

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 538.913
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-38-45>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Дисперсия оптических характеристик кристалла Si:PbGeO в терагерцовом диапазоне

В.Р. Билык¹,
К.А. Брехов^{1, @},
М.Б. Агранат²,
Е.Д. Мишина¹

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, 125412 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: brekhov_ka@mail.ru

Резюме

Цели. Успехи лазерной физики последнего десятилетия привели к созданию источников однопериодных электромагнитных импульсов длительностью порядка 1 пс, что соответствует терагерцовому (ТГц) диапазону частот, с амплитудой поля в несколько десятков МВ/см. Это позволило приложить электрическое поле к сегнетоэлектрику без электродов и наблюдать не только возбуждение когерентных фононов, но и сверхбыстрое, в субпикосекундном масштабе времени, динамическое переключение поляризации. Для обнаружения переключения поляризации используется метод накачки-зондирования, где в качестве накачки используется ТГц-импульс, а зонд является оптическим. Мерой переключения поляризации под действием ТГц-импульса служит сигнал второй оптической гармоники, поскольку ее интенсивность пропорциональна квадрату поляризации. Для оценки эффективности переключения требуются как линейные (показатель преломления и коэффициент поглощения), так и нелинейные оптические характеристики (квадратичная и кубическая восприимчивости). Знание линейных оптических характеристик необходимо также для любых применений рассматриваемых кристаллов в ТГц-диапазоне.

Методы. Использована методика ТГц-спектроскопии во временной области, в которой на вещество направляется пикосекундный ТГц-импульс, а регистрируется ТГц-импульс, прошедший через вещество, путем стробирования детектора фемтосекундным оптическим импульсом. Исследование ТГц-индуцированной динамики параметра порядка в сегнетоэлектрике проводилось путем детектирования интенсивности нелинейно-оптического сигнала на частоте второй оптической гармоники.

Результаты. На кристалле германата свинца, легированного кремнием, измерены пропускание ТГц-волны и интенсивность генерации второй гармоники во временной и спектральной областях, на основании чего рассчитаны дисперсия коэффициента поглощения и кубической нелинейной восприимчивости в диапазоне 0.5–2.0 ТГц. Обнаружено наличие области фундаментального поглощения вблизи фононных мод, а также резонансное усиление кубической нелинейной восприимчивости для двух фононных мод $\Omega_1 = 1.3$ ТГц и $\Omega_2 = 2.0$ ТГц.

Выводы. Предложенная методика эффективна для анализа дисперсии оптических характеристик сегнетоэлектрических кристаллов. Существенно улучшено спектральное разрешение, составляющее в данной работе 0.1 ТГц, а также точность определения нелинейной восприимчивости за счет детального анализа линейного и нелинейного вкладов в интенсивность второй гармоники.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, сегнетоэлектрики, спектроскопия, генерация второй оптической гармоники

• Поступила: 12.12.2022 • Доработана: 14.01.2023 • Принята к опубликованию: 24.02.2023

Для цитирования: Билык В.Р., Брехов К.А., Агранат М.Б., Мишина Е.Д. Дисперсия оптических характеристик кристалла Si:PbGeO в терагерцовом диапазоне. *Russ. Technol. J.* 2023; 11(3):38–45. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-38-45>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Dispersion of optical constants of Si:PbGeO crystal in the terahertz range

Vladislav R. Bilyk ¹,
Kirill A. Brekhov ^{1, @},
Mikhail B. Agranat ²,
Elena D. Mishina ¹

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

@ Corresponding author, e-mail: brekhov_ka@mail.ru

Abstract

Objectives. Advances in laser physics over the last decade have led to the creation of sources of single-period electromagnetic pulses having a duration of about 1 ps, corresponding to the terahertz (THz) frequency range and a field amplitude of several tens of MV/cm. This allows the electrode-free application of an electric field to a ferroelectric for observing not only the excitation of coherent phonons, but also ultrafast (at the sub-picosecond timescale) dynamic polarization switching. To detect polarization switching, a pump-probe technique is used in which a THz pulse is used with an optical probe. Since its intensity is proportional to the square of the polarization, the signal of the optical second harmonic is used to measure polarization switching under the action of a THz pulse. To evaluate switching efficiency, both linear (refractive index and absorption coefficient) and non-linear optical characteristics (quadratic and cubic susceptibilities) are required. For any application of ferroelectric crystals in the THz range, knowledge of the relevant linear optical characteristics is also necessary.

