

УДК 537.311

КОМПРЕССИЯ ИМПУЛЬСА ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ С ПОМОЩЬЮ ФАЗОВОГО ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТРАНСПАРАНТА

Д.Л. ОГАНЕСЯН^{1*}, А.О. ВАРДАНИЯН², Г.Д. ОГАНЕСЯН²

¹Национальный институт метрологии, Ереван, Армения

²Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: davidhl@ysu.am

(Поступила в редакцию 27 апреля 2017 г.)

Представлены результаты теоретического исследования и численного моделирования процесса генерации импульса излучения разностной частоты (ИРЧ) в диапазоне длин волн от 5 до 30 мкм в поле фемтосекундного лазерного импульса накачки с длиной волны 2 мкм, длительностью 34 фс и амплитудой 70.71 МВ/м, распространяющегося в периодической структуре ZnTe/воздух с числом периодов 13 вдоль нормали к плоскости (110) кристалла ZnTe; эффективность генерации ИРЧ составляет 1.11×10^{-4} . Показано, что применение фазового жидkokристаллического транспаранта, помещенного в фокальную плоскость системы частотно-пространственного отображения, позволяет реализовать такую компрессию импульса ИРЧ, при которой максимальное значение интенсивности импульса увеличивается в 6 раз.

1. Введение

Нелинейно-оптические методы генерации частотно-модулированного ИК импульса имеют практическое значение для нестационарной ИК спектроскопии многоатомных молекул, исследования процессов возбуждения и релаксации многоатомных молекул, разработки методов получения неравновесных внутри-молекулярных возбуждений, изучения физики узкозонных полупроводников и т. д. [1–3]. Компрессия и управление временным профилем частотно-модулированного ИК импульса длительностью в несколько колебаний имеет принципиальное значение в нестационарной ИК спектроскопии, где спектр поглощения излучения веществом определяется переходом энергии квантов излучения в энергию вращательных и колебательных уровней молекулы [4]. Как показано в работах [5, 6] при генерации излучения разностной частоты (ИРЧ) в процессе трехфотонного взаимодействия фемтосекундного лазерного импульса с нелинейно-оптическим кристаллом с нерегулярной доменной структурой можно управлять

законом частотной модуляции широкополосного ИК импульса ИРЧ в диапазоне длин волн от 5 до 15 мкм. Использование нерегулярной доменной структуры с линейно-изменяющейся (возрастающей или убывающей) величиной периода домена позволяет управлять знаком частотной модуляции ИРЧ. При этом значение толщины домена варьируется таким образом, чтобы по мере распространения фемтосекундного лазерного импульса имела место квазисинхронная генерация частотно-модулированного ИРЧ в широком спектральном диапазоне. Квазисинхронная генерация ИРЧ может быть также реализована путем использования традиционного дисперсионного механизма компенсации фазовой расстройки за счет изменения (увеличения или уменьшения) эффективного показателя преломления среды на краях запрещенной зоны одномерной периодической структуры – фотонного кристалла (ФК) [7–9].

В настоящей работе рассматривается процесс генерации широкополосного частотно-модулированного ИРЧ в поле фемтосекундного лазерного импульса, распространяющегося в одномерной периодической структуре ZnTe/воздух. Проводятся теоретические исследования и численное моделирование процесса компрессии и управления временным профилем импульсного ИРЧ с помощью фазового жидкокристаллического транспаранта, помещенного в фокальную плоскость системы частотно-пространственного отображения, состоящей из дифракционных решеток и находящихся между ними линз, отображающих Фурье-образ импульса в пространственную картину в фокальной (Фурье) плоскости.

2. Генерация импульса ИРЧ в поле фемтосекундного импульса, распространяющегося в периодической структуре ZnTe/воздух

Проводилось численное интегрирование системы нелинейных уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области, описывающих процесс генерации ИРЧ линейно-поляризованным фемтосекундным лазерным импульсом на центральной длине волны $\lambda_0 = 2$ мкм, распространяющимся в периодической структуре ZnTe/воздух. Рассматриваемая в работе периодическая структура ZnTe/воздух – одномерный ФК – состоит из параллельных друг другу слоев ZnTe и воздуха с толщинами l_z и l_o и коэффициентами преломления $n_z = n_{\text{ZnTe}}$ и $n_o = 1$, соответственно. Грани изотропного кристалла ZnTe с кубической кристаллической структурой группы симметрии $\bar{4}3m$ параллельны плоскостям (110).

На рис. 1а представлена структура ФК, а на рис. 1b показана взаимная ориентация кристаллографической (XYZ) и лабораторной (xyz) координатных систем. Согласно рис. 1а, период изменения коэффициента преломления $\Lambda = l_o + l_z$. Рассмотрим линейно-поляризованный фемтосекундный лазерный импульс с

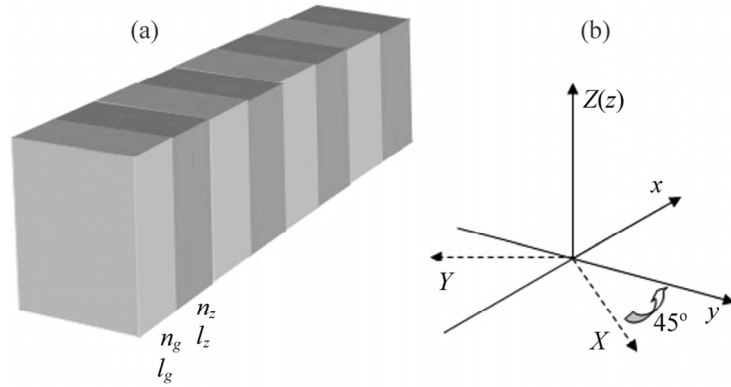


Рис.1. (а) Периодическая структура ZnTe/воздух и (б) взаимная ориентация кристаллографической (XYZ) и лабораторной (xyz) координатных систем.

плоским волновым фронтом и компонентами электромагнитного поля $(0, E_y, 0)$ и $(0, 0, H_z)$, распространяющийся вдоль оси x , совпадающей с нормалью к плоскости (110) , в периодической структуре ZnTe/воздух. Нелинейная поляризация периодической структуры ZnTe/воздух в полосе прозрачности кристалла ZnTe в квазистатическом приближении определяется как [9]

$$P_{zNL}(t) = \epsilon_0 d_{14} E_y^2(t), \quad P_{yNL}(t) = \sqrt{2} \epsilon_0 d_{14} E_y(t) E_z(t), \quad (1)$$

где при $m(l_0 + l_z) < x < m(l_0 + l_z) + l_0$ тензор нелинейной восприимчивости $d_{14} = d_{14}(\text{воздух}) = 0$, а при $m(l_0 + l_z) + l_0 < x < m(l_0 + l_z) + l_0 + l_z$, согласно работе [10], $d_{14} = d_{14}(\text{ZnTe}) = 92.15$ пм/В ($m \in \mathbb{Z}$ – целое число). Согласно (1), в процессе нелинейного взаимодействия y -поляризованного лазерного импульса с ФК генерируется z -поляризованное излучение с компонентами электромагнитного поля $(0, 0, E_z)$ и $(0, H_y, 0)$, которое содержит спектральные компоненты на суммарной и разностной частотах.

