

УДК 548.0534

АКУСТИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ © 2021 г. М. М. Мазур<sup>1</sup>, А. А. Павлюк<sup>2</sup>, А. В. Рябинин<sup>1</sup>, \*<sup>1</sup>ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений, корп. 11, Менделеево, Московская обл., 141570 Россия<sup>2</sup>Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО Российской академии наук,  
пр. Академика Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090 Россия

\*e-mail: ryabinin.nn@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.11.2020 г.

После доработки 20.11.2020 г.

Принята к публикации 24.11.2020 г.

Выполнены исследования акустических и оптических свойств кристалла  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ , выращенного низкоградиентным методом Чохральского. Измерена полная матрица модулей упругости и исследовано затухание ультразвука в диапазоне частот 40–170 МГц при распространении вдоль оси  $Z$  кристалла. Измерены показатели преломления в видимом и ближнем ИК-диапазоне и по формуле Зельмейера получена их спектральная зависимость. Сделаны выводы о перспективах использования кристалла для создания АОМ.

**Ключевые слова:** акустооптические модуляторы, молибдат  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ , модули упругости**DOI:** 10.31857/S0002337X21040096

## ВВЕДЕНИЕ

Акустооптические модуляторы (АОМ), предназначенные для управления лазерным излучением, широко используются в различных устройствах и системах: для модуляции добротности резонаторов лазеров [1], в системах передачи информации [2], в системах стабилизации частоты эталонов времени [3] и многих других. Так как для различных применений требуются АОМ с разными характеристиками, то в результате для их создания приходится использовать различные стекла и кристаллы. Наиболее широко используемым материалом для создания ячейки АОМ является парателлуриит. Для ряда применений АОМ используются силикатные и халькогенидные стекла, плавный и кристаллический кварц, КGW, германий и другие материалы. Критериями при выборе материала при создании АОМ служат их стоимость, спектральный диапазон пропускания, акустооптическая эффективность, лучевая стойкость, затухание ультразвуковой волны.

При низких уровнях интенсивности светового пучка важнейшим параметром при выборе материала является акустооптическая эффективность материала  $M_2$ . Особенно важно большое значение  $M_2$  в случае использования АОМ в ИК-области, так как эффективность акустооптического взаимодействия обратно пропорционально квадрату длины волны оптического излучения. Использование халькогенидных стекол, у которых  $M_2$  на порядок больше, чем у парателлурита, обеспечи-

вает радикальное уменьшение управляющей мощности. Однако халькогенидные стекла обладают и значительным затуханием ультразвуковой волны, что делает затруднительным их применение на частотах более нескольких десятков МГц. Для ряда применений в качестве материала ячейки АОМ привлекательным является кристалл  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ , у которого  $M_2$  существенно больше, чем у парателлурита, а затухание ультразвука меньше, чем у халькогенидного стекла  $\text{As}_2\text{S}_3$  [4–7].

Целью настоящей работы является получение более полной информации об оптических и упругих свойствах кристалла  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ , достаточной для разработки АО модуляторов ИК-диапазона и работающих на ультразвуковых частотах 100–200 МГц. Исследуемый кристалл  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$  был выращен низкоградиентным методом Чохральского [8, 9].

ИССЛЕДОВАНИЕ  
АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Выполнены измерения полной матрицы модулей упругости кристалла  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$  и определено затухание продольной ультразвуковой волны, распространяющейся в направлении оси  $Z$  кристалла. Полная матрица модулей упругости определялась следующим образом. Сначала измерялись скорости звука в нескольких кристаллофизических направлениях, затем обратным решением уравнений Кристоффеля определялись модули упругости [10].

