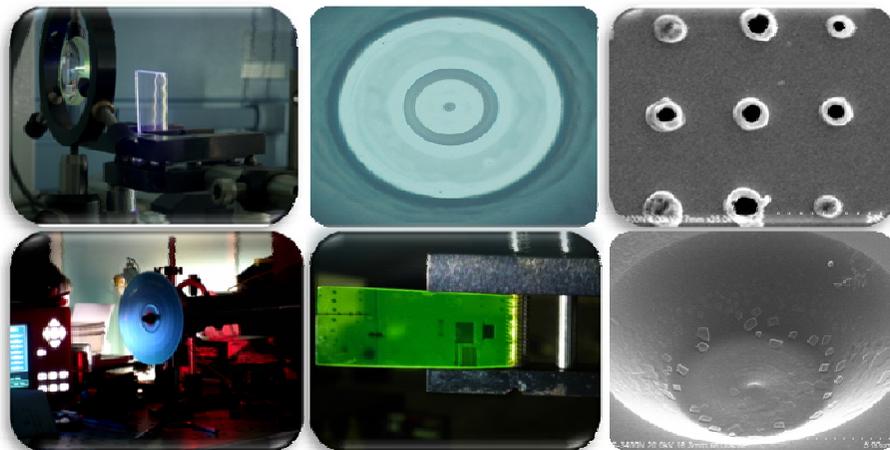


Всероссийская конференция по волоконной оптике
ВКВО-2011

Зонд на основе волоконно-оптического
интерферометра Фабри-Перо с выдвинутой
субволновой диафрагмой



Кульчин Ю.Н.

Витрик О.Б.

Кучмижак А.А.



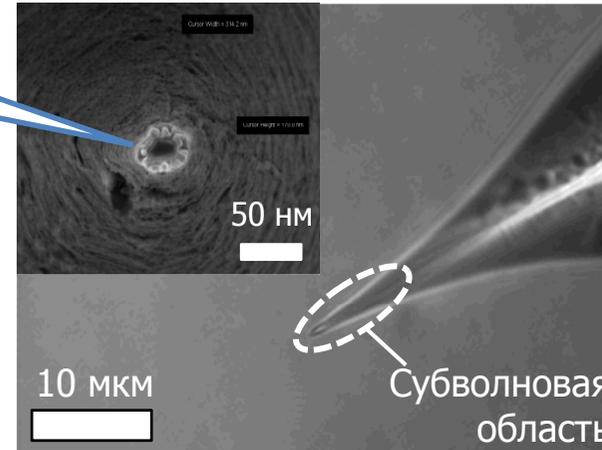
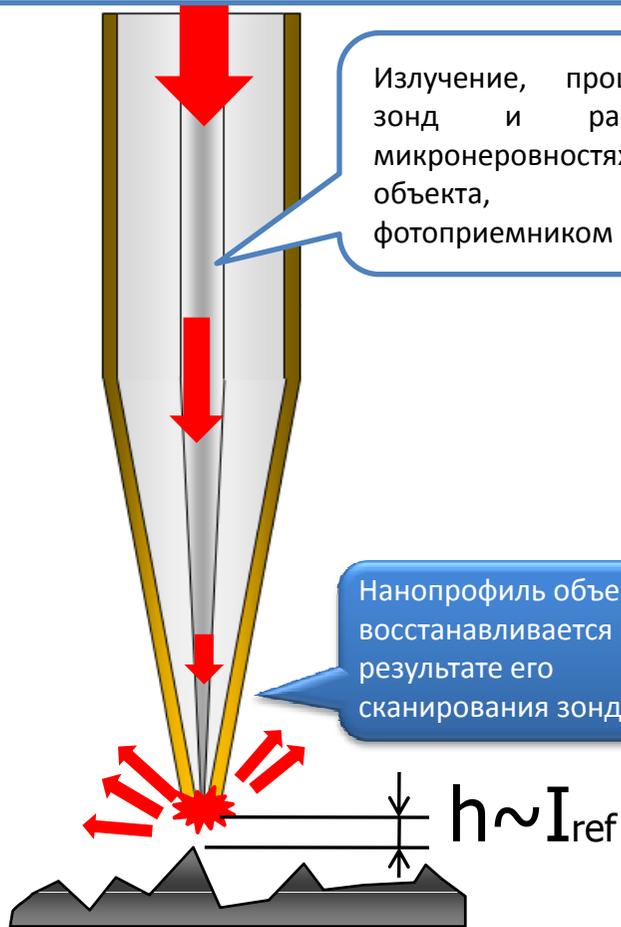
Институт автоматки и процессов управления
Дальневосточное отделение Российской Академии Наук

Традиционный подход к оптической микроскопии ближнего поля

Зонд микроскопа выполняется в виде сужающегося волоконного световода, покрытого металлической пленкой, на конце которого формируется наноразмерная апертура

Излучение, прошедшее через зонд и рассеянное на микронеровностях исследуемого объекта, регистрируется фотоприемником

Нанопрофиль объекта восстанавливается в результате его сканирования зондом



Недостаток традиционного подхода

Наличие сужающейся части приводит к сильному затуханию мощности излучения на выходе зонда

Пространственное разрешение метода ограничено значениями

$$\lambda/10 - \lambda/15$$

Переход от амплитудных принципов регистрации к интерферометрическим

Использование интерферометрических принципов регистрации вместо амплитудных приводит к значительному увеличению чувствительности



Можно увеличить разрешающую способность апертурных методов СБОМ за счет регистрации фазовых изменений

Интерферометр Фабри-Перо является одним из наиболее чувствительных типов интерферометров



Интерферометр Фабри-Перо позволяет преобразовывать фазовые сигналы в спектральные

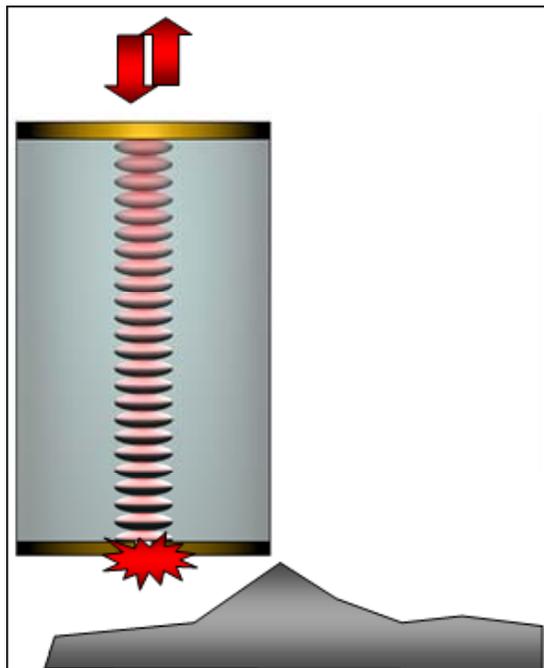
Цель работы:

