

На правах рукописи



Шугуров Александр Иванович

**Детектирование терагерцовых волн ультракороткими
лазерными импульсами в толстых электрооптических
кристаллах**

1.3.19. Лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Бакунов Михаил Иванович

Официальные оппоненты: Раевский Алексей Сергеевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Физика и техника оптической связи», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева», г. Нижний Новгород

Назаров Максим Михайлович,
кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории сверхсильных световых полей, федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Национальный исследовательский центр Курчатowski институт», г. Москва

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 17 мая 2023 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета 24.2.340.03 при Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте диссертационного совета по адресу: <https://diss.unn.ru/1326>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.340.03
доктор физ.-мат. наук, доцент



Клюев Алексей Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Импульсное терагерцовое излучение становится инструментом все более широкого круга научных и практических приложений, включающих терагерцовую спектроскопию во временной области [1-3], терагерцовые интроскопию и имиджинг [4-6], неразрушающий контроль композитных материалов и покрытий [7, 8], инспекцию почтовых отправлений [9], настольное ускорение заряженных частиц [10, 11], сверхбыстрое управление динамическими состояниями в веществе и намагниченностью материалов [12, 13] и др. Наиболее распространенные методы генерации и детектирования импульсного терагерцового излучения основаны на нелинейно-оптических преобразованиях фемтосекундных лазерных импульсов ближнего инфракрасного диапазона в электрооптических (квадратично нелинейных) средах или на их взаимодействии с фотопроводящими средами. При этом нелинейно-оптические методы, в целом, имеют большую эффективность и широкополосность.

При детектировании терагерцовых импульсов требуется, как правило, измерить их временную форму (осциллограмму), имеющую пикосекундный масштаб изменений. Это достигается стробированием терагерцовых импульсов более короткими оптическими импульсами фемтосекундных лазеров в электрооптических кристаллах [14, 15] или фотопроводящих антеннах [16]. В стандартной схеме электрооптического стробирования измеряемый терагерцовый импульс и пробный оптический импульс распространяются в кристалле коллинеарно. При этом пробный импульс испытывает изменение поляризации, вызванное наведенным в кристалле под действием электрического поля терагерцового импульса двулучепреломлением (эффект Погкельса). Измеряя с помощью эллисометрической схемы изменение поляризации пробного импульса в зависимости от времени задержки между терагерцовым и пробным импульсами, получают временную зависимость терагерцового электрического поля.

Для эффективного электрооптического стробирования пробный импульс должен двигаться синхронно с фазовым фронтом терагерцовой волны, т.е. групповая скорость оптического импульса должна равняться фазовой скорости терагерцовой волны. При нарушении условия синхронизма эффективное взаимодействие пробного импульса с терагерцовым ограничено длиной когерентности

$$L_{\text{coh}}(\nu) = \frac{c}{2\nu|n_g - n_{\text{THz}}(\nu)|},$$

где n_g – оптический групповой индекс кристалла, $n_{\text{THz}}(\nu)$ – показатель преломления кристалла на терагерцовой частоте ν , c – скорость света в вакууме. Для выполнения условия $n_g \approx n_{\text{THz}}$ в измеряемом диапазоне терагерцовых частот необходимо подбирать кристалл под длину волны используемого лазера. Так, например, кристалл ZnTe используется для электрооптического стробирования терагерцовых волн импульсами титан-сапфирового лазера с длиной волны $\lambda \approx 0,8$ мкм. При этом синхронизм достигается на частоте $\nu \approx 2$ ТГц, и длина ко-

герентности является довольно большой ($L_{\text{coh}} \geq 2$ мм) в интервале частот $\nu \leq 2$ ТГц [17, 18]. В кристаллах GaP и CdTe оптико-терагерцовый синхронизм может быть достигнут для излучения иттербиевого лазера с $\lambda \approx 1,06$ мкм [19]. Однако не существует кристаллов, способных обеспечить синхронизм на длине волны $\lambda \approx 1,56$ мкм, соответствующей эрбиевым волоконным лазерам, удобным для использования в дешевых и компактных терагерцовых спектрометрах [20, 21].

Среди электрооптических кристаллов GaAs имеет наибольшую длину волны синхронизма ($\lambda \approx 1,33$ мкм [19]), тем не менее на длине волны волоконного лазера ($\lambda \approx 1,56$ мкм) длина когерентности в GaAs составляет всего лишь 1 мм при $\nu = 1,5$ ТГц и уменьшается до 0,5 мм при $\nu = 2,5$ ТГц [19], что приводит к необходимости использовать тонкие кристаллы. При малой толщине кристалла снижается чувствительность детектирования и, что даже важнее, приходится ограничивать временное окно измерений, чтобы отфильтровать эхо-сигналы, возникающие из-за переотражений пробного импульса от граней кристалла. Присутствие во временном окне, наряду с основным сигналом, эхо-сигналов приводило бы к паразитной изрезанности терагерцового спектра и ограничивало бы возможности применения измерений для спектроскопических целей [22, 23]. Например, из кристалла GaAs толщиной 1 мм первый эхо-сигнал выходит через 20 пс после основного сигнала [22]. Ограничение временного окна интервалом в 20 пс снижает спектральное разрешение измерений до ~ 50 ГГц ($\sim 1/20$ пс⁻¹) и тем самым ограничивает возможности их спектроскопических применений.

В работе [24] был предложен универсальный, не требующий подбора типа кристалла под длину волны пробного импульса, метод достижения оптико-терагерцового синхронизма при электрооптическом стробировании терагерцовых волн лазерными импульсами. Идея метода основана на обращении явления черенковского излучения терагерцовых волн движущейся нелинейной поляризацией, наводимой ультракоротким лазерным импульсом в среде с квадратичной нелинейностью [25]. В обращенном варианте эффекта Черенкова терагерцовая волна запускается под черенковским углом к пробному оптическому пучку, так что пробный импульс в ходе распространения как бы скользит вдоль одного и того же терагерцового волнового фронта, что и обеспечивает своеобразный (неколлинеарный) синхронизм. На языке длины когерентности, которая для неколлинеарной геометрии записывается как

$$L_{\text{coh}}(\nu) = \frac{c}{2\nu |n_{\text{THz}}(\nu) \cos \beta - n_g|}$$

(β – угол между оптическим и терагерцовым пучками), неколлинеарный синхронизм соответствует расходимости $L_{\text{coh}} \rightarrow \infty$ при $\beta \rightarrow \beta_{\text{Ch}}$, где черенковский угол β_{Ch} определяется соотношением $\cos \beta_{\text{Ch}} = n_g/n_{\text{THz}}$. Неколлинеарное эллипсометрическое детектирование терагерцовых волн импульсами титан-сапфирового лазера ($\lambda \approx 0,8$ мкм) было экспериментально продемонстрировано в кристалле LiNbO₃ с $n_g \approx 2,25$ и $n_{\text{THz}} \approx 4,75$ (при $\nu \approx 0,5$ ТГц) [24]. Из-за большого угла $\beta_{\text{Ch}} \approx 63^\circ$ терагерцовое излучение заводилось в кристалл через боковую грань с помощью кремниевой призмы. По эффективности неколлинеарная схема оказа-

