

Кучмижак Александр Андреевич

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ  
ЗОНДОВ ДЛЯ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ  
БЛИЖНЕГО ПОЛЯ

01.04.21 - Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук



Владивосток – 2012

Работа выполнена в Федеральном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Витрик Олег Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Букин Олег Алексеевич  
доктор физико-математических наук,  
профессор Евтихий Николай Николаевич

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научный центр волоконной оптики Российской академии наук.

Защита диссертации состоится «25» октября 2012 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 005.007.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу: 690041, г. Владивосток, улица Радио, дом 5, ауд. 510.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАПУ ДВО РАН.

Автореферат разослан «20» сентября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук,  
доцент



Гамаюнов Е.Л.

# I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность проблемы

В настоящее время апертурная сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (СБОМ) является мощным инструментом исследования топографических, оптических и спектроскопических свойств различных объектов с субволновым пространственным разрешением. Со времени первой демонстрации в 1984, эта методика активно применялась в различных областях исследований, таких как получение изображений полупроводниковых и биологических объектов с высоким пространственным разрешением, детектирование флуоресценции единичных молекул и квантовых точек, модификации поверхностной структуры для сверхплотной записи информации и др. В основе СБОМ лежит принцип локализации света на субволновых масштабах. В наиболее распространенной модификации СБОМ для этих целей используется сканирующий зонд, выполненный в виде сильно сужающегося по направлению к выходному торцу волоконного световода, покрытого тонкой металлической оболочкой, формирующей на наконечнике световода субволновую апертуру. Как правило, диаметр апертуры не делается меньше, чем  $\lambda/10$ , где  $\lambda$  – длина волны используемого излучения. В противном случае пропускающая способность такого зонда становится чрезмерно малой и чувствительность фотоприемных устройств оказывается недостаточной для регистрации малых изменений интенсивности излучения, рассеянного или прошедшего через исследуемый объект. Как видно, малая пропускная способность апертурных зондов накладывает ограничение на минимальный размер выходной апертуры и, соответственно, на пространственное разрешение апертурных систем СБОМ.

Один из подходов к увеличению пространственного разрешения систем СБОМ заключается в увеличении интенсивности эванесцентного источника излучения за счет повышения мощности вводимого в зонд излучения. Тем не менее, сильная диссипация энергии в металлическом покрытии зонда приводит к сильному нагреву его наконечника и последующему разрушению. Для

увеличения порога разрушения апертурных зондов было предложено наносить на его конусообразную часть дополнительные адгезионные слои или многослойные металлические покрытия, однако это не позволило добиться существенного увеличения пространственного разрешения методов СБОМ. Достигнутая величина пространственного разрешения, ограничиваемая вследствие недостаточной чувствительности амплитудных методов регистрации сигнала, по-видимому, приближается к своему пределу. Поэтому разработка принципиально нового метода повышения чувствительности и, следовательно, разрешающей способности методов СБОМ является важной практической и научной задачей.

Значительное увеличение чувствительности оптических измерительных систем достигается при переходе от амплитудных принципов регистрации измеренного оптического сигнала к интерферометрическим. Поэтому, в данной диссертационной работе аналогичный подход используется для увеличения чувствительности и, как следствие, разрешающей способности методов СБОМ. В этом случае, сканирующий зонд может быть выполнен в виде волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо (ИФП) в выходном зеркале которого формируется наноразмерная диафрагма, представляющая субволновой эванесцентный световой источник. Взаимодействие излучения на выходе этой диафрагмы с поверхностью исследуемого объекта будет приводить к изменению фазы распространяющегося в резонаторе интерферометра излучения и, тем самым, к смещению пиков спектра отражения ИФП, по величине которого можно будет определить расстояние между поверхностью исследуемого объекта и эванесцентным источником. Однако, физические закономерности, описывающие процесс взаимодействия эванесцентного светового источника, сформированного в выходном зеркале интерферометра Фабри-Перо, с поверхностью исследуемого объекта, приводящее к смещению спектральных максимумов интерферометра Фабри-Перо, до сих пор остаются не изученными. Не исследованы вопросы, связанные с определением оптимальных геометрических параметров зонда на основе волоконного интерферометра Фабри-Перо, а также технологией его создания. Не выяснены во-

просы о вертикальном и латеральном разрешении, которое может обеспечить такой зонд.

### **Цель и задачи работы**

Целью данной работы является разработка физических принципов спектральной апертурной микроскопии ближнего поля с применением в качестве сканирующего зонда волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо с эванесцентным световым источником, сформированным в его выходном зеркале.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- Разработать физические принципы, описывающие процесс изменения фазы световой волны в интерферометре Фабри-Перо вследствие взаимодействия эванесцентного светового источника, сформированного в его выходном зеркале, с поверхностью исследуемого объекта. В рамках данной модели необходимо исследовать зависимость величины смещения максимумов спектра отражения ИФП от изменения расстояния между, сформированным в его выходном зеркале субволновым эванесцентным источником и поверхностью внешнего объекта, а также определить оптимальные геометрические параметры зонда.
- Разработать технологию создания спектрального ближнепольного зонда с заданными параметрами.
- Провести экспериментальные измерения вертикального и латерального разрешения разработанного зонда на основе волоконного интерферометра Фабри-Перо, а также исследовать возможность его использования для восстановления топографического профиля тестовых объектов.

