

Prof. dr hab. inż. Sergii Pavlov,
Wydział Inżynierii Biomedycznej i Systemów Optyczno-Elektronicznych
Winnicki Narodowy Uniwersytet Techniczny,
Vinnica, Ukraina

РЕЦЕНЗИЯ

докторской диссертации Владимира Ковалева
на тему: «Метод светодиодной спектральной эллипсометрии с
переключением ортогональных состояний поляризации»

1. Основание для подготовки рецензии.

- pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Lubelskiej z dnia 29.06.2022 r., Uchwała nr AEiE/23_2.9b/20-24,
- rozprawa doktorska mgr. inż. **Vladimira Kovaleva** pt.: “*Metoda elipsometrii spektralnej LED z przełączaniem ortogonalnych stanów polaryzacji*”;
- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r., poz. 85);
- Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669).

2. Характеристика работы.

Представленная на рассмотрение докторская диссертация написана на русском языке, имеет 146 страниц с приложением, из которых 145 страниц основного печатного текста и список литературы в количестве 122 наименований. Библиография отражает современное состояние знаний в области исследования и применения новых информационно измерительных систем на основе метода спектральной эллипсометрии для расширения рабочего диапазона, повышения точности и воспроизводимости измерения эллипсометрических параметров, а также упрощения конструкции измерительной установки с целью улучшения технико-экономических характеристик и расширения применимости в междисциплинарных задачах и на производстве.

Подбор литературы целенаправленный и правильный.

Диссертация разделена на 9 основных глав, включая введение, выводы, литературу и приложения. Иллюстративный материал, представленный в работе, нагляден и отражает достижения Владимира Ковалева в разработке метода светодиодной эллипсометрии с переключением ортогональных состояний поляризации, что позволило повысить точность по воспроизводимости и чувствительность измерений оптических констант, в совокупности с возможностью существенно упростить конструкцию спектрального эллипсометра за счет исключения из оптической схемы подвижных поляризационных элементов.

Задачи, поставленные в диссертации, есть правильными и четкими, а используемая терминология верна и понятна.

3. Актуальность темы диссертации.

Широкое применение эллипсометрия получила в связи с появлением лазерных источников излучения и компьютеров. Развитие микроэлектроники определило доминирующее развитие эллипсометрия, основанной на анализе отраженного пучка излучения. В настоящее время широкое распространение получила спекроэллипсометрия (СЭ), в которой измеряются спектры эллипсометрических параметров. Это один из основных методов анализа современных наноструктур.

Эллипсометрические измерения носят универсальный характер. В частности, могут быть выполнены исследования линейного и кругового дихроизма, вращения плоскости поляризации, оптической анизотропии, поляризационной микроскопии.

Универсальность и информативность метода СЭ определили широкую область ее применения.

СЭ позволяет точно определять спектры оптических постоянных всего набора материалов современной технологии (металлов, полупроводников, диэлектриков) в объемном и пленочном состояниях и толщины пленок, поверхностных и переходных слоев в сложных многослойных структурах в диапазоне от единиц до тысяч нанометров.

СЭ дает возможность исследовать механические, структурные, физико-химические свойства материалов, микрошероховатость поверхности, профиль распределения микропористости и микровключений. СЭ - эффективное средство *in situ* контроля процессов напыления и травления.

Сегодня актуальность использования методов СЭ связано с такими областями применения, как нанотехнология, физика и химия поверхности и тонких пленок, оптика, кристаллофизика, электрохимия, сенсорные устройства для экологии, биология и медицина.

Существует несколько основных направлений в современной эллипсометрии. Наиболее развитое направление - эллипсометрия с вращающимися поляризационными элементами. Эллипсометрия с фотоупругими скоростными модуляторами также находит широкое применение. Спектральная эллипсометрия с делением отраженного от образца пучка излучения на несколько каналов с различными состояниями поляризации и несколькими фотоприемниками используется значительно реже. Нулевая эллипсометрия, основанная на нахождении азимутов поляризатора и анализатора, соответствующих минимуму сигнала на фотоприемнике, широко использовалась ранее с лазерными источниками излучения, но неэффективна в спектральной эллипсометрии.

