

## ФОТОНИКА И ФОТОИНФОРМАТИКА PHOTONICS AND OPTOINFORMATICS

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-635-642

УДК 535-14

### Исследование дисперсионных свойств конгруэнтного кристалла ниобата лития в терагерцовом диапазоне частот

Владимир Сергеевич Шумигой<sup>1</sup>✉, Егор Николаевич Опарин<sup>2</sup>,  
 Александра Олеговна Набилкова<sup>3</sup>, Максим Владимирович Мельник<sup>4</sup>,  
 Антон Николаевич Цыпкин<sup>5</sup>, Сергей Аркадьевич Козлов<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>1</sup> [vshumigay@itmo.ru](mailto:vshumigay@itmo.ru)✉, <https://orcid.org/0000-0001-8597-1196>

<sup>2</sup> [en\\_oparin@itmo.ru](mailto:en_oparin@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4009-7594>

<sup>3</sup> [aonabilkova@itmo.ru](mailto:aonabilkova@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5699-2211>

<sup>4</sup> [mmelnik@itmo.ru](mailto:mmelnik@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0796-0659>

<sup>5</sup> [tsytkin@itmo.ru](mailto:tsytkin@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>

<sup>6</sup> [sakozlov@itmo.ru](mailto:sakozlov@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2692-627X>

#### Аннотация

**Предмет исследования.** В терагерцовом диапазоне частот рассмотрены дисперсионные кривые показателя конгруэнтного ниобата лития (cLN), срезанного перпендикулярно осям  $x$  и  $z$ . **Метод.** В исследовании применен метод терагерцовой спектроскопии с разрешением во времени, основанный на измерении эллиптичности пробного пучка, прошедшего через изначально изотропный детектирующий кристалл, который при воздействии терагерцового поля становится двулучепреломляющим. Величина наведенного двулучепреломления пропорциональна амплитуде терагерцового поля. С помощью фурье-анализа терагерцового импульса, прошедшего через кристалл cLN, и опорного импульса, не взаимодействующего с объектом, построены частотные зависимости показателя преломления и коэффициента поглощения исследуемого объекта. **Основные результаты.** Представлены дисперсионные кривые показателя преломления для действительной части показателя преломления кристалла cLN, срезанного вдоль плоскостей (100) и (001), в диапазоне частот 0,25–1,25 ТГц. Выполнено моделирование распространения полупериодного импульса в средах с дисперсиями на основании данных научных работ других авторов. В результате найдены временные формы выходных сигналов. Сделан вывод о неточности дисперсионных кривых из выбранных работ. Выявлены параметры, оптимизация которых позволила устранить неточности отображения дисперсионной зависимости для высокочастотной области терагерцового спектра. **Практическая значимость.** Полученные результаты о дисперсии очень важны для проектирования устройств, основанных на нелинейно-оптических эффектах. Полученные результаты полезны для генерации разностных частот, оптического выпрямления и генерации терагерцового излучения, а также для областей, где требуются точные данные о терагерцовых дисперсионных свойствах нелинейных кристаллов, в том числе cLN.

#### Ключевые слова

терагерцовое излучение, дисперсия, конгруэнтный кристалл, ниобат лития, терагерцовая спектроскопия с разрешением во времени, показатель преломления

#### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках Государственного задания (Паспорт № 2019-0903).

**Ссылка для цитирования:** Шумигой В.С., Опарин Е.Н., Набилкова А.О., Мельник М.В., Цыпкин А.Н., Козлов С.А. Исследование дисперсионных свойств конгруэнтного кристалла ниобата лития в терагерцовом диапазоне частот // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 4. С. 635–642. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-635-642

## Investigation of congruent lithium niobate crystal dispersion properties in the terahertz frequency range

Vladimir S. Shumigai<sup>1</sup>, Egor N. Oparin<sup>2</sup>, Aleksandra O. Nabilkova<sup>3</sup>, Maksim V. Melnik<sup>4</sup>, Anton N. Tsytkin<sup>5</sup>, Sergei A. Kozlov<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> ITMO University, Saint Petersburg, Russian Federation

<sup>1</sup> vshumigay@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8597-1196>

<sup>2</sup> en\_oparin@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4009-7594>

<sup>3</sup> aonabilkova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5699-2211>

<sup>4</sup> mmelnik@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0796-0659>

<sup>5</sup> tsypkinan@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>

<sup>6</sup> sakozlov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2692-627X>

### Abstract

Dispersion curves of the refraction index of a congruent lithium niobate (cLN) crystal cut perpendicular to the  $x$  and  $z$  axes in the terahertz frequency range are considered. In the study, the method of terahertz time domain spectroscopy with time resolution is used passed through an initially isotropic detecting crystal which becomes birefringent when exposed to a terahertz field. The magnitude of the induced birefringence is proportional to the amplitude of the terahertz field. Using Fourier analysis of a terahertz pulse passing through a cLN crystal and a reference pulse that does not interact with the object, the frequency dependences of the refractive index and the absorption coefficient of the object under study are constructed. Dispersion curves are presented for the real part of the refractive index of a cLN crystal cut along the planes (100) and (001), in the frequency range 0.25–1.25 THz. Simulation of the propagation of a one-and-a-half-cycle pulse in media with dispersion is performed based on the data of scientific papers by other authors. As a result, the temporal forms of the output signals are found. Conclusion about the inaccuracy of the dispersion curves from the selected works is made. The parameters has been identified whose optimization made it possible to eliminate inaccuracies in the display of the dispersion dependence for the high-frequency region of the terahertz spectrum were identified. The results obtained are very important for the design of devices based on nonlinear optical effects. These data will be useful for the generation of difference frequencies, optical rectification and generation of terahertz radiation as well as for areas where accurate data on the terahertz dispersion properties of nonlinear crystals, including cLN, are required.

### Keywords

terahertz radiation, dispersion, congruent crystal, lithium niobate, terahertz time-domain spectroscopy, refractive index

### Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Education of the Russian Federation (Passport No. 2019-0903).

