

На правах рукописи



СВИТАШЁВА СВЕТЛАНА НИКОЛАЕВНА

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА ЭЛЛИПСОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК ДИЭЛЕКТРИКОВ, ПОЛУПРОВОДНИКОВ И  
МЕТАЛЛОВ**

01.04.01- приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Новосибирск-2014 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской  
академии наук

#### НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ

ЧАПЛИК -доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН,  
Александр Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
Владимирович физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

САРАНИН -доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент  
Александр РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Александрович Институт автоматизации и процессов управления ДО РАН, г. Владивосток, зав.  
лабораторией технологии полупроводников и диэлектриков.

ИЛЬИН -доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное  
Валерий государственное бюджетное учреждение науки Институт Вычислительной  
Павлович математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск,  
главный научный сотрудник лаборатории вычислительной физики.

ФРУМИН -доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное  
Леонид государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и  
Лазаревич электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, ведущий научный сотрудник  
лаборатории фотоники.

ВЕДУЩАЯ -Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
ОРГАНИЗАЦИЯ физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии  
наук, г. Красноярск

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г. в «\_\_\_\_\_» часов на заседании  
диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения  
Российской академии наук.

Адрес: 630090 г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ СО РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



А.А. Иванов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы** Среди методов характеризации структуры и морфологии поверхности метод эллипсометрии (бесконтактный, невозмущающий и неразрушающий метод) занимает особое место в ряду с такими методами, как электронная, рентгеновская и туннельная микроскопия; дифракция электронов или рентгеновских лучей, электронная спектроскопия для химического анализа, электронная ОЖЕ спектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния. Метод эллипсометрии обеспечивает изучение многообразных свойств пленок для нано- и микроэлектроники, . В большей части работ используется эллипсометрия на отражение, хотя есть работы по эллипсометрии на пропускание (поляриметрии) и создан эллипсометр-поляриметр и эллипсометр матрицы Мюллера [3] для характеризации рассеянного света. Высокая чувствительность поляризационных характеристик отраженного света к наличию неровностей или пленок на поверхности позволила использовать эллипсометрический метод, как для оценки качества поверхности, так и для определения параметров низкоразмерных структур и пленок (толщины и состава пленки, дисперсии комплексной диэлектрической функции, а также анизотропии и профиля показателя преломления [4]). Традиционной в таких случаях стала ссылка на работу Арчера и Гобели [5], которые при исследовании хемосорбции газов на кремнии эллипсометрическим методом измерили адсорбционные покрытия с точностью до 0.02 монослоя.

Поскольку основное уравнение эллипсометрии устанавливает связь обобщенных коэффициентов отражения Френеля с параметрами системы, то эллипсометрические углы  $\Psi$  и  $\Delta$  являются функциями многих параметров, таких как: длина волны света  $\lambda$  и монохроматичность излучения  $\delta\lambda$  (**спектральная эллипсометрия**); угол падения света  $\varphi_0$  - (многоугольная эллипсометрия или **MAI- multiple-angle-of-incidence**); температура  $T^\circ\text{C}$ , давление  $P$ , напряженность электрического  $E$  или магнитного  $H$  поля -(**модуляционная эллипсометрия**); показатель преломления окружающей среды  $n_0$  (**иммерсионная эллипсометрия**). Кроме того, эллипсометрические углы  $\Psi$  и  $\Delta$  зависят от количества слоев и их толщин  $d_i$ , дисперсии показателя преломления  $n_i(\lambda)$  и коэффициента поглощения  $k_i(\lambda)$  каждого из слоев, а также наличия неоднородности состава пленок по глубине  $n_i(d)$ ,  $k_i(d)$ . Интенсивно развивается **отображающая эллипсометрия (imaging ellipsometry)**, применяемая для изучения и визуализации разнообразных наноразмерных объектов не только в микроэлектронике, но и в биологии, и в медицине. Задачи метода эллипсометрии делятся на прямые и обратные. **Прямая** задача - определение поляризационных характеристик отраженного электромагнитного излучения от поверхности, для которой известны: высота,

форма, плотность и закон распределения неровностей; наличие пленок и их свойства в измеряемом диапазоне. **Обратная** задача - это нахождение параметров исследуемой системы по измеренным поляризационным характеристикам отраженного сигнала. В любом случае необходимо решить задачу описания измеряемой системы, т.е. выбрать физическую и математическую модели и достаточное число параметров, однозначно ее описывающих. Решение обратной задачи эллипсометрии только в **редких** случаях удается получить аналитически, поэтому **численные методы условной минимизации** некоторого функционала являются основным вычислительным инструментом решения задач эллипсометрии. Процедура поиска решения сводится к решению прямой задачи путем перебора параметров трансцендентного **ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ** с достижением минимального несоответствия вычисленных и измеренных величин. **Точность** найденного решения зависит не только от точности (ошибок) измерения, но и от выбранного алгоритма вычислений. С развитием эллипсометрии *in situ* и управления процессом роста слоя (составом и толщиной пленки) с использованием обратной связи проблема точности, а также скорости и способа вычислений стала еще более важной. Поэтому в данной работе большое внимание уделено **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; и разработке методов математической обработки экспериментальных результатов с использованием моделирования физических явлений и процессов.**

**Цель работы** заключалась в развитии метода эллипсометрии и повышении его точности для наноразмерных пленок полупроводников и металлов; неоднородных по составу окислов металлов и диэлектриков, в разработке методов установления корреляционных зависимостей оптических свойств от состава и от морфологии (включая шероховатость разного масштаба) поверхности.

Для достижения поставленной цели решались следующие **основные задачи**:

- Исследование фундаментальных ограничений на точность восстановления параметров пленочной системы; однозначность, устойчивость и независимость решений методом эллипсометрии.
- Разработка метода аналитического решения для **поглощающих** пленок и разработка на его основе нового алгоритма компьютерной программы.
- Разработка методов *прецизионных* измерений кинетических параметров окисления и свойств наноразмерных пленок на поверхности металлов (Cu) и полупроводников  $A_3B_5$  и

$A_2B_6$  [GaAs(110) и CdTe(111)]. Определение законов роста и состава окислов в каждом случае.

- Разработка нового метода определения параметров пленок для исследования окислов переходных металлов в области фазового перехода I рода (металл-полупроводник) из *многоугольной*, модуляционной и спектральной эллипсометрии.
- Разработка метода определения четырех параметров (толщин  $d_1$ ,  $d_2$  и показателей преломления  $n_1$ ,  $n_2$ ) двух слоев диэлектриков, с учетом статистической обработки найденных решений. Исследование состава окисла, полученного влажным окислением блокирующего слоя диэлектрика в **МНОП-структурах**.
- Изучение корреляционной зависимости между параметрами рельефа и поляризационными характеристиками света, отраженного от модельной шероховатой поверхности. Определение роли каждого из параметров рельефа и расчет условий максимального влияния шероховатости модельной поверхности с нерегулярным рельефом случайной фазовой маски.
- Разработка метода спектральной эллипсометрии, сочетающего модель эквивалентной пленки и дисперсионную модель аппроксимации диэлектрической функции. Измерение параметров пленок в спектральном диапазоне 1.5÷ 4.75 эВ: а) сложного состава пленок при окислении переходных металлов и б) пленок, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ) и входящих в состав гетероструктур.
- Разработка корреляционного метода, устанавливающего зависимости **оптических свойств МЛЭ пленок нитридов алюминия, галлия и их сплавов от морфологии поверхности, полярности и состава**.

**Личный вклад автора** является основным и заключается в разработке новых методов эллипсометрических измерений; в исследовании фундаментальных ограничений на точность измерений эллипсометрическим методом; в повышении точности метода; в разработке методов математической обработки экспериментальных результатов и в моделировании процессов отражения поляризованного света от отражающих систем; в постановке задач исследования наноразмерных пленок, в проведении экспериментов по моделированию неоднородной поверхности.

**Научная и практическая значимость работы** заключалась в разработке новых методов математической обработки экспериментальных результатов, в разработке нового подхода к моделированию шероховатой поверхности, к анализу экспериментальных исследований, к теоретическому рассмотрению моделирования физических явлений; в разработке новых алгоритмов и программ решения обратных задач многоугольными,

модуляционными и спектральными методами эллипсометрии: на длине волны 0.63 мкм и в диапазоне энергии фотонов от 1.5 эВ до 4.8 эВ.

В качестве комплементарных независимых методов исследования использовались результаты сканирующей электронной микроскопии, атомно силовой микроскопии, высокоразрешающей интерференционной микроскопии, ЭСХА, ОЭС, РФЭС (XPS) и Рамановской спектроскопии комбинационного рассеяния.

С помощью такого подхода были получены результаты, имеющие важное

**практическое значение:**

- Разработан метод, повышающий **точность** восстановления параметров при численном решении задач многоугловыми и спектральными методами эллипсометрии. Для планирования эксперимента введено понятие **информативности** эллипсометрических измерений.
- Разработан метод аналитического решения задач для многоугловых эллипсометрических измерений на сильно поглощающих пленках, разработан алгоритм выбора симплекса (simplex) и разработаны программы восстановления параметров таких систем.
- Разработан метод определения **единственности** решения и разработан метод определения числа решений ОЗЭ в заданной области параметров измеряемой системы. Показана неоднозначность метода номограмм (отображения области с плоскости параметров  $n-ik$  на плоскость измеряемых эллипсометрических углов  $\Psi-i\Delta$ ).
- Разработан новый тип номограмм, позволяющий исключить ошибку в определении начальной (нулевой) точки, для определения толщины и показателя преломления (состава) субнанометровых-нанометровых окислов диэлектриков, полупроводников и металлов.
- Разработан метод измерения состава и оптических свойств наноразмерных оксидных пленок полупроводников, диэлектриков и металлов. Дано объяснение на основе теории Мотта и Кабреры и теории реакций в твердых телах результатов эллипсометрических экспериментов по кинетике образования наноразмерных оксидных пленок. Объяснена причина нового эффекта -образование слоя, обогащенного кремнием, и природа электронных ловушек в блокирующем слое в диэлектриках МНОП-структур.
- Разработан метод теоретической оценки оптических свойств эквивалентной пленки, используемой для интерпретации эллипсометрических измерений. Найден **концентрационный резонанс** и теоретически определены условия его возникновения. Объяснена причина разрушения поверхности при отражении мощного пучка света.
- Метод эллипсометрии применен для оценки теоретического и экспериментального влияния параметров искусственной рельефной поверхности, вытравленной с помощью двухуровневой ортогональной случайной фазовой маски, на состояние поляризации света,

отраженного в нулевой порядок дифракции. Эти результаты могут быть полезным для определения размеров тестовых структур.

- Разработан метод определения концентрации 3D ростовых дефектов на пленках, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией, с использованием эллипсометрии как неразрушающего метода исследования.
- Метод эллипсометрии применен для оптимизации процесса окисления для ФТИРОС (Фазово-Трансформационный Интерференционно-Реверсивный Отражатель Света)-структур. Построен алгоритм совместного решения задач модуляционной и многоугловой эллипсометрии. Определены свойства сложных по составу пленок оксида ванадия [ $V_2O$ ,  $VO$ ,  $V_2O_3$ ,  $V_nO_{2n-1}$  ( $n=3\div 9$ ),  $VO_2$ ,  $V_2O_5$ ]. Оценено относительное содержание двуокиси ванадия в пленке по динамике  $\delta\Delta/\delta T^\circ C$  температурного изменения фазового угла  $\Delta$ .
- Разработан метод интерпретации спектральных эллипсометрических измерений для сложных по составу пленок на базе алгоритма, сочетающего две модели: модель параметризации диэлектрической функции и модель эквивалентной пленки. Разработан способ эллипсометрического контроля воспроизводимости гетероструктур для гигагерцовых транзисторов.

