

第27回神戸大学大学院工学研究科公開講座・ひょうご講座

暮らしとナノエレクトロニクス

土屋 英昭

電気電子工学専攻

ナノ構造エレクトロニクス研究室

(<http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-nanoelectronics/>)

コンピュータを用いた計算的手法により新時代のエレクトロニクスを開拓する研究 - 計算ナノエレクトロニクスを推し進めている研究室

エレクトロニクス = 電子工学、電子技術

古くは、

トランジスタラジオ、VTR、CDプレーヤを生み出し、その後、パソコン、インターネット、携帯電話、デジタルカメラ、カーナビゲーションに代表されるようなIT（情報技術）革命を引き起こしました。

一方向(決められた機能)から双方向へ

最近では、

ETC(道路通行料自動徴収システム)やハイブリッド車、省エネビル、さらには指紋検出による個人認証システムまで登場しました。

高速処理、きめ細かな制御、正確性

将来は、

「いつでも、どこでも、だれとでも」コミュニケーションができるユビキタス社会や、ITS(高度道路交通システム)が実現すると期待されています。

[注]ユビキタス(ubiquitous): ラテン語で「どこにでもある、遍在する」という意味。

身の回りに溶け込む、安全、人間の生活をサポート

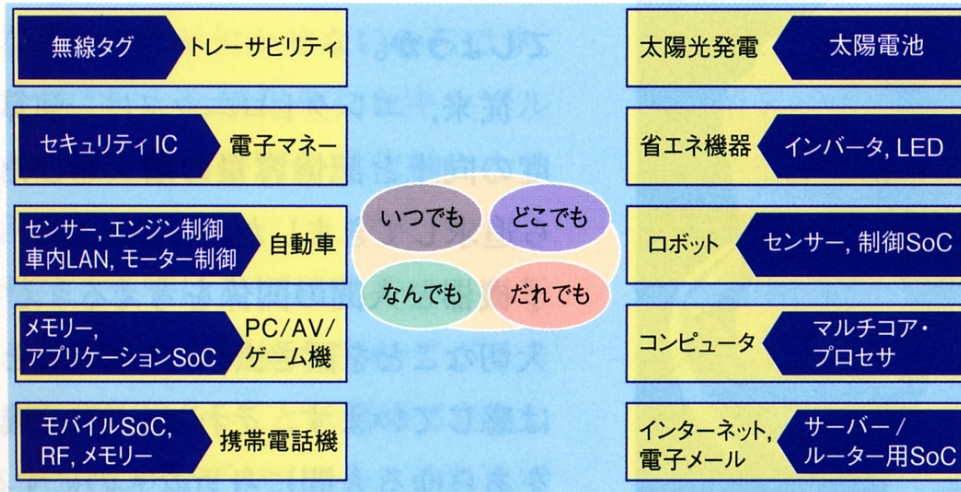
生活の質の向上
地球環境の保護



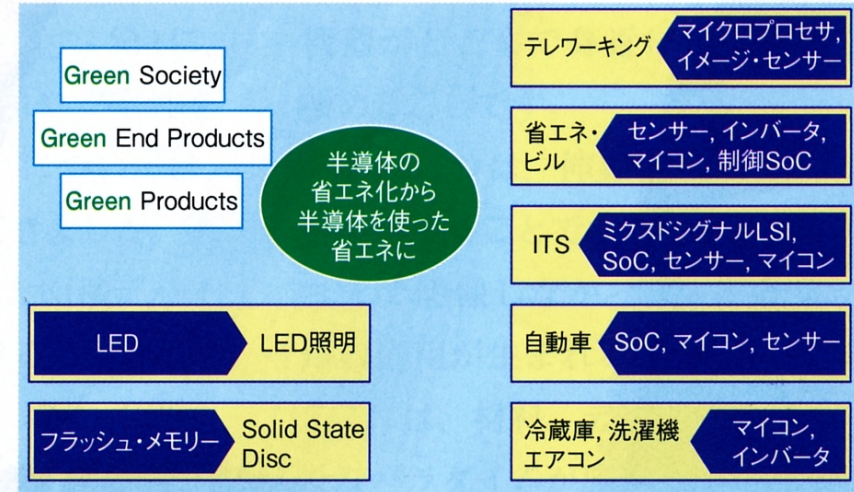
半導体技術の進化

暮らしに広がる半導体技術

半導体は社会基盤を支え、地球環境保護に貢献



(a) ユビキタス社会のキー・デバイス
～より豊かな社会の実現, 持続的成長と地球環境の両立～

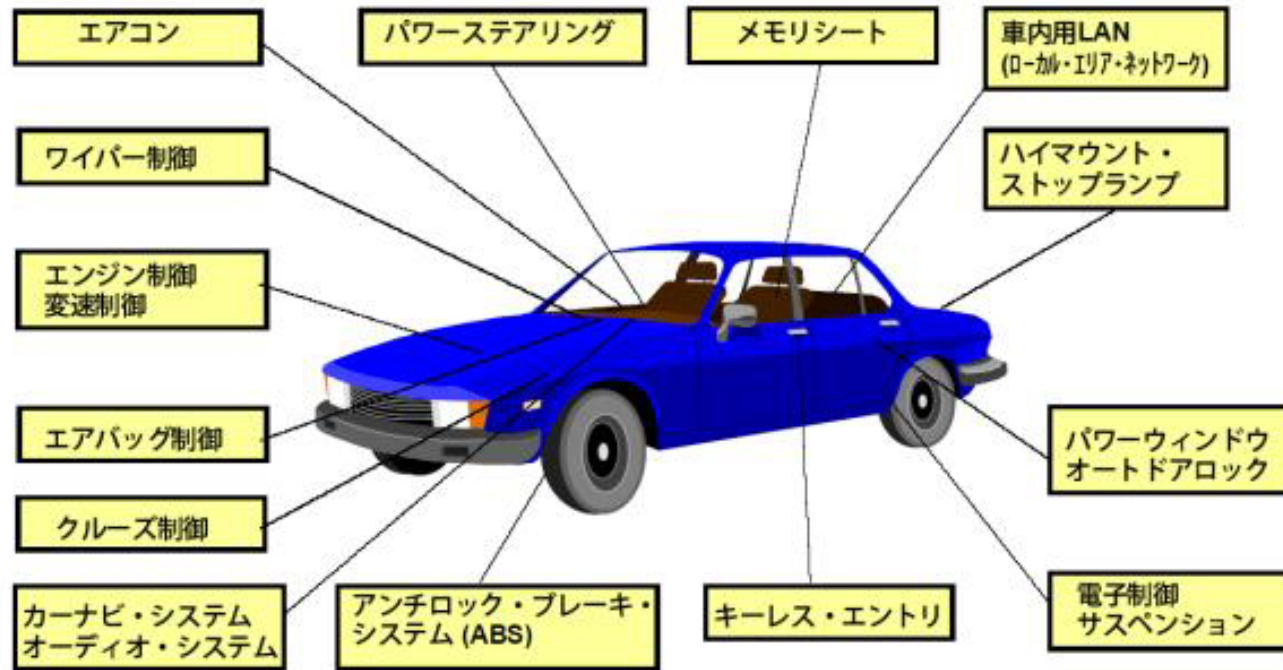


(b) 地球を守るキー・デバイス
～省エネ製品・省エネ社会を実現～

“未来を切り拓く半導体技術”、日経マイクロデバイス特別編集版(2008, 2009)より引用

我々の身の回りに半導体技術が浸透している様子が分かる

自動車は走るコンピュータ



“21世紀IT社会を拓く—半導体産業からのメッセージ—”、電子情報技術産業協会(JEITA)、2003年より引用

マイクロコンピュータの数 ⇒ 高級車で約60個、大衆車でも30個は使われている

ハイブリッド車 (= エンジン+電動モータで構成される) ハイブリッド車の価格の約1/3は電子部品

自動車がスピードダウンするときに捨てられるエネルギーを電気エネルギーとして蓄え、次に加速するときに電動モータ用として使おうという発想。その制御をマイクロコンピュータが行っている。

[注]マイクロコンピュータ = 半導体で作られた小さなコンピュータ

ITS (高度道路交通システム)

道路そのものもIT(情報技術)によって「知的なもの」にする

【カーブの先の路面状態・渋滞の情報提供実験】
実験場所: 国道26号米谷地区

カーブ区間の停止・低速車両・路面状態を検出するエリア

低速車等の位置を伝達

低速車等の位置・速度を伝達

音声: ビビ!
「300m先停車車
注意して運転して下さい。」

基点情報を伝達

出典: ITS ハンドブック

【トンネル出口の路面状態の情報提供実験】
実験場所: 国道45号宮古トンネル群

路面センサ

路面状態が
変わりやすい箇所

センサが計測したデータを分析

この異常に注意

トンネル出口付近で路面情報提供

出典: IHS研究組合

【広範囲な情報提供】

【音声情報の提供】

この先、浦安-幕張間、事故渋滞 2kmです。

【静止画像情報の提供】

この先、踏切凍結

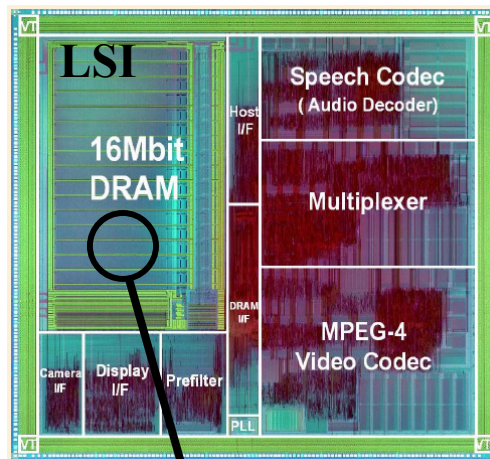
【多くの路線の情報提供】

半導体集積回路 (LSI) とMOSTランジスタ

半導体技術 = 半導体集積回路

LSI (Large-Scale Integrated) 回路

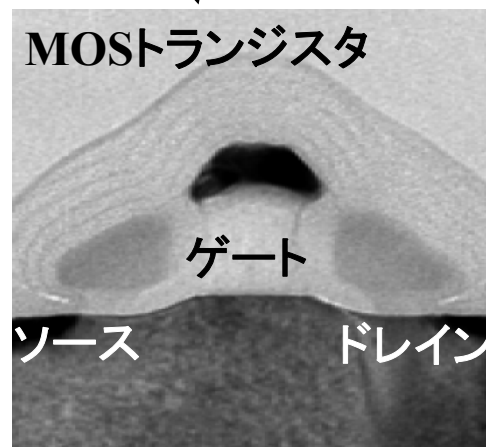
パソコン、デジカメ、自動車等でも同じ



- メモリ(記憶)
- 音声処理
- ビデオ処理
- インターフェース

などの機能を1つのチップ上に実現
システムオンチップ (SoC)

MOSTランジスタ



情報の記憶・データ処理等の最も重要な機能を掌っているのが...

