

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ
OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-439-447

УДК 535-14, 535.583, 535.341.08

**Оптические свойства нелинейных кристаллов семейства боратов
и их применение в источниках интенсивного терагерцового излучения****Дмитрий Михайлович Лубенко¹, Дмитрий Михайлович Ежов²,
Валерий Анатольевич Светличный³, Юрий Михайлович Андреев⁴,
Назар Александрович Николаев⁵**¹ Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, 634055, Российская Федерация^{2,3} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, Российская Федерация⁴ Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, 630055, Российская Федерация⁵ Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Российская Федерация¹ lubenkodm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3009-762X>² ezhov_dm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3311-5088>³ v_svetlichnyi@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3935-0871>⁴ yandreev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1891-9846>⁵ nazar@iae.nsk.su, <https://orcid.org/0000-0002-7106-3100>**Аннотация**

Введение. Для нелинейных кристаллов семейства боратов характерны высокие значения порога оптического пробоя на длинах волн ближнего инфракрасного диапазона. Как следствие, такие кристаллы являются эффективными генераторами гармоник излучения интенсивных лазерных источников. Последние исследования показали, что нелинейные кристаллы семейства боратов демонстрируют низкое поглощение излучения на субтерагерцовых частотах. Данный факт свидетельствует о возможности их применения в качестве генераторов терагерцового излучения. Выполнено сравнение источников терагерцового излучения на основе преобразования частоты излучения титан-сапфирового лазера в кристаллах бета-бората бария (β - BaV_2O_4), трибората лития (LiB_3O_5) и тетрабората лития ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$). **Метод.** Проведен расчет реализуемых типов коллинеарного трехволнового взаимодействия, обеспечивающих генерацию разностной частоты в субтерагерцовом диапазоне с учетом изученной дисперсии главных компонент терагерцового показателя преломления исследованных кристаллов. Для каждого кристалла получены условия фазового согласования и соответствующие длины когерентности. Учитывая тензоры квадратичной восприимчивости, рассчитаны коэффициенты эффективности нелинейности. Выполнены оценка и сравнение эффективности генерации терагерцового излучения в кристаллах с различным срезом. **Основные результаты.** Результаты расчетов показали, что генерация в кристалле β - BaV_2O_4 происходит эффективнее на три порядка по сравнению с кристаллом LiB_3O_5 и на пять — с $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$. На титан-сапфировом усилителе экспериментально изучена генерация терагерцового излучения в образце кристалла β - BaV_2O_4 со срезом $\theta = 5^\circ$ (где θ — угол между вектором распространения излучения и главной оптической осью z кристалла), обеспечивающим фазовое согласование для частоты 0,3 ТГц. Сравнение экспериментально полученных данных с численным расчетом показало, что на генерацию излучения оказывают влияние типы взаимодействия $o - e \rightarrow e$, $e - e \rightarrow o$ и $o - o \rightarrow o$. При этом значение пиковой мощности терагерцового излучения приблизительно составляет 20 кВт. **Обсуждение.** Полученные данные будут полезны для разработки генераторов интенсивного излучения субтерагерцового диапазона, основанных на преобразовании энергии мощных лазерных источников. Полученные результаты показали, что увеличение интенсивности оптических полей до предпороговых значений для кристалла β - BaV_2O_4 позволит достичь десятков гигаватт пиковой мощности терагерцового излучения. Такие источники излучения могут найти применение в системах зондирования атмосферы и ускорителях заряженных частиц.

© Лубенко Д.М., Ежов Д.М., Светличный В.А., Андреев Ю.М., Николаев Н.А., 2023

Ключевые слова

нелинейные кристаллы, генерация терагерцовых частот, фазовый синхронизм, показатель преломления, коэффициент поглощения

Благодарности

Исследование выполнено в рамках проектов государственного задания Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН), проект № 121032400052-6), Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, проект № 121031300155-8. Авторы благодарят центр коллективного пользования «Спектроскопия и Оптика» и центр коллективного пользования «ВТАН» Новосибирского государственного университета за предоставленное оборудование.

Ссылка для цитирования: Лубенко Д.М., Ежов Д.М., Светличный В.А., Андреев Ю.М., Николаев Н.А. Оптические свойства нелинейных кристаллов семейства боратов и их применение в источниках интенсивного терагерцового излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 439–447. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-439-447

Optical properties of borate family nonlinear crystals and their application in sources of intense terahertz radiation

Dmitry M. Lubenko¹, Dmitry M. Ezhov², Valery A. Svetlichnyi³, Yury M. Andreev⁴,
Nazar A. Nikolaev⁵✉

¹ Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, 634055, Russian Federation

^{2,3} National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russian Federation

⁴ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, 630055, Russian Federation

⁵ Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

¹ lubenkodm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3009-762X>

² ezhov_dm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3311-5088>

³ v_svetlichnyi@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3935-0871>

⁴ yuandreev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1891-9846>

⁵ nazar@iae.nsk.su✉, <https://orcid.org/0000-0002-7106-3100>

Abstract

Nonlinear crystals of the borate family are efficient harmonic generators for intense laser sources because of their high laser-induced damage threshold at near-infrared wavelengths. Recent studies have shown that they exhibit relatively low absorption coefficients at sub-terahertz frequencies, which could enable them to generate terahertz radiation. Based on this assumption, we compare terahertz sources based on the frequency down-conversion of the radiation from a titanium-sapphire amplifier in crystals of barium beta-borate (β -BaB₂O₄), lithium triborate (LiB₃O₅), and lithium tetraborate (Li₂B₄O₇). The calculation of collinear three-wave interactions, which provide the generation of the sub-terahertz difference frequency, is carried out considering the previously studied dispersion of the main components of the terahertz refractive index of these crystals. The phase-matching conditions and the corresponding coherence lengths are determined for each of the crystals. Taking into account the quadratic susceptibility tensors, the coefficients of the effective nonlinearity are calculated, and the terahertz generation efficiency in crystals with different cuts is evaluated and compared. The down-conversion in the β -BaB₂O₄ crystal is numerically shown to be three and five orders of magnitude more efficient than in the LiB₃O₅ and Li₂B₄O₇ crystals, respectively. Thus, terahertz generation in a sample of β -BaB₂O₄ crystal with a cut that provides phase-matching for a frequency of 0.3 THz ($\theta = 5^\circ$) has been studied experimentally using radiation from a titanium-sapphire amplifier. The comparison of the experimental data and the numerical results leads to the conclusion that the main contribution to the generation process is given by the $o - e \rightarrow e$, $e - e \rightarrow o$, and $o - o \rightarrow o$ types of interaction. The peak terahertz power reaches 20 kW. The data obtained in this work will be useful for the development of intense sub-terahertz radiation sources based on the energy conversion of high-power laser sources. It is estimated that tens of GW of peak terahertz power can be achieved by increasing the intensity of the optical fields to pre-threshold values for the β -BaB₂O₄ crystal. A source of this intensity can be used in systems for sounding the atmosphere as well as in charged particle accelerators.

