

МЕТОДЫ АКУСТООПТИКИ В ИССЛЕДОВАНИИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АКУСТООПТИЧЕСКИХ И АКУСТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

С. В. Кулаков^а, доктор техн. наук, профессор

О. Л. Балышева^а, канд. техн. наук, доцент

В. В. Клузгин^а, доктор техн. наук, профессор

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: монокристаллы для акустооптических и акустоэлектронных устройств должны обладать свойствами, обеспечивающими практическое применение распространяющихся в них оптических и акустических волн для обработки сигналов. Для исследования свойств и измерения различных параметров монокристаллов используются методы, многие из которых требуют применения специального оборудования и дополнительных средств отображения результатов. **Цель:** показать эффективность и наглядность использования акустооптического метода для исследования структуры акустических полей, акустического затухания и измерения нелинейных параметров кристаллов. **Методы:** оригинальность подхода состоит в использовании акустооптического взаимодействия как для комплексного исследования свойств монокристаллов, так и для визуализации с помощью «теневого картирования» (Schlierens images). **Результаты:** оценена дифракционная расходимость и измерено отклонение направления переноса энергии от волновой нормали. Одновременная визуализация продольной и сдвиговой акустических мод позволила сравнить их дифракционную расходимость и измерить углы отклонения направления переноса энергии от волновой нормали для каждой из мод. Получена картина пространственного распределения мощности акустической волны, позволяющая выявить ростовую неоднородность кристалла. Выполнены измерения параметров упругой нелинейности. Показано, что уровень затухания в упруго-нелинейной среде зависит от амплитуды волны. **Практическая значимость:** акустооптический подход позволяет выполнять визуальную оценку качества исследуемых кристаллов и их пригодности для построения устройств, а также оценивать затухание акустических волн и степень проявления упругой нелинейности.

Ключевые слова — акустооптика, акустическая волна, кристалл, «тенивые картины», затухание, упругая нелинейность.

Введение

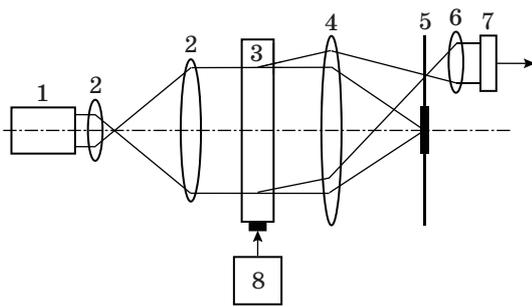
Акустоэлектронные и акустооптические устройства широко используются в аппаратуре современных информационно-измерительных систем. Одним из перспективных и востребованных применений таких устройств служат датчики в составе различных систем мониторинга — от технического состояния промышленных объектов до состояния здоровья человека. Особенностью устройств акустоэлектроники и акустооптики является необходимость применения специальных материалов — монокристаллов. Используемые монокристаллы должны удовлетворять ряду требований [1, 2], поэтому необходимо детальное исследование их свойств. Интересно, что инструментом исследований монокристаллов, применяемых в акустооптических и акустоэлектронных устройствах, может служить также акустооптическое устройство.

В дополнение к широким возможностям по обработке информации акустооптические методы являются эффективным средством различных физических измерений [3, 4], в частности средством исследования свойств материалов. С помощью акустооптики возможны измерения параметров и качественные исследования акусти-

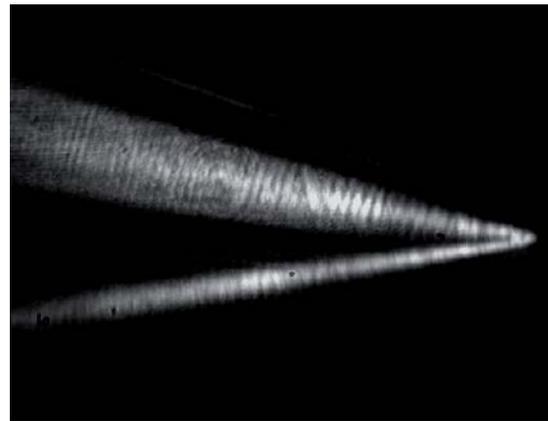
ческих полей (скорости, затухания, структуры акустических мод), оптических полей (например, оптической однородности образцов многокомпонентных кристаллов [5]) и характеристик самой среды взаимодействия — кристаллов. Для среды возможно исследовать анизотропные свойства, дифракционные и нелинейные эффекты, выявлять коллимирующие направления. В данной статье продемонстрировано применение акустооптического метода для исследования структуры акустических полей, акустического затухания и измерения нелинейных параметров кристаллов, используемых в акустооптических и акустоэлектронных устройствах.