Алгоритм численного решения системы уравнений Максвелла, описывающий данный процесс, приведен в нашей работе [9]. Как показано в работе [7], в ФК, в котором одна из подсистем представляет собой набор пластин без нелинейности с пренебрежимо малой дисперсией, а вторая – квадратично-нелинейная среда с зависящим от частоты показателем преломления, фазовый и групповой синхронизмы для процесса генерации второй гармоники достигаются за счет компенсации дисперсии материала ZnTe дисперсией периодической структуры. С учетом дисперсии кристалла ZnTe в диапазоне длин волн 5–30 мкм для рассматриваемого ФК толщина слоев выбиралась из условий $l_0 = \lambda_{\text{IR}}/4 = 2.5$ мкм и $l_z = \lambda_{\text{IR}}/2n_z(\lambda_{\text{IR}}) = 1.8628$ мкм, где $\lambda_{\text{IR}} = 5\lambda_0 = 10$ мкм, а $n_z(\lambda_{\text{IR}}) = 2.6839$.

На рис.2 приведены основные дисперсионные характеристики рассматриваемой нами структуры с числом периодов 13. На рис.2а показана зависимость

реальной части выражения

$$\begin{aligned} \cos(K(\lambda)\Lambda) &= \cos\left(\frac{2\pi l_0}{\lambda}\right) \cos\left(\frac{2\pi n_z(\lambda)l_z}{\lambda}\right) \\ &\quad - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{n_z(\lambda)} + n_z(\lambda)\right) \sin\left(\frac{2\pi l_0}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{2\pi n_z(\lambda)l_z}{\lambda}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

от длины волны λ , где $\Lambda = l_0 + l_z$. Согласно результатам расчетов и как видно из рис.2, для рассматриваемого ФК ZnTe/воздух с периодом $d = l_0 + l_z = 4.3628$ мкм и количеством периодов 13 для ИРЧ с $\lambda > 30$ мкм не существует запрещенных зон, т. е. ФК ведет себя как однородная среда со средним показателем преломления. На рис.2b показана зависимость реальной части $K(\lambda)$ от длины волны, на рис.2c – зависимость реальной части коэффициента преломления $n_p(\lambda) = c/v_p$, где $v_p(2\pi c/\lambda) = (K(2\pi c/\lambda)/2\pi c/\lambda)^{-1}$ – фазовая скорость, c – скорость света в вакууме, на рис.2d – зависимость отношения скорости света в вакууме к реальной части групповой скорости $v_g(2\pi c/\lambda) = (dK(2\pi c/\lambda)/d(2\pi c/\lambda))^{-1}$ в интервале длин волн до 30 мкм.

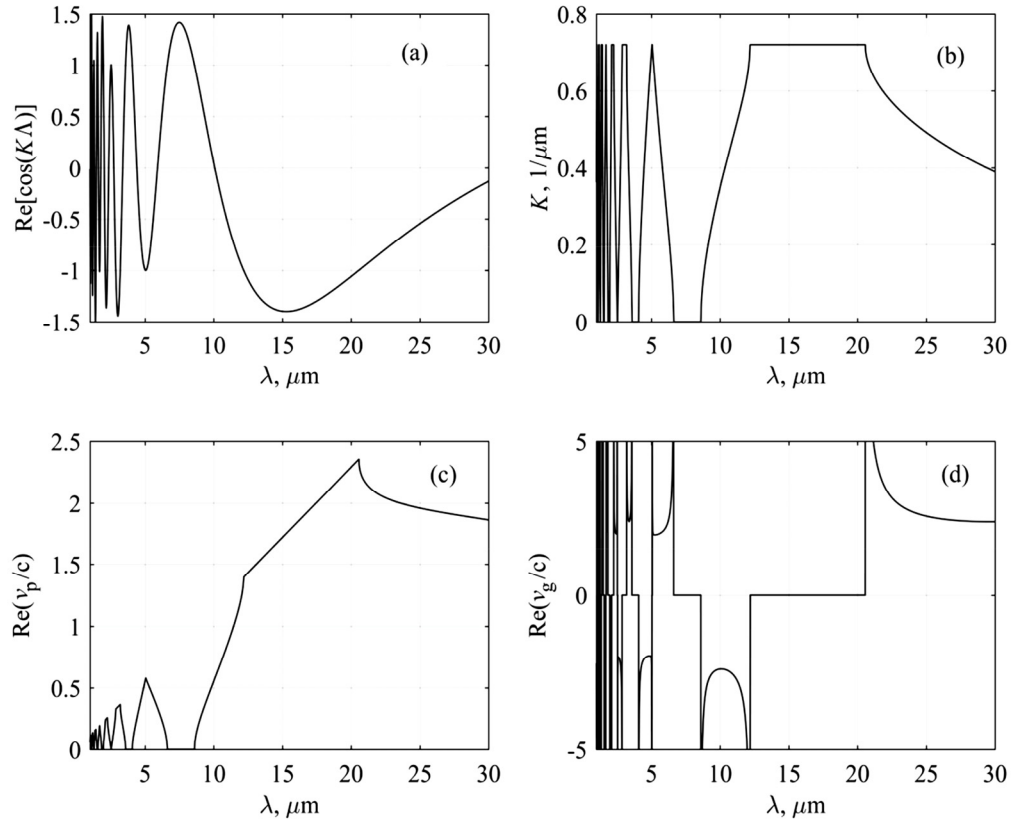


Рис.2. Дисперсионные характеристики периодической структуры ZnTe/воздух с числом периодов 13.

