

## СОДЕРЖАНИЕ

### ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

- 3 **Измерение параметров фемтосекундных импульсов в широком спектральном диапазоне на основе эффекта многофотонного поглощения в кристалле натурального алмаза**  
Гагарский С.В., Приходько К.В.
- 9 **Метод прямого измерения доплеровских смещений и эффекта Зеемана по оптическим цифровым спектрограммам Солнца и долгопериодические колебания солнечных пятен**  
Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Соловьев А.А.

### РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- 18 **Широкоугольные оптические системы с комбинером на основе синтезированных объемных голограмм для наשלемных дисплеев**  
Ган М.А., Щеглов С.А., Ган Я.М., Чертков А.С.
- 24 **Компьютеризированный интерферометр сдвига**  
Ле Зуй Туан, Кирилловский В.К.
- 30 **Градиентный метод расчета оптических элементов для формирования заданной освещенности на криволинейной поверхности**  
Белоусов А.А., Досколович Л.Л., Харитонов С.И.
- 36 **Взаимное неколлинеарное отображение пространства предметов и пространства видимых изображений**  
Потапова Г.К., Москаленко М.А.
- 43 **Изопланатизм оптической системы человеческого глаза**  
Дубинин А.В., Беляков А.И., Черезова Т.Ю., Кудряшов А.В.

### ИКОНИКА – НАУКА ОБ ИЗОБРАЖЕНИИ

- 46 **Исследование статистических характеристик оболочек 3D-объектов**  
Красильников Н.Н., Красильникова О.И.

### ГОЛОГРАФИЯ

- 50 **Чувствительность объемных голографических сред**  
Гуревич Б.С., Гуревич С.Б., Пецкус А.

- 54 **Крокониевый краситель в качестве сенсibilизатора фототермопластических голографических сред для ближней ИК области спектра**  
Давиденко Н.А., Ищенко А.А., Гетьманчук Ю.П., Деревянко Н.А., Костенко Л.И., Кулинич А.В., Курдюков В.В., Мокринская Е.В., Гуменюк Л.Н., Павлов В.А., Чуприна Н.Г., Куранда Н.Н., Хуторный С.В.

## **ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ**

- 60 **Серия кремниевых мультиплексоров для КРТ-фотодиодов спектрального диапазона 8–16 мкм**  
Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсяк В.Н., Асеев А.Л.
- 68 **Система дистанционного оптического контроля сечения провода контактных сетей железных дорог**  
Базин В.С., Верхогляд А.Г., Выхристюк И.А., Каличкин С.В., Калинин В.Э., Макаров С.Н., Ступак М.Ф., Чугуй Ю.В.

## **ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ**

- 74 **Физико-химические методы повышения термической прочности лазерных кристаллов  $\text{LiYF}_4:\text{Nd}$**   
Игнатъев А.И., Никоноров Н.В., Мочалов И.В., Цыганкова Е.В., Рейтеров В.М., Балтушка А.
- 79 **Спектры усиления в иттербий-эрбиевых метафосфатных стеклах для микролазеров**  
Асеев В.А., Златов А.С., Никоноров Н.В., Пржевуский А.К., Федоров Ю.К.
- 83 **Связь относительного сдвига интерференционных полос и поглощения света полупрозрачным металлическим слоем в двухлучевом интерферометре**  
Кулагин Е.С.

## **ИНФОРМАЦИЯ**

- 89 **Международная конференция “Оптоинформатика 2008”**
- 90 **Коллективная монография “Оптика наноструктур”**
- 91 **Монография “Оптические методы визуализации газовых потоков”**

---

Сдано в набор 18.12.07. Подписано в печать 00.00.08. Формат бумаги 60×84/8.

Бумага офсетная № 1. Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.

Заказ № 00. Отпечатано в ООО «ЦТТ». Тираж 300 экз. Цена подписная.

Адрес типографии: 199034, Санкт-Петербург, Биржевая линия, д. 16.

Качество графических материалов соответствует представленным оригиналам.