### **Научная новизна работы**

Новизна данной диссертационной работы заключается в следующем:

- впервые теоретически и экспериментально исследована зависимость величины смещения максимумов спектра отражения ИФП от изменения расстояния между, сформированным в его выходном зеркале суб-

волновым эванесцентным источником и поверхностью внешнего объекта;

- впервые показано, что в случае, когда объект микроскопического исследования находится в зоне действия эванесцентного светового источника, величина смещения максимумов спектра отражения интерферометра Фабри-Перо прямо пропорциональна расстоянию до объекта исследования;
- впервые разработаны экспериментальные методики создания спектральных зондов на основе волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо с субволновым источником, находящимся в плоскости выходного зеркала, а также выдвинутым за нее за счет наноразмерного конусообразного выступа;
- впервые в системах апертурной сканирующей оптической микроскопии ближнего поля достигнуто сверхвысокое вертикальное (не хуже, чем  $\lambda/100$ ) и латеральное (не хуже, чем  $\lambda/40$ ) разрешение.

### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные в работе результаты открывают возможность создания систем апертурной спектральной микроскопии ближнего поля принципиально нового типа, с пространственным разрешением, существенно превышающим разрешение существующих систем, использующих амплитудный принцип регистрации.

### **Выносимые на защиту положения**

1. Применение спектрального принципа регистрации сигнала о взаимодействии эванесцентного светового источника с объектом микроскопического исследования позволяет достичь сверхвысокого вертикального (не хуже, чем  $\lambda/100$ ) и латерального (не хуже, чем  $\lambda/40$ ) разрешения в системах сканирующей оптической микроскопии ближнего поля.
2. Регистрация спектрального сигнала о взаимодействии эванесцентного светового источника с объектом микроскопического исследования

обеспечивается использованием зонда в виде волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо с субволновым эванесцентным световым источником. Субволновой источник в виде наноразмерной диафрагмы может быть расположен в плоскости выходного зеркала интерферометра, а также выдвинут за нее за счет создания наноразмерного конусообразного выступа.

3. В случае, когда объект микроскопического исследования находится в зоне действия эванесцентного светового источника, величина смещения максимумов спектра отражения интерферометра Фабри-Перо прямо пропорциональна расстоянию до объекта исследования.
4. Создание экспериментальных макетов спектральных зондов на основе волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо с субволновым источником, находящимся в плоскости выходного зеркала, а также выдвинутым за нее за счет наноразмерного конусообразного выступа, может быть обеспечено использованием методов селективного химического и ионно-лучевого травления.

#### **Апробация результатов работы.**

Апробация результатов работы проводилась на следующих международных, всероссийских и региональных конференциях:

1. Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО-2009, Пермь (Россия) 2009.
2. Научная сессия НИЯУ МИФИ, Москва (Россия) 2010.
3. Всероссийский конкурс-конференция молодых физиков, Москва (Россия) 2010.
4. Asia-pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics APCOM'2010, Seoul (Korea) 2010.
5. International Conference of Advanced Laser Technologies ALT'10, Egmond aan Zee (Netherlands) 2010.
6. Научная сессия НИЯУ МИФИ, Москва (Россия) 2011.

7. Asia-pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics APCOM'2011, Samara/Moscow (Russia) 2011.
8. Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО-2011, Пермь (Россия) 2011.

### **Публикация результатов работы.**

Основные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 11 печатных работах, в том числе 5 статей – в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ.

### **Личный вклад автора.**

Автором лично подготовлены и проведены эксперименты, выполнены обработка экспериментальных данных и интерпретация полученных результатов. Все результаты, представленные в работе, получены соискателем лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 121 страница, включая список литературы, 52 рисунка и 2 таблицы. Список цитированной литературы содержит 147 наименований, включая публикации автора по теме диссертации.

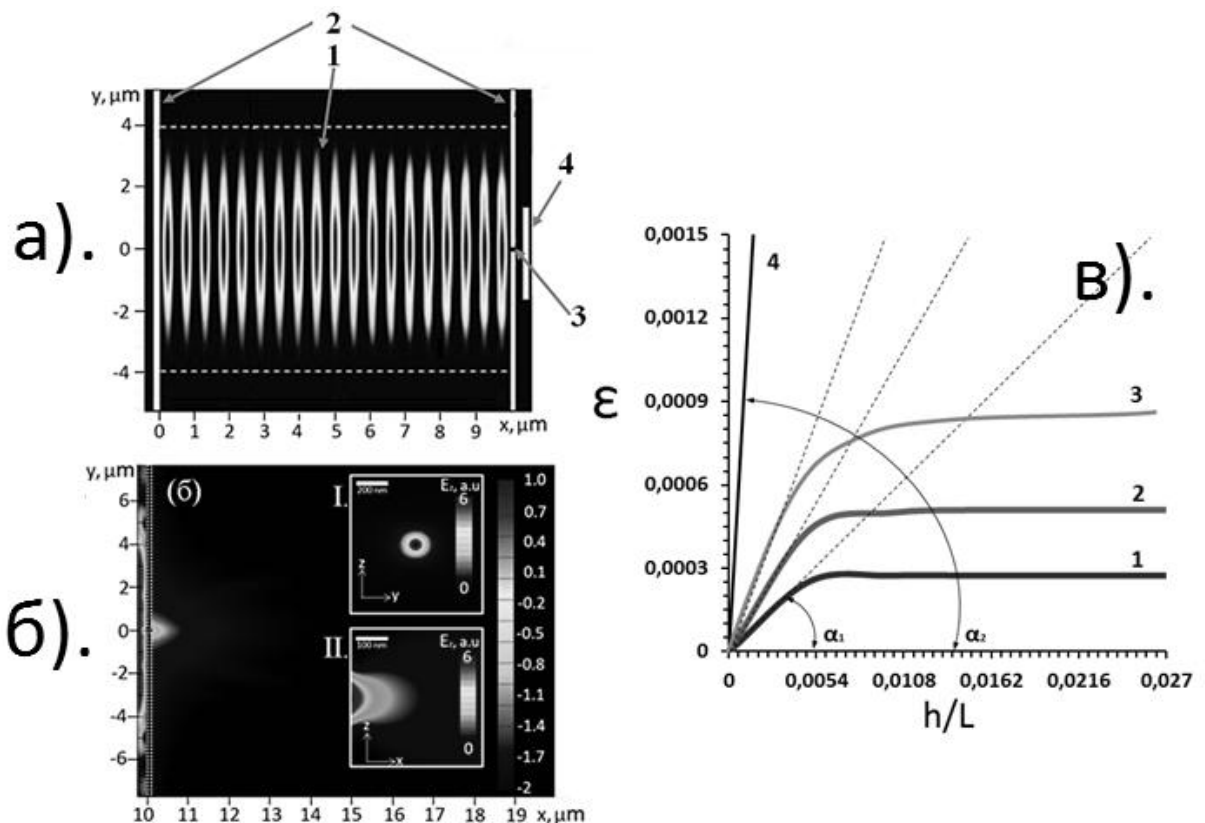
## **II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, дана общая характеристика научной проблемы, сформулирована цель и поставлены задачи исследований.

