

**Оптическая спектроскопия высокого
пространственного разрешения
(ближнепольная оптическая
сканирующая микроскопия - NSOM)**

Д. Лебедев

План доклада

Ближнепольная сканирующая оптическая микроскопия (БСОМ)

- Дифракционный предел и способ его преодоления (основы формирования изображения)
- Общие схемы работы БСОМ-установок
- Первые эксперименты

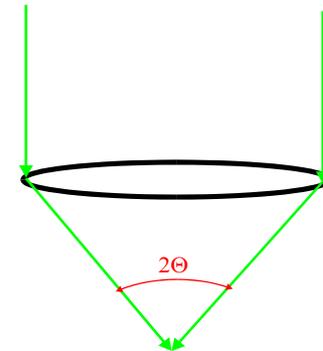
Задачи физики, демонстрирующие возможности метода

- Спектроскопия одиночных квантовых точек
- Распространение полей в оптических резонаторах

Ограничения оптики дальнего поля

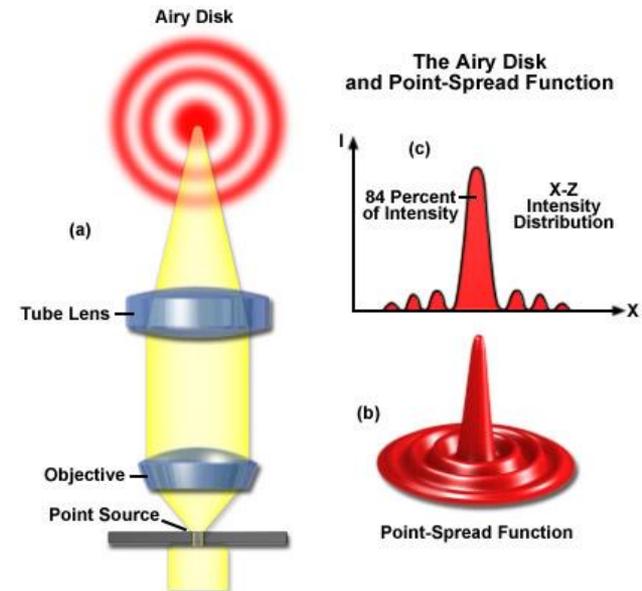
Дифракционный предел (Э. Аббе)

