
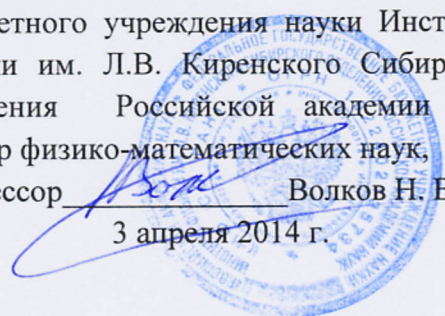


УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
физики им. Л.В. Киренского Сибирского
отделения Российской академии наук
доктор физико-математических наук,
профессор  Волков Н. В.

3 апреля 2014 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

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

Исследование свойств тонких пленок, синтезируемые различными технологиями, было и остается одной из важнейших задач современной микро- и нанoeлектроники. Метод эллипсометрии (бесконтактный, невозмущающий и неразрушающий метод) обеспечивает изучение многообразных свойств тонких пленок и занимает особое место в ряду с такими методами, как электронная, рентгеновская и туннельная микроскопия; дифракция электронов и рентгеновских лучей, электронная спектроскопия для химического анализа, электронная ОЖЭ спектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния.

В данной работе большое внимание уделено развитию метода эллипсометрии и исследованию фундаментальных ограничений на точность метода; разработке новых принципов и методов измерений физических величин, основанных на современных достижениях в области нанотехнологий, и позволяющих существенно увеличить точность и чувствительность метода; а также разработке методов математической обработки экспериментальных результатов с использованием моделирования физических явлений и процессов. Решение этих проблем являлось актуальной задачей.

Все полученные результаты сгруппированы в три блока: 1) развитие метода, 2) методы измерения кинетических параметров окисления наноразмерных структур; и 3) установление корреляционных зависимостей поляризационных свойств наноразмерных пленок от их состава, гомогенности и морфологии.

Среди полученных результатов, на наш взгляд, наиболее интересны следующие:

1. Исследованы фундаментальные ограничения на точность эллипсометрического метода измерения параметров отражающей системы. Разработан метод повышения точности и чувствительности измерений параметров пленки, использующий статистическую обработку результатов.
2. Разработан комбинированный метод взаимодействия поляризованного света с поверхностью пространственно-неоднородных структур, сочетающий несколько эллипсометрических методов: метод многоугловой эллипсометрии; метод сшивки двух задач по общему параметру; метод модуляционной эллипсометрии; метод динамических измерений и метод спектральной эллипсометрии.
3. Выявлен из эллипсометрических измерений механизм образования многофазной пленки окисла переходного металла для разных температур окисления. Обнаружено, что характеристикой содержания двуокиси ванадия в пленке являются крутизна изменения $\delta\Delta/\delta T^\circ\text{C}$ и ширина температурного интервала $\delta T^\circ\text{C}$ скачка эллипсометрического угла Δ при фазовом переходе I рода.
4. Разработан метод вспомогательных номограмм, который в сочетании с методом Друде для металла позволил из кинетических эллипсометрических измерений впервые обнаружить эффекты перестройки поверхности, сопровождающиеся «поляризационным шумом» при росте куприта на поверхности меди, и сменой закона роста окисла (параболического на кубический) после перестройки поверхности. Измерены толщины и состав суб-наноразмерных (0÷4 нм) пленок куприта.
5. Разработан новый метод «номограмм приращений» для повышения точности измерений оптических констант, закона роста и состава наноразмерных окисло полупроводников [A_3B_5 (GaAs) и A_2B_6 (CdTe)].
6. Разработан новый метод спектральной эллипсометрии для измерения параметров пространственно-неоднородных полиморфных пленок на базе многослойной модели, в которой оптические свойства каждого слоя описываются сочетанием двух методов: метода эквивалентной пленки (на основе принципа аддитивности) и метода дисперсионной аппроксимации диэлектрической функции (на основе зонной теории твердого тела). Определены для неоднородного по толщине и многофазного High-k диэлектрика TiO_2 (окисла титана) из эллипсометрических спектров: а) зависимость состава по глубине окисла (дисперсии диэлектрической функции $\epsilon(\lambda)$) и б) уменьшение общей толщины окисла при образовании кристаллических фаз.