**На защиту выносятся следующие основные научные положения:**

1. Универсальный метод аналитического решения задач эллипсометрии (для оптически прозрачных и поглощающих сред) в виде пространственной кривой, одна из проекций которой на плоскости параметров является логарифмической спиралью с переменным коэффициентом роста, что позволяет определить адекватность выбранной модели, оптические константы и толщины слоев.
2. Увеличение точности метода эллипсометрии для восстановления параметров измеряемых систем путем оптимизации информативности эллипсометрических измерений, **способов** минимизации функционала (выбора формы функции ошибок, выбора шага итераций и момента останова) и способа формирования симплекса (при статистической обработке результатов решения).
3. Метод оценки единственности решения или определения числа (семейства) решений задач эллипсометрии в заданной области параметров пленки при фиксированной и известной нормализованной толщине пленки ( $d/\lambda$ ). Метод предсказывает, что число решений определяется числом нулей и полюсов мероморфной функции, полученной из основного уравнения эллипсометрии.
4. Метод специальных номограмм для определения параметров наноразмерных пленок оксидов на полупроводниках [ $GaAs(110)$ ,  $CdTe(111)$ ], диэлектриках ( $Si_3N_4$ ) и металлах

(Cu, V, Ti). Объяснение зависимости толщины и состава оксидов от условий окисления, подтвержденное независимыми методами анализа поверхности.

- Графоаналитический метод построения номограмм для восстановления двух независимых параметров (толщины  $d_e$  и коэффициента заполнения  $q$ ) из четырех ( $n_e$ ,  $k_e$ ,  $d_e$ ,  $q$ ), полностью описывающих гетерогенную пленку диэлектриков, полупроводников и металлов.
- Метод имитационного моделирования поверхности с вытравленным нерегулярным рельефом, позволяющий объяснить: а) ограничения на **точность измерения** оптических констант; б) **общие закономерности** (наличие экстремумов в зависимостях  $\Psi(\varphi_0)$  и  $\Delta(\varphi_0)$ , обусловленных интерференцией отраженного и рассеянного света) и в) **существенные отличия** (в магнитуде и ширине экстремумов и их количестве) для поляризации света, отраженного от модельной поверхности **диэлектриков и металлов**.
- Неразрушающий бесконтактный высокочувствительный метод диагностики, разработанный на базе двух методов: метода параметризации диэлектрической функции (на основе зонной теории твердого тела) и метода эквивалентной пленки (на основе принципа аддитивности) для определения параметров наноразмерных пленок high-k dielectric и пленок в гетероструктурах, содержащих сверхрешетку, полученных молекулярно-лучевой эпитаксией для изготовления транзисторов гигагерцового диапазона.

**Научная обоснованность и достоверность** полученных экспериментальных результатов, представленных в диссертационной работе, определяется использованием современных методов измерений, современной экспериментальной техники и воспроизведением обнаруженных эффектов в ряде зарубежных научных коллективов, о чем свидетельствуют ссылки на опубликованные автором работы по теме данной диссертации.

Настоящая работа выполнена в Институте физики полупроводников СО РАН в течение 1979-2013г. Часть работ была поддержана грантами РФФИ: 1) «Математическое моделирование процессов взаимодействия излучения со слоистыми структурами, состоящими из металлических, полупроводниковых и диэлектрических слоев, и исследование алгоритмов решения обратных задач эллипсометрии» (98-01-00965-а, руководитель чл.-корр. РАН **Свиташев К.К.**), 2) «Электронная зонная структура и оптические свойства AlGaN/GaN гетероструктур с двумерным электронным газом» (05-02-17259-а, руководитель д.ф.-м.н. **Журавлев К.С.**), 3) «Свойства нанокристаллов кремния (нановискеров), пассивированных нанослоями оксида титана» (07-02-01250-а, руководитель академик РАН **Асеев А.Л.**) и 4) «Электронный транспорт в предельно малых кремниевых нанопиларах» (10-02-00926-а, руководитель академик РАН **Асеев А.Л.**); 5) междисциплинарный интеграционный проект



фундаментальных исследований на 2012 – 2014 гг. с участием ИНХ, ИТПМ ИГД и ИФП «Разработка газодинамических способов получения наноразмерных частиц и формирования покрытий» (Координатор проекта: д.т.н. А.И. Сапрыкин (ИНХ СО РАН).

**Апробация работы.** Материалы диссертации в виде 36 докладов обсуждались на 6 Российских и 17 Международных научных конференциях:

2<sup>ая</sup> Всесоюзная конференция “Эллипсометрия - метод исследования физико-химических процессов на поверхности твердых тел”, (Новосибирск, 1981), 3 доклада; Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Физика окисных пленок», 1982, Петрозаводск, с. 17; 3<sup>ья</sup> Всесоюзная конференция “Эллипсометрия: теория, методы, приложения”, (Новосибирск, 9-11 июля 1985), 2 доклада; 4<sup>ая</sup> Всесоюзная конференция “Эллипсометрия: теория, методы, приложения”, (Новосибирск, 19-21 июля 1989), 4 доклада; 10-я Байкальская школа-семинар «Методы оптимизации и их приложения», (Иркутск, 14-19 августа 1995), 1 доклад; The 2<sup>nd</sup> International Conference on Spectroscopic Ellipsometry- ICSE-2, (Charleston, SC, USA, 12-15 May 1997), 2 Abstracts: P2.15 and P4.12; Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on Microelectronics, Yugoslavia, 15-17 September, Vol. 1, p.111-114, 1997; Infos’97-Insulation Films on Semiconductors, June 11-14, Stenungsund, Sweden, P13, 1997; The 29<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference.-(20-24 May 2002, New Orleans, USA), Proceedings, p. 1178-1181; Кремний-2002, (Новосибирск, 9-12 июля 2002 г.) ”Совещание по росту кристаллов, пленок и дефектам структуры кремния” с. 154; The 6<sup>th</sup> International Conference on Nitride Semiconductors, (28.08-2.09.2005, Bremen, Germany), Abstract Th-P-072; The 14<sup>th</sup> International Symposium on Nanostructures Physics and Technology, (26-30.06.2006, St. Petersburg, Russia), Abstract, p. 82-83; The 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, (24-28 July, 2006, Vienna, Austria) Abstract FrM2j.31; Symposium on Growth of III-Nitrides, (Linkoping, Sweden, 2006) Abstract; The 4th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry- ICSE-4, (Stockholm, Sweden, June 11-15, 2007), 3 Abstracts: p. 28, p.81, p. 290; MRS spring meeting 2008, (San Francisco CA, USA), Abstract H4.42; The 5th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry- ICSE-5, (Albany NY USA, 23-28 May, 2010) 4 Abstracts; The 18<sup>th</sup> International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology” (St. Petersburg, Russia, June 21-26, 2010) 1 Abstract, SCORPH-2010 VIII Иссык-Кульская международная конференция по инновационным материалам 1 oral presentation; 7th International Conference on Nanosciences & Nanotechnologies (NN10), oral presentation, 11-14 July 2010, Ouranoupolis Halkidiki, Greece, p.58; 2 Posters on 2<sup>nd</sup> International Conference on OEEM 2012, China, Shanghai, p. 95 and p. 127;. oral presentation on E-MRS 2012 FALL MEETING, September 17-21, Poland, Program K-XI 3; oral presentation on The First International Conference “Development of nanotechnologies” Barnaul, 2012, Proceedings p. 124-126.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 43 статьи из Перечня ВАК, 14 публикаций, не входящих в Перечень ВАК, и 5 препринтов.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения с общими выводами и содержит 302 страницы основного текста, включая 126 графиков и иллюстраций, 34 таблицы; и 310 наименований цитируемой литературы.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Работа состоит из двух частей. Первая часть (глава 1 - глава 3) посвящена развитию теории метода эллипсометрии, т.к. в ней рассмотрены фундаментальные ограничения на точность измерений и методы математической обработки экспериментальных результатов при нахождении искомых параметров. Рассмотрены случаи, когда возможно аналитическое решение; и исследованы фундаментальные причины ограничения точности, однозначности (единственности) и независимости решения задач эллипсометрии численными методами. Показано улучшение точности новыми методами решения с применением моделирования процессов отражения.

Вторая часть работы (глава 4- глава 6) экспериментальная и посвящена разработке новых методов эллипсометрических измерений при исследовании свойств наноразмерных пленок диэлектриков, полупроводников и металлов; разработке имитационных методов моделирования свойств шероховатой поверхности и сравнению экспериментальных зависимостей поляризационных характеристик поверхности с вытравленным рельефом СФМ с характеристиками, вычисленными по разработанной модели; разработке методов измерения параметров тонких пленок в области энергий фотонов 1.5-4.75 эВ; и сочетанию нескольких методов: многоугловой (MAI), модуляционной и спектральной эллипсометрии для определения свойств наноразмерных пленок.

**Во введении** дается обоснование актуальности эллипсометрических исследований различных структур, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, сформулирован личный вклад автора, а также основные положения, выносимые на защиту; излагается практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** вводятся основные формулы, используемые в эллипсометрии (основное уравнение эллипсометрии, обобщенные коэффициенты Френеля, матрицы Абелеса, Джонса и Мюллера); и приводится классификация эллипсометрических измерений; описывается общая характеристика выполненного исследования. Разработан универсальный метод многоугловых эллипсометрических измерений и рассмотрены особенности измерения двух и трех параметров отражающей системы (для поглощающих и непоглощающих сред). Простота метода измерений и доступность оборудования (эллипсометра, работающего на одной длине волны) в данном случае очень важны для практики.

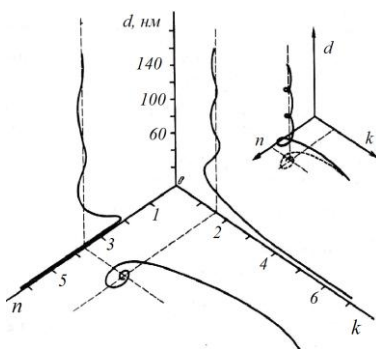


Рис.1

x	
[3.75-i1.38; 550 A]8	1[4.04-i1.56; 586 A]
	5[3.87-i1.53; 619 A]
[3.79-i1.38; 535 A]4	2[3.85-i1.38; 540 A]
y	
[3.83-i1.47; 608 A]7	6[3.92-i1.61; 660 A]
	3[3.81-i1.49; 641 A]

Рис1а

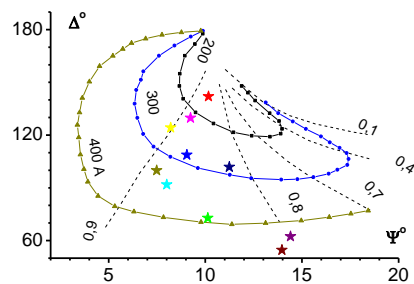


Рис. 2.

Разработан метод нового решения в виде 3D-кривой, одна из проекций которой является логарифмической спиралью с переменным коэффициентом роста (Рис. 1), сформулирован способ **устранения неоднозначности**. Повышена **чувствительность** метода, что показано на примере измерения однородности пленки HgTe по площади образца (Рис. 1а). Разработан новый графоаналитический метод определения четырех параметров неомогенной пленки. На Рис. 2 показаны номограммы для определения толщины  $d$  и объемной доли  $q$  для пленок поликристаллического кремния с разным размером зерна.