**В первой главе** на основе метода конечных разностей во временной области исследовано распределение электромагнитного поля в интерферометре Фабри-Перо (рис. 1(а)) с наноразмерной диафрагмой, сформированной в его выходном зеркале, а также на выходе этой диафрагмы (рис. 1(б)). Ис-



следована зависимость величины спектрального смещения  $\Delta\lambda_s$  от изменения расстояния  $h_s$  между сформированным в выходном зеркале ИФП эванесцентным источником и поверхностью внешнего объекта (рис. 1в). Показано, что сдвиг резонансной длины волны интерферометра определяется относительным перемещением внешнего объекта  $h_s/L_T$  ( $L_T$  – длина резонатора). Установлено, что для выходных диафрагм малого диаметра  $D \ll \lambda$  прямая пропорциональность между величинами  $\Delta\lambda_s$  и  $h_s$  сохраняется только для малых расстояний между эванесцентным источником и внешним объектом, сравнимых с  $D$ .

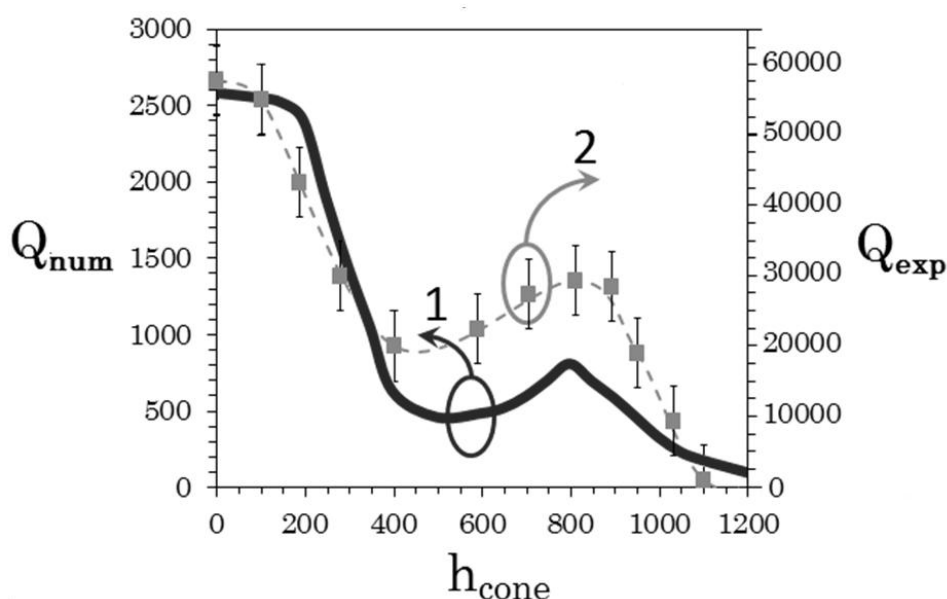


**Рис. 1.** Свойства зонда на основе плоскопараллельной геометрии расположения зеркал. (а) Распределение поперечной компоненты электромагнитного поля  $E_z$  внутри волоконного интерферометра Фабри-Перо, содержащего субволновую диафрагму и на выходе этой диафрагмы (б) с диаметром  $D = \lambda/15$ . На вставках I и II рисунка 1(б) показано распределение  $E_z$  вблизи выходной диафрагмы в проекциях  $yz$  и  $xz$  (использовано логарифмическое масштабирование). Зависимость относительного сдвига резонансной длины волны  $\epsilon$  от относительного изменения расстояния  $h/L$  (кривая 1 получена при диаметре диафрагмы  $D = \lambda/40$ , кривая 2 – при  $D = \lambda/15$ , кривая 3 – при  $D = \lambda/8$ , кривая 4 –  $D = 5\lambda$ ).

Установлено, что крутизна линейного участка зависимости  $\Delta\lambda_s(h_s)$ , определяющая спектральную чувствительность ИФП к смещению внешнего объек-

та  $\alpha_s$  изменяется в пределах от 0,07 до 0,14, при изменении диаметра выходной диафрагмы от  $\lambda/40$  до  $\lambda/15$ , соответственно.

