

クレジット:

UTokyo Online Education 学術俯瞰講義 2017 田中雅明

ライセンス:

利用者は、本講義資料を、教育的な目的に限ってページ単位で利用することができます。特に記載のない限り、本講義資料はページ単位でクリエイティブ・コモンズ 表示-非営利-改変禁止 ライセンスの下に提供されています。

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

本講義資料内には、東京大学が第三者より許諾を得て利用している画像等や、各種ライセンスによって提供されている画像等が含まれています。個々の画像等を本講義資料から切り離して利用することはできません。個々の画像等の利用については、それぞれの権利者の定めるところに従ってください。



学術俯瞰講義

物質のはじまりとはたらきーフェムト、ナノ、エクサの世界

物質科学の基礎と工学

Fundamentals of materials science and engineering

田中 雅明

東京大学 大学院工学系研究科

スピントロニクス学術連携研究教育センター長

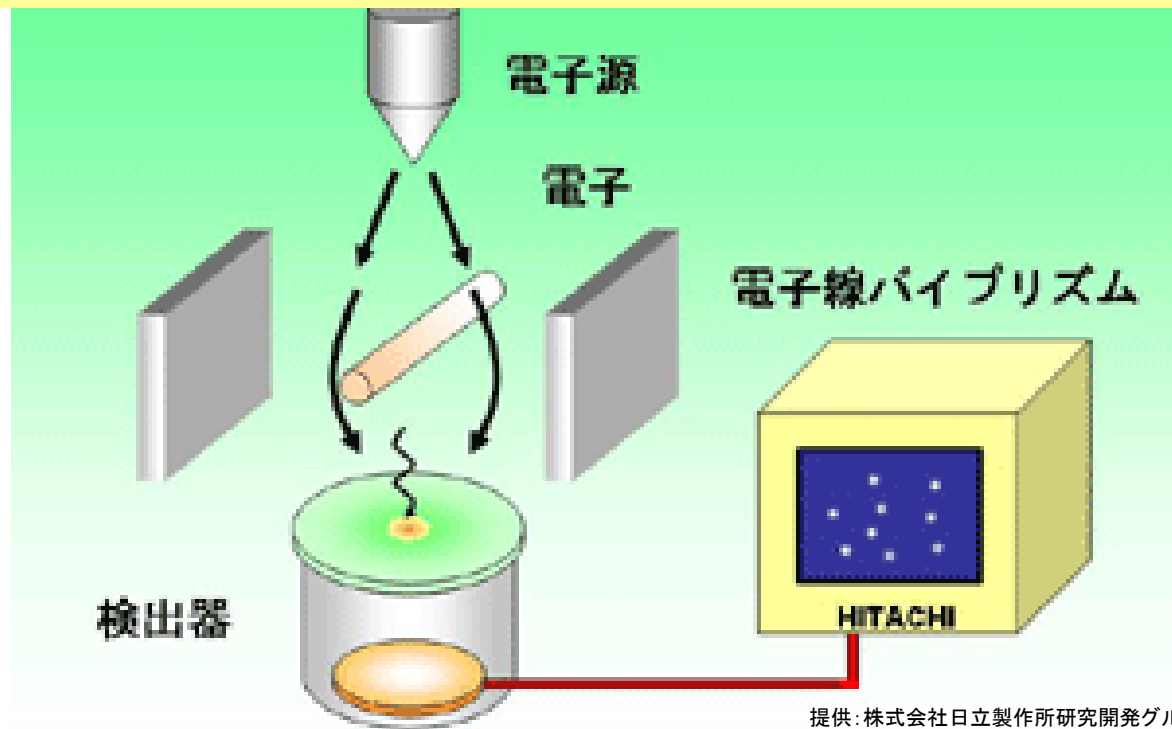
電気系工学専攻、電気電子工学科 教授

<http://www.cryst.t.u-tokyo.ac.jp/>

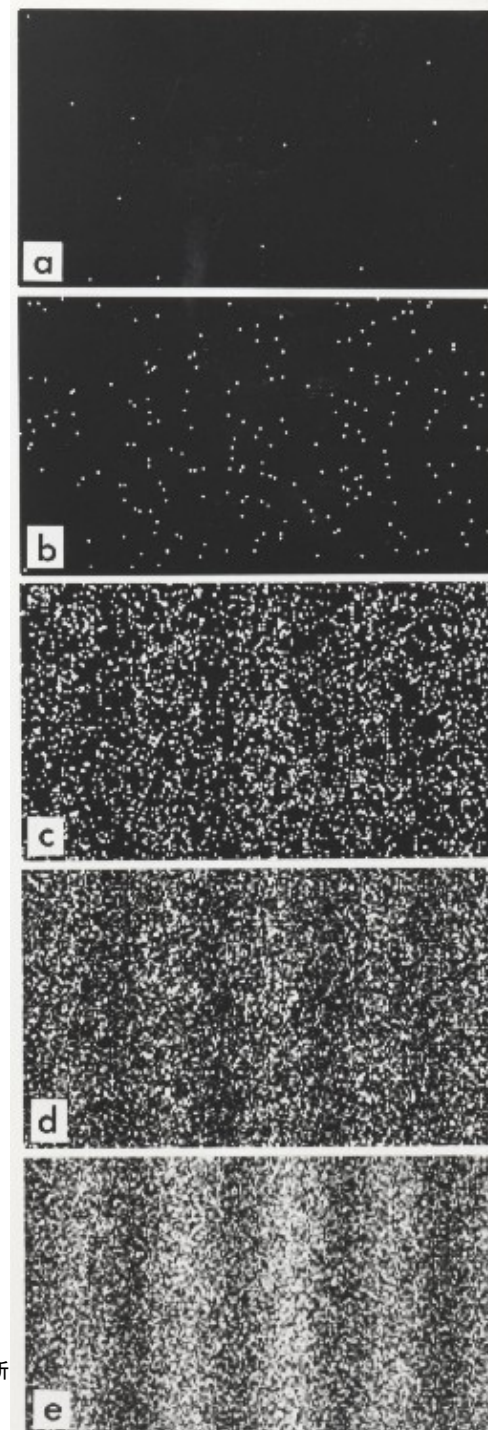
<http://www.csrn.t.u-tokyo.ac.jp/>

電子の粒子性と波動性を表す2重スリット実験

1個ずつ電子を発射しているのに、なぜ干渉縞が見られるのか？ → 電子1個でも確率振幅の波として振舞う



電子源から電子を一個ずつ発射し、発射された電子は中央に細い糸状電極の両側(どちらか一方)を通過する。通過した電子は検出器で一個ずつ検出される。
→ 1個ずつ検出されている(粒子性)にもかかわらず、干渉縞が現れる(波動性)。



時間



画像提供: 株式会社日立製作所中央研究所

質問 量子力学で波動関数は何を表すのか？

シュレディンガー方程式の解は何を表すのか？

電子など量子力学的粒子は粒子であり波である。

その状態を表す波動関数 $\psi(\mathbf{r}, t)$ は次のシュレディンガー方程式に従う。

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}, t) \right) \psi(\mathbf{r}, t)$$

ハミルトニアン H : エネルギー演算子

ここで $V(\mathbf{r}, t)$ は系のポテンシャル・エネルギー

粒子の存在確率は、 $|\psi(\mathbf{r}, t)|^2$ で表される。

時間に依存しないシュレディンガー方程式

$$\hat{H}\varphi(\mathbf{r}) = \left(-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} + V(\mathbf{r}) \right) \varphi(\mathbf{r}) = \varepsilon \varphi(\mathbf{r})$$

線形代数に対応

時間に依存しない定常状態ではこれを用いる(固有値問題)。

解: 固有エネルギー $\varepsilon \rightarrow$ 量子井戸、水素原子など束縛系では離散的エネルギー準位 ε_n
周期ポテンシャルをもつ固体結晶では連続的なエネルギーバンド $E(k)$ を与える。

解: 固有状態(固有関数) $\varphi \rightarrow$ 固有エネルギー ε_n , $E(k)$ をもつ電子の状態を与える。

質問

- 半導体中の電子の振舞いを制御するとどのようにトランジスタを動かせるのか？その仕組みは？
- バンド構造について、詳しく知りたい
- いつまでムーアの法則が続くか？
- 強磁性体とそうでない物質(元素)があるのはなぜか？
- すでに使われているというGMR, TMRの原理を知りたい。

本日の講義

次回の講義

- 構造化学の授業で量子論の基礎を学び始めたが、量子数(n, l, m)などが物質の性質としてどのように現れるのか？関連がわからない。
- 既知の物理学の理論的基盤で十分なのか？
- 理学と工学の融合は今後も進みますか？
- 理学部と工学部は将来合併して一体化しますか？
- LEDの研究に見られるように大学と企業の研究の境界は薄まるか？
- 新しい物質をつくり豊かさにつなげるのは良いが、産業廃棄物を分解し自然にやさしい戻すことについてどのような研究がなされているか？

物質科学の基礎と工学

Fundamentals of materials science and engineering

第7回 11月9日(木)

物質科学の基礎と現代社会

Fundamentals of materials science and modern society

第8回 11月15日(水)(補講日)

物質科学から工学へー半導体の爆発的発展と情報化社会ー

From materials science to engineering — Explosive developments of semiconductor technology and information society

第9回 11月30日(木)

物質科学と先端研究の世界

Advanced research in materials science

固体物質のバンド構造

原子、分子から固体へ

固体の中の電子状態を理解するには...

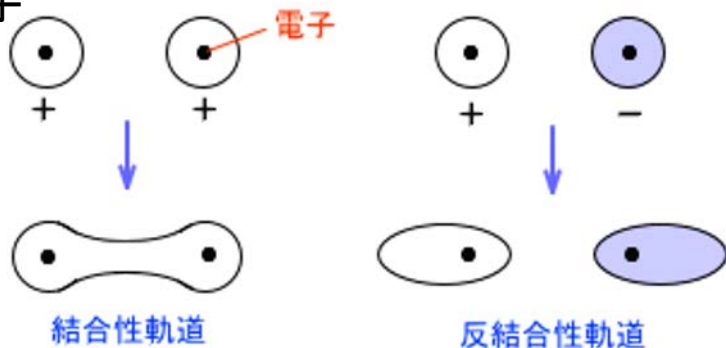
周期的に並んだ原子がつくるポテンシャル(周期ポテンシャル)中の電子の運動を量子力学で扱う(シュレディンガー方程式を解く)

2つの考え方がある

- ① 電子軌道をもつ原子を並べる(分子軌道の考え方の延長) → 強束縛電子モデル (tight binding model)
- ② 自由空間から出発して周期ポテンシャルを導入 → 準自由電子モデル (nearly free electron model)

分子軌道の考え方(復習)

孤立した原子

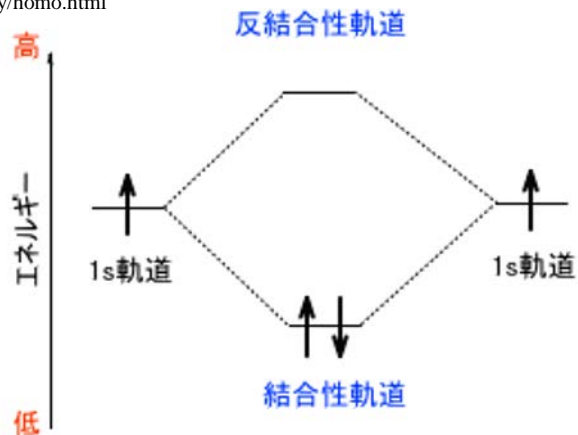


電子の波動関数が2つの原子のまわりに広がることによりエネルギーが減少

分子軌道

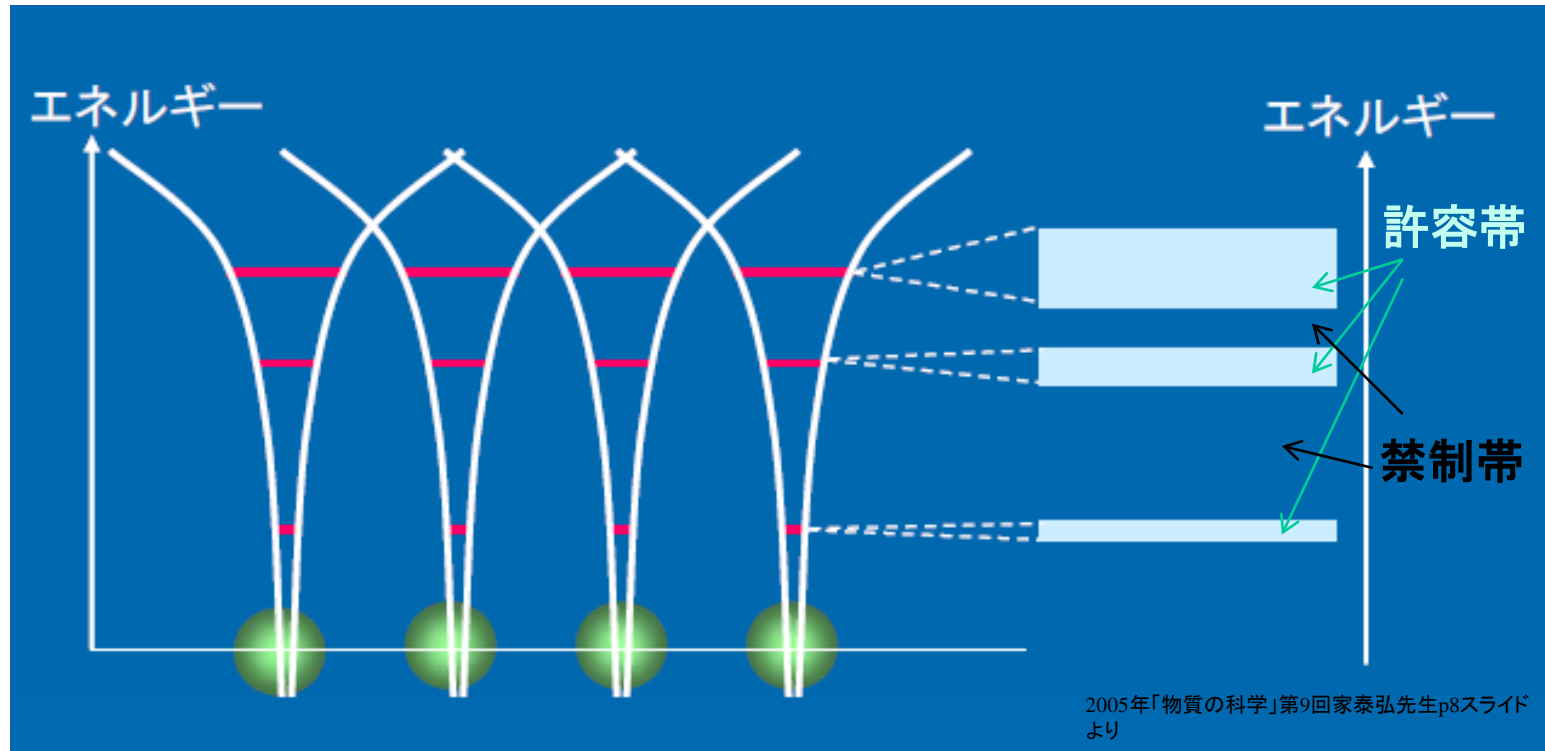
役に立つ薬の情報～専門薬学
 結合性軌道と反結合性軌道、HOMOとLUMO
 結合性軌道と反結合性軌道
<https://kusuri-jouhou.com/chemistry/homo.html>
 ref. 20171205

結合軌道の電子数 > 反結合軌道の電子数の時、エネルギーが減少



役に立つ薬の情報～専門薬学
 結合性軌道と反結合性軌道、HOMOとLUMO
 結合性軌道と反結合性軌道
<https://kusuri-jouhou.com/chemistry/homo.html>
 ref. 20171205