лась сравнимой со стандартной коллинеарной схемой на основе кристалла ZnTe. Однако большое собственное двулучепреломление кристалла LiNbO_3 потребовало существенного усложнения оптической схемы для его компенсации [24].

Неколлинеарная геометрия оптико-терагерцового нелинейного взаимодействия дает возможность проводить электрооптическое детектирование терагерцовых волн без использования эллипсометрической схемы. Как показано в работах [26, 27], вклады нелинейных процессов генерации разностной и суммарной частот в амплитуду пробного оптического пучка, практически компенсирующие друг друга в коллинеарной геометрии, оказываются пространственно разделенными в неколлинеарной. Это приводит к модуляции интенсивности в оптическом пучке, пропорциональной величине терагерцового поля. Таким образом, возникает возможность проводить электрооптическое стробирование терагерцовых волн просто по измерению интенсивности нужным образом выбранной части пробного пучка без использования поляризационной оптики, что существенно упрощает схему детектирования. Как показано в работе [26] с использованием структуры в виде пластинки кристалла LiNbO_3 с прикрепленной к нему кремниевой призмой для ввода терагерцового излучения, эффективности неэллипсометрического и эллипсометрического методов измерений в неколлинеарной схеме примерно одинаковы.

Таким образом, основные преимущества неколлинеарных схем электрооптического детектирования, как эллипсометрической, так и неэллипсометрической, состоят в следующем. Во-первых, такие схемы способны обеспечить оптико-терагерцовый синхронизм при любой длине волны пробного оптического пучка без необходимости подбора электрооптического кристалла, просто путем задания нужного (черенковского) угла между оптическим и терагерцовым пучками. Во-вторых, возможность обеспечить большую длину когерентности в неколлинеарных схемах позволяет использовать толстые (сантиметровой толщины) кристаллы и проводить измерения в больших (порядка сотен пс) временных окнах, достигая тем самым высокого (порядка нескольких ГГц) спектрального разрешения измерений. Так, например, при использовании кристалла LiNbO_3 толщиной 1 см временной интервал до прихода первого эхо-сигнала составляет ~ 160 пс, что соответствует спектральному разрешению ~ 6 ГГц.

Кристалл LiNbO_3 , в котором были впервые реализованы неколлинеарные схемы электрооптического детектирования терагерцовых волн [24, 26], имеет ряд недостатков. Сильное собственное двулучепреломление кристалла препятствует эллипсометрическим измерениям наведенной за счет эффекта Пококельса деполяризации пробного пучка в схеме с использованием наибольшей компоненты тензора электрооптических коэффициентов кристалла [24]. В этой схеме пробный оптический импульс распространяется перпендикулярно кристаллографической оси [001] и поляризован под углом 45° к этой оси. Из-за большой разницы групповых индексов обыкновенной (2,3) и необыкновенной (2,2) волн пакеты этих волн пространственно разделяются после прохождения короткого расстояния в кристалле ($\sim 0,3$ мм при длительности пробного импульса 100 фс), что делает невозможными эллипсометрические измерения на выходе их кристалла. Для компенсации паразитного эффекта собственного двулучепреломления требуется зна-

чительное усложнение экспериментальной схемы [24].

Еще одним недостатком кристалла LiNbO_3 является большое значение черенковского угла $\beta_{\text{Сч}} \approx 63^\circ$. Это, во-первых, приводит к необходимости использовать согласующую (кремниевую) призму для ввода терагерцового излучения в кристалл [24], а во-вторых, ограничивает область перекрытия пробного и терагерцового пучков, уменьшая тем самым длину (и эффективность) оптико-терагерцового взаимодействия. Кроме того, кристалл LiNbO_3 имеет сильное поглощение ($>20 \text{ см}^{-1}$ [28]) на частотах выше 1 ТГц.

В связи с вышесказанным представляет интерес исследование возможностей усовершенствования неколлинеарных схем электрооптического детектирования терагерцовых волн за счет использования в них других кристаллов, прежде всего GaAs, и других кристаллографических ориентаций кристалла LiNbO_3 , а также за счет увеличения толщины кристаллов.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является развитие нелинейно-оптических методов измерения временной формы импульсного терагерцового излучения в условиях неколлинеарного (черенковского) синхронизма пробного оптического и терагерцового импульсов в электрооптических кристаллах сантиметровой толщины, обеспечивающих высокое (до нескольких гигагерц) спектральное разрешение измерений.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка метода неколлинеарного эллипсометрического детектирования терагерцовых волн в кристаллах GaAs сантиметровой толщины;
- разработка метода неколлинеарного неэллипсометрического детектирования терагерцовых волн в кристаллах GaAs сантиметровой толщины;
- разработка метода неколлинеарного эллипсометрического детектирования терагерцовых волн в LiNbO_3 в конфигурации подавленного собственного двулучепреломления кристалла.

Научная новизна работы

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Впервые предложены схемы неколлинеарного электрооптического детектирования терагерцовых волн фемтосекундными лазерными импульсами с длиной волны 1,56 мкм в кристаллах GaAs. В отличие от известных схем на основе кристалла LiNbO_3 в предложенных схемах не используются согласующие призмы – терагерцовый и пробный пучки заводятся в кристалл непосредственно через одну из граней кристалла.

2. Впервые экспериментально продемонстрировано неколлинеарное эллипсометрическое детектирование временной формы терагерцовых волн импульсами волоконного фемтосекундного лазера (с длиной волны 1,56 мкм) в кристалле GaAs сантиметровой толщины. Достигнуто высокое спектральное разрешение (<10 ТГц) и на порядок большая эффективность по сравнению со

стандартным методом коллинеарного эллипсометрического детектирования в кристаллах GaAs (суб)миллиметровой толщины. Найдены оптимальные параметры неколлинеарной схемы (толщина кристалла, угол между оптическим и терагерцовым пучками, поляризации пучков).

