

**В.Б. Молодкин, А.П. Шпак  
А.А. Дышеков, Ю.П. Хапачев**

---

**ДИНАМИЧЕСКОЕ РАССЕЯНИЕ  
РЕНТГЕНОВСКОГО И СИНХРОТРОННОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЕРХРЕШЕТКАХ**

**РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННАЯ  
КРИСТАЛЛООПТИКА СВЕРХРЕШЕТОК**

---

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ МЕТАЛЛОФИЗИКИ  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
КАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

В.Б. МОЛОДКИН, А.П. ШПАК  
А.А. ДЫШЕКОВ, Ю.П. ХАПАЧЕВ

**ДИНАМИЧЕСКОЕ РАССЕЯНИЕ  
РЕНТГЕНОВСКОГО И СИНХРОТРОННОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЕРХРЕШЕТКАХ  
РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННАЯ  
КРИСТАЛЛООПТИКА СВЕРХРЕШЕТОК**

КИЕВ

«АКАДЕМПЕРИОДИКА»

2004

УДК 535-34  
ББК 22.346  
Д 466

**Динамическое рассеяние рентгеновского и синхротронного излучения в сверхрешетках. Рентгенодифракционная кристаллооптика сверхрешеток.** Молодкин В.Б., Шпак А.П., Дышеков А.А., Хапачев Ю.П. — К.: Академперіодика, 2004. — 121 с.

В книге проведено обсуждение работ в области динамического рассеяния рентгеновского диапазона длин волн в гетерозипитаксиальных и акустических сверхрешетках. Рассмотрены основные подходы к описанию динамической дифракции в металлических и полупроводниковых сверхрешетках. Специальное внимание уделено формализму зон устойчивых и неустойчивых решений системы уравнений Такаги для сверхрешеток. Данный формализм основан на методах качественной теории дифференциальных уравнений.

Изложены общие качественные подходы к анализу особенностей дифракции в сверхрешетках различных моделей, которые основаны на концепции единой параметризации характеристик сверхрешетки и волнового поля. Формализм зонных диаграмм классифицировать параметры теории динамической дифракции в сверхрешетках на «внешние» и «внутренние».

Развитый формализм позволяет определять структурные характеристики сверхрешетки по виду кривой дифракционного отражения.

Табл. 3. Ил. 10. Библиогр.: 116 назв.

ISBN 966-8002-77-6

© В.Б. Молодкин, А.П. Шпак,  
А.А. Дышеков, Ю.П. Хапачев, 2004

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
Введение.....	10
Глава I. Распространение волн рентгеновского диапазона в периодических структурах	
1.1. Кристаллические структуры с периодическим полем деформаций.....	14
1.2. Общие закономерности рентгеновской дифракции в кристаллах со сверхпериодом.....	18
1.3. Математические аспекты динамического рассеяния в сверхрешетках.....	22
1.4. Уравнение Матье как первое приближение динамической теории дифракции от СР. Влияние структурных параметров на характеристики КДО от СР.....	35
1.5. Кинематическая теория дифракции в сверхрешетках.....	45
Глава II. Динамическая дифракция в периодических структурах	
2.1. Концепция единой параметризации в проблеме описания динамической дифракции в сверхрешетках. Параметр когерентности сверхрешетки.....	55
2.2. Параметр когерентности сверхрешетки.....	58
2.3. Метод зонных диаграмм при динамической теории дифракции в сверхрешетке.....	61
2.4. Влияние градиента деформации между слоями сверхрешеток на динамические эффекты рентгеновской дифракции.....	64
2.5. Динамическое рассеяние рентгеновских лучей в сверхрешетке с разными толщинами слоев в периоде.....	68

2.6. Динамическая рентгеновская дифракция в сверхрешетках с различным градиентом деформации в переходной области.....	77
2.7. Особенности дифракции в кристаллах с переменным градиентом деформации, следующие из характеров решений уравнений Такаги. Структура с периодическим полем деформации.....	82
Заключение.....	91
Литература.....	107

## Предисловие

Представленная монография посвящена последовательному изложению и развитию теории рентгеновской дифракционной кристаллооптики в особом виде полупроводниковых гетероструктурах — кристаллических структурах с периодическим градиентом деформации, называемых сверхрешетками.

