

**C&C Prize 受賞記念講演 (2010年11月24日)**

**半導体ナノ薄膜・細線・ドット構造による  
電子の量子閉じ込めと先端素子応用の探索**

**榊 裕之**

**1. 東大大学院(電子工学専攻) 菅野研究室 (1968年 1973年)**

**2. 東大生産研(1973年 2007年):東大先端研・兼務(1988 - 1998年)**

**IBMワトソン研究所(江崎グループ)客員(1976 - 77年)**

**ERATO「量子波」、日米国際「量子遷移」(1988-93、94-98年)**

**3. 豊田工業大学(2007-2010年)**

## **I. Si MOS 電界効果トランジスタ:**

**「量子閉じ込め」と「2次元電子」の世界への通路**

### **Si MOS FET:**

**A gateway to “the quantum confinement”  
and “two-dimensional (2D) electrons”**

**大学院(菅野卓雄研究室)における「集積回路の中核素子」  
Si MOSFET に関する基礎研究 (1968-73年)**

**Ph. D thesis work on Si MOSFETs :**

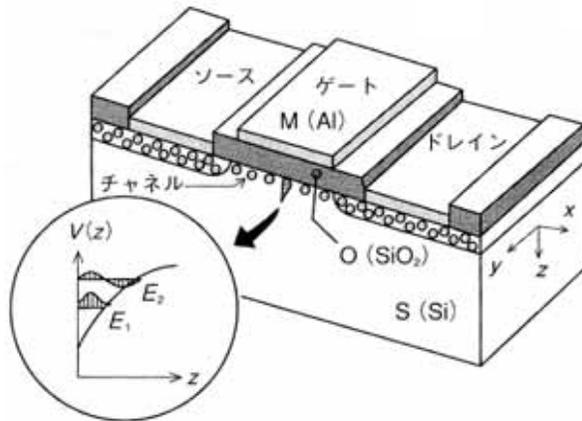
**“the core device in LSI electronics” under  
the guidance of “Prof. T. Sugano” (1968-73)**

# MOS FETの伝導層での量子閉じ込めと2次元電子

量子力学の基本式：波長と振動数で規定されるドブロイの物質波

( 1 ) 波長  $= h / p$  (  $p$  運動量  $= mv$  ) ( 2 )  $E = hf$  ( 振動数  $f$  )

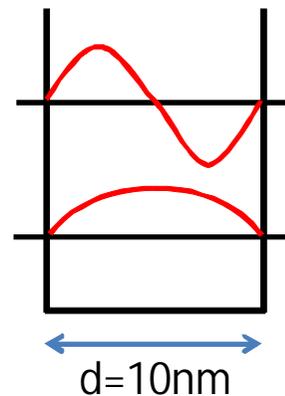
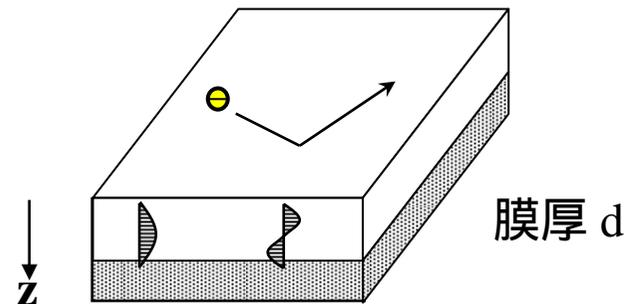
## MOS型ナノ薄膜



$$d = \left( \frac{h^2}{8meF} \right)^{1/3}$$

伝導層の膜厚  $d$  は  
正負の電荷間に働く  
電界強度  $F$  に依存

## ヘテロ型ナノ薄膜

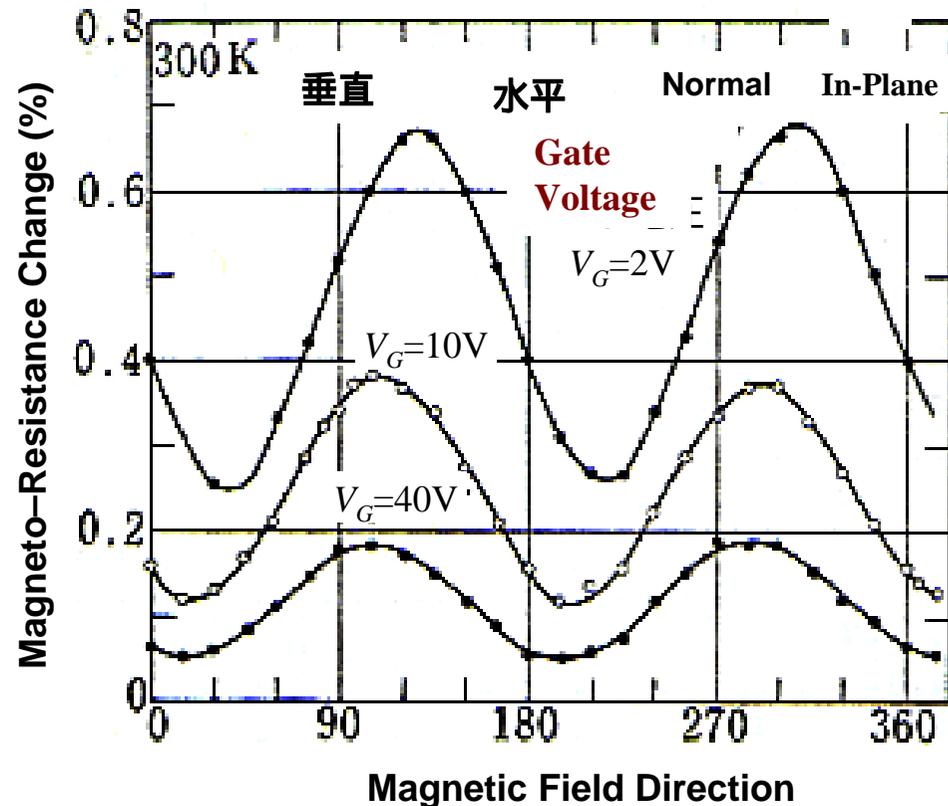
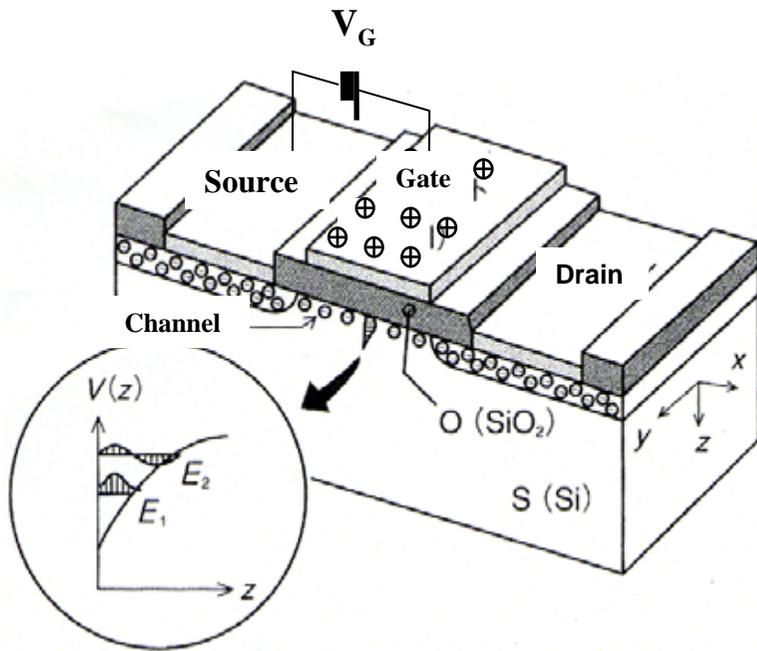