3. Впервые экспериментально продемонстрировано неколлинеарное неэллипсометрическое детектирование временной формы терагерцовых волн импульсами волоконного фемтосекундного лазера (с длиной волны 1,56 мкм) в кристалле GaAs сантиметровой толщины, основанное на измерении интенсивности пробного оптического пучка при ее нелинейно-оптической модуляции электрическим полем терагерцовой волны. Экспериментально исследована зависимость выходного электрооптического сигнала и его спектра от ширины пробного оптического пучка.

4. Предложен и экспериментально продемонстрирован метод неколлинеарного эллипсометрического детектирования временной формы терагерцовых волн фемтосекундными оптическими импульсами в кристалле LiNbO₃, не чувствительный к паразитному эффекту сильного собственного двулучепреломления кристалла LiNbO₃ и работоспособный при различной длине волны пробного оптического пучка. Экспериментально подтверждена работоспособность метода при использовании в качестве источника оптического излучения фемтосекундных лазеров с длиной волны 0,8 мкм и 1,56 мкм.

Практическая значимость работы

Разработанные в диссертации методы нелинейно-оптического измерения временной формы импульсного терагерцового излучения обеспечивают высокое спектральное разрешение и могут быть использованы в целях терагерцовой спектроскопии во временной области (THz-TDS).

Предложенные схемы детектирования на основе кристалла GaAs предназначены для работы с волоконными фемтосекундными лазерами и вследствие этого могут быть использованы в компактных терагерцовых спектрометрах.

Предложенный метод неколлинеарного неэллипсометрического детектирования временной формы терагерцовых волн импульсами фемтосекундного волоконного лазера в кристалле GaAs сантиметровой толщины позволяет проводить эффективное электрооптическое стробирование с высоким спектральным разрешением без использования поляризационной оптики и балансного детектора, что упрощает схему детектирования.

Предложенный метод неколлинеарного эллипсометрического детектирования временной формы терагерцовых волн в структуре, состоящей из кристалла LiNbO₃ специальной кристаллографической ориентации и прикрепленной к нему кремниевой призмы, обеспечивает высокие характеристики детектирования при различной длине волны стробирующих оптических импульсов (от 0,8 до 1,56 мкм), что позволяет применять данную структуру в качестве универсального детектирующего элемента терагерцовых спектрометров, совместимых с различными лазерными источниками.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Неколлинеарная эллипсометрическая схема электрооптического стробирования временной формы терагерцовых волн импульсами фемтосекундного волоконного лазера (с длиной волны 1,56 мкм) в кристаллах GaAs сантиметровой толщины позволяет проводить измерения с широким (до сотен пс) временным окном без паразитного влияния эхо-сигналов, обеспечивая тем самым высокое (до нескольких ГГц) спектральное разрешение измерений. При этом эффективность (динамический диапазон) измерений на порядок превышает эффективность стандартной коллинеарной схемы с кристаллами GaAs (суб)миллиметровой толщины. Оптимальные условия измерений с помощью неколлинеарной эллипсометрической схемы на основе кристалла GaAs достигаются при следующих параметрах: ориентации кристалла $\langle 110 \rangle$, толщине кристалла 1-3 см, угле падения пробного оптического пучка из воздуха на входную грань кристалла 42° – 50° при нормальном падении терагерцового пучка на границу, поляризации терагерцового пучка ортогонально кристаллографической оси [001] кристалла и поляризации пробного оптического пучка параллельно или ортогонально оси [001].

2. Электрооптическое стробирование временной формы терагерцовых волн импульсами фемтосекундного волоконного лазера (с длиной волны 1,56 мкм) может быть проведено в кристаллах GaAs неэллипсометрически – путем измерения интенсивности части пробного оптического пучка при ее нелинейно-оптической модуляции электрическим полем терагерцовой волны в условиях неколлинеарного распространения терагерцового и оптического излучений. Использование кристаллов сантиметровой толщины обеспечивает высокое (до нескольких ГГц) спектральное разрешение стробирования. Эффективность неэллипсометрического неколлинеарного метода электрооптического стробирования в кристалле GaAs сравнима с эффективностью эллипсометрического неколлинеарного метода для того же кристалла. Неэллипсометрическая неколлинеарная схема измерений обладает свойствами полосового фильтра, частотная характеристика которого определяется шириной пробного пучка. Существует оптимальная ширина пучка, обеспечивающая минимальное искажение спектра измеряемого терагерцового сигнала, например, для сигнала от фотопроводящей антенны (с максимумом спектра на частоте 0,5 ТГц) оптимальной является ширина пучка ~ 120 мкм.

3. Неколлинеарная схема с распространением пробного оптического импульса вдоль z -оси кристалла LiNbO_3 , а измеряемого терагерцового импульса под углом около 63° к этой оси позволяет обеспечить оптико-терагерцовый синхронизм и подавить паразитный эффект сильного собственного двулучепреломления кристалла LiNbO_3 , препятствующий эллипсометрическому измерению терагерцового поля. Данная схема может быть реализована на основе структуры, состоящей из пластины LiNbO_3 толщиной несколько миллиметров и размерами большой грани $\sim (1 \times 1)$ см² и прикрепленной к этой грани кремниевой призмы с углом 41° при основании. Пробный пучок заводится в пластину через ее торец вдоль z -оси кристалла, терагерцовый пучок заводится в пластину через кремниевую призму под углом 63° к пробному пучку. Оптимальная поляризация

терагерцового пучка – вдоль x -оси кристалла, а пробного пучка – вдоль x -оси или y -оси. Модуляция поляризации пробного пучка терагерцовым полем за счет эффекта Погкельса регистрируется на выходе из пластины эллипсометрическим методом. Сантиметровая дистанция распространения пробного импульса в пластине позволяет проводить электрооптическое стробирование терагерцовых импульсов с широким временным окном, обеспечивая тем самым высокое (до нескольких ГГц) спектральное разрешение измерений. Данная структура не чувствительна к длине волны пробного оптического пучка и может быть использована с различными фемтосекундными лазерами, например, титан-сапфировым (длина волны 0,8 мкм) и волоконным эрбиевым (длина волны 1,56 мкм).

