

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Валерия Леонидовича НОСИКА "Теоретические аспекты взаимодействия рентгеновского излучения с кристаллами с искаженной решеткой", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Диссертационная работа В.Л. Носика посвящена теоретическому анализу широкого круга задач и проблем в области взаимодействия рентгеновского излучения с совершенными кристаллами и с реальными кристаллами, т.е. содержащими дефекты кристаллической структуры, с колеблющимися кристаллами, находящимися в условиях ультразвукового возбуждения. Помимо рентгеновского излучения рассмотрены также дифракция мессбауэровского излучения в кристаллах со случайно распределенными мессбауэровскими изотопами и дифракция нейтронов и выход вторичных излучений в методе стоячих волн. Все эти задачи являются и поныне актуальными, но особую значимость и новизну для диссертации придает рассмотрение автором части перечисленных выше вопросов применительно к недавно появившимся и входящими в строй рентгеновским лазерам на свободных электронах, излучение которых представляет собой чрезвычайно мощные сверхкороткие (фемтосекундные) импульсы с высокой степенью пространственной когерентности.

Особо следует отметить, что автор не только проанализировал и выявил общие закономерности формирования рентгеновского поля и его фокусировки в кристаллах и вне его, что важно для диагностики искажений кристаллической структуры, но и предложил ряд идей и методов для создания элементов рентгеновской дифракционной оптики, позволяющих осуществлять целенаправленное управление различными параметрами рентгеновских пучков и импульсов.

Диссертация изложена на 334 страницах, содержит Введение, 6 глав, основные результаты и выводы, включает 81 рисунок, 5 таблиц, список из 26 публикаций автора в журналах из перечня ВАК, и список цитируемой литературы из 281 наименования.

**Во введении** сформулирована актуальность темы диссертации, цели и задачи диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, указаны 13 конференций, симпозиумов и совещаний, на которых апробировалась работа.

**В первой главе**, объемом 71 стр., рассматривается дифракция сферической рентгеновской волны на изогнутом кристалле при его акустическом возбуждении в условиях резонанса в симметричной геометрии Лауэ. Ранее динамическая фокусировка

рентгеновских лучей рассматривалась в основном лишь в случае изогнутых идеальных кристаллов. В диссертации впервые проведено подробное рассмотрение динамической фокусировки с использованием акустически колеблющегося кристалла. На основе анализа дисперсионных поверхностей в условиях рентгено-акустического резонанса показано, что в общем случае реализуются три точки фокусировки – центральная и две дополнительные точки, расположенные симметрично относительно центральной. Получены простые аналитические выражения для соответствующих глубин фокусов. Показано также, что в изогнутом колеблющемся кристалле каустики существуют только при определенном соотношении между расстоянием до кристалла и параметрами изгиба. Самым главным результатом в этой главе является вывод о том, что простым изменением напряжения на пьезопреобразователе, т.е. изменением амплитуды ультразвуковых колебаний, можно значительно (на порядок и больше) изменять длину фокусировки. Иными словами, обоснована новая возможность управления пространственной структурой волнового поля, что представляет значительный интерес для создания рентгенооптических элементов с управляемыми параметрами. Помимо фокусировки данная схема позволяет рассматривать ее и как новый способ определения длины экстинкции, фактора Дебая-Валлера и, вполне возможно, формы дисперсионных поверхностей.

В параграфе 1.3 исследован важный для практики вопрос о фокусировке типа “точка-точка” в вакууме в результате дифракции на колеблющемся изогнутом кристалле с деформацией общего вида. Показано, что механизм увеличения ширины кривой отражения в этом случае принципиально отличен от увеличения светосилы в классических схемах Дю-Монда и Кошуа, а ширина фокусного пятна может быть достаточно малой.

