

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 1

1997

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

УДК 535.39

В. А. Швец, С. В. Рыхлицкий
(Новосибирск)

МЕТОД ЭЛЛИПСОМЕТРИИ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

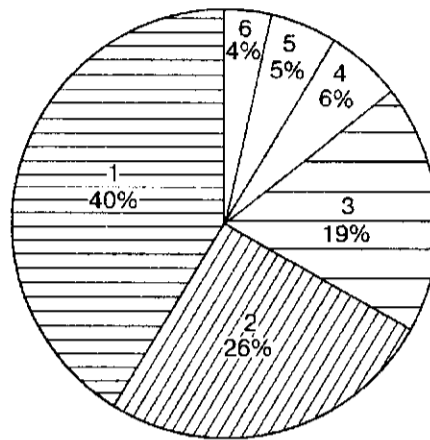
Проведен библиографический обзор по использованию метода эллипсометрии в различных областях научных исследований и технике. Анализ работ показывает, что основной сферой применения метода была и остается микроэлектроника. Здесь метод эллипсометрии занимает одну из ведущих позиций среди аналитических средств контроля полупроводниковых структур и материалов. Последним достижением в области практической эллипсометрии является создание полностью автоматизированных комплексов по производству полупроводниковых структур, управление которыми осуществляется по сигналу от эллипсометра. Помимо микроэлектроники, отмечены такие области применения метода, как оптика, электрохимия, органическая химия, биология, медицина. Рассмотрены также примеры нетрадиционного применения метода для решения практических и научных задач, связанных с контролем оптических сред и тонкопленочных покрытий.

Введение. За свою более чем столетнюю историю эллипсометрия как самостоятельное направление в оптике прошла сложный эволюционный путь развития. С начала выхода основополагающих работ Друде [1, 2] и до середины нынешнего столетия метод оставался практически невостребованным. Так, еще в начале 50-х годов в мировой научной литературе по эллипсометрической тематике публиковалось не более пяти работ в год.

Ситуация, однако, существенно стала меняться в 60-е годы. В первую очередь интерес к эллипсометрии был вызван потребностями бурно развивающейся микроэлектроники. Распространению метода немало способствовало также появление источников направленного монохроматического излучения — лазеров и быстродействующих компьютеров. Благодаря этим обстоятельствам, были достигнуты определенные успехи в области приборного оснащения метода (появилась аппаратура второго поколения) и в вопросах интерпретации эллипсометрических измерений. В результате количество публикаций стало неуклонно расти: к концу 60-х годов оно составило около 50 работ в год, в середине 70-х — порядка 100, в середине 80-х — 200—300 и в настоящее время ежегодно выходит свыше 500 научных работ, так или иначе связанных с эллипсометрической тематикой.

Такая интенсивная экспансия эллипсометрии объясняется рядом ее положительных качеств, главное из которых — отсутствие воздействия на исследуемый объект. Расширению границ применения метода способствовало также создание высокоинформативных спектральных эллипсометров (аппаратура третьего поколения) и разработка экспериментальных методик и пакетов прикладных программ для интерпретации результатов измерений.

Статистический анализ научных публикаций выявил несколько традиционных областей применения метода (см. рисунок). Три ведущие сферы наиболее интенсивного использования эллипсометрии составляют в совокупности 85 % от общего объема. На сегодняшний день отчетливо просматривается тенденция преимущественного использования метода эллипсометрии в науч-



Области применения эллипсометрии:

1 — микроэлектроника, 2 — оптика, 3 — электрохимия, 4 — органическая химия, 5 — биология и медицина, 6 — нетрадиционные области

ных исследованиях (до 90 %). Это обусловлено многими факторами, и в первую очередь отсутствием на рынке достаточно простых и надежных специализированных эллипсометров, способных эффективно осуществлять контроль различных технологических процессов в промышленных установках.

Цель настоящего обзора заключается в систематизации основных областей применения метода эллипсометрии и анализе тенденций его развития. При этом мы ограничиваем рассмотрение наиболее важной для исследований спектральной областью, включающей ближний инфракрасный, видимый и ближний ультрафиолетовый диапазоны (1,5—6 эВ), и оставляем вне поля зрения эллипсометрию дальнего ИК- и микроволнового диапазонов, а также эллипсометрию синхротронного излучения.

1. Применение эллипсометрии в микроэлектронике. 1.1. *Измерение спектров оптических постоянных материалов.* Эллипсометрия является основным методом измерения спектров оптических постоянных полупроводников, диэлектриков и металлов. Метод одинаково хорошо применим как для прозрачных, так и для сильно поглощающих сред, объемных образцов и тонких пленок. Единственное требование к образцам — наличие бездефектной зеркальной поверхности.

В отличие от фотометрии, где регистрируется только интенсивность отраженного или прошедшего света, в единичном акте эллипсометрических измерений получают сразу две величины — эллипсометрические параметры Ψ и Δ , характеризующие амплитудные и фазовые изменения световой волны. Благодаря этому, становится возможным одновременное определение показателей преломления и поглощения материала. При спектральных эллипсометрических измерениях такая информация оказывается избыточной, поскольку оптические постоянные связаны между собой соотношениями Крамерса — Кронига. Это обстоятельство используется либо для уточнения измеренных спектров и уменьшения ошибок эксперимента [3], либо для экстраполяции экспериментальных данных на более широкий спектральный диапазон [4].

На сегодняшний день методом спектральной эллипсометрии (СЭ) измерены и табулированы спектры оптических постоянных (или диэлектрические функции) широкого класса полупроводников: одноатомных монокристаллических Ge и Si [3], в том числе сильно легированных Ge [5] и Si [6], аморфных Ge [7] и Si [8], соединений группы A_3B_5 [3], A_2B_6 [9], тройных соединений GaAlAs [10], HgCdTe [11, 12] и других полупроводниковых соединений и их оксидов [12—14].

Как правило, перед измерениями качество поверхности образцов тестировали по специальной эллипсометрической методике [3], и измерения про-

водились на лучших образцах из тех, которые удовлетворяли разработанному критерию. Это позволило свести к минимуму погрешности, связанные с неконтролируемым загрязнением поверхности, и результаты измерений одного и того же материала различными группами исследователей совпадают с точностью до 1–2 %.

Спектры оптических постоянных являются источником обширной информации об энергетической зонной структуре полупроводников. В 80-е годы сотрудниками Института им. Макса Планка была выполнена серия работ, где метод СЭ служил основой для исследования зонной структуры широкого класса полупроводников [5, 6, 11, 15–17]. Были определены параметры критических точек межзонных переходов: амплитуда, энергия, полуширина в зависимости от температуры, состава твердых растворов, степени легирования. На основе анализа формы мнимой части диэлектрической функции $\epsilon_2(E)$ вблизи критических точек спектра анализировался вклад экситонного эффекта. Эти фундаментальные исследования имеют также и чисто практические приложения при постановке методов контроля различных физических параметров материалов в технологических процессах.

1.2. Контроль параметров слоистых структур и межфазных границ. Современная полупроводниковая технология ориентирована на создание слоистых структур, состоящих из полупроводниковых, металлических и диэлектрических слоев, толщины которых заданы с прецизионной точностью. Поэтому исторически одним из первых и, пожалуй, наиболее эффективных примеров применения эллипсометрии было измерение параметров тонкопленочных структур — толщин пленок в интервале от единиц до сотен нанометров и их оптических постоянных.

Измерение оптических постоянных слоев может представлять самостоятельный интерес, например, при создании волноводных структур [18] и служить их косвенной характеристикой, содержащей информацию о таких свойствах, как микроструктурное совершенство [19], химический состав [10–12], наличие инородных включений [20] и пористости [21], механические напряжения в слоях [22] и т. п. Благодаря чувствительности к перечисленным параметрам, метод эллипсометрии широко применяется в исследованиях и при отработке технологических режимов получения различных слоев: аморфного гидрированного [23], микрокристаллического [23, 24] и пористого кремния [21], оксида, нитрида и оксинитрида кремния [25, 26], алмазоподобных пленок [27], при плазмохимическом окислении полупроводников [28], а также при синтезе других слоев [29, 30]. Основные задачи, на решение которых направлен метод, — характеристика физических свойств получаемых слоев в зависимости от условий их выращивания и поиск оптимальных технологических режимов.

