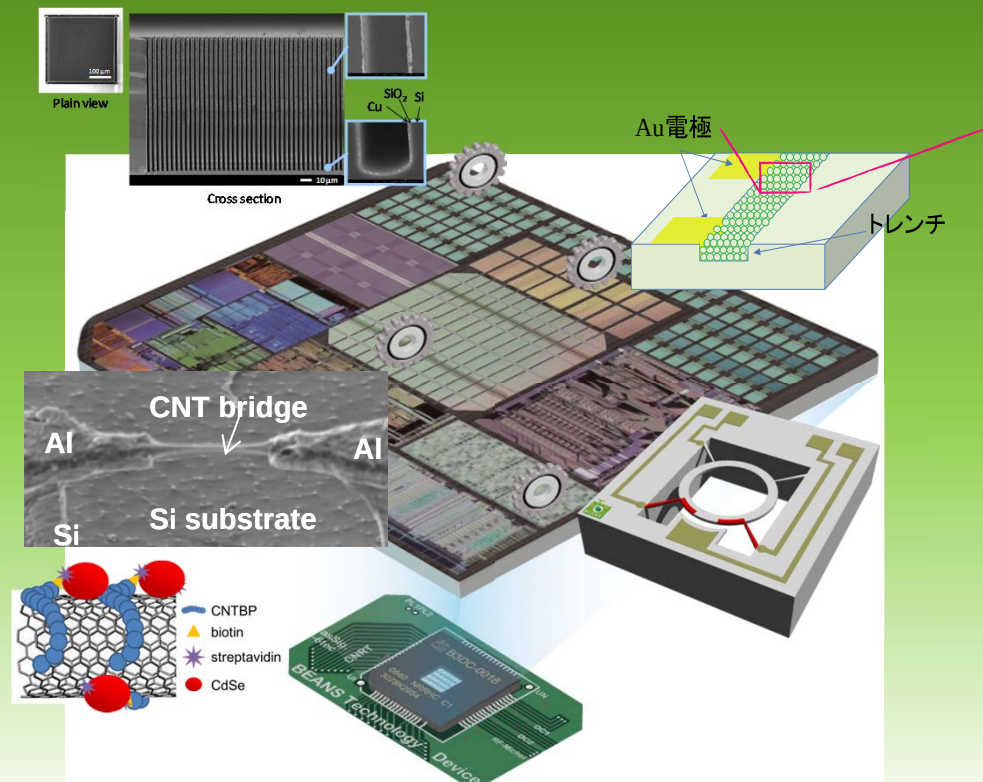


ナノの合わせ技がもたらす MEMSプロセスの新地平



3D BEANS センター
東京大学大学院工学系研究科
杉山 正和

3D BEANSの研究者たち



★ 企業

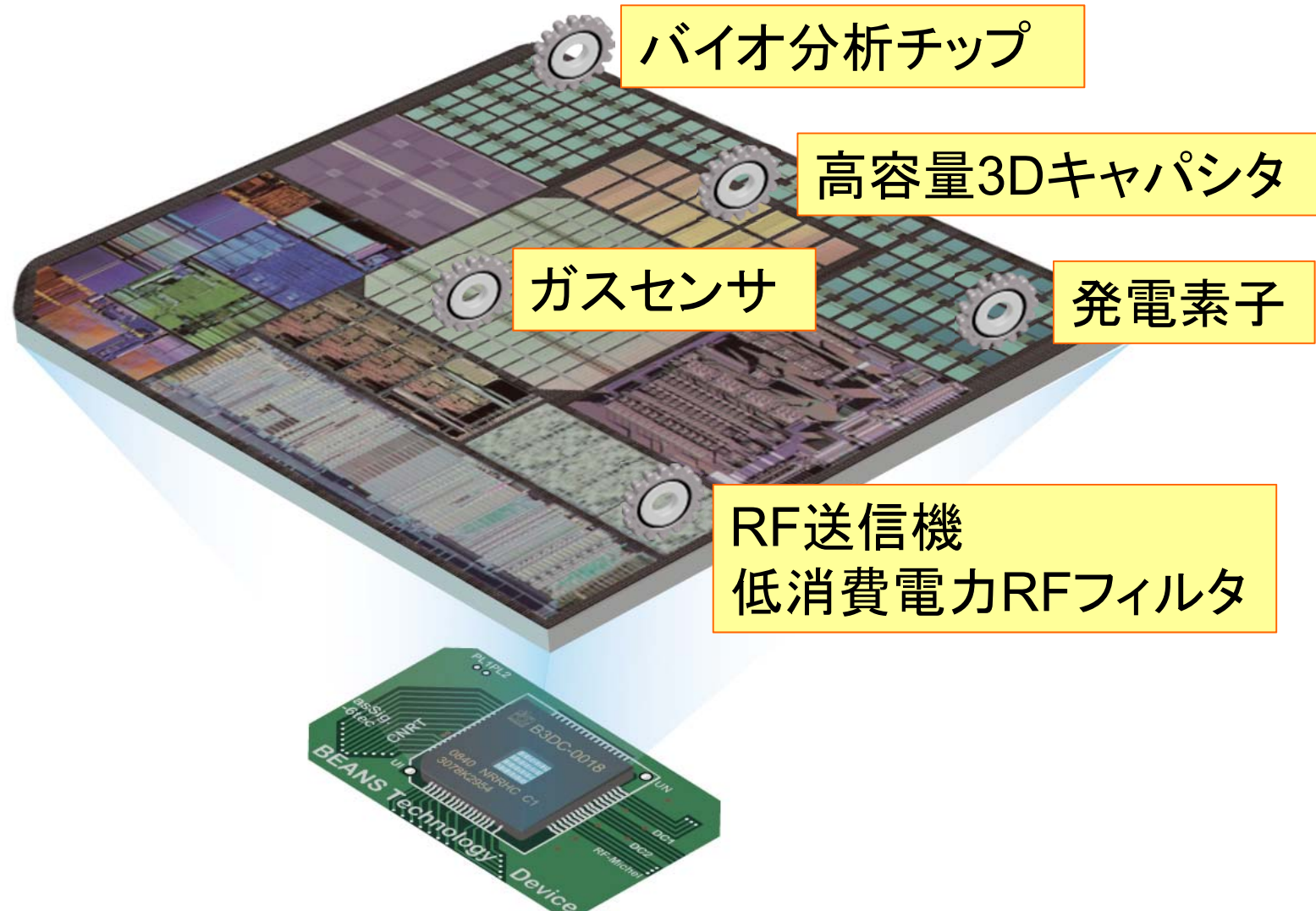
★ 大学

★ アドミニストレーション・研究補助

3D BEANSが可能にする集積MEMS



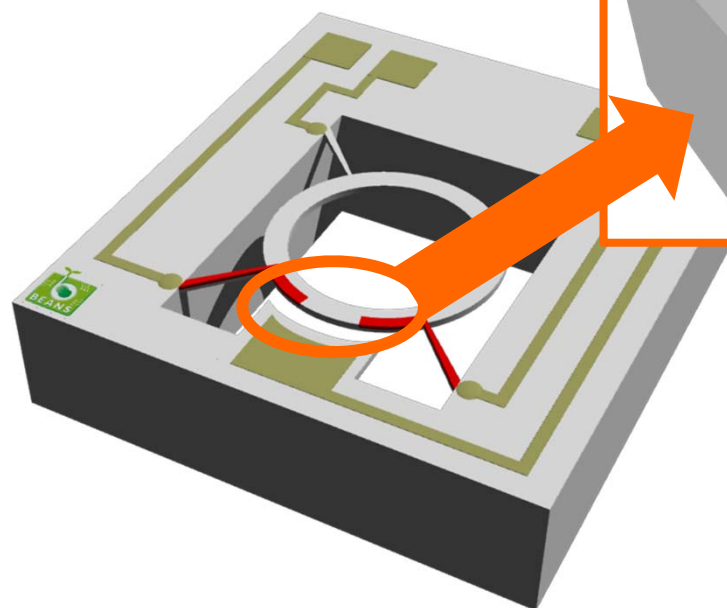
集積センサーノード



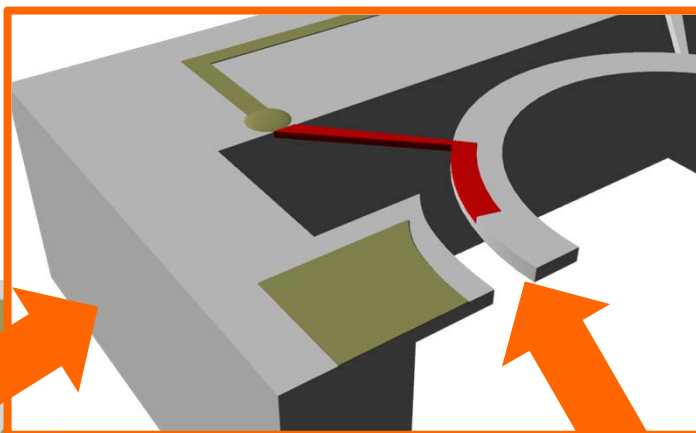
低消費電力RFフィルタ



新デバイス



MEMS振動子の側壁に
MOSFETを形成



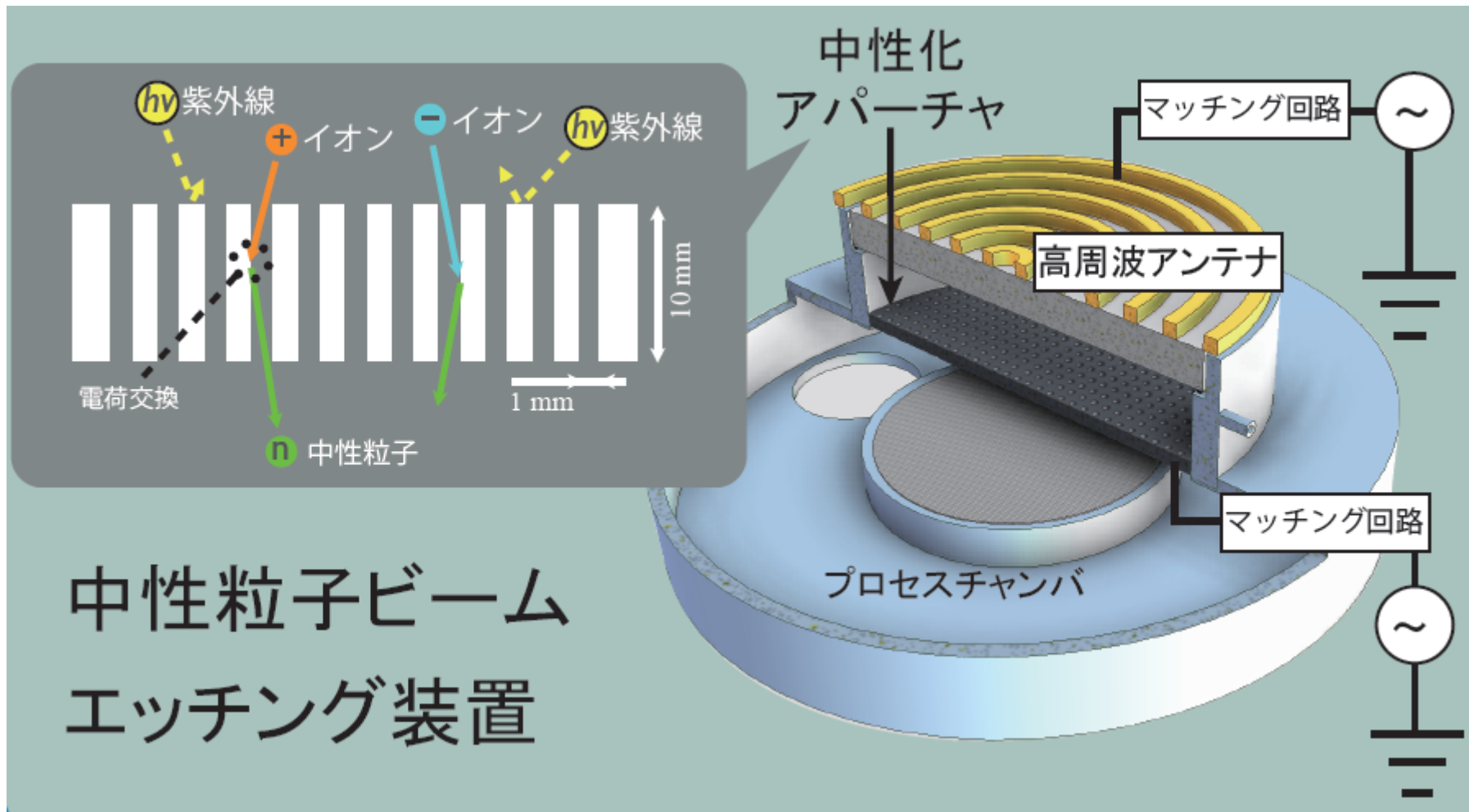
トレンチ側壁に電子チャネルを形成
ダメージフリーの側壁エッチングが必須

中性粒子ビームエッチング



新プロセス

中性粒子ビームエッチング



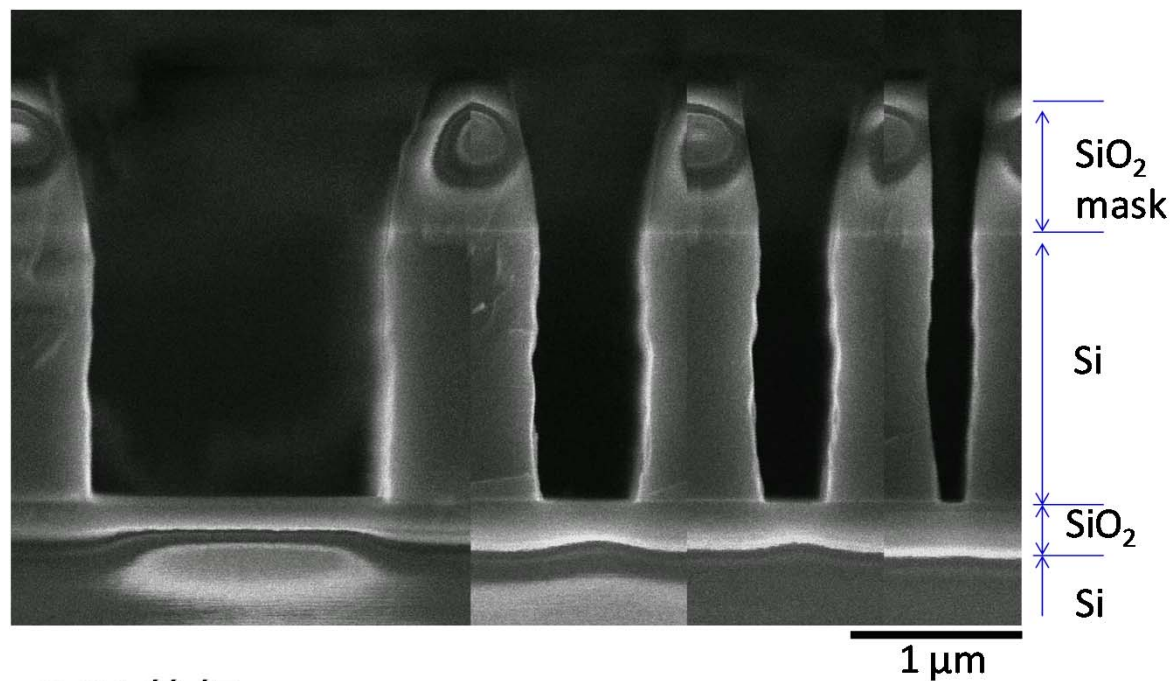
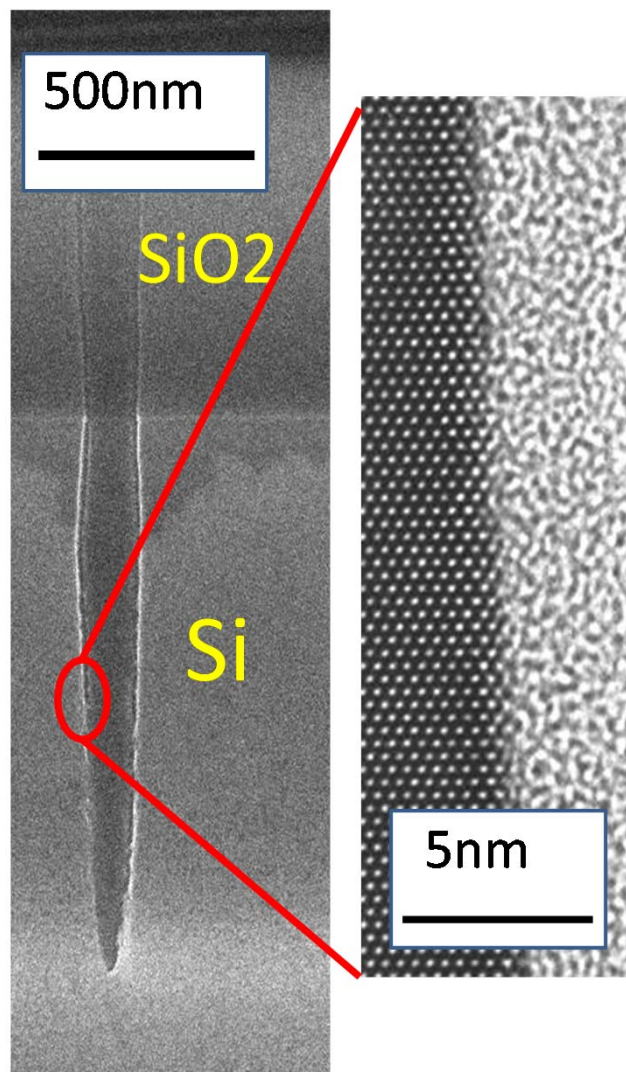
中性粒子ビーム エッチング装置