Оптическая визуализация структуры акустических полей

Акустооптическое взаимодействие можно использовать для визуализации особенностей распространения и структуры акустических волн в кристаллах. На рис. 1 представлена схема визуализации. В системе с помощью диафрагмы 5 выделяется (фильтруется) оптический дифракционный порядок, затем изображение этого порядка восстанавливается. ССД-камера и компьютерный дисплей регистрируют изображение. Метод



■ **Рис. 1.** Схема визуализации акустических полей: 1 — источник оптического излучения ($\lambda = 0,63 \text{ мкм}$); 2 — коллимирующая система; 3 — акустооптическая ячейка; 4 — оптическая линза; 5 — диафрагма; 6 — линза изображения; 7 — ССД-камера; 8 — генератор акустического сигнала



■ **Рис. 3.** Визуализация продольной и сдвиговой волн одновременно в кристалле GaP

«теневых картин» (Schlieren image) является очень чувствительным, позволяя накапливать оптический сигнал и осуществлять последетекторную обработку. Этот метод можно использовать для наглядной и численной оценки акустического затухания, эффектов дифракционной расходимости (меры энергетической расходимости), условий отражения, преломления и трансформации акустических мод.

Структура акустической сдвиговой волны, распространяющейся в плоскости (001) кристалла двуокиси теллура (TeO_2), показана на рис. 2, причем волновая нормаль здесь была смещена на $1,18^\circ$ относительно направления [110] (вертикальное направление на рис. 5), а угол отклонения направления переноса энергии от волновой нормали достигал $\sim 44^\circ$.

В представленной картине очевидны проявления дифракционной расходимости и затухания этой моды.

Уникальные возможности акустооптического метода визуализации структуры акустических полей особенно важны для анизотропных мате-



■ **Рис. 2.** Структура сдвиговой волны в плоскости (001) кристалла TeO_2

риалов. В качестве иллюстрации на рис. 3 «теневая картина» изображает структуру и особенности распространения двух акустических волн в кристалле фосфида галлия (GaP). И продольная, и сдвиговая волны излучаются одним пьезопреобразователем с волновой нормалью, ориентированной вдоль горизонтальной оси рисунка. Для обеих акустических мод наблюдается отклонение направления переноса энергии от волновой нормали с разными знаками. Кроме того, выделяются различия в энергетической расходимости этих волн, что связано с разной мерой и качеством упругой анизотропии для разных акустических мод.

Измерения затухания акустических волн

Для идеальных пространственно однородных сред коэффициент затухания α определяет пространственную зависимость амплитуды акустической волны в форме

$$s(x) = s_0 \exp(-\alpha x),$$

где s_0 — начальное значение амплитуды, а x — координата, вдоль которой распространяется акустическая волна. Реальные материалы (в том числе упорядоченные среды, кристаллы) обладают пространственными неоднородностями, возникновение которых определяется различными технологическими факторами. Эти неоднородности нарушают периодичность микростроения среды и могут быть вызваны различными примесями, включениями, дислокациями и т. д. Если задать функцию распределения неоднородностей вдоль координаты x (для упрощения рассмотрим одномерный вариант) $N(x)$, то коэффициент затухания $\alpha(x)$ будет связан с этим распределением в простейшей форме

$$\alpha(x) = \alpha_0 + \beta N(x),$$

а пространственное распределение амплитуды акустической волны в логарифмическом масштабе имеет вид

$$\ln \frac{s(x)}{s_0} = -\alpha(x)dx.$$

В акустооптических измерениях уровень оптического сигнала пропорционален мощности акустической волны, поэтому удобнее пользоваться модифицированным коэффициентом затухания $\alpha^*(x)$, определенным в форме

$$\alpha^*(x) = 20 \lg_e \alpha(x),$$

где e — основание натурального логарифма.