Стремительный прогресс микроэлектроники и оптоэлектроники, свидетелями которого мы являемся, в значительной степени обусловлен успехами в области создания многослойных кристаллических систем с высокой степенью структурного совершенства. Это обстоятельство повлекло за собой бурное развитие техники рентгенодифракционного эксперимента, значительно повысившего возможности исследования неразрушающим способом состава и структуры кристалла в тонких приповерхностных областях (единицы и доли микрометров). Разумеется, такая ситуация влечет за собой соответствующее развитие теоретических представлений, связанных с проблемой динамического рассеяния рентгеновских лучей в неоднородно деформированном по глубине кристалле. Однако теоретическое рассмотрение ограничивалось до настоящего времени достаточно простыми моделями идеального кристалла и кристалла с постоянным градиентом деформации.

Вместе с тем ясно, что подобные приближения не отражают реальное распределение деформаций в реальных эпитаксиальных композициях и зачастую могут приводить к неверной интерпретации экспериментальных данных. Таким образом, логика развития дифракционной рентгеновской кристаллооптики с неизбежностью приводит к острой необходимости рассмотрения задач

динамической теории дифракции для более общего класса структур с переменным градиентом деформации.

При этом представляется важным из необозримого числа возможных вариантов выделить, во-первых, модели, соответствующие реальным искажениям кристаллической решетки, и, во-вторых, обладающих некоторыми общими свойствами. Последнее позволяет, в частности, проводить определенные аналогии, а также экстраполировать получаемые закономерности на подобные модели, для которых решение неизвестно.

В связи с этим представляется естественным выбор авторами книги для теоретического рассмотрения регулярных пространственно периодических структур - сверхрешеток (в том числе с тонкими переходными слоями).

Следует отметить, что существующие монографии (В.И.Иверонова, Г.П.Ревкевич (1978), З.Г.Пинскер (1974), Л.И.Даценко, В.Б. Молодкин, М.Е. Осинковский ((1988), А.М. Афанасев, П.А. Александров, Р.М. Имамов (1989), Э.В.Суворов (1999)) и учебные пособия (А.В.Колпаков (1988, 1989, МГУ), В.А.Бушуев, Р.Н.Кузьмин (1990, МГУ)) посвящены лишь вопросам рентгеновской дифракции в идеальных кристаллах и в кристаллах с однородным распределением дефектов. Они в значительной степени устарели и совершенно не отражают современное состояние рентгеновской науки. Выход в свет рецензируемой книги существенно исправит положение и будет полезен как для научных сотрудников, так и для аспирантов и студентов, которые специализируются в области рентгеновской диагностики современных полупроводниковых материалов.

В области динамической теории дифракции в сверхрешетках авторами развивается формализм зонных диаграмм, идея которого впервые была выдвинута еще в 1977 г.

аспирантом кафедры физики твердого тела МГУ Ю.П.Хапачевым, нынешним соавтором данной книги. Этот формализм базируется на анализе качественных особенностей поведения решений уравнений Такаги для периодического профиля деформации. В рамках данного направления для гармонической сверхрешетки был получен ряд принципиальных теоретических результатов, подтвержденных впоследствии экспериментально И.Р.Энтиным (ИФТТ, Черноголовка). Однако обобщение этого подхода как на более сложные модели сверхрешеток, так и с целью более точного описания процессов когерентного взаимодействия рентгеновского излучения со сверхрешеткой наталкивается на проблему выбора параметра, наиболее адекватно связывающего структурные характеристики и дифракционные условия.

В книге излагается решение этой проблемы, для чего ее авторам понадобилось привлечь как общие физические принципы когерентного рассеяния рентгеновского излучения в сверхрешетках, так и специальные математические методы. В результате такого анализа в теории введена новая физическая величина, ответственная за качественные особенности формирования единого волнового поля в сверхрешетке, — "параметр когерентности". Рассмотрение метода зонных диаграмм с наиболее общих позиций позволило провести разделение характеристик поля деформации сверхрешетки на так называемые "внешние" и "внутренние" параметры.

