

КРИСТАЛЛОФИЗИКА

УДК 536.75:548.5

КРИСТАЛЛОФИЗИКА – ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Ю.М. Смирнов

Тверской государственной университет,
кафедра прикладной физики

Проанализированы итоги теоретических и экспериментальных разработок, реализуемых научной школой кристаллофизиков ТвГУ.

1. Симметрично-термодинамический метод [1]. Иногда рождение неравновесной термодинамики относят к появлению соотношений взаимности, сформулированных Онсагером (1931 г.) и Казимиром (1945 г.). Возможно, правильнее связывать эту науку с Фурье (1822 г.), Карно (1824 г.), Омом (1827 г.), Фиком (1855 г.), Умовым (1874 г.). Эти ученые ввели в рассмотрение движущие силы процессов (градиенты параметров) и потоки экстенсивных величин. Что касается фундаментальной категории – симметрии, то она была введена в неравновесную термодинамику значительно позже. Лишь в 60–70-х годах в термодинамике стал использоваться принцип Кюри. При этом де Гроот и Мазур применили его только для изучения влияния свойств среды на линейные законы, а Хакен в монографии, введившей понятие синергетики, симметрию упомянул лишь применительно к теории бифуркаций.

Теория и практика роста кристаллов имеют дело со стационарными и нестационарными неравновесными процессами. Все стороны процесса роста кристаллов определяются действующими термодинамическими силами (градиентами интенсивных параметров) и реализуются через потоки экстенсивных величин.

Уравнение Онсагера-Казимира явно симметрично:

$$J_i = \sum L_{ik} X_k. \quad (1)$$

Коэффициент L в нем характеризует свойства системы, J и X – плотность потока величины и действующие термодинамические силы. Коэффициент L в изотропных системах обладает симметрией $\infty/\infty m$. Известны термодинамические силы и потоки, являющиеся скалярами, аксиальными или полярными векторами, полярными тензорами второго ранга. Иногда в эту категорию включается аксиальный тензор второго ранга. Однако нельзя исключать в дальнейшем дополнений в эти перечисления.

На основе принципа Кюри и правила чётности для изотропных систем с группой симметрии $\infty/\infty m$ возможны следующие взаимосвязи сил и потоков: скаляр – аксиальный вектор – полярный тензор второго

ранга (четные величины); полярный вектор – псевдотензор четного ранга (нечетные величины).

Рассмотрим основные виды переноса экстенсивных величин при росте монокристаллов из расплава на примере германия. Одним из наиболее сложных вопросов теории роста кристаллов является расчет скорости роста. Теория иногда расходится с опытом на несколько порядков величин. В разрабатываемом подходе рост из расплава рассмотрен как двухстадийный – кластерообразование у фронта кристаллизации и встраивание кластеров в решетку. Движущей силой кластерообразования является переохлаждение. Роль градиента температур состоит в создании необходимого переохлаждения у фронта кристаллизации. Встраивание кластера в решетку регулируется решеточным потенциалом. Таким образом, здесь на перенос массы влияют две полярновекторных и одна скалярная силы. Вклады других сил оказались пренебрежимо малы, например, диффузиофоретическая и термофоретическая составляющая скорости роста не превышают $(1-3) \cdot 10^{-9} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Расчеты скоростей роста кристаллов германия в интервале переохлаждений от 0,1 до 30 К дают значения $1 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} - 1 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. В различных методах роста германия из расплава скорости изменяются в интервале $1 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} - 1 \cdot 10^{-4} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. При переохлаждениях от 10 К до 30 К растут дендриты со скоростями, достигающими $1 \cdot 10^{-1} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Совпадение теории и эксперимента вполне удовлетворительное. В рассматриваемом случае происходит взаимодействие различных по тензорной принадлежности термодинамических сил. При дислокационном (пластическом) течении отсутствует однозначное соответствие между тензорами деформаций ϵ_{ik} и τ_{ln} . Иногда обобщенную термодинамическую силу, определяющую пластическую деформацию в системе, записывают в виде τ/T . Однако ситуация здесь более сложна – состояние системы определяется как тензором деформации ϵ_{ik} , так и тензором релаксации ψ_{pq} . В литературе описывается множество причин образования дислокаций – термоупругие напряжения, наследование из затравки, захват коагулятов (примесных включений), неравномерное распределение примесей, внешние напряжения, термоудар, переохлаждение расплава, коагуляция вакансий и т.д. В целом все это разнообразие действующих сил может быть сведено к деформации и релаксации. При анализе любой действующей силы следует определить, возникают ли в кристалле напряжения, и может ли их уровень достигать критических напряжений генерации дислокаций.

