

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО  
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ  
ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА  
СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ  
(ГСССД)

УДК 536.21

**ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ**

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ  
СОЕДИНЕНИЙ ZnS, ZnSe, CdTe В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР 80-300 К

**ГСССД 308 – 2015**

(ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ, тема [RU.3.015-2018](#))

РАЗРАБОТАНЫ ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» с участием специалистов Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики им. Х.И. Амирханова» Дагестанского научного центра Российской академии наук (ФГБУН ИФ ДНЦ РАН).

РЕКОМЕНДОВАНЫ к утверждению Федеральным государственным унитарным предприятием «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия» (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»)

ОДОБРЕНЫ экспертной комиссией в составе:

докт. физ.–мат. наук С.В. Станкуса, докт. физ.–мат. наук А.Д. Ивлиева, канд. техн. наук Петухова В.А., канд. техн. наук Н.Ю. Тимофеевой, канд. техн. наук П.В. Попова

ПОДГОТОВЛЕНЫ к утверждению Российским научно-техническим центром информации по стандартизации, метрологии и оценки соответствия (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»)

УТВЕРЖДЕНЫ Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии **« 27 » октября 2015 г. (протокол № 3)**

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА  
СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ**

---

**Таблицы стандартных справочных данных**

Теплопроводность оптических материалов на основе  
соединений ZnS, ZnSe, CdTe в диапазоне  
температур 80 – 300 K

**ГСССД  
308 - 2015**

**Tables of Standard Reference Data**

Thermal conductivity of optical materials  
on ZnS, ZnSe, CdTe basis in the temperature  
range 80-300 K

**GSSSD  
308 - 2015**

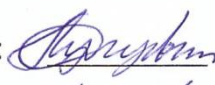
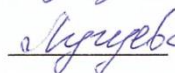
---

## ДЕПОНИРОВАННАЯ РУКОПИСЬ

УДК 536.21

Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 308 - 2015. Теплопроводность оптических материалов на основе соединений ZnS, ZnSe, CdTe в диапазоне температур 80-300 К / Лугуев С.М., Лугуева Н.В.; Росс. научно-техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия. М. 2015. - 45 с.: - Ил. – Библиогр. 50 назв. – Рус. – 34 назв. Депонированы в ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» 27.10.2015 г., № 888-2015 КК.

Приведены таблицы стандартных справочных данных о величине и температурной зависимости коэффициента теплопроводности оптических материалов на основе соединений ZnS, ZnSe, CdTe в диапазоне температур 80-300 К. Измерения коэффициента теплопроводности материалов выполнены абсолютным стационарным методом, основанном на создании линейного теплового потока через исследуемый образец. Суммарная средняя квадратическая погрешность измерений составляет 2-4 % в зависимости от области температур.

Авторы :  С.М. Лугуев  
 Н.В. Лугуева

## **Аннотация**

Приведены таблицы стандартных справочных данных о величине и температурной зависимости коэффициента теплопроводности оптических материалов на основе соединений ZnS, ZnSe, CdTe в диапазоне температур 80-300 К. Измерения коэффициента теплопроводности материалов выполнены абсолютным стационарным методом, основанном на создании линейного теплового потока через исследуемый образец. Суммарная средняя квадратическая погрешность измерений составляет 2-4 % в зависимости от области температур.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	7
2. Основные области применения оптических материалов на основе ZnS, ZnSe, CdTe .....	7
3. Общие сведения о материалах.....	8
4. Условные обозначения, термины и их пояснения.. ..	12
5. Методика определения теплопроводности .....	13
6. Таблицы стандартных справочных данных .....	17
7. Приложение. Таблицы отклонений первичных экспериментальных данных о коэффициенте теплопроводности от расчетных данных.....	31
8. Список литературы.....	40

## **Введение**

Полупроводниковые материалы группы  $A^2B^6$  широко применяются в современных оптических приборах и устройствах. Коэффициент теплопроводности является параметром, определяющим функциональные возможности используемых материалов, и информация о нем требуется при проведении технологических и конструкторских работ. Достоверные данные о теплопроводности материалов для оптических устройств различного целевого назначения необходимы для совершенствования материалов и расширения областей их применения. Существует несколько механизмов, обуславливающих теплопроводность в твердых телах и много процессов, ограничивающих эффективность каждого механизма. Поэтому, несмотря на успешное развитие расчетных методов, наиболее точным способом определения теплопроводности реального кристалла является ее непосредственное экспериментальное измерение.

Для оптимизации функциональных возможностей материалов используются различные методы их получения. В ряде случаев практическое применение поликристаллических материалов предпочтительнее монокристаллических. В зависимости от способа получения в материале преобладают те или иные типы дефектов, от которых зависят оптические свойства и теплопроводность, поэтому представляется необходимым стандартизация данных о теплопроводности оптических материалов на основе соединений  $A^2B^6$  различной технологической предыстории, что важно для разработчиков конструктивных элементов оптической техники.

## **2. Основные области применения оптических материалов на основе ZnS, ZnSe, CdTe**

**Сульфид цинка ZnS** – высоконадежный оптический материал, используемый для изготовления оптических элементов различного назначения: проходных элементов лазеров, работающих в ближнем и среднем инфракрасном (ИК) диапазонах, линз, защитных окон и элементов

для авиационных и космических аппаратов, приборов обнаружения, наблюдения, сигнальных устройств и управляемого вооружения [1].

**Селенид цинка ZnSe** – основными областями применения являются лазерная оптика, включая высокомо мощные лазеры, устройства приема и регистрации слабого ИК излучения [2, 3].

**Теллурид кадмия CdTe** – основным направлением использования является создание детекторов ионизирующих излучений, тепловидение, перспективен для фотоэлектрических преобразователей [4-6].

### 3. Общие сведения о материалах

В номенклатуре оптических сред поликристаллические оптические материалы на основе соединений  $A^2B^6$  представлены:

**КО-2** – поликристаллическая оптическая керамика, получаемая из мелкодисперсного порошка сульфида цинка методом вакуумного рекристаллизационного прессования.

**ПО-2** – поликристаллический оптический материал, получаемый физическим осаждением из пара сульфида цинка.

**ПО-4** – поликристаллический оптический материал, получаемый физическим осаждением из пара селенида цинка.

**КО-41** – получается из ПО-4, подвергнутого дополнительной деформации горячим изостатическим прессованием (ГИП) и рекристаллизации.

**ПО-6** – поликристаллический оптический материал, получаемый физическим осаждением из пара теллурида кадмия.

**КО-61** – получается из ПО-6, подвергнутого дополнительной деформации горячим изостатическим прессованием и рекристаллизации.

**Монокристалл сульфида цинка** - получен кристаллизацией из расплава.

Экспериментальные исследования этих оптических материалов проведены в тесном взаимодействии (в рамках хозяйственных договоров и договоров о научно-техническом сотрудничестве) с НИТИОМ (научно-



исследовательский технологический институт оптического материаловедения) ГОИ (Государственный оптический институт) им. С.И. Вавилова и предприятием Р-6681.

Поликристаллический оптический материал на основе сульфида цинка марки КО-2 соответствует ОСТЗ-1652-86. Технические условия. Отраслевой стандарт. Изд-во ГОИ им. С. И. Вавилова, Л.

Оптический материал ПО-4 на основе селенида цинка соответствует ОСТЗ-6307-87. Материал оптический поликристаллический марки ПО-4. Технические условия. Отраслевой стандарт. Изд-во ГОИ им. С,И. Вавилова, Ленинград.

Образцы оптического материала на основе теллурида кадмия КО-61 соответствуют техническим условиям ТУ:ИАБ.16-84.

Поликристаллические оптические материалы КО-2, КО-41, КО-61 имеют изотропную структуру со средним размером зерен в них  $1\div 2$  мкм (КО-2) и 1мм (КО-41, КО-61). Поликристаллические оптические материалы ПО-2, ПО-4 и ПО-6 характеризуются наличием текстуры: составляющие их кристаллиты геометрически вытянуты в направлении оси роста образцов, которая совпадает с кристаллографическим направлением [111]. Средний размер зерна в плоскости осаждения составляет 2мм. Плотность КО-2 составляет 0,998 от плотности монокристалла сульфида цинка. Поликристаллы ПО-2, ПО-4, ПО-6, КО-41 и КО-61 имеют плотность, равную плотности монокристаллов соответствующих материалов. Все образцы оптических материалов имеют кубическую структуру сфалерита.