Keywords

nonlinear crystals, terahertz frequency generation, phase matching, refractive index, absorption coefficient

Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the State Assignment projects of Institute of Automation and Electrometry of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (IA&E SB RAS), project No. 121032400052-6, and Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, project No. 121031300155-8. The authors express their gratitude to the Shared Equipment Center “Spectroscopy and Optics” of the IA&E SB RAS and the Shared Research Center “VTAN” of the Novosibirsk State University for the provided instrumentation support.

For citation: Lubenko D.M., Ezhov D.M., Svetlichnyi V.A., Andreev Yu.M., Nikolaev N.A. Optical properties of borate family nonlinear crystals and their application in sources of intense terahertz radiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 439–447 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-439-447

Введение

Терагерцовый (ТГц) диапазон электромагнитного спектра (0,1–3 ТГц) является привлекательным с точки зрения безопасности излучения для объектов живой природы, наличием разрешенных спектров поглощения газов, жидкостей и многих твердых тел, а также сложных синтетических органических соединений. Прогресс технологий создания мощных лазерных источников видимого и ближнего инфракрасного диапазонов способствует росту интереса к нелинейно-оптическим средам, в частности кристаллам, пригодным для преобразования энергии лазерного излучения в ТГц диапазон спектра [1]. Условно нелинейные кристаллы можно разделить на три класса: полупроводниковые (GaSe, ZnGeP₂), сегнетоэлектрические (KTiOPO₄, LiNbO₃) и диэлектрические (LiB₃O₅, β-BaB₂O₄). Полупроводниковые нелинейные кристаллы несмотря на то, что имеют высокие значения нелинейных коэффициентов, обладают малым порогом оптического пробоя на уровне 10–2 ГВт/см². В связи с этим такие кристаллы являются эффективными преобразователями лазерного излучения с энергией менее сотен микроджоулей.

Сегнетоэлектрические кристаллы имеют значения лучевой стойкости до 1 ГВт/см² и являются наиболее эффективными преобразователями лазерного излучения с энергией порядка единиц миллиджоулей. Например, на сегодняшний день наиболее эффективный преобразователь излучения титан-сапфировых усилителей — кристалл LiNbO₃. Вместе с тем стоит ожидать, что при дальнейшем росте энергии лазерного возбуждения до значений более сотен миллиджоулей сегнетоэлектрические кристаллы должны уступить первенство диэлектрическим кристаллам, порог разрушения которых может превышать десятки ГВт/см². Отметим, что при таких уровнях интенсивности лазерного возбуждения эффективным источником ТГц излучения может оказываться преобразование в газах. За счет эффекта оптического пробоя газа формируется плазменное облако, в котором осуществляется нелинейно-оптическое преобразование. Из-за нестабильности плазмы, а также сложности реализации такого подхода в полевых условиях, исследование кристаллических нелинейно-оптических материалов по-прежнему остается актуальным.

В работе проведено сравнение трех нелинейно-оптических кристаллов семейства боратов: бета-бората бария (β-BaB₂O₄ или β-BBO), трибората лития (LiB₃O₅ или LBO) и тетрабората лития (Li₂B₄O₇ или LB4). Преимущества данных кристаллов для нелинейно-оптических преобразований: малый коэффициент поглощения (до 10⁻⁵ см⁻¹) в основном окне прозрачности, высокая лучевая стойкость (до десятков ГВт/см²) и возможность фазового согласования в широкой области спектра от ультрафиолетового до инфракрасного диапазонов. Отработанные технологии роста боратных кристаллов позволяют изготавливать элементы параметрических генераторов с большой оптической апертурой, а последние исследования показали их относительную прозрачность в суб-ТГц и ТГц диапазонах

спектра [2, 3]. Эти особенности открывают потенциал боратных кристаллов в качестве генераторов ТГц частот, основанных на преобразовании энергии интенсивных лазерных источников.

Основное окно прозрачности для отрицательного одноосного нелинейного кристалла β-BBO, принадлежащего точечной группе симметрии 3m, составляет 185–3500 нм. Коэффициент поглощения в окне максимальной прозрачности для лучших образцов — 10⁻³–10⁻⁴ см⁻¹ [4]. Лучевая стойкость β-BBO достигает 50 ГВт/см² при облучении 14 нс импульсами с длиной волны 1,064 мкм [5]. Дисперсионные свойства в видимом диапазоне описаны в работе [6], а в ТГц спектре — в [7].

Нелинейный кристалл LB4 — отрицательный одноосный и относится к точечной группе симметрии 4mm. Область максимальной прозрачности составляет 160–3500 нм, с поглощением на уровне 10⁻⁴ см⁻¹. LB4 обладает лучевой стойкостью до 40 ГВт/см² при воздействии наносекундными импульсами [8]. Дисперсионные свойства кристалла описаны в работе [9] для видимого диапазона, а в [10] для ТГц частот.

LBO — отрицательный двуосный нелинейный кристалл, относящийся к точечной группе симметрии mm2. Он обладает минимальным коэффициентом поглощения, среди известных нелинейных кристаллов. При этом коэффициент поглощения, измеренный в диапазоне длин волн 515–1064 нм, уменьшается до значения 10⁻⁵ см⁻¹ [11, 12]. Дисперсионные свойства в видимом диапазоне описаны в работе [13], а в ТГц — в [14]. Лучевая стойкость кристалла достигает 36 ГВт/см² на длине волны 1064 нм и длительности импульсов порядка 1 нс [15]. Известно, что у кристалла LBO изменяется неравенство значений показателей преломления с $n_x < n_y < n_z$ в оптическом диапазоне на $n_z < n_x < n_y$ в ТГц области. При условии общепринятого соответствия главных оптических и кристаллографических осей $X, Y, Z \rightarrow a, c, b$ [14].

Значения коэффициентов тензора квадратичной восприимчивости рассматриваемых кристаллов лежат в диапазоне 0,03–2,2 пм/В. Вместе с тем экстремально высокие значения лучевой стойкости предположительно позволяют компенсировать этот недостаток при условии, что спектральные области максимальной прозрачности выбранных кристаллов совпадают со спектром генерации мощных лазерных систем. Отметим, что вопрос о возможности генерации ТГц волн в некоторых из рассматриваемых кристаллах уже затрагивался ранее, например в работах [3, 16, 17]. При этом в работах [3, 16] преобразованию в нелинейные кристаллы β-BBO было уделено мало внимания, ввиду того что его эффективность была указана как ничтожно малая.

Методы исследования и образцы

Используемые нелинейные кристаллы LBO, β-BBO и LB4 выращены в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН. Образцы представляют плоскопараллельные пластины нескольких толщин (0,35–2 мм) с апертурой диаметром около 1 см, полированные до высокого оптического

качества. Дисперсия показателя преломления и коэффициент поглощения образцов измерены с помощью поляризационного импульсного ТГц спектрометра [18]. На основе ранее проведенных измерений дисперсия главных компонент показателя преломления кристаллов аппроксимирована в форме уравнений Зельмеера, которые использованы для расчета кривых фазового согласования процесса генерации разностных частот (ГРЧ) в ТГц спектре интенсивных источников лазерного излучения с длинами волн в окрестности 0,8–1 мкм.