**For citation:** Shumigai V.S., Oparin E.N., Nabilkova A.O., Melnik M.V., Tsytkin A.N., Kozlov S.A. Investigation of congruent lithium niobate crystal dispersion properties in the terahertz frequency range. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 635–642 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-4-635-642

### Введение

Впервые терагерцовое (ТГц) излучение было экспериментально продемонстрировано около 100 лет тому назад [1], но его разнообразные возможности применения начали активно изучаться только в течение последних десятилетий [1, 2]. В настоящее время существуют доступные источники как импульсного, так и непрерывного излучений ТГц диапазона. Импульсное ТГц излучение применяется в спектроскопии [3], при исследовании фазовых переходов, вызванных сильным полем [4], в ТГц нелинейной оптике [5, 6], и др. Во многих исследованиях используются прозрачные в ТГц диапазоне частот материалы. Пример таких материалов — кристаллы, применяемые для генерации или детектирования импульсного ТГц поля. Один из самых эффективных генераторов ТГц излучения — одноосный конгруэнтный кристалл ниобата лития (cLN) [7–9]. Более того, кристалл cLN является материалом с сильными нелинейно-оптическими свойствами [10]. Области применения широкополосного ТГц излучения требуют наличие информации о линейных свойствах материалов, таких как дисперсия и поглощение.

Один из методов получения полной информации о действительной и мнимой частях показателя прелом-

ления — метод ТГц спектроскопии с разрешением во времени [11, 12]. Данная методика основана на измерении эллиптичности пробного пучка, прошедшего через изначально изотропный детектирующий кристалл, который при воздействии ТГц поля преобразуется в двулучепреломляющий. Величина наведенного двулучепреломления пропорциональна напряженности электрического поля в импульсе ТГц излучения. Для измерения временной формы ТГц импульса выполняют изменение временной задержки зондирующего импульса на некоторую величину [13]. Далее с помощью фурье-анализа ТГц импульса, прошедшего через материал, и опорного импульса, не взаимодействующего с объектом, получают частотные зависимости показателя преломления и коэффициента поглощения исследуемого объекта.

Отметим, что дисперсионные свойства кристалла cLN в ТГц диапазоне частот были измерены в работах [14, 15], где кристалл продемонстрировал сильную дисперсию показателя преломления в диапазоне частот 0,2–2 ТГц. Данные результаты оказывали большое влияние на временную структуру импульса [16].

В настоящей работе приведены зависимости показателя преломления cLN, срезанного перпендикулярно осям  $x$  и  $z$ , от частоты излучения в диапазоне 0,25–

1,25 ТГц. Зависимости представлены для значений толщин кристалла: 0,52 мм, 1 мм и 2,21 мм. Приведено сравнение дисперсионных кривых с дисперсиями кристалла cLN в ТГц диапазоне частот, полученными в научных работах других авторов. Дополнительно выполнена оценка сравнения дисперсионного уширения ТГц импульса во времени в процессе моделирования его распространения в среде с заданной дисперсией. Показано, что изначально полупериодный ТГц импульс уширяется в средах с дисперсиями, полученными в работах других авторов, что не соответствует экспериментальным данным из настоящей работы. В результате сделан вывод, что дисперсионные кривые cLN из рассмотренных работ не согласовываются со значениями показателя преломления в ТГц диапазоне частот, полученными в настоящей работе. Предложена методика оптимизации параметров в процессе пост-обработки.

### Экспериментальные методы

Измерения проведены на стандартной установке ТГц спектроскопии с разрешением во времени. В качестве источника излучения использован фемтосекундный Yb-лазер с центральной длиной волны 1050 нм, длительностью импульсов 100 фс и их энергией 30 нДж.

Схема ТГц спектрометра представлена на рис. 1. Инфракрасный пучок разделен на два в соотношении мощностей 90:10 с помощью светоделителя. Более мощный пучок освещает кристалл арсенида индия (InAs), помещенный в магнитное поле со значением индукции 2,4 Т, в котором за счет фотоэффекта Дембера производилась генерация ТГц излучения. С помощью системы линз ТГц импульсы направлялись через образец кристалла cLN в систему электрооптического детектирования на основе кристалла теллурида кадмия (CdTe). В ходе эксперимента были зарегистрированы временные формы ТГц импульсов, прошедшие через свободное пространство (O) и три образца (Л<sub>1-3</sub>) — x-cLN толщиной 1 мм и 2,21 мм, и z-cLN толщиной 0,52 мм. Спектр детектируемого ТГц излучения обладал полущириной 0,5 ТГц и центральной частотой 0,4 ТГц.

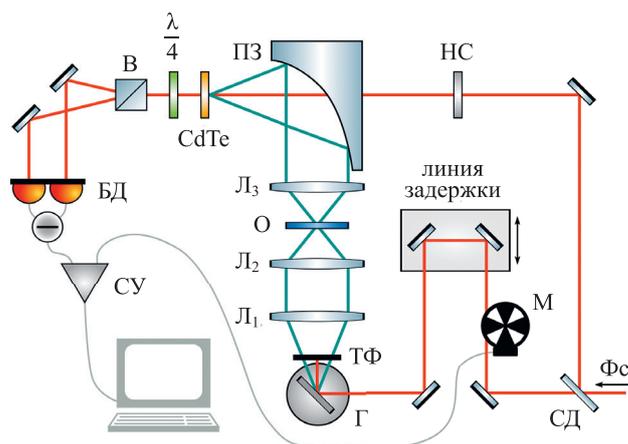


Рис. 1. Экспериментальная установка терагерцевой спектроскопии с разрешением во времени.

Фс — фемтосекундный инфракрасный импульс, СД — светоделитель 90:10, Г — генератор ТГц излучения, ТФ — фильтр, отсегающий инфракрасного излучения, Л<sub>1-3</sub> — линзы, O — образец, ПЗ — параболическое зеркало, НС — нейтральный светофильтр, В — призма Волластона, БД — балансный детектор, СУ и М — синхронный усилитель и оптико-механический модулятор

Fig. 1. Experimental setup of time-resolved terahertz spectroscopy.