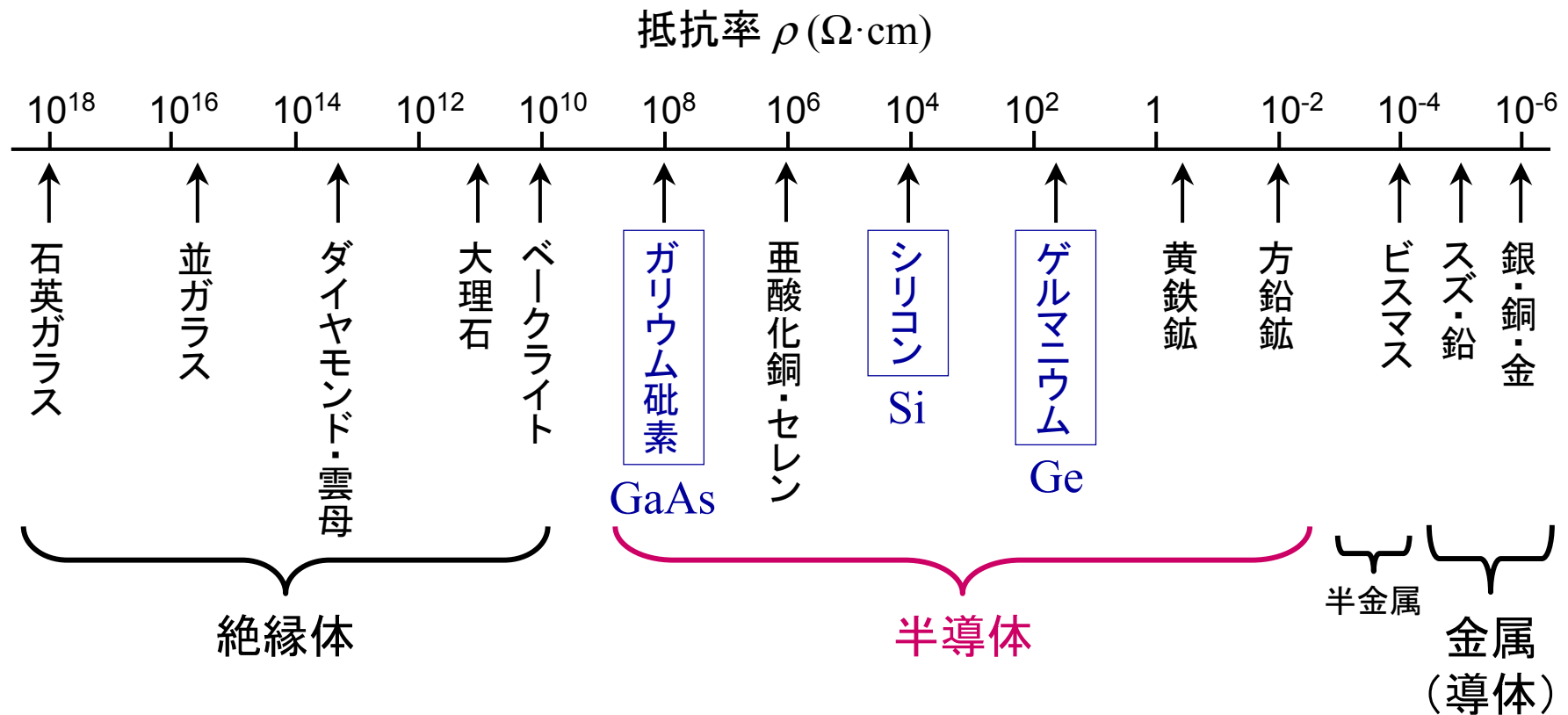
“MOSTランジスタ”

(<http://www.intel.com>)

半導体入門

半導体とは？

「ある決まった条件を満足すれば電気が流れるが、それ以外の時には電気が流れない、つまり**半分、導体**である。読んで字のごとし」



“**半分、導体**” ⇒ 大変、都合の良い性質

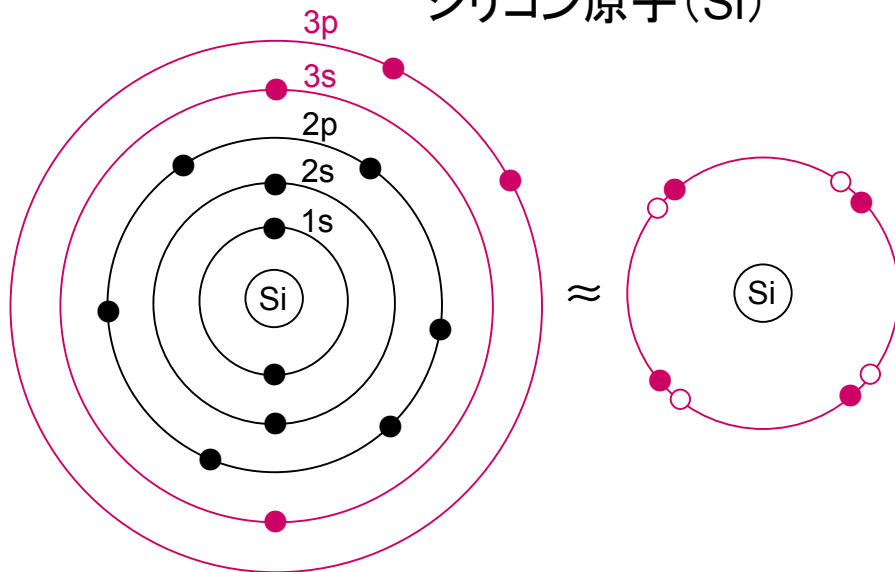
出典：電気伝導，阿部龍蔵

周期律表

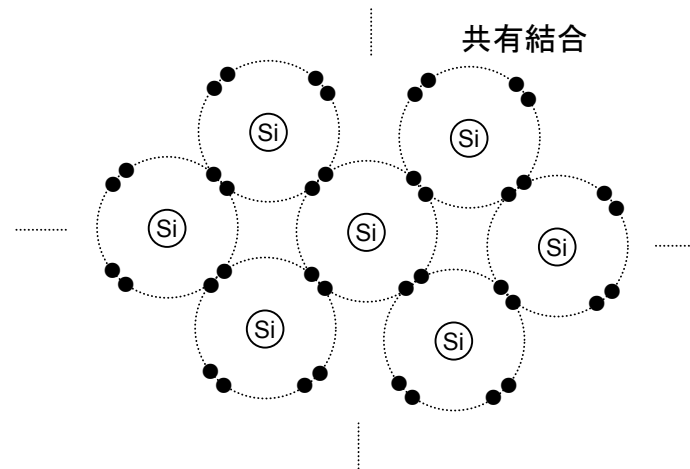
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	H							He
2	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr

⋮

シリコン原子(Si)

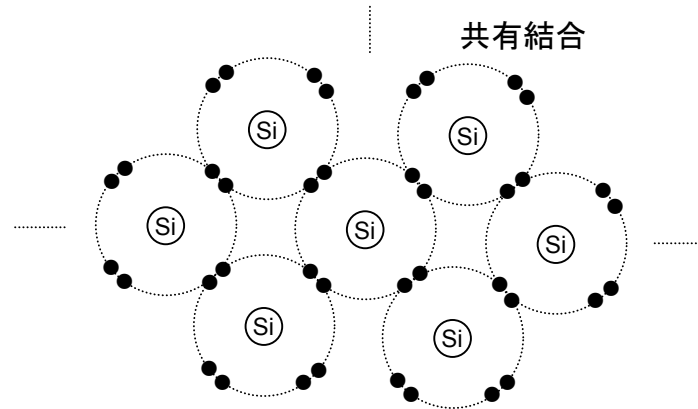


シリコン結晶



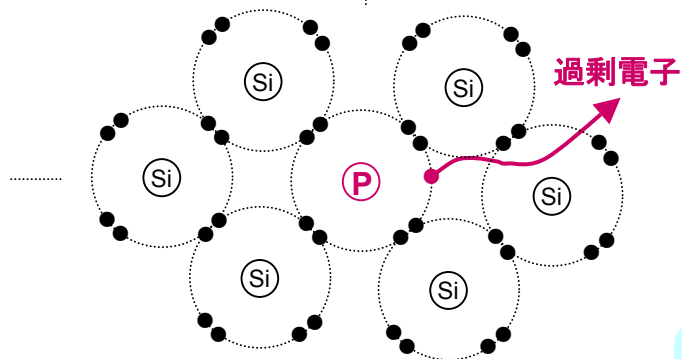
ドーピング(不純物添加)

真性(純粋な)半導体に不純物を添加することを「ドーピング」という



真性半導体 = 電気が流れない

↓ ドーピング(不純物P添加)



不純物半導体 = 電気が流れる

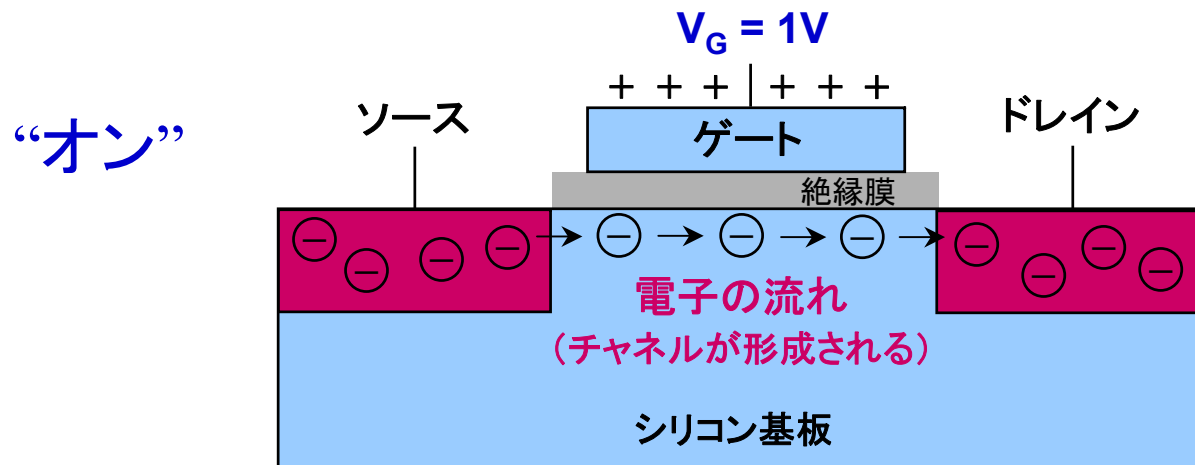
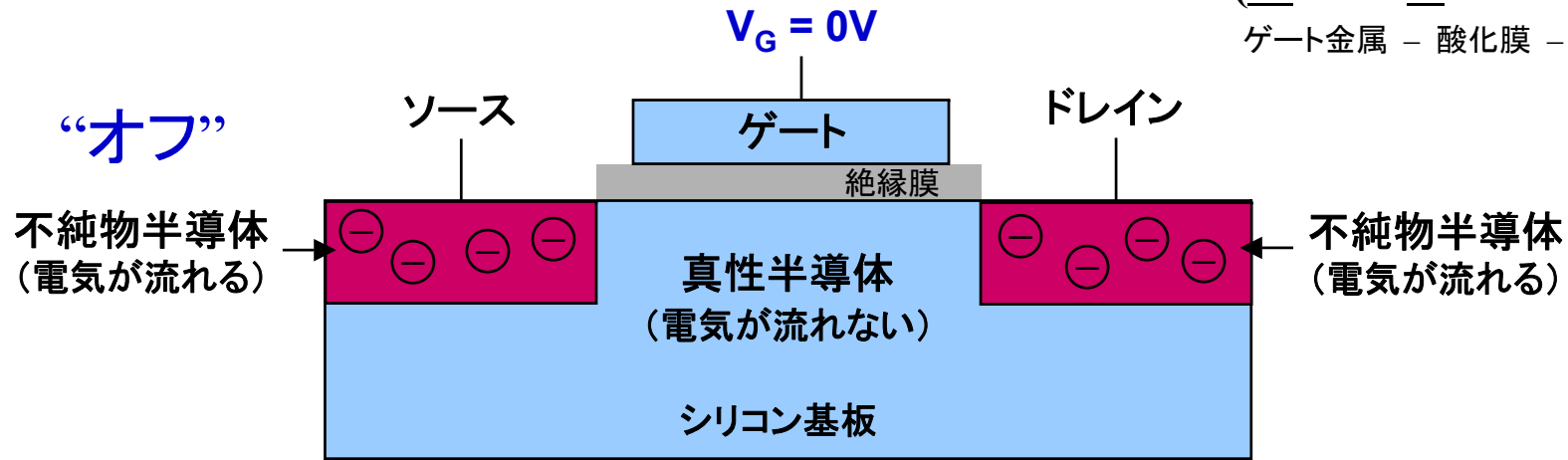
ある決まった条件を満足すれば電気が流れるが、それ以外の時には電気が流れない