$$\begin{aligned} E &= p^2 / 2m \\ &= (1/2m)(h/\lambda)^2 \\ &= (1/2m)(h/2d)^2 \end{aligned}$$

$$E_1 = 50\text{meV} \times (10\text{nm}/d)^2$$

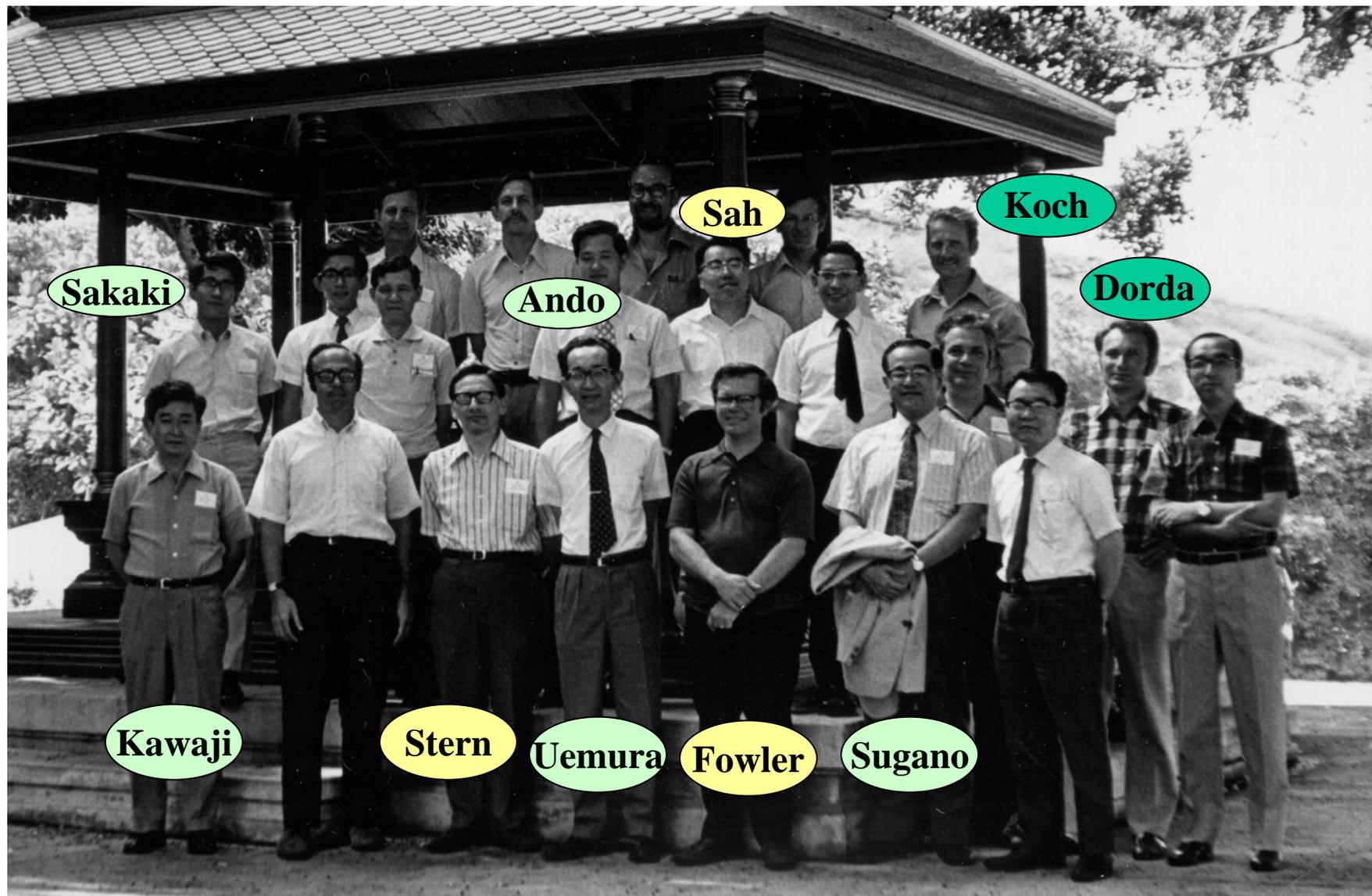
(質量  $m=0.07m_0$  の場合)

# Si MOSFETの電子は、室温でも、量子閉じ込めを受け、 電子の自由度は2次元化するか、否か？



MOS素子では、電子が表面近くの極薄伝導層に閉じ込められる。極低温で、量子閉じ込めが生じ、2次元性を示す散乱の多い室温 (300K) では、量子的効果は、効くか、無視できるか。  
(Schrieffer, 1955)

ゲート電圧  $V_G$  が高い時 (40V) 場合電子は強く閉じ込められ、面に垂直な磁場成分のみ、運動に影響 (2次元電子)  
 $V_G$  が低いと、他の成分も影響し、バルク的なSi結晶の対象性を反映 (3次元電子)



**(学振) 日米ワークショップ「MOS構造内の2次元電子の物理」**  
(Hawaii, Summer 1972) IBM, U. of Maryland, U of Tokyo, Siemens etc.

## **II. 電界効果素子概念の拡張と新構造への発展**

**Esakiの「超格子」と関連研究との出会いに啓発されて  
Extending Concepts and Structures of “Field Effect Devices”  
Inspired by “Superlattice (SL)” Research by Leo Esaki**

**(II-a) 面内超格子: 超格子とFETとの概念的結合 (1975-以降)  
Planar Superlattices: “Conceptual Blend of SLs and FETs”**

**(II-b) ヘテロ・ナノ薄膜内の2次元電子伝導とHEMT ('76以降)  
2D Electron Transport in Hetero-Nano Films and HEMTs**

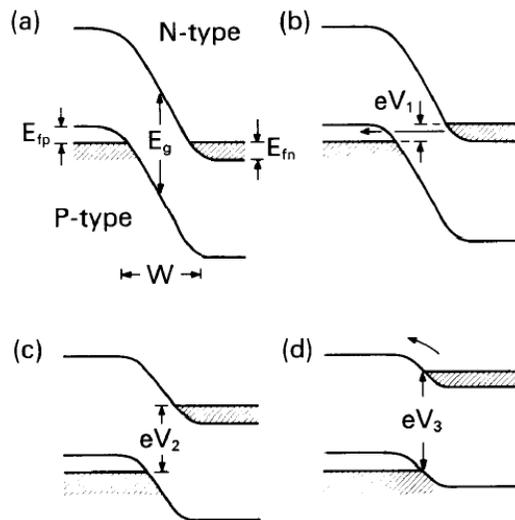
**(II-c) 量子細線FETの提案と発展 (1980以降)  
Proposal and Developments of “Quantum Wire FETs”**



