазерном поле, наряду с каскадами, аналогичными широким атмосферным ливням, могут возникать самоподдерживающиеся каскады, черпающие энергию из поля. Такие каскады при интенсивности порядка или больше 10^{24} Вт см $^{-2}$ могут инициироваться даже покоящейся частицей, находящейся в фокальной области жёстко сфокусированного лазерного импульса. Эффект возникновения каскадов может существенно изменить течение любого процесса, происходящего в лазерном поле сверхвысокой интенсивности. При очень больших интенсивностях развитие таких каскадов приводит к истощению лазерного поля. Предложена схема эксперимента, которая позволит наблюдать оба типа каскадов одновременно уже на лазерных установках следующего поколения.

Ключевые слова: квантово-электродинамические каскады, лазеры сверхвысокой интенсивности, высокоэнергетичные пучки

1. Введение

Создание во второй половине 1980-х годов технологии усиления chirпированных импульсов (Chirped Pulse Amplification, CPA) [1] и её дальнейшее развитие привели к созданию петаваттных лазерных установок, генерирующих короткие импульсы когерентного оптического излучения с пиковой интенсивностью до 10^{22} Вт см $^{-2}$ [2]. Уже в 2016 г. в рамках европейского проекта ELI (Extreme Light Infrastructure) [3] планируется ввести в эксплуатацию три лазера с интенсивностью 10^{24} Вт см $^{-2}$. В перспективе в рамках проектов ELI, а также XCELS (Exawatt Center for Extreme Light Studies) в Институте прикладной физики РАН в Нижнем Новгороде [4] планируется создание сверхмощных 200-петаваттных лазеров, которые обеспечат генерацию фемтосекундных импульсов с интенсивностью порядка 10^{26} Вт см $^{-2}$ или даже выше. Это открывает обширное поле для новых экспериментальных исследований. Среди приоритетных направлений фундаментальных исследований — лазерно-плазменное ускорение электронов и ионов, новые яркие источники излучения в жёстком рентгеновском диапазоне и γ -диапазоне, фотоядерная физика (в том числе управление ядерными реакциями с помощью лазерного поля), динамика ультрарелятивистской плазмы в экстремальных условиях ("лабораторная астрофизика"). Интенсивно обсуждаются возможности разнообразных приложений, начиная с создания "настолевых" ускорителей элементарных частиц и ядер и заканчивая материаловедением и адронной терапией.

Несомненный интерес вызывает принципиальная возможность экспериментального изучения квантовой электродинамики в интенсивном внешнем поле, в том числе эффектов поляризации вакуума внешним полем: рождения внешним полем электрон-позитронных пар, двойного лучепреломления в вакууме, генерации гармо-

Н.Б. Нарожный, А.М. Федотов. Национальный исследовательский ядерный университет "Московский инженерно-физический институт", Москва, РФ. E-mail: narozhny@theor.mephi.ru