

Nov. 13, 2009

電気電子基礎学 (電子材料系分野～その2～)

真島豊

応用セラミックス研究所

Beyond CMOSとは

Complementary Metal Oxide Semiconductor
(CMOS)とは異なる原理に基づき、
CMOSをしのぐデバイス

多様化: More than Moore

RF、バイオ、センサ、HV

微細化: More Moore

デザインルール

65→45→32→22 nm

2022年以降の集積回路

More Moore (微細化) は限界を迎える
Beyond CMOS は時代の要請

ナノ製造技術における トップダウン技術とボトムアップ技術

- トップダウン技術 【従来技術】
半導体プロセス技術
- ボトムアップ技術
分子の自己組織化を利用して構造体を組み
上げる



ボトムアップエレクトロニクスへ

Molecular Devices

There's Plenty of Room at the Bottom

Dr. R. P. Feynman (1959).

for chemists, engineers and physicists to combine to **build up structures from the molecular level** was influential in turning attention to the possibility of **engineering single molecules to function as elements in information-processing systems.**

<http://www.feynman.com/>

Top-Down手法に伴う技術的課題

- 微細化に伴う量子効果の顕在化
ゲート絶縁膜・素子間におけるトンネルリーク電流の増大
原子レベルの統計的ゆらぎの影響(不純物分布の制御)

high-k材料の導入・メタルゲート採用

- 消費電力の増大

回路の設計とアーキテクチャの工夫

- 光リソグラフィの限界

液浸リソグラフィ、Extreme Ultra-Violetリソグラフィ
インプリントなど

MOS FETのスケーリング

κ : スケーリング係数、 α : 電界

$$\kappa = 0.7$$

1世代で集積度は2倍

1テクノロジーノード後

$$\kappa = 1 / 0.7 = 1.42$$

$\alpha = 1$ (電界変えない)

電圧 0.7倍

電界 1倍

キャリア速度 同じ

動作速度 1.42倍

電力密度 1倍

1テクノロジーノード後

$$\kappa = 1 / 0.7 = 1.42$$

$\alpha = \kappa$ (電圧変えない)

電圧 1倍

電界 1.42倍

キャリア速度 1.42倍

動作速度 2倍

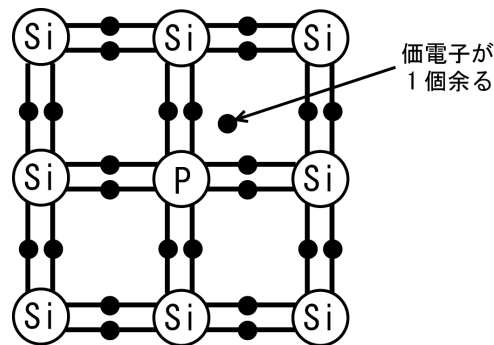
電力密度 2.86倍

半導体の不純物ドーピング

外から不純物をドーピングすることによりキャリア濃度を制御する

n型半導体

～Si結晶中のP(リン)原子～
n型ドーピング

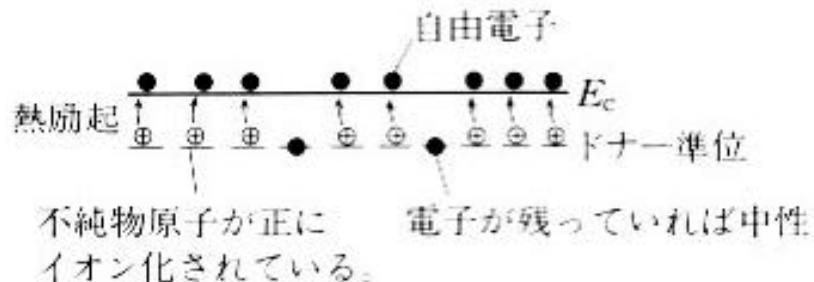


シリコン結晶中のリン原子の周りを回る電子の
シュレディンガー方程式

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m_e^*} \nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_{Si}r} \right) \varphi(\mathbf{r}) = E\varphi(\mathbf{r})$$

