

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Ордена Ленина Институт общей и неорганической химии
им. Н.С. Курнакова

На правах рукописи

ИЗЮТОВ

АЛЕКСАНДР ДМИТРИЕВИЧ

УСТОЙЧИВОСТЬ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР
В ГОМОЛОГИЧЕСКИХ РЯДАХ ПОЛУПРОВОДНИКИ-МЕТАЛЛ

(02.00.04 - физическая химия)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
химических наук

Москва - 1979



Работа выполнена в Институте общей и неорганической химии им.Н.С.Курнакова АН СССР

Научные руководители:

доктор химических наук, профессор В.Б.Лазарев

доктор химических наук В.А.Шевченко

Официальные оппоненты:

доктор химических наук А.А.Левин

доктор химических наук А.А.Елисеев

Ведущее предприятие: Московский государственный университет, химический факультет

Защита состоится " _____ " _____ 1979 г.

на заседании специализированного Совета К 002.37.02 по химии и технологии неорганических веществ по присуждению ученой степени кандидата химических наук в Институте общей и неорганической химии им.Н.С.Курнакова АН СССР по адресу: г.Москва, Г17071, Ленинский проспект, 31.

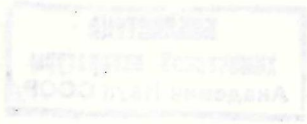
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке химической литературы АН СССР.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1979 г.

Ученый секретарь специализированного Совета,
кандидат химических наук



В.П.Данилов



Общая характеристика работы

Актуальность работы. Одной из фундаментальных проблем физикохимии твердого тела является установление связи между составом, атомной кристаллической структурой вещества и его свойствами.

Кристаллохимия полупроводников решает эти проблемы путем построения кристаллохимической модели полупроводника на основе его кристаллической структуры и представлений о химической связи. Таким образом, возник целый ряд полуэмпирических структурно-валентных правил, на основе которых делаются попытки предсказать полупроводниковые свойства вещества и провести соответствующую классификацию.

Такой подход оказался плодотворным при рассмотрении особенностей реализации полупроводникового состояния во многих известных полупроводниковых веществах.

Большинство работ в указанном направлении были в основном посвящены вопросам кристаллохимии отдельных классов полупроводников и нахождения различных правил, которым подчиняется ближайшая координация атома в кристаллической структуре полупроводника. Однако не существовало представлений о качественных и количественных границах одновременного изменения состава, структуры и свойств вещества при резком, но закономерном изменении состояния вещества под воздействием температуры, давления или изменения состава, что не давало возможности обсудить устойчивость кристаллической структуры. Из-за серьезных теоретических трудностей анализ устойчивости различных кристаллических структур путем расчета полной (свободной) энергии также не представляется сейчас

возможным.

Полученные в последние годы результаты, в частности открытие закономерности морфотропии в гомологических рядах полупроводники-металл, позволяют развить новый подход к этой проблеме.

Цель работы. При анализе структурных изменений в рядах двойных полупроводников типа $Me X_n X_m$, где $n, m = 1, 2, 3$, Me - металл, X - элемент IV, V, VI групп Периодической системы, которые строились путем замены одного из компонентов на его аналог из той же подгруппы Периодической системы, было показано /1/, что для изоструктурных рядов характерны переходы полупроводник-полупроводник и (или) полупроводник-полуметалл, а переходы типа полупроводник-металл при закономерном изменении химического состава характерны для таких рядов, в которых наблюдается явление морфотропии, т.е. резкое, но закономерное изменение кристаллической формы и структуры в зависимости от закономерного изменения химического состава. Переходы типа полупроводник-металл наблюдаются также в результате полиморфных превращений (автоморфотропия), т.е. когда химический состав изменяется.

Выяснение причин, обуславливающих неустойчивость кристаллической структуры при переходе полупроводник-металл в гомологических рядах полупроводников, является основной задачей работы.