Фс is femtosecond infrared pulse, СД is 90:10 beam splitter, Г is THz radiation generator, ТФ is filter that cuts off infrared radiation, Л<sub>1-3</sub> are lenses, O is sample, ПЗ is parabolic mirror, НС is neutral filter, В is Wollaston prism, БД is balanced detector, СУ and М are synchronous amplifier and opto-mechanical modulator

В результате экспериментальных данных о форме и спектре ТГц импульса, прошедшего через исследуемый кристалл cLN, построены дисперсионные кривые в диапазоне частот 0,25–1,25 ТГц. Действительная часть показателя преломления cLN в ТГц области частот найдена при помощи данных о спектре и форме ТГц импульса, прошедшего через кристалл. В качестве примера на рис. 2, а приведена типичная временная форма ТГц импульса, полученного при исследовании

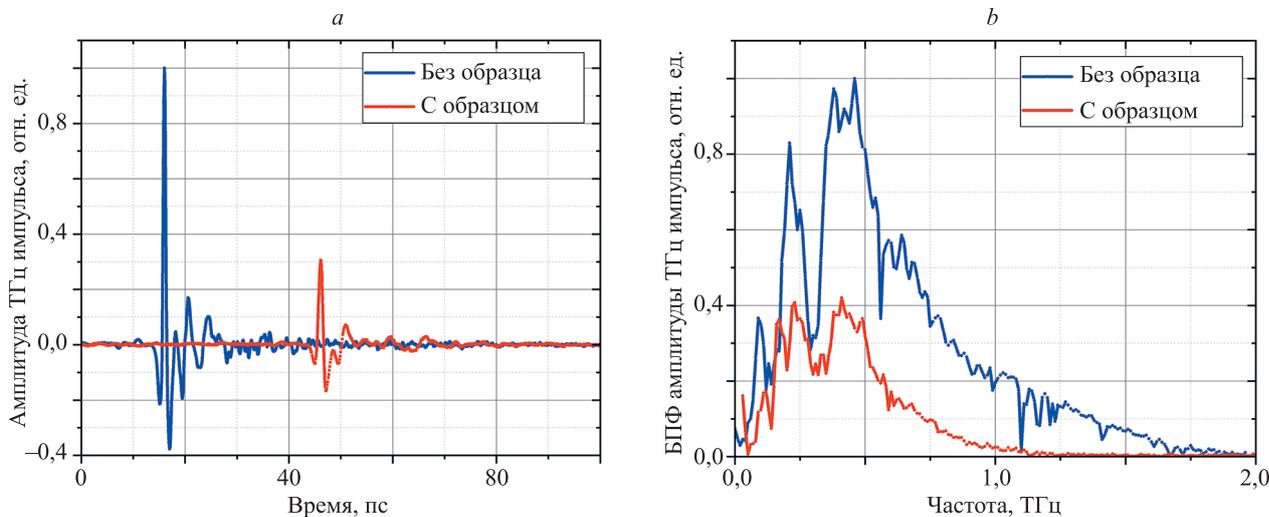


Рис. 2. Временная форма терагерцевого импульса (а), спектр терагерцевого импульса (b)

Fig. 2. Temporal form of the terahertz pulse (a), the spectrum of the terahertz pulse (b)

кристалла cLN, срезанного перпендикулярно оси  $x$  и обладающего толщиной 2,21 мм. На рис. 2,  $b$  изображен спектр детектируемого сигнала с центральной частотой 0,4 ТГц и полушириной 1 ТГц. Линии поглощения, возникающие на частотах выше 1 ТГц, вызваны содержанием водяных паров в воздухе.

### Обработка экспериментальных данных

Для расчета комплексного показателя преломления кристаллов cLN для каждого образца зарегистрировано два импульса:  $E_{sam}(t)$ , прошедший через образец, и  $E_{ref}(t)$ , распространённый в отсутствии образца. Полученные сигналы преобразованы из временной области в спектральную при помощи быстрого преобразования Фурье и имеют вид:

$$E_{sam}(\omega) = \frac{4\hat{n}_s n_0}{(\hat{n}_s + n_0)^2} \exp\left[-i\hat{n}_s \frac{\omega l}{c}\right] E_0(\omega),$$

$$E_{ref}(\omega) = \exp\left[-in_0 \frac{\omega l}{c}\right] E_0(\omega),$$

где  $\hat{n}_s = n_s - ik_s$  — комплексный показатель преломления образца;  $n_s$  — действительная часть  $\hat{n}_s$ ;  $k_s$  — мнимая часть  $\hat{n}_s$ ;  $i$  — мнимая единица;  $n_0$  — показатель преломления воздуха;  $l$  — длина распространения излучения в образце, которая в рассматриваемом случае равна его толщине;  $\omega$  — циклическая частота излучения;  $c$  — скорость света в вакууме;  $E_0$  — амплитуда электрического поля.

Извлечение оптических характеристик образца требует расчета его передаточной функции:

$$H_0(\omega) = \frac{E_{sam}(\omega)}{E_{ref}(\omega)} = \frac{4\hat{n}_s n_0}{(\hat{n}_s + n_0)^2} \exp\left[-k_s \frac{\omega l}{c}\right] \exp\left[-i(n_s - n_0) \frac{\omega l}{c}\right].$$

В рассматриваемом спектральном диапазоне кристалл cLN можно считать оптически прозрачным, т. е. допускается комплексный показатель преломления  $\hat{n}(\omega)$ , входящий во френелевский коэффициент пропускания, аппроксимировать действительной частью  $n_s$ . Например, получим аргумент от упрощенной таким образом передаточной функции:

$$\angle H(\omega) = -i(n_s - n_0) \frac{\omega l}{c},$$

где  $\angle H(\omega)$  — фаза комплекснозначной передаточной функции  $H(\omega)$ .

Отсюда может быть рассчитан показатель преломления образца:

$$n_s = n_0 - \frac{c}{\omega l} \angle H(\omega).$$

Описанный метод расчета крайне чувствителен к корректному определению фазового спектра ТГц излучения. Неточности может вносить ряд факторов. Например, множественное отражение ТГц импульса от границ образца приводит к возникновению в сиг-

нале повторных импульсов. Их наличие выражается в появлении в спектре осцилляций на частоте следования импульсов. По своей природе данный эффект близок к действию интерферометра Фабри–Перо. Однако интерференция в данном случае оказывается строго спектральной и может быть исключена путем наложения на сигнал временного окна.

Второй важный фактор — корректное определение рабочего диапазона спектрометра. Например, удовлетворительное соотношение сигнал-шум выполняется для задействованного в работе спектрометра в диапазоне 0,25–1,25 ТГц [17]. Неизбежное наличие шума в сигнале приводит к искажению фазовой информации на частотах ниже и выше указанных. Особенно важна низкочастотная часть спектра, которая в первую очередь влияет на развитие фазы во всем рассматриваемом диапазоне. При этом разрывы и скачки диапазона могут исказить кривую показателя преломления, создавая картину, похожую на область высокой дисперсии. Во избежание этого фаза на частотах ниже 0,25 ТГц была линейно экстраполирована до нуля, опираясь на поведение кривой в пределах рабочего диапазона.

С учетом перечисленных факторов построены дисперсионные кривые для cLN, срезанного перпендикулярно осям  $x$  и  $z$ . Одновременно построены дисперсионные кривые по данным научных работ [18–20], где кристалл cLN проявлял сильную дисперсию в ТГц диапазоне частот. Данные дисперсионные кривые представлены на рис. 3.

