

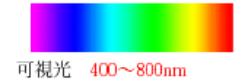
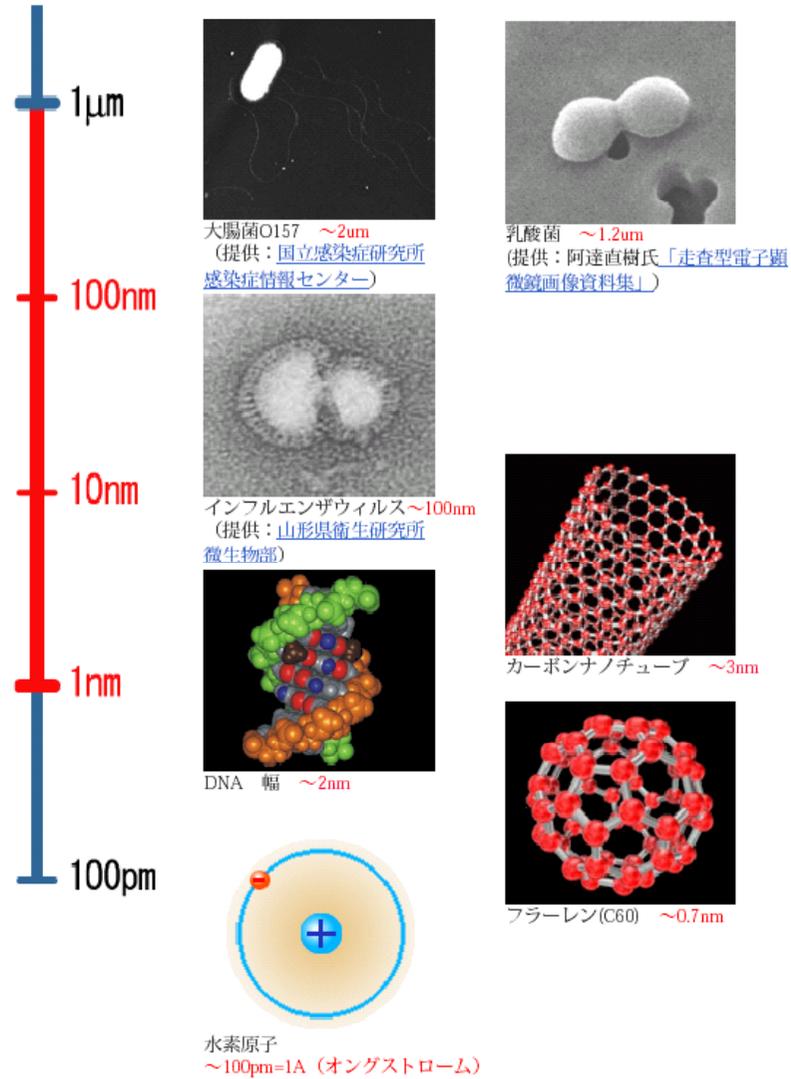
電気電子基礎学  
「電子デバイス」

「ナノテクノロジーが拓く未来のコンピューター」2

東京工業大学  
大学院理工学研究科電子物理工学専攻  
量子ナノエレクトロニクス研究センター  
小田 俊理



# ナノメートルの長さ



量子ドット

## ナノテクノロジーでできること

2000年 米国の国家ナノテクノロジーイニシアティブ (NNI)  
でクリントン前大統領が演説 (カリフォルニア工科大学)

- 鉄よりも10倍つよく、しかもずっと軽い材料を開発して全ての乗り物を軽くして燃費を下げる。
- 国会図書館の情報を角砂糖の大きさのメモリに収容する。
- ガンを細胞数個程度の段階で検出してそこを狙い撃ちして遺伝子や薬物を送り込む。
- 太陽電池のエネルギー効率を2倍にする。

1959年 ファインマン

“There’s Plenty of Room at the Bottom”

「コンピューターのビットを原子一個にすることに何の物理的障害もない」

# ナノ構造の作り方

## ● トップダウン法

マクロの構造からスタートして微細加工を行う。

リソグラフィ技術

## ● ボトムアップ法

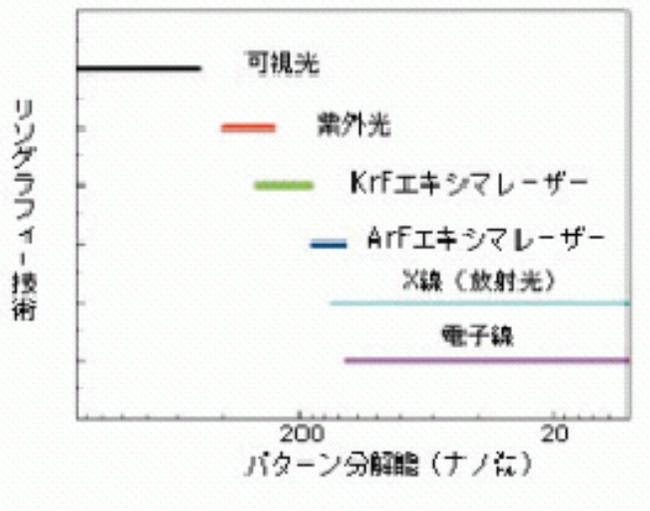
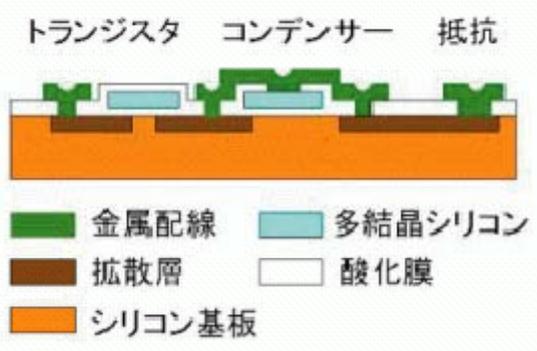
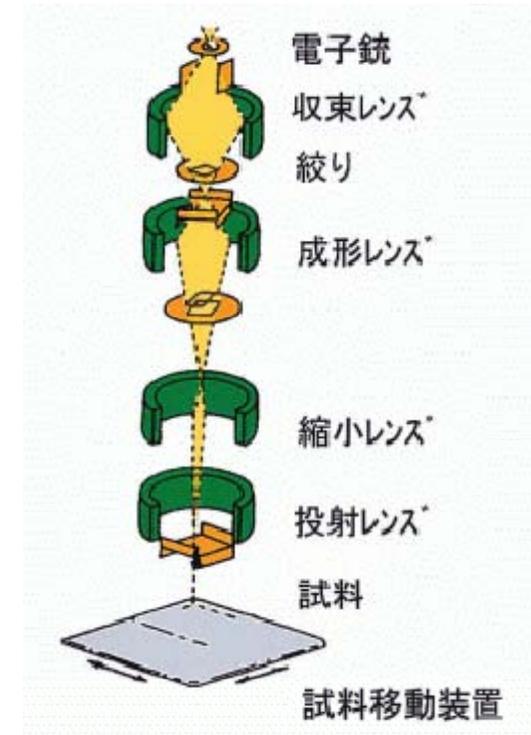
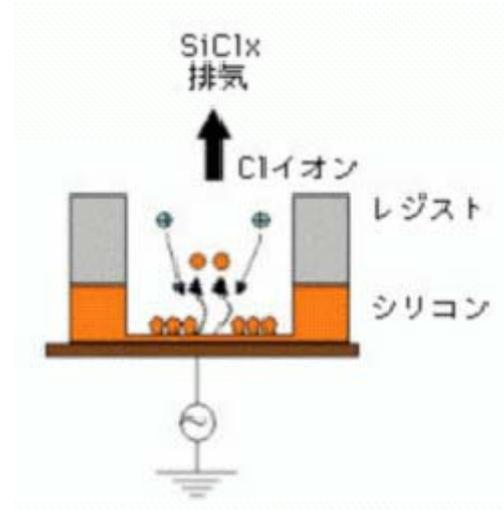
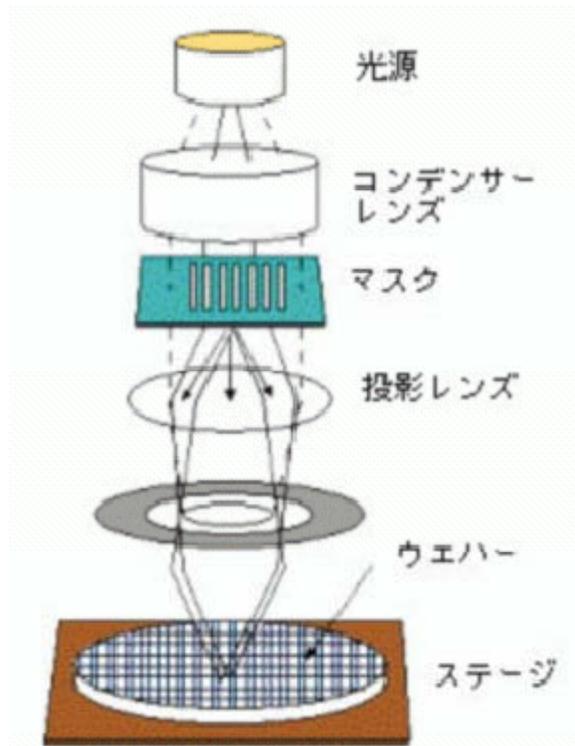
ミクロの原子1個1個を積み上げていく。

STM(走査型電子顕微鏡)

SAM(自己組織化分子)