Коэффициенты сокращенного тензора квадратичной восприимчивости d_{ij} исследуемых нелинейных кристаллов определим согласно работе [19]. Полученные результаты представлены в табл. 1–3. Для оценки эффективности генерации рассчитаем коэффициент качества (figure of merit, FOM) для каждого из кристаллов:

$$FOM = \frac{d_{\text{эфф}}^2}{n_3 n_2 n_1},$$

где n_i — показатель преломления для соответствующей волны, при этом $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ (λ_1 — результирующая

длина волны, соответствующая ТГц спектральному диапазону); $d_{\text{эфф}}$ — эффективная нелинейность, которая в общем случае зависит от направления распространения волн в среде и участвующих во взаимодействии коэффициентов d_{ij} .

Значения d_{ij} в видимом и ТГц диапазонах должны отличаться, однако данные для ТГц частот в известных научных работах отсутствуют. В связи с этим для оценочных расчетов используем известные значения коэффициентов для видимого диапазона: β -BBO ($d_{15} = -0,04$ пм/В, $d_{22} = 2,2$ пм/В, $d_{31} = -0,04$ пм/В, $d_{33} = 0,04$ пм/В) [20]; LBO ($d_{15} = -0,67$ пм/В, $d_{24} = 0,85$ пм/В, $d_{31} = -0,67$ пм/В, $d_{32} = 0,85$ пм/В, $d_{33} = 0,04$ пм/В) [21]; LB4 ($d_{15} = 0,12$ пм/В, $d_{31} = 0,12$ пм/В, $d_{33} = 0,47$ пм/В) [22]. В табл. 1, 2 и 3 представлены $d_{\text{эфф}}$ для возможных типов нелинейного взаимодействия трех волн $\lambda_3 - \lambda_2 \rightarrow \lambda_1$, которые в зависимости от типа преобразования обозначаются как обыкновенная o и необыкновенная e в случае одноосных кристаллов, или быстрая f или медленная s в случае двухосных кристаллов, где θ — угол между направлением распространения излучения и главной

Таблица 1. Коэффициент $d_{\text{эфф}}$ для кристалла β -BBO
Table 1. Form of d_{eff} coefficient for β -BBO crystal

Тип взаимодействия	Вид выражения $d_{\text{эфф}}$
$o - e \rightarrow e, e - o \rightarrow e, e - e \rightarrow o$	$d_{22} \cos \theta \cos 3\varphi$
$o - e \rightarrow o, e - o \rightarrow o$	$d_{15} \sin \theta - d_{22} \cos \theta \sin 3\varphi$
$o - o \rightarrow e$	$d_{31} \sin \theta - d_{22} \cos \theta \sin 3\varphi$
$o - o \rightarrow o$	$-d_{22} \cos 3\varphi$
$e - e \rightarrow e$	$d_{15} \sin 2\theta \cos \theta + d_{22} \cos^3 \theta \sin 3\varphi + d_{31} \cos^2 \theta \sin \theta + d_{33} \sin^3 \theta$

Таблица 2. Коэффициент $d_{\text{эфф}}$ для кристалла LBO
Table 2. Form of d_{eff} coefficient for LBO crystal

Тип взаимодействия	Плоскость кристалла			
	XY	YZ	$XZ (\theta < V_Z, \delta = \pi/2)$	$XZ (\theta > V_Z, \delta = 0)$
$s - s \rightarrow s$	0	$d_{33} \cos^3 \theta + d_{32} \sin 2\theta \cos \theta + d_{24} \sin \theta \sin 2\theta$	d_{33}	0
$s - s \rightarrow f,$ $s - f \rightarrow s,$ $f - s \rightarrow s$	$d_{32} \cos \varphi$	0	0	$d_{31} \cos^2 \theta + d_{32} \sin^2 \theta$
$s - f \rightarrow f,$ $f - s \rightarrow f,$ $f - f \rightarrow s$	0	$d_{31} \cos \theta$	$d_{31} \cos^2 \theta + d_{32} \sin^2 \theta$	0
$f - f \rightarrow f$	$d_{33} \cos^3 \varphi + d_{31} \sin^2 \varphi \cos \varphi + d_{15} \sin \varphi \sin 2\varphi$	0	0	d_{33}

Таблица 3. Коэффициент $d_{\text{эфф}}$ для кристалла LB4
Table 3. Form of d_{eff} coefficient for LB4 crystal

Тип взаимодействия	Вид выражения $d_{\text{эфф}}$
$o - o \rightarrow o, o - e \rightarrow e, e - o \rightarrow e, e - e \rightarrow o$	0
$o - o \rightarrow e, e - o \rightarrow o$	$d_{31} \sin \theta$
$o - e \rightarrow o$	$d_{15} \sin \theta$
$e - e \rightarrow e$	$(2d_{15} + d_{31}) \cos^2 \theta \sin \theta + d_{33} \sin^3 \theta$

оптической осью Z кристалла, φ — угол между проекцией направления распространения излучения на главную плоскость XY и главной оптической осью X кристалла, V_Z — угол между неглавной оптической осью и осью Z кристалла.

Основные результаты исследования

Измеренные на импульсном ТГц спектрометре коэффициенты поглощения главных оптических осей кристаллов, с наибольшими потерями, представлены на рис. 1, где α_o — коэффициент поглощения для не-обыкновенной волны, α_x — коэффициент поглощения излучения для случая совпадения поляризации волны с направлением оси X кристалла. Исходя из полученных результатов видно, что наименьшее поглощение ТГц волн при преобразовании следует ожидать в кристалле β -BBO.

Расчеты с использованием уравнений из работ [7, 10, 14] показали наличие фазового согласования для генерации частот в диапазоне 0,1–1,2 ТГц во всех исследуемых кристаллах. В табл. 4 представлены диапазоны углов синхронизма для данного диапазона, и рассчитанные для частоты 0,3 ТГц значения параметра качества (FOM).

Частота 0,3 ТГц выбрана как попадающая в локальное окно прозрачности атмосферы и перспективная, например, для решения задач телекоммуникации на километровых трассах в открытом пространстве или мониторинга малых газовых компонент приземного слоя атмосферы.

Из полученных результатов (табл. 4) видно, что наименьшими углами синхронизма θ обладают одноосные кристаллы β -BBO и LB4. Меньшие углы θ , с одной стороны, обеспечивают малый угол сноса, и, как следствие, позволяют использовать образцы с большей толщиной для достижения значительной эффективности преобразования. С другой стороны, как в случае с кристаллом LB4 — малые углы θ могут приводить к вырождению коэффициента эффективной нелинейной восприимчивости, поскольку он пропорционален $\sin\theta$. Таким образом, исходя из критерия наименьшего поглощения, наименьшего угла синхронизма и максимального значения FOM, кристалл β -BBO является наиболее эффективным генератором ТГц излучения среди исследуемых кристаллов.

