

ナノ光学と近接場光学顕微鏡の基礎

慶應義塾大学 理工学部 電子工学科
神奈川科学技術アカデミー

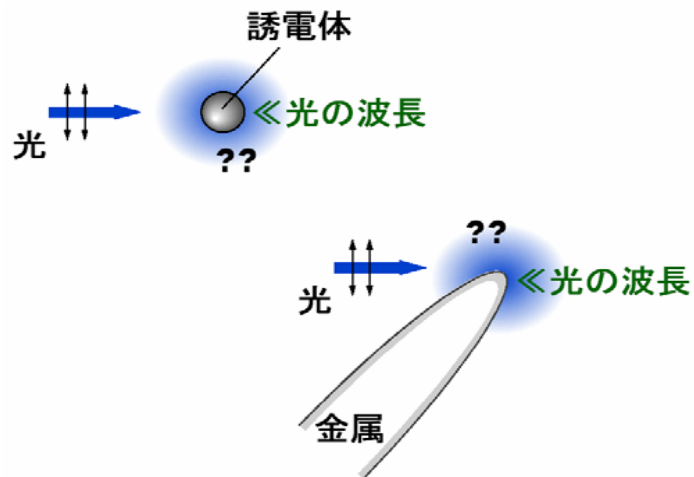
齋木 敏治

ナノ光学へのイントロダクション

アウトライン

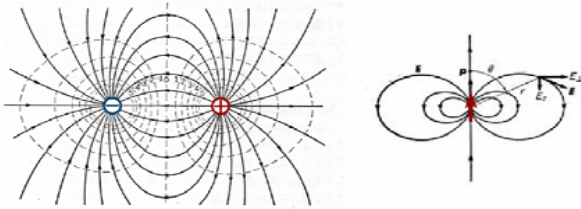
- ナノ光学へのイントロダクション
- 近接場光学顕微鏡の原理・歴史・基本性能
- 微小開口の光学
- 量子ドットに閉じ込められた電子の波動関数を見る
- ナノスケールに閉じ込められた光と電子の相互作用 -

近接場光とは・・・



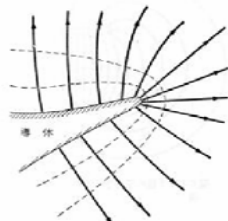
近接場光の正体

■ 電気双極子

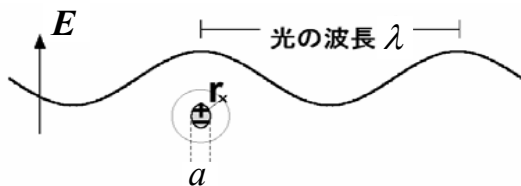


■ 尖った導体

- 避雷針
- 電界放出顕微鏡



Electrostatic近似



$a, r \ll \lambda$ → 空間的に一様な場が印加されているとみなしてよい.

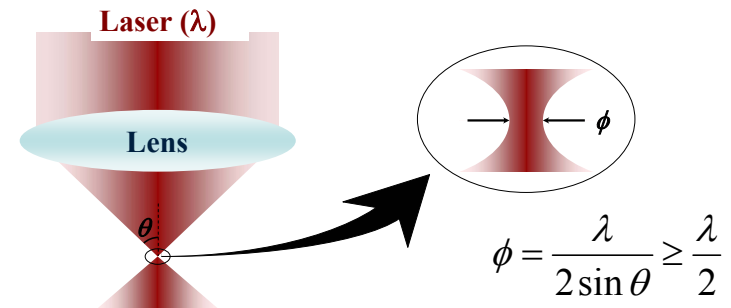
Electrostatic 近似

$$\frac{a}{\lambda}, \frac{r}{\lambda} \ll 1 \rightarrow ka, kr \ll 1$$

ナノ光学研究の意義

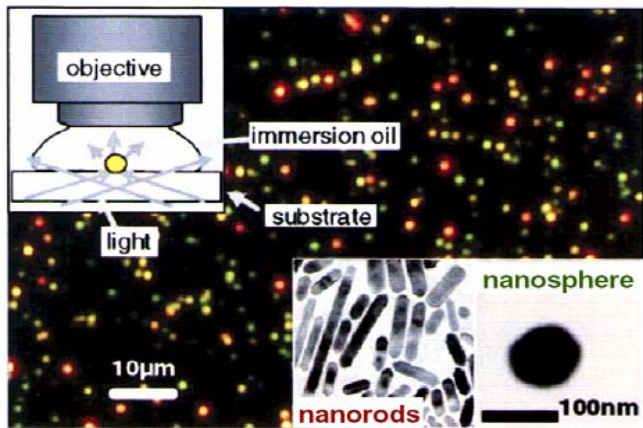
- 小さな光
- 明るい光
- 小さいが故に高感度
- ナノ領域に固有の光と電子の相互作用