“半分, 導体” ⇒ 大変, 都合の良い性質

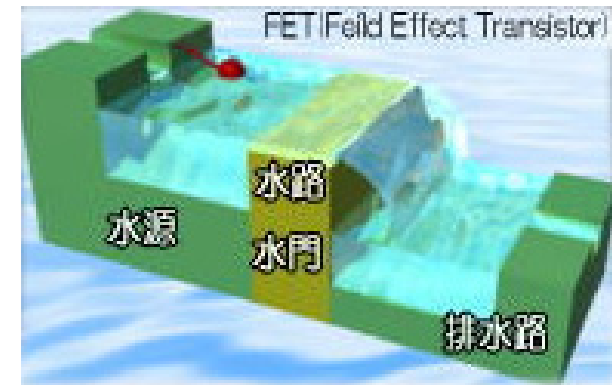
MOSTランジスタ

MOS (Metal - Oxide - Semiconductor)

ゲート金属 - 酸化膜 - 半導体

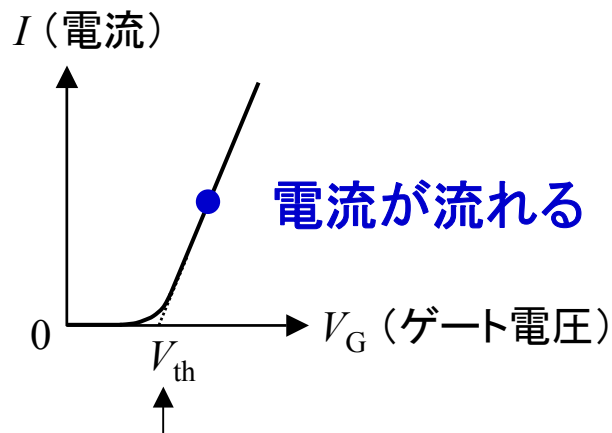
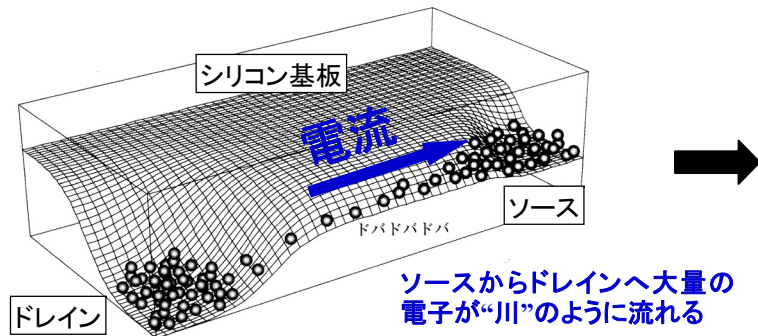


水門 : ゲート
水源 : ソース
排水路 : ドレイン

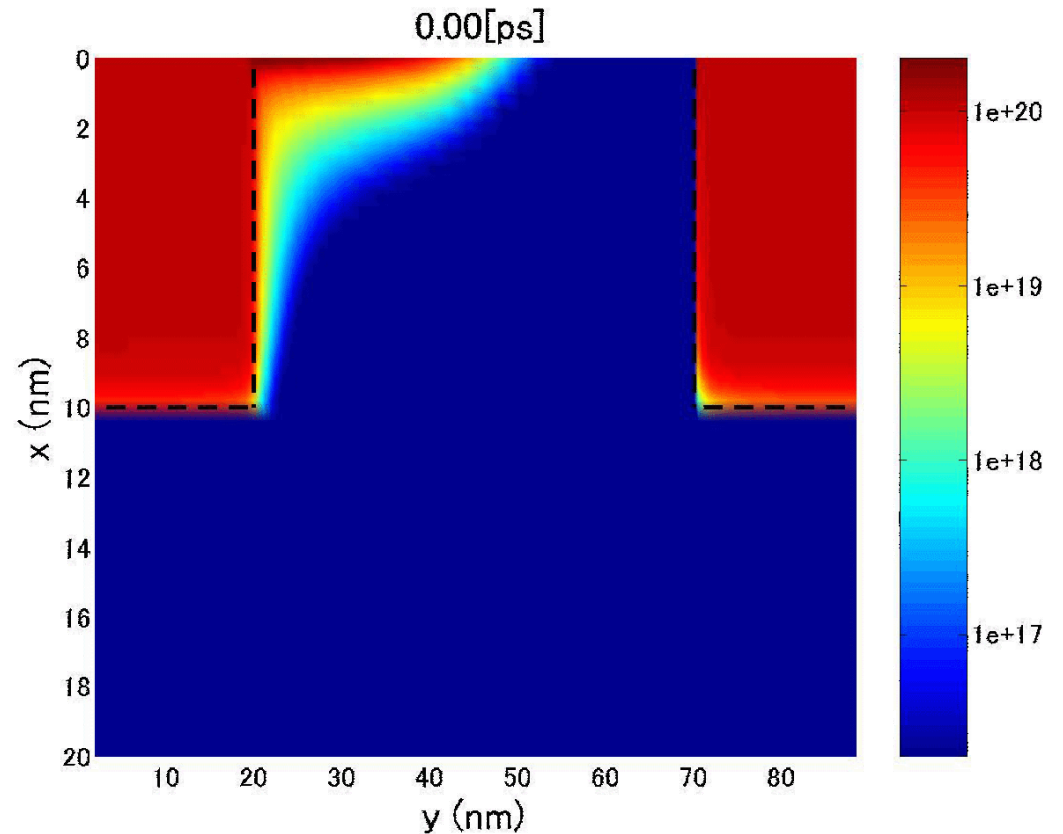


MOSTランジスタの電子シミュレーション

“オン” 状態 ($V_G = 1V$)

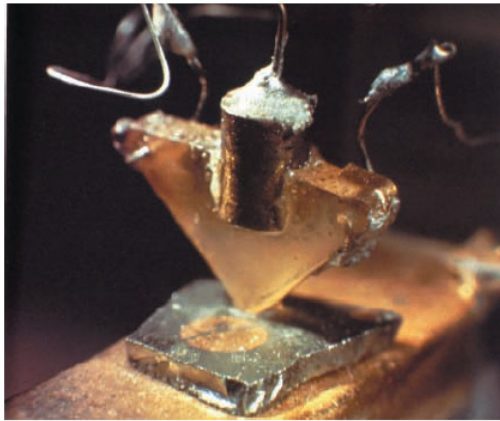


しきい値電圧 (ある決まった条件を満足すれば電気が流れるが、それ以外の時には電気が流れない)



モンテカルロシミュレーションを駆使し、MOSTランジスタ内の多数の電子の動きを忠実に再現することに成功 (当研究室 大学院生 前中章弘)

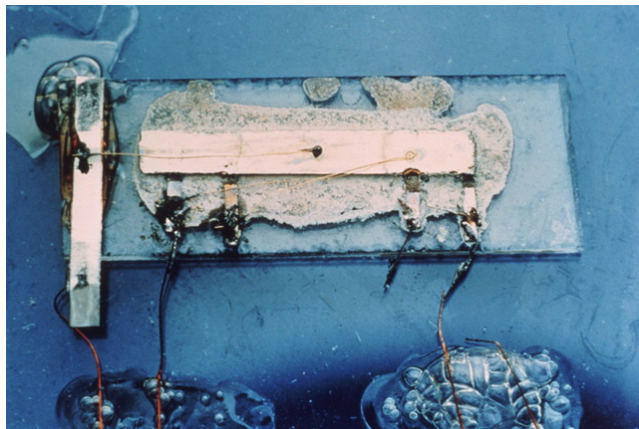
LSIを支えるMOSトランジスタの発展



最初の点接触型トランジスタ
(Lucent Technologies)

バーディーン、ブラッテン、ショックレー
(アメリカベル研究所) 1948年

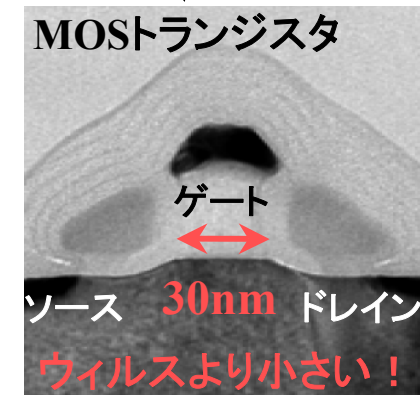
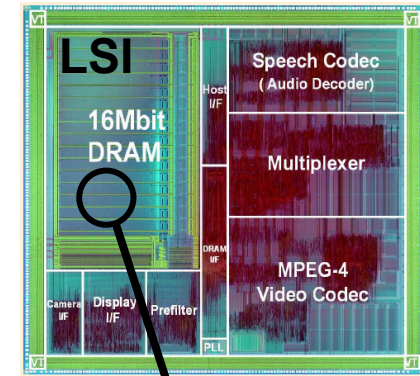
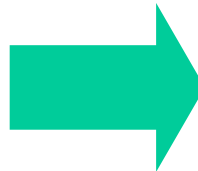
(<http://www.ti.com>)



キルビーが作ったIC(1959年)

IC: Integrated Circuit (集積回路)

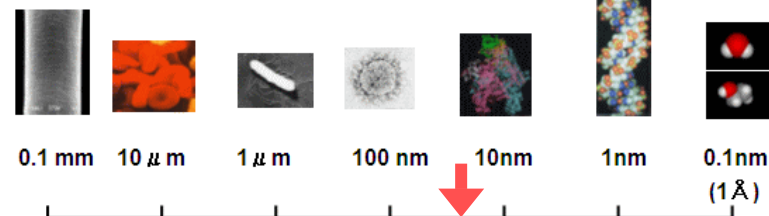
約半世紀後



(<http://www.intel.com>)

