

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 535.012.21, 535.341, 535.323

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД МЕТОДАМИ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ*

В. Д. Анцыгин¹, В. Ф. Лосев², А. А. Мамрашев^{1,2},
Н. А. Николаев^{1,2}, О. И. Потатуркин^{1,3}

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

²Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055, г. Томск, просп. Академический, 2/3

³Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

E-mail: nazar@iae.nsk.su

Широкополосная импульсная терагерцовая (ТГц) спектроскопия — распространённый метод исследования оптических свойств материалов. Этот метод рассматривается в приложении к поляризационно-чувствительным измерениям свойств анизотропных материалов и сред, обладающих значительным дихроизмом и двулучепреломлением. Важно понимать, что развитие элементной базы для терагерцового диапазона, в частности, для ТГц-поляризаторов, отстаёт от поляризационной оптики видимого диапазона. При изучении анизотропных материалов это может привести к одновременной регистрации ортогональных компонент ТГц-поля и к появлению артефактов в спектральной области при расчёте свойств исследуемых образцов. Уникальная особенность импульсной терагерцовой спектроскопии, а именно возможность зарегистрировать временную форму ТГц-импульса, позволяет разделить ортогональные компоненты поля во временной области. Таким образом можно обнаружить сигнал от излучения с ортогональной поляризацией и устранить его путём настройки поляризационных элементов системы спектроскопии. Данный метод продемонстрирован на примере исследования терагерцовых свойств вдоль оптической оси z анизотропного сегнетоэлектрического кристалла германата свинца, в котором возникает значительное двулучепреломление и дихроизм при нагреве до температуры фазового перехода.

Ключевые слова: терагерцовая спектроскопия, терагерцовое излучение, поляризационно-оптическая регистрация, германат свинца, сегнетоэлектрик, дихроизм, двулучепреломление.

DOI: 10.15372/AUT20160409

Введение. Широкополосная импульсная терагерцовая (ТГц) спектроскопия с развитием фемтосекундной лазерной техники стала одним из распространённых методов исследования оптических и диэлектрических свойств материалов в диапазоне частот 0,1–10 ТГц [1, 2]. С помощью этого метода изучаются динамика носителей заряда в твёрдых телах, наноматериалах и сильно коррелированных системах [3], коллективные колебательные моды сложных биомолекул [4], а также спектральные особенности нелинейно-оптических кристаллов [5, 6].

Совершенствуются методы поляризационно-чувствительной ТГц-спектроскопии [7–9] для исследования двулучепреломления, оптической активности и эффекта Фарадея. При

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-10021).

проведении поляризационных ТГц-исследований, как правило, работают с линейно-поляризованным излучением, однако его получение сопряжено с технологическими трудностями. Излучение фотопроводящих антенн, применяемых в качестве ТГц-генераторов, является эллиптически-поляризованным с отношением амплитуд ортогональных компонент $\sim 7\%$ [10]. Развитие методов изготовления терагерцовых фазовых пластин для компенсации эллиптичности находится на ранней стадии [11, 12]. Коммерчески доступные поляризаторы терагерцового диапазона обеспечивают значительно меньшее отношение коэффициентов пропускания ортогональных компонент ТГц-поля по сравнению с элементами в видимом диапазоне. Так, штампованные на полиэтилене высокой плотности поляризаторы фирмы "Tydex" (Россия) имеют отношение пропускания ортогональных компонент по амплитуде ~ 20 в диапазоне 0,3–10 ТГц [13]. Проволочный поляризатор G25 \times 10-S фирмы "Microtech" (США) имеет минимальное отношение пропускания ~ 18 на частоте 3 ТГц, которое повышается до ~ 110 на частоте 0,3 ТГц [14].

Очевидным способом исследования дихроизма и двулучепреломления в анизотропных кристаллах является ориентирование его оптических осей вдоль поляризации ТГц-излучения или вращение на 360° с заданным шагом, если направление оптических осей кристалла неизвестно заранее [15, 16]. Методы регистрации в импульсной ТГц-спектроскопии поляризационно-чувствительны, благодаря чему можно реализовать альтернативный метод исследования анизотропных кристаллов путём регистрации ортогональных компонент ТГц-излучения, проходящего через образец. Это обеспечивается поворотом на 90° детектирующей фотопроводящей антенны [17] или вращением кристалла-детектора в случае поляризационно-оптической регистрации [18–20].

