Письма в ЖЭТФ, том 98, вып. 7, с. 423 – 426

Генерация сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения среднего и дальнего инфракрасного диапазона

А. А. Ланин, А. Б. Федотов, А. М. Желтиков

Физический факультет, МГУ им. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

Международный лазерный центр, МГУ им. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

Российский квантовый центр, МГУ им. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

Поступила в редакцию 20 августа 2013 г.

Экспериментально показана возможность генерации сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения в спектральном диапазоне от 3 до 17 мкм на основе генерации разностной частоты полями сигнальной и холостой волн, формируемыми в результате оптического параметрического усиления слабого затравочного поля мощными сверхкороткими импульсами ближнего инфракрасного диапазона. С помощью кросс-корреляционных измерений показано, что длительность импульсов излучения среднего и дальнего инфракрасного диапазона, формируемых в процессе генерации разностной частоты, соответствует нескольким циклам электромагнитного поля.

DOI: 10.7868/S0370274X13190028

Оптика сверхкоротких лазерных импульсов стремительно развивается в направлении освоения инфракрасного (ИК) диапазона, открывая возможности реализации уникальных режимов взаимодействия мощного когерентного излучения с веществом [1, 2] и генерации рекордно коротких импульсов атто- и зептосекундного диапазонов [3]. На основе технологии оптического параметрического усиления чирпированных импульсов разработаны методы генерации сверхкоротких лазерных импульсов с длиной волны около 4 мкм [4] с энергией импульса (до 8 мДж), достаточной для формирования лазерных филаментов в газовых средах. С использованием лазерных источников этого класса выполнены первые эксперименты по исследованию оптических нелинейностей высокого порядка в атмосфере и инертных газах [5, 6], а также показана возможность возникновения лазерной генерации с дистанционной накачкой в условиях филаментации в газовых смесях [7]. Генерация разностной частоты в процессе четырехволнового взаимодействия в двухцветном лазерном филаменте позволяет получить импульсы среднего ИК-диапазона длительностью около половины цикла поля [8].

Результаты экспериментов, представленные в настоящей работе, показывают возможность дальнейшего продвижения оптики сверхкоротких импульсов в область среднего и дальнего ИК-диапазонов. На основе генерации разностной частоты полями сигнальной и холостой волн, формируемыми в результате оптического параметрического усиления слабого затравочного поля мощными сверхкороткими импульсами ближнего ИК-диапазона, реализована генерация импульсов электромагнитного излучения в области длин волн от 3 до 17 мкм. Длительность формируемых в этой схеме импульсов излучения среднего и дальнего ИК-диапазонов соответствует нескольким циклам электромагнитного поля.

Разработанная схема генерации сверхкоротких импульсов среднего и дальнего ИК-диапазонов (рис. 1) основана на последовательном использовании двух нелинейно-оптических процессов оптической даун-конверсии [9–11]. На первом этапе используется процесс оптического параметрического усиления слабого затравочного поля мощными сверхкороткими импульсами накачки ближнего ИК-диапазона. В качестве поля накачки в процессе оптического параметрического усиления выступают импульсы, формируемые лазерной системой на основе титаната сапфира в составе задающего генератора и многопроходного усилителя. Импульсы накачки на выходе усилительного каскада лазерной системы следуют с частотой повторения 1 кГц и имеют центральную длину волны около 800 нм, длительность 50 фс и энергию около 0.6 мДж.

Импульсы титан-сапфирового лазера используются для генерации широкополосного затравочного излучения. Они служат в качестве поля накачки в процессе оптического параметрического усиления этого затравочного излучения в кристалле BBO по схеме $\omega_p = \omega_s + \omega_i$, где ω_p – частота излучения на-

