

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Оптические свойства кристалла LBO в терагерцевом диапазоне при охлаждении до температуры жидкого азота

Н.А.Николаев, Ю.М.Андреев, Н.Г.Кононова, А.А.Мамрашев,
В.Д.Анцыгин, К.А.Кох, А.Е.Кох, В.Ф.Лосев, О.И. Потатуркин

Методами широкополосной импульсной терагерцевой спектроскопии измерена анизотропия оптических свойств образцов нелинейного кристалла трибората лития (LBO) в диапазоне 0.2–2 ТГц при комнатной температуре и при $T = 81$ К. На фоне значительного уменьшения двулучепреломления с охлаждением, ведущего к невозможности реализации условий фазового синхронизма, установлено радикальное уменьшение коэффициентов поглощения α_x и α_y , что показывает перспективность использования кристалла для генерации терагерцевого излучения методом оптического выпрямления, а также для изготовления периодических структур и оптических элементов.

Ключевые слова: кристалл трибората лития, LBO, терагерцевое излучение, коэффициент поглощения, показатель преломления.

1. Введение

Двухосный нелинейный кристалл (НК) трибората лития LiB_3O_5 (LBO) обладает уникальным набором физических и химических свойств [1]. Окно его максимальной прозрачности лежит в диапазоне 155–3200 нм, при этом в спектральной области 500–1200 нм коэффициент поглощения не превышает 10^{-5} см^{-1} в силу особенностей структуры, не допускающей внедрение примесей [2, 3]. Среди известных нелинейных кристаллов LBO обладает наибольшей лучевой стойкостью. На длине волны 1.064 мкм наносекундного (25 нс) неодимового лазера она составляет 11.2 ГВт/см^2 [4]. Коротковолновый край полосы пропускания, расположенный в окрестности 155 нм, позволяет избежать двухфотонного поглощения излучения основной и второй гармоник лазеров видимого и ближнего ИК диапазона. В широких спектральных интервалах окна максимальной прозрачности может быть реализован не-

критический фазовый синхронизм I и II типов. Существующие ростовые технологии позволяют получать кристаллы LBO дециметровых размеров массой свыше 1.5 кг [5]. В совокупности, несмотря на невысокое значение квадратичных коэффициентов нелинейной восприимчивости: $d_{31} = 0.67 \text{ пм/В}$, $d_{32} = 0.85 \text{ пм/В}$ и $d_{33} = 0.04 \text{ пм/В}$ [1], физические свойства и состояние ростовой технологии обуславливают применение НК LBO для преобразования частот мощных лазеров [3].

Сложившееся положение дел создает предпосылки для возможного применения этого кристалла и в качестве эффективного преобразователя излучения лазеров видимого и ближнего ИК диапазонов в терагерцевый (ТГц) диапазон. Однако на текущий момент публикации по практическому применению такого преобразователя отсутствуют. Имеется ограниченное число работ, посвященных исследованию оптических свойств в ТГц диапазоне. Методами ИК спектроскопии отражения и комбинационного рассеяния света исследованы спектральные свойства в диапазоне 40–2500 см^{-1} [6–8]. Детальные исследования оптических свойств в области 0.2–2.4 ТГц (6.7–80 см^{-1} соответственно) проведены группой российских и британских ученых [9]. В результате измеренные методом широкополосной импульсной ТГц спектроскопии дисперсионные свойства аппроксимированы в виде уравнений Селлмейера, и с их использованием показана возможность фазосогласованного преобразования лазерного излучения видимого и ближнего ИК диапазона в ТГц диапазон. Из данных работы [9] следует, что несмотря на невысокий (десять доли см^{-1}) коэффициент поглощения кристаллов в направлении фазового синхронизма в диапазоне до 0.5 ТГц, использование доступных кристаллов LBO многосантиметровой длины для генерации ТГц излучения невозможно. Решением проблем создания преобразователей частоты многосантиметровой длины, а также перекрытия спектром генерации более высокочастотной части ТГц диапазона может быть охлаждение кристаллов, если принять во внимание температурную зависимость фонного поглощения, определяющего потери в этом диапазоне. Температурная зависимость оптичес-

Н.А.Николаев, А.А.Мамрашев. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; Институт автоматки и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: nazar@iae.nsk.su, mamrash@iae.nsk.su

Ю.М.Андреев. Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 10/3; e-mail: yuandreev@yandex.ru

Н.Г.Кононова, А.Е.Кох. Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3; e-mail: kononovang@igm.nsc.ru, kohae@igm.nsc.ru

В.Д.Анцыгин, О.И. Потатуркин. Институт автоматки и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: antsign@iae.nsk.su, potaturkin@iae.nsk.su

К.А.Кох. Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: k.a.kokh@gmail.com

В.Ф.Лосев. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: losev@ogl.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 6 октября 2017 г., после доработки – 15 ноября 2017 г.