Имеющиеся в литературе данные о теплопроводности оптических материалов на основе соединений ZnS, ZnSe, CdTe приведены в таблицах 1-3.

Таблица 1 – Данные о коэффициенте теплопроводности кристаллов ZnS в научных изданиях и на сайтах различных компаний.

Вид материала	Температура, К	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Литературный источник
Монокристалл	300	27,0	[7, 8]
	80	155,0	[7]
	300	26,24	[9-15]
	80	152,42	[9-15]
КО-2	300	17,4	[16]
	300	23,72	[17,18]
	300	17,14	[9-15, 19]
ZnS (CVD)	298	16,7	[20,21]
	296	16,7	[22]
	298	19,0	[23]
ZnS (CVD, ГИП)	298	27,2	[20, 22 , 23]
	311	27,2	[24]
	296	28,4	[25]
	296	28,3	[26]
ПО-2	300	21,53	[18]
	300	21,73	[9-15]

Таблица 2 – Данные о коэффициенте теплопроводности кристаллов ZnSe в научных изданиях и на сайтах различных компаний.

Вид материала	Температура, К	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Литературный источник	Примечание
Монокристалл	300	19,0	[7,8]	
	350	12,5	[27]	
	295	16,7	[28]	в направлении [111]
	295	18,2	[28]	в направлении $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$
ZnSe (CVD)	293	16,0	[24, 29]	лазерного качества
	293	14,1	[24]	для окон ИК-излучения
	298	18,0	[21-23]	
		17,0	[30]	
ПО-4	300	17,8	[31]	
	300	16,02	[18]	
	300	18,02	[32,33]	в направлении оси роста кристаллитов
	300	17,68	[32,33]	в направлении перпендикулярном оси роста кристаллитов
ZnSe (сублимат)		14,1	[29]	
КО-41	300	17,7	[18]	
	300	17,81	[32,33]	в направлении оси роста кристаллитов
	300	17,31	[32,33]	в направлении перпендикулярном оси роста кристаллитов

Таблица 3 – Данные о коэффициенте теплопроводности кристаллов CdTe в научных изданиях и на сайтах различных компаний.

Вид материала	Температура, К	Коэффициент теплопроводности $\kappa$ , Вт/м·К	Литературный источник
CdTe, выращенный из расплава	300	7,5	[7]
	300	1,0	[8]
	300	6,2	[34]
	300	6,7	[35]
	300	7,1	[36]
CdTe, способ получения не указан	293	4,1	[24]
		6,2	[22, 37, 38]
ПО-6	300	6,12	[18]
	300	5,96	[39, 40]
КО-61	300	7,45	[18]
	300	5,51	[10, 39, 40]

Из приведенных в таблицах (1-3) данных можно заключить, что теплопроводность оптических материалов на основе соединений  $A^2B^6$  существенно отличается в зависимости от способа их получения, а в текстурированных образцах и от направления теплового потока относительно оси роста кристаллитов.

#### 4. Условные обозначения, термины и их пояснения

$\kappa$  – коэффициент теплопроводности, Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

$\kappa_{||}$  – коэффициент теплопроводности текстурированных поликристаллов в направлении оси роста поликристалла, Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

$\kappa$  – коэффициент теплопроводности текстурированных поликристаллов в направлении перпендикулярном оси роста поликристалла,  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ .

$\kappa_{\text{фот}}$  – фотонная компонента теплопроводности,  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ .

$\Delta\kappa$  – суммарная погрешность измерения коэффициента теплопроводности,  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ .

$\kappa_{\text{эксп}}$  – значения коэффициента теплопроводности, полученные в эксперименте,  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ .

$\kappa_{\text{расч}}$  – значения коэффициента теплопроводности, рассчитанные по аппроксимационным уравнениям,  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ .

$\delta\kappa, \%$  - относительное отклонение значений коэффициента теплопроводности, рассчитанных по аппроксимационным уравнениям, от экспериментальных данных.

ГИП – горячее изостатическое прессование.

CVD – метод получения материалов химическим паровым осаждением.

PVD – метод получения материалов физическим осаждением.

## 5. Методика определения теплопроводности

Измерения коэффициента теплопроводности образцов выполнялись абсолютным стационарным методом, основанном на создании линейного теплового потока через исследуемый образец. Исследованные образцы имели форму параллелепипеда с высотой 20 мм и с площадью поперечного сечения  $30\div 36 \text{ мм}^2$ . Расстояния между сечениями образцов, в которых определялась температура термопарами, были  $10\div 12 \text{ мм}$ . Перепад температур, в зависимости от температурной области измерений и величины теплопроводности, составлял  $3\div 10$  градусов.

Использованная авторами экспериментальная установка представляет собой модифицированный вариант низкотемпературной экспериментальной установки, описание которой приведено в статье [41], монографии [42] и справочнике [43] как установки, позволяющей получать надежные

экспериментальные данные о коэффициенте теплопроводности. Методика экспериментального определения теплопроводности аттестована ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» в качестве методики ГСССД МЭ 218-2014 [44], где приведены принципиальная схема прибора, методика проведения измерений и расчетные формулы. В этой установке измерения теплопроводности проводятся по аналогии с измерениями электрического сопротивления потенциометрическим методом, что исключает необходимость учета контактных тепловых сопротивлений между образцами, нагревателем и холодильниками.

Кристаллы соединений ZnS, ZnSe, CdTe имеют полосу пропускания, охватывающую видимую и широкую инфракрасную область оптического спектра и, следовательно, можно предположить, что в них, кроме колебаний кристаллической решетки (фононов), в переносе тепла может участвовать и электромагнитное излучение (фотоны). Нами проведен анализ возможного участия фотонов в переносе тепла в образцах, данные о теплопроводности которых представлены в таблицах.

В поликристаллическом образце длина свободного пробега определяется двумя процессами рассеяния: рассеянием на границах и поглощением в веществе. Длина свободного пробега фотонов рассчитывается по формуле [45]:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{l_{\text{погл}}} + \frac{1}{l_{\text{расс}}},$$

где  $l_{\text{расс}}$  – длина свободного пробега, определяемая рассеянием фотонов границами отдельных кристалликов в поликристалле или рассеянием границами образца;  $l_{\text{погл}}$  – длина свободного пробега фотонов, определяемая внутренним поглощением исследуемого вещества. В случае крупнокристаллических образцов и монокристаллов ( $l_{\text{погл}} \ll l_{\text{расс}}$ ) можно пренебречь рассеянием на границах. Тогда  $L \approx l_{\text{погл}} = \frac{1}{k}$ , где  $k$  – коэффициент поглощения (в  $\text{м}^{-1}$ ) для длин волн, соответствующих максимуму излучения

при температуре  $T$ . В случае мелкокристаллических образцов, когда будет преобладать граничное рассеяние,  $L \approx l_{\text{расс}}$ , где  $L$  – размер отдельного кристаллика.

Расчеты фотонной компоненты теплопроводности для ZnS.

Коэффициент поглощения сульфида цинка  $k = 0.096 \text{ см}^{-1}$  для  $\lambda = 10 \text{ мкм}$  [46]. Значит длина свободного пробега фотонов, определяемая внутренним поглощением среды  $l_{\text{погл}} = 1/k = 10.4 \text{ см}$ . В поликристаллических образцах границами рассеяния являются поверхности образцов и границы зерен. Поскольку размеры образцов и зерен  $L$  в измеренных нами образцах сульфида цинка значительно меньше этой величины, то внутренним поглощением мы можем пренебречь, и рассеяние фотонов определяется границами. В этом случае [47]

$$\kappa_{\text{фот}} = 4n^2\sigma T^3L,$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Для ZnS коэффициент преломления  $n = 2.2$  [46]. При 300 К в сульфиде цинка  $\kappa_{\text{фот}} = 4n^2\sigma T^3L = 4 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (2.2)^2 \cdot 27 \cdot 10^6 \cdot L = 29.63 \cdot L$ .

В КО-2 средний размер зерен 1 мкм и  $\kappa_{\text{фот}} = 29.63 \cdot L = 29.63 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ . При 300 К для КО-2  $\kappa = 17.14 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ .

$\kappa_{\text{фот}}/\kappa = 1.7 \cdot 10^{-6}$  и  $\kappa_{\text{фот}}$  составляет 0.00017% от  $\kappa$  для КО-2 при 300 К.