Исследование возможности создания сканирующего зонда на основе волоконного интерферометра Фабри-Перо



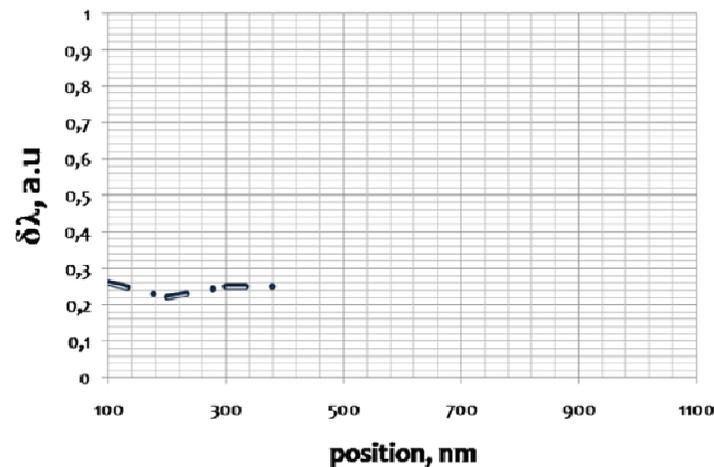
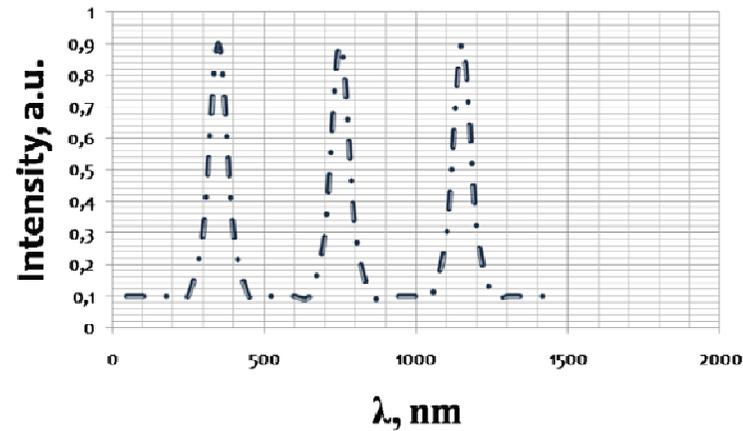
Зонд на основе волоконного интерферометра Фабри-Перо

В этом случае мы регистрируем малые фазовые изменения в самом интерферометре Фабри-Перо



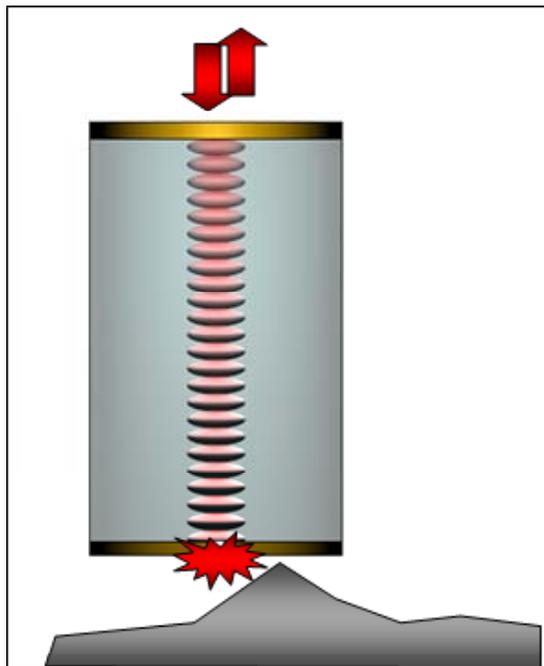
Используя информацию о величине сдвига $\delta\lambda$, мы можем определить расстояние между диафрагмой и исследуемым объектом

Фазовые изменения приводят к сдвигу резонансных длин волн в интерферометре



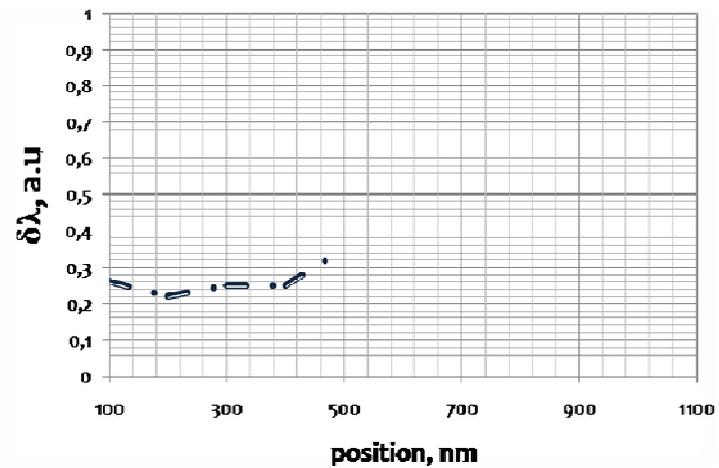
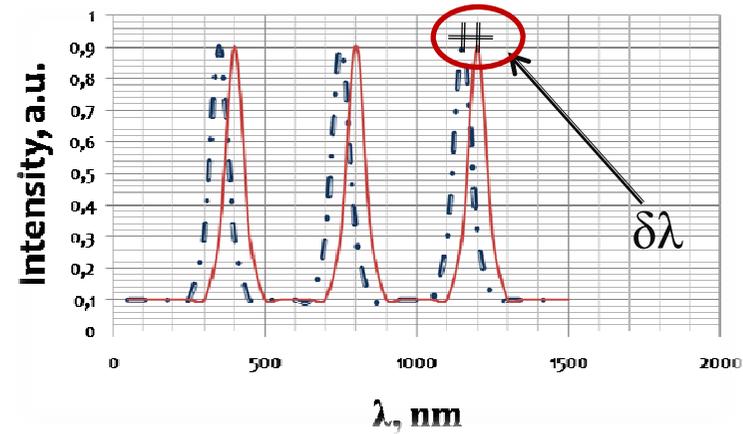
Зонд на основе волоконного интерферометра Фабри-Перо

