

# 水野研究室 : ナノ構造半導体研究

数理・物理学科  
水野 智久

研究室ホームページ

: [http://www.info.kanagawa-u.ac.jp/  
~mizuno/index.html](http://www.info.kanagawa-u.ac.jp/~mizuno/index.html)

# 目次

◆研究分野／モットー

◆研究方法

◆半導体とは？

◆驚異の微細加工：ナノテク

◆ナノ領域の物理：量子力学

◆究極の微細ナノ構造：半導体単原子層，及び新  
物理現象

◆詳細講義

: 木曜3限“半導体物理学”

: 3年生も聴講可

# 研究分野／モットー

◆ **目的**: 半導体ナノ/原子レベル領域の形成と, 新たな物理現象の解明⇒“産業の米”であるULSI用ナノ構造半導体の研究

## ◆ **モットー**

1. **世界で誰もやったことのない研究をやる！ = 誰も見たことない世界への知的冒険！**
2. **卒研時から, 世界最先端研究のメンバーとして研究**
3. **研究で重要なことは? : 1)何を研究するかを見極めること, 2)いかに研究を行うか, 3)論文/学会発表⇒歴史上に名を残す⇒社会的評価**
4. **世界最先端研究用装置を使用@神大, 農工大, 国立産業技術総合研究所**

## ◆ 主要研究テーマ

: Si系半導体素子の究極／極限を見極める＝アトム技術利用

1) どこまで小さい素子ができるか？ 原子レベルまで？

⇒ 微細化限界の打破: Si単原子層

2) どこまで速い素子ができるか？  $10^7$  cm/s, 時速36万kmの壁

⇒ 電子速度限界の打破: バリステック素子

: 異種半導体接合＝エネルギー差を利用

## ◆ 共同研究

1) 東京農工大学工学部 鮫島研究室

2) 国立産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門

◆ 学生へのメッセージ: ゼミは基礎から一步一步行う(新規参入者歓迎！)

知的冒険に飢えている諸君, 現実に不満を持っている諸君,  
新しい物好きな諸君, 一攫千金を狙っている諸君などなど,

いつでも誰でもWelcome !

# 具体的な研究手法

## ◆実験

- ナノ半導体の形成: 膜の形成／エッチングなど
- トランジスタ試作

## ◆測定

- レーザ照射による半導体の発光から物性を評価, 電子顕微鏡観察など
- 半導体中の電子速度の計測など

## ◆シミュレーション

1. 第一原理計算: 量子力学を用いたナノ領域半導体の物性の予測／解析
2. プロセスシミュレータ: 実験の予想／解析
3. デバイスシミュレータ: トランジスタ内の電子速度の予測／解析など

# 研究成果により, 名を残そう! (II)

## ◆研究成果:最近5年間の例

1. 論文: **14件**
2. 国際学会発表: **10件**
3. 国内学会発表: **16件**

## ◆国(文科省)からの研究費の補助獲得(科学研究費補助金)

2008年-2014年: **5件**

## ◆学会賞等の受賞: **8件**

### ◆ 論文例

1. T. Mizuno, T. Aoki, Y. Nagata, Y. Nakahara, and T. Sameshima, Jpn. J. Appl. Phys., 52, 04CC13 (2013).
2. T. Mizuno, J. Takehi, Y. Abe, and H. Akamatsu, Jpn. J. Appl. Phys., 52, 04CC05 (2013).
3. T. Mizuno, Y. Nakahara, Y. Nagata, Y. Suzuki, T. Aoki, and T. Sameshima, Jpn. J. Appl. Phys., 53, 04EC09 (2014).
4. T. Mizuno, Y. Nagata, Y. Suzuki, Y. Nakahara, T. Aoki, and T. Sameshima, Jpn. J. Appl. Phys., 53, 04EC08 (2014).
5. H. Abe, C. Akiyama, M. Hasumi, T. Sameshima, T. Mizuno, and N. Sano, JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering 9, 143 (2014).

# 研究により，名を残そう！(II)

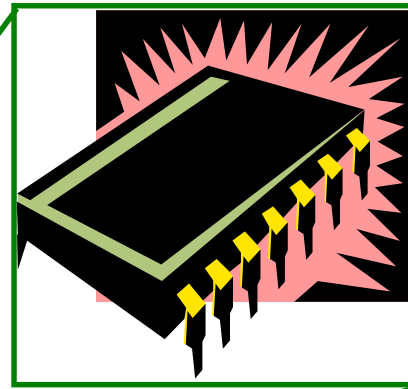
## ◆ 国際学会発表

1. T. Mizuno, Y. Nakahara, Y. Nagata, Y. Suzuki, Y. Kubodera, Y. Shimizu, T. Aoki, and T. Sameshima, *Extended Abst. of SSDM, Fukuoka*, p.696 (2013).
2. T. Mizuno, Y. Nagata, Y. Suzuki, Y. Nakahara, T. Tanaka, T. Aoki and T. Sameshima, *Extended Abst. of SSDM, Fukuoka*, p.96 (2013).
3. T. Sameshima, T. Nakamura, S. Yoshidomi, M. Hasumi, T. Ishii, Y. Inouchi, M. Naito, and T. Mizuno, *Extended Abst. of SSDM, Fukuoka*, p.484 (2013).
4. T. Mizuno, Y. Nakahara, Y. Nagamine, Y. Suzuki, Y. Nagata, T. Aoki, and T. Sameshima, *Extended Abst. of SSDM, Tsukuba*, p. (2014).
5. T. Mizuno, Y. Suzuki, M. Yamanaka, Y. Nagamine, Y. Nakahara, Y. Nagata, T. Aoki, and T. Maeda, *Extended Abst. of SSDM, Tsukuba*, p. (2014).