В ПО-2 средний размер зерен 2 мкм и  $\kappa_{\text{фот}} = 29.63 \cdot L = 29.63 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м} \cdot \text{К} = 0.059 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ . При 300 К для ПО-2  $\kappa = 21.73 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ .

$\kappa_{\text{фот}}/\kappa = 0.0027$  и  $\kappa_{\text{фот}}$  составляет 0.27% от  $\kappa$  для ПО-2 при 300 К.

В случае монокристалла рассеяние фотонов происходит на границах образца, поперечные размеры которого 0.5 см

$\kappa_{\text{фот}} = 0.15 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ , При 300 К для монокристалла  $\kappa = 26.24 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ .

$\kappa_{\text{фот}}/\kappa = 0.0057\%$  и  $\kappa_{\text{фот}}$  составляет 0.57% от  $\kappa$  для монокристалла ZnS при 300 К.

Расчеты фотонной компоненты теплопроводности для ZnSe.

Коэффициент поглощения ПО-4  $k = (3-20) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$  на длине волны 10.6 мкм [48]. Значит длина свободного пробега фотонов, определяемая внутренним поглощением среды,  $l_{\text{погл}} = 1/k = 50 \text{ см}$ . Поскольку размеры образцов и зерен  $L$  в измеренных нами образцах селенида цинка значительно меньше этой величины, то рассеяние фотонов определяется границами, и внутренним поглощением мы можем пренебречь. В этом случае  $\kappa_{\text{фот}}$  можно определить так же, как и для образцов ZnS.

Для ZnSe коэффициент преломления  $n = 2.40$  [49] При 300 К в селениде цинка  $\kappa_{\text{фот}} = 4n^2\sigma T^3 L = 4 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (2.4)^2 \cdot 27 \cdot 10^6 \cdot L = 35.27 \cdot L$ .

В ПО-4 средний размер зерен 2мм и  $\kappa_{\text{фот}} = 35.27 \cdot L = 35.27 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}\cdot\text{К} = 0.07 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ . При 300 К для ПО-4  $\kappa = 18.02 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ .

$\kappa_{\text{фот}}/\kappa = 0.0039$  и  $\kappa_{\text{фот}}$  составляет 0.39% от  $\kappa$  для ПО-4 при 300 К.

В КО-41 средний размер зерен 1 мм и  $\kappa_{\text{фот}} = 35.27 \cdot L = 35.27 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}\cdot\text{К} = 0.035 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ . При 300 К для КО-41  $\kappa = 17.81 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ .

$\kappa_{\text{фот}}/\kappa = 0.0019$  и  $\kappa_{\text{фот}}$  составляет 0.19% от  $\kappa$  для КО-41 при 300 К.

Расчеты фотонной компоненты теплопроводности для CdTe.

По данным Демиденко В.А. из НИТИОМ ГОИ им. С.И. Вавилова (представлены вместе с образцами для исследования) для КО-61 при длине волны 10 мкм  $n = 2.67$ , а коэффициент поглощения  $k$  меньше  $0.05 \text{ см}^{-1}$ . Значит  $l_{\text{погл}} = 20 \text{ см}$ . Поэтому можно считать, что рассеяние фотонов происходит границами зерен, размер которых 0.2см (ПО-6) и 0.1 см (КО-61)



Для CdTe при 300 К  $\kappa_{\text{фот}} = 4 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (2.67)^2 \cdot 27 \cdot 10^6 \cdot L = 43.68 \cdot L$ .

В ПО-6 средний размер зерен 2 мкм и  $\kappa_{\text{фот}} = 43.68 \cdot L = 43.68 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м} \cdot \text{К} = 0.087 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ . При 300 К для ПО-6  $\kappa = 5.96 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ .

$\kappa_{\text{фот}}/\kappa = 0.0146$  и  $\kappa_{\text{фот}}$  составляет 1.46% от  $\kappa$  для ПО-6 при 300 К.

В КО-61 средний размер зерен 1 мкм и  $\kappa_{\text{фот}} = 43.68 \cdot L = 43.68 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м} \cdot \text{К} = 0.044 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ . При 300 К для КО-61  $\kappa = 5.51 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ .

$\kappa_{\text{фот}}/\kappa = 0.008$  и  $\kappa_{\text{фот}}$  составляет 0.8% от  $\kappa$  для КО-61 при 300 К.

Суммарная погрешность результатов измерений на экспериментальной установке в диапазоне температур 80-300 К с учетом погрешностей измерения мощности нагревателя, излучения с боковых поверхностей образцов и нагревателя, оттока или подвода тепла по проводам, погрешностей измерения геометрических размеров образцов, температуры термодатчиками составляет  $2 \div 4 \%$  в зависимости области температур, геометрических размеров исследуемых образцов и их теплопроводности.

## **6. Таблицы стандартных справочных данных**

Основой для разработки таблиц стандартных справочных данных явились результаты экспериментального исследования коэффициента теплопроводности оптических материалов на основе ZnS, ZnSe, CdTe, проведенные авторами в Институте физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН.

Измерения проводились по методике “Методика экспериментального определения теплопроводности твердых тел в диапазоне температур 80...450 К, зарегистрированной в Российском научно-техническом центре информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ») под № ГСССД МЭ 218-2014.

Полученные результаты аппроксимированы полиномами третьей степени по методу наименьших квадратов. Ниже представлены аналитические зависимости, аппроксимирующие данные о коэффициенте теплопроводности каждого оптического материала:

Для монокристалла ZnS:

$$\kappa = 368,9999 - 3,7621T + 0,0148048T^2 - 2,0243 \cdot 10^{-5}T^3. \quad (1)$$

Для поликристаллической оптической керамики КО-2:

$$\kappa = 50,9561 - 0,1488T + 3,0741 \cdot 10^{-5}T^2 + 2,9894 \cdot 10^{-7}T^3. \quad (2)$$

Для текстурированного оптического материала ПО-2 в направлении оси роста поликристалла:

$$\kappa = 346,7456 - 3,5886T + 0,014137T^2 - 1,929 \cdot 10^{-5}T^3. \quad (3)$$

Для текстурированного оптического материала ПО-4 в направлении оси роста поликристалла:

$$\kappa = 226,5819 - 2,2722T + 0,0088825T^2 - 1,2086 \cdot 10^{-5}T^3. \quad (4)$$

Для текстурированного оптического материала ПО-4 в направлении перпендикулярном оси роста поликристалла:

$$\kappa = 178,0875 - 1,5783T + 0,0055559T^2 - 6,9236 \cdot 10^{-6}T^3. \quad (5)$$

Для деформированного оптического материала КО-41 в направлении оси роста поликристалла в процессе осаждения из пара:

$$\kappa = 202,2282 - 1,9133T + 0,0070914T^2 - 9,2097 \cdot 10^{-6}T^3. \quad (6)$$

Для деформированного оптического материала КО-41 в направлении перпендикулярном оси роста поликристалла в процессе осаждения из пара:

$$\kappa = 201,9902 - 2,1303T + 0,0087232T^2 - 1,2247 \cdot 10^{-5}T^3. \quad (7)$$

Для текстурированного оптического материала ПО-6 в направлении оси роста поликристалла:

$$\kappa = 63,8377 - 0,56797T + 0,002081T^2 - 2,69603 \cdot 10^{-6}T^3. \quad (8)$$

Для деформированного оптического материала КО-61 в направлении оси роста поликристалла в процессе осаждения из пара:

$$\kappa = 57,2279 - 0,534378T + 0,002036T^2 - 2,765941 \cdot 10^{-6}T^3. \quad (9)$$

Стандартные справочные данные о теплопроводности оптических материалов на основе соединений ZnS, ZnSe, CdTe в диапазоне температур 80÷300 К, рассчитанные по уравнениям (1)-(9) при равных значениях температуры, представлены в таблицах 4-12. Там же указаны абсолютные значения суммарной погрешности их определения ( $\Delta\kappa$ ).