Сравнивая зависимости из работ [18–20] с кривыми, полученными из эксперимента в настоящей работе, сделаем вывод, что для  $x$ -срезанного cLN в диапазоне 0,5–1,25 ТГц наблюдается расхождение данных — экспериментальные кривые демонстрируют меньший рост. Для  $z$ -срезанного cLN значительное расхождение данных наблюдается на всем исследуемом диапазоне ТГц частот.

Выполним моделирование распространения ТГц импульсов в средах с вычисленными дисперсиями для сравнения экспериментальных данных о форме импульса с результатами численного моделирования.

### Численное моделирование

Рассмотрим распространение фемтосекундных низкоинтенсивных импульсов ТГц диапазона частот в диэлектрической изотропной немагнитной среде. Математическая модель динамики импульсов в таких средах может быть описана уравнением [21]:

$$\frac{\partial E}{\partial z} - a \frac{\partial^3 E}{\partial t^3} + b \int_{-\infty}^{\tau} E d\tau' = 0,$$

где  $E$  — действительная часть электрического поля импульса;  $\tau = t - N_0 \frac{z}{c}$  — время в бегущей системе координат,  $c$  — скорость света в вакууме,  $z$  — координата, вдоль которой распространяется импульс.  $N_0$ ,  $a$  и  $b$  — параметры, описывающие эффективный показатель преломления среды и его дисперсию:

$$n(\omega) = N_0 + a\omega^2 - b \frac{c}{\omega^2}. \quad (1)$$

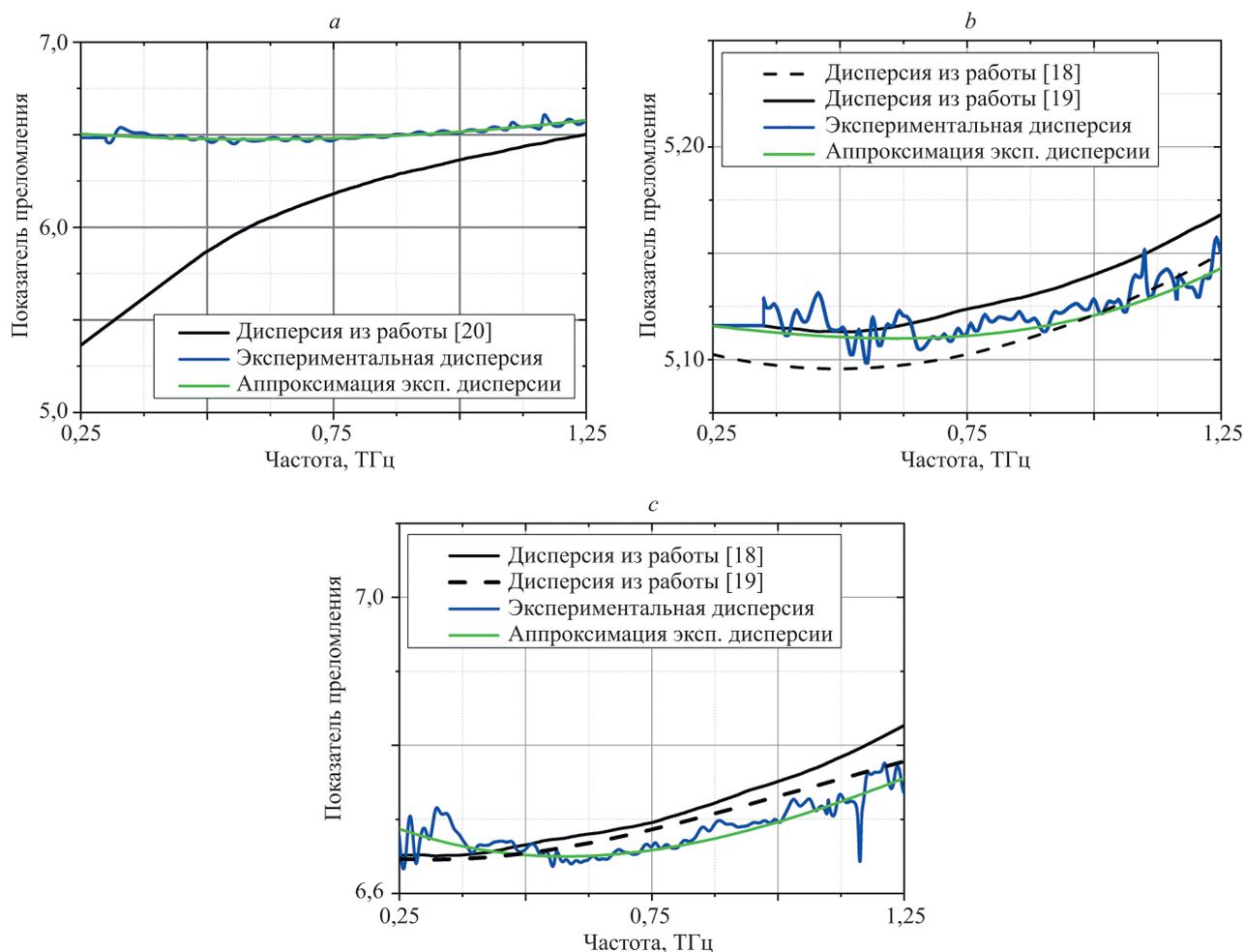


Рис. 3. Дисперсионные кривые из работ [18–20] и вычисленные дисперсии для кристалла cLN, срезанного перпендикулярно осям:  $z$  для случая, когда кристалл изотропен (а);  $x$  для необыкновенной (b) и обыкновенной (c) волн

Fig. 3. Dispersion curves from works [18–20] and calculated dispersions for the cLN crystal cut perpendicular to the axes:  $z$  for the case when the crystal is isotropic (a);  $x$  for extraordinary (b) and ordinary (c) waves

Рассчитанные дисперсии кристалла cLN, срезанного вдоль плоскостей (100) и (001), и начальная временная форма ТГц импульса обработаны программой, аппроксимирующей экспериментальные кривые с помощью уравнения (1). Выполним моделирование распространения полупериодного ТГц импульса в среде с заданной дисперсией. При правильных параметрах смоделированный импульс должен совпасть по форме и по времени с импульсом, детектируемым после прохождения кристалла cLN в эксперименте. Соответствующие импульсы представлены на рис. 4.