Согласно результатам расчетов, полученных методом матрицы переноса [11] и как видно из рис.2d, запрещенным зонам рассматриваемого ФК соответствуют диапазоны длин волн: 12.18–20.56, 5.033–5.065, 2.870–3.196, 2.108–2.261, 1.685–1.704, 1.355–1.428, 1.169–1.204 и 1.021–1.040 мкм. В спектральных диапазонах, соответствующих запрещенным зонам, групповая скорость равна нулю. В спектральных диапазонах, в которых групповая скорость отрицательна, т. е. эффективный коэффициент преломления c/v_g меньше нуля, импульс излучения выходит из среды раньше, чем он полностью в нее войдет [12]. Данное явление, которое противоречит нашим обычным представлениям, было впервые зарегистрировано в линейно-поглощающей среде [13]. По результатам расчетов, $2K(\omega_{IR}) = K(2\omega_{IR})$ и $\omega_{IR} = 2\pi c/\lambda_{IR}$, следовательно, для рассматриваемой структуры имеет место равенство фазовых скоростей для спектральных компонент на длинах волн 10 и 5 мкм. При этом согласно результатам расчетов и как видно из рис.2d, групповая скорость фемтосекундного лазерного импульса на центральной длине волны $\lambda_0 = 2$ мкм равна значению групповой скорости импульсов ИРЧ на длинах волн 10.79, 9.49, 5.02, 4.22, 2.80 и 2.55 мкм. Следовательно, для рассматриваемой структуры выполняется условие группового синхронизма одновременно для всех указанных длин волн. В процессе распространения фемтосекундного импульса в ФК происходит нелинейная генерация спектрального континуума в ИК диапазоне длин волн, при которой выполняется равенство групповых скоростей фемтосекундного импульса и импульсов ИРЧ на вышеуказанных длинах волн. А генерация остальных частотных компонент спектрального ИК суперконтинуума происходит в режиме отсутствия как фазового, так и группового синхронизма. Значения длин волн импульсов ИРЧ, для которых групповая скорость равна групповой скорости фемтосекундного импульса, можно варьировать путем изменения толщины слоев рассматриваемого ФК.

В соответствии с работой [9], нелинейная добавка к показателю преломления слоя ZnTe для z -поляризованного излучения при изменении амплитуды электрического поля от 70.71 до 100 МВ/м изменяется от 1.218×10^{-3} до 1.723×10^{-3} , а для y -поляризованного излучения от 1.810×10^{-3} до 2.559×10^{-3} , соответственно. Согласно результатам расчетов, при указанных величинах нелинейных добавок к показателю преломления смещениями дисперсионных кривых вдоль частотной оси (рис.2) можно пренебречь. В поле фемтосекундного лазерного импульса на центральной длине волны λ_0 будет иметь место генерация излучения суммарной частоты (ИСЧ) на длинах волн $\lambda_{ИСЧ} = \lambda_S \lambda_L / (\lambda_L + \lambda_S)$ и генерация ИРЧ на длинах волн $\lambda_{ИРЧ} = \lambda_S \lambda_L / (\lambda_L - \lambda_S)$, где λ_S, λ_L – коротковолновые и длинноволновые спектральные компоненты в пределах ширины спектра фемтосекундного лазерного импульса.

В ходе численного эксперимента с целью выделения ИРЧ в диапазоне длин волн от 5 до 30 мкм нами проводится фильтрация z -поляризованного импульса на выходе из кристалла фильтром, который экспериментально может быть реализован в виде диэлектрического полосового фильтра [14].

3. Компрессия и управление временным профилем импульса ИРЧ. Результаты численных расчетов и обсуждение

Начальные условия для численного решения системы нелинейных уравнений Максвелла выбираются в виде

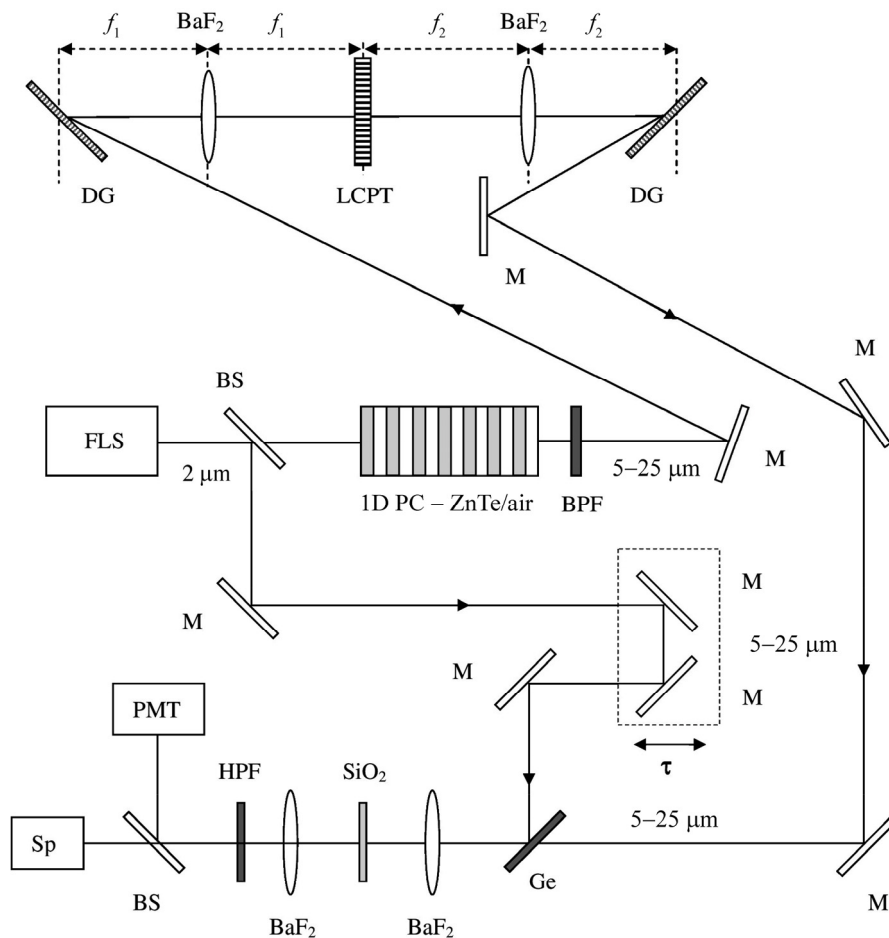


Рис.3. Схема генерации, управления и измерения импульса ИРЧ: FLS – волоконный фемтосекундный лазер, BS – расщепитель пучка, M – глухое зеркало, 1D PC – ФК, DG – дифракционная решетка, BaF₂ – линза из фторида бария, LCPT – жидкокристаллический фазовый транспарант, BPF – полосовой фильтр, Ge – германиевая пластина, SiO₂ – пластина плавленого кварца, HPF – оптический полосовой фильтр, PMT – фотодетектор, Sp – спектральный анализатор.

$$E_y(t, x=0) = E_0 \exp\left(-\frac{t^2}{\tau_0^2}\right) \cos\left(\frac{2\pi c}{\lambda_0} t\right), \quad (3)$$

где $E_0 = 70.71$ МВ/м – амплитуда ИК импульса, $2\tau_0 = 34$ фс – длительность импульса и $\lambda_0 = 2$ мкм – центральная длина волны. Шаг пространственной ячейки Δx выбирается равным $\lambda_0/400 = 5$ нм, а шаг по времени Δt определяется условием Куранта $\Delta t = \Delta x/2c = 0.0083$ фс.