В настоящее время широкое распространение получил аналитический метод спектральной эллипсометрии (СЭ). С помощью СЭ открывается возможность определять толщины и спектры оптических постоянных широкого круга различных материалов (металлов, полупроводников, диэлектриков). При этом метод спектральной эллипсометрии предоставляет наибольший объем

аналитических данных и позволяет проводить исследования *In situ* в процессе производства тонкопленочных структур, что находит применение в широкой области междисциплинарных исследований.

Таким образом, актуальными задачами при разработке новых информационно измерительных систем на основе метода спектральной эллипсометрии являются расширение рабочего диапазона, повышение точности и воспроизводимости измерения эллипсометрических параметров, а также упрощение конструкции измерительной установки с целью улучшения технико-экономических характеристик и расширения применимости в междисциплинарных задачах и на производстве.

4. Предметный анализ и оценка работы.

Первая глава диссертации, которая является введением, содержит введение в тему, которая рассматривается в диссертации, а также описывается актуальность работы. Эта глава представляет собой синтетический обзор литературы по затронутым в работе вопросам.

Представлены собственные размышления автора относительно преимуществ применения аналитического метода спектральной эллипсометрии.

Сделано заключение, что технологии создания тонкопленочных структур имеют ключевое значение в процессе создания целого ряда продукции в секторе высокотехнологичного производства. Характеристики данной продукции напрямую зависят от физических параметров создаваемых пленочных структур, что обуславливает необходимость их контроля. В этих случаях часто используют оптические методы и системы, для которых характерны возможности проведения бесконтактных и высокоточных измерений толщин и оптических постоянных таких тонкопленочных структур.

Вторая глава содержит тезис, цель и объем работы. В этой главе сформулирован тезис, что в работе разработан метод светодиодной эллипсометрии с переключением ортогональных состояний поляризации, который позволяет достичь высоких технических характеристик, таких как точность по воспроизводимости и чувствительность измерений оптических констант, в совокупности с возможностью существенно упростить конструкцию спектрального эллипсометра за счет исключения из оптической схемы подвижных поляризационных элементов. Цель работы заключается в снижении погрешности и повышении воспроизводимости измерений толщин и оптических констант тонкопленочных структур в присутствии внешних воздействий. Сформулированы задачи исследований.

В третьей главе приводится анализ методов и технических средств контроля оптических констант и толщин тонких пленок. При этом актуальной задачей является характеристика особенностей получаемых тонкопленочных структур, таких как градиенты микроструктуры, пористость, повреждения и возможные дефекты. Интерес представляют исследования тонких пленок, состоящие из наноструктур и микроструктур, биосенсорные применения тонкопленочных структур, а также новые решения в приборостроении и обходе

существующих фундаментальных ограничений измерительной техники. В этом контексте становится очевидна потребность промышленности и научного сектора в современных информационно-измерительных системах контроля оптических характеристик и толщин многослойных пленочных структур, совмещающих в себе возможность последовательного взаимодействия надежных теоретических подходов и современных коммерчески доступных средств измерения. В разделе представлен обзор альтернативных методов определения характеристик тонкопленочных структур. Задачей данного обзора было выявление наиболее перспективной и актуальной методики характеристики тонкопленочных структур, применимой в широком спектре междисциплинарных исследований. Автором сделано заключение, что использование эллипсометрии для характеристики трехмерных наноструктур, включая наночастицы, квантовые точки, фуллерены и дендримеры, всегда связано с другой структурной или композиционной характеристикой, описанной на рисунке. В случае наноструктуры в более чем половине случаев эллипсометрия поддерживается методом микроскопии для визуализации их размера и пространственного распределения.

В этой же главе автором определено место спектральной эллипсометрии среди других аналитических методов исследования тонкопленочных структур с субнанометровым разрешением. В ходе литературного обзора и патентного поиска выявлено, что на данный момент существующие системы и приборы спектральной эллипсометрии, представленные на коммерческом рынке, имеют фундаментальные ограничения, что налагает жесткие требования на вибрационную устойчивость и необходимость сложной процедуры калибровки. Эллипсометры с фазовой модуляцией лишены этих недостатков, но высокие частоты и температурная зависимость поляризационной модуляции являются ограничивающими факторами. При исследовании теоретических возможностей повышения технико-экономических показателей проектируемых ИИС контроля толщин и оптических характеристик тонкопленочных структур методом спектральной эллипсометрии выявлена возможность замены традиционных ламповых блоков освещения на светодиодные источники излучения в спектральном диапазоне UV-VIS-NIR, что значительно улучшит отношение сигнал/шум и стабильность зондирующего излучения.