**Вторая глава** посвящена рассмотрению фундаментальных ограничений точности и разработке нового метода статистической обработки результатов найденных решений для увеличения точности МЕТОДА. К сожалению, **не существует одного универсального алгоритма решения ОЗЭ**, поэтому для каждого типа задач необходим выбор метода измерений и оценка точности и адекватности модели. В первых двух параграфах разработан метод статистической обработки выборки найденных решений, смысл которой состоит в разбиении на несколько этапов процедуры поиска минимума функционала и последовательное изменение границ симплекса. Об эффективности разработанного численного алгоритма решения свидетельствует **увеличение точности**, которая ограничена лишь реальными погрешностями измерений. Введены числовые характеристики *обусловленности* обратной задачи, определяющие **реально достижимую точность** оценки каждого из параметров. Выявлен случайный характер найденных решений для плохо обусловленных задач, имеющих сложную форму поверхности минимизируемого функционала. Рассмотрено влияние формы функционала на **точность** итерационного процесса. На Рис. 3а,б показана причина линейной взаимной зависимости параметров ( $d_1-d_2$ ). Ключевым вопросом **точности определения** параметров остается выбор функционала, определяющий число локальных минимумов, которые показаны на Рис.3с для семи типов функционалов  $\chi^2$  для однослойной системы Si-SiO<sub>2</sub>. В третьем-пятом параграфах разработан метод определения **однозначности, независимости** решений и **информативности** эллипсометрических измерений и разработаны методы увеличения

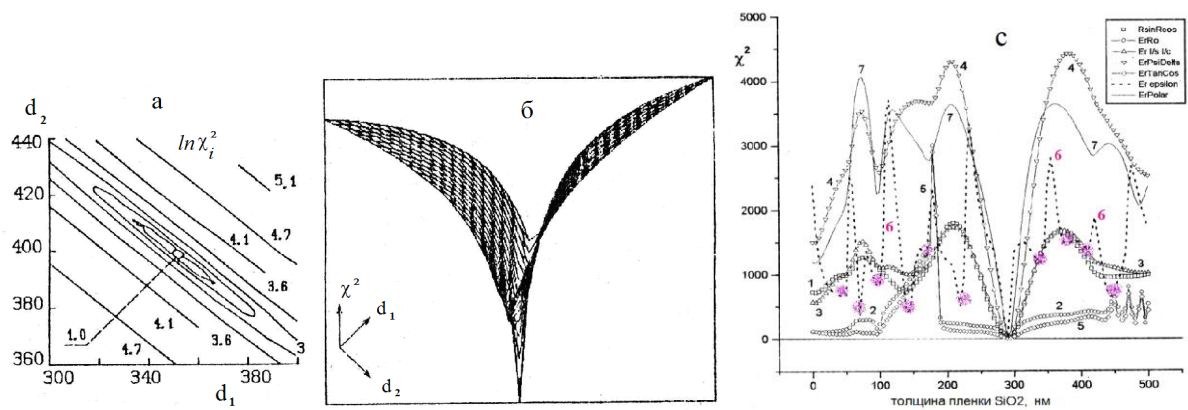


Рис. 3.

**точности** при устранении плохой обусловленности путем выбора шага итераций и критерия останова. Моделирование процесса отражения для многоугловых эллипсометрических измерений на одной и нескольких длинах волн показало, что оценивание нескольких параметров по одной паре  $\Psi$  и  $\Delta$  приводит к большим погрешностям решения. Усреднение по нескольким решениям **уменьшает** разброс оценок. Оценки разных параметров имеют разную степень **достоверности**, что численно характеризуется их обусловленностью, т. е. степенью влияния проекции параметра  $a_j$  на величину минимизируемого функционала  $\Phi(a)$ . Показана возможность математического **планирования** эксперимента, осуществлено вычисление коэффициента обусловленности  $K_{cond} = \max \delta a_i / \min \delta a_i$  или коэффициента  $K_v$ , представляющего собой **нормированный «объем» функционала в точке  $a^*$  в  $m$ -мерном пространстве параметров.**

**Третья глава** посвящена способам повышения точности метода эллипсометрии: анализу **фундаментальных ограничений** точности номограммного метода, предложенного Арчером [6], смыслом которого является отображение входных данных (комплексной плоскости измеряемых эллипсометрических углов) на комплексную плоскость искомых величин (параметров пленки). Показано **ограничение точности** при возникновении неоднозначности, и разработан **метод** определения числа (семейства) решений.

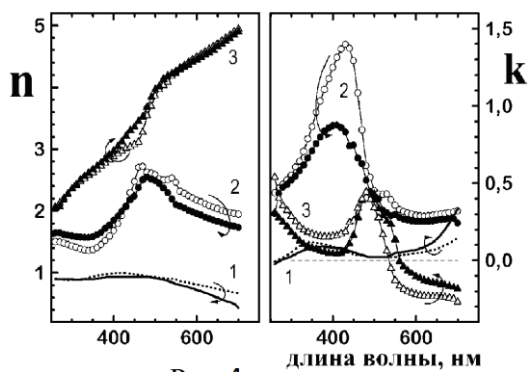


Рис. 4

На Рис. 4 показан пример восстановления семейства решений (три пары  $n, k(\lambda)$  ветвей) для  $VO_x$ , полученных для одного набора экспериментальных данных  $\Psi(\lambda)$  и  $\Delta(\lambda)$ . Стрелки на графике указывают изменения в пленке до и после фазового перехода. Толщина пленки (81.8 нм) была априорно определена из МАЭ эллипсометрических измерений.

Хотя математическая идея получения семейства решений очень заманчива, от некоторых из них в **данной** задаче (Рис.4) придется отказаться, поскольку они не имеют физического

смысла (ветви 1-1', где  $n \approx 1$ , и ветви и 2-2', где есть участок с  $k < 0$ , что маловероятно для  $\text{VO}_x$ ).

**Четвертая глава** содержит описание экспериментов, где учтены причины фундаментальных ограничений метода и использованы разработанные в предыдущих главах способы повышения точности измерения **ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**. Варьируемым параметром в зависимости от условий эксперимента могут являться: угол падения света, время- для кинетики процесса, длина волны падающего света или температура- для фазового перехода I рода. В каждом параграфе этой главы обсуждается причина выбора метода и ожидаемый результат. В первых двух параграфах разработан **новый метод вспомогательных номограмм  $\delta\Delta$ — $\delta\Psi$**  для измерения кинетических параметров роста естественных окислов, образующихся на свежем сколе поверхности полупроводников  $\text{A}_3\text{B}_5$  и  $\text{A}_2\text{B}_6$ : GaAs(110) и CdTe(111). Обнаружено, что ультрафиолетовое облучение GaAs(110) изменяет логарифмический закон роста пленки на кубический и увеличивает предельную толщину пленки окисла с  $\sim 8 \text{ \AA}$  до  $\sim 15$  при окислении в течение 8 часов:

$$d_1 = d_0 \ln A(\tau + \tau_0), \quad \text{УФО} \Rightarrow \quad d_2^3 = 3K\tau + 3c = A\tau + b,$$

$$d_0 = 1.48 \text{ \AA}, A = 0.198 \text{ мин}^{-1}, \tau_0 = 1 \text{ мин}. \quad A = 11.6 \text{ \AA}^3 \text{ мин}^{-1}, \quad b = -4.9 \text{ \AA}^3.$$

Логарифмический закон роста пленки окисла, который выполняется только для сплошных пленок, был предсказан в рамках теории Мотта и Кабреры, если лимитирующей стадией является туннелирование электронов на внешнюю границу оксида. Ультрафиолетовое облучение стимулирует в GaAs фотогенерацию электронов и туннельный эффект перестает быть лимитирующей стадией. Найденное экспериментально изменение стандартной свободной энергии реакции превращения хемосорбированного кислорода в кислород оксида  $\Delta\mu = 0.999 \div 1.7$  эВ, хорошо согласуется с энергией перехода  $\text{O}_2$  в  $\text{O}_2^-$ , равной 1.23 эВ, по теории Баха-Энглера [9]. Состав пленки, установленный из РФЭ и ОЖЭ спектров, представляет собой смесь оксидов  $\text{Ga}_2\text{O}_3 : \text{As}_2\text{O}_3 = 0.71:1$  в отсутствие освещения и  $\text{Ga}_2\text{O}_3 : \text{As}_2\text{O}_3 = 2.7:1$  при УФ освещении. Поэтому измеренный показатель преломления пленок ( $\sim 2.0$ ) отличается от соответствующих величин объемных кристаллов окислов, входящих в состав пленки. Во втором параграфе, используя аналогичный метод номограмм приращений, из эллипсометрических измерений на монокристаллическом CdTe(111) получен важный результат для воспроизводимости полупроводниковых структур. Предварительный отжиг в водороде по сравнению с ионной очисткой дает более **стабильную** поверхность CdTe. Показано **влияние естественного окисла на точность измерения его оптических констант**. Экспериментальные зависимости приращения эллипсометрического угла  $\delta\Delta$  от времени экспозиции  $\tau$  приведены на Рис. 5а, где кривая 1 относится к образцу после ионного травления, и 2 - после отжига в водороде, эти кривые аппроксимируются экспоненциальными

зависимостями:  $\delta\Delta_1 = \exp(-\tau/33.7) - 0.83$  и  $\delta\Delta_2 = \exp(-\tau/16.47) - 5.59$ . Следовательно, согласно **уравнению** Друде  $\delta\Delta \approx -C_{\Delta}d$ , из графика  $\delta\Delta(\tau)$  получим **экспоненциальные** зависимости  $d(\tau)$  не зависимо от предшествующей обработки. Использование номограмм на плоскости  $\delta\Delta$ — $\delta\Psi$  позволило минимизировать ошибку, связанную с определением начальной точки ( $d=0$ ), и определить показатель и толщину сверхтонких (0.5-2.0 нм) окисных пленок на CdTe. После ионной очистки образуется пленка:  $n_1=1.5$ ,  $d_1=16$ — $20$  Å, а после отжига в водороде при длительной экспозиции на воздухе образуется пленка другого состава:  $n_2=2.2$ — $2.3$ ;  $d_2=10$ - $12$  Å; показатель преломления пленки близок к показателю  $\text{TeO}_2$  ( $n_q=2.35$ ,  $n_m=2.18$ ,  $n_p=2.0$ ).

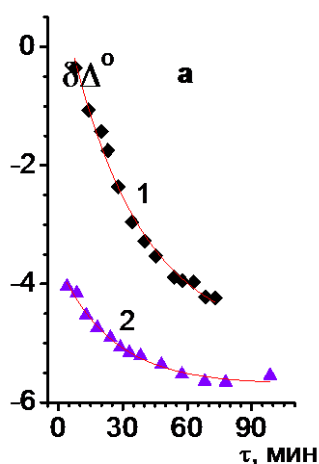
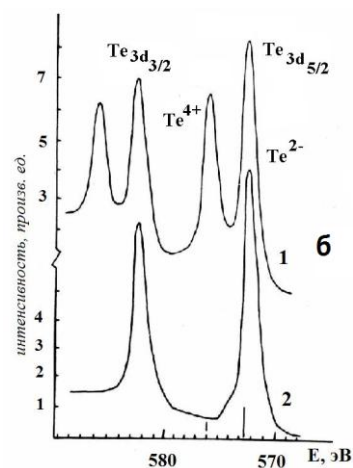


Рис. 5. а) Кинетика окисления с-  
CdTe(111). 1-после ионной  
очистки; 2-после отжига в  
водороде: б) Оже электронные  
спектры CdTe: химический  
сдвиг  $\delta$  в дуплете составил  $\sim 3.5$   
эВ:(576 эВ→572.5 эВ)эВ



Точность определения в рамках предлагаемой методики составляет  $0.02$  Å по толщине и  $0.01$  по показателю преломления. Методы: ОЖЭС и РФЭС подтвердили эллипсометрические расчеты. Из анализа Оже- и РФЭ- спектров получено, что при длительной экспозиции на воздухе образуется сложный окисел  $\text{TeO}_2 + \text{CdO}$ , а при отжиге в водороде - окисел  $\text{TeO}_2$ . Отсюда следует **косвенный** вывод, что после отжига в водороде поверхность обогащена теллуrom. В третьем параграфе разработан **комбинированный метод** эллипсометрических измерений, сочетающий **метод Друде и метод вспомогательных номограмм  $\delta\Delta$ - $\delta\Psi$**  для  $\lambda=0.63$  мкм. Измерены параметры пленки куприта на поверхности **меди**, образующейся в течение 16 суток. На Рис. 6 показано изменение состояния поляризации отраженного света при формировании nano размерной пленки оксида меди {зависимости  $\Psi(\tau^{1/2})$  и  $\Delta(\tau^{1/2})$ } и ее толщины, где можно выделить три характерных участка. На участке I значение  $\Delta$  уменьшается на  $\sim 2,5^\circ$  линейно от  $\tau^{1/2}$ , а флуктуации  $\Psi$  составляют всего  $12'$ .

