

АКУСТООПТИКА

УДК 535.241.13:534

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АКУСТООПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОБЪЕМНЫХ ВОЛНАХ

А. И. Колесников

Тверской государственной университет
кафедра прикладной физики

Проанализированы основные требования, предъявляемые к совокупности физических и химических свойств материалов, эффективных для применения в качестве светозвукопроводов устройств на объемных ультразвуковых волнах. Указаны критерии, согласно которым следует осуществлять поиск новых материалов для акустооптики. Приведены данные о свойствах акустооптических материалов, наиболее часто используемых в настоящее время. Рассмотрены структурные и оптические дефекты в кристаллах, снижающие характеристики акустооптических устройств и требующие совершенствования ростовых технологий.

Ключевые слова: *акустооптика, светозвукопровод, акустооптические материалы, оптические дефекты*

Введение. В настоящее время для большинства практических задач в принципе решаемых с помощью акустооптики, применяется классическая дифракция света на объемных ультразвуковых волнах, излучаемых пьезоперобразователями в присоединенный к нему светозвукопровод (СЗП). В отличие от устройств на поверхностных акустооптических волнах (ПАВ), в которых звук распространяется внутри узкого приповерхностного канала, в устройствах на объемных волнах используются относительно мощные и широкие световые потоки, для эффективной дифракции которых необходима большая глубина взаимодействия. При этом объем СЗП, в котором осуществляется фотон-фононное взаимодействие, в зависимости от типа устройства, может составлять от 0,5 см³ у модуляторов до 10–15 см³ у электронно-перестраиваемых фильтров изображений или у адаптивных дисперсионных линий задержки для сжатия и корреляции импульсов фемтосекундных лазеров.

Основными материалами для СЗП устройств на объемных волнах являются монокристаллы, причем их номенклатура на сегодняшний день не слишком обширна. Поэтому, с одной стороны, ведется поиск новых кристаллов, обладающих, помимо большого коэффициента акустооптической добротности M_2 , целым набором других необходимых

физических и химических свойств. С другой стороны, при развитии ростовых технологий и уменьшением концентраций дефектов, возможно улучшение и приближение к максимально высоким (близким к теоретическим) значениям характеристик у известных кристаллов.

Настоящая работа содержит анализ критериев, которым должны удовлетворять акустооптические материалы, а также обзор данных о свойствах наиболее эффективно применяемых в акустооптике кристаллов, в том числе об их типичных структурных и оптических дефектах.

Основные требования к акустооптическим материалам. Из теории следует, что акустооптический эффект должен проявляться в любых прозрачных для светового излучения конденсированных средах – твердых телах и жидкостях. Это действительно так, однако на практике в качестве материалов светозвукопроводов используется не более нескольких десятков веществ. Во-первых, почти не применяются (кроме демонстрационных опытов) жидкости. Причины этого заключаются в следующем. В жидкостях относительно малы скорости распространения звуковых волн (1000 – 1500 м/с), но очень велико затухание звука (более 600 дБ/см ГГц²). Минимальные значения затухания наблюдаются у таких жидкостей, как ксилол и вода. Далее, жидкость должна находиться в прозрачной кювете, на стенках которой неизбежны отражение и преломление света. В условиях температурных полей с ненулевыми градиентами в жидкостях возникает конвекция, приводящая к искажению характера дифракции. Возникают проблемы с перемешиванием жидкости и в случаях, когда акустооптическое устройство должно само находиться на движущемся объекте. Понятны также ограничения, связанные с узостью температурного диапазона жидкого агрегатного состояния, с большими значениями коэффициентов объемного расширения, с испарением жидкостей. Таким образом, целый ряд физических свойств и связанных с ними конструкционных проблем практически исключает жидкости из сферы применения в акустооптике.

Среди твердых тел в основном используются стекла и монокристаллы.

Стекла обладают низкими значениями акустооптического качества M_2 , но относительно дешевы, технологичны, освоены производством и обладают высокой прозрачностью, т.е. малыми потерями света на отражение, поглощение и рассеяние. В стеклах невозможно анизотропное акустооптическое взаимодействие.

В монокристаллах, напротив, как правило, относительно высоки значения M_2 , но в них выше световые потери и низка воспроизводимость свойств. В большинстве случаев акустооптические

кристаллы не встречаются в природе в виде, пригодном для изготовления светозвукопроводов. Поэтому их выращивают искусственными методами: Чохральского, Киропулоса, Бриджмена, Стокбаргера, методом зоны, методом гидротермального синтеза, из растворов, из раствора в расплаве и т.д. Процессы роста сопряжены со значительными трудностями технологического порядка. Они занимают большое время, зачастую – более ста часов, а иногда – до месяца, в них используются дорогостоящие сверхчистые исходные компоненты и реактивы, что приводит к высокой стоимости монокристаллов. Однако в ряде акустооптических устройств, например в фильтрах, использование оптически анизотропных монокристаллов принципиально необходимо. В дефлекторах преимущества монокристаллов с высокими значениями коэффициента M_2 по сравнению со стеклами также достаточно ощутимы.

Из физических свойств стекол и монокристаллов для акустооптики в первую очередь важны следующие.

Показатель преломления n . При прочих равных условиях желательны большие значения показателя преломления. В видимом диапазоне у стекол его значения составляют 1,5 – 1,8; у монокристаллов – до 2,5 (у парателлурита). В инфракрасном диапазоне он может достигать значительно больших значений, как, например, у германия (Ge) – 4,0. В устройствах, использующих анизотропную дифракцию, необходимо применение оптически одноосных и двуосных кристаллов.