光の回折限界



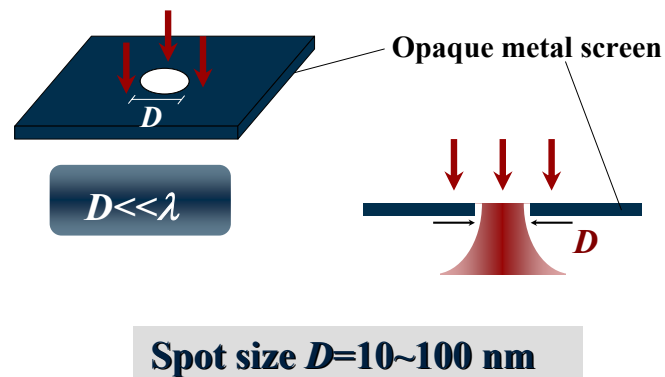
Minimum spot size ~ 0.5 μm

プラズモン



C. Soennichsen *et al.*, PRL 88, 77402 (2002).

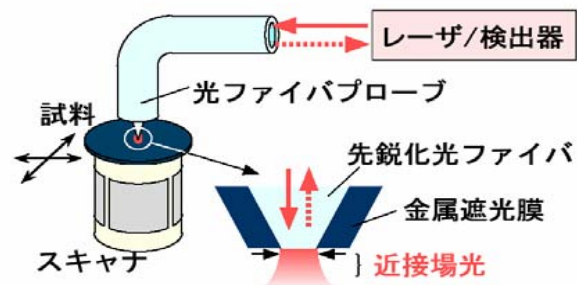
金属微小開口



近接場光学顕微鏡の原理・歴史・基本性能

近接場光学顕微鏡

Near-field Scanning Optical Microscopy (NSOM)



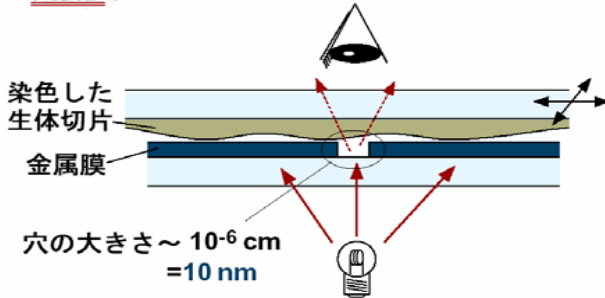
空間分解能~開口径 (\ll 光の波長)
(通常の顕微鏡の空間分解能~光の波長)

NSOM原理の提案

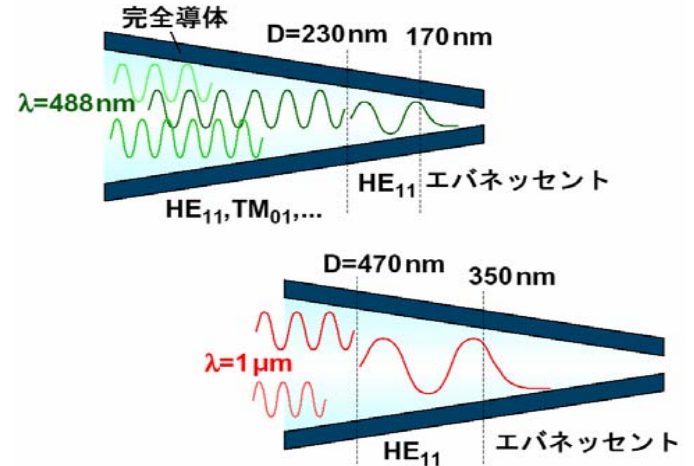
PHILOSOPHICAL MAGAZINE

JULY 1928.