На рис.3 показана схема генерации импульса ИРЧ. Импульсы волоконного фемтосекундного лазера (FLS) длительностью 34 фс на длине волны 2 мкм направляются на расщепитель пучка (BS). Часть импульса проходит через расщепитель и направляется на вышеописанный одномерный ФК, где происходит генерация ИСЧ и ИРЧ. ИРЧ отделяется от ИСЧ с помощью полосового фильтра (BPF), обеспечивающего пропускание в диапазоне длин волн от 5 до 25 мкм. В ходе численного моделирования спектральная фильтрация электрического поля

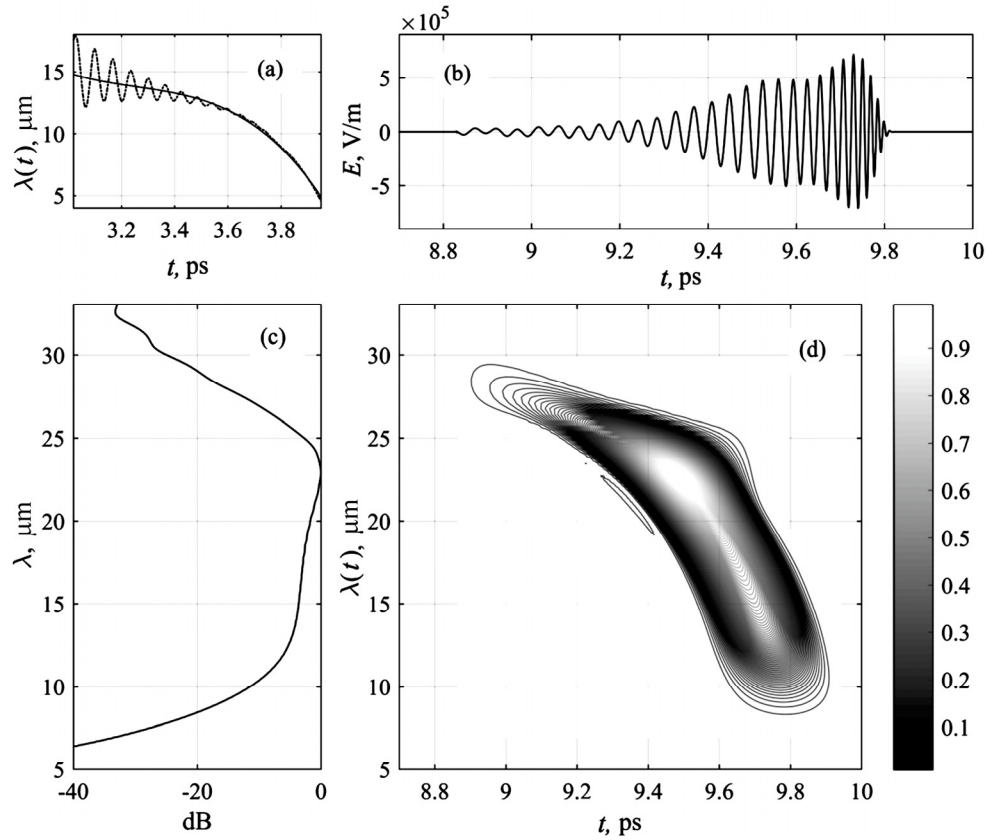


Рис.4. Спектрально-временные характеристики z -поляризованного импульса ИРЧ на выходе из фильтра BPF: (а) пунктирной линией показана зависимость длины волны импульса от времени, а сплошной линией – результат интерполяции данной зависимости кубическим полиномом, (b) временная зависимость поля, (c) спектр и (d) СПРВВ.

z -поляризованного импульса на выходе из ФК проводилась последовательно: сперва с помощью фильтра высоких, а затем с помощью фильтра низких частот с частотами среза $f_{\text{HP}} = 60$ ТГц ($\lambda_{\text{HP}} = 5$ мкм) и $f_{\text{LP}} = 12$ ТГц ($\lambda_{\text{LP}} = 25$ мкм), соответственно, [9].

На рис.4 приведены спектрально-временные характеристики z -поляризованного импульса на выходе из фильтра. Пунктирной линией на рис.4а показана зависимость длины волны импульса ИРЧ от времени, а сплошной линией – результат интерполяции данной зависимости кубическим полиномом. В соответствии с результатами расчетов и как видно из данной зависимости, коротковолновые спектральные компоненты опережают длинноволновые по времени на ~ 1 пс. На рис.4б показана временная зависимость поля z -поляризованного импульса на выходе из фильтра, на рис.4с – зависимость спектральной плотности от длины волны, а на рис.4д – сглаженное псевдо-распределение Вигнера–Вилля (СПРВВ), которое с целью сглаживания по времени независимо от сглаживания по частоте содержит окно как частотного сглаживания, так и временного сглаживания [15]. Протяженность импульса ИРЧ составляет около 1 пс, а максимум амплитуды поля составляет $E_{\text{zmax}} = 7.5 \times 10^5$ В/м. Таким образом, эффективность генерации ИРЧ, определяемая как $(E_{\text{zmax}}/E_0)^2$, составляет 1.11×10^{-4} ($10\lg(E_{\text{zmax}}/E_0)^2 = -39.57$ dB).

Согласно рис.3, z -поляризованный импульс после фильтра с помощью глухого зеркала (М) направляется под определенным углом к нормали на дифракционную решетку (DG) системы отображения, состоящей из дифракционных решеток и находящихся между ними линз, отображающих Фурье-образ импульса в пространственную картину в фокальной (Фурье) плоскости. В качестве линз использовались линзы из фторида бария (BaF_2), которые прозрачны в указанном ИК диапазоне. В фокальной плоскости системы находится электрически-управляемый жидкокристаллический фазовый транспарант (LCPT), предназначенный для управления временным профилем импульса ИРЧ, которое осуществлялось фазовой модуляцией импульса с помощью фазового транспаранта, помещенного в системе отображения. Разложенный в спектр пучок после отражения от дифракционной решетки (DG), расположенной в передней фокальной плоскости первой линзы системы формирования, проецируется на фазовый транспарант, расположенный в задней фокальной плоскости первой линзы. При этом имеет место однозначное соответствие между значением частоты ω спектрально-разложенного ИРЧ и поперечной координатой транспаранта x .