ких свойств в ТГц диапазоне была исследована китайскими учеными с использованием импульсного терагерцевого спектрометра [10], однако были изучены оптические свойства волн различных поляризаций, распространяющихся в направлении двух из трех оптических осей, кроме того, имел место очевидный «уход» коэффициентов поглощения в отрицательные значения на частотах ниже 0.5 ТГц, что говорит о некорректной нормировке ТГц сигналов. Это обстоятельство ставит под вопрос надежность определения и показателей преломления. Без корректного знания оптических свойств невозможно полное использование потенциала кристалла в освоении ТГц диапазона.

Настоящая работа посвящена детальному сравнительному исследованию трансформации коэффициентов поглощения и показателей преломления кристаллов LBO в диапазоне 0.2–2 ТГц при их охлаждении от комнатной температуры (КТ) до температуры жидкого азота.

2. Эксперимент

Исследуемые кристаллы LBO выращены из раствора-расплава в Институте геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН [5]. Образцы представляют собой полированные плоскопараллельные пластины размерами 10 × 10 мм и толщиной 2068 ± 5 мкм, вырезанные ортогонально оптическим осям x , y и z , которые связаны с кристаллографическими осями a , c и b соответственно [1]. Измерения проведены с помощью широкополосного импульсного ТГц спектрометра, описание которого, а также методика обработки выходных сигналов представлены в [11]. Для охлаждения образцов до температуры жидкого азота использовался заливной криостат. Перед на-

чалом эксперимента была проведена настройка оптической схемы спектрометра по методике, описанной в [12].

3. Результаты

При охлаждении НК LBO до температуры 81 К наблюдается радикальное уменьшение коэффициентов поглощения α_x и α_y (рис.1, *a, б*) до неизмеримо малого уровня, в то же время изменения коэффициента поглощения α_z остаются крайне незначительными и не превышают 1.5 см^{-1} на частоте 1 ТГц (рис.1, *в*).

При охлаждении кристалла существенно уменьшаются и показатели преломления n_x и n_y (на ~ 0.37 и ~ 0.47 соответственно) (рис.2, *a, б*). Однако показатель преломления n_z (рис.2, *в*) немного (на ~ 0.07) увеличивается, что может быть объяснено коротковолновым сдвигом соседнего длинноволнового пика фононного поглощения. Проведенные оценки дают следующие коэффициенты температурной дисперсии показателей преломления для ТГц диапазона: $dn_x/dT \approx 1.7 \times 10^{-3} \text{ К}^{-1}$, $dn_y/dT \approx 2.2 \times 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ и $dn_z/dT \approx -3.2 \times 10^{-4} \text{ К}^{-1}$, что на два-три порядка выше соответствующих значений для видимой области спектра. Значительное уменьшение двулучепреломления $n_x - n_z$ (с ~ 0.33 при комнатной температуре до ~ 0.04 при 81 К) и $n_y - n_z$ (с ~ 0.43 до ~ 0.03) неминуемо приводит к невозможности выполнения условий фазового синхронизма для генерации ТГц излучения методами нелинейной кристаллооптики. С другой стороны, радикальное уменьшение коэффициентов поглощения α_x и α_y при охлаждении до температуры жидкого азота способствует увеличению потенциальной эффективности оптико-терагерцевого преобразования излучения фемтосекундных лазеров методом оптического выпрямления. Кроме того, благодаря оригинальному на-

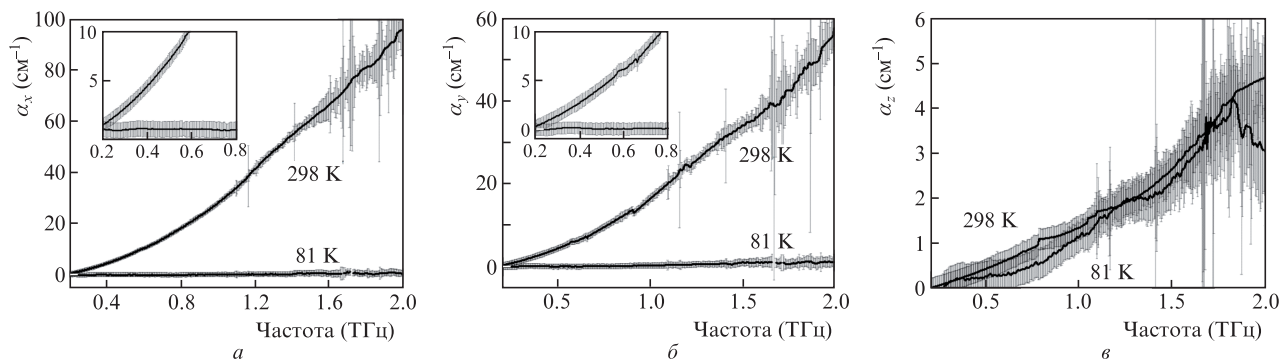


Рис.1. Коэффициенты поглощения α_x (*a*), α_y (*б*) и α_z (*в*) НК LBO при температурах 298 и 81 К. На вставках (*a*) и (*б*) увеличенный участок тех же кривых.