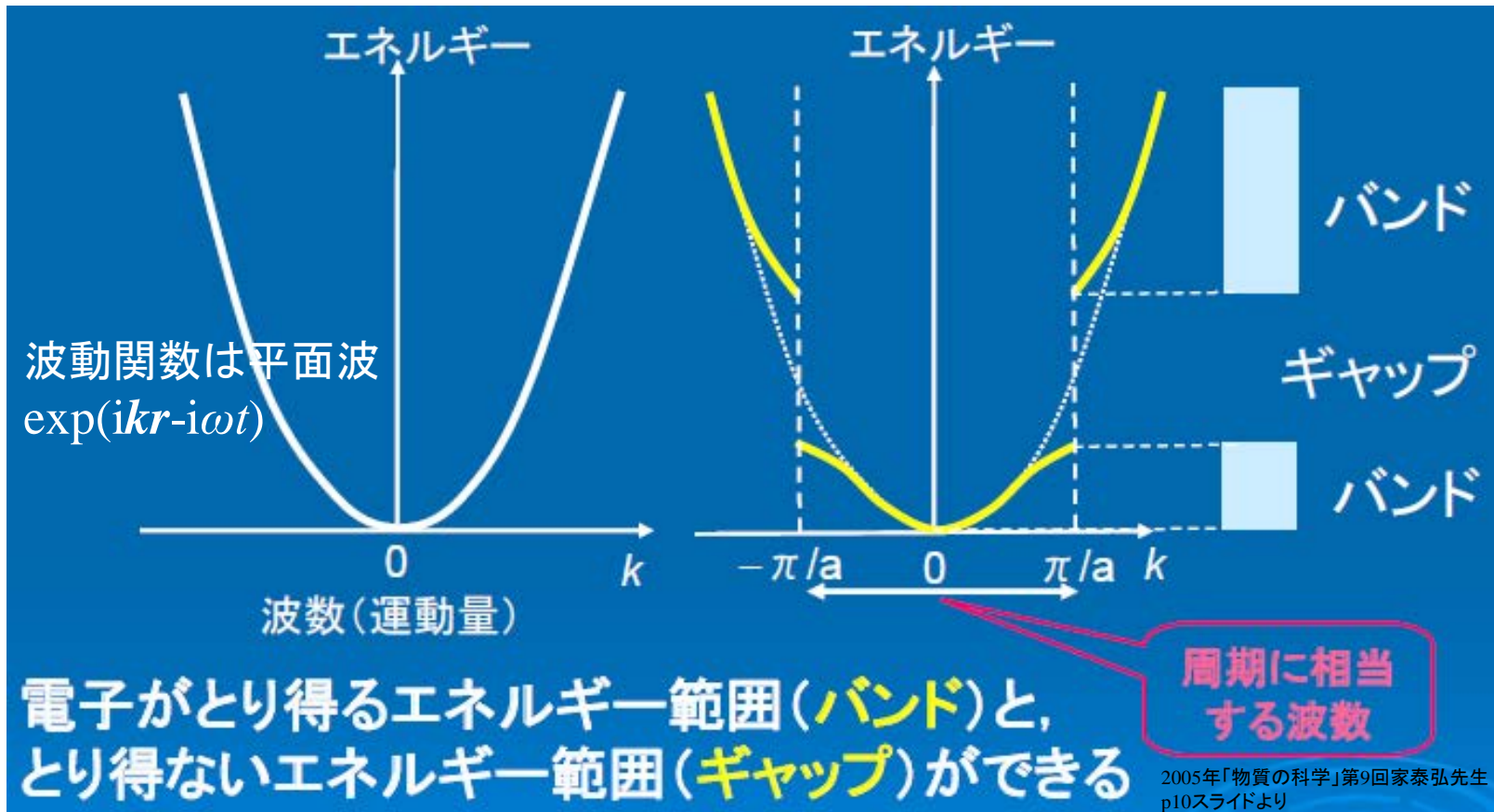
原子を多数並べた固体結晶では、エネルギーバンドができる



- 原子を多数並べると、離散的な電子のエネルギー準位が多数集まり、連続的な帯(バンド)になる
- 電子の跳び移りによって、それぞれの準位が広がって帯(バンド)を形成する
- 固体中の電子のエネルギーは、許容帯と禁制帯が交互に現れる。これをバンド構造(エネルギー帯構造)という

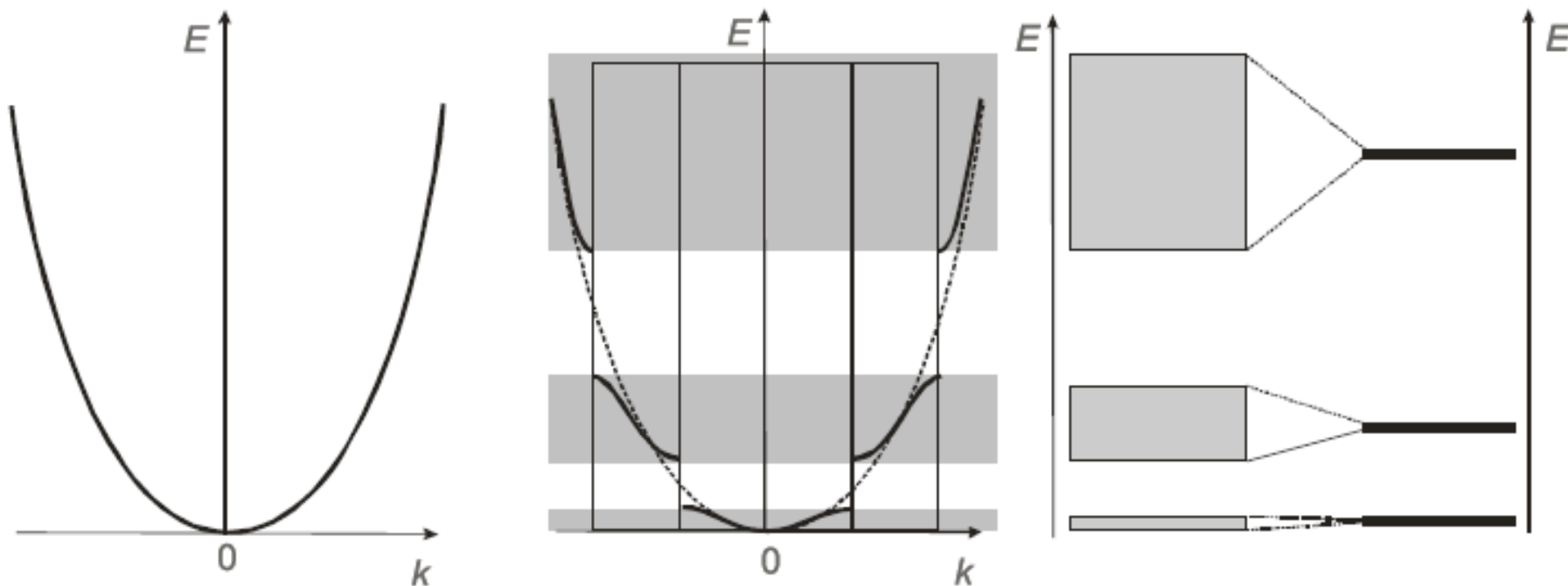
準自由電子モデルで導出されるバンド構造

自由電子 $E = (\hbar k)^2/2m$ → 周期ポテンシャルを考慮



- 自由電子の分散関係(エネルギー E と波数 k の関係)は放物線であるが、周期ポテンシャルを入れると禁制帯ができ、やはり、電子のエネルギーに許容帯と禁制帯が交互に現れる。
- 禁制帯は、原子配列周期(格子定数 a)の整数倍である波は強く反射(ブラッグ反射)され、定在波ができ、特定の波長では進行波ができないことにより生じる。

固体結晶中の電子のバンド構造



2005年「物質の科学」第9回家泰弘先生p11スライドより

自由電子



結晶中の電子



孤立した原子に
束縛された電子

準自由電子モデル

(nearly free electron model)

強束縛電子モデル

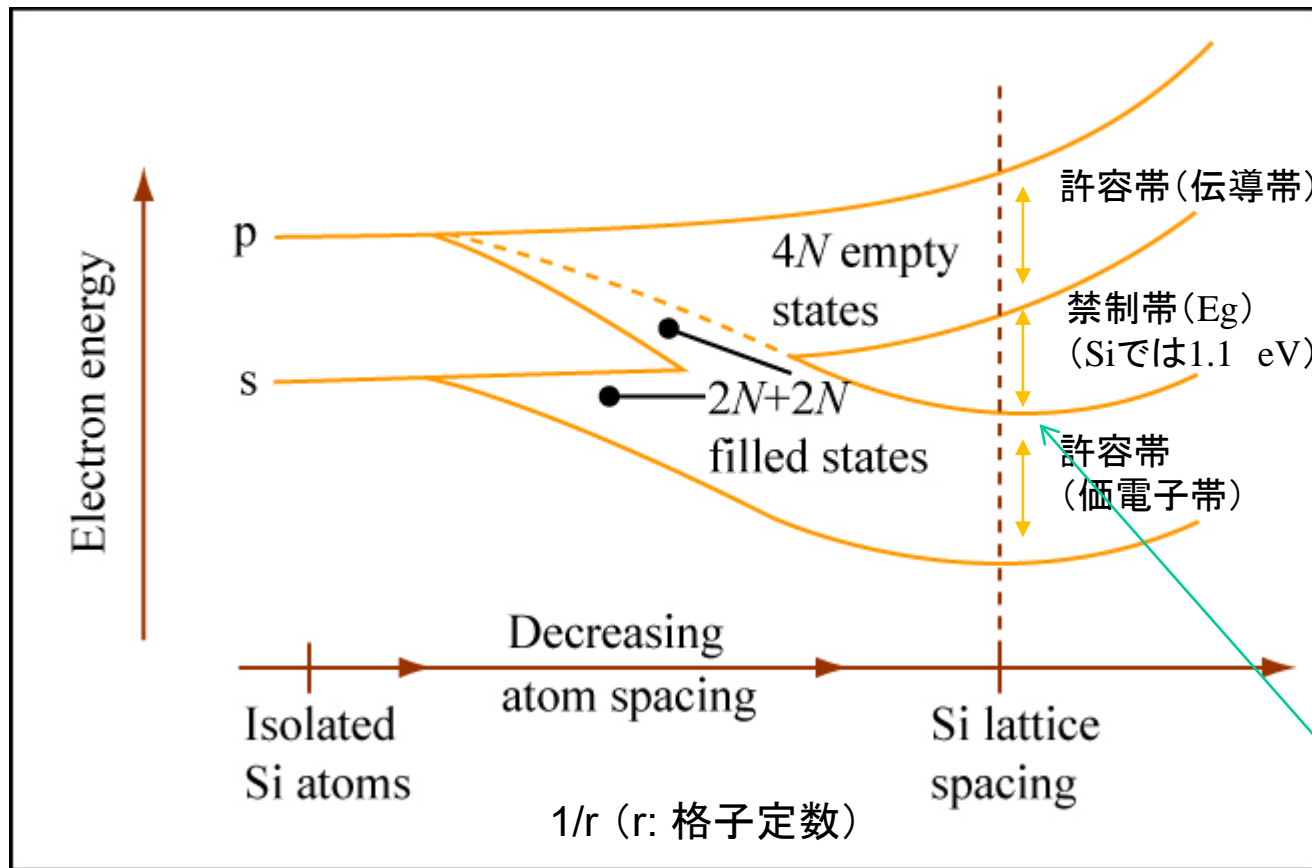
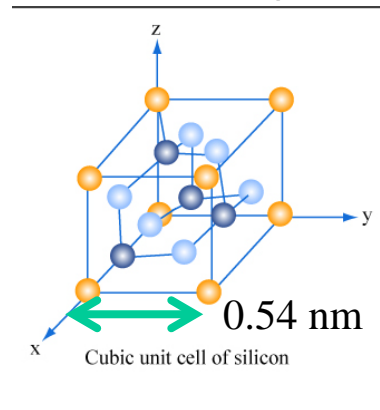
(tight binding model)

どちらのモデルでもほぼ同じ結果になる

たとえば、シリコン(Si)の結晶では

Image by MIT OpenCourseWare Follow, from flickr ref. 20171205
<https://www.flickr.com/photos/mitopencourseware/3362104209/in/photolist-apm37M-j1HCmX-TDD1dL-zAzaNc-x2sWy6-686ErX-3J3xK-4GRdP9-TDD1dq-688uGc-4HBB5c-RpUF9F-67ZK3w-CW7Q9N-4pjbU2-TDD1bm-TDD1aQ-TDD1cJ-C1UU5d-aNEqoK-TDD1c3-aNEqFR-aNEqyc-oSQMu4-uJZNgc-Lrm9Lf-oSRVaw-oSFEST>
 CC BY-NC-SA 2.0

ダイヤモンド構造



価電子帯上端まで
電子が占有

孤立した
Si原子



Si結晶

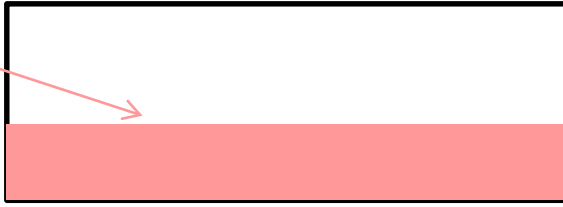
Image by MIT OpenCourseWare, from flickr ref. 20171205
<https://www.flickr.com/photos/mitopencourseware/3362461639/in/photolist-688uGx-9yKFBa-99BwsV-hkRz39-8ZhYws-hkSF28-a9nJAz-3HYK1-FmWGT-62Rzz2-fq6mdd-99BwtH-6fJ7BS-6GP2h5-aUmibg-a9nJDR-9yNGDs-9yKFsF-dam5kN-8xiYDG-WcziN2-99EDS7-aUkNZp-W9cYAf-tiZSF-8m3yRs-6xLPKz-9yKFzH-fmTEM7-fptvJJ-8QcTMW-99EDSQ-eRBjcD-9yNGHS-9yKFrX-eMiozf-8kNLwL-9yNGyA-NSCm7B-PEjZ0-9yKFw2-aUkP5D-8kKzzX-9yNGtN-8kyeNT-9yNGC7-c3Lsnj-8m3yNs-8kZNTZ-a9qxpS>
 CC BY-NC-SA 2.0

金属、半導体、絶縁体

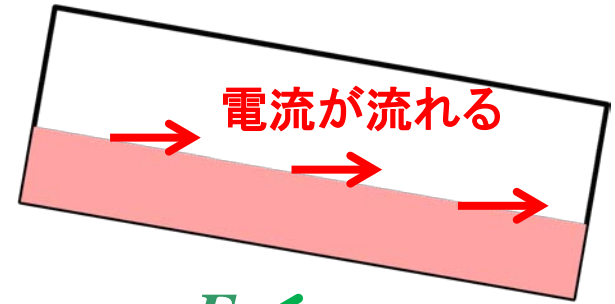
金属と絶縁体

途中まで電子が詰まったバンド

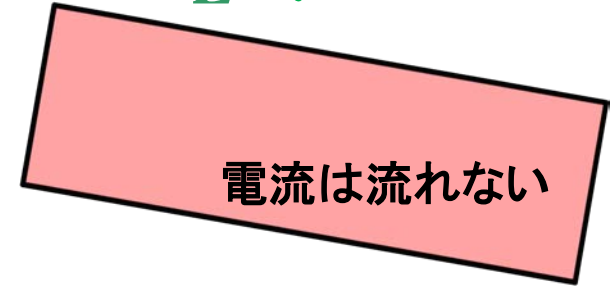
電子



電場(電界) E
をかける



完全に電子が詰まったバンド



電子のエネルギー

金属(導体)