水素原子の場合の(1s軌道における)電子の束縛エネルギー

$$E_{1s} = -\frac{m_0 e^4}{8\epsilon_0^2 \hbar^2} = -13.6 \text{ eV}$$



Si中の電子の場合

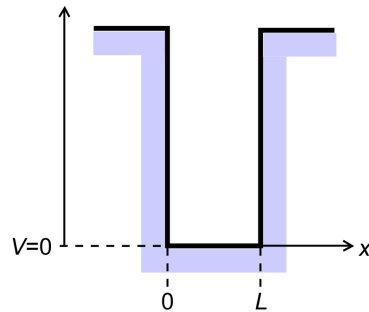
(真空中の)電子質量 $m_0 \rightarrow$ 有効質量 (m^*)
(真空中の)誘電率 $\epsilon_0 \rightarrow$ Siの誘電率 (ϵ_{Si})

$$m^* = 0.25m_0$$

$$\epsilon_{Si} = 11.9\epsilon_0$$

$$E = 24 \text{ meV}$$

1次元ポテンシャル井戸の電子の振る舞い



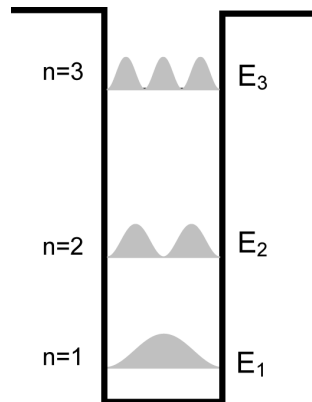
ポテンシャル $V = \begin{cases} 0 & (0 \leq x \leq L) \\ \infty & (x < 0, x > L) \end{cases}$

境界条件 $\varphi(0) = \varphi(L) = 0$

電子のエネルギーを E とすると、(定常状態における)シュレディンガー方程式は

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} = E \varphi(x) \quad (0 \leq x \leq L)$$

ここで $k^2 = \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right) E$ とすると、 $\frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} = -k^2 \varphi(x)$