При неоптимальной настройке спектрометра могут быть одновременно зарегистрированы ортогональные компоненты поляризации ТГц-излучения, что может привести к появлению мнимых линий поглощения в спектре исследуемых материалов [18]. Эта проблема особенно актуальна для анизотропных материалов, обладающих значительным дихроизмом и двулучепреломлением. Импульсная ТГц-спектроскопия по сравнению с фурье-спектроскопией обладает рядом преимуществ, позволяющих нивелировать эту проблему. Её ключевой особенностью является детектирование временной формы напряжённости поля электромагнитных импульсов, а не их мощности. Поляризационно-оптический метод регистрации ТГц-импульсов обеспечивает динамический диапазон более 60 дБ, что соответствует отношению амплитуды терагерцового поля к среднеквадратичному значению шума системы регистрации более 10^3 . Благодаря этому возможны обнаружение и разделение во временной области ТГц-импульсов с ортогональной поляризацией, прошедших через исследуемый образец вдоль разных осей.

В данной работе предлагается новый способ настройки поляризационных элементов импульсного терагерцового спектрометра, основанный на наблюдении ортогональной компоненты терагерцового излучения во временной области и её минимизации. На примере одноосного кристалла германата свинца, обладающего значительным двулучепреломлением и дихроизмом при температуре вблизи фазового перехода, продемонстрировано измерение корректных оптических свойств вдоль полярной оси.

Экспериментальная установка. Работа проведена на импульсном терагерцовом спектрометре, созданном в Институте автоматики и электрометрии СО РАН (рис. 1) [21]. Для генерации и детектирования ТГц-излучения используются импульсы второй гармоники волоконного эрбиевого лазера (длительность ~ 130 фс, частота следования ~ 78 МГц, длина волны 776 ± 5 нм, средняя мощность 80 мВт). Преобразование лазерного излучения в терагерцовое осуществляется в фотопроводящей многоэлементной антенне фирмы "Vator GmbH" (Германия) со встречно-штыревым расположением электродов на подложке из арсенида галлия, выращенного при низкой температуре. Генерируемое излучение, поляризованное горизонтально, дополнительно проходит через поляризатор фирмы "Tydex", уста-

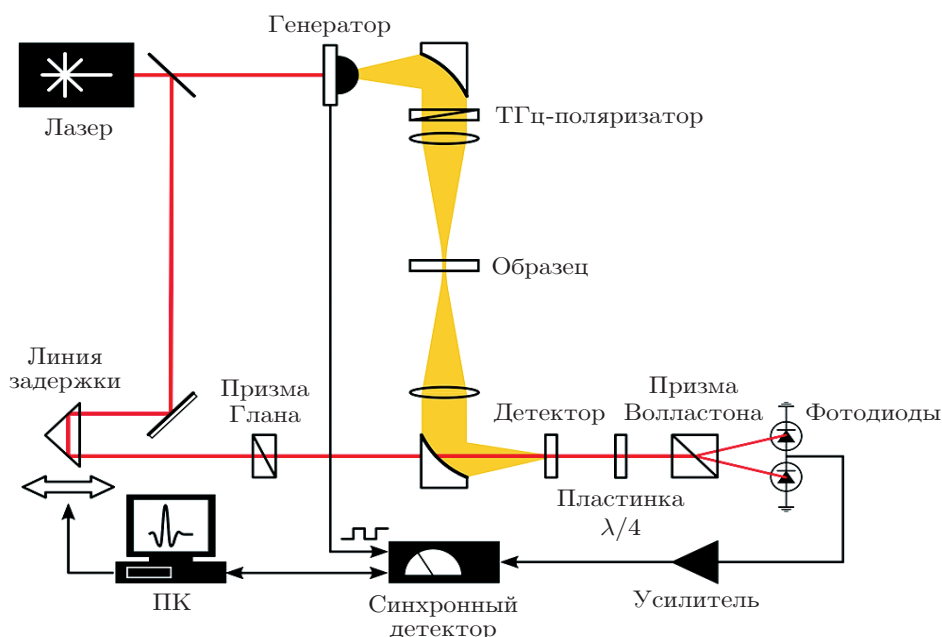


Рис. 1. Схема импульсного терагерцового спектрометра

новленный на угломерной головке, затем собирается и направляется системой из внеосевых параболических зеркал и линз на исследуемый образец и далее в систему поляризационно-оптической регистрации.