1nm: 1ナノメートル
⇒ $10^{-9}m = 10$ 億分の1メートル

髪の毛 赤血球 大腸菌 ウイルス タンパク質 DNA 分子 原子

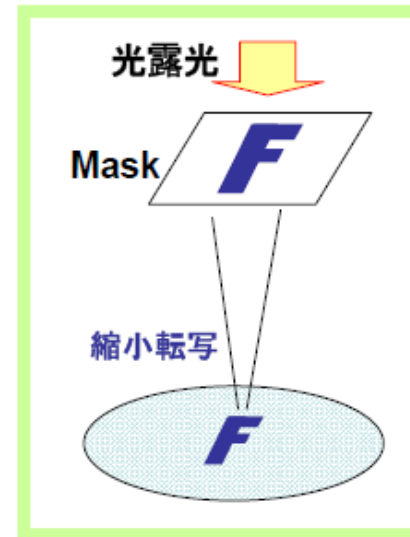


MOSTランジスタの製造工程

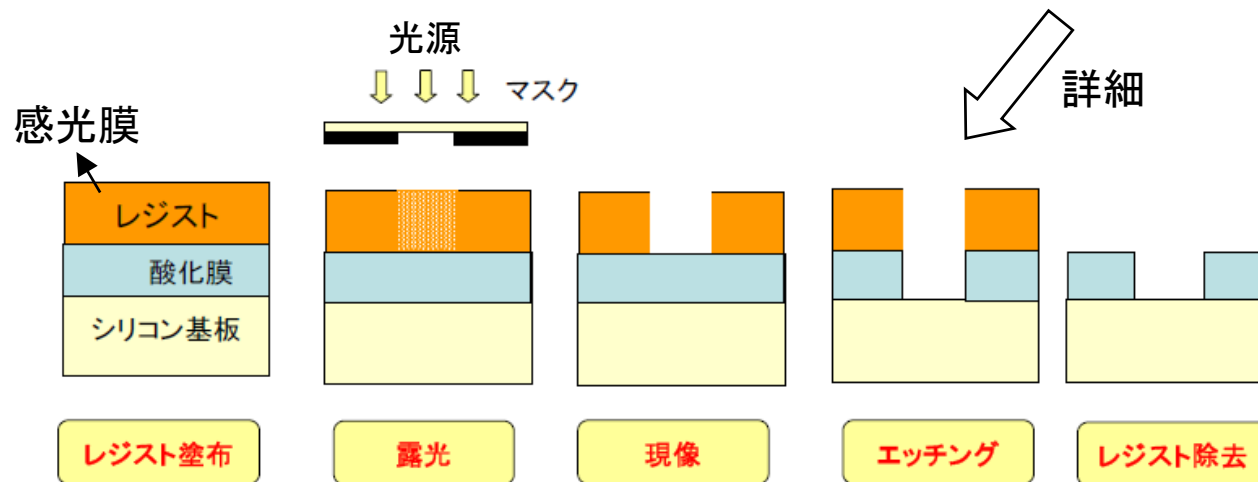
シリコンウェハ



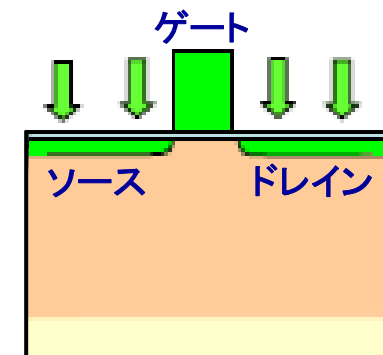
リソグラフィ工程



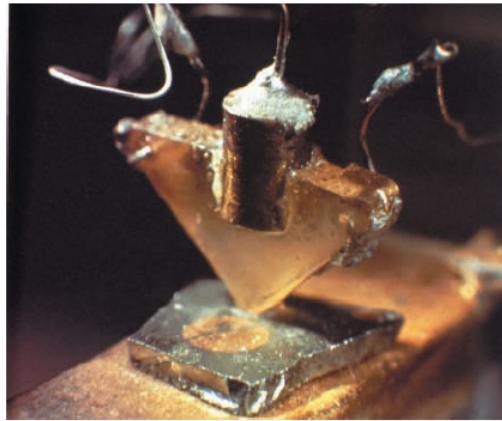
微細パターンをウェハ上に
転写する
(写真と同じ原理)



不純物導入
(イオン(P)注入)



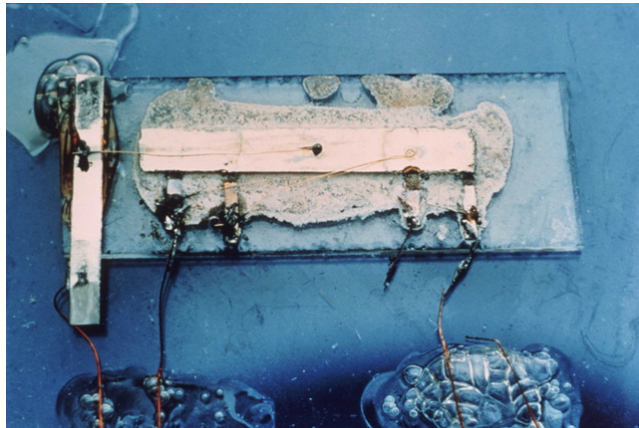
LSIを支えるMOSTランジスタの発展



最初の点接触型トランジスタ
(Lucent Technologies)

バーディーン、ブラッテン、ショックレー
(アメリカベル研究所) 1948年

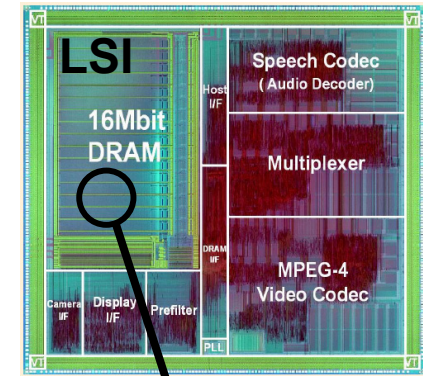
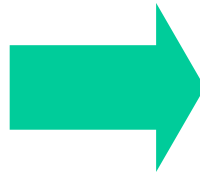
(<http://www.ti.com>)



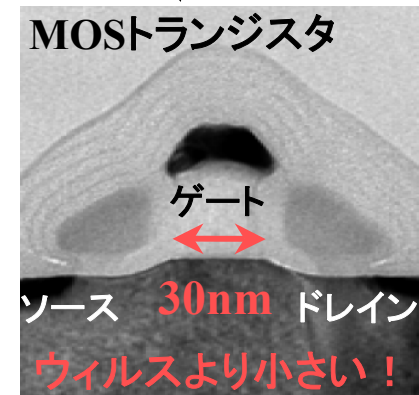
キルビーが作ったIC(1959年)

IC: Integrated Circuit (集積回路)

約半世紀後



MOSTランジスタ

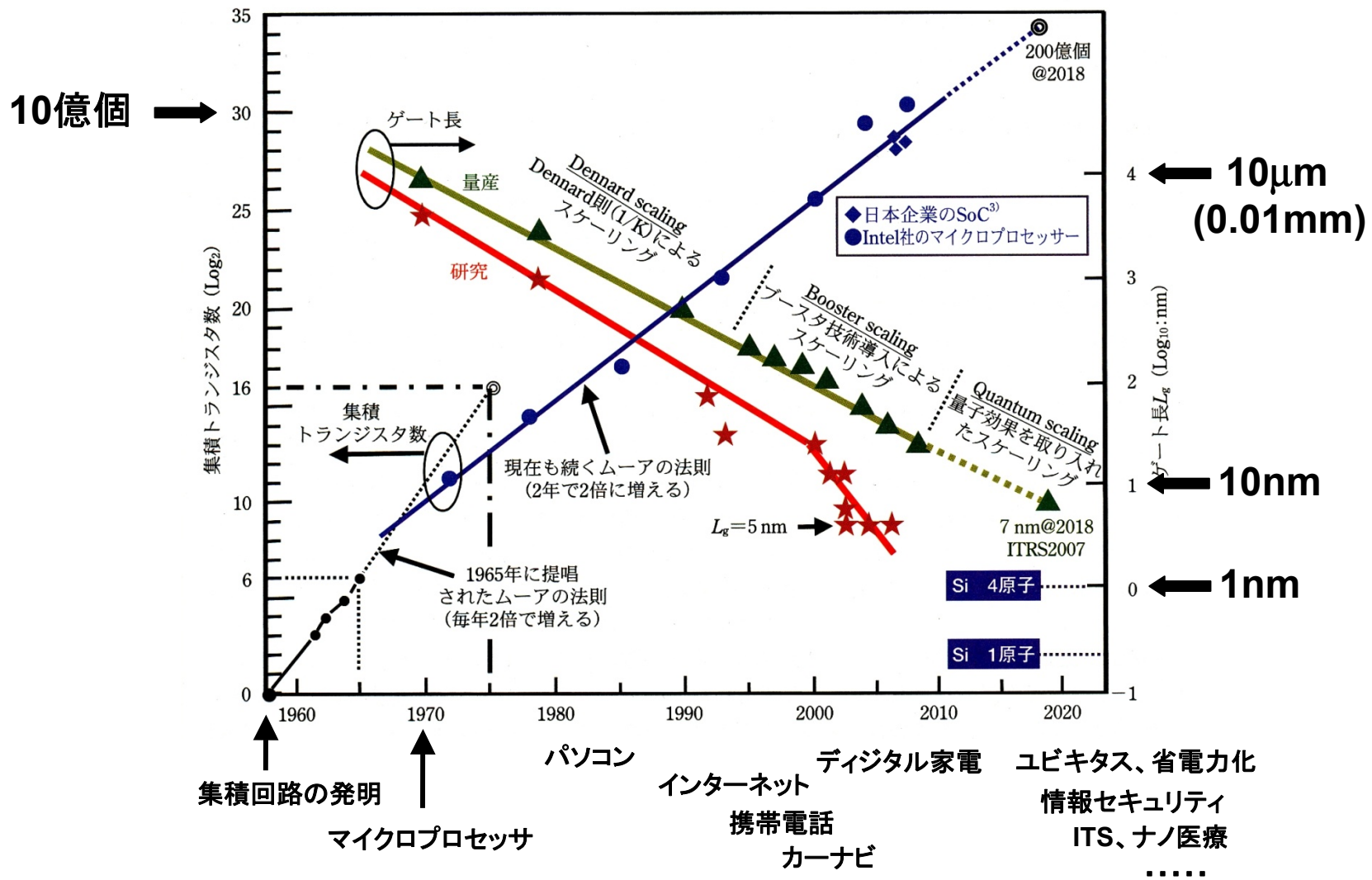


(<http://www.intel.com>)

問題 最新の携帯電話に集積化されているMOSTランジスタの数はおよそいくらか？

- (1) 1万個 以上
- (2) 100万個 以上
- (3) 1億個 以上
- (4) 10億個 以上

約半世紀間のMOSトランジスタの微細化

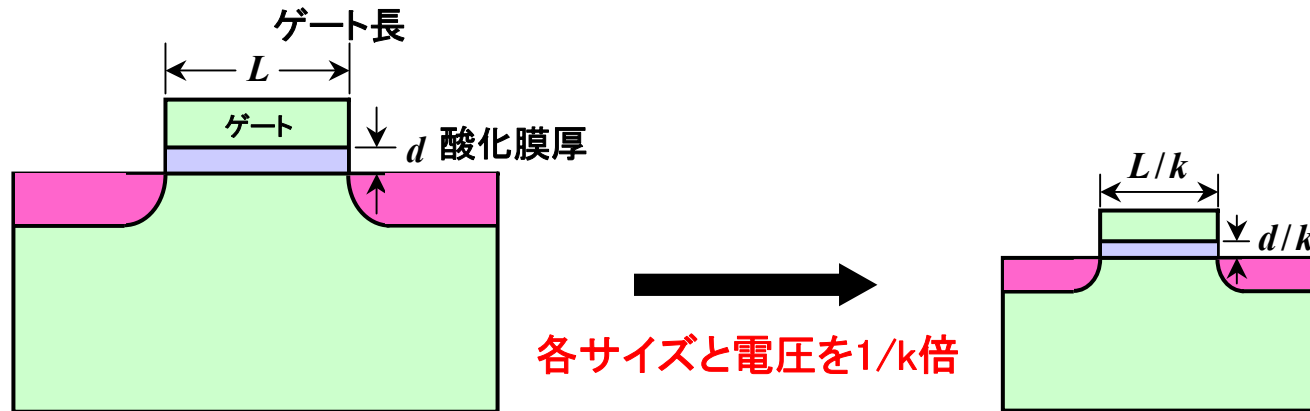


微細化されると何故性能が上がるか？

QOL (生活の質) 向上へ

スケーリング則(比例縮小則)