XXXVIII. A Suggested Method for extending Microscopic Resolution into the Ultra-Microscopic Region. By E. H. SNYGE*.



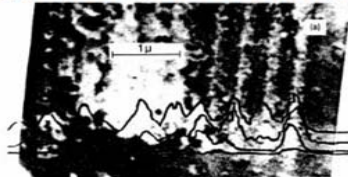
プローブ内の導波モード



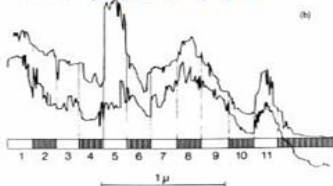
Optical Stethoscopy

D. W. Pohl APL 44, 651 (1984)

● 試料 (クロムパターン) の電顕写真

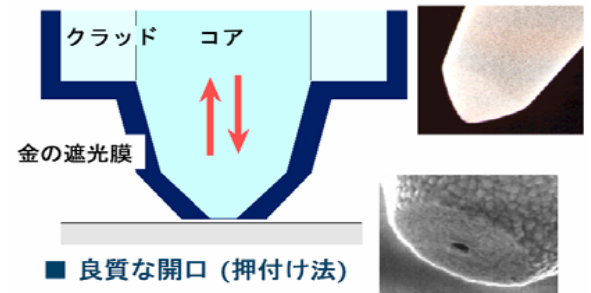


● NSOMラインスキャン



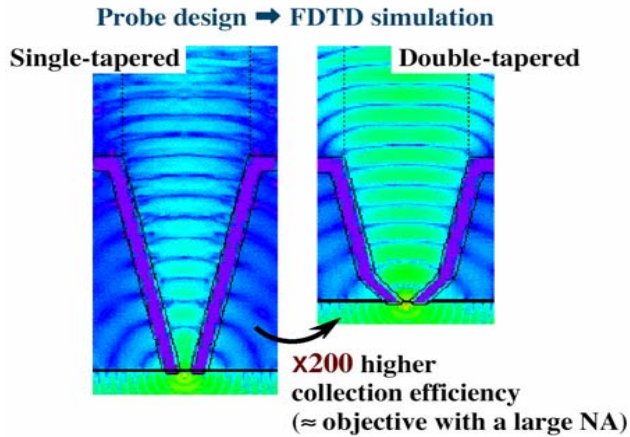
ファイバプローブ

- テーパー構造の最適化 (化学エッチング)
 - ➔ 光の伝搬効率の向上 (高感度化)



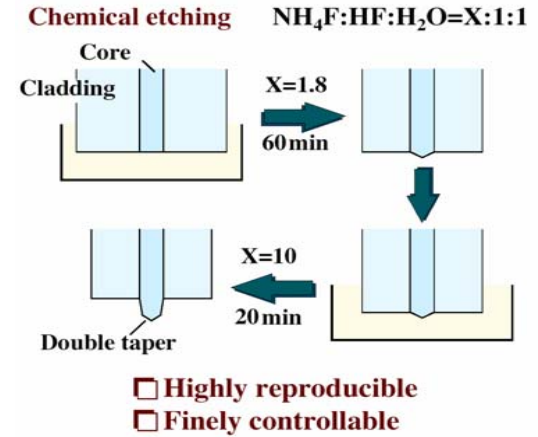
- 良質な開口 (押付け法)
 - 平坦, 試料面に平行
 - ➔ 試料との効率的な相互作用
 - 小さい, 真円状
 - ➔ 高分解能, 良好な偏光特性

二段テーパプローブ



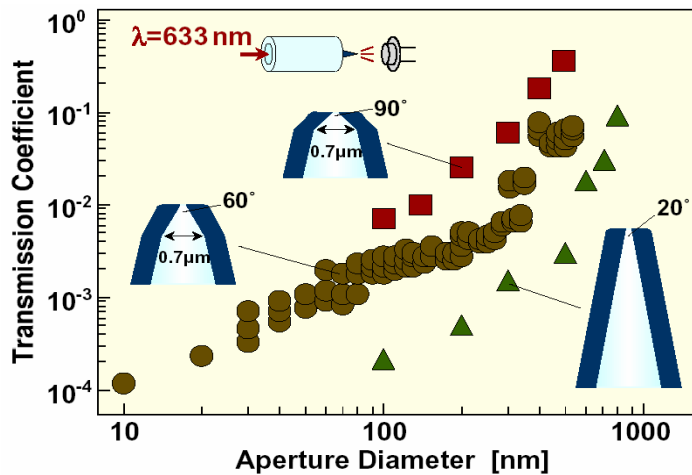
H. Nakamura, J. Microscopy 202, 50 (2001).