В этом случае мы регистрируем малые фазовые изменения в самом интерферометре Фабри-Перо



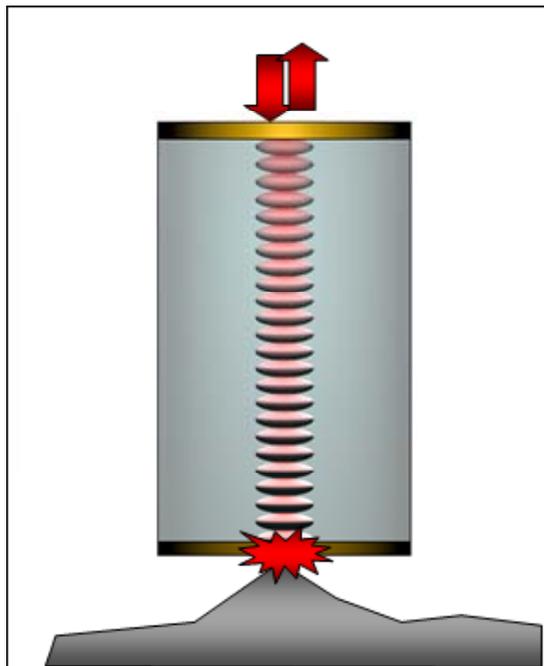
Используя информацию о величине сдвига $\delta\lambda$, мы можем определить расстояние между диафрагмой и исследуемым объектом

Фазовые изменения приводят к сдвигу резонансных длин волн в интерферометре



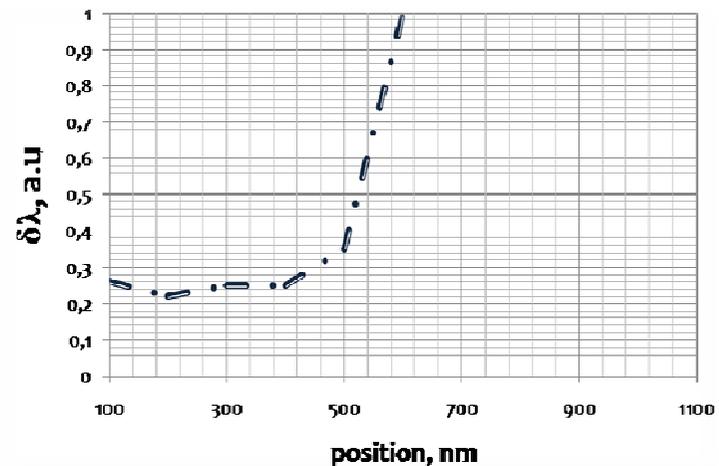
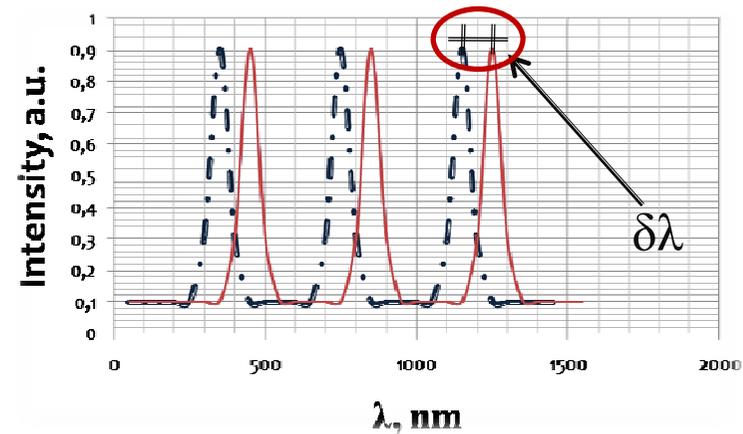
Зонд на основе волоконного интерферометра Фабри-Перо

В этом случае мы регистрируем малые фазовые изменения в самом интерферометре Фабри-Перо



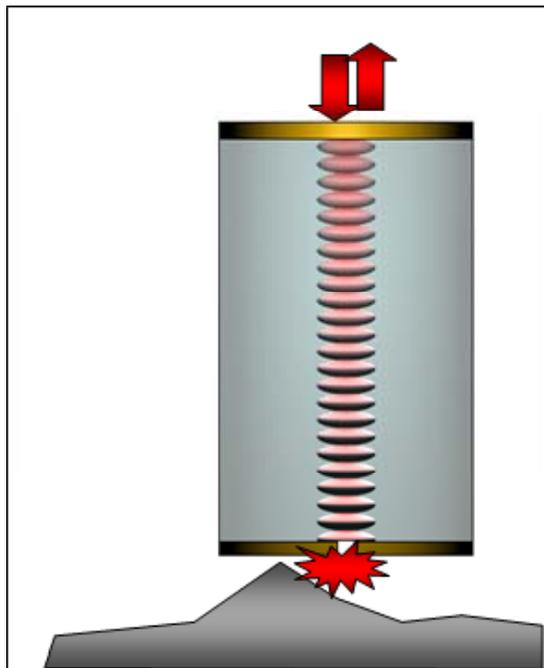
Используя информацию о величине сдвига $\delta\lambda$, мы можем определить расстояние между диафрагмой и исследуемым объектом

