

# МЕЖФАЗНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ГЕТЕРОЭПИТАКСИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ

В. В. Кузнецов, П. П. Москвин

[www.e.lanbook.com](http://www.e.lanbook.com)



**ЭБС  
ЛАНЬ**

ЛАНЬ

0.2

0.4

0.6

0.8

**В. В. КУЗНЕЦОВ,  
П. П. МОСКВИН**

**МЕЖФАЗНЫЕ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ПРИ ГЕТЕРОЭПИТАКСИИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ**

*Монография*



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
МОСКВА · КРАСНОДАР  
2022**

УДК 544  
ББК 24.5я73

**К 89 Кузнецов В. В. Межфазные взаимодействия при гетероэпитаксии полупроводниковых твердых растворов : монография / В. В. Кузнецов, П. П. Москвин. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 376 с. : ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература). — Текст : непосредственный.**

**ISBN 978-5-8114-3809-9**

В книге на основе различных приближений теории регулярных растворов и модели диффузионного массопереноса рассмотрены особенности эпитаксии твердых растворов на основе полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  и  $A^2B^6$ . Проанализировано влияние упругих деформаций на смещение фазовых равновесий в многокомпонентных системах. Изложены методики расчета равновесных и когерентных диаграмм состояния многокомпонентных систем. Дано математическое описание эффекта стабилизации периода решетки и кинетики кристаллизации многокомпонентных твердых растворов. Рассмотрены критические явления и термодинамическая устойчивость подложки в неравновесной жидкой фазе. Особое внимание уделено процессам получения изопериодических гетероструктур на основе четверных и пятерных твердых растворов, которые широко применяются в различных приборах полупроводниковой оптоэлектроники.

Книга адресована студентам вузов, обучающимся по направлениям подготовки и специальностям, входящим в УГСН: «Электроника, радиотехника и системы связи», «Физико-технические науки и технологии», «Химия», «Химические технологии», «Технологии материалов». Также будет полезна для научно-технических работников предприятий электронной промышленности, специалистов в области полупроводникового материаловедения, аспирантов и преподавателей вузов инженерно-физического, химико-технологического и металлургического профилей.

УДК 544  
ББК 24.5я73

**Рецензенты:**

*В. А. МОШНИКОВ* — доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета;

*Н. А. ЧАРЫКОВ* — доктор химических наук, профессор кафедры физической химии Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).

**Обложка**  
*П. И. ПОЛЯКОВА*

© Издательство «Лань», 2022  
© В. В. Кузнецов, П. П. Москвин, 2022  
© Издательство «Лань»,  
художественное оформление, 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	6
Глава 1. Термодинамика гетерогенных равновесий .....	10
1.1. Закономерности изменения свойств в полупроводниковых твердых растворах .....	10
1.2. Термодинамические модели растворов .....	19
1.3. Гетерогенные равновесия в многокомпонентных системах на основе соединений $A^3B^5$ .....	29
1.3.1. Межфазная поверхностная энергия границ раздела фаз .....	40
1.4. Ассоциированные растворы. $p$ - $t$ - $x$ равновесия в полупроводниковых системах $A^2B^6$ .....	47
1.4.1. Термодинамика модели полиассоциированных растворов .....	53
1.4.2. Системы $Hg-Te$ , $Cd-Te$ и $Zn-Te$ .....	58
1.4.3. Тройные системы $Cd-Hg-Te$ и $Zn-Cd-Te$ .....	64
1.5. Особенности термодинамического описания эпитаксии многокомпонентных твердых растворов .....	75
Глава 2. Термодинамическая устойчивость и критические явления .....	89
2.1. Несмешиваемость и спинодальный распад .....	89
2.2. Области неустойчивости в твердых растворах типа $A_xB_yC_{1-x-y}D$ .....	94
2.3. Критерий устойчивости и спинодальные изотермы для твердых растворов типа $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$ .....	98
2.4. Расчет областей несмешиваемости в четверных системах $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$ .....	105
2.5. Когерентная спинопаль и индуцированная устойчивость .....	114
Глава 3. Влияние упругих напряжений на смещение фазовых равновесий в системах твердых растворов .....	126
3.1. Межфазные границы и псевдоморфизм .....	127
3.2. Уравнения состояния упруго-деформированной системы .....	131
3.3. Релаксация упругих напряжений и критические параметры гетероструктур .....	137

3.4. Когерентная диаграмма состояния.....	149
3.5. Эффект стабилизации периода решетки.....	160
Глава 4. Кинетика процессов при жидкостной эпитаксии твердых растворов .....	174
4.1. Диффузионное приближение процессов массопереноса компонентов .....	174
4.2. Кристаллизация эпитаксиальных слоев методом равномерного охлаждения .....	180
4.3. Приближение полного перемешивания жидкой фазы.....	182
4.4. Особенности кристаллизации многокомпонентных твердых растворов .....	187
4.4.1. Кристаллизация твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}$ методом ступенчатого охлаждения.....	187
4.4.2. Кристаллизационные процессы при получении твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ и $InP_xAs_ySb_{1-x-y}$ .....	206
4.4.3. Изотермическая кристаллизация твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ и $Zn_xCd_{1-x}Te$ .....	215
4.4.4. Кристаллизация твердых растворов $Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}$ методом равномерного охлаждения.....	229
4.4.5. Особенности неизотермической кристаллизации твердых растворов системы $A^2B^6$ .....	234
4.4.6. Изотермический рост твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}P_yAs_{1-y}$ из ограниченного объема жидкой фазы.....	239
4.5. Определение коэффициентов диффузии компонентов в жидкой фазе .....	243
Глава 5. Процессы релаксации межфазной границы в неравновесной гетерогенной системе .....	249
5.1. Закономерности образования переходного слоя.....	250
5.2. Термодинамический анализ устойчивости межфазной границы.....	256
5.3. Релаксация гетерогенной системы с формированием пересыщения в жидкой фазе .....	261
5.4. Релаксация гетерогенной системы с образованием новой фазы.....	269
5.5. Модельные представления процессов релаксации .....	276
5.6. Релаксационная изотермическая эпитаксия твердых растворов .....	284
5.7. Эрозия бинарных подложек в многокомпонентной жидкой фазе.....	291

Глава 6. Термодинамика гетероэпитаксии пятикомпонентных твердых растворов $A^3B^5$ .....	298
6.1. Особенности термодинамического описания диаграмм состояния пятикомпонентных систем $A^3B^5$ .....	301
6.2. Фрагменты диаграмм состояния пятикомпонентных полупроводников систем $A^3B^5$ .....	307
6.2.1. Система $Ga-In-P-As-Sb$ .....	309
6.2.2. Система $Al-Ga-In-As-Sb$ .....	313
6.2.3. Особенности фазовых равновесий и эффект снижения температуры плавления в четверных и пятерных системах $A^3B^5$ .....	316
6.3. Термодинамическая устойчивость пятикомпонентных твердых растворов $A^3B^5$ .....	323
6.3.1. Бинодали несмешиваемости пятикомпонентных твердых растворов .....	333
6.4. Когерентная диаграмма состояния и эффект стабилизации периода решетки .....	339
6.4.1. Индуцированная устойчивость и когерентная спинопаль для пятикомпонентных твердых растворов.....	355
Литература.....	360