二段テーパプローブの作製 -1-

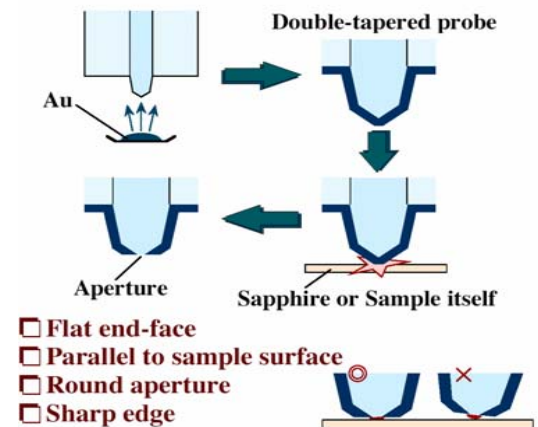


T. Saiki, APL 68, 2612 (1996).

プローブの光透過効率

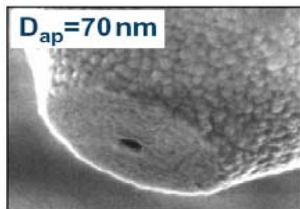


二段テーパプローブの作製 -2-

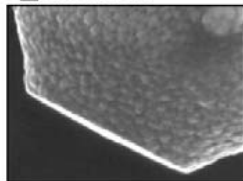


T. Saiki, APL 74, 2773 (1999).

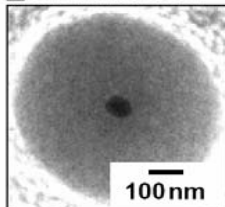
押し付け法によって作製した微小開口



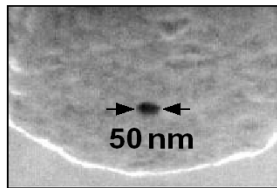
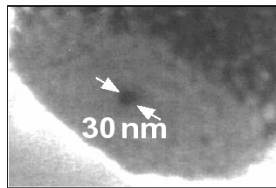
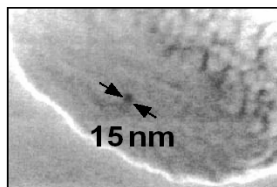
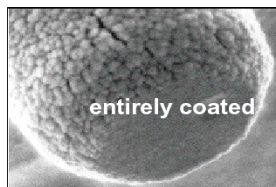
☐ Side view



☐ Overhead view



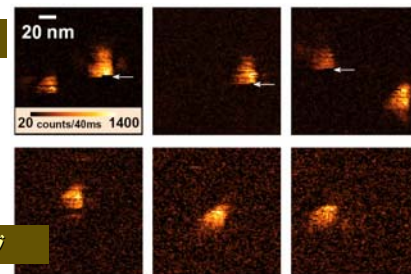
さまざまなサイズの微小開口



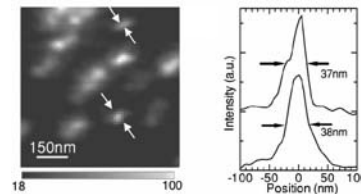
The scanning electron micrographs were taken after conducting NSOM imaging measurements.

30nm 空間分解能

単一分子イメージング



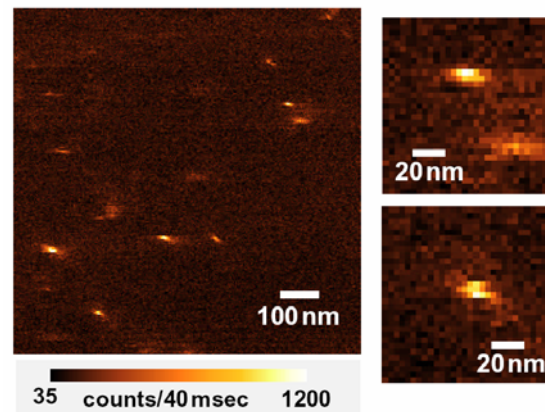
単一量子ドットイメージング



JSAP Int. 5, 22 (2002)

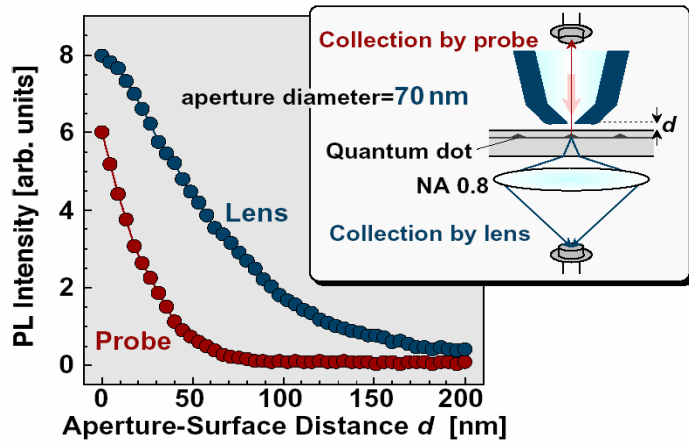
APL 81, 2291 (2002)