Диапазон прозрачности. Акустооптический материал должен быть в максимальной степени прозрачным в области используемых оптических частот. В устройствах, в которых применяется монохроматическое излучение, важна прозрачность для длины волны лазерного излучения. В перестраиваемых фильтрах необходима прозрачность уже в значительном диапазоне длин волн света, поэтому у материала не должно быть в рабочем диапазоне заметных полос поглощения. Это означает, что материал должен быть визуально неокрашенным (бесцветным). Парателлурит (α -TeO₂), например, используется практически во всем диапазоне прозрачности 0,35 – 5 мкм.

Монокристаллы, как правило, интенсивно поглощают излучение УФ-диапазона, поэтому для данной области длин волн могут быть использованы только плавный кварц SiO₂ (коротковолновая граница пропускания – 0,2 мкм), кристаллический кварц (0,12 мкм), сапфир Al₂O₃ (0,15 мкм), однако все эти материалы, к сожалению, имеют низкие значения коэффициента M_2 . Диапазон прозрачности обусловлен соотношениями между коэффициентами пропускания, отражения и поглощения света монокристаллами.

Пропускание, поглощение, отражение. Коэффициентом пропускания τ называется отношение интенсивности светового потока, прошедшего через материал I , к интенсивности падающего потока I_0 , $\tau = I / I_0$. Падающий поток должен быть монохроматическим, параллельным и направленным перпендикулярно к плоскопараллельной пластинке исследуемого материала.

Оптическая плотность $D = \ln(I_0 / I)$. Оптическая плотность для слоя материала единичной толщины называется коэффициентом поглощения A , см^{-1} . Оптическая плотность и коэффициент поглощения зависят от длины волны и температуры.

Коэффициенты экстинкции (ослабления) света. В работах [1; 2] показано, что во многих кристаллах, и в том числе в таких акустооптических кристаллах, как германий и парателлурит, основные световые потери могут быть связаны не с поглощением, а с рассеянием на различных структурных неоднородностях. И хотя закон экспоненциального ослабления света Бугера-Ламберта именно из-за рассеяния выполняется не вполне точно, для практических расчётов можно использовать суммарный коэффициент экстинкции $\alpha_s = \alpha_n + \alpha_r$, где α_n и α_r – коэффициенты поглощения и рассеяния света соответственно:

$$I = I_0 \exp(-\alpha_s l) \quad (1)$$

где l – толщина оптического материала вдоль луча.

Коэффициентом отражения называется отношение интенсивности отраженного излучения к интенсивности падающего потока $R = I_{\text{отр}} / I_0$. Отражение зависит от длины волны $R = R(\lambda)$. При

нормальном падении лучей $R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$, где $n = n(\lambda)$ – показатель преломления.

Для уменьшения световых потерь, связанных с отражением, широко применяются технологии просветления оптических поверхностей светозвукопроводов с помощью нанесения тонких слоёв подходящих по физическим свойствам материалов.

Оптическая активность. В кристаллах, у которых в точечной группе симметрии отсутствует центр инверсии, наблюдается вращение плоскости поляризации линейно поляризованного света, проходящего вдоль оптической оси, а также поворот осей эллипсов для эллиптически поляризованного света, идущего в других направлениях. Данные об оптической активности кристаллов (гиротропии) необходимы при расчётах угловых и частотных характеристик акустооптических

устройств, поскольку дифракция света на ультразвуковых волнах определяется в том числе и состоянием поляризации падающего на область взаимодействия луча [3]. Значение компонента псевдотензора гирации, $G_{33} = \rho\lambda/\pi N_0^3$, где ρ – удельное вращение, а также сами значения ρ у акустооптических материалов, обладающих оптической активностью, различаются на 1-2 порядка. Так, очень высоким удельным вращением в видимом и ближнем УФ диапазонах отличаются кристаллы парателлуриата ($\rho = 186$ град/мм для длины волны $\lambda = 488$ нм; $\rho = 800$ град/мм для длины волны $\lambda = 355$ нм). Для сравнения у кристаллов кварца, также обладающих заметной оптической активностью, величина удельного вращения ρ для длины волны $\lambda = 486,1$ нм существенно ниже и составляет 32,7 град/мм [4].

Твердость. Полированные поверхности мягких материалов легко царапаются всегда имеющимися в воздухе микрочастицами песка (SiO_2). Кроме того, большей твердости материала обычно соответствует и большая его прочность. Поэтому высокая твердость является желательной для акустооптического материала. Твердость часто указывается по условной шкале Мооса, в которой 10 стандартных минералов расположены в ряд по степени возрастания твердости. Если испытываемый кристалл можно поцарапать минералом с твердостью H_{n+1} , а сам он царапает минерал с твердостью H_n , значит его твердость H по шкале Мооса имеет значение $H_n < H < H_{n+1}$. Качественно рост твердости по шкале Мооса отвечает росту числовых значений твердости или микротвердости, измеренных на испытательных машинах. Твердость по шкале Кнупа характеризуется в кгс/мм². Соотношение твердости по Кнупу с твердостью по Моосу дано в таблице 1. Микротвердость H_μ характеризуется в отечественных работах по измерению на приборе ПМТ-3, в котором индентор – алмазная четырехгранная пирамидка – вдавливается в испытываемую грань под действием контролируемой нагрузки.

