

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук

Рудинского Александра Вадимовича

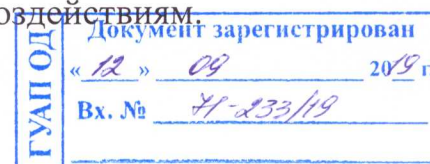
на диссертационную работу Казакова Василия Ивановича

«Система оптического спектрального контроля с высокопорядковой дифракционной решеткой», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

Бурное развитие промышленности и внедрение высокотехнологичных видов производства, а также автоматизация процессов на таких производствах требует разработки соответствующих методов и приборов их контроля. Приборы контроля, в свою очередь, должны обладать как высокой надежностью и достоверностью, так и высокой информативностью. Особо следует отметить важность методов оптического вида контроля, которые находят широкое применение не только в промышленности, но и в самых различных областях науки, поскольку получаемая с помощью прибора спектроскопическая информация позволяет судить о многих деталях протекающего процесса. Речь идет, например, о спектральных линиях металлов и легирующих добавок в спектре расплава, по наличию и интенсивности которых можно судить о качестве выплавляемого металла. Методы контроля, основанные на анализе оптических спектров, находят также применение в двигателестроении, ракетной отрасли, теплоэнергетике при контроле процессов горения и т.д.

Для всех отмеченных процессов важно иметь информацию о спектре, излучаемым или поглощаемым объектом, в широком диапазоне длин волн с высоким спектральным разрешением.

Следует отметить, что многие технологические процессы протекают в условиях критически высоких температур, при экстремальных механических нагрузках и вибрациях. Это усложняет техническую реализацию приборов контроля, которые должны быть устойчивы к таким воздействиям.



Для приборов контроля, построенных на базе оптического спектрального прибора, одним из возможных решений отмеченной проблемы является использование оптического волокна для передачи оптического излучения на безопасное для прибора контроля расстояние. Таким образом, отпадает необходимость разработки специальной защиты для прибора контроля, а расположение прибора вне зоны действия экстремальных условий благоприятно влияет на качество получаемой с помощью прибора контроля информации. С другой стороны, передача оптического излучения по волокну будет ухудшать спектральное разрешение прибора, а также приводить к потере его чувствительности.

Отмеченные выше проблемные аспекты контроля процессов оптическим спектральным методом делают актуальной диссертационную работу Казакова В.И., которая посвящена разработке системы оптического спектрального контроля на базе прибора с дифракционной решеткой.

Автор формулирует цель работы как «повышение разрешающей способности бесконтактного оптического спектрального метода контроля за счет измерения спектров в высоких дифракционных порядках», что является важной и актуальной задачей не только для приборов контроля оптическим спектральным методом, но и для всех спектральных приборов с дифракционными решетками.

В первом разделе диссертации рассмотрены принципы и выполнена классификация методов оптической спектроскопии. Приводится обзор некоторых областей применения оптической спектроскопии в задачах контроля и делается вывод о необходимости разработки спектрального прибора с высоким спектральным разрешением для каждой из рассмотренных задач контроля. Заканчивается первый раздел обзором оптических спектральных приборов и их сопоставлением по метрологическим характеристикам. Это сопоставление позволяет Казакову В.И. сделать вывод, что наиболее подходящим для целей контроля является спектральный прибор с дифракционной решеткой. Однако, успешному применению дифракционных решеточных спектральных

приборов препятствует невозможность выполнять анализ спектра в высоких дифракционных порядках, где следует ожидать гораздо лучшего разрешения. Это ограничение проявляется в том, что интенсивность дифрагированного света в высокие дифракционные порядки заметно падает с возрастанием номера дифракционного порядка.

Решение задачи повышения интенсивности дифрагированного света в высшие порядки автор излагает во втором разделе, который начинается с критики современного состояния теории спектральных измерений вообще, и в оптическом диапазоне в частности. Автор предлагает отказаться от принципов геометрической оптики при описании принципа получения энергетического спектра оптического сигнала решеточным спектральным прибором вследствие их несостоятельности для этой задачи, а вместо этого использовать радиооптический подход, методы теории линейных систем и системного анализа.

В работе предлагается рассмотреть последовательное преобразование оптического сигнала каждым элементом прибора. При этом сам прибор разделяется на линейную (анализирующую) и нелинейную (регистрирующую) подсистемы. Это позволяет получить Казакову В.И. вначале комплексную, а, затем, энергетическую аппаратные функции прибора, которые являются исчерпывающими характеристиками системы и устанавливают связь вход-выход спектрального прибора. Таким образом, Казаковым В.И. в строгой математической форме получено основное соотношение теории спектральных измерений, которое устанавливает связь между истинным распределением энергии по спектру и спектральным распределением, регистрируемым с помощью дифракционного решеточного спектрального прибора.

Разработанная математическая модель открыла возможность Казакову В.И. установить важные свойства формируемых оптических спектров в различных дифракционных порядках. Главным образом, получено математическое соотношение, которое показывает кратное улучшение спектрального разрешения прибора пропорционально номеру

дифракционного порядка, а также изменение разрешающей способности прибора в пределах одного порядка.

Следует особо отметить оригинальность математических выкладок, связанных с получением функции пропускания дифракционной решетки в виде разложения в комплексный ряд Фурье. Автором подробно показано получение коэффициентов разложения для всего размера апертуры решетки, а не одного периода, как это представлено в других известных источниках.