Научная новизна. На основе анализа фононных спектров полупроводниковых веществ в изоморфных ($ZnS \rightarrow ZnSe \rightarrow ZnTe$; $ZnTe \rightarrow CdTe \rightarrow HgTe$) и морфотропных ($Si \rightarrow Ge \rightarrow \alpha-Sn \rightarrow Pb$;

$\text{InP} \rightarrow \text{InAs} \rightarrow \text{InSb} \rightarrow \text{InBi}$) гомологических рядах и расчета зонной структуры полупроводников типа $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$, в том числе в зависимости от температуры ($\alpha\text{-Sn}$, GaAs) и давления (Si), показано, что неустойчивости кристаллической структуры в гомологических рядах полупроводники-металл соответствует перекрытие различных щелей запрещенной зоны и понижение ветвей фононного спектра соединений. Направления характерных структурных искажений, происходящих при переходе полупроводник-металл, определенным образом связаны с векторами, соединяющими перекрывающиеся участки валентной зоны и зоны проводимости.

Построена схема взаимосвязи кристаллических структур при морфотропии в гомологических рядах веществ типа $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$. Показано, что морфотропные переходы образуют в основном замкнутую систему структурных переходов.

Практическая ценность. Обнаруженная закономерность морфотропии в гомологических рядах полупроводники-металл /2/ позволяет на новом уровне рассматривать вопросы связи кристаллической структуры и свойств вещества и является основой теории структурной устойчивости при перекрытии щелей запрещенной зоны.

Закономерность морфотропии в совокупности с построенной системой морфотропных переходов может быть использована в работах по прогнозированию кристаллических структур и свойств неизвестных ранее веществ, в частности, полупроводников.

Показано, что гипотетические соединения $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ TiP , AlBi и GaBi могут существовать в кристаллической структуре сфалерита и быть полупроводниками, в то время как TiAs , TiSb , TiBi

и InBi в этой структуре неустойчивы и должны быть металлами.

Создан ряд Алгол-программ для расчета зонной структуры алмазоподобных полупроводников и для проведения математической обработки эмпирических псевдопотенциалов. Получены усредненные псевдопотенциалы элементов Шв и Ув подгруппы Периодической системы, которые могут быть непосредственно использованы в конкретных расчетах.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на Конференциях научных сотрудников и молодых ученых ИОНХ АН СССР 1974, 1975, 1977 и 1978 годов, на двух Всесоюзных конференциях, на заседаниях двух Секций Научных Советов АН СССР, на заседании Президиума АН СССР.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 1 препринт:

Объем работы. Диссертация изложена на 138 страницах машинописного текста, иллюстрирована 20 рисунками и 10 таблицами и состоит из введения, пяти глав, выводов, списка цитируемой литературы, содержащего 162 наименования и двух приложений.

Содержание работы

В первой главе проводится литературный обзор основных положений кристаллохимии и теории твердого тела, относящихся к рассмотрению вопроса устойчивости кристаллических структур в гомологических рядах веществ. Критическое изучение и анализ литературных данных способствовали конкретизации общей задачи диссертации, детальному определению основных подходов к ее решению.

Вторая глава посвящена рассмотрению стабильности структур с точки зрения динамической теории кристаллических решеток. Оценка устойчивости структур на основе расчета полной или свободной энергии, как показал анализ литературных данных, в настоящее время не может быть проведена, поскольку такие оценки носят в лучшем случае качественный характер и представляют интерес в основном с точки зрения развития методов расчета. Однако общие тенденции в изменении устойчивости кристаллических структур в гомологических рядах можно выявить при анализе фононных спектров полупроводниковых кристаллов. Для этого необходимо использовать интегральный критерий неустойчивости решетки, заключающийся в том, что при приближении кристаллической структуры к неустойчивости под влиянием каких-либо факторов частоты колебаний атомов стремятся к нулю, а при наступлении абсолютной неустойчивости становятся мнимыми.

Расчеты фононных спектров ряда ионно-ковалентных соединений $A^N B^{8-N}$ на основе метода псевдопотенциала, выполненные с целью выяснения возможности проведения безпараметрических расчетов, показали серьезные расхождения с экспериментальными данными, что не позволяет надеяться на получение фононных спектров всех членов морфотропных гомологических рядов с точностью, достаточной для проведения оценки устойчивости кристаллической структуры. Тем не менее такая оценка проведена на основе экспериментальных данных по фононным спектрам путем простой перенормировки частот. В изоморфных ($ZnS \rightarrow ZnSe \rightarrow ZnTe$; $ZnTe \rightarrow CdTe \rightarrow HgTe$) и морфотропных ($Si \rightarrow Ge \rightarrow \alpha-Sn \rightarrow Pb$; $InP \rightarrow InAs \rightarrow InSb \rightarrow InBi$) гомологических рядах было получено