L. Esaki

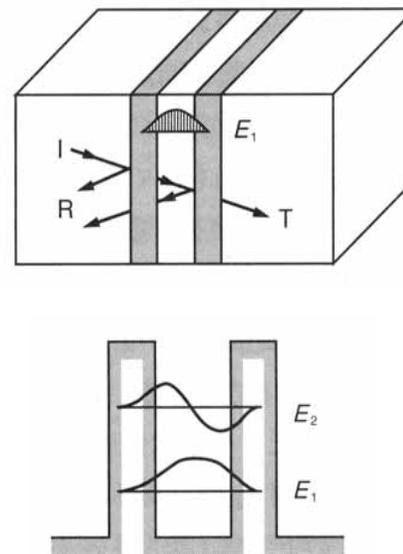
# Esakiの「超格子」研究とその波及効果 (Esaki-Tsu, 1969-70)

## (1) Single Barrier Tunnel Diode (1958)

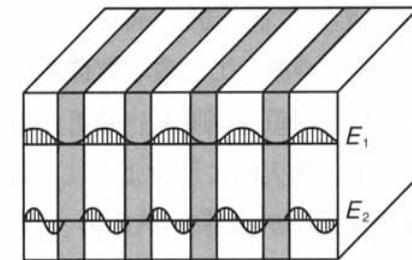


**Tunnel Diode with 10nm-Scale Single Barrier (1958, Nobel Prize 1973)**

## (2) Double Barrier Resonant Tunnel Diode



## (3) Multi-Barrier Superlattice Diode (1969-70)



**Bragg Filter for Electrons**

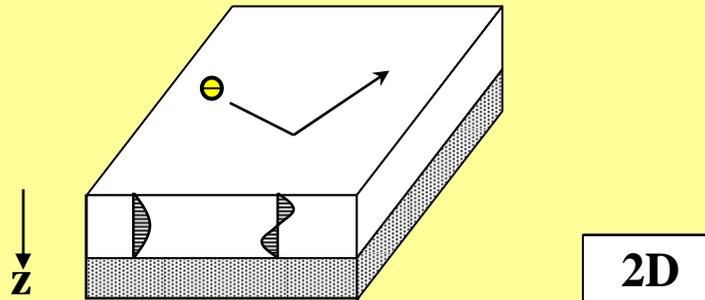
## Impacts of Superlattice Research

- A) Promoted MBE and Nano-Technology
- B) Uses of Quantum Confinements and Tunnelling
- C) Induced Concepts of Quantum Dots and Wires

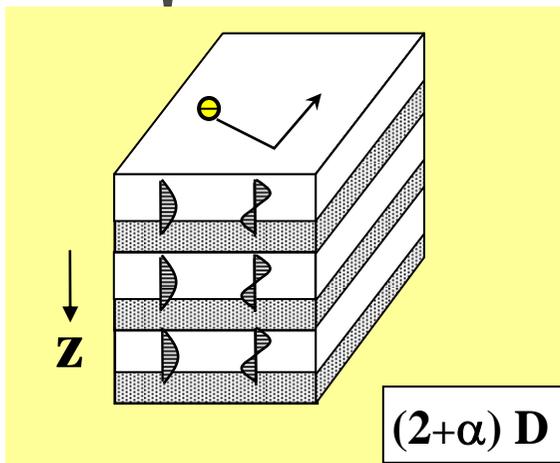
# IIa: 「面内超格子」: 2次元電子の面内運動の量子的な抑制と制御

Esaki-Tsu  
(1969-70)

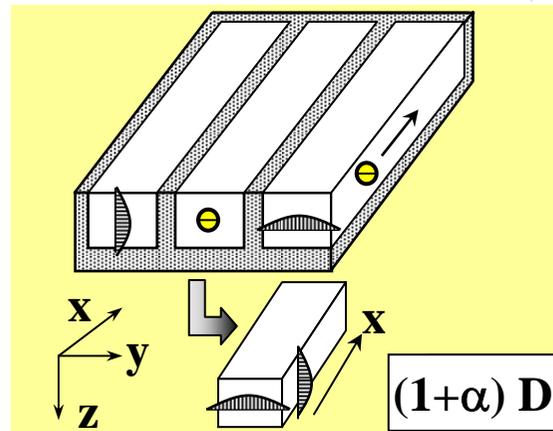
量子(井戸)薄膜と 2次元(2D)電子



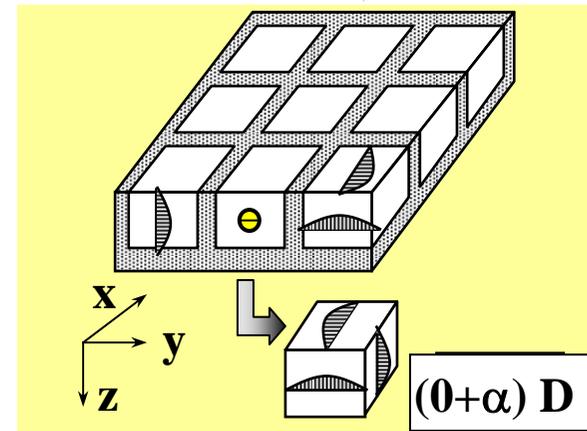
Sakaki ら  
(1975-6)



(層状)超格子: 結合量子薄膜



(面内)超格子: 結合量子細線



(面内)超格子: 結合量子ドット

“FET” と“Superlattice” との概念の結合:

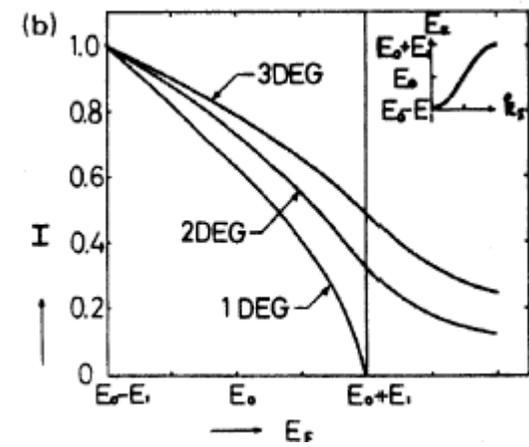
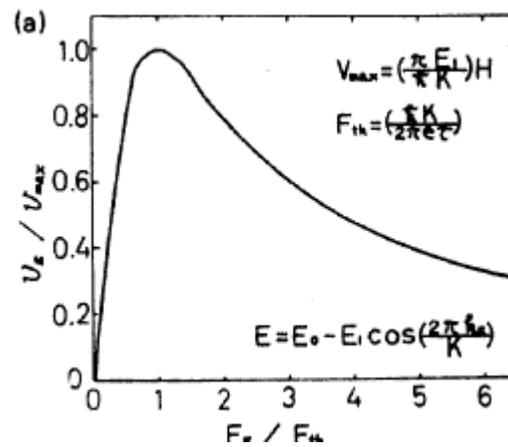
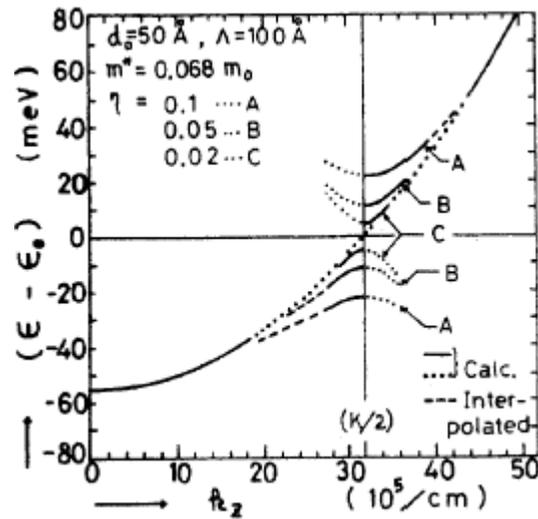
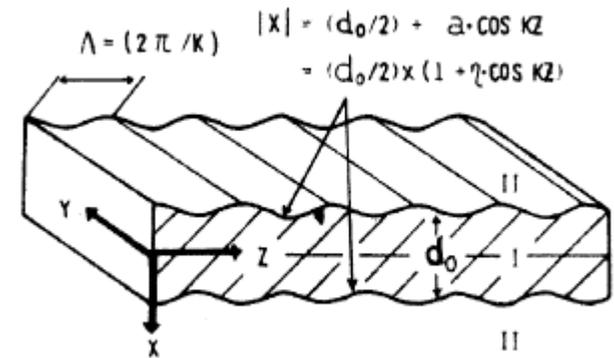
ゲートで制御可能な超格子、運動の自由度の削減

POSSIBLE APPLICATIONS OF SURFACE-CORRUGATED QUANTUM THIN FILMS TO NEGATIVE-RESISTANCE DEVICES\*

H. SAKAKI, K. WAGATSUMA, J. HAMASAKI AND S. SAITO

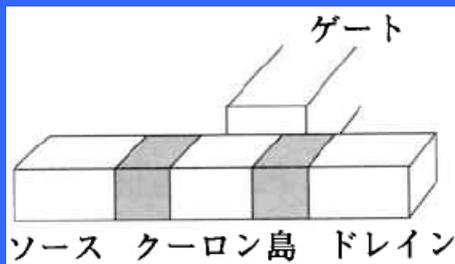
Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo (Japan)

(Received August 25, 1975)

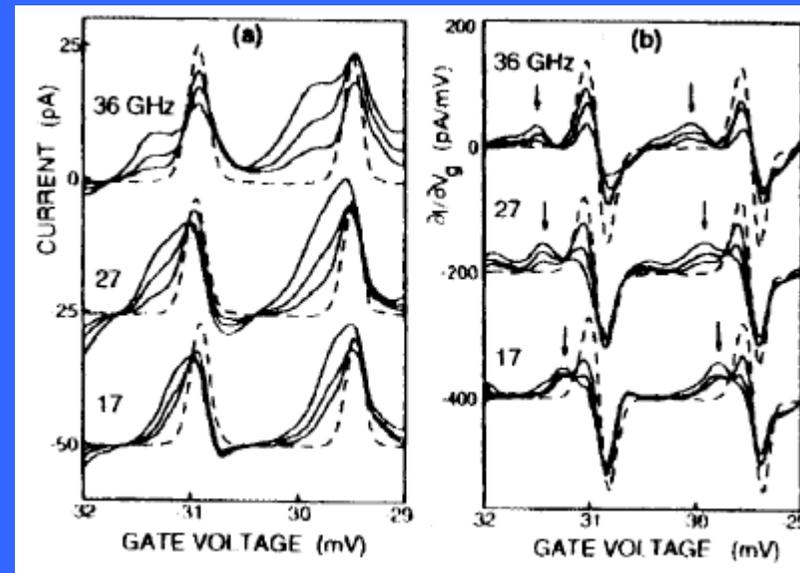
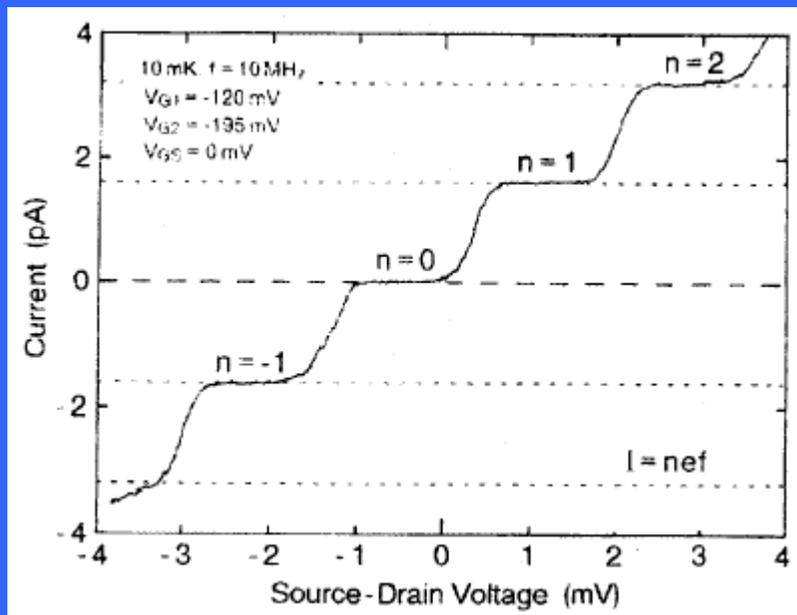
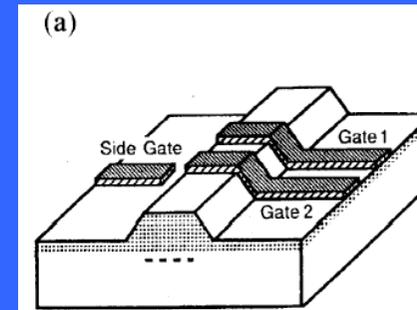


## その後の発展

量子ドット内の「ゼロ次元」電子が関与する単電子素子  
電子一個のトンネル移動を制御する単電子トランジスタ・単電子転送素子



Nagamune, Kouwenhoven *ら*  
*Appl. Phys. Lett.* (1994)  
*Phys. Rev. Lett.* (1996)