Последовательное применение метода одноволновой эллипсометрии позволяет находить неразрушающим способом параметры, как правило, одного или двух слоев, например, в структурах полупроводник — диэлектрик [31] или более сложных — типа монокристаллический Si/SiO₂/ поликристаллический Si [32], однако точность измерений снижается с увеличением числа слоев из-за взаимной корреляции параметров [33]. Этого удастся избежать при спектральных эллипсометрических измерениях. Основываясь на анализе спектроэллипсометрических данных, в базисе длина волны — длина волны [34] удастся определять параметры трех, четырех и более слоев.

Наиболее показательны в этом отношении результаты работ [35, 36]. Исследованы трех- и четырехслойные структуры, полученные SIMOX-технологией и состоящие из чередующихся слоев аморфного и кристаллического кремния, разделенных SiO₂. Определены толщины слоев, которые хорошо совпали с данными просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), а по спектрам оптических постоянных найден количественно их фазовый состав, т. е. доля аморфного и кристаллического Si. Метод СЭ в отличие от ПЭМ оказался в данном случае более информативным (ПЭМ дает лишь качественную характеристику состава) и является к тому же неразрушающим.

Рабочие параметры полупроводниковых структур во многом зависят от качества межфазных границ и наличия переходных слоев. Трудность исследования скрытых в глубине переходных слоев обусловлена их малой протяженностью. Интерпретация результатов, полученных разрушающими методами (например, данные рентгеновской фотоэмиссионной спектроскопии или эдс-спектроскопии при ионном травлении), в этом случае затруднена из-за воздействия ионного пучка. Являясь неразрушающим методом, эллипсометрия позволяет получить более достоверную информацию, обнаруживая при этом высокую чувствительность.

Наиболее детально изучены переходные слои в системах Si—SiO₂ и Si—Si₃N₄ [37, 38], определены их состав и толщины. Значения последних сильно варьируются в зависимости от технологии получения диэлектриков. Имеются также данные по исследованию границ раздела других гетероструктур [39, 40]. По сравнению с одноволновыми измерениями СЭ более предпочтительна при исследовании переходных слоев и позволяет получить достоверные данные даже для довольно сложных структур. Так, например, в работе [35] убедительно показано, что для полученной структуры SiO₂—Si—SiO₂ на кремнии наиболее адекватна исследуемой системе модель слоев с плавным переходом между Si и SiO₂ и найдены толщины переходных слоев (14,2 и 19,5 нм). Физически размытие границ авторы объясняют включением островков Si в слоях SiO₂ и их шероховатостью.

1.3. Контроль при ионной имплантации полупроводников. Ионная имплантация является универсальной технологией легирования и модификации полупроводниковых слоев. В облученном материале образуется большая плотность радиационных дефектов, которые приводят к сильному изменению его оптических постоянных. Благодаря этому, эллипсометрические измерения чувствительны к процессам ионной имплантации и последующему отжигу дефектов и широко применяются для их контроля.

На основе метода одноволновой эллипсометрии была исследована зависимость толщины нарушенного слоя и степени разупорядоченности от энергии и дозы облучения для различных имплантируемых элементов [41, 42]. Эти исследования показали, что метод может успешно использоваться для контроля перечисленных параметров. В последующих работах более детально изучались нарушенные аморфные слои и распределение оптических постоянных по толщине [42, 43]. Использовалась как неразрушающая методика многоуглового эллипсометрических измерений [42], так и методика послойного сравливания нарушенного слоя [43]. На основе этих исследований была установлена корреляция между профилем оптических постоянных, с одной стороны, и распределением дефектов и внедренных ионов — с другой. В работе [43] изучались также процессы термического и лазерного отжига в имплантированном GaAs. Показано, что при лазерном отжиге в отличие от термического происходит лишь поверхностная кристаллизация из-за оптического поглощения в материале.

Профили оптических постоянных в зависимости от условий облучения исследовались в работе [44]. Было обнаружено сглаживание неоднородного распределения оптических постоянных с увеличением плотности потока ионов и предложен механизм, объясняющий этот результат за счет трансформации дефектных комплексов, образующихся при повышенных температурах имплантации.

Применение метода СЭ для исследования имплантированных слоев дает наглядную физическую картину процессов. Так, было показано, что спектр оптических постоянных полупроводника, имплантированного высокой дозой ионов, является спектром его аморфной фазы [45]. С уменьшением дозы облучения в спектрах обнаруживается наличие кристаллической фазы. Пользуясь приближением эффективной среды [20] в рамках модели нескольких однородных слоев, авторы работы [38] нашли профиль распределения доли аморфного GaAs, который соответствовал профилю распределения примесей. Проведенный затем последовательный отжиг при повышении температуры до 900 °С позволил наблюдать появление пиков поглощения в диэлектрической

функции $\epsilon_2(E)$, соответствующих кристаллическому состоянию, и исследовать динамику кристаллизации.

1.4. *Контроль в технологии соединений A_3B_5 и A_2B_6 .* Использование эллипсометрии в качестве аналитического метода контроля процессов синтеза имеет то преимущество, что позволяет наблюдать за ростом непосредственно в технологической установке (*in situ*) и реальном масштабе времени. Кроме того, в отличие от электронного пучка для оптического луча не требуется высокий вакуум и измерения могут проводиться также в установках высокого давления. Такое свойство эллипсометрии, как отсутствие возмущающего воздействия, оказалось принципиальным при контроле низкотемпературного синтеза CdHgTe методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Используемый обычно метод дифракции электронов приводит к локальному разогреву образца, что критически сказывается на процессах эпитаксии [46].

С помощью эллипсометрических измерений контролируются такие важные характеристики процессов и выращиваемых структур, как скорость роста [46—48], состав твердых растворов [46, 48—50], морфология поверхности роста [46] и ее температура [51], качество межфазных границ при синтезе сверхрешеток [52] и другие.

В пионерских работах Хотье с соавторами [47, 52] метод эллипсометрии был применен для контроля *in situ* процессов эпитаксии слоев $Ga_{1-x}Al_xAs$ на подложке GaAs и синтеза сверхрешеток GaAs—GaAlAs. Используя автоматический одноволновой эллипсометр, авторы в реальном масштабе времени измеряли скорость роста пленки и определяли состав x . При синтезе сверхрешеток применение эллипсометрии реального времени позволяет переключать источники при точно заданной толщине слоев, что крайне важно для изготовления высококачественных структур. Состав слоев находился путем измерения оптических постоянных. Так, исследование начальной стадии роста $Ga_{0,65}Al_{0,35}As$ выявило аномальное изменение оптических постоянных, которое было связано с переходным слоем между GaAs и AlGaAs. В последующей работе этой группы исследователей [49] показано, что методом эллипсометрии можно определять также распределение оптических постоянных (а следовательно, и состава) по толщине синтезируемого слоя. Аспнес [53] предложил для решения этой проблемы использовать кинетические зависимости $\Psi(t)$, $\Delta(t)$, измеряемые непрерывно в процессе роста пленки, и показал возможность определения оптических постоянных выращенного участка без какой-либо информации о его предыстории.

Альтернативный способ определения состава при спектральных измерениях основан на зависимости пиков поглощения в спектрах $\epsilon_2(E)$, соответствующих критическим точкам плотности состояний [50]. Имеющиеся на сегодняшний день прецизионные измерения диэлектрических функций тройных соединений GaAlAs [10], CdHgTe [11] позволяют построить соответствующую градуировочную кривую — зависимость $E_1(x)$.

Одна из важных проблем в технологии молекулярно-лучевой эпитаксии — определение температуры поверхности роста. В условиях сложного лучистого теплообмена гетероструктур температура поверхности может заметно отличаться от температуры подложки и изменяться во времени [46], поэтому показания термпары, расположенной вблизи подложки, при нестационарных условиях роста дают неверные результаты [51]. Более предпочтительными в этом случае являются оптические методы, так как они характеризуют непосредственно температуру поверхности.

На основе температурной зависимости оптических постоянных методом эллипсометрии измерялась температура таких полупроводников, как GaAs и Si [54, 55], с точностью до долей градуса. Для определения температуры можно использовать также положение максимумов в спектрах диэлектрических функций [51, 56]. Этот вариант предпочтительней тем, что результаты в меньшей степени зависят от неконтролируемых несовершенств поверхности, например рельефа.