"Внешние" параметры отвечают за общие структурные характеристики сверхрешетки — амплитуду и период. В частности, важнейшая "внешняя" характеристика — "параметр когерентности" — выражается именно через эти величины. "Внутренние" параметры связаны со специфиче-

скими особенностями конкретной модели сверхрешетки. Как показано в книге, "внутренние" параметры могут служить критерием характера дифракционного рассеяния. Например, параметр "степень динамичности" дает количественную характеристику степени отклонения от кинематического характера рассеяния в зависимости от величины переходной области между слоями сверхрешетки. Тем самым появляется возможность оценки степени размытия интерфейса по данным рентгеновской дифракции от сверхрешетки.

Общие подходы метода зонных диаграмм применены для анализа динамической дифракции в различных моделях сверхрешетки. Показано, что строгий учет динамического характера рассеяния приводит к результатам, принципиально отличающимся от выводов кинематической теории. В этой связи особенно важен полученный в работе вывод о том, что наглядное представление о сверхрешетке как об идеальном кристалле с макроэлементарной ячейкой с параметром, равным периоду сверхрешетки, не может быть непосредственно распространено на случай динамической дифракции.

Весьма интересным представляется результат, полученный для квантоворазмерной сверхрешетки, в которой толщина одного из слоев в периоде много меньше толщин других слоев. Влияние динамических эффектов в этом случае приводит к тому, что угловые ширины сателлитов на кривых дифракционного отражения определяются уже не особенностями модели, а размерными эффектами — отношением толщин слоев в периоде сверхрешетки.

С учетом того, что в области динамической теории дифракции рентгеновских лучей для сверхрешеток, несмотря на обилие работ других авторов, так и не были найдены и обоснованы общие физические принципы коге-

рентного взаимодействия волны со сверхструктурой, можно констатировать следующее: изложенные в книге результаты в целом отражают современное состояние рентгеновской дифракционной оптики кристаллических структур с периодическим градиентом деформации.

Основные результаты книги были апробированы на специализированных отечественных и международных конференциях, докладывались на семинаре лаборатории кафедры физики твердого тела физического факультета МГУ, и опубликованы в ряде работ, включая ведущие научные журналы. В книге частично представлены результаты авторов из защищенных ими докторских диссертаций (Ю.П. Хапачева (1990 г.), А.А. Дышекова (2000 г.)).

В целом книга написана на высоком научном и методическом уровне, рисунки и таблицы хорошо и наглядно иллюстрируют основные теоретические результаты и выводы. Данная монография, может быть рекомендована в качестве учебного пособия для студентов и аспирантов, специализирующихся по направлению "Физика конденсированного состояния", и конкретно, в области теории рентгеновской дифракции в гетероструктурах.

Профессор кафедры физики твердого тела  
физического факультета МГУ  
доктор физ.-мат. наук  
В.А. Бушуев

Зав.кафедрой кафедры физики твердого тела  
физического факультета МГУ, профессор,  
доктор физ.-мат. Наук  
А.С. Илюшин

*Наукове видання*

МОЛОДКІН Вадим Борисович  
ШПАК Анатолій Петрович  
ДИШЕКОВ Артур Альбекович  
ХАПАЧЄВ Юрій Шиканович

**ДИНАМІЧНЕ РОЗСІЯННЯ РЕНТГЕНІВСЬКОГО  
ТА СИНХРОТРОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ  
У НАДГРАТНИЦЯХ  
РЕНТГЕНОДИФРАКЦІЙНА  
КРИСТАЛООПТИКА НАДГРАНИЦЬ**

*(російською мовою)*

Видавничий дім "Академперіодика" НАН України  
01004, Київ-4, вул. Терещенківська, 4.  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів  
видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

Підп. До друку 22.12.2003. Формат 60x84/16.  
Папір офсетний. Друк різнографічний.  
Ум.-друк.арк. 6,92. Обл.-вид.арк. 5,62.  
Наклад 300. Зам. 1016.

Друкарня Видавничого дому "Академперіодика" НАН України  
01004, Київ-4, вул. Терещенківська, 4.