$$d = \frac{\lambda}{2n \sin \theta}$$

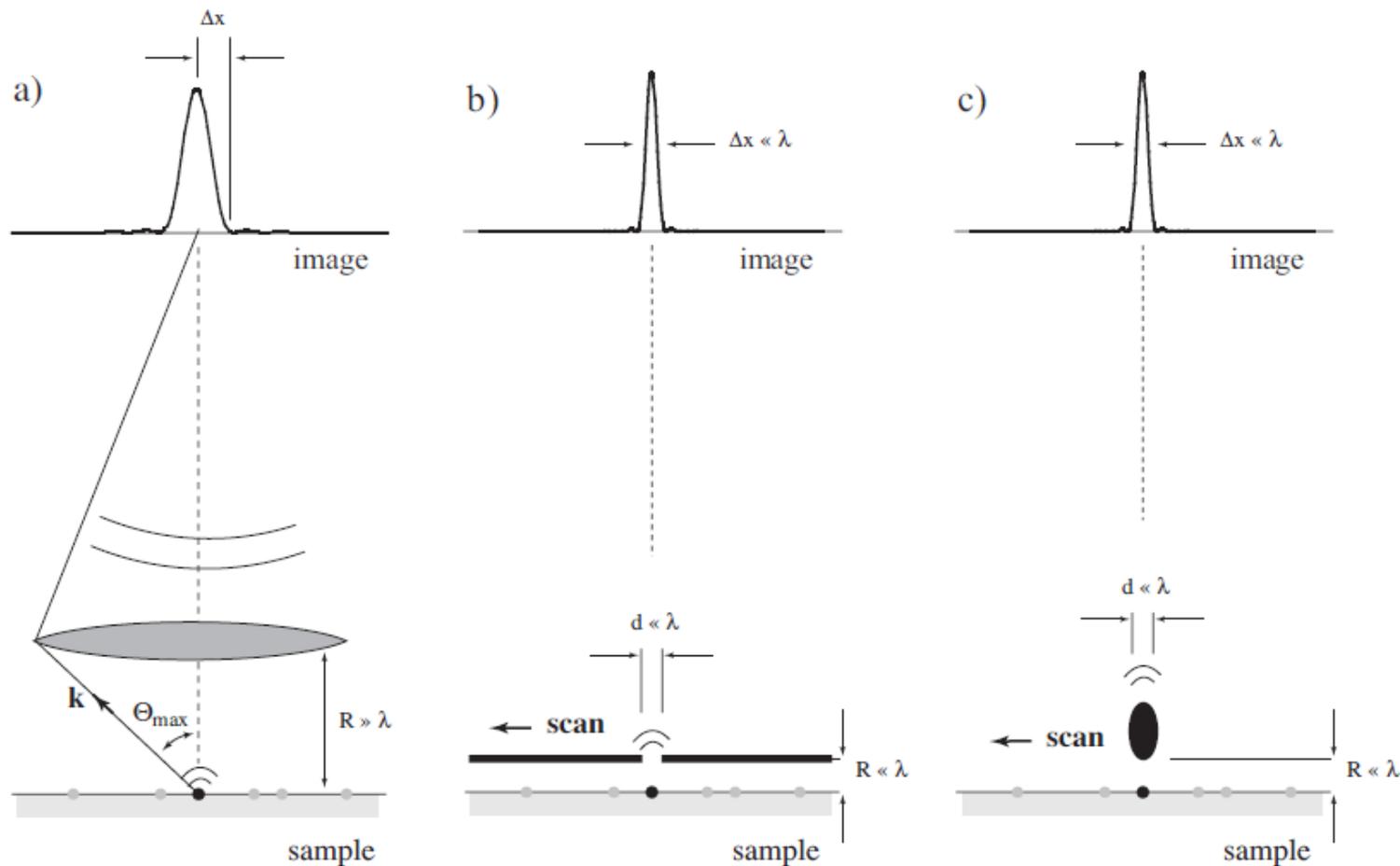


Разрешение оптического микроскопа

$$\Delta x \approx 0.61 \frac{\lambda}{n \sin \theta}$$



Основная идея БСОМ



a) оптическая микроскопия b) апертурная БОМ c) безапертурная БОМ

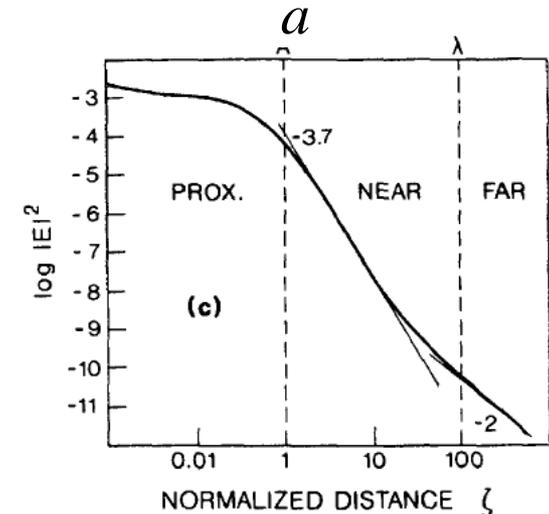
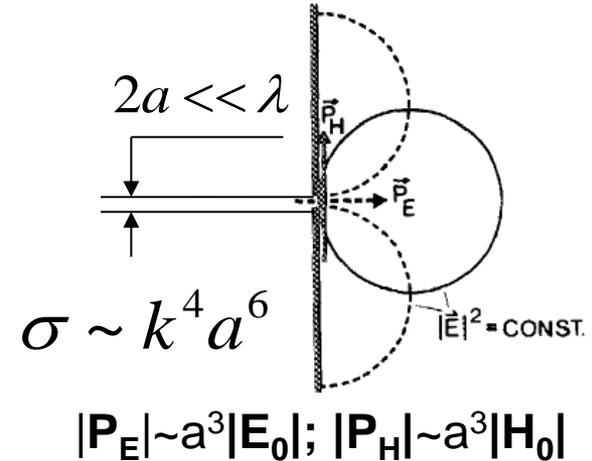
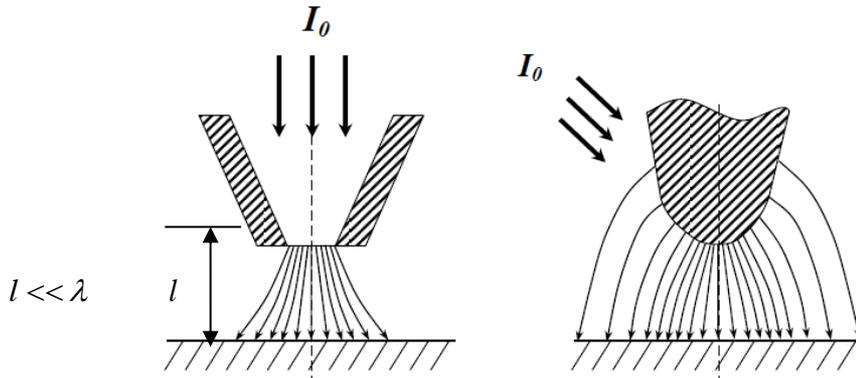
Формирование изображения в БСОМ

Соотношение неопределенности:

$$\Delta x \geq \frac{1}{2\Delta k_x} \quad k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}$$

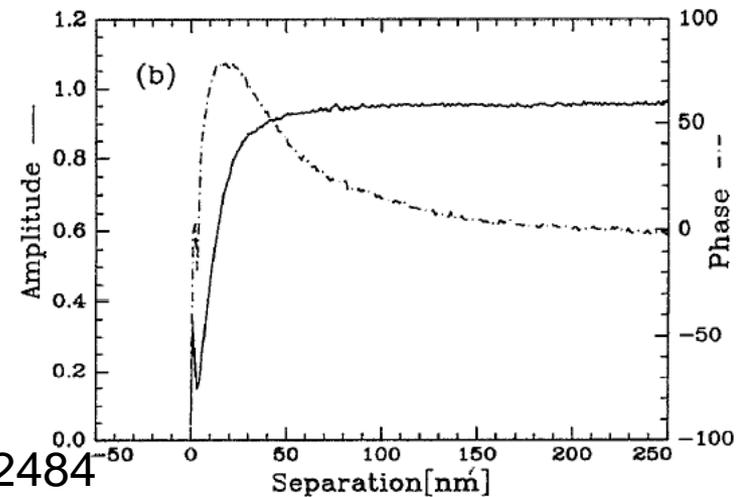
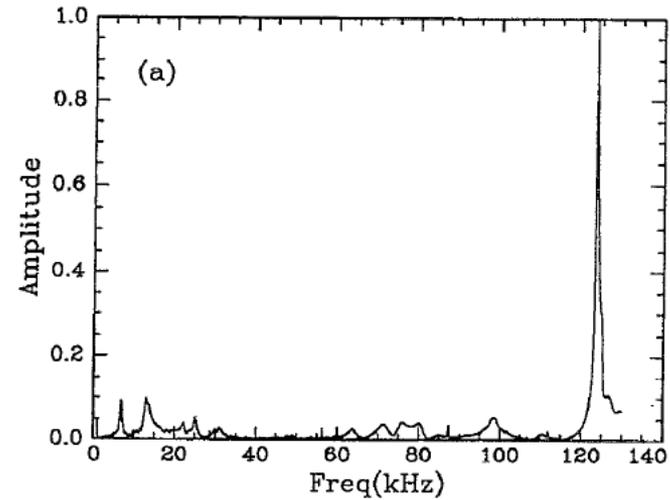
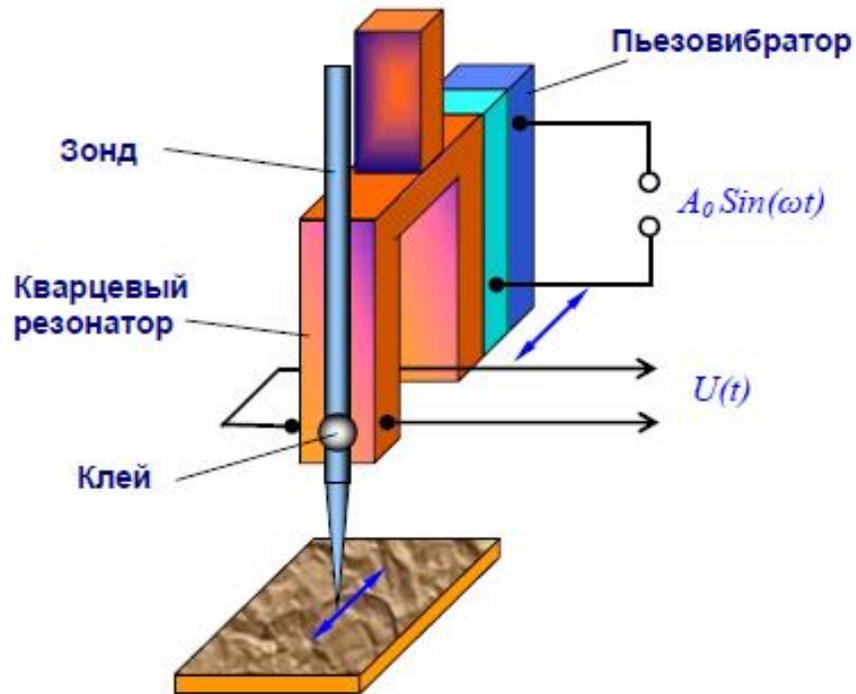
$$k_y = 0 \quad k_z = -i\gamma \quad k_x = (k^2 + \gamma^2)^{1/2}$$

$$E(z) = E(0) \exp(-\gamma z)$$



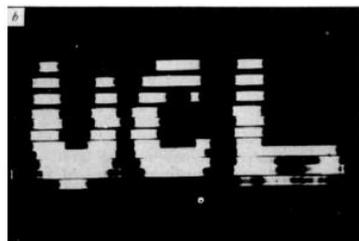
D.W. Pohl, JAP, V. **59**, N10, P3318
 H. Bethe, Phys. Rev., V. **66**, P163