Рассчитана зависимость величины спектрального смещения  $\Delta\lambda_s$  от изменения расстояния  $h_s$  между поверхностью внешнего объекта и вынесенным эванесцентным световым источником, сформированным на вершине конусообразного выступа одного из зеркал ИФП (рис. 3(б)). Показано, что, как и для случая ИФП с плоскопараллельной геометрией расположения зеркал, сдвиг резонансной длины волны в ИФП с конусообразным выступом определяется относительным перемещением внешнего объекта  $h_s/L_r$ .

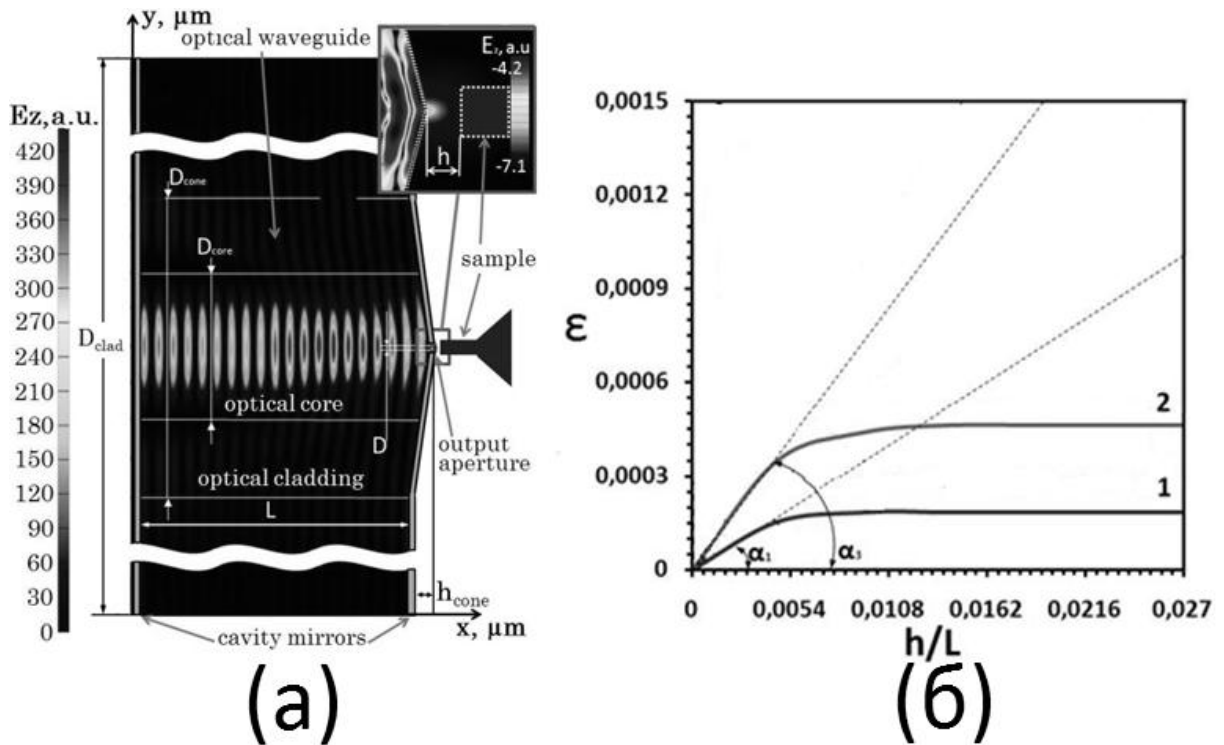


**Рис. 2.** Зависимость добротности интерферометра Фабри-Перо  $Q$  от высоты конусообразной части световода  $h_{\text{cone}}$ : кривая 1 получена на основе численных расчетов, кривая 2 – для экспериментального ИФП (толщина зеркальных покрытий на входном и выходном торцах ИФП толщинами  $d_{\text{ext}} \sim 100$  нм (коэффициент отражения  $R_{\text{ext}} \sim 0.95$ ) и  $d_{\text{int}} \sim 25$  нм (коэффициент отражения  $R_{\text{int}} \sim 0.7$ ), соответственно).

На основе метода конечных разностей во временной области исследована зависимость добротности ИФП  $Q$  от высоты конусообразного выступа  $h_{\text{cone}}$  (рис. 2). Установлены, что при высоте конусообразного выступа  $h_{\text{cone}} = 800$  нм и диаметре его основания  $D_{\text{cone}} = 8$  мкм обеспечивается локальный максимум добротности ИФП. Показано, что для такого выступа величина добротность ИФП приблизительно в 3 раза меньше, чем для ИФП с плоскопараллельной геометрией расположения зеркал.

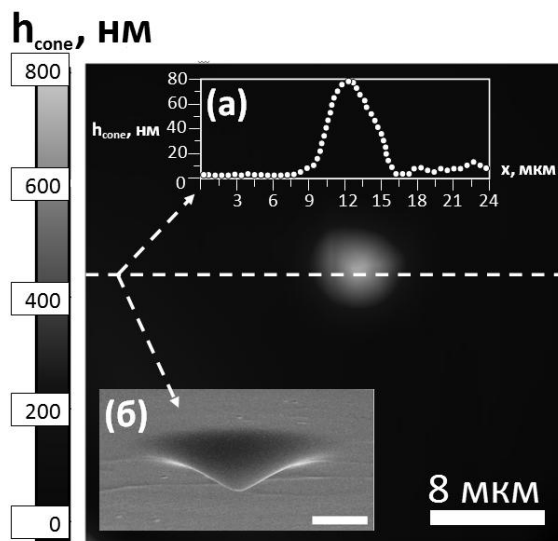
Установлено, что спектральная чувствительность ИФП с оптимальным конусообразным выступом к смещению внешнего объекта изменяется в пределах  $0,052 < \alpha_s < 0,105$  при изменении диаметра выходной диафрагмы от  $\lambda/40$  до  $\lambda/15$ .