---

Научный редактор **В.П. Белошеев**

Корректор **Э.А. Рождественская**

УДК 621.373.826

## ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ШИРОКОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА МНОГОФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ НАТУРАЛЬНОГО АЛМАЗА

© 2008 г. С. В. Гагарский, канд. физ.-мат. наук; К. В. Приходько, канд. физ.-мат. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: s\_gagarski@mail.ru

Измерение параметров фемтосекундных импульсов в спектральном диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного без изменения типа измерительной системы или ее значительной перенастройки представляет собой достаточно сложную задачу. В настоящей работе проведено исследование возможностей использования для ее решения эффекта многофотонного поглощения в прозрачных в широком спектральном диапазоне оптических материалов. Приводятся результаты измерения параметров фемтосекундных импульсов в ультрафиолетовом (от 230 нм), видимом и инфракрасном (вплоть до 3000 нм) диапазонах с помощью предложенного комбинированного корреляционного измерителя, работающего на эффекте двухфотонного поглощения в кристалле натурального алмаза.

Коды OCIS: 260.0260.

Поступила в редакцию 19.06.2007.

### Введение

Корреляционные измерения являются стандартным методом определения длительности и фазовой структуры ультракоротких световых импульсов (УКИ). Этот метод реализуется с использованием целого ряда физических эффектов, преимущественно нелинейно-оптических. Как было показано в работах [1–6], в целом ряде практических ситуаций определенными преимуществами обладает метод, основанный на эффекте двухфотонного поглощения (ДФП) в прозрачных для измеряемого излучения материалах. Этот метод базируется на нечувствительных к выполнению условий фазового синхронизма кросскорреляционных измерениях групповой задержки между импульсом накачки с центральной частотой  $\omega_p$  и пробного импульса с центральной частотой  $\omega_i$  (в вырожденном случае автокорреляционных измерений  $\omega_p = \omega_i$ ). Кросскорреляционные измерения проводятся с использованием эффекта двухфотонного поглощения в тонком слое подходящего материала (вода, кварц и т. д.). Ширина запрещенной зоны поглощающего материала  $E_g$  должна удовлетворять условию  $\omega_p < E_g/h < \omega_p + \omega_i + \Delta\Omega_i$ , где  $\Delta\Omega_i$  – спектральное разрешение метода, соответствующее минимальной спектральной ширине импульса.

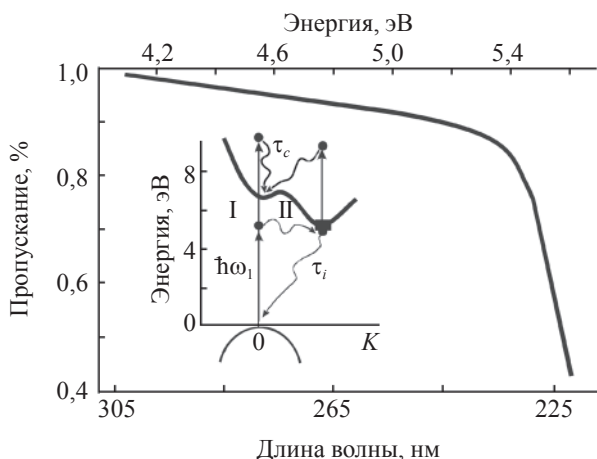
За нелинейным оптическим элементом располагается спектральная система, позволяющая выделить частотный интервал  $\Delta\Omega_i$  с выбранной центральной частотой  $\omega_i$ . Пропускание образца на  $\omega_i$  зависит от плотностей мощности сфокусированных импульсов накачки и пробного импульса, соответствующего значения коэффициента ДФП ( $\beta_2$ ) и спектрально-временного перекрытия взаимодействующих импульсов. Экстремум кросскорреляционной функции, соответствующий минимуму пропускания материала на выбранной частоте  $\omega_i$ , сдвинут на временную задержку  $\tau_D$  от реальной “нулевой позиции”, совпадающей с максимумом автокорреляционной функции импульса накачки. В конечном итоге можно построить зависимость групповой задержки от мгновенной частоты  $\tau_D(\omega_i)$ . В сочетании с данными по спектру пропускания анализируемого сигнала этой информации вполне достаточно для определения временной и фазовой структуры исследуемого импульса, если известна зависимость  $\beta_2(\omega_p, \omega_i)$ . Спектральный диапазон применения указанной методики весьма широк и ограничен в коротковолновом диапазоне границей фундаментального поглощения выбранного оптического материала (для большинства оптических материалов область длин волн короче 200 нм). В инфракрасном диапазоне ограничения начинаются для частот, со-