Фазовые изменения приводят к сдвигу резонансных длин волн в интерферометре



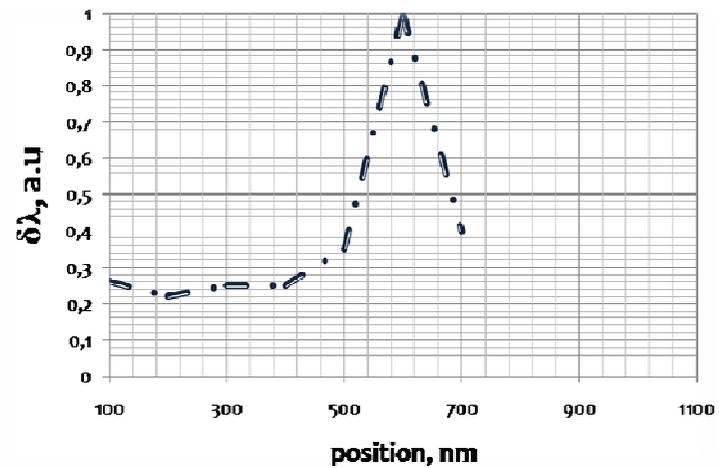
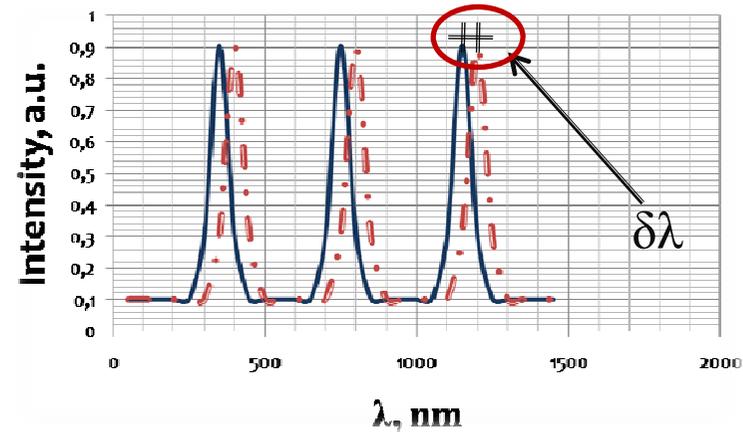
Зонд на основе волоконного интерферометра Фабри-Перо

В этом случае мы регистрируем малые фазовые изменения в самом интерферометре Фабри-Перо



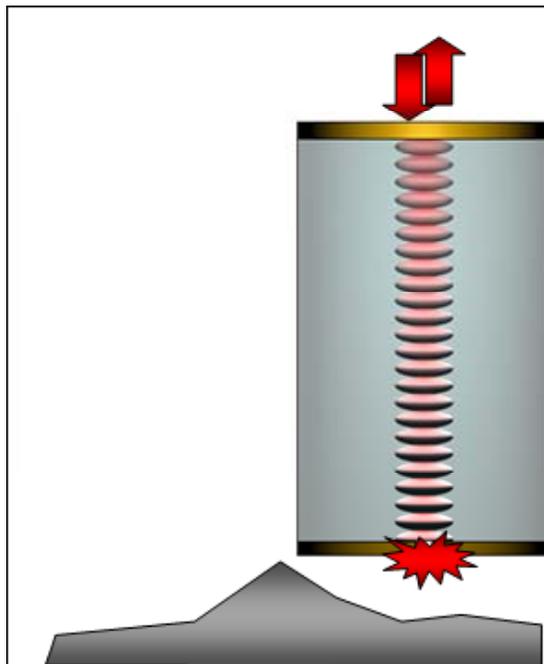
Используя информацию о величине сдвига $\delta\lambda$, мы можем определить расстояние между диафрагмой и исследуемым объектом

Фазовые изменения приводят к сдвигу резонансных длин волн в интерферометре



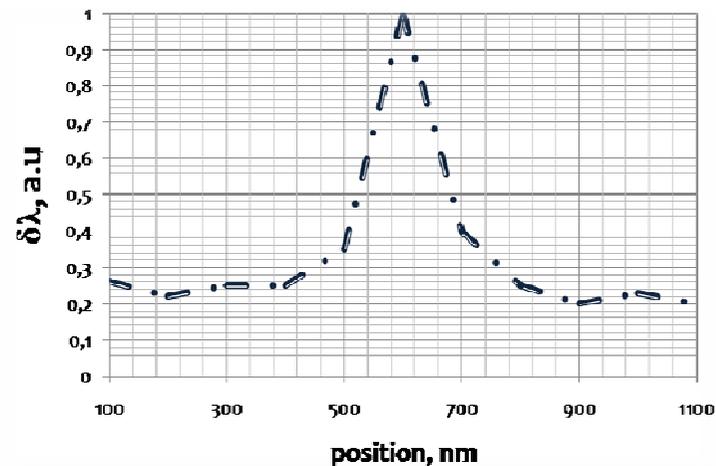
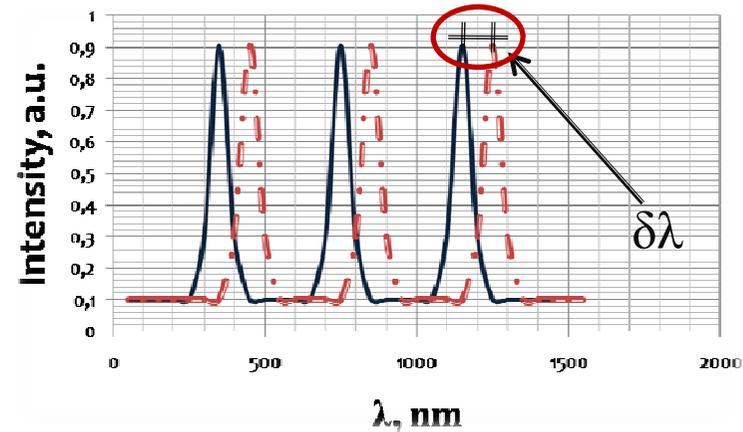
Зонд на основе волоконного интерферометра Фабри-Перо

В этом случае мы регистрируем малые фазовые изменения в самом интерферометре Фабри-Перо

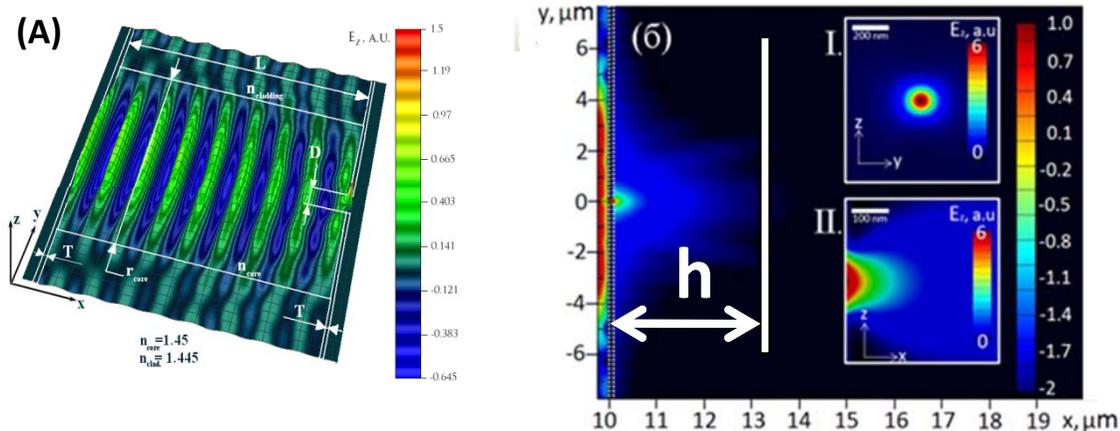


Используя информацию о величине сдвига $\delta\lambda$, мы можем определить расстояние между диафрагмой и исследуемым объектом