- 表面へのイオン・紫外線の入射をカット → ダメージフリー

深掘り・高アスペクト比への挑戦



寸法が異なるパターンを
ノッチフリーで加工可能

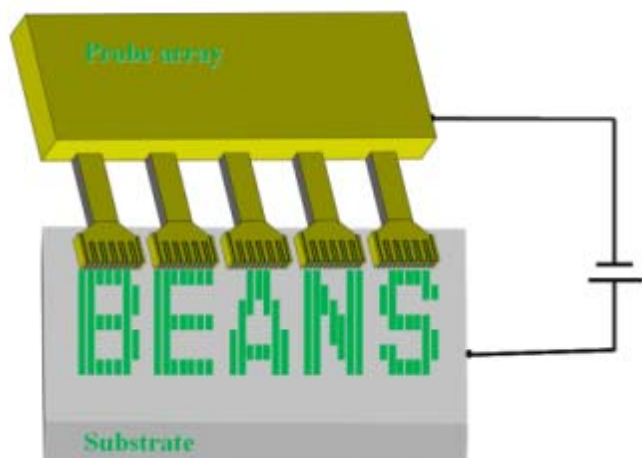


SOI基板

長寿命ナノプローブリソグラフィー

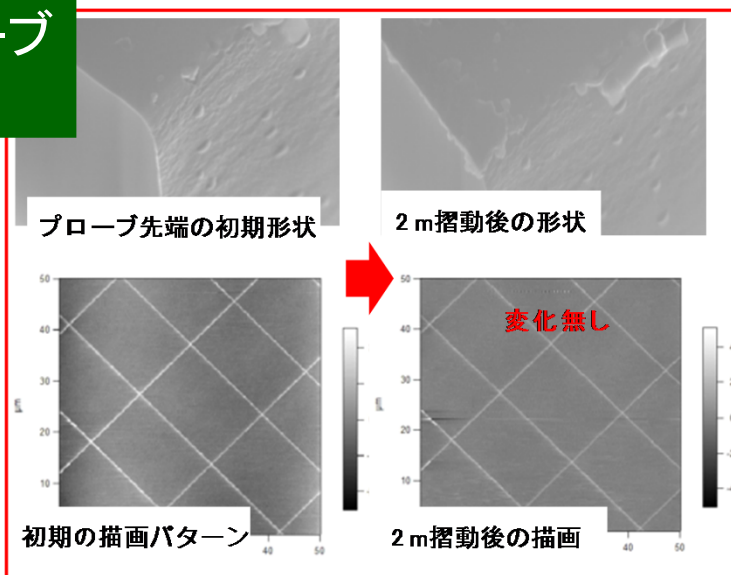


マルチプローブリソ

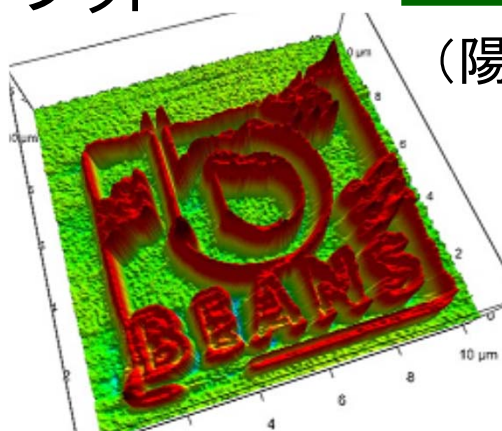


耐摩耗プローブ 2 m描画

(陽極酸化)

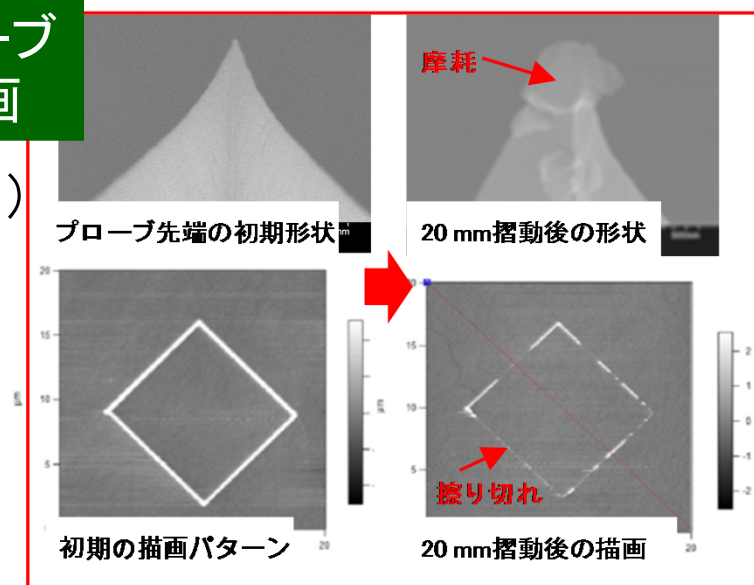


- 10 nm精度の描画
- 高スループット
- 低コスト



市販プローブ 2 cm描画

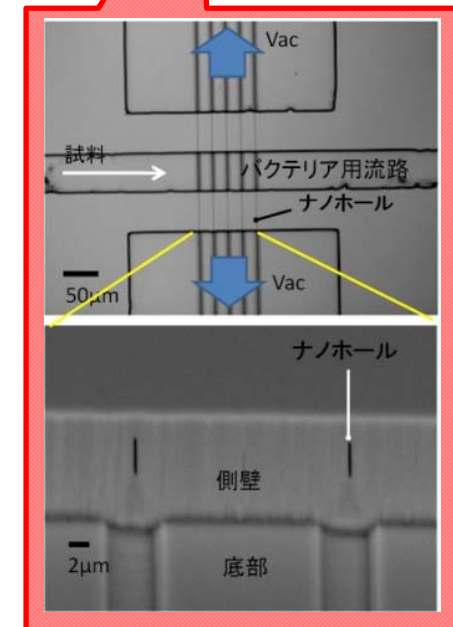
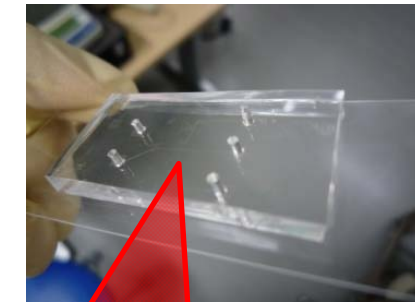
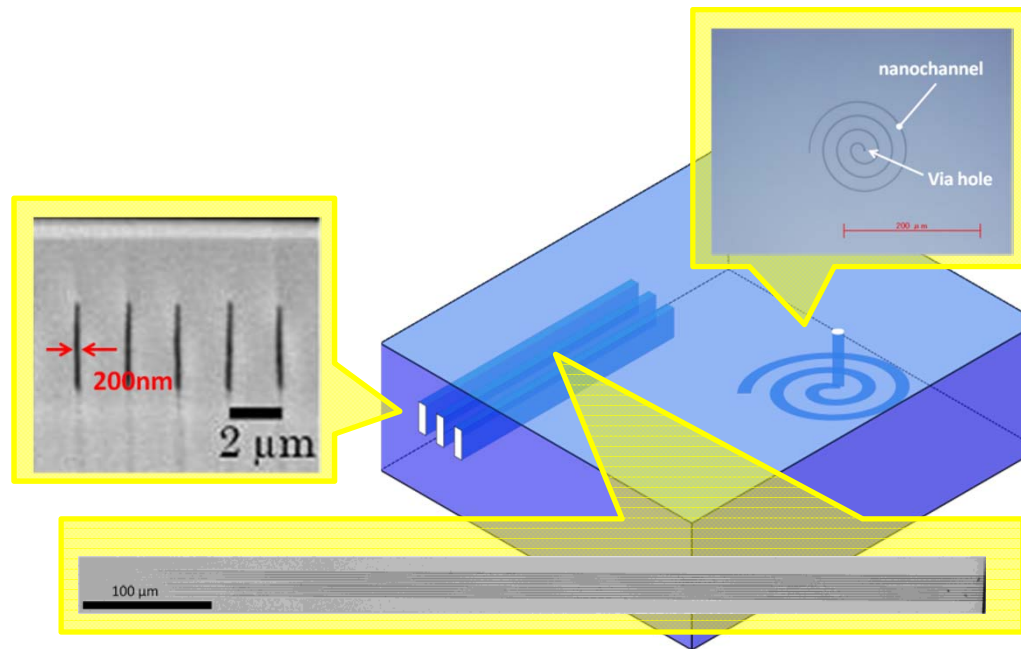
(陽極酸化)



バイオアッセイチップ



サブ μm 寸法の埋め込みチャネル

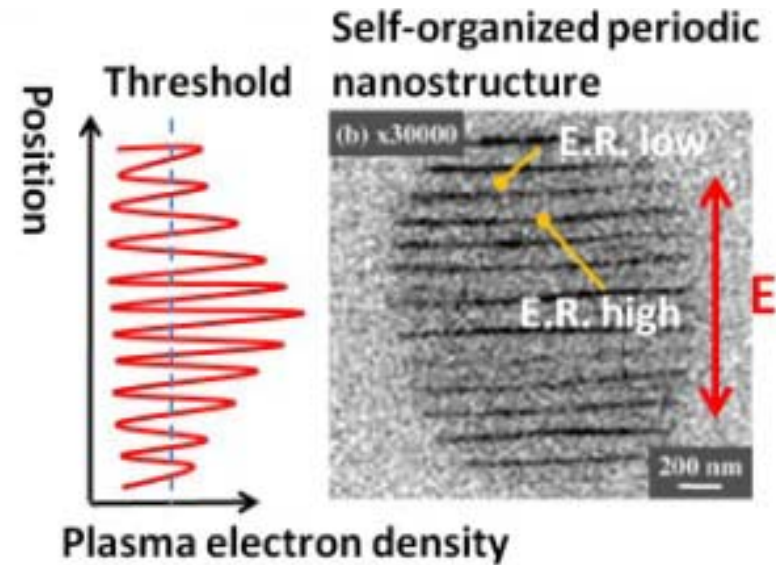
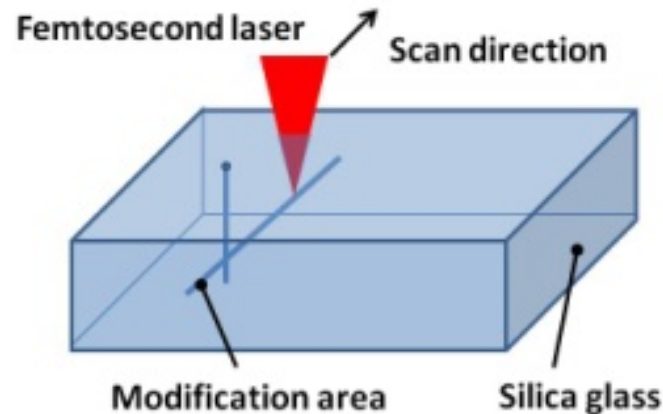


