

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Свиташевой Светланы Николаевны «Развитие метода эллипсометрии для исследования наноразмерных пленок диэлектриков, полупроводников и металлов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Актуальность темы. Современное развитие микроэлектроники и наноэлектроники, использующих большое разнообразие известных полупроводниковых и диэлектрических материалов и искусственно созданных пленок тройных полупроводниковых сплавов для создания приборов с новыми функциональными возможностями и все меньшими размерами, может быть обеспечено увеличением точности и чувствительности методов контроля тонких и монослойных пленок. К таким методам относится эллипсометрия, интенсивное развитие которой наблюдается в течение последних двух десятилетий. Представленная работа Свиташевой С. Н. является ярким тому примером.

Предложенный автором метод, который позволяет исключить ошибку в определении оптических констант начальной стадии окисления и увеличить точность оценки ее параметров (толщины и состава) для нанометровых и субнанометровых окислов диэлектриков, полупроводников и металлов, вносит существенный вклад в мониторинг современных технологических процессов. Эллипсометрический метод дает информацию о свойствах пленки и законе ее формирования. Информация о перестройке поверхности в процессе длительного окисления меди важна и с точки зрения понимания теории окисления. Полученные Свиташевой С. Н. данные об образовании пленок окислов на поверхности двойных полупроводников A_3B_5 и A_2B_6 особо важны для оценки воспроизводимости характеристик при изготовлении приборов микроэлектроники. Актуальность исследований пленок термически окисленного ванадия очевидна, поскольку интерес к пленкам окислов ванадия вызван их применением в матричных болометрических фотоприемниках.

Обоснованность и достоверность научных результатов, приведенных в диссертации, обеспечены проведением исследований в контролируемых условиях, использованием хорошо апробированных процедур приготовления поверхностей и методов их контроля, взаимодополняющими современными методами исследования поверхности, тщательностью проработки применяемых методик, воспроизводимостью получаемых данных. Результаты работы были представлены и

обсуждались на многочисленных всероссийских и международных конференциях (36 докладов).

Новизна полученных результатов. Предложены новые методы математической обработки экспериментальных результатов. Разработаны новые подходы к моделированию шероховатой поверхности и к теоретическому рассмотрению моделирования физических явлений. Представлены новые алгоритмы решения обратных задач многоугловыми, модуляционными и спектральными методами эллипсометрии.

Научная и практическая значимость работы. Полученные результаты носят фундаментальный характер и могут быть использованы для развития теоретических представлений в физике поверхности твердого тела. Полученные результаты расширяют возможности управления процессами, имеющими важное значение для практических приложений, как в области существующих полупроводниковых технологий, так и для нанотехнологии (температурная и концентрационная устойчивость, диффузионное размытие, механизм роста, пассивирующие свойства и т.д.).

Наиболее значимыми результатами работы по нашему мнению являются следующие:

Свиташевой С.Н. применен оригинальный метод сшивки двух задач по общему параметру, что дало возможность восстановить пять параметров многофазной пленки окислов переходного металла: три параметра $-d, n, k$ до фазового перехода и два $-n, k$ после фазового перехода, считая толщину пленки d неизменной.

Автором предложен метод исследования динамики $\delta\Delta/\delta T^{\circ}\text{C}$ температурного изменения фазового угла Δ , чтобы найти режим окисления с максимальным содержанием двуокиси ванадия. Для оценки относительного содержания двуокиси ванадия в неоднородной многофазной пленке, содержащей смесь нескольких окислов, применен динамический метод измерений, т.к. только в двуокиси ванадия происходит перестройка кристаллической структуры, сопровождаемая изменением комплексного показателя преломления при изменении температуры в диапазоне от комнатной до 70°C .