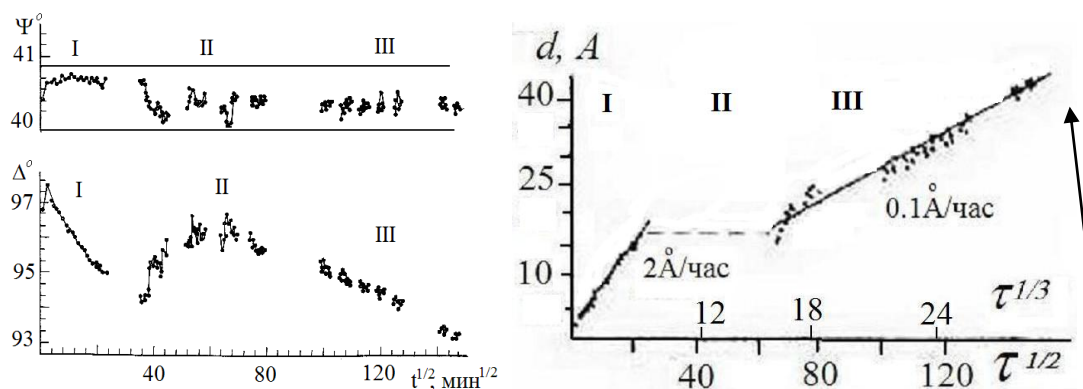


Рис. 6. Зависимость поляризационных углов  $\Psi$  и  $\Delta$  и толщины окисла от времени экспозиции поверхности меди на воздухе при  $T=20\pm 1^\circ\text{C}$ ; угол падения  $\varphi_0=70^\circ$ ,  $\lambda=0.63$  мкм.

Участок II (экспозиция 3 суток) характеризуется немонотонными изменениями  $\Delta$  и  $\Psi$ . Флуктуации  $\Psi$  («поляризационный шум»)  $\sim 40'$  не могут быть объяснены ростом какой-либо пленки и были объяснены перестройкой поверхности, т.е. последовательными стадиями взаимодействия молекулярного кислорода с металлом: а) хемосорбцией, б) диссоциацией молекул, в) образованием связи «ион кислорода- катион металла». На участке III флуктуации  $\Psi$  и  $\Delta$  уменьшаются по сравнению с участком II, угол  $\Delta$  снова уменьшается, но значительно медленнее, чем на участке I. Из уравнений Друде следует, что на линейных участках окисления эллипсометрические углы связаны соотношениями:  $\Delta = a\Psi + b$ , где  $a = -2\sin 2\bar{\Psi} C_\Delta / C_\Psi$ ,  $b = \bar{\Delta} - a\bar{\Psi}$ , где  $\bar{\Delta}$  и  $\bar{\Psi}$  - эллипсометрические углы чистой поверхности. Отношение коэффициентов  $C_\Delta / C_\Psi$ , легко вычисляется из эксперимента и позволяет найти показатель преломления пленки для начального участка окисления, равный 2.5—2.6. Зная  $n_1$ , по любому из уравнений Друде можно найти толщину пленки  $d_I = -\delta\Delta / C_\Delta \approx 16 \text{ \AA}$ . Номограммный метод чувствителен к толщине пленки, тогда как отношение коэффициентов  $C_\Delta / C_\Psi$  чувствительно, именно, к показателю преломления пленки. Участок I окисления хорошо описывается параболическим законом:  $d = d_0 (\tau^{1/2} + \tau_0^{1/2})$ . Из расчета изменения оптических констант, на II участке имеет место сильное *обогащение катионами металла* окисленного слоя, сопровождающиеся значительными флуктуациями поляризационных углов («поляризационным шумом»). Расчет параметров окисла на III участке при условии, что после перестройки толщина слоя осталась неизменной (на Рис.8 показана пунктиром), но изменились ее оптические свойства, дал следующие результаты:  $d_3 \approx 25 \text{ \AA}$ ,  $n \approx 2.5 - 2.8$ , которые неплохо согласуются с результатами измерений ( $n=2.45\div 2.76$  и  $k=0.24$  [11]) для пленок куприта  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Согласно правилу Освальда, на меди идет образование фаз: **Cu (p-тип) /  $\text{Cu}_2\text{O}$  /  $\text{CuO}$  /  $\text{O}_2$** , причем при  $T=20^\circ\text{C}$  образуется преимущественно куприт [10]. Третий участок лучше спрямляется в координатах от  $d(\tau^{1/3})$ . Из теории Мотта следует, что для

перехода от параболического закона окисления к кубическому необходимо перераспределение плотности и типа дефектов в слое. С этой точки зрения, понятна причина перестройки поверхностного слоя на втором участке окисления. В четвертом параграфе обосновано сочетание нескольких методов эллипсометрических измерений: **методом последовательного окисления** из MAI и модуляционных эллипсометрических измерений в области температур фазового перехода I рода, где происходит резкое изменение кристаллической структуры, проводимости и оптических свойств, определены свойства **неоднородной по составу** пленки термически окисленного ванадия. Метод использует «сшивку» двух задач по общему параметру для определения толщины окисной пленки и получения зависимости состава по глубине (профилей оптических констант) для двух температур: до и после фазового перехода металл-полупроводник. Построены кривые роста окисла ванадия для 400°C, 450°C, 490°C и обсуждается температурная зависимость механизма роста окисла. Для окислов ванадия была применен **метод «последовательного наращивания»** пленки. Каждый *i*-й исследуемый образец рассматривался как совокупность (*i*-1)-го образца и некоторого дополнительного слоя окисла  $\delta d_i$ . При этом (*i*-1)-й образец характеризовался эффективными оптическими константами  $n_{эф}$   $k_{эф}$ . В пределах слоя  $\delta d_i$  комплексная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_i$  линейно зависит от толщины слоя  $\delta d_i$  и не меняет своего значения на границе:  $\varepsilon_i(d) = \varepsilon_{i-1}^{exp}(1 + \alpha_i d)$ , где  $d \in (d, \delta d_i)$ ;  $\varepsilon_{i-1}^{exp}$  - значение  $\varepsilon$  на верхней границе (*i*-1)-го образца;  $\alpha$ - константа. Для первого образца  $\varepsilon_1(d) = \varepsilon_v(1 + \alpha_1 d)$ , где  $\varepsilon_v$  — комплексная диэлектрическая проницаемость ванадия. Таким образом, по программе однослойного линейного поиска [12], для каждого *i*-го слоя определяются три величины: прирост толщины *i*-го образца  $\delta d_i$ , и значения комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{i-1}^{exp}$  на верхней границе *i*-го образца. Полученный набор величин  $\delta d_i$  и  $\varepsilon_i^{exp}$  позволяет получить, по крайней мере, в нулевом приближении, **аппроксимацию функции  $N(d)=n(d)+ik(d)$**  для окисной пленки ванадия в виде ломаной линии. Пунктирными линиями обозначена последовательность расчета: в качестве эффективной подложки не всегда использовался предыдущий слой, иногда это был более глубокий слой, что связано с нелинейным движением фронта окисления. Трудно предположить, что профили оптических констант пленки оксида ванадия могут иметь столь сложный характер (пунктир на Рис. 7а, б). Поэтому профиль оптических констант окисной пленки  $n(d)$  и  $k(d)$  был описан с помощью двух экспонент. Подставляя  $n(d)$  и  $k(d)$  в основное уравнение эллипсометрии  $\rho = tg\Psi \exp(i\Delta)$  и вычисляя функции  $\Psi(d)$  и  $\Delta(d)$ , на плоскости  $\Psi$ — $\Delta$ , построены две кривые для  $t_1$  и  $t_2$ , причем для каждого образца должно выполняться условие равенства толщин.



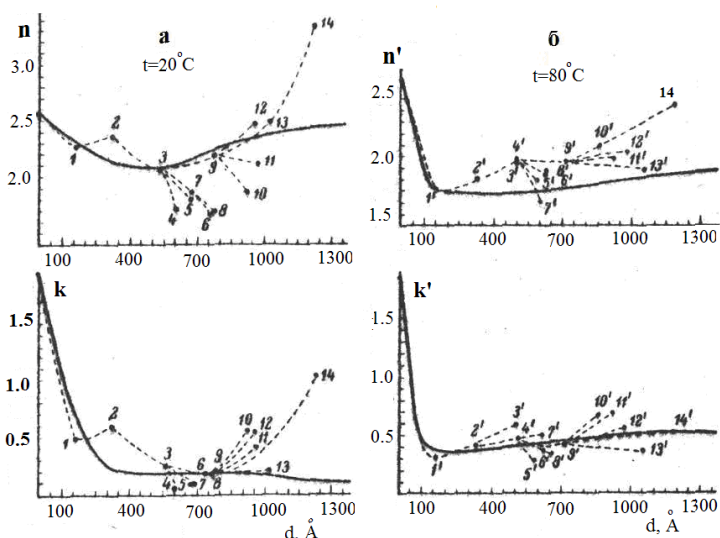


Рис. 7. Зависимость оптических констант оксида ванадия от его толщины.

Хорошее согласие расчетных кривых на Рис.8 с результатами эксперимента  $[d(t_1)=d(t_2)\pm 10\text{Å}]$  является убедительным доказательством эффективности описанной выше методики определения функций  $n(d)$  и  $k(d)$  для пленки сложного состава. Обнаружено, что в процессе роста

пленки при временах окисления до 250 минут профили оптических констант внутренних слоев пленки существенно не изменяются, и только для больших времен окисления (точки 14 и 14') происходит заметная деформация функций  $n(d)$  и  $k(d)$ .

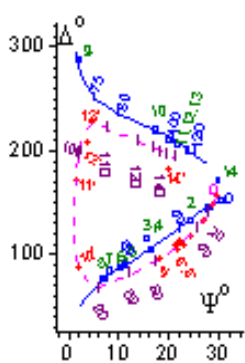


Рис. 8.

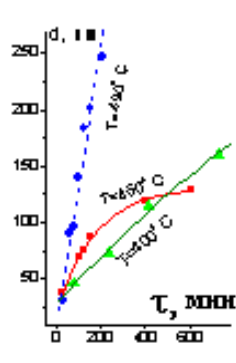


Рис. 9.

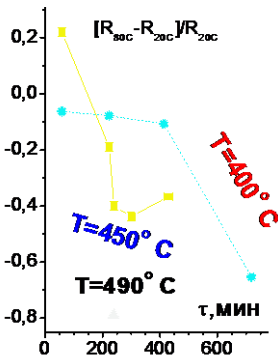


Рис. 10.