Предлагается решение научной задачи, которая заключается в разработке ИИС контроля оптических констант и толщин тонких пленок, реализующей модифицированный метод спектральной эллипсометрии со светодиодным широкодиапазонным источником излучения, обеспечивающей снижение погрешности и повышение воспроизводимости измерений эллипсометрических параметров с сопутствующим улучшением технико-экономических характеристик ИИС.

Глава четвертая посвящена разработке математического аппарата формализации эллипсометрических измерений и поляризации излучения.

Приведено описание математического аппарата, применяемого при построении эллипсометрических измерительных систем и сопутствующих поляризационных устройств. Рассмотрена модель распространения электромагнитной волны в пространстве. Сформулированы основные

положения формализма матриц Джонса и Мюллера. Относительно поляризационных элементов оптического тракта, таких как поляризатор, анализатор и компенсатор получены выражения, описывающие их взаимодействие с излучением. На основе данного формализма предполагается построение математической модели измерительного тракта спектрального эллипсометра с ограниченным числом состояний поляризации.

Пятая глава посвящена разработке модифицированного метода эллипсометрии с конечным числом состояний поляризации. При этом эллипсометрические методы можно разделить на две принципиально различные категории. В первой категории изменение поляризации зондирующего излучения происходит за счет изменения азимута поляризационных устройств во времени, и к этой категории относятся большинство современных коммерческих эллипсометрических установок, таких как эллипсометры с вращающимися поляризационными элементами и эллипсометры с фотоупругими модуляторами. Ранее были отмечены фундаментальные ограничения при определении эллипсометрических параметров, присущие данным методам построения спектральных эллипсометров. Во второй категории, так называемой статической эллипсометрии, эллипсометрические измерения проводятся с измерением интенсивности зондирующего излучения в конечном числе заданных азимутальных положений поляризационных устройств.

В разделе предложена математическая модель, описывающая процесс измерения степени поляризации зондирующего пучка при реализации модифицированного метода статической эллипсометрии. Решена задача формализация модели четырехзонных статических эллипсометрических измерений с целью определения статических архитектур эллипсометра, которые оптимизируют погрешность оценки эллипсометрических параметров при наличии двух основных источников шума, искажающих измерения: аддитивный гауссов шум и дробовый шум. В силу того, что представленные источники шума являются неустранимыми, то полученные результаты представляют собой фундаментальные пределы точности измерения эллипсометрических параметров при статических эллипсометрических измерениях. С целью обоснования рациональности использования данной модели, проведен ее оценочный анализ на устойчивость к аддитивному гауссовскому шуму и пуассоновскому шуму (дробовый шум). Применялся метод перемешанной комплексной эволюции (SCE), который устойчив к наличию локальных максимумов, когда необходимо оптимизировать несколько параметров.

В шестой главе автор разработал алгоритм расчета светодиодного плоского спектра, необходимого для сшивания конечного набора спектров светодиодов в широкодиапазонный спектр с заданной интенсивностью. Основная цель предлагаемого алгоритма для заданного количества светодиодов заключается в поиске весовых коэффициентов, которые умножают управляющие токи светодиода так, что суммарный выходной спектральный профиль представляет наилучшее возможное приближение к желаемому.

Предлагаемый алгоритм выгодно отличается от других методов формирования выходного спектрального профиля перестраиваемых светодиодных источников света, что обеспечивает эффективную теоретическую базу для практической реализации широкополосных светодиодных источников. Разработаны оригинальные поляризационные устройства, реализующие переключение ортогональных состояний поляризации и вносящие заданный сдвиг фаз, которые позволяют повысить устойчивость эллипсометрических измерений к внешним воздействиям, таким как вибрация и колебания температуры (воспроизводимость фазового сдвига Δ до 0.001°).

В главе семь представлены соответствующие разработанной ИИС функциональные требования, на основе которых подобраны основные компоненты, используемые в светодиодном спектральном эллипсометре. Сформулированы и проанализированы основные требования к параметрам и возможностям, представлена структурная схема системы контроля оптических констант и толщин тонких пленок, на которой в полной мере представлены все виды обеспечения, используемые в ИИС. Получена функциональная схема измерительного канала контроля оптических параметров и толщин тонких пленок при проведении экспериментальных исследований.