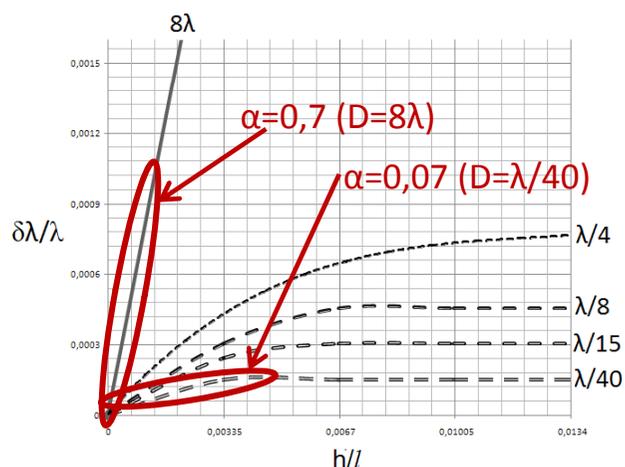
Фазовые изменения приводят к сдвигу резонансных длин волн в интерферометре



Исследование зависимости величины сдвига резонансного максимума $\delta\lambda$ от изменения расстояния h между диафрагмой интерферометра и исследуемым объектом с использованием FDTD-метода



Пространственное распределение E_z компоненты электрического поля в плоскопараллельном резонаторе Фабри-Перо (A) и на выходе субволновой диафрагмы (B)



Зависимость относительного сдвига резонансного максимума $\varepsilon = \delta\lambda/\lambda$ от относительного изменения расстояния h/l для диафрагм с различным диаметром

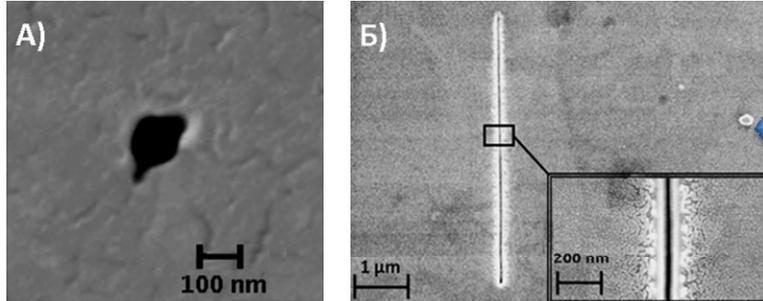
Крутизна линейного участка зависимости $\varepsilon(h/l)$

$$\alpha = \lambda \cdot \nu_1 / \lambda \cdot \delta \lambda / l$$

определяет чувствительность зонда к продольному перемещению объекта

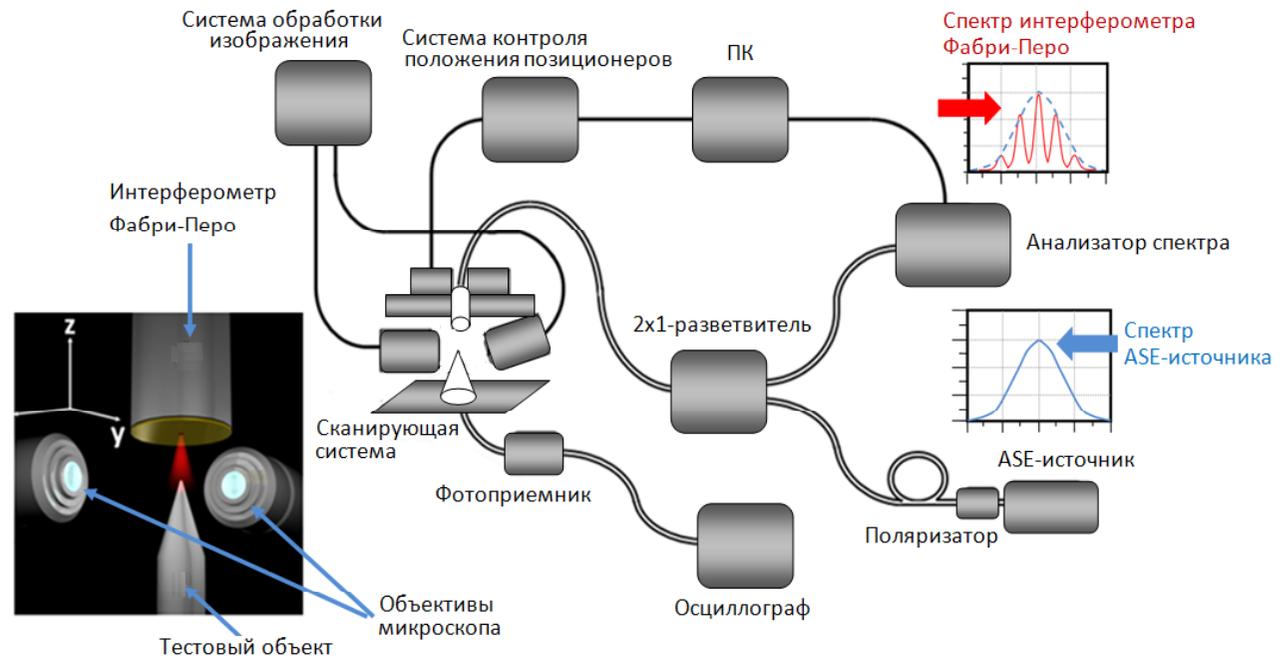
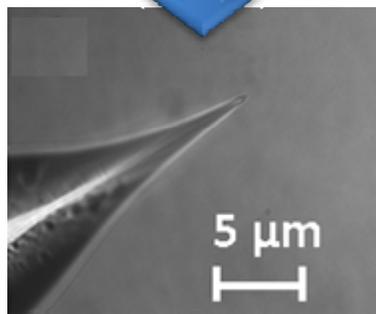


Экспериментальное исследование зонда на основе волоконного интерферометра Фабри-Перо