フェムト秒レーザーアシストエッチング

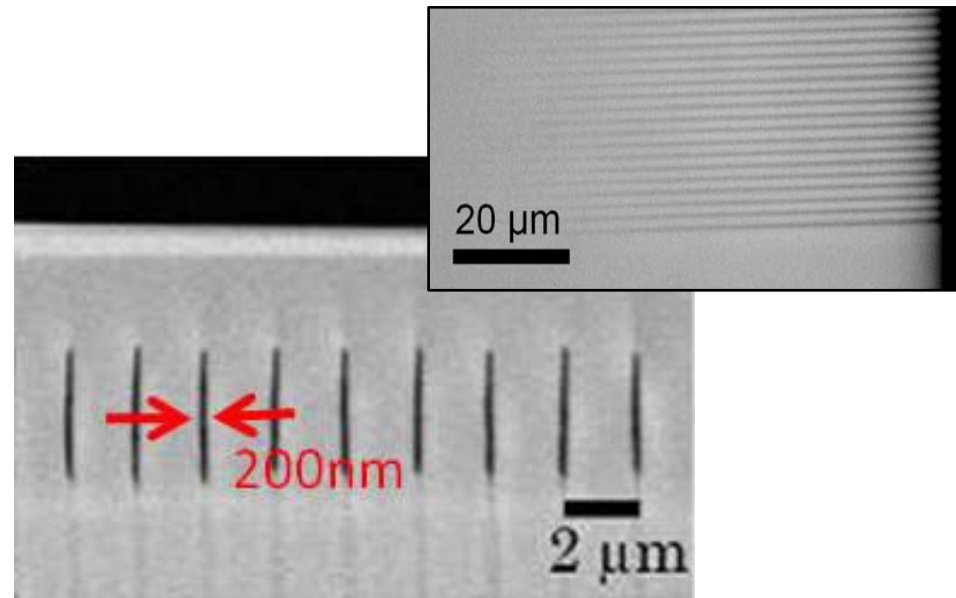
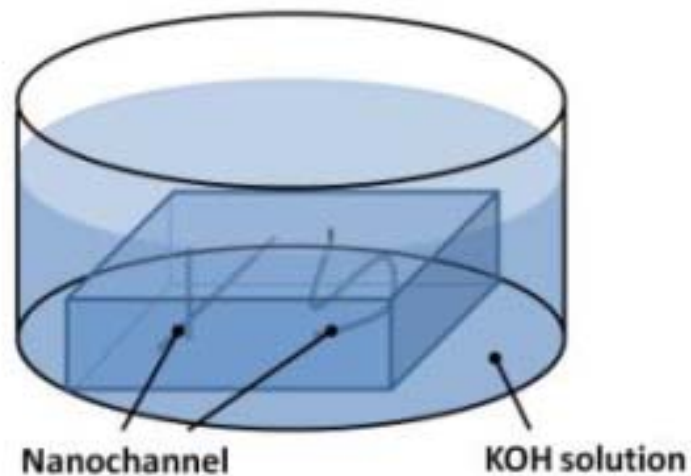
フェムト秒レーザーアシストエッチング



露光 (レーザー照射)



現像 (ウェットエッチ)



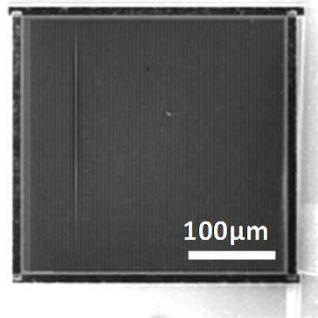
高アスペクト比3Dキャパシタ



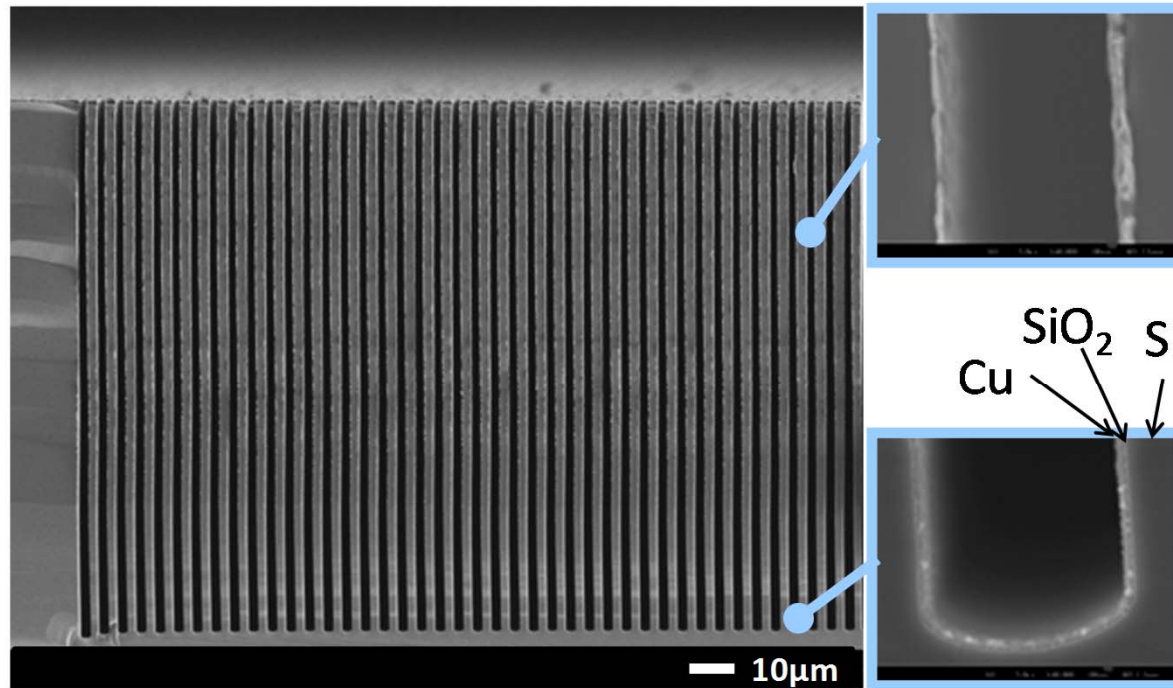
発電 → **蓄電** → センサデバイス
RF送受信機



深掘り3次元トレンチを用いた高容量キャパシタ



Plain view



Cross section

平面状キャパシタに比べて70倍の
容量増大(比表面積の増大効果)