Свиташева С. Н. большое внимание обратила на математическое описание исследуемых объектов, математический анализ моделей для расчета свойств этих объектов, математическое обоснование выбора способов эллипсометрических измерений для всех исследованных систем. С помощью математического

моделирования процессов отражения поляризованного света от многослойных пленочных систем она не только обнаружила случайный характер решений, полученных методом условной минимизации некоторого функционала, но и предложила новый метод статистической обработки найденных решений обратной задачи эллипсометрии, который более, чем на порядок увеличивает точность оценки параметров пленки, как показано на примере окисления нитрида кремния в МНОП структурах «флэш» памяти. Практическое значение этих результатов легко объясняется огромным рынком применения устройств памяти.

Чтобы исключить измерения, которые ухудшают точность восстановления искомых параметров пленки, введено понятие информативности эллипсометрических измерений, что дает возможность эффективно планировать эксперимент.

Важность результатов, полученных из спектральных эллипсометрических измерений, очевидна как для практики, так и для теории окисления переходных металлов или сдвига края поглощения при изменении мольного состава тройных соединений.

Автором предложен оригинальный подход использования корреляционных методов, устанавливающих связь свойств исследуемых объектов с поляризацией света, отраженного от этих объектов. Метод применен для образцов, шероховатость которых составляет единицы нанометров для пленок, полученных молекулярно-лучевой эпитаксией, и десятки и сотни нанометров для поверхностей с искусственным рельефом. Найдены условия максимального и минимального влияния шероховатости на поляризацию света.

Отмеченные замечания:

По главам 1-3

1. В машинном эксперименте не достаточно обоснован выбор модели структуры для расчета, не совсем ясно, почему взяты к рассмотрению два слоя диэлектрика.
2. Введена численная характеристика дефекта измерения и приведены ее значения в таблицах 11 и 12 для вычислительного эксперимента с набором углов падения, но пояснения к этим таблицам очень кратки, хотя вопрос о числе измерений и выборе варьируемого параметра остается для любого исследователя важнейшим и определяющим качество решения.
3. На Рис.11-Рис.15 не пояснено, почему для отображения взят логарифм значения функционала.

По главе 4

1. Уравнение Друде в §4.2 приводится только для одного поляризационного угла Δ (фазового), нет пояснения относительно угла Ψ .

2. На Рис. 51 видно, что фазовый переход 1 рода в пленках оксида ванадия наблюдается не для всех энергий фотонов, автор не поясняет причину этого явления.

По главе 5

1. На Рис. 65 для второй модели не указаны толщины эквивалентной пленки.

По главе 6

1. На Рис. 102, где изображены дисперсии оптических констант рутила, для различных кристаллографических осей плохо читаются их обозначения.

Основные положения и результаты диссертационной работы **рекомендуется использовать** для практических приложений как в области существующих полупроводниковых технологий, так и для разработки перспективных приемов нанотехнологии в Институте физики полупроводников СО РАН, Физико-техническом институте РАН им.Иоффе, Научно-технологическом центре полупроводниковой микроэлектроники ИАПУ ДВО РАН, конструкторских бюро и на предприятиях электронной промышленности.

Заключение.

Диссертационная работа базируется на достаточном объеме экспериментальных данных, примеров и расчетов. Экспериментальные данные получены с использованием самых современных и высоко эффективных методов исследования. Она написана доходчиво, грамотно и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Научные публикации полностью отображают содержание диссертации и характеризуются высоким качественным показателем.

Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты, позволяющие их квалифицировать как новое научное достижение, содержащее решение актуальной проблемы, имеющей как фундаментальное, так и прикладное значение. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Диссертационная работа отвечает требованиям "Положения ВАК РФ", а ее автор Свиташева Светлана Николаевна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент
д.ф.-м.н., профессор

25.04.2014 г.

Подпись д.ф.-м.н. А.В. Зотова заверяю
Ученый секретарь ИАПУ ДВО РАН
к.т.н.



А.В. Зотов

С.Б. Змеу

Личные данные оппонента

Зотов Андрей Вадимович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий Лабораторией технологии двумерной микроэлектроники Института автоматки и процессов управления ДВО РАН, (ИАПУ ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, д. 5, e-mail: zotov@iacp.dvo.ru, тел. 8-(902)-522-00-70)