Система регистрации состоит из кристалла-детектора ZnTe ориентации (110) толщиной 1 мм, четвертьволновой пластинки, призмы Волластона, фотодиодов и синхронного детектора. Терагерцовый импульс поступает в кристалл-детектор одновременно с пробным лазерным импульсом, прошедшим через линию задержки — ретрорефлектор, установленный на моторизованном трансляторе. За счёт эффекта Поккельса под действием электрического поля терагерцового излучения кристалл-детектор приобретает двулучепреломление, вследствие чего линейная поляризация пробного лазерного импульса перестраивается в эллиптическую. Пластинка $\lambda/4$ преобразует эллиптическую поляризацию пробного излучения в линейную, повернутую на некоторый угол, а призма Волластона разделяет его на два луча с ортогональными поляризациями. Разность мощностей этих компонент, а значит, и разность ΔI токовых сигналов, измеряемых фотодиодами, оказывается пропорциональной напряжённости терагерцового поля $E_{\text{ТГц}}$ на кристалле ZnTe. Сигнал ΔI выделяется с помощью усилителя и синхронного детектора. Регистрация осуществляется на частоте модуляции напряжения, приложенного к фотопроводящей антенне.

Спектрометр регистрирует напряжённость терагерцового поля в зависимости от длительности задержки между терагерцовым и пробным лазерными импульсами и таким образом сканирует временную форму терагерцового импульса. Типичное измерение включает в себя сканирование двух ТГц-импульсов: сигнального, полученного в присутствии исследуемого образца, и опорного — без образца. Чтобы обеспечить непрерывную серию измерений сигнальных и опорных импульсов при разных температурах, изготовлен нагреваемый держатель симметричной конструкции с двумя одинаковыми отверстиями. В одном из них закреплён образец, а второе остаётся свободным. Отверстия держателя поочередно устанавливаются в терагерцовый пучок с помощью моторизованного транслятора.

Комплексные спектры амплитуды сигнального и опорного импульсов рассчитываются с использованием быстрого преобразования Фурье. Отнормировав спектр сигнального импульса на спектр опорного импульса (т. е. на аппаратную функцию спектрометра), можно определить комплексный спектр пропускания образца по амплитуде. Спектр пропускания

имеет характерные осцилляции, так как ТГц-импульс испытывает многократные переотражения при прохождении образца. Теоретически эти переотражения могут быть учтены в модели плоскопараллельной пластинки, в качестве её параметров выступают спектральный комплексный показатель преломления материала и толщина образца. Минимизируя численную разницу между теоретически рассчитанной и экспериментально измеренной функцией пропускания образца, а также спектральные осцилляции подбором параметров, можно определить физические свойства исследуемого объекта: показатель преломления, коэффициент поглощения, комплексную диэлектрическую проницаемость и толщину [22].

Вклады ортогональных компонент излучения в ТГц-сигнал. Для исследования анизотропных материалов важной характеристикой спектрометра является отношение вкладов ортогональных компонент ТГц-излучения в общий сигнал. Выражение для регистрируемого ТГц-сигнала имеет следующий вид:

$$\Delta I = \eta E_{\text{ТГц}} = \eta T K E_{\text{ген}}, \quad (1)$$

где ΔI — измеряемый сигнал, разность интенсивностей ортогональных компонент пробного лазерного излучения после призмы Волластона; $E_{\text{ТГц}}$ — напряжённость терагерцового поля в кристалле-детекторе; η — чувствительность системы регистрации, т. е. отношение измеряемого сигнала к полю терагерцового излучения; $E_{\text{ген}}$ — поле генерируемого терагерцового излучения; K — коэффициент пропускания ТГц-поляризатора по полю ТГц-импульса; T — коэффициент пропускания образца по полю ТГц-импульса.

Рассмотрим значения измеряемых сигналов от электрического поля с ортогональными поляризациями ΔI_{\parallel} и ΔI_{\perp} . Здесь индекс \parallel относится к сигналу от ТГц-поля с горизонтальной поляризацией, а индекс \perp — с вертикальной поляризацией. Отношение амплитуд ортогональных компонент терагерцового поля, генерируемого фотопроводящей антенной, имеет вид $E_{\text{ген}\parallel}/E_{\text{ген}\perp} = 1/0,07 \approx 14$. Отношение пропускания ортогональных компонент ТГц-поля для применяемого в спектрометре поляризатора фирмы "Tudex" составляет $K_{\parallel}/K_{\perp} = 20$.