ответствующих длине волны в несколько микрометров. Для проведения измерений в спектральном диапазоне, простирающемся от глубокого ультрафиолетового до среднего инфракрасного, одним из наиболее перспективных материалов оказался натуральный алмаз типа 2А. Такой выбор обусловлен тем, что алмаз обладает наиболее оптимальным среди известных на данный момент материалов сочетанием тепловых, механических и оптических свойств. Этот материал прозрачен в диапазоне 230–5000 нм, имеет высокий коэффициент ДФП и низкий коэффициент трехфотонного поглощения, а также, имеет высокий порог оптического разрушения. По данным наших экспериментов, это значение составляет  $0,2 \text{ ТВт/см}^2$  для импульсов длительностью 100 фс на длине волны 250 нм. Динамика взаимодействия УКИ с алмазом и соответствующая форма кросскорреляционной функции определяется энергетической структурой его уровней (рис. 1) и зависит от суммарной энергии взаимодействующих фотонов. Если энергия одиночного фотона меньше ширины запрещенной зоны, то можно выделить три основных возможных канала многофотонного поглощения [7–15]:

I. Резонансное (истинное) двухфотонное поглощение, вызванное прямым двухфотонным переходом в зону проводимости.

II. Резонансное двухфотонное поглощение с участием фонона, вызванное непрямым переходом в зону проводимости.

III. Каскадное поглощение низкоэнергетичного пробного фотона долгоживущими свободными носителями, индуцированными фотонами накачки.



**Рис. 1.** Энергетическая диаграмма и результаты измерения внутреннего пропускания образца натурального алмаза типа 2А толщиной 1 мм. Область нарастания поглощения в районе 5,5 эВ соответствует непрямым двухфотонным процессам, включая фотон-фоннонные переходы.

Не зависящий от температуры “истинный” коэффициент ДФП ответственен за процессы типа I. Основные цели наших исследований в рамках данной работы состояли в измерении коэффициента ДФП алмаза типа 2А, определении параметров фемтосекундных импульсов в области, расположенной вблизи края полосы поглощения (диапазон 230–280 нм), а также в определении граничных возможностей применения данного материала к измерениям в инфракрасном диапазоне.

### Источник мощных фемтосекундных импульсов в диапазоне 230–3000 нм с килогерцовой частотой повторения

Совместно с Институтом физической и теоретической химии Мюнхенского технического университета нами был разработан лазерный комплекс, позволяющий генерировать импульсы с длительностью порядка 100 фс и мощностью до 1 ГВт в широком спектральном диапазоне. Комплекс предназначен для изучения процессов переноса заряда в сложных органических молекулах, а также для измерения характеристик различных нелинейно-оптических материалов.

Задающим генератором в комплексе служит непрерывнонакачиваемый лазер на титан-сапфире MIRA (Coherent). Генерация фемтосекундных импульсов осуществляется методом синхронизации мод с помощью керровской нелинейной линзы, наводимой в активном элементе. На выходе лазера генерируются спектрально-ограниченные импульсы длительностью 60–70 фс на длине волны 790 нм с энергией 0,5 мкДж, следующие с частотой повторения 1 МГц. Далее каждый тысячный импульс усиливается до энергии 2 мДж в оригинальном регенеративном усилителе, снабженном системой временной декомпрессии/компрессии, построенной на решеточной элементной базе. Накачка регенеративного усилителя осуществляется наносекундными импульсами с длиной волны 523 нм, генерируемыми твердотельным лазером “SUPERMERLIN 23” на кристалле ИЛФ:Nd. Энергия выходного импульса достигает 23 мДж и используется для накачки кристаллов титан-сапфира собственно регенеративного усилителя, а также дополнительного двухкаскадного усилителя. После выходного компрессора, собранного на паре дифракционных решеток, выходной пучок из регенеративного усилителя разделяется на два канала и используется для накачки двух параметрических генераторов-усилителей серии TOPAS. Часть перестраиваемого по спектру выходного излучения сигнальной и холостой волн смешивается в нелинейном кристалле генератора

разностной частоты (спектральный диапазон 445–550 нм) и затем удваивается в сверхтонком кристалле бетабората бария. В результате в ультрафиолетовом диапазоне обеспечивается генерация фемтосекундных импульсов с энергией 25–70 мкДж, перестраиваемых в диапазоне 230–280 нм. В видимом и ближнем инфракрасном диапазонах энергия импульсов, соответствующих прямой и холостой волнам параметрического генератора, а также их гармоникам, составляла сотни микроджоулей. Таким образом, на выходе установки имели место субмиллиджоульные импульсы с длительностью порядка 100 фс, перекрывающие область длин волн от 230 нм до 3 мкм, причем пространственное распределение выходного излучения близко к дифракционному.