монотонное понижение частот большинства ветвей спектра, что указывает на уменьшение устойчивости структуры. Понижение частот фононного спектра в гомологическом ряду $ZnTe \rightarrow CdTe \rightarrow HgTe$ за счет только уменьшения устойчивости сфалеритной структуры показано на рис. I

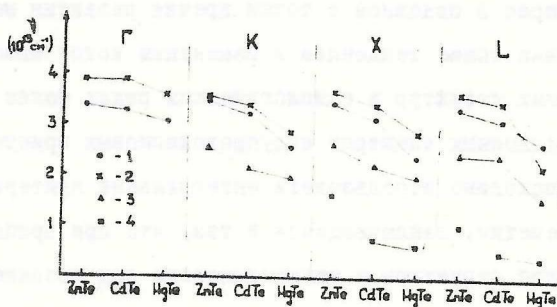


Рис. I Перенормированные частоты колебаний для $ZnTe$, $CdTe$, $HgTe$ в высокосимметричных точках зоны Бриллюэна: 1- L_0 , 2- T_0 , 3- LA , 4- TA .

Имеющиеся экспериментальные данные по исследованию спектров комбинационного рассеяния света 1-го и 2-го порядков для некоторых соединений типа $A^N B^{8-N}$ /3/ подтверждают проведенные оценки.

В третьей главе рассмотрены особенности электронной зонной структуры в гомологических рядах полупроводников. При переходе полупроводник-металл происходит перестройка кристаллической структуры. Поэтому изменения, происходящие в зонной структуре полупроводника, играют определенную роль в структурном

переходе, т.к. они являются прямым результатом изменения взаимодействия между атомами при переходе от полупроводника к металлу.

Конкретные расчеты зонной структуры проводились для элементов IУЪ подгруппы Периодической системы и полупроводников АШВУ, для которых имеется большое число экспериментальных данных и у которых переход полупроводник-металл хорошо изучен.

Основная схема и оригинальная Алгол-программа расчета зонной структуры методом псевдопотенциала приведены в приложении I. Расчет зонной структуры по составленной программе можно проводить для веществ, кристаллизующихся в алмазоподобной, сфалеритной и типа NaCl структурах.

Как для морфотропного, так и для различных полиморфных переходов полупроводник-металл, показано, что неустойчивости кристаллической структуры соответствует перекрытие щелей запрещенной зоны при сохранении четности числа электронов на примитивную ячейку кристалла (табл. I).

В четвертой главе рассматривается задача нахождения характерных структурных искажений, происходящих в морфотропных гомологических рядах полупроводники-металл. Так как неустойчивости структуры соответствует конденсация фононов и перекрытие щелей запрещенной зоны, то наиболее вероятный механизм такого перехода электрон-фононный. Вектор перекрытия зон определяет волновой вектор фонона, который электрон испускает или поглощает при переходе из валентной зоны в зону проводимости. При этом структура перестраивается так, что направление ее характерных искажений определенным образом связано с вектором перекрытия зон, а характер деформации обуславливается видом

Таблица I

Характерные энергетические зазоры (эВ)

Ряд	Соединение	$\Gamma_{25'}-\Gamma_2'$	$\Gamma_{25'}-\Gamma_{15}$	$\Gamma_{25'}-\Gamma_1$	$\Gamma_{25'}-\chi_1$	$L_3'-L_1$	$L_3'-L_3$	$\chi_4-\chi_1$
Морфогрупп-	Si	3,8	3,4	1,9	1,1	3,1	5,2	4,0
ный	Ge	1,2	3,4	0,9	1,0	2,0	5,4	3,8
	α -Sn	-0,1	3,0	0,6	1,1	1,4	4,4	3,1
	Pb	-0,76	2,11	-0,53	-0,18	0,30	3,40	1,80
Морфогрупп-	ZnP	1,6	4,6	2,0	2,3	2,8	6,0	4,2
ный	ZnAs	0,5	4,6	1,6	2,1	2,3	5,7	3,9
	ZnSb	0,6	4,1	1,5	2,0	2,1	5,1	3,5
	ZnBi	-4,81	0,71	-3,71	-2,66	-2,08	2,34	-0,08
Изоморфный	ZnTe	2,5	6,7	3,8	4,0	4,3	7,3	5,2
	CdTe	2,0	6,6	3,5	4,0	3,9	7,0	5,1
	HgTe	0,2	6,2	2,4	3,5	2,5	6,7	4,8

наиболее быстро понижающихся ветвей фононного спектра.