Methods. The technique of THz spectroscopy in the time domain was used; here, a picosecond THz pulse transmitted through the crystal is recorded by strobing the detector with a femtosecond optical pulse. The THz-induced dynamics of the order parameter in a ferroelectric was studied by detecting the intensity of a nonlinear optical signal at the frequency of the second optical harmonic.

Results. The transmission of a THz wave and the intensity of second harmonic generation on a lead germanate crystal doped with silicon in the time and spectral domains were measured. On this basis, the absorption coefficient dispersion and cubic nonlinear susceptibility were calculated in the range of 0.5–2.0 THz. The presence of a region of fundamental absorption near the phonon modes was confirmed along with a resonant enhancement of the cubic nonlinear susceptibility for two phonon modes $\Omega_1 = 1.3$ THz and $\Omega_2 = 2.0$ THz.

Conclusions. The proposed technique is effective for analyzing the dispersion of the optical characteristics of ferroelectric crystals. The significantly improved spectral resolution (0.1 THz) increases the accuracy of determining nonlinear susceptibility due to the detailed analysis of the linear and nonlinear contributions to the second harmonic intensity.

Keywords: terahertz radiation, ferroelectrics, spectroscopy, optical second harmonic generation

• Submitted: 12.12.2022 • Revised: 14.01.2023 • Accepted: 24.02.2023

For citation: Bilyk V.R., Brekhov K.A., Agranat M.B., Mishina E.D. Dispersion of optical constants of Si:PbGeO crystal in the terahertz range. *Russ. Technol. J.* 2023;11(3):38–45. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-3-38-45>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Кристаллы германата свинца ($\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$, PGO) являются одноосными сегнетоэлектриками с температурой Кюри $T_C = 450$ К [1]. Эти кристаллы и кремнийсодержащие твердые растворы на их основе обладают особенностями спонтанного переключения поляризации, пьезоэлектрического и фоторефрактивного эффектов, которые могут быть использованы для различных применений. Изменением концентрации кремния в твердом растворе можно управлять точкой Кюри, переводя основные особенности в область температуры в пределах от комнатной до T_C , что существенно увеличивает области применения этих кристаллов, в т.ч. в качестве элементов пьезоприемников, сегнетоэлектрических запоминающих устройств. К настоящему времени имеется большое количество работ, посвященных строению этих материалов, их диэлектрическим, пьезо- и пьезоэлектрическим, механическим и другим свойствам, исследованным, в основном, в области низких частот [2].

Область частот 1–10 ТГц представляет большой интерес для исследований сегнетоэлектриков, поскольку именно на эту область приходится фононные моды, в т.ч. мягкая мода. До последнего времени для исследования некогерентных процессов в этой области применялась методика спектроскопии комбинационного рассеяния [3, 4].

Успехи лазерной физики последнего десятилетия привели к созданию источников однопериодных электромагнитных импульсов длительностью порядка 1 пс, что соответствует терагерцовому (ТГц) диапазону частот, с амплитудой поля в несколько десятков МВ/см. Это позволило приложить электрическое поле к сегнетоэлектрику без электродов и наблюдать не только возбуждение когерентных фононов, но и сверхбыстрое, в субпикосекундном масштабе времени, динамическое переключение поляризации. Для обнаружения переключения поляризации используется метод накачки-зондирования, где в качестве накачки используется ТГц-импульс, а зонд является либо оптическим, либо рентгеновским. Теория генерации когерентных колебаний в ТГц-спектроскопии накачки-зондирования изложена в [5].

Оптическое детектирование позволяет различать линейный и нелинейный режимы колебаний мод [6, 7] и переключение поляризации, динамическое и перманентное, если последнее имеет место [8].