Контроль расстояния «зонд-поверхность»



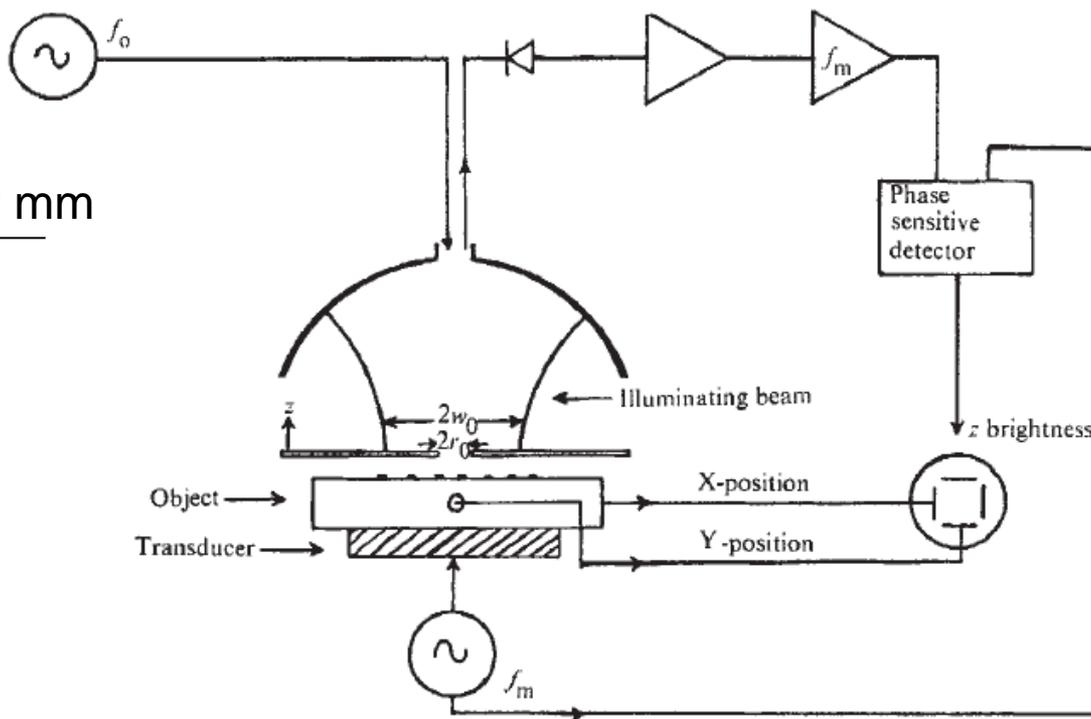
Прообразы ближнепольного микроскопа

- E. Syngé (идея использования субволновой апертуры) 1928г.
- E. Ash, G. Nicholls
Nature, V.237, 1972, p. 510



$d=1.5 \text{ mm}$
 $\lambda=3 \text{ cm}$

Разрешение $\lambda/15!$

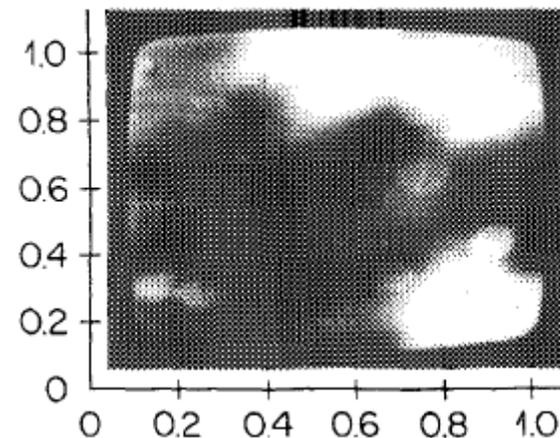
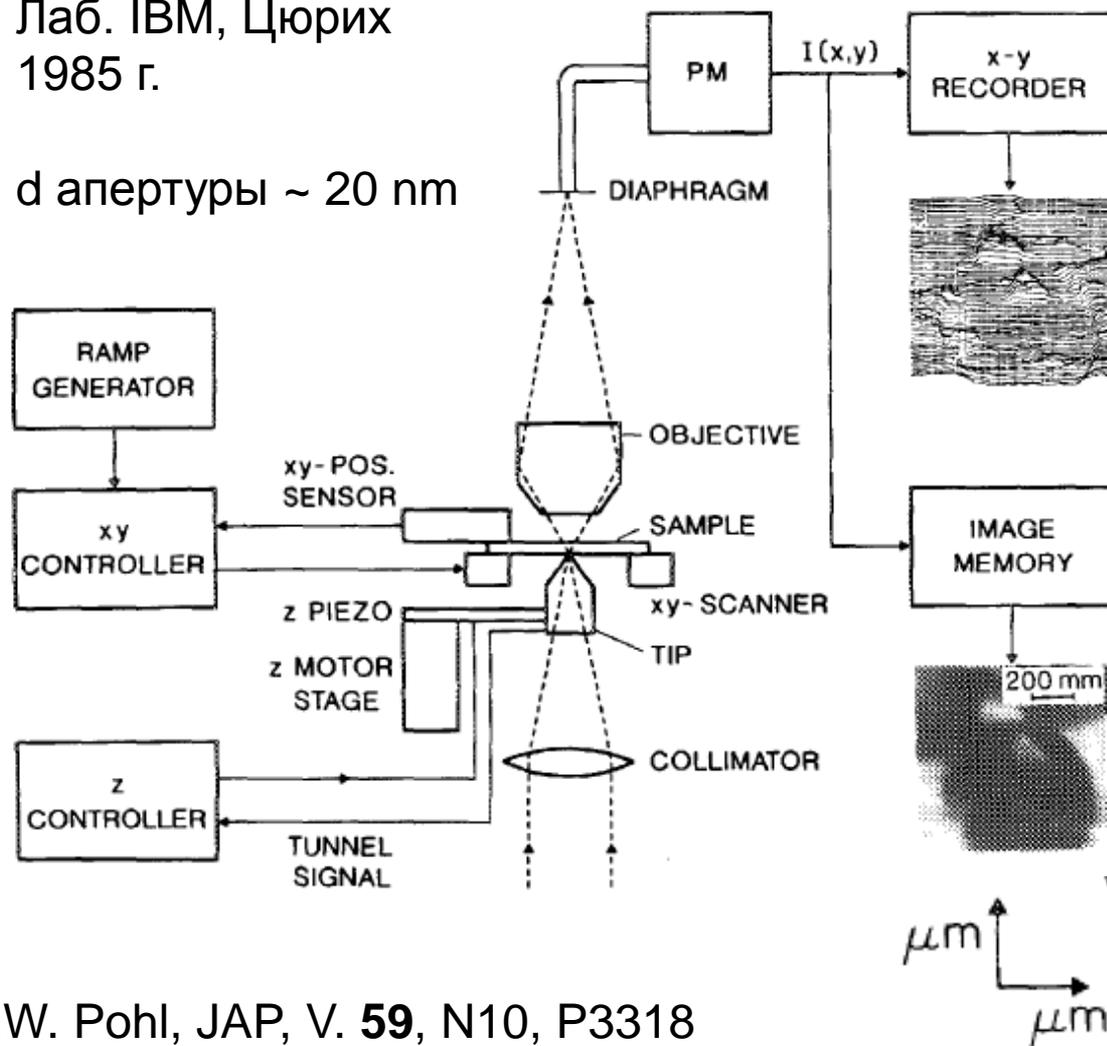


