



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и  
инновационной деятельности  
ФГБОУ ВО  
«Тюменский индустриальный  
университет»,  
канд. \_\_\_\_\_

Тимнев Алексей Леонидович  
< 28 » ноября 2023 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации

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

Исследования в рамках диссертационной работы Катасонова  
Александра Олеговича сосредоточены на проблеме повышения разрешающей  
способности вихретоковых преобразователей и применения вихретокового  
метода для исследования тонких пленок. В качестве основных задач  
диссертационной работы автором обозначены разработка миниатюрного  
вихретокового преобразователя и программно-аппаратного комплекса для  
исследования неоднородностей и дефектов тонких пленок, а также разработка  
методики определения границ дефектов на основе анализа скорости изменения  
амплитуды сигнала преобразователя и сравнение результатов измерений  
разработанного метода с результатами оптической микроскопии и  
фотометрии. Актуальность этой работы обусловлена тем, что применение

вихретокового метода на различных этапах производства микроэлектроники может обеспечить улучшение качества и экономических показателей продукции.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертационная работа А.О. Катасонова состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 100 наименований и двух приложений.

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертации, поставлены цели и задачи исследования, отмечена научная новизна работы и её практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, а также отмечен вклад автора.

Первая глава диссертации посвящена анализу современного состояния и литературы в области неразрушающего исследования тонких металлических пленок. Выделены основные параметры, отвечающие за качество пленок, приведен сравнительный анализ основных методов применяемых для исследования пленок, описаны существующие вихретоковые измерительные устройства, применяемые для исследования тонких пленок.

Вторая глава диссертации посвящена разработке вихретокового преобразователя и программно-аппаратного комплекса для исследования тонких металлических пленок. Приведены результаты моделирования методом конечных элементов в пакете Elcut распределения вихревых токов наводимых накладным вихретоковым преобразователем в тонкой металлической пленке. Описана конструкция миниатюрного накладного дифференциального вихретокового преобразователя разработанного на основе результатов моделирования.

Представлена схема работы программно-аппаратного комплекса, а также алгоритм работы программного обеспечения, осуществляющего управление работой программно-аппаратного комплекса и производящего обработку и визуализацию результатов.

В третьей главе описываются результаты экспериментов с использованием разработанного программно-аппаратного комплекса.

Работа измерительной системы осуществлялась на различных частотах, результаты измерений демонстрируют, что рост частоты возбуждающего сигнала приводит к повышению качества получаемых результатов увеличивается. Для проверки получаемых результатов распределения неоднородностей пленок по поверхности с использованием вихретокового метода были проведены исследования светопропускания пленок (фотометрический метод). Результаты позволяют сделать вывод о высокой степени корреляции между амплитудой сигнала ВТП и коэффициентом ослабления лазерного излучения тонкой пленкой, который, в свою очередь, прямо пропорционален толщине пленки. Для определения способности разработанного программно-аппаратного комплекса к обнаружению дефектов типа нарушения сплошности на пленки были нанесены дефекты различных размеров. Анализ скорости изменения амплитуды сигнала, позволил снизить погрешность определения границ дефектов до 9%.

В заключении автор перечисляет достигнутые в работе результаты, которые затем обобщены в виде в четырех выводов. В приложении А приведена программа для Arduino Uno на языке processing для обмена данными между ПК и Arduino а также управления работой генератора. В приложении Б приведен текст программы на языке Python для управления системой и визуализации измерений.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Достоверность результатов исследования определяется следующими признаками:

- Корректность постановки задач, которые имеют понятную формулировку и органично дополняют друг друга.

- Физико-математическая модель распределения вихревых токов получена с применением программы Elcut, вычислительные алгоритмы которой проверены и отработаны. Кроме того, результаты моделирования находятся в согласии с экспериментальными данными.
- Для реализации программно-аппаратного комплекса использована современная элементная база и аппаратура.
- Достаточный объем экспериментальных данных, которые хорошо согласуются с результатами оптической микроскопии и фотометрии.
- Полученные результаты не противоречат современным представлениям о физике исследуемых процессов.

### **Научная значимость диссертации**

Научная значимость проведенного исследования связана, прежде всего с разработкой оригинального миниатюрного вихретокового преобразователя, позволяющего производить сканирование тонких металлических пленок, метода анализа дефектов пленок и его программно-аппаратной реализацией, обеспечивающей работу в режиме реального времени. Основой расчета в методе является анализ скорости изменения амплитуды сигнала преобразователя при его прохождении над пленкой. Отдельно заслуживает внимания проведенная с использованием фотометрического метода верификация полученных результатов, показавшая высокое соответствие результатов, полученных с использованием двух методов.

### **Практическая значимость результатов диссертационной работы**

Разработанный и апробированный программно-аппаратный комплекс, основанный на методе вихревых токов, позволяет выполнять контроль металлических пленок толщиной от 100 нанометров. Это решение позволит осуществлять малозатратный контроль качества металлических пленок. В особенности это может дать ощутимый эффект при использовании в крупносерийном или массовом производстве.

Автоматизированные измерения позволяют накапливать достаточно большую выборку данных, статистическая обработка которой позволяет судить о показателях качества. В параграфе 3.3 показан пример использования этой информации для определения однородности тонких пленок. Однако характер функции распределения толщины пленки является не только отражением этих показателей, но и результатом использованных материалов, оборудования и режимов изготовления. Другими словами, результаты работы могут быть использованы как инструмент управления качеством изготовления тонких металлических пленок.