Мерой переключения поляризации под действием ТГц-импульса служит сигнал второй оптической гармоники (ВГ), поскольку ее интенсивность пропорциональна квадрату поляризации. Для оценки эффективности переключения требуются как линейные (показатель преломления и коэффициент поглощения), так и нелинейные оптические характеристики (квадратичная и кубическая восприимчивости). Знание линейных оптических характеристик необходимо также для любых применений рассматриваемых кристаллов в терагерцовом диапазоне.

Для определения линейных и нелинейных оптических констант применима методика ТГц-спектроскопии во временной области (time domain spectroscopy – TDS) – спектроскопический метод, в котором на вещество направляется пикосекундный ТГц-импульс, а регистрируется ТГц-импульс, прошедший через вещество, путем стробирования детектора фемтосекундным оптическим импульсом. Схема генерации и детектирования чувствительна к воздействию образца как на амплитуду, так и на фазу регистрируемого ТГц-излучения, и поэтому позволяет получать и действительную, и мнимую части оптических констант.

К настоящему времени методика ТГц-TDS применяется для определения дисперсии оптических констант и достаточно широко используется для исследования, прежде всего, органических материалов (см. обзор [9]). Определенные успехи достигнуты и при исследовании фононных мод сегнетоэлектрических кристаллов [10, 11]. Проблема заключается в том, что в большинстве работ результаты получены на маломощных ТГц-источниках со стандартными параметрами, обеспечивающими так называемую широкополосную спектроскопию: при накачке пикосекундным импульсом область генерируемого спектра составляет 0.5–2 ТГц с центром в области 1 ТГц. При этом у многих сегнетоэлектриков фононный спектр (и особенно наиболее интересная мягкая мода) лежит в области выше 1.5 ТГц.

В этом отношении PGO является поистине уникальным материалом, т.к. при ярко выраженных сегнетоэлектрических свойствах и относительно высокой температуре фазового перехода (около 450 К) частота его мягкой моды близка к 1 ТГц, и имеется достаточно широкий диапазон фононных мод, которые попадают в рабочий диапазон настольных установок. Методом

широкополосной спектроскопии кристалл PGO был исследован нами ранее в работе [12] со спектральным разрешением 0.25 ТГц. Там же были получены спектральные зависимости электроиндуцированной ВГ.

В данной работе мы впервые используем узкополосную ТГц-спектроскопию для определения коэффициента поглощения и нелинейной (кубичной) восприимчивости кристалла PGO, легированного кремнием. Существенно улучшено спектральное разрешение, составляющее в данной работе 0.1 ТГц, а также точность определения нелинейной восприимчивости за счет детального анализа линейного и нелинейного вкладов в интенсивность ВГ.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Для проведения экспериментальных исследований использовался кристалл PGO, легированный кремнием $Pb_5(Ge_{0.74}Si_{0.26})_3O_{11}$ (кристалл был изготовлен и предоставлен А.А. Бушем, МИРЭА – Российский технологический университет, Россия). При данном стехиометрическом составе температура Кюри, по сравнению с нелегированным кристаллом, понижается до 346 К [2]. Исследуемый кристалл имеет толщину ~1.1 мм. Кристаллографическая ориентация поверхности (100), вектор поляризации при такой ориентации выровнен в плоскости поверхности. Фононный спектр исследуемого кристалла позволяет эффективно возбуждать сразу несколько частот колебаний кристаллической решетки, лежащих в диапазоне возбуждающего ТГц-излучения, в том числе частоту мягкой фононной моды [13].

Для генерации узкополосных ТГц-импульсов использовалась Сг:форстеритовая лазерная система, описанная в работе [12], с длиной волны 1240 нм, частотой повторения импульсов 10 Гц и длительностью 100 фс. Генератором ТГц-импульсов служил органический кристалл ОН1 [14].