Рассчитаем спектры процессов ГРЧ и оптического выпрямления при преобразовании частоты излучения лазера с длиной волны 800 нм (рис. 2). Оценку ин-

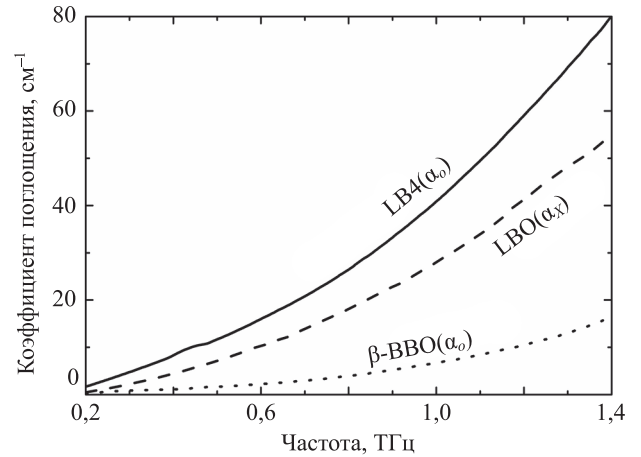


Рис. 1. Измеренный коэффициент поглощения одной из главных оптических осей с наибольшими потерями для исследуемых кристаллов

Fig. 1. Measured absorption coefficient of the principal optical axis with the highest losses for the crystals under study

тенсивности ТГц излучения $I_{ТГц}$ выполним согласно упрощенному выражению для оценки эффективности генерации с неистощаемой накачкой [23]. Расчеты осуществим для каждого из возможных типов нелинейно-оптического преобразования, обладающих соответствующим значением коэффициента $d_{эфф}(\theta, \varphi)$, при разных толщинах кристаллов $L_{крист}$:

$$I_{ТГц} \propto \frac{8\pi^2 d_{эфф}^2 L_{эфф}^2 I_{накачки}^2}{\epsilon_0 n_3 n_2 n_1 c \lambda_1^2} \exp(-\alpha_1 L_{эфф}),$$

$$L_{эфф} = \begin{cases} L_{ког}, & L_{крист} > L_{ког} \\ L_{крист}, & L_{крист} \leq L_{ког} \end{cases},$$

$$L_{ког} = \left\lfloor \frac{\pi}{k_3(\lambda_3, n_3) - k_2(\lambda_2, n_2) - k_1(\lambda_1, n_1)} \right\rfloor,$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная; c — скорость света; $k_i = 2\pi n_i / \lambda_i$ — волновой вектор; α_1 — коэффициент поглощения ТГц волны. Значение нижних индексов: «крист» — параметр, относящийся к кристаллу; «ТГц» — параметр, относящийся к результирующей ТГц волне; «эфф» — эффективный параметр; «накачки» — параметр, относящийся к возбуждающему излучению на длине волны 800 нм; «ког» — параметр когерентности. В данном упрощении эффективная длина нелинейного взаимодействия $L_{эфф}$ ограничена длиной когерентности $L_{ког}$ соответствующего типа взаимодействия или длиной кристалла.

Таблица 4. Углы фазового согласования в боратных кристаллах для генерации разностных частот в терагерцовой области при преобразовании частот излучения с длиной волны 800 нм

Table 4. Phase-matching angles of borate crystals for DFG in THz range when converting the frequencies of the radiation with a wavelength of 800 nm

Кристалл	Тип взаимодействия	θ , град.	φ , град.	FOM (0,3 ТГц), nm^2/B^2
β -BBO	$o - e \rightarrow e$	3–13	0	0,7
β -BBO	$o - e \rightarrow o$	3–13	30	0,7
LBO	$s - f \rightarrow s (XZ, \theta < V_Z)$	30–37	0	0,01
LB4	$o - e \rightarrow o$	4–17	—	0,00005

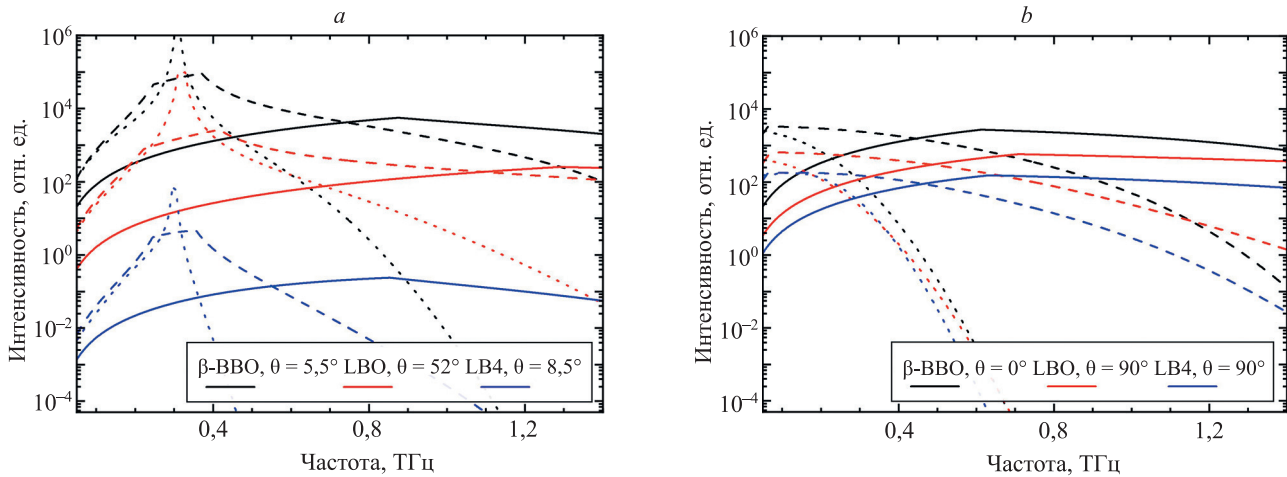


Рис. 2. Эффективность генерации терагерцового излучения в боратных кристаллах разной толщины при преобразовании частот лазерного излучения с длиной волны 800 нм. Спектры генерации при выполнении условий фазового согласования (а) и при оптическом выпрямлении в ортогональных срезах кристаллов (b).

Сплошные кривые — толщина кристалла 0,2 мм; штриховые — 2 мм; пунктирные — 20 мм

Fig. 2. Terahertz radiation generation efficiency in borate crystals of various thicknesses during frequency conversion of 800 nm laser radiation. Spectra generated under phase-matching conditions (a) and optical rectification in orthogonal crystal cuts (b).

Solid curves — crystal thickness 0.2 mm; dashed lines — 2 mm; dotted — 20 mm

Поглощение учтено только для результирующей (ТГц) волны на эффективной длине кристалла. Интенсивность накачки $I_{\text{накачки}}$ принята равной 1 ТВт/см².