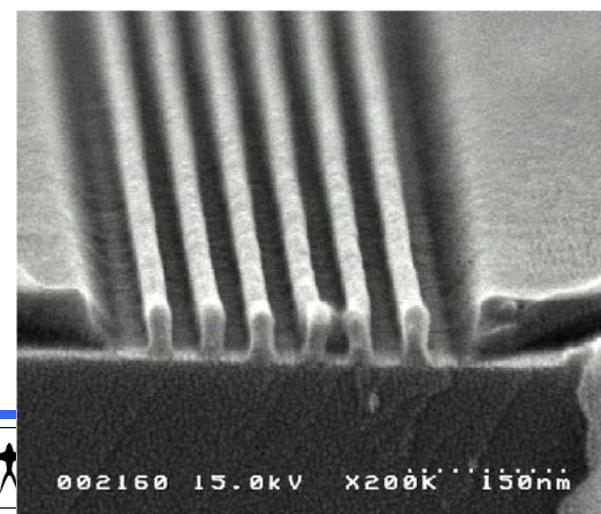
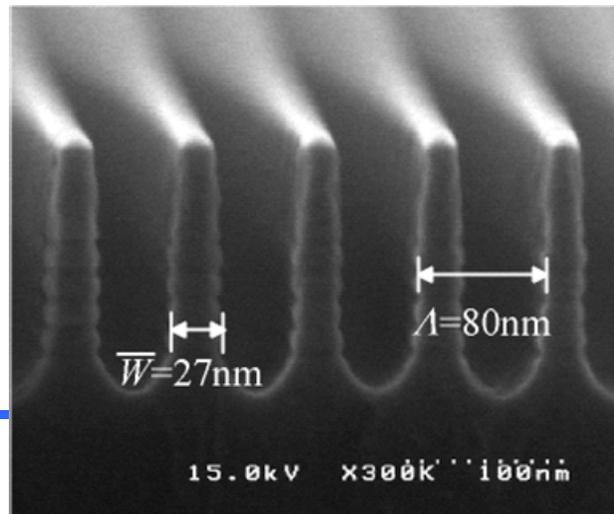
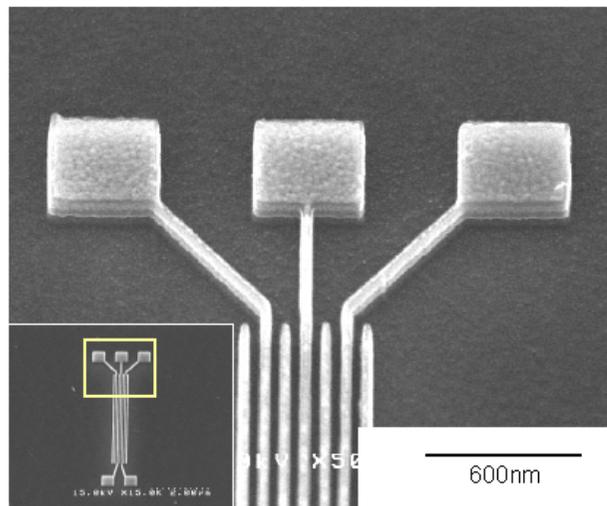
結晶成長

# トップダウン法: リソグラフィ技術

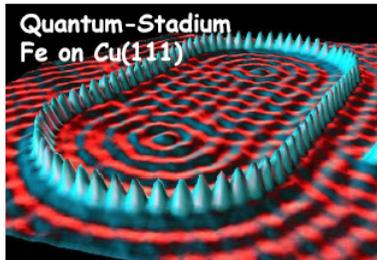
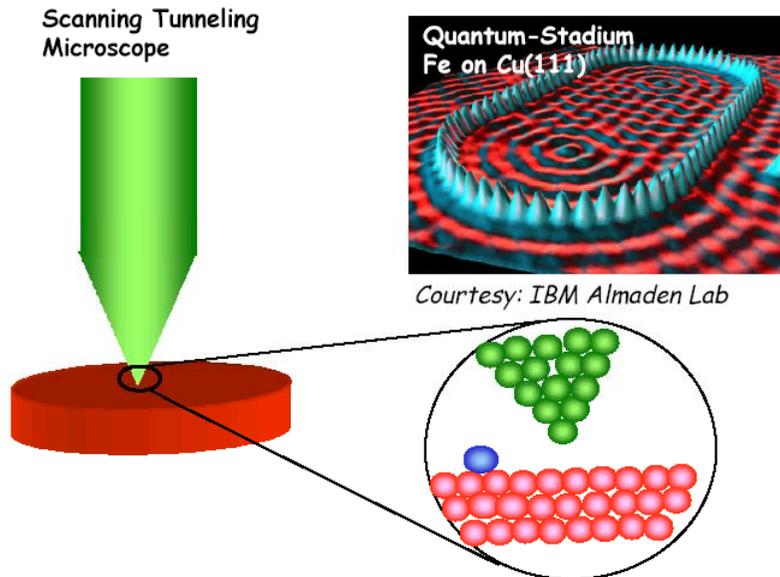




## 電子ビーム露光による3次元ナノ構造構築支援 東工大



# ボトムアップ法:STM



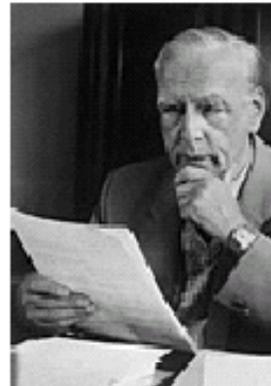
Courtesy: IBM Almaden Lab



## The Nobel Prize in Physics 1986

"for his fundamental work in electron optics, and for the design of the first electron microscope"

"for their design of the scanning tunneling microscope"



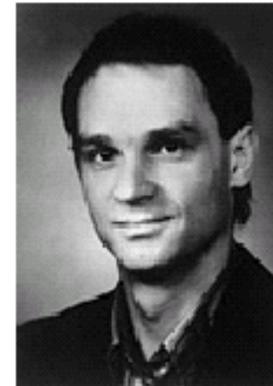
**Ernst Ruska**

🏆 1/2 of the prize

Federal Republic of Germany

Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft  
Berlin, Federal Republic of Germany