Установлено, что для обеспечения вертикального пространственного разрешения  $\sim \lambda/40$ , значение добротности резонатора плоскопараллельного ИФП должно быть не меньше, чем  $Q_{\text{пор}} = 26.8 \cdot 10^3$ , что достигается при коэффициентах отражения входного и выходного золотых покрытий  $R_{\text{int}} = 0.45$  и  $R_{\text{ext}} = 0.9$ , соответственно, и угле рассогласования  $\theta$  нормали к плоскости зеркал и оптической оси ВС не более  $1.5^\circ$ . Для ИФП с конусообразным выступом оптимального размера требуемые значения добротности ИФП и вертикального разрешения обеспечиваются при таких же  $R_{\text{ext}}$  и  $\theta$ , но чуть более высоком коэффициенте отражения входного золотого покрытия  $R_{\text{int}} = 0.5$ .



**Рис. 3.** Свойства зонда на основе ИФП с конусообразным выступом высотой  $h_{\text{cone}} = 800$  нм. (а) Распределение поперечной компоненты  $E_z$  электрического поля в волоконно-оптическом интерферометре Фабри-Перо (а) и на выходе субволновой диафрагмы для резонансной длины волны 1554 нм. Распределение  $E_z$  на выходе из субволновой диафрагмы диаметром  $D = 100$  нм представлено в логарифмическом масштабе. (б). Относительный сдвиг резонансной длины волны ИФП с конусообразным выступом  $\epsilon$  как функция относительного изменения расстояния  $h/L$ , рассчитанная для диафрагм с диаметрами  $D = \lambda/40$  (кривая 1) и  $D = \lambda/15$  (кривая 2).

Во второй главе приводится описание экспериментальных методик, используемых для создания сканирующего зонда на основе интерферометра



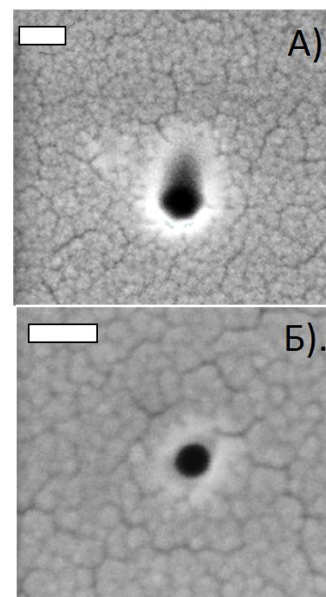
*Рис. 4. Топографическое изображение конусообразного выступа, сформированного в результате травления в растворе в течении 10 минут (изображение получено при помощи атомно-силового микроскопа). На вставке (а) показано двухмерное топографическое сечение, проведенное через точку с наивысшей высотой. На вставке (б) показано электронное изображение конусообразного выступа высотой  $h_{cone}=800$  нм (Длина масштабной полоски – 2 мкм).*

Фабри-Перо с субволновым источником, находящимся в плоскости выходного зеркала, а также выдвинутым за нее за счет наноразмерного конусообразного выступа с параметрами.

Показано, что рекомендованное значение добротности  $Q_{пор}$  для обоих типов расположения зеркал интерферометра достигается при использовании на выходном и входном торцах световода в ИФП золотых покрытий с толщинами  $d_{ext} \sim 100$  нм ( $R_{ext} \sim 0.95$ ) и  $d_{int} \sim 25$  нм ( $R_{int} \sim 0.7$ ).

Показано, что травление ВС с сердцевинной допированной ионами Ge в растворе  $NH_4OH$  и  $HF$  с объемным соотношением фтороводородной кислоты  $X=0.5$  в течение 10 минут обеспечивает получение рекомендованных в главе 2 размеров конусообразного выступа. Топографическое изображение полученного на торце ВС выступа представлено на рис. 4.

Разработана методика формирования субволновых диафрагм с диаметрами в диапазоне  $40 \div 100$  нм (рис. 5) в зеркальных покрытиях плоскопарал-



*Рис. 5. Электронные изображения наноразмерных диафрагм с диаметрами  $D=100$  нм (а) и  $D=40$  нм (б), сформированных в выходном зеркале ИФП (Длина масштабной полоски – 100 нм).*

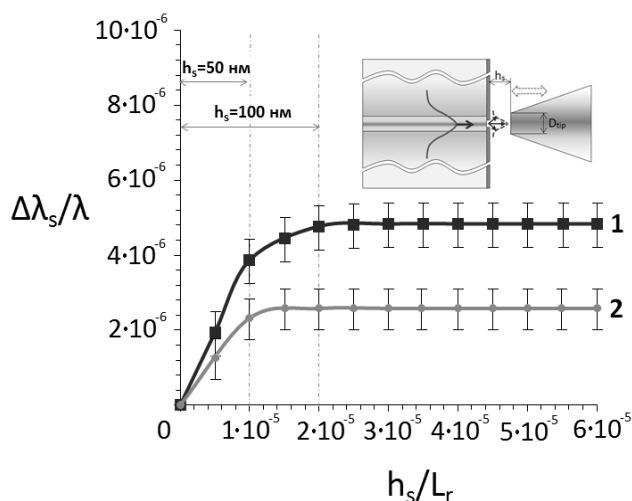
лельного ИФП, а также в случае, когда одно из его зеркал имеет конусообразный выступ.