- 電圧(ゲート, ドレイン)一定でゲート長を縮小 \Rightarrow
- ・ 高電界による材料の絶縁破壊
 - ・ パンチスルー現象(電流制御不能)

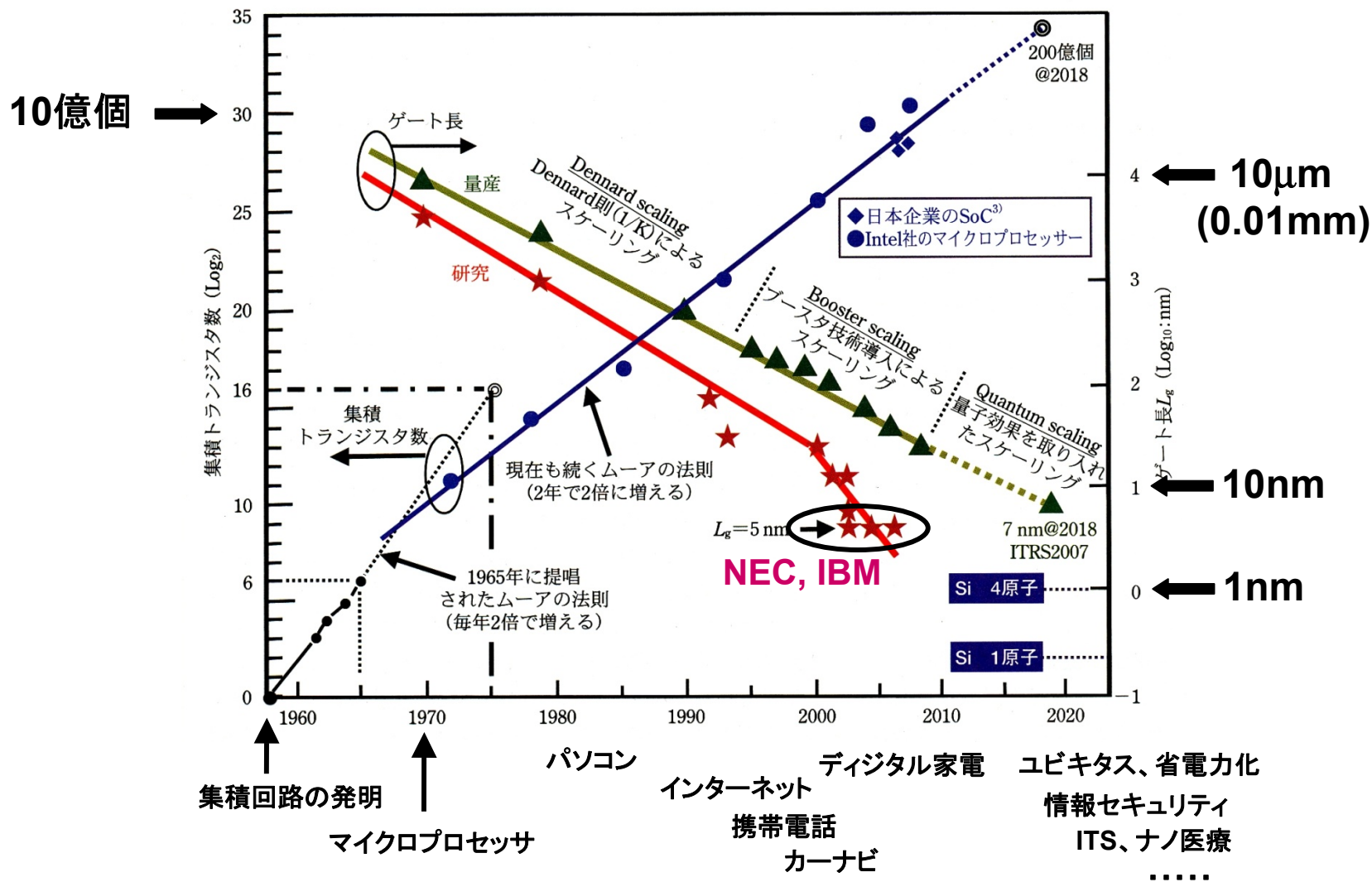


デバイス・パラメータ	縮小係数
ゲート長 L	$1/k$
ゲート幅 z	$1/k$
ゲート酸化膜厚 d	$1/k$
接合深さ x_j	$1/k$
基板不純物密度 N_A	k
電圧 $V (V_G, V_D, V_{th})$	$1/k$
電界強度 E	1

回路性能	縮小係数
電流 I	$1/k$
ゲート容量 C	$1/k$
スイッチング時間 CV/I	$1/k$
消費電力 VI	$1/k^2$
消費電力密度 VI/A	1

デバイス性能および
回路性能の向上
 \Rightarrow LSIの微細化
(指導原理)

約半世紀間のMOSTランジスタの微細化



$L_G \approx 5\text{nm}$ で微細化限界？

注) 5nmはシリコン原子約20個の長さ

最先端MOSTランジスタ研究

微細化限界？

製造バラつき：完全に無くすことは不可能

LSIでは、特性の揃ったMOSTランジスタを何十億個以上集積化する
たとえば、5nmのゲート長(約20原子)では、**1原子**違っただけで
ゲート長が **±5%** バラつく

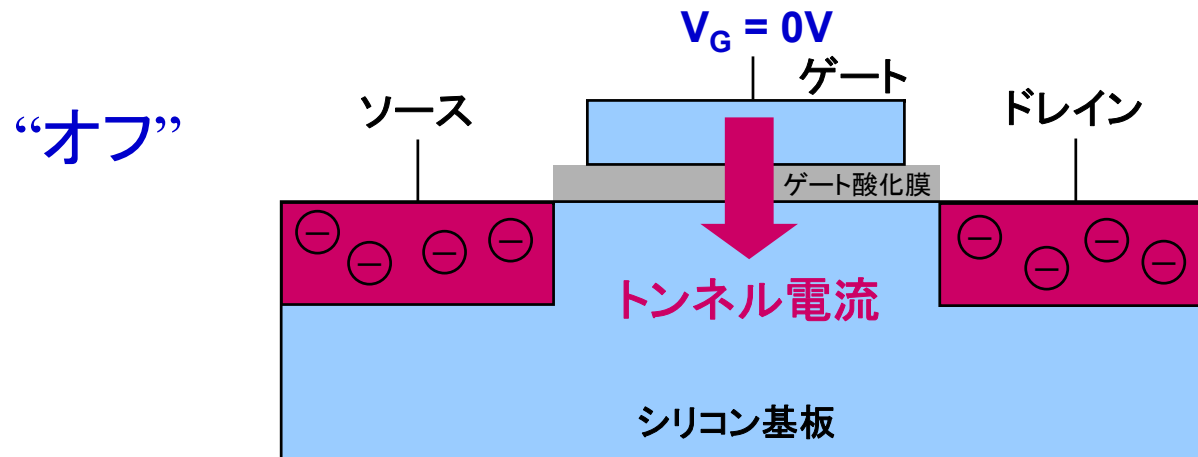
⇒ バラつきを抑えるランジスタ構造や作製方法の見直しが必要

量子力学的効果：電子のミクロな性質

量子力学的効果とは、「**電子は粒子であり波でもある**」という大変不思議な性質に基づくもので、多くの場合、MOSTランジスタの性能を劣化させてしまう

現在最も深刻な量子力学的効果の影響は「**トンネル効果**」と呼ばれるもので、ゲート電圧をゼロにしたオフ状態でも、ゲート酸化膜を電子がすり抜け電流が流れてしまう現象

トンネル効果

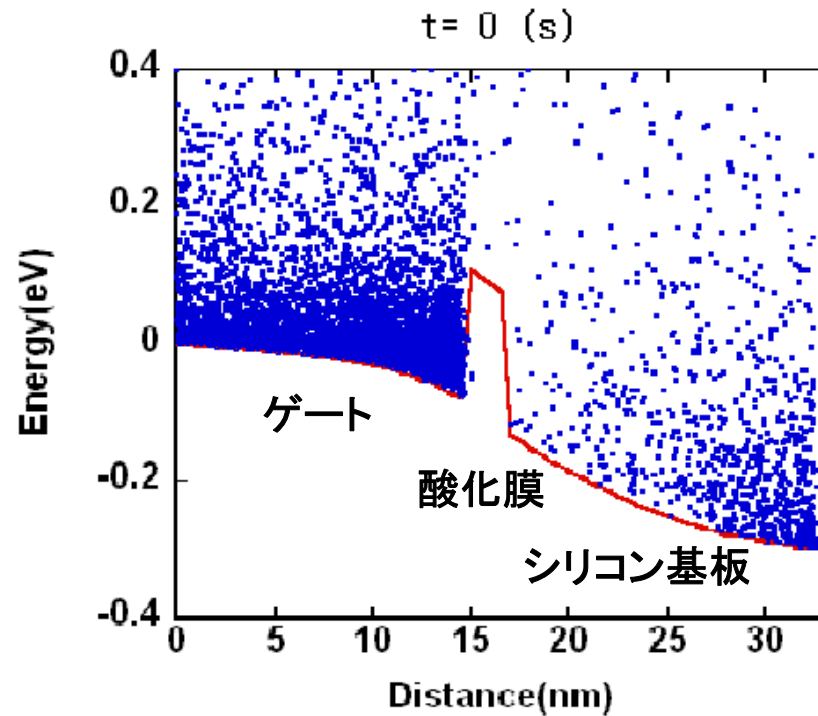


電子機器にどんな影響があるか？

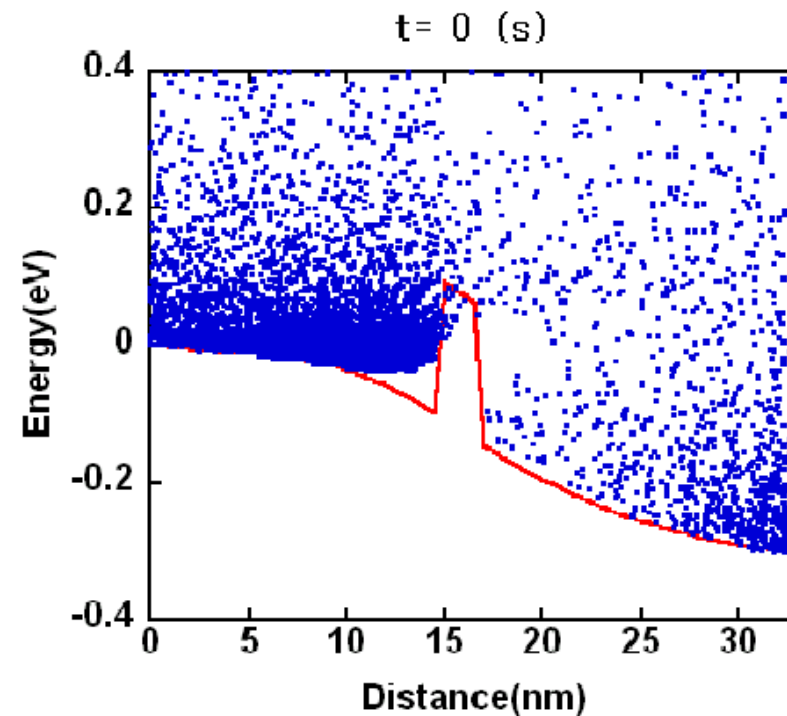
- 携帯電話の待ち受け時にも電力を消費する
- バッテリー持続時間を短くする
- 消費電力を増大させる

トンネル効果シミュレーション

古典的モンテカルロ法



量子補正モンテカルロ法



電子は粒子であるとする...