b. 1906  
d. 1988



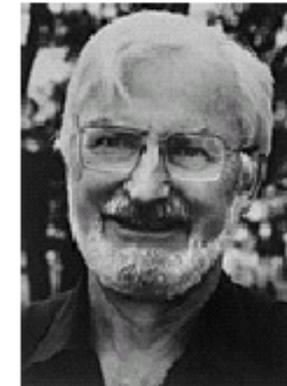
**Gerd Binnig**

🏆 1/4 of the prize

Federal Republic of Germany

IBM Zurich Research Laboratory  
Rschlikon, Switzerland

b. 1947



**Heinrich Rohrer**

🏆 1/4 of the prize

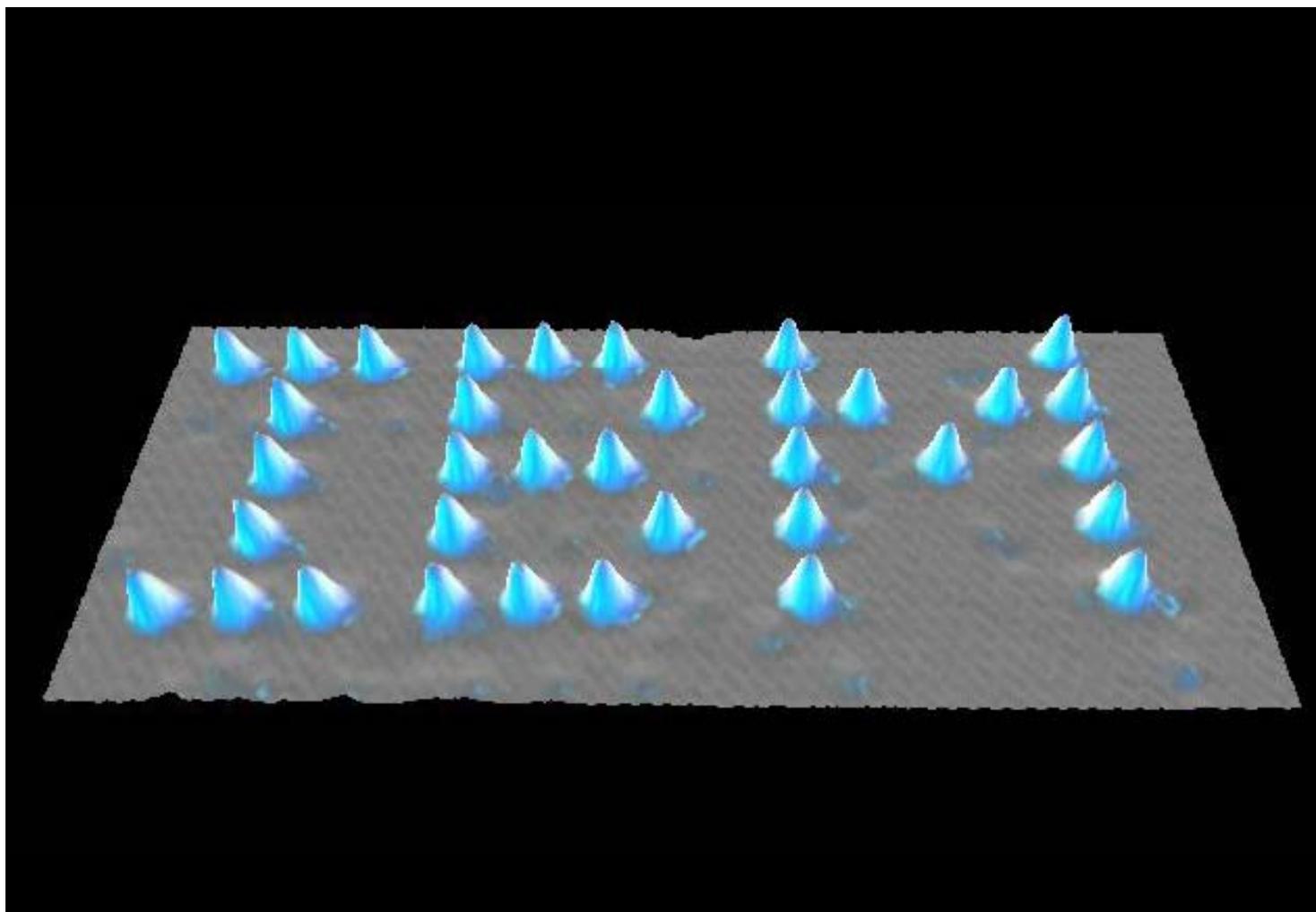
Switzerland

IBM Zurich Research Laboratory  
Rschlikon, Switzerland

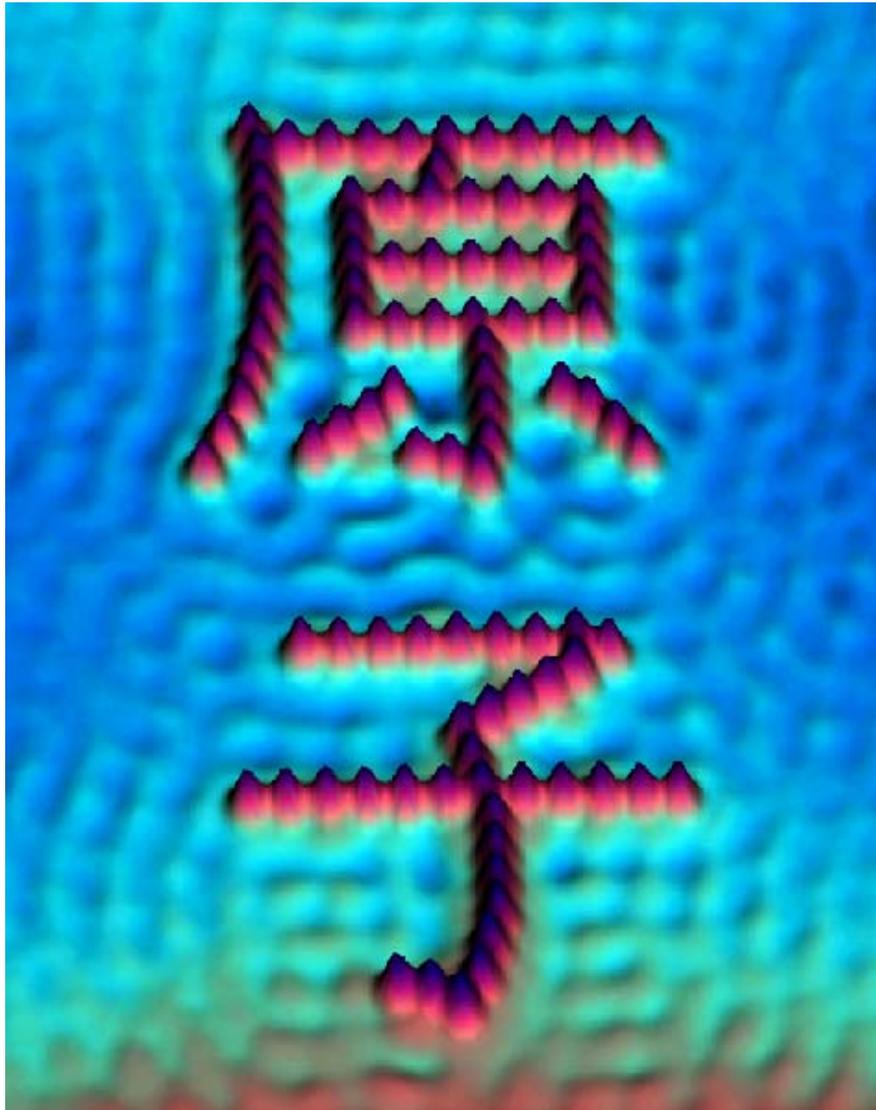
b. 1933

# 世界最小の文字

STMで並べたニッケル板上のキセノン原子



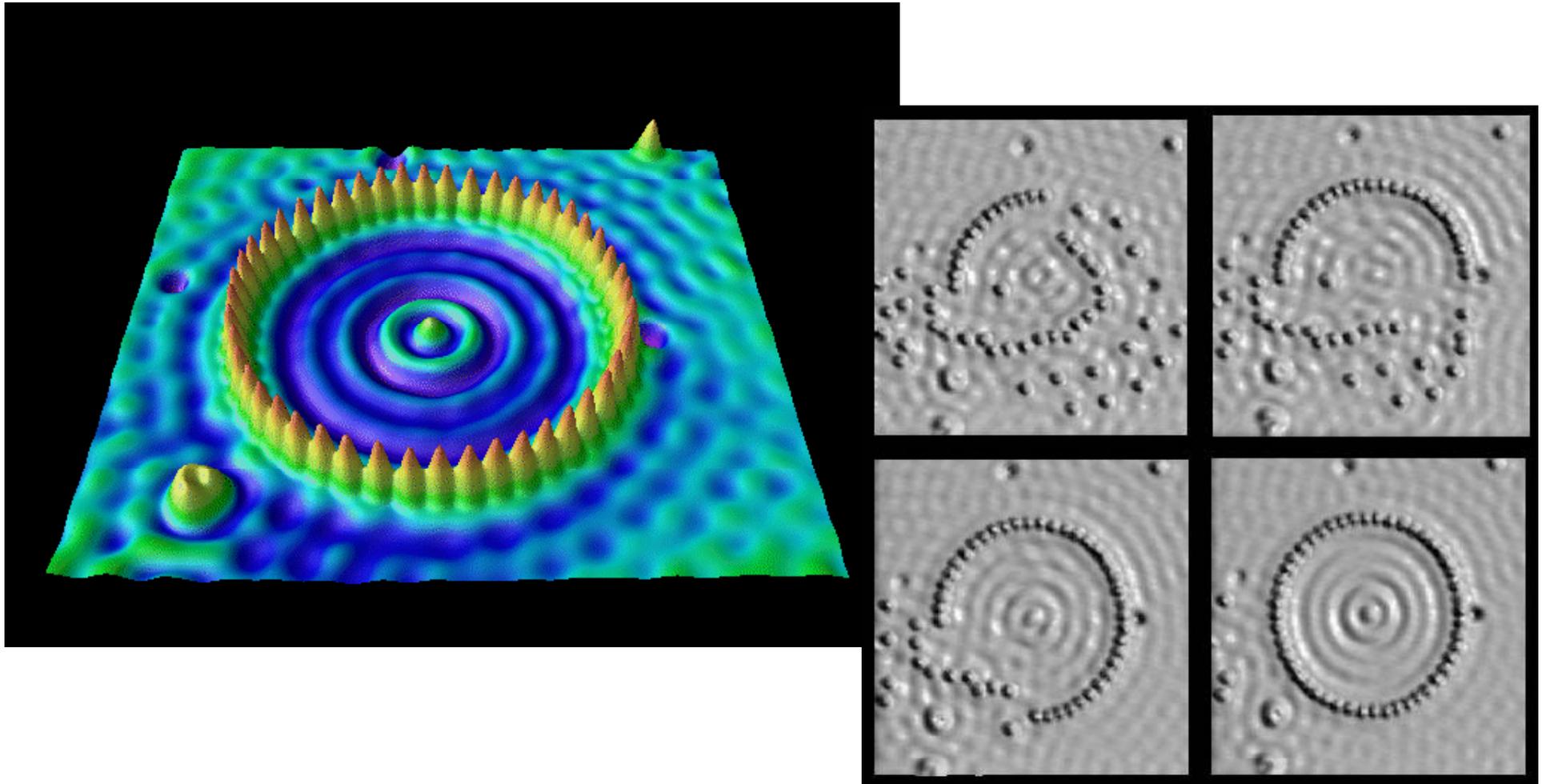
# 世界最小の漢字



STMで並べた銅板  
上の鉄原子

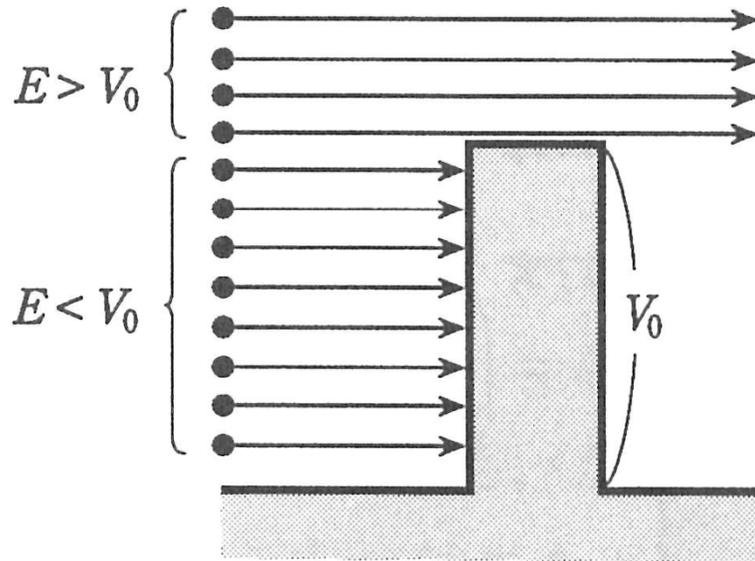
# Quantum Corrals

STMで並べた銅板上の48個の鉄原子



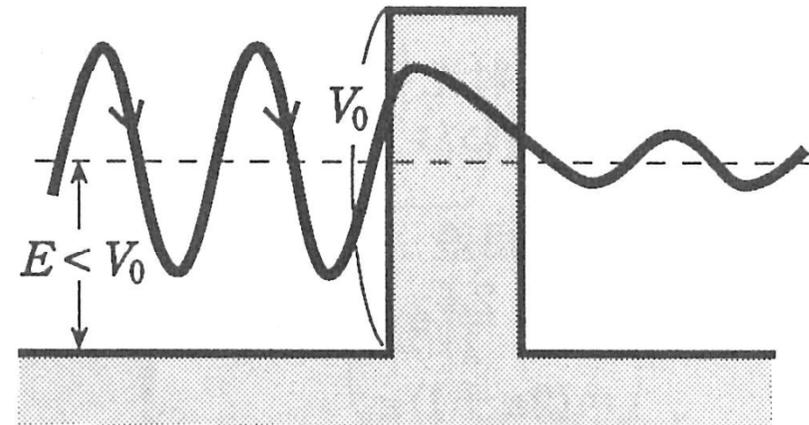
# 量子効果1:トンネル効果

古典論では



( $E < V_0$ ) の粒子は障壁を超え  
ることができない。

物質波

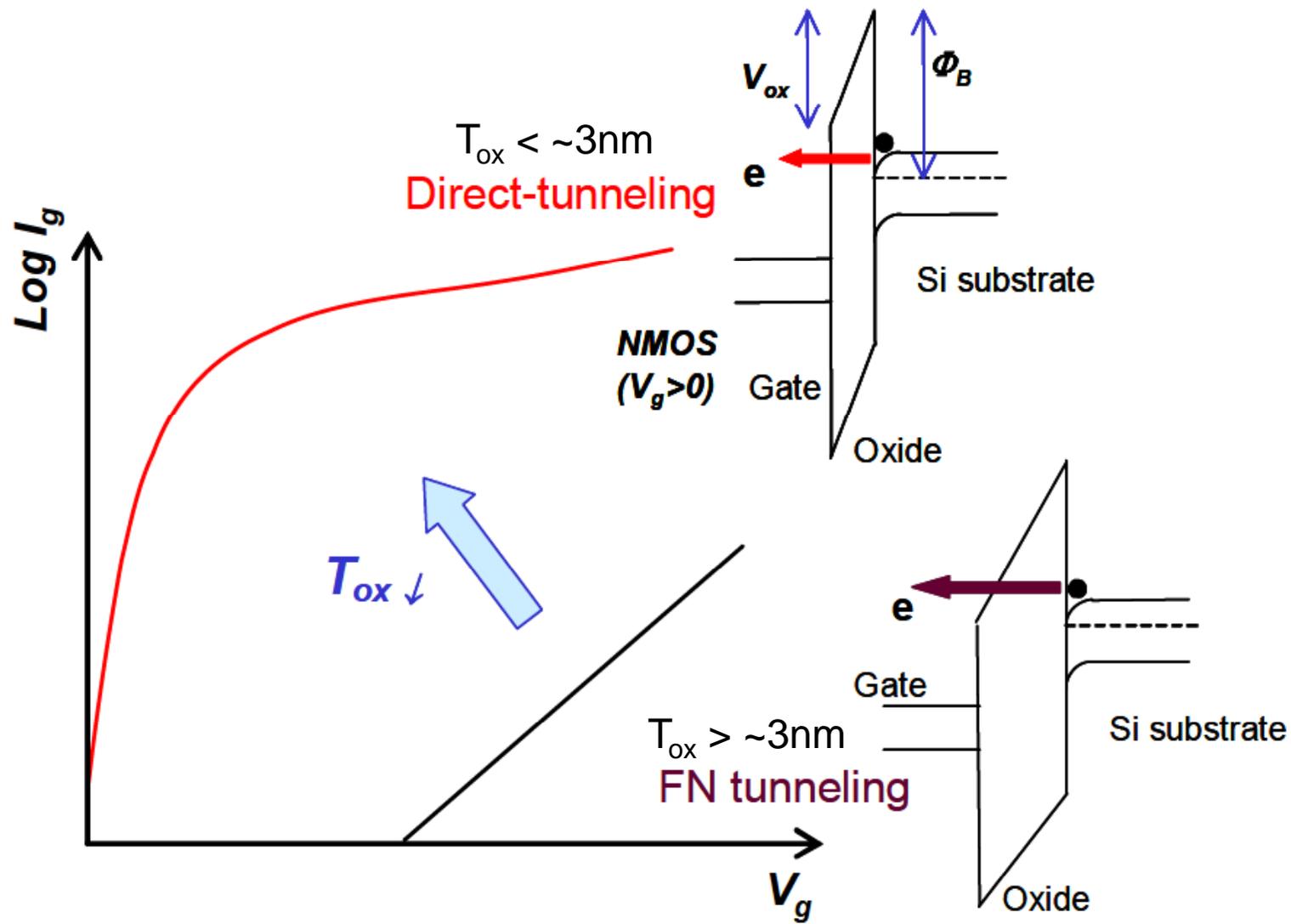


( $E < V_0$ ) の粒子(電子)は障  
壁を透過できる。

$$T = \left[ 1 + \frac{V_0 \sinh^2 \left\{ d \sqrt{2m(V_0 - E)} / \hbar \right\}}{4E(V_0 - E)} \right]^{-1}$$

「電子物性概論 -量子論の基礎-」阿部正紀著.