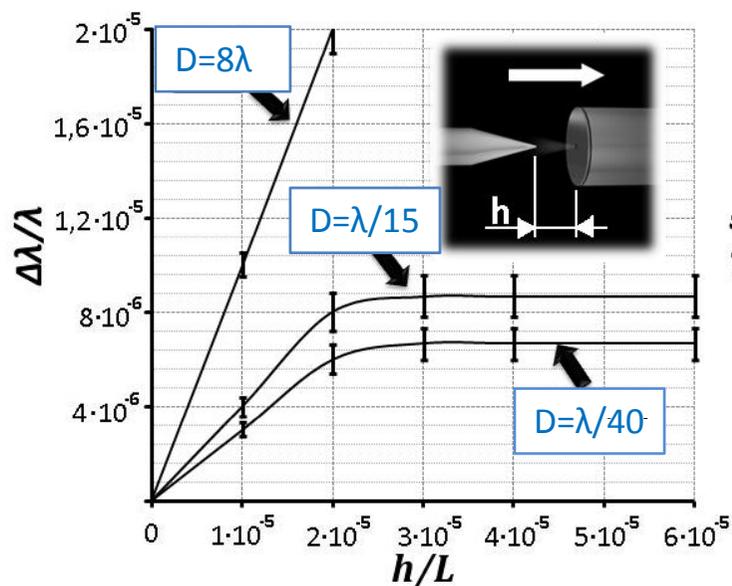


Диафрагма щелевой формы соответствует численному расчету, в котором рассматривался планарный интерферометр, что предполагает неограниченную протяженность диафрагмы вдоль одной из осей.

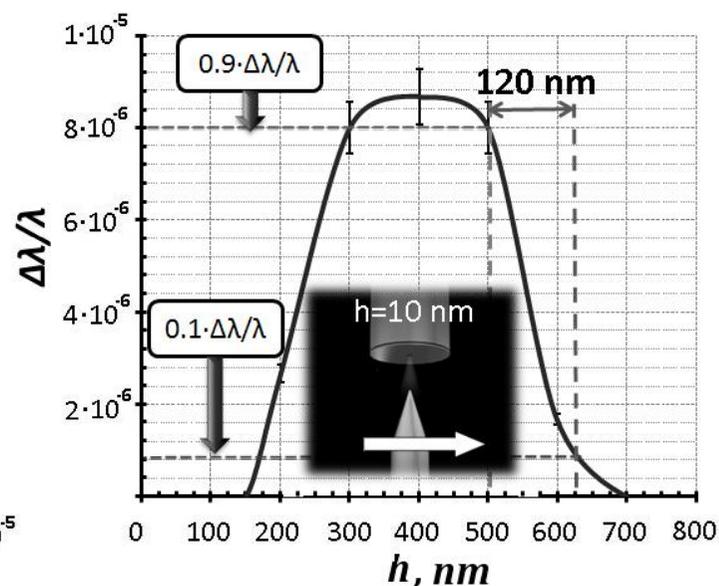
В качестве тестового объекта использовался суженный конусообразный волоконный световод с радиусом кривизны наконечника ~ 300 нм



Экспериментальные зависимости $\delta\lambda/\lambda(h)$ при перемещении тестового объекта в вертикальном и горизонтальном направлении



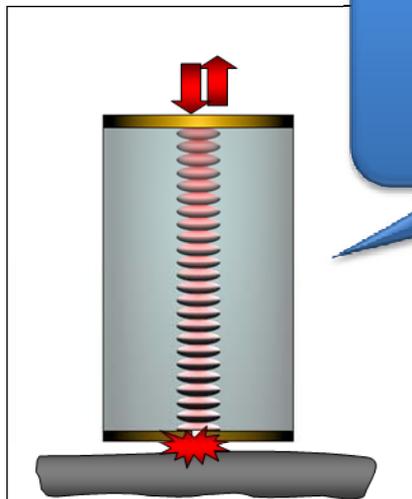
Зависимость $\Delta\lambda/\lambda(h/L)$ при приближении/отдалении тестового объекта относительно диафрагмы для случая $D=8\lambda$, $D=\lambda/15$, $D=\lambda/40$. Экспериментальная чувствительность к продольному перемещению объекта приблизительно в 2 раза больше значения, полученного при численном моделировании.



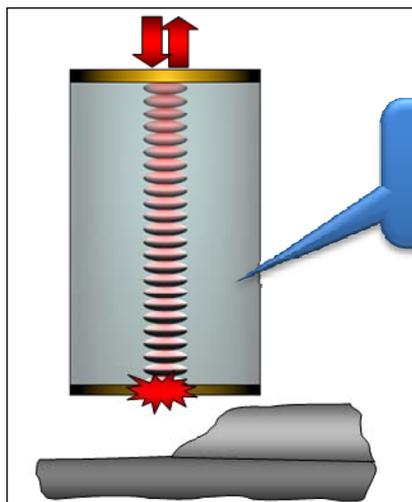
Зависимость $\Delta\lambda/\lambda(h)$ при горизонтальном сканировании наконечника исследуемого объекта резонатором с диафрагмой круглой формы при расстоянии h между исследуемым объектом и диафрагмой $\sim 10 \text{ nm}$.



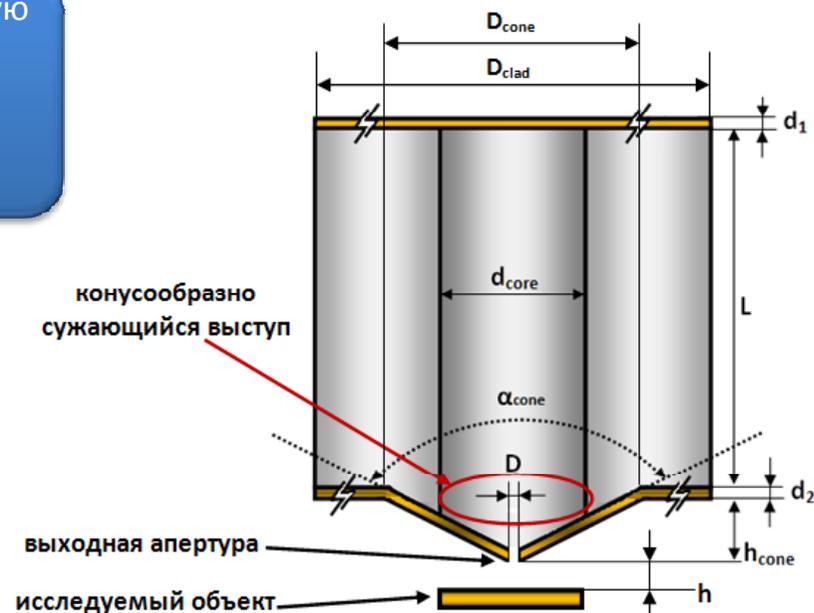
Недостатки предложенного подхода



Необходимо поддерживать строгую параллельность исследуемого образца и выходного зеркала интерферометра во время сканирования