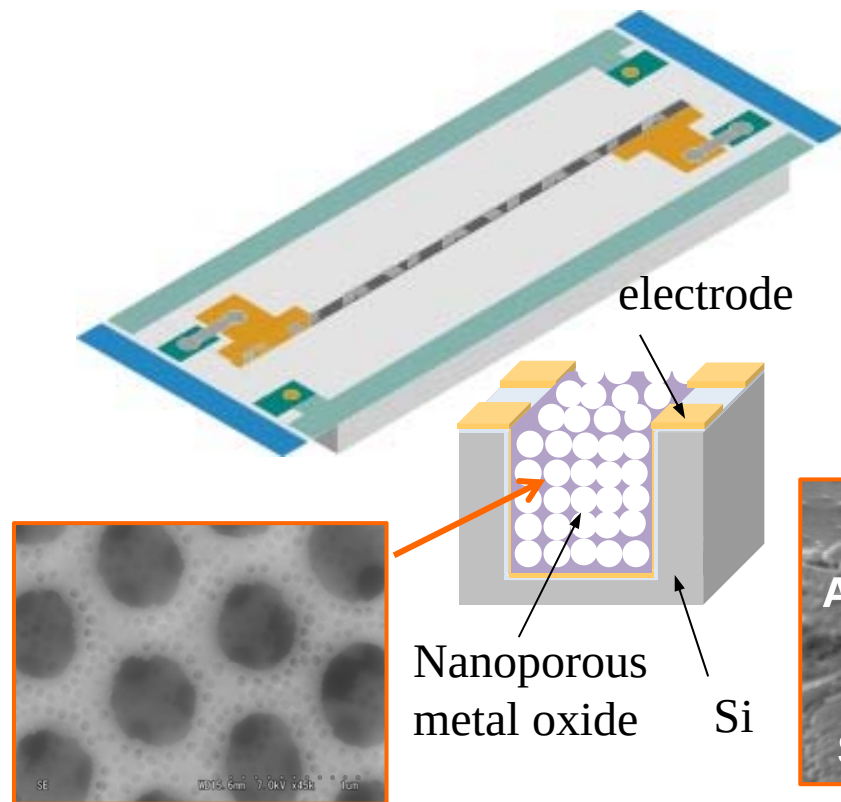


超臨界流体製膜

高感度ガスセンサ



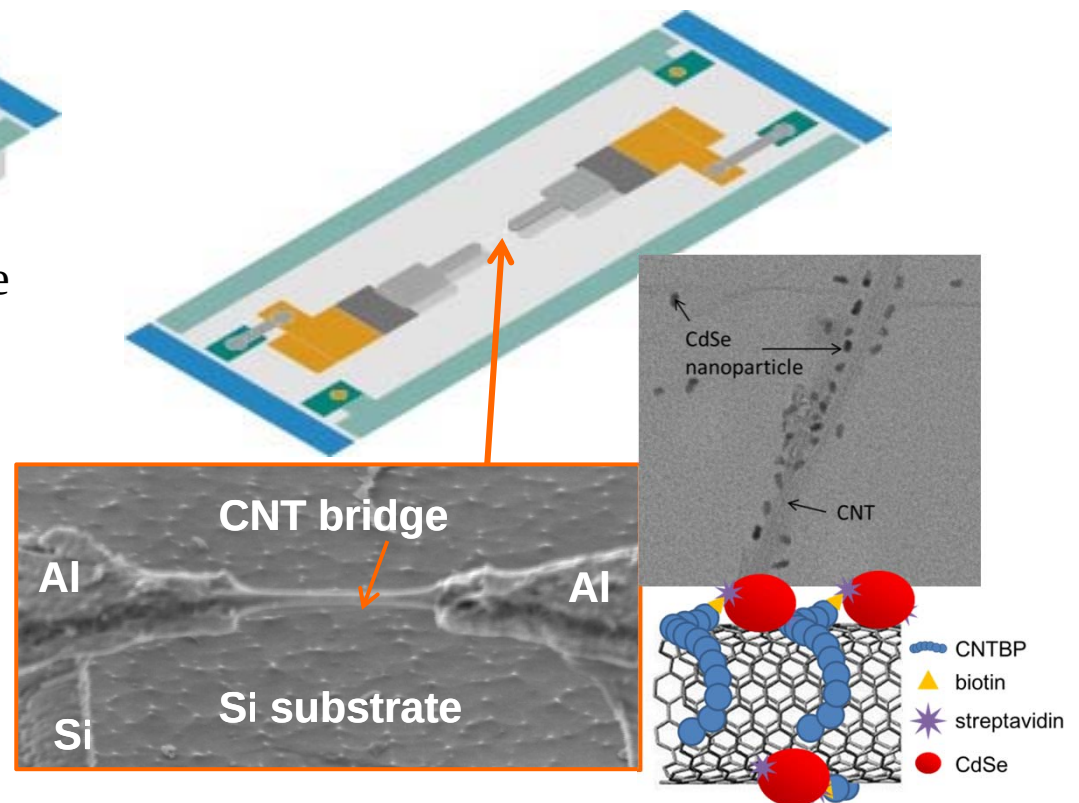
ナノポーラスガスセンサ



トレンチ内への
ナノ粒子自己組織化配列



CNTバンドルガスセンサ



CNTの誘電泳動



ペプチドによるナノ粒子の修飾

超低損傷エッチングシミュレーション3次元形状予測



●中性粒子ビームエッチング実用化に向けた統合的シミュレーション

TD-DFTシミュレーション

□ 中性化過程

アパーチャ内
イオン軌道シミュレーション

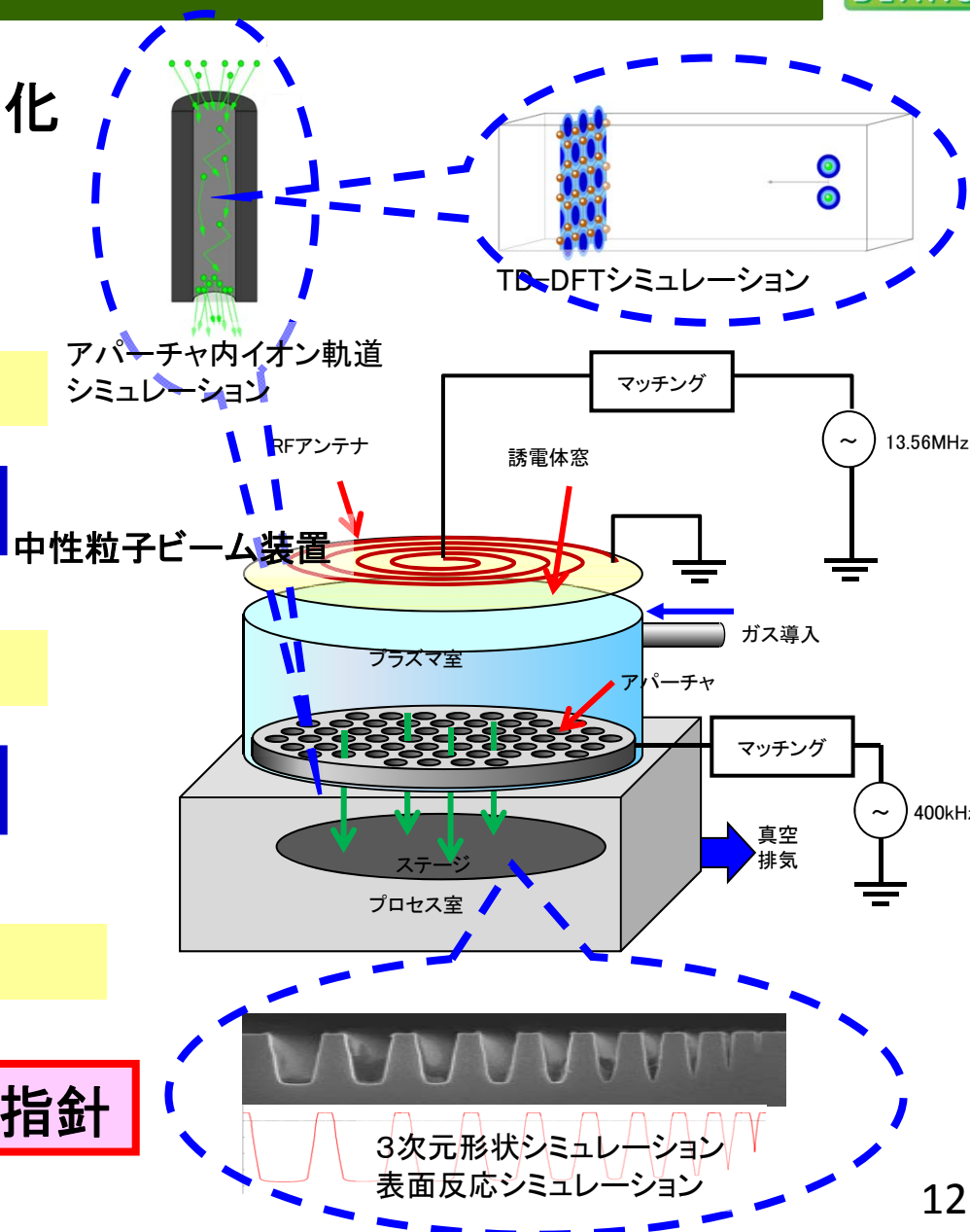
□ フラックスのエネルギー・角度分布

エネルギー角度分布

3次元形状シミュレーション

□ 高アスペクト比エッチング形状予測

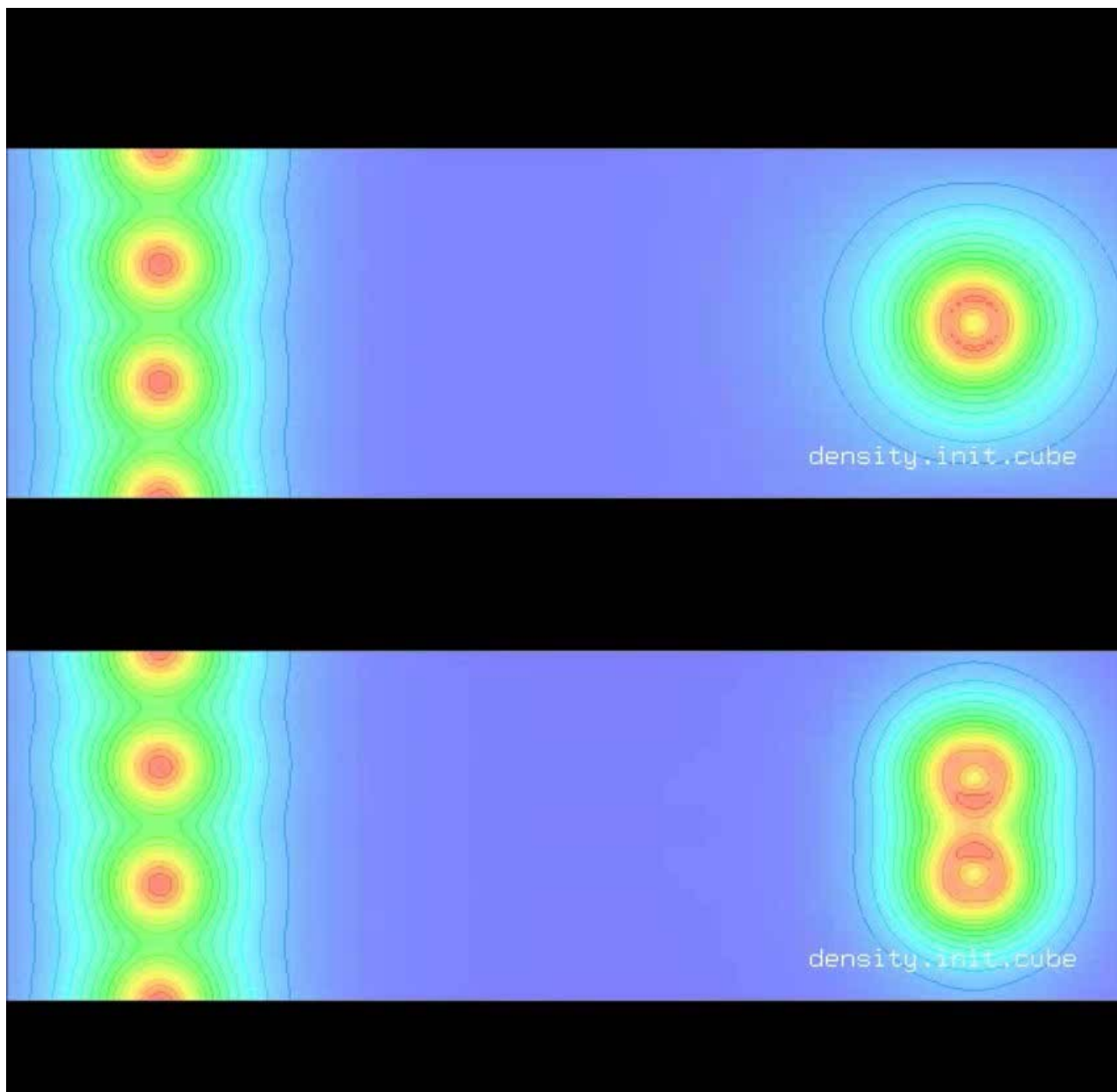
深掘エッチングのための設計・加工指針



中性化過程のTD-DFTシミュレーション



graphite



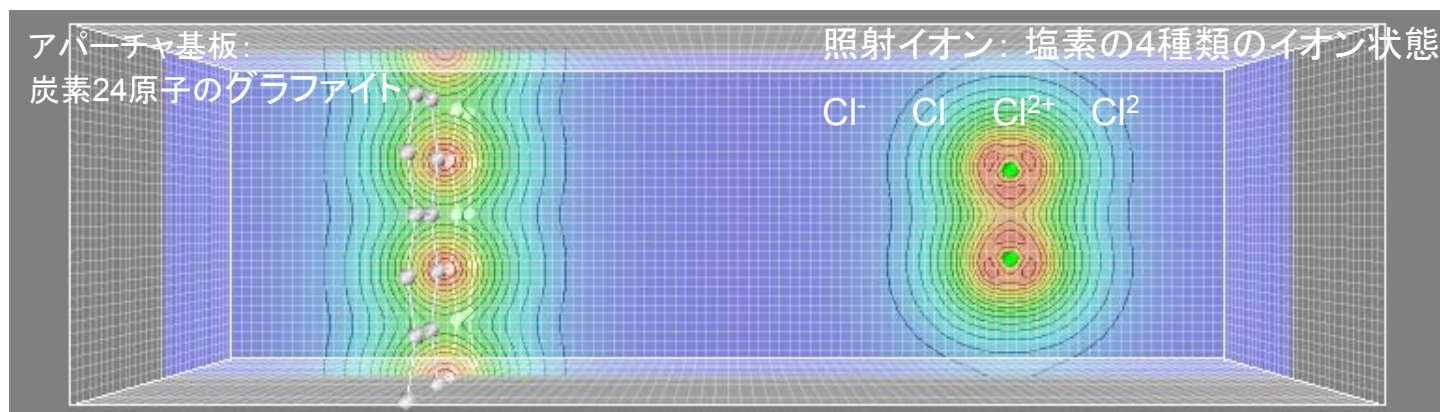
Cl^-

Cl_2^+

中性化過程のTD-DFTシミュレーション



●時間依存Kohn-Sham方程式で波動関数の時間発展を数値計算



TD-DFTシミュレーションにおけるイオンと基板の初期位置

●中性化過程を解析し、正イオンと負イオンの中性化確率の違いを解明

12eV	価電子数		遷移反応の確率方程式			
	衝突前	衝突後	イオン化率		中性化率	
Cl ⁻	8.00	7.13	Cl ⁻	→ 13% Cl ⁻ +	87% Cl	
Cl	7.00	7.05	Cl	→ 5% Cl ⁻ +	95% Cl	
Cl ₂ ⁺	13.00	13.78	Cl ₂ ⁺	→ 22% Cl ₂ ⁺ +	78% Cl ₂	
Cl ₂	14.00	13.98	Cl ₂	→ 2% Cl ₂ ⁺ +	98% Cl ₂	

アパーチャ基板衝突による電子状態の遷移

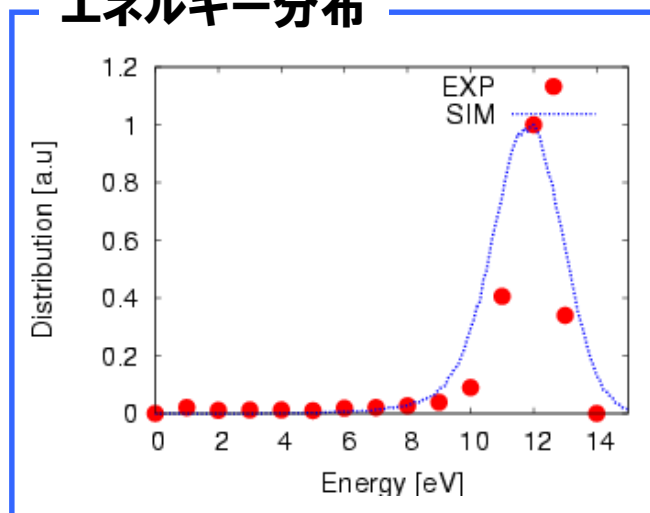
アパーチャ内イオン軌道シミュレーション



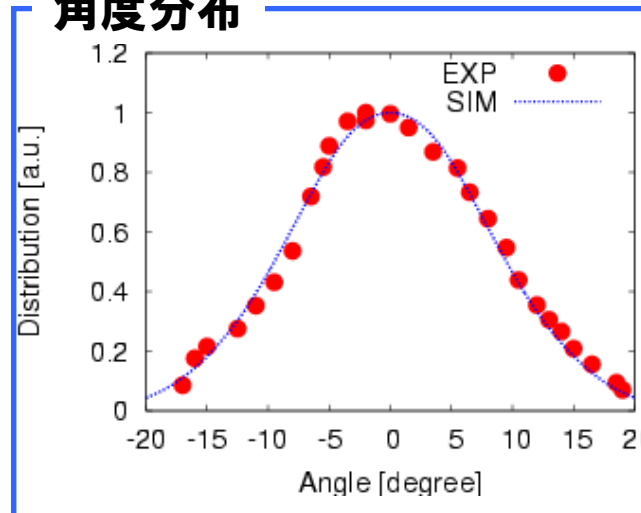
●アパーチャを通過する粒子のエネルギー・角度分布を予測

■アパーチャARとビーム角度分布の関係を解明

エネルギー分布

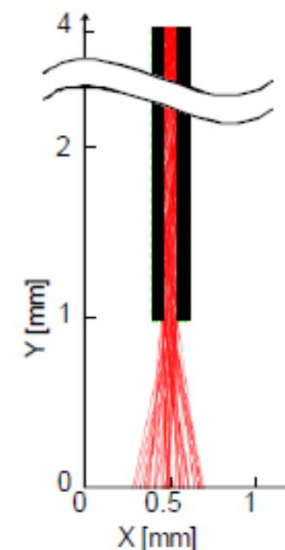


角度分布



※残留イオンにおける実測値との比較

アパーチャ通過後の
粒子軌道



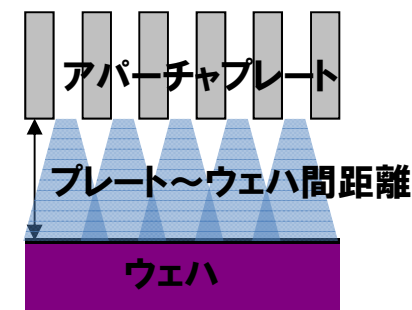
●8インチ口径装置のためのアパーチャ設計指針を提供

■アパーチャ開口率 ⇔ ウェハ照射分布均一性

■開口率10%以上でウェハ上照射分布が均一



8インチ口径装置実現へ向けた知見を提供



3次元形状シミュレーション



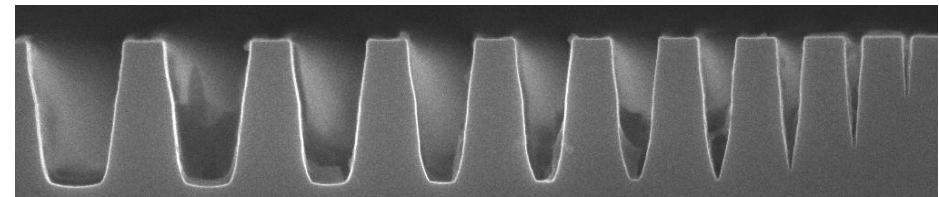
●実加工形状キャリブレーション による表面反応の解明

- 形状シミュレーション
表面デポジションが
高アスペクト比加工を阻害??



アパーチャ由来の炭素のデポジションを発見
→アパーチャのDLC被覆

実加工形状



シミュレーション結果



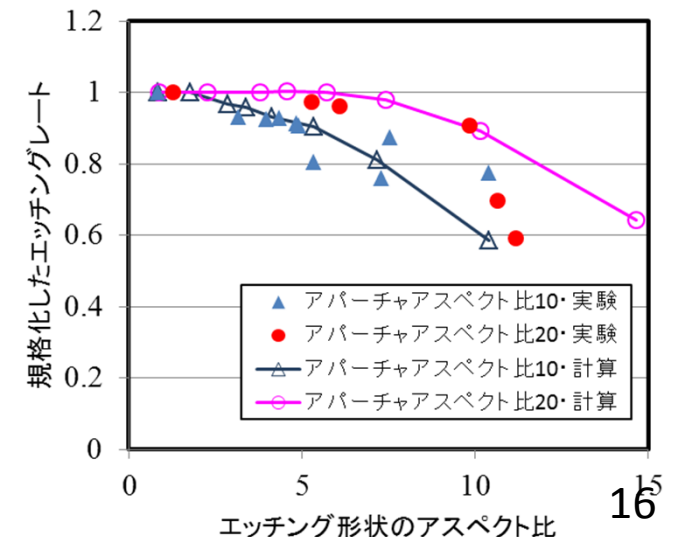
●アパーチャの高AR化による プロセス改善

- 予測: アパーチャのアスペクト比大
→エッチング形状のアスペクト比増大

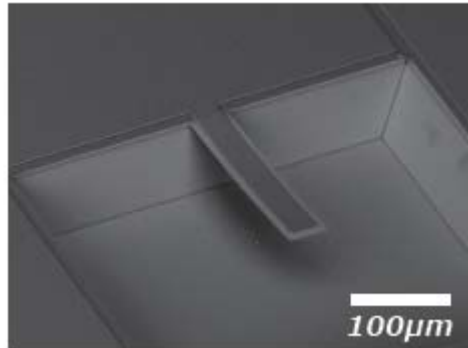


アパーチャのアスペクト比を変更(10→20)
垂直性に優れたエッチングが可能に!!