当研究室 中村俊輔
卒業研究(2002年)

「電子は粒子であり波でもある」性質を再現することに成功！

(シュレディンガー方程式を使わずに)

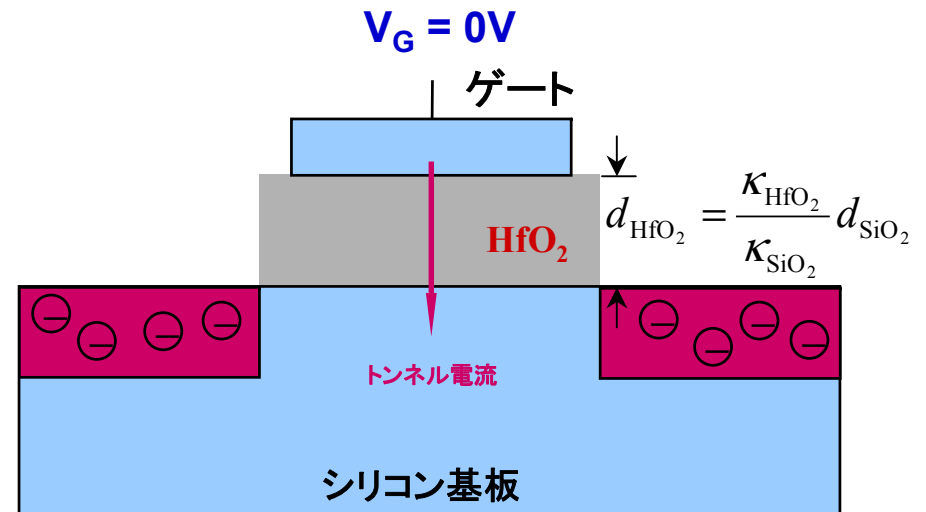
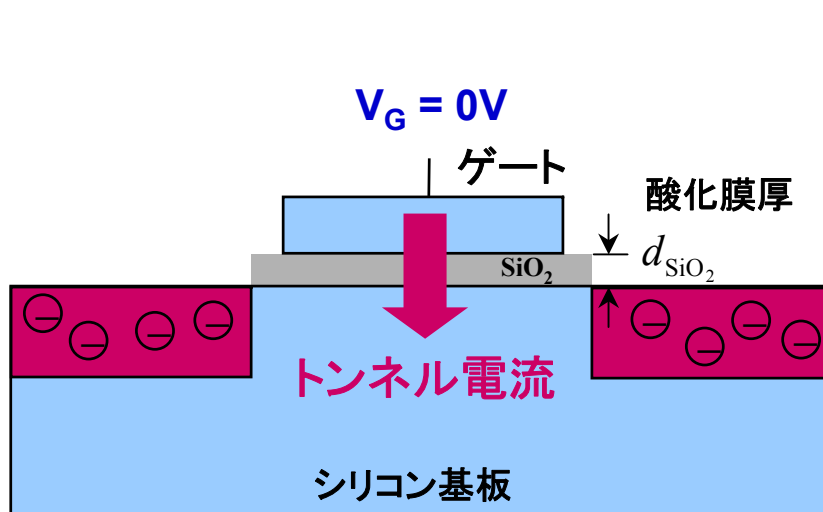
高誘電率ゲート絶縁膜 (high- k 絶縁膜)

“オフリーク電流の抑制に成功”

従来の絶縁膜
SiO₂ (シリコン酸化膜)



高誘電率絶縁膜
HfO₂ (ハフニウム酸化膜)



ゲート容量 $C = \kappa_{\text{SiO}_2} \kappa_0 \frac{S}{d_{\text{SiO}_2}}$

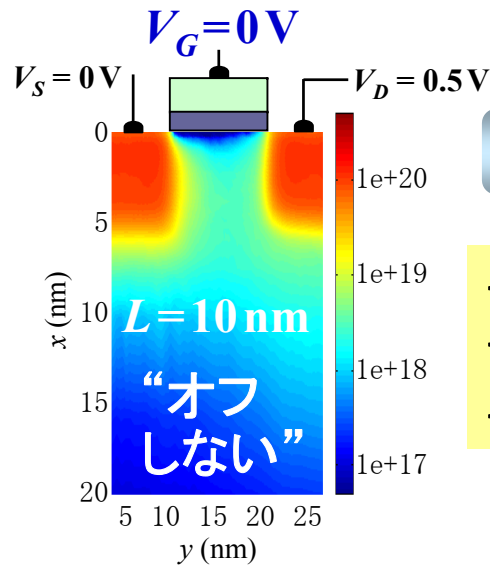
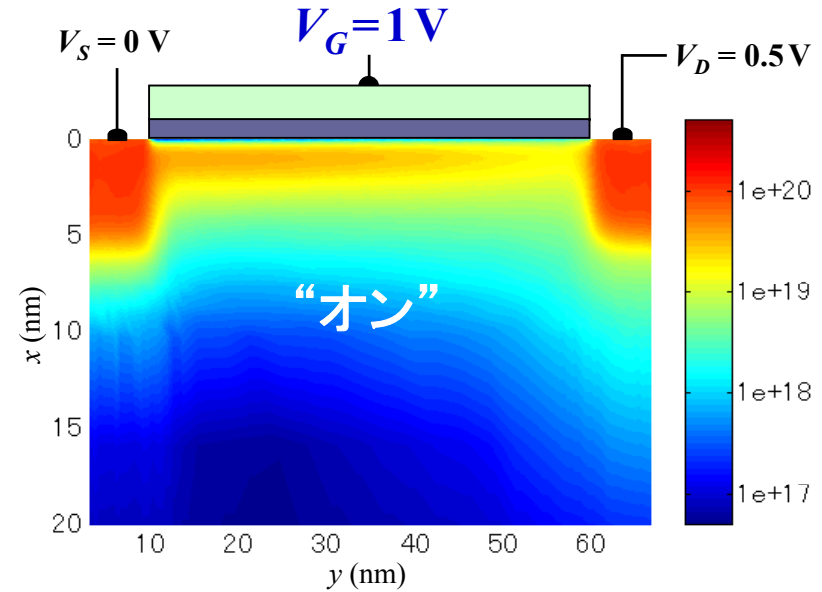
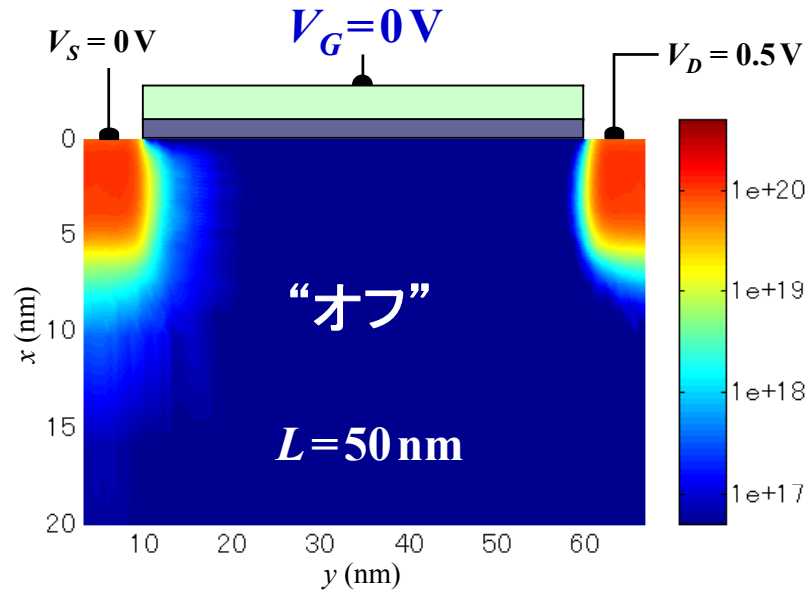
SiO₂ : $\kappa_{\text{SiO}_2} = 3.9$

ゲート容量 $C = \kappa_{\text{HfO}_2} \epsilon_0 \frac{S}{d_{\text{HfO}_2}}$

HfO₂ : $\kappa_{\text{HfO}_2} = 20$

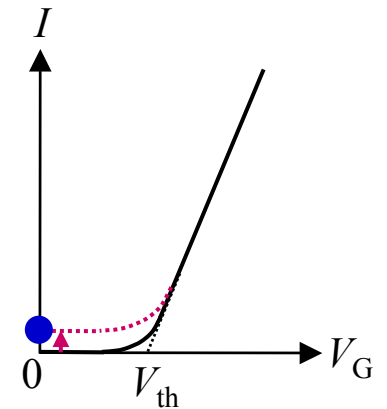
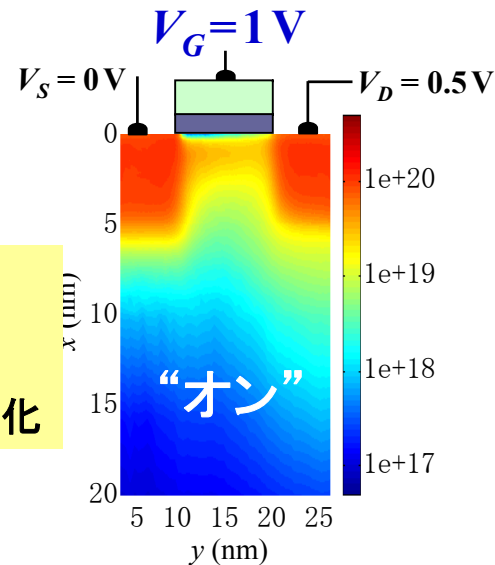
短チャネル効果