## ◆ 国内学会発表

1. 中原雄太，永田祐介，青木孝，鮫島俊之，水野智久，春季応物予稿集，講演番号28p-G9-8，(2013).
2. 永田祐介，中原雄太，青木孝，鮫島俊之，水野智久，春季応物予稿集，講演番号28p-G9-9，(2013).
3. 永田祐介，中原雄太，青木孝，鮫島俊之，水野智久，“秋季応物予稿集，講演番号講演番号：19p-C8-9 (2013).
4. 鈴木佑弥，中原雄太，永田祐介，青木孝，鮫島俊之，水野智久，秋季応物予稿集，講演番号講演番号：19p-C8-10 (2013).
5. 中原雄太，永田祐介，鈴木佑弥，青木孝，鮫島俊之，水野智久 第78回応用物理学会秋季学術講演会 19p-C8-11 (2013)
6. 永田祐介，中原雄太，青木孝，鮫島俊之，水野智久，春季応物予稿集，講演番号講演番号：19p-F1 2-1 (2014).
7. 中原雄太，永田祐介，鈴木佑弥，青木孝，鮫島俊之，水野智久 第61回応用物理学会春季学術講演会，19p-F12-2 (2014).

# 携帯電話の中にもLSI！



**LSI**

## LSIの機能

### ◆記憶

メール, 住所録, 写真

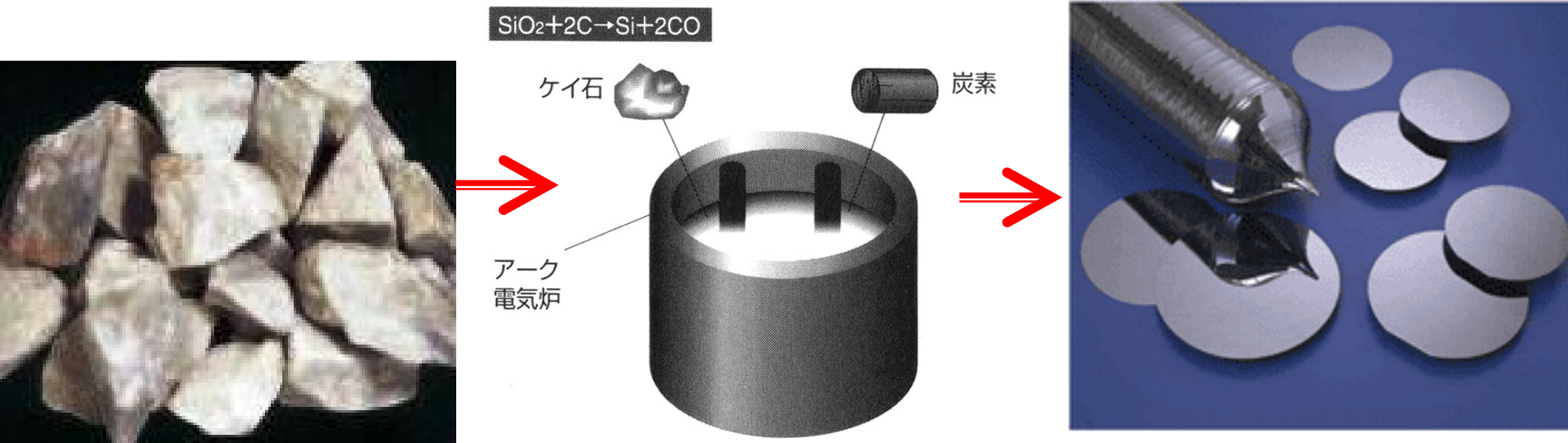
### ◆計算／制御

### ◆通信

メール, インターネット



# 珪石がSi半導体基板になる



## 1. 珪石

- 成分:  $\text{SiO}_2$
- Si: 地殻の約1/3

## 2. Siの高純度化

- 還元 @  $> 1400^\circ\text{C}$
- $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$
- 純度: 99.9999999999%