Чувствительность системы регистрации в кристалле-детекторе с ориентацией (110) зависит от углов поворота поляризации и имеет вид [23]

$$\eta \sim (\sin 2\beta \cdot \cos \alpha + 2 \cos 2\beta \cdot \sin \alpha), \quad (2)$$

где α, β — углы поворота поляризации терагерцового ($E_{\text{ТГц}}$) и пробного лазерного ($E_{\text{пр}}$) излучений относительно оси z кристалла-детектора (рис. 2). Из соотношения (2) следует, что если поляризация пробного излучения близка к вертикальной, т. е. $\beta \approx 0$, то для горизонтальной ТГц-поляризации $\eta_{\parallel} \rightarrow 2$, так как $\alpha \approx \pi/2$. Вертикальной ТГц-поляризации ($\alpha \approx 0$) соответствует $\eta_{\perp} \rightarrow 2(\alpha + \beta)$. При малой отстройке углов от идеальных положений, например $\alpha, \beta = 1/57$ ($\sim 1^\circ$), получим $\eta_{\perp} = 0,07$, т. е. отношение эффективностей регистрации излучения с ортогональными поляризациями составит $\eta_{\parallel}/\eta_{\perp} = 2/0,07 \approx 28,6$.

Рассмотрим последнюю компоненту формулы (1) — пропускание исследуемого образца — и её влияние на результирующий ТГц-сигнал. Для изотропного образца отношение пропускания ТГц-излучения с различными поляризациями равно 1. Значит, отношение эффективностей регистрации ортогональных компонент составляет

$$\frac{\Delta I_{\parallel}}{\Delta I_{\perp}} = \frac{\eta_{\parallel} K_{\parallel} E_{\text{ген}\parallel}}{\eta_{\perp} K_{\perp} E_{\text{ген}\perp}} = 28,6 \cdot 20 \cdot 14 = 8 \cdot 10^3.$$

Так как типичное значение динамического диапазона терагерцового спектрометра равно 1000, сигнал ΔI_{\perp} от поля $E_{\text{ТГц}\perp}$ не превышает уровня шума. Однако, если исследуемый образец анизотропен и отношение коэффициентов пропускания вдоль различных осей

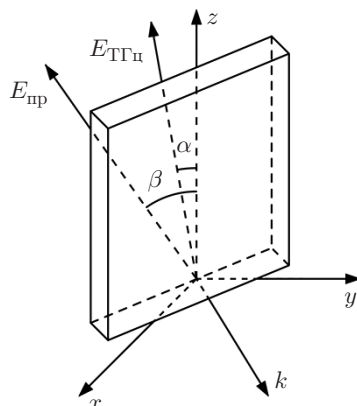


Рис. 2. Углы поворота поляризации терагерцового (α) и пробного лазерного (β) излучений относительно оси z кристалла-детектора системы поляризационно-оптической регистрации

$T_{\parallel}/T_{\perp} < 10^{-1}$, то возможно зарегистрировать сигнал ΔI_{\perp} . Для материалов с большим дихроизмом и отношением $T_{\parallel}/T_{\perp} < 10^{-3}$ сигналы ортогональных компонент ΔI_{\parallel} и ΔI_{\perp} будут сравнимы.

Исследования кристалла германата свинца. Рассмотрим в качестве примера кристалл германата свинца ($\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$, PGO). Это сегнетоэлектрик, переходящий при температуре 177°C в параэлектрическое состояние. Анизотропия оптических свойств кристалла в терагерцовом диапазоне значительно возрастает при приближении к температуре фазового перехода. К примеру, при комнатной температуре коэффициенты поглощения на частоте $0,35$ ТГц (что соответствует максимуму динамического диапазона спектрометра в частотной области) составляют $\alpha_z \sim 25$ см $^{-1}$, $\alpha_x \sim 8$ см $^{-1}$. Здесь и далее индексы z и x отражают случай совпадения направления поляризации терагерцового излучения вдоль соответствующей оптической оси кристалла. При повышении температуры до 140°C коэффициент поглощения α_z достигает значения ~ 220 см $^{-1}$, в то время как α_x возрастает приблизительно до 12 см $^{-1}$. Показатель преломления n_z увеличивается от 6 до $6,3$, а n_x практически не меняется и остаётся в диапазоне $4,5$ – $4,6$. По формуле Френеля можно рассчитать амплитудный коэффициент пропускания T для образца толщиной d с коэффициентом поглощения α и показателем преломления n :