Было проанализировано, например, известное полиморфное превращение кремния под давлением 190 кбар, при котором он переходит из структуры алмаза в структуру типа β -Sn, элементарная ячейка которой представляет сильно сжатую в направлении $[001]$ ячейку алмаза. Одновременно происходит переход из полупроводника в металл. Из расчета методом псевдопотенциала получено, что около 180 кбар происходит перекрытие щели Γ -X, при этом вектор перекрытия зон будет $\vec{q} = \vec{K}_X - \vec{K}_\Gamma = [110] - [111] = [001]$. Как видно, в этом простом случае вектор перекрытия зон просто совпал с направлением характерного структурного искажения при переходе [алмаз] \rightarrow [β -Sn]. Характер деформации подтверждается имеющимися в литературе экспериментальными данными по исследованию спектров комбинационного рассеяния света 1-го и 2-го порядков в Si под давлением /4/, показывающими, что при приближении к неустойчивости структуры типа алмаз и при переходе [алмаз] \rightarrow [β -Sn] происходит смягчение поперечных акустических мод также в точке X.

Следовательно, на основе обнаруженной закономерности морфотропии в гомологических рядах полупроводники-металл /2/ можно последовательно решить задачу о нахождении характерных структурных искажений в морфотропных рядах и при полиморфных превращениях при переходе полупроводник-металл. Общая постановка этой задачи и конкретные пути ее решения также рассмотрены в четвертой главе.

Первой частью этой работы является анализ всех известных

структурных перестроек, происходящих при полиморфных и морфотропных переходах, исходя из принципа минимальных искажений: определение направлений минимального, но дискретного смещения атомов.

Вторая часть работы заключается в расчете зонных структур и фононных спектров в области нарушения устойчивости кристаллической структуры и их совместный анализ. Целесообразно выделить в определенных классах веществ базисные, наиболее устойчивые (высокосимметричные) типы кристаллических структур и определять структурные перестройки, ставя в основу схему взаимосвязи структур.

Такая схема взаимосвязи структур при морфотропных переходах нами построена для соединений типа AX. Показано, что морфотропные переходы образуют в основном замкнутую систему структурных переходов, причем, вообще говоря, различную для соединений на основе s- и p-металлов (рис.2 а) и d- и f-металлов (рис.2 б). В системе морфотропных переходов выделены основные и дополнительные структурные типы. Прослежено взаимное соответствие между системами связей структурных типов соединений состава AX на основе полиморфизма /5/ и морфотропии.

В пятой главе рассматриваются некоторые следствия и возможные области применения закономерности морфотропии в гомологических рядах полупроводники-металлы. Случай полиморфного превращения, не сопровождающийся изменением структурного типа, в то время как постоянные решетки и физико-химические свойства меняются скачкообразно (гомеоморфизм) рассмотрен на примере