**Таблица 1.** Результаты измерения скоростей

Направление	[001]	[110]	[100]	[101]
Размер, см	1.450	0.9745	1.296	0.9327
Скорости, км/с	$v_1 = 3.455$	$v_4 = 4.028$	$v_7 = 4.109$	$v_{10} = 3.575$
	$v_2^*$	$v_5 = 2.132$	$v_8 = 1.978$	$v_{11} = 1.806$
	$v_3^*$	$v_6 = 1.683$	$v_9 = 1.684$	$v_{12} = 2.142$

\*  $v_2$  и  $v_3$  не измерялись, они равны  $v_6$  и  $v_9$  вследствие симметрии кристалла.

**Таблица 2.** Модули упругости кристалла  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ 

$vh$	11	12	13	16	33	44	66
$\lambda_{vh}$	16.718	7.2316	5.133	-1.4545	11.928	2.832	4.0754
$C_{vh}$	94.62	40.93	29.05	-8.23	67.51	16.03	23.07
$C_{vh}$ [12]	94.67	40.03	29.55	-9.17	67.87	15.91	23.23

Скорость звуковых волн измеряли фазоимпульсным методом [11] на плоскопараллельных ориентированных образцах. Были измерены скорости звука в четырех кристаллофизических направлениях. Частоты резонансов измерялись на частотах от 50 до 90 МГц в диапазоне около 30 МГц для продольных волн и в диапазоне около 15 МГц для сдвиговых волн. Точность измерения скоростей около 0.1%, точность ориентировки образцов кристалла около 5'. Результаты измерений скоростей представлены в табл. 1.

Симметрия кристаллов  $4/m$ , к которой принадлежит  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ , позволяет непосредственно вычислить из измеренных скоростей звука только два тензора модулей упругости  $C_{33} = \rho v_1^2$  и  $C_{44} = C_{55} = \rho v_6^2$ . Остальные 5 модулей находятся из решения систем квадратных и кубических уравнений. Практически для определения матрицы модулей упругости удобнее вычислять и пользоваться приведенными модулями упругости  $\lambda_{vh} = C_{vh}/\rho$ , т.к. в этом случае нет необходимости использовать плотность кристалла и уравнения менее громоздкие. Для приведенных тензоров модулей упругости  $\lambda_{vh}$  из уравнений Кристоффеля и измеренных значений скоростей можно записать 7 уравнений и для измеренных скоростей составить 16 комбинаций разрешаемых систем уравнений для нахождения модулей  $\lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{13}, \lambda_{16}, \lambda_{66}$ . Для определения знака модуля  $\lambda_{16}$  необходимо выполнить дополнительные измерения значений скоростей в направлении между [110] и [100]. Знак модуля  $\lambda_{16}$  и значение плотности кристалла  $\rho = 5.66 \text{ г/см}^3$  заимствованы из работы [12]. Значения полученных модулей представлены в табл. 2. Для сравнения там же приведены модули упругости, полученные в работе [12].

Так как точность измерения скоростей в нашей работе и работе [12] одинакова, возможно, небольшое расхождение в величинах модулей упругости связано или с технологией роста кристаллов, или с погрешностями в ориентации исследуемых образцов. Различие в полученных величинах  $C_{vh}$  не существенно для разработки АОМ.

С использованием полученных модулей упругости были рассчитаны скорости ультразвуковых волн в трех кристаллофизических плоскостях. Результаты расчетов представлены на рис. 1. Точками на диаграммах обозначены экспериментальные значения скоростей.

Так как наибольшая акустооптическая эффективность на продольной ультразвуковой волне в кристалле  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$  реализуется при распространении звука вдоль оси  $Z$  кристалла [6], то для данного направления важно знать величину затухания звука. Для определения частотной зависимости затухания ультразвуковой волны мы измеряли изменение эффективности акустооптической дифракции при распространении ультразвуковой волны на расстояние 1 см для различных частот ультразвуковой волны в диапазоне от 40 до 170 МГц. Из полученных значений затухания ультразвуковой волны установлена следующая частотная зависимость затухания мощности ультразвуковой волны, распространяющейся в направлении оси  $Z$ :

$$P(z) = P_0 \times 10^{-\alpha z}, \quad \alpha = 0.0031 f^{1.21},$$

где  $P_0$  – мощность ультразвуковой волны при  $z = 0$ ,  $f$  – частота ультразвуковой волны в МГц,  $z$  – в сантиметрах. На рис. 2 приведены результаты измерения показателя поглощения продольной ультразвуковой волны в диапазоне от 40 до 170 МГц и аппроксимация  $\alpha$  полученных результатов степенной функцией.