В главе восемь приведена методика экспериментальных исследований, а также результаты экспериментов, подтверждающих полученные теоретические характеристики светодиодного спектрального эллипсометра для контроля оптических констант и толщин тонких пленок. Проведены калибровочные измерения на кремниевой пластине Ocean Optics StepWafer Si-SiO₂. Отклонение измеренных толщин от паспортной величины не превышает 0,4 нм, что позволяет судить о суб-нанометровом разрешении измерений толщин тонких пленок. Среднеквадратичный шум на длине волны 600 нм и толщине окисла 450 нм составил $0,003^\circ$ (для Ψ) и $0,02^\circ$ (для Δ); на длине волны 1000 нм и толщине окисла 501 нм – $0,005^\circ$ (для Ψ) и $0,03^\circ$ (для Δ).

Новый подход, развиваемый в работе, существенно расширяет измерительные возможности чувствительных эллипсометров с переключением ортогональных состояний поляризации. Исключение низкочастотных модуляторов поляризации уменьшает потери интенсивности пучков, упрощает конструкцию СЭ и позволяет существенно увеличить скорость эллипсометрических измерений с использованием скоростных импульсных источников излучения. На выбранных длинах волн возможно определение пространственного распределения эллипсометрических параметров по площади исследуемых пластин, быстрое измерение изменения параметров жидких и газообразных потоков во времени, кинетические измерения в конфигурации pump/probe. Данный СЭ может быть использован для контроля ростовых процессов.

В разделе девять представлено библиография современной литературы, которая состоит из 122 источников, которые полностью коррелируются с тематикой проведенных в диссертации исследований.

Глава десять представлена как приложение к диссертации, здесь автор представил сертификат соответствия эталонной пластины.

5. Подробные комментарии.

Тезис, как и цель работы, были сформулированы корректно и достоверно, не вызывая никаких сомнений и недомолвок. Работа в согласованном порядке проводится согласно намеченной цели, что приводит к доказательству выдвинутого тезиса. Принятая методология доказательства логична, так как осуществляется от определения потребностей и требований через анализ, разработку методов и математических моделей до приложений в современных средствах моделирования.

Работа состоит из теоретических утверждений, моделирования и практических исследований.

На основании выполненного математического моделирования процесса четырехзонных статических эллипсометрических измерений проанализировано влияние неустранимых шумов на погрешность оценки эллипсометрических параметров в конечном числе заданных азимутальных положений поляризационных устройств измерительного тракта, что позволило определить фундаментальный предел точности статической схемы измерения. Отличительной особенностью представленной ИИС является использование в качестве широкополосного источника излучения спектрального эллипсометра набора светодиодов, обеспечивающего сплошной спектральный профиль в диапазоне UV-Vis-NIR с требуемым уровнем отношения сигнал/шум. Разработанные оригинальные поляризационные устройства позволяют повысить устойчивость ИИС к внешним воздействиям, таким как вибрация и колебания температуры, а теоретические изыскания подтверждены результатами эксплуатации лабораторного образца разработанной ИИС контроля оптических констант и толщин тонких пленок.

Экспериментальные исследования показали высокую сходимость с результатами моделирования. Это демонстрирует (подтверждает) выполнения 6-и поставленных во второй главе задач исследований.

Собственными достижениями автора считаю:

- Разработан модифицированный метод эллипсометрии с конечным числом состояний поляризации. При этом эллипсометрические методы предлагается разделить на две принципиально различные категории. В первой категории изменение поляризации зондирующего излучения происходит за счет изменения азимута поляризационных устройств во времени, и к этой категории относятся большинство современных коммерческих эллипсометрических установок, таких как эллипсометры с вращающимися поляризационными элементами и эллипсометры с фотоупругими модуляторами. Ранее были отмечены фундаментальные

ограничения при определении эллипсометрических параметров, присущие данным методам построения спектральных эллипсометров. Во второй категории, так называемой статической эллипсометрии, эллипсометрические измерения проводятся с измерением интенсивности зондирующего излучения в конечном числе заданных азимутальных положений поляризационных устройств.