Рассмотрим электрически-управляемый фазовый транспарант, состоящий из структурированных слоев нематического жидкого кристалла (НЖК) с разными значениями показателя преломления (рис.5). Транспарант представляет собой жидкокристаллическую ячейку толщиной d с двумя стеклянными

подложками, покрытыми прозрачными проводящими пленками ИТО (оксид индия–олова) [16]. При этом на одну из подложек нанесен сплошной слой ИТО, а на вторую – этот слой структурирован в виде параллельных электрически-соединенных электродов с шириной L . При приложении напряжений $V_1, V_2, V_3, \dots V_N$ между подложками происходит переориентация молекул НЖК, которая определяется их электрооптически-наведенным двулучепреломлением. Разность фаз спектральных компонент ИРЧ λ_1 и λ_2 , прошедших через слои с различными значениями показателей преломления $n_{\text{eff}}(V_1)$ и $n_{\text{eff}}(V_2)$, можно представить в виде $n_{\text{eff}}(V_1)d/\lambda_1 - n_{\text{eff}}(V_2)d/\lambda_2$. При соответствующем выборе значений напряжений $V_1, V_2, V_3, \dots V_N$, прикладываемых к N электродам, можно получить желаемую фазочастотную характеристику рассматриваемого фазового транспаранта. С целью компрессии импульса ИРЧ нами рассматривается набор значений управляющих напряжений, при которых фазочастотная характеристика транспаранта соответствует фазочастотной характеристике импульса ИРЧ, аппроксимированной кубическим полиномом и взятой со знаком минус. Групповая задержка транспаранта определяется как

$$\tau_{\text{гг}}(\omega) = -\frac{\partial \phi_{\text{appr}}(\omega)}{\partial \omega}, \quad (4)$$

где $\phi_{\text{appr}}(\omega)$ – фазочастотная характеристика z -поляризованного импульса ИРЧ, определяемая в результате численного интегрирования системы нелинейных уравнений Максвелла с последующей фильтрацией и затем аппроксимируемая кубическим полиномом.

В численном эксперименте рассматриваются дифракционные решетки с

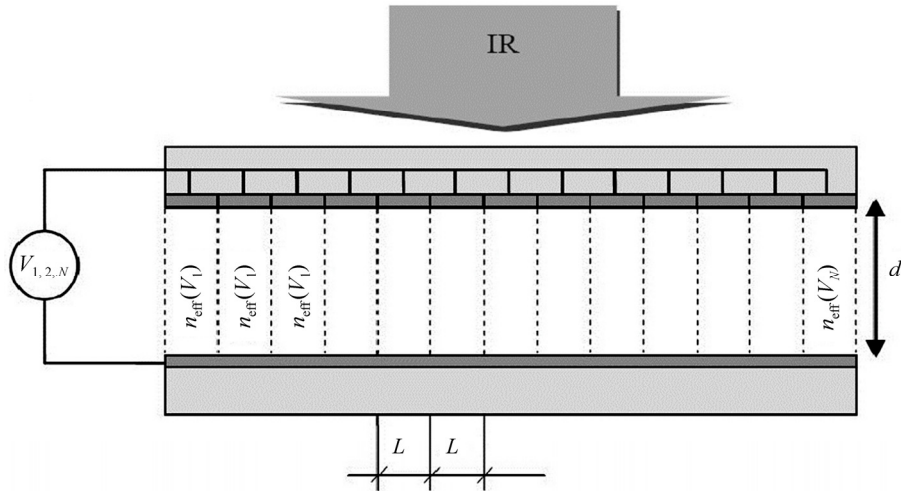


Рис.5. Схематическое изображение поперечного сечения жидкокристаллического фазового транспаранта.

постоянной 30 шт/мм и линзы из BaF_2 с фокусным расстоянием $f = 5$ см. Угол падения импульса ИРЧ на входную дифракционную решетку относительно нормали выбирается равным 7° . При ширине спектра импульса ИРЧ от 5 до 25 мкм ширина пучка ИРЧ в фокальной плоскости составляет 33 мм, что при количестве электродов $N = 300$ соответствует ширине электрода $L = 110$ мкм (рис.5). В ходе расчетов рассматривается НЖК 6СНВТ толщиной $d = 200$ мкм.

Согласно работе [16], при изменении значения управляющего напряжения на $\Delta V = 3$ В показатель преломления из-за электрооптически наведенного двулучепреломления может изменяться от 1.52 до 1.67. Таким образом, если коротковолновая компонента ИРЧ на длине волны 5 мкм проходит через электрод фазового транспаранта, на который подано напряжение, равное пороговому значению (напряжение 10.83 В, соответствующее переходу Фредерикса для НЖК 6СНВТ толщиной 200 мкм [16]), а длинноволновая компонента на длине волны 25 мкм проходит через электрод, на который подано напряжение на $\Delta V = 3$ В больше порогового, то в соответствии с работой [16], групповая задержка между данными компонентами составит 1 пс. Следовательно, при количестве электродов $N = 300$ шаг изменения управляющего напряжения от электрода к электроду составляет 10 мВ. Для пучка ИРЧ конечного диаметра σ в плоскости входной дифракционной решетки спектральная компонента частоты ω отклоняется на угол $\beta(\omega) \approx \partial\theta(\omega)/\partial\omega \times \omega$, где $\partial\theta(\omega)/\partial\omega$ – коэффициент угловой дисперсии решетки, и имеет при этом угловую расхожимость, пропорциональную λ/σ , что соответствует пространственному расплыванию $f\lambda/\sigma$ по оси x , направленной вдоль электродов транспаранта [17]. Для спектральных компонент ИРЧ на длинах волн 5 и 25 мкм пространственное расплывание составляет 8.3 и 42 мкм, соответственно, что меньше ширины электрода $L = 110$ мкм.

Согласно рис.3 импульс ИРЧ после выхода из фазового транспаранта фокусируется второй линзой BaF_2 на выходную дифракционную решетку, на выходе которой формируется коллимированный отфильтрованный импульс ИРЧ.

На рис.6 приведены спектрально-временные характеристики z -поляризованного импульса ИРЧ на выходе из системы отображения. Приведены зависимость длины волны от времени (рис.6а), временной профиль электрического поля (рис.6б), спектр (рис.6с) и СПРВВ (рис.6д). Видно, что протяженность импульса ИРЧ на выходе из системы отображения меньше протяженности импульса ИРЧ на входе системы и составляет около 0.44 пс, а максимум амплитуды поля $E_{z\max}$ составляет 1.84×10^6 В/м. Таким образом, применение фазового жидкокристаллического транспаранта, помещенного в фокальную плоскость системы частотно-пространственного отображения позволяет реализовать такую компрессию протяженности импульса ИРЧ, при которой относительная пиковая интенсивность ИРЧ увеличивается на $10\lg(E_{z\max}/E_0)^2 - 10\lg(E_{z\max0}/E_0)^2 = 7.8$ dB.

