

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу

Катасонова Александра Олеговича
**ВИХРЕТОКОВЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ И ДЕФЕКТОВ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ПЛЕНОК**

представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность темы диссертационной работы

Вихретоковый метод является важным методом исследования металлических объектов. Он позволяет изучать массивные проводящие структуры, слоистые композитные материалы, металлические листы, а также тонкие металлические пленки. Использование тонких пленок в микроэлектронике, СВЧ-технике и оптике открывает новые возможности для создания приборов и технологий. Однако характеристики тонких пленок могут существенно отличаться от массивных материалов, поэтому необходимы новые методы для измерения их характеристик. Вихретоковый метод является одним из таких методов и обладает значительными преимуществами. Он позволяет производить точные измерения без контакта с объектом исследования, а также в условиях роста пленки, что обеспечивает более точный контроль процесса. Однако низкая частота электромагнитного поля, используемого при исследованиях, ограничивает применение этого метода для тонких пленок толщиной менее 1 мкм. Автоматизация процесса сканирования является еще одним аспектом развития вихретокового метода исследования материалов, позволяющим повысить скорость и точность исследований. Для дальнейшего развития этого метода необходимо создание программно-аппаратного комплекса, позволяющего изучать однородность и дефектность тонких металлических пленок. В связи с этим, диссертационная работа А.О. Катасонова, посвященная разработке миниатюрного вихретокового преобразователя, программно-аппаратного комплекса и методик определения геометрических размеров неоднородностей и дефектов тонких металлических пленок, представляется актуальной.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

1. В диссертационной работе сформулировано научное положение, согласно которому разработанный миниатюрный вихретоковый

преобразователь трансформаторного типа, разработанный на основе результатов моделирования распределения вихревых токов методом конечных элементов, позволяющий осуществлять локальное сканирование тонких металлических пленок и производить измерения размеров неоднородностей и дефектов типа нарушение сплошности имеющих площадь от 10 000 мкм². Достоверность сформулированного положения экспериментально подтверждается результатами лабораторных исследований модельных дефектов тонких пленок.

2. В соответствии со вторым научным положением экспериментально продемонстрировано, что разработанный программно-аппаратный комплекс, осуществляет сканирование тонких пленок в автоматическом режиме, с возможностью изменения амплитуды (от 10 до 500 мВ) и частоты (от 100 кГц до 25 МГц) тока возбуждения преобразователя в зависимости от электрической проводимости (от 14 до 57 МСм/м) и толщины (от 100 нм) пленок, представляя результаты измерений в 2D и 3D режимах с возможностью определения местоположения и измерения размеров неоднородностей и дефектов.

3. Третье научное положение сформулировано на основе экспериментальных результатов исследования скорости изменения амплитуды сигнала вихретокового преобразователя при приближении к границе пленки, согласно которым метод измерения размеров дефектов и неоднородностей тонкой металлической пленки позволяет по величине изменения производной сигнала снизить погрешность измерений размеров дефектов до 9 %.

4. В соответствии с четвертым научным положением, полученные результаты измерения размеров дефектов в пределах погрешности, определенной в третьем положении, соответствуют результатам метода оптической микроскопии и фотометрического метода.

Достоверность

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов подтверждается следующими факторами:

четко сформулированы задачи исследования, а также проведено теоретическое обоснование выбранных подходов и методов. При разработке программно-аппаратного комплекса использовались современные технологии и инструменты, что гарантирует надежность и точность полученных результатов. Использован системный и комплексный подход, который позволил учесть все необходимые аспекты и факторы, влияющие на исследуемые процессы. Проведены эксперименты с использованием различных методов и техник, что обеспечило получение достаточного объема

данных для анализа и обработки. Для обработки данных разработаны специальные программы, которые позволили провести анализ и получить нужные результаты с высокой точностью и достоверностью. Все полученные результаты были проверены на соответствие существующим физическим законам и теориям, что подтверждает их достоверность и надежность. Таким образом, все указанные факторы подтверждают достоверность представленных результатов в диссертационной работе.

Научная новизна работы

В диссертационной работе автором представлены результаты с существенной научной новизной. Среди них следует отметить следующие:

1. Предложена конструкция вихретокового преобразователя, обладающая характеристиками, позволяющими осуществлять локальное сканирование тонких металлических пленок. Этот преобразователь позволяет определить координаты границ пленок и производить измерения размеров дефектов и неоднородностей, имеющих площадь от 10 000 мкм².