10nm 空間分解能



J. Microscopy 202, 362 (2000).

プローブの集光効率



全反射とエバネッセント光

$k_0 = 2\pi/\lambda$

$nk_0 \sin \theta_i$

$k_0 \sin \theta_o$

θ_i

θ_o

k_0

$nk_0 \sin \theta_i = k_0 \sin \theta_o$

$\sin \theta_o / \sin \theta_i = n$ (スネルの法則)

$k_z^2 = k_0^2 - (k_0 \sin \theta_o)^2$

$k_0^2 - (nk_0 \sin \theta_i)^2$

$k_z = k_0 [1 - (n \sin \theta_i)^2]^{1/2}$

$nk_0 \sin \theta_c$

k_0

θ_c

$nk_0 \sin \theta_c = k_0$

$\sin \theta_c = 1/n$ (臨界角)

$k_z = 0$

$nk_0 \sin \theta_i$

k_0

θ_i

$nk_0 \sin \theta_i > k_0$

全反射

エバネッセント光

$k_z^2 = k_0^2 - (nk_0 \sin \theta_i)^2 < 0$

$k_z = ik_0 [(n \sin \theta_i)^2 - 1]^{1/2}$

$1/|k_z|$

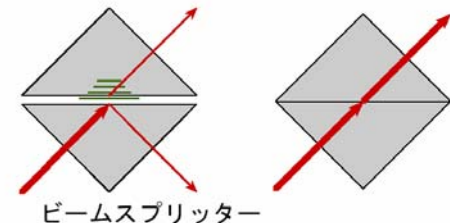
微小開口の光学

光トンネリング

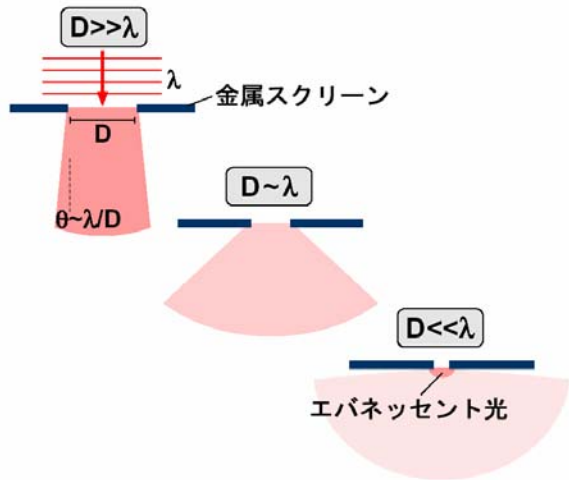
$1/|k_z| = 1/k_0 [(n \sin \theta_i)^2 - 1]^{1/2}$

$\sim \lambda/2$

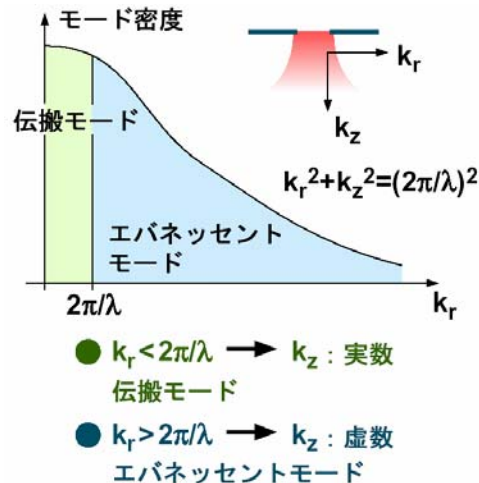
$(k_0 = 2\pi/\lambda, n = 1.5, \theta_i = 45^\circ)$