## 3. 半導体基板

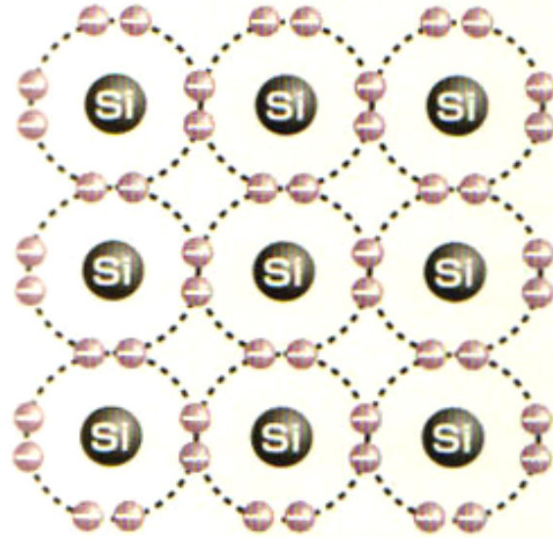
- Siの結晶化
- 直径: 30cm
- 厚さ: 約0.5mm

# トランジスタを実現するSi半導体

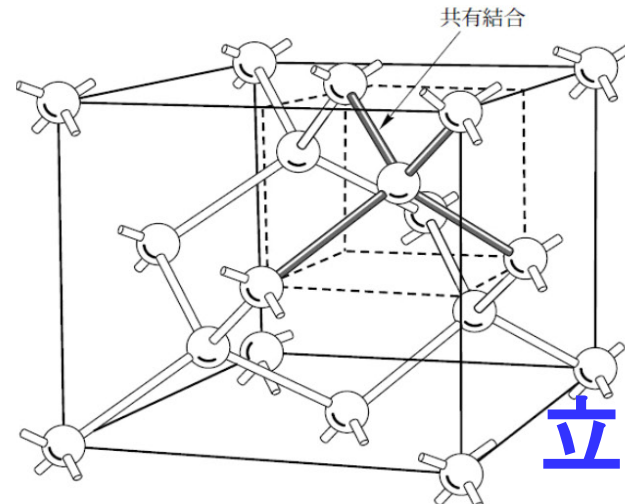
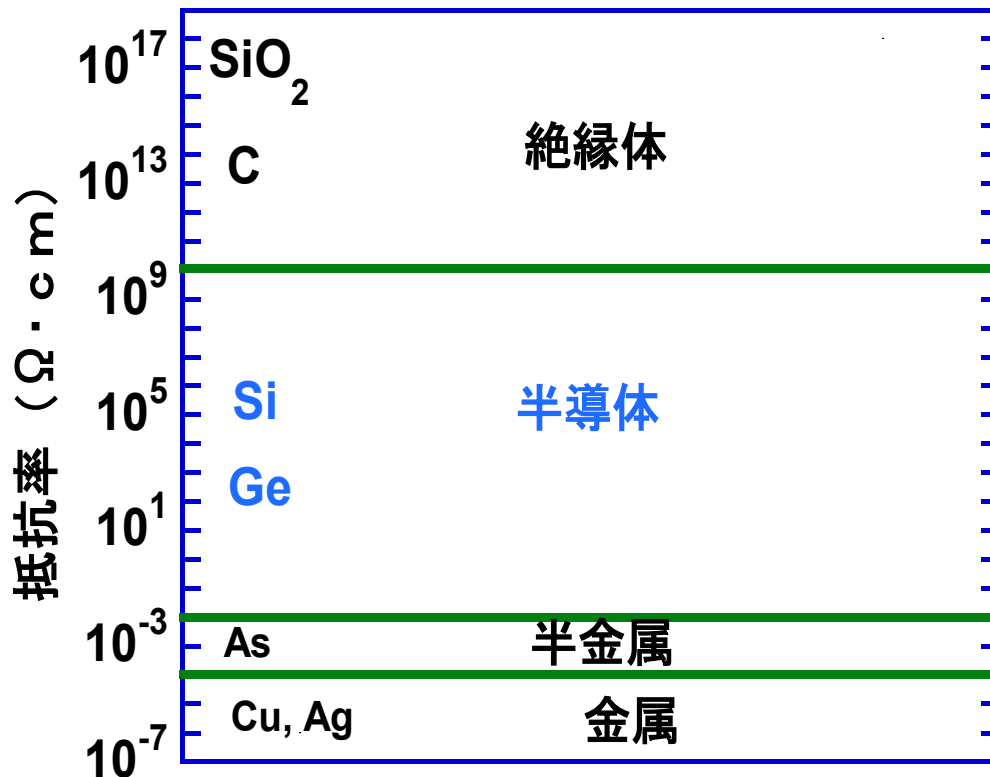
- トランジスタ: LSIの基本素子

1) 機能: 電氣的スイッチ (時間:  $10^{-11}$  秒)