絶縁体

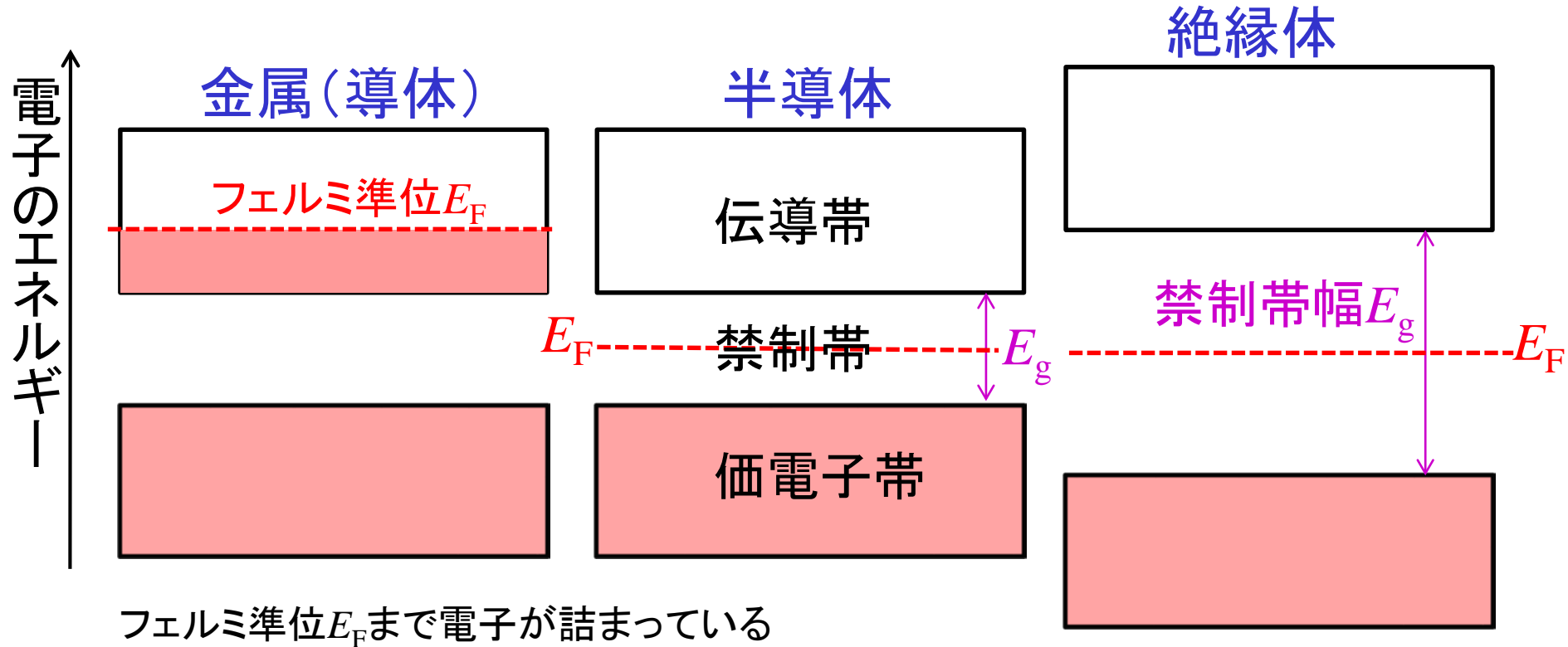


電流は流れない

禁制帯幅 E_g

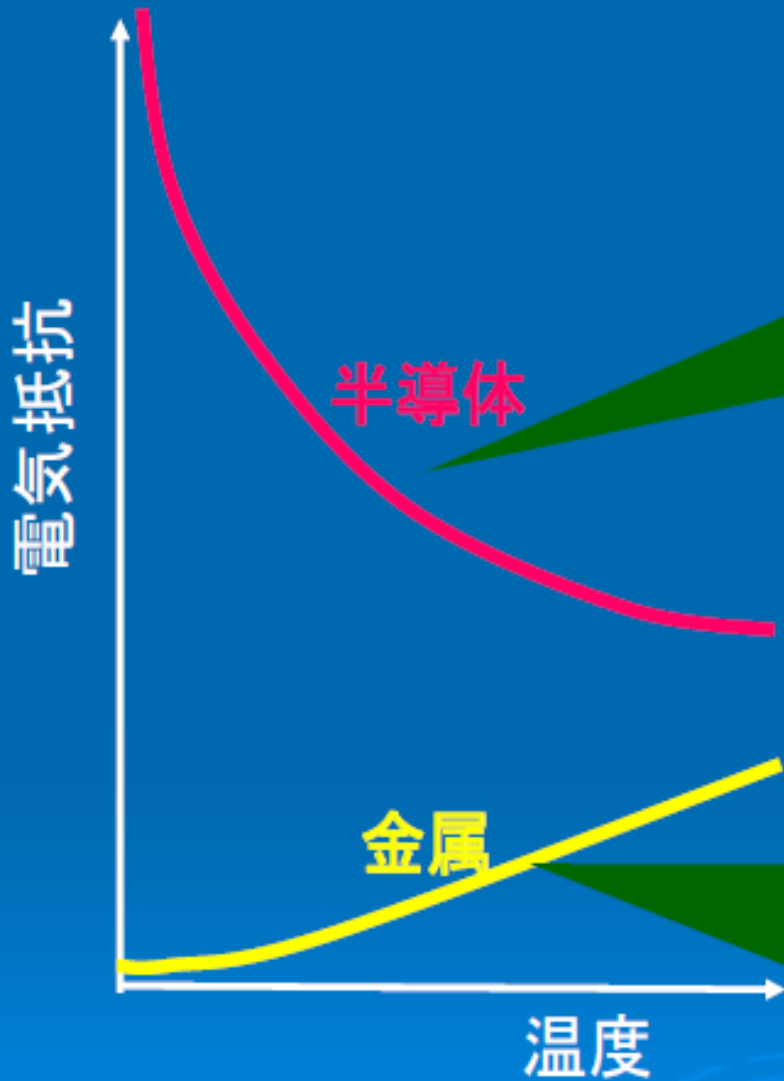


金属、半導体、絶縁体



- 半導体は、バンド構造からみると絶縁体と同じ
- 室温での抵抗率は、金属より大きく、絶縁体より小さい
- 禁制帯幅 E_g が比較的小さい(1eVのオーダー)ので、温度が高い時には熱エネルギーにより価電子帯の電子が伝導帯に励起する
→ 温度が上がると抵抗が下がる

金属と半導体の抵抗の温度依存性



半導体(絶縁体)では, 温度が高いほど熱励起によって(キャリアー)電子や正孔が数多く生成されるため, 電気抵抗が低くなる.

金属では, 電子の数は温度によって変化しない. 高温では格子振動が電子に対する散乱するとして働く. 低温極限での電子散乱は不純物や欠陥などによって決まる.

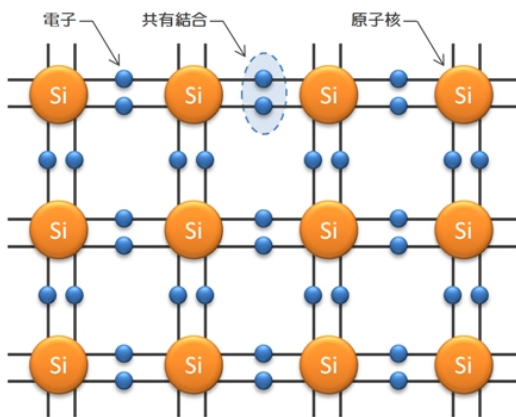
2005年「物質の科学」第9回家泰弘先生p16スライドより

不純物の添加 → n型半導体とp型半導体

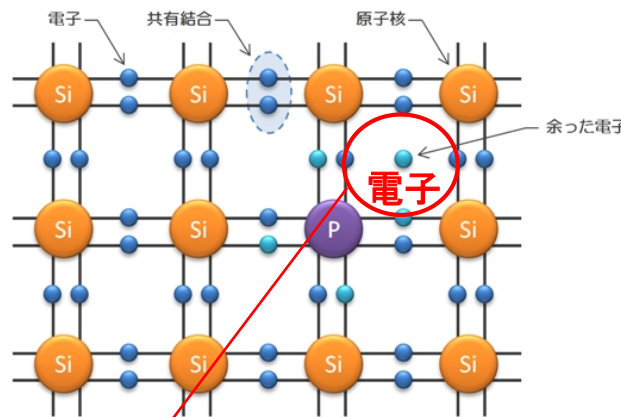
SiはIV族
4個の最外殻電子

電子を結晶中に供給
→ n型に

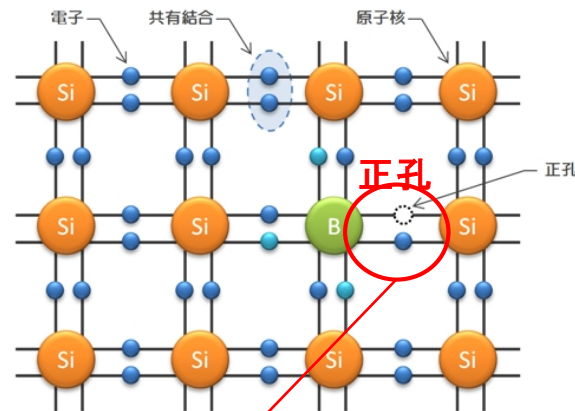
正孔(電子の抜け穴)を結晶中
に供給 → p型に



真性半導体
不純物のないSi



n型半導体
SiにP (リン: V族元素)
を添加: Pは電子を1個
供給するドナになる



p型半導体
SiにB (ホウ素: III族元素)
を添加: Bは電子を1個受容
(=正孔を1個供給)するア
クセプタになる

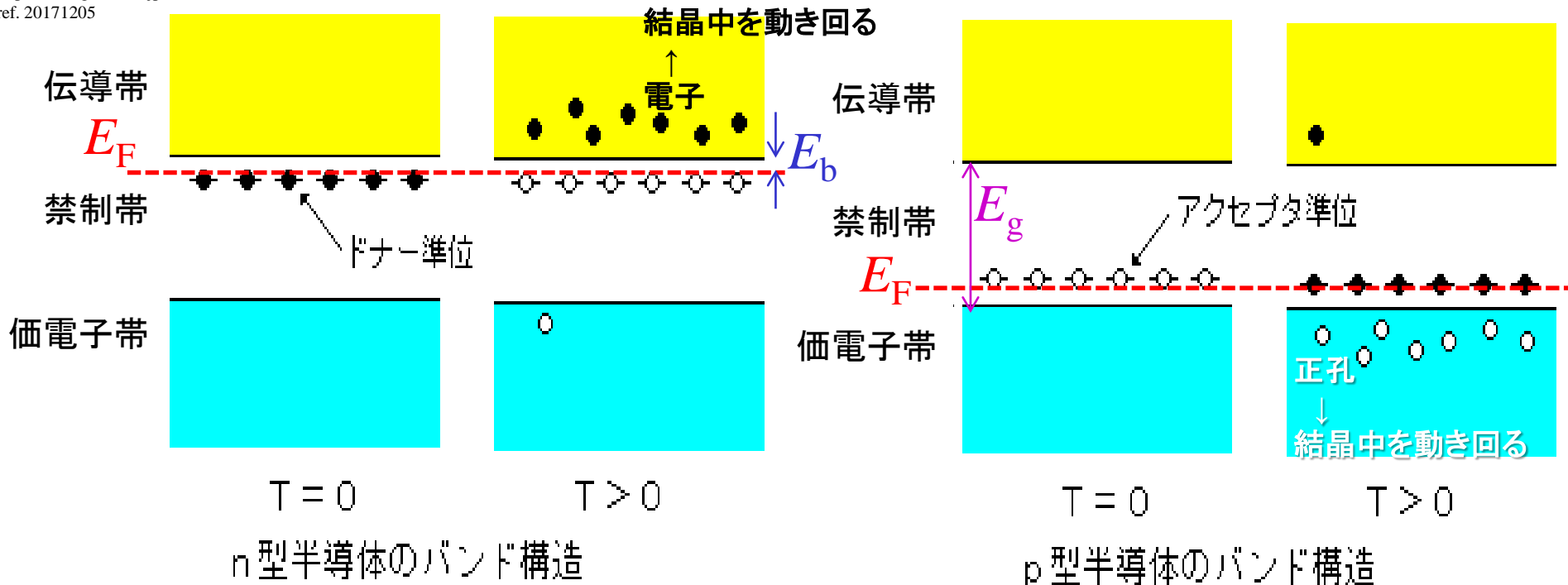
結晶中を動き回るキャリア (carrier = 電流の担い手)

ドナ不純物を添加するとキャリアは電子 (electron)、n型半導体になる
アクセプタ不純物を添加するとキャリアは正孔 (hole)、p型半導体になる

太陽光発電の仕組み
半導体の種類
[http://www.solartech.jp/knowledge/semiconduc
tor.html](http://www.solartech.jp/knowledge/semiconductor.html)

n型半導体とp型半導体のバンド構造

CPUの内部温度を測定しよう
 ダイオードの理論2 フェルミ準位
 n型半導体のバンド構造 p型半導体のバンド構造
http://www.geocities.jp/thermal_diode/diode_2.html
 ref. 20171205



- ドナ不純物(D)とアクセプター不純物(A)は水素原子に似ており($D \rightarrow D^+ + e^-$, $A \rightarrow A^- + h^+$)水素原子モデルで不純物準位(不純物原子のイオン化エネルギー)を計算できる。
- ドナー準位は伝導帯下端からわずかに($E_b = \text{数meV} \sim \text{数}10 \text{ meV}$)下に、アクセプタ準位は価電子帯上端からわずかに($\text{数meV} \sim \text{数}10 \text{ meV}$)上にある。
- このエネルギー差(束縛エネルギー E_b)より室温の熱エネルギー $k_B T = 26 \text{ meV}$ が大きいと同程度であれば、キャリアが結晶中に放出され、半導体はn型、p型になる。
- 一方、禁制帯幅 E_g が1 eV程度であれば(温度にすると10000 K程度)、室温の熱エネルギーより十分大きいので、価電子帯から伝導帯への電子の熱励起はきわめて少ない。

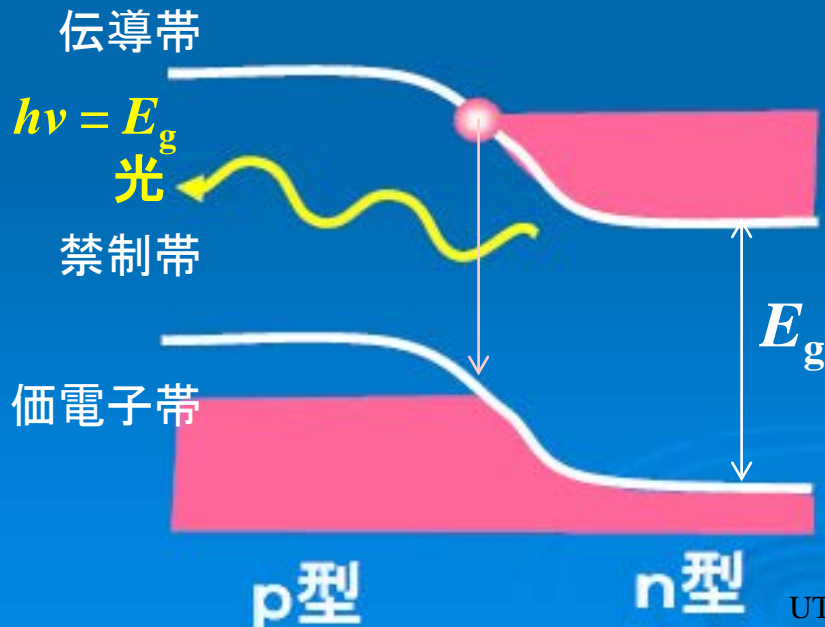
半導体pn接合と発光ダイオード(LED)

2005年「物質の科学」第9回家泰弘先生p18 スライドより

p-n接合



発光ダイオード



放出される光の色は
半導体のバンドギャップ E_g
で決まる

1eV ~ 3eV
赤外 ~ 青色

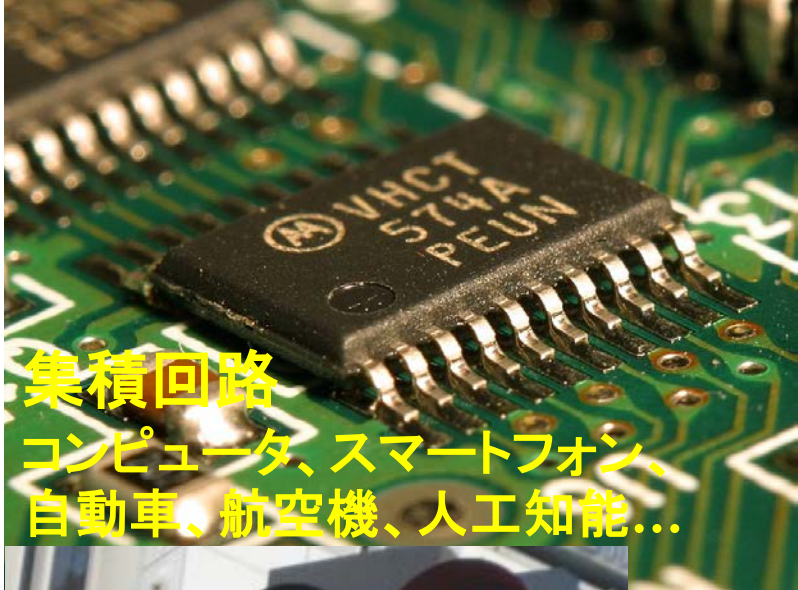
半導体の応用 トランジスタから集積回路へ

社会のあらゆるところで半導体が使われている

Google Data centers
Douglas County, Georgia
<https://www.google.com/about/datacenters/gallery/#/tech/12>
ref. 20171205



データセンター



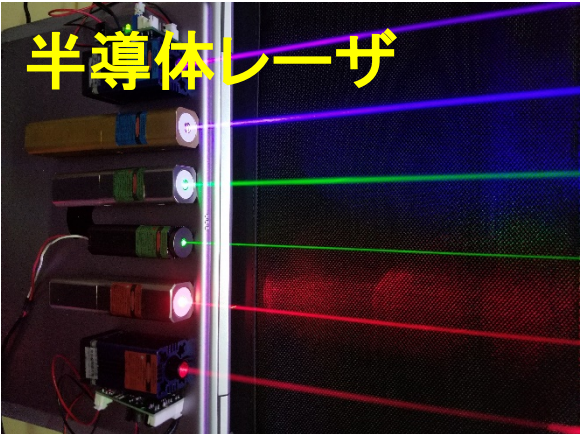
集積回路
コンピュータ、スマートフォン、
自動車、航空機、人工知能...