Описана методика создания тестового объекта с плоской передней гранью диаметром  $D_{\text{tip}} \sim 810$  нм для проведения экспериментальных исследований зондов на основе плоскопараллельного ИФП.

**Третья глава** посвящена экспериментальному исследованию параметров зондов на основе ИФП с эванесцентным световым источником в виде наноразмерной диафрагмы, сформированной в плоскости выходного зеркала интерферометра, а также выдвинутой за нее за счет создания наноразмерного конусообразного выступа.

Приведены описания экспериментальных установок, используемых для экспериментального исследования параметров зондов на основе ИФП с различной геометрий расположения зеркал.

Экспериментально исследована зависимость величины спектрального смещения  $\Delta\lambda_s$  от изменения расстояния  $h_s$  между сформированным в выходном зеркале ИФП эванесцентным источником и поверхностью внешнего



**Рис. 6.** Зависимость величины относительного смещения «центра тяжести» спектральных пиков ИФП субволновой диафрагмой  $\Delta\lambda_s/\lambda$  от относительного изменения расстояния  $h_s/L_r$  между диафрагмой и плоской передней гранью тестового объекта: кривая 1 получена для диафрагмы с диаметром  $D_1=100$  нм, кривая 2 - для диафрагмы с  $D_2=40$  нм.

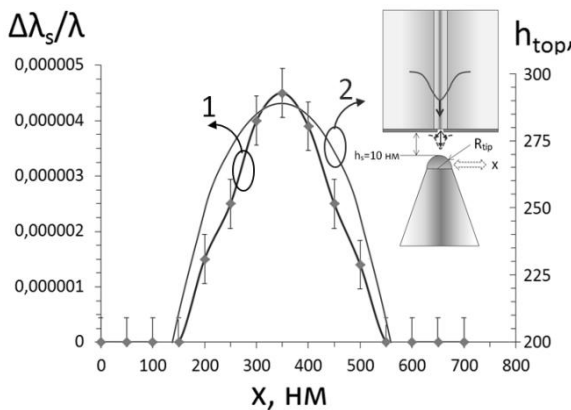
объекта (рис. 6). Экспериментально подтвержден вывод о том, что для диафрагм малого диаметра ( $D \leq 100$  нм) прямая пропорциональность между величинами  $\Delta\lambda_s$  и  $h_s$  сохраняется только для малых расстояний между эванесцентным источником и внешним объектом, сравнимых с диаметром выходной диафрагмы  $D$ .

Показано, что экспериментальная величина  $\alpha_s$  в

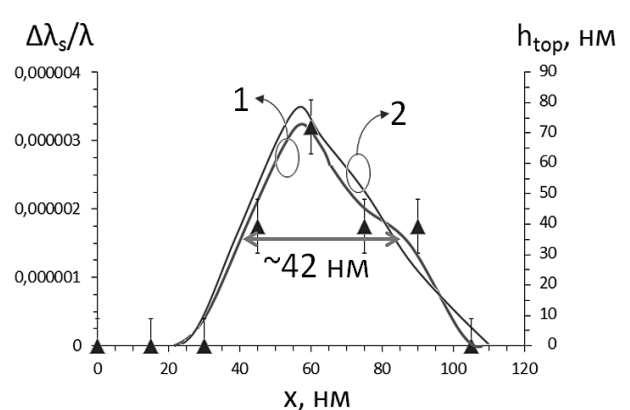
2-3 раза превышает полученные численным методом для одинаковых значе-

ний  $D$  значения и изменяется в пределах от 0,343 до 0,21, при изменении диаметра выходной диафрагмы от  $\lambda/15$  до  $\lambda/40$ , соответственно. Данный факт объясняется вследствие различия распределений поляризации в плоскости поперечного сечения входящем в состав зонда ВС в численной модели и в экспериментальном случае. С использованием спектрального ближнепольного зонда на основе плоскопараллельного ИФП экспериментально продемонстрирована возможность восстановления топографического профиля тестовых объектов с вертикальным разрешением не более 10 нм и латеральным разрешением  $\sim \lambda/13$  (120 нм для  $\lambda_c=1550$  нм) при диаметре выходной диафрагмы зонда  $D_1=100$  нм (рис.7).

Экспериментально продемонстрирована возможность восстановления топографического профиля тестового объекта, представляющего кантилевер атомно-силового микроскопа, спектральным ближнепольным зондом на основе плоскопараллельного ИФП с вертикальным разрешением не более 16 нм и латеральным разрешением  $\sim \lambda/37$  (42 нм для  $\lambda_c=1550$  нм) при  $D_2=40$  нм (рис. 8).