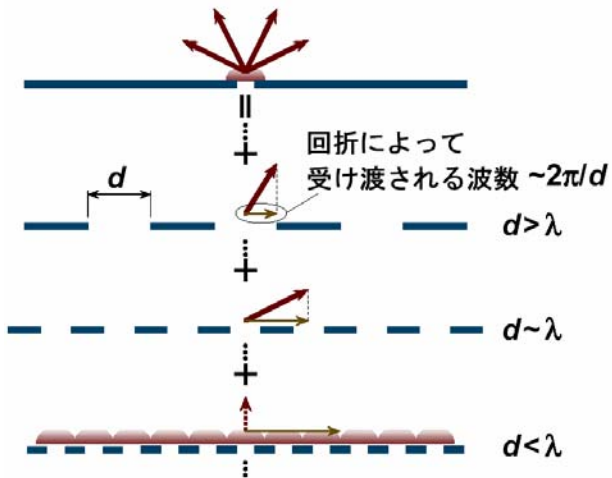
円孔による光の回折



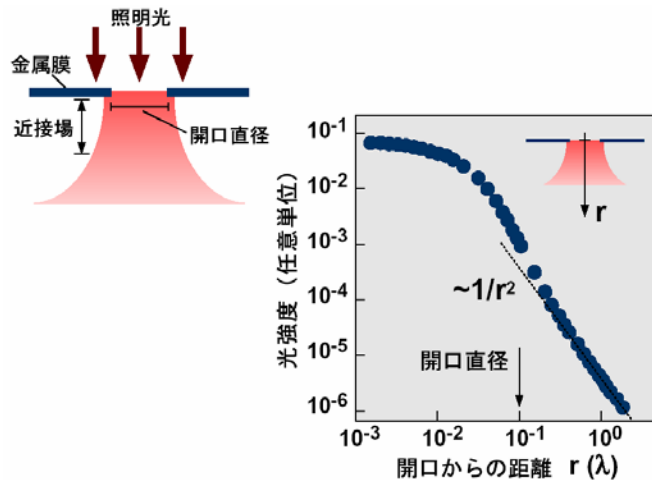
開口近傍における回折光のモード分布



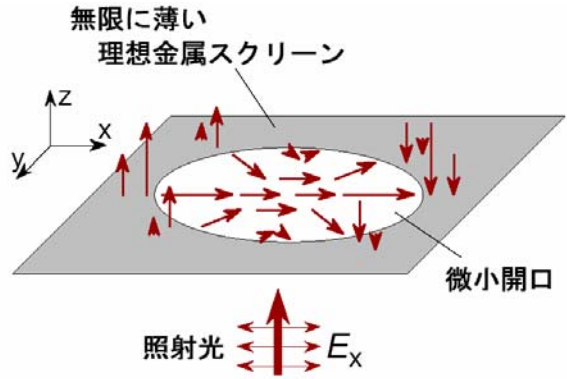
スリットによる光の回折



光強度の開口面からの距離依存性



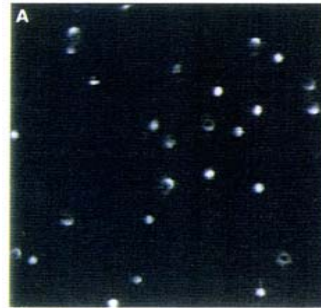
開口面内の電場ベクトル分布



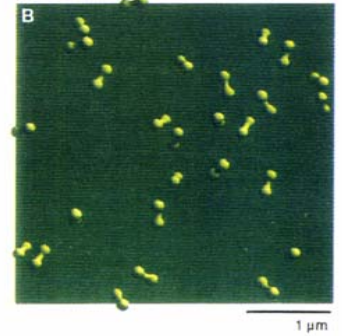
照明光の偏光に依存して、
開口エッジ近傍に強い電場が発生

近接場蛍光イメージングによる分子の向き決定

Fluorescence NSOM

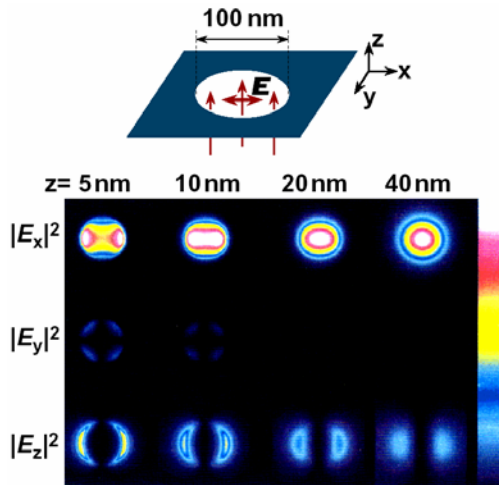


Dipole Orientation



E. Betzig et al., Science 262, 1422 (1993).

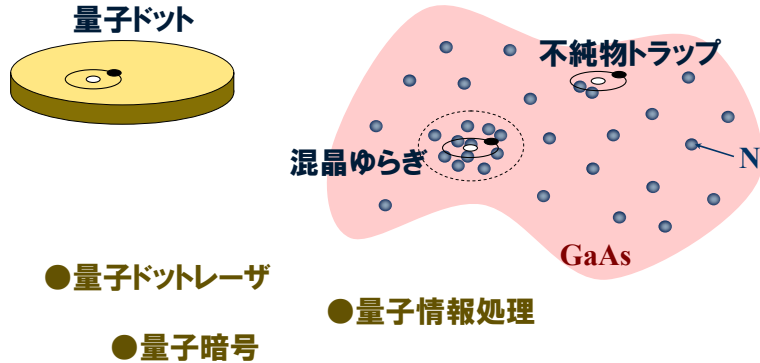
開口近傍の電場強度分布



量子ドットに閉じ込められた電子の波動関数を見る

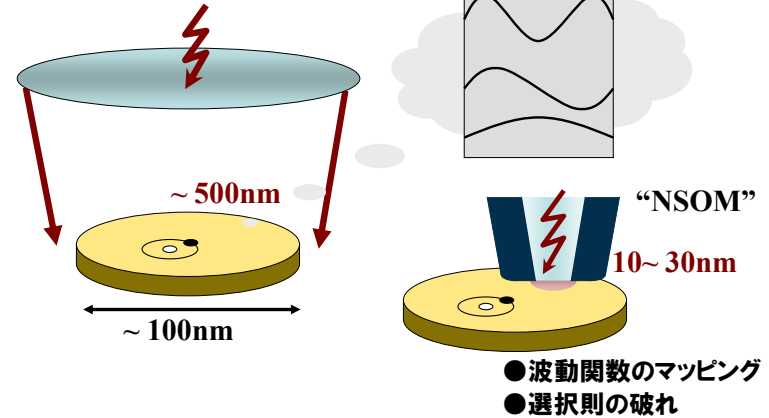
局在電子系

量子閉じ込め状態



Optical mapping of electron wavefunction

“Far-field microscopy”



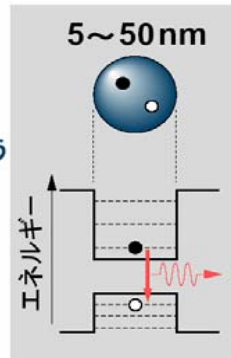
半導体量子ドット

電子がもつ波動の性質が顕著になり、完全に離散的なエネルギー準位構造を形成する。