Апробация результатов работы и публикации

Диссертационная работа выполнена на кафедре общей физики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского в 2014-2022 годах. По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, [A1–A3], 2 патента на изобретение [A4, A5], а также 9 работ в сборниках трудов конференций [A6–A14].

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: The 8th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2021 (IW-FIRT 2021, Фукуи, Япония, 2021), The 19th International Conference on Laser Optics 2020 (ICLO 2020, Санкт-Петербург, 2020), IX международной конференции по фотонике и информационной оптике (Москва, 2020), The 8th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUSE 2019, Нижний Новгород, 2019), 3rd International Conference Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (Tera-2018, Нижний Новгород, 2018), International Conference on Ultrafast Optical Science and Ultrafast Light (UltrafastLight-2018, Москва, 2018), 6th EOS Topical Meeting on Terahertz Science & Technology (TST 2018, Берлин, Германия, 2018), VII международной конференции по фотонике и информационной оптике (Москва, 2018), 2015 European Conference on Lasers and Electro-Optics - European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2015, Мюнхен, Германия, 2015), XVIII научной конференции по радиофизике (Нижний Новгород, 2014).

Диссертационная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 0729-2020-0035).

Достоверность результатов работы

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением апробированных экспериментальных, теоретических и численных методов, согласованием результатов диссертационной работы в частных случаях с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными других авторов, а также апробацией результатов на солидных международных конференциях и

публикациями в высокорейтинговых международных рецензируемых журналах.

Методология и методы исследования

Использованные в работе экспериментальные установки основаны на апробированной общей методологии терагерцовой спектроскопии во временной области, в соответствии с которой лазерный импульс разделяется на две части, одна из которых используется в качестве импульса накачки для генерации терагерцового импульса, в другая – в качестве пробного импульса для детектирования [15]. В качестве источников оптических импульсов использовались фемтосекундные лазеры C-Fiber (Menlo Systems, Германия) с длиной волны 1,56 мкм и Tsunami (Spectra-Physics, США) с длиной волны 0,8 мкм. Терагерцовое излучение генерировалось с помощью фотопроводящей антенны Tera 15-SL25-FC (Menlo Systems, Германия) при воздействии на нее лазером C-Fiber, а также при накачке лазером Tsunami оптико-терагерцового преобразователя в виде пластины кристалла LiNbO₃, расположенной между двух кремниевых призм полного внутреннего отражения [29]. Измерения модуляции пробного пучка проводились методом синхронного детектирования. Мощность терагерцового излучения измерялась с помощью ячейки Голлея GC-1D (Tydex, Россия), мощность зондирующего пучка – с помощью пироэлектрического детектора S320C (Thorlabs, США). Ширина терагерцового пучка измерялась методом «knife-edge», для измерения ширины оптического пучка использовалась CCD-камера pco.pixelfly usb (Excelitas PCO GmbH, Германия). Длительность оптических импульсов измерялась автокоррелятором Mini TRA (APE, Германия). Использовалось оптомеханическое оборудование компаний Thorlabs (США), Standa (Литва), Edmund Optics (США), ЭЛАН (Россия). Расчеты спектров измеренных электрооптических сигналов проводились методом быстрого преобразования Фурье.

Личный вклад автора

Все экспериментальные исследования, включая проектирование и сборку экспериментальных установок, проводились автором лично. Теоретические расчеты и анализ полученных экспериментальных результатов проводились автором совместно с научным руководителем Бакуновым М.И. (все главы), а также соавторами Машковичем Е.А. (все главы), Бодровым С. Б. (главы 2 и 3) и Абрамовским Н.А. (глава 3).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 59 наименований и списка публикаций по диссертации из 14 наименований. Общий объем диссертации составляет 79 страниц, включая 17 рисунков, список литературы из 59 наименований на 7 страницах и список публикаций по диссертации из 14

наименований на 2 страницах.

Краткое содержание диссертации

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируется цель исследования, указываются научная новизна и практическая значимость диссертации, кратко описывается ее содержание, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена разработке метода эллипсометрического детектирования терагерцевых волн импульсами фемтосекундного волоконного

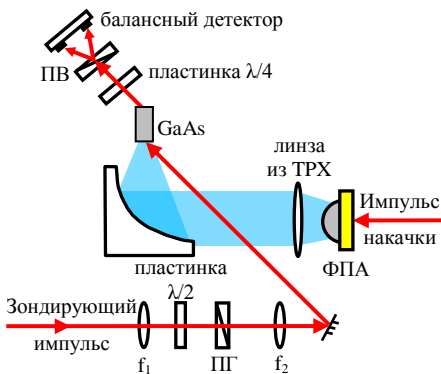


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для неcollinearного эллипсометрического детектирования терагерцевых волн импульсами волоконного лазера в кристалле GaAs.

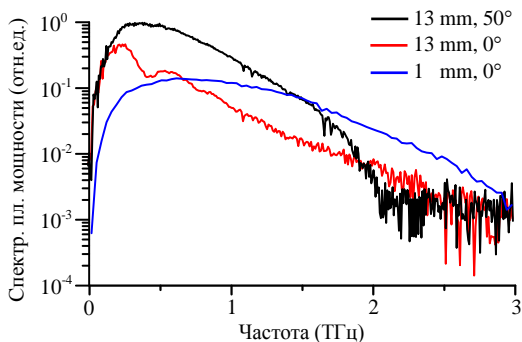


Рис. 2. Спектры сигналов, полученные при использовании кристаллов различной толщины в collinearной (0°) и неcollinearной (50°) схемах детектирования.

лазера в толстых (сантиметровой толщины) кристаллах GaAs в условиях неcollinearного оптико-терагерцевого синхронизма. Проведен анализ факторов, влияющих на эффективность детектирования в неcollinearной геометрии. Приведена схема неcollinearного детектирования и описание экспериментальной установки. Приведены результаты экспериментов по неcollinearному детектированию в кристаллах GaAs различной толщины в сравнении с результатами, полученными с помощью стандартной collinearной схемы. Экспериментально определены оптимальные значения толщины кристалла и угла ввода пробного пучка в кристалл.

В п. 1.1 даны описания схемы неcollinearного детектирования и экспериментальной установки (рис. 1), приведены параметры терагерцевого и пробного оптического пучков.