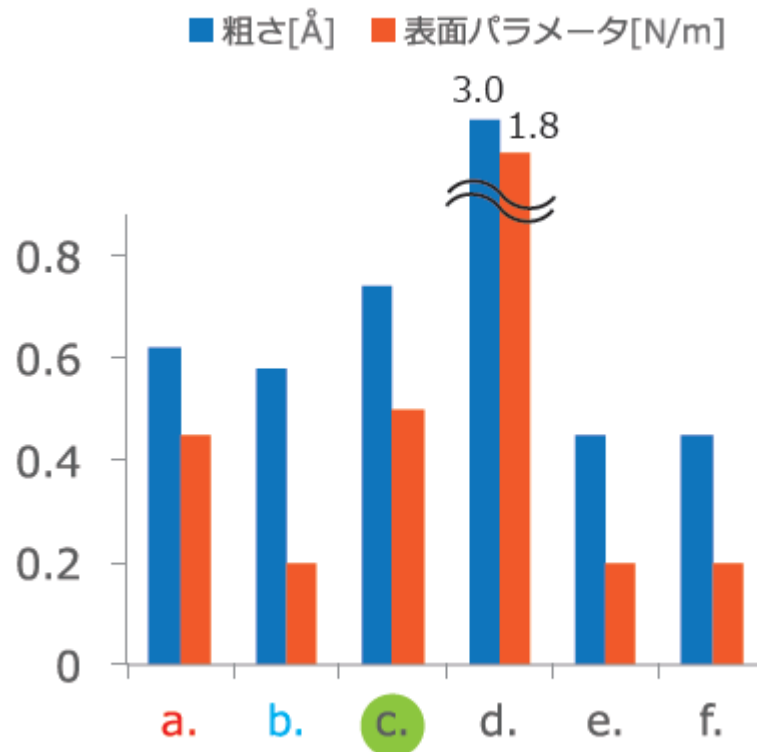
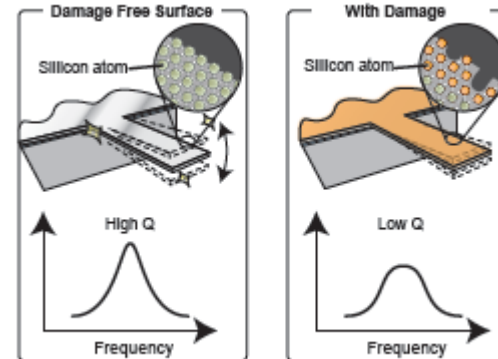
エッチレートのアパーチャAR依存性



MEMS振動子によるエッチング損傷評価

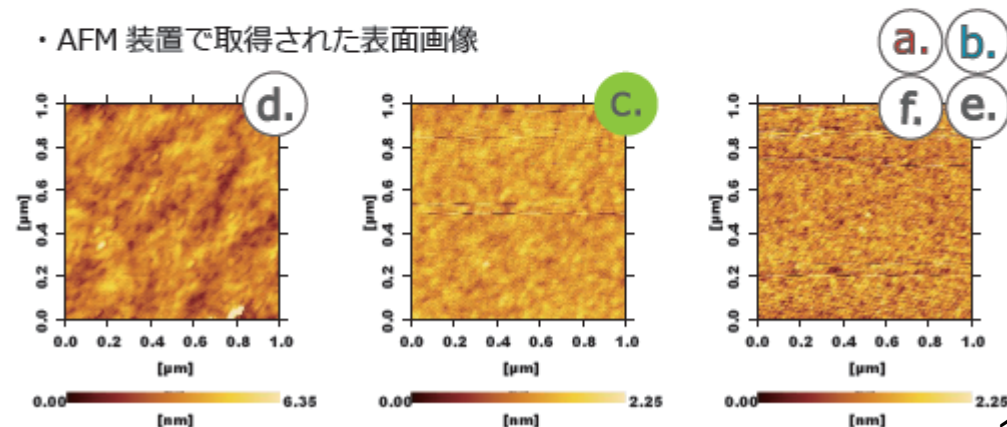


$$\delta E_{ds} = \frac{E_{Si}}{Q} \frac{h}{6}$$

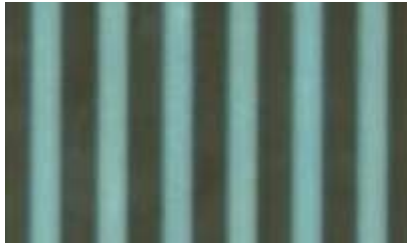


- a. ポリッシング後の表面 (ベアウェハ)
- b. a. の表面を「wet 酸化」→「HF 処理」
- c. a. の表面を「**中性粒子ビームエッチング** :100nm」
- d. a. の表面を「**プラズマエッチング** :100nm」
- e. b. の表面を「高温水素アニール : 30min」
- f. b. の表面を「高温水素アニール : 05min」

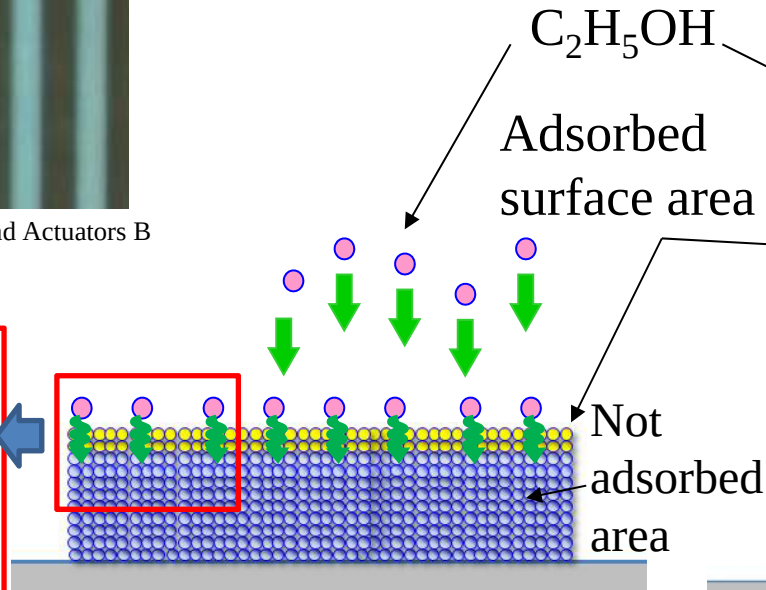
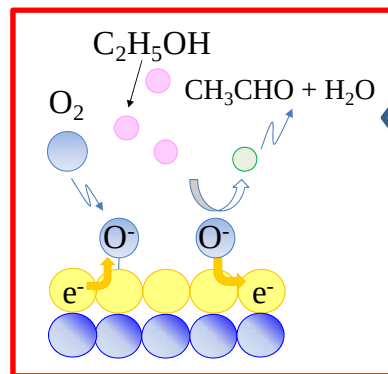
・ AFM 装置で取得された表面画像



ナノポーラス金属酸化膜を用いたガスセンサ

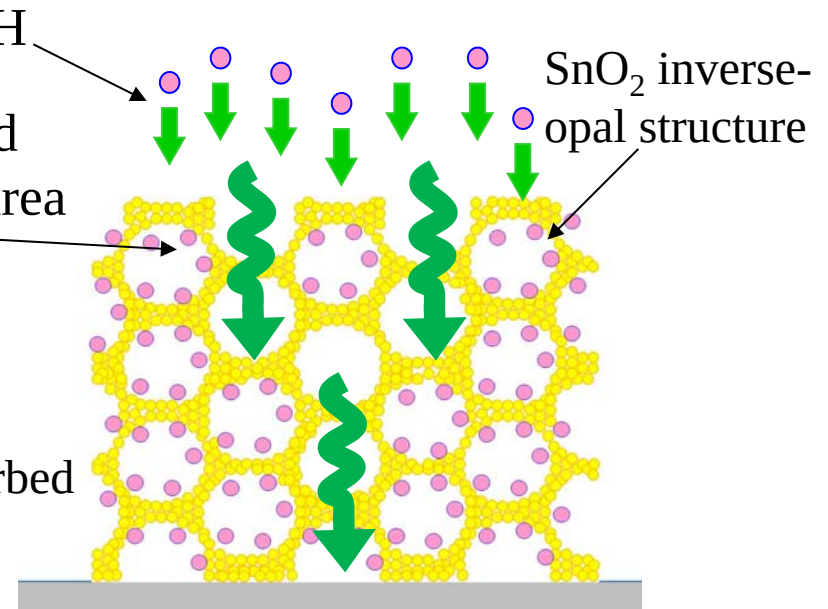


Il-Doo Kim et al. Sensors and Actuators B



平面型

表面のみが
ガスに反応



ナノポーラス型

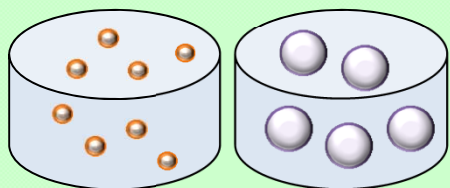
全体積で反応
→ 高感度

作製プロセス (1)



懸濁液の調整

Polystyrene suspension



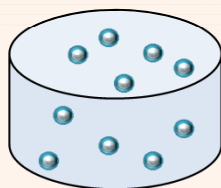
$\phi=100\text{nm}$

0 – 0.1 vol%

$\phi=1\mu\text{m}$

0.45- 0.5vol%

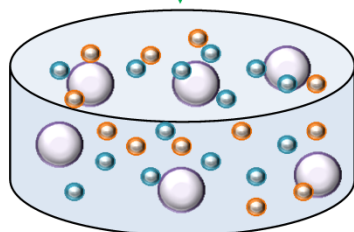
SnO₂ suspension



$\phi=30\text{nm}$

0.045 – 0.05vol%

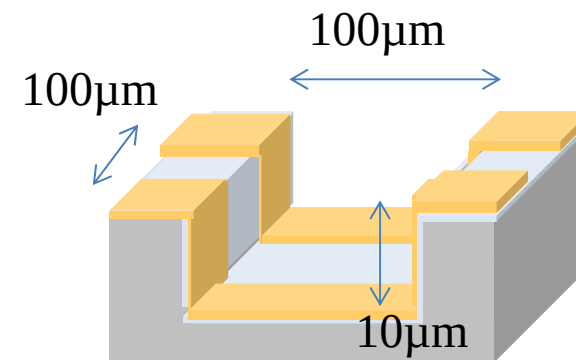
Mix



ナノ粒子懸濁液

溶媒: 水

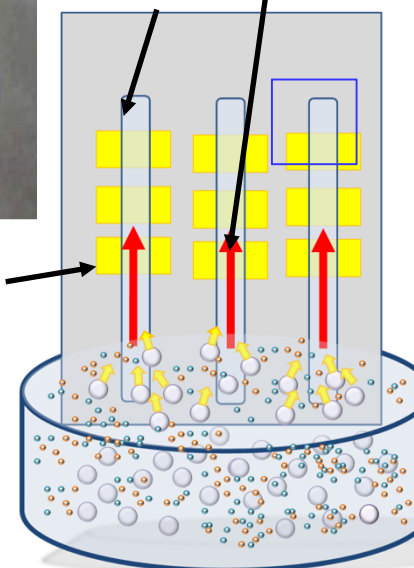
ディップコート



Capillary force

trench

Electrode

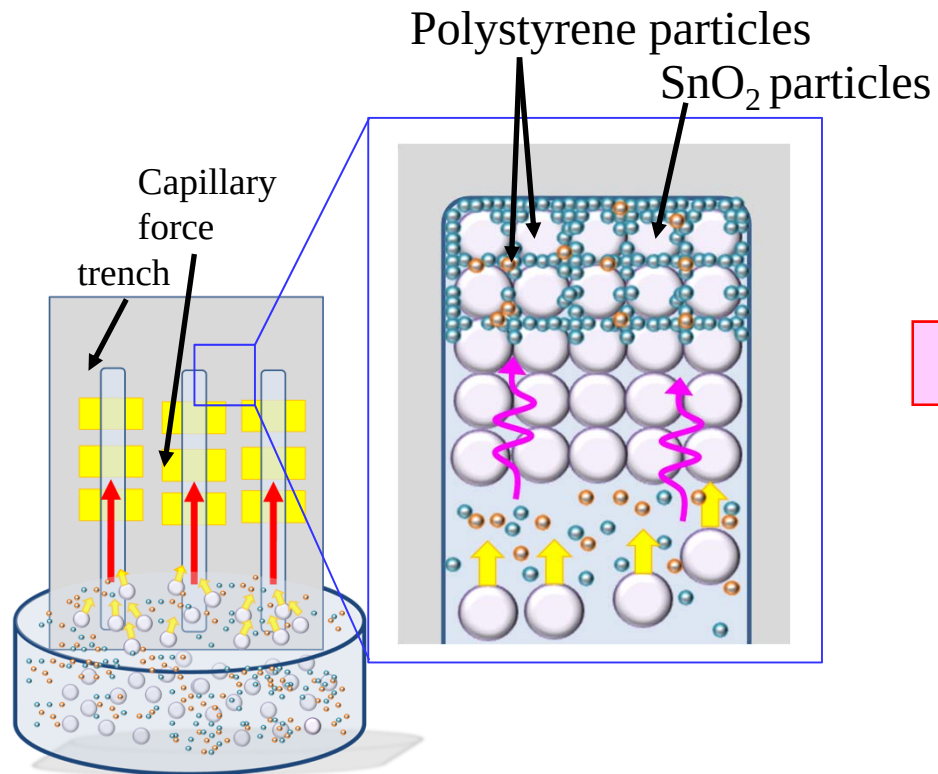


Temperature : 23 deg. C
Relative humidity : 60 %RH

作製プロセス (2)