1.5. *Контроль микроструктуры материалов.* Под микроструктурой материала подразумеваются объемные неоднородности в масштабе от 1 до 1000 нм. Детальное их изучение, особенно для кремниевой технологии, очень важно, так как в конечном итоге от этого зависят рабочие параметры приборов. Аспнес [19, 20] предложил использовать информацию, содержащуюся в спектрах оптических постоянных, для характеристики микроструктуры материала. Сравнение диэлектрических функций аморфного и монокристаллического полупроводников показывает, что для первого имеет место широкий пик в спектре $\epsilon_2(E)$, в то время как второй, обладая дальним порядком, обнаруживает более тонкую структуру поглощения, соответствующую межзонным переходам. Основываясь на этих различиях в спектрах и используя модель эффективной среды [20], можно оценить содержание обеих фаз.

Такой подход позволяет исследовать слои аморфного и монокристаллического кремния [23, 24, 57]. Из анализа эллипсометрических спектров удастся найти процентное содержание аморфной и кристаллической модификаций кремния и пустот и обнаружить микроструктурные изменения, связанные с отжигом.

Особый интерес представляют исследования пористого кремния, применение которого связывается с разработкой новых перспективных технологий. Сохраняя дальний порядок кристаллической структуры, пористый кремний с точки зрения оптических свойств представляет собой смесь монокристаллического Si и пустот. Измеренные спектры оптических постоянных позволяют определить коэффициент пористости — основную характеристику такого материала [21].

1.6. *Контроль качества поверхности и процессов адсорбции.* Поверхность играет особую роль в физике полупроводников. В технологии синтеза слоев качество исходной поверхности в значительной степени предопределяет физические характеристики изделия. Тенденция к миниатюризации в микроэлектронике также предъявляет повышенные требования к качеству поверхности полупроводниковых структур. Обладая высокой чувствительностью, метод эллипсометрии является эффективным средством характеристики качества поверхности — обнаружения остаточных слоев, поверхностных дефектов и нарушений, морфологии и т. д.

Широкое применение находят эллипсометрические методы контроля в технологии плазменной очистки поверхности [58]. Наблюдая эволюцию состояния поверхности в процессе обработки, можно избавиться от загрязнений и избежать нежелательных эффектов, связанных с воздействием ионов: нарушений поверхностного слоя, шероховатости и т. д.

Прецизионные эллипсометрические измерения позволили наблюдать в условиях сверхвысокого вакуума термическую очистку кремния до атомарно-чистой поверхности [59]. Отражающие свойства такой поверхности зависят от ее сверхструктуры. Соответствующая модель интерпретации эллипсометрических измерений была предложена для Ge(111)(2 × 1), Si(111)(2 × 1) и Si(100)(2 × 1) в [60]. Исследования сверхструктуры (7 × 7)Si(111), выполненные методом СЭ, позволили установить металлический характер поверхностных связей и обнаружить электронные переходы, соответствующие поверхностным состояниям [61].

Обычно для оценки качества поверхности используется степень приближения измеренных оптических констант к их объемным значениям. Это предполагает, однако, знание априори оптических постоянных материала. Аспнес и Студна предложили критерий качества поверхности полупроводниковых подложек, который не предполагает знания оптических констант [3]. Наличие остаточных пленок и дефектов поверхности сильнее искажает отраженный сигнал в ультрафиолетовой области спектра из-за уменьшения глубины проникновения света. Поэтому всякое несовершенство поверхности приводит к уменьшению амплитуды в пике мнимой части диэлектрической функции, соответствующем критической точке E_2 зонной структуры. Этот критерий, называемый в литературе "biggest is best" («наибольшее является

наилучшим»), широко применяется при характеристике поверхности полупроводников тетрагональной симметрии [3, 5, 6, 8, 9, 10—13, 15—17, 34].

Высокая чувствительность эллипсометрии к состоянию поверхности делает метод удобным инструментом при исследовании кинетики адсорбционно-десорбционных процессов [62—64]. Измерение толщины адсорбированного слоя с точностью до долей монослоя позволяет найти изотермы адсорбции и рассчитать термодинамические характеристики процесса. Так, в работе [63] с помощью быстродействующего одноволнового эллипсометра исследован механизм адсорбции молекул F_2 на атомарно-чистой поверхности Si. Показано существование нескольких типов состояний для сорбируемых молекул и найдены их энергии активации.

1.7. Контроль квантово-размерных структур. Исследования параметров квантово-размерных структур и сверхрешеток — сравнительно новая область применения эллипсометрии. Одна из первых работ в этом направлении была выполнена Эрманом с сотрудниками [65], где они изучали спектры диэлектрических функций квантово-размерной структуры GaAs—GaAlAs и изменения в спектрах, наблюдаемые при вариации толщины квантовых ям и барьеров. Им удалось идентифицировать экстремумы в спектрах, которые соответствовали переходам между подзонами. В работах [66, 67] исследованы зависимости электронных переходов от ориентации подложки при выращивании квантовой структуры и ее азимутального положения при эллипсометрических измерениях (поляризационно-зависимые эффекты).

В работе [68], используя спектроскопию с переменным углом падения, исследовали сверхрешетку GaAs/AlGaAs. Было показано, что измерения хорошо согласуются с моделью, в которой 25 пар слоев сверхрешетки представлено эффективным слоем AlGaAs с некоторым средним составом. Авторы исследовали поведение спектров эллипсометрических параметров при вариации толщин сверхрешеток и их среднего состава, а также качество границ раздела. Эллипсометрические измерения не обнаружили смешанные слои или шероховатости на межфазных границах, что подтверждалось наличием экситонной структуры в спектрах.

1.8. Автоматизация технологических процессов. Применение эллипсометрической аппаратуры *in situ* и в реальном масштабе времени (т. е. когда время измерения и обработки эллипсометрического сигнала меньше характерных для данного процесса времен) открывает возможности создания полностью автоматизированных технологических комплексов. Эллипсометр при этом используется в качестве чувствительного датчика, сигнал с которого поступает на управляющую ЭВМ, обрабатывается, и на основе этих данных корректируются параметры технологического процесса. Помимо функции управления режимом работы автоматизированных комплексов, эллипсометр служит также индикатором сбоев и отклонений в технологических процессах, выдавая сообщение об ошибках оператору. В ряде случаев для этих целей может быть использован одноволновый эллипсометр, например, для управления быстропротекающими температурными процессами [69].

Характерный пример автоматизированной установки создан в корпорации "Texas Instruments" [70]. Одноволновый эллипсометр использован для контроля финишной стадии травления поликристаллического кремния индивидуально на каждой шайбе. Данные эллипсометрических измерений в реальном времени передавались на ЭВМ. Это позволило контролируемо менять режим травления и избежать вытравливания окисла. В отличие от нерегулируемого процесса при эллипсометрическом контроле удается поддерживать заданную скорость травления в центре шайбы (которая может меняться за счет старения установки) и рассчитывать неоднородность травления по шайбе.

Процессы травления в многослойных структурах, состоящих из комбинации слоев Si_3N_4 , поликристаллического Si, SiO_2 , смеси Si_3N_4 и SiO_2 , а также рост слоев этих материалов контролировали с помощью многоканального спектрального эллипсометра [71]. Данные спектроскопических измерений в процессе травления многослойной структуры обрабатывали на ЭВМ (характерное время обработки составляло несколько секунд) и рассчитывали

толщину травливаемого слоя. На основе этих измерений определялась финишная точка травления. Кроме информации о кинетике травления, получали также данные о параметрах структуры на старте технологических операций: толщинах слоев, их составе и т. д.

Для технологии соединений A_3B_5 , A_2B_6 и структур на их основе ключевым моментом является поддержание заданного состава твердых растворов при их синтезе или распределения состава по толщине при выращивании варизонных структур. Аспнес с сотрудниками [73], по-видимому, впервые для технологии A_3B_5 реализовали обратную связь эллипсометр — технологическая установка и полностью автоматизировали процесс роста слоев GaAlAs, используя эллипсометрические данные для управления потоками молекулярных пучков. Отмечено, что по сравнению с неконтролируемым экспериментом (фиксированными технологическими параметрами) регулируемый таким образом процесс позволил получить пленки, более однородные по составу. В дальнейшем были получены структуры с заданным распределением состава по толщине. Так, в работе [73] продемонстрированы результаты по выращиванию параболической квантовой ямы шириной 20 нм. При этом разброс состава от заданного не превышал 0,05 при глубине ямы (по составу) 0,3.