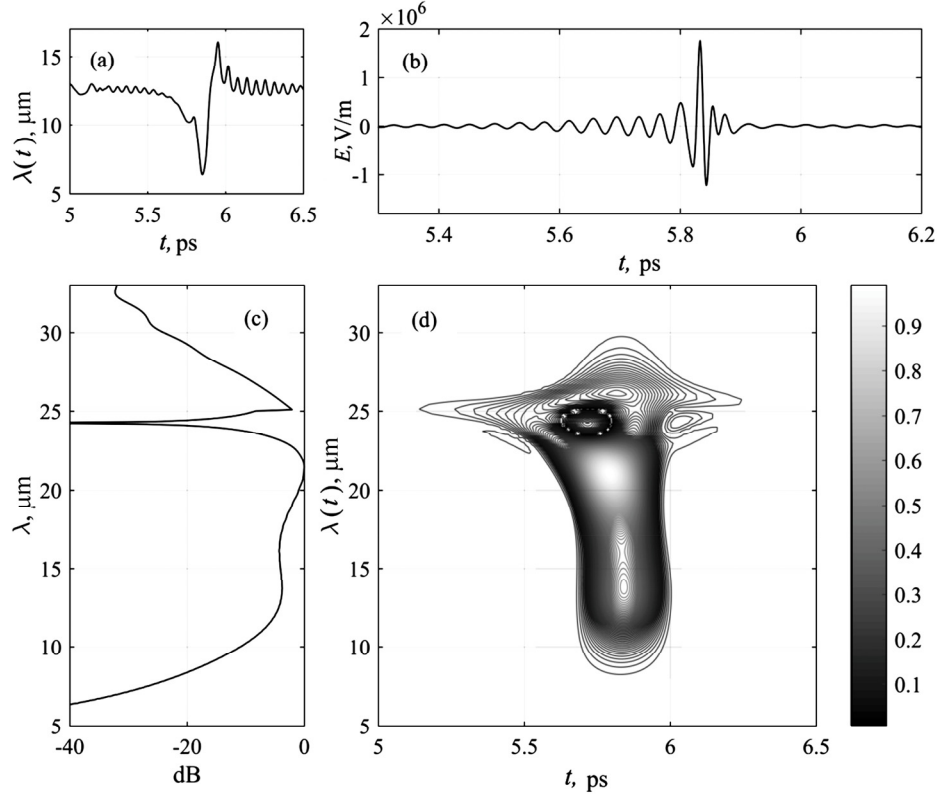


Рис.6. Спектрально-временные характеристики z-поляризованного импульса ИРЧ на выходе из системы частотно-пространственного отображения: (а) зависимость длины волны импульса от времени, (б) временная зависимость поля, (с) спектр и (д) СПРВВ.

Согласно рис.6а, в момент времени, соответствующий максимуму поля, происходит резкое увеличение длины волны от 6 до 16.5 мкм, а на временных интервалах, соответствующих переднему и заднему фронтам импульса, длина волны $\lambda_{\text{ИРЧ}}$ составляет около 12.5 мкм.

Временной профиль импульса ИРЧ предлагается измерять с помощью кросс-корреляционной методики на основе четырехволнового взаимодействия (ЧВВ) вида $2 \times 2\pi c/\lambda_0 - 2\pi c/\lambda_{\text{ИРЧ}} = 2\pi c/\lambda$ мощных импульсов волоконного фемтосекундного лазера с частотой $2\pi c/\lambda_0$ и ИРЧ с частотой $2\pi c/\lambda_{\text{ИРЧ}}$ [14]. Такой ЧВВ-процесс сводит проблему характеристики импульсов ИРЧ к выполнению кросс-корреляционных и спектральных измерений характеристик импульсов в диапазоне длин волн, сосредоточенных в окрестности длины волны $\lambda_0/2$. Действительно, при $\lambda_0 = 2$ мкм, длина волны генерируемого в результате такого ЧВВ-процесса импульса лежит в области 1.16–1.21 мкм, что позволяет производить его регистрацию с помощью стандартных полупроводниковых фотодетекторов и

выполнять анализ спектра сигнала с использованием распространенных спектральных анализаторов, предназначенных для работы в диапазоне длин волн от 0.9 до 1.3 мкм.

Для выполнения кросс-корреляционных измерений часть излучения с выхода волоконно-оптического фемтосекундного лазера, отраженная от расщепителя пучка и прошедшая через оптическую линию задержки, состоящую из двух глухих зеркал, совмещается с ИРЧ на германиевой пластине, после чего оба пучка фокусируются линзой BaF₂ на нелинейную среду. В качестве нелинейной среды, центр которой совмещен с передней фокальной плоскостью первой линзы, может быть использован плавленный кварц (SiO₂) или газовая среда. Далее излучение с выхода нелинейного кристалла коллимируется с помощью второй линзы BaF₂, расположенной на расстоянии, равном фокусному расстоянию от центра кристалла. При фиксированной временной задержке τ между y -поляризованным фемтосекундным импульсом $E_y(t)$ и z -поляризованным импульсом $E_z(t)$ нелинейная поляризация среды определяется как

$$P_{zNL}(t, \tau) \propto \chi_{zyz}^{(3)} [E_y(t - \tau) + E_z(t)]^3. \quad (5)$$

Выделение спектральных компонент ИРЧ в окрестности частоты $2\pi c/\lambda = 2 \times 2\pi c/\lambda_0 - 2\pi c/\lambda_{ИРЧ}$ можно реализовать с помощью оптического полосового фильтра, установленного после второй линзы. Сумма произведений $|E_y(t - \tau)^2 E_z(t)|^2 dt$, взятых при каждом фиксированном значении задержки τ , соответствует функции кросс-корреляции

$$I'_{FWM}(\tau) \propto \int |E_y(t - \tau)^2 E_z(t)|^2 dt \propto \int I_{FWM}(\tau, \omega) d\omega \quad (6)$$

и регистрируется фотодетектором. Двумерная функция $I_{FWM}(\tau, \omega)$ в выражении (6) соответствует динамической спектрограмме [18]

$$I_{FWM}(\tau, \omega) \propto \left| \int E_y(t - \tau)^2 E_z(t) \exp(j\omega t) dt \right|^2. \quad (7)$$

Сумма произведений $|S_y(\omega_1) S_z(\omega - \omega_1)|^2 d\omega_1$, взятых при каждом фиксированном значении частоты ω , соответствует свертке Фурье-образов взаимодействующих импульсов

$$I''_{FWM}(\omega) \propto \int |S_y(\omega_1) S_z(\omega - \omega_1)|^2 d\omega_1 \propto \int I_{FWM}(\tau, \omega) d\tau \quad (8)$$

и регистрируется спектральным анализатором. Фурье-образы взаимодействующих импульсов в выражении (8) определяются как $S_y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E_y^2(t) \exp(j\omega t) dt$ и $S_z(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E_z(t) \exp(j\omega t) dt$, соответственно. Следует отметить, что временное