Для генерации узкополосных ТГц-импульсов усиленный лазерный импульс разделялся на два, каждый из которых проходил через одно из плеч интерферометра типа Маха – Цендера. Варьируя задержку между этими импульсами перед их последующим сжатием в компрессоре, можно было добиться биения оптических импульсов на заданной частоте. Полученный частотно модулированный оптический чирп в конечном итоге облучал кристалл ОН1 для генерации узкополосного ТГц-излучения [15]. Энергия широкополосного импульса в 90 мкДж позволяет выделять узкополосное излучение с шириной спектра ~200 ТГц. Согласно измерениям профиля напряженности электрического поля методом ТГц-TDS, длительность таких импульсов составляет порядка 5 пс и содержит ~5 периодов. Энергия ТГц-волны измерялась ячейкой Голя и составляла в среднем 4 мкДж.

Исследование ТГц-индуцированной динамики параметра порядка в сегнетоэлектрике проводилось путем детектирования интенсивности нелинейно-оптического сигнала на частоте ВГ [12].

На рис. 1 представлены типичные временная и спектральная формы падающей ТГц-волны, ТГц-волны, прошедшей через образец, и волны ВГ, индуцированной электрическим полем ТГц-импульса.

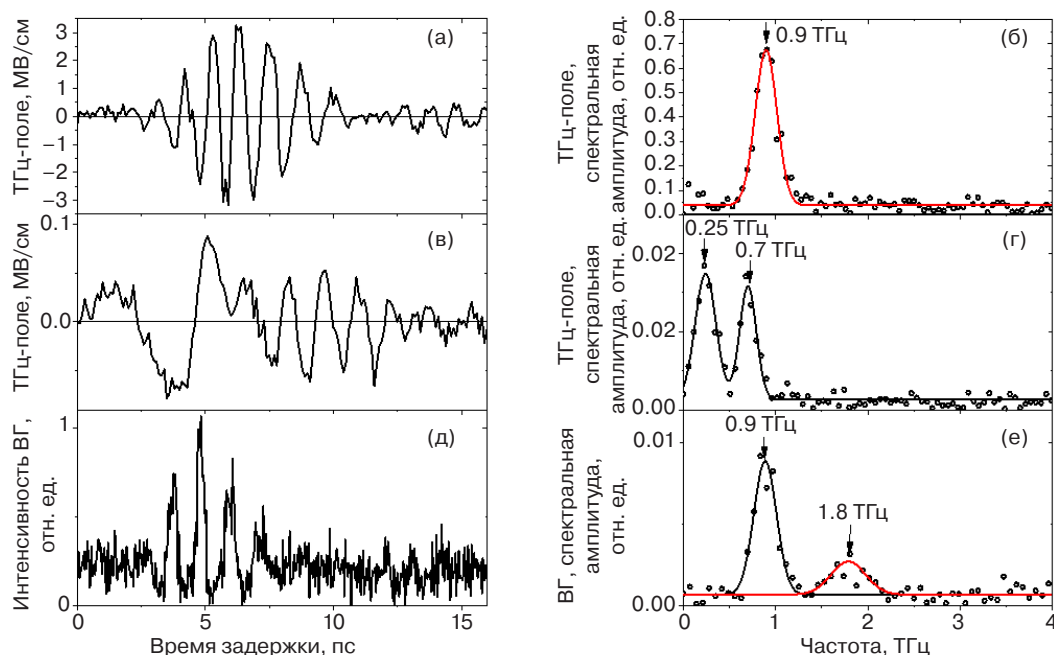


Рис. 1. Для частоты 0.9 ТГц временные (слева) и спектральные (справа) зависимости (а), (б) падающей ТГц-волны; (в), (г) ТГц-волны, прошедшей через образец; (д), (е) волны ВГ, индуцированной электрическим полем ТГц-импульса

В падающей волне при изменении ее частоты изменяется ее энергия (максимум приходится на частоту 1.2 ТГц). Во временной форме (рис. 1а) меняется только период, характер зависимости остается примерно одинаковым для всех частот в диапазоне 0.5–2.2 ТГц. Для 0.9 ТГц длительности импульса составляет ~8 пс. При попытке дальнейшего увеличения частоты сигнал становится неотличим от шума. В частотном пространстве (рис. 1б) сдвигается частота импульса, при этом его полуширина изменяется слабо в пределах 0.25–0.3 ТГц (что соответствует наблюдаемой длительности импульса).