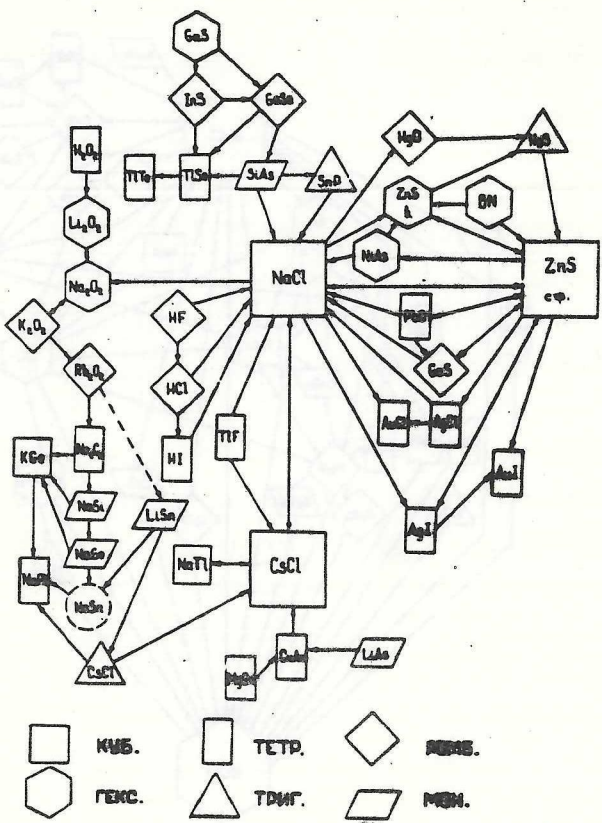


Рис. 2 а. Система морфотропных переходов в гомологических рядах между структурными типами соединений АХ на основе s - и p-металлов.

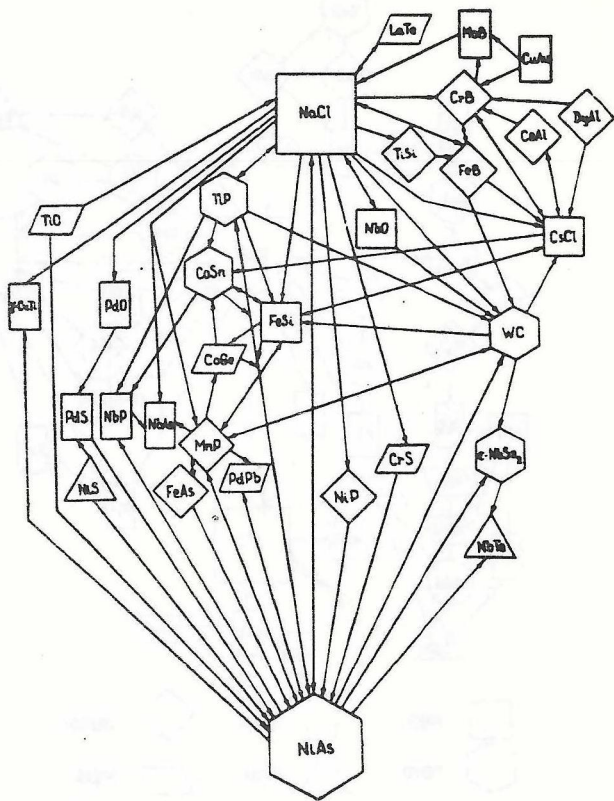


Рис.2 б. Система морфотропных переходов в гомологических рядах между структурными типами соединений AX на основе d- и f-металлов.

монокристаллических р.з.э. У этих соединений переход полупроводник-металл является гомеоморфным полиморфным или морфотропным превращением и происходит при переходе лантаноида из двух- в трехвалентное состояние, что обуславливает и изменение числа валентных электронов на примитивную ячейку. Показано, что эти переходы являются частным случаем обнаруженной закономерности.

На основе выводов, полученных во 2-й, 3-й и 4-й главах, был рассмотрен вопрос об устойчивости гипотетических соединений $A^{III}Bi$ и TlB^{IV} в структуре сфалерита. На основе предварительной математической обработки известных факторов псевдопотенциалов полупроводников $A^{III}B^{IV}$, приведенной в приложении II, была рассчитана зонная структура как известных, так и гипотетических соединений $A^{III}B^{IV}$. Как видно из табл.2, полученные нами значения ширины запрещенной зоны для известных полупроводников $A^{III}B^{IV}$ весьма близки к экспериментальным. Для гипотетических соединений наши данные более близко подходят к данным /7/. Значения ΔE для $TlSb$, $TlBi$ и $ZnBi$ в /6-8/ приняты равными нулю. Значение ΔE для $TlAs$ у нас получилось отрицательным в отличие от работ /6-8/. Для гипотетических соединений $TlSb$, $TlBi$ и $ZnBi$ было получено перекрытие не только прямых, но и не прямых щелей запрещенной зоны, что указывает на неустойчивость кристаллической структуры типа сфалерита для этих соединений.