# トンネル効果の例1 : MOSFETのゲートリーク電流



# 走査トンネル顕微鏡 (STM)

プローブと試料表面の間隔により、トンネル電流は大きく変わる。



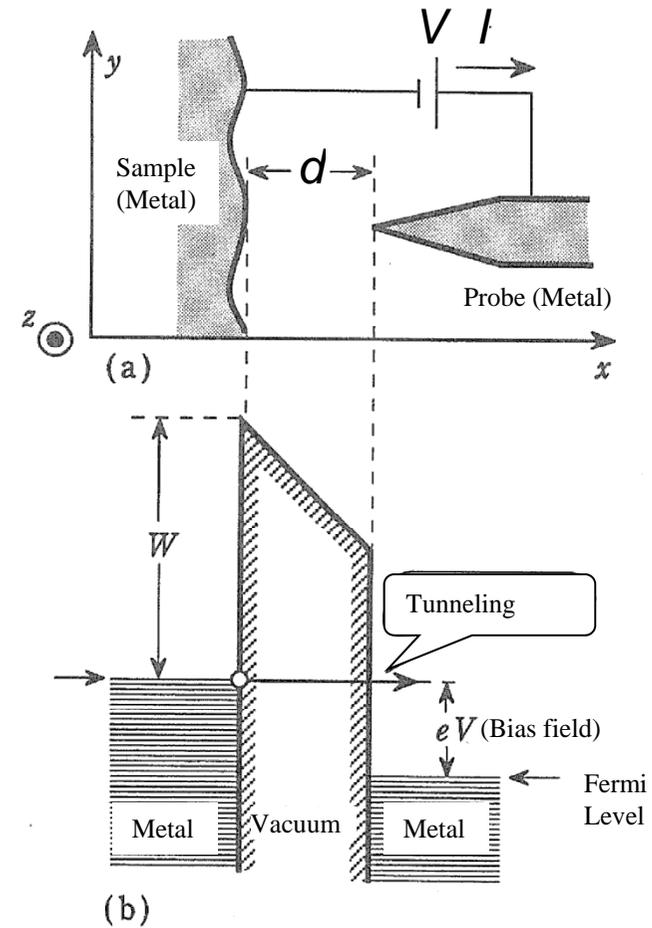
トンネル電流が一定になるように、プローブ位置を制御する。



プローブ位置の変化を測定する。



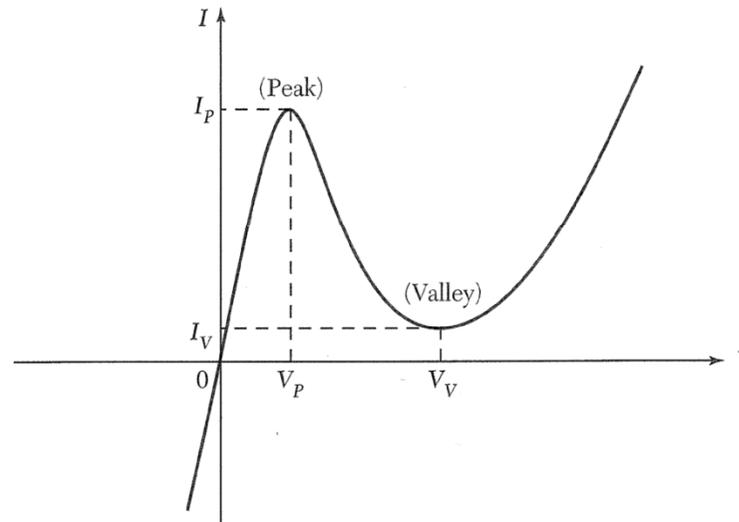
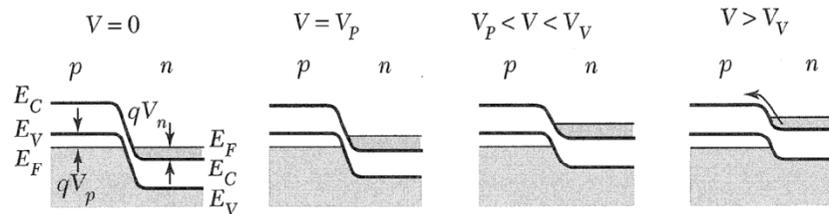
原子レベルの精度で表面原子構造が判る。



# トンネルダイオード(江崎ダイオード)

高濃度に不純物ドーピングされたpn接合ダイオードの電流電圧特性

➡ 負性抵抗現象をトンネル効果で説明

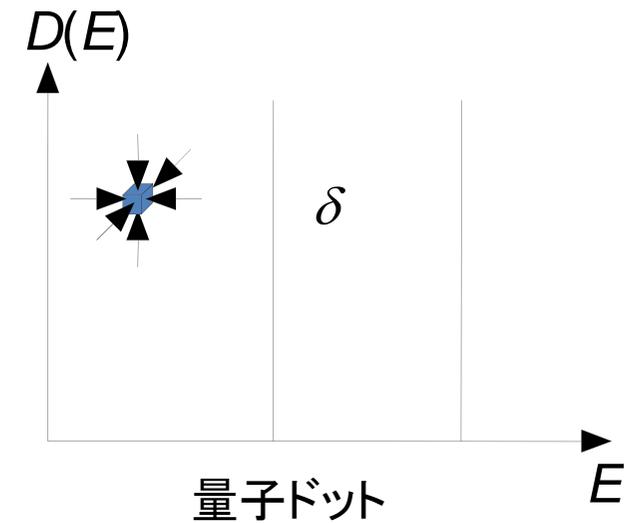
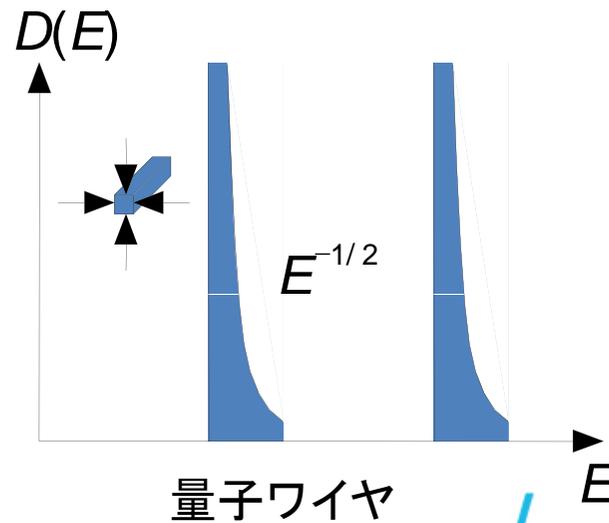
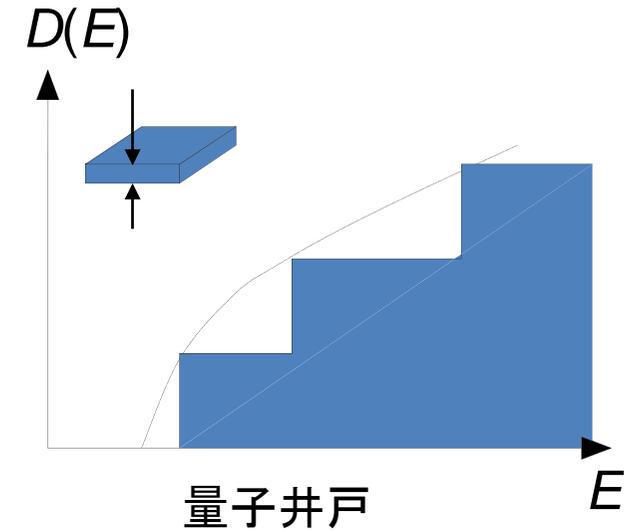
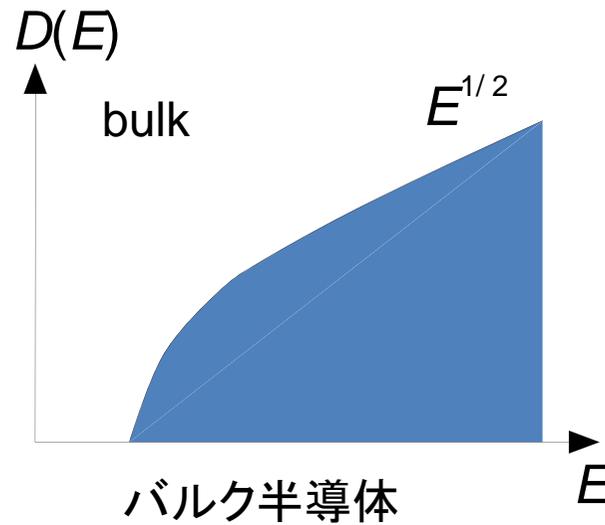


This figure is from  
"SEMICONDUCTOR DEVICES:  
Physics and Technology, 2<sup>nd</sup>  
Edition" by S. M. Sze.

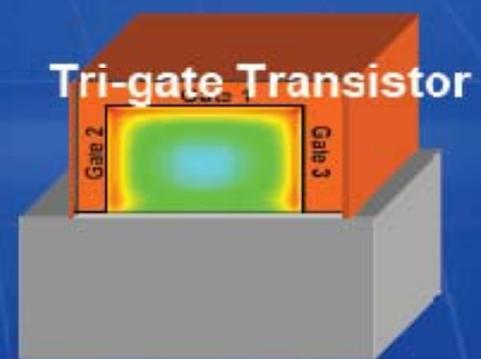
Static current-voltage characteristics of a typical tunnel diode.  $I_p$  and  $V_p$  are the peak current and peak voltage, respectively.  $I_v$  and  $V_v$  are the valley current and valley voltage, respectively. The upper figures show the band diagrams of the device at different bias voltages.