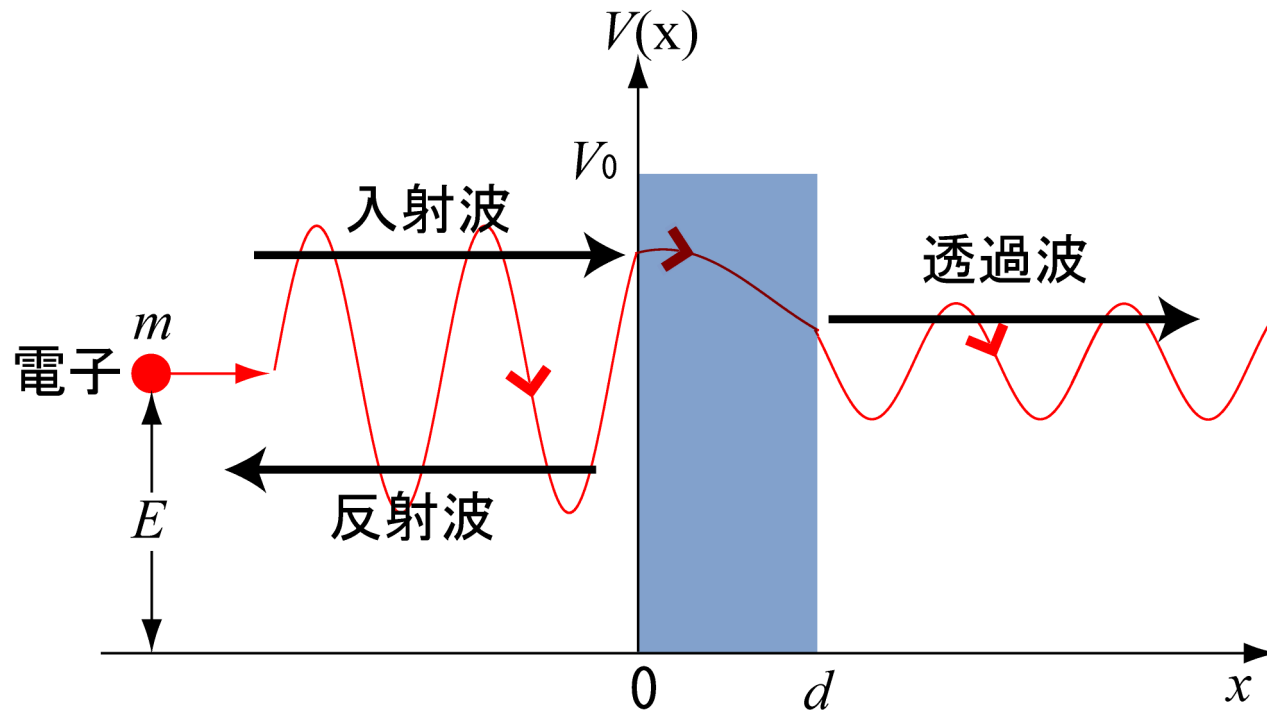


境界条件 $\varphi(0) = 0$ を一般解に代入すると、波動関数は

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= A \exp(j k x) - A \exp(-j k x) \\ &= j 2 A \sin(k x) \end{aligned}$$

トンネル効果

接触していないのに電流が流れるトンネル電流



粒子のエネルギーがポテンシャル障壁よりも低くても粒子の波としての性質のため $0 < x < d$ の領域で波動関数が減衰しながら、有限の確率で障壁を透過する。これをトンネル効果と呼ぶ。

トンネル効果

質量 m 、エネルギー E を持った粒子が高さ V_0 、幅 d のポテンシャル障壁を透過する確率を考える。Schrödinger 方程式により

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} E\psi(x) \quad (x < 0, d < x)$$

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} (E - V_0)\psi(x) \quad (0 \leq x \leq d)$$

よって一般解は

$$\psi(x) = A \exp(ikx) + B \exp(-ikx) \quad x < 0$$

$$\psi(x) = C \exp(i\kappa x) + D \exp(-i\kappa x) \quad 0 \leq x \leq d$$

$$\psi(x) = F \exp(ikx) \quad d < x$$

$$\text{ただし } k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}, \quad \kappa = \frac{\sqrt{2m(E - V_0)}}{\hbar}$$

トンネル効果

$x=0, d$ それぞれにおける $\psi(x), \frac{d\psi(x)}{dx}$ の境界条件から

$$A + B = C + D$$

$$k(A - B) = \kappa(C - D)$$

$$C \exp(ikd) + D \exp(-ikd) = F \exp(ikd)$$

$$\kappa(C \exp(ikd) - D \exp(-ikd)) = k(F \exp(ikd))$$

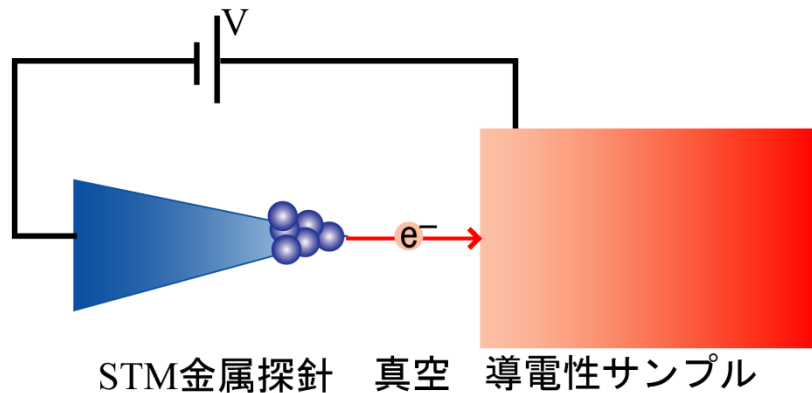
以上の式から、 $E < V_0$ における波動関数の透過率 T は

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

障壁の厚さ d が非常に薄いとき T は次のように近似される

$$T \approx \frac{16E(V_0 - E)}{V_0^2} \exp \left[-2d \sqrt{2m(V_0 - E)} / \hbar \right]$$

トンネル電流



$$I_{tunnel} \propto \exp \left[-2d \frac{\sqrt{2m_e(\Phi - eV)}}{\hbar} \right]$$