2) 材料: 半導体 = 規則正しい原子配列 = 金属と絶縁物の中間の抵抗値



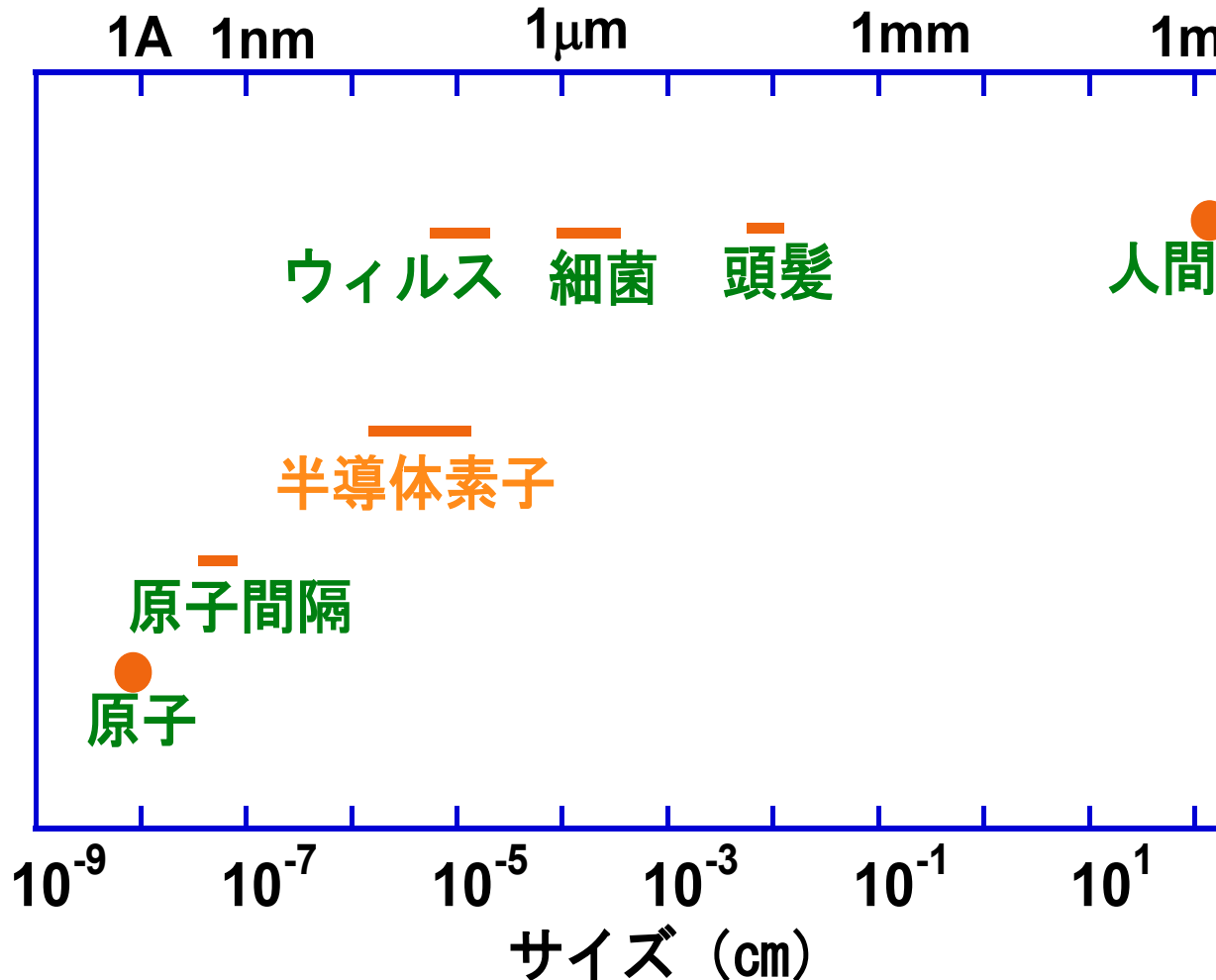
Si半導体: Siの結晶



立体構造

# 現在のLSI: 驚異の技術革新

- ◆ 現在の素子数 = 約5億個 / チップ
  - ◆ サイズ: 研究段階では5nm = Si原子9個分
- ⇔ インフルエンザウィルス (約100nm) より微細



サイズの比較図

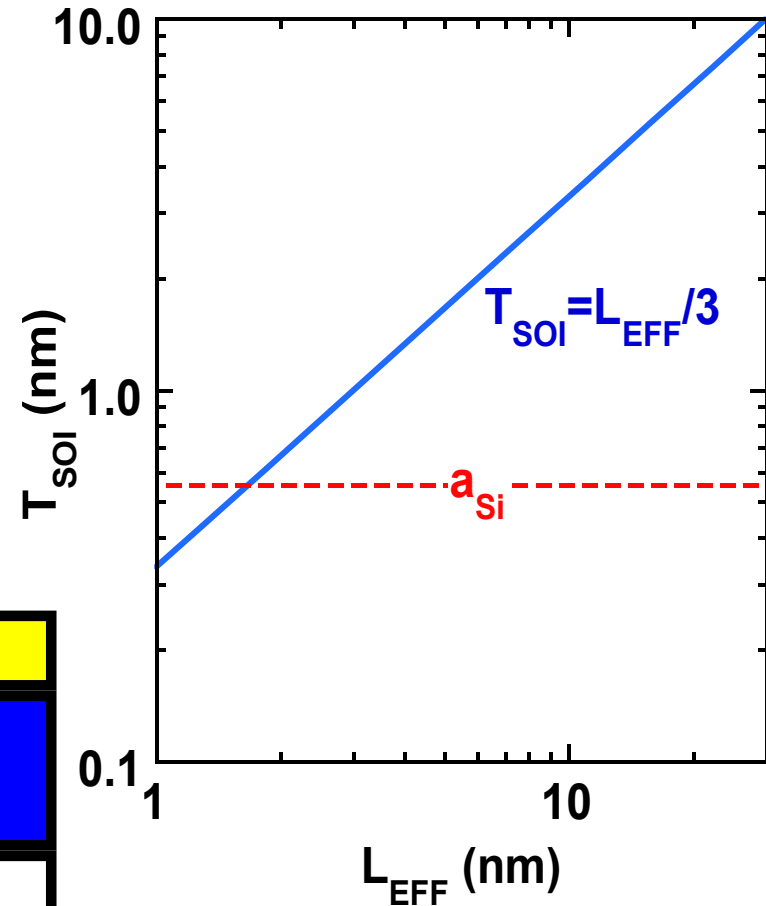
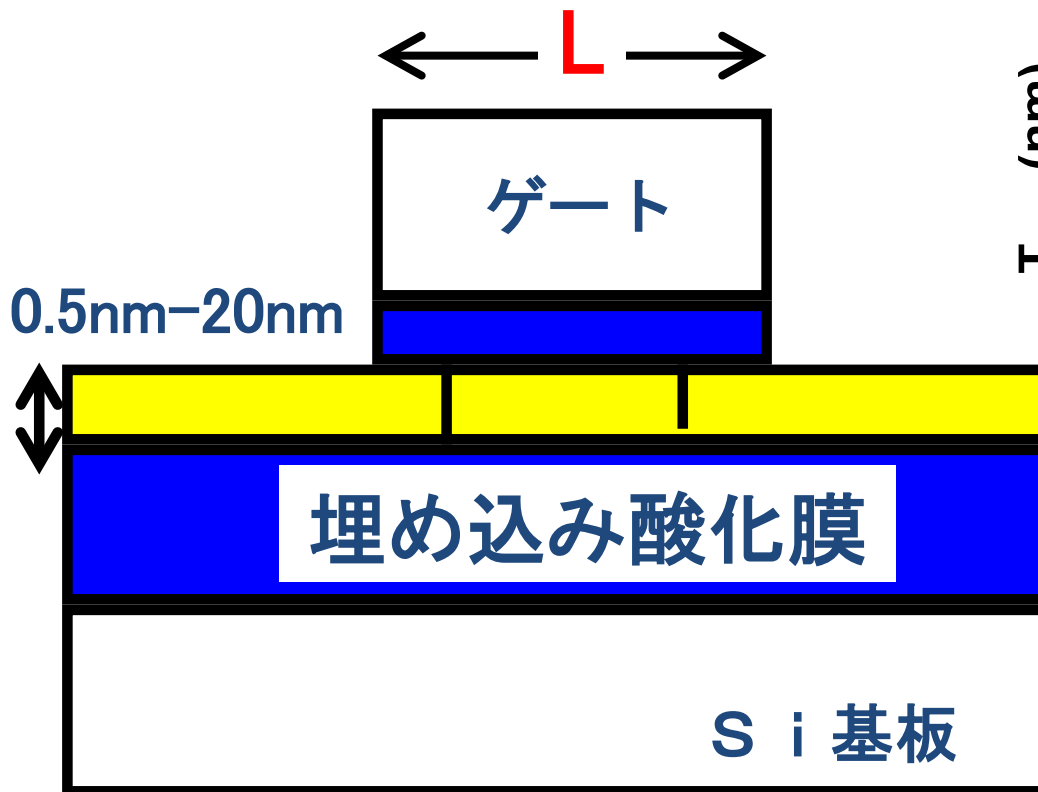
# 最先端素子: SOI構造