2. Разработан программно-аппаратный комплекс, основанный на методе вихревых токов. Этот комплекс предназначен для экспериментального исследования неоднородностей и дефектов тонких металлических пленок, имеющих толщину от 100 нм и удельную электропроводность от 14 МСм/м.

3. Предложен метод измерения размеров дефектов и неоднородностей тонкой металлической пленки с погрешностью до 9% на основе данных о скорости изменения сигнала вихретокового преобразователя.

4. Установлен диапазон частот возбуждающего сигнала вихретокового преобразователя, равный 10-30 МГц. Этот диапазон позволяет проводить исследования дефектов структуры пленок, имеющих толщину от 100 нм.

Таким образом, представленные результаты демонстрируют значительный вклад автора в область исследования неоднородностей и дефектов тонких металлических пленок.

Практическая значимость работы

Разработанная конструкция сверхминиатюрного накладного дифференциального вихретокового преобразователя, позволяющая производить локальные исследования неоднородностей и дефектов тонких пленок и проводить дефектоскопию других металлических материалов, представляет существенный интерес для практического использования в перспективных разработках электронной компонентной базы. Разработанный программно-аппаратный комплекс, позволяющий осуществлять управление разработанным вихретоковым преобразователем и производить исследование

различных параметров электрическая тонких металлических пленок и других металлических материалов и визуализировать результаты исследования, представляет существенный интерес для разработки и совершенствования портативных автоматизированных вихретоковых измерительных комплексов.

Анализ содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Она изложена на 123 страницах, содержит 52 рисунка, 2 таблицы и список цитируемой литературы из 100 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи работы, приведены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, научные положения, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации результатов исследования, описан личный вклад автора.

В первой главе на основании обзора современного состояния и литературы в области неразрушающего исследования тонких металлических пленок был выделен ряд свойств, оказывающих влияние на характеристики тонкой металлической пленки. Приведен краткий обзор экспериментальных методов исследований тонких пленок с выделением преимуществ и недостатков каждого метода. Отражены факторы, ограничивающие применимость вихретокового метода для исследования тонких пленок.

Во второй главе приведены результаты моделирования распределения вихревых токов в тонкой металлической пленке, наводимых различными конструкциями вихретоковых преобразователей (ВТП). Рассмотрены основные принципы построения вихретоковых преобразователей, описана конструкция разработанного накладного трансформаторного миниатюрного вихретокового преобразователя для исследования дефектности тонких металлических пленок. Приведена структурная схема и описан алгоритм работы программно-аппаратного комплекса, приведены характеристики основных составляющих аппаратной части программно-аппаратного комплекса. Описан алгоритм работы программного обеспечения, управляющего работой программно-аппаратного комплекса и отвечающего за обработку и визуализацию результатов.

В третьей главе описаны экспериментальные исследования работы разработанного программно-аппаратного комплекса. Проанализирована работа измерительной системы с различной частотой возбуждающего сигнала. Показано что с ростом частоты возбуждающего сигнала качество получаемых результатов увеличивается, о чем свидетельствует значительное повышение соотношения сигнал/шум. Приведены результаты сканирования нескольких партий тонких медных пленок на стеклянных подложках. Определена

зависимость амплитуды сигнала ВТП от толщины пленки. Проведено сравнение результатов, получаемых разработанным программно-аппаратным комплексом с оптическим и фотометрическим методом. Описан метод определения границ и дефектов пленок по положению максимума скорости изменения амплитуды сигнала датчика. Показано что описанный метод позволяет значительно снизить погрешность измерения продольного размера дефектов тонких пленок.