Кристалл существенно преобразует падающий импульс. Амплитуда прошедшей волны резко падает (на частоте падающей волны 0.9 ТГц уменьшение амплитуды поля составляет 30 раз). Кроме того, во временной зависимости периодическая функция, напоминающая падающий импульс, сдвигается на половину импульса, а в его начале доминирует аperiodичный сигнал. Соответственно в спектре прошедшего ТГц-импульса проявляется частота 0.7 ТГц, т.е. уменьшенная по сравнению с частотой падающего поля. Кроме того, появляется низкочастотная компонента 0.25 ТГц. Следует отметить, что 0.9 ТГц является частотой резкого изменения характера пропускания ТГц-излучения. При меньших частотах доминирует более высокочастотный максимум, его частота приближается к частоте падающей волны. При больших частотах амплитуда импульса резко падает, и в прошедшем излучении остается только низкочастотный пик. Это соответствует границе поглощения, обнаруженной в работе [12] в широкополосном ТГц-излучении.

Интенсивность ВГ во временном пространстве повторяет поведение падающего импульса, однако в частотном пространстве проявляются две частоты: частота падающей волны и удвоенная частота падающей волны. Это соответствует квадратичной зависимости интенсивности ВГ от внешнего поля (а в сегнетоэлектриках – от поляризации) при наличии значительного неактивного по полю вклада (в сегнетоэлектриках – непереклюкаемой поляризации).

Действительно, интенсивность ВГ в ТГц-поле может быть представлена в виде разложения либо по ТГц-полю E_Ω в случае несегнетоэлектрического кристалла:

$$I^{2\omega}(E_\Omega) \propto (\chi^{(2)} + \chi_E^{(3)} E_\Omega)^2 (I^\omega)^2, \quad (1)$$

либо по поляризации $P(E_\Omega)$ в случае сегнетоэлектрического кристалла:

$$I^{2\omega}(P(E_\Omega)) \propto (P_0 + \chi_P^{(3)} P(E_\Omega))^2 (I^\omega)^2, \quad (2)$$

где $\chi^{(2)}(2\omega, \omega, \omega)$ – кристаллографическая квадратичная восприимчивость, $\chi_E^{(3)}(2\omega, \Omega, \omega, \omega)$ – кубичная восприимчивость.

Очевидно, что в случае линейной зависимости $P(E_\Omega)$, например, в слабых полях, соотношения (1) и (2) идентичны. В общем случае, для того чтобы различить (1) и (2), необходимо исследовать зависимости интенсивности ВГ от ТГц-поля.

При разложении квадрата суммы возникают два члена, зависящих от поля: линейный I_2 и квадратичный I_3 :

$$I_2 \propto \chi^{(2)} \chi_E^{(3)} E_\Omega, \quad (3a)$$

$$I_3 \propto (\chi_E^{(3)})^2 (E_\Omega)^2. \quad (3b)$$

Именно они в разложении Фурье дают, соответственно, сигналы на основной Ω и удвоенной 2Ω частотах падающей волны.

На рис. 2 представлены дисперсионные зависимости коэффициента поглощения и нелинейной восприимчивости кристалла PGO. Коэффициент поглощения (рис. 2а) растет значительно до частоты 0.7 ТГц, где точность его определения не превышает 5%.

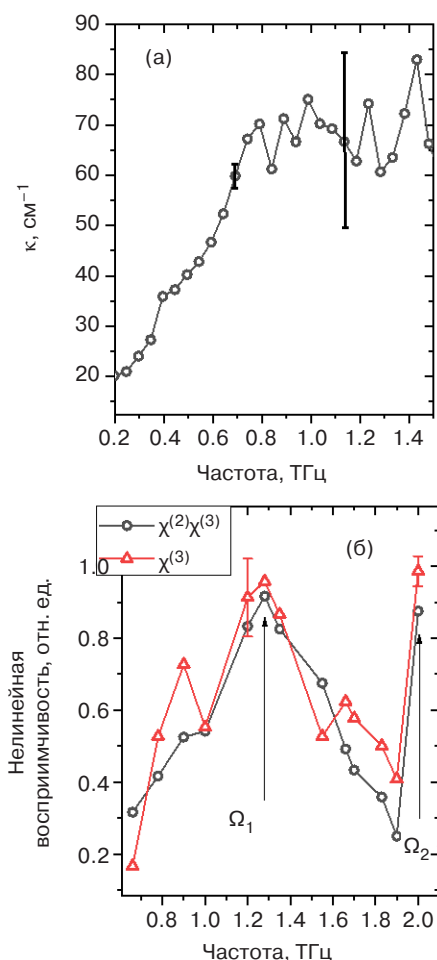


Рис. 2. Дисперсия коэффициента поглощения и нелинейной восприимчивости кристалла PGO