разрешение определяется шагом изменения координаты зеркал, входящих в состав оптической линии задержки, которая, в свою очередь, определяется точностью выставления координаты механических держателей зеркал. Для держателей с точностью выставления, например, равной $\Delta l = 1$ мкм временное разрешение составляет $\delta\tau = \Delta l/c \approx 3.3$ фс, что в 2 раза меньше периода осцилляции импульса $E_y(t)$, в 5.15 раза меньше длительности импульса $E_y^2(t)$ и в 151.5 раза меньше протяженности импульса $E_z(t)$. Точность регистрации свертки Фурье-образов (8) определяется спектральным разрешением анализатора, которое, в частности, для спектроскопа с дифракционной решеткой может достичь величины 0.1 нм [19]. Согласно вышеизложенному, в отличие от способа измерения, основанного на частотно-разрешаемом оптическом стробировании (FROG), используемого для регистрации сверхкоротких лазерных импульсов, в рассматриваемом нами

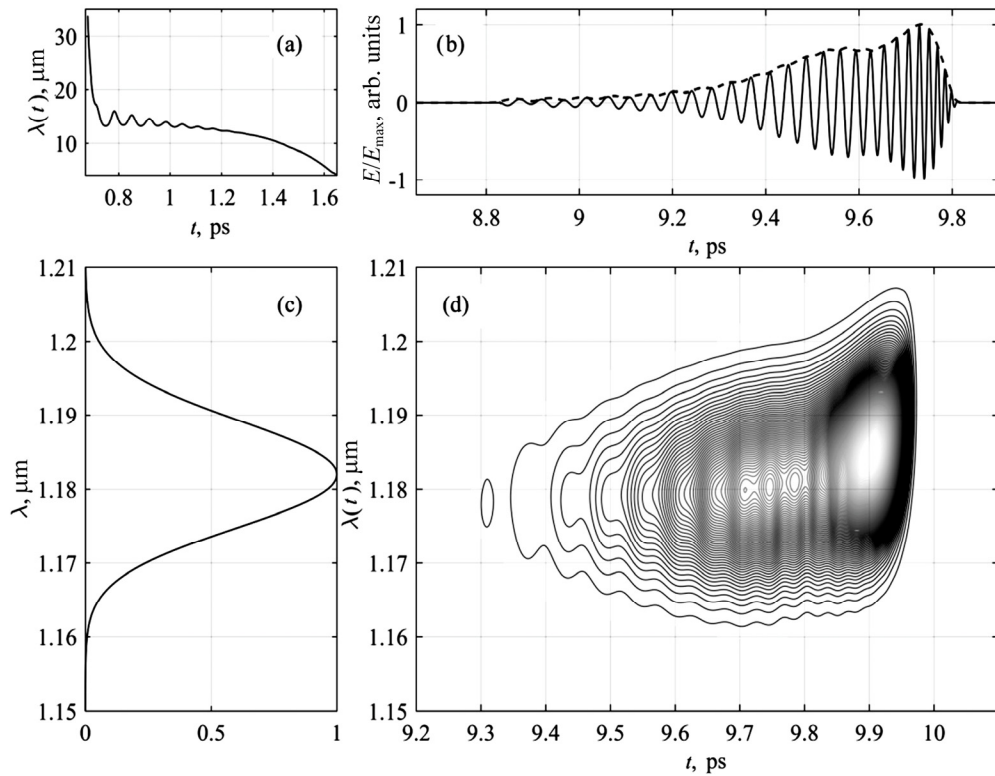


Рис.7. Спектрально-временные характеристики z -поляризованного импульса ИРЧ на выходе системы отображения без жидкокристаллического фазового транспаранта, полученные в результате кросс-корреляции: (а) зависимость длины волны от времени, (б) временной профиль электрического поля, нормированного на его максимальное значение (сплошная линия), и огибающая (штриховая линия), (с) спектр сигнала, генерируемого в результате ЧВВ-процесса, и (д) динамическая спектрограмма.

случае временное разрешение не зависит от спектрального разрешения, а проводимые измерения являются многократными, реализуемыми отдельно для каждого значения задержки $m \times \tau$ между импульсами, где $m \in \mathbb{Z}$.

На рис.7 приведены спектрально-временные характеристики z -поляризованного импульса ИРЧ на выходе из системы отображения без жидкокристаллического фазового транспаранта, полученные в результате численного моделирования процесса кросс-корреляционного измерения. Показаны зависимость длины волны от времени (рис.7а), временной профиль электрического поля, нормированного на его максимальное значение (рис.7б), спектр сигнала, генерируемого в результате ЧВВ-процесса (рис.7с) и динамическая спектрограмма (рис.7д). На рис.7б штриховой линией показана огибающая импульса

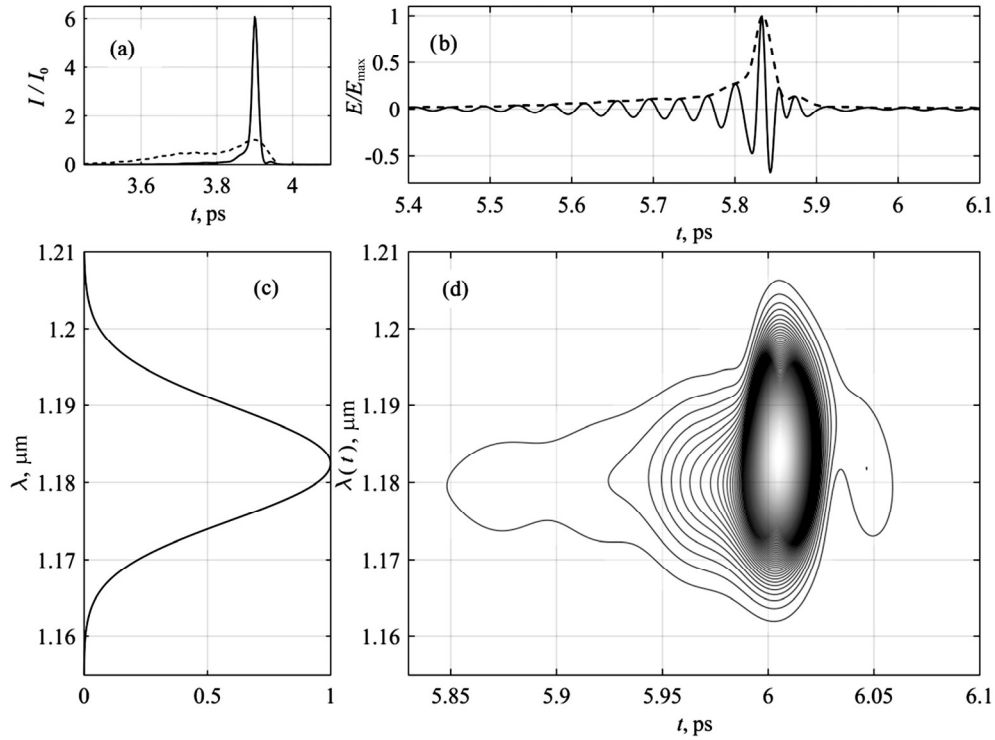


Рис.8. Спектрально-временные характеристики z -поляризованного импульса ИРЧ на выходе из системы отображения с жидкокристаллическим фазовым транспарантом, полученные в результате кросс-корреляции: (а) временной профиль интенсивности компрессированного импульса (сплошная линия) и временной профиль импульса ИРЧ до компрессии (пунктирная линия), (б) временной профиль электрического поля, нормированного на его максимальное значение (сплошная линия), и огибающая (штриховая линия), (с) спектр сигнала, генерируемого в результате ЧВВ-процесса, и (д) динамическая спектрограмма.