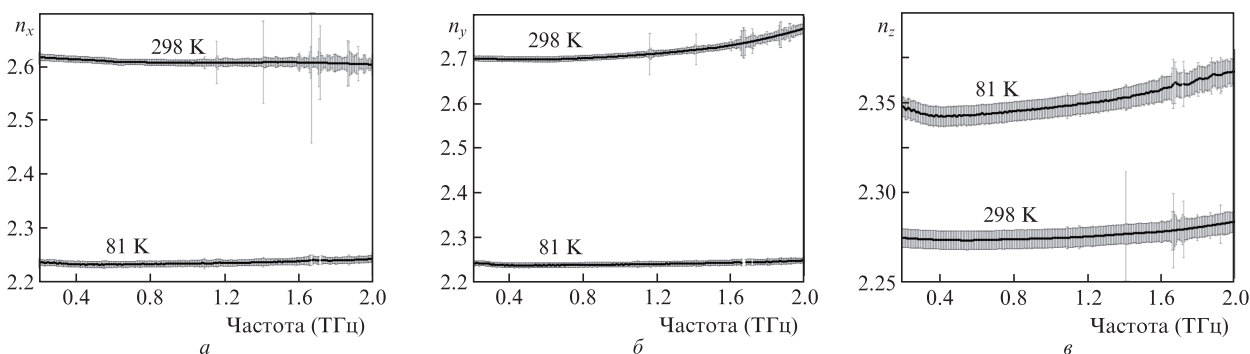


Рис.2. Показатели преломления n_x (*a*), n_y (*б*) и n_z (*в*) НК LBO при температурах 298 и 81 К.

бору физических свойств, а также большой (свыше 0.3 мм) длине когерентности [13], из охлажденных кристаллов LBO можно изготавливать высокоэффективные периодические структуры для преобразователей частоты в низкочастотную (менее 1 ТГц) часть диапазона, а также высокостойкие оптические элементы различного назначения с ориентацией ортогонально оптическим осям x и y . Из кристаллов LBO с ориентацией вдоль оптической оси z можно изготавливать нечувствительные к изменению температуры элементы оптики ТГц диапазона субсантиметровых длин с высокими техническими характеристиками.

4. Заключение

Итак, с помощью широкополосного импульсного спектрометра впервые комплексно исследованы вариации полного набора коэффициентов поглощения и показателей преломления двухосного нелинейного кристалла LBO в диапазоне 0.2–2 ТГц при изменении температуры от комнатной до 81 К. Установлено, что с понижением температуры коэффициенты поглощения для волн с поляризацией, параллельной осям x и y , уменьшаются до неизмеримо малого уровня, при этом на порядок уменьшается двулучепреломление, что делает структурные свойства кристалла близкими к изотропным. Оптические свойства

кристалла для волн с поляризацией, параллельной оптической оси z , изменяются незначительно. При охлаждении кристалл LBO остается перспективным для применения в качестве оптического выпрямителя, а также для создания периодических структур и высокостойких оптических элементов ТГц диапазона, в том числе работающих и при комнатной температуре.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 19-19-10021). Импульсный терагерцевый спектрометр предоставлен центром коллективного пользования «Спектроскопия и оптика» при Институте автоматизации и электротехники СО РАН.

1. Nikogosyan D.N. *Nonlinear optical crystals: a complete survey* (Springer Science & Business Media, 2006).
2. Waasem N. et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **84** (2), 023109 (2013).
3. Kokh A. et al. *J. Cryst. Growth*, **312** (10), 1774 (2010).
4. Furukawa Y. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **65** (12), 1480 (1994).
5. Kokh A. et al. *J. Cryst. Growth*, **360**, 158 (2012).
6. Xia H.R. et al. *J. Mater. Res.*, **16** (12), 3464 (2001).
7. Xiong G. et al. *J. Raman Spectrosc.*, **24** (11), 785 (1993).
8. Jiang Y.J., Wang Y., Zeng L.Z. *J. Raman Spectrosc.*, **27** (8), 601 (1996).
9. Andreev Y.M. et al. *Opt. Mater.*, **66**, 94 (2017).
10. Song K. et al. *Sci. Rep.*, **7**, 8122 (2017).
11. Antsygin V.D. et al. *Opt. Express*, **22** (21), 25436 (2014).
12. Анцыгин В.Д. и др. *Автометрия*, **52** (4), 71 (2016).
13. Лубенко Д.М., Лосев В.Ф., Андреев Ю.М., Ланский Г.В. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **81** (10), 1375 (2017).