Как следует из таблиц 4-12, стандартные справочные данные для оптических материалов на основе одних и тех же соединений (ZnS – табл.4-6, ZnSe – табл.7-10, CdTe – табл. 11-12) различны. Это различие более существенно в низкотемпературной области, а с повышением температуры значения коэффициента теплопроводности сближаются. Указанные особенности обусловлены структурными дефектами в кристаллах с различной технологической предысторией. Теплопроводность оптической керамики КО-2 при 80 К почти на 400% ниже, чем у монокристаллических образцов ZnS и поликристаллического оптического материала ПО-2, полученного методом физического осаждения (PVD) из пара (см. табл. 4-6). Детальный анализ причин, приводящих к такому различию данных о теплопроводности оптических материалов на основе соединения ZnS, приведен в работе [9], где показано, что относительно низкая теплопроводность поликристаллической оптической керамики КО-2 по

сравнению с монокристаллом ZnS обусловлена эффективным рассеянием фононов дефектами в приграничном слое зерен. Более того, при размерах зерен 1 мкм и менее приграничный слой занимает значительную часть объема зерна, что и является причиной низкой теплопроводности поликристаллов КО-2. В поликристаллах с размером зерен 1 мкм длина свободного пробега фононов в низкотемпературной области становится сопоставимой с размерами зерен и уже сказываются размерные эффекты, существенно снижающие теплопроводность. В оптических поликристаллах ПО-2 размеры кристаллитов на три порядка больше, чем в КО-2. Поэтому в ПО-2 приграничные слои составляют незначительную часть объема зерна и вклад дефектов в этих слоях в рассеяние фононов, как и границ зерен, существенно меньше, чем в КО-2. Как следствие этого, теплопроводность поликристаллов ПО-2 близка к значениям  $\kappa$  для монокристаллов. Особенности переноса тепла в оптических материалах на основе ZnS, ZnSe, CdTe, имеющих различную технологическую предысторию и соответственно различную дефектную структуру рассмотрены в работах [9-15, 19, 32,33,39,40].

Оптические материалы ПО-2, ПО-4, ПО-6, полученные осаждением из пара, имеют четкую геометрическую и структурную ориентацию. Составляющие их кристаллиты вытянуты в направлении оси роста и имеют преимущественную ориентацию, которая совпадает с кристаллографическим направлением  $[111]$ . Средний размер зерна в плоскости осаждения составляет 2 мм. Теплопроводность текстурированных поликристаллов анизотропна и зависит от направления роста кристаллитов. В таблице 7 приведены данные о теплопроводности ZnSe (ПО-4) в направлении оси роста кристалла ( $\kappa_{||}$ ), а в таблице 8 – данные теплопроводности поликристаллов ZnSe в направлении перпендикулярном оси роста кристалла ( $\kappa_{\perp}$ ). Во всем диапазоне температур  $\kappa_{||} \geq \kappa_{\perp}$ . Это отличие более существенно в области низких температур. При размерах кристаллитов порядка 1 мм рассеяние

фононов на границах вносит пренебрежимо малый вклад в тепловое сопротивление, поскольку средняя длина свободного пробега фононов много меньше размеров зерен. Поэтому роль поверхности зерен в ПО-4 незначительна. Более значительна роль дислокаций в рассеянии фононов [32]. Известно, что рост кристаллов соединений  $A^2B^6$  происходит посредством винтовых дислокаций, направление оси которых совпадает с направлением роста кристалла [50]. Анизотропия коэффициента теплопроводности в поликристаллах ПО-4 связана с наличием в них ориентированных дислокаций. Аналогичные особенности наблюдаются и для поликристаллов ПО-2 и ПО-6.

Теплопроводность поликристаллов КО-41 и КО-61 несколько ниже, чем у ПО-4 и ПО-6, но в КО-41 и КО-61 также наблюдается анизотропия коэффициента теплопроводности, что обусловлено сохранением в них преимущественной ориентации дислокаций и после процесса деформации и рекристаллизации.

Таким образом, в поликристаллах соединений группы  $A^2B^6$ , особенно в низкотемпературной области, теплопроводность должна быть соотнесена с направлением роста кристаллитов и технологической предысторией.

В таблицах П.1-П.9 приложения содержатся относительные отклонения исходных экспериментальных данных ( $\kappa_{\text{эксп}}$ ) о коэффициенте теплопроводности от значений ( $\kappa_{\text{расч}}$ ), рассчитанных по (1)-(9), %:

$$\delta\kappa = \frac{\kappa_{\text{эксп}} - \kappa_{\text{расч}}}{\kappa_{\text{эксп}}} \cdot 100. \quad (9)$$

Из таблиц П.1-П.9 следует, что это отклонение не превышает 2%, что составляет величину меньшую суммарной погрешности эксперимента.

Таблица 4 – Стандартные справочные данные о теплопроводности монокристалла ZnS.

T, K	$\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	$\Delta\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>
80	152,42	3,05
85	143,75	2,88
90	135,58	2,71
95	127,86	2,56
100	120,59	2,41
105	113,77	2,28
110	107,36	2,15
115	101,36	2,03
120	95,75	1,92
125	90,52	1,81
130	85,65	1,71
135	81,13	1,65
140	76,93	1,62
145	73,05	1,57
150	69,47	1,54
155	66,17	1,52
160	63,15	1,49
165	60,38	1,46
170	57,84	1,42
175	55,54	1,39
180	53,44	1,33
185	51,33	1,29
190	49,80	1,26
195	48,24	1,24
200	46,82	1,23
205	45,54	1,23
210	44,38	1,22
215	43,31	1,22
220	42,34	1,21
225	41,44	1,21
230	40,59	1,20
235	39,79	1,19
240	39,01	1,17
245	38,24	1,14
250	37,47	1,13
255	36,69	1,11
260	35,86	1,08
265	34,99	1,05
270	34,06	1,03
275	33,04	0,99
280	31,93	0,96
285	30,71	0,92
290	29,36	0,88
295	27,88	0,84
300	26,24	0,79

Таблица 5 – Стандартные справочные данные о теплопроводности поликристаллической оптической керамики КО-2.

T, K	$\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	$\Delta\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>
80	39,40	0,79
85	38,71	0,77
90	38,03	0,76
95	37,35	0,76
100	36,68	0,75
105	36,01	0,73
110	35,35	0,71
115	34,70	0,71
120	34,05	0,70
125	33,42	0,69
130	32,78	0,69
135	32,16	0,69
140	31,54	0,67
145	30,93	0,67
150	30,33	0,66
155	29,15	0,66
160	28,58	0,66
165	28,01	0,65
170	27,45	0,65
175	26,90	0,64
180	26,37	0,64
185	25,84	0,64
190	25,32	0,63
195	24,81	0,63
200	24,74	0,62
205	24,31	0,62
210	23,82	0,61
215	23,35	0,61
220	22,88	0,60
225	22,43	0,60
230	21,99	0,60
235	21,56	0,59
240	21,14	0,59
245	20,73	0,58
250	20,34	0,58
255	19,96	0,57
260	19,59	0,57
265	19,24	0,56
270	18,89	0,56
275	18,57	0,55
280	18,25	0,55
285	17,95	0,54
290	17,67	0,53
295	17,40	0,52
300	17,14	0,51

Таблица 6 – Стандартные справочные данные о теплопроводности текстурированного оптического материала ПО-2 в направлении оси роста поликристалла.

T, K	$\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	$\Delta\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
80	140,26	2,80
85	132,01	2,64
90	124,23	2,49
95	116,88	2,34
100	109,97	2,20
105	103,48	2,07
110	97,39	1,95
115	91,69	1,83
120	86,37	1,73
125	81,40	1,63
130	76,78	1,54
135	72,49	1,53
140	68,51	1,48
145	64,84	1,45
150	61,45	1,39
155	58,34	1,37
160	55,49	1,32
165	52,88	1,30
170	50,49	1,26
175	48,33	1,21
180	46,36	1,16
185	44,58	1,11
190	42,98	1,07
195	41,52	1,06
200	40,22	1,05
205	39,04	1,04
210	37,97	1,02
215	37,00	1,01
220	36,12	0,99
225	35,31	0,98
230	34,55	0,97
235	33,84	0,95
240	33,15	0,94
245	32,48	0,93
250	31,80	0,91
255	31,10	0,90
260	30,38	0,89
265	29,61	0,86
270	28,78	0,84
275	27,87	0,77
280	26,88	0,75
285	25,78	0,74
290	24,57	0,72
295	23,22	0,70
300	21,73	0,66



Таблица 7 – Стандартные справочные данные о теплопроводности текстурированного оптического материала ПО-4 в направлении оси роста поликристалла