Первый ближнепольный микроскоп

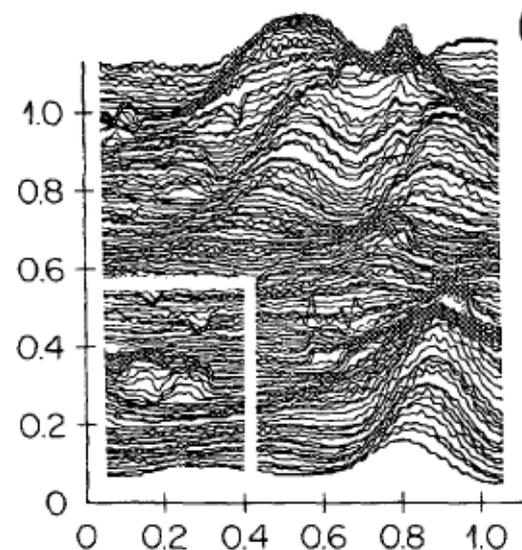
(a)

Лаб. IBM, Цюрих
1985 г.

d апертуры ~ 20 nm

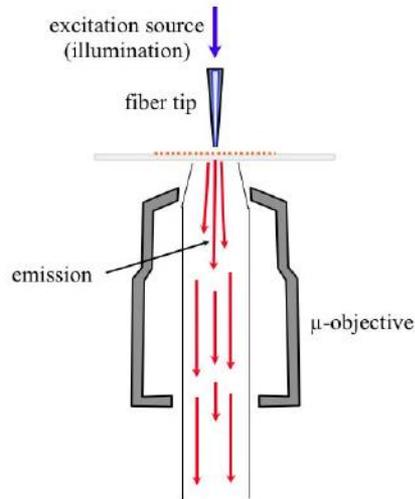


(c)

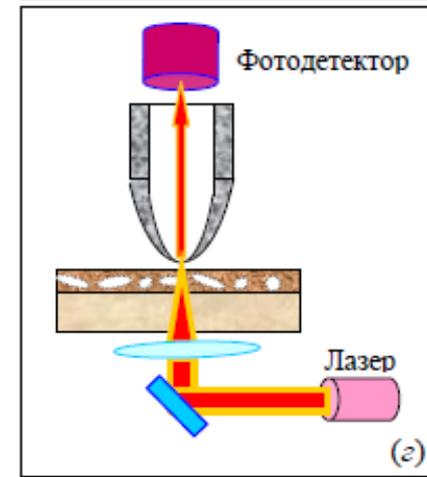
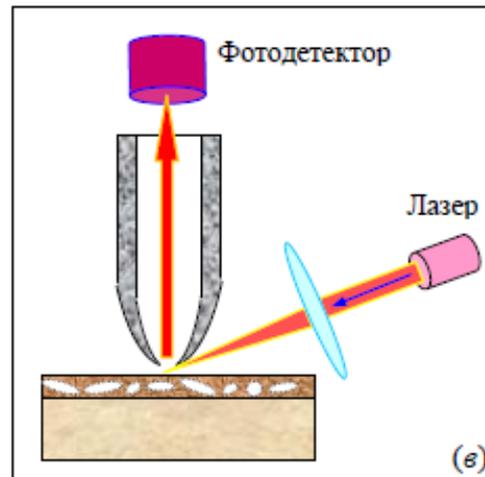
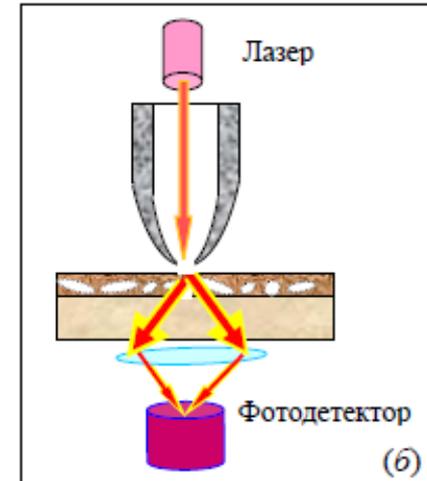
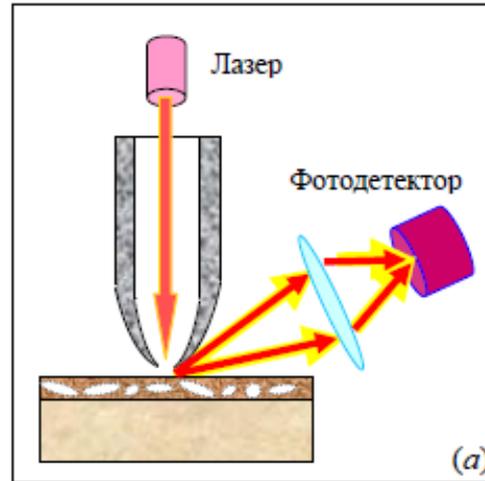
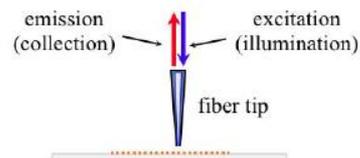


Режимы работы ближнепольного микроскопа

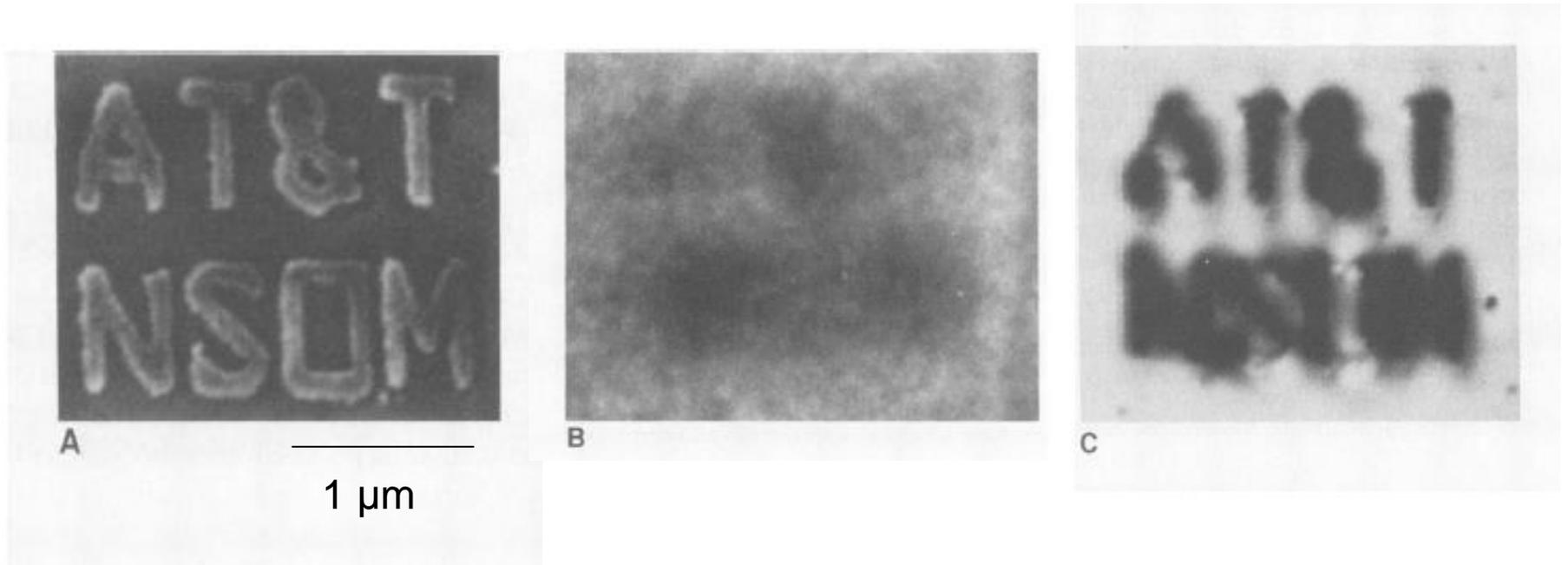
Illumination Mode (I-mode)