$$T = \frac{4n}{(n+1)^2} e^{-\alpha d/2},$$

тогда для кристаллов толщиной 270 мкм отношение T_z/T_x падает с $0,65$ до $0,05$. При совпадении направления поляризации ТГц-излучения с осью z кристалла с учётом небольшой расстройки кристалла-детектора, отмеченной выше, можно ожидать, что в регистрируемом сигнале будет присутствовать вклад двух ортогональных компонент поля.

Рассмотрим подробнее подготовку спектрометра к проведению измерений анизотропных материалов. Поляризация считывающего излучения $E_{\text{пр}}$ выставляется вертикально ($\beta \approx 0$). Терагерцовый генератор и следующий за ним поляризатор пропускают горизонтально-поляризованное излучение ($\alpha \approx \pi/2$). Для измерения свойств исследуемых образцов необходимая оптическая ось ориентирована параллельно поляризации ТГц-излучения, т. е. горизонтально. В нашем случае образец закрепляется в нагревателе без угломерной головки при комнатной температуре и его вращение после нагревания невозможно.

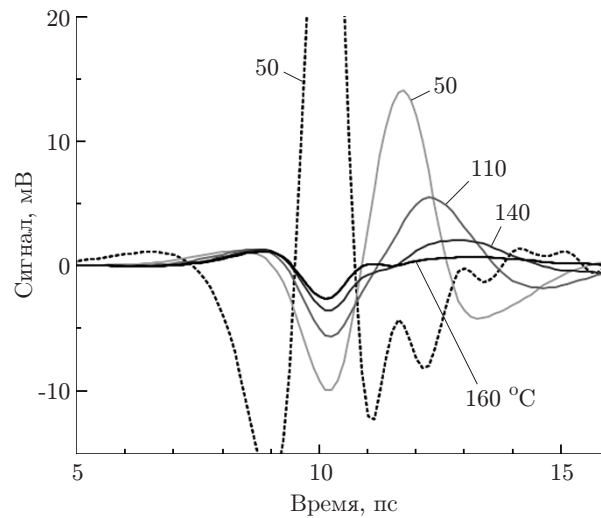


Рис. 3. Временная форма импульсов, прошедших через кристалл PGO: поляризация $E_{\text{TГц}\parallel z}$ параллельна оси z кристалла (сплошные кривые), $E_{\text{TГц}\parallel x}$ направлена вдоль оси x кристалла (пунктирная кривая)

Результаты измерения ТГц-импульсов, прошедших через исследуемый образец, представлены на рис. 3. Изначальные измерения проводились при температуре 50 °С. При повышении температуры кристалла до 160 °С наблюдаются смещение и уменьшение по абсолютной величине максимума амплитуды поля $E_{\text{TГц}\parallel z}$, что свидетельствует об увеличении показателей преломления и поглощения кристалла. Стоит обратить внимание на то, что характерный отрицательный сигнал в точке 10 пс по времени совпадает с максимумом импульса $E_{\text{TГц}\parallel x}$ и не сдвигается при повышении температуры. Это объясняется тем, что показатель преломления n_x практически не изменяется при повышении температуры, а значит, соответствующий ТГц-импульс не должен задерживаться во времени и сдвигаться. Также известно, что форма терагерцового импульса, погашенного проволочным поляризатором, является первой производной по времени падающего импульса, что приближённо описывается сменой его знака [24]. Следовательно, отрицательный сигнал в точке 10 пс соответствует ТГц-полю $E_{\text{TГц}\perp x}$, имеющему вертикальную поляризацию и зарегистрированному со значительно меньшей чувствительностью по сравнению с $E_{\text{TГц}\parallel x}$. Таким образом, сигнал от поля $E_{\text{TГц}\parallel z}$ имеет вклад от $E_{\text{TГц}\perp x}$, который начинает преобладать при повышении температуры кристалла до 160 °С.