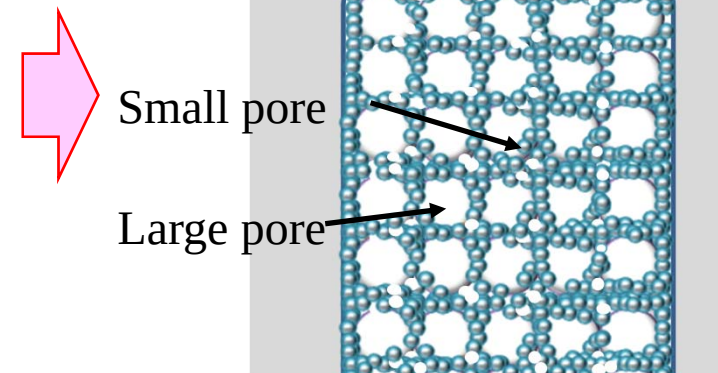


ディップコート



ポリスチレンの除去 焼結

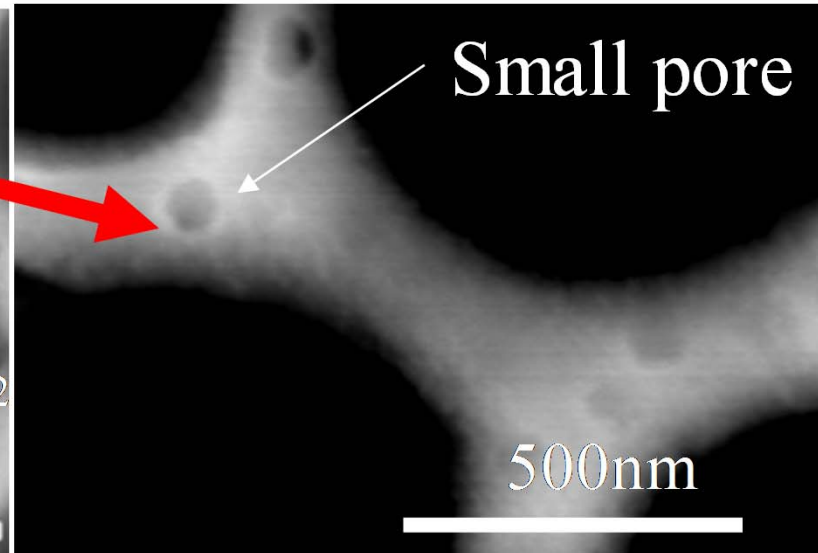
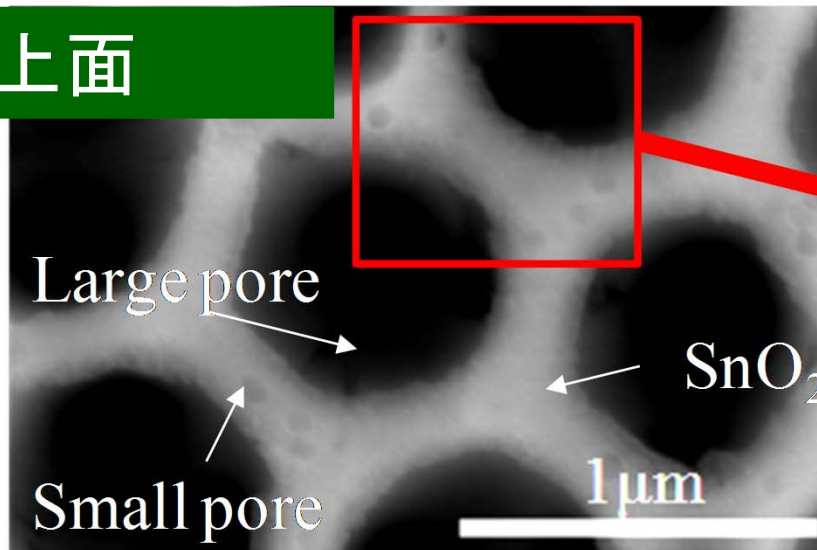
Temperature :600 degree C



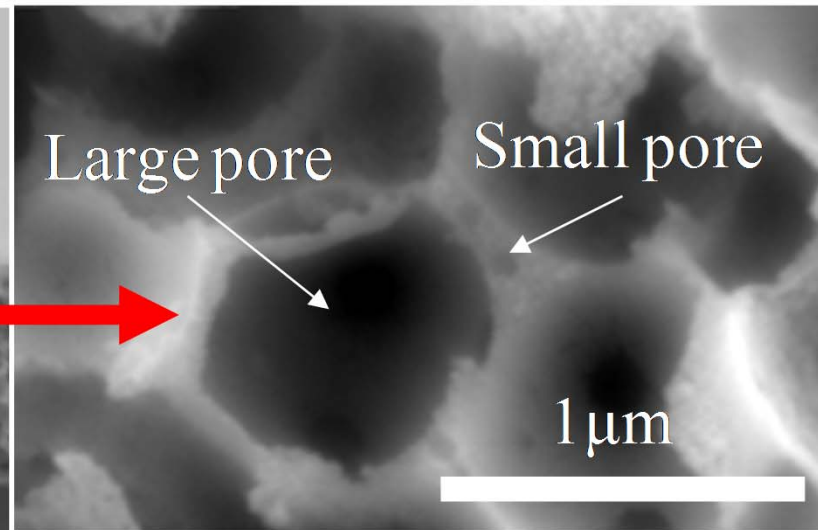
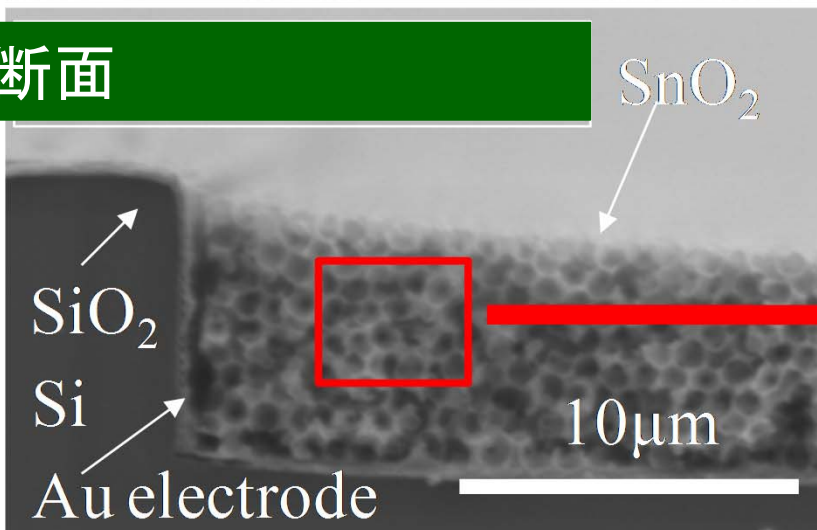
トレンチ内に作製したナノポーラスSnO₂



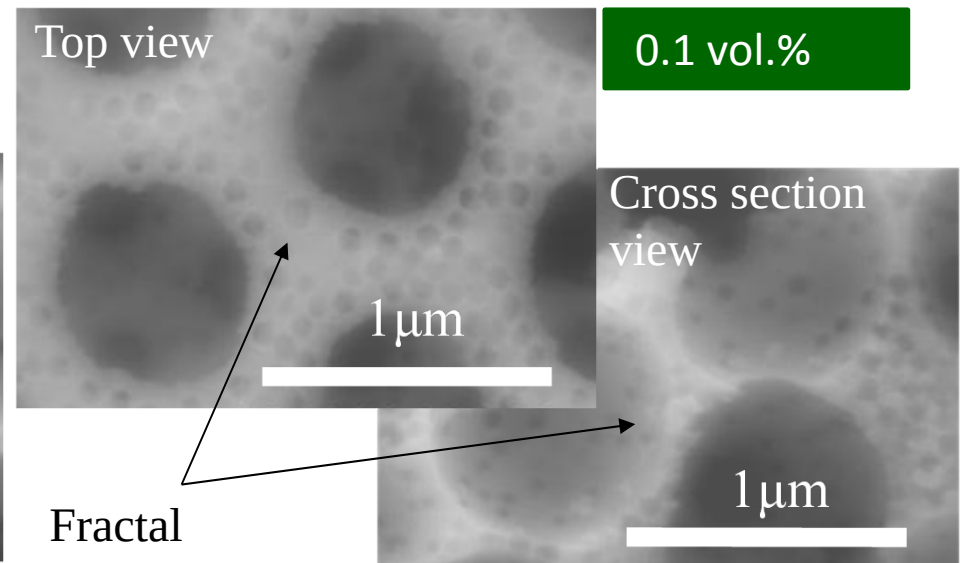
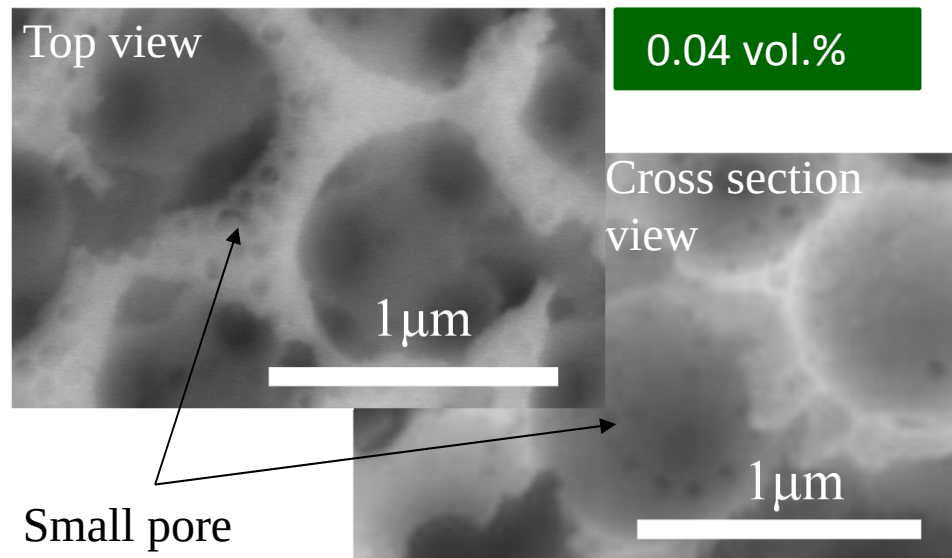
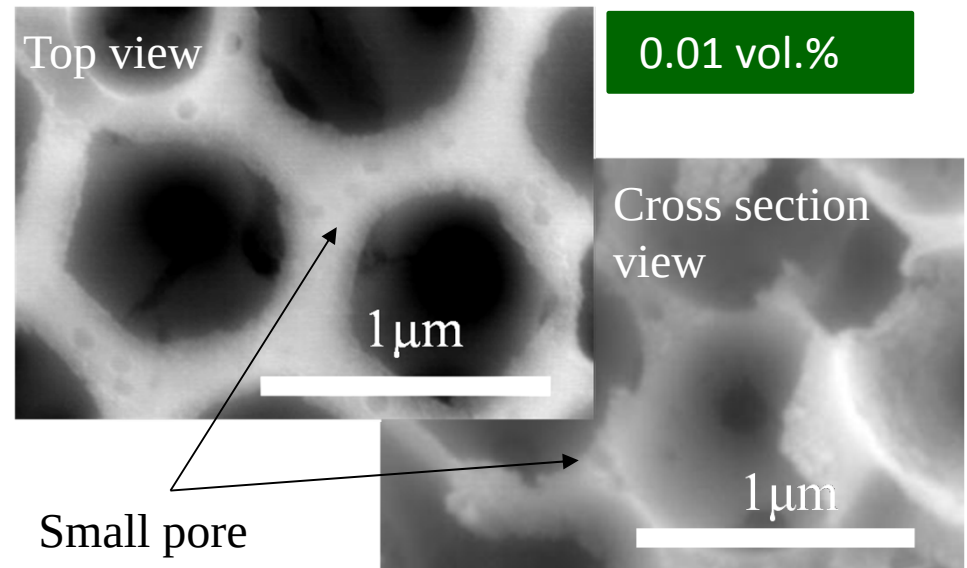
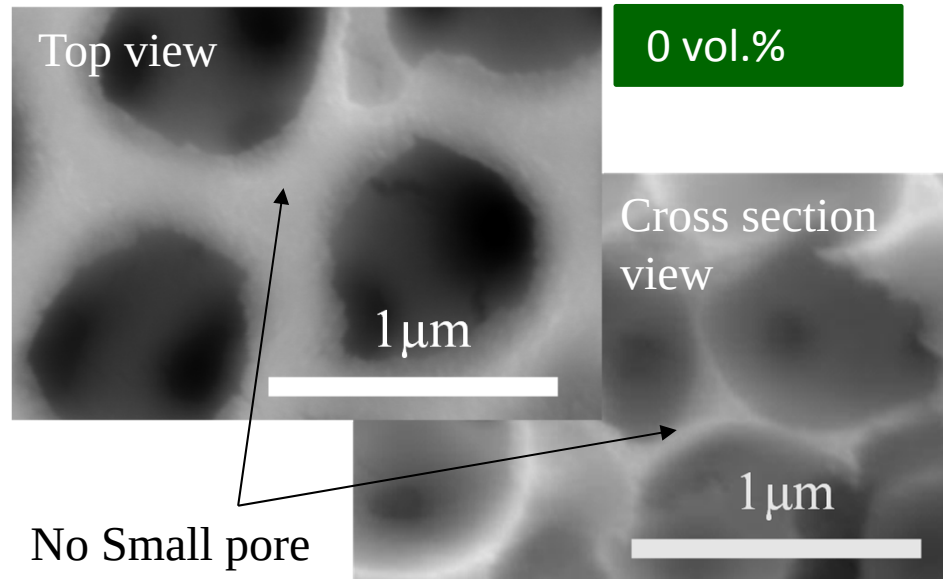
上面