# 量子効果2: 電子閉じこめ効果

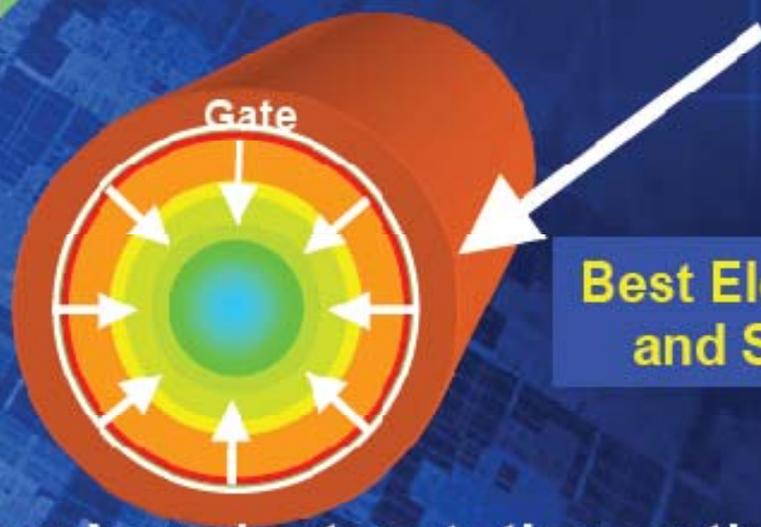
電子状態密度  
のエネルギー  
依存性



# Nano-Device Structure Evolution



Fully-Surround Gate Transistor

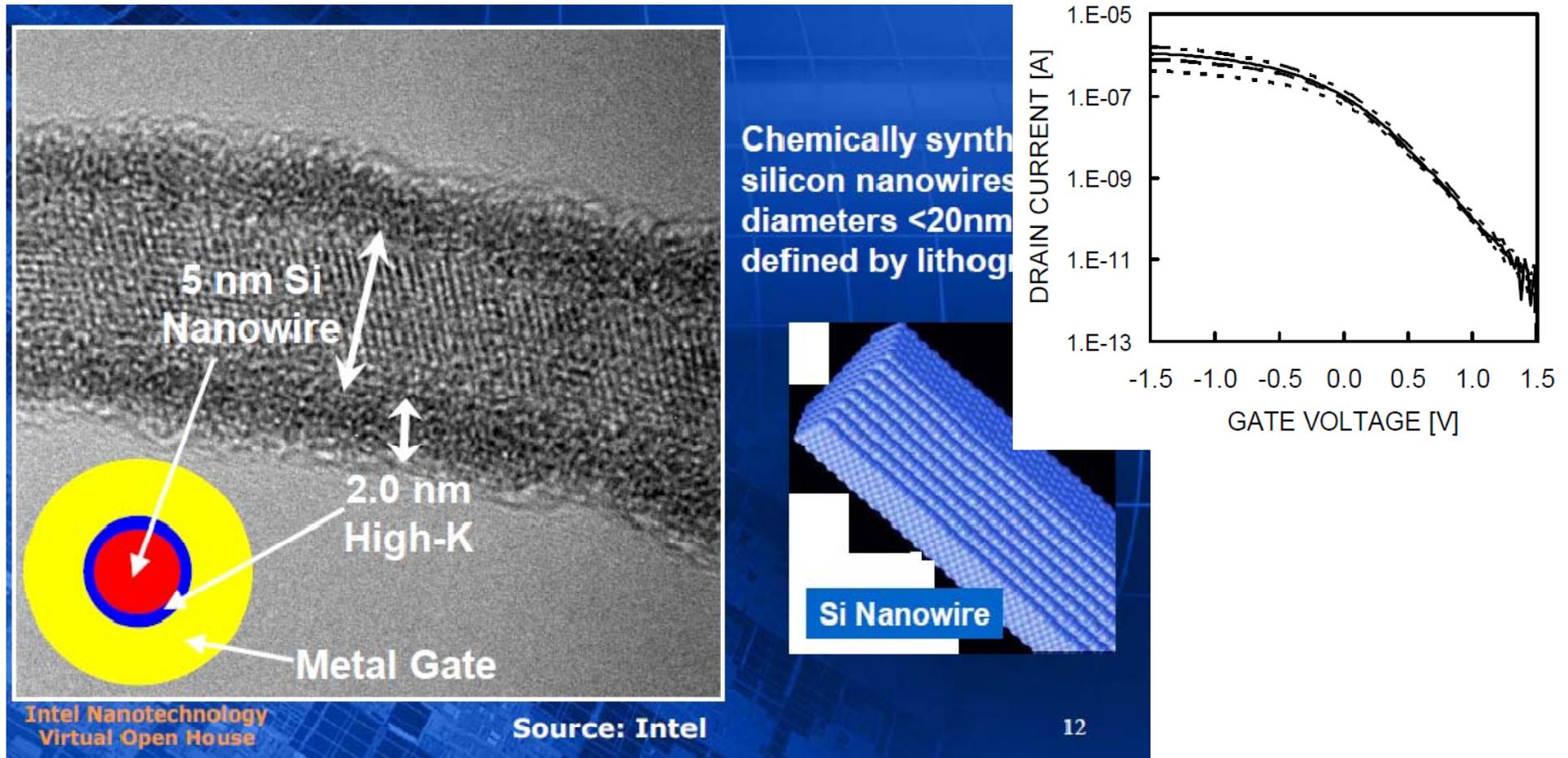


Improved Electrostatics

Best Electrostatics and Scalability

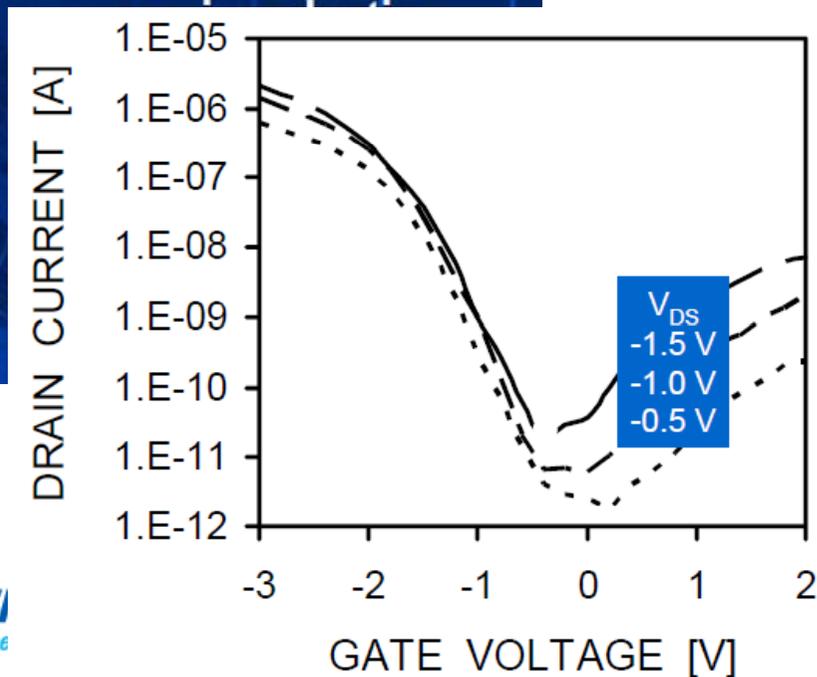
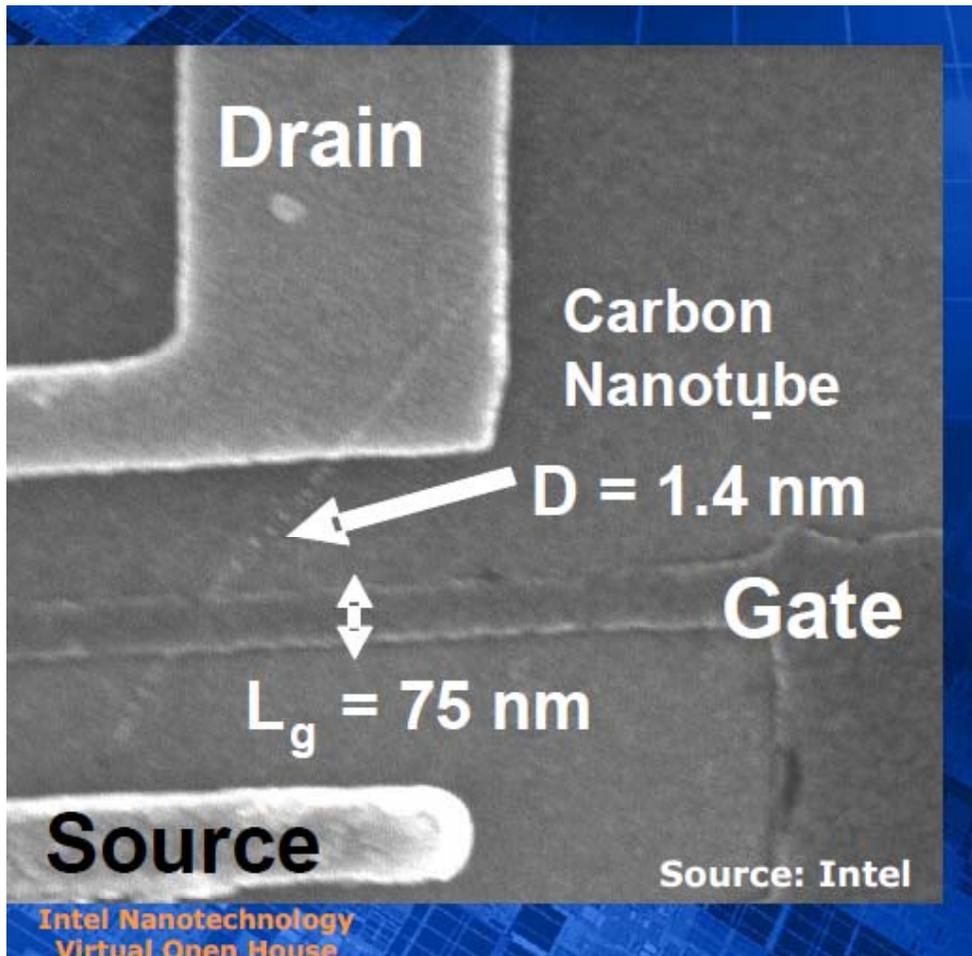
Improving electrostatics optimizes power consumption and performance