Collection-Illumination Mode (CI-mode)



Первые эксперименты



a) SEM;

b) optical microscope 100X, 0.9 NA ;

c) NSOM

E. Betzig, Science, vol. **257**, p. 189

E. Betzig, Science, vol. **251**, p. 1468

Разрешение $\lambda/40!$

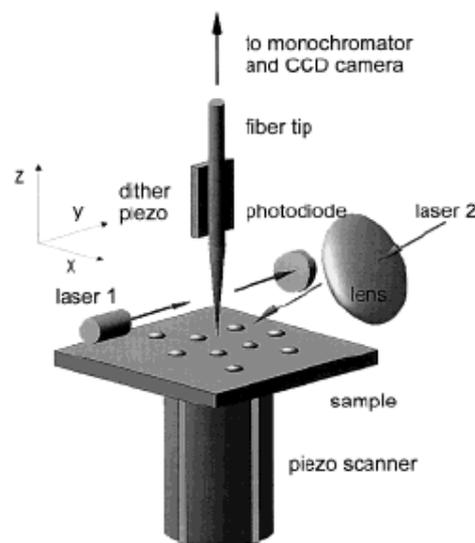
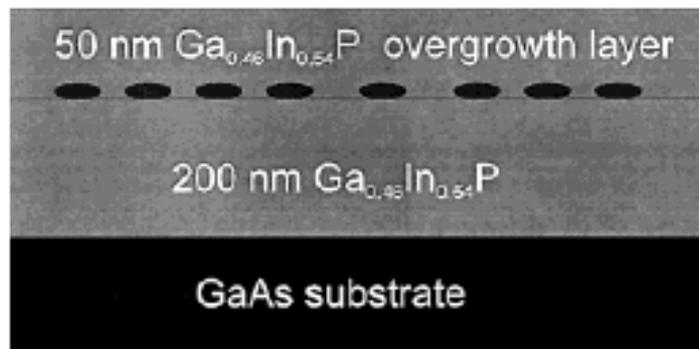
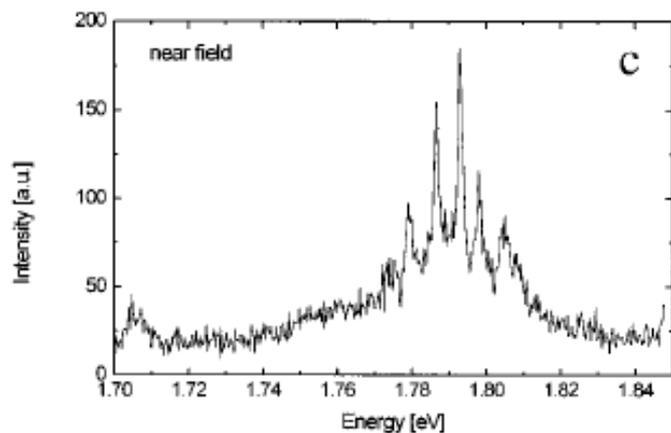
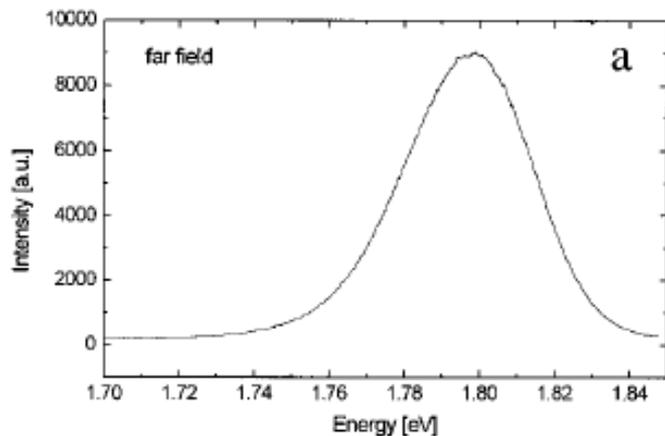
Спектроскопия одиночных