В общем случае для реальных сред распределение неоднородностей $N(x)$ является случайной функцией, причем вероятностный закон распределения величины N вследствие центральной предельной теоремы можно считать нормальным:

$$p(N) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[\frac{-(N - N^*)^2}{2\sigma^2} \right],$$

где N^* — среднее значение концентрации неоднородностей среды, а σ — дисперсия концентрации, величина которой связана со средним значением, причем степень связи определяется условиями синтеза материала. В этом случае коэффициент затухания состоит из двух компонент:

$$\alpha(x) = \alpha_0 + \gamma(x),$$

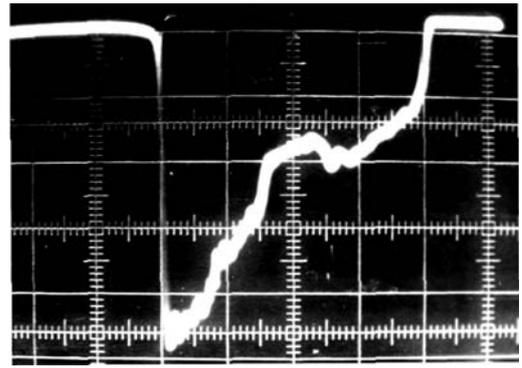
где α_0 — коэффициент затухания идеальной среды, не содержащей неоднородностей, а $\gamma(x)$ — введенная неоднородностями часть затухания. Вероятностный закон распределения логарифмической меры нормированных значений амплитуды акустической волны определяется аналогичным образом, причем модульные значения моментов этого распределения увеличиваются с ростом координаты x . Истинные логарифмические значения моментов являются отрицательными величинами.

В неоднородных средах потенциальная минимальная погрешность измерения затухания ограничена соотношением

$$\Delta = \frac{\beta\sigma}{\beta N^* + \alpha_0}$$

и не может быть уменьшена какими-либо инструментальными методами. Поэтому в реальных средах минимальный уровень затухания, который может быть измерен, всегда ограничен.

Осциллограмма сигнала фотоприемника (рис. 4) иллюстрирует особенности измерения затухания в неоднородных средах. Здесь использовался кристалл GaP с явно выраженной ростовой неоднородностью в центральной части.



■ Рис. 4. Пространственное распределение мощности акустической волны в неоднородном образце

Практически наибольшее влияние на затухание оказывают структурные неоднородности реальных сред и нелинейные эффекты, присущие всем материалам. Наличие микрон неоднородностей материала может привести к заметной деформации пространственных распределений амплитуды акустической волны и существенно усложнить процесс определения коэффициента затухания. Случайный характер распределения неоднородностей в объеме среды ограничивает потенциальную точность определения затухания, а также минимальный уровень коэффициента затухания, который может быть измерен.

Значительное влияние на характеристики затухания оказывает упругая нелинейность материала. В общем случае нелинейность не только увеличивает коэффициент затухания в зависимости от условий измерения, но и меняет форму пространственных распределений амплитуды волны. Степень влияния упругой нелинейности на затухание зависит от уровня мощности акустической волны, поэтому для минимизации влияния нелинейности необходимо проводить измерения при минимально возможной амплитуде.

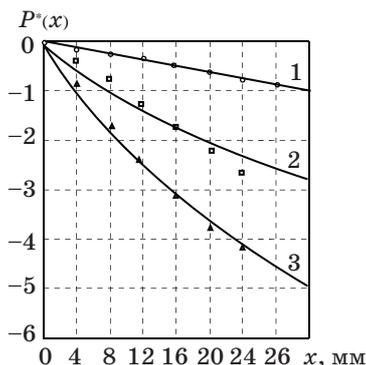
Измерение параметров упругой нелинейности материалов

Явление упругой нелинейности является одним из важнейших физических факторов, ограничивающим и искажающим характеристики и параметры акустооптических устройств. Вследствие нелинейности среды увеличивается коэффициент затухания акустической волны, причем в некоторых материалах это увеличение по экспериментальным данным может быть значительным (в 5–7 раз, например, в кристаллах LiNbO_3 и $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$). Характерно, что величина затухания в реальных кристаллах зависит от уровня плотности акустической мощности, скорости изменения сигнала во времени (частоты сигнала) и нелинейных характеристик материала.