ИРЧ, полученная из функции кросс-корреляции (6). Динамическая спектрограмма в ходе численного эксперимента формируется как матрица, у которой распределение интенсивности вдоль каждого столбца соответствует свертке Фурье-образов взаимодействующих импульсов (8), а номер столбца m соответствует временной задержке между взаимодействующими импульсами.

На рис.8 приведены спектрально-временные характеристики сжатого во времени z -поляризованного импульса ИРЧ на выходе из системы отображения с жидкокристаллическим фазовым транспарантом, полученные в результате численного моделирования процесса кросс-корреляционного измерения. Сплошной линией показан временной профиль интенсивности компрессированного импульса, а пунктирной линией – временной профиль импульса ИРЧ до компрессии (рис.8а), представлены временной профиль электрического поля (рис.8б), спектр сигнала, генерируемого в результате ЧВВ-процесса (рис.8с) и динамическая спектрограмма (рис.8д). На рис.8б штриховой линией показана огибающая компрессированного импульса ИРЧ, полученная из функции кросс-корреляции (6). Как видно из рис.8а, пиковая интенсивность сжатого импульса в 6 раз больше интенсивности импульса ИРЧ до компрессии.

4. Заключение

Приведены результаты теоретического исследования и численного моделирования процесса генерации импульса ИРЧ в диапазоне длин волн от 5 до 30 мкм в поле фемтосекундного лазерного импульса накачки на длине волны 2.0 мкм, длительностью 34 фс и амплитудой 70.71 МВ/м, распространяющегося в периодической структуре ZnTe/воздух вдоль нормали к плоскости (110) кристалла ZnTe. Представлены результаты расчетов основных дисперсионных характеристик рассматриваемой периодической структуры с толщинами слоев воздух и ZnTe, равными 2.5 и 1.8628 мкм, соответственно, и количеством периодов 13. Показано, что эффективность генерации ИРЧ составляет 1.11×10^{-4} .

Приводятся результаты расчета процесса компрессии импульса ИРЧ с помощью системы отображения с жидкокристаллическим электрооптически управляемым фазовым транспарантом. Показано, что применение фазового жидкокристаллического транспаранта, помещенного в фокальную плоскость системы частотно-пространственного отображения, позволяет реализовать такую компрессию протяженности импульса ИРЧ, при которой относительная пиковая интенсивность ИРЧ увеличивается на 7.8 dB.

Приводятся также результаты расчета частотно-временных характеристик импульса ИРЧ с помощью СПРВВ, а также результаты численного эксперимента, описывающего процесс кросс-корреляционного измерения временного профиля импульса ИРЧ, полученного в результате ЧВВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **V. Petrov, F. Rotermund, F. Noack.** J. Opt. Pure Appl. Opt, **3**, R1 (2001).
2. **F. Rotermund, V. Petrov, F. Noack.** Opt. Commun, **185**, 177 (2000).
3. **А.А. Ахумян, Г.Д. Оганесян.** Известия НАН Армении, Физика, **50**, 476 (2015).
4. **A.A. Lanin, A.A. Voronin, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov.** J. Scientific Reports, **4**, 6670, (2014).
5. **А.А. Ахумян, Г.Д. Оганесян.** Известия НАН Армении, Физика, **49**, 99 (2014).
6. **D.L. Novhannisyanyan, V.O. Chaltikyan, G.D. Novhannisyanyan.** Intern. J. Modern Physics: Conference Series, **15**, 91 (2012).
7. **А.В. Тарасишин, А.М. Желтиков, С.А. Магницкий.** Письма в ЖЭТФ, **70**, 800 (1999).
8. **Б.И. Манцызов.** Когерентная и нелинейная оптика фотонных кристаллов. Москва, Физматлит, 2009.
9. **Д.Л. Оганесян, А.О. Варданын, Г.Д. Оганесян.** Известия НАН Армении, Физика, **51**, 437 (2016).
10. **M. Ebrahim-Zadeh, I.T. Sorokina.** Mid-infrared Coherent Sources and Applications. Results of the NATO Advanced Research Workshop on Middle Infrared Coherent Sources (MICS), Barcelona, Spain 6–11 November, pp. 150–153, 2005.
11. **А. Ярив, П. Юх.** Оптические волны в кристаллах. Москва, Мир, 1987.
12. **L.J. Wang, A. Kuzmich, A. Dogariu.** Nature, **406**, 277 (2000).
13. **C. Chu, S. Wong.** Phys. Rev. Lett., **48**, 738 (1982).
14. **А.А. Ланин, А.Б. Федотов, А.М. Желтиков.** Письма в ЖЭТФ, **98**, 423 (2013).
15. **G.D. Novhannisyanyan.** Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), **22**, 135 (2013).
16. **Д.Л. Оганесян, А.Л. Маргарян, Н.Г. Акопян, В.М. Арутюнян, В.В. Беляев, А.С. Соломатин.** Известия НАН Армении, Физика, **50**, 74 (2015).
17. **Б. Салех, М. Тейх.** Оптика и фотоника. Принципы и применения. Долгопрудный, Издательский Дом Интеллект, 2012.
18. **R. Trebino.** Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses, Springer Science+Business Media, 2002.
19. **В. Демтредер.** Современная лазерная спектроскопия. Долгопрудный, Издательский Дом Интеллект, 2014.

PULSE COMPRESSION OF DIFFERENCE FREQUENCY RADIATION BY LIQUID CRYSTAL PHASE TRANSPARENT

D.L. HOVHANNISYAN, A.H. VARDANYAN, G.D. HOVHANNISYAN

Results of theoretical research and numerical simulation of difference frequency radiation (DFR) pulse generation in 5–25 μm wavelength range in the field of pump femtosecond laser pulse at 2 μm central wavelength, 34 fs duration and 70.71 MV/m electrical field amplitude, propagated in periodic structure ZnTe/air with the number of periods equal to 13 along the normal to the (110) plane of the ZnTe crystal are presented; and the efficiency of DFR generation is 1.11×10^{-4} . It is shown that the using of liquid crystal phase transparent, placed in the focal plane of the frequency-spatial shaping system, allows to realize the DFR pulse compression, at which the maximum intensity is increased by a factor of 6.