В ряде измерений также использовалось излучение фемтосекундного континуума, создаваемое при фокусировке световых импульсов во вращающиеся образцы плавленого кварца, фторида лития или фторида магния. Плотности мощности в области фокусировки достигали  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>, что существенно превышало порог генерации континуума. Коэффициент преобразования в непрерывный спектр излучения достигал десятков процентов при высокой воспроизводимости распределения спектральной плотности излучения от импульса к импульсу.

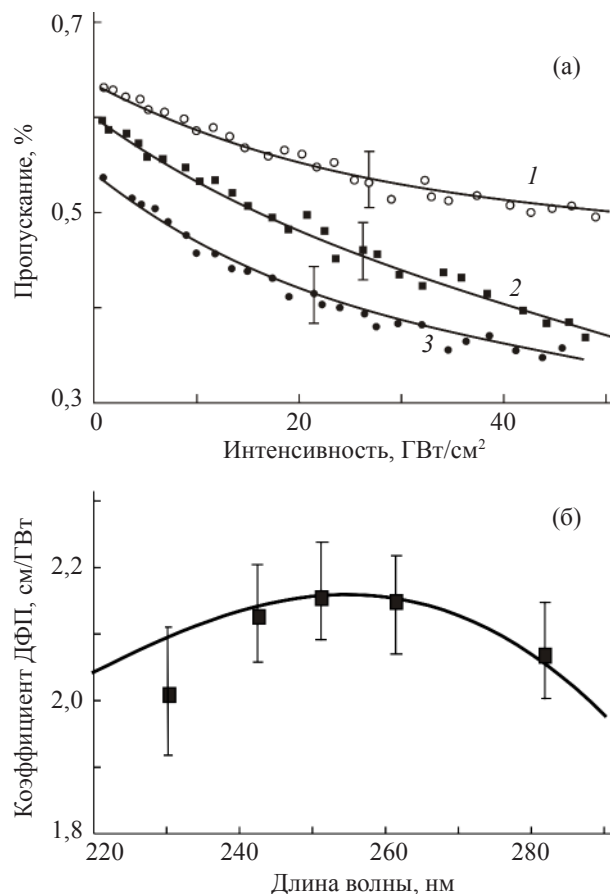
Достигнутые параметры световых импульсов позволяют решать широкий круг задач динамической спектроскопии и нелинейной оптики.

### Измерение коэффициента двухфотонного поглощения кристалла натурального алмаза вблизи края запрещенной зоны

По нашим данным, систематические и достоверные измерения дисперсии коэффициента ДФП вблизи края запрещенной зоны, т. е. в области 230–280 нм, не проводились. Некоторые данные, полученные ранее [3, 6] на различных длинах волн, различаются на порядки по величине вследствие использования разных лазерных источников и проблем, связанных с трудностями разделения вкладов прямого и ступенчатого двухфотонного поглощения.

Основным методом измерения коэффициента ДФП является измерение ослабления энергии импульса, распространяющегося через исследуемую среду, с последующей обработкой зависимостей нелинейного пропускания и пространственно-временных параметров этого импульса.

Результаты наших измерений и зависимость коэффициента ДФП от длины волны приведены на рис. 2. Теоретическая оценка дисперсионной зави-



**Рис. 2.** а – зависимости оптического пропускания образца алмаза от пиковой интенсивности на различных длинах волн. 1 –  $\lambda = 280$  нм,  $\beta_2 = 2,1$  см/ГВт; 2 –  $\lambda = 250$  нм,  $\beta_2 = 2,2$  см/ГВт; 3 –  $\lambda = 235$  нм,  $\beta_2 = 2,0$  см/ГВт; б – спектральная зависимость коэффициента двухфотонного поглощения.