2. Применение эллипсометрии в кристаллооптике и в оптических технологиях. Использование метода эллипсометрии в оптике не столь интенсивно, как в основной области его применения — полупроводниковой микроэлектронике. На наш взгляд, главная причина этого одна. В микроэлектронике характерные размеры составляют от единиц до сотен нанометров и попадают в область, наиболее оптимальную для использования метода, в то время как оптические технологии имеют дело с размерами порядка длины волны. Тем не менее можно выделить два направления применения эллипсометрии в оптике: измерение объемных свойств оптических материалов и изучение поверхностных слоев, возникающих при обработке оптических изделий или сформированных целенаправленно.

2.1. Измерение оптических характеристик материалов. Если для полупроводниковых структур измерение оптических постоянных материала является, как правило, средством для исследования электронных или микроскопических характеристик, то в оптике именно изучение оптических свойств образцов в зависимости от физических условий: температуры, давления, механических напряжений, напряженности полей и т. д. — является основной целью. Эллипсометрия в настоящее время используется при изучении эффектов двулучепреломления [74], оптической активности [75], для определения параметров, характеризующих пьезо- [76], электро- [77], магнитооптические [78] взаимодействия и другие оптические эффекты.

Для кристаллооптики метод эллипсометрии привлекателен, благодаря своей информативности, особенно при исследовании кристаллов низкой симметрии. Сочетание многоугловых, азимутальных, иммерсионных измерений делает возможным определение оптических констант анизотропных материалов и ориентации их оптических осей [75, 79].

2.2. Контроль поверхности и исследование слоистых структур. Одна из практических задач оптической технологии — контроль состояния поверхности. В результате обработки оптических стекол, кристаллов, керамик, металлов на их поверхности образуется модифицированный слой, оптические свойства которого отличаются от объемных. Приповерхностные слои могут быть сформированы также направленным физико-химическим воздействием. Во всех случаях они играют значительную роль в формировании отраженной волны и определяют потребительские качества оптических изделий.

Эллипсометрические исследования процессов полировки [80, 81] позволили установить общие закономерности формирования модифицированных слоев и их влияние на коэффициенты отражения и пропускания. Было показано, что данные эллипсометрических измерений можно использовать как критерий степени готовности поверхности при полировке. Проблема контроля качества оптических поверхностей и покрытий особенно актуальна для оптических устройств с высокой плотностью электромагнитного излучения,

например, квантовых генераторов высокой мощности. Проведенные исследования обнаружили корреляцию эллипсометрических измерений поверхности внутрирезонаторных оптических элементов с величиной потерь и со стабильностью излучения [82, 83].

Отдельная область применения эллипсометрии — изучение параметров пленкообразующих материалов [84] и характеристика оптических покрытий различного функционального назначения: оптических фильтров [85], зеркал рентгеновского диапазона [86], антиотражающих покрытий для солнечных батарей [87] и прочих устройств [88]. Используя данные эллипсометрических измерений, изучали как интегральные характеристики устройств, так и параметры отдельных слоев (толщины, показатели преломления), качество границ раздела, скорость роста и т. п.

3. Применение эллипсометрии в электрохимии. Применение метода эллипсометрии в электрохимии связано главным образом с возможностью измерений *in situ*, так как эллипсометрия — единственный в своем роде метод, обладающий способностью наблюдать в развитии формирование и рост поверхностных пленок в электролите. Эта информация оказывается особенно полезной в сочетании с электрохимическими измерениями.

Особенность эллипсометрических измерений в электрохимии состоит в том, что оптические постоянные пленки и подложки могут меняться с изменением потенциала (эффект электроотражения), а оптические постоянные пленки меняются также и от времени взаимодействия с электролитом. Так, Гриф [89], изучая процессы адсорбции в электролите на поверхности золота, показал, что при этом происходит изменение оптических постоянных Au, которое связано с уменьшением концентрации электронов в поверхностном слое.

Метод эллипсометрии используется для исследования таких процессов, как адсорбция ионов в зависимости от потенциала электродов, коррозия металлов и сплавов в химически активных средах и пассивация их поверхности, а также при выращивании анодных окисных пленок [89—96].

Несмотря на трудности количественной интерпретации при изучении коррозионных процессов, эллипсометрия позволяет получить качественную информацию о начале образования ямок травления при коррозии и изменениях в пассивирующей пленке перед началом образования ямок, измерить скорость репассивации при шлифовании предохраняющей пленки [90]. Большое внимание уделяется исследованию роста и свойств пассивирующих пленок, их устойчивости в зависимости от кислотности среды, ориентации металлической подложки, а также при повышенных температурах и давлении [91—93].

Однако наиболее эффективно использование эллипсометрии при изучении процессов выращивания анодных окислов и обработке воспроизводимых режимов получения высококачественных диэлектрических слоев [94—96]. Технологические проблемы встают особо остро при анодировании полярных полупроводников типа A_3B_5 или тройных полупроводниковых соединений, где процессы массопереноса имеют более сложный характер [12].

Метод эллипсометрии привлекается для решения таких проблем анодирования в электролите, как:

- исследование начальной стадии зародышеобразования;
- измерение скорости роста анодно-окисных пленок;
- измерение оптических постоянных пленок и их распределения по глубине;
- определение плотности осажденного материала из сравнения с электрохимическими измерениями;
- исследование процессов роста—растворения пленок, которые сопровождаются также коррозией подложки.

Гриф в своем обзоре [89] отмечает, что поскольку исследования электрохимических процессов проводят в динамике, то предпочтение отдается эллипсометрической аппаратуре с высоким временным разрешением, а спектральное разрешение отодвигается на второй план. Следует, однако, отметить,

что применение быстродействующих многоканальных эллипсометров позволяет решать обе задачи одновременно [96].

4. Применение эллипсометрии в биологии и медицине. Основные предпосылки, стимулирующие применение эллипсометрии в биологии и медицине, заключаются в следующем:

1. Эллипсометрическое зондирование при соответствующем выборе интенсивности и частоты света не нарушает структуры белковых молекул. Отсюда вытекает одно из важнейших достоинств метода — возможность проведения исследований на живых объектах.

2. Большинство биологических реакций происходит на границе раздела фаз или на поверхности клетки. Кроме того, биологические объекты можно искусственно перенести из раствора на твердую подложку, получив так называемый слайд. При этом реализуется наиболее удобная для интерпретации эллипсометрических измерений однослойная модель.

3. Возможность исследования биологических объектов в процессе развития.

4.1. *Исследования адсорбции белков и иммунологических реакций.* Адсорбция белковых соединений из физиологических растворов на твердые подложки или межфазные границы является одним из методов исследования в биологии. Эллипсометрия позволяет с высокой степенью точности находить толщины адсорбированных слоев и тем самым получать информацию о размерах молекул, скоростях молекулярной диффузии и взаимодействии различных белковых соединений [97]. Наибольшее практическое значение это имеет при иммунологических реакциях.

Иммунологическими называются реакции взаимодействия антигена (чужеродного объекта в крови или клетке — вируса, молекулы и т. п.) с антителом, вырабатываемым организмом для защиты. Специфической особенностью антител является их способность избирательно адсорбироваться на антигенах. Исследования Ротена [98] показали, что толщина адсорбированной пленки в десятки раз превышает толщину слайда — пленки антигенов. На этом принципе основана иммунологическая проба для диагностики различных заболеваний в основном инфекционного характера.

4.2. *Исследования свертываемости крови.* Проблема свертывания крови имеет принципиальное значение при разработке искусственных органов, а также при консервации крови. Изучение кинетики свертывания крови, а также связанных с этим реакций проводилось Вроманом [99] и позже Дэвисом [100]. Количественным показателем состояния крови служила толщина адсорбированного слоя фибриногена — растворимого белка крови. При свертывании фибриноген претерпевал превращения и толщина слоя уменьшалась.

Были изучены такие вопросы, как скорость свертывания, влияние различных факторов, включая поверхность, контактирующую с плазмой крови, на свертываемость и процесс образования тромбоцитов.

4.3. *Исследования клеточных структур.* Начало эллипсометрическим исследованиям клеточных мембран и покровного клеточного материала было положено работой Розенберга [101], который обнаружил, что после механического удаления клеточной популяции с твердой подложки на ней остается слой толщиной 4 нм — так называемый микроэкссудат. В последующей работе Поста [102] было установлено, что природа микроэкссудативной пленки связана с покровным клеточным материалом. Были измерены толщина и скорость ее роста при различных температурах и биологических воздействиях. Практический интерес к этим исследованиям вызван тем, что толщина клеточной оболочки изменялась после заражения клеток вирусами.

