



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»
(НИТУ «МИСИС»)

119049, Москва, Ленинский проспект, 4
Тел. +7 (495) 955-00-32; Факс: +7 (499) 236-21-05

<http://www.misis.ru>

E-mail: kancela@misis.ru

ОКПО 02066500 ОГРН 1027739439749
ИНН/КПП 7706019535/ 770601001

№ _____

На № _____

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке и инновациям
НИТУ «МИСИС» проф. Филонов М.Р.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Игоря Викторовича Кожевникова «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»

Диссертационная работа И.В. Кожевникова посвящена развитию теории дифракции рентгеновского излучения (РИ) от слоисто-неоднородных шероховатых сред и разработке на этой основе новых подходов к решению обратных задач рентгеновской рефлектометрии и многослойной рентгеновской оптики. Актуальность работы обусловлена все более широким применением слоистых структур в нанотехнологиях и современной рентгеновской оптике, что требует разработки соответствующих методик их исследования и оптимизации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, основных результатов и выводов. Общий объем диссертации составляет 356 страниц, включая 168 рисунков, 11 таблиц, список литературы из 225 наименований и список публикаций автора по теме диссертации из 63 наименований.

Во введении дается обоснование актуальности выбранной темы, сформулированы цели и задачи работы, показаны научная новизна и практическая ценность работы.

В начале каждой главы приводится обзор той или иной проблемы современной рентгеновской оптики и более детально поясняется актуальность и важность исследований, проведенных в диссертации. В конце каждой главы приводится сводка основных полученных результатов.

В первой главе диссертации построена последовательная теория отражения РИ от шероховатых сред, которая объясняет все наблюдаемые в эксперименте особенности дифракции РИ от слабо шероховатых поверхностей и позволяет предсказать новые физические явления. В частности, показано, что при предельно малых углах скольжения, ни фактор Дебая-Валлера, ни фактор Нево-Кроса, хорошо известные в литературе, не являются справедливыми. Разработаны методики определения статистических параметров шероховатости поверхностей и скрытых границ разделов (PSD-функций), включая кросс-корреляционные PSD-функции непосредственно из набора индикаторов рассеяния, не используя никаких априорных предположений ни о виде корреляционной функции, характеризующей рельеф поверхности, ни о функции распределения высот шероховатостей. Это обстоятельство принципиальным образом отличает подход, используемый в работе И.В. Кожевникова, от всех, описанных в литературе.

Появление синхротронных источников третьего поколения сделало возможным исследовать изменение морфологии поверхности *in-situ*. Ясно, что подобные исследования позволяют получить несравненно больший объем информации об объекте, если разработаны соответствующие методы ее извлечения из экспериментальных данных. Это тоже было сделано в диссертации И.В. Кожевникова. Среди интересных результатов работы отметим обоснование возможности однозначного определения двух PSD-функций из одной индикаторы рассеяния, методы определения скэйлинговых экспонент, характеризующих эволюцию поверхности в пространстве и времени, и однозначное разделение шероховатости растущей пленки на две компоненты, одна из которых определяется шероховатостью исходной подложки, а вторая – случайным характером процесса роста.

Вторая глава посвящена разработке новых подходов к решению обратных задач рефлектометрии. Прежде всего, разработан оригинальный модельно независимый метод решения проблемы реконструкции профиля диэлектрической проницаемости $\epsilon(z)$ из измеренной угловой зависимости коэффициента отражения. В отличие от подходов, описанных в литературе, подход И.В. Кожевникова основан на моделировании амплитудного коэффициента отражения в области больших углов скольжения, а не на моделировании самой функции $\epsilon(z)$. Такое моделирование оказывается возможным при единственном предположении, что или сама функция $\epsilon(z)$, или какая-то ее производная испытывает скачкообразное изменение в некоторых точках. Подход был успешно применен на практике для исследования целого ряда пленочных покрытий и приповерхностных слоев.

Найдено точное решение фазовой проблемы применительно к *in-situ* рентгеновской рефлектометрии растущих слоистых структур. Доказано следующее утверждение: если в какой-то момент времени t известен коэффициент отражения и его производная по времени, то и вещественная, и мнимая части амплитудного коэффициента отражения в этот же момент времени находятся однозначно. В отличие от методов, обсуждавшихся в литературе, подход И.В. Кожевникова применим для поглощающих сред и не требует знания предыстории роста структуры.

Разработан самосогласованный модельно независимый подход к исследованию трехмерной структуры слоистых сред, который позволяет реконструировать профиль диэлектрической проницаемости и определить статистические параметры шероховатостей на основе одновременного анализа кривой отражения и набора индикаторов рассеяния, измеренных при разных углах скольжения зондирующего пучка, без каких-либо или, по крайней мере, при минимальных априорных предположениях об исследуемом объекте. Подобного подхода в литературе еще не было описано.

Наконец, продемонстрирована интересная и перспективная возможность восстановления профилей концентраций химических элементов, составляющих образец, а не только профиля диэлектрической проницаемости на фиксированной длине волны. Метод основан на одновременном анализе набора кривых отражения, измеренных в зависимости от угла скольжения мягкого рентгеновского излучения при различных энергиях фотонов, лежащих между краями поглощения элементов.