**Вторая глава**, объемом 31 стр., посвящена развитию теории динамического существенно многоволнового рассеяния рентгеновских лучей в колеблющихся деформированных кристаллах в случае высокочастотной ультразвуковой (УЗ) волны, когда длина волны ультразвука много меньше длины экстинкции. При этом на дисперсионной поверхности появляются многочисленные дополнительные щели, и задача существенно усложняется. Ранее было показано, что интегральная интенсивность дифракции (ИИД) с ростом деформации должна плавно увеличиваться. Однако, как было показано впоследствии экспериментально, ИИД в случае симметричной Лауэ дифракции на изогнутом кристалле может иметь “аномальный”

минимум на кривой зависимости интенсивности дифракции от амплитуды УЗ волны. В.Л. Носик подробно проанализировал сложные интерференционные механизмы внутри- и межветвевой переброски возбуждений между различными ветвями дисперсионной поверхности и различные траектории блоховских волн в деформированном колеблющемся кристалле. Весьма положительным является аналитический подход к решению этой сложной задачи, рассмотрение и обсуждение различных частных и предельных случаев, что позволило детально разобраться с физикой этого явления.

Более того, помимо теоретического анализа в работе проведено также и сравнение с ранее проведенными экспериментальными исследованиями упругих деформаций в кристаллах, приклеенных к кварцевому пьезопреобразователю. Приведены данные по пиковой интенсивности дифракции как функции амплитуды УЗ-возбуждения при малых и при больших деформациях, двумерная карта интенсивности дифракции как функция от координаты вдоль поверхности кристалла и напряжения, а также зависимость градиента деформации от координаты вдоль поверхности. Убедительно показано согласие расчетов автора с экспериментом и, главное, величина амплитуды УЗ, при которой действительно наблюдается минимум на кривой пиковой интенсивности, совпадает в пределах погрешности с вычисленным автором значением.

**В третьей главе**, объемом 39 стр., излагаются результаты статистической теории дифракции мессбауэровского излучения в кристалле гематита для магнитных чисто ядерных рефлексов, в объеме которого случайным образом расположены резонансные мессбауэровские изотопы  $Fe^{57}$ . Из-за случайного распределения этих изотопов “резонансная периодичность”, в отличие от “электронной периодичности” идеальной решетки, нарушается, поэтому автор вполне справедливо использовал статистическое описание мессбауэровской дифракции на такой системе. Кроме того, в работе приведен также анализ влияния вклада “неупругих” каналов рассеяния на фонах в интенсивность диффузного рассеяния. Автор предварительно подробно проанализировал такие понятия и явления, как упругие некогерентные процессы, спиновая и изотопическая некогерентность, образование магнитных доменов, неупругие и некогерентные процессы, т.е. рассеяние с участием фононов, спиновые флуктуации, флуктуации вблизи фазового перехода, и их вклад в среднюю (статистически усредненную) поляризуемость и в ее дисперсию.

С большим интересом оппонент ознакомился с разделом 3.2, в котором получены

дифференциальные уравнения типа Такаги-Топена в рамках статистического подхода Като для амплитуд когерентной компоненты поля и для интенсивностей диффузной компоненты применительно к ядерному рассеянию. В работе проведен подробный численный анализ зависимости коэффициента отражения в случае расщепленной линии и показано, что с увеличением дисперсии распределения поляризуемости максимальное значение коэффициента отражения уменьшается, а ширина отражения растет пропорционально квадратному корню от дисперсионного параметра.

В результате расчетов диффузной и когерентной компонент дифракционного рассеяния автором показано, что учет дисперсии поляризуемости приводит к уменьшению когерентной составляющей и к образованию некоторого слабо выраженного “пьедестала” на кривой диффузного рассеяния. Важным результатом является также подобранная в результате вычислений величина длины корреляции, которая наиболее хорошо описывает форму экспериментальной кривой качания и которая в теории Като, фактически по умолчанию, вводилась феноменологически и считалась по порядку величины близкой к глубине экстинкции.