К сравнительно мягким материалам, часто применяемым в акустооптике, относятся кристаллы молибдата свинца (твёрдость по Моосу – 2,75 – 3) и парателлурит (твёрдость по Моосу – 5).

Основной материал для пьезопреобразователей акустооптических устройств – кристаллы ниобата лития – имеют твёрдость 5 – 5,5 по Моосу.

К твёрдым акустооптическим материалам относятся кристаллы германия (твёрдость по Моосу – 6,25), кристаллы кремния и кварца (твёрдость по Моосу – 7).

Т а б л и ц а 1. Шкала твердости по Моосу и ее соотношение с твердостью по шкале Кнупа

Твердость по Моосу	Стандартный минерал	Возможная замена	Твердость по Кнупу, кгс/мм ²
1	Тальк	Карандаш №1	-
2	Гипс	Мягкая алюминиевая проволока	32
3	Кальцит	Медная монета	165
4	Флюорит	Железная проволока	263
5	Апатит	Стекло	430
6	Ортоклаз	Лезвие перочинного ножа	560
7	Кварц	Напильник	820
8	Топаз		1340
9	Корунд		2100
10	Алмаз		7000

Скорости упругих волн. В кристаллах в произвольном направлении, заданном волновой нормалью $\bar{N}_{зв}$, могут распространяться три волны с различными фазовыми скоростями:

$$V_{\phi} = \sqrt{C/\rho}, \quad (2)$$

где C – эффективная константа упругой жесткости (дин/см² или н/м²), ρ – плотность материала. В общем случае распространяются две квазипоперечные $V_s^{\bar{b}}$, V_s^M и одна квазипродольная V_L волны, где $V_s^{\bar{b}}$ – скорость быстрой поперечной, V_s^M – скорость медленной поперечной волны. В справочной литературе [4] направления вектора нормали \bar{N} или вектора смещения \bar{U} определяются кристаллографическими индексами. Например $V_{L[110]}$ – скорость продольной волны, для которой $\bar{N} \parallel \bar{U} \parallel [110]$, $V_{[110][001]}$ – скорость сдвиговой (поперечной) волны, для которой $\bar{N} \parallel [110]$, $\bar{V} \parallel [001]$.

Особенный интерес для акустооптики представляют материалы с низкими значениями скоростей упругих волн. В то время, как типичный диапазон скоростей звука в твердых телах заключен в пределах 2 – 10 км/с, имеются материалы с чрезвычайно низкими скоростями

звука, например, парателлурит, в котором поперечная мода по оси [110] распространяется со скоростью всего лишь 616 м/с, что сопоставимо уже со скоростями звука в газах (при условии, близких к нормальным).

Затухание упругих волн является очень важным обстоятельством, ограничивающим апертуры акустооптических устройств. Большое затухание ультразвука является нежелательным. Коэффициент затухания B характеризует потери акустической энергии, обусловленные дислокационным трением или взаимодействием с электронами проводимости и фонон-фононными взаимодействиями, а также с рассеянием акустической энергии на дефектах кристаллической решетки. Величина коэффициента затухания определяется формулами:

$$B = \frac{1}{l_2 - l_1} 20 \lg \left[\frac{P(l_1)}{P(l_2)} \right] \text{ дБ/см}, \quad (3)$$

$$B = \frac{1}{l_2 - l_1} \ln \left[\frac{P(l_1)}{P(l_2)} \right] \text{ Нп/см}, \quad (4)$$

$$B = \frac{1}{(l_2 - l_1) f^2} 20 \lg \left[\frac{P(l_1)}{P(l_2)} \right] \text{ дБ/смГГц}^2, \quad (5)$$

где l_1 и l_2 – координаты точек вдоль направления распространения звуковой волны, в которых измеряются акустические мощности $P(l_1)$ и $P(l_2)$; f – частота ультразвука (1 Нп = 1 непер = 0,5 ln e = 0,8686 бел (Б), 1 Б = $\lg(P_2/P_1)$ при $P_2=10 P_1$, 1 дБ = 0,1 Б).

Растворимость. Здесь подразумевается растворимость вещества светозвукопровода в воде. В литературе она выражается в граммах вещества на 100 г воды. Растворимость материала является крайне неудобным и нежелательным свойством, т.к. подразумевает целый ряд мер, препятствующих контакту светозвукопровода с влагой, всегда присутствующей в окружающем устройстве воздухе. К сожалению, такие эффективные акустооптические материалы, как КДР (KN_2PO_4), АДР ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), БФК ($\text{KNC}_8\text{H}_4\text{O}_4$), довольно сильно растворяются в воде, их растворимость достигает $\sim 10 - 40$ г/100 г H_2O . Такие же кристаллы, как α - TeO_2 , Al_2O_3 (сапфир), LiNbO_3 , в воде практически нерастворимы.

Все перечисленные свойства, определяющие применимость кристаллов в акустооптике, жестко связаны между собой и обусловлены химическим составом и структурой материала. При этом к акустооптической среде предъявляются требования, с точки зрения физики зачастую противоречащие друг другу.

Рассмотрим формулу $M_2 = n^6 p^2 / \rho V_{зв}^3$ для коэффициента акустооптического качества. Именно эта величина определяет эффективность дифракции. Естественным является стремление к большим значениям фотоупругих констант p и малым значениям скоростей упругих волн $V_{зв}$. Однако одновременное удовлетворение этих требований означает не что иное, как «рыхлость» структуры материала. А это неизбежно ведет к большим значениям затухания ультразвука, к низкой теплопроводности и к «мягкости» материала.