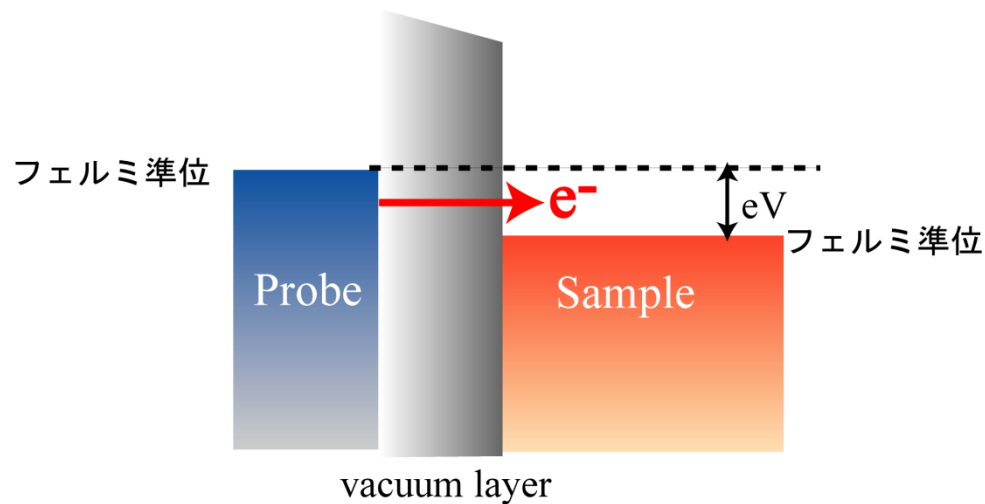
d : プローブ-試料間距離

m_e : 電子質量

$\Phi = \frac{\Phi_{probe} + \Phi_{sample}}{2}$: 平均仕事関数

e : 電子電荷

V : プローブ-試料間印加電圧



真空中において、プローブ-試料間距離 d が $1\text{\AA}$ 変動すると、トンネル電流は1桁変化する。STMの垂直方向における高分解能($0.1\text{\AA}$ 以下)は、このトンネル電流の強い距離依存性により生まれる。

単電子デバイス

単一電子により動作し、高集積、高速で低消費電力を実現することが期待されるBeyond CMOSにむけたデバイス
単電子トランジスタ: 電子を1つずつソースからドレインまでトンネル原理により運ぶ3端子のスイッチング素子

課題:

常温で動作する単電子トランジスタの製造技術の確立

- ・常温動作: 数nmスケールの単電子島
- ・サイズ揺らぎの制御: 閾値電圧変動の抑制

クーロンブロッケード現象

Coulomb blockade effect

単一電子現象を観察するには電子のトンネルに伴う
静電エネルギー変化 W_C が熱揺らぎよりも大きいことが要求される。

$$W_C = \frac{e^2}{2C} \gg k_B T \quad C: \text{トンネル接合容量、} k_B: \text{ボルツマン定数、} T: \text{温度}$$

トンネル効果を有効に利用するには、量子揺らぎによるコンデンサの漏れ電流が小さいこと、即ちトンネル接合の時定数 CR が量子揺らぎの時間より充分長くないといけない。そのためトンネル抵抗 R_T には不確定性原理より以下の不等式を満たす必要がある

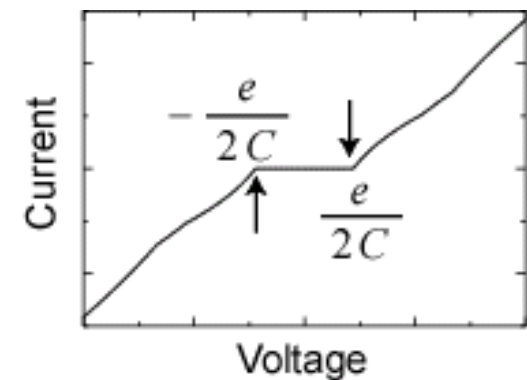
$$\Delta W \cdot \Delta t \sim \frac{e^2}{C} \cdot R_T C = e^2 R_T > h \quad \therefore R_T \gg \frac{h}{e^2} = 25.8 \text{ k}\Omega \text{ (量子抵抗)}$$

上記の条件下において、接合に電荷 Q が蓄えられている場合、電子が一つトンネルすることによる静電エネルギーの変化 W_C は

$$W_C = \frac{(Q \pm e)^2}{2C} - \frac{Q^2}{2C} = \frac{e}{C} \left(\frac{e}{2} \pm Q \right)$$

電子は系全体のエネルギーが小さくなる方向にトンネルする。つまり $W_C > 0$ となるようなトンネルは抑制される。つまり以下の電圧範囲において電子はトンネルできず電流が流れない。