В п. 1.2 проведен теоретический анализ зависимости длины когерентности оптико-терагерцевого взаимодействия от частоты терагерцевой волны при различных углах между

терагерцовым и пробным пучками, введена и оценена длина области пересечения пучков, обоснована несущественность поглощения терагерцового излучения в кристаллах GaAs сантиметровой толщины, рассмотрено влияние факторов дисперсионного расплывания пробного импульса и ширины пробного пучка на спектральную полосу детектирования. Показано, что при толщине кристалла, превышающей длину оптико-терагерцового взаимодействия, результат электрооптического детектирования не зависит от степени фокусировки терагерцового пучка.

В п. 1.3 приведены экспериментальные спектры электрооптических сигналов, полученных неколлинеарным эллипсометрическим методом при различной толщине кристалла GaAs и различных углах ввода пробного пучка в кристалл. Определены оптимальные значения толщины и угла ввода. Дано сравнение спектров, полученных в кристаллах GaAs неколлинеарным и коллинеарным методами (рис. 2), указаны преимущества неколлинеарного метода.

В п. 1.4 сделаны выводы по первой главе.

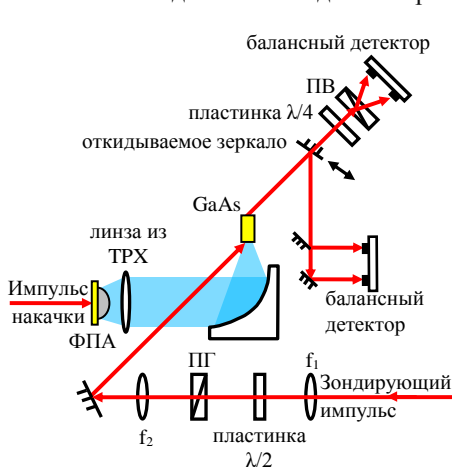


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для неколлинеарного неэллипсометрического детектирования терагерцовых волн импульсами волоконного лазера в кристалле GaAs и сравнения с неколлинеарным эллипсометрическим методом.

проведено их сравнение с результатами эллипсометрических измерений, а также с теоретическими предсказаниями.

В п. 2.1 приведена экспериментальная схема (рис. 3), позволяющая проводить как неэллипсометрическое, так и эллипсометрическое неколлинеарное детектирование терагерцовых волн импульсами фемтосекундного волоконного лазера. Дано описание экспериментальной установки, приведены характеристики используемых приборов и оптических элементов. Описан способ пере-

Вторая глава посвящена разработке неэллипсометрического, основанного на измерении модуляции интенсивности в пробном пучке, метода электрооптического детектирования терагерцовых волн импульсами фемтосекундного волоконного лазера в толстых (сантиметровой толщины) кристаллах GaAs в условиях неколлинеарного оптико-терагерцового синхронизма. Приведена схема детектирования и описание экспериментальной установки. Определены теоретически и подтверждены экспериментально оптимальные поляризации терагерцового и пробного оптического пучков относительно кристаллографических осей кристалла GaAs. Приведены экспериментальные осциллограммы электрооптических сигналов и их спектры, про-

ключения экспериментальной схемы между режимами неэллипсометрического и эллипсометрического детектирования.

В п. 2.2 проведен теоретический анализ зависимости электрооптического сигнала от поляризаций терагерцового и пробного пучков относительно кристаллографических осей кристалла GaAs, приведены экспериментальные данные, согласующиеся с анализом. Приведены электрооптические сигналы (рис. 4а), полученные методом неэллипсометрического неколлинеарного детектирования при фокусировке пробного пучка в пятна различных диаметров. Показано, что форма электрооптического сигнала, полученного методом неэллипсометрического электрооптического стробирования, близка к производной по времени от сигнала, полученного методом эллипсометрического стробирования. Проведено сравнение соответствующих спектров (рис. 4б). Дано объяснение формы спектров с привлечением теоретических результатов работы [27].

В п. 2.3 сделаны выводы по второй главе.

Третья глава посвящена разработке неколлинеарного эллипсометрического метода электрооптического детектирования терагерцовых волн фемтосекундными лазерными импульсами в кристалле LiNbO₃ в конфигурации с распространением пробного импульса вдоль z-оси кристалла, обеспечивающей подавление паразитного эффекта собственного двулучепреломления кристалла. Экспериментально продемонстрирована работоспособность метода при двух длинах волн пробного импульса – 1,5 мкм и 0,8 мкм. Проведено сравнение с детектированием с помощью фотопроводящей антенны и кристалла GaAs.

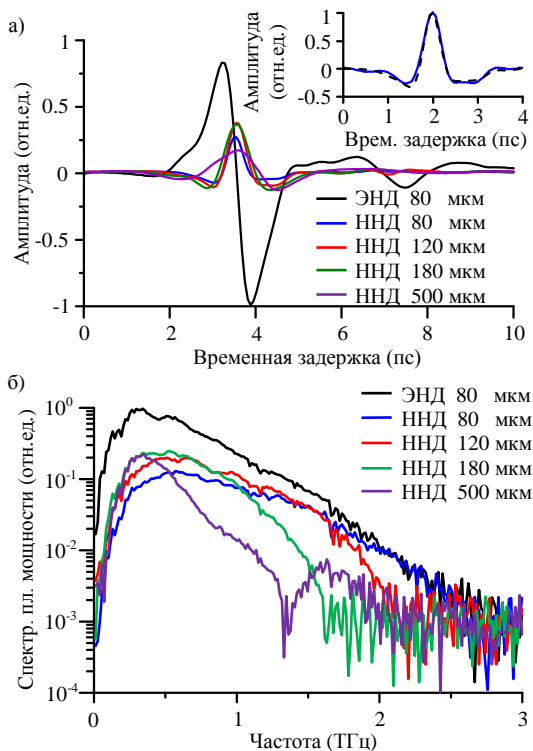


Рис. 4. а) Осциллограммы сигналов и б) их спектры, полученные методом неэллипсометрического неколлинеарного детектирования (ННД) при различном диаметре пробного пучка. Для сравнения показаны результаты эллипсометрического неколлинеарного детектирования (ЭНД). На вставке: нормированные ННД сигнал при диаметре пробного пучка 80 мкм (сплошная линия) и продифференцированный по времени ЭНД сигнал (штриховая линия).

В п. 3.1 приведены экспериментальные схемы детектирования терагерцовых волн импульсами фемтосекундного волоконного лазера с длиной волны 1,5 мкм (рис. 5а) и импульсами титан-сапфирового лазера с длиной волны 0.8 мкм (рис. 5б) в структуре, состоящей из кристалла LiNbO_3 и прикрепленной к нему кремниевой призмы. Дано описание структуры, приведены характеристики используемых приборов и оптических элементов.