Аззам продемонстрировал возможности эллипсометрии в исследовании клеточных мембран популяции *in vitro* (т. е. «в пробирке») [103]. Используемая им методика полного внутреннего отражения позволила ограничить глубину проникновения зондирующего света толщиной мембраны, прилегающей к прозрачной подложке. Эти измерения выявили информацию о молекулярной организации клеточной мембраны: были обнаружены оптическая анизотропия липидного бислоя (основного материала мембраны) и оптическая

активность, обусловленная спиральной формой полипептидной цепочки протеина.

4.4. *Исследования в офтальмологии и в других областях.* Основные направления исследований в офтальмологии связаны с изучением сетчатки глаза и оптических свойств глазных сред. В работе [104] эллипсометрия использовалась при изучении структуры фоторецепторных мембран глаза быка. Измерены оптические характеристики мономолекулярных слоев светочувствительных элементов сетчатки, их толщины, проанализировано влияние сжатия монослоев на их молекулярную организацию. В работах [105, 106] исследовали состояние поляризации света, отраженного сетчаткой глаза. Было показано, что материал сетчатки обладает двулучепреломлением, причем ориентация оптической оси зависит от местоположения точки относительно входа глазного нерва. Используя аппаратуру с высоким пространственным разрешением, авторы измерили распределение двулучепреломления по площади сетчатки и показали, что оно коррелирует с толщиной слоя нервных волокон.

Один из необычных примеров применения эллипсометрии в биологии — изучение поверхностной микроструктуры узоров на крыльях насекомых, которые по своим отражающим свойствам подобны дифракционной решетке [107]. Были исследованы поляризационные характеристики отраженного света и показано, что с помощью эллипсометрических измерений можно определить показатель преломления материала крыльев.

5. *Применение эллипсометрии в органической химии.* Можно выделить в основном два аспекта использования эллипсометрии в органической химии: исследование физико-химических процессов на межфазных границах и исследование свойств пленок органических соединений.

Граница раздела фаз (жидкость — пар, твердое тело — пар, твердое тело — раствор) является наиболее интересной областью с точки зрения протекания химических реакций. Как правило, на этой границе наблюдается адсорбция молекул, изучение которой позволяет понять процессы молекулярного взаимодействия [108, 109]. Построенные на основе эллипсометрических измерений изотермы адсорбции используются для расчета термодинамических характеристик процесса [108]. Исследования адсорбции несут также информацию об изменениях в строении адсорбируемых органических макромолекул, о скорости процесса [109] и позволяют наблюдать фазовые переходы [110].

Исследование пленок высокомолекулярных соединений выполнялось как в процессе роста слоев *in situ* [111], так и после различных технологических операций *ex situ* или при их старении [112, 113]. Измерение толщины и оптических постоянных пленок позволяет изучать кинетические характеристики в процессе роста или удаления пленок, механизмы протекания реакций. Так, в работе [114] с помощью эллипсометрических измерений исследовался процесс удаления полимерной пленки при облучении светом ультрафиолетового диапазона. Изменение толщины при хранении пленки на воздухе [113] позволило наблюдать эффект расслаивания.

Оптические постоянные чувствительны к плотности синтезируемых пленок и наличию инородных включений, а также зависят от состава и молекулярной структуры пленки. Благодаря этому измерения оптических постоянных позволили наблюдать полимеризацию органических пленок при плазменной обработке [115]. Оптическая неоднородность пленок по толщине свидетельствует, как правило, об их структурной неоднородности [116].

Особый интерес для эллипсометрии представляют пленки Лэнгмюра — Блоджетта, получаемые многократным наслаиванием на подложку мономолекулярных слоев ориентированных молекул [117, 118]. Эллипсометрические исследования таких пленок обнаруживают анизотропию оптических постоянных. Определяемые значения показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн, а также ориентация оптической оси пленки характеризуют ориентацию молекулярных групп. В свою очередь, измерение толщины мономолекулярного слоя, которая непосредственно связана со структурой мо-

лекулы, позволяет исследовать структурные изменения в слоях, например, в процессе термического отжига [118].

6. Нетрадиционные области применения эллипсометрии. Развитие новых направлений исследований в науке и технике постоянно расширяет сферу применения эллипсометрии. Иногда метод используется для решения самых неожиданных проблем. В данном разделе перечислены лишь некоторые примеры таких применений.

В последнее время появились работы по исследованию методом эллипсометрии высокотемпературных сверхпроводящих керамик на основе купратов [119, 120]. Отмечается, что получаемая из спектроэллипсометрических измерений информация об электронной структуре важна для понимания механизма сверхпроводимости и изучения микроструктурной организации на молекулярном уровне. Проведен сравнительный анализ оптических свойств сверхпроводников с различным содержанием кислорода и степени его разупорядочения [119] и исследован эффект отжига [120].

Представляется интересным сообщение о возможности использования эллипсометрии для контроля пленок как естественного, так и искусственного происхождения на поверхности моря [121]. Адсорбированные пленки поверхностно-активных веществ, а также пленки, образующиеся в результате разлива нефти, имеют характерные толщины от единиц до сотен нанометров и являются подходящим объектом для эллипсометрических исследований.

В работе [122] сообщается об измерении двулучепреломления атмосферного слоя при градиенте скорости ветра. Свет проходил оптический путь около 4 км и анализировался эллипсометрической установкой. Была обнаружена линейная зависимость между среднеквадратичным отклонением показаний эллипсометра и среднеквадратичным разбросом градиента скорости ветра. Методика может быть полезна для изучения воздушных потоков как вблизи поверхности Земли, так и в верхних слоях атмосферы.

Метод эллипсометрии использовался для контроля загрязнений поверхности криогенно-вакуумных установок источниками органического происхождения [123]. Была измерена динамика роста кристалла — пленки вакуумного масла — в зависимости от температуры. Отмечается высокая чувствительность и эффективность метода.

Для имитации атмосферы околоземного пространства и ее влияния на обшивку космических кораблей обычно используют кислородные плазменные генераторы. Условия, которые создают такие системы, близки к реальным, но отличаются тем, что приводят к загрязнению образца при его экспозиции в плазме. В работе [124] исследовались такие загрязнения с целью их минимизации или устранения. Спектроэллипсометрия использовалась для определения скорости роста загрязнений и их природы. Было установлено, что эффект существенно уменьшается, если на пути плазменного потока установить металлическую пластину.

Космическая тематика исследований продолжена в работе [125], где изучалось воздействие атомарного кислорода на поверхность SiC-зеркал, длительное время находившихся на низких околоземных орбитах. Эллипсометрия применялась, наряду с другими методами, для изучения степени деградации поверхности зеркал.

В работе [126] метод эллипсометрии использован в метрологии для контроля эффективности различных методов очистки эталонных образцов массы от загрязнений. С помощью эллипсометрии была установлена природа загрязнений и найден наиболее эффективный метод очистки.

Анализируя общую тенденцию развития научных исследований и появление практических задач, можно указать также области потенциального применения метода эллипсометрии, где он пока что не используется или используется эпизодически. Это квантовая электроника, акустооптика и акустоэлектроника, анализ жидких растворов и смесей, экология, криминалистика и ряд других областей. Возможно, что разработка эллипсометрических методик для решения проблем в указанных областях — дело ближайшего будущего.

