На правах рукописи

Белаш Александр Олегович

РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА КОНЦЕНТРАЦИЙ ПРИМЕСЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ МЕТОДОМ СТАТИЧЕСКОЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ

Специальность: 05.27.06 - технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт–Петербург – 2012 г.

Работа выполнена на кафедре прикладной физики и оптики твердого тела Санкт-Петербургского государственного университета

Научный руководитель: Бочарова Татьяна Викторовна
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Мошников Вячеслав Алексеевич,
доктор физико-математических наук, профессор, ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова»

Мусихин Сергей Федорович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Ведущая организация: ГОУ «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»

Защита состоится **30 мая 2012** в **16** часов **00** минут в аудитории **51 Химического корпуса** на заседании диссертационного совета Д.212.229.02 в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, по адресу: г. Санкт - Петербург, 195251, ул. Политехническая, д.29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Санкт-Петербургского государственного политехнического университета по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29.
Отзывы в одном экземпляре, заверенные печатью, просим направлять в адрес ученого совета института.

Автореферат разослан « »_____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор Бочарова Т.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Повышение разрешающей способности аналитических приборов и технологических средств измерения для экспресс-анализа в связи с развитием современной микро- и наноэлектроники и стремлением достичь большей миниатюризации элементной базы, делает необходимым дальнейшее уменьшение элементов фотоники и элементов конструкции. Основные требования, предъявляемые к системам - уменьшение габаритов, увеличение быстродействия (время проведения измерений не более 15 секунд), увеличение разрешения (8, 16 и 32 см$^{-1}$ в зависимости от решаемых задач) и увеличение чувствительности, что позволяет проводить измерения объектов с оптической плотностью более трех ($D > 3$). В то же время прибор должен отличаться простотой в управлении и низкой стоимостью.

Практически все фурье-спектрометры являются спектрометрами динамического типа, т.е. в системе присутствует один или несколько подвижных элементов. Соответственно такие приборы требуют сложных механизмов и алгоритмов стабилизации скорости движения оптических элементов.

Однако с развитием многоэлементных систем регистрации изображения (ПЗС матрицы и диодные линейки) достаточно высокого разрешения появилась возможность реализовать статический фурье-спектрометр, в котором происходит не временная развертка интерферограммы, а ее пространственное двумерное представление. Таким образом, за короткий промежуток времени регистрируется сразу ряд интерферограмм, что сокращает общее время измерения. Кроме того, применяя различные режимы работы ПЗС матрицы, значительно расширяется динамический диапазон (появляется дополнительная возможность работы с образцами различной оптической плотностью без применения эталона).

Основным ограничением создания промышленного образца на основе статического фурье-спектрометра является необходимость работы либо с то-

чечными источниками излучения (что уменьшает светосилу прибора), либо только с протяженными. Однако реальные источники излучения и объекты измерения в большинстве случаев являются протяженными и работа с ними довольно затруднительна. Применение подобных спектрометров ограничивается работой с оптоволоконными системами и получением спектральной информации от прозрачных объектов.

Совмещая разработку оптической схемы статического фурье-спектрометра, развитие новых методов обработки интерферограмм и оптимизацию программного обеспечения, можно устранить как ограничения при работе с разнообразными источниками, так и решить проблему виброзащищенности. Все вышеуказанное свидетельствует о том, что тема работы является **актуальной**.

Цель диссертационной работы

Целью работы является разработка нового аппаратно-программного комплекса и методики, позволяющих реализовать возможности фурье-спектроскопии в инфракрасной области (ближнего и среднего диапазонов)**.**

Задачи диссертационной работы

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**:

1) Рассчитать оптическую схему статического фурье-спектрометра, позволяющую работать с протяженными диффузно-рассеивающими объектами в двух спектральных диапазонах: 1.2 ÷ 20 мкм и 0.7 ÷ 1.1 мкм.
2) Разработать оптико-механическую конструкцию статического фурье-спектрометра.
3) Разработать методы и алгоритмы предварительной обработки интерферограмм и их преобразование в спектр.
4) На основе полученных результатов реализовать в едином схемном решении рамановский фурье-спектрометр для спектрального диапазона 0.7 ÷ 1.1 мкм и разрешением не хуже 8 см$^{-1}$.

Методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы анализа, расчета и обработки данных для оптических схем интерференционных узлов и высокоразрешающих объективов. Расчеты и обработка результатов проводились на ЭВМ с использованием программных пакетов Matlab и Zemax.

Научная новизна

1) Предложена оригинальная светосильная оптическая схема статического фурье-спектрометра, позволяющая работать не только с точечными источниками, но и с протяженными диффузно-рассеивающими объектами.
2) Рассчитана оптическая схема статического фурье-спектрометра для двух возможных вариантов работы: в ближней (0.7 ÷ 1.1 мкм) и средней (1.2 ÷ 20 мкм) инфракрасной областях.
3) На основании расчетных и экспериментальных данных показана возможность создания статического фурье-спектрометра с разрешением 6 см$^{-1}$ по сравнению с разрешением подобных приборов других производителей (например, компания «Arcoptic» представляет неразъюстируемые статические фурье-спектрометры с разрешением лучше 10 см$^{-1}$).
4) Статический фурье-спектрометр позволяет измерять объекты на пропускание с оптической плотностью D = 4 ÷ 5,в то время как у других эта величина ограничена значением D = 3. Это указывает на высокую чувствительность разработанного прибора.
5) На основе разработанной оптической схемы создан рамановский фурье-спектрометр с разрешением 8 см$^{-1}$. Необходимо отметить, что большинство малогабаритных рамановских спектрометров промышленного образца относятся к приборам дифракционного типа, а значит, обладают гораздо меньшей светосилой. Предлагаемый вариант рамановского спектрометра обладает в 5 раз

большей светосилой, чем его ближайшие аналоги, следовательно, такой спектрометр обладает большей чувствительностью.

6) Полученное значение сигнал-шум в ближней инфракрасной области составляет 15000:1, при этом время регистрации оставляет 10 секунд. У других приборов подобного класса параметр сигнал шум находится в пределах от 20000:1 до 80000:1, однако эти значения получены при регистрации спектров за время более 2 минут.

Все вышеизложенное позволяет разработанному аппаратно-программного комплексу на основе статического интерференционного узла иметь такие же параметры, как и фурье-спектрометры динамического типа, что позволяет им быть конкурентноспособными на рынке аналитических приборов.

Положения, выносимые на защиту

1) Расчетно-теоретические модели, описывающие принцип работы статического фурье-спектрометра, обосновывают его использования в инфракрасной области (среднего и ближнего диапазонов).
2) Разработанная оптическая схема позволяет работать не только с точечными источниками излучения, но и с протяженными диффузно-рассеивающими объектами.
3) Методика и оптическая схема статического фурье-спектрометра позволяет осуществлять измерение параметров полупроводниковых материалов.
4) Разработанный прибор на основе статического фурье-спектрометра обладает высокой скоростью измерения – время регистрации не более 10 с, высокой чувствительностью ~ 10 мкВт, и максимальным разрешением ~ 6 см$^{-1}$.
5) На основе предложенной оптической схеме разработан рамановский фурье-спектрометр с разрешением не хуже 8 см$^{-1}$.

Научная и практическая значимость

Основные результаты работы способствуют развитию отечественного приборостроения, соответствующего современным тенденциям мирового стандарта.

1. Решена проблема влияния геометрических размеров и однородности (диффузное-рассеивание) полихроматических источников излучения на характеристики интерференционной картины (контраст, спектральное разрешение, параметр сигнал-шум и др.).
2. Предложена оптическая схема статического фурье-спектрометра с максимальным разрешением 6 см$^{-1}$ и возможностью работы с протяженными диффузно-рассеивающими источниками.
3. Результаты работы позволяют создавать малогабаритные, виброзащищенные аналитические приборы для экологического контроля окружающей среды, химической, сельскохозяйственной продукции и измерения концентраций примесей в полупроводниковых материалах. Подобные приборы легко встраиваются в системы контроля реального времени на промышленных предприятиях.
4. На основе разработанной оптической схемы, создан и опробован рамановский фурье-спектрометр для инфракрасной области спектра 0.7 ÷ 1.1 мкм. Данный вид прибора необходим для проведения научных исследований и получения данных при исследовании наноразмерных структур.
5. Разработанные в диссертации инженерно-технические решения, алгоритмы и методы эксперимента использованы при внедрении в серийное производство прибора для рутинного анализа веществ в инфракрасной области спектра (0.7 ÷ 1.1 мкм). Данный прибор разработан в ходе опытно-конструкторской разработки в фирме аналитического приборостроения ООО «Люмэкс» (Россия).