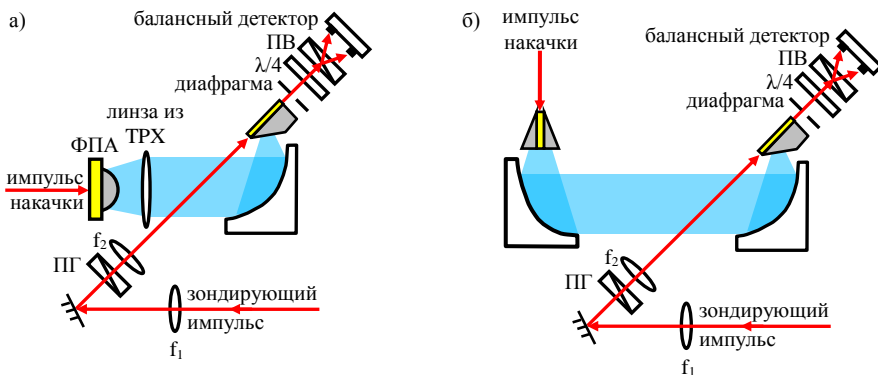


Рис. 5. Схемы экспериментальных установок для неколлинеарного эллипсометрического детектирования терагерцовых волн в кристалле LiNbO_3 с различными лазерами: а) волоконным и б) титан-сапфировым.

В п. 3.2 дано теоретическое обоснование выбора поляризаций терагерцового и пробного пучков, а также угла при основании кремниевой призмы.

В п. 3.3 приведены результаты экспериментов по детектированию терагерцовых волн в структуре с кристаллом LiNbO_3 при использовании в качестве источника света волоконного фемтосекундного лазера с длиной волны 1,55 мкм и титан-сапфирового фемтосекундного лазера с длиной волны

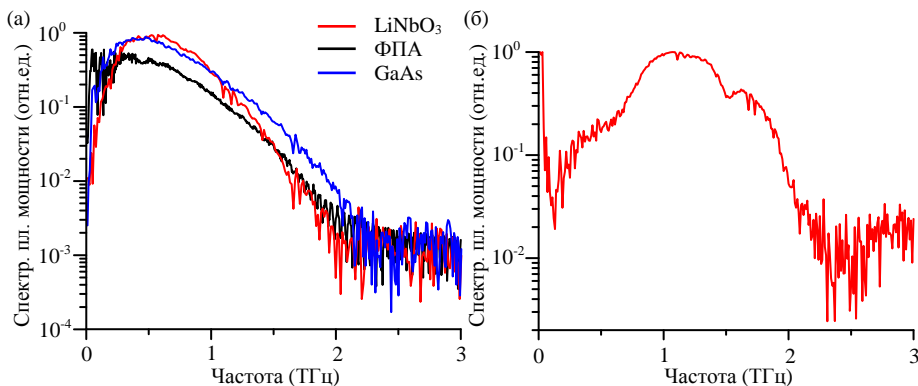


Рис. 6. Спектры сигналов, полученных методом эллипсометрического неколлинеарного детектирования терагерцовых волн в кристалле LiNbO_3 с различными лазерами: а) волоконным и б) титан-сапфировым.

0,8 мкм. Приведены осциллограммы электрооптических сигналов и соответствующие спектры (рис. 6). Для схемы с волоконным лазером проведено сравнение осциллограммы и спектра с результатами детектирования в кристалле GaAs и фотопроводящей антенне (ФПА).

В пункте 3.4 сделаны выводы по третьей главе.

В заключении представлены основные результаты диссертации.

Основные результаты

1. Экспериментально продемонстрировано неколлинеарное эллипсометрическое детектирование терагерцовых волн фемтосекундными импульсами эрбиевого волоконного лазера с длиной волны 1,56 мкм в кристалле GaAs сантиметровой толщины. Показано, что использование неколлинеарной схемы и толстого кристалла позволяет проводить измерения с широким (>100 пс) временным окном, обеспечивающим высокое (<10 ГГц) спектральное разрешение измерений. Эффективность детектирования при этом на порядок превышает эффективность стандартного метода коллинеарного эллипсометрического детектирования в кристаллах GaAs (суб)миллиметровой толщины. Определены оптимальные условия измерений с помощью неколлинеарной эллипсометрической схемы на основе кристалла GaAs (ориентация и толщина кристалла, угол падения пробного пучка на входную грань кристалла, поляризации терагерцового и пробного пучков).

2. Разработан метод неэллипсометрического детектирования терагерцовых волн импульсами волоконного фемтосекундного лазера в кристалле GaAs сантиметровой толщины, основанный на измерении интенсивности части пробного оптического пучка при ее нелинейно-оптической модуляции электрическим полем терагерцовой волны в условиях неколлинеарного распространения терагерцового и оптического излучений. Работоспособность метода продемонстрирована экспериментально. Достигнуто высокое (<10 ГГц) спектральное разрешение детектирования. Показано, что существует оптимальная ширина пучка, обеспечивающая минимальное искажение спектра измеряемого терагерцового сигнала, в частности, для сигнала от фотопроводящей антенны (с максимумом спектра на частоте 0,5 ТГц) оптимальной является ширина пучка ~ 120 мкм. Показано, что эффективность неэллипсометрического неколлинеарного метода электрооптического детектирования в кристалле GaAs сравнима с эффективностью эллипсометрического неколлинеарного метода для того же кристалла.

3. Предложен и экспериментально продемонстрирован метод неколлинеарного эллипсометрического детектирования временной формы терагерцовых волн фемтосекундными оптическими импульсами в кристалле LiNbO_3 , не чувствительный к паразитному эффекту сильного собственного двулучепреломления кристалла LiNbO_3 и совместимый с лазерными источниками различной длины волны. С помощью структуры в виде пластины кристалла LiNbO_3 определенной кристаллографической ориентации толщиной несколько миллиметров и

размерами большой грани $\sim(1 \times 1)$ см² и прикрепленной к этой грани кремниевой призмы с углом 41° при основании экспериментально подтверждена работоспособность метода при использовании в качестве источника оптического излучения фемтосекундных лазеров с длиной волны 0,8 мкм и 1,56 мкм. Достигнуто высокое (в несколько ГГц) спектральное разрешение детектирования.