Результаты моделирования с большой точностью совпали с данными из эксперимента и показали, что изначально полупериодный импульс не уширяется после прохождения через образец cLN толщинами 0,52 мм, 1 мм и 2,21 мм. В результате сделан вывод, что используемая методика расчета действительной и мнимой частей показателя преломления дает корректные результаты.

Убедившись в том, что экспериментальные данные сходятся с результатами моделирования с высокой точностью, было произведено численное моделирование распространения импульса заданной формы в кристалле cLN со значениями дисперсий из работ [18–20].

По результатам численного моделирования распространения полупериодного импульса в средах с дисперсиями найдены временные формы выходных сигналов. Данные импульсы представлены на рис. 5 и рис. 6.

Анализ временных форм ТГц импульсов, прошедших через среды со значениями дисперсии из работ [18–20], показал, что полупериодный импульс испытывает дисперсионное уширение, тем самым увеличивая число колебаний, чего на эксперименте не наблюдалось. В соответствии с этим был сделан вывод о важности выбора параметров в процессе пост-обработки для дальнейшего определения показателя преломления исследуемой среды.

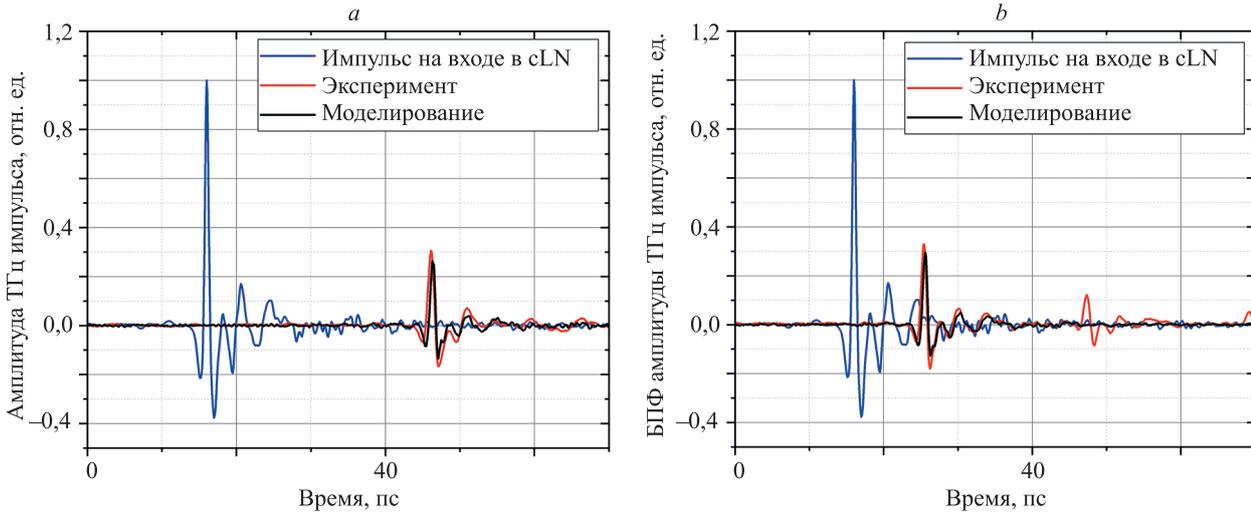


Рис. 4. Временные формы терагерцовых импульсов — до и после прохождения через кристалл cLN: x-срезанного толщиной 2,21 мм (a), z-срезанного толщиной 0,52 мм (b)

Fig. 4. Temporal forms of terahertz pulses — before and after passing through the cLN crystal: x-cut with a thickness of 2.21 mm (a), z-cut with a thickness of 0.52 mm (b)

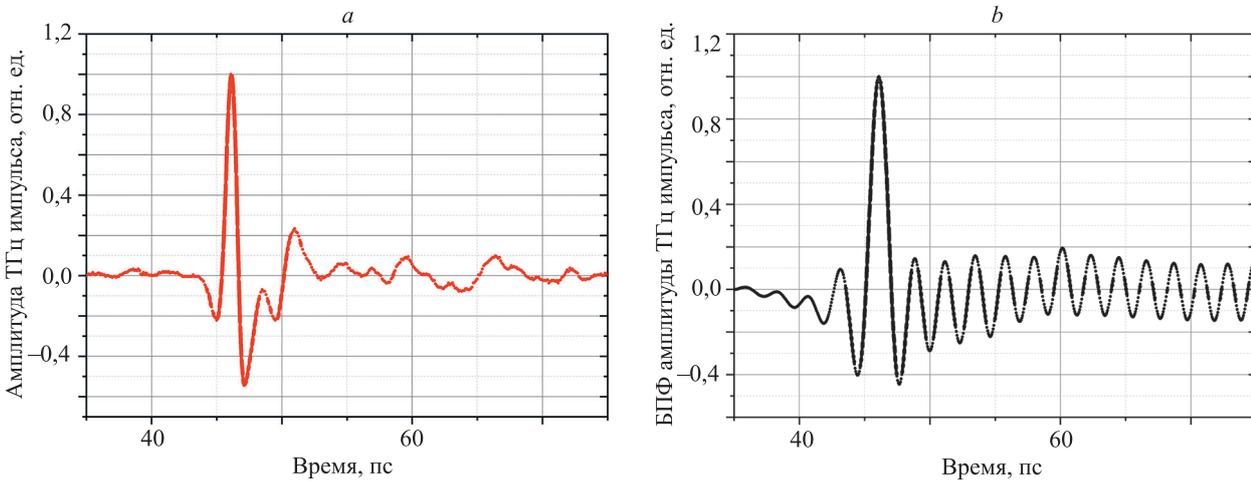


Рис. 5. Временные формы терагерцовых импульсов после распространения в x-cLN толщиной 2,21 мм с: экспериментальной дисперсией (a), дисперсией из работы [19] (b)

Fig. 5. Temporal forms of terahertz pulses after propagation in x-cLN with a thickness of 2.21 mm with: experimental dispersion (a), dispersion from work [19] (b)