Исследуемый объект должен быть достаточно гладким

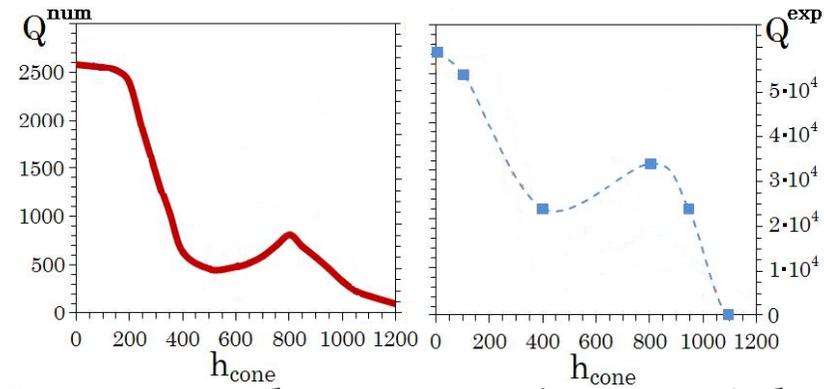
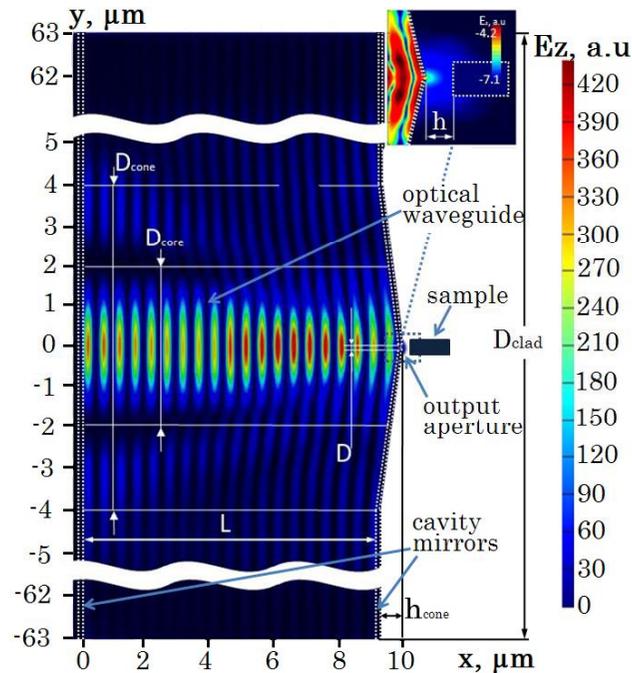


Наличие выступа приведет к уменьшению добротности интерферометра

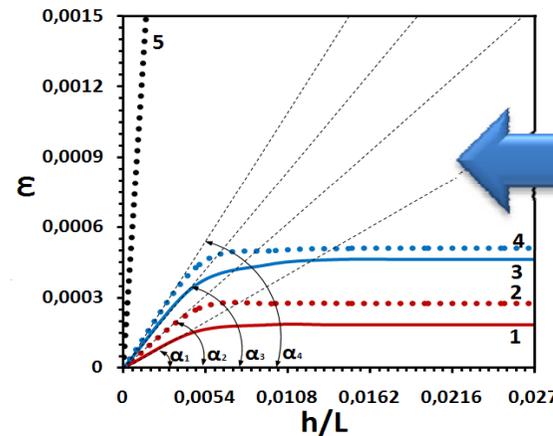


Исследование интерферометра Фабри-Перо с конусообразным выступом с применением FDTD-метода

Распределение E_z в резонаторе Фабри-Перо и на выходе субволновой диафрагмы размером $D=100$ нм (использовано логарифмическое масштабирование)



Зависимость добротности интерферометра Фабри-Перо Q от высоты конусообразной структуры h_{cone}



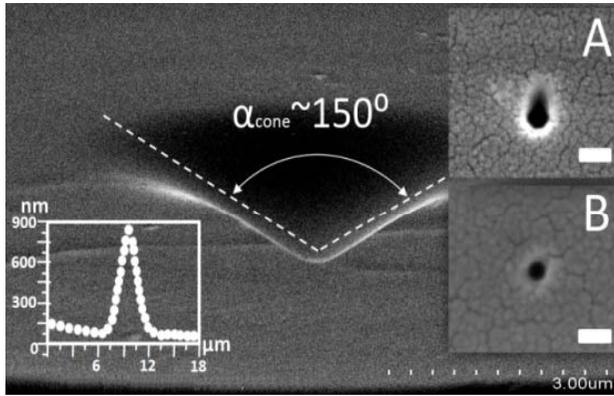
Чувствительность зонда с конусообразным выступом к перемещению объекта меньше приблизительно в 1,5 раза, чем для плоскопараллельного случая

Зависимость $\epsilon = \delta\lambda/\lambda$ от h/L для диафрагм с различным диаметром $D=100$ нм и 50 нм (точечные линии 2,4 – случай плоскопараллельного резонатора с аналогичными значениями D)

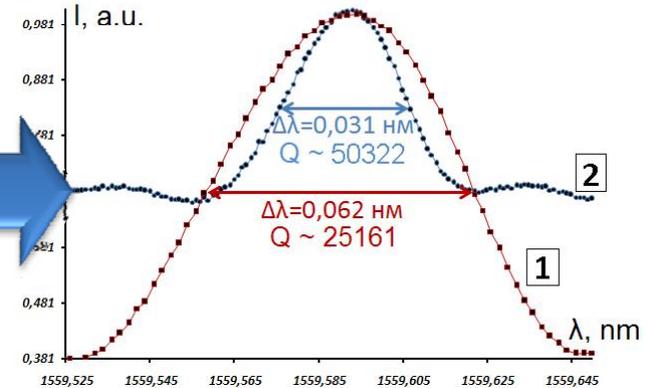


Экспериментальное исследование зависимости величины сдвига резонансного максимума $\delta\lambda$ от изменения расстояния h

Конусообразный вырост на торце волоконного световода формировался методом химического травления световода с оптической сердцевиной допированной Ge в растворе HF и NH₄OH



Снижение добротности по сравнению со случаем плоскопараллельного интерферометра Фабри-Перо



В качестве тестового объекта использовался кантилевер атомно-силового микроскопа покрытый тонкой пленкой золота.