Характер зонной структуры гипотетических соединений TlP , $AlBi$ и $GaBi$ указывает на принципиальную возможность существования этих соединений со структурой сфалерита. Вероятно, TlP , $AlBi$ и $GaBi$ могут быть получены при существенно

Таблица 2
 Значение ширины запрещенной зоны соединений типа АВ^{III} в центре зоны Бриллюэна

АВ ^{III}	P	As	Sb	Bi
Al	3,6 эксп.	3,28 эксп.	2,46 эксп.	1,88 расч.
	3,54 расч.	3,21 расч.	2,43 расч.	1,30 /7/ 0,7 /8/
Ga	2,8 эксп.	1,5 эксп.	1,0 эксп.	0,75 расч.
	2,84 расч.	1,45 расч.	0,84 расч.	0,55 /7/ 0,25 /8/
In	1,4 эксп.	0,5 эксп.	0,27-0,23 эксп.	-0,94 расч.
	1,42 расч.	0,52 расч.	0,25 расч.	0 /6-8/
Tl	1,00 расч.	-0,21 расч.	-0,63 расч.	-1,59 расч.
	0,92 /7/ 0,5 /6/	0,10 /7/ 0,15 /8/	0 /6-8/	0 /6-8/

неравновесных условиях, например, при быстром охлаждении из расплава, или при ударном сжатии и т.п., и могут существовать в метастабильном состоянии.

Как показывают расчеты у гипотетического соединения $TlAs$ очень мала непрямая щель $\Gamma-L$, поэтому оно, вероятно, не будет устойчивым в структуре сфалерита.

Таким образом, гипотетические соединения TlP , $AlBi$ и $GaBi$ могут существовать в кристаллической структуре сфалерита и быть полупроводниками, в то время как $TlAs$, $TlSb$, $TlBi$ и $InBi$ в этой структуре неустойчивы и должны быть металлами.

В заключении главы кратко обсуждаются возможные области научного и практического использования закономерности морфотропии в гомологических рядах полупроводники-металл.

ВЫВОДЫ

1. На основе проведения конкретных расчетов для ряда характерных примеров показано, что неустойчивости кристаллической структуры при переходе полупроводник-металл как в морфотропных гомологических рядах, так и в случае полиморфизма (автоморфотропии) соответствует перекрытие различных щелей запрещенной зоны при сохранении четности числа электронов на примитивную ячейку кристалла и понижение ветвей фононного спектра соединений.

2. При переходе полупроводник-металл в гомологических рядах полупроводников структура перестраивается так, что направления ее характерных искажений определенным образом связаны с векторами, соединяющими перекрывающиеся участки валентной зоны и зоны проводимости. Характер происходящих при этом деформаций

решетки обуславливается видом наиболее быстро понижающихся ветвей фононного спектра.

3. Показано, что одним из следствий закономерности морфотропии в гомологических рядах полупроводники-металл является возможность построения замкнутой системы структурных переходов при полиморфизме и морфотропии, исходя из принципа минимальных дискретных искажений.

На основе анализа структурных переходов в морфотропных гомологических рядах соединений типа $A^I X$ (X - элемент III в - УП в подгрупп Периодической системы) построена система морфотропных переходов. Показано, что морфотропные переходы образуют в основном замкнутую систему структурных переходов. Прослежено взаимное соответствие между системами связей структурных типов соединений состава $A^I X$ на основе полиморфизма и морфотропии. В системе морфотропных переходов выделены основные и дополнительные базисные структурные типы.

4. При рассмотрении гомологических рядов монохалькогенидов р.з.э. показано, что частным случаем закономерности морфотропии в гомологических рядах полупроводники-металл являются и гомеоморфные полиморфные и морфотропные превращения типа полупроводник-металл.

5. Рассмотрен вопрос устойчивости кристаллической структуры сфалерита у гипотетических соединений $A^III Bi$ и TlB^V . Расчеты зонной структуры этих соединений позволили сделать вывод о том, что гипотетические соединения TlP , $AlBi$ и $GaBi$ могут существовать в кристаллической структуре сфалерита и быть полупроводниками, в то время как $TlAs$, $TlSb$, $TlBi$ и $SnBi$

в этой структуре неустойчивы и должны быть металлами.

6. Создана Алгол-программа расчета зонной структуры алмазоподобных полупроводников и веществ со структурой NaCl по методу псевдопотенциала. На основе ряда разработанных Алгол-программ проведена математическая обработка факторов локальных псевдопотенциалов, использовавшихся в расчетах зонных структур полупроводников $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ по методу эмпирического псевдопотенциала.