# II b: ヘテロ超薄膜(超格子)内の電子の面内伝導(1976以降)とヘテロ構造FET(HEMT)の発展

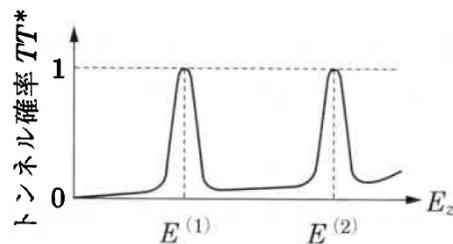
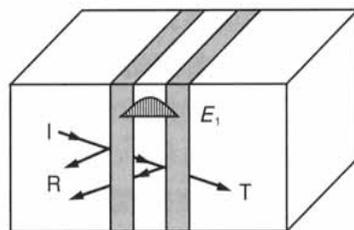
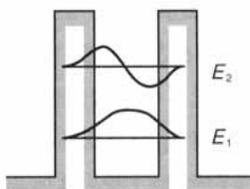


江崎博士1976

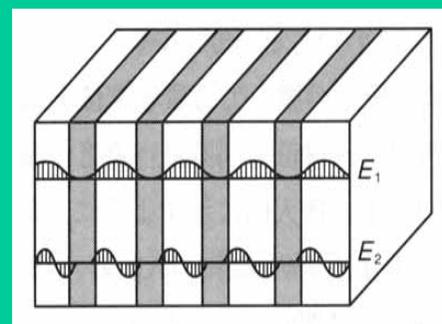
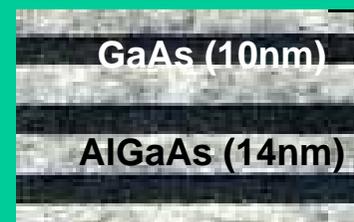


ワトソン研究所

## 2重障壁を介する共鳴トンネル

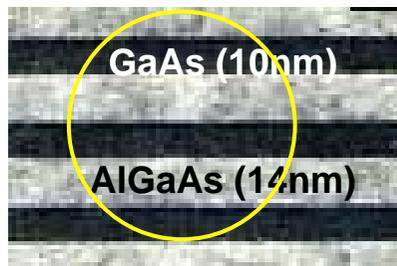


## 多重障壁(超格子)を介する特異な伝導

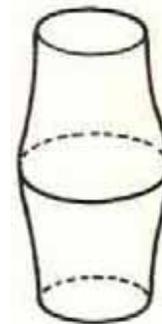


## 波長選択的な伝導

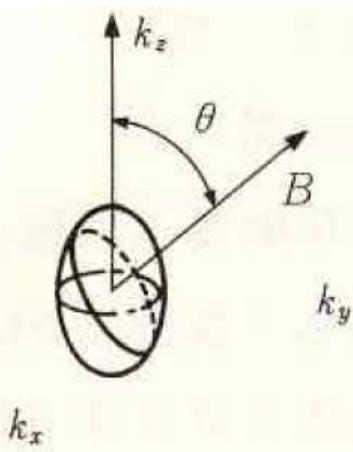
# IIb (1) 超格子における面に沿う電子伝導の磁場方向依存性 電子状態の異方性とフェルミ面の決定(1976 77)



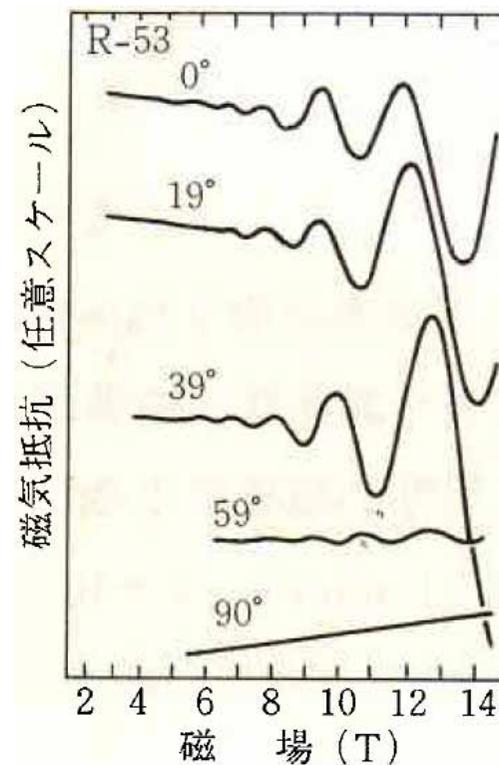
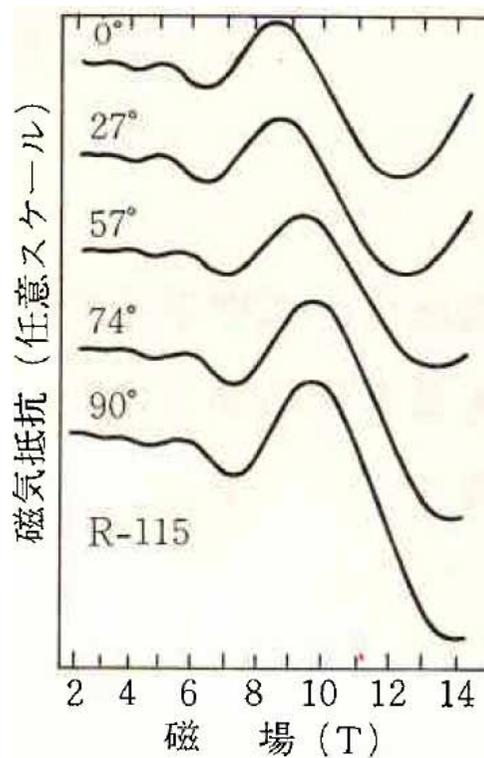
ラグビーボール型で  
電子数を増やすと  
円筒型に変化する



