

## ОТЗЫВ

официального оппонента, ведущего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматизи- ки и электрометрии Сибирского отделения РАН д.ф.-м.н., доцента Фрумина Леонида Лазаревича (ИАиЭ СО РАН, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д. 1, E-mail: [lfrumin@iae.nsk.su](mailto:lfrumin@iae.nsk.su), тел. 8-(383)-330-88-80) на диссертацию С.Н. Свиташевой «Развитие метода эллипсометрии для исследования наноразмерных пленок диэлектриков, полупроводни- ков и металлов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики.

Задача исследования физических свойств поверхностей и тонких пленок диэлектриков, металлов и полупроводников является одной из наиболее актуальных для современной науки и технологии. Эта важнейшая задача стимулирует развитие широкого спектра аналитических методов, таких как рентгеновская и электронная микроскопия, сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, электронная Оже-спектроскопия, Рамановское рассеяние и др. Эллипсометрия в этом ряду давно занимает особое место, благодаря своей сравнительно высокой чувствительности к свойствам поверхностей и тонких пленок. Эллипсометрия является бесконтактным, неразрушающим оптическим методом исследования поверхности и используется для определения толщины тонкой поверхностной пленки и ее оптических свойств. Этот экспериментальный метод широко применяется в таких областях, как полупроводники, оптоэлектроника, химия и физика поверхности и биотехнология. В последние годы эллипсометрия продолжает быстро развиваться, расширяя спектр рабочих длин волн от радиодиапазона до синхротронного излучения, и находя новые интересные приложения.

В рецензируемой работе представлено развитие новых разнообразных методик эллипсометрии и описаны результаты их приложения к многочисленным задачам исследования свойств поверхностных слоев твердых тел и наноразмерных пленок. Результаты этого исследования представляют несомненный интерес, а тема исследований является *актуальной* для экспериментальной физики, в особенности при исследовании свойств наноразмерных полупроводниковых пленок. На актуальность работы указывают 12 публикаций автора только за последние три года, в том числе, в таких известных журналах, как *Thin Solid Films* и *Surface Science*.

Диссертация объемом 357 страниц, состоит из Введения, шести глав, перечисления основных результатов и выводов, заключения и списка литературы. Часть глав и часть параграфов в них содержат отдельные выводы и заключения. В небольшом введении автор дает обоснование актуальности исследования, определяет его задачи и цели и формулирует выносимые на защиту положения. Основная часть работы естественно делится на две части, по три главы в каждой. Первая часть носит

методический характер и посвящена развитию метода, а вторая часть содержит разделы, описывающие многочисленные конкретные приложения метода эллипсометрии, главным образом в области физики и технологии современных полупроводниковых материалов.

В первой главе дано введение в эллипсометрию, приводятся основные уравнения, лежащие в основе метода эллипсометрии. Большая часть главы посвящена анализу ограничений на разрешимость параметрических некорректных (условно-корректных) обратных задач эллипсометрии (ОЗЭ) для прозрачных и поглощающих сред. Во второй главе продолжено рассмотрение методических вопросов повышения точности метода. Особая роль при этом отводится статистическим методам оценивания параметров моделей сред. Описан численный алгоритм решения параметрической ОЗЭ. Кратко рассмотрены вопросы выбора функционала наименьших квадратов и способов его минимизации. Разработан оригинальный метод оценки качества обусловленности ОЗЭ. Рассмотрены статистические методы оптимизации итерационного поиска решения задачи. На примере методики многоугловой эллипсометрии проводится моделирование ОЗЭ с помощью методов минимизации нулевого и первого порядка (метод Гаусса), а также их регуляризация. В третьей главе особое внимание уделено вопросам однозначности решения и повышению точности решения параметрических обратных задач. В этой главе предложен метод оценки числа решений ОЗЭ для случая поглощающей пленки на поглощающей подложке в воздухе, основанный на аналитических свойствах комплексного коэффициента отражения. Вторая, основная часть работы, посвященная применению методик эллипсометрии для исследования поверхности, начинается в четвертой главе. Эта глава содержит описание исследований кинетических параметров наноразмерных окисных пленок. В ней приводятся результаты эллипсометрического изучения окисных пленок на арсениде галлия, теллуриде кадмия, на меди, на ванадии и на нитриде кремния при его плазменном окислении. Сильной стороной описанных в этой главе исследований является сочетание методик эллипсометрии с рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией, электронной Оже-спектроскопией, спектроскопией энергетических потерь электронов, спектроскопией инфракрасного поглощения. При исследовании окисной пленки на ванадии применяется последовательно пять методов эллипсометрических измерений, основанных на вариации угла падения света, его длины волны, температуры образца, а также периодическая модуляция температуры. Проведенные исследования позволили получить новые данные о химических составах и кинетике роста окисных пленок, представляющие несомненный интерес как для научных, так и для технологических приложений. Пятая глава работы в основном посвящена анализу влияния шероховатости поверхности, а в более общем случае – поверхностного рельефа на эллипсометрические измерения. Модельные эллипсометрические эксперименты со случайной фазовой маской также носят методический характер. Основным результатом этой главы состоит в том, что интерференционные и поляризационные свойства отражения света