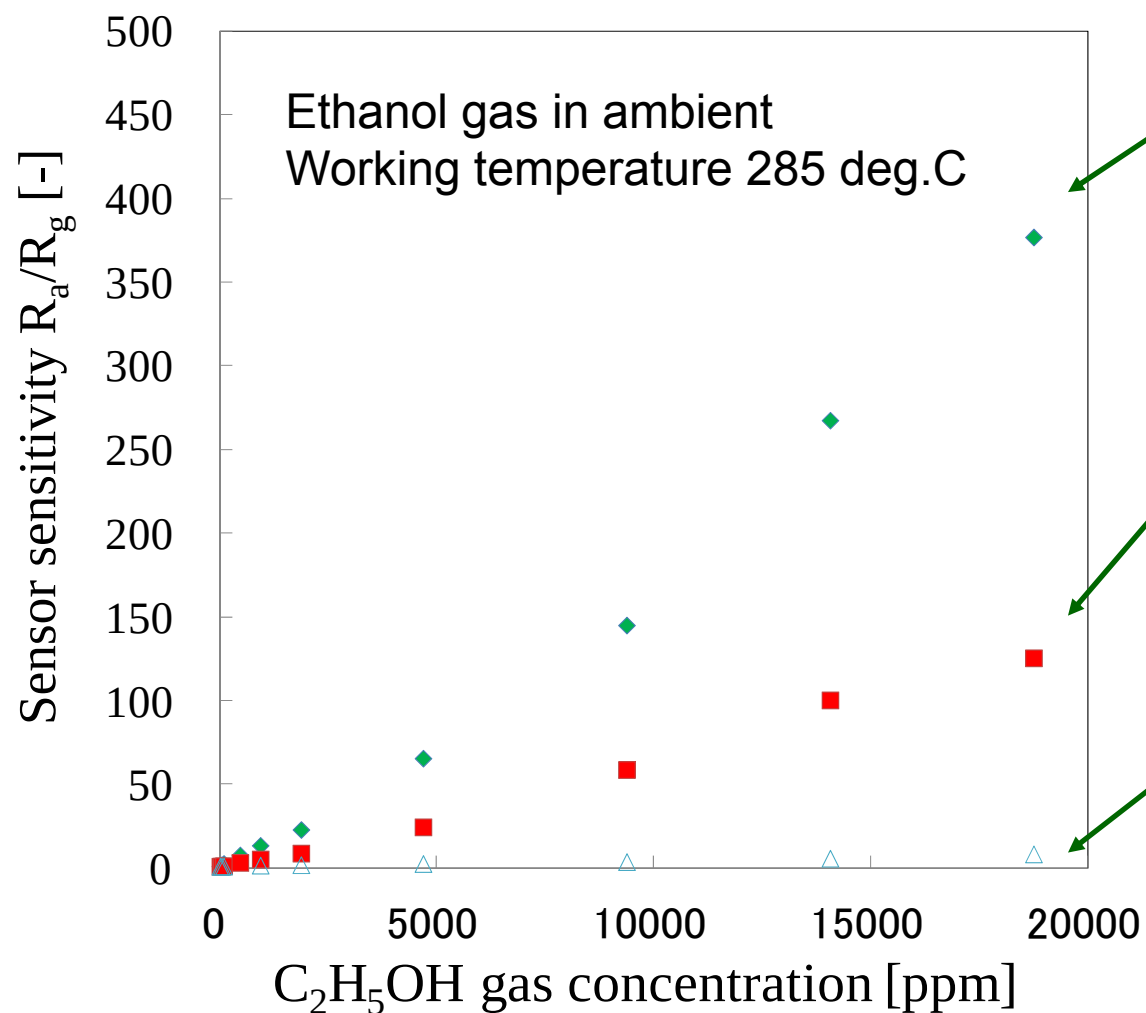
断面



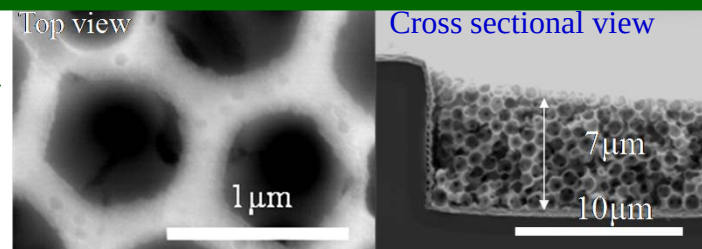
ナノポーラス構造は混合比により調整可能



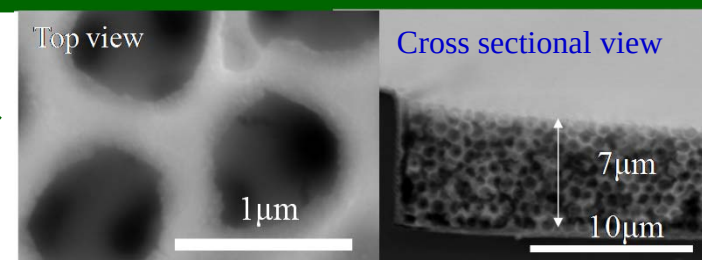
ガスセンサ感度特性



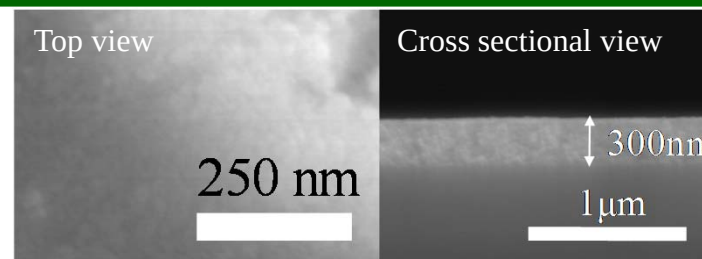
ナノフラクタル(複数径粒子)



逆オパール(単一径粒子)

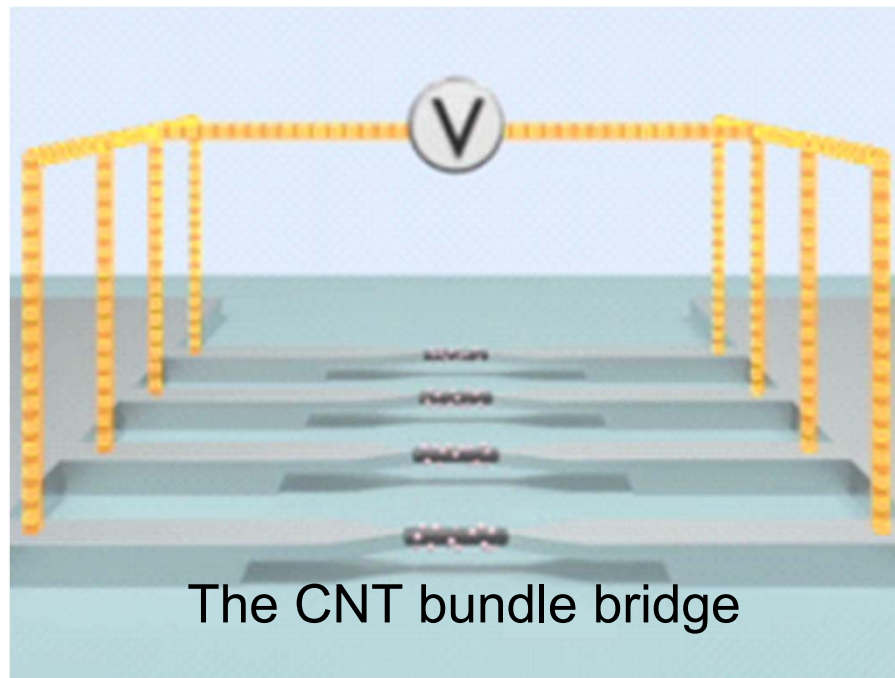


平面型

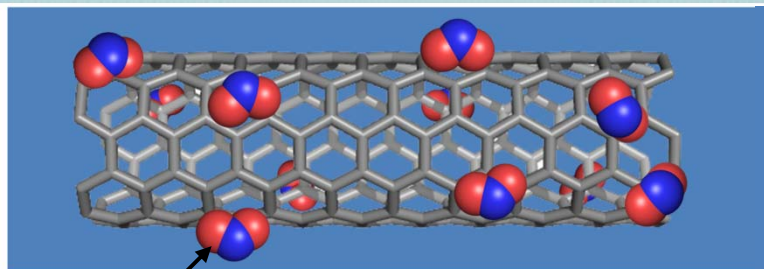


エタノール検出感度: 平面型<<逆オパール<<ナノフラクタル

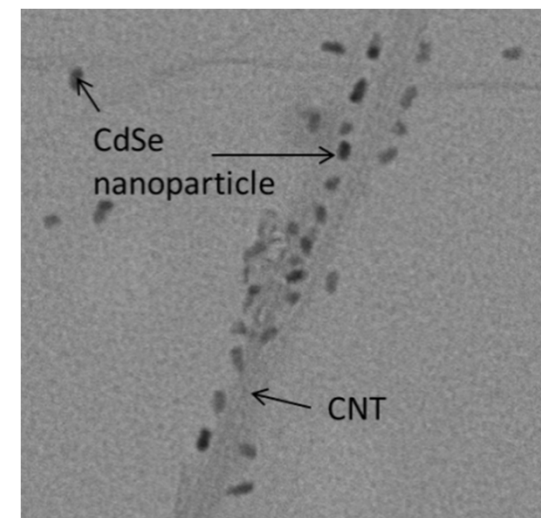
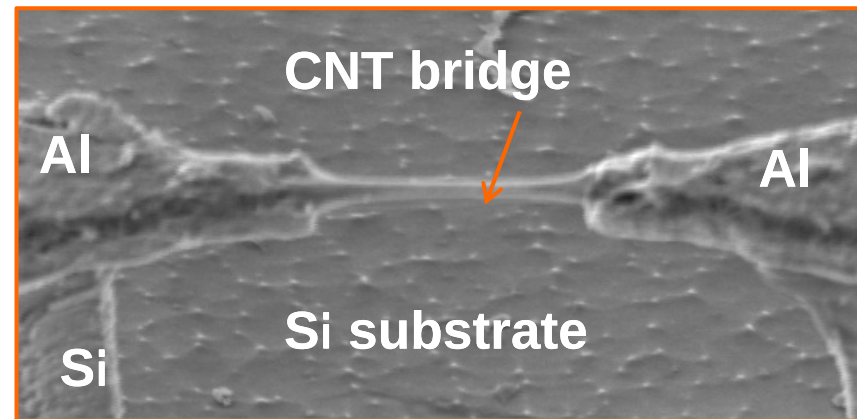
ナノチューブ架橋構造を用いたガスセンサ



The CNT bundle bridge



Adsorbed gas molecules



作製手法



溶液法で
精製した
CNT

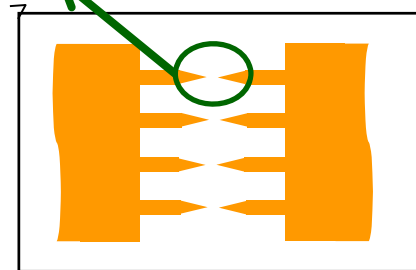
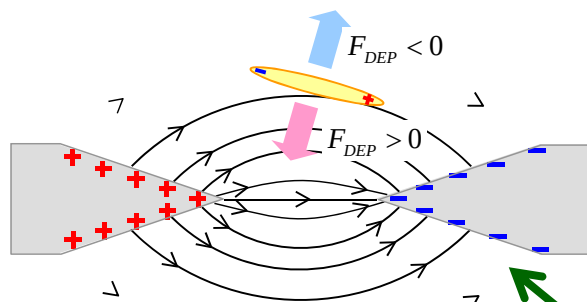


オシロスコープ

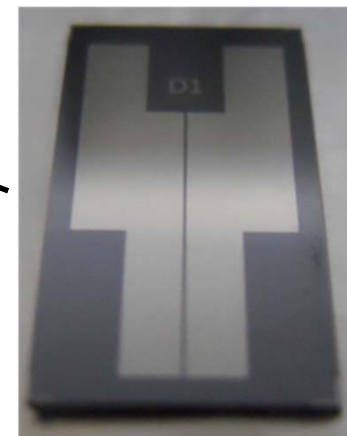
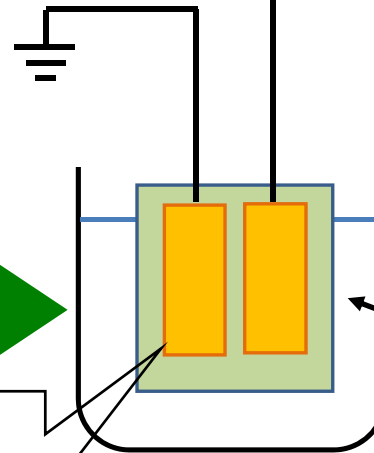
電圧のモニタ

AC電源

$<10\text{MHz}$, $<100\text{V}_{\text{pp}}$



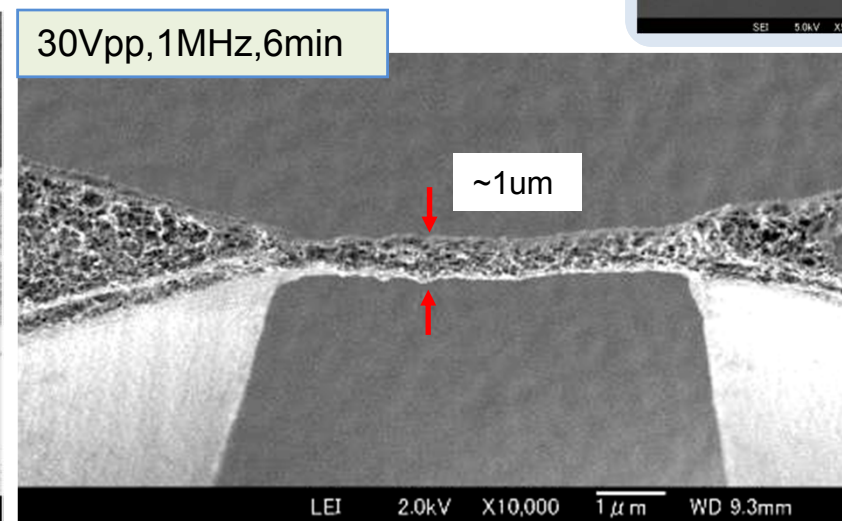
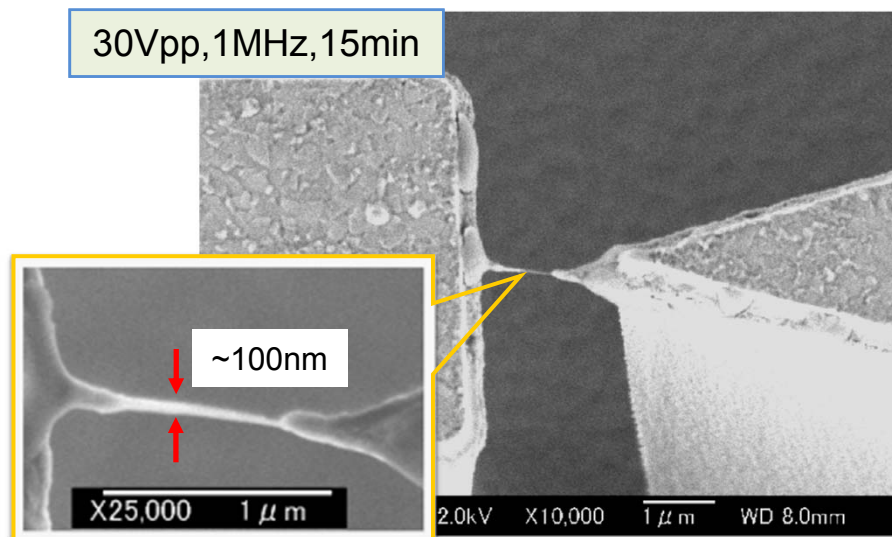
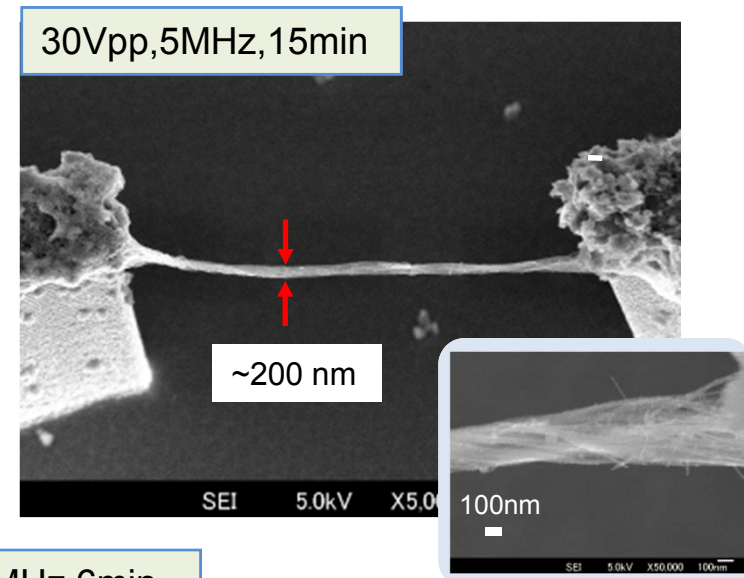
電極パターン