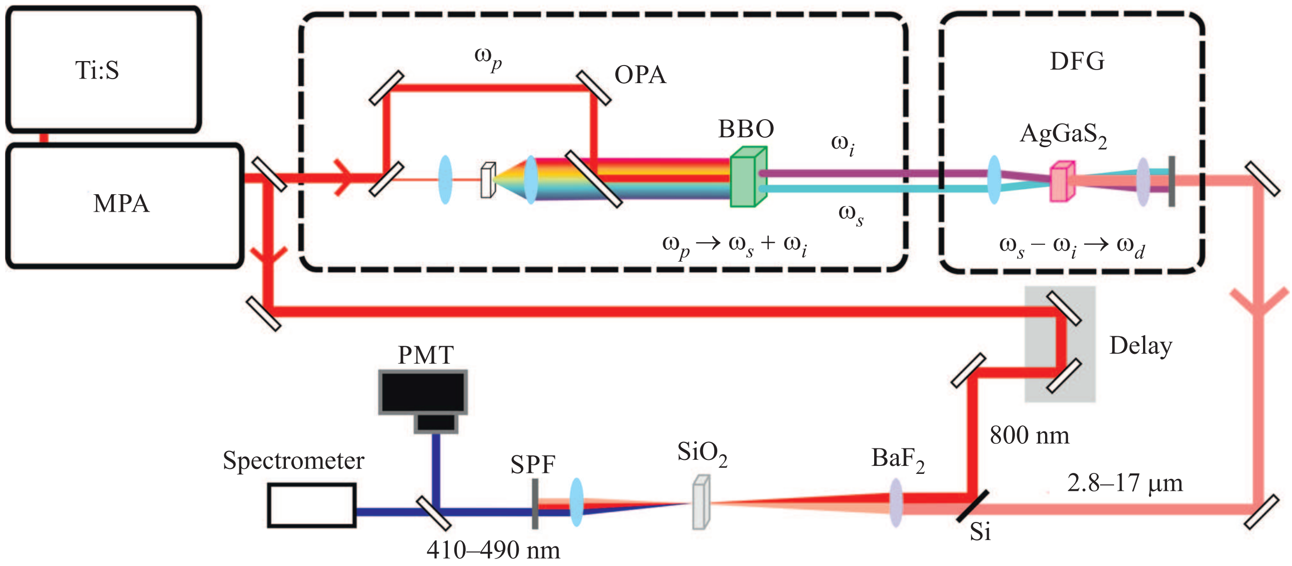

Рис. 1. Схема генерации и измерения сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения среднего и дальнего ИК-диапазонов: TiS – задающий лазерный генератор на основе титаната сапфира, MPA – многопроходный усилитель на основе титаната сапфира, OPA – оптический параметрический усилитель, DFG – генератор разностной частоты, BaF_2 – линзы из фторида бария, Si, SiO_2 – кремниевая и кварцевая пластинки, SPF – фильтр высоких частот, PMT – электронный фотоумножитель

качки, ω_s и ω_i – частоты сигнальной и холостой волн. Настройка синхронизма кристалла производится его поворотом относительно пучков накачки и затравочного излучения. Это позволяет осуществить плавную перестройку длины волны сигнального и холостого полей в диапазоне от 1150 до 1560 нм для сигнальной волны (рис. 2a) и от 1650 до 2200 нм для холостой волны. Холостое и сигнальное поля формируются в виде импульсов длительностью около 100 фс с максимальной эффективностью преобразования в центре перестроечной кривой 25%.

На второй ступени сверхкороткие импульсы сигнальной и холостой волн (рис. 1) используются для генерации разностной частоты в кристалле тиогаллата серебра ($AgGaS_2$). Для увеличения эффективности генерации разностной частоты с помощью телескопа производится согласование входных пучков, диаметр которых устанавливается равным 0.5 мм. Процесс генерации разностной частоты $\omega_d = \omega_s - \omega_i$ приводит к формированию сверхкоротких импульсов среднего и дальнего ИК-диапазонов. Центральная длина волны этого излучения перестраивается в диапазоне от 2.85 до 17 мкм (рис. 2a) путем изменения длин волн сигнальной и холостой волн, подаваемых в кристалл $AgGaS_2$.

Излучение разностной частоты отделяется от сигнальной и холостой волн с помощью диэлектрического полосового фильтра (рис. 1), обеспечивающего пропускание в области длин волн, большее 2.5 мкм. Для прямой регистрации импульсов излучения среднего и дальнего ИК-диапазонов (рис. 2b) используются фотоприемник на основе HgCdTe и автоматизированный решеточный монохроматор, специально разработанный для анализа спектра излучения в средней и дальней ИК-областях. Конструкцией монохроматора предусмотрена смена дифракционных решеток. Для анализа спектров излучения с длиной волны менее 4 мкм используется дифракционная решетка 300 мм$^{-1}$. Для спектрального анализа излучения с большей длиной волны используется решетка 150 мм$^{-1}$. Мощность ИК-излучения измеряется при помощи болометра. Эффективность процесса генерации разностной частоты, определяемая как отношение энергии излучения разностной частоты к суммарной энергии сигнальной и холостой волн на входе нелинейного кристалла, достигает своего максимума в области длины волны сигнала разностной частоты, равной 4 мкм, и составляет 2.5%. Энергия в импульсе излучения с центральной длиной волны 4 мкм составляет 2 мкДж. Во всем диапазоне длин волн от 3 до 17 мкм регистрируемая болометром мощность излучения составляла не менее 0.3 мВт.