# 将来のトランジスター：シリコンナノワイヤ



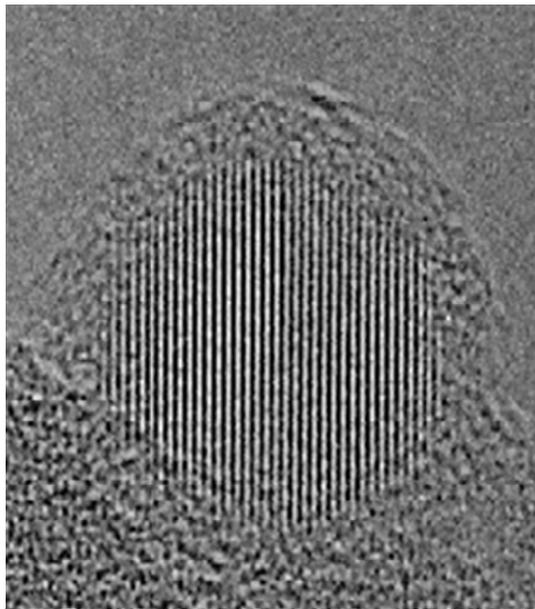
- 直径5nmのナノワイヤでトランジスター動作を実証

# 将来のトランジスター:カーボンナノチューブ

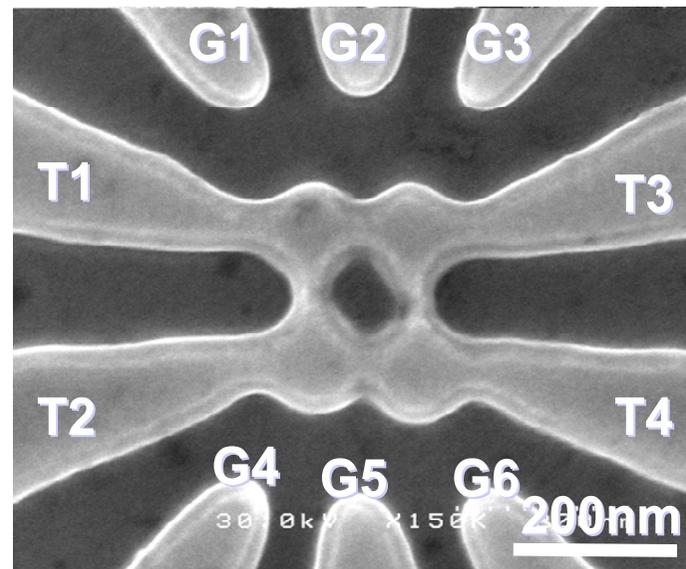


- 直径1.4nmのナノチューブでトランジスター動作

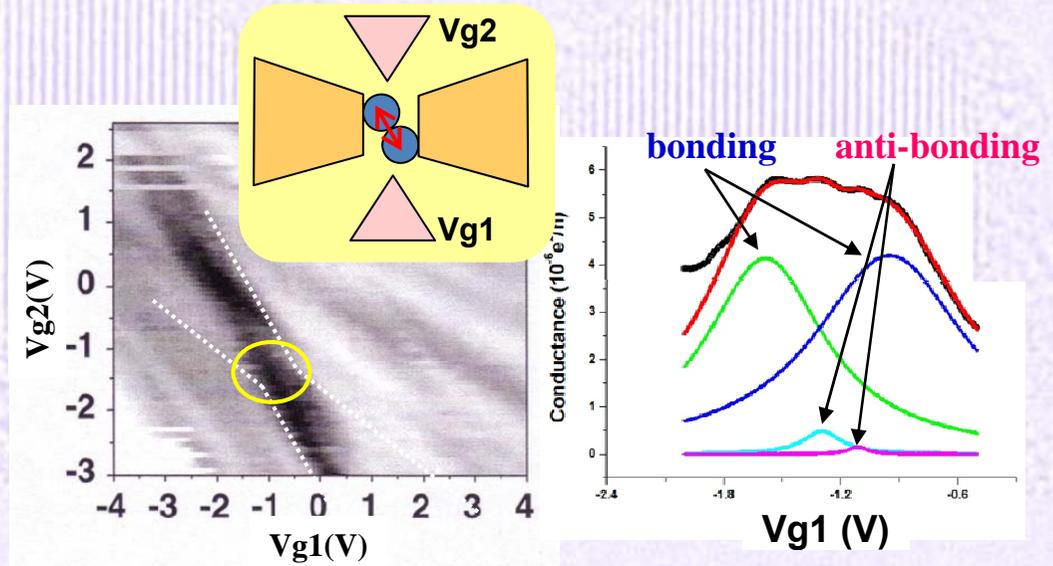
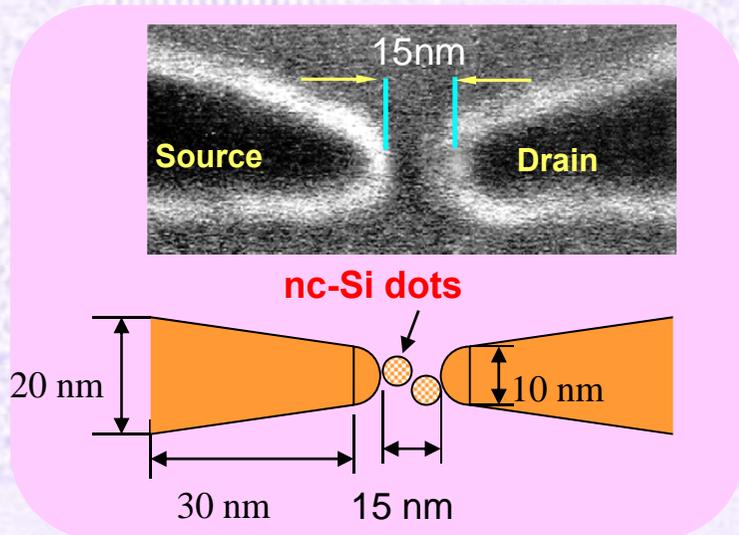
# シリコン量子ドット



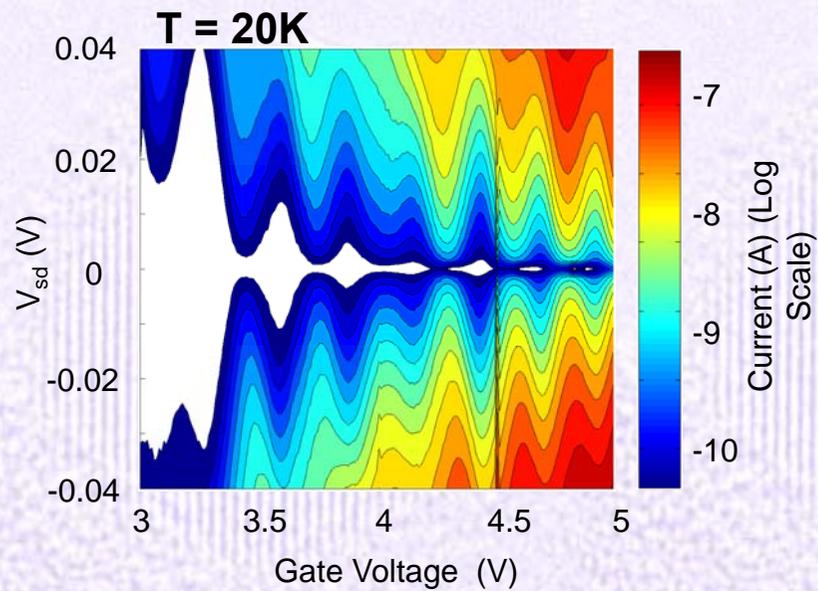
10nm



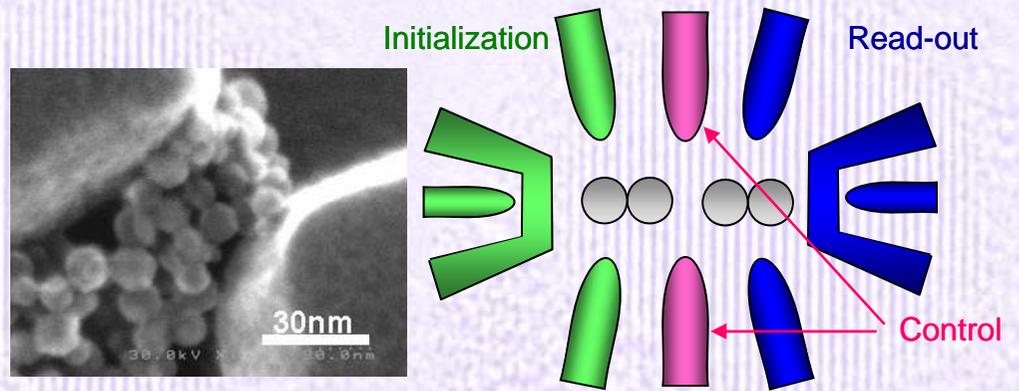
# Si量子ドット:ユニークな電子輸送現象



結合ドット間の量子力学的干渉

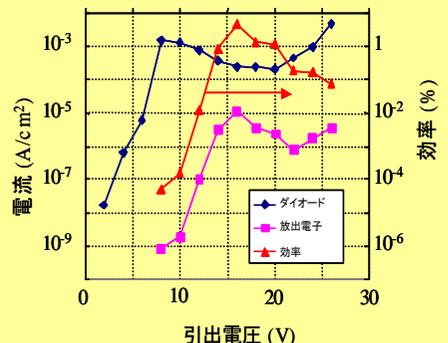
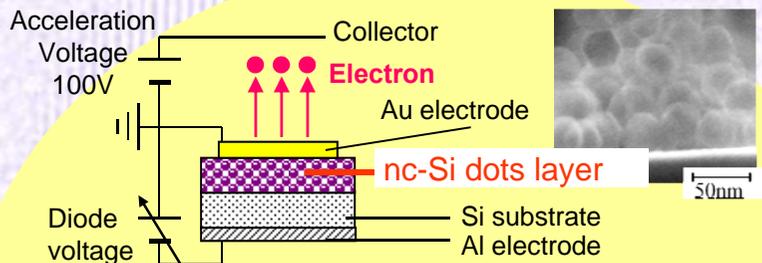


単電子トランジスタ

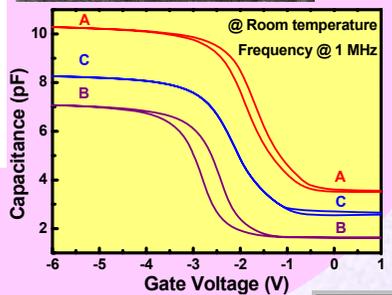
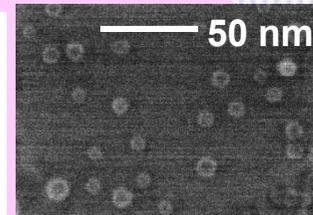
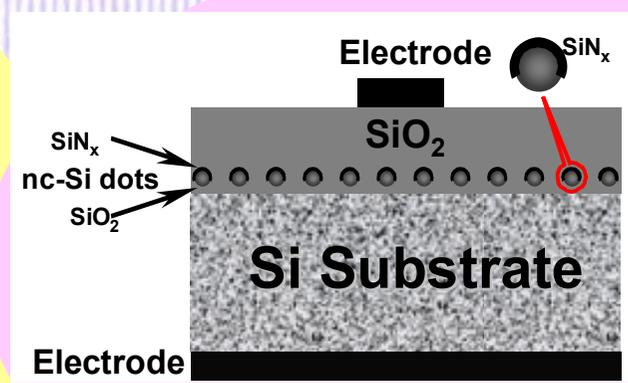


