

КОНИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ СУПЕРКОНТИНУУМА ПРИ ФИЛАМЕНТАЦИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА В ПЛАВЛЕНОМ КВАРЦЕ

© 2010 г. Е. О. Сметанина*; А. Е. Дормидонов*, канд. физ.-мат. наук; В. О. Компанец**

* Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

** Институт спектроскопии РАН, г. Троицк, Московская обл.

E-mail: jannes-2002@yandex.ru

Экспериментально и численно исследован частотно-угловой спектр суперконтинуума при филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в плавленом кварце КУ-1 на различных длинах волн. Проведено сравнение эффекта расщепления расходящегося излучения конической эмиссии суперконтинуума на дискретные кольца при рефокусировке излучения для разных длин волн.

Ключевые слова: филаментация, суперконтиум, коническая эмиссия.

Коды OCIS: 190.7110

Поступила в редакцию 13.04.2010

Введение

В процессе филаментации фемтосекундного лазерного импульса происходит сверхуширение его частотного и углового спектров и формирование так называемой конической эмиссии (КЭ) суперконтинуума [1–2]. Формирование конической эмиссии суперконтинуума при филаментации фемтосекундного импульса на длине волны 800 нм в плавленом кварце рассмотрено в [3]. Для выявления общих закономерностей формирования частотно-углового спектра фемтосекундного импульса в настоящей работе представлены результаты исследования формирования КЭ суперконтинуума в процессе филаментации импульсов в кварце на длине волны 1300 нм. Проведено сравнение полученных результатов с представленными в работе [3] для излучения с длиной волны 800 нм.

Лабораторный эксперимент и численное моделирование

Исследования КЭ суперконтинуума выполнены на фемтосекундном спектроскопическом стенде ЦКП ИС РАН. Эксперименты проводились с импульсами на длине волны 1300 нм, длительностью 60 фс, на частоте повторения 1 кГц, с энергией до 5 мкДж. Для получения КЭ фемтосекундное излучение фокусировалось

длиннофокусной кварцевой линзой на поверхность образца. Диаметр пучка на его входной грани составлял 70 мкм. Через боковую грань образца цифровой фотокамерой со временем экспозиции 20 с регистрировались светящиеся нити – плазменные каналы. На расстоянии 20 см от выходной грани образца располагался белый экран, на котором наблюдалась КЭ суперконтинуума, изображение которой регистрировала зеркальная цифровая камера.

КЭ суперконтинуума и нити филаментов в образце исследовались при изменении энергии импульсов в диапазоне от 2 до 5 мкДж. При энергии импульсов более 3 мкДж в центре экрана образуется оранжевое пятно, что свидетельствует о уширении спектра суперконтинуума, так как центральная длина волны лежит вне видимого диапазона. В диапазоне энергии 3,5–4 мкДж вокруг центрального пятна появляются цветные кольца, радиус которых монотонно увеличивается с ростом частотного смещения в антистоксову область относительно центральной длины волны импульса (рис. 1а). Угол расходности для коротковолновой области спектра составляет порядка 5 градусов. Внутри образца на расстоянии 10 мм от входной грани формируется один плазменный канал протяженностью 1,5–2 мм (рис. 1д, сверху). При повышении энергии до 4,8 мкДж, после первого плазменного канала возникает второй плазмен-

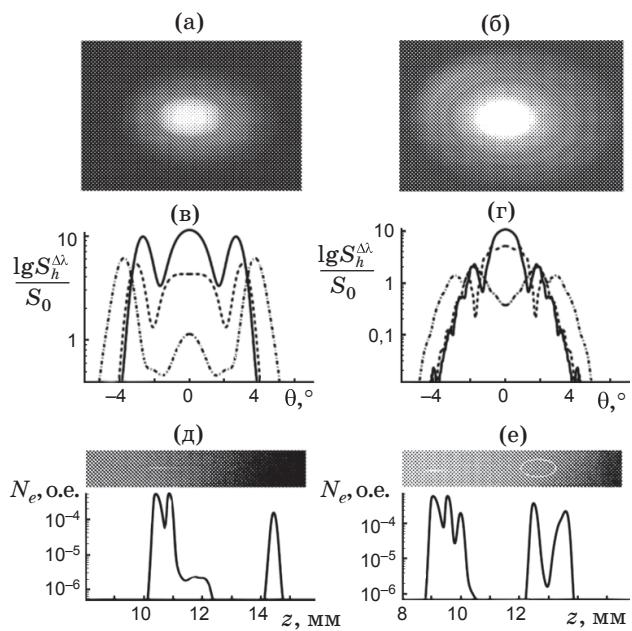


Рис. 1. Энергия импульсов: 3,8 мкДж (левая колонка) и 4,8 мкДж (правая колонка). а, б – фотографии конической эмиссии; в, г – угловая зависимость спектральных компонент $S_h^{\Delta\lambda}(\theta)/S_0$ в логарифмическом масштабе, рассчитанная для интервалов длин волн: 600–730 нм (сплошная кривая); 580–600 нм (пунктирная кривая); 480–560 нм (точка-тире); д, е – плазменные каналы, зарегистрированные фотокамерой через боковую грань образца. Под фотографиями приведена зависимость концентрации электронов $N_e(z)$ вдоль оси плазменного канала, полученная расчетным путем.