симости коэффициента ДФП, предложенная в [11], дается формулой

$$\beta_2(\omega') = \beta_2(\omega) \left( \frac{\omega^3 n(\omega')}{\omega'^3 n(\omega)} \right)^2 \left( \frac{2\hbar\omega'/E_g - 1}{2\hbar\omega/E_g - 1} \right)^{3/2},$$

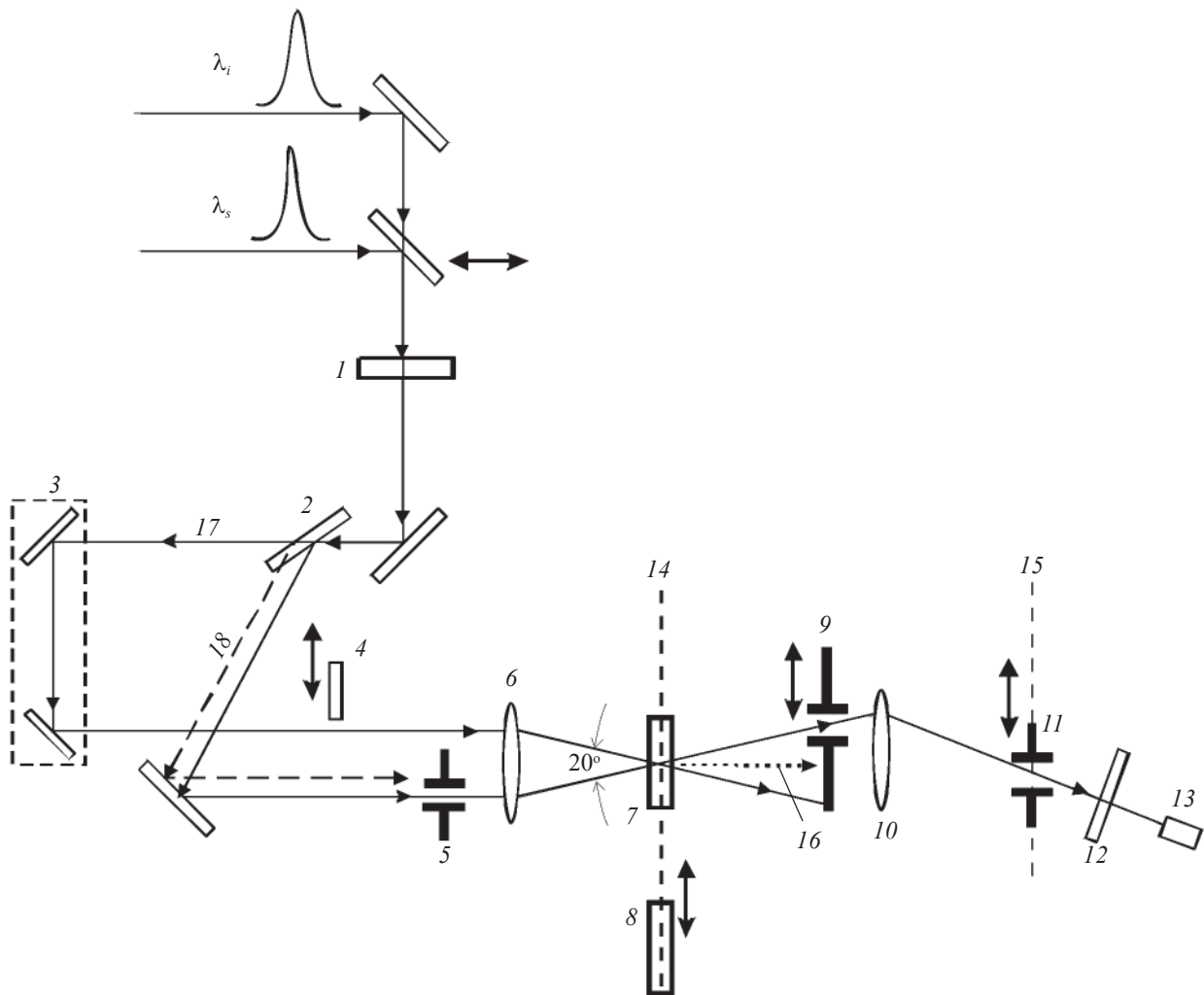
где  $n(\omega')$  и  $n(\omega)$  – показатели преломления на частотах  $\omega$  и  $\omega'$ ,  $E_g$  – ширина запрещенной зоны. Экспериментально определенное значение коэффициента ДФП на длине волны 250 нм составило  $2,2 \pm 0,2$  см/ГВт, что совпадает с данными, полученными ранее на длине волны 248 нм. Расчетная кривая показана на рис. 2б сплошной линией. Как теоретическая кривая, так и экспериментальные данные имеют отчетливый максимум на длине волны 250 нм. Таким образом, можно сделать вывод, что экспериментальные данные для кристалла натурального алмаза находятся в хорошем соответствии с универсальной масштабной формулой для дисперсии двухфотонного поглощения в области, близкой к краю запрещенной зоны.