Одним из решений вопроса является разработанная нами технология получения бездислокационных монокристаллов германия. Ее основные условия – монокристалл должен быть пирамидой роста особой сингулярной грани (для германия – грань {111}), определенный

уровень переохлаждения расплава (1–3 К), сравнительно небольшой радиальный градиент (не более $300 \text{ K}\cdot\text{m}^{-1}$), точная ориентация затравки. Эти условия обеспечивают получение бездислокационных монокристаллов, но ограниченных по диаметру (не более 30 мм). При больших диаметрах начинает проявляться пирамидальное строение монокристалла. Это также приводит к образованию малоугловых границ (МУГ) на контактах пирамид роста граней серий $\{11\bar{1}\}$ и $\{1\bar{1}\bar{1}\}$. Таким образом, действие напряжений и их релаксация дополняются проявлением влияния свободной поверхностной энергии. Она обычно считается скалярной величиной, но в случае искажений ростовой поверхности учитывается как поверхностное напряжение (полярный тензор второго ранга). В тех случаях, когда речь идет о поверхностном натяжении, это – аксиальный вектор, дуальный антисимметричному тензору второго ранга. Перечисленные силы объединяет одна симметричная характеристика – одинаковая четность.

При образовании сложных форм кристаллов в качестве переносимых экстенсивных величин можно рассматривать объем и площадь. Локальное изменение энергии можно записать в виде:

$$dW = \sigma dA, \quad (2)$$

где A – поверхность (площадь).

Известно, что формы кристаллов изменяются с переохлаждением расплава. Для однокомпонентной среды основной движущей силой следует считать разность химических потенциалов среды и кристалла $\Delta\mu$, а ее характеристикой – переохлаждение ΔT . Основными формами при изменениях переохлаждения являются монокристалльные – антискелеты, гранные формы, скелеты и двойниковые – двойники и дендриты. Нами изучались в этом отношении германий, кремний, диоксид теллура (парателлуриит). Несмотря на различия температур кристаллизации, интервалы образования сложных форм довольно близки. Антискелеты образовались при переохлаждениях до (1,0–1,5) К, гранные формы в пределах (1–4) К, скелеты – (4–12) К, образование дендритов начиналось с переохлаждений (10–15) К. Следует полагать, что значение σ заметно зависит от разности химических потенциалов. Учитывая, что изменение энергии с изменением объема определяется его умножением на давление, а тензор давления для движущихся вязких жидкостей имеет вид

$$\vec{P} = (p + p^v)\delta + \hat{D}^{va} + \vec{P}^{vs}, \quad (3),$$

включающий величины, описываемые предельными группами симметрии $\infty/\infty m$, ∞/m , ∞/mmm , т.е. четными группами, следует по аналогии считать поверхностное натяжение аксиальным вектором с предельной группой ∞/m , т.е. тоже тензорной величиной четного типа.

Принципы получения однородно легированных монокристаллов можно разделить на две группы. Неоднородности, связанные с изменением количества легирующей примеси в объеме расплава, могут быть устранены путем регулирования коэффициента распределения примеси, секториальные неоднородности устранимы путем управления внутренней морфологией кристалла. Кардинальным решением вопроса обеспечения однородности распределения легирующих или неконтролируемых примесей в монокристаллах является использование закона секториального роста монокристаллов – закона Бекке. Концепция пирамиды роста особой сингулярной грани явилась основой для разработки технологии выращивания однородных бездислокационных монокристаллов германия и была применена для выращивания малодислокационных монокристаллов парателлуриата. К особым сингулярным граням следует относить сингулярные грани с минимальной свободной поверхностной энергией. Характеристиками действующих термодинамических сил в этом случае являются химическое сродство легирующей примеси и вещества кристалла, разность химических потенциалов двухкомпонентного расплава и кристалла, а также свободная поверхностная энергия сингулярной грани.

Для реализации симметрично-термодинамического метода необходимо правильно представлять существо процессов, происходящих в физико-химической системе. Определим главные ступени использования метода: 1) определение переносимой экстенсивной величины, 2) установление четности (нечетности) потока этой величины и влияющих на плотность потока термодинамических сил, 3) составление уравнения, связывающего поток и действующие силы через коэффициенты Онсагера-Казимира, 4) расчет или экспериментальное определение действующих термодинамических сил, определение результата – значения плотности потока. На основе этой схемы реально построение модели процесса, исключение из рассмотрения сил, вносящих незначительные вклады в поток величины и в конечном итоге – определение технологических параметров.