В качестве второго примера можно упомянуть поиски эффективного акустооптического материала для ИК диапазона 8 – 12 мкм. Веществами, пропускающими свет в указанном диапазоне, являются полупроводники – германий, теллур, кремний, арсенид галлия, фосфид индия и т.д. Наилучший материал – германий – имеет сравнительно небольшой показатель преломления ($n = 4$), но при этом обладает и крайне малым поглощением света ($A \sim 0,02 \text{ см}^{-1}$). Низкие значения обеих этих величин связаны с небольшой концентрацией свободных носителей заряда (10^{12} см^{-3}). Попытки использования полупроводников с большими показателями преломления ($n = 8 - 10$), а значит, и с высокой концентрацией носителей ($\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$), неизбежно наталкиваются на резкое увеличение у таких материалов (теллур, теллурид висмута) коэффициентов поглощения ($A \sim 1-10^3 \text{ см}^{-1}$), что фактически говорит о почти полной непрозрачности среды.

Таким образом, выбор акустооптического материала определяется целым комплексом физических свойств, а также стоимостью, технологичностью и освоенностью производством тех или иных материалов.

Тем не менее, используя характеристики АО качества, можно сформулировать некоторые общие требования, выполнение которых дает возможность рассматривать кристалл в качестве среды для акустооптики [5]. Величины M_2 относительно слабо зависят от констант фотоупругости p , так как эти константы слабо изменяются в пределах материалов, принадлежащих к одному типу, и даже для различных типов материалов отличаются не более чем в два раза. Согласно данным, приведенным в [6], максимальные значения констант фотоупругости для различных типов кристаллов составляют:

$$P_{\max} = \begin{cases} 0,21 & \text{для нерастворимых в воде оксидов;} \\ 0,35 & \text{для растворимых в воде оксидов;} \\ 0,20 & \text{для щелочно - галоидных кристаллов.} \end{cases}$$

Плотность ρ у различных кристаллов может отличаться довольно сильно. Среди хорошо известных диэлектрических кристаллов это отличие может составлять от $\rho = 2,65$ (SiO_2) до $\rho = 9,22$ ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$). Поэтому, несмотря на то, что M_2 слабо (обратно пропорционально) зависит от ρ , влияние плотности на M_2 для различных кристаллов может быть близким влиянию показателя преломления.

Согласно формуле для коэффициента акустооптического качества высокие значения M_2 должны иметь кристаллы с высоким показателем преломления. Реально среди диэлектрических кристаллов можно искать среды с показателем преломления от 1,6 до 2,6 для видимого диапазона. Учитывая сильную зависимость M_2 от показателя преломления n , можно надеяться повысить M_2 в 2 – 3 раза за счет выбора кристаллов с высоким значением показателя преломления.

Скорость распространения оптических волн $C_{зв}$ для различных кристаллов может отличаться в несколько раз, поэтому влияние $C_{зв}$ на различие M_2 для различных кристаллов во многих случаях является определяющим. Низкая скорость звука особенно выгодна для устройств отклонения светового луча, т. к. позволяет получать большие углы отклонения и обеспечивает высокую разрешающую способность. Однако низкие скорости звука препятствуют получению больших скоростей отклонения, что ограничивает частоты, на которых может работать АО дефлектор. Кроме того, существует корреляция между скоростью звука и его затуханием: в материалах с низкими скоростями звука обычно велико затухание, что требует увеличения акустической мощности и, следовательно, компенсирует преимущества, получаемые от увеличения M_2 . Какой-либо корреляции между скоростью звука и показателем преломления материала на установлено.

Существует определённая связь между параметрами, входящими в M_2 , и такими фундаментальными свойствами вещества, как молекулярная масса, химическая формула, температура плавления и др. Используя такие зависимости, можно искать кристаллы для АО применений, основываясь на свойствах как хорошо известных, так и мало исследованных кристаллов. Соответствующие рекомендации изложены Пинноу [7] и рассмотрены в обзоре [8].

Так, величину показателя преломления можно оценить с помощью уравнения Гладстона

$$(n-1)/\rho = \sum q_i R_i, \quad (6)$$

где q_i – весовые доли компонентов кристалла; R_i – парциальные доли компонентов в преломлении. Величины R_i установлены для большого числа кристаллов оксидов и галоидов.

Для оценки скорости звука можно использовать эмпирическую связь скорости звука с температурой плавления и средней молекулярной массой соединения M [7].

$$C_{зв}^2 = cT_{пл}/\mu, \quad (7)$$

где $c = 8 \cdot 10^3$ (см·г)/(с·кал).

Наряду с M_2 и $C_{зв}$ величиной, прямо определяющей рабочие характеристики АО устройств, является затухание звука в кристалле. Для области частот $\Omega\tau \ll 1$ (τ – время релаксации фононов) коэффициент затухания акустических волн γ хорошо определяется [6] выражением

$$\gamma = 0,68G^2\Omega^2kT/\rho C_{зв}^2, \quad (8)$$

где G – коэффициент Грюнайзена; k – константа Больцмана, T – температура; величина γ измеряется в Дб/см.