人工的な原子のように振る舞う

その結果・・・

- 電子のエネルギー分布の集中
- 光学スペクトルの先鋭化
- 電子間の相互作用の増強



Optical mapping of wavefunction

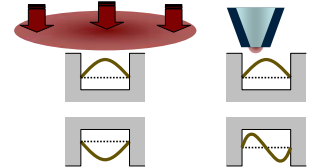
Wavefunctions : $|\Psi^e(r)\rangle = \phi^e(r)|e\rangle, |\Psi^h(r)\rangle = \phi^h(r)|h\rangle$

Dipole interaction Hamiltonian : $H' = \mathbf{p} \cdot \mathbf{A} = (c/i\omega)\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}$

Dipole matrix element : $\langle \Psi^e(r) | H' | \Psi^h(r) \rangle \propto \langle e | \mathbf{p} | h \rangle \cdot \int \phi^e(r) \mathbf{E} \phi^h(r) dV$

- Far-field excitation: $\mathbf{E} \sim \text{const.} (\lambda \gg \text{size of quantum dot})$

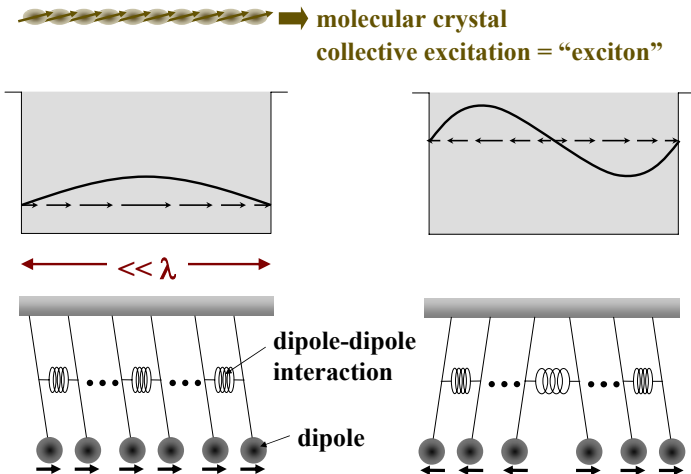
$\int \phi^e(r) \mathbf{E} \phi^h(r) dV \rightarrow \mathbf{E} \int \phi^e(r) \phi^h(r) dV$ Selection rule