ゲート長が短くなると、ゲートによる電流制御が効かなくなる



短チャネル効果

- オフ電流の増大
- 消費電力増大
- バラつき耐性の劣化

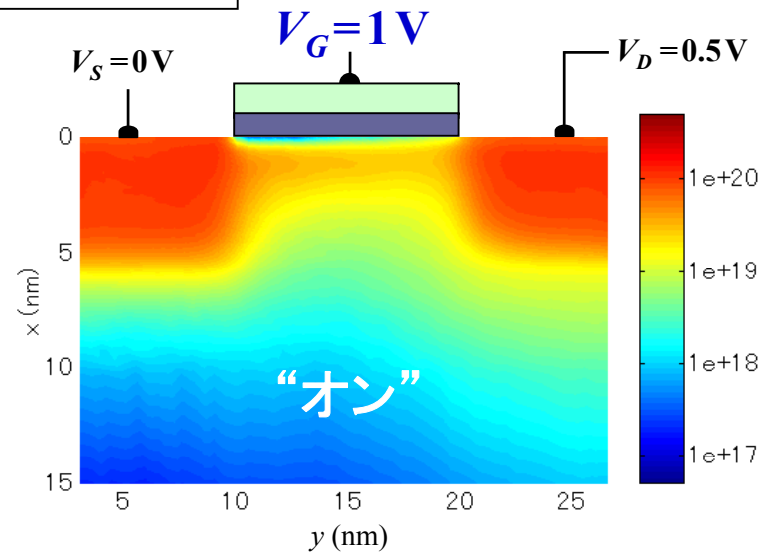
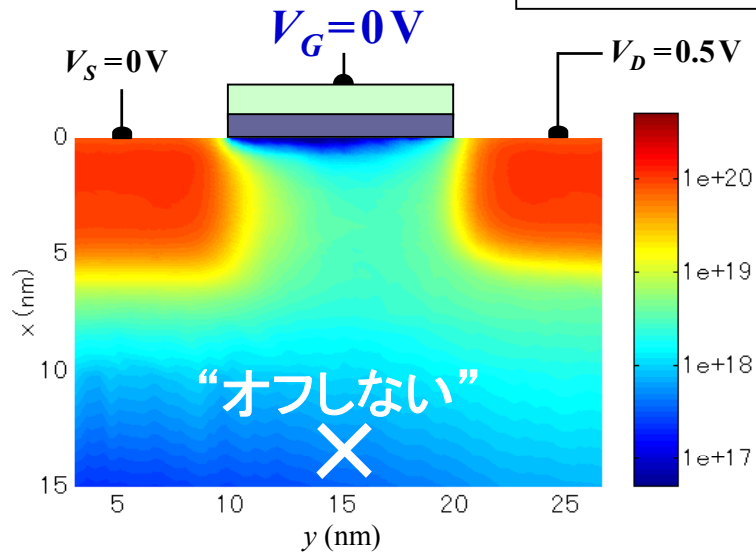


オフ電流の増大！

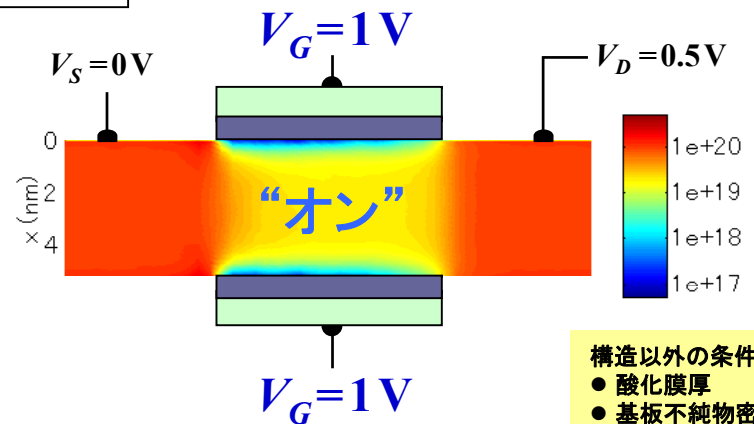
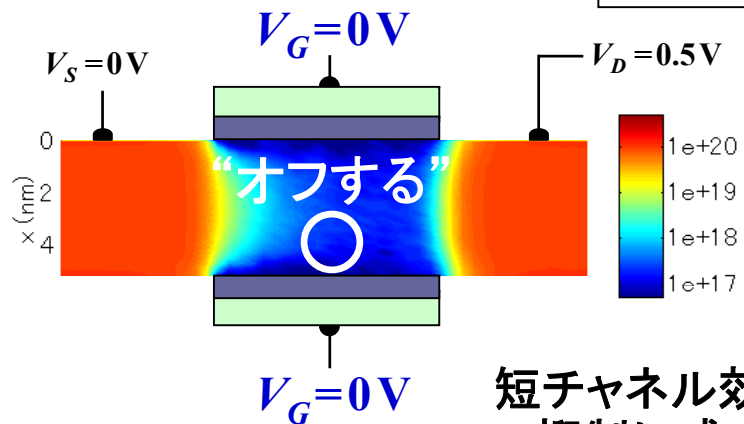
マルチゲート構造

$L = 10 \text{ nm}$

従来構造(シングルゲート)



ダブルゲート構造



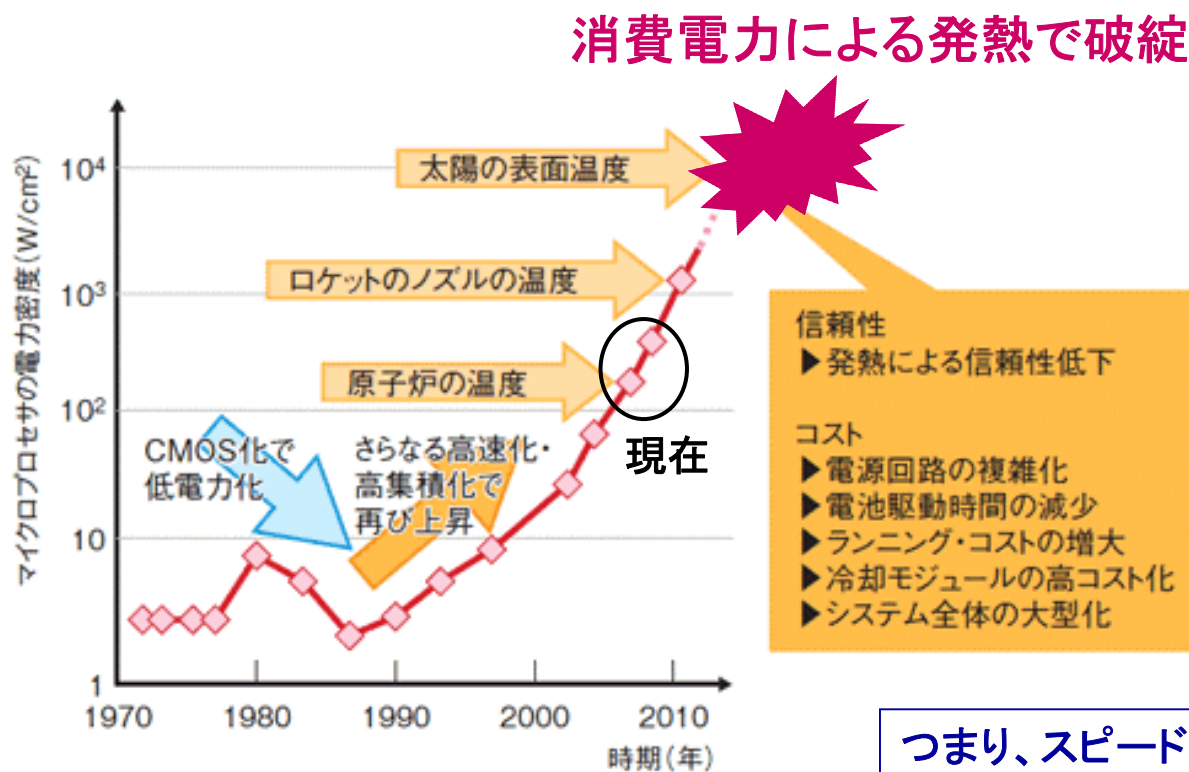
短チャネル効果の抑制に成功!

構造以外の条件は全て同じ

- 酸化膜厚
- 基板不純物密度
- 接合深さ
- バイアス条件

LSIの消費電力は“うなぎのぼり”

ノイズマージンを確保するため、電源電圧 V (V_G, V_D, V_{th}) は2005年以降1Vで下げ止まった。米Intel Corp.のマイクロプロセッサの電力密度は、45nm世代で既に100W/cm²超となり、原子力発電所の原子炉と同等である(下図参照)。この結果、Intelが最近4年間で出荷した約10億個のマイクロプロセッサの総消費電力は、大型の発電所でもまかなえない水準に達している。



■ LSIのスピード

$$\tau \approx \frac{C_{\text{load}} V_{\text{dd}}}{I_{\text{on}}} \propto \frac{V_{\text{dd}}}{(V_{\text{dd}} - V_{\text{th}})^{1.3 \sim 2.0}}$$

■ LSIの消費電力

$$P = \underbrace{f C_{\text{load}} V_{\text{dd}}^2}_{\text{オン}} + \underbrace{I_{\text{off}} V_{\text{dd}}}_{\text{オフ}}$$

f : クロック周波数

C_{load} : 負荷容量

V_{dd} : 電源電圧(現在1V)

つまり、スピードを上げるために V_{dd} を下げられない
 ⇒ オン状態の消費電力が急増

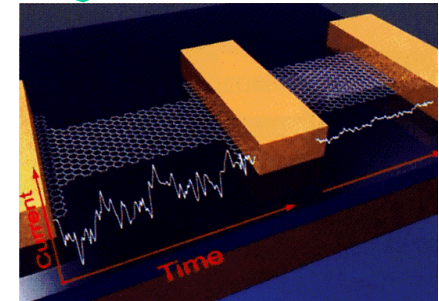
新デバイスコンセプトの研究

MOSTランジスタの心臓部である“チャンネル(電流が流れる所)”に手を加える

材料の進化

電子の速度が約200倍!

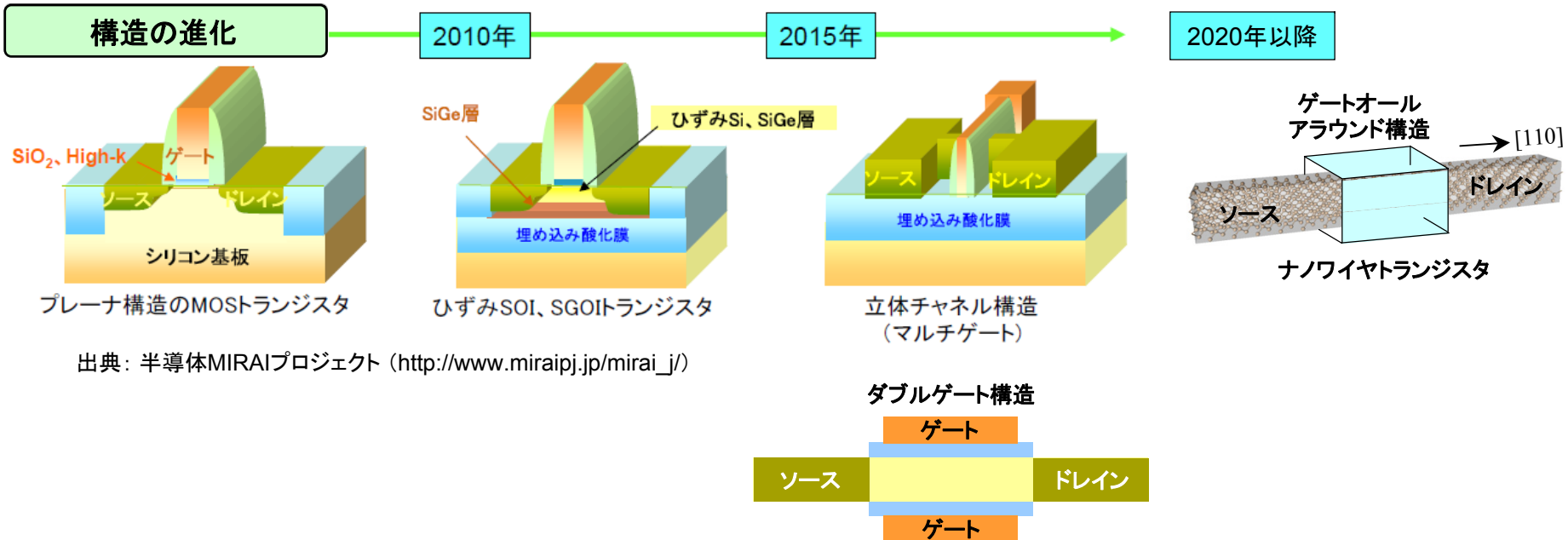
MOS FETのチャンネル材料	Si	Ge	Ⅲ-V族	グラフェン
キャリア移動度($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	約1000	約4000	数千~数万	20万
ノーマリ・オフ動作 [現状]	◎	○	△	×
微細化・集積化 [現状]	◎	△	△	×
コスト [現状]	◎	?	?	?
実用化が期待される時期(年)	実用化済み	2015~2020	2015~2020	2020以降