### Измерение параметров фемтосекундных импульсов в диапазоне 230–810 нм с использованием автокоррелятора, работающего на эффекте прямого двухфотонного поглощения в кристалле алмаза

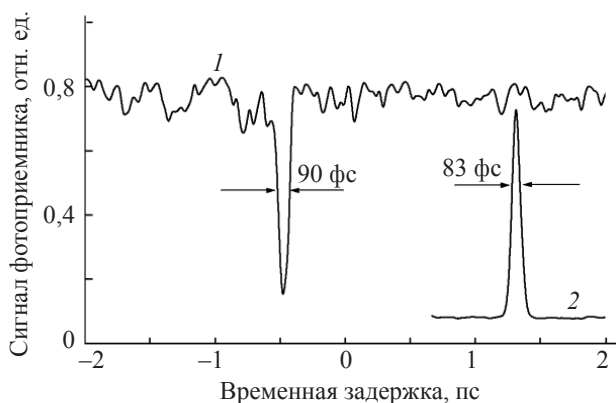
Измерения в ультрафиолетовом и видимом диапазонах проводились по автокорреляционной методике. Схема коррелятора, которая практически без изменений впоследствии использовалась и в измерениях в ИК диапазоне, приведена на рис. 3. Входной пучок разделяется на канал возбуждения и канал зондирования поляризационным делителем, обеспечивающим коэффициент деления в диапазоне 1:1–1:100 без внесения существенных дисперсионных искажений в фазовую структуру измеряемого импульса.

После внесения геометрической разности хода между зондирующим и возбуждающим импульсами параллельные пучки фокусировались в кристалл натурального алмаза типа 2А толщиной 100 мкм. Угол схождения пучков в объеме измерительного кристалла варьировался в пределах  $5^\circ$ – $20^\circ$ . Пространственное перекрытие взаимодействующих импульсов контролировалось по трассам возбуждения люминесценции в кристалле. Изменение задержки приводило к изменению пропускания зондирующего пучка от 90% вне зоны временного перекрытия до 8% при максимальном перекрытии. Пропускание зондирующего пучка контролировалось фотоприемником, установленным за диафрагмой, которая размещалась за кристаллом алмаза.

Достигнутый в наших измерениях высокий контраст полезного сигнала позволял проводить изме-



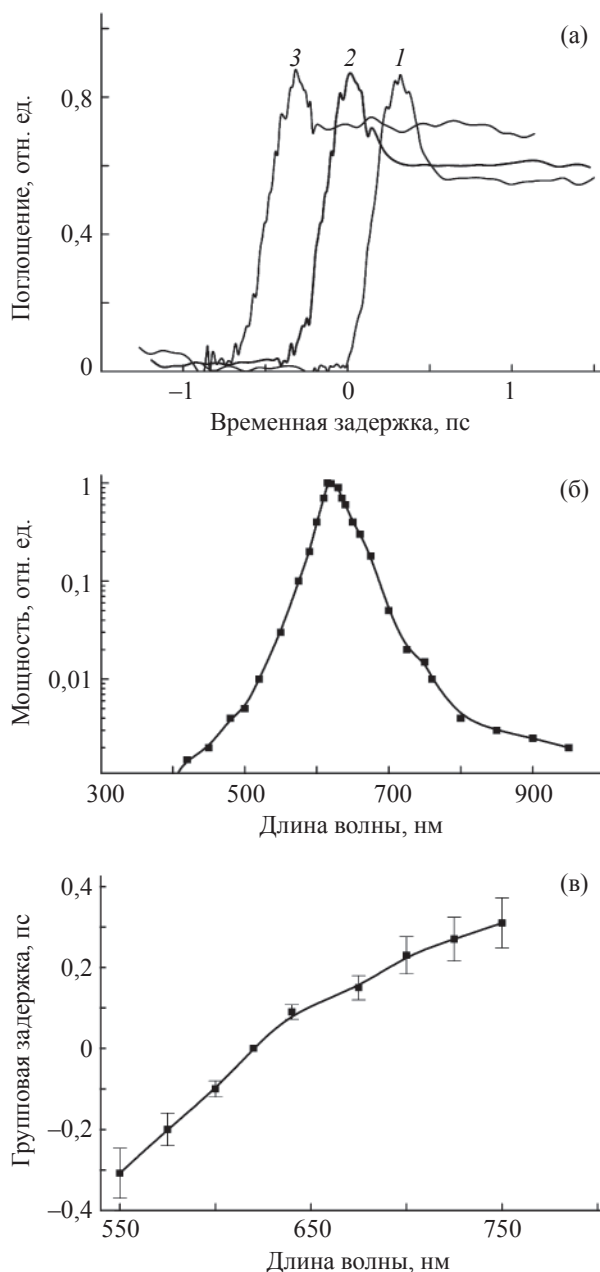
**Рис. 3.** Схема комбинированного коррелятора для аттестации фемтосекундных импульсов в УФ, видимом и ИК диапазонах. 1 – фазовая пластинка, 2 – поляризатор, 3 – линия задержки, 4 – фазовая пластинка; 5, 9, 11 – диафрагма; 6 – фокусирующая линза, 7 – алмаз 2А (толщина 0,1 мм), 8 – кристалл матабората бария (толщина 0,5 мм), 10 – изображающая линза, 12 – фильтр, 13 – фотодиод, 14 – плоскость объекта, 15 – плоскость изображения, 16 – сигнал неколлинеарной второй гармоники, 17 – сигнал *p*-поляризации, 18 – сигнал *s*-поляризации.