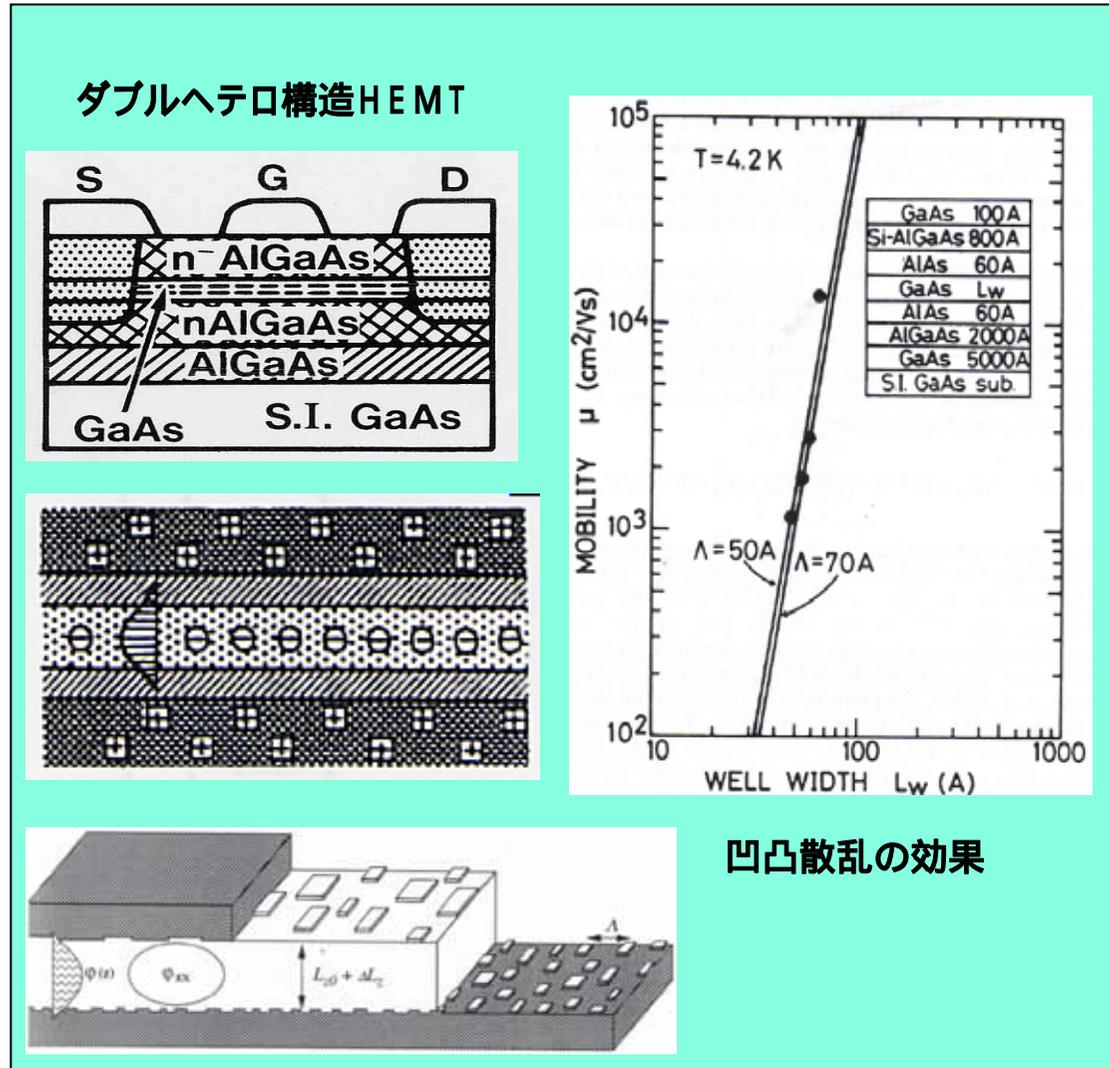
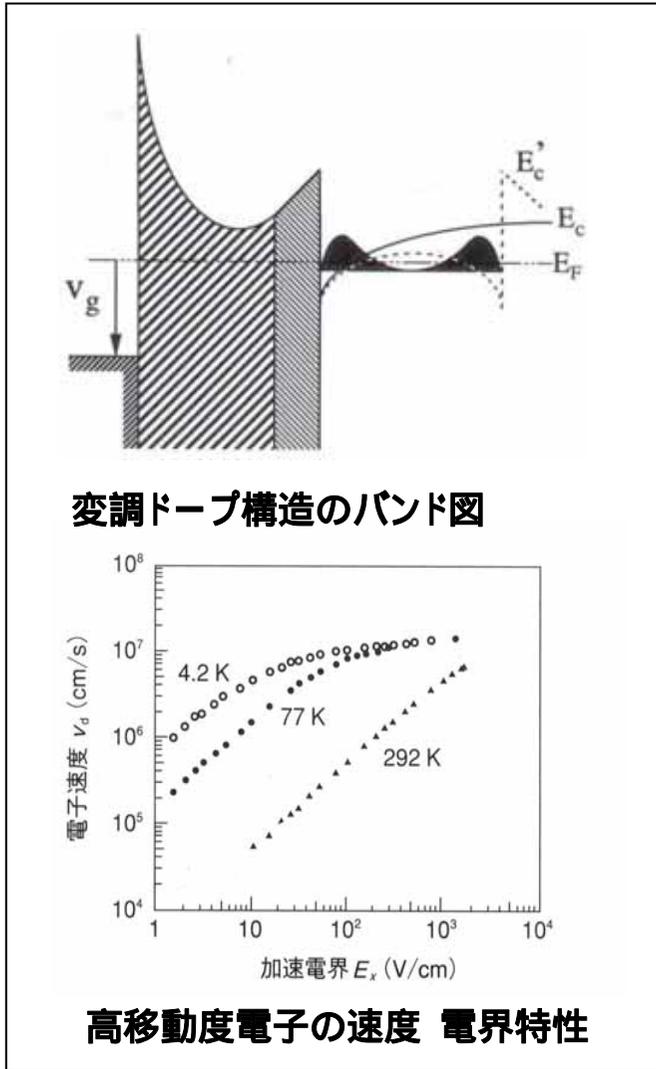
磁界の中の抵抗変化  
(磁場方向依存性)



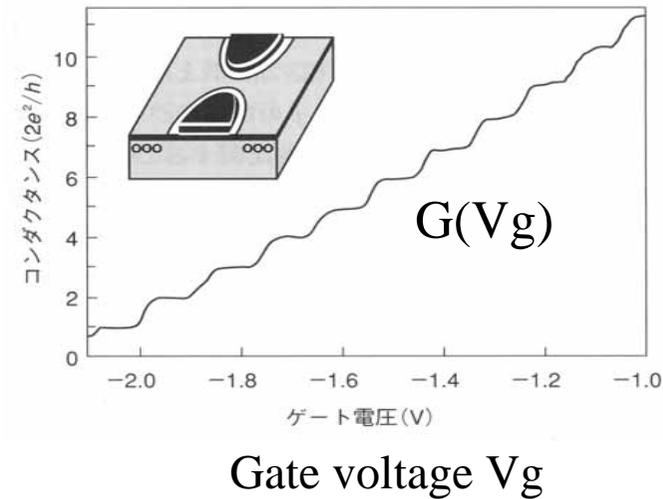
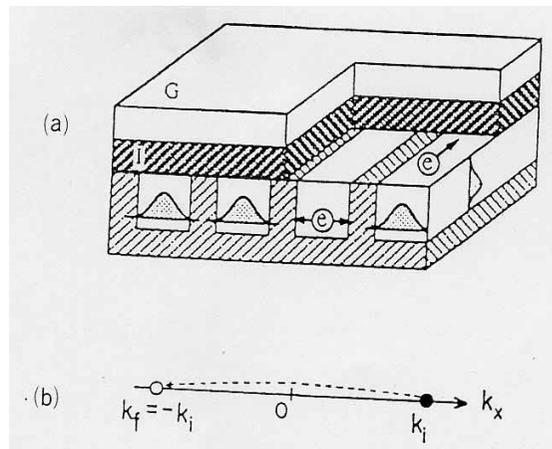
壁(3nm)をトンネルする場合