Photo from Wikipedia Commons

LED
照明

Photo by Hr-jawiki, from Wikipedia Commons
https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9F%A2%E5%8D%B0%E5%BC%8F%E4%BF%A1%E5%8F%B7%E6%A9%9F#/media/File:Signal_LED.jpg
GFDL



半導体レーザー



太陽電池

Photo from Wikipedia Commons



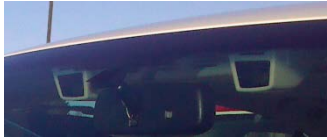
大型ディスプレイ

Photo by Rs1421 from
Wikimedia Commons
ref. 20171206
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:QFront-Shibuya-01.jpg#/media/File:QFront-Shibuya-03.jpg>
CC BY-SA 3.0

Photo by 彭嘉傑 from Wikimedia Commons ref. 20171206
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lasers.JPG>
CC BY 2.5

拡大する半導体の用途

監視用カメラ



車載コンピューター



Photo by NVIDIA Taiwan
from Wikimedia Commons
ref. 20171206
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NVIDIA_Drive_PX_Computex_Taipei_20150601.jpg
CC BY 2.0

自動車



LEDヘッドランプ

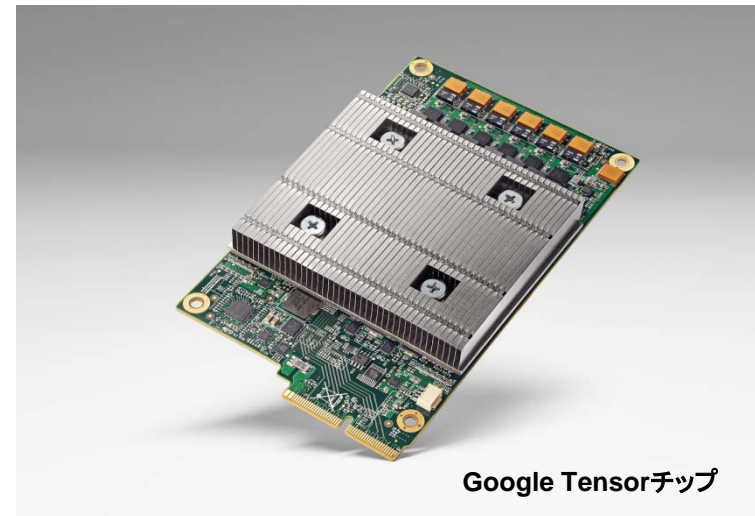
モーター駆動用
パワートランジスタ

各種センサ

人工知能
も半導体
の塊

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を
削除しました

IBMワトソン



Google Tensorチップ

20世紀最大の発明 1947-48, 米国Bell研究所 トランジスタ Transistor = Transfer resistor



Photo from Wikipedia Commons



Photo from Wikipedia Commons

ゲルマニウムを使った点接触型
トランジスタ

Bardeen, Brattain, 1947

点接触型トランジスタの発明

Shockley, 1948 接合型トランジスタの発明

トランジスタ

■バイポーラトランジスタ(接合型トランジスタ)

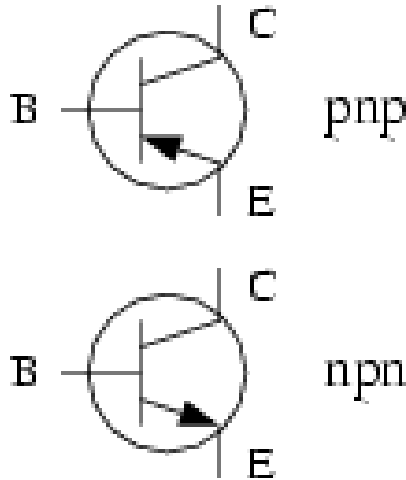
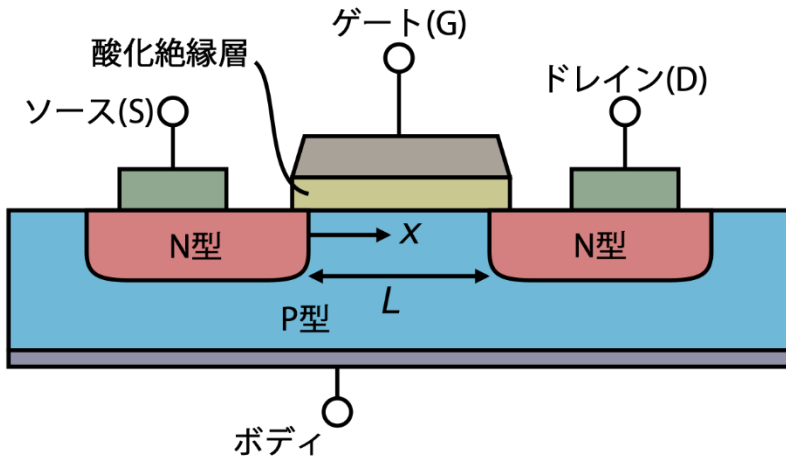


Image by wiki from Wikimedia Commons ref. 20171206
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Icon_of_Bipolar_transistor.png
CC BY-SA 2.0 TW

1948年 Shockleyが発明
初期トランジスタにおいて
中心的役割。
現在は、特殊用途で利用。

■MOS電界効果型トランジスタ(MOS-FET)



1960年 J. Attala and D. Kahng
現在、トランジスタの主流
大規模集積化に向く

nチャネル MOSFET pチャネル MOSFET

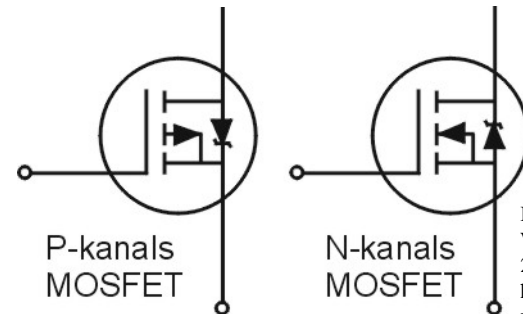


Image by Trappeter from Wikimedia Commons ref. 20171206
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MOSFET.jpg>
CC BY-SA 3.0

Image by CyrilB from Wikimedia Commons ref. 20171206
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lateral_mosfet_japanese.png
CC BY-SA 3.0

トランジスタの応用

小さな信号

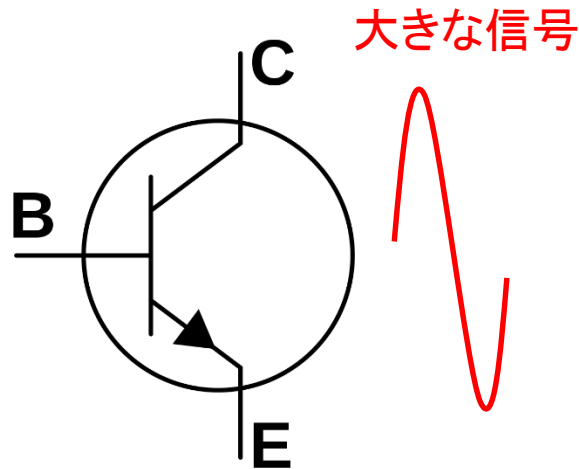
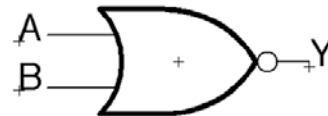
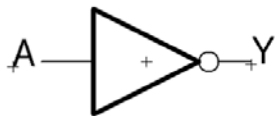
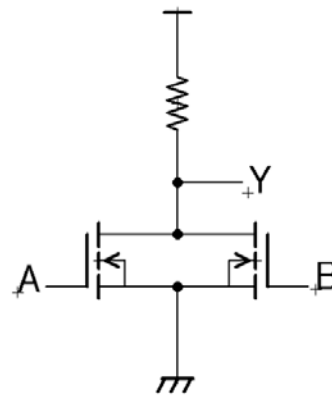
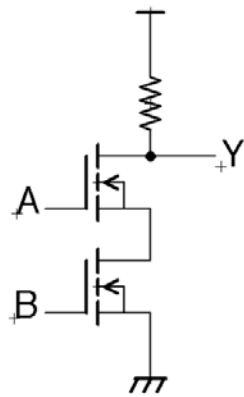
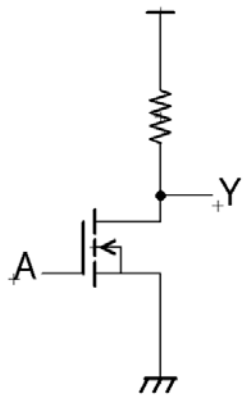


Image from Wikipedia Commons

信号の増幅ができる
 → アナログ電子回路
 電磁波・光の検出もできる
 → CCD、センサ



論理回路で論理演算、情報処理ができる(デジタル電子回路)
 → 大規模集積回路 (VLSI)
 → コンピュータ

東京工業大学 ロボット技術研究会
 トランジスタによる論理演算
<http://titech-ssr.blog.jp/archives/1018020218.html>
 ref. 20171206

スマートフォン(iPhone 7)を分解すると...

スマートフォンは半導体の塊だ

—iPhone7 (32GB版)の製造原価構成—

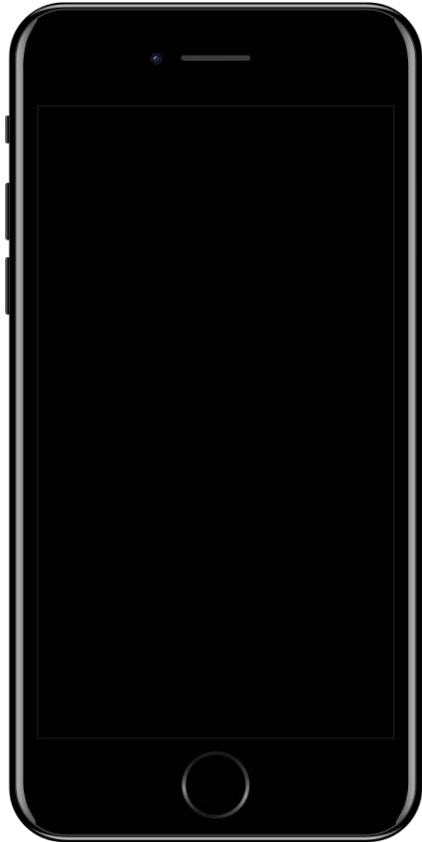
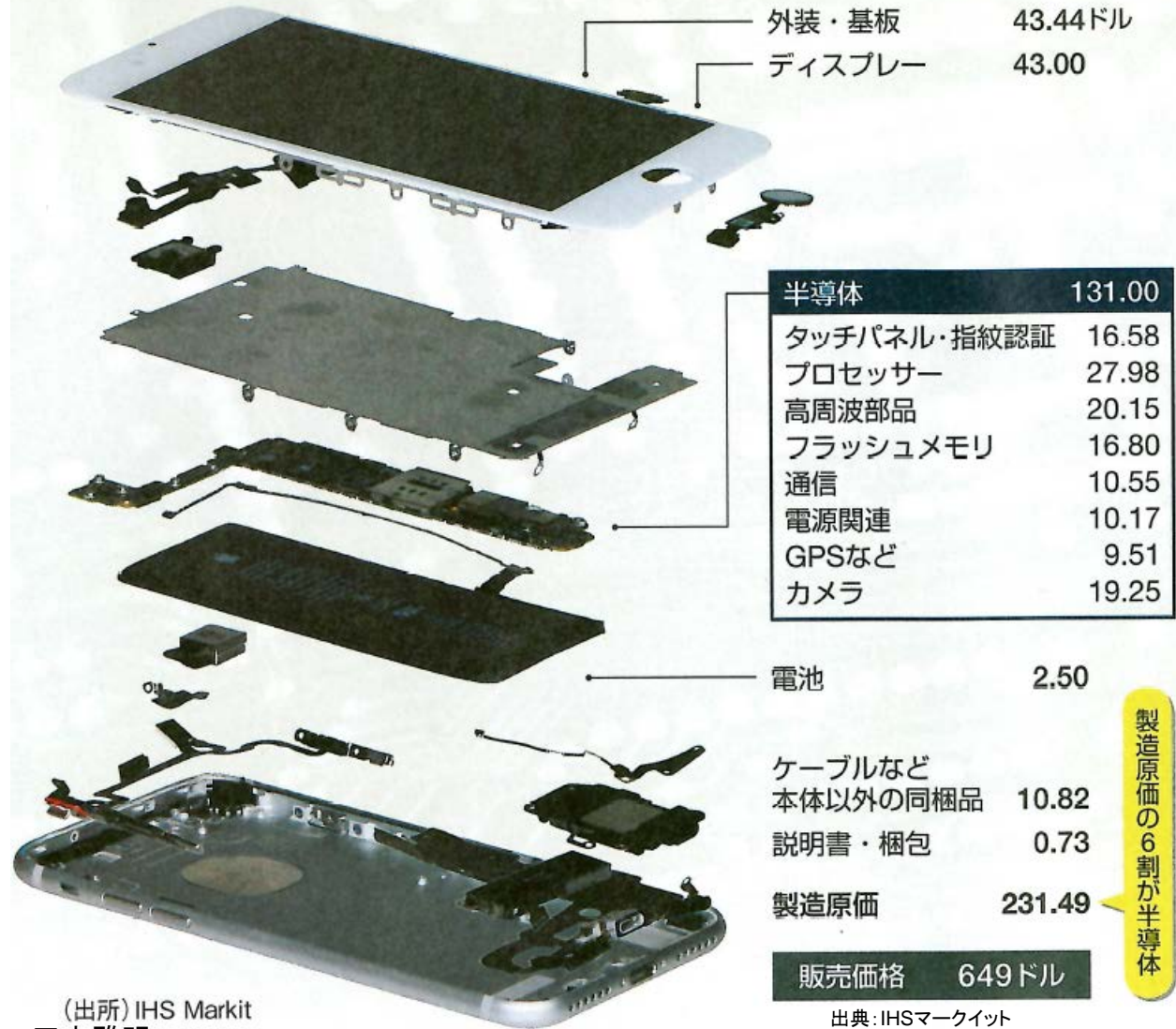


Photo by Rafael Fernandez, from Wikipedia Commons. ref.20171213
https://ja.wikipedia.org/wiki/IPhone_7#/media/File:IPhone_7_Jet_Black.svg
CC BY-SA 4.0



製造原価の6割が半導体

(出所) IHS Markit

出典: IHSマークイット
掲載: 『週刊東洋経済』2017年5月27日号

iPhone 7のCPU (A10プロセッサ)

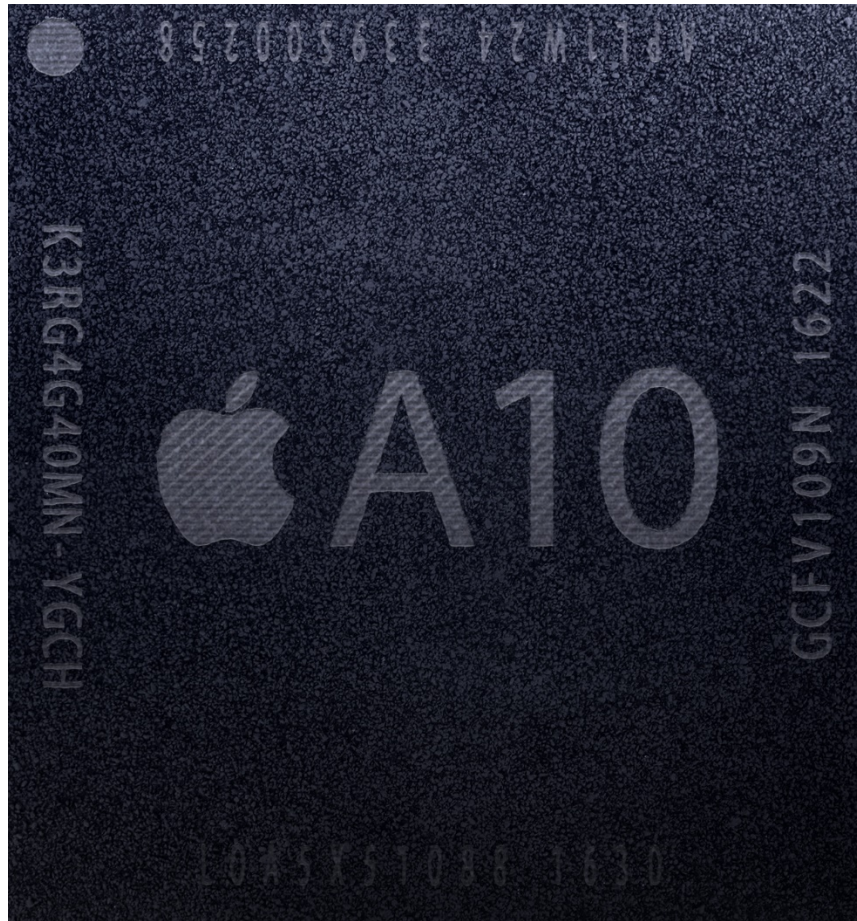
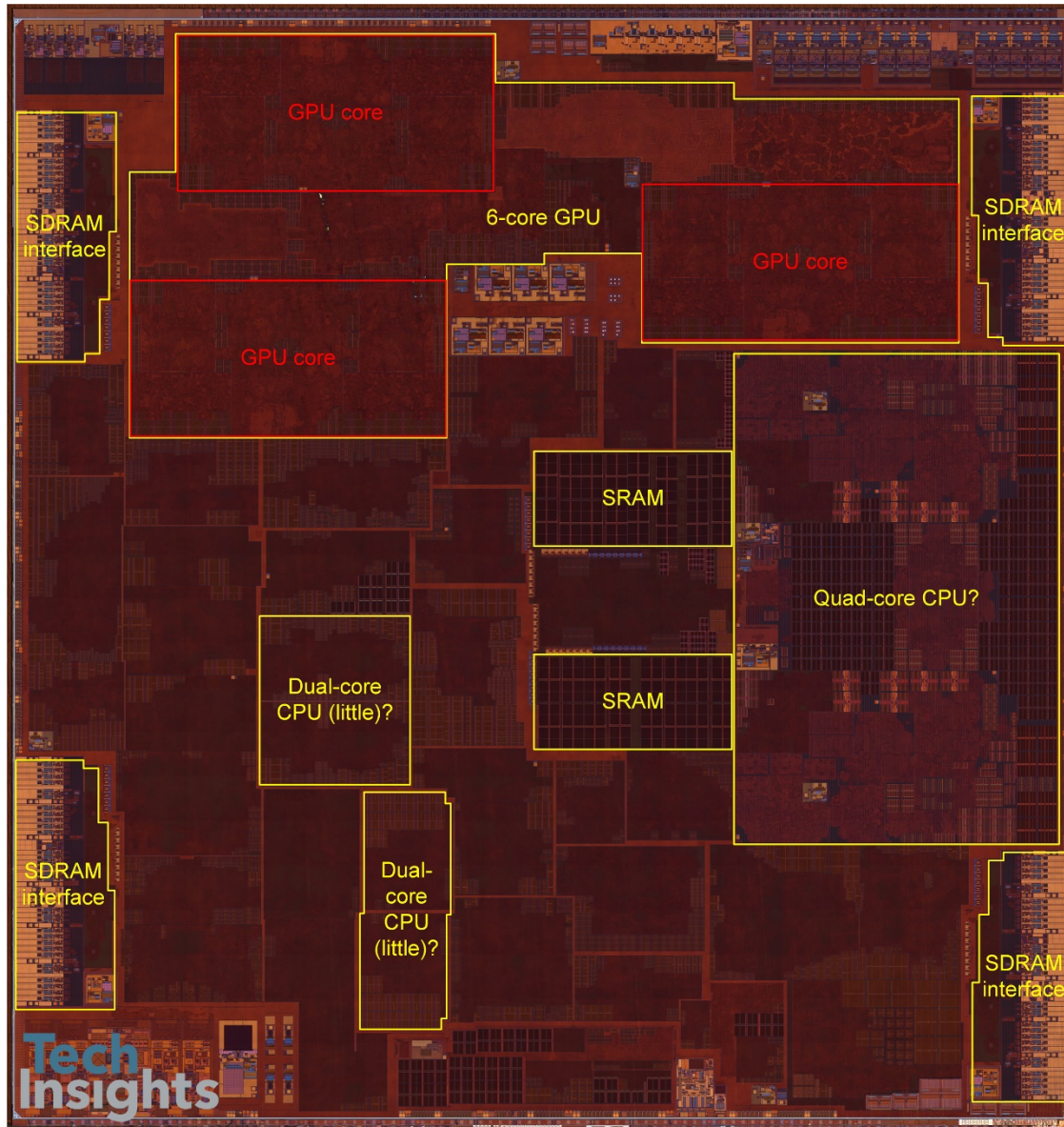