Длительность сверхкоротких импульсов среднего и дальнего ИК-диапазонов измерялась с помощью кросс-корреляционной методики на основе использования четырехволнового взаимодействия (ЧВВ)

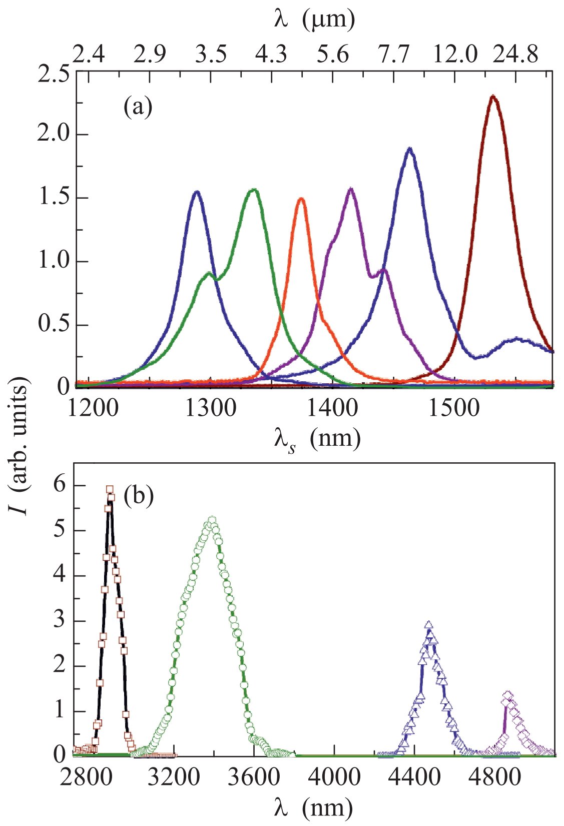

Рис. 2. (a) – Спектры импульсов сигнального поля, формируемых оптическим параметрическим усилителем при различных углах поворота нелинейного кристалла. На верхней горизонтальной шкале отложена длина волны сигнала разностной частоты. (b) – Спектры сигнала разностной частоты, измеренные с помощью HgCdTe-фотодетектора для различных длин волн сигнальной и холостой волн

вида $\omega_{800} + \omega_{800} - \omega_d = \omega_x$ мощных сверхкоротких импульсов титан-сапфирового лазера с частотой ω_{800} и ИК-излучения разностной частоты ω_d. Важно отметить, что такой ЧВВ-процесс сводит проблему характеризации сверхкоротких импульсов среднего и дальнего ИК-диапазонов к выполнению кросс-корреляционных и спектральных измерений над импульсами видимого диапазона. Действительно, длина волны генерируемого в результате такого ЧВВ-процесса сигнала лежит в области 410–490 нм, что позволяет производить его регистрацию с помощью стандартных полупроводниковых фотодетекторов и электронных фотоумножителей и выполнять анализ спектра этого сигнала с использованием широко распространенных спектральных анализаторов. Для выполнения кросс-корреляционных измерений интенсивность ЧВВ-сигнала находится с помощью фотоэлектронного умножителя как функция задержки между импульсами титан-сапфирового лазера и импульсом излучения разностной частоты. Для получения информации о фазе сверхкоротких импульсов среднего и дальнего ИК-диапазонов кросс-корреляционные измерения производятся над спектрально разрешенным ЧВВ-сигналом с помощью стандартного компактного переносного спектрометра.

Для выполнения кросс-корреляционных измерений излучение титан-сапфирового лазера совмещается с излучением разностной частоты на кремниевой пластине, после чего оба пучка фокусируются линзой из фторида бария с фокусным расстоянием 20 см (рис. 1). В качестве нелинейной среды использовалась кварцевая пластина или газовая среда. Длительности импульсов излучения разностной частоты, полученные на основе анализа результатов кросс-корреляционных измерений (рис. 3 и 4),