7. Разработан метод математической обработки экспериментальных измерений свойств поляризованного света, отраженного от шероховатой поверхности со случайным распределением дефектов. Вычислено влияние каждого из параметров нерегулярного искусственного рельефа на поляризационные характеристики отраженного от нее света. Метод хорошо объясняет и предсказывает наблюдаемое в эксперименте аномальное поведение эллипсометрических углов (наличие экстремумов) $\Psi(\varphi_0)$ и $\Delta(\varphi_0)$.
8. Разработан метод математического моделирования процесса отражения поляризованного света от шероховатой поверхности с учетом поправки Лоренца. Выявлен «концентрационный резонанс», т.е. возникновение поглощения, на порядок превышающего поглощение исходных материалов смеси, из теоретического анализа математической модели шероховатых поверхностей. Определены условия резонанса (показатель преломления $n < 1$ и $k > n$, что возможно для таких металлов, как золото, серебро и медь).
9. Разработан метод определения неизвестных параметров из эллипсометрических спектров, суть которого состоит из решения двух подзадач: 1) в области слабого и 2) в области сильного поглощения. Определена зависимость дисперсии оптических констант от уровня и типа легирующей примеси слоя GaAs в гетероструктуре.
10. Разработан не разрушающий бесконтактный высокочувствительный метод контроля количества дефектов или состава тройных соединений. Найдены из эллипсометрических спектров корреляционные зависимости поляризационных свойств пленок, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией: а) от количества поверхностных наноразмерных 3D дефектов и б) *края* фундаментального поглощения и полярности поверхности пленок тройных соединений $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ от состава.

Значимость для науки результатов исследований заключается в следующем:

- ✓ Разлит метод эквивалентной пленки, широко используемый для интерпретации эллипсометрических измерений.
- ✓ Найден концентрационный резонанс в свойствах эквивалентной пленки, который может быть причиной разрушения поверхности.
- ✓ Показано теоретически и экспериментально влияние параметров рельефной поверхности, вытравленной с помощью двухуровневой случайной маски, на состояние поляризации зеркально отраженного света.
- ✓ Все полученные из эллипсометрических измерений результаты подтверждены независимыми методами исследования поверхности такими как:

электронная, рентгеновская и туннельная микроскопия; дифракция электронов или рентгеновских лучей, электронная спектроскопия для химического анализа, электронная ОЖЭ спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния.

Практическое значение результатов работы определяется следующим:

- ❖ Разработан экспрессный бесконтактный неразрушающий метод оценки шероховатости зеркально гладких поверхностей, высота неровностей которых составляет сотые доли микрометра, пригодный для диэлектриков, полупроводников и металлов.
- ❖ Показана возможность определения наличия ростовых дефектов на пленках, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией. Это особенно существенно для разработки методов контроля гетероструктур на основе широкозонных материалов, таких как, GaN, AlN и других на основе которых создается электроника мощных, высокочастотных транзисторов, фотоприемников, работающих в УФ области спектра, и других приборов.

Считаем целесообразным продолжить работу в части внедрения результатов в заинтересованных организациях, например, ФТИ РАН, ИОФ РАН, ИФМ УрО РАН, ИФП СО РАН, ИФ СО РАН, ИАПУ ДВО РАН. Новизна и достоверность результатов диссертации С. Н. Свиташевой не вызывают сомнений. Результаты опубликованы центральных российских и зарубежных журналах и известны специалистам.

По объему и содержанию работа С. Н. Свиташевой значительно превышает требования к докторской диссертации. Вместе с тем по работе можно высказать некоторые замечания:

1. В работе не указана технология создания фотошаблона для изготовления СФМ.
2. По нашему мнению, моделировать шероховатости методами, предложенными в диссертации, трудно. В частности в работе не указан предел применимости модели. Для современных чистых условий число дефектов на поверхности пластин или других структур крайне мало, а толщина пленок загрязнений меньше, чем толщина модельных дефектов.
3. В качестве пожелания в дальнейшей работе хотелось бы предложить автору применить развитые методы для *in situ* контроля технологического процесса роста наноструктур в сверхвысоком вакууме.

Указанные замечания не снижают общего впечатления о высоком уровне выполненной работы.

Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для микро- и наноэлектроники, физики полупроводников и твердотельной электроники. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы. Работа отвечает критериям Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Свиташева Светлана Николаевна заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании семинара отдела физики магнитных явлений ИФ СО РАН 11 марта 2014г., протокол № 2.

Заместитель Директора ИФ СО РАН

Д.ф.-м.н., профессор,

Заслуженный деятель науки РФ



С. Г. Овчинников