Как следует из (8), в материалах с низкими скоростями звука затухание должно быть большим, и экспериментальные данные хорошо подтверждают это положение. В результате возникает неблагоприятная корреляция между M_2 и γ : кристаллы с большим M_2 обычно характеризуются большим затуханием, что снижает преимущество кристаллов, обладающих большим M_2 .

Все же характер корреляции между M_2 и затуханием таков, что M_2 возрастает быстрее, чем затухание звука и, следовательно, произведение M_2P_a (P_a – мощность ультразвука) с ростом M_2 должно возрастать. Это позволяет считать, что в большинстве случаев преимущества в большой величине M_2 делают кристалл перспективным для акустооптического применения.

Наиболее распространенными в настоящее время являются: в УФ – диапазоне – плавный и кристаллический кварц (SiO_2); в видимом и ближнем ИК диапазонах – плавный и кристаллический кварц (SiO_2), стекла (тяжелые финты), молибдат свинца (PbMoO_4), парателлуриит ($\alpha\text{-TeO}_2$), молибдат кальция (CaMoO_4), альфа-иодноватая кислота ($\alpha\text{-HfO}_3$), ниобат лития (LiNbO_3), каломель (Hg_2Cl_2); в среднем ИК диапазоне – германий (Ge).

В качестве пьезопреобразователей – используется в основном ниобат лития, реже – ЦТСЛ-керамика.

Параметры этих, а также близких к ним по свойствам материалов, возможно, представляющих в перспективе определенный интерес, приведены в табл. 2, основанной на данных работ [4, 5].

Т а б л и ц а 2. Физические параметры акустооптических материалов

№ п/п	Название, химическая формула	Диапазон прозрачности, мкм	Показатель преломления для длины волны, мкм	Скорости звука, км/сек	Коэф-т акустооптического качества M_2 , $(c^{3/2}) \cdot 10^{-18}$	Затухание ультразвука (дБ/(ГГц ² ·см))	Плотность г/см ³
1	Стекло (тяжелый флинт ТФ-7)	0,4 – 2,6	1,728 ($\lambda = 0,63$)	3,63	4,99	300	4,59
2	Плавленый кварц (SiO ₂)	0,2 – 4,5	1,457 ($\lambda = 0,63$)	5,96 для L 3,76 для S	1,56 для L 0,48 для S	12 для L 19 для S	2,20
3	Монокристаллический кварц (SiO ₂)	0,15 – 4,5	$n_0 = 1,544$ $n_e = 1,553$ ($\lambda = 0,589$)	5,75 для X _L 6,01 для Y _S 4,69 для Z _{S z}	1,48 для $\bar{N}_{зв}[001]$ $\bar{U}_{зв}[001]$ $\bar{E}[001]$ 2,3 для $\bar{N}_{зв}[001]$ $\bar{U}_{зв}[100]$ $\bar{E}[001]$ 3,0 для L[100]	4,2 по оси X 3,25 по оси Z	2,65
4	Молибдат свинца РbМоО ₄	0,4 – 5,5	$n_0 = 2,262$ $n_e = 2,386$ ($\lambda = 0,63$)	3,63 – 4,34	5 для $\bar{N}_{зв}[100]$ $\bar{U}_{зв}[100]$ $\bar{E}[001]$ $\bar{n}_{св}[010]$ ($\lambda = 0,63$) 37,4 для $\bar{N}_{зв}[001]$ $\bar{U}_{зв}[001]$ $\bar{E}[100]$ $\bar{n}_{св}[010]$ $\lambda = 0,488$	1,0 для V _{zz} f = 500МГц	6,95
5	Парателлурит (α -TeO ₂)	0,35 – 5,0	$n_0 = 2,259$ $n_e = 2,412$ ($\lambda = 0,63$)	0,616 для V _L [1 $\bar{1}$ 0]; 2,08 для V _S [001]	10,6 для $\bar{N}_{зв}[100]$, $\bar{N}_{св}[010]$, $\bar{E}[100]$	290 для [110], 15 для	6,0

					793 для $N_{зв}[110]$ $\bar{U}_{зв}[\bar{1}\bar{1}0]$ $\bar{N}_{св}[001]$ E круговая	[001],	
6	Альфа-иодноватая кислота ($\alpha\text{-HIO}_3$)	0,3 – 1,8	1,986 ($\lambda = 0,63$)	2,44 для L[001]	89,65	10	5,0
7	Сапфир (Al_2O_3)	0,15 – 6,5	1,766 ($\lambda = 0,63$)	11 для L[001]	0,35	0,2	4,0
8	Ниобат лития (LiNbO_3)	0,4 – 4,5	2,20 ($\lambda = 0,63$)	6,57 для L[001] 1,87 для S[001]	7,33 для L[001] 3,05 для S[001]	0,15 для L[001] 2,6 для S[001]	4,64
9	Каломель (Hg_2Cl_2)	0,38 – 28	$n_o = 1,973$ $n_e = 2,656$	1,622 для $V_{[100][100]}$ 3,343 для $V_{[001][010]}$	506 для $\bar{N}_{зв}[100]$ $\bar{U}_{зв}[100]$ $\bar{E}[100]$ 185 для $\bar{N}_{зв}[110]$ $\bar{U}_{зв}[110]$ $\bar{E}[110]$	2 для $f = 400 \text{ МГц}$	6,97 для $t = 20^0$
10	Дигидрофосфат калия KH_2PO_4	0,25 – 1,17	$n_o = 1,51$ ($\lambda = 0,5$) $n_e = 1,47$ ($\lambda = 0,5$)	5,5 для $V_{L[100]}$	1,91 для $\bar{N}_{зв}[100]$ $\bar{U}_{зв}[100]$ $\bar{E}[100]$	0,11 для L[100]	2,34
11	Фосфид галлия GaP	0,6 – 10	3,31 ($\lambda = 0,63$)	6,32 для $V_L[110]$, 4,13 для $V_S[100]$	44,46 для $V_L[110]$, 23,56 для $V_S[100]$	6	4,18
12	Арсенид галлия (GaAs)	1 – 15	3,34 для $\lambda = 8,0$, 2,41 для $\lambda = 21,9$	1,90 для $V_L[\bar{1}00]$ 1,84 для $V_L[\bar{1}10]$	104 для	30 для $V_L[110]$	5,32