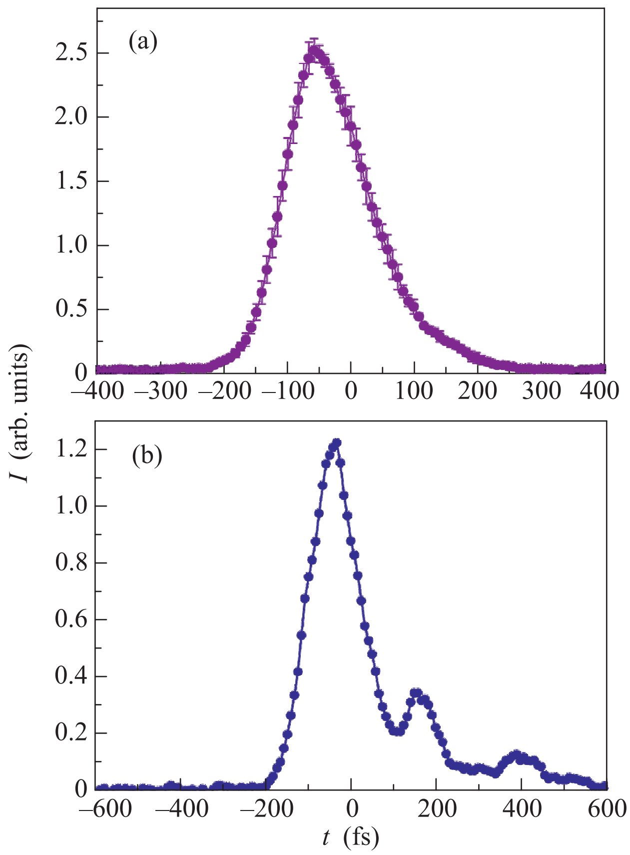

Рис. 3. Результаты кросс-корреляционных измерений, выполненных с использованием ЧВВ в кварцевой пластине (a) и в атмосферном воздухе (b) для импульсов ИК-излучения с центральной длиной волны 3.5 мкм (a) и 7.4 мкм (b), полученных при генерации разностной частоты

составляли 120 фс (что соответствует 10 периодам поля) для импульсов излучения с центральной дли-

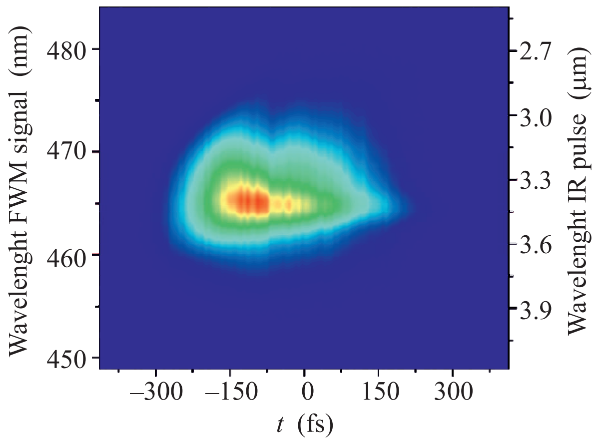

Рис. 4. Результаты кросс-корреляционных измерений с разрешением по частоте, выполненных с использованием ЧВВ в атмосферном воздухе для импульсов ИК-излучения с центральной длиной волны 3.4 мкм

ной волны 3.5 мкм, 77 фс (4.8 периода поля) для излучения на 4.8 мкм, 70 фс (3.4 периода поля) для 6.1 мкм и 115 фс (4.7 периода поля) для 7.4 мкм.

Выполненные эксперименты показывают возможность генерации сверхкоротких (длительностью в несколько циклов электромагнитного поля) импульсов электромагнитного излучения в спектральном диапазоне от 3 до 17 мкм на основе генерации разностной частоты полями сигнальной и холостой волн, формируемыми в результате оптического параметрического усиления слабого затравочного поля мощными сверхкороткими импульсами ближнего инфракрасного диапазона. Реализованная в настоящей работе технология генерации сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения среднего и дальнего ИК-диапазонов открывает новые возможности в области молекулярной спектроскопии, исследования полупроводниковых материалов и устройств, изучения квантово-каскадных систем, дистанционного зондирования атмосферы, сенсорных приложений, нелинейно-оптической микроскопии, лазерного ускорения электронов и аттосекундной физики.

Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты # 12-02-01244, 13-02-92115, 13-02-01465), а также фонда Роберта Уелча (грант А-1801).

1. С. А. Ахманов, В. А. Выслоух, А. С. Чиркин, *Оптика фемтосекундных лазерных импульсов*, М.: Наука, 1988.
2. А. М. Желтиков, *Сверхкороткие импульсы и методы нелинейной оптики*, М.: Наука, 2006.
3. T. Popmintchev, M.-C. Chen, D. Popmintchev et al., Science, Science **336**, 1287 (2012).
4. G. Andriukaitis, T. Balciunas, S. Alisauskas et al., Opt. Lett. **36**, 2755 (2011).
5. D. Kartashov, S. Alisauskas, A. Pugzlys et al., Opt. Lett. **37**, 2268 (2012).
6. D. Kartashov, S. Alisauskas, A. Pugzlys et al., Opt. Lett. **37**, 3456 (2012)
7. D. Kartashov, S. Alisauskas, G. Andriukaitis et al., Phys. Rev. A **86**, 033831 (2012).
8. Y. Nomura, H. Shirai, K. Ishii et al., Opt. Express **20**, 24741 (2012).
9. J. M. Fraser, D. Wang, A. Hache et al., Appl. Opt. **36**, 5044 (1997).
10. R. A. Kaindl, M. Wurm, K. Reimann et al., J. Opt. Soc. Am. B **17**, 2086 (2000).
11. F. Rotermund, V. Petrov, and F. Noack, Opt. Commun. **185**, 177 (2000).