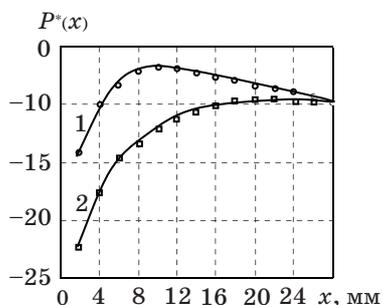
На рис. 5 представлены логарифмические пространственные распределения амплитуды (мощности) основной моды (продольной акустической волны), распространяющейся вдоль направления [001] в кристалле $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ при разных уровнях плотности мощности на грани возбуждения. Здесь наглядно представлено влияние упругой нелинейности, проявление которой тем больше, чем выше плотность мощности акустического сигнала. Если при малой мощности коэффициент затухания составляет 0,32 дБ/см при частоте гармоники $f = 270$ МГц, то при большой мощности коэффициент затухания возрастает почти на порядок.

На рис. 6 представлены совместно с экспериментальными данными расчетные зависимости, иллюстрирующие логарифмические пространственные распределения мощности второй гармоники в кристалле $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$ при разных значениях начальной плотности мощности основной моды на границе возбуждения волны.

Акустооптическим методом экспериментально исследовались характеристики упругой нели-



■ **Рис. 5.** Пространственные распределения мощности основной гармоники $P^*(x) = P_1(x)/P_1(0)$ при разных уровнях мощности $P_1(0)$ на границе возбуждения: $P_1(0) = 10$ мВт/см² (кривая 1); $P_1(0) = 3$ Вт/см² (кривая 2); $P_1(0) = 6$ Вт/см² (кривая 3)



■ **Рис. 6.** Пространственные распределения мощности второй гармоники $P^*(x) = P_2(x)/P_1(0)$ при разных значениях мощности возбуждения: $P_1(0) = 6$ Вт/см² (кривая 1); $P_1(0) = 3$ Вт/см² (кривая 2)

нейности кристаллов LiNbO_3 , TeO_2 , KRS-5, $\text{NaBi}(\text{MoO}_4)_2$, $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, PbMoO_4 и других материалов. В средах с небольшим коэффициентом затухания в номинальных условиях и при последовательной подстройке угла Брэгга оказалось возможным наблюдать ряд высших гармоник вплоть до 15–20 включительно, что в определенных условиях соответствовало частотам гармоник 7–12 ГГц.

Уровень затухания акустической волны в упруго-нелинейной среде зависит от амплитуды волны и в этой зависимости может меняться в несколько раз. Поэтому при оценке естественного затухания необходимо производить измерения при минимально возможной мощности возбуждаемой волны.

В общем случае пространственные распределения волны, измеряемые экспериментально, отклоняются от экспоненциальной зависимости вследствие влияния нелинейных эффектов. Поэтому оценка коэффициента затухания оказывается приблизительной.

Заключение

Показано, что акустооптический метод служит эффективным и наглядным средством как качественных исследований, так и количественных измерений характеристик кристаллов. Наблюдаемые структурные изменения и искажения акустических мод в кристаллах могут иметь значительное влияние на характеристики реализуемых акустооптических и акустоэлектронных устройств. Метод позволяет определять частотный характер затухания при использовании возбуждения пьезопреобразователя на высших гармониках. С помощью акустооптического взаимодействия выявляются характеристики и параметры упругой нелинейности среды взаимодействия — монокристаллов. Наличие упругой нелинейности приводит к искажению гармонической формы акустической волны и, соответственно, к генерации высших гармоник.

Литература

1. **Бальшева О. Л.** и др. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования / О. Л. Бальшева, В. И. Григорьевский, Ю. В. Гуляев, В. Ф. Дмитриев, Г. Д. Мансфельд: монография; под ред. академика РАН Ю. В. Гуляева. — М.: Радиотехника, 2012. — 576 с.
2. **Бальшева О. Л.** Критерии выбора материалов для датчиков на поверхностных акустических волнах // Датчики и системы. 2015. № 2. С. 23–27.