Завершается второй раздел рассмотрением процедуры считывания оптического спектра с помощью ПЗС-линейки. Автор рассматривает попиксельное считывание спектра как операцию пространственной частотной фильтрации, что приводит его к получению энергетического спектра в форме отсчетных значений.

Третий раздел диссертации посвящен теоретическому и экспериментальному исследованию влияния передачи оптического сигнала по волокну на результат спектральных измерений. Теоретические исследования выполнены для системы с одномодовым волокном, где рассмотрен процесс преобразования системой формирующей оптики волнового пучка от торца волокна до входной апертуры спектрального прибора. Приводятся результаты эксперимента по исследованию уширения аппаратной функции прибора при передаче оптического сигнала по одномодовой волоконно-оптической системе. Кроме того, автор делает попытку установить энергетические потери при выводе излучения из волокна как путем компьютерного моделирования, так и экспериментальным способом.

Четвертый раздел посвящен разработке лабораторного макета системы оптического спектрального контроля с высокопорядковой решеткой. Здесь автор использует полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований из второго и третьего разделов и предлагает новую топологию расположения штрихов решетки в виде пространственной модуляции ширины прозрачных и непрозрачных полос. На спектральный прибор с такой решеткой автором получен Патент на

полезную модель. Далее приводится описание лабораторного макета разработанной системы оптического спектрального контроля, а также результаты экспериментальных исследований по измерению спектров тестовых источников. Эти результаты показывают обнадеживающие результаты, которые говорят о том, что введение пространственной модуляции расположения штрихов позволяет получить перераспределение интенсивности света между дифракционными порядками.

Таким образом, решая последовательно ряд задач для достижения поставленной цели, автор получил ряд новых научно-технических результатов, наиболее важными из которых являются:

1. Предложена новая математическая модель процесса спектрального преобразования, реализованного в дифракционном решеточном спектральном приборе, путем последовательного рассмотрения преобразования оптического излучения от входной апертуры до чувствительной поверхности ПЗС-линейки, применения радиооптических аналогий к оптическим элементам и рассмотрении прибора как линейной системы на основе системного подхода. Это позволило автору установить важнейшие свойства спектров в различных дифракционных порядках и способ повышения разрешающей способности прибора путем изменения функции пропускания дифракционной решетки.

2. Предложена новая топология в виде пространственной модуляции штрихов дифракционной решетки, что позволило повысить разрешающую способность прибора.

3. Разработана математическая модель распространения излучения в оптической системе вывода излучения из волокна, предложена методика расчета параметров оптических элементов этой системы и проведены экспериментальные исследования, позволяющие оценить уширение аппаратной функции дифракционного решеточного спектрального прибора и минимизировать энергетические потери при передаче сигнала по волокну.

4. Процедура считывания спектрометрической информации с помощью ПЗС-линейки рассмотрена как операция частотной пространственной

фильтрации каждым элементом (пикселем) с дальнейшим квадратичным детектированием и временным интегрированием, что позволило установить результат считывания в форме отсчетных значений энергетического спектра.

5. Предложен алгоритм коррекции результатов детектирования оптического спектра, учитывающий нелинейную связь пространственной и частотной шкалы и неравномерность спектральной чувствительности ПЗС-линейки.

Результаты работы автора широко апробированы как на международных, так и на всероссийских конференциях и симпозиумах. По материалам выполненного исследования у автора имеется 25 опубликованных работ, в том числе 3 статьи в журналах из перечня ВАК и получен 1 Патент РФ на полезную модель.

Несмотря на ценность полученных научных результатов, считаю необходимым сделать некоторые замечания по диссертационной работе:

1. В четвертом разделе, где раскрывается разработка топологии высокопорядковой дифракционной решетки, автор не показывает, как именно он пришел именно к такому результату и почему были взяты именно такие соотношения между шириной прозрачных и непрозрачных штрихов и их чередование в пределах одного периода. К тому же, автор делает оговорку, что предложенная топология не является наилучшей и поэтому требует дальнейшей доработки. Считаю, что этому аспекту следовало бы уделить больше внимания и подробнее раскрыть идею формирования топологии высокопорядковой дифракционной решетки.

2. Результаты компьютерного моделирования энергетических потерь в системе формирующей оптики, показанные на рисунках 37, 38 приведены в виде семейства кривых, поскольку введенная им функция энергетических потерь является функцией трех переменных: длины волны, диаметра линзы и фокусного расстояния линзы. Считаю, что автору следовало бы использовать возможности современных средств компьютерного моделирования и представить эти зависимости в виде двумерного графика для большей наглядности и удобства.

3. Неудачное обозначение аппаратной функции разными буквами. Сначала для обозначения аппаратной функции вводится буква *K*, но затем в выражении 24 (стр. 66) аппаратная функция обозначена буквой *A*, и после этого снова автор возвращается к первоначальному обозначению. Это, несомненно, затрудняет восприятие работы.

Отмеченные недостатки, тем не менее, не снижают ценности полученных в диссертационной работе результатов, а сама работа представляет собой последовательное и законченное исследование по разработке системы контроля с улучшенным спектральным разрешением.

Работа хорошо структурирована, написана грамотным техническим языком и оформлена в соответствии с требованиями ГОСТа к оформлению диссертационных работ.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Казакова В.И. на тему «Система оптического спектрального контроля с высокопорядковой дифракционной решеткой» соответствует специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». Автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по искомой специальности.

Официальный оппонент

д.т.н.

А.В. Рудинский

10.09.2019

*Подпись Рудинского А.В. подтверждена
специалистом по кадрам
ЗАО «НПФ «Аквамарин» Гит. М.В. Антонова*