◆ SOI=Silicon on Insulator

1. 微細化可能 ← Si薄膜化するだけで

:  $L > 3T_s \sim 4T_s$ : 経験則

2. 原子層レベルまで薄膜化?



# 量子力学：ナノ領域を支配する法則

- ◆ **不確定性原理**：位置  $x$  と運動量  $p$  を同時に正確に測定することは不可能 ← 波動の広がり (物体は点ではない)  $\Delta x \Delta p \geq \hbar$

⇒ Si 原子振動モードの変調

- ◆ **量子的閉じ込め効果**：電子などがナノ領域に閉じ込められると現れる効果 = 飛び飛びのエネルギー準位

$$E_G(T_S) = E_{G0} + 2h^2 / T_S^2 (m_L^*{}^{-1} + m_{HH}^*{}^{-1})$$

⇒ Si エネルギー構造の変調

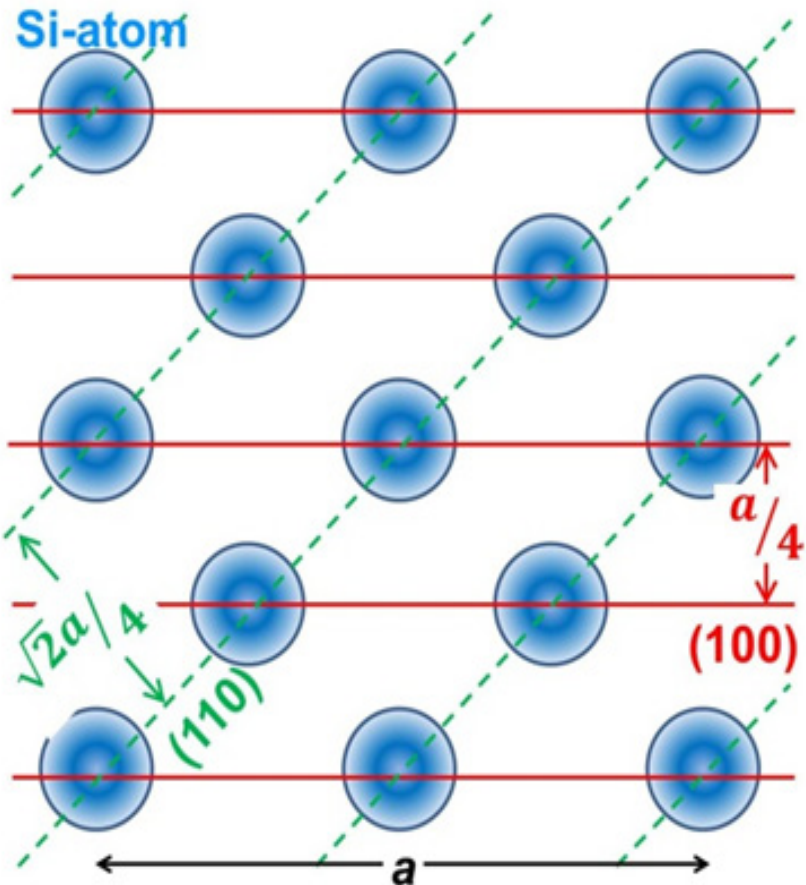


半導体特性はナノ構造では大きく変化！

# Si半導体の最小単位：単位胞

◆ Si特性 = 原子層が多数ある三次元構造(3D)の場合

◆ 単位胞：一辺  $a$  が  $0.54\text{nm}$ ，原子5層から成る



Si単位胞

## ◆ 現研究：二次元Si層

1) 厚さ：原子が数層-5層

現状 =  $0.3\text{nm}$  = 3層

2) Si厚さ方向での量子効果



二次元Si特性が変わる!?