Это близко к значению, полученному нами ранее при использовании методики широкополосной ТГц-спектроскопии. При больших частотах погрешность существенно увеличивается. Это связано с тем, что при узкополосном зондировании спектральные линии излучения значительно деформируются при прохождении через кристалл (рис. 1г). При нахождении отношения спектральных амплитуд прошедшего и падающего излучения за пределами FWHM (full width at half maximum – длительность импульса на уровне половины амплитуды) падающей волны возникает «деление на 0», а точнее, на шумовой сигнал. Точно так же за пределами FWHM прошедшей волны в области максимума спектральной амплитуды падающей волны возникает деление шумового сигнала на ненулевую спектральную амплитуду. Можно найти также области спектра, где оба сигнала являются шумовыми. При частотах выше 1.4 ТГц сигнал не выделяется на фоне шума.

Нелинейная восприимчивость рассчитывалась на основе спектральных зависимостей интенсивности ВГ (рис. 1г) для максимумов на основной частоте по формуле (3а) и на удвоенной частоте по формуле (3б). Результат приведен на рис. 2б. Зависимости нормированы на максимум нелинейной восприимчивости. Отметим, что зависимости $\chi_E^{(2)}\chi_E^{(3)}$ и $\chi_E^{(3)}$ практически совпадают. Это означает отсутствие спектральных особенностей в ТГц-диапазоне в кристаллографической восприимчивости $\chi^{(2)}$ (что соответствует природе этой восприимчивости, являющейся восприимчивостью электронного типа). Значит в нашей задаче $\chi^{(2)}$ является просто константой.

Кубичная восприимчивость $\chi_E^{(3)}$ отчетливо проявляет два максимума при $\Omega_1 = 1.3$ ТГц и $\Omega_2 = 2$ ТГц. К сожалению, второй максимум пока не удалось промерить более детально, однако обращаем внимание на погрешность измерения в данной точке. Наблюдаемые максимумы соответствуют фоновым модам кристалла PGO.

Наши исследования показывают, что в случае ТГц-спектроскопии в области фоновых резонансов методика генерации ВГ, индуцированной узкополосным ТГц-полем, является более информативной по сравнению с обычно применяемой методикой TDS, поскольку имеет существенно более высокое спектральное разрешение. Это связано с наличием в выражении для кубичной нелинейной восприимчивости резонансного знаменателя на частотах фоновых мод: $\chi_E^{(3)} \propto (\Omega - \Omega_0 - i\gamma\Omega)^{-1}$ [16]. Кроме того, искажение спектра при распространении ТГц-волны не играет существенной роли, поскольку резонанс сам «выбирает» частоты, на которых происходит резонансное усиление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное в данной работе исследование спектральных характеристик коэффициента поглощения

и нелинейной восприимчивости на основе методов TDS и генерации индуцированной ТГц электрическим полем ВГ показало наличие области фундаментального поглощения вблизи фоновых мод, а также резонансное усиление кубичной нелинейной восприимчивости для двух фоновых мод $\Omega_1 = 1.3$ ТГц и $\Omega_2 = 2$ ТГц. Результаты согласуются как с полученными нами ранее результатами по широкополосной TDS спектроскопии (коэффициент поглощения), так и с результатами спектроскопии комбинационного рассеяния света по определению частот фоновых мод. Впервые получена спектральная зависимость кубичной нелинейной восприимчивости в ТГц-диапазоне. Полученные результаты важны для понимания физики процессов взаимодействия ТГц-излучения с сегнетоэлектрическими кристаллами. Полученные значения коэффициента поглощения могут быть использованы при создании устройств ТГц-диапазона на кристаллах PGO.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-12-00334), а также Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-21-00043). Авторы благодарят А.А. Буша за предоставление кристалла PGO.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 22-12-00334) and the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 20-21-00043). The authors also thank A.A. Bush for the PGO crystal.