от некоторых рельефных поверхностей описаны качественно, количественно, и подтверждены в модельных экспериментах. В шестой главе приведены результаты спектральной эллипсометрии по измерению свойств наноразмерных пленок в области энергий фотонов 1.5-4.75 эВ, что соответствует рабочему диапазону ряда спектральных эллипсометров фирмы Jobin Yvon. В начале главы дан краткий обзор различных способов аналитического описания и параметризации диэлектрической функции, применительно к методу спектральной эллипсометрии (СЭ). Метод СЭ развивается и используется в работе, в частности, для измерения фазового состава тонких пленок оксида титана. Такие пленки могут содержать в своем составе сложные комбинации различных кристаллических модификаций оксида титана (рутил, анатаз), что подтверждается данными Рамановской спектроскопии. Эксперименты сопровождаются расчетами, основанными на модели эффективной среды, а также на параметризации диэлектрической функции слоя. СЭ в этой главе адаптируется далее для исследования тонкопленочных эпитаксиальных структур на поверхности арсенида галлия, перспективных для создания высокочастотных (гигагерцовых) транзисторов и интегральных схем. Новые методики СЭ позволяют оценить влияние легирующих добавок на оптические свойства тонких пленок на арсениде галлия. В конце этой главы метод СЭ использован для определения связи между морфологией поверхности и оптическими свойствами пленок нитрида алюминия и установление корреляции между оптическими свойствами тонкой пленки и ее дефектами. Эти эллипсометрические измерения сочетаются с атомно-силовой микроскопией. В этой же главе предложен новый экспресс-метод определения состава слоев гетероструктур с помощью метода СЭ. В конце работы приводятся основные результаты и выводы. В заключении отражен личный вклад автора, приведены основные авторские публикации в журналах из списка ВАК и освещается апробация работы. Работу завершает общий список литературы из 311 наименований.

В целом работа написана хорошим языком. Опечаток в тексте и в формулах сравнительно немного, однако недостатки оформления и стилевые погрешности в работе встречаются. Перечислим основные из них в качестве замечаний:

- 1) Первое из положений, выносимых на защиту, звучит так: «универсальный метод решения задач эллипсометрии...в виде кривой...». Непонятно, как метод может быть в виде кривой?
- 2) Результатов и выводов в работе оказалось так много, что они были разбиты автором на 3 группы по 4 пункта в каждой. Всего получилась дюжина пунктов, занимающая почти 4 страницы текста диссертации. Стоит заметить, что множество полученных результатов и выводов может указывать не на особую ценность работы, а на недостаточное внимание автора к точной формулировке результатов. Неточность формулировки проиллюстрируем цитированием пункта II.1 результатов и выводов: «Разработан комбинированный метод взаимодействия поляризованного света