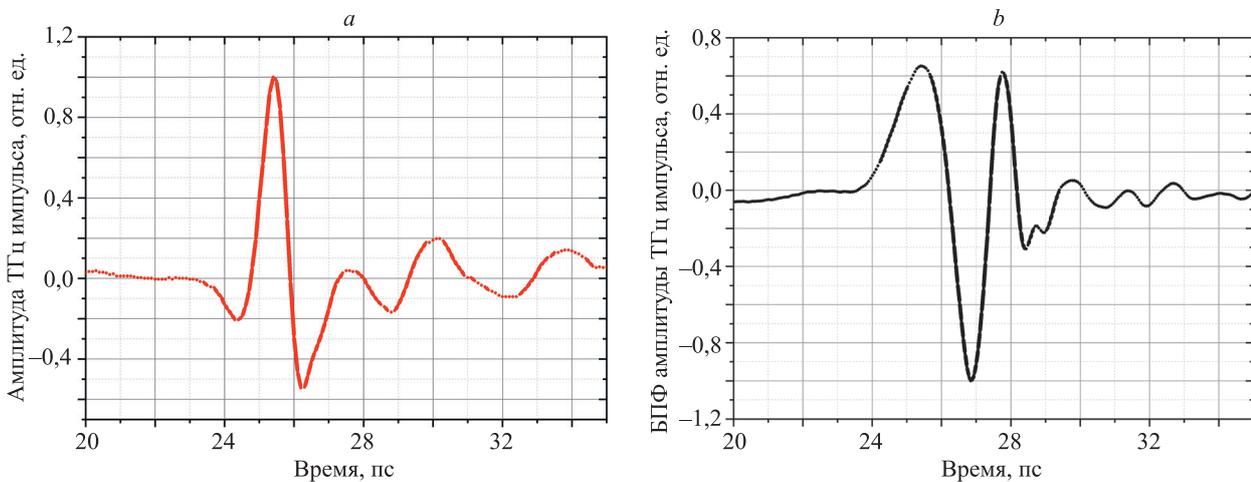


Рис. 6. Временные формы терагерцовых импульсов после распространения в z-cLN толщиной 0,52 мм с: экспериментальной дисперсией (a), дисперсией из работы [20] (b)

Fig. 6. Temporal forms of terahertz pulses after propagation in a 0.52 mm thick z-cLN with: experimental dispersion (a), dispersion from work [20] (b)

### Заключение

В результате проведения экспериментов с использованием установки терагерцовой спектроскопии с разрешением во времени были найдены дисперсионные кривые показателя преломления кристалла cLN, срезанного перпендикулярно осям  $x$  и  $z$ , в диапазоне частот 0,25–1,25 ТГц. Численное моделирование распространения полуторапериодного импульса в средах с найденными дисперсиями показало, что терагерцовый импульс не претерпевает дисперсионное уширения, что находится в полном соответствии с экспериментальными данными. Выполнен сравнительный анализ полученных дисперсионных кривых показателя преломления с данными работ [18–20]. Результаты, полученные в ходе численного моделирования распространения терагерцового излучения в кристалле cLN с такими дисперсиями, показали, что полуторапериодный импульс дисперсионно уширился в  $x$ -cLN толщиной 1 мм и 2,21 мм, и в  $z$ -cLN толщиной 0,52 мм, чего не наблюдалось при эксперименте.

Расхождение дисперсионных кривых показателя преломления кристалла cLN можно объяснить разным

выбором параметров в процессе пост-обработки данных из эксперимента. В связи с этим была предложена методика подбора параметров для пост-обработки, исключающая ошибки при определении дисперсии образцов. Согласно ей, необходимо накладывать на выходной сигнал временное окно, чтобы не учитывать повторные импульсы, обусловленные множественным отражением терагерцового импульса от границ образца. Также важным параметром является рабочий диапазон спектрометра. Его необходимо точно определить для получения корректных данных. Необходимо задействовать диапазон частот, для которого сохраняются большие значения соотношения сигнал-шум, так как наличие шума в сигнале приводит к искажению фазовой информации на участках спектра с низким соотношением сигнал-шум.

Рассмотренные примеры показали, что точные знания о дисперсионных характеристиках позволяют учитывать особенности материалов в терагерцовом диапазоне частот и для их использования в системах терагерцовой фотоники.

### Литература

1. Glagolewa-Arkadiewa A. Short electromagnetic waves of wavelength up to 82 microns // *Nature*. 1924. V. 113. N 2844. P. 640–640. <https://doi.org/10.1038/113640a0>
2. Evenson K.M., Wells J.S., Matarrese L.M. Absolute Frequency Measurements of The CO<sub>2</sub> CW Laser at 28 THz (10.6 $\mu$ m) // *Applied Physics Letters*. 1970. V. 16. N 6. P. 251–253. <https://doi.org/10.1063/1.1653183>
3. Hangyo M., Tani M., Nagashima T. Terahertz time-domain spectroscopy of solids: A review // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 2005. V. 26. N 12. P. 1661–1690. <https://doi.org/10.1007/s10762-005-0288-1>
4. Liu M.K., Hwang H.Y., Tao H., Strikwerda A.C., Fan K.B., Keiser G.R., Sternbach A.J., West K.G., Kittiwatanakul S., Lu J.W., Wolf S.A., Omenetto F.G., Zhang X., Nelson K.A., Averitt R.D. Terahertz-field-induced insulator-to-metal transition in vanadium dioxide metamaterial // *Nature*. 2012. V. 487. N 7407. P. 345–348. <https://doi.org/10.1038/nature11231>
5. Тсупкин А.Н., Мельник М.В., Жуклова М.О., Воронцова И.О., Путилин С.Е., Козлов С.А., Zhang X.-C. High Kerr nonlinearity of water in THz spectral range // *Optics express*. 2019. V. 27. N 8. P. 10419–10425. <https://doi.org/10.1364/OE.27.010419>
6. Тсупкин А., Жуклова М., Воронцова И., Куля М., Путилин С., Козлов С., Choudhary S., Boyd R.W. Giant third-order nonlinear response of liquids at terahertz frequencies // *Physical Review Applied*. 2021. V. 15. N 5. P. 054009. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.054009>
7. Kawase K., Sato M., Taniuchi T., Ito H. Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO<sub>3</sub> with monolithic grating coupler // *Applied Physics Letters*. 1996. V. 68. N 18. P. 2483–2485. <https://doi.org/10.1063/1.115828>
8. Bodrov S.B., Ilyakov I.E., Shishkin B.V., Stepanov A.N. Efficient terahertz generation by optical rectification in Si-LiNbO<sub>3</sub>-air-metal sandwich structure with variable air gap // *Applied Physics Letters*. 2012. V. 100. N 20. P. 201114. <https://doi.org/10.1063/1.4719674>
9. Nagashima K., Kosuge A. Design of rectangular transmission gratings fabricated in LiNbO<sub>3</sub> for high-power terahertz-wave generation // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2010. V. 49. N 12R. P. 122504. <https://doi.org/10.1143/JJAP.49.122504>
10. Zhukova M., Melnik M., Vorontsova I., Тсупкин А., Козлов С. Estimations of low-inertia cubic nonlinearity featured by electro-optical crystals in the thz range // *Photonics*. 2020. V. 7. N 4. P. 98. <https://doi.org/10.3390/photonics7040098>
11. Neu J., Schmuttenmaer C.A. Tutorial: An introduction to terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS) // *Journal of Applied Physics*. 2018. V. 124. N 23. P. 231101. <https://doi.org/10.1063/1.5047659>