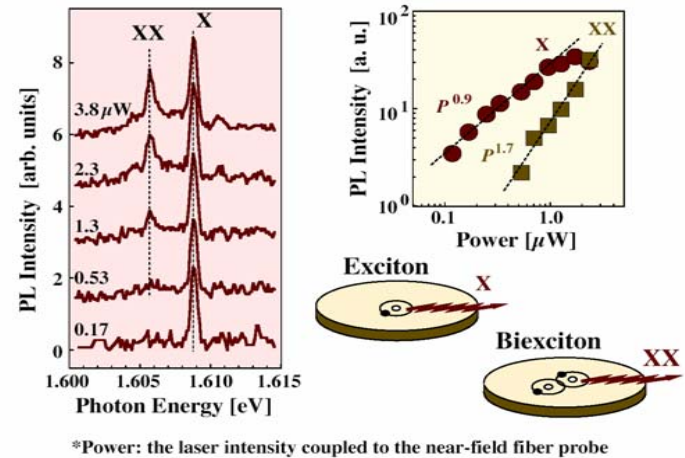
- NSOM excitation: $\mathbf{E} \sim \mathbf{E}_0 \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)$

$\int \phi^e(r) \mathbf{E} \phi^h(r) dV \rightarrow \mathbf{E}_0 \phi^e(r_0) \phi^h(r_0)$ Wavefunction mapping

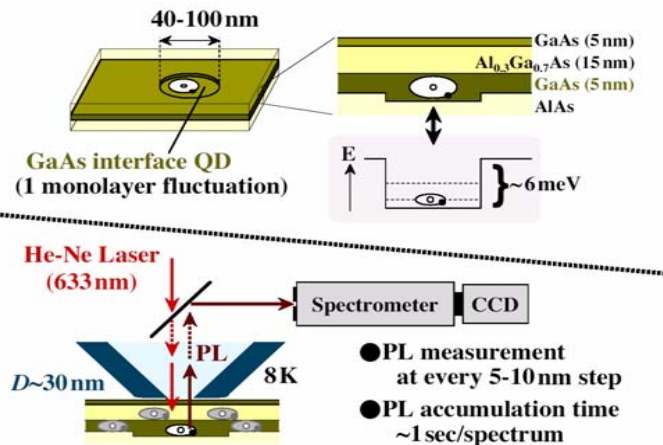
Coupled Oscillator Model



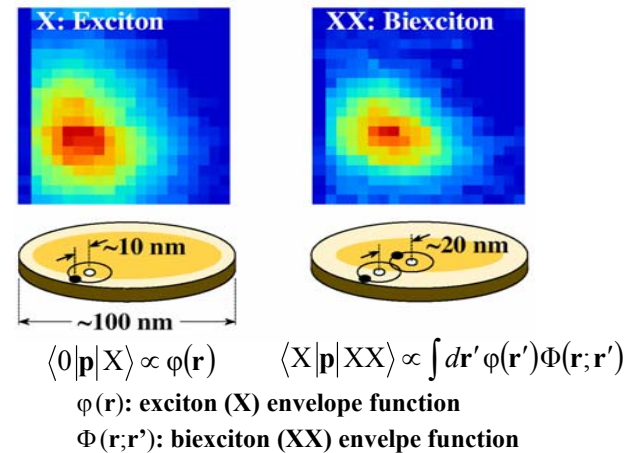
PL spectra from single quantum island



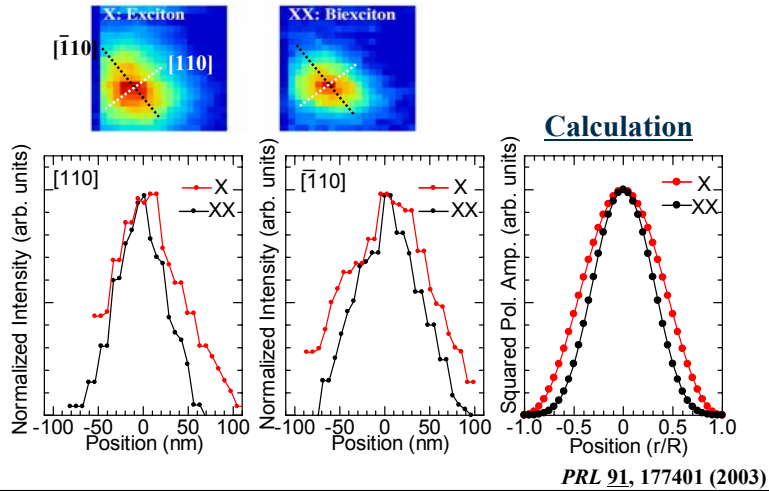
Imaging spectroscopy of quantum island



Exciton & biexciton Wavefunctions



Numerical calculation of polarization field



Wavefunction of excited state