Заключение. В обзоре представлены лишь основные направления применения метода эллипсометрии в научных исследованиях и при решении технических задач. Очевидно, что невозможно охватить все аспекты использования метода. В настоящее время эллипсометрия переживает период динамичного поступательного развития, и это позволяет считать ее одним из самых перспективных методов анализа состояния поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Drude P. Über die Gesetze der Reflexion und Brechung des Lichtes an der Grenze absorbirender Krystalle // *Ann. Phys.* 1887. 32. S. 584.
2. Drude P. Bestimmung der Optischen Konstanten der Metalle // *Ann. Phys.* 1890. 39. S. 481.
3. Aspnes D. E., Studna A. A. Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV // *Phys. Rev. B.* 1983. 27, N 2. P. 985.
4. Aspnes D. E. Extending scanning ellipsometric spectra into experimentally inaccessible region // *Surf. Sci.* 1976. 56, N 1. P. 322.
5. Vina L., Cardona M. Optical properties of ultraheavily doped germanium: Theory and experiment // *Phys. Rev. B.* 1986. 34, N 4. P. 2586.
6. Vina L., Cardona M. Effect of heavy doping on the optical properties and the band structure of silicon // *Phys. Rev. B.* 1984. 29, N 12. P. 6739.
7. De Sande J. C. G., Afonso C. N., Escudero J. L. et al. Optical properties of laser-deposited a-Ge films: a comparison with sputtered and e-beam-deposited films // *Appl. Opt.* 1992. 31, N 28. P. 6133.
8. Aspnes D. E., Studna A. A., Kinsbron E. Dielectric properties of heavily doped crystalline and amorphous silicon from 1.5 to 6.0 eV // *Phys. Rev. B.* 1984. 29, N 2. P. 768.
9. Suto K., Adachi S. Optical properties of ZnTe // *J. Appl. Phys.* 1993. 73, N 2. P. 926.
10. Aspnes D. E., Kelso S. M., Logan R. A., Bhat R. Optical properties of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ // *J. Appl. Phys.* 1986. 60, N 2. P. 754.
11. Vina L., Umbach C., Cardona M., Vodopyanov L. Ellipsometric studies of electronic interband transitions in $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // *Phys. Rev. B.* 1984. 29, N 12. P. 6752.
12. Arvin H., Aspnes D. E. Nondestructive analysis of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0.00, 0.20, 0.29, \text{ and } 1.00$) by spectroscopic ellipsometry. 2. Substrate, oxide, and interface properties // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 1984. 2, N 3. P. 1316.
13. Burkhard H., Dinges H. W., Kuphal E. Optical properties of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}_{1-y}\text{As}_y$, InP, GaAs, and GaP determined by ellipsometry // *J. Appl. Phys.* 1982. 53. P. 655.
14. Biswas D., Lee H., Salvador A. et al. Characterization of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}/\text{GaAs}$ grown by gas source molecular-beam epitaxy ($0.35 \leq x \leq 0.60$) by spectroscopic ellipsometry // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 1992. 10, N 2. P. 962.
15. Lautenschlager P., Carriga M., Logothetidis S., Cardona M. Interband critical points of GaAs and their temperature dependence // *Phys. Rev. B.* 1987. 35, N 17. P. 9174.
16. Lautenschlager P., Carriga M., Cardona M. Temperature dependence of the interband critical-point parameters of InP // *Ibid.* 36, N 9. P. 4813.
17. Logothetidis S., Cardona M., Lautenschlager P., Carriga M. Temperature dependence of the dielectric function and the interband critical points of CdSe // *Phys. Rev. B.* 1986. 34, N 4. P. 2458.
18. Boudreau M., Boumerzoug M., Kruzelecky R. V. et al. Electron cyclotron resonance CVD of silicon oxynitride for optoelectronic applications // *III-V Electronic and Photonic Device Fabrication and Performance* /Eds. K. S. Jones, S. J. Pearton, H. Kanber. Pittsburgh, PA, USA: Mater. Res. Soc., 1993. P. 183.
19. Aspnes D. E. Microstructural information from optical properties in semiconductor technology // *SPIE. V. 276. Optical Characterization Techniques for Semiconductor Technology*, 1981. P. 188.
20. Aspnes D. E. Optical properties of thin films // *Thin Sol. Films.* 1982. 89. P. 249.
21. Minder H., Theiss W. et al. Optical characterization of porous silicon layers formed on heavily p-doped substrates // *Appl. Surf. Sci.* 1992. 56—58. P. 6.
22. Pickering C., Carlinc R. T., Robbins D. J. et al. Spectroscopic ellipsometry characterization of strained and relaxed $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ epitaxial layers // *J. Appl. Phys.* 1993. 73, N 1. P. 239.
23. Layadi N., Roca i Cabarrocas P., Yakovlev V., Drevillon B. Study by real time ellipsometry of the growth of amorphous and microcrystalline silicon thin films combining glow discharge decomposition and UV light irradiation // *Thin Sol. Films.* 1993. 233, N 1—2. P. 281.

24. Nguyen H. V., Ihsin An., Collins R. W. et al. Preparation of ultra thin microcrystalline silicon layers by atomic hydrogen etching of amorphous silicon and end-point detection by real time spectro-ellipsometry // *Appl. Phys. Lett.* 1994. 65, N 26. P. 3335.
25. Bergonzo P., Boyd I. W. Photodeposition of oxynitride and nitride films using excimer lamps // *Microelectron. Eng.* 1994. 25, N 2-4. P. 345.
26. Bergonzo P., Boyd I. W. Rapid photochemical deposition of silicon dioxide films using an excimer lamp // *J. Appl. Phys.* 1994. 76, N 7. P. 4372.
27. Yuc Cong, Collins R. W., Windischmann H. Spectroellipsometry characterization of optical quality vapor-deposited diamond thin films // *Appl. Phys. Lett.* 1991. 58, N 8. P. 819.
28. Joseph J., Hu Y. Z., Irene E. A. A kinetics study of the electron cyclotron resonance plasma oxidation of silicon // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 1992. 10, N 2. P. 611.
29. Fukarek W., Kersten H. Application of dynamic in situ ellipsometry to the deposition of tin-doped indium oxide films by reactive direct-current magnetron sputtering // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 1994. 12, N 2. P. 523.
30. Von Keudell A., Jacob W. Growth and erosion of hydrocarbon films investigated by in situ ellipsometry // *J. Appl. Phys.* 1996. 79, N 2. P. 1092.
31. Rzhhanov A. V., Svitashov K. K. Ellipsometric techniques to study surfaces and thin films // *Advanc. in Electronics and Electron Phys.* 1979. 49. P. 1.
32. Irene E. A., Dong D. W. Ellipsometry measurements of polycrystalline silicon films // *J. Electrochem. Soc.* 1982. 129, N 6. P. 1347.
33. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.
34. Arvin H., Aspnes D. E. Unambiguous determination of thickness and dielectric function of thin films by spectroscopic ellipsometry // *Thin Sol. Films.* 1984. 113. P. 101.
35. Vanhellemont J., Maes H. E., De Veirman A. Spectroscopic ellipsometry and transmission electron microscopy study of annealed high-dose oxygen implanted silicon // *J. Appl. Phys.* 1989. 65, N 11. P. 4454.
36. Vedam K., McMarr P. J., Narayan J. Nondestructive depth profiling by spectroscopic ellipsometry // *Appl. Phys. Lett.* 1985. 47, N 4. P. 339.
37. Yakovlev V. A., Irene E. A. An interface enhanced spectroscopic ellipsometry technique: application to Si-SiO₂ // *J. Electrochem. Soc.* 1992. 139, N 5. P. 1450.
38. Theeten J. B., Erman M. Depth profiling and interface analysis using spectroscopic ellipsometry // *J. Vac. Sci. Technol.* 1981. 20, N 3. P. 471.
39. Erman M., Frijlink P. M. Interface analysis by spectroscopic ellipsometry of Ga_{1-x}Al_xAs-GaAs heterojunctions grown by metal organic vapor phase epitaxy // *Appl. Phys. Lett.* 1983. 43, N 3. P. 285.
40. Theeten J. B., Aspnes D. E. The determination of interface layers by spectroscopic ellipsometry // *Thin Sol. Films.* 1979. 60, N 2. P. 183.
41. Ibragim M. M., Bashara N. M. Ellipsometric study of 400 eV ion damage in silicon // *Surf. Sci.* 1972. 30, N 3. P. 632.
42. Adams J. R., Bashara N. M. Determination of the complex index profiles in P₃₁⁺ ion implanted silicon by ellipsometry // *Surf. Sci.* 1975. 49, N 2. P. 441.
43. Kim O., Park Y. S. Ellipsometric investigation of ion-implanted GaAs // *Surf. Sci.* 1980. 96. P. 307.
44. Мардежев А. С., Серяпин В. Г., Швец В. А. Профили показателей преломления и поглощения в кремнии, имплантированном ионами фосфора // *ФТП.* 1988. 22, вып. 7. С. 1306.
45. Aspnes D. E., Studna A. A. An investigation of ion-bombarded and annealed (111) surfaces of Ge by spectroscopic ellipsometry // *Surf. Sci.* 1980. 96. P. 294.
46. Svitashov K. K., Dvoretzky S. A., Sidorov Yu. G. et al. The growth of high-quality MCT films by MBE using in-situ ellipsometry // *Cryst. Res. Technol.* 1994. 29, N 7. P. 931.
47. Theeten J. B., Hottier F., Hallais J. Ellipsometric assesment of (Ga, Al)As/GaAs epitaxial layers during their growth in an organometallic VPE system // *J. Cryst. Growth.* 1979. 46. P. 245.
48. Murthy S. D., Bhat I. B., Johs B. et al. Application of spectroscopic ellipsometry for real-time control of CdTe and HgCdTe growth in an OMCVD system // *J. Electron. Materials.* 1995. 24, N 5. P. 445.
49. Hottier F., Laurence G. Assessment by in situ ellipsometry of composition profiles of Ga_{1-x}Al_xAs-GaAs heterostructures // *Appl. Phys. Lett.* 1981. 38, N 11. P. 863.
50. Demay Y., Arnoult D., Gailliard J. P., Medina P. In situ spectroscopic ellipsometry during molecular-beam epitaxy of cadmium mercury telluride // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 1987. 5, N 5. P. 3139.
51. Свиташев К. К., Швец В. А., Мардежев А. С. и др. Метод эллипсометрии в технологии синтеза соединений кадмий-ртуть-теллур // *Автометрия.* 1996. № 4. С. 100.