2. Четность и нечетность физико-химических величин. В кристаллофизике существует понятие четности и нечетности тензорных физических величин [2]. Например, тензоры четного и псевдотензоры нечетного ранга относятся к величинам четного типа. Тензоры нечетного и псевдотензоры четного ранга относятся к величинам нечетного типа. Например, аксиальный вектор и дуальный ему антисимметричный тензор второго ранга должны быть отнесены к величинам четного типа. Такое же деление возможно и для симметричных операций. Они делятся на операции первого рода с определителем, равным +1, и второго ранга с определителем, равным

–1. Силы и потоки, являющиеся скалярами, аксиальными векторами и полярными тензорами второго ранга, следует отнести к величинам четного, а являющиеся полярными векторами и псевдотензорами второго ранга – к величинам нечетного типов.

Таким образом, объединяющим свойством сил и потоков является наличие центра инверсии \bar{I} или его отсутствие в их группах симметрии. Именно эта операция является «пробной» для изотропных сред. Можно привести пример определения наличия взаимосвязей. Релаксационный процесс (плотность потока релаксации) описывается полярным тензором второго ранга, имеющим симметрию $\frac{\infty}{m}mm$.

Вносит ли вклад в этот перенос сила вида $\nabla \cdot \vec{v}$? Эта сила – скаляр, группа симметрии которого включает операцию инверсии. В этом случае её вклад в релаксационный поток возможен. Взаимодействия в сложных физических системах иногда в итоге имеют симметрию, описываемую более высокой группой (надгруппой), чем исходные. Четность результата определяется по общим правилам, например, по правилам перемножения операций симметрии. Общим принципом, ограничивающим произвольность определения группы симметрии результата является закон сохранения четности: четность сложной системы определяется произведением четностей взаимодействующих частей системы. Правила умножения представлены в табл. 1, построенной по принципу таблиц Кэли.

Таблица 1

Принципы определения четности итоговой группы симметрии

	ч	н
ч	ч	н
н	н	ч

Например, пироманитный и электрокалорический эффекты описываются следующими симметричными выражениями

$$\frac{\infty}{m} \otimes \frac{\infty}{m} \rightarrow \infty / \infty m, \quad \infty m \otimes \infty m \rightarrow \infty / \infty m. \quad (4, 5)$$

В итоге получилась четная группа симметрии – группа скаляра.

3. Общий принцип суперпозиции симметрий. Формулировкой принципа Неймана является: элементы симметрии кристалла содержатся среди элементов симметрии свойства; симметрия кристалла не может быть выше симметрии его любого физического свойства. Возможна иная формулировка: физическое свойство имеет группу симметрии, являющуюся надгруппой (группой) симметрии объекта (кристалла).

Рассмотрим некоторые физические эффекты. Уравнение пересечений групп симметрии для пирозлектрического эффекта можно записать в виде

$$\infty m \cap \infty / \infty m \rightarrow \infty m . \quad (6)$$

В этом случае инверсия исчезает. При электрокалорическом эффекте инверсия возникает в группе симметрии результата. Электропластический эффект описывается уравнением вида

$$\infty / m m m \cap \infty m \rightarrow \infty . \quad (7)$$

Здесь инверсия исчезает.

Можно заключить, что если явление описывается группой (подгруппой) пересечений групп системы и воздействия, то оно симметрично в случае центросимметричности (или нецентросимметричности) групп системы и воздействия и нецентросимметрично, если центросимметричен один из двух входящих в пересечение членов, а второй – нецентросимметричен.

В принципе этот подход коррелирует с законом сохранения четности. Это позволяет не разделять материальные и полевые тензоры по градациям вида – четный, магнитный, электрический, магнитоэлектрический и др. [2]. Характеризуя ранг тензора числом N , определяющим количество компонент матрицы 3^N , описывающей тензор, и учитывая, что вид можно выражать с помощью нуля или единицы, можно ввести формальное понятие арифметической четности (нечетности) тензора. Тогда соответствующие численные значения для скаляра, псевдоскаляра, полярного вектора, аксиального вектора, тензора второго ранга и т.д. будут равны: 0+0; 0+1; 1+0; 1+1; 2+0 и т.д. Проанализируем выражения, включенные в работу [2] в параграфе "Пьезомагнитный и магнитоэлектрический эффекты":

$$\Sigma = q \cdot \overset{\circ}{H}, \quad \overset{\circ}{B} = \overset{\circ}{E} \cdot v, \quad \overset{\circ}{B} = b : \overset{\circ}{\sigma}, \quad \overset{\circ}{\varepsilon} = \overset{\circ}{H} \cdot \varepsilon . \quad (8, 9, 10, 11)$$

Тензоры q, v, b, ε определяются численными значениями (1+1), (2+1), (3+1), (3+1). В итоге следует считать, что материальные тензоры q (пиромагнитный эффект) и b (пьезомагнитный эффект) являются четными величинами, а тензор v (магнитоэлектрический эффект) – нечетная величина.