Поскольку в сигнале $E_{\text{TГц}\parallel z}$ присутствует сигнал от излучения с ортогональной поляризацией $E_{\text{TГц}\perp x}$, соответствующий иному показателю преломления и коэффициенту поглощения, модель, используемая в алгоритме численного расчёта параметров материала, перестаёт адекватно описывать измерения. В этом случае алгоритм не способен подобрать толщину образца и корректно рассчитать его свойства, что выражается в появлении артефактов — неустраняемых спектральных осцилляций на графике поглощения (рис. 4, штриховая кривая).

Как видно из рис. 3, система регистрации импульсной терагерцовой спектроскопии непосредственно записывает временную форму импульсов, что при исследовании образцов с сильным двулучепреломлением позволяет обнаружить разделённые во времени вклады ортогональных компонент ТГц-поля в детектируемый сигнал. Дополнительной юстировкой в пределах малого угла исследуемого образца или поляризационных элементов спектрометра можно добиться гашения ортогональной компоненты, напрямую наблюдая её уменьшение. В данной работе незначительная подстройка терагерцового поляризатора

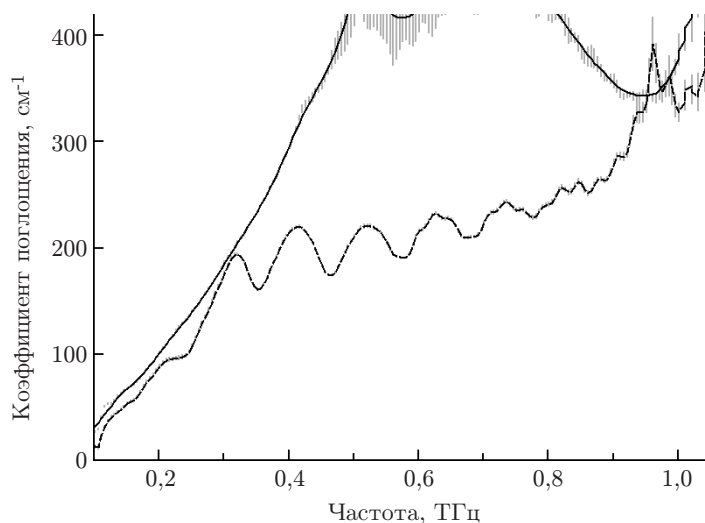


Рис. 4. Рассчитанный коэффициент поглощения германата свинца вдоль полярной оси z с ортогональной поляризацией в сигнале (штриховая кривая) и без неё (сплошная кривая). Коэффициент поглощения в промежутке от 0,5 до 0,8 ТГц не измерен из-за ограниченного динамического диапазона спектрометра

привела к исчезновению спектральных осцилляций и получению корректно рассчитанных оптических свойств исследуемого материала (см. рис. 4, сплошная кривая).

Закключение. В настоящее время коммерчески доступные поляризаторы для терагерцового диапазона обеспечивают невысокое подавление ортогональной компоненты. Их использование в системах спектроскопии в совокупности с небольшой расстройкой оптических элементов, в частности детектора, может привести к одновременной регистрации ортогональных компонент ТГц-поля и появлению артефактов в спектральной области при расчёте свойств исследуемых анизотропных материалов. В данной работе предложено разделять ортогональные компоненты терагерцового поля при регистрации сигнала во временной области и устранять одну из них путём подстройки поляризационных элементов спектрометра. В результате продемонстрировано исчезновение артефактов в спектре поглощения вдоль оптической оси z анизотропного сегнетоэлектрического кристалла германата свинца вблизи температуры фазового перехода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jepsen P. U., Cooke D. G., Koch M.** Terahertz spectroscopy and imaging — Modern techniques and applications // *Laser & Photonics Rev.* 2011. **5**, Is. 1. P. 124–166.
2. **Baxter J. B., Guglietta G. W.** Terahertz spectroscopy // *Anal. Chem.* 2011. **83**, N 12. P. 4342–4368.
3. **Lloyd-Hughes J., Jeon T.-I.** A review of the terahertz conductivity of bulk and nano-materials // *Journ. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.* 2012. **33**, Is. 9. P. 871–925.
4. **Markelz A. G.** Terahertz dielectric sensitivity to biomolecular structure and function // *IEEE Journ. Selec. Top. Quant. Electron.* 2008. **14**, N 1. P. 180–190.
5. **Antsygin V. D., Mamrashev A. A., Nikolaev N. A. et al.** Optical properties of borate crystals in terahertz region // *Opt. Commun.* 2013. **309**. P. 333–337.
6. **Antsygin V. D., Kaplun A. B., Mamrashev A. A. et al.** Terahertz optical properties of potassium titanyl phosphate crystals // *Opt. Express.* 2014. **22**, Is. 21. P. 25436–25443.