				1,08 для $V_S[111]$	$\bar{N}_{зв}[11\bar{0}]$ $\bar{U}_{зв}[110]$ $\bar{E}[110]$ 46,3 для $\bar{N}_{зв}[100]$ $\bar{U}_{зв}[010]$ $\bar{E}_{произв}$		
13	Германий Ge	2 – 20	4,06 для $\lambda = 2,55$; 4,006 для $\lambda = 12,36$	5,41 для $V_L[110]$ 3,55 для $V_S[100]$ 5,50 для $V_L[111]$	840 для $\bar{N}_{зв}[111]$ $\bar{U}_{зв}[111]$ $\bar{E}[111]$ 290 для $\bar{N}_{зв}[100]$ $\bar{U}_{зв}[010]$ $\bar{E}_{произв.}$	30 для $V_L[111]$, 9,0 для $V_S[100]$	5,33
14	Кремний Si	1,5 – 10	3,48 для $\lambda = 1,60$	9,85 для $V_L[111]$ 8,43 для $V_L[100]$	6,2 для $\bar{N}_{зв}[111]$; 2,4 для $\bar{N}_{зв}[100]$		2,33
15	Теллур Te	5 – 20	$n_0=4,8$ $n_e=6,25$ ($\lambda=10,6$ мкм)	2,3 для $V_{L[001]}$	4400 при $E \parallel [0001]$ для $\lambda=10,6$ мкм)	13,7 для $V_{L[001]}$	6,25

Дефекты в акустооптических кристаллах. Оптические и акустические свойства идеальных и реальных кристаллов могут сильно различаться из-за присутствия в последних нульмерных, одномерных, двумерных и трехмерных (объемных) дефектов.

К нульмерным дефектам относятся атомы посторонних примесей (внедрения, замещения), вакансии, а также комбинации точечных дефектов (Френкеля, Шоттки, краудионы и т. д.). Несмотря на то, что нульмерные дефекты искажают решетку в пределах от нескольких ангстрем до нескольких десятков ангстрем, их суммарное действие может быть значительным. Нульмерные дефекты отрицательно сказываются на следующих свойствах кристаллов.

В локальных областях возникают большие механические напряжения (десятки-сотни кгс/мм²), что, вследствие эффекта фотоупругости, вызывает изменение показателя преломления. Это ведет к деполяризации, преломлению света, повышенному рассеянию, поглощению света и ультразвука в кристалле. Особенно чувствительными к посторонним примесям являются свойства полупроводниковых кристаллов. Повышение концентрации некоторых элементов в германии всего на порядок может вызвать резкое увеличение коэффициента поглощения и практически сделать кристалл непрозрачным [9]. Поэтому допустимые концентрации посторонних примесей в кристаллах диэлектриков – 10^{-6} – 10^{-7} , а в полупроводниках – 10^{-16} – 10^{-17} . Это требует использования при росте акустооптических кристаллов диэлектриков особо чистых исходных веществ и реактивов – марок ОСЧ, а для полупроводников – многократно зонно-очищенного сырья.

Одномерные дефекты в кристаллах – дислокации – при их плотности $N_d > 10^3$ – 10^4 см⁻² приводят к затуханию ультразвука. В работе [10] показано, что величина коэффициента затухания ультразвука в парателлурите может изменяться от 5 дБ/см в объемах с плотностью дислокаций 10^2 см⁻² и до 15 дБ/см в объемах с плотностью дислокаций 10^6 см⁻². Возможные технологические меры, ведущие к снижению плотности дислокаций в выращиваемых кристаллах, – это, как и для нульмерных дефектов, – использование особо чистого сырья, а также снижение температурных градиентов в зоне роста, применение минимально возможных скоростей роста. Некоторое снижение плотности дислокаций (на 30–40 %) может быть достигнуто в результате длительного (до 100 часов) послеростового отжига готового кристалла в безградиентной камере при температуре 0,8 – 0,9 T_{пл.}. Положительный эффект объясняется перегруппировкой (переползанием) дислокаций и их частичной взаимной аннигиляцией. В [11] утверждается, что примерная граница допустимой плотности дислокаций для диэлектрических кристаллов высокого оптического качества $\sim 5 \times 10^3$ – 5×10^4 см⁻².