T, K	$\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	$\Delta\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>
80	95,47	1,91
85	90,20	1,81
90	85,22	1,63
95	80,53	1,61
100	76,10	1,52
105	71,94	1,44
110	68,03	1,36
115	64,37	1,29
120	60,94	1,23
125	57,74	1,16
130	54,76	1,10
135	51,98	1,08
140	49,41	1,05
145	47,02	1,03
150	44,82	1,00
155	42,79	0,99
160	40,92	0,97
165	39,21	0,95
170	37,64	0,93
175	36,20	0,90
180	34,90	0,87
185	33,71	0,84
190	32,63	0,82
195	31,65	0,81
200	30,76	0,80
205	29,95	0,79
210	29,21	0,78
215	28,54	0,77
220	27,92	0,76
225	27,35	0,75
230	26,81	0,75
235	26,30	0,74
240	25,81	0,72
245	25,33	0,71
250	24,84	0,71
255	24,35	0,70
260	23,84	0,69
265	23,31	0,68
270	22,73	0,66
275	22,11	0,64
280	21,44	0,63
285	20,70	0,61
290	19,89	0,59
295	19,00	0,56
300	18,02	0,54

Таблица 8 – Стандартные справочные данные о теплопроводности текстурированного оптического материала ПО-4 в направлении перпендикулярном оси роста поликристалла

T, K	$\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	$\Delta\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
80	83,83	1,68
85	79,82	1,60
90	75,99	1,52
95	72,35	1,45
100	68,89	1,37
105	65,60	1,31
110	62,48	1,25
115	59,53	1,19
120	56,73	1,13
125	54,08	1,08
130	51,59	1,06
135	49,24	1,03
140	47,02	1,02
145	44,94	1,01
150	42,98	0,99
155	41,14	0,96
160	39,43	0,93
165	37,82	0,91
170	36,32	0,89
175	34,92	0,87
180	33,62	0,85
185	32,41	0,84
190	31,28	0,81
195	30,24	0,78
200	29,27	0,76
205	28,37	0,75
210	27,53	0,74
215	26,76	0,73
220	26,04	0,72
225	25,37	0,71
230	24,74	0,70
235	24,15	0,69
240	23,60	0,67
245	23,07	0,66
250	22,57	0,65
255	22,08	0,64
260	21,61	0,63
265	21,17	0,62
270	20,69	0,60
275	20,22	0,59
280	19,75	0,58
285	19,27	0,58
290	18,76	0,57
295	18,24	0,56
300	17,68	0,54

Таблица 9 – Стандартные справочные данные о теплопроводности деформированного оптического материала КО-41 в направлении оси роста поликристалла в процессе осаждения из пара

T, K	$\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	$\Delta\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
80	89,84	1,80
85	85,18	1,70
90	80,76	1,62
95	76,57	1,53
100	72,61	1,44
105	68,86	1,37
110	65,32	1,29
115	61,98	1,22
120	58,84	1,17
125	55,89	1,11
130	53,11	1,05
135	50,52	1,02
140	48,09	1,00
145	45,82	0,98
150	43,71	0,95
155	41,75	0,93
160	39,92	0,91
165	38,23	0,90
170	36,67	0,87
175	35,22	0,85
180	33,89	0,83
185	32,66	0,80
190	31,54	0,77
195	30,50	0,76
200	29,55	0,75
205	28,68	0,74
210	27,88	0,73
215	27,15	0,73
220	26,47	0,72
225	25,84	0,71
230	25,26	0,71
235	24,71	0,70
240	24,19	0,70
245	23,70	0,69
250	23,22	0,68
255	22,76	0,67
260	22,29	0,66
265	21,82	0,66
270	21,33	0,65
275	20,83	0,63
280	20,31	0,62
285	19,75	0,60
290	19,15	0,58
295	18,51	0,56
300	17,81	0,54

Таблица 10 – Стандартные справочные данные о теплопроводности деформированного оптического материала КО-41 в направлении перпендикулярном оси роста поликристалла в процессе осаждения из пара

T, K	$\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	$\Delta\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
80	81,12	1,63
85	76,42	1,53
90	71,99	1,46
95	67,84	1,35
100	63,94	1,27
105	60,30	1,20
110	56,90	1,13
115	53,74	1,07
120	50,80	1,01
125	48,08	0,96
130	45,56	0,91
135	43,25	0,89
140	41,12	0,86
145	39,16	0,85
150	37,38	0,84
155	35,76	0,82
160	34,29	0,79
165	32,96	0,78
170	31,77	0,76
175	30,70	0,74
180	29,74	0,73
185	28,89	0,72
190	28,14	0,72
195	27,47	0,71
200	26,88	0,70
205	26,36	0,70
210	25,90	0,69
215	25,49	0,68
220	25,12	0,67
225	24,78	0,66
230	24,46	0,65
235	24,16	0,64
240	23,87	0,63
245	23,57	0,63
250	23,25	0,62
255	22,91	0,61
260	22,54	0,60
265	22,13	0,58
270	21,67	0,56
275	21,14	0,54
280	20,55	0,53
285	19,88	0,52
290	19,13	0,50
295	18,27	0,50
300	17,31	0,50

Таблица 11 – Стандартные справочные данные о теплопроводности текстурированного оптического материала ПО-6 в направлении оси роста поликристалла

T, K	$\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	$\Delta\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>
80	28,34	0,57
85	26,94	0,54
90	25,61	0,51
95	24,35	0,49
100	23,16	0,46
105	22,02	0,44
110	20,96	0,42
115	19,94	0,40
120	18,99	0,38
125	18,09	0,36
130	17,25	0,35
135	16,46	0,35
140	15,72	0,34
145	15,02	0,34
150	14,37	0,33
155	13,76	0,33
160	13,20	0,32
165	12,67	0,31
170	12,18	0,30
175	11,73	0,29
180	11,31	0,28
185	10,92	0,27
190	10,56	0,26
195	10,23	0,26
200	9,92	0,25
205	9,64	0,24
210	9,38	0,24
215	9,13	0,23
220	8,91	0,23
225	8,70	0,23
230	8,50	0,22
235	8,31	0,22
240	8,13	0,22
245	7,96	0,22
250	7,80	0,21
255	7,63	0,21
260	7,47	0,21
265	7,30	0,20
270	7,14	0,20
275	6,97	0,20
280	6,78	0,19
285	6,60	0,19
290	6,40	0,19
295	6,19	0,18
300	5,96	0,18

Таблица 12 – Стандартные справочные данные о теплопроводности деформированного оптического материала КО-61 в направлении оси роста поликристалла в процессе осаждения из пара

T, K	$\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	$\Delta\kappa$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
80	26,09	0,52
85	24,82	0,50
90	23,61	0,47
95	22,47	0,45
100	21,39	0,43
105	20,37	0,41
110	19,40	0,39
115	18,50	0,37
120	17,65	0,35
125	16,85	0,33
130	16,10	0,32
135	15,39	0,31
140	14,74	0,31
145	14,12	0,30
150	13,55	0,29
155	13,02	0,29
160	12,53	0,28
165	12,07	0,28
170	11,65	0,27
175	11,25	0,27
180	10,89	0,26
185	10,55	0,26
190	10,24	0,26
195	9,95	0,25
200	9,68	0,25
205	9,43	0,25
210	9,20	0,24
215	8,98	0,24
220	8,77	0,24
225	8,58	0,24
230	8,39	0,23
235	8,21	0,23
240	8,04	0,23
245	7,86	0,22
250	7,69	0,22
255	7,51	0,22
260	7,33	0,22
265	7,15	0,21
270	6,95	0,21
275	6,75	0,20
280	6,54	0,20
285	6,30	0,19
290	6,06	0,18
295	5,79	0,17
300	5,51	0,17

## 7. Приложение. Таблицы отклонений первичных экспериментальных данных о коэффициенте теплопроводности от расчетных данных

Таблица П.1 – Отклонение экспериментальных данных о теплопроводности монокристалла сульфида цинка ZnS от рассчитанных по (1).