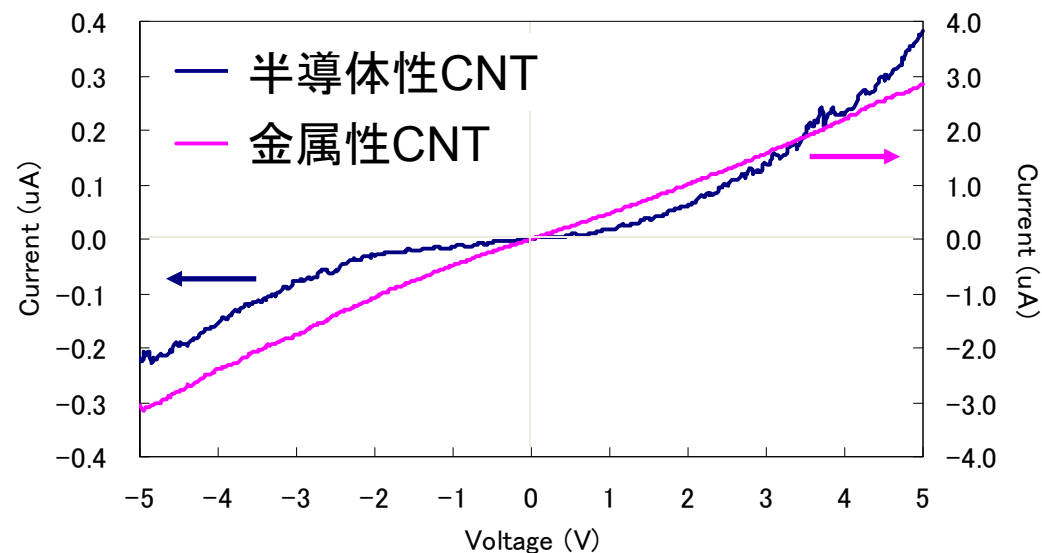
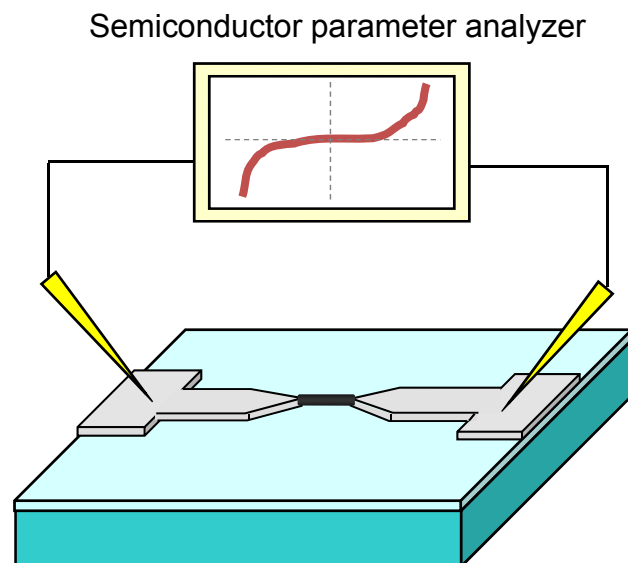
CNT架橋構造



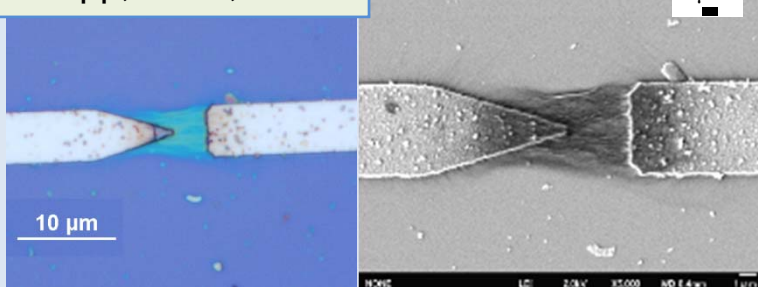
- 尖頭間にCNT架橋構造を形成
- 多数のCNTから形成される
- 架橋の形状は尖頭の構造と電圧印加条件により制御可能



CNT架橋構造の電圧特性



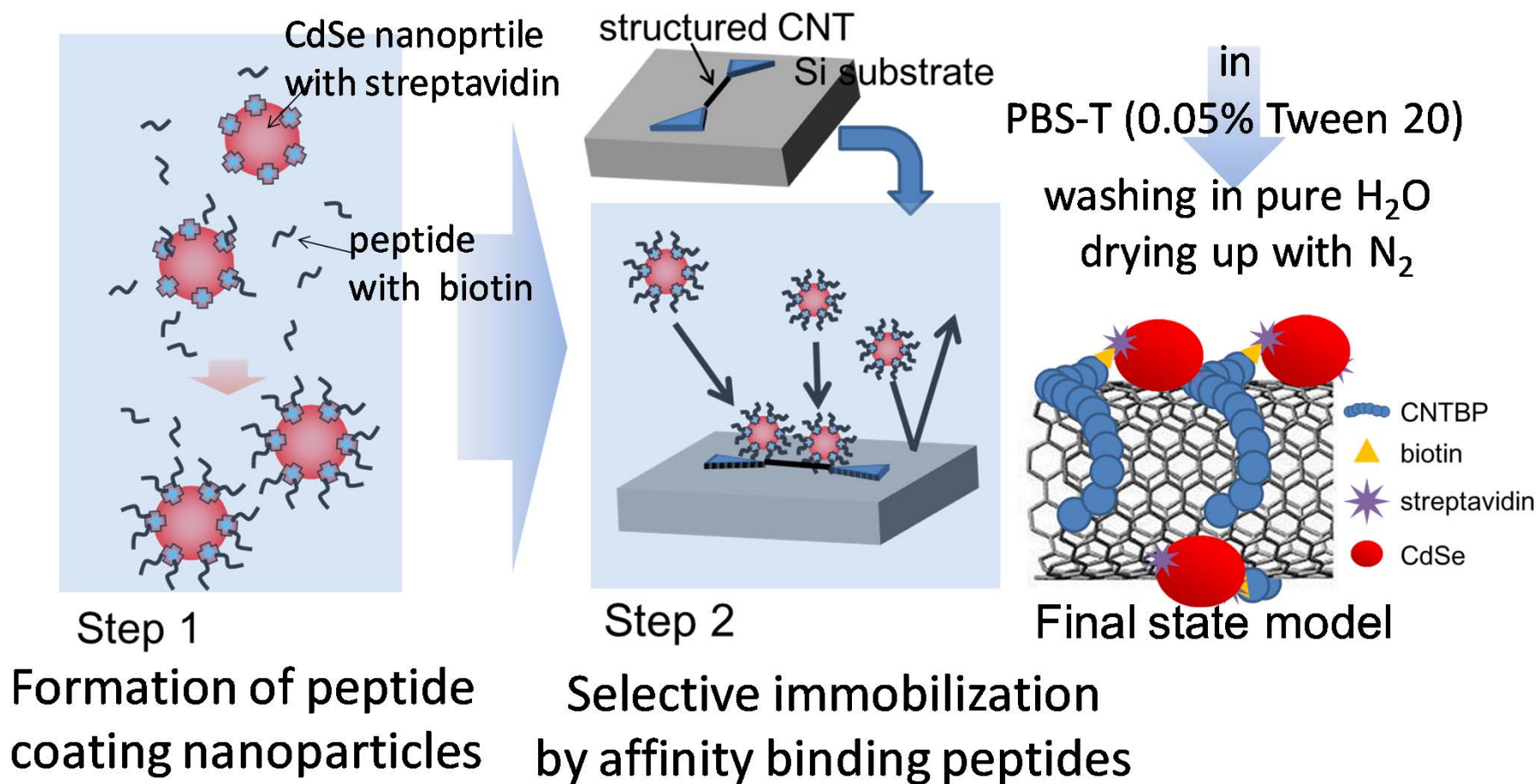
15Vpp, 5MHz, 15min



上面顕微鏡写真

- 単層CNTを選択的に修飾
 - 半導体性 → 非線形
 - 金属製 → 線形
- 半導体性・金属性CNTによる電気伝導特性の違いを観察

CNT表面へのナノ粒子修飾

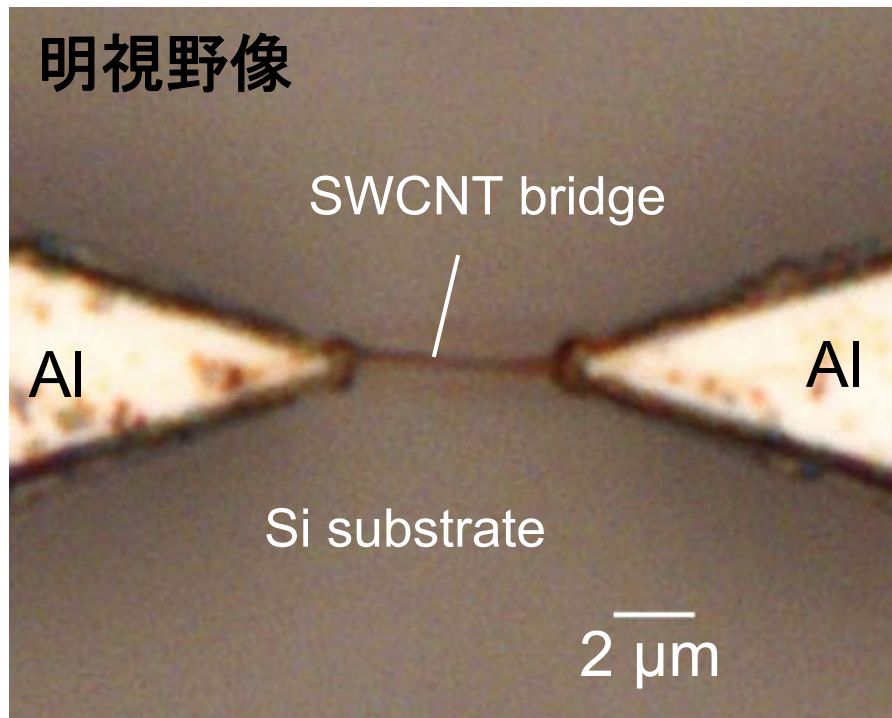


- CdSeナノ粒子にCNT特異吸着性ペプチドを修飾
→ CdSeナノ粒子がCNT表面のみに吸着

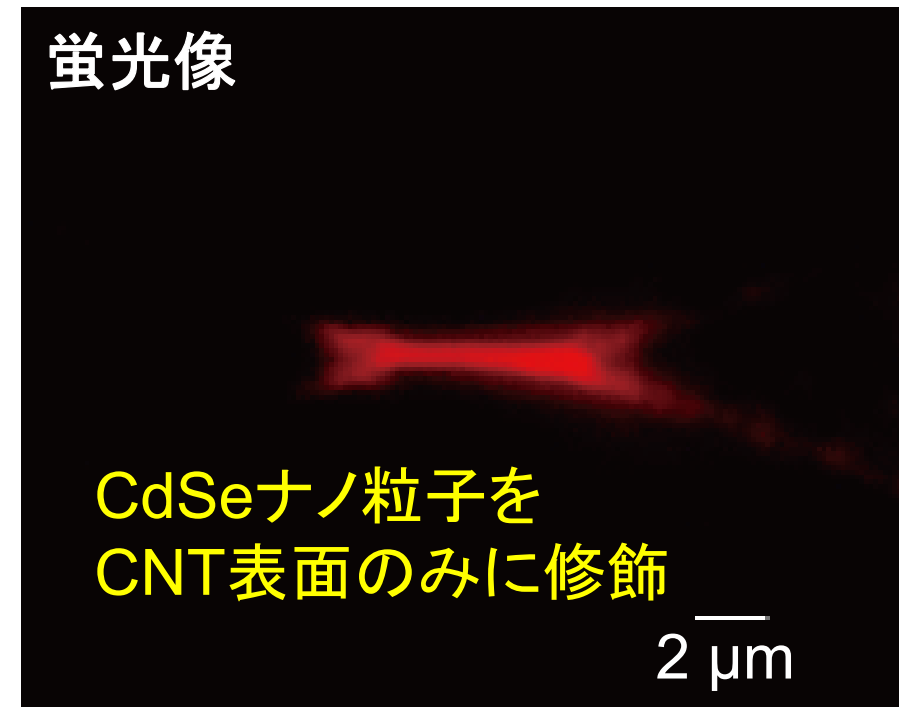
CNT表面への選択的CdSeナノ粒子修飾



明視野像



蛍光像



surface	CdSe nanoparticle
CNT	attached
Al (oxide)	unattached
Si (oxide)	unattached

まとめに代えて

想いは通じる,
そして、実る.

日本を元気にする
産業の豆を提供す
べく、
BEANSメンバーは
歩み続けます。