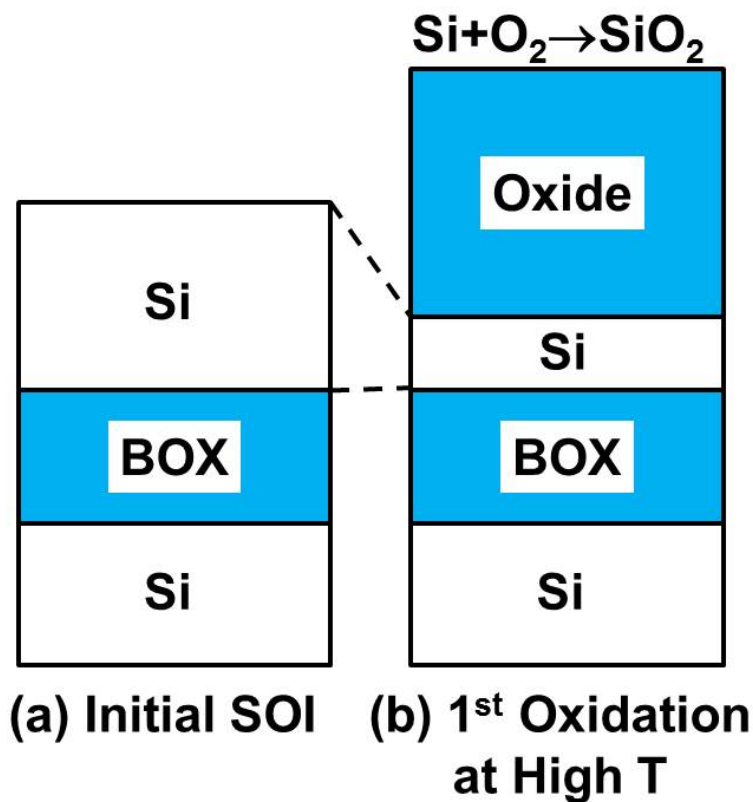
トランジスタ特性が変わる!?



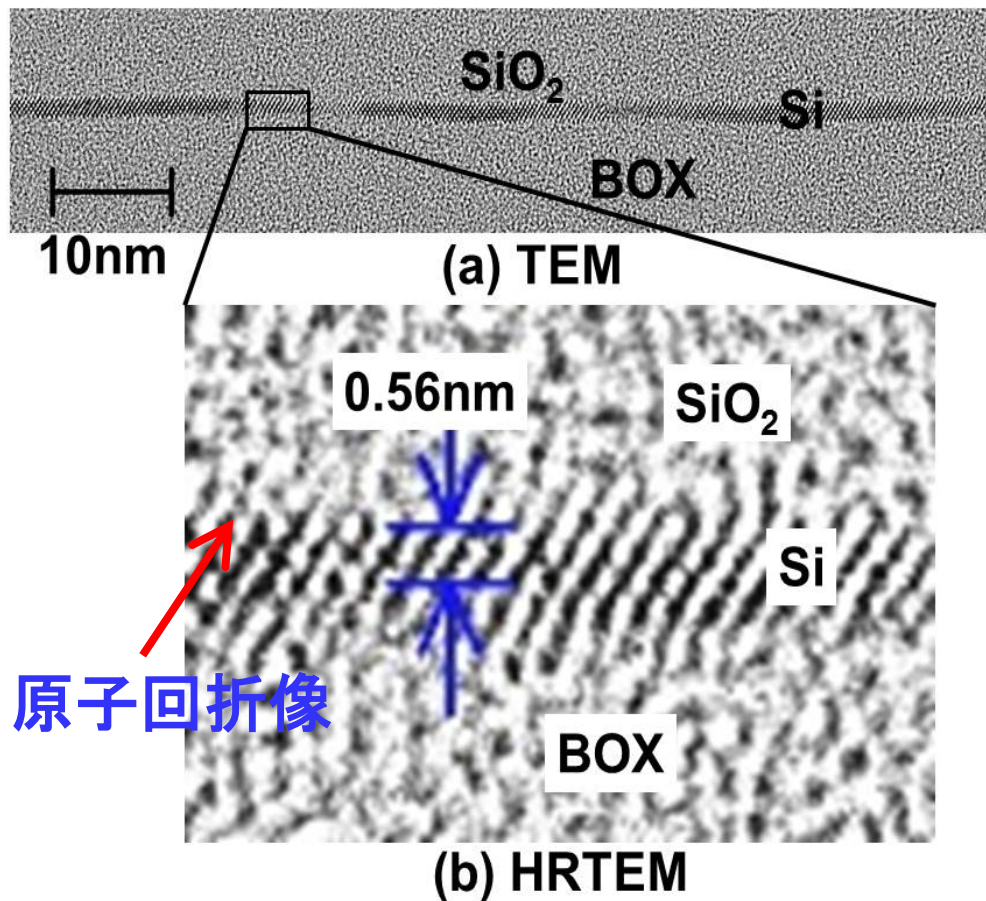
# 簡単な製法によりSi単原子層形成が成功！

- ◆ Si単原子層形成: 簡単な酸化法により可能
- ◆ 電子顕微鏡観察: Si単原子層形成の実証 ( $T_{SOI}=a_{Si}=0.53\text{nm}$ )

- 1) 連続的な2D-Si層の形成の成功
- 2) 良好な結晶性



製法



断面電子顕微鏡写真

# Si単原子層：原子一個一個を観察

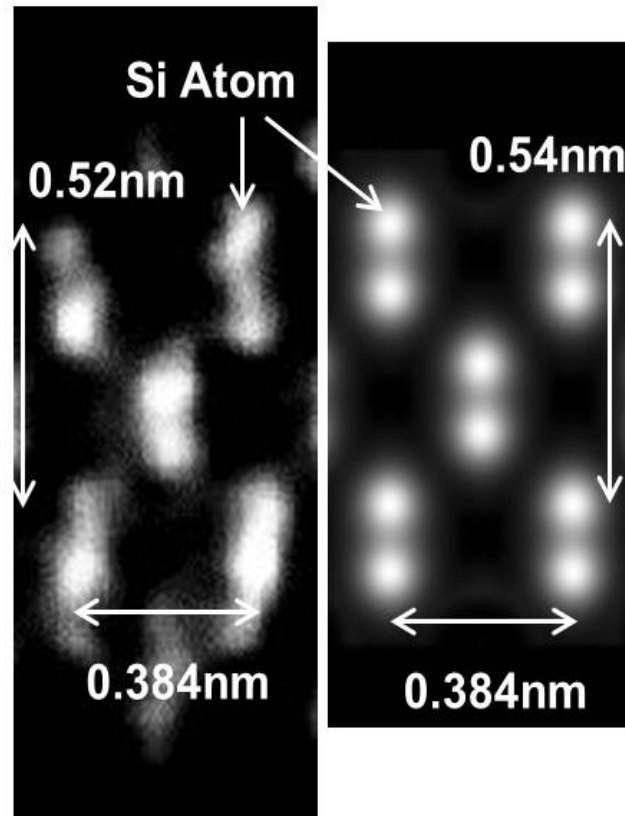
(a) 良好な Si原子イメージ ⇒ (b)ほぼシミュレーション通り  
実験結果  $a_{Si}=0.52\text{nm}\approx$ (b) 計算結果 (0.54nm)