**В четвертой главе**, объемом 58 стр., приведены и обсуждены результаты, полученные в области теории рефлектометрических и спектрально чувствительных методов при рассеянии рентгеновских лучей на кристаллических сверхрешетках. Рентгеновская рефлектометрия является наиболее чувствительным методом для исследования профиля распределения электронной плотности и межслойных шероховатостей. В этой области, которая развивается уже несколько десятков лет, опубликованы сотни работ. Основной отличительной чертой настоящей диссертационной работы является использование двухмасштабной модели поверхности, которая является комбинацией двух методов: рассеяние на крупномасштабных плавных неровностях, описываемое в приближении Кирхгофа, и рассеяние на мелкомасштабных неровностях, учитываемое в рамках теории возмущений. Учет крупномасштабных неровностей в задаче отражения проводился в приближении представления о касательной плоскости, локально плоской в пределах ячеек разбиения и наклоненной к средней границе раздела двух сред. Для вычисления сечения рассеяния вначале проводится усреднение по мелкомасштабным шероховатостям в приближении отсутствия корреляции между шероховатостями мелкого масштаба, а затем проводится усреднение по флуктуирующим крупномасштабным неровностям.

В разделе 4.2 рассмотрены возможности использования метода стоячих нейтронных волн при динамической дифракции тепловых нейтронов в монокристаллах. Получено удовлетворительное согласие с ранее полученными экспериментальными кривыми выхода вторичных гамма-квантов, которые образуются в кристалле кальцита в результате радиационного захвата нейтронов при дифракции в геометрии Лауэ в зависимости от угловой отстройки.

В разделе 4.3 приведены результаты анализа теплового диффузного рассеяния при условии существования стоячей рентгеновской волны в колеблющемся кристалле. Показано, что использование дополнительной ультразвуковой модуляции кристаллической решетки позволяет существенно расширить возможности стандартного метода стоячих рентгеновских волн в условиях одновременного измерения кривых дифракционного отражения и кривых интенсивности теплового диффузного рассеяния, как в области основного рефлекса, так и от всего набора сателлитов. Особенностью данной постановки задачи, как показал автор, является тот факт, что в колеблющемся кристалле можно изменять длину экстинкции при дифракции на основном рефлексе и сателлитах и, тем самым, повысить возможности и чувствительность метода стоячих рентгеновских волн.

Достаточно интересными я считаю результаты, полученные в разделе 4.4, в котором показано, что с использованием колеблющегося кристалла можно трансформировать временную структуру падающего излучения в пространственную. Кроме того, колеблющийся кристалл можно использовать также и для анализа временной структуры задержанных импульсов.

В пятой главе, объемом 42 стр., проведено исследование колебательных свойств и других физических характеристик наноструктур (модуль Юнга, температура Дебая, коэффициенты теплового расширения, скорость звука, теплоемкость, теплопроводность и др.). Представленный в этой главе материал чрезвычайно интересен и полезен, так как он существенно расширяет многие давно уже укоренившиеся в физике твердого тела представления об основных характеристиках материалов. В работе на основе кропотливого анализа автором обширного числа литературных данных был применен логически безупречный метод исследования цепочки “связь-порядок-длина-сила химических связей”. Показано, что при переходе к одномерным и двумерным структурам и наночастицам вследствие уменьшения числа химических связей на атом появляются свободные электронные орбитали. Именно это и приводит к

существенному изменению механических свойств вещества на наномасштабном уровне. С большим интересом оппонент ознакомился с результатами расчетов размерной зависимости модуля Юнга от такого параметра как отношение числа поверхностных атомов с не скомпенсированными химическими связями к числу атомов в объеме. Полученные автором аналитические выражения для зависимости модулей Юнга и других механических и теплофизических “констант” от размерности, температуры и особенностей химической связи количественно и качественно согласуются с литературными результатами измерений.

Наиболее интересными для практики считаю результаты по исследованию влияния потери поверхностных связей на дисперсию фононов и теплопроводность в цилиндрических кремниевых нанотрубках и нанопроволочках, так как эти материалы полностью совместимы с современными микроэлектронными устройствами и перспективны из-за их возможных технологических применений (пьезопреобразователи, тонкопленочные и полевые транзисторы, наносенсоры и др.).