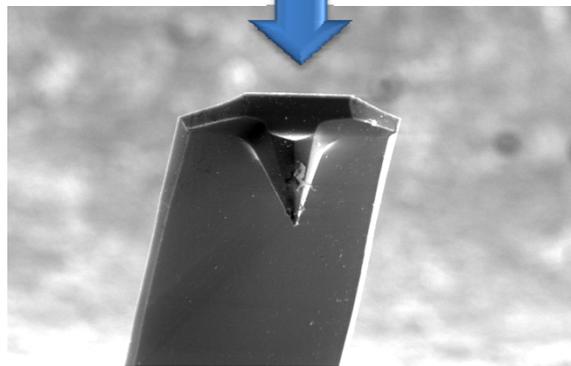
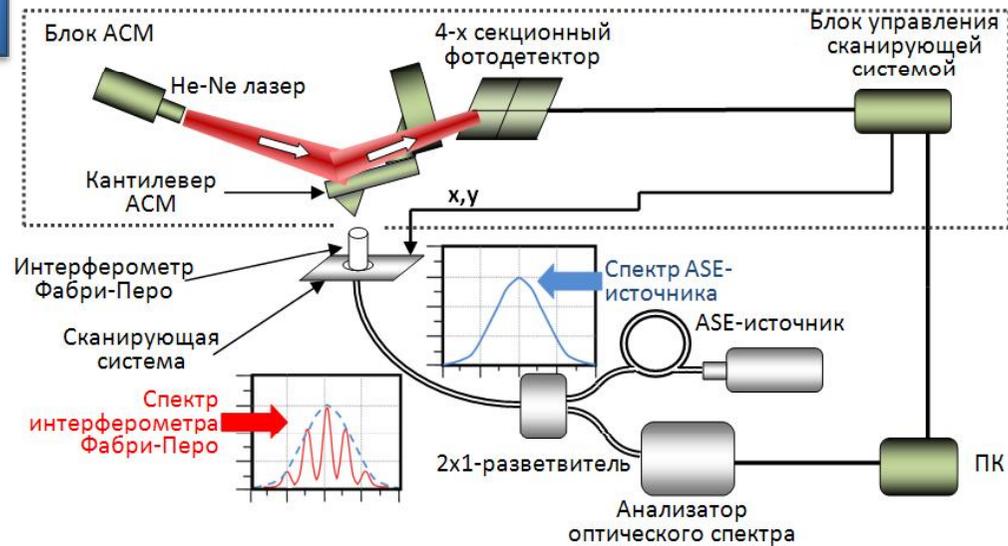
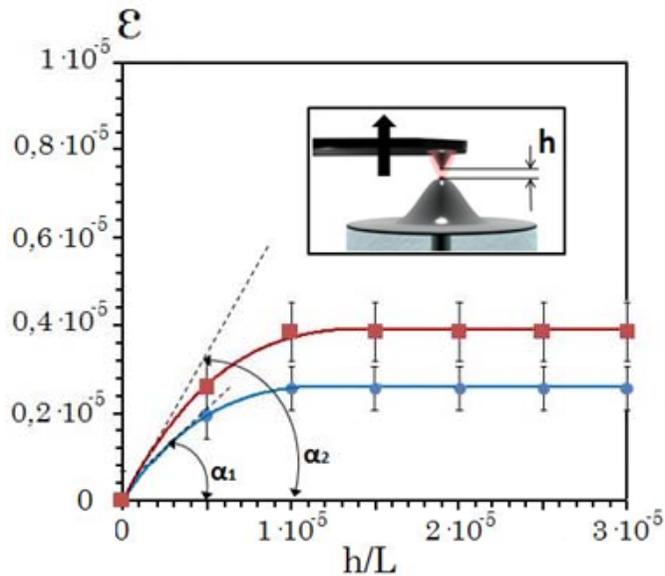


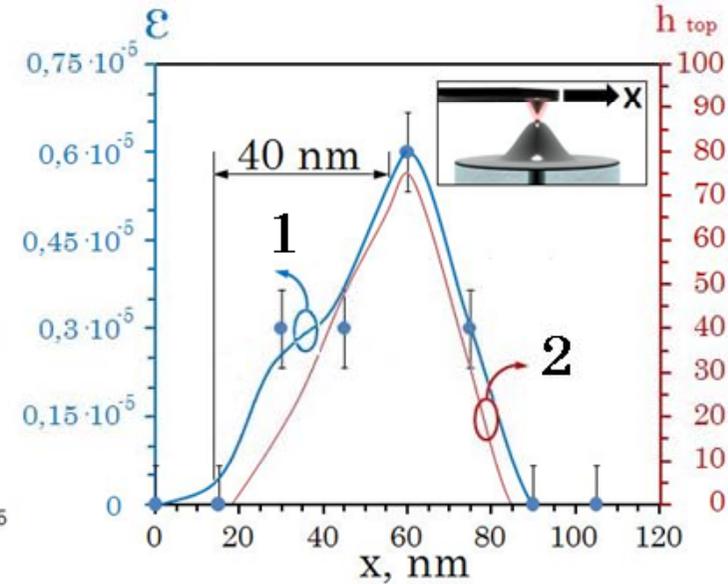
Схема экспериментальной установки



Зависимости $\delta\lambda(h)$ при перемещении тестового объекта в вертикальном и горизонтальном направлении



Зависимость относительного смещения резонансного максимума $\epsilon(h/L)$ при вертикальном перемещении тестового объекта относительно диафрагмы для случая диафрагмы с диаметром $D=100$ nm и $D=50$ nm.



Результаты сканирования наконечника кантилевера атомно-силового микроскопа зондом с диафрагмой $D=50$ nm: профиль наконечника, восстановленный по величине сдвига резонансной (кривая 1), в сравнении с реальной топографией, полученной при помощи АСМ (кривая 2)



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована возможность создания сканирующего апертурного зонда на основе волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо с субволновой диафрагмой, сформированной в его выходном зеркале

Экспериментально и численно на основе конечно-разностного метода исследована зависимость величины сдвига резонансных максимумов $\delta\lambda$ в интерферометре Фабри-Перо от изменения расстояния h между тестовым объектом и диафрагмой для разных диаметров D диафрагм.

Продемонстрировано максимальное пространственное разрешение порядка 40 нм, что соответствует значению $\lambda/40$ для длины волны $\lambda=1550$ нм.



Спасибо за внимание!