В заключении диссертации представлены основные выводы, сформулированные на основании выполненных исследований.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертационная работа А.О. Катасонова выполнена на актуальную тему, содержит детальное описание разработанного вихретокового программно-аппаратного комплекса, хорошо проиллюстрирована и оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ. Материалы автореферата полностью отражают результаты, представленные в диссертационной работе. Основные результаты опубликованы в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК Минобрнауки РФ (7 журнальных статей). Всего по результатам работы подготовлено 39 печатных работ в российских и зарубежных рецензируемых научных журналах входящих в перечень, рекомендуемых ВАК, а также индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

В качестве замечаний по работе можно отметить следующее:

1. В первой главе диссертации, при обосновании необходимости применения развиваемого индукционного метода, приводится краткое описание других методов исследования тонких металлических пленок. При описании некоторых альтернативных (традиционных) методов, например, растровой электронной микроскопии (см. стр. 21 «...В этом методе электронный пучок высокой энергии (~1000 кэВ) фокусируется системой электромагнитных линз (электронная пушка) на поверхность образца, и когда электроны поглощаются, отражаются то появляются вторичные электроны, вероятность излучения которых зависит от рельефа поверхности и атомного номера образца....»), метода рентгеновской дифрактометрии (см. стр. 23 «В случае отклонений от идеальной модели кристалла с бесконечным периодом, рентгеновский максимум имеет ненулевую ширину при измерении реальных материалов....»), автором приводится некорректное значение энергии электронов, а также представлено несколько вольное описание физических процессов, используемых в этих методах, в то время как представляется более целесообразным проработка вопроса о возможности применения

традиционных способов для верификации результатов измерений, выполненных индукционным методом. В качестве недостатка рассмотрения альтернативных методов в Главе 1 можно отметить отсутствие упоминания о широко распространенной и доступной в настоящее время технологии локальной вырезки тонкой ламели в направлении перпендикулярном поверхности образца (без изготовления макроскопических шлифов) с помощью установки со сфокусированным ионным пучком (FIB), что позволяет напрямую измерить толщину пленки как с помощью растрового, так и с помощью просвечивающего электронных микроскопов, а также оценить степень ее однородности по толщине.

2. В диссертации присутствуют небрежности в оформлении текста и ошибки в нумерации рисунков. Так, например, отсутствует рисунок 3.5, на который дается ссылка на странице 78 пункта 3.2; далее следует рисунок 3.6, на который отсутствует ссылка в тексте.

3. В пункте 3.2 из текста не ясно, какая медная плёнка была использована для выбора оптимальной частоты сигнала. Если была использована «однородная пленка», то не понятно, почему оптимальной частотой возбуждающего сигнала была выбрана частота 25 МГц (см. рис. 3.6,д), а не 19 МГц (см. рис 3.6,г), поскольку визуализируемое изображение на рис.3.6,г более однородно, чем на рис.3.6,д. К тому же, из табл 3.1 следует, что на частоте 19 МГц наблюдается минимальная погрешность и достаточно высокое соотношение сигнал/шум. Обращает внимание тот факт, что на рисунках 3.6,г и 3.6,д использована различная шкала для уровня выходного сигнала (40 мВ и 50 мВ, соответственно), в то время как расцветка уровней сигнала равномерно распределена по двум разным шкалам. Это затрудняет сравнение рисунков и выявление степени однородности сигнала для различных частот по этим рисункам.

4. Отсутствует таблица 3.2, на которую даётся ссылка на странице 87.

5. Толщина пленок на рис 3.10-3.12 не указана.

Отмеченные замечания не влияют на общую высокую оценку качества выполненной работы.

Заключение

Диссертационная работа А.О. Катасонова выполнена на актуальную тему, является завершённым научным исследованием, содержит новые оригинальные научные результаты, представляющие существенный научный интерес и прикладное значение для развития вихретокового метода исследования, в том числе повышения локальности и точности при измерении размеров дефектов как тонких пленок, так и массивных объектов.

Считаю, что представленная диссертационная работа А.О. Катасонова «Вихретоковый метод исследования неоднородностей и дефектов тонких металлических пленок» соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Катасонов Александр Олегович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент

Дементьева Мария Михайловна

Кандидат физико-математических наук (01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики)

Федеральное государственное бюджетное учреждение
"Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт",
Группа рентгеноструктурного анализа и температурных измерений Отдела
аналитических методов исследования материалов и перспективных
технологий Отделения Реакторных Материалов и Технологий Курчатова
Комплекса НБИКС-природоподобных технологий
Научный сотрудник

123182, г. Москва, площадь Академика Курчатова, д.1

Тел. +7 (499) 196–95–39

Электронная почта: mdementewa@gmail.com

Подпись к.ф.-м.н. Дементьевой М.М. заверяю:

Главный Ученый секретарь

НИЦ «Курчатовский институт»

кандидат физико-математических наук



К.Е. Борисов