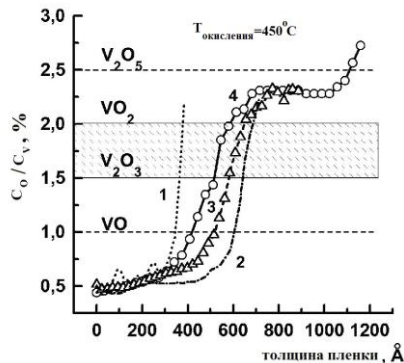


Рис. 11

Методом эллипсометрических измерений показано, что изменение температуры окисления приводит к смене закона роста, толщины и скачка сопротивления окисной пленки, образующейся за одно и тоже время (Рис. 9, 10). Неоднородность пленки подтверждена вычислением отношений атомных концентраций кислород/ванадий как функции толщины пленки, полученными из ОЖЭ спектров методом послойного травления (Рис. 11, где заштрихованная область соответствует оксидам ряда Магнели; время окисления в секундах равно: 1-30; 2-115; 3-150; 4-400; температура окисления  $T=450^\circ\text{C}$ ). Фазовый переход в кристалле  $\text{VO}_2$  является фазовым переходом первого рода и сопровождается изменением электропроводности и переходом из тетрагональной в моноклинную кристаллическую модификацию скачком. Следовательно, изменение оптических свойств должно происходить скачкообразно. Эта идея лежит в основе нашего эксперимента. В реальном эксперименте переход металл-полупроводник происходит в некотором температурном интервале для  $\lambda=0.63$  мкм. Методом динамических измерений (Рис. 12) для термически окисленного ванадия,

содержащего смесь различных окислов, определена крутизна перехода (или ширина температурного интервала фазового перехода) из полупроводникового состояния в металлическое, которая служит мерой содержания  $\text{VO}_2$  фазы в пленке.

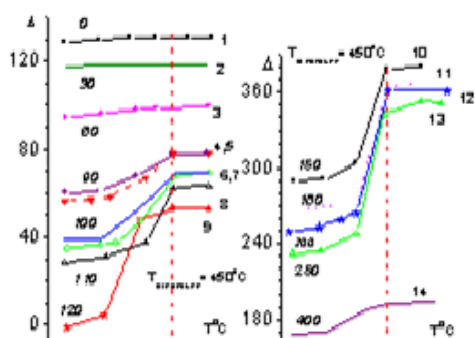


Рис.12

На Рис. 12 представлен метод динамических измерений фазового угла  $\Delta$  комплексного коэффициента отражения  $\rho$  для всей серии образцов, окисленных при температуре  $T=450^\circ\text{C}$ .

На образцах 1-3, где идет формирование переходного слоя, угол  $\Delta$  не зависит от температуры нагрева образца. При увеличении времени окисления начинает образовываться фаза  $\text{VO}_2$  и появляется фазовый переход на образцах 4-6, где изменение  $\Delta$  достигает  $30^\circ$ , а далее оно продолжает расти и резко падает для 14 образца, где формируется фаза высшего окисла ванадия-  $\text{V}_2\text{O}_5$ . Таким методом оптимизирован режим окисления ФТИРОСа для получения максимального содержания  $\text{VO}_2$ .

Пятый параграф посвящен разработке **метода многоугловой эллипсометрии** в сочетании с **методом варьирования толщины** для обнаружения избыточного кремния в блокирующем слое МНОП-структур, ответственного за концентрацию ловушек в элементах памяти [13]. Метод многоугловых измерений был следующий: сверху вниз послойное травление и измерение  $\Psi$  и  $\Delta$  на каждом шаге травления продолжалось до тех пор, пока Si подложка не была достигнута. Метод определения параметров каждого удаленного слоя осуществлялся шаг за шагом снизу вверх; сначала параметры самого нижнего слоя двуокиси кремния  $n_1$ ,  $d_1$  на кремнии и затем на каждом следующем шаге определялись одновременно четыре параметра ( $n_1$ ,  $d_1$  и  $n_2$ ,  $d_2$ ). При расчете полагали, что измеряемые слои прозрачны (т.е. не поглощают и  $k_1 = k_2 = 0$ ) и однородны, а границы слоев резкие. Время травления для каждого шага выдерживалось достаточно малым, чтобы обеспечить хорошее разрешение по глубине (по профилю) структуры. Параметры  $n_1$  и  $d_1$  термического окисла  $\text{SiO}_2$  на кремнии были **независимо** подтверждены **многократно** (на каждом шаге вычисления) как для структуры с естественным окислом, так и для структуры после влажного окисления. Точность решения равняется  $n_1 \pm 2\%$  (от среднего значения показателя преломления) и  $d_1 \pm 5\%$  (от среднего значения толщины пленки) и ограничена точностью позиционирования образца на каждом шаге измерения.. Обогащение слоев  $\text{SiN}_x$  или  $\text{SiO}_x$  избыточным кремнием приводит к увеличению показателей преломления этих слоев.

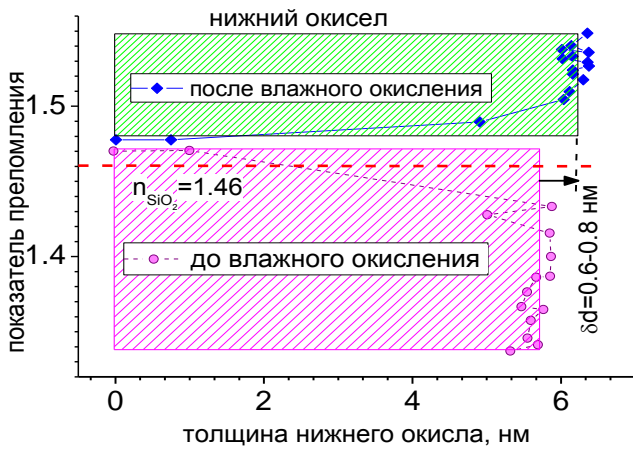


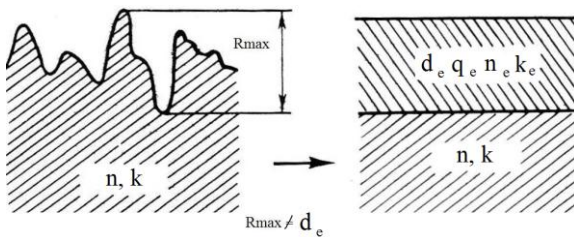
Рис. 13

Влажное окисление приводит к изменению оптических свойств не только  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , и вновь сформированного поверх нитрида окисла  $\text{SiO}_2$ , но и свойств нижнего изолированного окисла  $\text{SiO}_2$  на границе с кремнием, как показано на рисунке 13. Результаты эллипсометрии, ИКС (IRS), ОЖЭС, РФЭС(XPS) и ЭПЭС (EELS) подтверждают

наличие избыточного кремния на границах:  $\text{Si}_3\text{N}_4$  / **термический**  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  / естественный  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  / **влажный окисел**. Образование Si-Si связей во время окисления  $\text{Si}_3\text{N}_4$  подробно рассмотрено с позиций теории реакций в твердых телах и объяснено правилом Мотта: замена трехкоординированного атома N на двухкоординированный атом O приводит к образованию Si-Si дефектов.

**В пятой главе**

разработаны методы моделирования процесса отражения



поляризованного света, используемые для интерпретации свойств шероховатых поверхностей. Разработаны два новых метода: математического и имитационного моделирования шероховатой поверхности для

различного уровня шероховатости, и рассмотрены особенности разработанных методов. Впервые ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД применен для объяснения причины разрушения зеркальных поверхностей при отражении мощного пучка света. В первом параграфе; определены оптические свойства модельных пленок и границы применимости методов. Физическая суть метода эквивалентной пленки состоит в том, что  $q$ -параметр объемной доли материала, с одной стороны, описывает макроскопические свойства эквивалентной пленки, такие как: число дефектов на единицу площади, некоторый усредненный профиль шероховатого слоя. С другой стороны,  $q$  описывает микроскопические свойства пленки: плотность, поляризуемость единичного объема пленки, а также определяет параметры волнового вектора электромагнитной волны в пленке. Для поляризуемости единичного объема эквивалентной пленки  $\alpha_e$  выполняется условие аддитивности:  $\alpha_e = q\alpha_s + (1-q)\alpha_v$ , где  $\alpha_s$  и  $\alpha_v$  – поляризуемости двух компонент пленки. Эквивалентная толщина  $d_e$  не равна толщине шероховатого слоя, определяемого максимальной высотой неровности  $R_{\max}$ , поэтому  $d_e$  нельзя сравнивать с результатами интерферометрической оценки без статистической обработки. В этом параграфе разработан метод, основанный на определении

поляризуемости вещества с поправкой Г. А. Лорентца, которая учитывает влияние электрического поля, создаваемого окружающими частицами. Анализ показал [1988 г.], что концентрационный резонанс  $\varepsilon(q)$  возможен только для поглощающих материалов, таких как медь, серебро, золото. Похожие соотношения были получены для условий возникновения плазмонов в островковых металлических пленках: [Raether Heinz, Surface Plasmons on smooth and rough surfaces and Gratings.-Springer-Verlag, 1988]. Известно аналогичное явление концентрационной зависимости оптических свойств в неупорядоченных металлических сплавах и явление опалесценции, сопровождающееся резким усилением рассеяния света чистыми веществами, находящимися в критической точке газ-жидкость

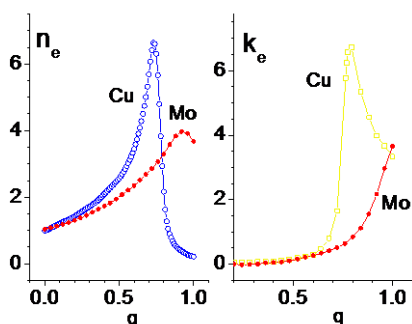


Рис. 14.

На Рис. 14 приведены расчетные зависимости оптических свойств модельных пленок:  $n_e(q)$  и  $k_e(q)$  для двух металлов: меди и молибдена. Наличие экстремумов в  $n_e(q)$  и  $k_e(q)$  приводит к возникновению неоднозначности решения, которая может быть устранена дополнительным анализом их физического смысла. Показано, что наличие

аномально высокого поглощения в тонком слое эквивалентной пленки на зеркально-гладкой поверхности может приводить к коллапсу при отражении мощного пучка света. **Метод** эквивалентной пленки успешно применен для интерпретации осцилляций  $\Psi(t)$  и  $\Delta(t)$ , которые наблюдались в эксперименте [14] при росте суб-наноразмерных МЛЭ пленок Ge на Ge. Если считать, что коэффициент заполнения  $q$  пропорционален времени при постоянном потоке частиц, то зависимости  $\Psi(q)$  и  $\Delta(q)$  будут аналогичны зависимостям  $\Psi(t)$  и  $\Delta(t)$ . Осцилляции  $\Psi$  и  $\Delta$  могут уменьшиться и даже совсем исчезнуть, как в экспериментальной работе [14], если формирование каждого следующего монослоя пленки будет идти с накоплением дефектов роста, что приведет к несовпадению точки  $q=0$  с точкой  $q=1$  и к уменьшению амплитуд  $\delta\Psi(q)$  и  $\delta\Delta(q)$ . Во втором и третьем параграфах разработан метод имитационного моделирования шероховатой поверхности искусственным рельефом, вытравленным с помощью случайной фазовой маски (СФМ). Получено условие максимального влияния рассеянного света, отраженного от рельефной поверхности; приведен расчет зависимостей эллипсометрических параметров  $\Psi(\varphi_0)$  и  $\Delta(\varphi_0)$  при отражении поляризованного света от поверхностей нерегулярного рельефа со случайным законом распределения прямоугольных дефектов  $1/2^{(n+1)}$ . Цель этих параграфов установить корреляционную связь между эллипсометрическими углами  $\Psi$  и  $\Delta$  и известными параметрами искусственного рельефа, объяснить наблюдаемые в эксперименте аномальное поведение  $\Psi(\varphi_0)$  и  $\Delta(\varphi_0)$ , на базе формул, аналитически полученных для модели. Отраженное поле СФМ представляет собой

суперпозицию дифракционных картин Фраунгофера, получающихся в результате дифракции на квадратном отверстии. Все наши измерения относятся только к **нулевому** порядку дифракции, т.е. к зеркально отраженным лучам. Рассмотрены два варианта поперечного профиля дефекта (модельной ячейки): а) с плоскими наклонными боковыми гранями и б) с цилиндрическими боковыми гранями. Аналитически найдены условия с учетом эффекта затенения, при которых свет может рассеиваться в зеркальную компоненту. Интенсивность рассеянных лучей невелика и ее вклад в зеркальную компоненту мало заметен, кроме "особых точек" ( $\varphi_{интер}$  и  $\varphi_B$ ), когда наблюдается минимум **интерференции** волн, отраженных верхней и нижней гранями и/или  $p$ -компонента отраженной волны обращается в нуль.