Анализ электрокалорического эффекта указывает на возможность повышения итоговой симметрии. Это позволяет считать принцип Неймана более всеобъемлющим, чем иные принципы, описывающие итоговую симметрию системы.

При описании динамики процессов в изотропных и анизотропных средах достаточно полно учитывать различия между полярностью и аксиальностью (или между тензорами и псевдотензорами). Напомним, что компоненты полярного вектора при

инверсии меняют знак. Термин «отражение», применяемый в теоретической физике, следует понимать как инверсию (отнюдь не как зеркальное или скользящее отражение). Компоненты аксиального вектора, являющегося векторным произведением двух полярных векторов, при инверсии знака не меняют. Псевдоскаляр меняет знак при инверсии. Эти рассуждения можно дополнить понятием дуальности. Известно, что аксиальный вектор дуален антисимметричному тензору второго ранга. Это отношение записывается в виде $\overset{o}{a} \sim \overset{\bar{}}{A}$. Арифметически $(1+1) \sim (2+0)$, откуда следует, что обе величины являются четными и даже эквивалентными.

При рассмотрении операций с полярными и аксиальными векторами возникает вопрос «правизны» и «левизны». Эти векторы принципиально отличны друг от друга: аксиальный является четным и имеет симметрию ∞/m , полярный является нечетным и имеет симметрию ∞m . Рассмотрим движение электрического заряда q

(скаляр) в однородном магнитном поле $\overset{o}{B}$ (аксиальный вектор) со скоростью \vec{V} (полярный вектор). Сила, действующая на заряд, равна

$$\vec{F} = \frac{q}{c} \vec{V} \times \overset{o}{B}, \quad (12)$$

где \vec{F} – полярный вектор. Направление действия силы зависит от знака заряда.

Аксиальный вектор $\overset{o}{B}$ условно характеризуется направлением вращения. В кристаллофизике аксиальный вектор иллюстрируется линией с окружностью, на которой стрелкой указано направление вращения. Показанное на рис. 1 направление вращения одно и то же для зарядов разного знака: при взгляде из центра координат системы – против часовой стрелки. Условно это направление можно считать левым.

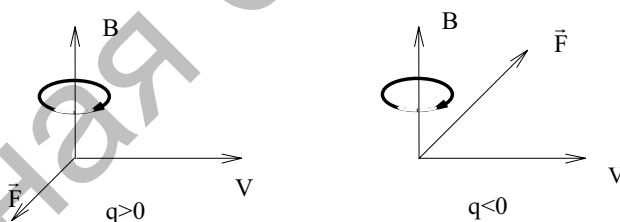


Рис. 1. Схема взаимодействия векторов

Принцип Кюри иногда иллюстрируют рассмотрением двух фигур – квадрата с симметрией $4mm$, и равностороннего треугольника с симметрией $3m$. Наложение фигур понижает симметрию составной системы до m . Такая трактовка не позволяет объяснить случаи, когда

симметрия составной фигуры выше симметрии ее частей или когда низкосимметричные полевые величины в конечном итоге создают объект или явление с более высокой симметрией. Пример – электрокалорический эффект. Истинным принципом суперпозиций симметрий следует считать более общее утверждение Кюри: «...следствия могут обладать более высокой симметрией, чем вызвавшие их причины».

Рассматривая взаимодействия сил и потоков в сложных динамических системах, мы пришли к выводу, что здесь общий принцип суперпозиций симметрии полевых величин (термодинамических сил) и физических свойств системы (коэффициентов Онсагера–Казимира) можно трактовать следующим образом: группа симметрии результата (например, плотность потока переносимой величины) является итоговой группой или подгруппой пересечения групп симметрий, описывающих как симметрию воздействий (полевых величин), так и симметрию физических свойств объектов. Такой подход объясняет как сохранение итоговой симметрии групп любого числа пересечений, так и ее повышение в ряде случаев.