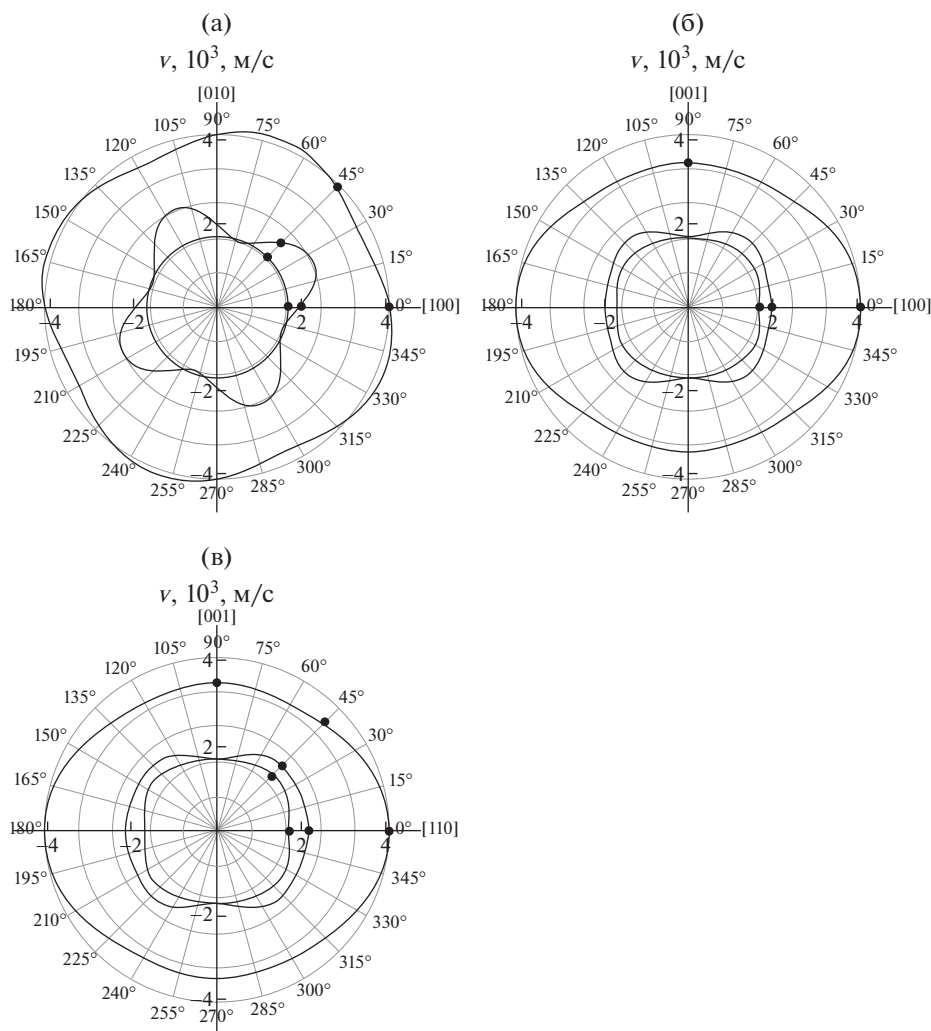


Рис. 1. Диаграммы скоростей ультразвуковых волн в трех кристаллофизических плоскостях.

### ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Были выполнены исследования спектра пропускания кристалла  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$  в видимом и ближнем ИК-диапазонах и измерены его показатели преломления. Спектр пропускания измерялся на спектрофотометре Shimadzu UV 3600 plus. Исследовался неактивированный образец  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$  длиной 16.2 мм при распространении света вдоль оси  $Z$ . Результаты измерения представлены на рис. 3.

На большей части исследованного спектрального диапазона пропускание кристалла не имеет особенностей за исключением незначительных особенностей в диапазонах 550–860 и 2800–3100 нм.

Для измерения показателей преломления кристалла  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$  была изготовлена трехгранная призма с углом между двумя оптическими гранями  $20^\circ 26' 16'' \pm 15''$ . Одна оптическая грань

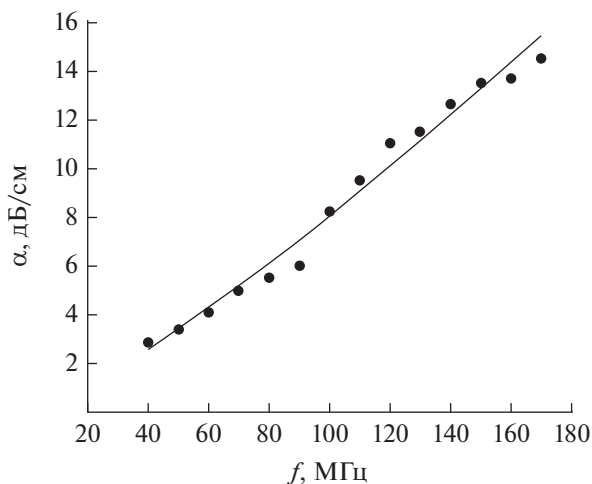


Рис. 2. Частотная зависимость поглощения продольной акустической волны, распространяющейся вдоль оси  $Z$  в кристалле  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ .

**Таблица 3.** Результаты измерения показателя преломления для различных длин волн

$\lambda$ , нм	532	546.1	588.19	611	632.8	1064	1150
$n_e$	2.302	2.294	2.273	2.262	2.255	2.192	2.193
$n_o$	2.438	2.425	2.395	2.380	2.368	2.282	2.275

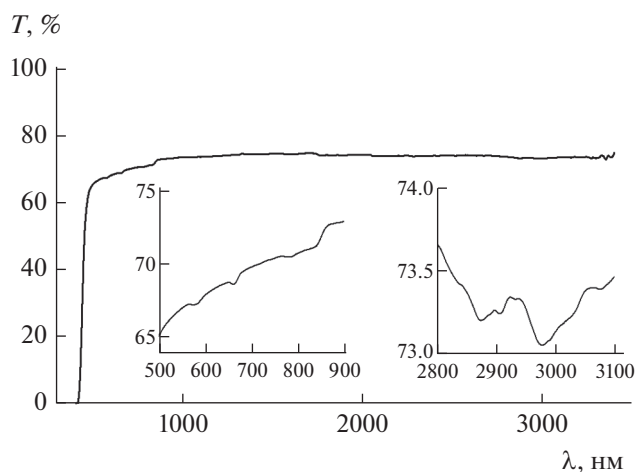
призмы перпендикулярна оси  $X$  кристалла и обе оптические грани призмы параллельны оси  $Z$  кристалла. Исследования показателей преломления кристалла  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$  в видимой области спектра были выполнены при помощи гониометра ГС-5 на 5 спектральных линиях. Показатели преломления на длинах волн 1064 и 1150 нм получены путем измерения отклонения призмой  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$  лазерного пучка. Результаты измерений представлены в табл. 3. Точность измерения показателей преломления на гониометре в видимом диапазоне  $\pm 0.0005$  и в ИК-диапазоне на длинах волн 1.064 и 1.15 мкм —  $\pm 0.005$ .