InP QDs

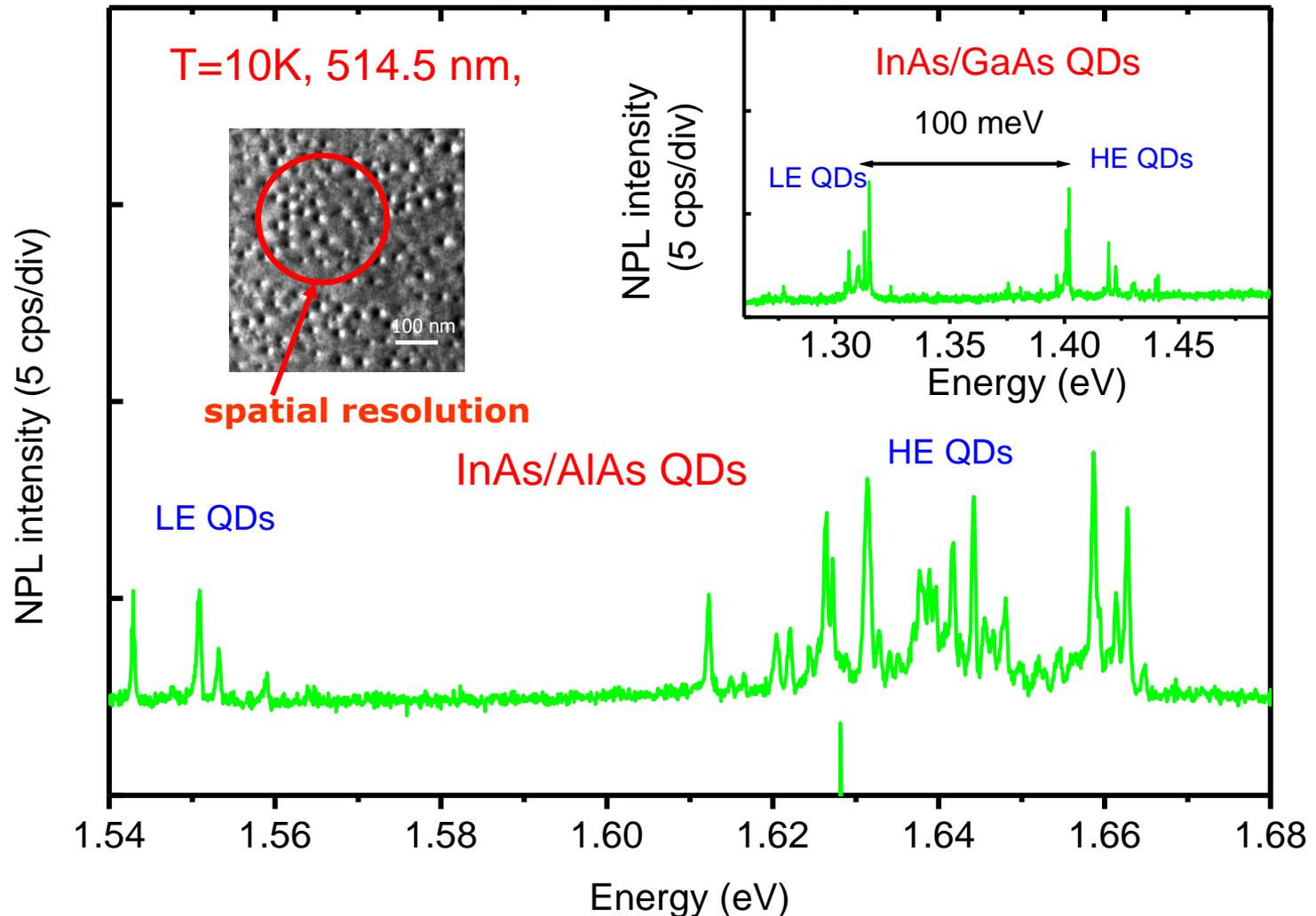
Плотность 500 на μm^2

T=4K

КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

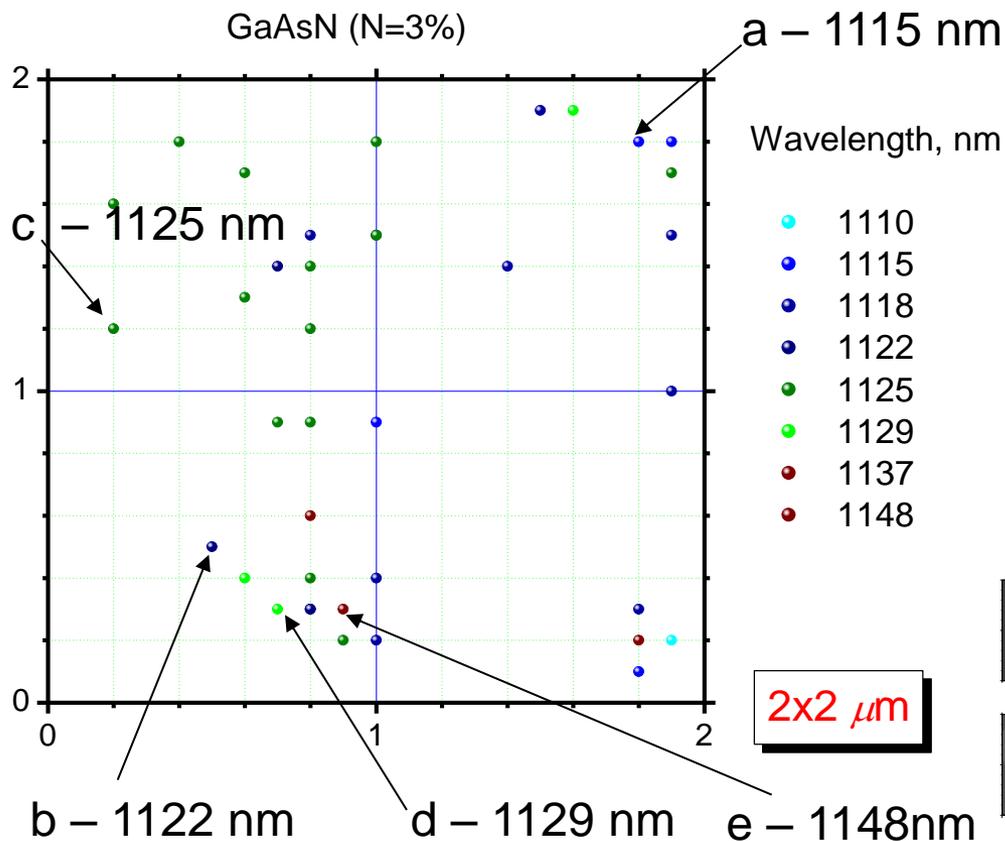


Распределение по размерам квантовых точек InAs

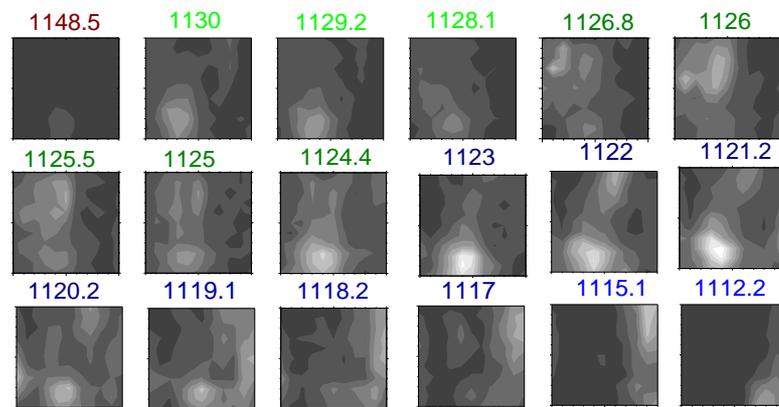
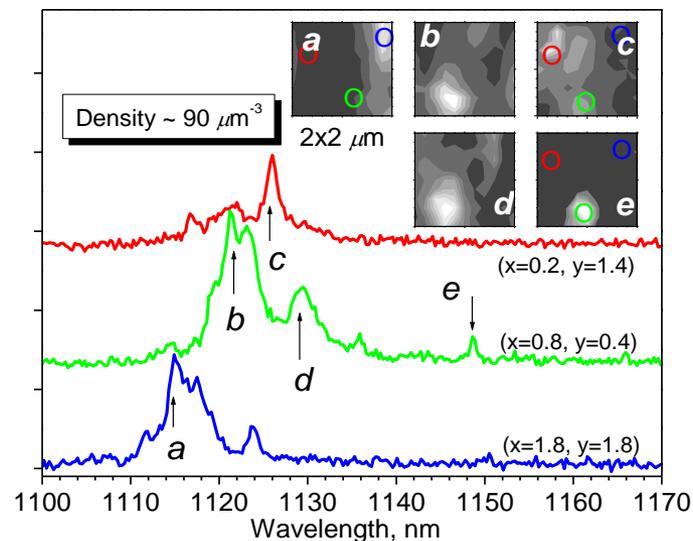


Распределение массива квантовых точек в GaAsN (N=3%)