4. Иерархия симметрий материальных и полевых тензоров.

Тензоры делятся на два вида: полярные (истинные тензоры) и аксиальные (псевдотензоры):

1. $s \rightarrow p \rightarrow T^2 \rightarrow T^3 \rightarrow T^4 \dots$ (T – истинные тензоры, верхние индексы – ранг тензора)

2. $\varepsilon \rightarrow a \rightarrow \varepsilon T^2 \varepsilon T^3 \rightarrow \varepsilon T^4 \dots$ (εT – псевдотензоры, ε – псевдоскаляр, a – аксиальный вектор).

Приведем таблицу групп с максимальной симметрией для физических тензоров (псевдотензоров).

Таблица 2.

Максимальная симметрия групп тензорных и псевдотензорных величин

Ранг	Вид	Свойства	Симметрия
0	S	Теплоемкость	$\infty/\infty m$
0	εs	Энантиоморфизм	∞/∞
1	εV	Магнитная индукция	∞/m
1	V	Пироэлектрические коэффициенты	∞m
2	V^2	Диэлектрическая проницаемость	$\infty/\infty m$
2	εV^2	Гирация	∞/∞
3	$\varepsilon V^3 = \{V\}^2 V$	Коэффициент Холла	$\infty/\infty m$
3	$V^3 = \{V\}^2 V$	Пространственная дисперсия	∞/∞
4	V^4	Квадратичная восприимчивость	$\infty/\infty m$
5	$V^5 [[V^2]^2]$	Квадратичный пьезоэлектрический эффект	∞/∞
6	$V^6 [[V^2]^3]$	Упругость квадратичная	$\infty/\infty m$

С позиций симметрии четный и нечетный ряды величин принципиально отличны. Рассмотрим взаимодействия тензоров на основе принципа Яна. Известны следующие соотношения дуальности [2]:

$$\varepsilon \sim \{V^3\}, s \sim \varepsilon \{V^3\}, \varepsilon V \sim \{V^2\}, V \sim \varepsilon \{V^2\}.$$

В конечном итоге получим четную цепочку центросимметричных тензоров:

$$s \rightarrow a \rightarrow T^2 \rightarrow \varepsilon T^3 \rightarrow T^4 \rightarrow \varepsilon T^5 \rightarrow T^6 \rightarrow \varepsilon T^7 \dots,$$

и нечетную цепочку нецентросимметричных тензоров:

$$\varepsilon \rightarrow p \rightarrow \varepsilon T^2 \rightarrow T^3 \rightarrow \varepsilon T^4 \rightarrow T^5 \rightarrow \varepsilon T^6 \rightarrow T^7 \dots$$

Видно, что символика Яна имеет более глубокий смысл и является неформальной, учитывая реальную ситуацию в ряду тензорных физических величин. Отметим, что выведенные ряды могут быть сопоставлены с хорошо известными иерархиями подчиненности полярных и аксиальных тензоров по А.В. Шубникову. Для выписанных по рядам иерархий и по столбцам по Шубникову всегда сохраняется определенная величина (теорема Нетер). В одном случае – это инверсия пространства, в другом – инверсия времени.

Полученные соотношения имеют глубокий смысл, подтверждаемый математической логикой.

1) Операция отображения ряда четных тензорных величин на ряд нечетных тензорных величин соответствует операции конъюнкции. Отображение реализуется исключением операций инверсии. Результатом является группа вращений или подчиненные ей группы.

2) Операция дизъюнкции является обратным отображением (умножением нечетной группы симметрии на операцию инверсии).

3) Операция импликации связывает исходную причину и следствие с сохранением определенного единства. В данном случае – это столбцы иерархии четных и нечетных величин по А.В. Шубникову.

4) Операция эквивалентности наблюдается при анализе рядов тензорных величин, начиная с третьего члена, имеющих общую максимальную группу симметрии (ортогональную в случае четных величин и группу вращений в случае нечетных величин).

5. Дуальность. В кристаллофизике понятие дуальности пока используется редко. Между тем в ряде случаев, например, при изучении систем с векторным перемножением аксиальных и полярных векторов, с помощью этого подхода можно получить достаточно точную информацию. Например, учитывая, что $\varepsilon^2=1$, т.е. итог перемножения псевдоскаляров – скаляр, и умножая выражение $\varepsilon = \{V^3\}$ на ε , получим

$1 = \varepsilon \{V^3\}$. Это означает, что псевдотензор 3 ранга дуален скаляру. Симметрия более низких уровней не исследована.