T, K	$\kappa_{\text{эксп}},$ Вт/(м·K)	$\kappa_{\text{расч}},$ Вт/(м·K)	$\delta\kappa, \%$
81,18	152,44	150,33	1,38
81,9	149,81	149,07	0,49
82,81	150,02	147,49	1,69
83,72	148,75	145,92	1,90
84,88	145,81	143,96	1,27
86,05	141,10	141,99	-0,63
87,94	137,60	138,88	-0,93
88,92	138,72	137,30	1,02
91,38	131,05	133,40	-1,79
92,48	128,92	130,69	-1,37
95,5	125,94	127,11	-0,93
97,65	123,89	123,95	-0,05
99,96	119,91	120,65	-0,62
105,66	110,39	111,90	-1,37
112,84	101,26	101,90	-0,63
121,78	92,31	93,85	-1,67
126,45	88,29	89,07	-0,89
134,07	80,78	81,94	-1,44
142,71	75,01	74,79	0,29
159,63	65,26	64,36	1,01
168,54	60,88	59,96	1,51
175,33	55,92	55,39	0,95
186,53	52,20	51,98	0,42
189,92	51,95	51,83	0,23
193,89	49,38	48,57	1,63
198,76	47,81	47,16	1,35
201,25	46,71	46,49	0,47
209,88	44,34	44,40	-0,14
218,33	42,35	42,66	-0,72
226,16	40,16	40,73	-1,42
233,79	38,24	38,87	-1,65
250,02	34,23	34,47	-0,70
252,2	33,29	33,43	-0,42
254,66	33,23	33,74	-1,53
275,84	29,33	29,86	-1,81
295,83	26,36	26,62	0,99
297,81	26,83	26,98	-0,54
298,78	26,64	26,65	-0,04
301,74	25,84	25,63	0,81

Таблица П.2 – Отклонение экспериментальных данных о теплопроводности поликристаллической оптической керамики КО-2 от рассчитанных по (2).

T, К	$\kappa_{\text{эксп}},$ Вт/(м·К)	$\kappa_{\text{расч}},$ Вт/(м·К)	$\delta\kappa, \%$
81,48	39,12	39,19	-0,18
82,87	38,8	39,00	-0,52
84,48	38,52	38,78	-0,67
85,22	38,1	38,68	-0,99
89,78	38,17	38,06	0,29
92,94	37,80	37,63	0,45
96,32	37,64	37,17	1,25
99,48	36,99	36,75	0,65
107,49	35,65	35,68	0,08
116,54	35,08	34,50	1,65
123,63	33,49	33,59	-0,30
130,04	33,17	32,78	1,17
136,87	31,72	31,93	-0,66
143,23	31,26	31,15	0,35
152,93	30,22	29,98	0,79
160,14	28,78	29,14	-1,25
163,48	28,31	28,75	-1,55
167,12	28,48	28,34	0,49
171,03	27,44	27,89	1,64
175,18	27,41	27,43	-0,07
178,06	27,68	27,12	0,59
186,31	26,11	26,23	-0,46
194,49	25,15	25,37	-0,87
205,17	24,26	24,29	-0,12
212,69	23,42	23,57	-0,64
217,94	23,05	23,07	-0,08
226,45	22,57	22,30	1,19
233,66	21,46	21,67	-0,98
238,01	21,31	21,30	0,05
253,21	20,32	20,09	1,13
256,06	20,07	19,88	0,95
258,82	19,91	19,68	1,16
262,17	19,27	19,43	-0,83
275,88	18,68	18,51	0,91
286,32	18,01	17,88	0,56
293,12	17,33	17,33	-0,98
296,17	17,51	17,34	0,97
297,18	17,4	17,28	0,69
298,37	17,26	17,22	0,23
300,09	16,96	17,14	-1,06
301,65	16,78	17,06	-1,67



Таблица П.3 – Отклонение экспериментальных данных о теплопроводности текстурированного оптического материала ПО-2 в направлении оси роста поликристалла от рассчитанных по (3).

T, K	$\kappa_{\text{эксп}},$ Вт/(м·К)	$\kappa_{\text{расч}},$ Вт/(м·К)	$\delta\kappa, \%$
82,28	138,27	136,44	1,32
84,38	135,08	133,01	1,53
86,2	131,22	130,10	0,85
88,18	126,21	127,01	-0,63
91,92	120,44	121,36	-0,76
92,48	119,32	120,53	-1,01
95,52	115,13	116,15	-0,88
97,65	111,93	113,17	-1,11
99,96	108,72	110,03	-1,20
106,59	100,07	101,50	-1,43
117,06	88,52	89,45	-1,05
124,46	81,16	81,92	-0,92
128,56	77,11	78,07	-1,24
140,16	68,21	68,39	-0,26
146,26	64,1	63,96	0,21
160,33	55,79	55,31	0,86
167,11	52,51	51,84	1,28
176,12	48,16	47,87	0,60
181,76	46,24	45,72	1,04
187,1	43,97	43,89	0,18
195,6	41,71	41,36	0,84
201,25	40,27	39,91	0,86
209,88	38,15	38,00	0,40
218,33	36,23	36,41	-0,49
226,15	34,6	35,13	-1,54
233,79	33,80	34,01	-0,62
244,19	32,34	32,58	-0,74
253,12	30,98	31,37	-1,03
262,6	29,84	29,98	-0,47
273,89	27,66	28,08	-1,52
286,38	25,24	25,46	-0,87
293,82	23,80	23,55	1,05
295,8	23,12	22,99	0,56
298,72	22,33	22,13	0,90
302,65	21,20	20,87	1,56

Таблица П.4 – Отклонение экспериментальных данных о теплопроводности текстурированного оптического материала ПО-4 в направлении оси роста поликристалла от рассчитанных по (4).

T, K	$\kappa_{\text{эксп}},$ Вт/(м·К)	$\kappa_{\text{расч}},$ Вт/(м·К)	$\delta\kappa, \%$
82,71	93,65	92,58	1,15
86,05	89,75	89,13	0,69
89,86	85,03	85,36	-0,39
94,31	81,06	81,16	-0,12
99,87	75,6	76,22	-0,81
106,02	70,44	71,12	-0,97
112,84	65,18	65,92	-1,14
122,59	58,95	59,26	-0,52
128,10	55,47	55,87	-0,72
134,76	52,2	52,11	0,16
141,50	48,84	48,67	0,34
146,59	46,49	46,30	0,40
153,88	43,51	43,23	0,64
165,90	39,56	38,91	1,63
176,41	36,26	35,82	1,21
186,59	33,56	33,35	0,62
196,02	31,58	31,46	0,39
209,45	29,46	29,29	0,58
218,10	28,43	28,15	1,00
229,62	26,43	26,85	-1,59
238,80	25,71	25,93	-0,84
247,01	24,84	25,13	-1,18
257,39	23,78	24,11	-1,40
268,96	22,57	22,85	-1,26
276,59	21,71	21,90	-0,90
284,89	20,89	20,72	0,81
291,23	19,78	19,68	0,49
297,12	18,74	18,60	0,76
301,44	17,96	17,72	1,34

Таблица П.5 – Отклонение экспериментальных данных о теплопроводности текстурированного оптического материала ПО-4 в направлении перпендикулярном оси роста поликристалла от рассчитанных по (5).

T, K	$K_{\text{эксп}},$ Вт/(м·К)	$K_{\text{расч}},$ Вт/(м·К)	$\delta K, \%$
83,41	81,87	81,08	0,97
86,93	78,48	78,32	0,20
89,72	76,08	76,20	-0,16
92,69	73,77	74,01	-0,32
96,83	71,29	71,06	0,32
106,44	64,22	64,69	-0,73
115,10	58,56	59,47	-1,55
124,11	54,26	54,54	-0,53
136,48	48,09	48,56	-0,99
144,12	45,76	45,29	1,02
152,70	42,05	41,97	0,18
162,01	39,20	38,77	1,10
172,42	35,89	35,63	0,72
181,30	33,75	33,30	1,34
187,33	31,79	31,88	-0,27
197,23	30,15	29,80	1,18
206,18	28,08	28,17	-0,31
215,84	26,65	26,63	0,06
231,58	24,83	24,55	1,13
236,20	23,87	24,02	-0,61
241,73	23,44	23,41	0,12
247,82	22,37	22,78	-1,85
254,19	21,84	22,16	-1,47
264,37	20,96	21,21	-1,18
272,38	20,23	20,47	-1,17
285,13	19,27	19,25	0,08
292,39	18,71	18,52	1,04
296,28	18,26	18,10	0,89
299,74	17,75	17,71	0,21
304,66	17,23	17,14	0,55

Таблица П.6 – Отклонение экспериментальных данных о теплопроводности деформированного оптического материала КО-41 в направлении оси роста поликристалла в процессе осаждения из пара от рассчитанных по (6).