В шестой главе, объемом 57 стр., представлены результаты дальнейшего развития динамической теории дифракции и диффузного рассеяния рентгеновских лучей на кристаллах с дефектами, заложенной работами М.А. Кривоглаза, В.Б. Молодкина и их школы. Основной результат заключается в обобщении динамической теории Брэгговского и диффузного рассеяния рентгеновских лучей в кристаллах произвольных размеров с дефектами нескольких типов (кластеры, дислокационные петли) в геометриях Брэгга и Лауэ с учетом многократных экстинкционных эффектов, как при когерентном, так и при диффузном рассеянии. Детально проанализировано взаимное влияние различных каналов дифракции и рассеяния на поведение угловых и интегральных коэффициентов отражения и прохождения. Обсуждены вопросы повышения чувствительности развитого метода при использовании излучения вблизи К-края поглощения, в том числе в макроскопически деформированных кристаллах, в кристаллах в условиях аномального прохождения (эффект Бормана). Проведен подробный анализ влияния на дифракционную картину таких разных по физике факторов как статический фактор Дебая-Валлера и эффективное недиссипативное экстинкционное ослабление когерентных волн из-за их диффузного рассеяния на дефектах. Примечательно, что автору удалось достаточно сложную многопараметрическую картину рассеяния в областях Хуанга и Стокса-Вильсона описать простыми и удобными для практического использования аналитическими выражениями. Часть

теоретических результатов для зависимости полной интегральной интенсивности отражения от радиуса изгиба кристалла, от его толщины, длины волны падающего излучения и азимутального поворота кристалла получили экспериментальную апробацию.

В целом диссертация В.Л. Носика производит самое благоприятное впечатление. В первую очередь благодаря обширности и глубокой взаимосвязи обсуждаемых вопросов и задач: многоволновая дифракция рентгеновская, мессбауэровская и нейтронная, плоские и изогнутые кристаллы, кристаллы с различными дефектами структуры, акустическое возбуждение кристаллов, диффузное рассеяние на шероховатых решетках и в кристаллах с объемными дефектами, выход вторичных процессов, расчеты механических и теплофизических параметров низкоразмерных наноструктур и др. Всё это свидетельствует о широчайшей эрудиции автора и о его высочайшей научной квалификации.

По диссертации можно сделать следующие замечания, часть из которых носит характер пожеланий и не влияет на высокую оценку работы:

1. Желательно все-таки приводить оригинальные ссылки на отечественные журналы (например, Кристаллография), а не на переведенные источники (например, Crystallography reports. Либо, как это принято в некоторых журналах, помещать ссылки на переведенные статьи в квадратных скобках после ссылок на оригинальные источники.
2. В подписях к рис. 2.8 – рис. 2.10, как и в тексте на стр. 110-113, отсутствуют ссылки на оригинальные экспериментальные работы. На стр. 20 автореферата вместо ссылки на рис. 11 следует сослаться на рис. 7в.
3. На рис. 3.7, на котором приведены три кривые отражения когерентной интенсивности, отсутствуют обозначения *a*, *b*, *c* самих кривых, что затрудняет понимание материала. Также в тексте не обсуждается причина появления узкого провала в центре кривых.
4. Неясно, насколько является оправданным предположение об отсутствии продольной корреляции высот мелкомасштабных шероховатостей на стр. 165 диссертации (соотношение (4.27)).

Диссертация изложена четко, грамотно и в меру аккуратно. Многочисленные тщательно подобранные рисунки и графики хорошо иллюстрируют основные полученные автором результаты. Автор умеет давать простую и наглядную физическую

интерпретацию результатам, полученным из громоздких аналитических формул или компьютерных расчетов. Все пять защищаемых положений сформулированы четко и правильно. Автореферат дает исчерпывающее представление о материале диссертации. Результаты диссертации неоднократно докладывались на представительных совещаниях и конференциях и получили высокую оценку специалистов.

Считаю, что по объему полученных результатов, их новизне, актуальности, практической и научной значимости представленная работа соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а Валерий Леонидович Носик, вне всякого сомнения, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Профессор кафедры физики твердого тела  
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова  
доктор физико-математических наук  
119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2,  
МГУ, физический факультет  
тел. 8(495) 939-12-26, e-mail: vabushuev@yandex.ru  
03 апреля 2016 г.

Владимир Алексеевич Бушуев

Подпись проф. В.А. Бушуева заверяю  
декан физического факультета МГУ,  
профессор



Н.Н. Сысоев