(c) SBF(scanning bright field)-STEM: 均一な原子回折像

(d) HAADF: 均一なSi結晶 ⇒ 非晶質Si, SiO<sub>2</sub>領域は無し!



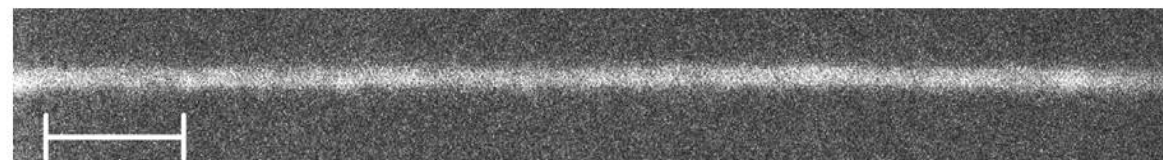
Si結晶構造の劣化は起こらない。



(a) HAADF (b) Simulation



(c) SBF-STEM



(d) HAADF-STEM



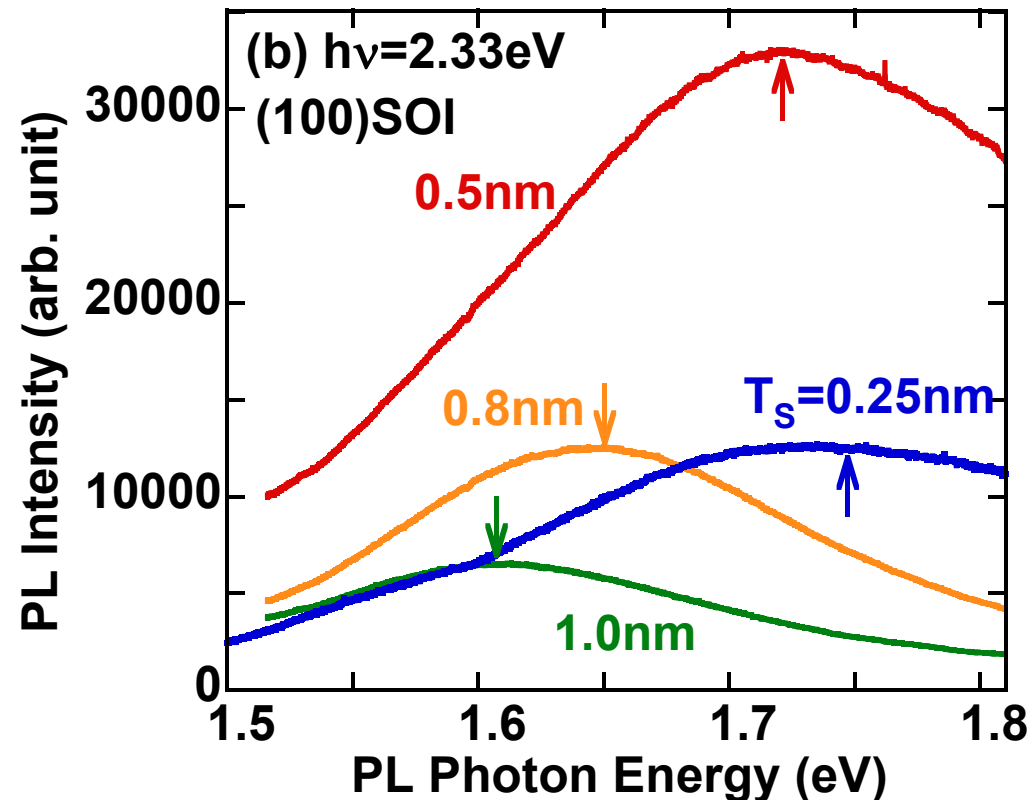
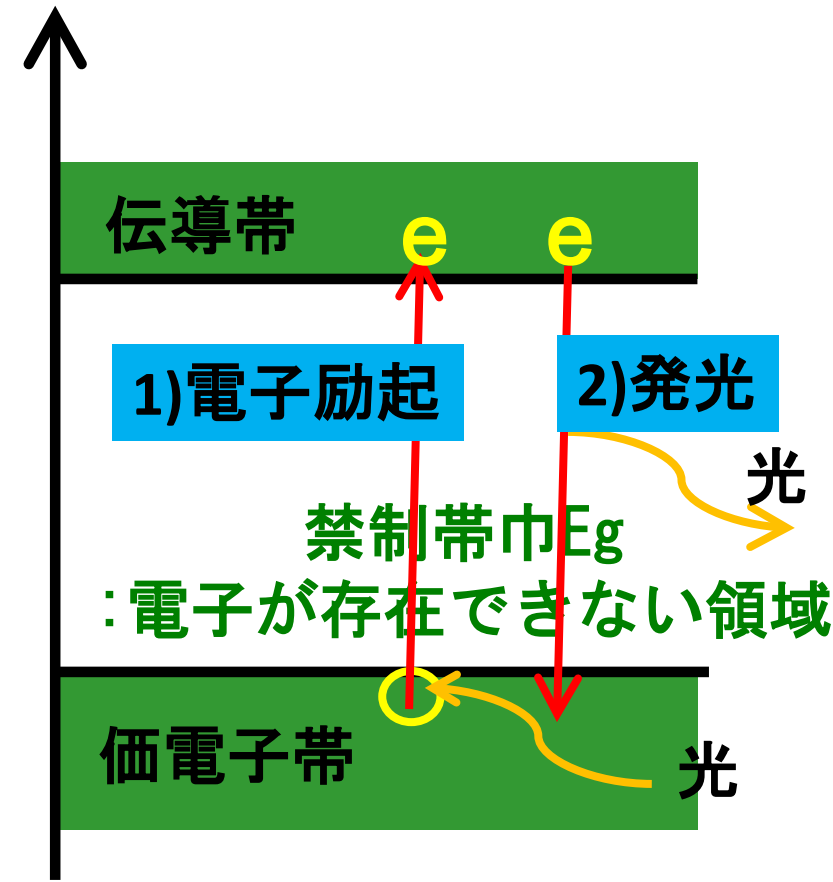
# 光るSi:エネルギーバンド構造の変調