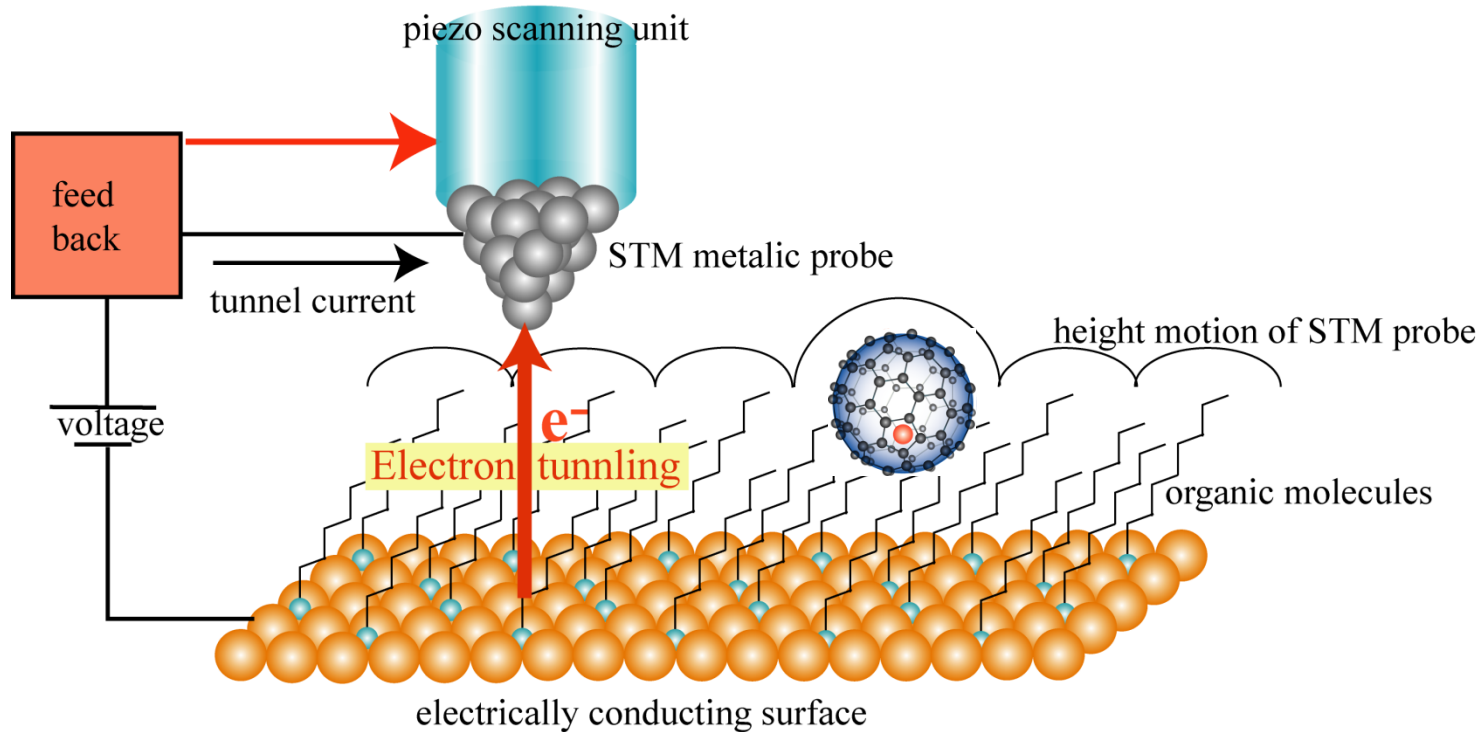
$$-\frac{e}{2} < Q < \frac{e}{2} \quad \therefore -\frac{e}{2C} < V < \frac{e}{2C}$$



Coulomb blockade 現象

走査型プローブ顕微鏡SPM

Scanning Tunneling Microscopy (STM)
Scanning Tunneling Spectroscopy (STS)