QD location map



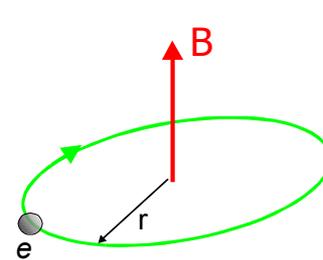
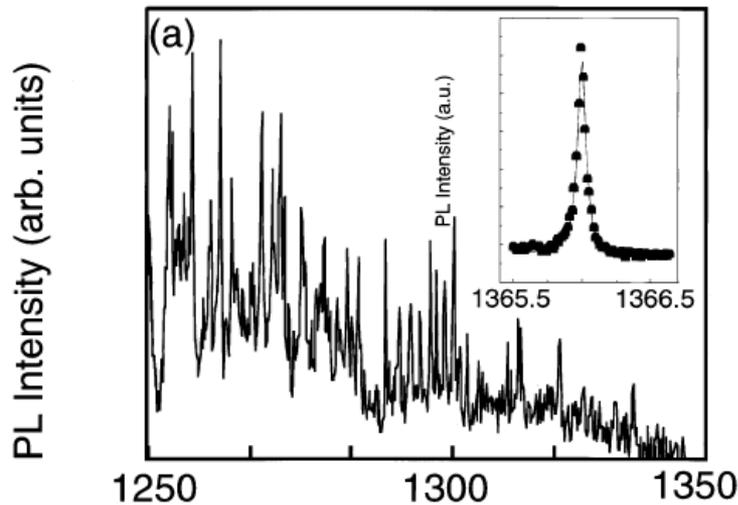
Spatially resolve spectra



a

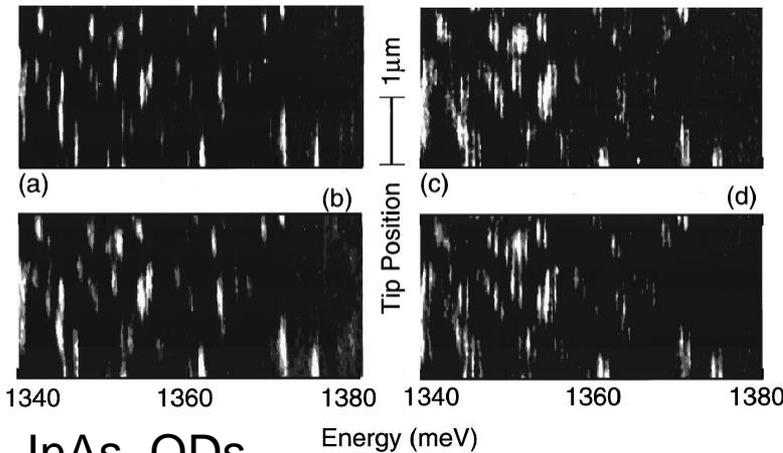
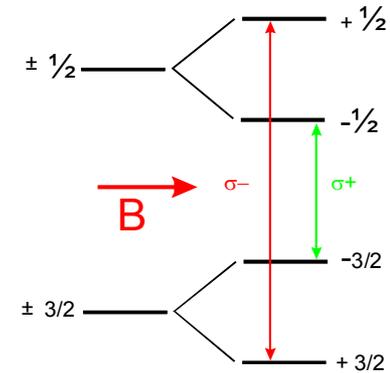
Зеемановское расщепление

diamagnetic shift (β): Zeeman splitting:



$$M \sim B * r^2$$

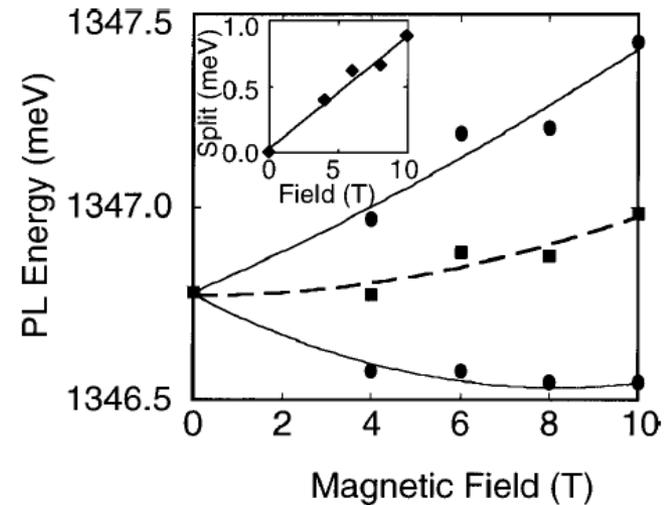
$$E = M * B = \beta B^2$$



InAs QDs

Плотность $\sim 10^{10}$ на cm^2

Y. Toda et al, APL, v. **73**, p. 517



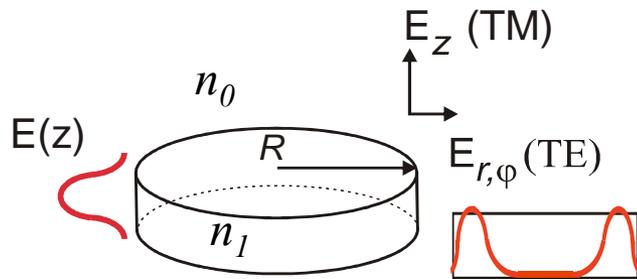
$$\beta = 2 \mu eV / T^2$$

$$\langle \rho^2 \rangle = 20 \text{ nm}$$

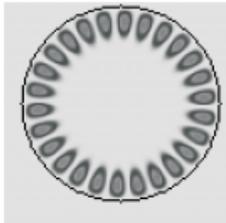
Распределение полей в

микродисковых резонаторах

Моды шепчущей галереи:



$TE_{13,1}$



$$E \sim J_m(2\pi n_{\text{eff}} r / \lambda_{m,n}) e^{im\phi}$$

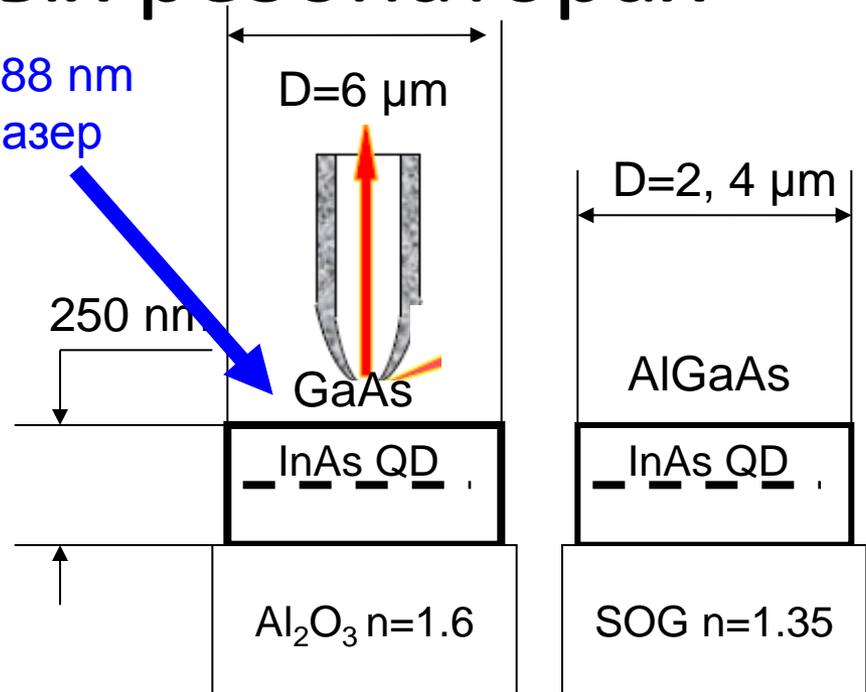
$J_m(x)$ - Bessel function

m - azimuthal number ($2m$ intensity maxima)