- | | |
|--|---|
| <p>3. Гусев О. Б., Клудзин В. В. Акустооптические измерения. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. — 152 с.</p> <p>4. Sergei V. Kulakov, et al. Acousto-Optics as an Efficient Method for Physical Measurements / Sergei V. Kulakov, Olga L. Balysheva, Arcenii Yu. Zhdanov, Victor V. Kludzin, Oleg V. Shakin // <i>Physics Procedia</i>. 2015. N 70. P. 253–275.</p> | <p>5. Балышева О. Л., Клудзин В. В., Кулаков С. В., Дмитриев В. Ф. Материалы группы лангасита для акустоэлектронной элементной базы современных информационно-коммуникационных систем // <i>Информационно-управляющие системы</i>. 2012. № 6. С. 67–72.</p> |
|--|---|

UDC 534:621.382

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.84

Methods of Acousto-Optics in Studying the Properties of Materials for Acousto-Optic and Acousto-Electronic Devices

Kulakov S. V.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, svk25@mail.ruBalysheva O. L.^a, PhD, Tech., Associate Professor, balysheva@mail.ruKludzin V. V.^a, Dr. Sc., Tech., Professor^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Monocrystals for acousto-optic and acousto-electronic devices should have properties which provide practical application of their acoustic and optical waves for signal processing. To study the properties and measurement of various parameters of monocrystals, various methods are used, many of which require special equipment and additional effort to display the results. **Purpose:** The goal of this paper is to show the efficiency and easy visualization of using the acousto-optic method for studying the structure of acoustic fields, acoustic attenuation and measurement of nonlinear parameters of crystals. **Methods:** The originality of the approach is using acousto-optic interaction both for a complex study of the properties of monocrystals and for the visualization through “Schlierens images”. **Results:** The degree of diffraction was evaluated, and the power flow angle was measured. Simultaneous visualization of longitudinal and shear acoustic modes provided the opportunity to compare their diffraction divergence and to measure the power flow angle for each mode. A picture was obtained for the spatial distribution of the power of acoustic waves in crystals, and the parameters of the elastic nonlinearity were measured. It was shown that the level of elastic damping in nonlinear medium depends on the wave amplitude. **Practical relevance:** The acousto-optic method provides a visual assessment of the quality of the crystals and their suitability for constructing devices. Moreover, the acousto-optic approach allows you to estimate the attenuation of acoustic waves and the intensity of the elastic nonlinearity.

Keywords — Acousto-Optics, Acoustic Wave, Crystal, Schlierens Images, Attenuation, Nonlinearity Parameters.

References

- | | |
|---|---|
| <p>1. Balysheva O. L., Grigorievsky V. I., Gulyaev Yu. V., Dmitriev V. F., Mansfeld G. D. <i>Akustoelektronnye ustroystva obrabotki i generatsyi signalov. Prinsipy raboty, rasceta i proektirovaniia</i> [Acoustoelectronic Devices for Signal Processing and Generation. Principles of Operation Modeling and Development]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012. 576 p. (In Russian).</p> <p>2. Balysheva O. L. Criteria of a Choice of Materials for Sensors on Surface Acoustic Waves. <i>Datchiki i sistemy</i>, 2015, no. 2(189), pp. 23–27 (In Russian).</p> <p>3. Gusev O. B., Kludzin V. V. <i>Akusroopticheskie izmereniia</i> [Acousto-Optic Measurements]. Leningrad, LGU Publ., 1987. 152 p. (In Russian).</p> | <p>4. Sergei V. Kulakov, Olga L. Balysheva, Arcenii Yu. Zhdanov, Victor V. Kludzin, Oleg V. Shakin. Acousto-Optics as an Efficient Method for Physical Measurements. <i>Physics Procedia</i>, 2015, no. 70, pp. 253–275.</p> <p>5. Balysheva O. L., Kludzin V. V., Kulakov S. V., Dmitriev V. F. Langasite Group Materials for Acoustic-Electronic Elemental Base in Modern Information and Communication Systems. <i>Informatsionno-upravliaiushchie sistemy</i> [Information and Control Systems], 2012, no. 6(61), pp. 67–72 (In Russian).</p> |
|---|---|