Апробация диссертационной работы.

Основные результаты работы докладывались: 14th International Workshop on New approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations (NTDS-2011); X Всероссийском форуме «Русские инновации» как «Универсальный БИК анализатор СФ для количественного и качественного анализа зерна и сельскохозяйственных культур» (совместно с группой разработки ИК фурье-спектрометров НПФ «Люмэкс»).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 научных работ, из них 3 патента , 1 статья (в изданиях, рекомендованных ВАК),
1 публикация в материалах научно-технической конференции.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 196 наименований. Основной текст содержит 173 страницы машинописного текста, 67 рисунков и 6 таблиц.

Вклад автора в разработку проблемы

Основные научные положения, теоретические выводы, математические модели, практические рекомендации и расчеты в диссертации разработаны автором самостоятельно.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов и обоснованность научных выводов работы обусловлена всесторонним изучением особенностей работы спектрометров статического типа, а также методов обработки интерферограмм и изображений. На созданном прототипе статического фурье-спектрометра был получен и обработан большой объем экспериментальных данных. Спектральные данные, полученные в результате обработки интерферограмм, зарегистрированных на статическом фурье-спектрометре, сравнивались с результатами динамического ИК спектрометра «ИнфраЛЮМ ФТ-10» (производство НПФ «Люмэкс», Россия), внесенного в государственный реестр средств измерений. Данные спектров совпадали по разрешению с точностью до 5%. Сравнение спектров от модельных источников (ртутная лампа ДРГС-12, He-Ne

лазер, полосовой интерференционный фильтр) по количеству пиков и их положению на шкале длин волн на двух типах приборов показало их полную идентичность.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическую значимость полученных результатов диссертационной работы.

В первой главе обобщены литературные данные о различных модификациях оптических схем интерференционных узлов, предлагаемых для построения статического фурье-спектрометра. На основе систематизированных данных можно выделить три основные конфигурации интерференционных узлов: 1) на основе интерферометра Саньяка; 2) на основе интерферометра Майкельсона; 3) на основе «голографического» интерферометра. Сравнительный анализ указанных групп (Таблица 1) позволил сформулировать основные тактико-технические требования к разрабатываемому статическому фурье-спектрометру.

Таблица 1

Ключевые параметры фурье-спектрометра	Фурье-спектрометр на основе интерферометра Саньяка	Фурье-спектрометр на основе интерферометра Майкельсона	Фурье-спектрометр на основе «голографического» интерферометра	Разрабатываемый фурье-спектрометр
Разрешение, $см^{-1}$	16 или 32	8 или 16	8	6
Максимальное число полос на интерференционной картине при длине волны 0.6328 мкм	250	200	350	350

Размеры интерференционного узла, мм	35x35	35x35	35x35	10x30
Число пикселей в строке ПЗС матрицы	4096	4096	4096	4096

Рассмотрены особенности работы многоэлементных фотоприемных устройств (ФПУ) при различных режимах работы. Особенно выделен, так называемый, режим работы line-binning. В этом режиме происходит аппаратное суммирование всех строк, что позволяет увеличить полезный сигнал в ~N раз, где N – количество строк ФПУ. Такой режим работы ФПУ особенно эффективен при сильном ослаблении светового потока (до 0.001Лк).

С практической точки зрения режим line-binning позволяет снизить время регистрации интерферограмм в (N-1) раз, что существенно уменьшает общее время проведения измерений.

Рассмотренные литературные данные позволили детализировать задачи разработки статического фурье-спектрометра и наметить пути их решения. Одной из задач является разработка оптической схемы интерференционного узла.

Во второй главе приводятся методики обработки экспериментальных исследований.