n - radial number

Расчет $n_{\text{eff}} \lambda_{m,n}$ - M. K. Chin et al, Appl. Phys. Lett. 1993

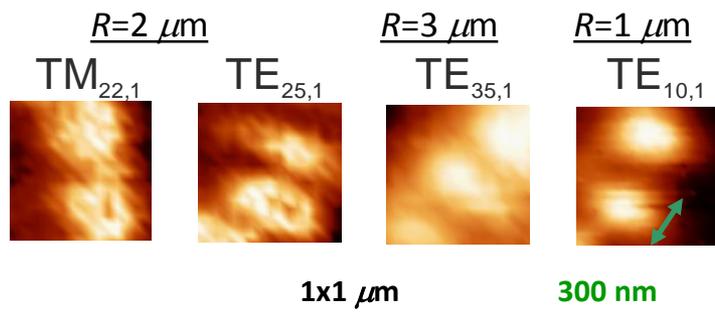
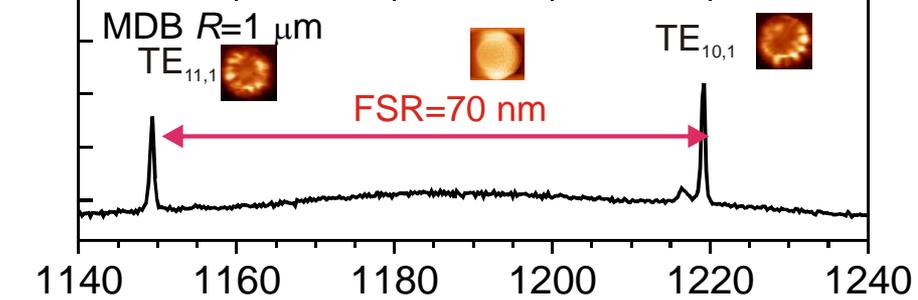
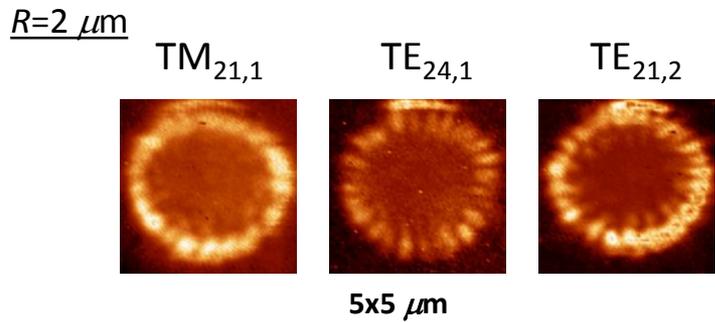
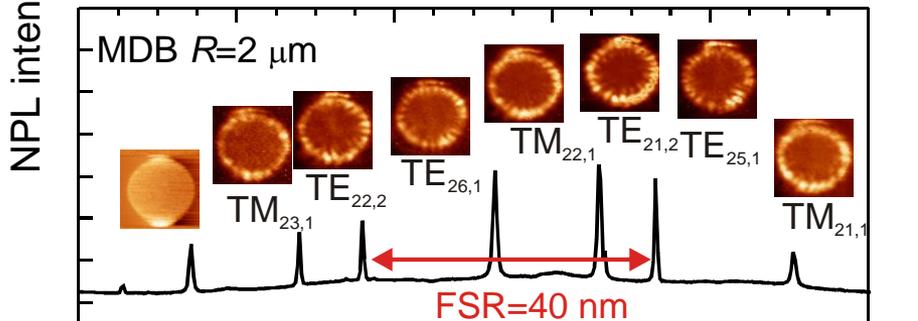
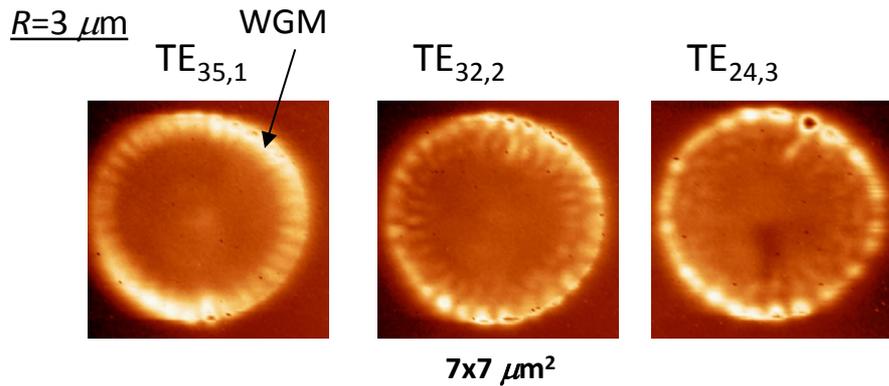
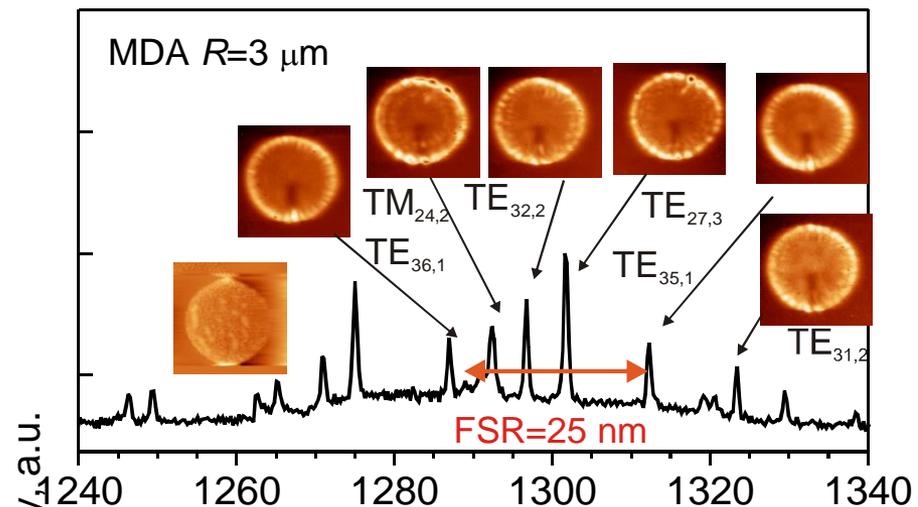
488 nm
лазер



A. M. Mintairov

Phys. Rev. B, v.77, p.195322

NSOM изображения микродисков



Спасибо за внимание!