T, K	$K_{\text{эксп}},$ Вт/(м·К)	$K_{\text{расч}},$ Вт/(м·К)	$\delta K, \%$
85,36	85,59	84,85	0,86
90,7	80,3	80,16	0,17
96,65	74,98	75,24	-0,34
103,06	69,93	70,29	-0,51
109,82	65,2	65,44	-0,37
116,95	60,42	60,73	-0,52
123,07	56,53	57,00	-0,84
129,46	53,29	53,40	-0,22
137,05	49,32	49,50	-0,37
143,91	46,56	46,30	0,55
152,6	43,09	42,67	0,97
164,27	38,82	38,47	0,90
175,94	35,27	34,96	0,87
185,72	32,57	32,50	0,22
196,8	30,25	30,15	0,32
208,57	28,2	28,10	0,34
224,19	26,01	25,94	0,27
230,28	24,94	25,23	-1,15
240,58	24,12	24,14	-0,06
240,62	23,98	24,13	-0,63
248,32	23,25	23,38	-0,56
255,38	22,57	22,72	-0,66
264,15	21,73	21,90	-0,77
277,81	20,47	20,54	-0,35
289,42	19,43	19,22	1,07
294,56	18,74	18,57	0,93
298,88	18,08	17,97	0,60
304,03	17,09	17,21	-0,68

Таблица П.7 – Отклонение экспериментальных данных о теплопроводности деформированного оптического материала КО-41 в направлении перпендикулярном оси роста поликристалла в процессе осаждения из пара от рассчитанных по (7).

T, К	$\kappa_{\text{эксп}},$ Вт/(м·К)	$\kappa_{\text{расч}},$ Вт/(м·К)	$\delta\kappa, \%$
82,61	77,89	78,63	-0,95
85,70	75,96	75,78	0,23
87,94	73,21	73,78	-0,78
90,91	72,12	71,22	1,25
94,27	69,33	68,43	1,30
98,10	64,90	65,39	-0,76
103,34	62,07	61,48	0,94
111,95	55,69	55,64	0,08
117,49	52,18	52,25	-0,14
123,99	47,94	48,61	-1,41
135,21	42,85	43,15	-0,71
145,71	38,61	38,90	-0,75
156,20	35,17	35,39	-0,64
164,48	33,24	33,09	0,44
176,52	30,69	30,39	0,96
181,17	29,86	29,53	1,10
193,84	27,79	27,62	0,62
206,21	26,36	26,24	0,45
220,02	25,17	25,12	0,21
235,40	24,01	24,14	-0,54
246,87	23,25	23,45	-0,86
257,12	22,73	22,76	-0,13
268,22	21,83	21,84	-0,04
285,81	19,57	19,77	-1,00
295,40	18,23	18,20	0,17
302,74	16,92	16,74	1,07

Таблица П.8 –. Отклонение экспериментальных данных о теплопроводности текстурированного оптического материала ПО-6 в направлении оси роста поликристалла от рассчитанных по (8).

Т, К	$\kappa_{\text{эксп}},$ Вт/(м·К)	$\kappa_{\text{расч}},$ Вт/(м·К)	$\delta\kappa, \%$
82,31	27,49	27,68	-0,69
85,52	26,82	26,80	0,07
88,97	26,24	25,88	1,37
93,63	24,98	24,69	1,16
97,49	23,98	23,75	0,96
101,07	23,15	22,91	1,04
104,93	21,94	22,04	-0,46
116,51	19,43	19,65	-1,13
121,65	18,46	18,69	-1,24
128,12	17,48	17,56	-0,46
133,71	16,54	16,66	-0,72
137,13	16,07	16,14	-0,43
146,73	14,59	14,79	-1,37
151,21	14,13	14,22	-0,64
157,33	13,39	13,49	-0,75
162,61	12,94	12,92	0,15
166,29	12,60	12,54	0,48
173,3	12,03	11,88	1,25
176,71	11,67	11,58	0,75
182,28	11,23	11,13	0,89
191,05	10,64	10,49	1,41
197,41	10,12	10,08	0,40
201,78	9,96	9,82	1,40
206,76	9,58	9,54	0,42
213,12	9,35	9,22	1,39
219,44	9,03	8,93	1,11
229,24	8,56	8,53	0,35
233,17	8,33	8,38	-0,60
239,42	8,12	8,15	-0,37
253,05	7,62	7,69	-0,92
256,62	7,51	7,58	-0,93
261,63	7,33	7,42	-1,23
268,12	7,19	7,20	-0,14
271,25	7,00	7,10	-1,39
277,33	6,87	6,89	-0,30
286,62	6,47	6,54	-1,08
290,75	6,32	6,37	-0,80
296,21	6,19	6,14	0,81
297,19	6,13	6,09	0,65
302,77	5,91	5,83	1,35
305,81	5,74	5,68	1,04

Таблица П.9 – Отклонение экспериментальных данных о теплопроводности деформированного поликристаллического оптического материала КО-61 в направлении оси роста поликристалла в процессе осаждения из пара от рассчитанных по (9).

T, К	$K_{\text{эксп}},$ Вт/(м·К)	$K_{\text{расч}},$ Вт/(м·К)	$\delta K, \%$
82,14	26,01	25,54	1,81
85,36	24,74	24,73	0,04
87,29	24,03	24,26	-0,96
88,92	24,1	23,87	0,96
92,46	22,98	23,04	-0,27
97,51	21,66	21,92	-1,20
101,41	21,03	21,09	-0,30
107,11	19,78	19,95	-0,86
116,8	18,08	18,19	-0,58
123,25	16,96	17,12	-0,94
129,43	16,11	16,18	-0,43
133,95	15,32	15,54	-1,42
143,02	14,5	14,36	0,94
154,23	13,33	13,10	1,71
165,95	12,06	11,99	0,58
174,51	11,40	11,29	0,96
182,16	10,91	10,74	1,58
189,69	10,37	10,26	1,06
198,92	9,82	9,74	0,81
209,05	9,28	9,24	0,43
222,31	8,64	8,68	-0,48
234,23	8,15	8,24	-1,09
241,4	7,97	7,99	-,025
250,24	7,66	7,68	-0,13
259,03	7,29	7,37	-1,10
267,19	7,02	7,06	-0,57
274,64	6,68	6,77	-1,29
285,24	6,33	6,29	0,58
290,86	5,97	6,01	-0,73
294,71	5,83	5,81	0,37
302,64	5,45	5,35	1,83

## 8. Список литературы

1. Kumta P.N., Risbud S.H. Rare-earth chalcogenides – an emerging class of optical materials // J.of Materials science. 1994. V. 29. N 5. P. 1135-1158.
2. Сеник Б.Н. Применение кристаллов в перспективных разработках гиперспектральных оптических систем// Прикладная физика. 2007. № 3. С. 136-143.
3. Багаев В.С., Галкина Т.И., Шарков А.И., Клоков Ю.В., Мартовицкий В.П., Кривобок В.С., Клевков Ю.В., Черноок С.Г. Рассеяние неравновесных акустических фононов в чистом крупнозернистом ZnSe с микродвойниковой хаотичной структурой // ФТТ. 2007. Т. 49. № 7. С. 1183-1188.
4. Акимов Ю.К., Игнатьев О.В., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике - М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Клевков Ю. В., Колосов С.А., Медведев С.А., Плотников А.В. Электрические и фотоэлектрические свойства текстурированных поликристаллов CdTe // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. №. 10. С. 1192-1196.
6. Хрипунов Г. С., Черных Е.П., Ковтун Н.А., Белоногов Е.К. Гибкие солнечные модули на основе сульфида и теллурида кадмия // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43. №. 8. С. 1084-1089.
7. Slack G.A. Thermal Conductivity of II-VI Compounds and Phonon Scattering by  $\text{Fe}^{2+}$  Impurities // Phys. Rev. B. 1972. V. 6, N 10. P. 3791-3802.
8. Springer Handbook of Electronic and Photonic materials. Editors: Sefa Kasap, Peter Casper, 2006, 1406 p. Springer Science and Media Incorporation. Part B16, pp. 325-342.