Проведены исследования влияния ограниченного числа экспериментальных точек интерферограммы на конечный результат в виде спектра. Для статического фурье-спектрометра этот вопрос особенно актуален, так как число рабочих точек интерферограммы определяется числом пикселей многоэлементного ФПУ. Расчеты показали, что минимальное количество точек в интерферограмме при разрешении порядка 8 см$^{-1}$ должно составлять не менее 2^{12}. Разрешение спектрометра определяется соотношением $\delta\lambda = \frac{2\lambda^2}{N\lambda_{min}}$, где $\delta\lambda -$ спектральное разрешение, $\lambda -$ длина волны, для которой определяется разрешение, N – количество

пикселей ПЗС матрицы, λ_{min} – нижняя граница рабочего спектрального диапазона.

Предложен и обоснован способ регистрации несимметричной интерферограммы с последующим «достраиванием» до симметричной. Данный алгоритм позволяет увеличить количество обрабатываемых точек интерферограммы в два раза без внесения искажений и артефактов в спектр.

Для исключения появления дополнительных пиков на спектре, проанализирован фактор «дополнения» интерферограммы нулями перед дискретным преобразованием фурье (ДПФ). Данный алгоритм заключается в добавлении некоторого количества точек нулевой интенсивности к интерферограмме, что увеличивает число точек на единицу волнового числа. Дополнение нулями эквивалентно интерполяции спектра и снижает ошибки преобразования. Показано, что увеличение количества точек за счет дополнения нулями должно составлять не более 4N, где N- количество пикселей в строке многоэлементного ФПУ.

Проведен анализ влияния функции аподизации на параметры спектра. Подобраны функции аподизаций, позволяющие получить наилучшие параметры спектра (полуширина пиков, разрешение и соотношение сигнал-шум).

Рассмотрены основные достоинства и недостатки быстрого (БПФ) и обычного преобразования фурье для случая ограниченного набора (512÷4098 пикселей) точек в заданном спектральном диапазоне. Показано, что для фурье-спектрометров с малым количеством точек обработки, для достижения разрешения 8 $см^{-1}$ БПФ не является оптимальным, в силу того, что массив обрабатываемых данных должен быть 2^n, т.е. быть равным 512, 1024, 2048 и т.д.

Исследовано влияние среднего уровня интерферограммы на качество конечного спектра. Эксперименты показали, что для разработанной оптической схемы средний уровень нелинеен и описывается уравнением 5-го порядка. Предложена методика позволяющая исключить такой нелинейный уровень, в основу которой положен метод решения систем линейных уравнений с помощью модифицированного метода Жордана-Гаусса. Для работы с

монохроматическими источниками рассмотрены различные методы восстановления формы интерферограм на этапе их предварительной обработке применительно к работе статического фурье-спектрометра.

В третьей главе обоснован выбор типа интерферометра для разрабатываемого статического фурье-спектрометра, приведены результаты расчета оптической схемы, позволяющей работать с диффузно-рассеивающими источниками излучения различной геометрической конфигурации.

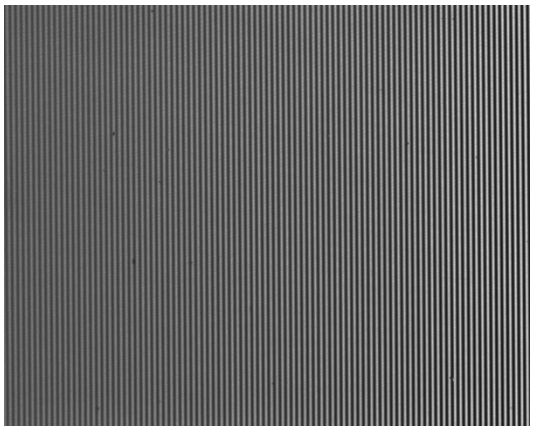

Рис. 1. Фотография интерференционной картины, получаемой от He-Ne лазера.

В основу оптической схемы положена модификация интерферометра Майкельсона, позволяющая получать полосы равной толщины.

На рис. 1 показана интерференционная картины, полученная для монохроматического источника (He-Ne лазер) с помощью такого интерферометра.