**Рис. 4.** Типичные автокорреляционные трассы импульсов. 1 – АКФ, полученная при нелинейном поглощении в алмазе,  $\lambda = 250$  нм; 2 – АКФ, полученная в кристалле бетабората бария при неколлинеарном преобразовании во вторую гармонику,  $\lambda = 500$  нм.

рение длительности импульсов в режиме реального времени (“осциллографический режим”) при обеспечении периодических продольных механических перемещений одного из зеркал автокоррелятора, установленного на пьезоэлемент, вблизи положения, соответствующего нулевой задержке. Это в свою очередь позволяло проводить оперативную настройку лазерной системы на генерацию импульсов высокого оптического качества, соответствующего минимуму фазовой модуляции (“чирпа”) и, соответственно, минимуму длительности импульсов на выходе системы как в видимой, так и в ультрафиолетовой областях.

Записанная в осциллографическом режиме автокорреляционная функция (АКФ) приведена на рис. 4. Контраст АКФ (отношение сигнал/шум) имеет в зависимости от длины волны значения в интервале 10–15, что вполне достаточно для оперативной настройки компрессора и декомпрессора регенеративного усилителя и системы ОРО/ОРА – преобразователи частоты. Минимальная длительность автокорреляционного отклика, полученного в ультрафиолетовом диапазоне, составила 90 фс. Симметричная форма АКФ свидетельствует о том, что преобладающим эффектом в данных условиях является истинное двухфотонное поглощение в кристалле алмаза, а не ступенчатое. Для упрощения предварительной настройки схемы и калибровки линии задержки использовалось входное излучение в диапазоне 520–540 нм и вместо кристалла алмаза устанавливался тонкий (0,1 мм) кристалл бетабората бария, вырезанный таким образом, чтобы без изменения угла схождения опорного и пробного пучков генерировалась неколлинеарная вторая гармоника (260–270 нм).



**Рис. 5.** Результаты исследований. а – кросскорреляционные трассы. 1 –  $\lambda_1 = 550$  нм, 2 – 620 нм, 3 – 750 нм; б – спектр континуума, полученный в образце плавленного кварца (толщина 5 мм, энергия входного импульса 30 мкДж,  $\lambda = 620$  нм, длительность импульса 100 фс); в – зависимость групповой задержки соответствующего спектрального компонента континуума.

Разработанный автокоррелятор был использован при проведении цикла измерений динамики переноса заряда в одиночных органических молекулах класса полипептидов методом времяпролетной масс-спектропии с возбуждением фемтосекундными лазерными импульсами.

## Кросскорреляционные измерения параметров импульсов фемтосекундного континуума

Мы также апробировали описанный коррелятор при определении параметров импульсов светового континуума, возбужденных фемтосекундными импульсами, в видимой и инфракрасной областях.