# IIb (2): 超薄膜ヘテロ構造の面内伝導の研究の発展: 変調ドープ構造(ベル研)とHEMT(富士通1980)の誕生 超高速FETのその後の発展への関与



## II c 量子細線FETの提案(1980)とその後の発展 1次元電子の散乱抑制、弾道伝導の実証など

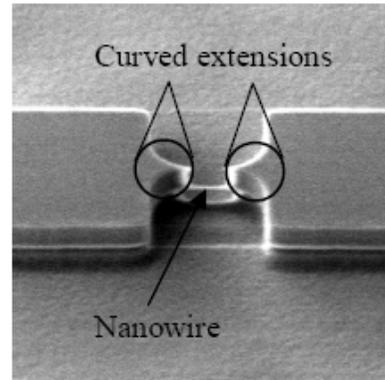


1次元電子の散乱抑制効果  
( $2k_F$ 効果)の解析とFET応用  
の提案 (Sakaki, 1980)

量子ポイントコンタクト素子の  
コンダクタンスの量子化  
(van Wees et al, 1988)

# 量子細線FETの発展 作製法の発展と次世代LSI技術としての意義

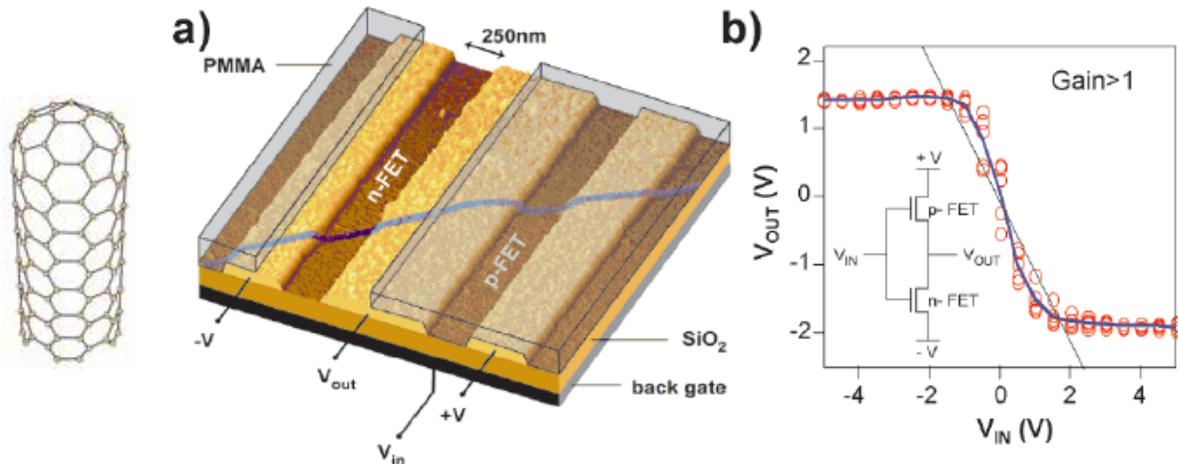
Si MOS型  
量子細線 FET  
NTT, 東大, 東芝, 三星など



短チャンネル効果  
閾値電圧の低下  
の抑制に有効:  
次世代LSI素子  
としての検討

Inst. of Microelectr. Singaporeなど  
N.Singh et al, IEDM 2006

Carbon ナノチューブ  
を用いたFET  
IBMグループなど



**・量子薄膜・細線・ドット構造の新光素子応用の探索**  
**Esakiの「超格子」および関連研究に啓発されて**

**Exploration of New Photonic Devices**

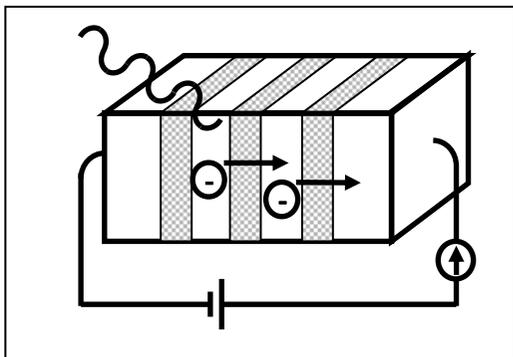
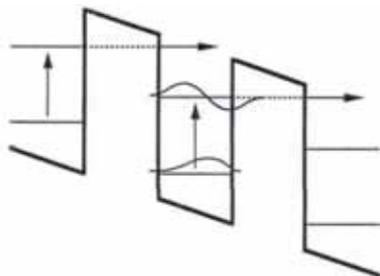
**Based on Quantum Films, Wires, and Dots”**

**Inspired by “Superlattice” Research by L. Esaki and Related Studies**

- ( **-a) 量子薄膜内の量子準位間遷移を用いた(中)赤外検出器**  
**Quantum Well Infrared Photodetectors (QWIPs) (1977以降)**
- ( **-b) 量子細線・量子ドットのレーザ応用 (1982以降:荒川・榊)**  
**Quantum Dot and Quantum Wire Based Lasers**
- ( **-c) 量子ドットの光検出器応用 (1997以降)**  
**Quantum Dot Based Photodetectors**

( a) 量子井戸(超格子)赤外検出器(1977以降)  
基底準位から励起準位への光学遷移を活用

超格子の電子伝導：  
赤外光照射効果



赤外光照射下のみ伝導性を示す(榊・江崎、1977)



ドイツ・フライブルグ市の夜景  
赤外映像(36万画素)  
物体の温度を反映  
Fraunhofer研究所 (Schneiderら)

## ( b) 量子ドット・レーザの提案 (荒川・榎, 1982) と発展

Proposal of Quantum Dot Lasers by Arakawa & Sakaki

イリノイ大学の友人 (K. Hess) の論文に啓発されて

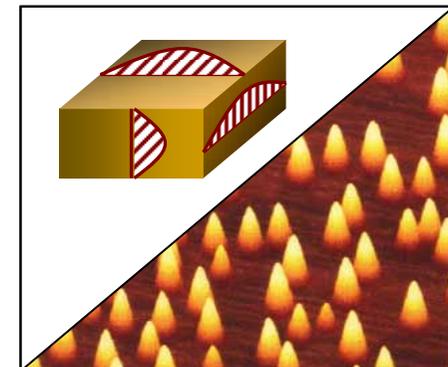
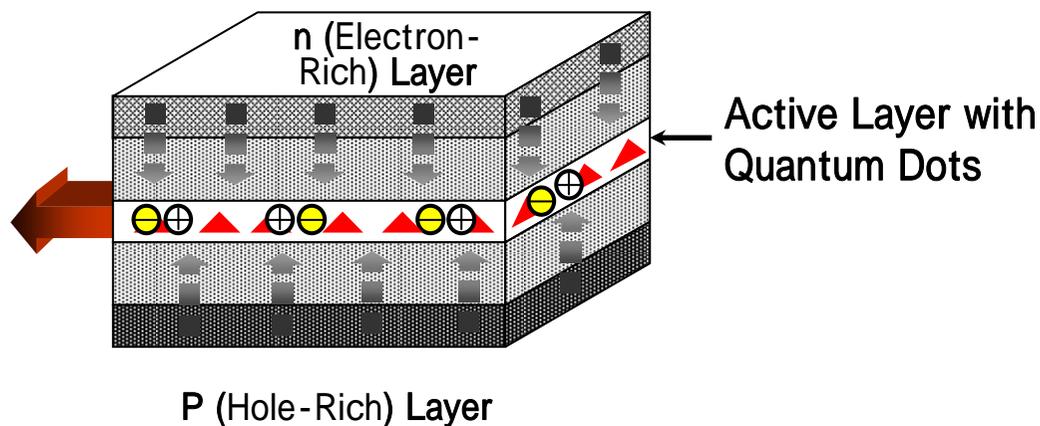
Inspired by Dr. K. Hess,, U. of Illinois, a long time friend

### Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current

Y. Arakawa and H. Sakaki

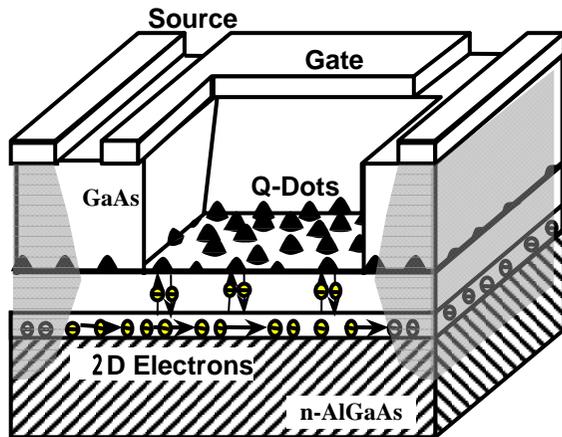
*Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Minato-ku, Tokyo 106, Japan*

(Received 19 January 1982; accepted for publication 23 March 1982)

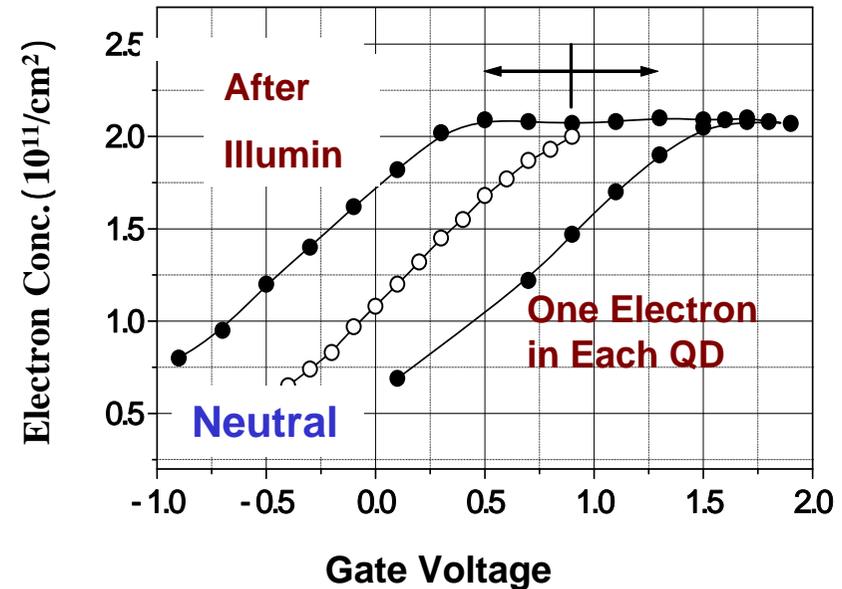


自己形成手法による  
InAs量子ドット

( -c) 量子ドットを用いた光検出器の研究 (1997以降)  
Quantum Dot Based Photodetectors

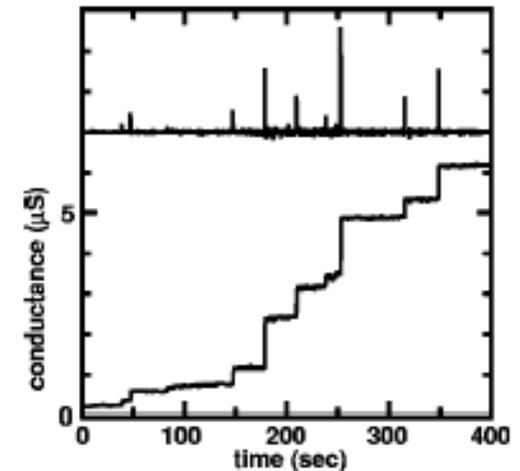


(a)



(b)

- 1) FETの伝導層の近傍にInAs量子ドットを埋めこんだ素子
- 2) 光照射により各ドットは正孔一個を捕縛。正に帯電し、閾値は左に移動。持続性光伝導効果が実現。ゲート電圧で、正孔は消去可能
- 3) 素子を小型化して、単一光子の検出も実現  
東芝ケンブリッジ Shields, APL2000 (左図)



# 結びと謝辞

東京大学 (1964-07)

生産研、先端研、  
工学部(電子)など

IBM Watson 研究所

(1976-77)

ERATO/ICORP  
研究プロジェクト

(1988-93, 94-99)

豊田工業大学

(2007 - 2010)

先輩・同僚・研究メンバー  
共同研究のパートナー

.....

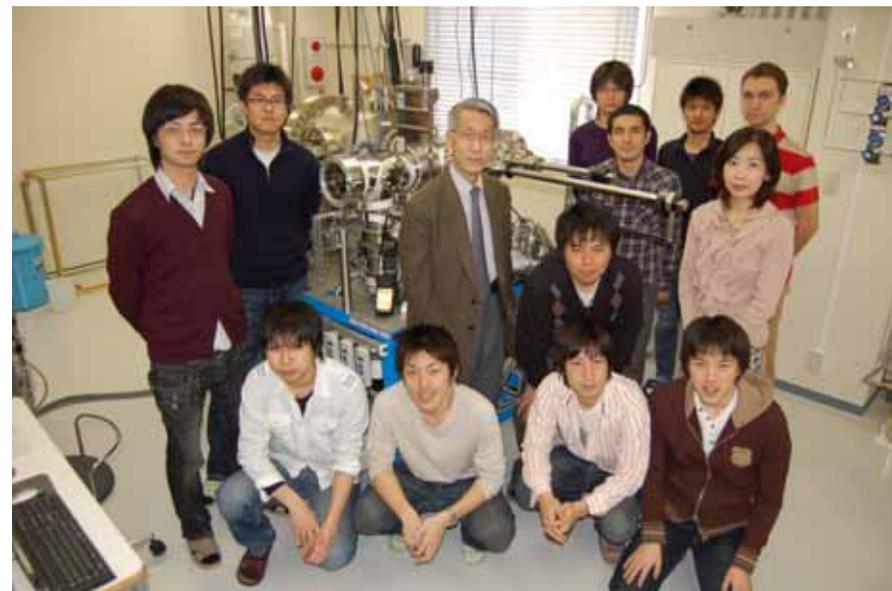
文部科学省の科学研究費、  
JRDC / JST、NEDO、財団、  
企業からのご支援

.....

家族、友人



研究室の関係者やOBなど(2008 ICPS, ウィン)



豊田工大研究室のメンバー(2009)