Для увеличения светосилы приборы, уменьшения габаритных размеров и возможности работы с источниками различной конфигурации была разработана зеркально-линзовая оборачивающая система. Итоговая оптическая схема системы показана на рис. 2. Измерения, проведенные на опытном образце, позволили оценить параметры прибора на основе разработанной оптической схемы: разрешение – 8 см$^{-1}$, спектральный диапазон - 0.7 ÷ 1.1 мкм, входная апертура – 0.25, количество пикселей матрицы - 2^{12}.

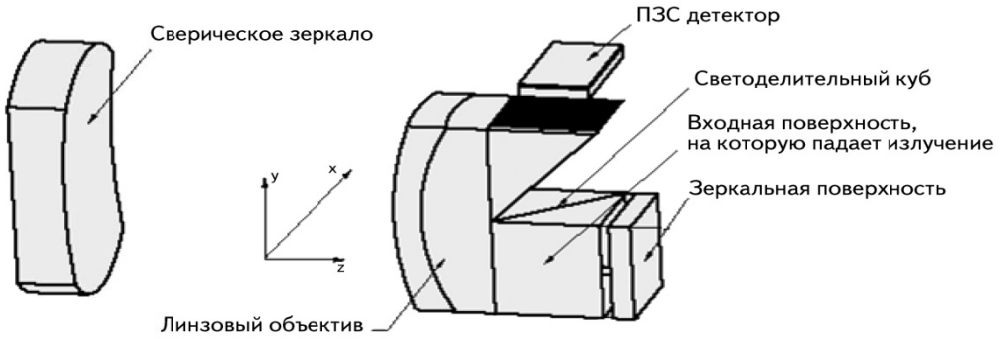

Рис. 2. Оптическая схема статического фурье-спектрометра

Вид интерферограммы и спектр от модельного источника (галогеновая лампа) для такого спектрометра представлены на рис.3.

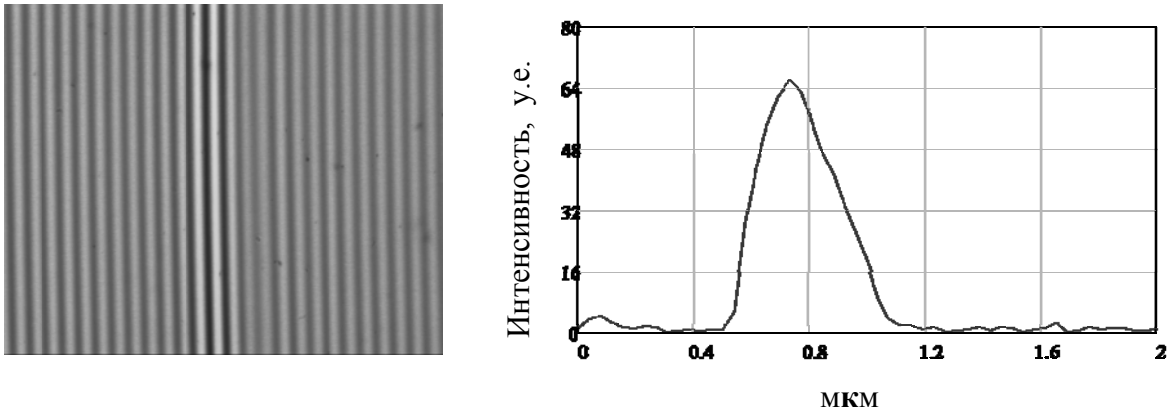

Рис. 3. Фрагмент интерференционной картины от галогеновой лампы и спектр, получаемый после обработки интерферограммы.

Была предложена оригинальная схема источника инфракрасного излучения, состоящая из набора светодиодов, предназначенных для различных диапазонов и обладающих различной интенсивностью с определенной конфигурацией согласующей оптики.

Результаты исследований показали, что данная система освещения позволяет создать равномерное освещение объекта исследования (размерами диаметров до 35 мм) в спектральном диапазоне 0.7 ÷ 1.1 мкм. Основным дос-

тоинством такого источника – низкое энергопотребление и практически отсутствующий разогрев образца.

По результатам проведенной опытно-конструкторской разработке работы был получен патент на модель статического фурье-спектрометра.