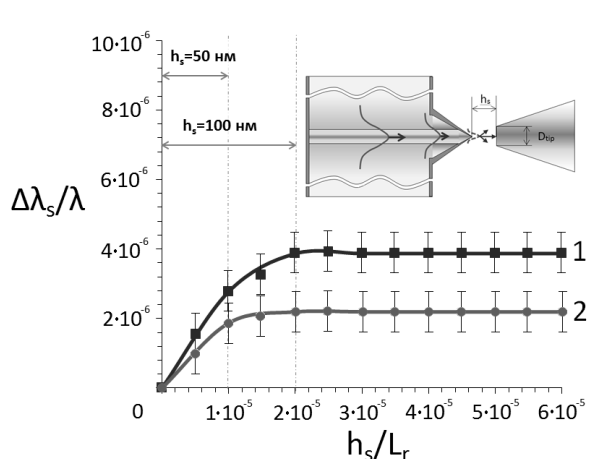


**Рис. 7.** Результаты восстановления топографического профиля наконечника конусообразно сужающегося световода тестового объекта по величине относительного смещения спектральных пиков ИФП (кривая 1), в сравнении с топографией (кривая 2), измеренной при помощи РЭМ высокого разрешения.

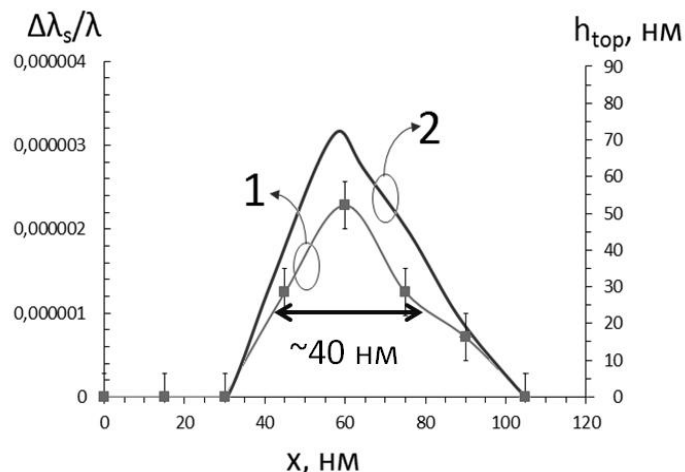


**Рис. 8.** Результаты восстановления топографического профиля наконечника кантилевера АСМ зондом на основе ИФП с выходной диафрагмой диаметром  $D=40$  нм по величине относительного смещения спектральных пиков (кривая 1) в сравнении с топографией (кривая 2), измеренной при помощи АСМ с применением калибровочной решетки TGT1.

Экспериментально исследована зависимость величины спектрального смещения  $\Delta\lambda_s$  от изменения расстояния  $h_s$  между поверхностью внешнего



**Рис. 9.** Зависимость величины относительного смещения «центра тяжести» спектральных пиков ИФП с выдвинутой субволновой диафрагмой  $\Delta\lambda_s/\lambda$  от относительного изменения расстояния  $h_s/L_r$  между диафрагмой и плоской передней гранью тестового объекта: кривая 1 получена для диафрагмы с диаметром  $D_1=100$  нм, кривая 2 - для диафрагмы с  $D_2=40$  нм.



**Рис. 10.** Результаты восстановления топографического профиля наконечника кантилевера АСМ зондом на основе ИФП с конусообразным выступом оптимальных размеров и выходной диафрагмой диаметром  $D=40$  нм по величине относительного смещения спектральных пиков (кривая 1) в сравнении с реальной топографией (кривая 2), полученной при помощи АСМ.

объекта и вынесенным эванесцентным световым источником, вынесенным за плоскость выходного зеркала ИФП по направлению к исследуемому объекту при помощи конусообразного выступа (рис.9). Экспериментально подтвержден вывод о том, что размеры конусообразного выступа  $h_{\text{cone}}=800$  нм и  $D_{\text{cone}}=8$  мкм обеспечивают локальный максимум добротности ИФП. Экспериментально продемонстрировано, что, как и для случая интерферометра с плоскопараллельной геометрией расположения зеркал, для ИФП с выдвинутой субволновой диафрагмой малого диаметра ( $D \leq 100$  нм) прямая пропорциональность между величинами  $\Delta\lambda_s$  и  $h_s$  сохраняется только для малых расстояний между эванесцентным источником и внешним объектом, сравнимых с  $D$ . Установлено, что экспериментальная величина  $\alpha_s$  для ИФП с конусообразным выступом оптимальных размеров приблизительно в 2,5 раза превышает полученные численным методом для одинаковых значений  $D$  значения и изменяется в пределах от 0,248 до 0,135, при изменении диаметра выходной диафрагмы от  $\lambda/15$  до  $\lambda/40$ , соответственно.

Данный факт объясняется несоответствием направлений поляризации фундаментальной моды ВС, входящем в состав зонда, в расчетном и экспе-

риментальном случае. Экспериментально продемонстрирована возможность восстановления топографического профиля тестовых объектов спектральным ближнепольным зондом на основе ИФП с выдвинутой при помощи конусообразного выступа субволновой диафрагмой с вертикальным разрешением не более 40 нм и латеральным разрешением  $\sim \lambda/39$  (40 нм для  $\lambda_c=1550$  нм) при диаметре выходной диафрагмы  $D_2=40$  нм (рис.10).

**В заключении** подводятся итоги проделанной работы и приводятся важнейшие результаты, полученные в ходе диссертационного исследования.