量子コンピューターの基本構成要素

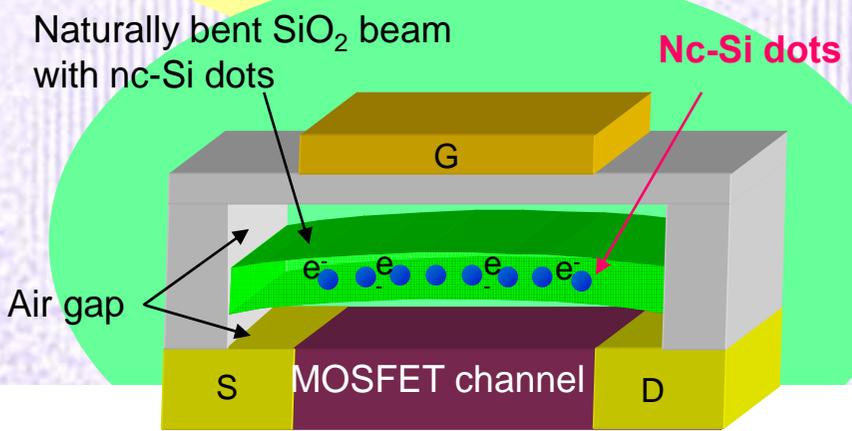
# Si量子ドット: 種々の新しい応用



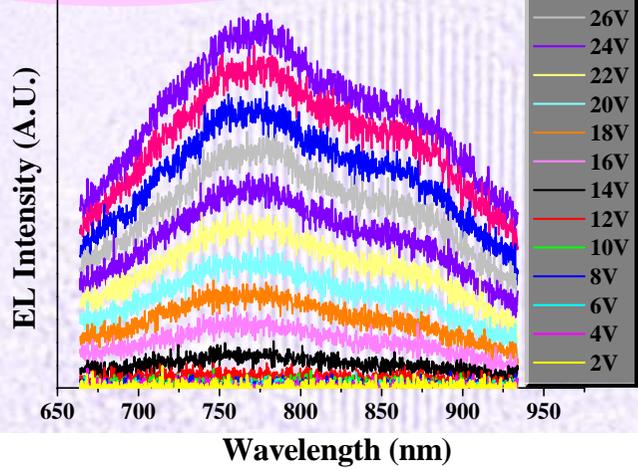
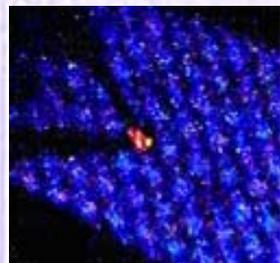
電子放出デバイス



不揮発性メモリー

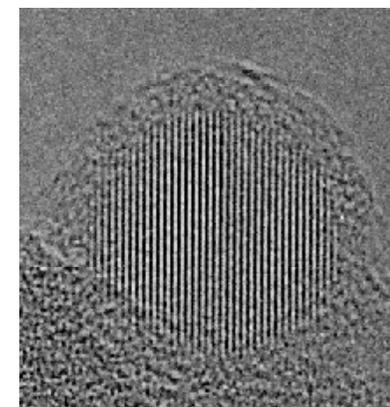
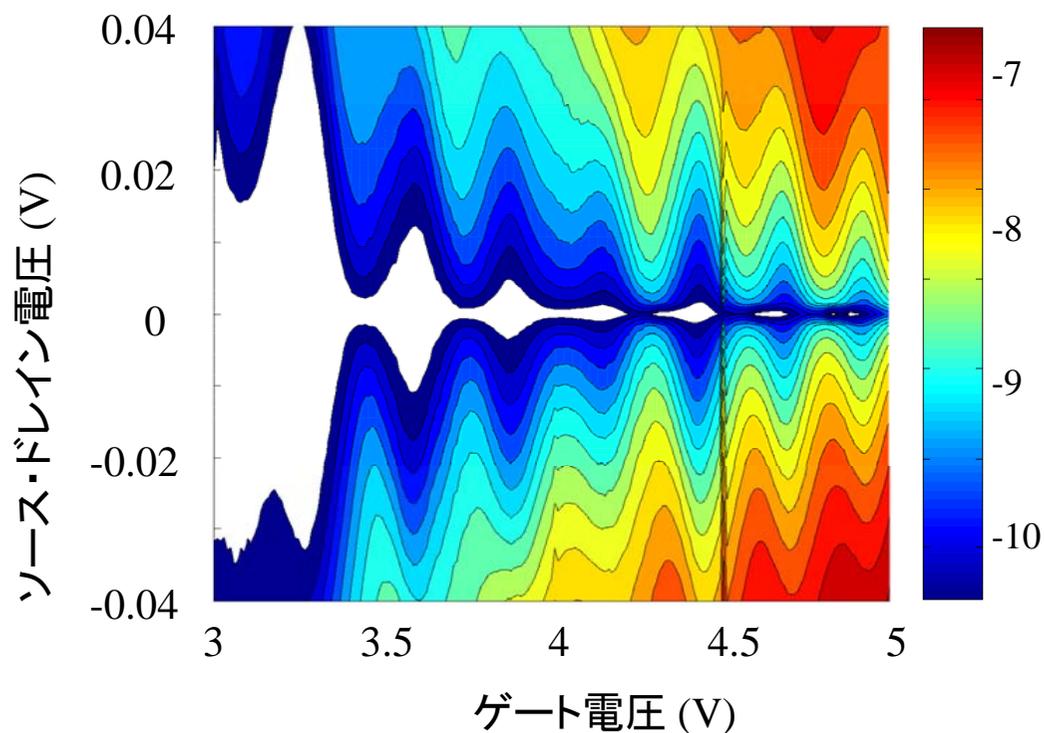