Photo by Henriok from Wikimedia Commons ref. 20171206
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Apple_A10_Fusion_APL1W24.jpg
CC0 1.0

iPhone 7のCPUのチップ写真



iPhone 7と7 Plus向け
2016年9月に発売

チップ面積: 125 mm²
33億トランジスタ

CPU: 4コア
GPU: 6コア
最高 2.34GHz
16nm FinFET
TSMCで製造

メモリ: 256GBの場合
→ 256 × 10⁹ × 8 = 2兆トランジスタ

courtesy of Tech Insights corporation

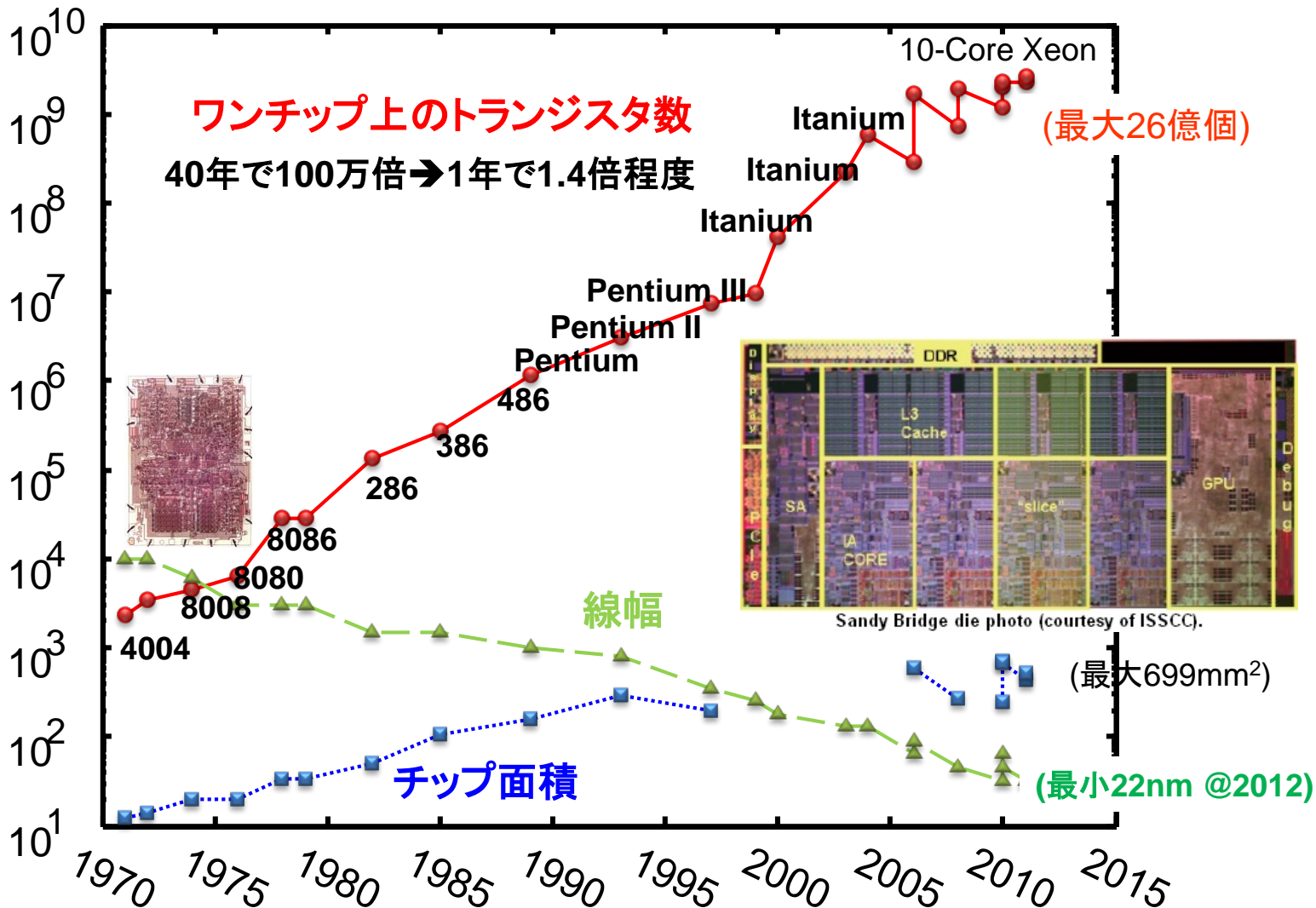
ムーアの法則

集積回路上のトランジスタ数は18か月(=1.5年)ごとに倍になる

ワンチップ上のトランジスタ数 (個)

線幅 (nm)

チップ面積 (mm²)



著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

EETimesの記事

見出し: Semiconductor Sales Tracking up 21% Form
2016

Dylan McGrath

8/4/2017

https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1332126

社会を支えるコンピュータとネットワーク

Image by buysellgraphic.com,from GATAG
<http://free-illustrations.gatag.net/2014/11/23/230000.html>
CC BY



Image from GATAG

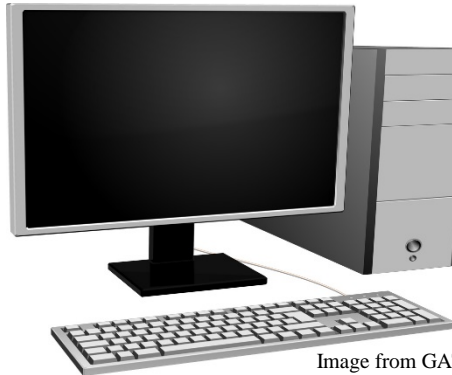


Image from GATAG



Image by いらすとや



光ファイバー
無線(電磁波)

コンピュータの心臓部 = CPU + メモリ



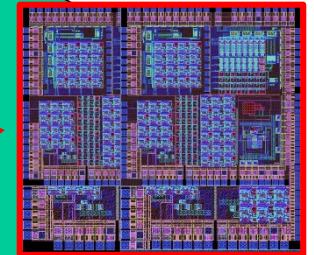
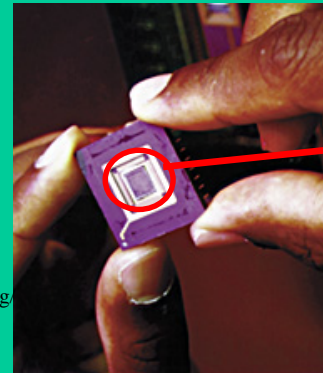
<https://www.flickr.com/photos/ichibod/2073251155/>
Image by Ryan Jones, from Flickr
CC BY-NC-SA 2.0

CPU = Central Processing Unit

中央処理装置

メモリ: SRAM, DRAMなど

コンピュータは半導体の塊である



COMPUTING FOR THE SOCIO-
TECHNO WEB
A History of Computing through
Representation
4th Generation: Very Large Scale
Integrated (VLSI) circuits
<https://cs.wellesley.edu/~cs110/reading/history/>
CC BY-NC-SA 1.0 ref. 20171205

Photo by Angeloleithold from
Wikimedia Commons ref. 20171205
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:InternalIntegratedCircuit2.JPG>
CC BY-SA 3.0



Image from GATAG

半導体集積回路(多数のトランジスタを組み合わせた回路)でできている
主材料はシリコン(Si)

← 半導体中の電子の振舞い

← 固体物理学、量子力学

VLSIチップ (大規模集積回路)

Very Large Scale Integrated Circuits

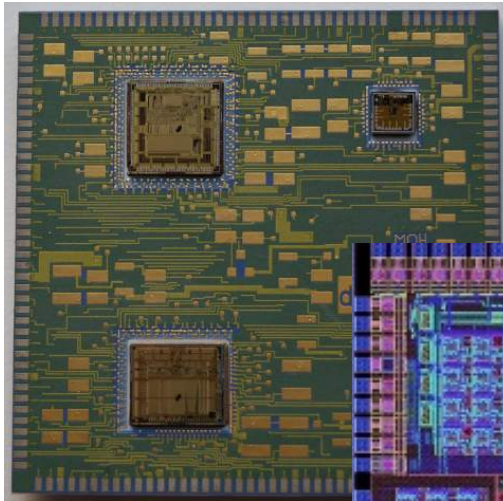


Photo by Jamo spingal ,from Wikipedia Commons
ref.20171218
https://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9B%86%E7%A9%8D%E5%9B%9E%E8%B7%AF#/media/File:Dec_alpha_small.JPG
CC BY 3.0

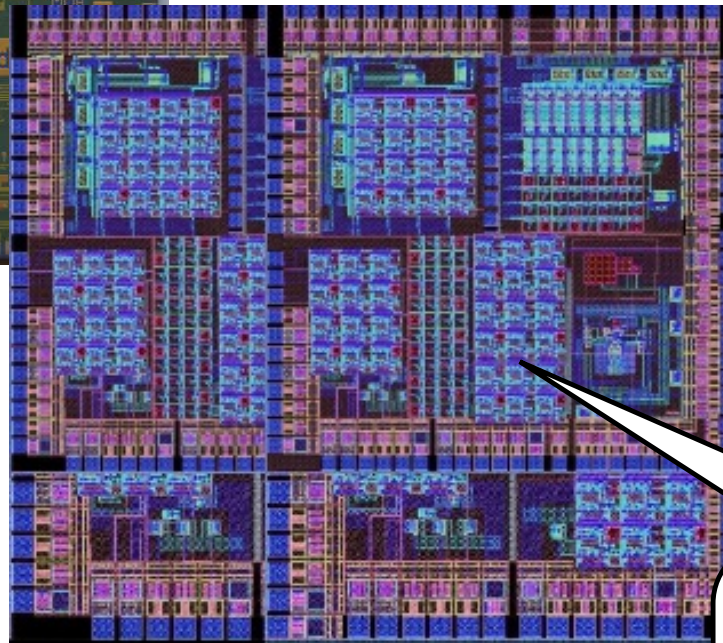
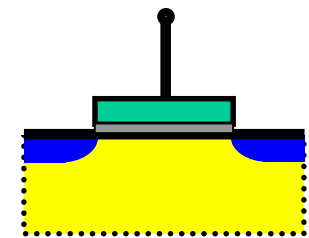
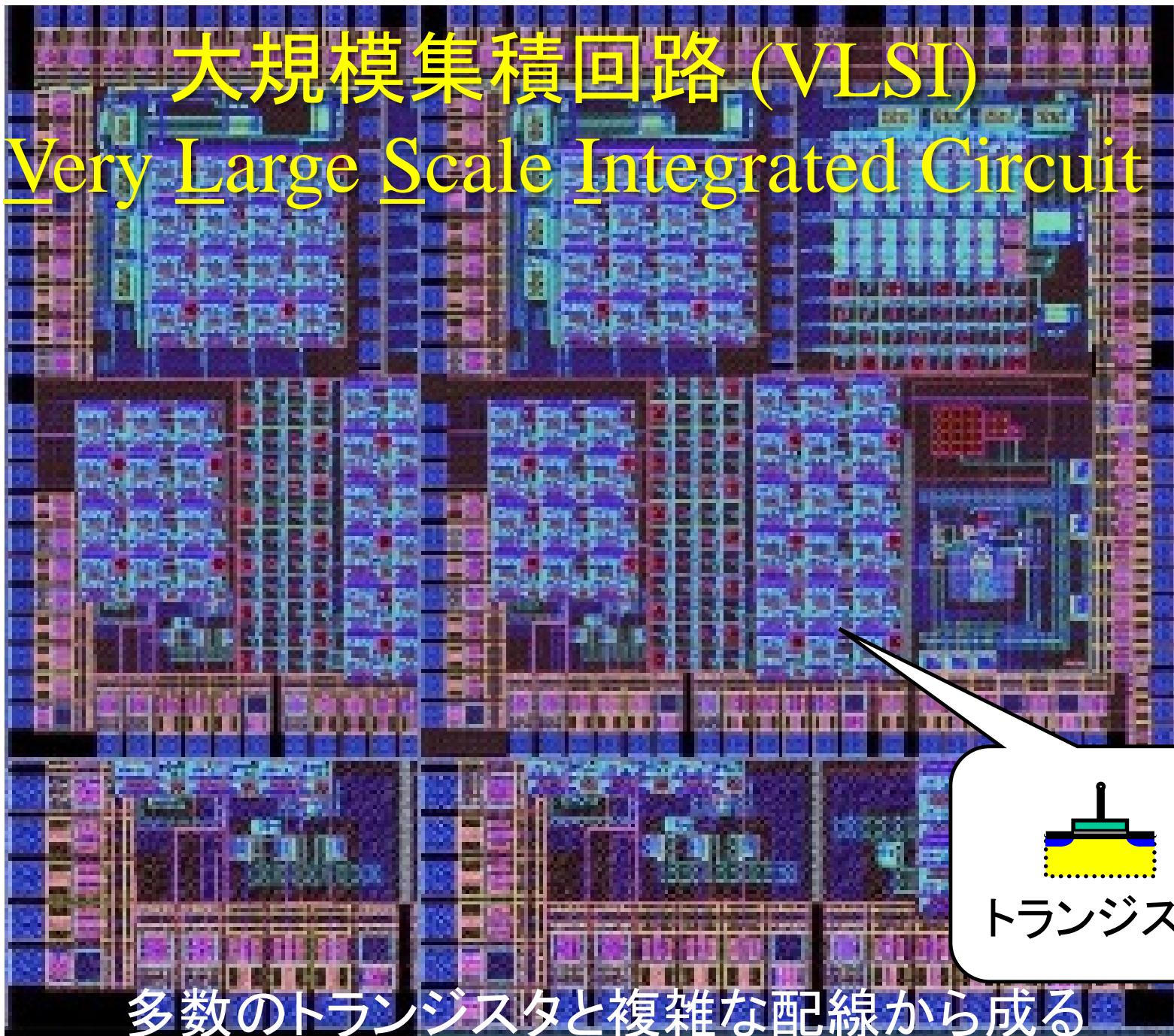


Photo by Angeloleithold from Wikimedia Commons ref. 20171205
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:InternalIntegratedCircuit2.JPG>
CC BY-SA 3.0



MOSTランジスタ

大規模集積回路 (VLSI) Very Large Scale Integrated Circuit



トランジスタ

多数のトランジスタと複雑な配線から成る

MOS電界効果トランジスタ

MOSFET

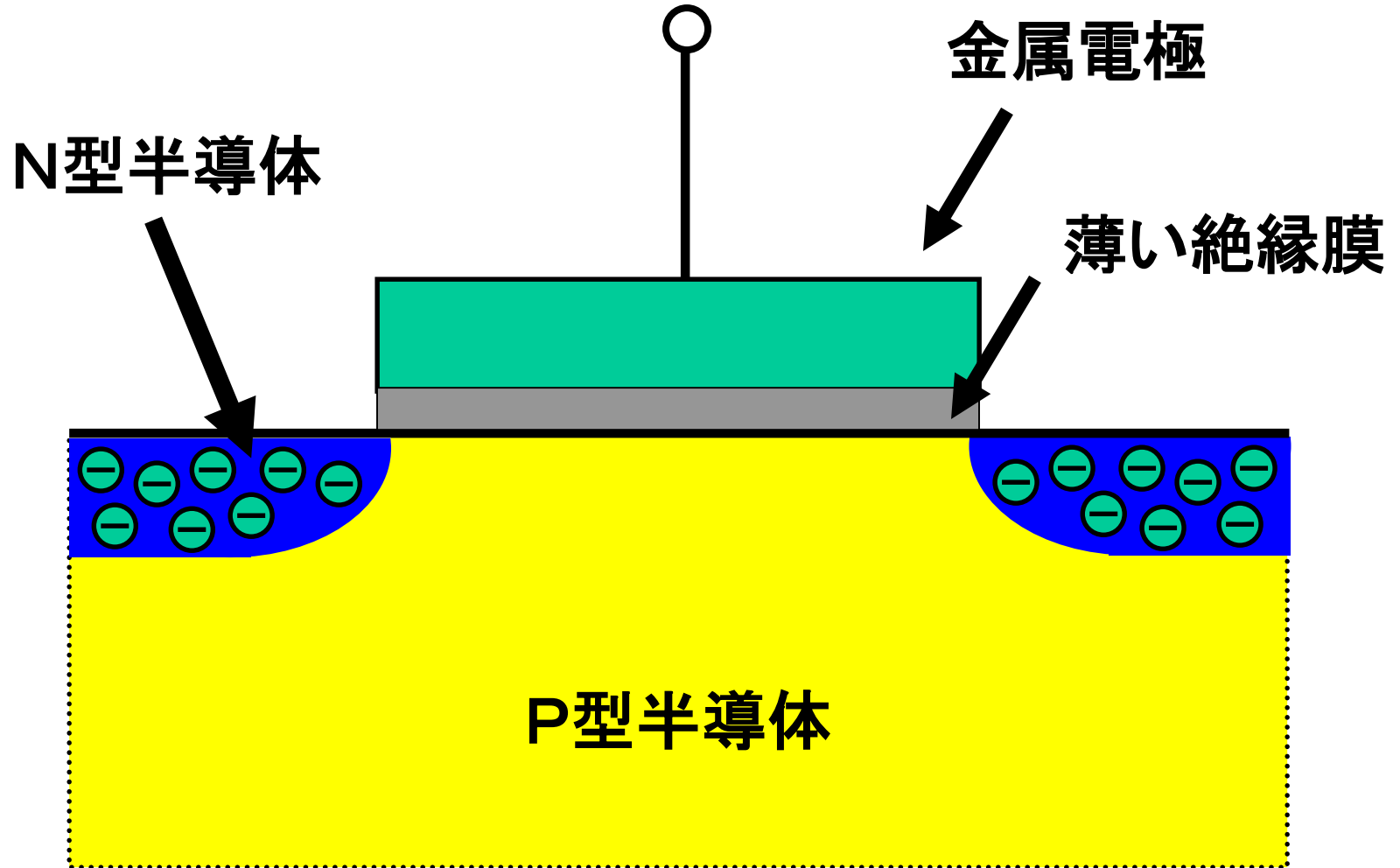
||

“スイッチ”