7. **Castro-Camus E.** Polarization-resolved terahertz time-domain spectroscopy // Journ. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2012. **33**, Is. 4. P. 418–430.
8. **Nagashima T., Tani M., Hangyo M.** Polarization-sensitive THz-TDS and its application to anisotropy sensing // Journ. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2013. **34**, Is. 11. P. 740–775.
9. **Wiesauer K., Jördens C.** Recent advances in birefringence studies at THz frequencies // Journ. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2013. **34**, Is. 11. P. 663–681.
10. **Van Rudd J., Johnson J. L., Mittleman D. M.** Cross-polarized angular emission patterns from lens-coupled terahertz antennas // JOSA B. 2001. **18**, Is. 10. P. 1524–1533.
11. **Masson J.-B., Gallot G.** Terahertz achromatic quarter-wave plate // Opt. Lett. 2006. **31**, Is. 2. P. 265–267.
12. **Weis P., Paul O., Imhof C. et al.** Strongly birefringent metamaterials as negative index terahertz wave plates // Appl. Phys. Lett. 2009. **95**, N 17. 171104.
13. **FIR- and THz-Polarizers** // Tydex. URL: http://www.tydexoptics.com/pdf/THz_polarizers.pdf (дата обращения: 09.06.2016).
14. **Free Standing Wire Grid Polarizers** // Microtech Instruments, Inc. URL: <http://www.mtinstruments.com/downloads/Polarizer%20Datashet.pdf> (дата обращения: 09.06.2016).
15. **Kim Y., Yi M., Kim B. G., Ahn J.** Investigation of THz birefringence measurement and calculation in Al_2O_3 and LiNbO_3 // Appl. Opt. 2011. **50**, Is. 18. P. 2906–2910.
16. **Pfleger M., Roitner H., Pühringer H. et al.** Advanced birefringence measurements in standard terahertz time-domain spectroscopy // Appl. Opt. 2014. **53**, Is. 15. P. 3183–3190.
17. **Dong H., Gong Y., Olivo M.** Measurement of Stokes parameters of terahertz radiation in terahertz time-domain spectroscopy // Microwave and Opt. Technol. Lett. 2010. **52**, Is. 10. P. 2319–2324.
18. **Zhang L., Zhong H., Deng C. et al.** Polarization sensitive terahertz time-domain spectroscopy for birefringent materials // Appl. Phys. Lett. 2009. **94**, N 21. 211106.
19. **Yasumatsu N., Watanabe S.** Precise real-time polarization measurement of terahertz electromagnetic waves by a spinning electro-optic sensor // Rev. Sci. Instrum. 2012. **83**, Is. 2. 023104.
20. **Yasumatsu N., Watanabe S.** Robustness of electric field vector sensing of electromagnetic waves by analyzing crystal angle dependence of the electro-optic effect // JOSA B. 2013. **30**, Is. 11. P. 2940–2951.
21. **Анцыгин В. Д., Мамрашев А. А., Николаев Н. А., Потатуркин О. И.** Малогабаритный терагерцовый спектрометр с использованием второй гармоники фемтосекундного волоконного лазера // Автометрия. 2010. **46**, № 3. С. 110–117.
22. **Duvillaret L., Garet F., Coutaz J.-L.** Highly precise determination of optical constants and sample thickness in terahertz time-domain spectroscopy // Appl. Opt. 1999. **38**, Is. 2. P. 409–415.
23. **Planken P. C. M., Nienhuys H.-K., Bakker H. J., Wenckebach T.** Measurement and calculation of the orientation dependence of terahertz pulse detection in ZnTe // JOSA B. 2001. **18**, Is. 3. P. 313–317.
24. **Filin A., Stowe M., Kersting R.** Time-domain differentiation of terahertz pulses // Opt. Lett. 2001. **26**, Is. 24. P. 2008–2010.

Поступила в редакцию 25 ноября 2015 г.