Симметрию псевдотензоров и тензоров рангов выше второго следует рассматривать также и с позиций групп симметрии вещества, в которых реализуются явления. Например, физические свойства, описываемые полярными тензорами 3 ранга в классах сред вида $\infty/\infty m$, ∞/mmm , ∞/m , тоже не могут существовать.

6. Монокристаллы германия для инфракрасной оптики [3].

Германий – основной материал для ИК оптики в интервале длин волн 8–12 мкм. Германий хорошо совместим с рядом материалов для просветляющих покрытий, имеет высокие твердость и механическую прочность, обладает малым поглощением. Линзы, окна, фильтры, объективы, призмы и другие элементы для активных и пассивных устройств наземных и космических систем изготавливаются из монокристаллического германия.

Работы по выращиванию монокристаллов германия для оптики начаты нами в 1971 г. В то время в стране такой германий не производился. В течение 1–2 лет был превзойден зарубежный уровень по площадям сечения и монокристаллы начали применяться в опытно-конструкторских разработках. В дальнейшем работы были направлены на увеличение площади сечения и на минимизацию поглощения энергии. Результаты приводятся в табл. 3.

Таблица 3

Время окончания разработок	Диаметр монокристалла, мм	Плотность дислокаций, см^{-2}	Показатель ослабления лучистой энергии (10,6 мкм), см^{-1}
1971	60,0 – 160,0	$2 \cdot 10^4$	–
1973	160,0 – 200,0	$2 \cdot 10^4$	–
1976	300,0	$(2-5) \cdot 10^4$	0,02
1981	400,0	$5 \cdot 10^4$	0,015–0,018
1983	500,0	$5 \cdot 10^4$	0,013–0,015

Наши дальнейшие работы были направлены на получение монокристаллов с большими размерами, т.к. предполагалось использование монокристаллов с диаметрами 600 мм и более. Разработанные методы выращивания позволили показать реальные возможности получения монокристаллов с диаметрами 500–620 мм.

Исследования были продолжены в направлении регулирования и уменьшения рассеяния, которое было существенно снижено с 10–12% до 2–3%. Были реализованы различные приемы спонтанного зародышеобразования как на поверхности, так и в объеме расплава. Было значительно увеличено и локализовано переохлаждение,

обеспечены малые градиенты температур в расплаве при стабилизации требуемого переохлаждения. В дальнейшем проводились работы по выращиванию монокристаллов в нестационарных режимах роста. Можно резюмировать, что необходимые методы созданы и обеспечивают требуемые технические параметры кристаллов.

7. Монокристаллы диоксида теллура для акустооптики [4]. Диоксид теллура (парателлурит) – один из наиболее эффективных материалов для акустооптики. Диапазон прозрачности парателлурита 0,35–5,5 мкм. Уникальным свойством является малая скорость акустической волны в плоскости (001) при направлении $\langle \bar{1}10 \rangle$. При взаимодействии со световыми волнами с направлением, близким к $\langle 001 \rangle$ значение коэффициента акустооптического качества M_2 в 500 раз выше, чем в кварце. Это свойство дополняется рядом других положительных особенностей парателлурита. Основные направления применения парателлурита – акустооптические фильтры и дефлекторы. В результате совместных работ ТвГУ с НТЦ акустооптики МИСИС создан АО фильтр изображений с большой оптической и угловой апертурой, ставший базой для нового спектрометра, использованного для наблюдения Сатурна. Полученные изображения оказались выше по качеству ранее полученных в США (НАСА). Подобные монокристаллы использованы и для изготовления АО дефлекторов с числом позиций до 1200×1200 . Парателлурит применяется для перестраиваемых фильтров, поиска замаскированных объектов, для дефлекторов в системах наведения и в ряде других устройств.

Нами получены монокристаллы парателлурита диаметром 70–90 мм и высотой до 100 мм. Монокристаллы находятся по качеству на достаточно высоком уровне по сравнению с мировым.

Список литературы

1. Смирнов Ю.М. Актуальные проблемы кристаллофизики. Тверь: ТвГУ, 1998
2. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1979 г.
3. Смирнов Ю.М., Каплунов И.А. Монокристаллы германия для оптики /Физика кристаллизации. Тверь: ТвГУ, 2002. С.37–39.
4. Смирнов Ю.М., Молчанов В.Я., Колесников А.И. и др. Новые применения акустооптических устройств предъявляют новые требования к монокристаллам парателлурита. /Физика кристаллизации. Тверь: ТвГУ, 2002. С.9–17.