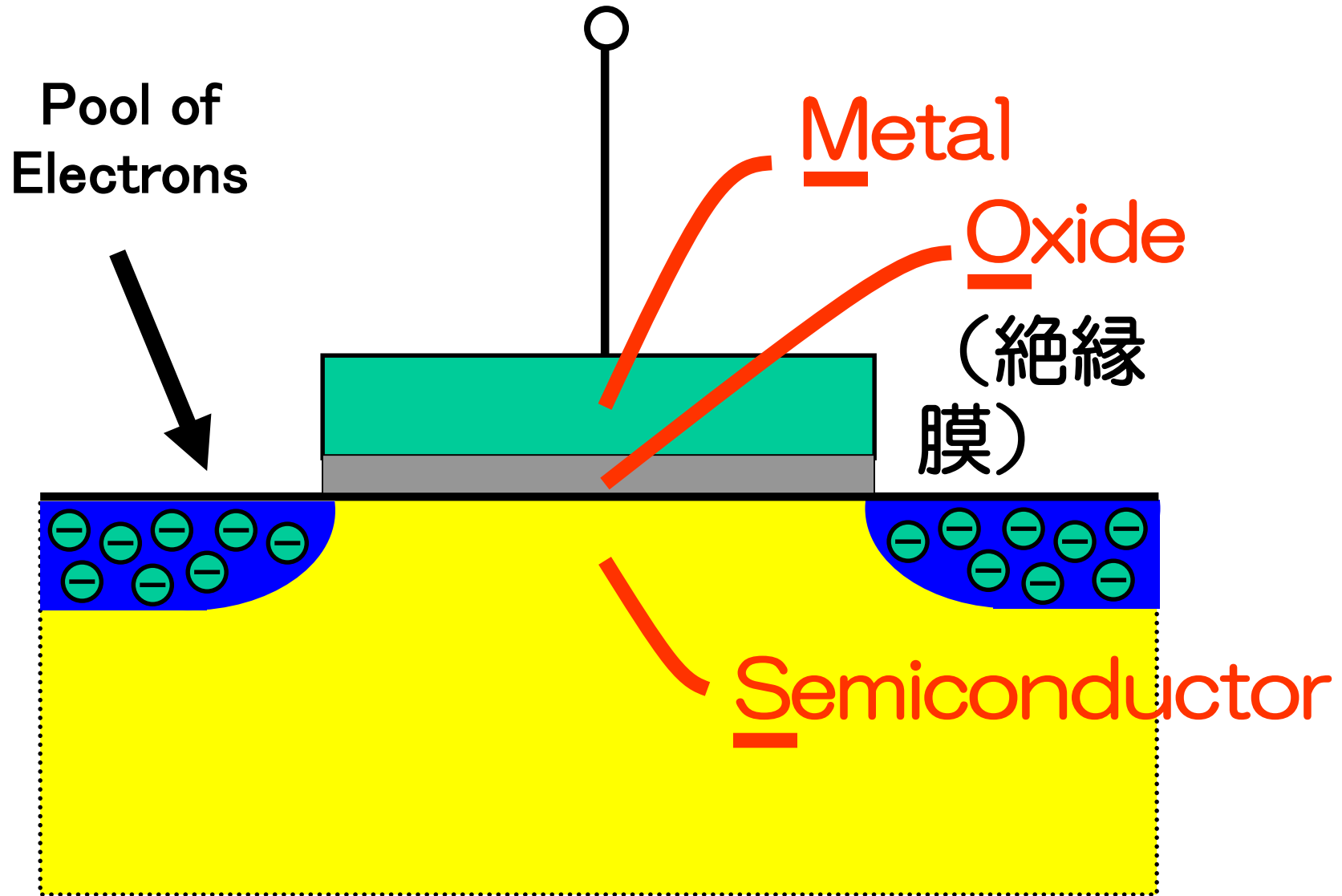
LSI (Large Scale Integration)
とは、膨大な数の“スイッチ”の集合体

MOSFET

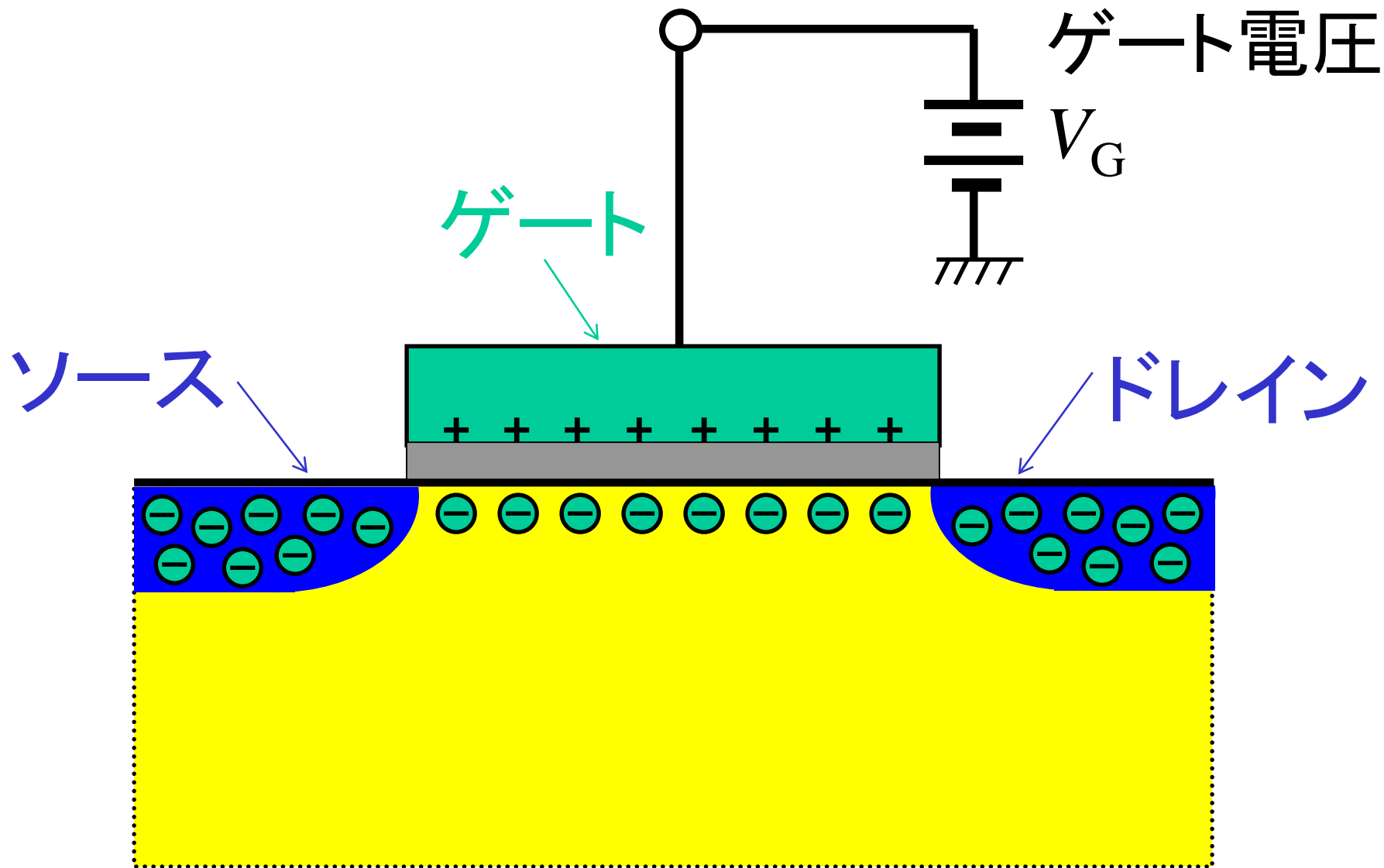
Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor

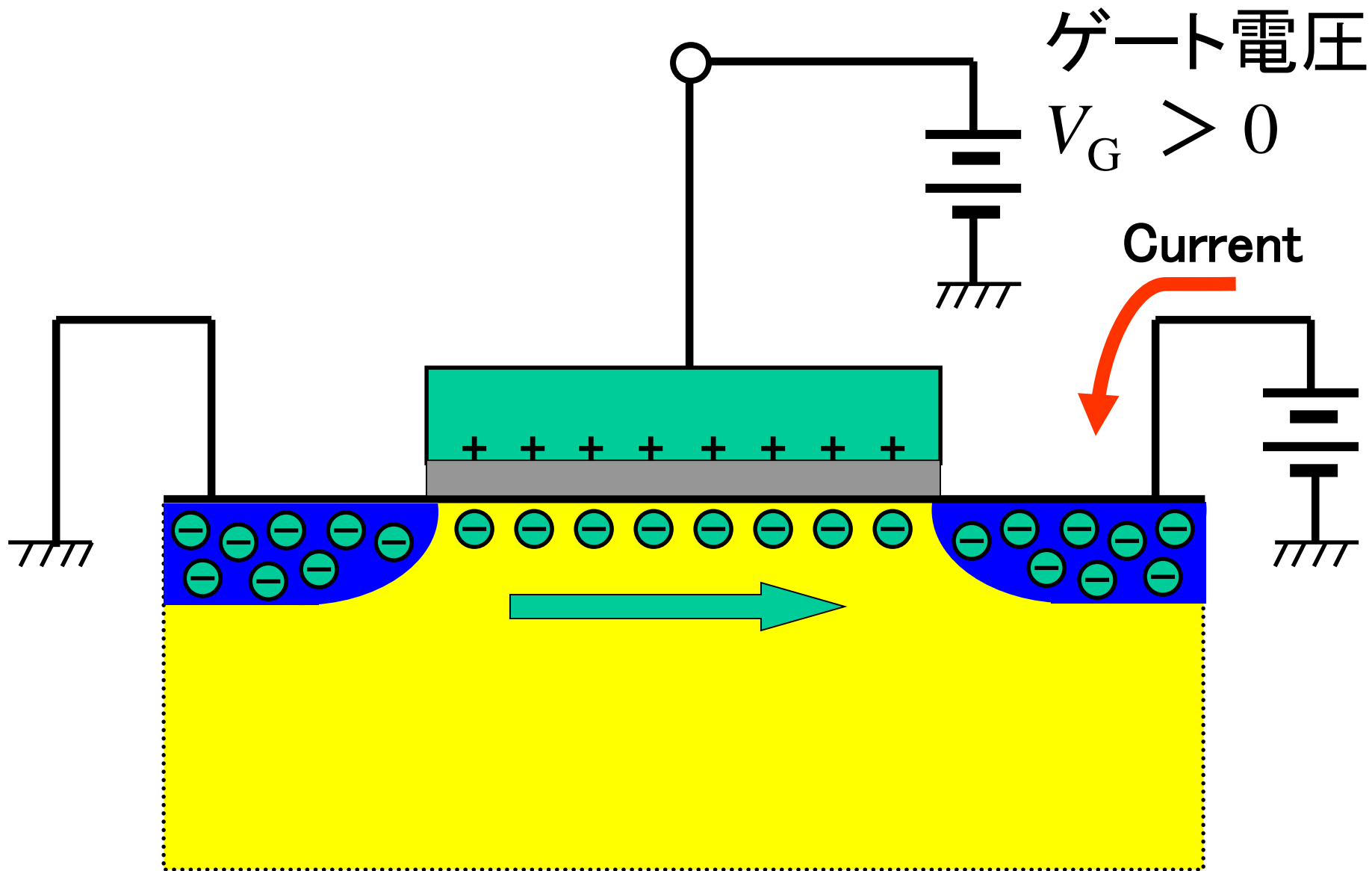


MOSFET

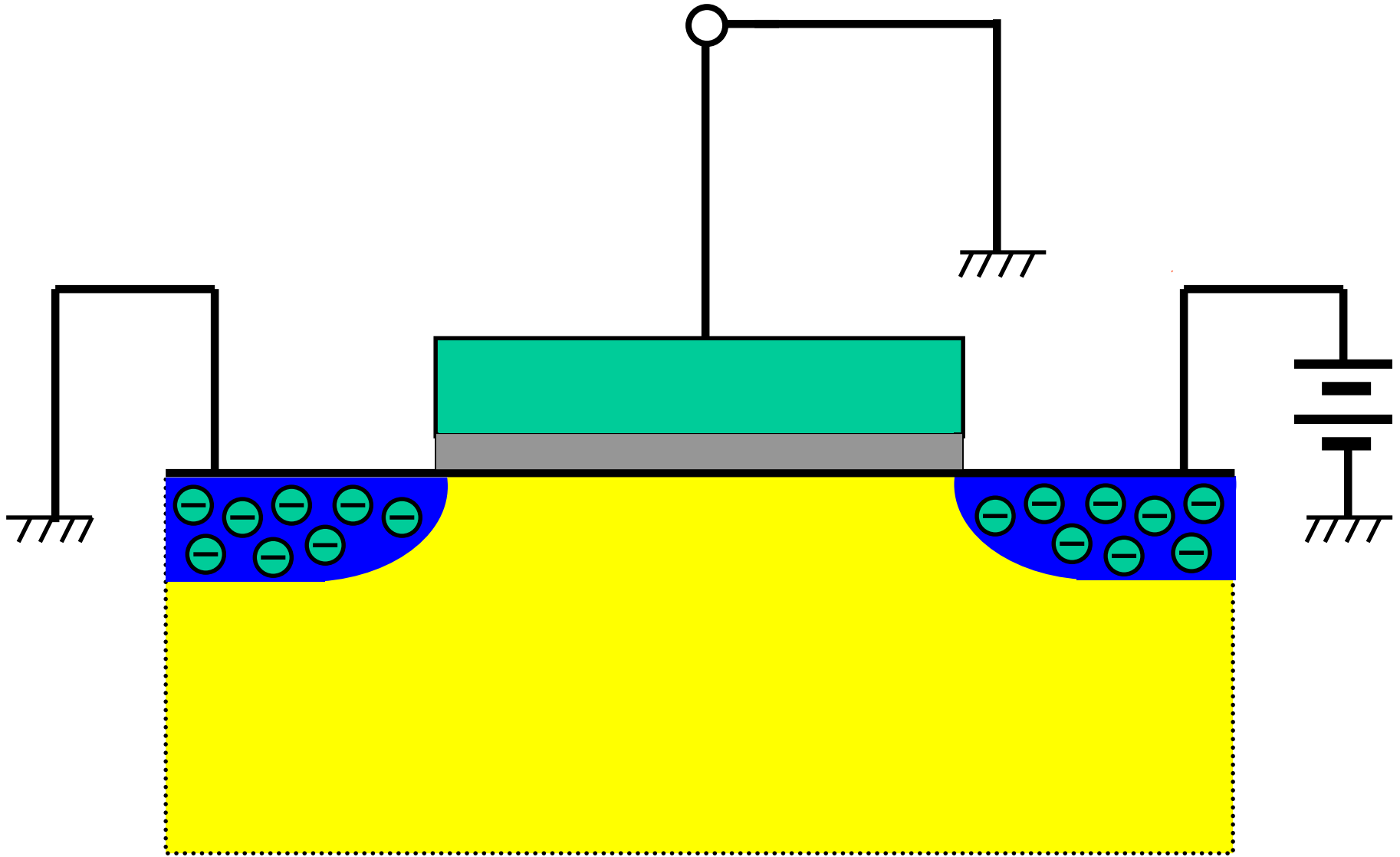


MOS Field Effect Transistor

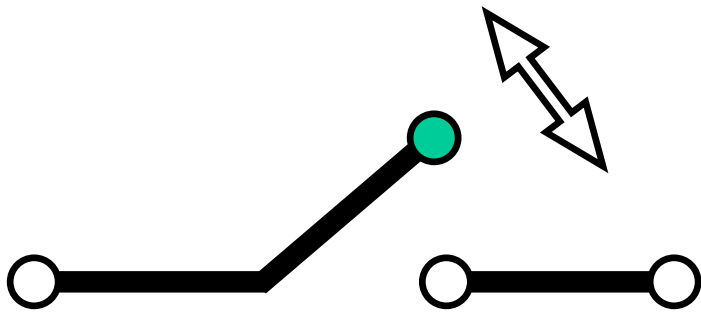
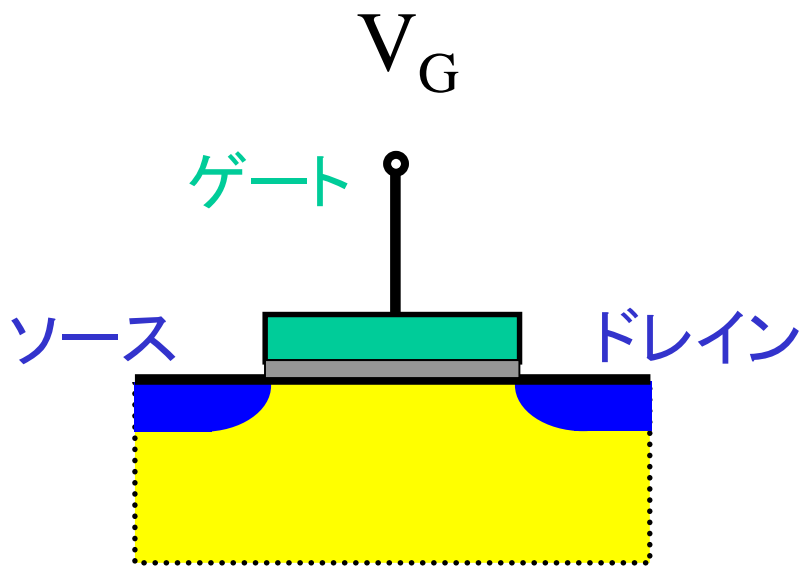