Вклад авторов

В.Р. Билык – проведение экспериментальных исследований ТГц-TDS кристалла PGO, обработка экспериментальных данных.

К.А. Брехов – проведение экспериментальных исследований динамики нелинейно-оптического отклика кристалла PGO.

М.Б. Агранат – определение научной концепции, написание первоначального текста статьи.

Е.Д. Мишина – определение научной концепции, написание первоначального текста статьи, обработка экспериментальных данных, расчет оптических констант кристалла PGO.

Authors' contributions

V.R. Bilyk – experimental studies of the THz-TDS of the PGO crystal; analysis of experimental data.

K.A. Brekhov – experimental studies of the PGO crystal nonlinear response dynamics.

M.B. Agranat – definition of the research concept; writing the initial text of the manuscript.

E.D. Mishina – definition of the research concept; writing the initial text of the manuscript; analysis of experimental data, calculation of the PGO crystal optical constants.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Iwasaki H., Sugii K., Yamada T., Niizeki N. $5\text{PbO} \cdot 3\text{GeO}_2$ Crystal; a new ferroelectric. *Appl. Phys. Lett.* 1971;18(10):444–445. <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1653487>
- Bush A.A., Kamentsev K.E., Mamin R.F. Transformation of dielectric properties and appearance of relaxation behavior in $\text{Pb}_3(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_3\text{O}_{11}$ crystals. *J. Exp. Theor. Phys.* 2005;100(1):139–151. <http://link.springer.com/10.1134/1.1866206>
- Hosea T.J.C. Raman scattering from soft modes in barium-doped lead germanate. *J. Raman Spectrosc.* 1990;21(11):717–724. <https://doi.org/10.1002/jrs.1250211104>
- Gorelik V.S., Pyatyshev A.Y. Raman scattering from the effective soft mode in lead germanate crystal. *J. Raman Spectrosc.* 2020;51(6):969–977. <https://doi.org/10.1002/jrs.5854>
- Udina M., Cea T., Benfatto L. Theory of coherent-oscillations generation in terahertz pump-probe spectroscopy: From phonons to electronic collective modes. *Phys. Rev. B.* 2019;100(16):165131. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.214304>
- Melnikov A.A., Boldyrev K.N., Selivanov Y.G., Martovitskii V.P., Chekalin S.V., Ryabov E.A. Coherent phonons in a Bi_2Se_3 film generated by an intense single-cycle THz pulse. *Phys. Rev. B.* 2018;97(21):214304. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.214304>
- Kozina M., Fechner M., Marsik P., van Driel T., Glowina J.M., Bernhard C., Radovic M., Zhu D., Bonetti S., Staub U., Hoffmann M.C. Terahertz-driven phonon upconversion in SrTiO_3 . *Nat. Phys.* 2019;15(4):387–392. <https://doi.org/10.1038/s41567-018-0408-1>
- Salén P., Basini M., Bonetti S., Hebling J., Krasilnikov M., Nikitin A.Y., Shamuilov G., Tibaid Z., Zhaunerchyk V., Goryashko V. Matter manipulation with extreme terahertz light: Progress in the enabling THz technology. *Phys. Rep.* 2019;836–837:1–74. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2019.09.002>
- Bawuah P., Zeitler J.A. Advances in terahertz time-domain spectroscopy of pharmaceutical solids: A review. *TrAC Trends Anal. Chem.* 2021;139(40):116272. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116272>
- Ryu H.-C., Kwak M.-H., Kang S.-B., Jeong S.-Y., Paek M.-C., Kang K.-Y., Lee S.-J., Moon S.E., Park S.-O. A dielectric property analysis of ferroelectric thin film using terahertz time-domain spectroscopy. *Integr. Ferroelectr.* 2007;95(1):83–91. <https://doi.org/10.1080/10584580701756573>
- Билык В.Р., Гришунин К.А. Комплексный показатель преломления титаната стронция в терагерцовом диапазоне частот. *Russ. Technol. J.* 2019;7(4):71–80. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-71-80>
- [Bilyk V.R., Grishunin K.A. Complex refractive index of strontium titanate in the terahertz frequency range. *Russ. Technol. J.* 2019;7(4):71–80 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-71-80>]
- Bilyk V., Mishina E., Sherstyuk N., Bush A., Ovchinnikov A., Agranat M. Transient polarization reversal using an intense THz pulse in silicon-doped lead germanate. *Phys. Status Solidi (RRL) – Rapid Res. Lett.* 2021;15(1):2000460. <https://doi.org/10.1002/pssr.202000460>, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pssr.202000460>
- Lockwood D.J., Hosea T.J., Taylor W. The complete Raman spectrum of paraelectric and ferroelectric lead germanate. *J. Phys. C: Solid State Phys.* 1980;13(8):1539. <https://doi.org/10.1088/0022-3719/13/8/023>
- Vicario C., Jazbinsek M., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Ashitkov S.I., Agranat M.B., Hauri C.P. High efficiency THz generation in DSTMS, DAST and OH1 pumped by Cr:forsterite laser. *Opt. Express.* 2015;23(4):4573–4580. <https://doi.org/10.1364/OE.23.004573>
- Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Agranat M.B., Fortov V.E., Jazbinsek M., Hauri C.P. Generation of strong-field spectrally tunable terahertz pulses. *Opt. Express.* 2020;28(23):33921–33936. <https://doi.org/10.1364/OE.405545>, <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=oe-28-23-33921>
- Бломберген Н. *Нелинейная оптика*: пер. с англ. под ред. С.А. Ахманова и Р.В. Хохлова. М.: Мир; 1966. 424 с. [Blombergen N. *Nelineinaya optika (Nonlinear Optics)*; transl. from Engl. Akhmanov S.A., Khokhlov R.V. (Eds.). Moscow: Mir; 1966. 424 p. (in Russ.).] [Bloembergen N. *Nonlinear Optics*. Harvard University. New-York, Amsterdam: Benjamin W.A.; 1965. 220 p.]