### III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Рассчитана и экспериментально исследована зависимость величины смещения максимумов спектра отражения интерферометра Фабри-Перо  $\Delta\lambda_s$  от изменения расстояния между, сформированным в его выходном зеркале субволновым эванесцентным источником и поверхностью внешнего объекта для случаев, когда источник представляет субволновую диафрагму в плоскости выходного зеркала интерферометра, а также, когда источник выполняется на вершине конусообразного выступа выходного зеркала. Рассчитаны параметры таких зондов, обеспечивающие максимальное разрешение системам ближнепольной оптической микроскопии.
2. Установлено, что в случае, когда объект микроскопического исследования находится в зоне действия субволнового источника, создаваемого в выходном зеркале спектрального зонда (т.е. расстояние  $h_s$  между источником и объектом сравнимо с диаметром  $D$  источника), спектральное смещение  $\Delta\lambda_s$  прямо пропорционально величине относительного смещения объекта  $h_s/L_r$ , (где  $L_r$  – длина резонатора).
3. На основе методов селективного химического травления и травления сфокусированным пучком ионов разработана технология создания макета спектрального ближнепольного зонда в виде волоконного интерферометра Фабри-Перо с длиной резонатора  $L_r=5$  мм и диаметром выходной диафрагмы в пределах  $D=40 - 100$  нм, для



случаев, когда субволновой источником, находящимся в плоскости выходного зеркала, а также когда выходное зеркало имеет конусообразный выступ с размерами: высота конуса  $h_{\text{cone}}=800$  нм и диаметр основания  $D_{\text{cone}}=8$  мкм .

4. Экспериментально установлено, что относительная спектральная чувствительность  $\alpha_s = \frac{\Delta\lambda_s L_r}{h_s \lambda}$  плоскопараллельного зонда на основе интерферометра Фабри-Перо к смещению внешнего объекта на линейном участке зависимости  $\Delta\lambda_s(h_s)$  варьируется от 0,343 до 0,21 при изменении диаметра его выходной диафрагмы, соответственно, в пределах от  $\lambda/15$  до  $\lambda/40$ .
5. Экспериментально продемонстрирована возможность восстановления топографического профиля тестовых объектов спектральным ближнепольным зондом на основе плоскопараллельного интерферометра Фабри-Перо с вертикальным разрешением  $\sim\lambda/96$  (16 нм для  $\lambda_c=1550$  нм ) и латеральным разрешением  $\sim\lambda/37$  (42 нм для  $\lambda_c=1550$  нм) в случае  $D=40$  нм.
6. Экспериментально установлено, что относительная спектральная чувствительность  $\alpha_s$  зонда с конусообразным выступом к смещению внешнего объекта варьируется от 0,248 до 0,135 при изменении диаметра выходной диафрагмы, соответственно, от  $\lambda/15$  до  $\lambda/40$ .
7. Экспериментально продемонстрирована возможность восстановления топографического профиля тестовых объектов спектральным ближнепольным зондом на основе ИФП с конусообразным выступом с вертикальным и латеральным разрешением не более 40 нм ( $\sim\lambda/39$  для  $\lambda_c=1550$  нм) при диаметре выходной диафрагмы  $D_2=40$  нм.

**Материалы диссертационной работы полностью отражены в следующих публикациях:**

**В журналах из перечня ВАК:**

- A1. Kulchin Yu. N., Vitrik O.B., Kuchmizhak A.A., Pustovalov E.V. and Nepomnyaschii A.V. «Cavity-based Fabry-Perot probe with protruding subwavelength aperture». *Optics Letters*, **36**(20), 3945-3947 (2011).
- A2. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Безвербный А.В., Пустовалов Е.В., Кучмижак А.А. Непомнящий А.В. «Апертурный зонд на основе волоконного резонатора Фабри-Перо для систем ближнепольной оптической микроскопии». *Квантовая электроника*, **41**(3), 249-252 (2011).
- A3. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Пустовалов Е.В., Кучмижак А.А. Непомнящий А.В. «Волоконный микрорезонатор Фабри-Перо для систем оптической ближнепольной микроскопии». *Кристаллография*, **56**(5), 966-971 (2011).
- A4. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Безвербный А.В., Дышлюк А.В., Кучмижак А.А. «Интерферометрический зонд для систем ближнепольной оптической микроскопии». *Письма в Журнал Технической Физики*, **36**(13), 599-601 (2010).
- A5. Кучмижак А.А., Витрик О.Б., Кульчин Ю.Н. «Сканирующий зонд на основе волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо для систем ближнепольной оптической микроскопии». *Физическое образование в вузах*. **16**(1), 19-20 (2010).

**В других журналах и сборниках трудов конференций:**

1. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Дышлюк А.В., Кучмижак А.А. «Интерферометрический принцип апертурной ближнепольной оптической микроскопии с применением волоконного резонатора Фабри-Перо». *Фотон-экспресс*, **78**(6), 102-103 (2009).
2. Кучмижак А.А., Дышлюк А.В., Витрик О.Б., Кульчин Ю.Н. «Исследование принципов апертурной спектральной ближнепольной оптической микроскопии с применением волоконно-оптического резонатора Фабри-Перо». *Научная сессия НИЯУ МИФИ. Сборник трудов конференции*, 34-35(2010).

3. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Kuchmizhak A. A. «Interferometric probe for near-field optical microscopy». *Pacific Science Review*, **12**(1), (2010).
4. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Kuchmizhak A. A. «Interferential probe for aperture near-field optical microscopy». *Advanced laser technologies. Book of abstracts*. 136(2010).
5. Кучмижак А.А., Витрик О.Б., Кульчин Ю.Н. «Исследование принципов апертурной спектральной ближнепольной оптической микроскопии с применением волоконно-оптического резонатора Фабри-Перо». *Научная сессия НИЯУ МИФИ. Сборник трудов конференции*, 84-85 (2011).
6. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Кучмижак А.А. «Зонд на основе волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо с выдвинутой суб-волновой диафрагмой». *Фотон-Экспресс*, **6**, 46-47 (2011).