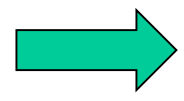
“ON”



“OFF”



$V_G >$ しきい値電圧
 $V_G <$ しきい値電圧



スイッチ ON “1”
 OFF “0”

トランジスタ以前は 真空管 だった

- 1904年 J. A. Flening 真空2極管
- 1906年 Lee de Forest 真空3極管

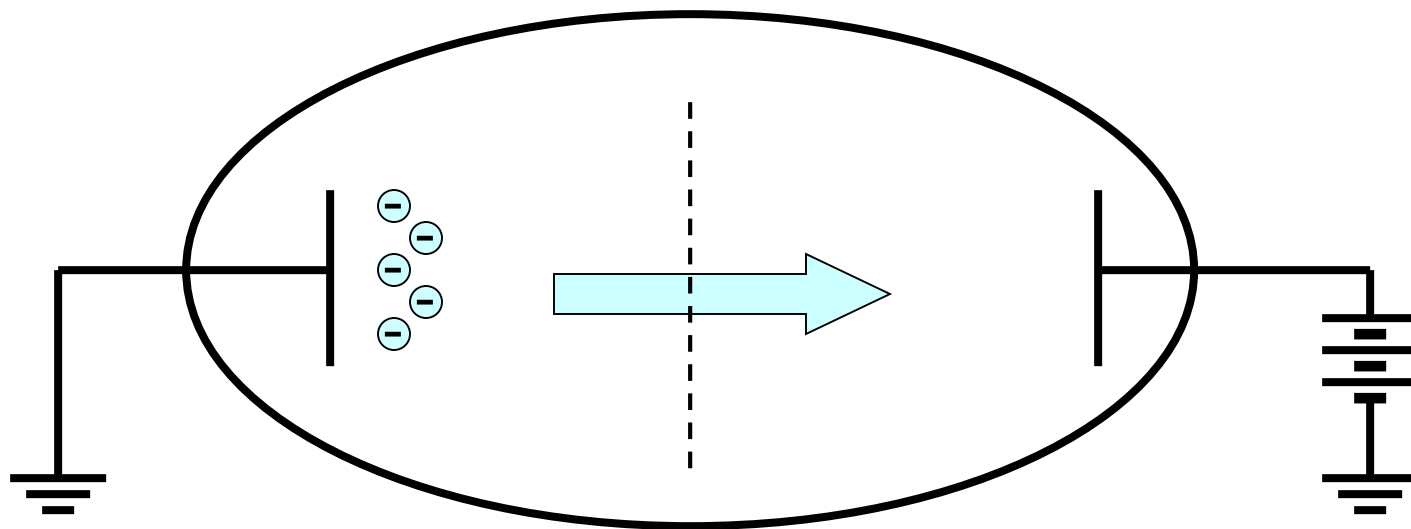




Photo by Noelas from flickr
<https://www.flickr.com/photos/hpj7173/5339114780/in/photolist-8WgJHZ-br4Qhx-6u8hpp-9pV7kX-8GNrhS-Bj3rED-2kXdT-8mPAX2-95VExW-64Tmn1-64TnFN-a7c248-ds5LjR-8yNwzD-8GCgGj-nwBaNV-BQk2K-8tQr9S-ds5Lkt-98NmP7-9dfyXR-8tMm1t-X82Bm-c9SztQ-tg2J7-4wDVbL-BQjNd-8GyWUm-nj5sC>
 CC BY-NC-ND 2.0

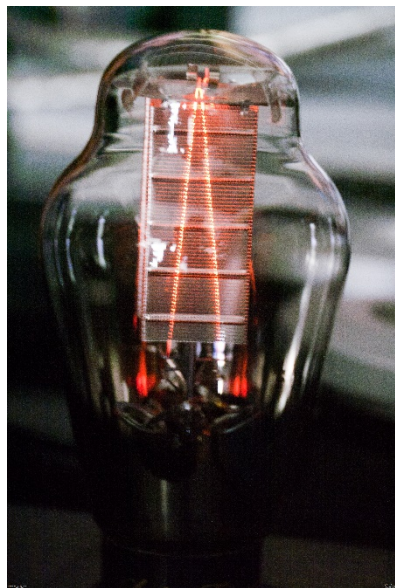
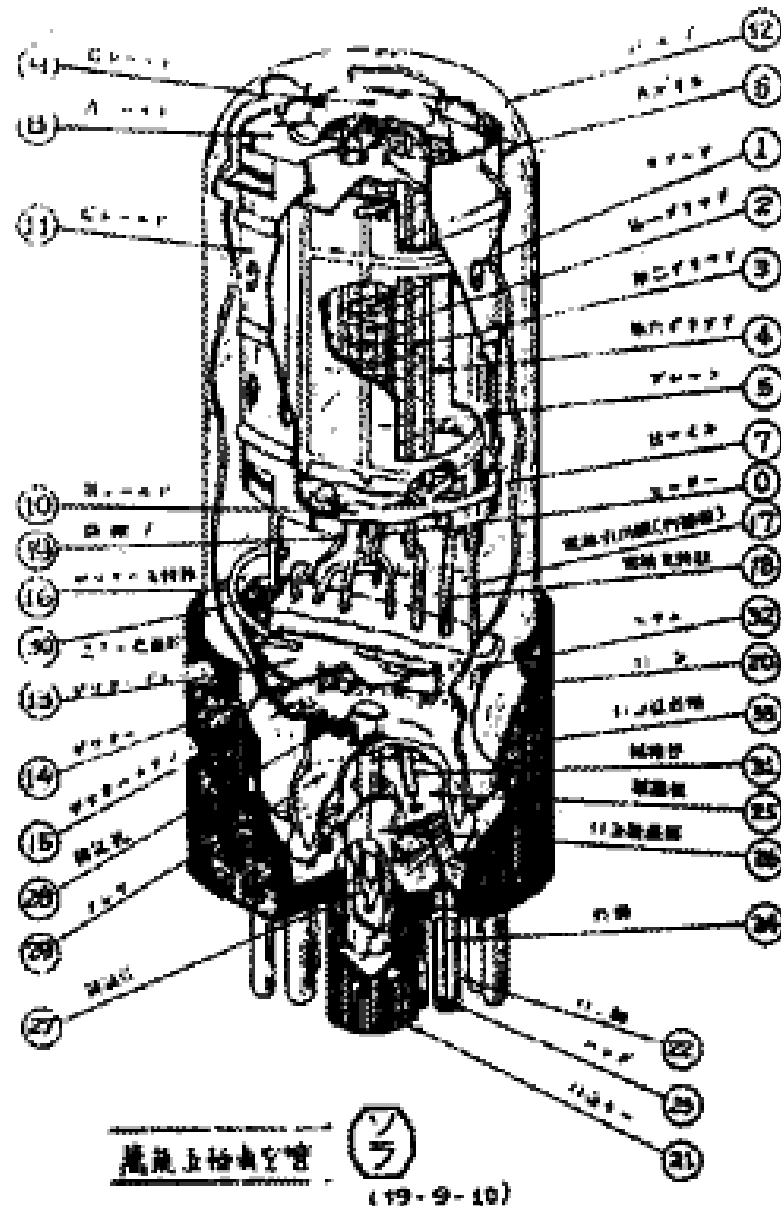


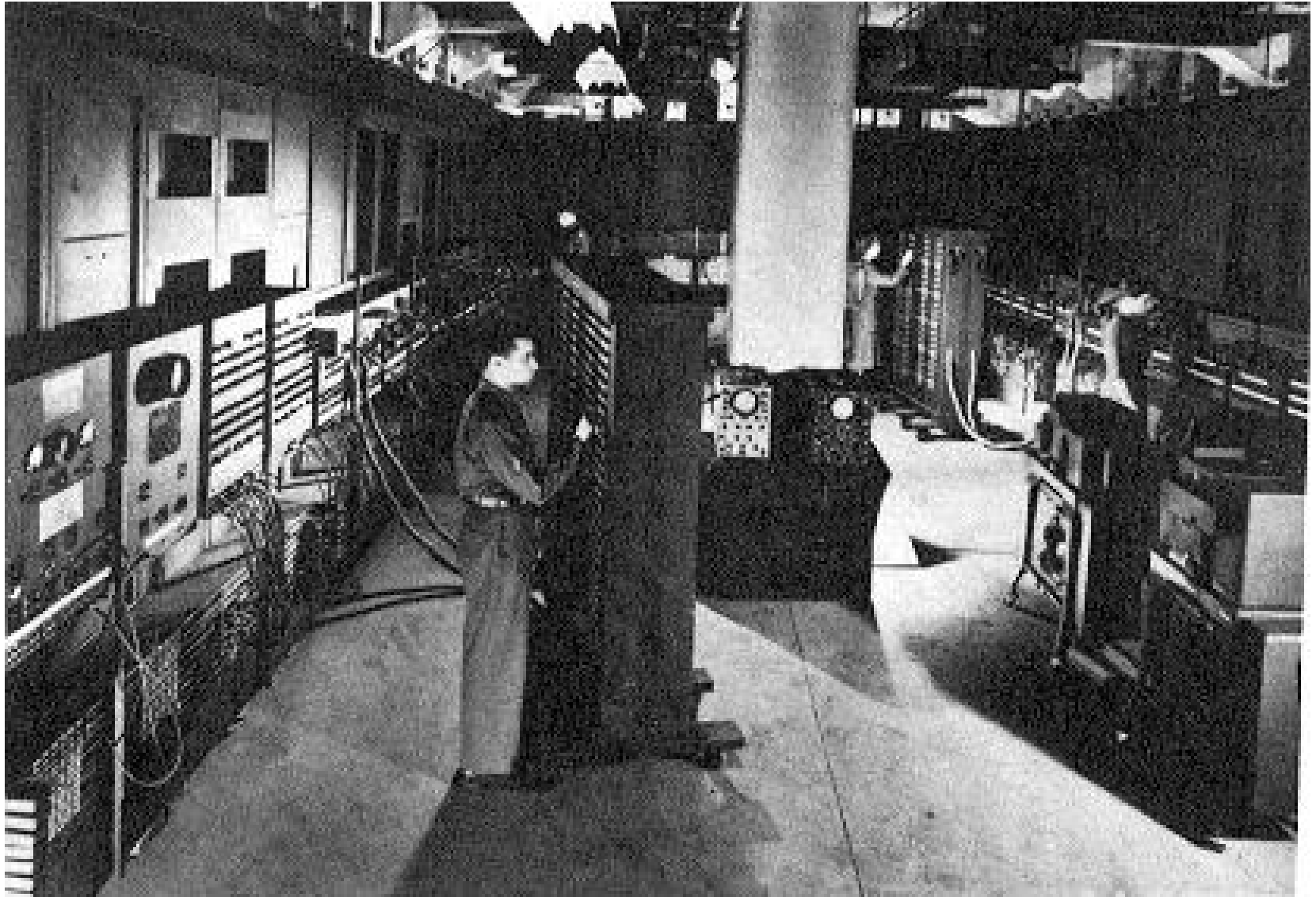
Photo by Noelas from flickr
<https://www.flickr.com/photos/hpj7173/4909492758/in/photolist-8WgJHZ-br4Qhx-6u8hpp-9pV7kX-8GNrhS-Bj3rED-2kXdT-8mPAX2-95VExW-64Tmn1-64TnFN-a7c248-ds5LjR-8yNwzD-8GCgGj-nwBaNV-BQk2K-8tQr9S-ds5Lkt-98NmP7-9dfyXR-8tMm1t-X82Bm-c9SztQ-tg2J7-4wDVbL-BQjNd-8GyWUm-nj5sC>
 CC BY-NC-ND 2.0