### References

1. Glagolewa-Arkadiewa A. Short electromagnetic waves of wavelength up to 82 microns. *Nature*, 1924, vol. 113, no. 2844, pp. 640–640. <https://doi.org/10.1038/113640a0>
2. Evenson K.M., Wells J.S., Matarrese L.M. Absolute Frequency Measurements of The CO<sub>2</sub> CW Laser at 28 THz (10.6 $\mu$ m). *Applied Physics Letters*, 1970, vol. 16, no. 6, pp. 251–253. <https://doi.org/10.1063/1.1653183>
3. Hangyo M., Tani M., Nagashima T. Terahertz time-domain spectroscopy of solids: A review. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, vol. 26, no. 12, pp. 1661–1690. <https://doi.org/10.1007/s10762-005-0288-1>
4. Liu M.K., Hwang H.Y., Tao H., Strikwerda A.C., Fan K.B., Keiser G.R., Sternbach A.J., West K.G., Kittiwatanakul S., Lu J.W., Wolf S.A., Omenetto F.G., Zhang X., Nelson K.A., Averitt R.D. Terahertz-field-induced insulator-to-metal transition in vanadium dioxide metamaterial. *Nature*, 2012, vol. 487, no. 7407, pp. 345–348. <https://doi.org/10.1038/nature11231>
5. Тсупкин А.Н., Мельник М.В., Жуклова М.О., Воронцова И.О., Путилин С.Е., Козлов С.А., Zhang X.-C. High Kerr nonlinearity of water in THz spectral range. *Optics express*, 2019, vol. 27, no. 8, pp. 10419–10425. <https://doi.org/10.1364/OE.27.010419>
6. Тсупкин А., Жуклова М., Воронцова И., Куля М., Путилин С., Козлов С., Choudhary S., Boyd R.W. Giant third-order nonlinear response of liquids at terahertz frequencies. *Physical Review Applied*, 2021, vol. 15, no. 5, pp. 054009. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.054009>
7. Kawase K., Sato M., Taniuchi T., Ito H. Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO<sub>3</sub> with monolithic grating coupler. *Applied Physics Letters*, 1996, vol. 68, no. 18, pp. 2483–2485. <https://doi.org/10.1063/1.115828>
8. Bodrov S.B., Ilyakov I.E., Shishkin B.V., Stepanov A.N. Efficient terahertz generation by optical rectification in Si-LiNbO<sub>3</sub>-air-metal sandwich structure with variable air gap. *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 100, no. 20, pp. 201114. <https://doi.org/10.1063/1.4719674>
9. Nagashima K., Kosuge A. Design of rectangular transmission gratings fabricated in LiNbO<sub>3</sub> for high-power terahertz-wave generation. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 49, no. 12R, pp. 122504. <https://doi.org/10.1143/JJAP.49.122504>
10. Zhukova M., Melnik M., Vorontsova I., Тсупкин А., Козлов С. Estimations of low-inertia cubic nonlinearity featured by electro-optical crystals in the thz range. *Photonics*, 2020, vol. 7, no. 4, pp. 98. <https://doi.org/10.3390/photonics7040098>
11. Neu J., Schmuttenmaer C.A. Tutorial: An introduction to terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS). *Journal of Applied Physics*, 2018, vol. 124, no. 23, pp. 231101. <https://doi.org/10.1063/1.5047659>