В третьей главе рассматривается отражение РИ от апериодических и ламеллярных многослойных структур. Прежде всего, разработана теория отражения РИ от произвольной многослойной структуры с монотонно изменяющимся периодом. На основе этой теории разработан новый подход к решению обратной задачи синтеза широкополосных многослойных зеркал рентгеновского диапазона, основанный на комбинации аналитического и численного расчетов. Задача синтеза состоит в определении последовательности толщин слоев, составляющих МИС, которая обеспечивает наперед заданную спектральную или угловую зависимость коэффициента отражения либо максимально возможный интегральный коэффициент отражения с учетом функции источника. Получена аналитическая итерационная процедура, позволяющая определить необходимое распределение толщины слоев МИС по глубине, которое затем уточняется прямой компьютерной оптимизацией. Аналитическое решение оказалось очень хорошим начальным приближением даже в случае сложного профиля кривой отражения. На основе полученных результатов рассмотрены особенности конструкций широкополосных зеркал

для управления пучками СИ, ЭУФ литографии и зеркал Гёбеля для увеличения эффективности использования излучения точечных источников.

На основе метода связанных волн была проанализирована дифракция РИ от ламеллярных многослойных решеток. Был идентифицирован одномодовый режим работы ламеллярных структур, когда падающая волна эффективно возбуждает лишь один дифракционный порядок. Найдено аналитическое выражение для коэффициента отражения и эффективности дифракции одномодовой ламеллярной структуры. Полученные результаты позволили И.В. Кожевникову разработать простой аналитический метод оптимизации параметров ламеллярных структур, т.е. решить проблему, о сложности которой неоднократно упоминалось в литературе.

Достоверность предложенных методов и решений подтверждается сравнением с результатами, полученными другими теоретическими методами, а также экспериментально.

Личный вклад И.В. Кожевникова состоит в постановке задач, разработке теоретических подходов и программного обеспечения для расчетов, проведения модельных расчетов и анализе результатов экспериментов. Результаты, полученные совместно с другими учеными, перечислены во Введении к диссертации. Существенная часть представляемой работы была выполнена в рамках проектов, поддержанных РФФИ (гранты 93-02-3254, 97-02-17870, 03-0239000) и Международным научно-техническим центром (гранты ISTC 139-95, 1051-99, 3124-06), в которых автор являлся руководителем.

Практическая ценность работы заключается в том, что подходы и методы, разработанные И.В. Кожевниковым, могут быть непосредственно использованы в задачах исследования внутренней структуры материалов методами рентгеновской рефлектометрии, а также для оптимизации параметров многослойных и ламеллярных структур, используемых в рентгеновской оптике. Результаты работы могут быть использованы в МИЭМ, МИСиС, ИПТМ РАН, ИФМ РАН, НПО «ОПТИКА», НПО «САПФИР», НПО «АСТОРФИЗИКА» и ряде других предприятий. Отметим, что разработанные в диссертации методы и подходы уже в течение многих лет активно используются в целом ряде ведущих научных центров в России и за рубежом.

Материалы работы опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах, апробированы на многочисленных российских и международных

конференциях и хорошо известны специалистам , работающим в области применения рентгенодифракционных методов изучения структуры поверхности материалов,

Некоторые из результатов, полученных в диссертации, были представлены на конкурсе научных работ Института кристаллографии РАН в 2012 г., где были отмечены 1-й премией.

Автореферат и публикации полностью отражает содержание диссертации.

Замечания и вопросы

1. Разработанный автором модельно независимый подход для решения обратной задачи рефлектометрии предполагает отсутствие поглощения излучения в веществе. Ясно, что это предположение существенно ограничивает возможности применения подхода для "толстых" образцов. Имеются ли перспективы обобщения подхода с тем, чтобы принять во внимание эффекты поглощения? Это хорошо было бы включить в работу.
2. Каковы ограничения модельного подхода, в котором обратная задача решается на основе той или иной модели ,отражающей среды с каким-то набором подгоночных параметров и в которой эффекты поглощения могут быть учтены точно?
3. Автор использует термин "ламеллярная структура" для обозначения дифракционных решеток на основе многослойных структур с периодически протравленными вдоль поверхности штрихами. Насколько этот термин является употребительным и устоявшимся в литературе?

Эти замечания, однако, не снижают ценности рецензируемой работы. Совокупность результатов диссертации можно охарактеризовать как научное направление , заключающееся в превращении методов рентгеновской рефлектометрии из подгоночных, основанных на той или иной модели объекта, в аналитический инструмент, позволяющий исследовать внутреннюю структуру слоистых сред безо всяких или, по крайней мере, с минимальными априорными предположениями, а также оптимизировать параметры многослойных структур для задач рентгеновской оптики на основе ясных и простых физических представлений, а не на переборе огромного числа возможных вариантов.

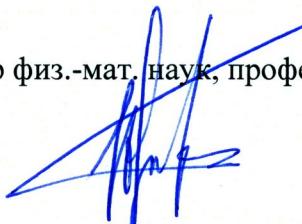
Диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния», а ее автор заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертационная работа И.В. Кожевникова «Теория дифракции рентгеновского излучения от неоднородных слоистых сред», заслушана и обсуждена на заседании семинара кафедры «Материаловедения полупроводников и диэлектриков» «Национального исследовательского технологического университета, "МИСиС"», протокол № 1/ 14 от 23.01. 2014 года.

Отзыв составили проф, д ф-м н Бублик В.Т, и к.ф.-м. н. Щербачев К.Д.

Отзыв заслушан и утвержден на заседании семинара кафедры материаловедения полупроводников и диэлектриков "Национального исследовательского технологического университета "МИСиС", протокол № 1/14__ от __23.01_ 2014 года.

Доктор физ.-мат. наук, профессор, зав.кафедрой


Пархоменко Ю.Н.

Доктор физ.-мат. наук, профессор,


Бублик В.Т.

Канд.физ-мат наук


Щербачев К.Д.