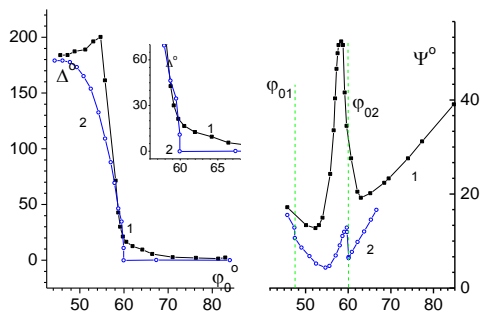
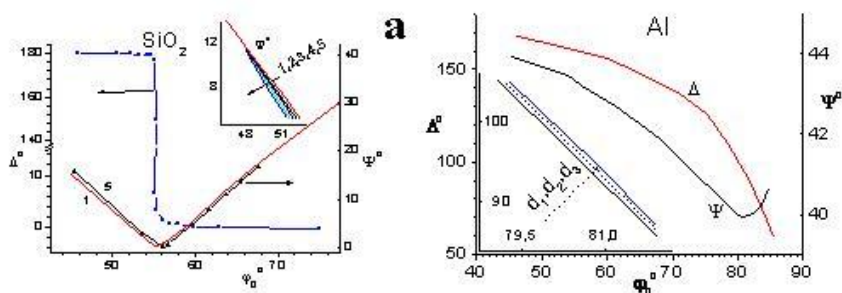


Рис. 15. Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей поляризационных характеристик света: 1)- экспериментальные ( $d=0.306$  мкм и  $a=2.5$  мкм) и 2)- расчетные зависимости для **трапецидальной** ячейки ( $d=0.306$  мкм,  $a=2.3$  мкм и угол наклона боковой грани  $\alpha=75^\circ$ ) поляризационных углов  $\Psi$  и  $\Delta$  для света,

отраженного от поверхности плавленого кварца с рельефом СФМ. Длина волны  $\lambda=0.633$  мкм.

Применен **метод суммирования** всех возможных парциальных волн для нулевого порядка дифракции и показано влияние каждого из параметров ячейки (размера квадрата  $a$ , глубины  $d$ , угла наклона боковой грани  $\alpha$ ) на расчетные зависимости  $\Delta(\varphi_0)$  и  $\Psi(\varphi_0)$ . Расчетные зависимости для трапецидального профиля ячейки имеют резкие границы области рассеяния (Рис. 15), учет кривизны боковых граней элементарной ячейки СФМ позволяет устранить этот недостаток. Из анализа экспериментальных и расчетных зависимостей поляризационных характеристик  $\Psi$  и  $\Delta$  найдены условия для минимизации ошибки, вносимой наличием неровностей на исследуемой поверхности. Экспериментальная зависимость  $\Psi(\varphi_0)$  и  $\Delta(\varphi_0)$  изучена на четырех типах образцов, полученных на двух материалах: на диэлектрике-кварце и металле-алюминии, с размером элементарной ячейки  $25 \times 25$  мкм и  $2.5 \times 2.5$  мкм на каждом из материалов. Глубина рельефа изменялась от  $0.02$  мкм до  $1.005$  мкм. Варьирование глубины рельефа означает изменение условия интерференции.



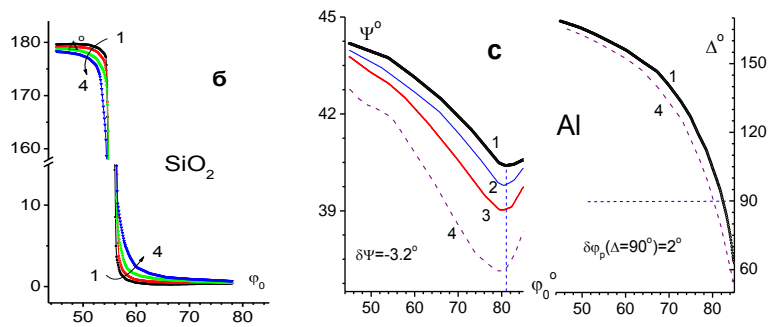


Рис. 16. Сравнение экспериментальных зависимостей поляризационных углов  $\Psi(\varphi_0)$  и  $\Delta(\varphi_0)$  для света, отраженного поверхностью **кварца** и **алюминия** вытравленным рельефом СФМ. **а)** Размер элементарной ячейки **25×25** мкм. Глубина рельефа кварца:  $d_1=20$  нм,  $d_2=40$  нм,  $d_3=50$  нм,  $d_4=80$  нм,  $d_5=110$  нм. При увеличении глубины смещается положение  $\Psi_{\min}$ . Глубина рельефа **алюминия**:  $d_1=20$  нм,  $d_2=40$  нм,  $d_3=80$  нм. На вставке показано поведение  $\Delta$  вблизи псевдо Брюстера, равного для алюминия  $\sim 81^\circ$ , при этом  $\Delta \approx 90^\circ$ ; **б)** размер элементарной ячейки СФМ **2.5×2.5** мкм; глубина рельефа **кварца**:  $d_1=21$  нм,  $d_2=40$  нм,  $d_3=55$  нм,  $d_4=80$  нм; **с)** глубина рельефа **алюминия**:  $d_1=0$  нм,  $d_2=55$  нм,  $d_3=103$  нм,  $d_4=143$  нм. Пунктиром на Рис. 16 отмечено значение угла Брюстера, где  $\delta\Psi_{\min} = \Psi_{1\min} - \Psi_{4\min} = -3.2^\circ$  и смещение главного угла падения  $\varphi_p$ :  $\delta\varphi_p \approx 2^\circ$  при  $\Delta = 90^\circ$ .

Переход от одного размера ячейки СФМ к другому означает изменение в  $\sim 100$  раз плотности "дефектов" на исследуемой поверхности. Переход от одного материала к другому означает изменение интенсивности рассеянного света  $\sim$  в 20 раз (при каждом отражении), поскольку отражательная способность кварца составляет  $\sim 4\%$ , а алюминия  $\sim 90\%$  при нормальном падении. **Поэтому один и тот же рельеф по-разному влияет на поляризационные характеристики света, отраженного от поверхности металла и диэлектрика**, как видно на Рис. 16. Случайная фазовая маска является грубой моделью шероховатой поверхности: размер "дефектов" велик ( $a \gg \lambda$ ), дефекты хоть и распределены случайным образом, но глубина их одинакова, поэтому ярко проявляются интерференционные эффекты при  $d > \lambda/4$ . Однако, даже в рамках такой грубой модели для малой ( $d < \lambda/4$ ) глубины рельефа СФМ изменения экспериментальных зависимостей  $\Delta(\varphi_0)$  и  $\Psi(\varphi_0)$  совпадают с аналогичными зависимостями, полученными нами на полированных поверхностях. Кроме того, этот метод позволил объяснить эксперименты и предсказать аномальное поведение поляризации света, отраженного от поверхности с глубоким рельефом. В четвертом параграфе метод эллипсометрии впервые применен для объяснения экспериментально наблюдаемого «отрицательного» показателя преломления и «гигантского» поглощения в области относительной прозрачности кремния в метаматериалах (кремниевых

наноструктурах) с использованием фазовых соотношений интерферирующего света при отражении. Показано, что модель эквивалентной пленки **не применима** для расчета этих структур.

**В шестой главе** разработаны несколько методов интерпретации эллипсометрических спектральных измерений для сложных GaAs систем, полученных молекулярно-лучевой эпитаксией и содержащих сверхрешетки, и для негомогенных полиморфных пленок окислов титана. Обсуждается причина выбора метода интерпретации с учетом априорной информации. Кроме того, разработаны способы применения **корреляционного метода интерпретации** состава  $Al_xGa_{1-x}N$  или ростовых дефектов в МЛЭ пленках AlN. В первом параграфе рассмотрена суть **метода параметризации** диэлектрической функции (ДФ) и практика его применения. Условия синтеза пленки влияют на ее кристаллическую структуру и состав, что приводит к существенным изменениям спектрального вида  $\varepsilon(\lambda)$ . Практически невозможно создать библиотеку ДФ известных и МЛЭ синтезируемых новых материалов на все случаи жизни. Теоретически все диэлектрические функции должны иметь общую

спектрально выраженную форму [15-18]: 
$$\varepsilon(\omega) = 1 + \sum_j \frac{\omega_{pj}^2}{\omega_{gj}^2 - \omega^2 - 2i\omega\Gamma_j},$$
 автоматически

удовлетворяющую принципу причинности, четности и соотношению Крамерса-Кронига, однозначно связывающему действительную и мнимую части диэлектрической функции во всем диапазоне измерений. Правда, в этих уравнениях не выполняется правило сумм на бесконечности, поэтому **классическая дисперсионная модель аппроксимации диэлектрической функции** может быть использована и в модифицированном виде, с выделением в отдельное слагаемое Друде осциллятора. Во втором параграфе разработана комбинация двух методов измерений пространственно-неоднородных полиморфных пленок: **метода параметризации диэлектрической функции (ДФ) и метода эквивалентной пленки**. Представлены результаты исследования пленок многофазного окисла титана (high-k dielectric), найдено адекватное описание (модель) сложных структур Si/ Ti/TiO<sub>x</sub>/ TiO<sub>2</sub>, определены для всех слоев толщины, состав и законы дисперсии ДФ  $\varepsilon(\lambda)$ .

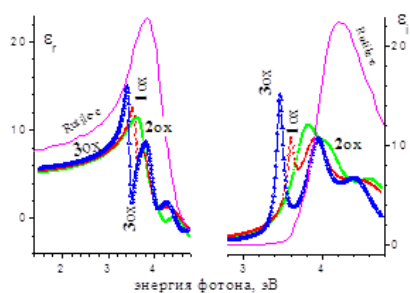


Рис. 18. Реальные  $\varepsilon_1$  и мнимые  $\varepsilon_2$  части диэлектрической функции верхнего слоя модифицированного рутила для Si-Ti образцов, окисленных на воздухе при температуре 750°C в течение 25 часов кумулятивного отжига (1ox, 2ox, 3ox), в спектральном диапазоне 1.5-4.77 эВ.

Объяснено изменение толщин пленок двуокиси титана от времени отжига, а также сдвиг края поглощения и смещение критических точек; что подтверждено независимым методом (Рамановской спектроскопией). Показано, что

спектры диэлектрической функции **модифицированного** рутила для образцов 1оx, 2оx, 3оx характеризуются меньшей магнитудой поглощения и сдвигом в сторону меньших энергий не только края поглощения, но и обеих критических точек. В третьем параграфе разработан **комбинированный метод** измерения свойств пленок с использованием **метода спектральной эллисометрии для области прозрачности и для области сильного поглощения**. Определены оптические константы МЛЭ пленок *n*-типа GaAs:Si в гетероструктурах, содержащих сверхрешетку (Рис. 19), и влияние легирующей примеси на комплексный показатель преломления.

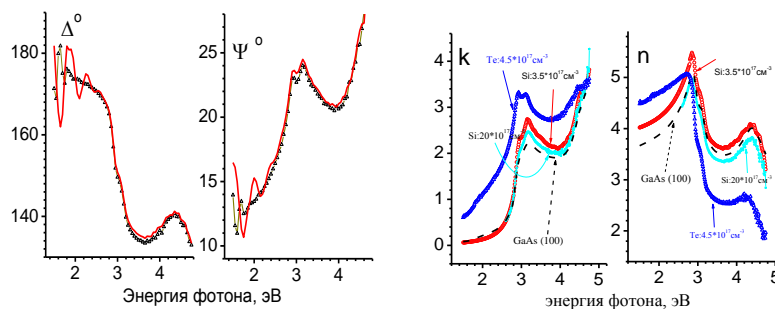


Рис. 19.