◆PL発光：レーザー照射→電子励起→電子再結合

→発光： 光エネルギー =  $E_G$

◆通常のSiは発光無⇔1) 2D-Si発光, 2) 発光強度 /  $E_G$  増大

エネルギー

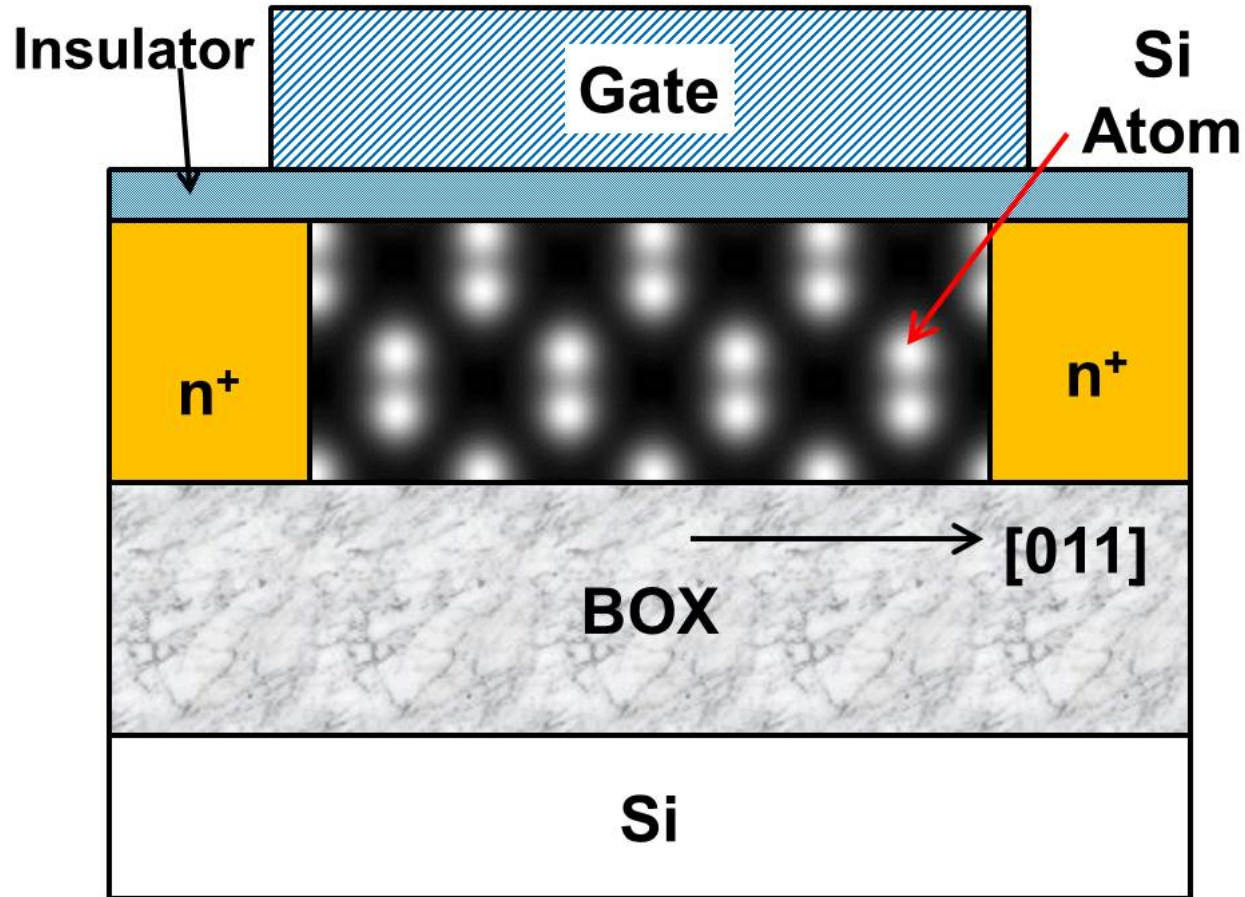


# 将来の1.5nm長二次元Si素子構造

◆20年後のトランジスタ@2030年代：Si単原子素子

横 = 1.5nm 縦 = 0.5nm : 現在の約1/13

⇒ Si原子層 横：9層 縦：5層 で動作



Si単原子素子

# 水野研ホームページ

- <http://www.info.kanagawa-u.ac.jp/~mizuno/>