В четвертой главе проведено обобщение результатов полученных на опытном образце и рассмотрены различные варианты разработанной оптической схемы. Рассмотрена и опробована оптическая схема, рассчитанная на спектральный диапазон 1.2 ÷ 20 мкм и разрешением порядка 8 см$^{-1}$ (Рис. 4). В качестве источника излучения был выбран керамический излучатель типа ЛК (производство ФГУП «НПИ «ГОИ им. С.И. Вавилова»).

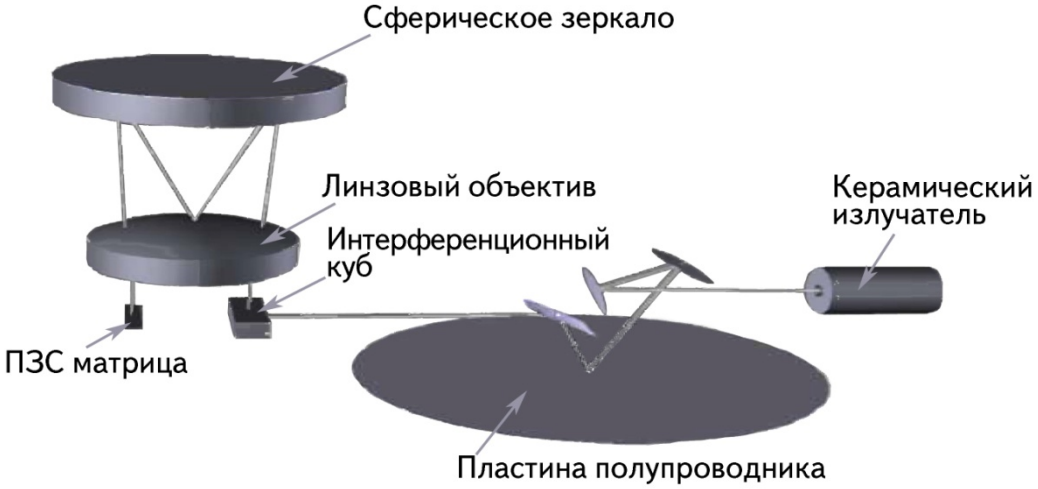

Рис. 4. Расчетная схема статического фурье - спектрометра для спектрального диапазона 1.2 ÷ 20 мкм.

Разработанная оптическая схема рассчитана на работу с отраженным от образца излучением. Для регистрации интерферограммы был выбран приемник на основе пироэлектричеких материалов со следующими параметрами: количество строк – 1, количество пикселей в строке - 1024. Для регистрации интерферограмы применялась система из 3 детекторов, установленных в ряд.

Рассчитанная система предназначена для проведения экспресс-диагностики качества полупроводниковых пластин. Испытание модификации статического фурье-спектрометра для диапазона 1.2 ÷ 20 мкм проводилось на образце кремниевой пластины с концентрацией примесей кислорода

~ 10^{16} см$^{-3}$ и концентрация центров углерода замещения ~ 10^{17} см$^{-3}$. На рис. 5 представлены спектры данного образца, полученные на промышленном варианте фурье-спектрометра («ИнфраЛЮМ ФТ-08» производства компании ООО «Люмэкс», Россия) и на предложенной модификации статического фурье-спектрометра. Видно, что по основным пикам результаты полностью идентичны (различия по шкале концентраций вызваны отсутствием нормировки).