В области слабого поглощения от 1.5 до 2.6 эВ можно и без расчетов оценить **воспроизводимость** структур, т.е. насколько отличаются или совпадают по свойствам рабочие слои, что очень важно при изготовлении транзисторов в гигагерцовом диапазоне. Разработанный метод использован для измерения следующих параметров слоев, отличающихся степенью легирования: 1) в области слабого поглощения шести параметров одновременно - толщин  $d_1$  и  $d_2$  и четырех параметров одного осциллятора, описывающего

$\varepsilon_{trans}^{II}(E)$  верхнего слоя:  $\varepsilon_{trans}^{II} = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})\omega_T^2}{\omega_T^2 - \omega^2 + i\Gamma_0\omega}$ , 2) в области  $E > 2.6$  эВ, где глубина

проникновения света значительно меньше толщины пленки, определяется спектральная

зависимость диэлектрической функции только верхнего слоя  $\varepsilon_{opak}^{II} = tg^2 \varphi_0 \left[ 1 - \frac{4\rho}{(1+\rho)^2} \sin^2 \varphi_0 \right]$ .

Контроль скорости роста пленки осуществлялся методом дифракции быстрых электронов на отражение по числу периодов осцилляций интенсивности зеркального рефлекса. Измерения выполнены на спектральном эллисометре фирмы Jobin Yvon в диапазоне энергий 1.5-4.75 эВ. Результаты проведенных исследований могут быть применены для выходного контроля гетероструктур. В четвертом параграфе для спектральных эллисометрических (SE) измерений разработан **метод корреляции** между количеством поверхностных дефектов типа "хилоков" и оптическими свойствами МЛЭ тонких пленок AlN; и разработан корреляционный **метод определения состава** МЛЭ пленок тройных соединений и идентификации **полярности** поверхности  $Al_xGa_{1-x}N$  пленок (Ga/N терминирующей). Корреляционные



зависимости затем можно использовать для сортировки пленок без повреждения образцов. Показано, что состав пленки  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  можно определить непосредственно из измеренных эллипсометрических спектров без вычислений и моделирования, используя калибровочные кривые  $E_g^*(x)$ . Зависимость сдвига края поглощения от состава ( $x=0\div 0.6$ ) для N полярной поверхности видна из спектров  $\varepsilon_i(E)$  на Рис. 20: **а)** Спектры  $\varepsilon_i(E)$  для гетероструктур, выращенных в ИФП СОРАН; **б)** Энергии  $E_g^*(x)$  края поглощения  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  для  $x=0\div 0.6$ , определенные из спектров на Рис.20а; **в)** зависимость  $E_g(x)$  для  $x=0\div 0.15$  из работы [20].

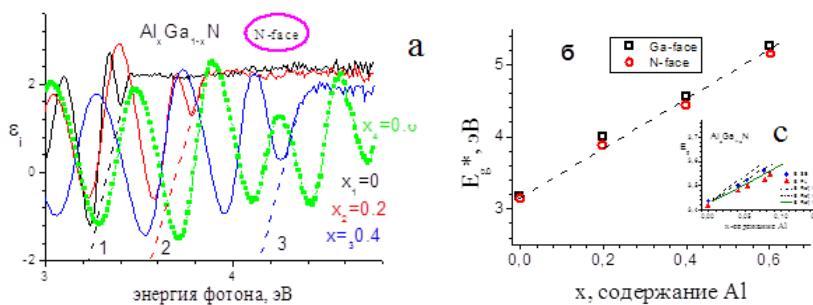


Рис. 20.

Полученная зависимость отражает реальную ситуацию и служит для контроля гетероструктур и определения состава пленок, выращенных на конкретной МЛЭ установке. Обнаружено, что  $\varepsilon_r(E)$  и  $\varepsilon_i(E)$  в области энергий выше края поглощения зависят от полярности и от состава пленки, также как и край поглощения. Эта зависимость может служить для контроля состава пленок и, возможно, окажется более удобной. Разработана интерпретация обнаруженного эффекта наличием шероховатости или образованием окисла галлия [21-22].

**В заключении** приведены основные результаты и следующие **общие выводы:**

**I. Развиг метод эллипсометрии наноразмерных пленок диэлектриков, полупроводников и металлов, основанный на разработке новых принципов измерений, позволяющих существенно увеличить точность и чувствительность метода, суть которых состоит в следующем.**

I.1. Разработан универсальный метод эллипсометрических измерений (параметров поглощающих и прозрачных пленок), основанный на аналитическом решении основного уравнения эллипсометрии в форме 3D спирали в  $(n-ik-d)$  пространстве параметров пленки. Разработан способ проверки адекватности исследуемой системы и выбранной модели расчета.

I.2. Исследованы фундаментальные ограничения на точность эллипсометрического метода измерения параметров отражающей системы. Разработан метод повышения точности и чувствительности измерений параметров пленки, использующий статистическую обработку результатов. Показано влияние выбора формы функционала и процедур вычисления (величины

шага итерации и критерия момента останова) на точность, независимость, однозначность и устойчивость решения при восстановлении параметров исследуемой системы.

I.3. Разработан метод математического планирования эксперимента на базе матрицы Гесса, которая опосредованно зависит от углов падения  $\varphi_0$  и числа измерений. Предложена численная характеристика дефекта  $M_0$  одного измерения и его обусловленности, т.е. степени влияния каждого из параметров на точность. Показано, что оценки нескольких параметров имеют разную степень достоверности (разную степень отклонения от точных значений).

I.4. Разработан метод определения однозначности решений в заданной области искомых параметров при фиксированной и известной нормализованной толщине пленки ( $d/\lambda$ ). Предсказано, что число решений определяется числом нулей и полюсов мероморфной функции, полученной из основного уравнения эллипсометрии. Метод полезен на начальных этапах решения конкретных обратных задач эллипсометрии.

## **II. Разработаны методы эллипсометрии для измерения кинетических параметров роста наноразмерных окислов**

II.1. Разработан комбинированный метод исследования взаимодействия поляризованного света с поверхностью пространственно-неоднородных наноразмерных 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. Измерены зависимости роста толщины окисла от времени окисления  $d(\tau)$ , зависимость состава неомогенной многофазной пленки окисла по глубине оксида и зависимость комплексного показателя преломления оксидной пленки от толщины окисла  $d$  и от температуры окисления  $n(d, T^\circ\text{C})$  и  $k(d, T^\circ\text{C})$ . 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  $\Delta\Delta/\delta T^\circ\text{C}$  или ширина температурного интервала  $\delta T^\circ\text{C}$  скачка эллипсометрического угла  $\Delta$  при фазовом переходе I рода.

II.2. Разработан метод вспомогательных номограмм, который в сочетании с методом Друде, для металла позволил из кинетических эллипсометрических измерений впервые обнаружить эффекты, а) перестройки поверхности, сопровождающейся «поляризационным шумом», при росте куприта на поверхности меди; б) смены закона роста окисла (параболического на кубический) после перестройки поверхности. Измерены толщины и состав суб-наноразмерных (0÷4 нм) пленок куприта.

II.3. Разработан новый метод «номограмм приращений» для повышения точности измерений: оптических констант, законов роста и состава наноразмерных окислов

полупроводников [ $A_3B_5$  (GaAs)  $A_2B_6$  (CdTe)]. Исследовано ограничение на точность измерений оптических констант при наличии окислов на поверхности, влияющих на работу прибора. ОЭС и РФЭС **подтвердили** результаты моделирования и расчетов эллипсометрических данных.

II.4. 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.

**III. Установлены методом эллипсометрии корреляционные зависимости поляризационных свойств наноразмерных пленок от их состава, гомогенности и морфологии.**

III.1. Разработан метод математической обработки экспериментальных измерений свойств поляризованного света, отраженного от шероховатых поверхностей 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  $\Psi(\varphi_0)$  и  $\Delta(\varphi_0)$ -наличие экстремумов.

III.2. Разработан метод математического моделирования процесса отражения поляризованного света от шероховатой поверхности с учетом поправки Лорентца. 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).

III.3. Разработан метод восстановления неизвестных параметров из эллипсометрических спектров, суть которого состоит в решении 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.

III.4. Разработан неразрушающий 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.

Итогом работы явилось получение совокупности новых знаний, что можно квалифицировать как крупное **научное достижение** в развитии метода и в изучении физических (толщина, состав, морфология, однородность) и оптических (края фундаментального поглощения, оптических переходов, отражательной способности) характеристик поверхностей, пленок и структур эллипсометрическими методами.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Ланская Т. Г., Любинская Р. И., Свиташева С. Н., Свиташев К. К. Эллипсометрическое исследование термически окисленного ванадия. –// ЖТФ, 1981, **51**, № 9, с. 1920-1926.
2. Ржанов А. В., Свиташева С. Н., Свиташев К. К., Соколов В. К., Ашкерев Ю. В., Осадчев Л. А., Цеснек Л. С. Эллипсометрический метод определения качества обработки поверхности. –// Доклады Академии Наук СССР. 1982, т. **267**, № 2, с. 373.
3. Свиташева С.Н., Свиташев К.К., Семенов Е.В., Васильев А.Г. Изменение эллипсометрических параметров в зависимости от механической обработки поверхности. – //Поверхность. Физика, химия, механика, 1983, №12, с.64.
4. Ржанов А. В., Свиташева С. Н., Свиташев К. К. Графический метод интерпретации результатов эллипсометрических измерений на шероховатых поверхностях.–// Доклады Академии Наук СССР,- 1983, **273**, N5, с. 1123-1126.
5. Свиташева С.Н., Любинская Р.И., Свиташев К.К. Исследование процесса формирования пленки естественного окисла на поверхности меди методом эллипсометрии.– //Поверхность. Физика, химия, механика, № 11, 1986, с. 80-85.
6. Брагинский Л. С., Гишинский И. А, Свиташева С.Н. Отражение света шероховатой поверхностью: интерпретация эллипсометрических измерений.– //Доклады Академии Наук СССР, -1987, **293**, №5, с. 1097-1102.
7. Галицын Ю. Г., Петренко И. П., Свиташева С. Н. Исследование кинетики образования и состава окисла на сколотой поверхности GaAs (110).–//Поверхность. Физика, химия, механика, № 11, 1987, с. 51-58.
8. Свиташева С. Н. Точное решение обратной задачи эллипсометрии для поглощающих пленок, –//Доклады Академии Наук СССР, 1991, **318**, № 5, с. 1154-1158.
9. Воскобойников Ю. Е., Свиташева С. Н. Точность восстановления параметров и обусловленность обратной задачи эллипсометрии. Часть I, –//Автометрия, 1992, 4, с. 76.