9. Лугуева Н.В., Лугуев С.М. Влияние особенностей структуры на теплопроводность поликристаллического сульфида цинка // ФТТ. 2002. Т. 44. № 2. С. 251 -256.
10. Лугуева Н.В., Лугуев С.М. Влияние дефектов структуры на теплопроводность поликристаллов ZnS, ZnSe, CdTe // ТВТ. 2004. Т. 42. №1. С. 58-63.
11. Лугуев С.М., Лугуева Н.В., Батдалов А.Б., Лугуев Т.С. Особенности теплопроводности поликристаллического сульфида цинка // Перспективные материалы. 2012. № 5. С. 34-38.
12. Лугуева Н.В., Крамынина Н.Л., Лугуев С.М. Теплопроводность поликристаллического ZnS при всестороннем сжатии // ФТТ. 2001. Т. 43, № 2. С. 222-225.
13. Лугуева Н.В., Лугуев С.М. Исследование влияния дефектов структуры на теплопроводность поликристаллических образцов ZnS, ZnSe, CdTe // Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. Спецвыпуск. 2002. №10. С. 200-203.
14. Luguev S.M., Lugueva N.V., Batdalov A.B. Thermal conductivity of polycrystalline ZnS, ZnSe, CdTe in the temperature range 4-400 K // Proceedings of Seventeenth European Conference on Thermophysical Properties. Bratislava, 2005. On CD ROM, 13 pp.
15. Лугуева Н.В., Лугуев С.М., Крамынина Н.Л. Температурная и барическая зависимости коэффициента теплопроводности сульфида цинка и их корреляция с параметрами фононного спектра // Fizika (Baki). 2007. V. 13. № 1-2. P. 40-43.
16. Every A.G., Tzou Y., Hasselman D.P.H. Thermal Conductivity of ZnS/Diamond Composites // Technical Reports No 12 for Office of Naval Research. Cornell University Department of Materials Science and Engineering, Ithaca, NY, USA. 1991.

17. Гаджиев Г.Г., Дронова Г.Н. Теплопроводность поликристаллического сульфида цинка // Неорг. материалы. 1983. Т. 7, N 10. С. 1208–1210.
18. Гаджиев Г.Г., Исмаилов Ш.М., Дадашев А.И. Тепловые свойства керамик на основе соединений  $A^{II}B^{VI}$  // ТВТ. 1993. Т.11, N 3. С. 390-394.
19. Лугуева Н.В., Дронова Г.Н., Лугуев С.М. Теплопроводность оптической керамики КО-2. // ОМП. 1983. №10. С. 30-31.
20. [www.elcomltd.spb.ru](http://www.elcomltd.spb.ru). Сайт компании ООО «Электронные компоненты и материалы».
21. [www.nnoptics.ru](http://www.nnoptics.ru) Сайт компании ООО “НН ОПТИКА”. Нижний Новгород, ул. Тропинина, д. 49.
22. The Crystran Handbook of Infra-Red and Ultra-Violet Optical Materials. Ed. by Keith Matthews. Published by Crystran LTD. 2011. P.102-105. ([www.crystran.co.uk/handbook](http://www.crystran.co.uk/handbook)).
23. [www.tydex.ru](http://www.tydex.ru) Сайт компании TYDEX, С.-Петербург.
24. [www.mateck.de](http://www.mateck.de) Сайт компании MaTeck GmbH Компания находится в г. Юлих, Германия.
25. Harris D.C., Baronowski M., Henneman L., LaCroix L., Wilson C., et al. Thermal, structural, and optical properties of Cleartran multispectral zinc sulfide // Opt. Eng. 2008. V.47., N11.114001; <http://dx.doi.org/10.1117/1.3006123>.
26. Development of Zinc Sulfide Seeker Window Material. Final Report. Submitted by Vicus Technologies LLC, Kennebunk, Maine. Submitted to US Army Space & Missile Defense Command. 2005.
27. Мень А.А., Чечельницкий А.З., Соколов В.А., Холодова Л.А. Теплопроводность и коэффициент поглощения селенида цинка в интервале температур 300-580 К // Неорганические материалы. 1974. Т.10. № 3. С. 548-549.

28. Комарь В.К., Мигаль В.П., Чугай О.Н. Аномалии теплопроводности кристаллов селенида цинка, содержащие двумерные дефекты // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. № 1. С. 47-51.
29. [www.optotl.ru](http://www.optotl.ru). Сайт ЗАО «Оптико-технологическая лаборатория» С.-Петербург, Менделеевская ул. Д.9.
30. Лукьянов А.Ю, Ральченко В.Г., Хомич А.В. и др. Измерение оптического поглощения пластин поликристаллического CVD-алмаза фазовым фототермическим методом на длине волны 10.6 мкм // Квантовая электроника. 2008. Т. 38. № 12. С.1171-1178.
31. Sankar N., Ramachandran K. On the thermal and optical properties of ZnSe and doped ZnSe crystals grown by PVT // J. Cryst, Growth. 2003. V. 247, N 1. P. 157-165.
32. Лугуева Н.В., Лугуев С.М., Дунаев А.А. Теплопроводность поликристаллического селенида цинка // ФТТ. 2003. Т. 45. № 3. С. 424-428.
33. Лугуев С.М., Лугуева Н.В., Магомедов М.-Р.М., Дунаев А.А. Теплофизические свойства оптических поликристаллов ZnSe. // Сборник трудов 8 Международной конференции "Прикладная оптика-2008", Том 2. Оптические технологии и материалы. 20-25 октября 2008, СПб, 2008. С. 114-118.
34. Девяткова Е.Д., Смирнов И.А. О температурной зависимости теплового сопротивления некоторых кристаллов вблизи температуры Дебая // ФТТ. 1962. Т. 4, N 9. С. 2507-2513.
35. Holland M.G. Phonon Scattering in Semiconductors from Thermal Conductivity Studies // Phys. Rev. 1964. V. 134, N 2A. P. 471-480.
36. Jouglar J., Hetroit C., Vuillermoz P.L., Triboulet R. Influence of Growth Parameters on CdTe Low Temperature Thermal Conductivity // J. Appl. Phys. 1980. V. 51, N 6. P. 3171-3174.

37. [www.china-raremetal.com/](http://www.china-raremetal.com/) Сайт компании China Rare Metal Materials. Компания находится в провинции Цзянси Китая.
38. [www.reade.com](http://www.reade.com) Сайт компании READE Advanced Materials (США).
39. Лугуева Н.В., Лугуев С.М., Гусейнов А.А. Теплопроводность текстурированного поликристаллического CdTe // Неорганические материалы. 2004. Т. 40. №2. С. 166-172.
40. Лугуева Н.В., Лугуев С.М. Теплопроводность поликристаллических оптических материалов ПО-6 и КО-61 // Прикладная оптика – 2002. Доклады V Международной конференции. С.-Петербург, 2002. С. 120-124.
41. Девяткова Е.Д., Петров А.В., Смирнов И.А., Мойжес Б.Я. Плавленый кварц как образцовый материал при измерении теплопроводности // ФТТ. 1960. Т.2, N 4. С. 738-746.
42. Охотин А.С., Пушкарский А.С., Горбачев В.С. Теплофизические свойства полупроводников. М.: Атомиздат. 1972.
43. Теплопроводность твердых тел. М.: Энергоатомиздат. 1984.
44. Методика ГСССД МЭ 218-2014. Методика экспериментального определения теплопроводности твердых тел в диапазоне температур 80-450 К / С.М. Лугуев, И.А. Смирнов, Н.В. Лугуева; Росс. научно-техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия. М., 2014. 30 с.: М., 2014. 30 с. : Ил.- 5; Табл.- 3; Библиогр. назв. 31. – рус. 27 назв. Деп. в ФГУП “СТАНДАРТИНФОРМ” 31.03.2014, № 912а-2014кк.
45. Петрусевич В.А., Сергеева В.М., Смирнов И.А. О связи тепловых и оптических свойств  $\text{In}_2\text{Te}_3$  // ФТТ. 1960. Т. 2. N 11. С. 2894-2898.
46. Klein C. A., diBenedetto B., Pappis J. ZnS, ZnSe, and ZnS/ZnSe windows: their impact on FLIR system performance // Optical Engineering. 1986. Т. 25. №. 4. С. 254519-254519.
47. Сергеев О.А. Метрологические основы теплофизических измерений / Москва: Издательство стандартов, 1972. 156 с.

48. Мусиенко Т.И., Носов Б.Б., Демиденко А.А., Дунаев А.А., Карпов А.В., Павлова О.П., Шатилова А.В. Однородность поглощения и рассеяния в крупногабаритных пластинах поликристаллического селенида цинка ПО-4 // Сб. тезисов докладов VII Всесоюзного совещания “Кристаллические оптические материалы”. Ленинград, 1989. С. 69-70.
49. Li H. H. Refractive index of ZnS, ZnSe, and ZnTe and its wavelength and temperature derivatives //Journal of physical and chemical reference data. – 1984. – Т. 13. – №. 1. – С. 103-150.
50. Физика и химия соединений  $A^2B^6$ . Под ред. Медведева А.С. - М.: Мир, 624 с.