### **Апробация работы**

Основные положения, результаты и научная новизна диссертационной работы были обсуждены и одобрены на 12 конференциях российского и международного уровней.

По теме диссертационного исследования опубликованы 39 статей, 3 патента РФ в которых нашли отражение теоретические принципы и результаты работы.

Результаты работы апробировались и использовались при выполнении фундаментальных работ по грантам РФФИ № 17-48-220044, № 18-38-00272 и № 20-38-90062.

### **По диссертационной работе имеются следующие замечания**

1. В параграфе 2.1 приведены результаты моделирования вихревых токов программой численного моделирования Elcut. Приведенная геометрия модели является плоской, тогда как далее основываясь на результаты моделирования предлагается вихретоковый осесимметричный преобразователь. Здесь было бы разумно обосновать некоторые критерии сопоставления результатов моделирования плоской задачи и осесимметричной.

2. При сопоставлении поставленных задач и выводов в заключении наблюдается их нечеткое согласование: первая задача не имеет сформулированного ответа на нее, хотя сомнений что она достигнута нет; ответы на четвертую и пятую задачи сформулированы внутри третьего вывода; четвертый вывод на наш взгляд является частичным ответом на вторую задачу, то есть дополняет первый вывод.

3. К сожалению, не рассмотрен такой параметр как фаза сигнала. Сигнал измерительной и компенсационной катушек имеют одинаковую фазу в отсутствии объекта контроля. При его наличии вихревые токи сдвинут фазу сигнала измерительной катушки. Тогда разностный сигнал будет являться результатом не только изменения амплитуды, но и фазы на измерительной катушке. Одновременная регистрация фазы может увеличить чувствительность контроля и снизить помехи.

Отмеченные замечания не снижают актуальности темы исследования и не являются определяющими при оценке научных положений и выводов диссертационной работы.

### **Соответствие диссертации научной специальности**

Результаты диссертационной работы по своему содержанию и выводам соответствуют специальности 1.3.2 « Приборы и методы экспериментальной физики», в части пункта 1. – «Изучение физических явлений и процессов, которые могут быть использованы для создания принципиально новых приборов и методов экспериментальной физики»; пункта 3 – «Разработка и создание научной аппаратуры и приборов для экспериментальных исследований в различных областях физики»; пункта 6 – «Разработка и создание средств автоматизации физического эксперимента».

В работе теоретически описано распределение вихревых токов и их вклад в сигнал измерительной катушки, на основании чего разработан вихретоковый преобразователь, работоспособность которого подтверждена экспериментально (пункт 1); разработан и апробирован программно-

аппаратный комплекс реализующий метод вихревых токов, позволяющий контролировать тонкие металлические пленки толщиной от 100 нанометров (пункты 3 и 6).

### **Общая оценка диссертационной работы**

Кандидатская диссертация Катасонова Александра Олеговича является выполненным на высоком научном уровне завершенным научным исследованием, посвященным разработке нового вихретокового метода определения неоднородностей и дефектов тонких металлических пленок, а также его приборной реализации.

Работа написана ясным и понятным языком, тщательно отредактирована. Результаты исследований проиллюстрированы графиками и таблицами в достаточном количестве. Оформление работы соответствует стандартам ВАК Министерства науки и высшего образования РФ. Подходы и методы исследования понятны, апробированы

Список литературных источников охватывает актуальные исследования по рассматриваемой тематике и свидетельствует о достаточно глубокой проработке диссертантом состояния вопроса, лежащего в основе темы его исследований. Публикации отражают суть выполненных исследований, а также полученные результаты. Результаты диссертационной работы соответствуют поставленным целям и задачам, имеют высокую научную и практическую значимость.

Автореферат диссертации отражает содержание работы. Уровень актуальности, научной новизны, практической значимости, достоверности и обоснованности защищаемых положений диссертационной работы соответствует требованиям п. 9 положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Автор работы Катасонов Александр Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертационная работа, автореферат и отзыв рассмотрены и обсуждены на расширенном заседании кафедры «Физика и приборостроение» ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» (протокол № 1 от «13» октября 2023 г.)

Присутствовало на заседании: всего - 10 человек. Результаты голосования: «за» – 10 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.

Исполняющий обязанности заведующего кафедрой физики и приборостроения ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», канд. физ.-мат. наук, доцент.

Третьяков  
Петр  
Юрьевич

Доцент кафедры физики и приборостроения ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», канд. техн. наук, доцент.

Муратов  
Камиль  
Рахимчанович





Организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет»

Почтовый адрес: 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38

Тел.: 8(3452)28-36-70

Факс: 8(3452)28-36-60

E-mail: [general@tyuiu.ru](mailto:general@tyuiu.ru)

Веб-сайт: <https://www.tyuiu.ru/>

### **Третьяков Петр Юрьевич**

Исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Физика и приборостроение» ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», кандидат физико-математических наук, доцент.

Адрес: 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38

тел.: 8-922-261-05-65

E-mail: [tretjakovpj@tyuiu.ru](mailto:tretjakovpj@tyuiu.ru)

Согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку

  
П.Ю. Третьяков

### **Муратов Камиль Рахимчанович**

Доцент кафедры физики и приборостроения ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», кандидат технических наук, доцент.

Адрес: 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38

тел.: 8-904-461-19-01

E-mail: [muratovkr@tyuiu.ru](mailto:muratovkr@tyuiu.ru)

Согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку

  
К.Р. Муратов