ный канал, расположенный на оси филамента на расстоянии 1,5 мм за первым (рис. 1е, сверху). Сплошной по углу спектр концентрических колец КЭ расщепляется на дискретные кольца (рис. 1б). При этом характерная для КЭ зависимость радиуса цветных колец от их длины волны сохраняется. Процесс формирования КЭ при увеличении энергии импульсов на длине волны 1300 нм качественно совпадает с процессом формирования КЭ импульсов на длине волны 800 нм [3]. При энергии импульсов более 5 мкДж на экране образуется спекл-картина.

Для теоретического исследования КЭ использовалась модель филаментации фемтосекундного лазерного импульса в конденсированных средах и программное обеспечение, которое позволяет численно моделировать генерацию суперконтиума при филаментации излучения разных длин волн. Данная модель наряду с дифракцией и нелинейно-оптическим взаимодействием фемтосекундного излучения со

средой в полной мере учитывает материальную дисперсию в кварце в соответствии с формулой Селмейера. В результате численного моделирования филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в условиях поставленного эксперимента получены распределения свободных электронов $N_e(r, z)$ в плазменных каналах (рис. 1д, е, внизу) и частотно-угловые спектры $S(\theta, \lambda)$ импульсов (рис. 2). Рассчитанные параметры плазменных каналов, их протяженность и расположение в объеме среды совпадают с зарегистрированными в эксперименте (рис. 1д, е).

Частотно-угловой спектр импульса на длине волны 1300 нм, лежащей в области нулевой дисперсии групповой скорости в кварце, имеет характерную Fish-образную форму (рис. 2а), а спектр импульса на длине волны 800 нм, лежащей в области нормальной дисперсии групповой скорости в кварце, представляет собой суперпозицию X- и Fish-образных форм (рис. 2б). В результате рефокусировки импульсов их частотно-угловые спектры приобретают ярко выраженную модуляцию, что соответствует появлению дискретных колец конической эмиссии, наблюдавшихся в эксперименте.

Для наглядного сравнения численных и экспериментальных результатов на рис. 1в, г представлены угловые зависимости спектральных компонент, рассчитанные для ряда интервалов длин волн ($\lambda_1 - \lambda_2$) в видимой области спектра, с учетом спектральной чувствительности цифровой фотокамеры. При малой энергии импульса (3,8 мкДж) для каждого выделенного интервала длин волн существует по одному боковому максимуму (рис. 1в), что соответствует непрерывным радужным кольцам КЭ (рис. 1а). Максимум “зеленой” линии

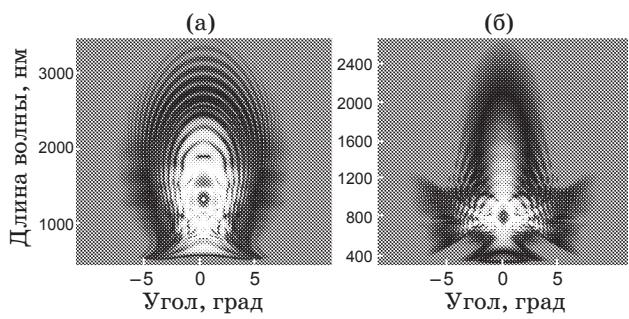


Рис. 2. Численно полученные спектры импульсов: а – спектр импульса на длине волны 1300 нм после рефокусировки, б – спектр импульса на длине волны 800 нм после рефокусировки.

при $\theta = 4$ градуса соответствует внешнему зеленому кольцу, зарегистрированному в эксперименте. При энергии импульса 4,8 мкДж (рис. 1г) в угловом распределении “красной” спектральной компоненты присутствует несколько ярко выраженных боковых максимумов, соответствующих красным дискретным кольцам конической эмиссии (рис. 1б).

Выводы

Впервые экспериментально и численно исследован частотно-угловой спектр фемтосекундного импульса на длине волны 1300 нм при филаментации в плавленом кварце. Из анализа результатов исследований филаментации импульсов на длине волны 1300 нм и 800 нм следует, что эффект углового расщепления колец КЭ не зависит от длины волны и является результатом интерференции излучения от последовательности протяженных когерентных источников,

образующихся в результате рефокусировки импульса.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 08-02-00517-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Faccio M.A., Porras A., Dubietis F., Bragheri A., Couairon P., Di Trapani. Conical Emission, Pulse Splitting, and X-Wave Parametric Amplification in Nonlinear Dynamics of Ultrashort Light Pulses // PRL. 2006. 96. 193901.
2. Кандидов В.П., Шленов С.А., Косарева О.Г. Филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 3. С. 205–228.
3. Дормидонов А.Е., Компанец В.О., Кандидов В.П., Чекалин С.В. Дискретные кольца конической эмиссии при филаментации фемтосекундного лазерного импульса в кварце // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 7. С. 653–657.