10. Воскобойников Ю. Е., Свиташева С. Н. Точность восстановления параметров и обусловленность обратной задачи эллипсометрии. Часть II; -//Автометрия, 1992, 4, с. 81.
11. Воскобойников Ю. Е., Лантюхова Е. В., Свиташева С. Н. Однозначность, устойчивость и независимость решения обратной задачи эллипсометрии; -//Автометрия, 1994, №4, с. 91.
12. Воскобойников Ю. Е., Петухова Е. В., Свиташева С. Н. Эффективный алгоритм решения обратной задачи эллипсометрии при исследовании тонких пленок. - //Автометрия, 1996, 4, с. 110-119.
13. Свиташева С. Н. Особенности решения обратной задачи эллипсометрии для сильно поглощающих пленок.- //Автометрия, 1996, №4, с. 119-126.
14. Gritsenko V. A., Novikov Yu. N., Petrenko I. P., Svitashева S. N., and Wong H. Enriching of the Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> -thermal oxide interface by excess Silicon in ONO structures. -//Microelectronic Engineering, 1997, **36**, 123.
15. Polovinkin V. G., Svitashева S. N. The analysis of general ambiguities of the inverse ellipsometric problem. -//Thin Solid Films, 1998, **313-314** , P.128-131
16. Svitashева S. N., Kruchinin V. N. Spectral dependence of the complex refractive index shift across the semiconductor-metal transition in thermally- oxidized Vanadium. -//Thin Solid Films, 1998, **313-314**, 319-322.
17. Gritsenko V. A., Petrenko I. P., Svitashева S. N., and Wong H. Excess Silicon at Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiO<sub>2</sub> Interface. -//Appl. Phys. Lett, 1998, **72**, №4, p.462-464,.
18. Gritsenko V. A., Morokov Yu. N., Novikov Yu. N., Petrenko I. P., Svitashева S. N., Kwok R., Chan R., Wong H. Characterization of the Silicon Nitride - Thermal Oxide Interface in ONO Structures by ELS Spectroscopy and Ellipsometry. - //Microelectronics and Reliability, 1998, **38**. P.745-751.
19. Половинкин В. Г., Свиташева С. Н. Определение числа решений обратной задачи эллипсометрии в заданной области параметров. - //Автометрия, 1999, №4, с. 94-103.
20. Gritsenko V. A., Svitashева S. N., Petrenko I. P., Wong Hei, Xu J. B., and Wilson I. H. Study of excess silicon at Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> / Thermal SiO<sub>2</sub> Interface using EELS and Ellipsometric Measurements, - // Journal of Electrochemical Society, 1999, **146** (2) 780-785.
21. Badmaeva I.A., Repinskij S.M., Sveshnikova L.L., Khapov Y.I., Kruchinin V.N., Svitashева S.N., Tereshchenko O.E., Yanovskij Y.A. Photolysis of Langmuir-Blodgett films containing lead, silver, and cooper behenates.-// Journal of Physical Chemistry **A(75)** 2001, pp. 828-833.
22. Sharafutdinov, R., Khme, S., Semenova, O., Svitashева, S., Bilyalov, R., Poortmans, J. A new high-rate deposition method for thin film crystalline Si solar cells.-// Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002, pp. 1178-1181.

23. Nastaushev Yu. V., Prinz V. Ya., Svitashva S.N. A technique for fabrication Au/Ti micro- and nanotubes.-//Nanotechnology, 2005, **16**, p. 908-912.
24. Naumova O. V., Nastaushev Y.V., Svitashva S. N., Sokolov L. V., Werner Peter, Zakharov N. D., Gavrilova T. A., Dultsev F. N., Aseev A. L. Properties of Silicon Nanowhiskers Grown by Molecular-Beam Epitaxy. -AIP Conference Proceeding, 2007, **893**, p. 793-740.
25. Свиташева С. Н. Определение оптических констант МЛЭ пленок GaAs n-типа в спектральном диапазоне 1.5-4.75 эВ.-// Автометрия, 2007, **43**, № 6, стр. 108-115,.
26. Mansurov V.G., Nikitin A.Yu., Galitsyn Yu.G., Svitashva S. N., Zhuravlev K.S., Osvath Z., Dobos L., Horvath Z.E., Pecz B. AlN growth on sapphire substrate by ammonia MBE.-//Journal of Crystal Growth , 2007, **300** , P.145–150.
27. Naumova O. V., Nastaushev Yu. V., Svitashva S. N., Sokolov L. V., Zakharov N. D., Werner P., Gavrilova T. A., Dultsev F. N. and Aseev A. L. MBE-grown Si whisker structures: morphological, optical and electrical properties. - //Nanotechnology -2008, **19**, 225708, P. 1-5.
28. Svitashva S. N., Gritsenko V. A., Kolesov B. A. Optical properties of TiO<sub>2</sub> films made by air oxidation of Ti.-// Phys. Status Solidi (c) 2008, **5**, №5, p. 1101–1104; /DOI 10.1002/pssc.200777731.
29. Svitashva S. N., Mansurov V. G., Zhuravlev K. S., Nikitin A. Yu., Sheglov D. V., and Pecz B. Correlation between optical properties of MBE films of AlN and morphology of their surface.- //Phys. Status Solidi (a) -2008, **205**, № 4, P.941–944.
30. Svitashva S.N. Optical Constants of MBE n-type GaAs Films doped by Si or Te.-// JEMAA, Vol.2, No. 6, 2010, p.357-361 DOI: 10.4236/jemaa.2010.26046.
31. Svitashva S.N. Random Phase Mask as Model of rough surface. Part I Theory.-//Thin Solid Films v. **519** 2011, p.2718-2721; DOI information: 10.1016/j.tsf.2010.11.070. Svitashva S.N. Random Phase Mask as Model of rough surface. Part II Experiment.-// Thin Solid Films v. **519** 2011, p.2722-2724; DOI information: 10.1016/j.tsf.2010.11.067.
33. Dultsev F.N., Svitashva S.N., Nastaushev Yu.V., Aseev A.L. Ellipsometric investigation of the mechanism of the formation of titanium oxynitride nanolayers.- //Thin Solid Films, **519**, 2011, p.6344-6348; Doi: 10.1016/j.tsf.2011.04.034.
34. Свиташева С.Н., Поздняков Г.А., Щеглов Д.В., Настаушев Ю.В. Оптические свойства и морфология алмазоподобных углеродных пленок, полученных в сверхзвуковом потоке плазмы.-// Автометрия 2011, т.**47** №5 стр.59-66.
35. Свиташева С.Н., Журавлев К.С. Зависимости оптических характеристик пленок Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N от состава и полярности поверхности. - //Автометрия 2011, т.**47** №5 стр.82-87.

37. Свиташева С. Н., Поздняков Г. А., Настаушев Ю.В. Свойства алмазоподобных пленок, выращенных в сверхзвуковом потоке углеводородной плазмы.-// Proceedings of The First International Conference “Development of nanotechnologies”, p. 124-126, 2012.
38. Svitashева S. N. Experimental Study of Polarization Properties of Rough Surface.-// Electrical and Electronic Engineering, Vol. 2, No. 6, p. ,2012.
39. Svitashева S. N. Optimization of maximum VO<sub>2</sub> content in polymorphous oxides of vanadium.- // Key Engineering Materials, Vol. 538, p. 113-116, 2013.
40. Svitashева S.N., Pozdnyakov G. A. Monitoring of technological conditions for preparing DLC films in supersonic flow of a hydrocarbonic plasma. // Key Engineering Materials, Vol. 538, p. 281-284, 2013.
41. Svitashева S. N., Gilinsky A.M. Influence of doping level on shift of absorption edge of gallium nitride films (Burstein-Moss effect).-//Appl. Surf. Sci., Vol. 281, p. 109-112, (2013); <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.02.094>.
42. Svitashева S.N. Optical properties of Si nano-whisker structures grown by MBE technique: impact of Ti metallization and nitrogen plasma treatment.-//Известия АЛТГУ, 1/1, с.. 189, 2013.
43. Svetlana Svitashева. Modeling Methods of Optical Inhomogeneous Structures. Application of ellipsometry. // Lambert Academic Publishing, 2013, Book pp.1-112.

#### Цитированная литература

1. Ржанов А. В., Свиташев К.К., Семенов А.И., Семенов Л.В., Соколов В.К. Основы эллипсометрии.- под ред. Ржанова А.В., Новосибирск, "Наука", 1979, с.419.
2. Azzam R.M.A., Bashara N.M. Ellipsometry and Polarized light.- North-Holland, 1977, p. 529.
3. Compain E., Drevillon B., Huc J., Parey J. Y., Bouree J.E. Complete Mueller matrix measurement with a single high frequency modulation.- //Thin Solid Films, **313-314**, 1998, p. 47-52.
4. Fukarek W., Kaschny J. R. Cavities in helium implanted and annealed silicon characterized by spectroscopic ellipsometry // Journal of Applied Physics, v.**86**, number 8, p. 4160-4165, 1999.
5. Archer R. J., Gobeli G. W. Measurement of oxygen adsorption on Silicon by ellipsometry.-// J. Phys. Chem. Solids, **26**, 1965, p. 343.
6. Archer R. J. Determination of the properties of films on Silicon by the method of ellipsometry. - // J. Opt. Soc. Am., 1962, **52**, № 9, p. 970.
7. Koshkarov P.K., Kazior T. E., Lagowski J., Gatos H.C. Interface states and internal photoemission in p-type GaAs metal-oxide-semiconductor surfaces. -//J. Appl. Phys. 1983, V. **54**. № 2, P. 963.
8. Yokoyama S., Hirose M., Osaka Y. et al. Internal photoemission in anodic oxide/GaAs interface. -// Appl. Phys. Lett., 1981, V. **38**, № 2, P. 97—99.

9. Шишаков П. А., Андреева В. В., Андриющенко Ф. К. Структура и механизм образования окисных пленок на металлах. - М.: Изд-во АН СССР, 1959.
10. Хауффе К. Реакция в твердых телах и на их поверхности. Часть II, М., ИЛ, 1963.
11. Bärwinkel I.C., Schmidt H. J. Numerical analysis of normal reflectance data as applied to the study of oxide films on copper.-// Thin Sol. Films, 1979, v. **59**, № 3, p. 373.
12. Бурыкин И.Г., и др. Алгоритмы и программы для численного решения некоторых задач эллипсометрии., "Наука", 1980 с.192.
13. Gritsenko V. A., in "Silicon Nitride in Electronics", pp. 138-187, Elsevier, New York (1988)
14. Соколов Л.В., Ламин М.А., Марков В.А., Машанов В.И., Пчеляков О.П., Стенин С.И. Осцилляции оптических характеристик поверхности роста пленок Ge при эпитаксии из молекулярного пучка. -// Письма в ЖЭТФ.1986, т.**44**, вып.6, с. 278-280.
15. Cardona M. Modulation Spectroscopy, Academic Press, New York, 1969.
16. Forouhi A.R., Bloomer I. Optical dispersion relations for amorphous semiconductors and amorphous dielectrics. -// Phys. Rev. **B 34**, № 10, 1986, p. 7018-7026.
17. Forouhi A.R., Bloomer I. Optical properties of crystalline semiconductors and dielectrics. -// Phys. Rev. **B 38**, № 3, 1988, p. 1865-1874.
18. Jellison G.E. Jr, Modine F.A. Parametrization of the optical functions of amorphous materials in the interband region. -// Appl. Phys. Lett., **69**, № 3, 1996, p. 371-373.ë
19. Aspnes D.E., Quinn W.E., Tamargo M.C., Pudensi M. A. A., Schwarz S. A., Brasil M. J. S. P., Nahoty R. E., and Gregory S. Growth of  $Al_xGa_{1-x}As$  parabolic quantum wells by real-time feedback control of composition. // -Appl. Phys. Lett., **60**, № 10, 1992, p. 1244-1248.
20. Wagner J., Ramakrishnan A., Obloh H., Kunzer M., Kohler K., Johs B. Spectroscopic Ellipsometry Analysis of InGaN/GaN AlGaIn/GaN. Heterostructure Using a Parametric Function Model. - MRS'99 Full Meeting Symposium W: GaN and Related Alloys.
21. Ptak A.J., Holbert L.J., Ting L., Swartz C.H., Moldovan M., Giles N.C., Myers T.H., Van Lierde P., Tian C., Hockett R.A., Mitha S., Wickenden A.E., Koleske D.D., and Henry R.L.- Controlled oxygen doping of GaN using plasma assisted molecular-beam epitaxy.-// Applied Physics Letters, **79** (2001) 2740-2742.
22. Mastro M.A., Kryliouk O.M., Andersen T.J., Davydov A., Shapiro A.- Influence of polarity on GaN thermal stability.-// Journal of Crystal Growth 274 (2005) 38-46.