На основании полученных результатов методом наименьших квадратов по формуле Зельмейера найдены спектральные зависимости  $n_e(\lambda)$  и  $n_o(\lambda)$ :

$$n_e(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{3.688\lambda^2}{(\lambda^2 - 199.65^2)^2}}$$

$$n_o(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{3.998\lambda^2}{(\lambda^2 - 232.21^2)^2}}$$

(длина световой волны в нанометрах).



**Рис. 3.** Спектральная зависимость пропускания образца кристалла  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены данные о акустических свойствах кристалла  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ , выращенного методом Чохральского в условиях низких градиентов температур. Получены полная матрица модулей упругости и частотная зависимости поглощения продольной ультразвуковой волны, распространяющейся вдоль оси  $Z$  кристалла.

Исследованы спектры пропускания кристалла  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$  в видимом и ближнем ИК диапазонах.

Измерены коэффициенты преломления кристалла и рассчитаны коэффициенты формулы Зельмейера для показателей преломления.

Полученные результаты о поглощении звуковой волны в диапазоне частот до 170 МГц, а также значения  $M_2 = 70$  для акустической волны, распространяющейся вдоль оси  $Z$  [6], позволяют утверждать, что на основе кристалла  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$  могут быть изготовлены высокоэффективные АОМ, работающие на ультразвуковых частотах до нескольких сотен МГц (как минимум до 200 МГц).

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят Л.Л. Пальцева за изготовление ультразвукового преобразователя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов Л.В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. М.: Радио и связь, 1981. 440 с.
2. Антонов С.Н. Акустооптическая коммуникация волоконно-оптических каналов // ЖТФ. 2019. Т. 89. Вып. 2. С. 274–279.
3. Бердасов О.И., Хабарова К.Ю., Стрелкин С.А., Белотелов Г.С., Костин А.С., Грибов А.Ю., Пальчиков В.Г., Колачевский Н.Н., Слюсарев С.Н. Оптические стандарты частоты на холодных атомах стронция // Альманах современной метрологии. 2014. № 1. С. 13–36.
4. Балакиев В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.
5. Акимов С.В., Дудник Е.Ф., Столпакова Т.М., Довченко Г.В. Акустооптические характеристики  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$  // Физика твердого тела. 1978. Т. 20. Вып. 3. С. 944–945.

6. *Цыдытова Б.М., Мазур М.М., Павлюк А.А.* Акусто-оптические свойства монокристаллов  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$ , выращенных при низких значениях градиентов температуры // Неорг. материалы. 2012. Т. 48. № 9. С. 1058–1061.
7. *Лавров Е.А., Мазур М.М., Ширяев В.С., Сопаткин Г.Е.* Исследование затухания ультразвука в халькогенидном стекле  $\text{As}_2\text{S}_3$  // Сб. науч. Тр. VII междунар. конф. по фотонике и информационной оптике. Москва: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 91–92.
8. *Pavlyuk A.A., Vasiliev Ya.V., Kharchenko L.Yu., Kuznetsov F.A.* Low Thermal Gradient Technique and Method for Large Oxide Crystals Growth from Melt and Flux // Proc. APSAM\_92. Japan, 1993. P. 164–171.
9. *Цыдытова Б.Н., Павлюк А.А.* Выращивание кристаллов литий-висмутового молибдата  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$  в условиях низких градиентов температуры // Вестн. Бурятского гос. ун-та. 2012. № 3. С. 6–12.
10. *Беликов Б.П., Александров К.С., Рыжова Т.В.* Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. М.: Наука, 1970.
11. *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972
12. *Александров К.С., Бурков С.И., Замков А.В., Холов А., Хафизов С.Х., Шабанова Л.А., Клевцов П.В.* Акустооптические и упругие свойства кристаллов  $\text{NaBi}(\text{WO}_4)_2$  и  $\text{LiBi}(\text{MoO}_4)_2$  // Физика твердого тела. 1988. Т. 30. Вып. 2. С. 609–612.