

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Кожевникова Игоря Викторовича

«Теория дифракции рентгеновского излучения от неоднородных слоистых сред»

представленную на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

по специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния»

Среди многочисленных направлений в исследовании структуры вещества наиболее перспективными является методы, основанные на рассеянии рентгеновского и синхротронного излучений, включая жесткий, мягкий и экстремальный ультрафиолетовый диапазон частот. Эти методы являются неразрушающими и позволяют с достаточной точностью определять морфологические особенности поверхности образцов и гетерограниц, толщины слоев и электронную плотность тонких пленок в системе чередующихся материалов разного химического состава, структурные характеристики латеральных решеток и т.д. В зависимости от технологических условий при создании гладких и рельефных поверхностей, формировании самоорганизованных наноструктурированных сред или напылении ультратонких слоев практически всегда возникают структурные и композиционные нарушения (дефекты), требующие неразрушающего экспрессного контроля. Следует отметить, что приборная база высокоразрешающей рентгеновской рефлектометрии и дифрактометрии непрерывно развивается, появляются новые светосильные источники и элементы рентгеновской оптики для управления рентгеновскими пучками, что, несомненно, стимулирует проведение экспериментальных исследований на более высоком уровне. Однако новые экспериментальные результаты требуют адекватной физической интерпретации и соответствующего количественного анализа. В свою очередь, все это непрерывно связано с развитием сопутствующих теорий, выбором моделей и численных расчетов. Поэтому диссертационная работа И.В. Кожевникова, посвященная развитию теории, численному моделированию и решению обратных задач рентгеновского рассеяния от неоднородных слоистых сред является весьма актуальной и своевременной.

Достоверность и обоснованность полученных в работе соискателя результатов и выводов подтверждается выбором физически обоснованных моделей, сопоставлением полученных результатов с экспериментальными данными и с теоретическими результатами других авторов.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе И.В. Кожевникова, определяется впервые представленными теоретическими исследованиями процессов рентгеновского рассеяния от шероховатых слоисто-неоднородных сред, а именно:

- Впервые теория возмущений по высоте шероховатостей, позволяющая однозначно определять характеристики поверхности (PSD-функцию), применена для анализа экспериментальных данных.

- Предложен и реализован оригинальный подход определения скэйлинговых экспонент по in-situ измерениям рентгеновского рассеяния от растущих поверхностей.
- Впервые получено точное решение фазовой проблемы в in-situ рентгеновской рефлектометрии растущих слоистых структур.
- Разработан самосогласованный метод для исследования структурных параметров тонкопленочных покрытий. Метод позволяет одновременно определить как профиль диэлектрической проницаемости по глубине, так и PSD-функции шероховатостей.
- Впервые предложен и реализован новый подход к обратной задаче синтеза широкополосных многослойных рентгеновских зеркал с использованием аналитического решения и численных расчетов.
- Разработана теория дифракции мягкого рентгеновского излучения от латерально-периодических многослойных структур. Детально исследован одномодовый режим, при котором отсутствует связь между различными дифракционными порядками.

Практическая значимость работы неразрывно связана с поиском и реализацией подходов количественного анализа сложных структурированных сред по данным эксперимента. Несомненной заслугой И.В. Кожевникова является разработка методов решения обратных задач рентгеновского рассеяния без привлечения априорной информации о внутреннем строении исследуемых объектов. Кроме того, разработаны уникальные методы неразрушающего рентгеновского контроля (in-situ исследования) процессов роста и ионного травления пленок ряда перспективных материалов. Особо хочется отметить сформулированные подходы к конструированию широкополосных многослойных зеркал, основанные на комбинации аналитического решения и численных расчетов, которые позволяют оптимизировать строение многослойных интерференционных структур для любого спектрального или углового профиля кривой отражения. В частности, такие градиентные системы широко применяются для управления пучками синхротронного излучения, увеличения эффективности рентгеновских трубок и в ЭУФ литографии. Большое практическое значение имеет разработанный соискателем программный продукт, позволяющий проводить численные расчеты практически по всем задачам, представленным в диссертации.

Значительная часть результатов, представленных в диссертации, была получена в рамках проектов РФФИ и Международного научно-технического центра, в которых соискатель был руководителем.

Результаты диссертационной работы И.В. Кожевникова используются и могут быть использованы в монографиях и учебных пособиях, а также в учебных и научных организациях, в частности, в Институте кристаллографии РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, Институте физики микроструктур РАН (Н. Новгород), на физических факультетах Московского и Санкт-Петербургского уни-

верситетов, в Европейском центре синхротронных исследований (Гренобль, Франция), Институте прикладной оптики и точной механики (Йена, Германия) и др.

Диссертация состоит из введения, трех оригинальных глав, заключения в виде перечня основных результатов и выводов, списка литературы из 63 работ соискателя и 225 наименований работ других авторов. Объем диссертации составляет 356 страниц, в том числе 168 рисунков и 11 таблиц. Обращает на себя внимание отсутствие единого литературного обзора, присущего традиционной структуре диссертации. Историческая иерархия развития данного физического направления и сопутствующие этому направлению цитируемые работы размещены в оригинальных главах диссертации.

Во введении дается краткая справка об актуальности темы диссертации, сформулированы цели, научная новизна и практическая значимость исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также изложена аннотация работы.

Первая глава посвящена исследованию разных аспектов рассеяния рентгеновских лучей от шероховатых слоисто-неоднородных сред. Соискатель обобщил оптическую теорему рентгеновского рассеяния от шероховатой слоисто-неоднородной среды. Им доказано, что при определенных условиях борновское приближение для искаженных (возмущенных) волн (*distorted-wave Born approximation, DWBA*) и теория возмущений по высоте шероховатостей обеспечивают строгое выполнение закона сохранения энергии для непоглощающей среды. Более того, И.В. Кожевниковым получено выражение для индикатрисы рассеяния от шероховатой поверхности в рамках строгого DWBA приближения без упрощений структуры поля невозмущенной волны вблизи поверхности. Далее, в работе установлено, что в случае малого радиуса корреляции шероховатостей фактор Нево-Кроса справедлив только для нормального распределения высот поверхностного рельефа. При отклонении от гауссова распределения формула Нево-Кроса не описывает коэффициент отражения вне области ПВО. Кроме того, выполненный соискателем анализ рентгеновского рассеяния при предельно малых углах скольжения показал, что этот случай не может быть описан ни фактором Дебая-Валлера, ни фактором Нево-Кроса.

В рамках теории возмущений И.В. Кожевниковым проанализированы особенности рентгеновского рассеяния от шероховатой периодической многослойной структуры. В отличие от известных результатов им получены компактные выражения, описывающие угловое распределение рентгеновского рассеяния в условиях линейной модели роста пленок. Полученные формулы описывают все особенности рассеяния от многослойных структур, в частности весьма важный процесс формирования квази-брэгговских максимумов за счет интерференцией волн, рассеянных от межслойных границ с коррелированными шероховатостями.

Важным результатом диссертационной работы является разработка методов определения характеристик шероховатости в *in-situ* рефлектометрии растущих поверхностей без априорной информации о ростовом процессе. Можно выделить оп-