- Предложена математическая модель, описывающая процесс измерения степени поляризации зондирующего пучка при реализации модифицированного метода статической эллипсометрии. Решена задача формализация модели четырехзонных статических эллипсометрических измерений с целью определения статических архитектур эллипсометра, которые оптимизируют погрешность оценки эллипсометрических параметров при наличии двух основных источников шума, искажающих измерения: аддитивный гауссов шум и дробовый шум.
- Разработал алгоритм расчета светодиодного плоского спектра, необходимого для сшивания конечного набора спектров светодиодов в широкодиапазонный спектр с заданной интенсивностью. Предлагаемый алгоритм выгодно отличается от других методов формирования выходного спектрального профиля перестраиваемых светодиодных источников света, что обеспечивает эффективную теоретическую базу для практической реализации широкополосных светодиодных источников. Разработаны оригинальные поляризационные устройства, реализующие переключение ортогональных состояний поляризации и вносящие заданный сдвиг фаз, которые позволяют повысить устойчивость эллипсометрических измерений к внешним воздействиям, таким как вибрация и колебания температуры (воспроизводимость фазового сдвига Δ до 0.001°).
- Сформулированы соответствующие разработанной ИИС функциональные требования, на основе которых подобраны основные компоненты, используемые в светодиодном спектральном эллипсометре.
- Представлена структурная схема системы контроля оптических констант и толщин тонких пленок, на которой в полной мере представлены все виды обеспечения, используемые в ИИС. Получена функциональная схема измерительного канала контроля оптических параметров и толщин тонких пленок при проведении экспериментальных исследований.
- Разработана методика экспериментальных исследований, а также результаты экспериментов, подтверждающих полученные теоретические характеристики светодиодного спектрального эллипсометра для контроля оптических констант и толщин тонких пленок. Проведены калибровочные измерения на кремниевой пластине Ocean Optics StepWafer Si-SiO₂.

К недостаткам работы, которые должен объяснить докторант, относятся:

- В цели работы диссертации заявлено, что она заключается в снижении погрешности и повышении воспроизводимости измерений толщин и оптических констант тонкопленочных структур в присутствии внешних воздействий, корректно было бы заявить значение погрешности, так как погрешность это есть величина.
- В работе отсутствуют общие выводы, которые бы позволили систематизировать полученные результаты, хотя по главам они представлены.
- В четвертом разделе автором утверждается, что сформулированы основные положения формализма матриц Джонса и Мюллера относительно поляризационных элементов оптического тракта, таких как поляризатор, анализатор и компенсатор получены выражения, описывающие их взаимодействие с излучением, однако эти положения общеизвестны.
- В пятом разделе при разработке информационно-измерительной системы контроля оптических констант и толщин тонких пленок было бы предпочтительно использовать структурно-параметрического синтез, который бы позволил бы нагляднее определить структуру объекта и значения параметров составляющих ее элементов, чтобы были удовлетворены условия задач на синтез разработки.
- По работе достаточно много стилистических неточностей.
- неудобство в составлении списка литературы.

Перечисленные недостатки не влияют на общее восприятие работы, которое я считаю положительным.

6. Резюме и заключение.

При ознакомлении с представленной на оценку докторской диссертацией констатирую, что:

- доказан тезис диссертации, изложенный во второй главе: разработан метод светодиодной эллипсометрии с переключением ортогональных состояний поляризации, который позволяет достичь высоких технических характеристик, таких как точность по воспроизводимости и чувствительность измерений оптических констант, в совокупности с возможностью существенно упростить конструкцию спектрального эллипсометра за счет исключения из оптической схемы подвижных поляризационных элементов.
- тематика работы актуальна и хорошо скомбинированы как теоретические знания, так и практические результаты;
- в диссертации указаны необходимость и перспективы будущих исследований, направлены на решение вопросов, связанных с развитием

технологий создания тонкопленочных структур имеют ключевое значение в процессе создания целого ряда продукции в секторе высокотехнологичного производства.

Из вышеизложенного следует, что докторант обладает компетенцией для самостоятельного проведения научных исследований и характеризуется значительными знаниями по научной дисциплине, на которую распространяются вопросы, освещаемые в диссертации.

На мой взгляд, докторант показал умение сформулировать задачу, решить ее самостоятельно и проверить ее полезность, подтвердив правильность принятой теории и инструментария для ее реализации. Намеченная работа была выполнена и тезис доказан.

- Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Vladimira Kovaleva pt.: *“Metoda elipsometrii spektralnej LED z przełączaniem ortogonalnych stanów polaryzacji”* spełnia ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim w odniesieniu do oryginalności problemu naukowego, umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wiedzy teoretycznej.

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. inż. Vladimira Kovaleva do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.



/recenzent/

prof. dr hab. inż. Sergii Pavlov