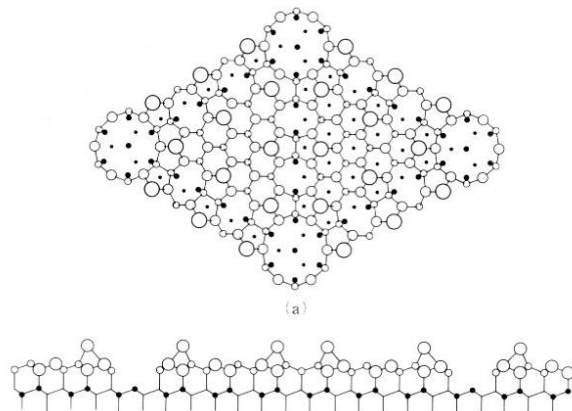
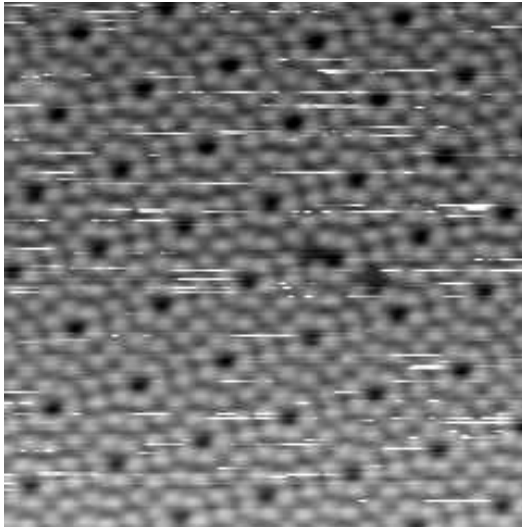
STM: Molecular image

STS: I-V characteristic on a nanodot

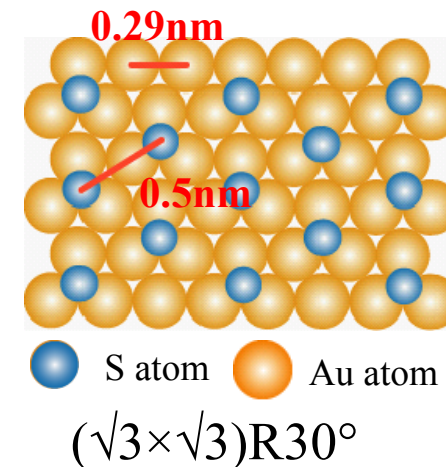
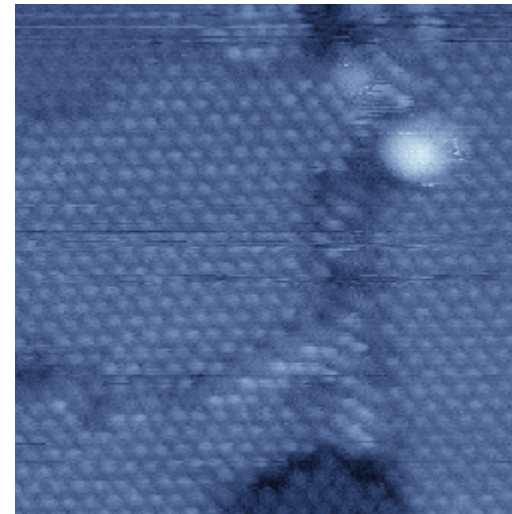
原子スケールでの表面凹凸像ならびに局所状態密度の観察が可能となる。