На рис. 2, а видно, что с увеличением длины кристалла на модельных спектрах генерации проявляется фазо-согласованное преобразование типа $o - e \rightarrow e$ для кристаллов β -ВВО и LBO и $o - e \rightarrow o$ — для LB4 с пиком в окрестности 0,3 ТГц (желаемая частота задается выбором соответствующих углов θ , φ). Также заметно, что при увеличении толщины кристалла вырастают потери в коротковолновой части спектра. При этом можно предположить, что интенсивность при оптическом выпрямлении будет выше, чем интенсивность при ГРЧ с выполнением условий фазового согласования. Данное предположение видно при сравнении спектров генерации в кристалле LB4: вырезанном для фазового согласования при $\theta = 8,5^\circ$ (рис. 2, а), и для оптического выпрямления при $\theta = 90^\circ$ (рис. 2, б). Отметим, что при уменьшении длительности импульса от наносекунд к фемтосекундам — возрастает порог лучевой стойкости нелинейных кристаллов вследствие смены теплового механизма пробоя на полевой, это позволяет увеличить интенсивность лазерного излучения, а следовательно, и эффективность преобразования. Кроме того, фемтосекундные импульсы обладают достаточной спектральной шириной, чтобы в результате взаимодействия отдельных частотных ее компонент, происходила генерация широкого разностного спектра.

Результаты, полученные на рис. 2, подтвердили предположение о перспективности применения кристалла β -ВВО для разработки генераторов ТГц излучения. На данном кристалле проведем предварительные эксперименты по преобразованию излучения титан-сапфирового усилителя (центральная длина волны — 950 нм, длительность импульса — 60 фс, частота повторения — 10 Гц, энергия в импульсе — 20 мДж).

Выберем срез кристалла $\theta = 5^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, который должен обеспечить фазовое согласование для генерации разностной частоты в окрестности 0,3 ТГц. Азимутальным вращением образца кристалла получена реализация различных типов взаимодействий, поскольку проекция вектора поляризации лазерного излучения на оси кристалла при вращении воспринималась кристаллом как компоненты обыкновенной или необыкновенной волн. Регистрация ТГц излучения осуществлена с помощью программно-аппаратного комплекса на основе ячейки Голя Tydex GC-1P (Tydex, Россия). Спектр генерации при такой постановке эксперимента определить затруднительно, так как детектируется интегральная мощность излучения. Детектор откалиброван для измерения энергии непрерывного излучения, модулированного со скважностью 50 %. Примем, что излучение представляет собой кратковременные импульсы длительностью около 2 пс и следуют с частотой 10 Гц. Пересчитаем показания детектора в соответствии с калибровочной вольт-ваттной шкалой. При заданных параметрах генерации учтем ослабление светофильтров, отсекающих лазерное излучение, спектры пропускания которых были предварительно измерены на импульсном ТГц спектрометре. Оценки показали, что регистрируемый детектором сигнал соответствует уровню 20 кВт пиковой мощности. Результаты расчетов и их сравнение с экспериментальными данными представлены на рис. 3.

В результате сопоставления диаграмм экспериментально полученной зависимости интенсивности ТГц излучения с численным расчетом (рис. 3, б), сделаем вывод, что основной вклад в оптико-терагерцовое преобразование дают типы взаимодействий $o - e \rightarrow e$, $e - e \rightarrow o$ и $o - o \rightarrow o$. При этом кривые двух последних взаимодействий имеют высокую точность. Значения интенсивностей, соответствующие углам $45^\circ + n \times 90^\circ$ (где n — целое число), соответствуют ГРЧ в условиях

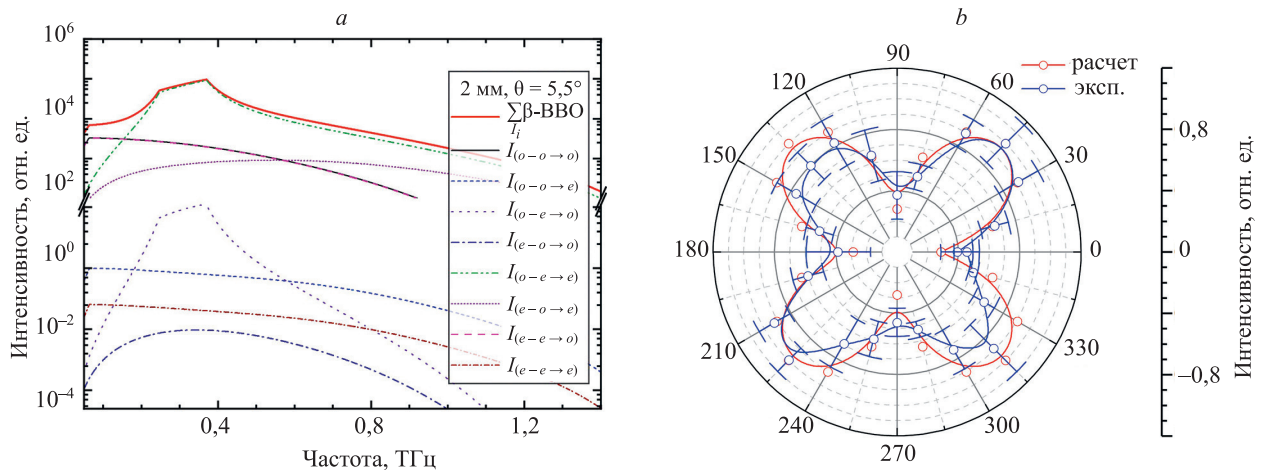


Рис. 3. Генерация терагерцового излучения в образце кристалла β -BBO со срезом $\theta = 5^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ при преобразовании частот излучения титан-сапфирового усилителя.

Расчетные спектры генерации для различных типов взаимодействия и их сумма (красная кривая) (a); экспериментально измеренная зависимость интенсивности терагерцового излучения от азимутального угла поворота кристалла (синяя кривая); теоретическая оценка интенсивности, полученная интегрированием площади под кривой суммарного расчетного спектра генерации (b)

Fig. 3. Generation of terahertz radiation in a β -BBO crystal sample with a cut: $\theta = 5^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ upon frequency conversion of radiation from a titanium-sapphire amplifier.

Calculated generation spectra for different types of interaction and their sum (red curve) (a); experimentally measured dependence of the terahertz radiation intensity on the azimuth angle of the crystal rotation (blue curve); theoretical intensity estimate obtained by integrating the area under the curve of the total calculated generation spectrum (b)

фазового согласования для взаимодействия $o - e \rightarrow e$. При углах $0^\circ + n \times 90^\circ$ — ГРЧ в условиях фазовой расстройки (либо оптическом выпрямлении) для взаимодействий $e - e \rightarrow o$ и $o - o \rightarrow o$ соответственно. Полученные результаты показали, что определяющим коэффициентом генерации ТГц излучения является коэффициент тензора квадратичной восприимчивости d_{22} , что противоречит данным, приведенным в работе [16], где полагается, что d_{22} обращается в ноль при оптико-терагерцовых преобразованиях.