株式会社東芝
 ソラ真空管組立教本 萬能五極真空管の組立図

ENIAC

1946 The University of Pennsylvania



20世紀最大の発明 1947-48, 米国Bell研究所 Transistor = Transfer resistor



Photo from Wikipedia
Commons

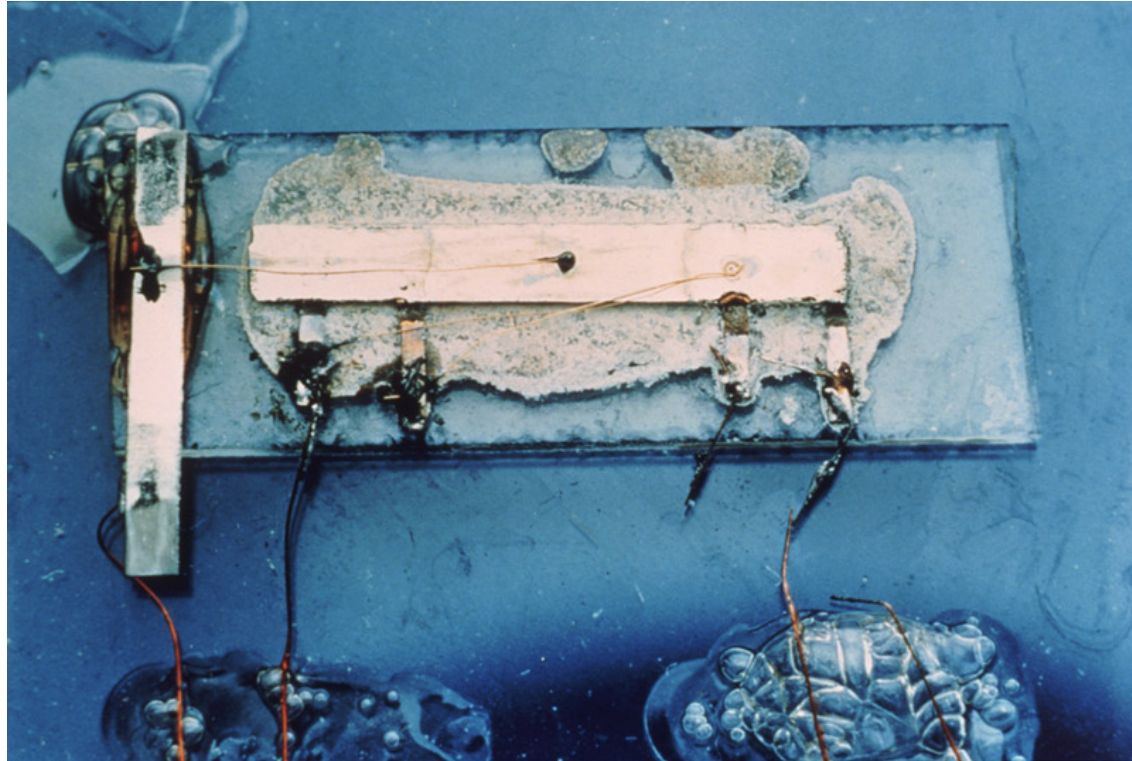
ゲルマニウムを使った点接触型
トランジスタ



Photo from Wikipedia
Commons

Bardeen, Brattain, 1947
点接触型トランジスタの発明
Shockley, 1948 接合型トランジスタの発明

First Integrated Circuit (IC) Jack Kilby 1958

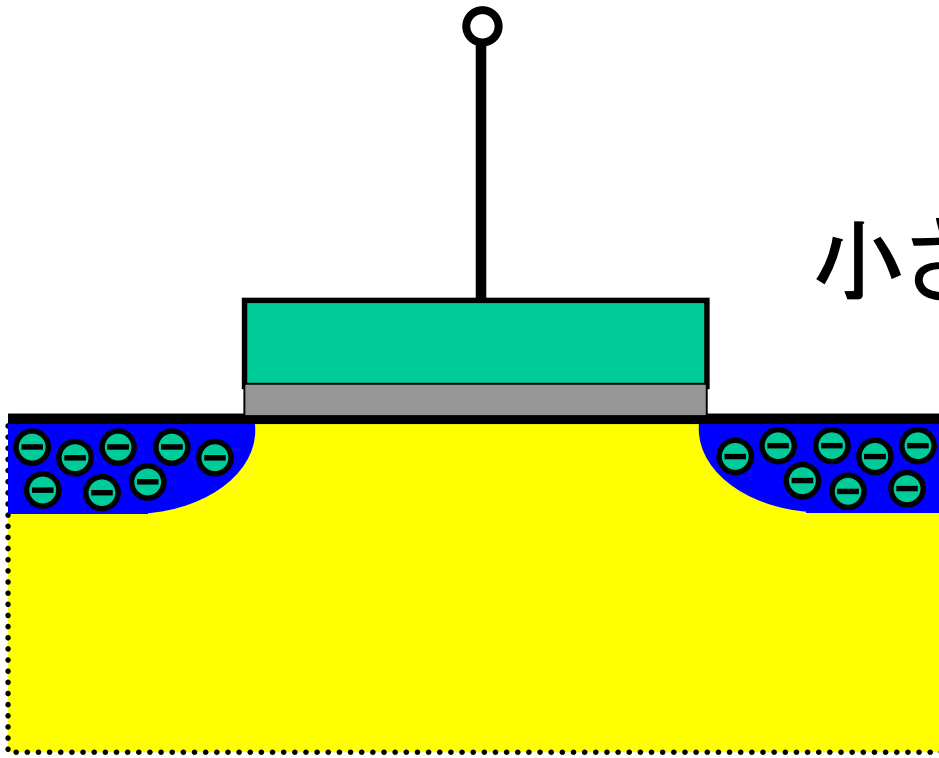


©Texas Instruments

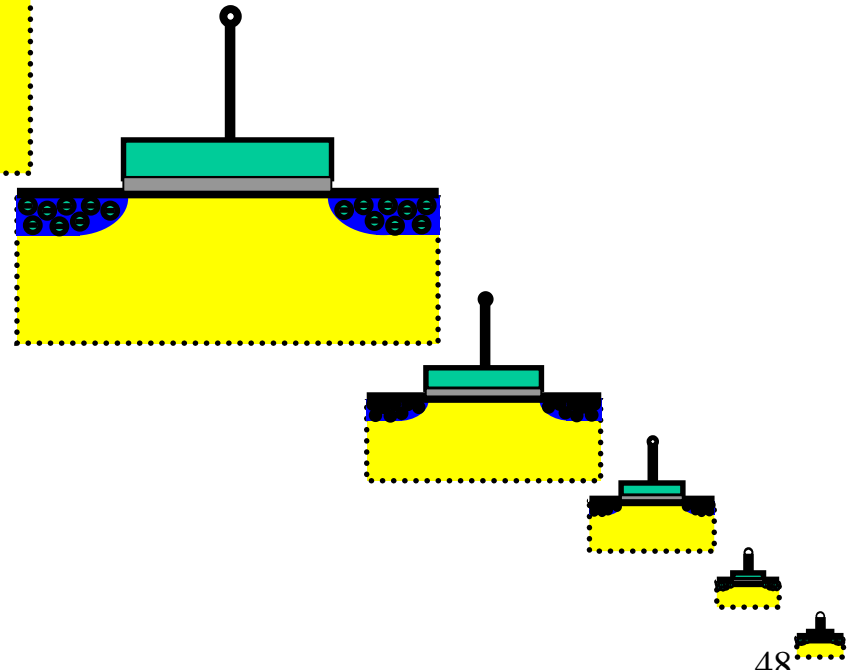
First Integrated Circuit - Jack Kilby invented the integrated circuit at Texas Instruments in 1958. Comprised of only a transistor and other components on a slice of germanium, Kilby's invention, 7/16-by-1/16-inches in size, revolutionized the electronics industry. The roots of almost every electronic device we take for granted today can be traced back to Dallas more than 40 years ago.

47

小さく、小さく、小さく、小さく.....

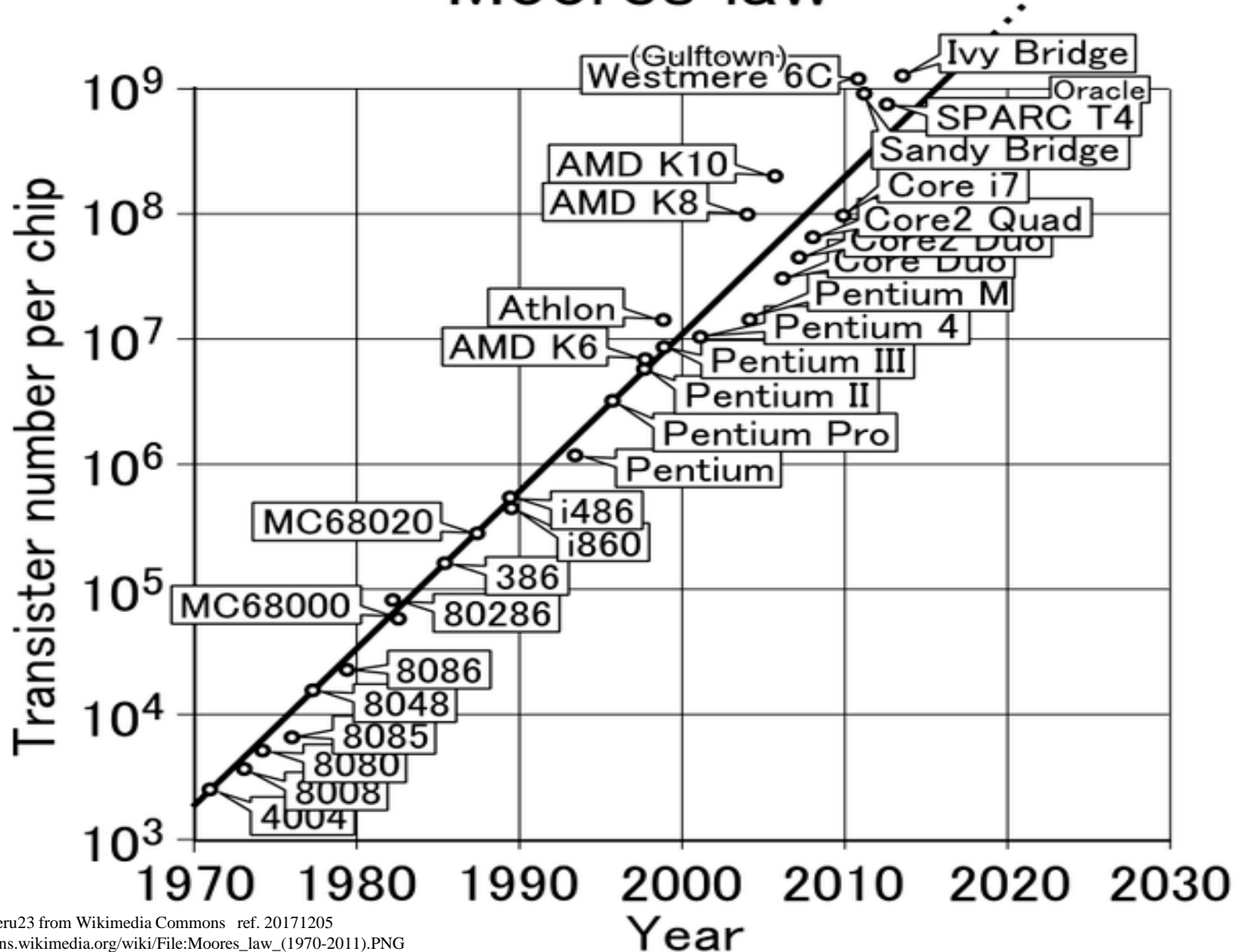


MOSTランジスタ



ムーアの法則

Moore's law



Graph by shigeru23 from Wikimedia Commons ref. 20171205
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moore's_law_\(1970-2011\).PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moore's_law_(1970-2011).PNG)
 CC BY-SA 3.0

MOSFET : トランジスタ構造の進化

Single Gate

Double Gate
(FinFET)

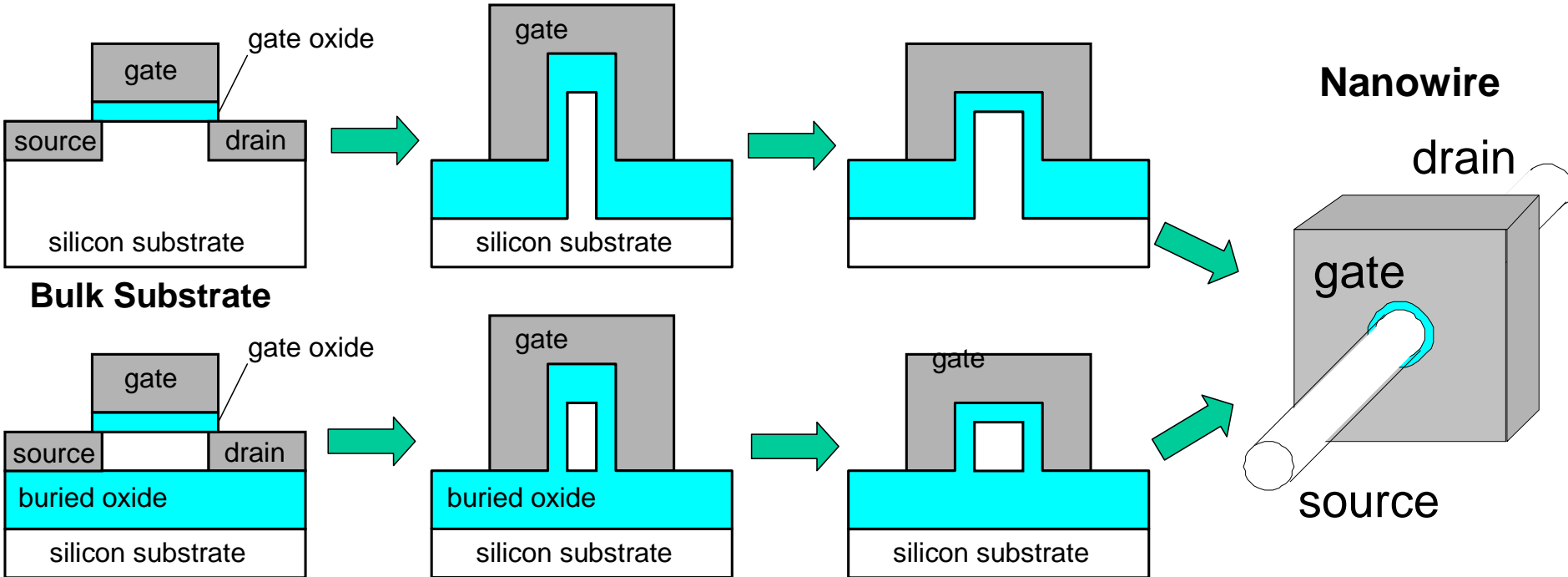
Tri Gate

Nanowire

drain

gate

source



Bulk Substrate

SOI Substrate

教科書的な
プレーな構造

FINFET 線幅
22 - 14nm 大量生産
10 - 7nm 研究、試作成功

近い将来
3次元的なナノ構造へ

量子力学、物性物理、材料科学/化学、デバイス物理、
電子工学、集積回路設計、システム、ソフトウェア...総合力が必要

半導体デバイス：比類なき技術革新のスピード 情報技術（IT）を支える原動力

指数関数的な成長（集積度と処理能力の向上）

- ・ **メモリー：3年で4倍**

10年で100倍、30年で100万倍！

1 K D R A M (1969) → 1 G D R A M (2001)

- ・ **プロセッサ：2年で2倍**

4004 (1971)： 2300個、0.06 MIPS

Pentium Pro (1996) 550万個、120 MIPS

(2400倍) (2000倍)

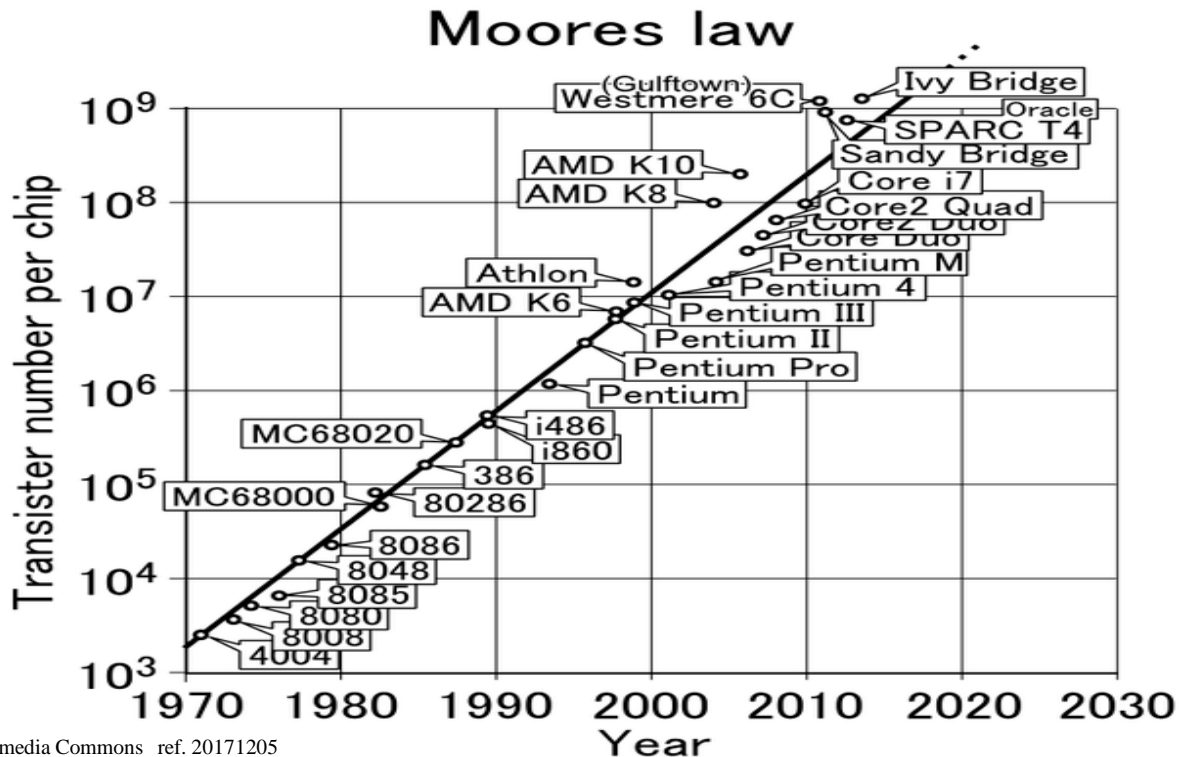
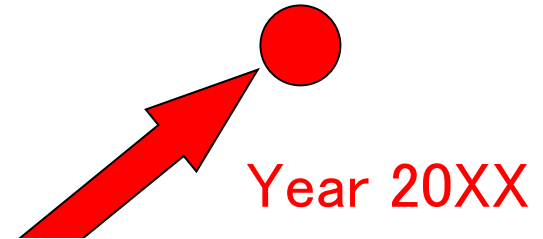
もし、自動車に同じスピードで技術革新が起きていたら...

T型Ford (1909) → 光速の100,000倍の速さの自動車

いずれ限界に直面する

Limitations due to:

- *Device physics*
- *Power dissipation*



限界を破るには...

原子レベルでの物質設計 “究極のものづくり” 物質科学からエレクトロニクスへのアプローチ

例1) 究極の不純物制御

Si (シリコン): 半導体エレクトロニクスの主役
電子デバイス・集積回路の主な材料

シリコン結晶の純度はどれくらいか？

「10~11 Nine」= 99. 999999999 %

100億~1000億個の原子のうち、不純物原子が1個以下

例2) 究極の物質設計: 原子を自在に操る

原子を並べてサンドイッチをつくる: 超格子、多層膜ヘテロ構造

ナノスケールの構造をつくり、電子状態(波動関数やスピン)を制御

すでに、高速トランジスタ、高性能半導体レーザとして

移動体通信、衛星通信、光通信システムに応用

強磁性体を用いた多層膜は、HDDの大容量化に貢献、不揮発性メモリにも応用

新しい材料とデバイスの技術、ナノサイエンス&ナノテクノロジーが システムを革新する

International Technology Road Map for Semiconductors (国際半導体技術ロードマップ): Emerging Research Devices

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

国際半導体技術ロードマップ

INTERNATIONAL TECHNOLOGY

ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS

[https://www.semiconductors.org/clientuploads/](https://www.semiconductors.org/clientuploads/Research_Technology/ITRS/2005/ERD.pdf)

[Research_Technology/ITRS/2005/ERD.pdf](https://www.semiconductors.org/clientuploads/Research_Technology/ITRS/2005/ERD.pdf)

Fig51

まとめ

■ 固体のバンド構造

- 2つのモデル: ①孤立した原子の軌道を組み合わせ分子軌道から考える強束縛電子モデルと、②自由電子に周期ポテンシャルを導入した準自由電子モデル
- 固体中の電子のエネルギーは、許容帯と禁制帯が交互に現れる。これをバンド構造(エネルギー帯構造)という。

■ 金属、半導体、絶縁体のバンド構造

- 金属はバンドの途中まで電子が占めている。絶縁体はあるバンドまでは完全に電子で占められ、その上のバンドは空である。
- 半導体は絶縁体と同様であるが、禁制帯幅 E_g が比較的小さい。不純物としてドナ(アクセプタ)を添加するとn型(p型)になる。

■ 半導体の応用

- 20世紀最大の発明「トランジスタ」: バイポーラトランジスタとMOS型電界効果トランジスタ(MOSFET)
- 集積回路とその微細化、ムーアの法則
- ムーアの法則後は? More than Moore, Beyond CMOS