IBMがトランジスタを試作(2008)

◆各種チャンネル材料の比較 (日経マイクロデバイス特別編集版(2009)より)

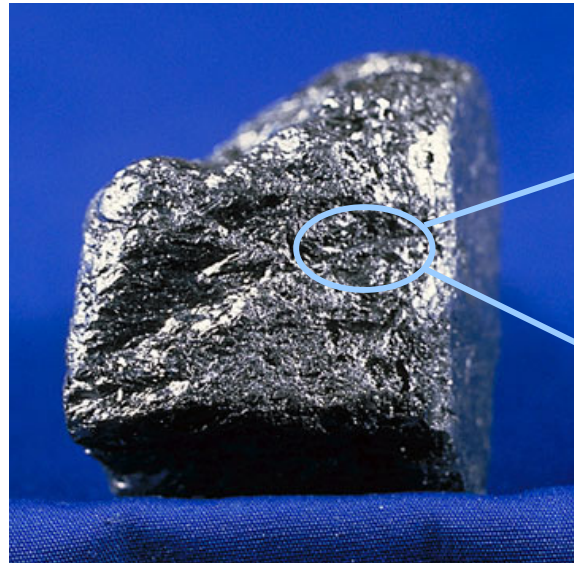
構造の進化



出典: 半導体MIRAIプロジェクト (http://www.miraijp.jp/mirai_j/)

カーボン(炭素)系材料 — グラフェン —

グラファイト(黒鉛)

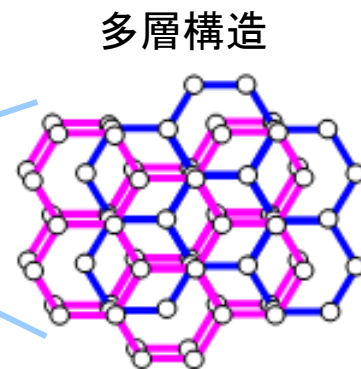


出典: フリー百科事典『ウィキペディア』



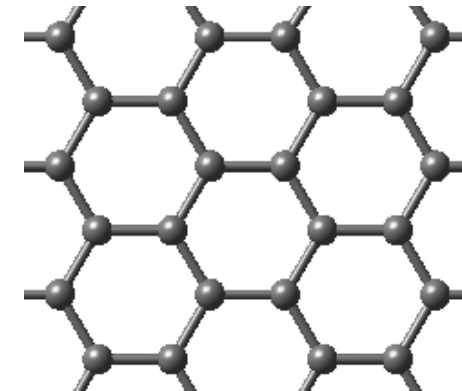
グラファイトは、六角形に並び網目状の面構造をした炭素原子が層状に集まった結晶のことである。グラファイトの用途としてよく知られている鉛筆の芯は、グラファイトを粘土と混合し、乾燥・焼成・油含浸・冷却などの工程を経ることで生成されている。グラファイトは黒色で柔らかく、電気をよく通す特徴を持っている。ちなみにグラファイトは、炭素の主な同素体として、ダイヤモンドと並列の関係にある。

グラフェン



はがれやすい

1枚の層だけ
抽出



結晶構造はほとんど欠陥がないうえ、
常温でも化学的に安定している。

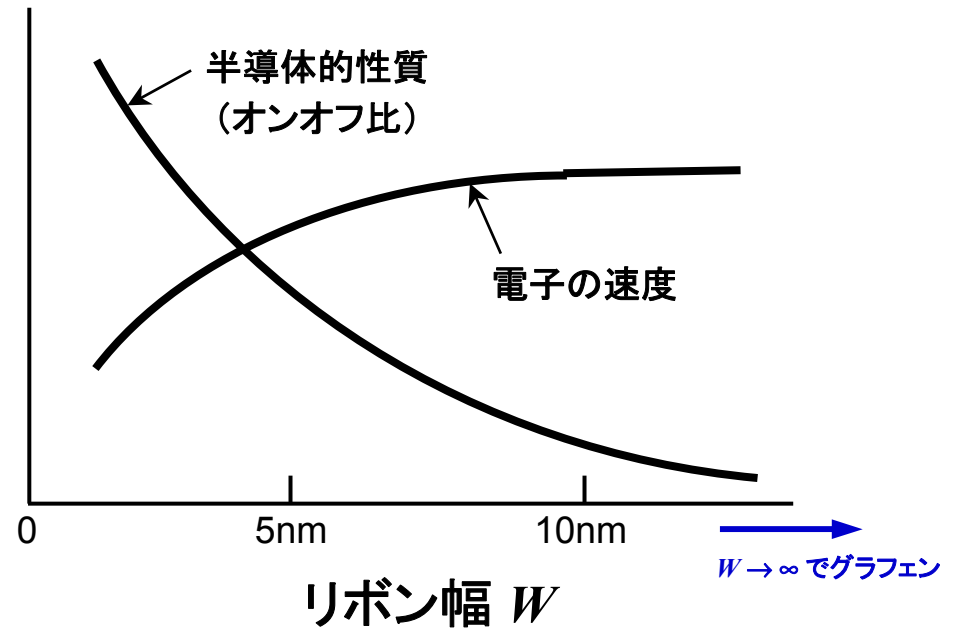
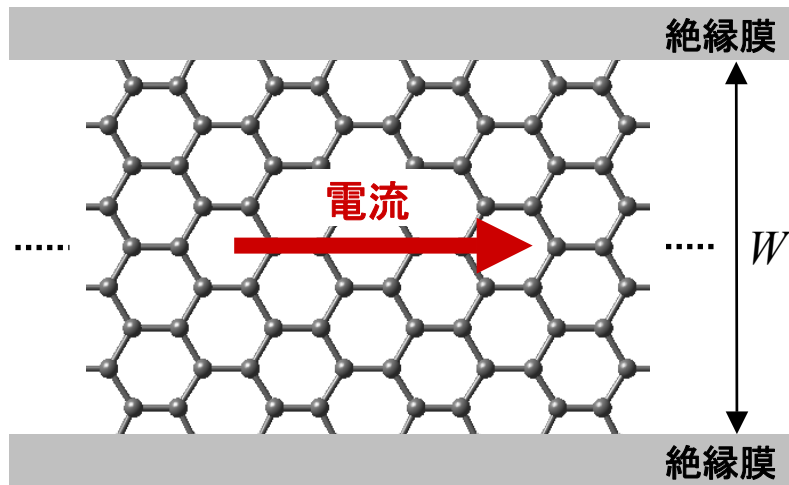
しかし、金属である

⇒ 半導体(半分、導体)にしたい

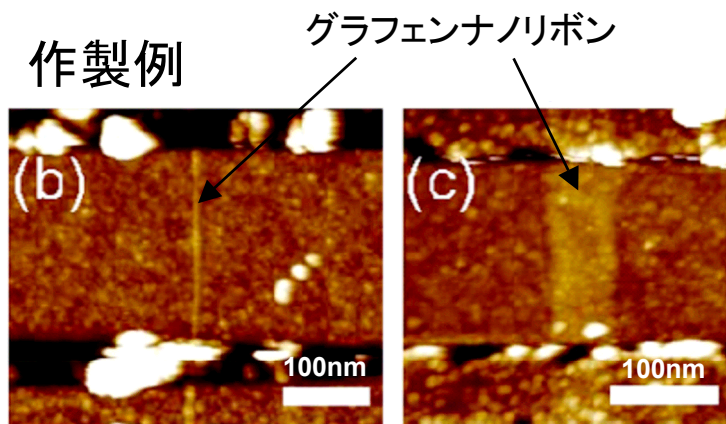
出典: IT用語辞典バイナリ

グラフェン・ナノリボン

グラフェンナノリボン



作製例



X. Wang et al., Phys. Rev. Lett. vol. 100, 206803, 2008.

最適なリボン幅が存在する？

まとめ

- エレクトロニクスが人々の生活環境と地球環境の両面で大きく貢献できたのは、**半導体技術、すなわちLSIの進化**が指数関数的であったことが大きな要因となっている
- 半導体技術の進化はまだまだ続き、将来は、カーボンエレクトロニクスに代表される**ナノエレクトロニクス**が、生活の利便性や仕事の効率性の向上だけにとどまらず、安全・低エネルギー消費化社会・地球環境保全・最先端医療等の面でも、**人々の暮らしを支える基盤技術**となることは間違いない
- その目標に向けた研究開発の一端を紹介した

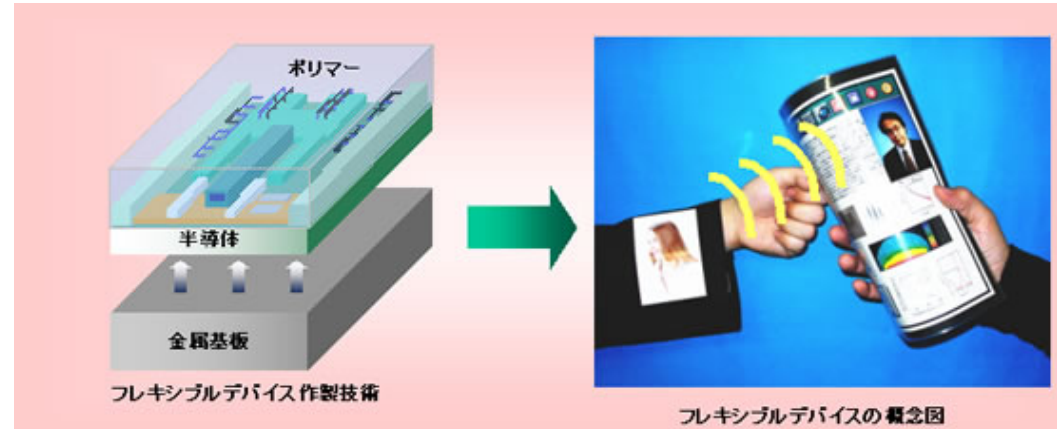
ナノエレクトロニクスによりこんなことが...

サイバーハンド



出典: <http://www.neoteo.com/tag/Cyberhand.neo>

フレキシブルデバイス



軽量かつ柔軟、透明といった今までに無い特徴を持つエレクトロニクス素子を安価に大面積で生産できるようになる

出典: (財)神奈川科学技術アカデミー「フレキシブルデバイス」プロジェクト

「システム・オン・フィルム」軽く、薄く、曲げられる

- 人工網膜などの生体応用エレクトロニクス
- 洗えるMP3プレーヤー

...