Масштабируя полученные данные, можно предположить, что при использовании оптических элементов с большой апертурой, изготовленных из кристалла β -BaV₂O₄, и тераваттных лазерных систем подобно THL-100 [24], возможно получить пиковую мощность ТГц излучения в десятки гигаватт при увеличении интенсивности оптических полей до предпороговых значений для кристалла.

Закключение

В работе проведено сравнение источников терагерцового излучения на основе преобразования энергии излучения титан-сапфирового усилителя в трех распространённых кристаллах семейства боратов β -BaV₂O₄, LiV₃O₅ и Li₂V₄O₇. Для каждого кристалла выполнен расчет реализуемых типов коллинеарного трехволнового взаимодействия, обеспечивающих генерацию

разностной частоты в субтерагерцовом диапазоне, и получены условия фазового согласования и соответствующие длины когерентности. Показано, что для генерации в диапазоне 0,1–1,2 ТГц подойдут срезы кристаллов со следующими значениями угла θ : 1–13° для β -BaV₂O₄, 30–37° для LiV₃O₅ и 4–17° для Li₂V₄O₇. Учитывая тензоры квадратичной восприимчивости, численно показано, что генерация в кристалле β -BaV₂O₄ на три и пять порядков эффективнее, чем в кристаллах LiV₃O₅ и Li₂V₄O₇ соответственно, что определило выбор данного кристалла для дальнейшего экспериментального исследования.

С использованием излучения титан-сапфирового усилителя (с параметрами: 950 нм, 60 фс, 10 Гц, 20 мДж) экспериментально изучена генерация терагерцовых волн в образце кристалла β -BaV₂O₄ со срезом $\theta = 5^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, обеспечивающим фазовое согласование для частоты 0,3 ТГц. Сравнение экспериментально полученных данных с численным расчетом позволило сделать вывод о том, что основной вклад в генерацию дают типы взаимодействия $o - e \rightarrow e$, $e - e \rightarrow o$ и $o - o \rightarrow o$. При этом значение пиковой мощности терагерцового излучения достигает 20 кВт. Предположительно, применение элементов из β -BaV₂O₄ с апертурой до сотни миллиметров на тераваттных лазерных установках позволит достигнуть значения пиковой мощности ТГц излучения в десятки гигаватт. Такие источники актуальны для развития физики экстремальных полей ультракоротких длительностей.