Список литературы

1. J. Neua and C.A. Schmuttenmaer, "Tutorial: An introduction to terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS)," *J. Appl. Phys.* **124**, 231101 (2018).
2. K. Reimann, M. Woerner, and T. Elsaesser, "Two-dimensional terahertz spectroscopy of condensed-phase molecular systems," *J. Chem. Phys.* **154**, 120901 (2021).
3. X. Fu, Y. Liu¹, Q. Chen, Y. Fu. and T. J. Cui, "Applications of Terahertz Spectroscopy in the Detection and Recognition of Substances," *Front. Phys.* **10**, 869537 (2022).
4. Q. Wang, L. Xie, and Y. Ying, Overview of imaging methods based on terahertz time-domain spectroscopy, *Appl. Spectrosc. Rev.* **57**, 249 (2022).
5. A. D'Arco, M. Di Fabrizio, V. Dolci, M. Petrarca, and S. Lupi, "THz Pulsed Imaging in Biomedical Applications," *Condens. Matter* **5**, 25 (2020).
6. J.-P. Guillet, M. Roux, K. Wang, X. Ma, F. Fauquet, H. Balacey, B. Recur, F. Darracq, and P. Mounaix, "Art Painting Diagnostic Before Restoration with Terahertz and Millimeter Waves," *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **38**, 369 (2017).
7. F. Ellrich, M. Bauer, N. Schreiner, A. Keil, T. Pfeiffer, J. Klier, S. Weber, J. Jonuscheit, F. Friederich, and D. Molter, "Terahertz Quality Inspection for Automotive and Aviation Industries," *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **41**, 470 (2020).
8. S. Zhong, "Progress in terahertz nondestructive testing: A review," *Front. Mech. Eng.* **14**, 273 (2019).
9. D. Molter, D. Hübsch, T. Sprenger, K. Hens, K. Nalpantidis, F. Platte, G. Torosyan, R. Beigang, J. Jonuscheit, G. von Freymann, and F. Ellrich, "Mail Inspection Based on Terahertz Time-Domain Spectroscopy," *Appl. Sci.* **11**, 950 (2021).
10. D. Zhang, A. Fallahi, M. Hemmer, H. Ye, M. Fakhari, Y. Hua, H. Cankaya, A.-L. Calendron, L.E. Zapata, N.H. Matlis, and F.X. Kärtner, "Femtosecond phase control in high-field terahertz-driven ultrafast electron sources," *Optica* **6**, 872 (2019).
11. H. Xu, L. Yan, Y. Du, W. Huang, Q. Tian, R. Li, Y. Liang, S. Gu, J. Shi, and C. Tang, "Cascaded high-gradient terahertz-driven acceleration of relativistic electron beams," *Nat. Photon.* **15**, 426 (2021).
12. P. Salén, M. Basini, S. Bonetti, J. Hebling, M. Krasilnikov, A.Y. Nikitin, G. Shamuilov, Z. Tibai, V. Zhaunerchyk, and V. Goryashko, "Matter manipulation with extreme terahertz light: Progress in the enabling THz technology," *Phys. Rep.* **836-837**, 1 (2019).

13. E.A. Mashkovich, K.A. Grishunin, R.M. Dubrovin, A.K. Zvezdin, R.V. Pisarev, and A.V. Kimel, "Terahertz light-driven coupling of antiferromagnetic spins to lattice," *Science* **374**, 1608 (2021).
14. J.A. Valdmanis and G.A. Mourou, "Subpicosecond electrooptic sampling: principles and applications," *IEEE J. Quantum Electron.* **22**, 69 (1986).
15. Q. Wu and X.-C. Zhang, "Ultrafast electro-optic field sensors," *Appl. Phys. Lett.* **68**, 1604 (1996).
16. D.H. Auston, K.P. Cheung, and P.R. Smith, "Picosecond photoconducting Hertzian dipoles," *Appl. Phys. Lett.* **45**, 284 (1984).
17. J. Shan, A. Nahata, and T.F. Heinz, "Terahertz time-domain spectroscopy based on nonlinear optics," *J. Nonlinear Opt. Phys. Mater.* **11**, 31 (2002).
18. A. Tomasino, A. Parisi, S. Stivala, P. Livreri, A.C. Cino, A.C. Busacca, V. Peccianti, and R. Morandotti, "Wideband THz time domain spectroscopy based on optical rectification and electro-optic sampling," *Sci. Rep.* **3**, 3116 (2013).
19. M. Nagai, K. Tanaka, H. Ohtake, T. Bessho, T. Sugiura, T. Hirosumi, and M. Yoshida, "Generation and detection of terahertz radiation by electro-optical process in GaAs using 1.56 μm fiber laser pulses," *Appl. Phys. Lett.* **85**, 3974 (2004).
20. A. Schneider, M. Stillhart, and P. Gunter, "High efficiency generation and detection of terahertz pulses using laser pulses at telecommunication wavelengths," *Opt. Express* **14**, 5376 (2006).
21. B. Sartorius, H. Roehle, H. Kunzel, J. Bottcher, M. Schlak, D. Stanze, H. Venghaus, and M. Schell, "All-fiber terahertz time-domain spectrometer operating at 1.5 μm telecom wavelengths," *Opt. Express* **16**, 9565 (2008).
22. Z. Zhao, A. Schwagmann, F. Ospald, D.C. Driscoll, H. Lu, A.C. Gossard, and H. Smet, "Thickness dependence of the terahertz response in <110>-oriented GaAs crystals for electro-optic sampling at 1.55 μm ," *Opt. Express* **18**, 15956 (2010).
23. K. Maussang, J. Palomo, J.-M. Manceau, R. Colombelli, I. Sagnes, L.H. Li, E.H. Linfield, A.G. Davies, J. Mangeney, J. Tignon, and S.S. Dhillon, "Monolithic echo-less photoconductive switches as a high-resolution detector for terahertz time-domain spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.* **110**, 141102 (2017).
24. M. Tani, K. Horita, T. Kinoshita, Ch.T. Qua, E. Estacio, K. Yamamoto, and M.I. Bakunov, "Efficient electro-optic sampling detection of terahertz radiation via Cherenkov phase matching," *Opt. Express* **19**, 19901 (2011).
25. G.A. Askar'yan, "Cerenkov radiation and transition radiation from electromagnetic waves," *Sov. Phys. JETP* **15**, 943 (1962).
26. M. Tani, T. Kinoshita, T. Nagase, K. Horita, C.T. Que, E. Estacio, K. Yamamoto, and M.I. Bakunov, "Non-ellipsometric detection of terahertz radiation using heterodyne EO sampling in the Cherenkov velocity matching scheme," *Opt. Express* **21**, 9277 (2013).
27. M.I. Bakunov, S.D. Gorelov, and M. Tani, "Nonellipsometric noncollinear electrooptic sampling of terahertz waves: A comprehensive theory," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **6**, 473 (2016).