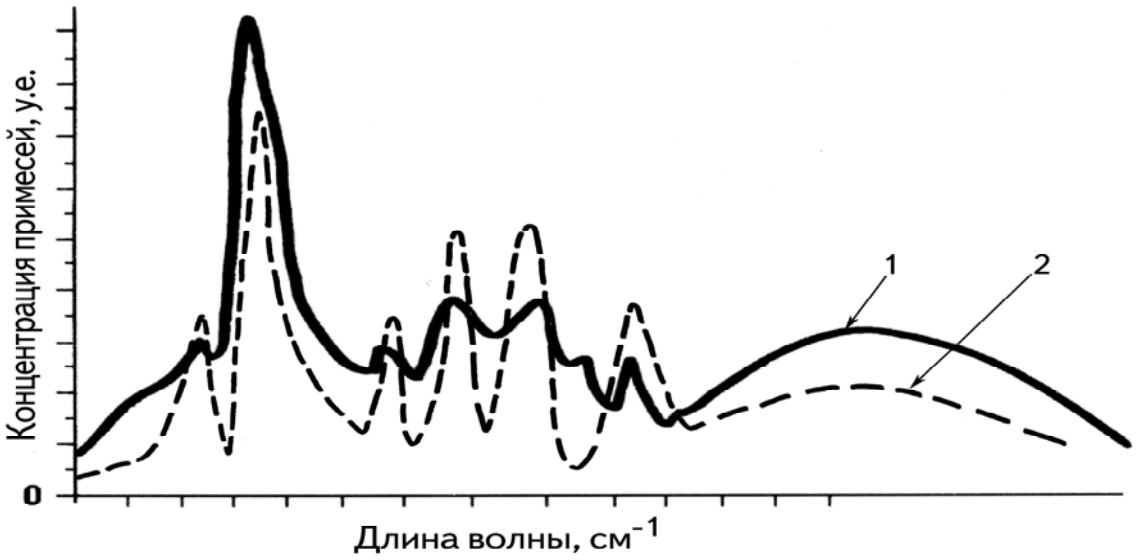

Рис. 5. Сравнение спектров, зарегистрированных на разработанном статическом фурье-спектрометре (1) и промышленном спектрометре «ИнфраЛЮМ ФТ-08» (НПФ «Люмэкс») (2)

Данные результаты показывают, что разрабатываемый прибор может применяться для экспресс-измерений концентраций примесей в полупроводниках.

В пятой главе предложена оптическая схема рамановского фурье-спектрометра на основе разработанной схеме. Согласно расчетам, разрешение данного спектрометра составляет не менее 8 см$^{-1}$. В качестве источника возбуждающего излучения выбран полупроводниковый лазер с длиной воны 785 мкм и мощностью 500 мВт. Для того чтобы спектрометр обладал необходимой чувствительностью предложена согласующая оптика на основе двух цилиндрических линз, расположенных перпендикулярно друг относительно

друга, что позволяет максимально сфокусировать все излучения на рабочую область многоэлементного ФПУ. Данная оптика позволила увеличить полезный уровень сигнала в 50 раз, по сравнению с исходным вариантом спектрометра. Для того чтобы увеличить количество экспериментальных точек, необходимых для обработки, интерферометрический узел спектрометра настроен таким образом, чтобы половина получаемой интерферограммы была развернута в растр вдоль всей рабочей области ПЗС матрицы. Последующее «достраивание» интерферограммы до симметричного вида и дополнение нулями, позволяет получить спектр с разрешением не хуже 8 см$^{-1}$.

Доказана работоспособность прибора с помощью регистрации спектров от объектов, которые входят в список метрологических образцов рамановской спектроскопии (циклогексан). Сравнение спектров показало, что совпадение основных пиков составляет 90%.

Результаты измерений показали, что на основе предложенной схемы можно создавать рамановский спектрометр с разрешением не хуже 8 см$^{-1}$. Данный класс приборов востребован для научных исследований полупроводниковых структур, в частности различного рода наноструктур.

В шестой главе представлены основные этапы и особенности технологии изготовления интерференционного узла статического фурье-спектрометра различного исполнения для двух спектральных диапазонов (1.2 ÷ 20 мкм и 0.7 ÷ 1.1 мкм) и спектрометра рамановского исполнения (работы выполнены совместно с ООО НПФ «Люмэкс»).

Выделены основные дефекты, оказывающие существенное влияние на интерференционную картину:

- локальные дефекты (пыль, дефекты напыления);
- дефекты, вносящие фазовые ошибки (отсутствие плоскостности диагональных граней призм интерференционного узла);
- технологические дефекты изготовления (оптическая неоднородность склейки, неоднородности на рабочих поверхностях оптических элементов).

Предложены методы коррекции дефектов при обработке регистрируемых интерферограмм.

Основные выводы

1) Созданы расчетно-теоретические модели, описывающие принцип работы статического фурье-спектрометра, позволяющего обосновать возможность его использования в инфракрасной области спектра (среднего и ближнего диапазона).