12. Peretti R., Mitryukovskiy S., Froberger K., Mebarki M.A., Eliet S., Vanwolleghem M., Lampin J.-F. THz-TDS time-trace analysis for the extraction of material and metamaterial parameters // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2018. V. 9. N 2. P. 136–149. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2018.2889227>
13. Nahata A., Weling A.S., Heinz T.F. A wideband coherent terahertz spectroscopy system using optical rectification and electro-optic sampling // *Applied Physics Letters*. 1996. V. 69. N 16. P. 2321–2323. <https://doi.org/10.1063/1.117511>
14. Pálfalvi L., Hebling J., Kuhl J., Pter Á., Polgár K. Temperature dependence of the absorption and refraction of Mg-doped congruent and stoichiometric LiNbO<sub>3</sub> in the THz range // *Journal of Applied Physics*. 2005. V. 97. N 12. P. 123505. <https://doi.org/10.1063/1.1929859>
15. Wang T.D., Lin S.T., Lin Y.Y., Chiang A.C., Huang Y.C. Forward and backward terahertz-wave difference-frequency generations from periodically poled lithium niobate // *Optics Express*. 2008. V. 16. N 9. P. 6471–6478. <https://doi.org/10.1364/OE.16.006471>
16. Дроздов А.А., Козлов С.А. Фазовая самодюляция одноперодных оптических волн // *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*. 2011. № 2(72). С. 99–105.
17. Grachev Y.V., Osipova M.O., Kuz'mina A.V., Bespalov V.G. Determining the working band of frequencies of a pulsed terahertz spectrometer // *Journal of Optical Technology*. 2014. V. 81. N 8. P. 468–471. <https://doi.org/10.1364/JOT.81.000468>
18. Li D., Ma G., Ge J., Hu S., Dai N. Terahertz pulse shaping via birefringence in lithium niobate crystal // *Applied Physics B*. 2009. V. 94. N 4. P. 623–628. <https://doi.org/10.1007/s00340-008-3334-6>
19. Unferdorben M., Szaller Z., Hajdara I., Hebling J., Pálfalvi L. Measurement of refractive index and absorption coefficient of congruent and stoichiometric lithium niobate in the terahertz range // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2015. V. 36. N 12. P. 1203–1209. <https://doi.org/10.1007/s10762-015-0165-5>
20. Mao Z.-L., Hou B.-H., Wang L., Sun Y.-M., Hao W. The study of the terahertz spectral of LiNbO<sub>3</sub> crystal // *Proc. of the Joint 31<sup>st</sup> International Conference on Infrared Millimeter Waves and 14<sup>th</sup> International Conference on Terahertz Electronics*. 2006. P. 465–465. <https://doi.org/10.1109/ICIMW.2006.368673>
21. Самарцев В., Козлов С. Основы фемтосекундной оптики. М.: Физматлит, 2009. 292 с.
22. Peretti R., Mitryukovskiy S., Froberger K., Mebarki M.A., Eliet S., Vanwolleghem M., Lampin J.-F. THz-TDS time-trace analysis for the extraction of material and metamaterial parameters. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 136–149. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2018.2889227>
23. Nahata A., Weling A.S., Heinz T.F. A wideband coherent terahertz spectroscopy system using optical rectification and electro-optic sampling. *Applied Physics Letters*, 1996, vol. 69, no. 16, pp. 2321–2323. <https://doi.org/10.1063/1.117511>
24. Pálfalvi L., Hebling J., Kuhl J., Pter Á., Polgár K. Temperature dependence of the absorption and refraction of Mg-doped congruent and stoichiometric LiNbO<sub>3</sub> in the THz range. *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 97, no. 12, pp. 123505. <https://doi.org/10.1063/1.1929859>
25. Wang T.D., Lin S.T., Lin Y.Y., Chiang A.C., Huang Y.C. Forward and backward terahertz-wave difference-frequency generations from periodically poled lithium niobate. *Optics Express*, 2008, vol. 16, no. 9, pp. 6471–6478. <https://doi.org/10.1364/OE.16.006471>
26. Drozdov S., Kozlov S. Phase self-modulation of single-cycle optical waves. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 2(72), pp. 99–105. (in Russian)
27. Grachev Y.V., Osipova M.O., Kuz'mina A.V., Bespalov V.G. Determining the working band of frequencies of a pulsed terahertz spectrometer. *Journal of Optical Technology*, 2014, vol. 81, no. 8, pp. 468–471. <https://doi.org/10.1364/JOT.81.000468>
28. Li D., Ma G., Ge J., Hu S., Dai N. Terahertz pulse shaping via birefringence in lithium niobate crystal. *Applied Physics B*, 2009, vol. 94, no. 4, pp. 623–628. <https://doi.org/10.1007/s00340-008-3334-6>
29. Unferdorben M., Szaller Z., Hajdara I., Hebling J., Pálfalvi L. Measurement of refractive index and absorption coefficient of congruent and stoichiometric lithium niobate in the terahertz range. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, vol. 36, no. 12, pp. 1203–1209. <https://doi.org/10.1007/s10762-015-0165-5>
30. Mao Z.-L., Hou B.-H., Wang L., Sun Y.-M., Hao W. The study of the terahertz spectral of LiNbO<sub>3</sub> crystal. *Proc. of the Joint 31<sup>st</sup> International Conference on Infrared Millimeter Waves and 14<sup>th</sup> International Conference on Terahertz Electronics*, 2006, pp. 465–465. <https://doi.org/10.1109/ICIMW.2006.368673>
31. Samartcev V., Kozlov S. *Basics of Femtosecond Optics*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, 292 с. (in Russian)

### Авторы

**Шумигой Владимир Сергеевич** — лаборант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-8597-1196>, [vshumigay@itmo.ru](mailto:vshumigay@itmo.ru)  
**Опарин Егор Николаевич** — лаборант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57209803630](https://orcid.org/0000-0002-4009-7594), <https://orcid.org/0000-0002-4009-7594>, [en\\_oparin@itmo.ru](mailto:en_oparin@itmo.ru)  
**Набилкова Александра Олеговна** — лаборант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57214074539](https://orcid.org/0000-0001-5699-2211), <https://orcid.org/0000-0001-5699-2211>, [aonabilkova@itmo.ru](mailto:aonabilkova@itmo.ru)  
**Мельник Максим Владимирович** — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57191410349](https://orcid.org/0000-0002-0796-0659), <https://orcid.org/0000-0002-0796-0659>, [mmelnik@itmo.ru](mailto:mmelnik@itmo.ru)  
**Цыпкин Антон Николаевич** — доктор физико-математических наук, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 56366230300](https://orcid.org/0000-0002-9254-1116), <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>, [tsyppkinan@itmo.ru](mailto:tsyppkinan@itmo.ru)  
**Козлов Сергей Аркадьевич** — доктор физико-математических наук, профессор, руководитель международного научного центра оптической и квантовой информатики, биофотоники, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7103166835](https://orcid.org/0000-0002-2692-627X), <https://orcid.org/0000-0002-2692-627X>, [sakozlov@itmo.ru](mailto:sakozlov@itmo.ru)

### Authors

**Vladimir S. Shumigai** — Laboratory Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8597-1196>, [vshumigay@itmo.ru](mailto:vshumigay@itmo.ru)  
**Egor N. Oparin** — Laboratory Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57209803630](https://orcid.org/0000-0002-4009-7594), <https://orcid.org/0000-0002-4009-7594>, [en\\_oparin@itmo.ru](mailto:en_oparin@itmo.ru)  
**Aleksandra O. Nabilkova** — Laboratory Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57214074539](https://orcid.org/0000-0001-5699-2211), <https://orcid.org/0000-0001-5699-2211>, [aonabilkova@itmo.ru](mailto:aonabilkova@itmo.ru)  
**Maksim V. Melnik** — PhD (Physics and Mathematics), Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57191410349](https://orcid.org/0000-0002-0796-0659), <https://orcid.org/0000-0002-0796-0659>, [mmelnik@itmo.ru](mailto:mmelnik@itmo.ru)  
**Anton N. Tsyppkin** — D. Sc. (Physics and Mathematics), Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 56366230300](https://orcid.org/0000-0002-9254-1116), <https://orcid.org/0000-0002-9254-1116>, [tsyppkinan@itmo.ru](mailto:tsyppkinan@itmo.ru)  
**Sergei A. Kozlov** — D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of International Research Center of Biophotonics, Optical and Quantum Information, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7103166835](https://orcid.org/0000-0002-2692-627X), <https://orcid.org/0000-0002-2692-627X>, [sakozlov@itmo.ru](mailto:sakozlov@itmo.ru)

Статья поступила в редакцию 26.05.2022  
 Одобрена после рецензирования 06.06.2022  
 Принята к печати 26.07.2022

Received 26.05.2022  
 Approved after reviewing 06.06.2022  
 Accepted 26.07.2022



Работа доступна по лицензии  
 Creative Commons  
 «Attribution-NonCommercial»