28. X. Wu, C. Zhou, W.R. Huang, F. Ahr, and F.X. Kartner, “Temperature dependent refractive index and absorption coefficient of congruent lithium niobate crystals in the terahertz range,” *Opt. Express* **23**, 29729 (2015).
29. M.I. Bakunov, E.S. Efimenko, S.D. Gorelov, N.A. Abramovsky, and S.B. Bodrov, “Efficient Cherenkov-type optical-to-terahertz converter with terahertz beam combining,” *Opt. Lett.* **45**, 3533 (2020).

Список публикаций по диссертации

- [A1] Mashkovich E.A., Shugurov A.I., Ozawa S., Estacio E., Tani M., Bakunov M.I. Noncollinear electro-optic sampling of terahertz waves in a thick GaAs crystal // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2015. Vol. 5, № 5. P. 732–736.
- [A2] Shugurov A.I., Mashkovich E.A., Bodrov S.B., Tani M., Bakunov M.I. Nonellipsometric electro-optic sampling of terahertz waves in GaAs // *Opt. Express.* 2018. Vol. 26, № 18. P. 23359–23365.
- [A3] Shugurov A.I., Bodrov S.B., Mashkovich E.A., Kitahara H., Abramovsky N.A., Tani M., Bakunov M.I. Noncollinear electro-optic sampling detection of terahertz pulses in a LiNbO₃ crystal while avoiding the effect of intrinsic birefringence // *Opt. Express.* 2022. Vol. 30, № 3. P. 3741–3748.
- [A4] Бакунов М.И., Машкович Е.А., Шугуров А.И.; ФГАОУВО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского». Рабочий узел детектора импульсного терагерцового излучения // Патент № 2637182 РФ, МПК G02F 1/03. Заявл. 11.11.2015; Опубл. 30.11.2017, Бюл. № 34.
- [A5] Бакунов М. И., Шугуров А. И.; ФГАОУВО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского». Рабочий узел детектора импульсного терагерцового излучения // Патент № 2777461 РФ, МПК G02F 1/03. Заявл. 29.09.2021; Опубл. 04.08.2022, Бюл. № 22.
- [A6] Шугуров А.И., Машкович Е.А., Бакунов М.И. Неколлинеарное детектирование терагерцовых импульсов в кристалле GaAs // Труды XVIII научной конференции по радиофизике, посвященной Дню радио, Нижний Новгород, 12–16 мая, 2014. С. 169–170.
- [A7] Mashkovich E.A., Shugurov A.I., Tani M., Bakunov M.I. Cherenkov-type electro-optic sampling of terahertz waves in a GaAs crystal // *Proceedings 2015 European Conference on Lasers and Electro-Optics - European Quantum Electronics Conference*, Munich, Germany, 21–25 June, 2015. Paper CC_6_1.
- [A8] Шугуров А.И., Бодров С.Б., Машкович Е.А., Бакунов М.И. Неэллипсометрическое электрооптическое стробирование терагерцовых импульсов в GaAs // VII международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов, Москва, 24–26 января, 2018. С. 124–125.
- [A9] Shugurov A.I., Bakunov M.I. Nonellipsometric electro-optic detection of terahertz pulses in GaAs // 6th EOS Topical Meeting on Terahertz Science &

Technology (TST 2018), Berlin, Germany, 6-9 May, 2018. P. 22–23.

- [A10] Shugurov A. I., Bakunov M. I. Nonellipsometric electro-optic sampling of terahertz pulses in GaAs // Book of Abstracts: International Conference on Ultrafast Optical Science Ultrafast Light, Moscow, Russia, 1–5 October, 2018. P. 175-176.
- [A11] Shugurov A.I., Mashkovich E.A., Bodrov S.B., Bakunov M.I. Electro-Optic Sampling of Terahertz Waves in LiNbO₃ with Avoided Intrinsic Birefringence // 8th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies: Program and Proceedings, Nizhny Novgorod, Russia, 8–11 July, 2019. P. 131.
- [A12] Шугуров А.И., Бодров С.Б., Машкович Е.А., Бакунов М.И. Эллипсометрическое детектирование терагерцевых волн при вырожденной ориентации кристалла ниобата лития // IX международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов, Москва, 29-31 января, 2020. С. 41–42.
- [A13] Shugurov A.I., Bakunov M.I. Electro-optic detection of terahertz waves in a prism-coupled lithium niobate layer with overcoming the effect of inherent birefringence // Proceedings - International Conference Laser Optics 2020, ICLO 2020, St. Petersburg, Russia, 2–6 November, 2020. Paper 165863.
- [A14] Shugurov A.I., Bodrov S.B., Mashkovich E.A., Kitahara H., Tani M., Bakunov M.I. Avoiding the effect of intrinsic birefringence in noncollinear electro-optic detection of terahertz waves in prism-coupled LiNbO₃ layer // The 8th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2021 (IW-FIRT 2021): Program and Abstracts, Fukui, Japan, 8-9 March, 2021. Paper P-21.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. Неколлинеарное эллипсометрическое детектирование терагерцовых волн в кристаллах GaAs сантиметровой толщины

1.1 Схема детектирования и описание экспериментальной установки

1.2 Теоретический анализ

1.3 Экспериментальные результаты и их анализ

Выводы по главе 1

Глава 2. Неколлинеарное неэллипсометрическое детектирование терагерцовых волн в кристаллах GaAs сантиметровой толщины

2.1 Схема эксперимента и описание экспериментальной установки

2.2 Анализ результатов

Выводы по главе 2

Глава 3. Неколлинеарное эллипсометрическое детектирование терагерцовых волн в LiNbO₃ в конфигурации подавленного собственного двулучепреломления кристалла

3.1 Схема детектирования и описание экспериментальных установок

3.2 Теоретический анализ условий детектирования

3.3 Экспериментальные результаты и их анализ

Выводы по главе 3

Заключение

Список литературы

Список публикаций по диссертации

Подписано в печать «__» _____ 2023 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Уч.-изд. л. 1. Заказ № _____. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ННГУ им. Н.И. Лобачевского.
603000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37