Об авторах

Билык Владислав Романович, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник, кафедра наноэлектроники Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: vrbilyk@mail.ru. ResearcherID AAN-4586-2019, Scopus Author ID 57194048515, <https://orcid.org/0000-0002-3013-8655>

Брехов Кирилл Алексеевич, к.ф.-м.н., инженер-исследователь, кафедра наноэлектроники Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: brekhov_ka@mail.ru. ResearcherID Q-1014-2017, Scopus Author ID 55452447100, <https://orcid.org/0000-0001-9091-2609>

Агранат Михаил Борисович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, ФГБУН Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: agranat2004@mail.ru. Scopus Author ID 6602697816, <https://orcid.org/0000-0001-7819-822X>

Мишина Елена Дмитриевна, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией, кафедра наноэлектроники Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mishina_elena57@mail.ru. ResearcherID D-6402-2014, Scopus Author ID 7005350309, <https://orcid.org/0000-0003-0387-5016>

About the authors

Vladislav R. Bilyk, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Junior Researcher, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: vrbilyk@mail.ru. ResearcherID AAH-4586-2019, Scopus Author ID 57194048515, <https://orcid.org/0000-0002-3013-8655>

Kirill A. Brekhov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Research Engineer, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: brekhov_ka@mail.ru. ResearcherID Q-1014-2017, Scopus Author ID 55452447100, <https://orcid.org/0000-0001-9091-2609>

Mikhail B. Agranat, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (13/2, Izhorskaya ul., Moscow, 125412 Russia). E-mail: agranat2004@mail.ru. Scopus Author ID 6602697816, <https://orcid.org/0000-0001-7819-822X>

Elena D. Mishina, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory, Department of Nanoelectronics, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mishina_elena57@mail.ru. ResearcherID D-6402-2014, Scopus Author ID 7005350309, <https://orcid.org/0000-0003-0387-5016>