分子分解能STMで原子や分子を見る

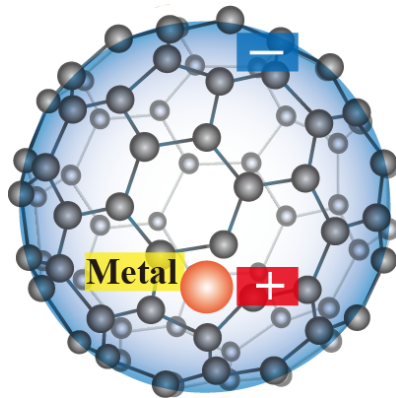
Si(111)面の7×7表面再配列
のSTM像



Au(111)面のアルカンチオール分子
のSTM像
右上は、金属内包フラーレン分子

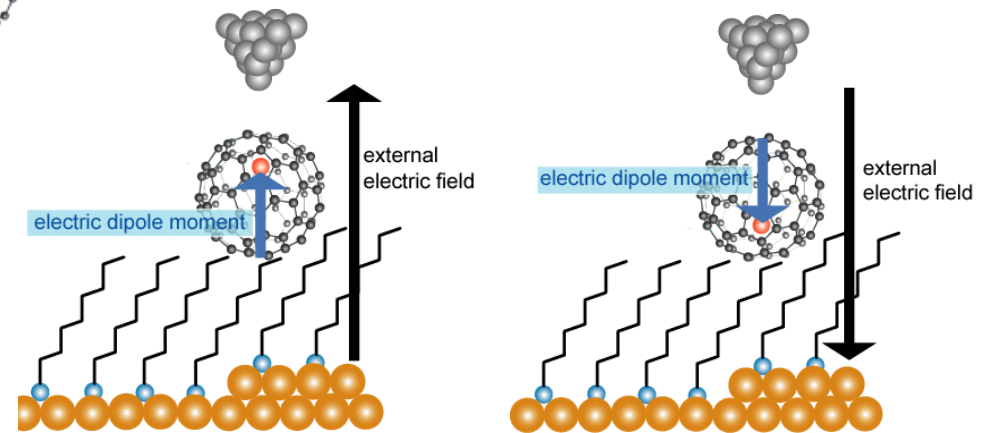
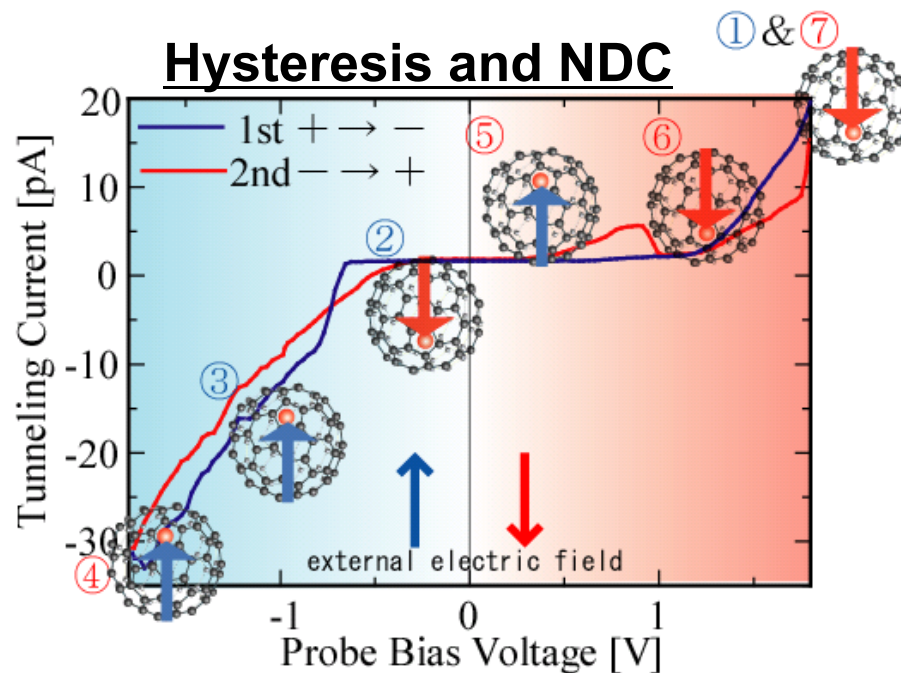


単一金属内包フラーレン分子配向スイッチ



金属内包フラーレン

フラーレン殻の中に1個の金属原子が存在する。金属は $+3e$ 、フラーレン殻は全体で $-3e$ に帯電しているので、電氣的な偏りが存在する。このため、外部から電界を掛けると向きを変えることができ、単一分子のスイッチとして機能する。



Au(111)/octanethiol(C8)/Tb@C₈₂

Y. Yasutake, Z. Shi, T. Okazaki, H. Shinohara, Y. Majima, *Nano Letters* 5, 1057 (2005).

我々のこの論文は、ITRS2005の新探求素子の分子素子として引用されています。

2022年のエレクトロニクスは 君たちが切り拓く

君たちの時代はナノスケールの材料技術が
新たなエレクトロニクスを創出する

電気電子工学科専門科目と 本講義との接点

- **電磁気 I、II (必修、3、4学期)**との関わり
電荷、電界、電位の概念
誘電体と電束密度
- **半導体物性(準必修、4学期)**との関わり
バンド図
キャリア濃度
ドリフトと拡散
トンネル過程
- **電子デバイス(準必修、5学期)**との関わり
バイポーラトランジスタ
MOS FET
- **量子力学(選択、5学期)**との関わり
波動方程式
電子の力学
固体物性論