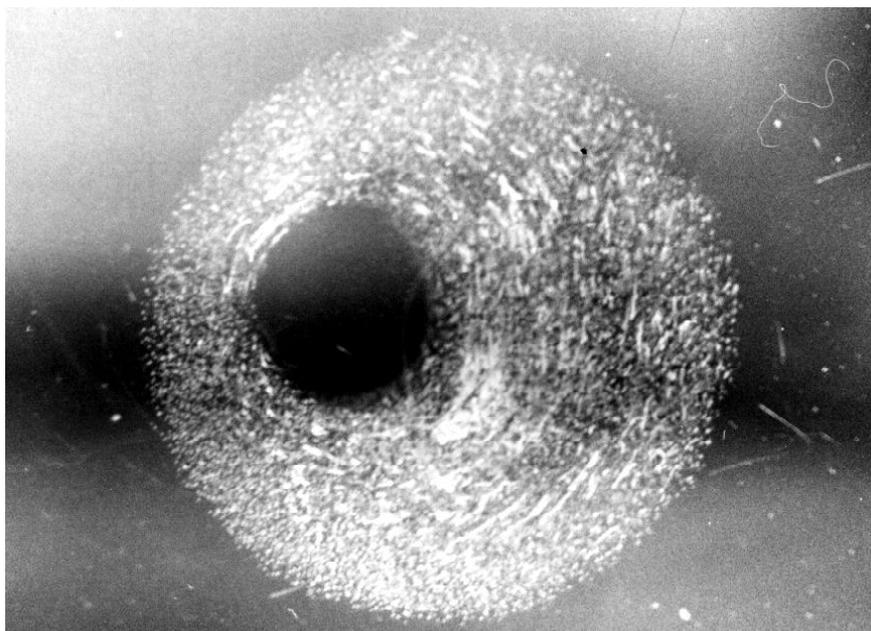
Известные в кристаллах двумерные дефекты – границы блоков, малоугловые границы – наблюдаются в большинстве полупроводниковых кристаллов, например в германии [12].

На границах двойников и блоков происходит преломление и рассеяние световых и звуковых волн, что ухудшает все характеристики акустооптических устройств.

К крайне нежелательным трехмерным дефектам относятся макроскопические включения посторонних примесей и пузырьки (поры, или отрицательные кристаллы).

Крупные включения посторонних примесей связаны с большими отклонениями химического состава исходного сырья для получения кристаллов от стехиометрического состава. К образованию пузырьков приводит вынужденное выращивание некоторых кристаллов в газовой атмосфере при давлении $\sim 10^{-2} - 10^2$ атм. (в воздухе и инертных газах). Газы растворяются в расплаве (растворе) и затем выделяются на фронте кристаллизации. Пузырьки имеют размеры от нескольких мкм до 1 – 2 мм в диаметре и могут иметь отходящие от них газонаполненные каналы.

Пузырьки приводят к сильным искажениям световых и звуковых волновых фронтов, вызывают повышенное рассеяние и поглощение света и звука. Возможные способы устранения пузырьков – интенсивное перемешивание ростовой среды (раствора или расплава), использование «эффекта грани». Последний заключается в оттеснении пузырьков гладкой гранью с малыми индексами, совпадающей с фронтом кристаллизации. Такими гранями, например, для германия (особыми сингулярными гранями) являются грани $\{111\}$, для парателлурита – грани $\{110\}$ [12; 13]. На рис. 1 показан срез монокристалла парателлурита в диаметральной плоскости. Отсутствие спиралевидных газовых включений в центральной приосевой области объясняется оттеснением пузырьков плоской гранью (110).



Р и с . 1. Проявление эффекта грани (110) в распределении газовых включений по кристаллу парателлурита

Суммарное действие дефектов всех размерностей может проявляться в искажении оптической индикатрисы кристалла. Наглядный пример такого действия – возникновение аномальной оптической двуосности у оптически одноосных кристаллов. Величина этой «наведенной» двуосности (т. е. угла $2V$, который у одноосных кристаллов равен нулю) связана с напряжениями σ , обусловленными дефектами структуры, и определяется следующей формулой [14]:

$$\operatorname{tg}V = \frac{\sqrt{[(\pi_{1\mu} - \pi_{2\mu})\sigma_{\mu}]^2 + (2\pi_{6\mu}\sigma_{\mu})^2}}{\sqrt{N_0^{-2} - N_e^{-2}}}, \quad (9)$$

где π_{ij} – соответствующие пьезооптические коэффициенты.

Визуально двуосность проявляется в искажении характера изохром и изогир в коноскопической картине кристаллов. Изохромы вместо окружностей могут превращаться в эллипсы, овалы Кассини и лемнискаты.

Считается, что аномальная двуосность кристаллов не должна превышать 25 – 30 угловых минут.

Непосредственно для акустооптики важны не столько сами структурные дефекты, сколько их совокупное действие, искажающее те или иные свойства. В связи с этим используются еще некоторые характеристики оптического качества материалов.

Оптический поляризационный контраст. Дефекты приводят к частичной деполаризации поляризованного света, проходящего через акустооптический кристалл. Для количественной характеристики данного эффекта используется называемое оптическим контрастом отношение I_{\max}/I_{\min} , где I_{\max} и I_{\min} – интенсивности света, прошедшего через кристалл при параллельном и скрещенном положениях поляроидов (николей), между которыми помещается исследуемый образец.

Удовлетворительные значения оптического контраста – не менее $(2,5 - 3) \times 10^4$.