NEMSデバイス



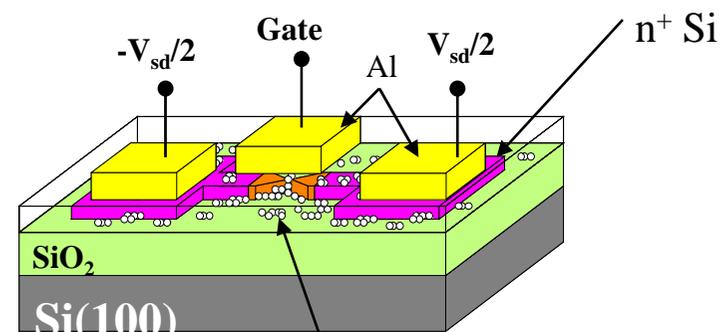
発光デバイス

# 将来のトランジスター: 単電子トランジスター



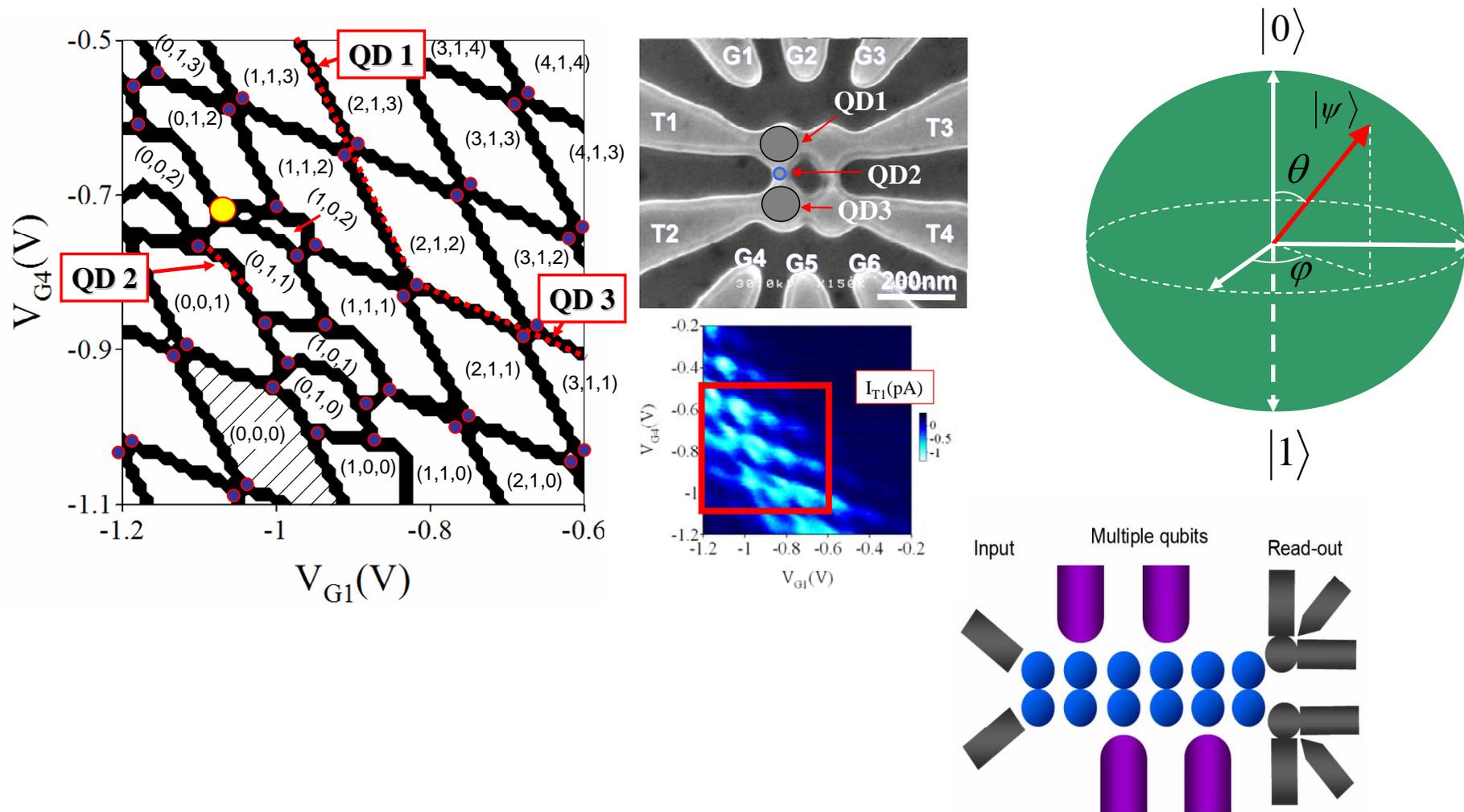
ナノ結晶  
シリコン  
量子ドット

10nm



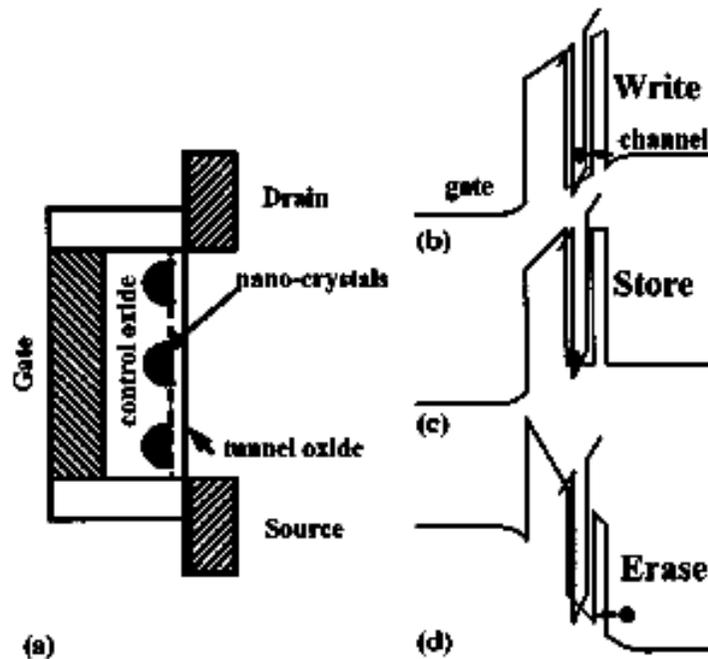
- 電子1個で動作する単電子トランジスター

# 将来の量子コンピューター

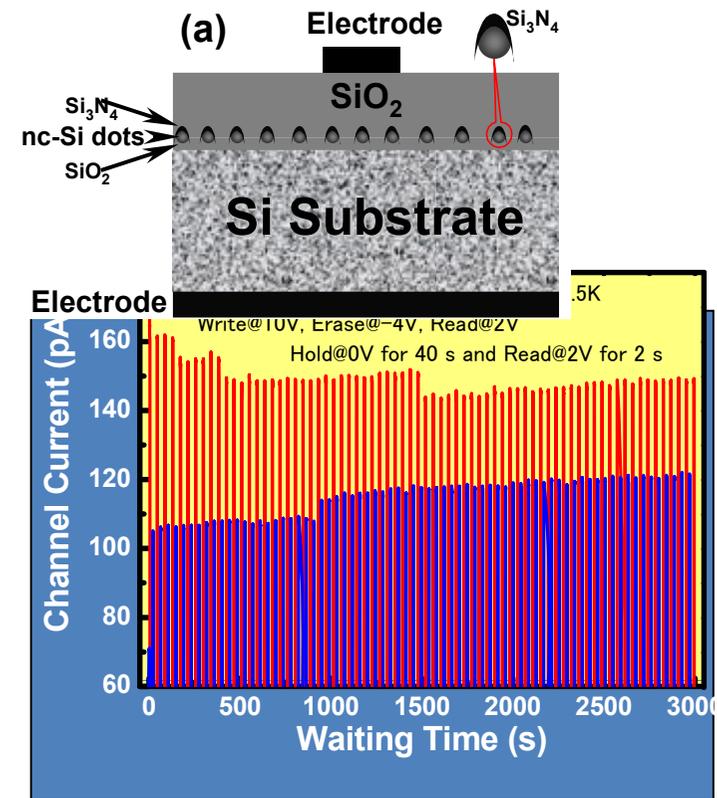


- 何年もかかる計算が数秒で！

# Si ナノドット不揮発性メモリー

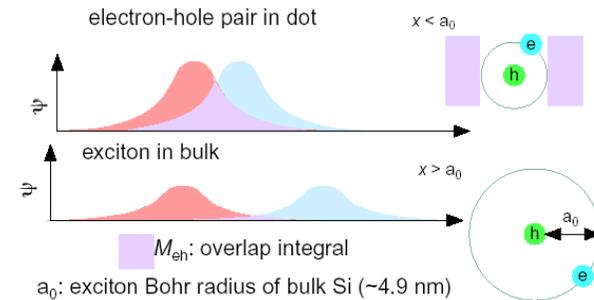
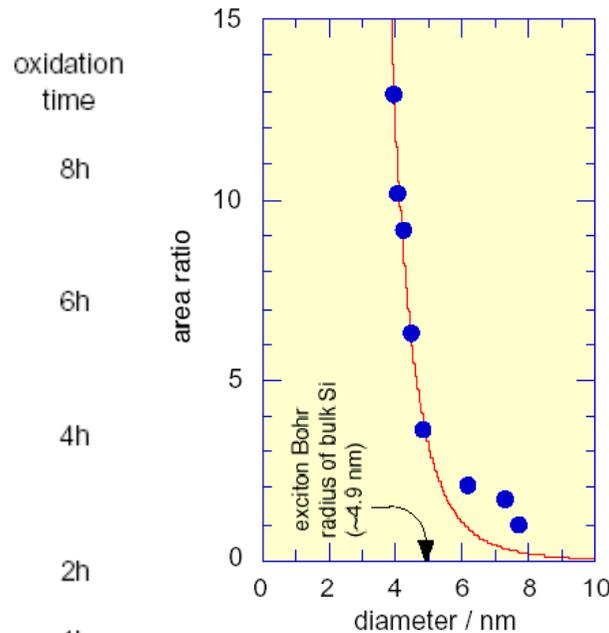
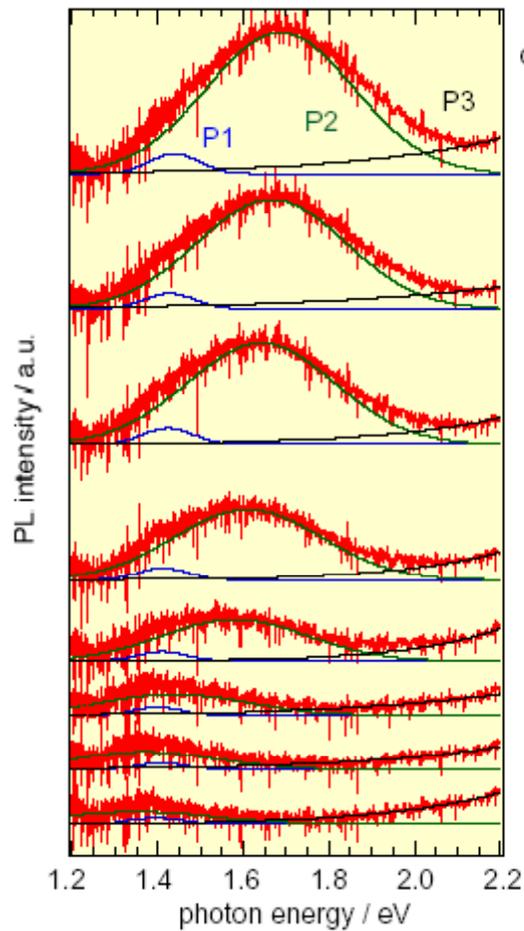


S. Tiwari 1995



1. 電源を切っても消えない半導体メモリー
2. 将来はテラビットの大容量メモリー

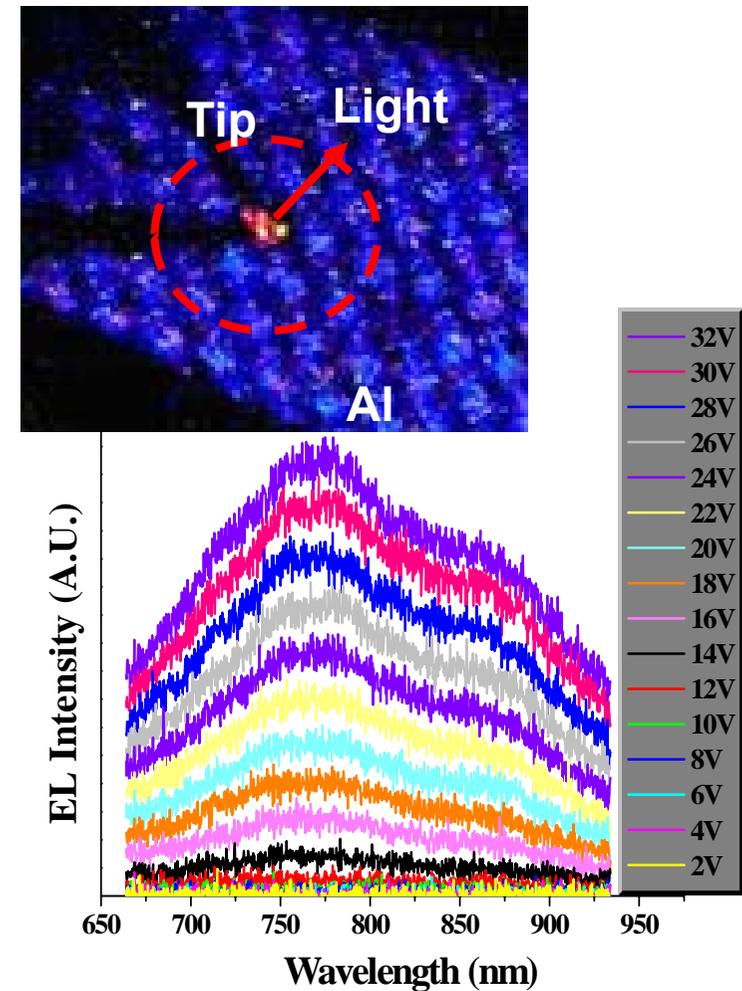
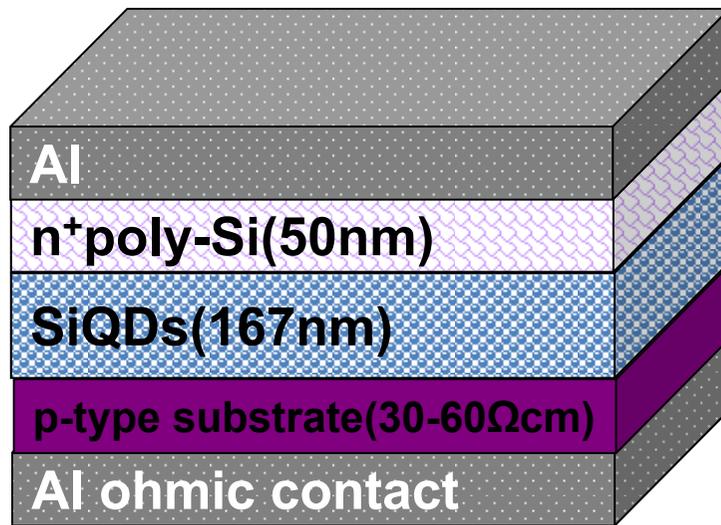
# Si量子ドットからの発光



間接遷移型バンド構造のSiは発光素子には向いていない

Si量子ドットから、フォノン支援のない、擬直接遷移的可視光発光

# Si量子ドット発光素子



Cheong, Oda, CLEO2006

- ナノ結晶Si量子ドットダイオードから可視光発光を観測

# まとめ

- ナノテクノロジーによる新しい世界
- 量子効果が顕著になる
- 量子ワイヤ、量子ドットを利用する新しいデバイスが世界を変える