   Согласно расчетам интерференционная картина локализована на отражающих поверхностях куба, которые оптически, выходным объективом сопряжены с ПЗС матрицей. Основным компонентом, обеспечивающим необходимую светосилу, является сферическое зеркало. Интерференционная картина расположена вблизи центра кривизны сферического зеркала, за счет этого обеспечивается минимальная величина сферической аберрации, комы, дисторсии и хроматических аберраций.

2) Разработанная оптическая схема на основе интерференционного куба и зеркально-линзовой согласующей оптики делает возможным работать не только с точечными источниками излучения, но и с протяженными диффузно-рассеивающими объектами. Для решения большинства задач БИК анализа достаточно разрешения 16 см$^{-1}$, что соответствует 260 полосам в плоскости ПЗС матрицы (рассчитано для λ = 1 мкм). Для качественной обработки 2-х мерного изображения интерференционной картины необходима ПЗС матрица размером 2048 x 256 пикселей, т.е.

   8 пикселей на интерференционную полосу. Это накладывает требования в зеркально-линзовой системе фокусировки – 30 линий/мм (при длине матрицы 25 мм).

3) Экспериментально отработаны методы преобразования интерферограммы в спектр. На основании данных методов было создано программное обеспечение для промышленного образца статического фурье-спектрометра ближнего инфракрасного спектрально диапазона.

Реализованы различные режимы работы матрицы: line – binning (аппаратное суммирование строк) и scan area (передача 2-х мерного изображения интерференционной картины). Для обеспечения максимального быстродействия (время регистрации одной интерферограммы в режиме line-binning не более 2 с) для работы выбраны ПЗС матрицы без затвора (электронного или механического) производства Hamamatsu (Япония). Это позволяет использовать разработанный статический фурье-спектрометр для контроля технологических процессов в режиме реального времени.

4) На основании полученных методов обработки результатов и разработанной оптической схемы получен опытный образец статического фурье-спектрометра для спектрального диапазона 1.2 ÷ 20 мкм, который позволяет осуществлять измерение параметров полупроводниковых материалов.
5) Проведенные расчетно-теоретические исследования показали, что на основании предложенной оптической схемы можно создать рамановский фурье-спектрометр ближнего инфракрасного диапазона, с возбуждающей частотой излучений 785 нм и разрешением не хуже 8 см$^{-1}$. Для увеличения уровня полезного сигнала ПЗС матрицы, реализован режим управления длительность импульсов задержки на ПЗС матрице (без затвора). Вместе с режимом line-binning такой подход позволяет дополнительно увеличить чувствительность прибора в 10 раз. Экспериментальные результаты подтверждают правильность расчетов и реализацию режимов работы ПЗС матрицы: разрешение такого прибора не менее 8 см$^{-1}$.
6) Полученные результаты работы использованы компанией ООО «Люмэкс» для создания промышленного образца статического фурье-спектрометра ближнего инфракрасного диапазона, с разрешением 16 см$^{-1}$ для работы с диффузно-рассеивающими объектами, в качестве которых выступают различного рода порошки.

Основные публикации по теме диссертации

1. Зеркально-линзовая система всесуточного наблюдения: Патент №2366987; заявл. 22.11.2007; опубл. 10.09.2010 г.

   Личный вклад автора заключается в проведении расчетов и опытно-конструкторской разработке изделия.

2. Статический фурье-спектрометр: Патент №2436038, заявл.01.02.2010; опубл. 02.2011 г.

   Личный вклад автора заключается в проведении расчетов, разработке методики и проектировании опытного образца.

3. Светосильный зеркально-линзовый объектив: Патент №2368924; заявл.27.11.2007; опубл. 27.09.2009 г.

   Личный вклад автора заключается в проведении расчетов и опытно-конструкторской разработке изделия.

4. **Поликарпов Ю.И.,** Слуцкер А.И., Белаш А.О. и др. Автоматизированная установка для измерения комплексного коэффициента теплового расширения методом модуляционной дилатометрии [Текст]// Приборы и техника эксперимента. – 2004. №3. С. 139 – 145.

   Личный вклад автора заключается в проведении сравнительного анализа дилатометров разного типа: интерференционного и на основе механической регистрации микроперемещений.