52. Hottier F., Hallais J., Simondet F. In situ monitoring by ellipsometry of metallorganic epitaxy of GaAlAs—GaAs superlattice // *J. Appl. Phys.* 1980. 51, N 3. P. 1599.
53. Aspnes D. E. Minimum-data approaches for determining outer-layer dielectric responses of films from kinetic reflectometric and ellipsometric measurements // *Appl. Phys. Lett.* 1993. 62, N 4. P. 343.
54. Tomita T., Kinoshita T., Yamashita T. et al. A new non-contact method to measure temperature of the surface of semiconductor wafers // *Jap. Journ. Appl. Phys.* 1986. 25, N 11. P. L929.
55. Sampson R. K., Massoud H. Z. Resolution of silicon wafer temperature measurement by in situ ellipsometry in a rapid thermal processor // *J. Electrochem. Soc.* 1993. 140, N 9. P. 2673.
56. Yao H., Snyder P. G., Woolam J. A. Temperature dependence of optical properties of GaAs // *J. Appl. Phys.* 1991. 70, N 6. P. 3261.
57. Bagley B. G., Aspnes D. E., Adams A. C., Mogab C. J. Optical properties of low-pressure chemically vapor deposited silicon over the energy range 3.0—6.0 eV // *Appl. Phys. Lett.* 1981. 38, N 1. P. 58.
58. Thomas D. J., Southworth P., Flowers M. C., Greef R. An investigation of the reactive ion etching of polysilicon in pure Cl₂ plasmas by in situ ellipsometry and quadrupole mass spectrometry // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 1990. 8, N 5. P. 1044.
59. Алгазин Ю. Б., Блюмкина Ю. А., Гребнев Н. И. и др. Оптические постоянные атомарно-чистой поверхности германия и кремния и их температурные зависимости // *Оптика и спектроскопия.* 1978. 45, вып. 2. С. 330.
60. Kelly M. K., Zollner S., Cardona M. Modelling the optical response of surfaces measured by spectroscopic ellipsometry: application to Si and Ge // *Surf. Sci.* 1993. 285, N 3. P. 282.
61. Hammadi Z., Gauch M., Muller P., Quentel G. Experimental results from spectroscopic ellipsometry on the (7 × 7)Si(111) surface reconstruction — dielectric function determination // *Surf. Sci.* 1995. 341, N 1–2. P. 202.
62. Meyer F., Bootsma G. A. Ellipsometric investigation of chemisorption of clean silicon (111) and (100) surfaces // *Surf. Sci.* 1969. 16. P. 221.
63. Aliev V. S., Kruchinin V. N., Baklanov M. R. Adsorption of molecular fluorine on the Si(100) surface: an ellipsometry study // *Surf. Sci.* 1996. 347. P. 97.
64. Kruchinin V. N., Repinsky S. M., Shklyayev A. A. Monosilane adsorption and initial growth stages of silicon layers on the (100) and oxidized silicon surfaces // *Surf. Sci.* 1992. 275. P. 433.
65. Erman M., Alibert C., Theeten J. B. et al. // *J. Appl. Phys.* 1988. 63. P. 465.
66. Lukes F., Plog K. Dielectric function of GaAs/AlAs superlattices grown on GaAs substrates with different orientations // *Spectroscopic Ellipsometry: Proc. of the 1st Int. Conf. Paris, France, Jan. 11–14, 1993.* P. 162.
67. Zettler J.-Th., Mikkelsen H., Trepk Th. et al. Modulated ellipsometry for characterization of multiple quantum wells and superlattices // *Ibid.* P. 112.
68. Merkel K. G., Snyder P. J., Woolam J. A. GaAs/AlGaAs superlattice characterization by variable angle spectroscopic ellipsometry // *SPIE. V. 946. Spectroscopic Characterization Techniques for Semiconductor Technology III, 1988.* P. 105.
69. Massoud H. Z., Sampson R. K., Conrad K. A. et al. Applications of in situ ellipsometry in RTP temperature measurement and process control // *Rapid Thermal and Integrated Process. Symp. /Eds. J. C. Gelpey, M. L. Green, R. Singh, J. J. Wortman. Pittsburgh, PA, USA: Mater. Res. Soc., 1991.* P. 17.
70. Butler S. W., Stefani J., Sullivan M. et al. Intelligent model-based control system employing in situ ellipsometry // *J. Vac. Sci. Technol. A.* 1994. 12, N 4. Pt. 2. P. 1984.
71. Duncan W. M., Henck S. A., Kuehne J. W. et al. High-speed spectral ellipsometry for in situ diagnostics and process control // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 1994. 12, N 4. P. 2779.
72. Aspnes D. E., Quinn W. E., Gregory S. Optical control of growth of Al_xGa_{1-x}As by organometallic molecular beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.* 1990. 57, N 25. P. 2707.
73. Aspnes D. E. New developments in spectroellipsometry: the challenge of surfaces // *Thin Sol. Films.* 1993. 233, N 1–2. P. 1.
74. Primak W. Determination of small dilatations and surface stress by birefringence measurements // *Surf. Sci.* 1969. 16. P. 398.
75. Тронин А. Ю., Константинова А. Ф., Филиппов В. В. Эллипсометрические исследования одноосных гиротропных кристаллов // *Эллипсометрия: теория, методы, приложения. Новосибирск: Наука, 1987.* С. 37.
76. Mikami N., Nagaо C., Sawada T., Sato K. Measurement of stress induced birefringence of bismuth germanium oxide single crystals by a new ellipsometry // *Jap. Journ. Appl. Phys.* 1987. 26. P. 152.
77. Neson D. F. General solution for the electro-optic effect // *JOSA.* 1975. 65, N 10. P. 1144.