Получены усредненные псевдопотенциалы элементов III в и U в подгрупп Периодической системы, которые далее были использованы в ряде конкретных расчетов.

Основное содержание диссертации доложено на ежегодных Конференциях научных сотрудников и молодых ученых ИОНХ АН СССР 1974, 1975, 1977, 1978 гг., I Всесоюзном совещании по неорганической кристаллохимии, Звенигород, 1977 г.; на Всесоюзной конференции по интерметаллическим соединениям, Львов, 1978 г.; на заседании Секции кристаллохимии Научного Совета по химической кинетике и строению АН СССР, 17 июня 1976 г.; на заседании Секции по химии и технологии полупроводников Научного Совета по химии и технологии полупроводников и особо чистых веществ АН СССР, 17 мая, 1976 г.; на заседании Президиума АН СССР 4 ноября, 1977 г.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы: Г. Г. Б. Бокий, В. Б. Лазарев, В. А. Шевченко, А. Д. Изотов, В. Ф. Дворянкин. Устойчивость кристаллических структур в морфотропных и изоморфных рядах некоторых полупроводников, Изв. АН СССР, сер. неорганич. материалы, 12, №7, 1329 (1976).

2. Г.Б.Бокий, В.Ф.Дворянкин, А.Д.Изотов, В.Б.Лазарев, Н.Л.Смирнова, В.Я.Шевченко, Н.В.Белов О структурных переходах при морфотропии в гомологических рядах полупроводников, Кристаллография, 21, №5, 960 (1976).
3. Г.Б.Бокий, В.Б.Лазарев, В.Я.Шевченко, А.Д.Изотов
О гомеоморфных полиморфных и морфотропных превращениях в гомологических рядах полупроводники-металл, Изв.АН СССР, сер.неорган.материалы, 14, №1, 158 (1978).
4. Н.В.Белов, Г.Б.Бокий, В.Б.Лазарев, Н.Л.Смирнова, В.Я.Шевченко, В.Ф.Дворянкин, А.Д.Изотов, А.М.Альтшулер, Ю.Х.Векилов, Г.Р.Умаров Закономерность морфотропии в гомологических рядах полупроводники-металл, Открытие № 196, "Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки". Официальный бюллетень Государственного комитета Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий, №21, 3 (1978).
5. А.Д.Изотов Псевдопотенциалы полупроводников $A^{III}B^V$
Препринт ИОНХ АН СССР, М., 1978.
6. Г.Б.Бокий, А.Д.Изотов, В.Б.Лазарев, Н.Л.Смирнова, В.Я.Шевченко, Н.В.Белов Система морфотропных переходов для соединений типа AX, Кристаллография, 23, №5, 1063 (1978).
7. Г.Б.Бокий, В.Б.Лазарев, В.Я.Шевченко, В.Ф.Дворянкин, А.Д.Изотов, И.А.Антышев Гипотетические соединения $A^{III}B^V$, Изв.АН СССР, сер.неорган.материалы, 14, №11, 1958 (1978).

Цитируемая литература

1. Кристаллохимические проблемы материаловедения полупроводников, Под.ред. Г.Б.Бокия и В.Б.Лазарева, "Наука", М., 1975.

2. Н.В.Белов, Г.Б.Бокий, В.Б.Лазарев, Н.Л.Смирнова, В.Я.Шевченко, В.Ф.Дворянкин, А.Д.Изотов, А.М.Альтшулер, Ю.Х.Векилов, Г.Р.Умаров, Открытие № 196, Официальный бюлл. Гос.комитета СМ СССР по делам изобретений и открытий, №21,3 (1978).
3. B. A. Weinstein. *Sol.Stat.Comm.* 24, 595 (1977).
4. B. A. Weinstein, G. J. Piermarini. *Phys. Rev. B* 12, 1172 (1975).
5. Б.Г.Гранадчикова, Н.Л.Смирнова, Н.В.Белов *ЖСХ*, 14, 321 (1973)
6. Б.Ф.Ормонт *ЖНХ*, 4, 2176 (1959).
7. N. Sclar. *J. Appl. Phys.*, 33, 2999 (1962).
8. С.Д.Громаков *ЖФХ*, X, 1262 (1966).

Т-04351, подл. в печ. 25/1-79г.
Зак. № 1238, тир. 150 ОРТП МИТ