Литература

References

1. Wu X., Carbajo S., Ravi K., Ahr F., Cirmi G., Zhou Y., Mücke O.D., Kärtner F.X. Terahertz generation in lithium niobate driven by Ti:sapphire laser pulses and its limitations // *Optics Letters*. 2014. V. 39. N 18. P. 5403–5406. <https://doi.org/10.1364/ol.39.005403>
2. Antsygin V.D., Mamrashev A.A., Nikolaev N.A., Potaturkin O.I., Bekker T.B., Solntsev V.P. Optical properties of borate crystals in terahertz region // *Optics Communications*. 2013. V. 309. P. 333–337. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.08.014>
3. Bernerd C., Segonds P., Debray J., Roux J.-F., Héroult E., Coutaz J.-L., Shoji I., Minamide H., Ito H., Lupinski D., Zawilski K., Schunemann P., Zhang X., Wang J., Hu Z., Boulanger B. Evaluation of eight nonlinear crystals for phase-matched Terahertz second-order difference-frequency generation at room temperature // *Optical Materials Express*. 2020. V. 10. N 2. P. 561–576. <https://doi.org/10.1364/ome.383548>
4. Chen C., Sasaki T., Li R., Wu Y., Lin Z., Mori Y., Hu Z., Wang J., Aka G., Masashi Y., Kaneda Y. *Nonlinear Optical Borate Crystals: Principles and Applications*. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012. 406 p.
5. Nakatani H., Bosenberg W.R., Cheng L.K., Tang C.L. Laser-induced damage in beta-barium metaborate // *Applied Physics Letters*. 1988. V. 53. N 26. P. 2587–2589. <https://doi.org/10.1063/1.100535>
6. Eimerl D., Davis L., Velsko S., Graham E.K., Zalkin A. Optical, mechanical, and thermal properties of barium borate // *Journal of Applied Physics*. 1987. V. 62. N 5. P. 1968–1983. <https://doi.org/10.1063/1.339536>
7. Ezhov D.M., Lubenko D.M., Andreev Y.M. Doubling of THz radiation frequency in nonlinear borate crystals // *Russian Physics Journal*. 2021. V. 64. N 7. P. 1358–1362. <https://doi.org/10.1007/s11182-021-02461-9>
8. Komatsu R., Sugawara T., Sassa K., Sarukura N., Liu Z., Izumida S., Segawa Y., Uda S., Fukuda T., Yamanouchi K. Growth and ultraviolet application of Li₂B₄O₇ crystals: Generation of the fourth and fifth harmonics of Nd:Y₃Al₅O₁₂ lasers // *Applied Physics Letters*. 1997. V. 70. N 26. P. 3492–3494. <https://doi.org/10.1063/1.119210>
9. Umemura N., Watanabe J., Matsuda D., Kamimura T. Refined Sellmeier and thermo-optic dispersion formulas for Li₂B₄O₇ // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2017. V. 56. N 3. P. 032602. <https://doi.org/10.7567/jjap.56.032602>
10. Ezhov D., Turgeneva S., Nikolaev N., Mamrashev A., Mikerin S., Minakov F., Simanchuk A., Antsygin V., Svetlichnyi V., Losev V., Andreev Y. Potential of sub-THz-wave generation in Li₂B₄O₇ nonlinear crystal at room and cryogenic temperatures // *Crystals*. 2021. V. 11. N 11. P. 1321. <https://doi.org/10.3390/cryst11111321>
11. Waasem N., Fieberg S., Hauser J., Gomes G., Haertle D., Kühnemann F., Buse K. Photoacoustic absorption spectrometer for highly transparent dielectrics with parts-per-million sensitivity // *Review of Scientific Instruments*. 2013. V. 84. N 2. P. 023109. <https://doi.org/10.1063/1.4792724>
12. Röcker C., Weinert P., Villevall P., Lupinski D., Delaigue M., Hönninger C., Weber R., Graf T., Ahmed M.A. Nonlinear absorption in lithium triborate frequency converters for high-power ultrafast lasers // *Optics Express*. 2022. V. 30. N 4. P. 5423–5438. <https://doi.org/10.1364/oe.447255>
13. Kato K. Temperature-tuned 90° phase matching properties of LiB₃O₅ // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1994. V. 30. N 12. P. 2950–2952. <https://doi.org/10.1109/3.362711>
14. Andreev Y.M., Kokh A.E., Kokh K.A., Lanskii G.V., Litvinenko K., Mamrashev A.A., Molloy J.F., Murdin B., Naftaly M., Nikolaev N.A., Svetlichnyi V.A. Observation of a different birefringence order at optical and THz frequencies in LBO crystal // *Optical Materials*. 2017. V. 66. P. 94–97. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.01.031>
15. Yoshida H., Fujita H., Nakatsuka M., Yoshimura M., Sasaki T., Kamimura T., Yoshida K. Dependences of laser-induced bulk damage threshold and crack patterns in several nonlinear crystals on irradiation direction // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2006. V. 45. N 2A. P. 766–769. <https://doi.org/10.1143/jjap.45.766>
16. Zhang Y., Zheng Y., Xu S., Liu W. Empirical study of nonlinearity tensor dominating THz generation in barium borate crystal through optical rectification // *Applied Physics B*. 2011. V. 103. N 4. P. 831–835. <https://doi.org/10.1007/s00340-011-4415-5>
17. Andreev Y.M., Naftaly M., Molloy J.F., Kokh A.E., Lanskii G.V., Svetlichnyi V.A., Losev V.F., Kononova N.G., Kokh K.A. LBO: optical properties and potential for THz application // *Laser Physics*
1. Wu X., Carbajo S., Ravi K., Ahr F., Cirmi G., Zhou Y., Mücke O.D., Kärtner F.X. Terahertz generation in lithium niobate driven by Ti:sapphire laser pulses and its limitations. *Optics Letters*, 2014, vol. 39, no. 18, pp. 5403–5406. <https://doi.org/10.1364/ol.39.005403>
2. Antsygin V.D., Mamrashev A.A., Nikolaev N.A., Potaturkin O.I., Bekker T.B., Solntsev V.P. Optical properties of borate crystals in terahertz region. *Optics Communications*, 2013, vol. 309, pp. 333–337. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.08.014>
3. Bernerd C., Segonds P., Debray J., Roux J.-F., Héroult E., Coutaz J.-L., Shoji I., Minamide H., Ito H., Lupinski D., Zawilski K., Schunemann P., Zhang X., Wang J., Hu Z., Boulanger B. Evaluation of eight nonlinear crystals for phase-matched Terahertz second-order difference-frequency generation at room temperature. *Optical Materials Express*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 561–576. <https://doi.org/10.1364/ome.383548>
4. Chen C., Sasaki T., Li R., Wu Y., Lin Z., Mori Y., Hu Z., Wang J., Aka G., Masashi Y., Kaneda Y. *Nonlinear Optical Borate Crystals: Principles and Applications*. Germany, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012, 406 p.
5. Nakatani H., Bosenberg W.R., Cheng L.K., Tang C.L. Laser-induced damage in beta-barium metaborate. *Applied Physics Letters*, 1988, vol. 53, no. 26, pp. 2587–2589. <https://doi.org/10.1063/1.100535>
6. Eimerl D., Davis L., Velsko S., Graham E.K., Zalkin A. Optical, mechanical, and thermal properties of barium borate. *Journal of Applied Physics*, 1987, vol. 62, no. 5, pp. 1968–1983. <https://doi.org/10.1063/1.339536>
7. Ezhov D.M., Lubenko D.M., Andreev Y.M. Doubling of THz radiation frequency in nonlinear borate crystals. *Russian Physics Journal*, 2021, vol. 64, no. 7, pp. 1358–1362. <https://doi.org/10.1007/s11182-021-02461-9>
8. Komatsu R., Sugawara T., Sassa K., Sarukura N., Liu Z., Izumida S., Segawa Y., Uda S., Fukuda T., Yamanouchi K. Growth and ultraviolet application of Li₂B₄O₇ crystals: Generation of the fourth and fifth harmonics of Nd:Y₃Al₅O₁₂ lasers. *Applied Physics Letters*, 1997, vol. 70, no. 26, pp. 3492–3494. <https://doi.org/10.1063/1.119210>
9. Umemura N., Watanabe J., Matsuda D., Kamimura T. Refined Sellmeier and thermo-optic dispersion formulas for Li₂B₄O₇. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 56, no. 3, pp. 032602. <https://doi.org/10.7567/jjap.56.032602>
10. Ezhov D., Turgeneva S., Nikolaev N., Mamrashev A., Mikerin S., Minakov F., Simanchuk A., Antsygin V., Svetlichnyi V., Losev V., Andreev Y. Potential of sub-THz-wave generation in Li₂B₄O₇ nonlinear crystal at room and cryogenic temperatures. *Crystals*, 2021, vol. 11, no. 11, pp. 1321. <https://doi.org/10.3390/cryst11111321>
11. Waasem N., Fieberg S., Hauser J., Gomes G., Haertle D., Kühnemann F., Buse K. Photoacoustic absorption spectrometer for highly transparent dielectrics with parts-per-million sensitivity. *Review of Scientific Instruments*, 2013, vol. 84, no. 2, pp. 023109. <https://doi.org/10.1063/1.4792724>
12. Röcker C., Weinert P., Villevall P., Lupinski D., Delaigue M., Hönninger C., Weber R., Graf T., Ahmed M.A. Nonlinear absorption in lithium triborate frequency converters for high-power ultrafast lasers. *Optics Express*, 2022, vol. 30, no. 4, pp. 5423–5438. <https://doi.org/10.1364/oe.447255>
13. Kato K. Temperature-tuned 90° phase matching properties of LiB₃O₅. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, vol. 30, no. 12, pp. 2950–2952. <https://doi.org/10.1109/3.362711>
14. Andreev Y.M., Kokh A.E., Kokh K.A., Lanskii G.V., Litvinenko K., Mamrashev A.A., Molloy J.F., Murdin B., Naftaly M., Nikolaev N.A., Svetlichnyi V.A. Observation of a different birefringence order at optical and THz frequencies in LBO crystal. *Optical Materials*, 2017, vol. 66, pp. 94–97. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.01.031>
15. Yoshida H., Fujita H., Nakatsuka M., Yoshimura M., Sasaki T., Kamimura T., Yoshida K. Dependences of laser-induced bulk damage threshold and crack patterns in several nonlinear crystals on irradiation direction. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 45, no. 2A, pp. 766–769. <https://doi.org/10.1143/jjap.45.766>
16. Zhang Y., Zheng Y., Xu S., Liu W. Empirical study of nonlinearity tensor dominating THz generation in barium borate crystal through optical rectification. *Applied Physics B*, 2011, vol. 103, no. 4, pp. 831–835. <https://doi.org/10.1007/s00340-011-4415-5>
17. Andreev Y.M., Naftaly M., Molloy J.F., Kokh A.E., Lanskii G.V., Svetlichnyi V.A., Losev V.F., Kononova N.G., Kokh K.A. LBO: optical properties and potential for THz application. *Laser Physics*