78. Minden H. T. Ellipsometric measurement of the Kerr magneto-optic effect // *Appl. Opt.* 1979. 18, N 6. P. 813.
79. Schubert M., Rheinlander B., Woollam J. A. et al. Extension of rotating analyzer ellipsometry to generalized ellipsometry: Determination of the dielectric function tensor from uniaxial TiO₂ // *JOSA. A.* 1996. 13, N 4. P. 875.
80. Храмовский И. А., Пшеницын В. И. Влияние полирующего абразива на оптические характеристики поверхностного слоя // *ОМП.* 1987. № 7. С. 29.
81. Храмовский И. А., Пшеницын В. И. Роль удельного давления в формировании оптических свойств поверхностного слоя при полировании кварцевого стекла // *ОМП.* 1986. № 12. С. 26.
82. Пшеницын В. И., Храмовский И. А. Исследование потерь излучения на оптических элементах в зависимости от физических параметров поверхностного слоя // *ОМП.* 1983. № 12. С. 5.
83. Zuber A., Kaiser N., Stehle J. L. Variable-angle spectroscopic ellipsometry for UV characterization of dielectric coatings // *Thin Sol. Films.* 1995. 261, N 1–2. P. 37.
84. Chindaudom P., Vedam K. Characterization of inhomogeneous transparent thin films on transparent substrates by spectroscopic ellipsometry: refractive indices $n(\lambda)$ of some fluoride coating materials // *Appl. Opt.* 1994. 33, N 13. P. 2664.
85. Carr N., Goodwin M. J., Harrison K. J., Lewis K. L. The design and fabrication of optical filters using organic materials // *Thin Sol. Films.* 1993. 230, N 1. P. 59.
86. Mai H., Pompe W. Manufacture and characterization of soft X-ray mirrors by laser ablation // *Appl. Surf. Sci.* 1992. 54. P. 215.
87. Saitoh T., Kamataki O., Uematsu T. Optimization of antireflection film structures for surface-passivated crystalline silicon solar cells // *Jap. Journ. Appl. Phys.* 1994. 33, N 4A. Pt. 1. P. 1809.
88. Bichri A., Hunderi O., Lafait J., Wold E. Characterization of radiative surface modes and anisotropy in Ag/SiO₂ multilayers, by visible and IR ellipsometry // *Thin Sol. Films.* 1993. 234, N 1–2. P. 496.
89. Greef R. Ellipsometry in electrochemistry: spectrum of applications // *Spectroscopic Ellipsometry: Proc. of the 1st Int. Conf. Paris, France, Jan. 11–14, 1993.* P. 32.
90. Kruger J., Ambrose J. R. Qualitative use of ellipsometry to study localized corrosion processes // *Surf. Sci.* 1976. 56. P. 394.
91. Sengar H. G. S., Pandey K. N., Singh K. et al. Studies of the passive film on mild steel at different pH by ellipsometry // *Bull. Electrochem.* 1987. 3, N 6. P. 627.
92. McBee C. L., Kruger J. Ellipsometric-spectroscopy of film formed on metals in solution // *Surf. Sci.* 1969. 16. P. 340.
93. Hayfield P. C. S. Studies by ellipsometry on high pressure gas and liquid reactions // *Ibid.* P. 370.
94. Greef R., Norman C. F. W. Ellipsometry of the growth and dissolution of anodic oxide films on aluminium in alkaline solution // *J. Electrochem. Soc.* 1985. 132, N 10. P. 2362.
95. Conway B. E. Electrochemical oxide film formation at noble metals as a surface-chemical process // *Progr. in Surf. Sci.* 1995. 49, N 4. P. 331.
96. Kim Y.-T., Collins R. W., Vedam K. Fast scanning spectroelectrochemical ellipsometry: in-situ characterization of gold oxide // *Surf. Sci.* 1990. 233, N 3. P. 341.
97. Azzam R. M. A., Rigby P. C., Krueger J. A. Kinetics of protein absorption and immunological reaction at a liquid/solid interface by ellipsometry // *Phys. in Medicine and Biology.* 1977. 22, N 3. P. 422.
98. Mathot C., Rothen A. The immunoelectroadsorption method // *Surf. Sci.* 1969. 16. P. 428.
99. Vroman L., Adams A. L. Findings with the recording ellipsometer suggesting rapid exchange of specific plasma proteins at liquid/solid interfaces // *Ibid.* P. 438.
100. Davis R. B., Azzam R. M. A., Holtz G. Ellipsometric observation of surface adsorption and molecular interactions of native and modified fibrinogen and factor VIII // *Surf. Sci.* 1980. 96. P. 539.
101. Rosenberg M. D. // *Biophys. Journ.* 1960. 1. P. 137.
102. Poste G., Moss C. // *Progress in Surf. Sci. N. Y.: Pergamon Press, 1972.* V. 2. Pt. 3. P. 139.
103. Azzam R. M. A. Use of a light beam to probe the cell surface in vitro // *Surf. Sci.* 1976. 56. P. 126.
104. Ducharme D., Salesse C., Leblanc R. M. Ellipsometric studies of rod outer segment phospholipids at the nitrogen-water interface // *Thin Sol. Films.* 1985. 132. P. 83.
105. Dreher A. W., Reiter K. Retinal laser ellipsometry: a new method for measuring the retinal nerve fiber layer thickness distribution? // *Clinical Vision Sci.* 1992. 7, N 6. P. 481.
106. Dreher A. W., Reiter K., Weinreb R. N. Spatially resolved birefringence of the retinal nerve fiber layer assessed with a retinal laser ellipsometer // *Appl. Opt.* 1992. 31, N 19. P. 3730.
107. Brink D. J., Lee M. E. Ellipsometry of diffractive insect reflectors // *Appl. Opt.* 1996. 35, N 12. P. 1950.

108. Tse J., Adamson A. W. Adsorption and contact angle studies. Organic substances on polished polyethylene // *J. Colloid and Interface Sci.* 1979. 72, N 3. P. 515.
109. De Feijter J. A., Benjamins J., Veer F. A. Ellipsometry as a tool to study the adsorption behaviour of synthetic and biopolymers at the air-water interface // *Biopolymers.* 1978. 17, N 7. P. 1759.
110. Tenebre L. Etude par ellipsometrie des conformations moleculaires dans les monocouches d'acides gras a la surface de l'eau // *J. Phys. (France).* 1977. N 11. P. 123.
111. Bouizem Y., Chao F., Costa M. et al. Ellipsometric study of acrylonitrile electropolymerization on nickel // *J. Electroanal. Chem. Interfac. Electrochem.* 1984. 172, N 1-2. P. 101.
112. Oleszkiewicz E., Kisza M. Ellipsometric measurements of poly (methyl metacrylate) layers bombarded with boron ions // *Appl. Opt.* 1985. 15, N 2. P. 157.
113. Lauer J. L., Banting G., Jones W. R. Jr. Investigation of PTFE transfer films by infrared emission spectroscopy and phase-locked ellipsometry // Avail. NTIS. Fro. Sci. Technol. Aersp. Rep. 1987. 25, N 13. Abstr. N 87-20421.
114. Bolle M., Lazare S. Ablation of thin polymer films on Si or metal substrate with the low intensity UV beam of an excimer laser or mercury lamp: advantages of ellipsometric rate measurements // *Appl. Surf. Sci.* 1992. 54. P. 471.
115. Poll H.-U., Meichsner J., Arzt M. et al. Optical properties of plasma polymer films // *Surf. and Coatings Technol.* 1993. 59, N 1-3. P. 365.
116. Chao F., Costa M., Lang P., Lheritier E. Ellipsometrie: variation de la fonction dielectrique d'un film de polymethylthiophene greffe, en fonction de la croissance // *Ann. Phys. (France).* 1986. 11, N 1. P. 101.
117. Honig E. P., De Koning B. R. Ellipsometric investigation of the skeletonization process of Langmuir — Blodgett films // *Surf. Sci.* 1976. 56. P. 454.
118. Kim T. W., Lee S. K., Song M. J. et al. Thermal annealing effects of C-22-quinolium (TCNQ) Langmuir — Blodgett films // *Synthetic Metals.* 1995. 71, N 1-3. P. 2029.
119. Kircher J., Gopalan S., Cardona M. Optical properties of the Y-Ba cuprates: mainly a band structure point of view // *Spectroscopic Ellipsometry: Proc. of the 1st Int. Conf. Paris, France, Jan. 11—14, 1993.* P. 522.
120. Kircher J., Cardona M., Zibold A. et al. Optical investigation of room-temperature chain ordering in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ // *Phys. Rev. B.* 1993. 48, N 13. P. 9684.
121. Тибилов А. С., Кулик Е. С. Импульсный эллипсометр с электрооптической модуляцией // *Эллипсометрия — метод исследования поверхности.* Новосибирск: Наука, 1983. С. 153.
122. Boyer G. R., Prade B. S. Atmospheric and wind tunnel air-flow-birefringence measurements // *Surf. Sci.* 1976. 56. P. 449.
123. Григоренко Б. В., Гетманец В. Ф., Курская Т. А. Эллипсометрический анализ криогенно-вакуумных загрязнений // *Эллипсометрия в науке и технике.* Новосибирск: ИФП СО АН СССР, 1990. Вып. 2. С. 167.
124. Synowicki R. A., Hale J. S., McGahan W. A. et al. Oxygen plasma ashers as space simulators: a quantitative analysis of contamination with identification of sources and remedies // *Appl. Phys. Commun.* 1993. 12, N 3-4. P. 275.
125. Raikar G. N., Gregory J. C., Partlow W. D. et al. Surface characterization of SiC mirrors exposed to fast atomic oxygen // *Surf. & Interface Analys.* 1995. 23, N 2. P. 77.
126. Schwartz R., Glaser M. Procedures for cleaning stainless steel weight, investigated by mass comparison and ellipsometry // *Measurement Sci. & Technol.* 1994. 5, N 12. P. 1429.

Поступила в редакцию 6 ноября 1996 г.