Оптическая однородность. Дефекты приводят к разбросу значений показателя преломления по кристаллу. Для количественной характеристики этих нежелательных изменений величины n пользуются отношением, называемым оптической однородностью k :

$$k = \frac{n_{\max}}{n_{\min}},$$

где n_{\max} и n_{\min} – максимальное и минимальное значения показателя преломления по образцу. В случае одноосного кристалла величина k

измеряется по отношению к показателю преломления обыкновенного луча: $k = \frac{n_{0\max}}{n_{0\min}}$ а в случае двуосного кристалла – по отношению к показателю преломления для кругового сечения эллипсоида Френеля.

Удовлетворительные значения оптической однородности лежат в пределах: $1 \leq k \leq 1,006$.

Заключение. В течение последних 5 – 10 лет сфера применения акустооптических устройств на объемных волнах резко расширилась. Она включает в себя приборы для управления излучением мощных фемтосекундных лазеров – дисперсионные адаптивные линии задержки. Разработаны электронно-перестраиваемые акустооптические фильтры изображений с чрезвычайно высоким спектральным разрешением, которые активно используются в наземных астрофизических исследованиях, а также в исследованиях атмосфер планет с космических аппаратов. Широко внедряются устройства для анализа подстилающей поверхности со спутников, самолетов и вертолетов, для экологического экспресс-анализа газового состава земной атмосферы. Акустооптические фильтры устанавливаются на медицинских микроскопах с целью диагностики по тончайшим изменениям цвета биологических тканей и жидкостей человека, животных и растений. Бурно развивается техника пеленгации, классификации и дешифровки слабых радиосигналов на фоне помех с помощью акустооптических процессоров. Акустооптические модуляторы для волоконных технологических лазеров выпускаются в мире в настоящее время до сотни тысяч в год с очевидной тенденцией к еще более массовому производству.

Все это предъявляет новые требования к увеличению производства известных акустооптических монокристаллов и к максимальному улучшению их структурных и оптических характеристик. В то же время остается важным вопрос о расширении номенклатуры применяемых в акустооптике материалов. Это диктуется как расширением числа задач, решаемых с помощью акустооптики, так и появлением лазеров с новыми длинами волн излучения. В особенности желательно наличие новых диэлектрических кристаллов, пригодных для использования в УФ диапазоне, а также полупроводниковых кристаллов, достаточно прозрачных и эффективных в ИК диапазоне 8 – 12 мкм.

При этом физические принципы поиска новых кристаллов с высоким акустооптическим качеством, изложенные в настоящей работе, могут стать в дальнейшем существенно развиты и дополнены.

Список литературы

1. Каплунов И.А., Колесников А.И., Шайович С.Л., Талызин И.В. Рассеяние света монокристаллами германия и парателлурита // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 3. С. 51–56.
2. Колесников А.И., Шелопаев А.В., Каплунов И.А., Талызин И.В., Воронцова Е.Ю. Ослабление света монокристаллами парателлурита // Известия ВУЗов. Материалы электронной техники. Материаловедение и технология. Диэлектрики. М.: МИСиС. 2009. № 4. С.27–30.
3. Молчанов В.Я., Макаров О.Ю., Колесников А.И., Смирнов Ю.М. Перспективы применения кристаллов TeO_2 в акустооптических дефлекторах УФ диапазона // Вестник ТвГУ. Серия «Физика». 2004. №4(6). С. 88–93.
4. Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Переломова Н.В. и др. Акустические кристаллы. Справочник. М.: Наука, 1982. 632 С.
5. Блистанов А.А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики: Учебное пособие для ВУЗов. М. 2000.
6. Uchida N., Niizeki N. Acoustooptic deflection materials and techniques // Proc. IEEE. 1973. V.61, N. 8. P. 1073–1089.
7. Pinnow D.A. // IEEE J. of Quantum Electronics. 1970. V.QE-6. N. 4. P. 223–238.
8. Dixon R.W. // J. Appl. Phys. 1967. V. 38, N. 13. P. 5149–5153.
9. Каплунов И.А., Колесников А.И. Влияние характеристик германия на рассеяние ИК излучения // Поверхность. 2002. № 2. С.14–19.
10. Янски И., Петер А., Мечеки А. и др. О плотности дислокаций и затухании ультразвука в парателлурите // Кристаллография. 1982. Т. 26, вып. 1. С. 152–155.
11. Bonner J. High Quality Tellurium Dioxide for Acousto-Optic and Non-Linear Application. // Electronic Materials. 1972. V. 1. P. 156–165.
12. Смирнов Ю.М., Колесников А.И., Каплунов И.А., Родионова Г.Е. Выращивание высокочистых крупногабаритных монокристаллов. // Высокочистые вещества. М., 1990. С. 213–216.
13. Смирнов Ю.М., Колесников А.И. Концепция особой сингулярной грани (на примере парателлурита) // Физика кристаллизации. Тверь, 1994. С. 82–85.
14. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. М., 1979.

MODERN MATERIALS FOR ACOUSTO-OPTICAL DEVICES BASED ON VOLUME WAVES

A. I. Kolesnikov

Tver State University
Chair of Applied Physics

An analysis is made of the main requirements for the whole of physical and chemical properties of materials effective for applications in light-sound transmission lines on volume ultrasound waves. Criteria for the search of new materials for acoustooptics are indicated. Data for the properties of acoustooptic materials in current use are presented. An analysis is given of the structural and optical defects lowering the characteristics of acoustooptical devices demanding for the improvement of growth technology.

Keywords: *acoustooptics, light-sound transmission line, acousto-optic materials, optical defects*

Об авторах:

КОЛЕСНИКОВ Александр Игоревич – кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладной физики ТвГУ, 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33.