- Letters. 2015. V. 12. N 11. P. 115402. <https://doi.org/10.1088/1612-2011/12/11/115402>
18. Wang C.-R., Pan Q.-K., Chen F., Lanski G., Nikolaev N., Mamrashev A., Andreev Y., Meshalkin A. Phase-matching in KTP crystal for THz wave generation at room temperature and 81 K // *Infrared Physics & Technology*. 2019. V. 97. P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.12.012>
 19. Midwinter J.E., Warner J. The effects of phase matching method and of uniaxial crystal symmetry on the polar distribution of second-order non-linear optical polarization // *British Journal of Applied Physics*. 1965. V. 16. N 8. P. 1135–1142. <https://doi.org/10.1088/0508-3443/16/8/312>
 20. Shoji I., Nakamura H., Ohdaira K., Kondo T., Ito R., Okamoto T., Tatsuki K., Kubota S. Absolute measurement of second-order nonlinear-optical coefficients of β -BaB₂O₄ for visible to ultraviolet second-harmonic wavelengths // *Journal of the Optical Society of America B*. 1999. V. 16. N 4. P. 620–624. <https://doi.org/10.1364/josab.16.000620>
 21. Roberts D.A. Simplified characterization of uniaxial and biaxial nonlinear optical crystals: a plea for standardization of nomenclature and conventions // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1992. V. 28. N 10. P. 2057–2074. <https://doi.org/10.1109/3.159516>
 22. Petrov V., Rotermund F., Noack F., Komatsu R., Sugawara T., Uda S. Vacuum ultraviolet application of Li₂B₄O₇ crystals: Generation of 100 fs pulses down to 170 nm // *Journal of Applied Physics*. 1998. V. 84. N 11. P. 5887–5892. <https://doi.org/10.1063/1.368904>
 23. Sutherland R.L. *Handbook of Nonlinear Optics*. CRC Press, 2003. 976 p. <https://doi.org/10.1201/9780203912539>
 24. Alekseev S.V., Ivanov N.G., Losev V.F., Mesyats G.A., Mikheev L.D., Ratakhin N.A., Panchenko Y.N. THL-100 multi-terawatt laser system of visible spectrum range // *Optics Communications*. 2020. V. 455. P. 124386. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124386>
- Letters*, 2015, vol. 12, no. 11, pp. 115402. <https://doi.org/10.1088/1612-2011/12/11/115402>
18. Wang C.-R., Pan Q.-K., Chen F., Lanski G., Nikolaev N., Mamrashev A., Andreev Y., Meshalkin A. Phase-matching in KTP crystal for THz wave generation at room temperature and 81 K. *Infrared Physics & Technology*, 2019, vol. 97, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.12.012>
 19. Midwinter J.E., Warner J. The effects of phase matching method and of uniaxial crystal symmetry on the polar distribution of second-order non-linear optical polarization. *British Journal of Applied Physics*, 1965, vol. 16, no. 8, pp. 1135–1142. <https://doi.org/10.1088/0508-3443/16/8/312>
 20. Shoji I., Nakamura H., Ohdaira K., Kondo T., Ito R., Okamoto T., Tatsuki K., Kubota S. Absolute measurement of second-order nonlinear-optical coefficients of β -BaB₂O₄ for visible to ultraviolet second-harmonic wavelengths. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, vol. 16, no. 4, pp. 620–624. <https://doi.org/10.1364/josab.16.000620>
 21. Roberts D.A. Simplified characterization of uniaxial and biaxial nonlinear optical crystals: a plea for standardization of nomenclature and conventions. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, vol. 28, no. 10, pp. 2057–2074. <https://doi.org/10.1109/3.159516>
 22. Petrov V., Rotermund F., Noack F., Komatsu R., Sugawara T., Uda S. Vacuum ultraviolet application of Li₂B₄O₇ crystals: Generation of 100 fs pulses down to 170 nm. *Journal of Applied Physics*, 1998, vol. 84, no. 11, pp. 5887–5892. <https://doi.org/10.1063/1.368904>
 23. Sutherland R.L. *Handbook of Nonlinear Optics*. CRC Press, 2003, 976 p. <https://doi.org/10.1201/9780203912539>
 24. Alekseev S.V., Ivanov N.G., Losev V.F., Mesyats G.A., Mikheev L.D., Ratakhin N.A., Panchenko Y.N. THL-100 multi-terawatt laser system of visible spectrum range. *Optics Communications*, 2020, vol. 455, pp. 124386. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124386>

Авторы

Лубенко Дмитрий Михайлович — младший научный сотрудник, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, 634055, Российская Федерация, [sc 55642871000](https://orcid.org/0000-0002-3009-762X), <https://orcid.org/0000-0002-3009-762X>, lubenkodm@gmail.com

Ежов Дмитрий Михайлович — младший научный сотрудник, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, Российская Федерация, [sc 57195325727](https://orcid.org/0000-0002-3311-5088), <https://orcid.org/0000-0002-3311-5088>, ezhov_dm@mail.ru

Светличный Валерий Анатольевич — кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, Российская Федерация, [sc 35514642000](https://orcid.org/0000-0002-3935-0871), <https://orcid.org/0000-0002-3935-0871>, v_svetlichnyi@bk.ru

Андреев Юрий Михайлович — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, 630055, Российская Федерация, [sc 55411777300](https://orcid.org/0000-0002-1891-9846), <https://orcid.org/0000-0002-1891-9846>, [yuandreev@yandex.ru](mailto:yandreev@yandex.ru)

Николаев Назар Александрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Российская Федерация, [sc 56363884600](https://orcid.org/0000-0002-7106-3100), <https://orcid.org/0000-0002-7106-3100>, nazar@iae.nsk.su

Authors

Dmitry M. Lubenko — Junior Researcher, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, 634055, Russian Federation, [sc 55642871000](https://orcid.org/0000-0002-3009-762X), <https://orcid.org/0000-0002-3009-762X>, lubenkodm@gmail.com

Dmitry M. Ezhov — Junior Researcher, National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russian Federation, [sc 57195325727](https://orcid.org/0000-0002-3311-5088), <https://orcid.org/0000-0002-3311-5088>, ezhov_dm@mail.ru

Valery A. Svetlichnyi — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Head of Laboratory, National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russian Federation, [sc 35514642000](https://orcid.org/0000-0002-3935-0871), <https://orcid.org/0000-0002-3935-0871>, v_svetlichnyi@bk.ru

Yury M. Andreev — D.Sc. (Physics & Mathematics), Chief Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, 630055, Russian Federation, [sc 55411777300](https://orcid.org/0000-0002-1891-9846), <https://orcid.org/0000-0002-1891-9846>, [yuandreev@yandex.ru](mailto:yandreev@yandex.ru)

Nazar A. Nikolaev — PhD, Senior Researcher, Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, [sc 56363884600](https://orcid.org/0000-0002-7106-3100), <https://orcid.org/0000-0002-7106-3100>, nazar@iae.nsk.su

Статья поступила в редакцию 20.07.2022
Одобрена после рецензирования 11.03.2023
Принята к печати 23.05.2023

Received 20.07.2022
Approved after reviewing 11.03.2023
Accepted 23.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»