В качестве опорного сигнала использовались импульсы на длине волны 310 нм. Как правило, импульс фемтосекундного континуума нелинейно промодулирован по фазе и его длительность больше, чем длительность исходного импульса возбуждения. Кросскорреляционные трассы для различных областей спектра, зависимость задержки различных спектральных компонентов  $\tau_D$  приведены на рис. 5. Из рисунка видно, что чирп импульса континуума носит нелинейный характер и задержка между стоксовым и антистоксовым компонентами существенно превышает длительность исходного импульса.

### Заключение

Таким образом, в настоящей работе продемонстрированы возможности использования эффекта двухфотонного поглощения в кристалле натурального алмаза для измерения параметров фемтосекундных импульсов в широком спектральном диапазоне без изменения типа измерительной системы или ее значительной перенастройки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Dadap J.I., Focht G.B., Reitze D.N., Downer M.C.* Two-photon absorption in diamond and its application to ultraviolet femtosecond pulse-width measurement // *Opt. Lett.* 1991. V. 16. № 7. P. 498–501.
2. *Albrecht T.F., Seibert K., Kurz H.* Chirp measurement of large-bandwidth femtosecond optical pulses using two-photon absorption // *Opt. Commun.* 1991. V. 84. P. 223–227.
3. *Roth T., Laenen R.* Absorption of free carriers in diamond determined from the visible to the mid-infrared by femtosecond two-photon absorption spectroscopy // *Opt. Commun.* 2001. V. 189. P. 289–296.
4. *Reuther A., Laubereau A., Nikogosian D.N.* A simple method for the in situ analysis of femtosecond UV pulses in the pump-probe spectroscopy of solutions // *Opt. Commun.* 1997. V. 141. № 3. P. 180–184.
5. *Kovalenko S.A., Dobrjakov A.L., Ruthman J., Ernsting N.* Femtosecond spectroscopy of condensed phases with chirped supercontinuum probing // *Phys. Rev. B.* 1999. V. 59. № 3. P. 2369–2384.
6. *Preuss S., Stuke M.* Subpicosecond ultraviolet laser ablation of diamond: Nonlinear properties at 248 nm and time-resolved characterization of ablation dynamics // *Appl. Phys. Lett.* 1995. V. 67. № 3. P. 338–340.
7. *Van Styrland E.W., Woodall M.A., Vanherzeele H., Soileau M.J.* Energy band-gap dependence of two-photon absorption // *Opt. Lett.* 1985. V. 10. № 10. P. 490–492.
8. *Brodeur A., Chin S.L.* Band-gap dependence of the ultrafast white-light continuum // *Phys. Rev. Lett.* 1998. V. 80. № 20. P. 4406–4409.
9. *Bespalov V.G., Kozlov S.A., Shpolyanskiy Z.A.* Method for analyzing the propagation dynamics of femtosecond pulses with a continuum spectrum in transparent optical media // *JOT.* 2000. V. 67. № 4. P. 303–308.
10. *Dmitriev V., Gurzadyan G., Nikogosyan D.N.* Handbook of Nonlinear Optical Crystals. N.Y.: Springer-Verlag, 1997. 422 p.
11. CVI Laser Optics catalogue. / Albuquerque 385.
12. *Gagarsky S.V., Iglev H.A., Kozlov S.A., Lehr L., Schlag E.W., Shpolansky Yu.A.* Characterization of chirped femtosecond light pulsed in wide spectral range by two-photon absorption cross-correlation // *CLEO-Europe 2001 Conference Digest. Muenchen.* 2001. V. C-NLP242. P. 229.
13. *Boesl U., Weinkauff R., Schlag E.W.* Reflectron time-of-flight mass spectrometry and laser excitation for the analysis of neutrals, ionized molecules and secondary fragments // *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes.* 1992. V. 112. № 2. P. 121–166.
14. *Schlag E.W.* Spectroscopy in our age // *Appl. Phys. B.* 2000. V. 71. № 5. P. 619–621.
15. *Fuss W., Schmid W., Trushin A.* Time-resolved dissociative intense-laser field ionization for probing dynamics: Femtosecond photochemical ring opening of 1,3-cyclohexadiene // *J. Chem. Phys.* 2000. V. 112. № 19. P. 8347–8362.