

シリコン時代における技術の特徴

工学系研究科
マテリアル工学専攻

鳥海 明

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

「※: このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。」

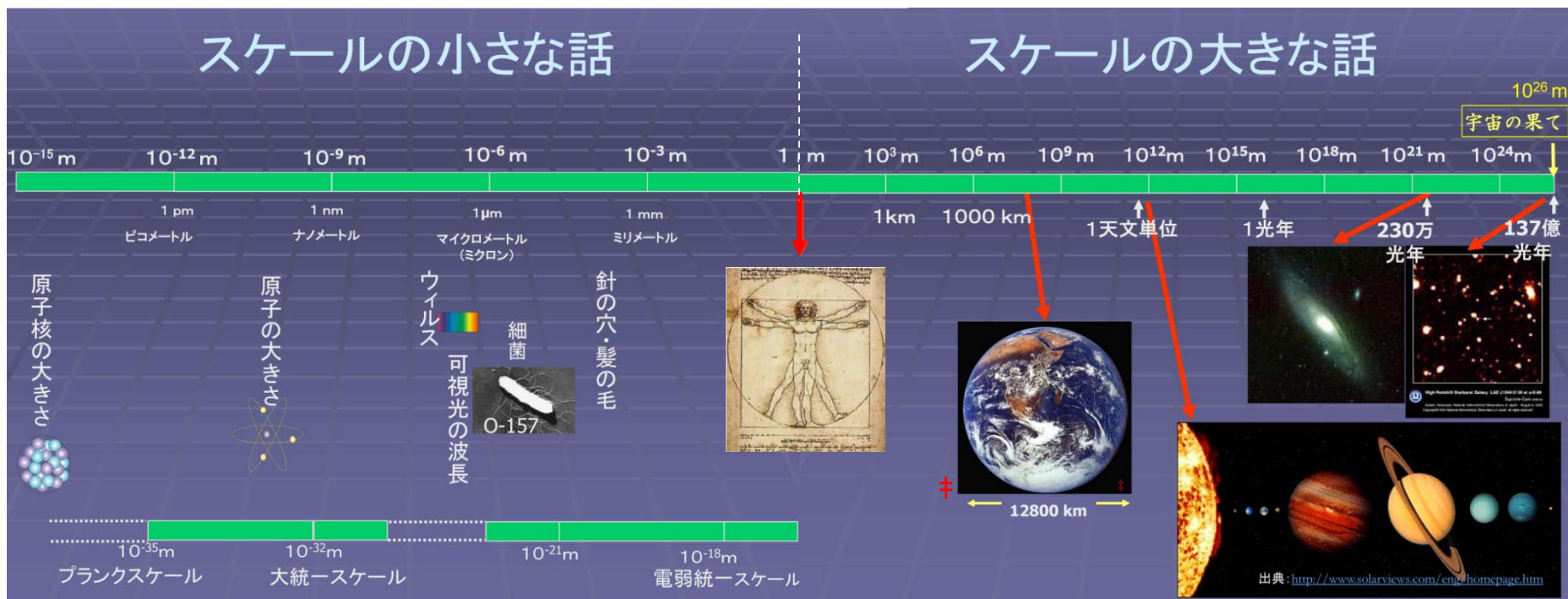
自然界のスケール

(家 先生講義資料より改変)

原子核
(10^{-15} m)

41桁の違い！

宇宙の果て
(10^{26} m)



原子
(10^{-10} m)

物質界

17桁

地球
(10^7 m)

巨視的世界と微視的世界はつながっている

ウロボロス:「尾を飲み込む蛇」を意味するギリシャ語

微視的世界 量子力学

- ・ 粒子性と波動性
- ・ プランク定数 h_p が重要な役割

巨視的世界

一般相対論

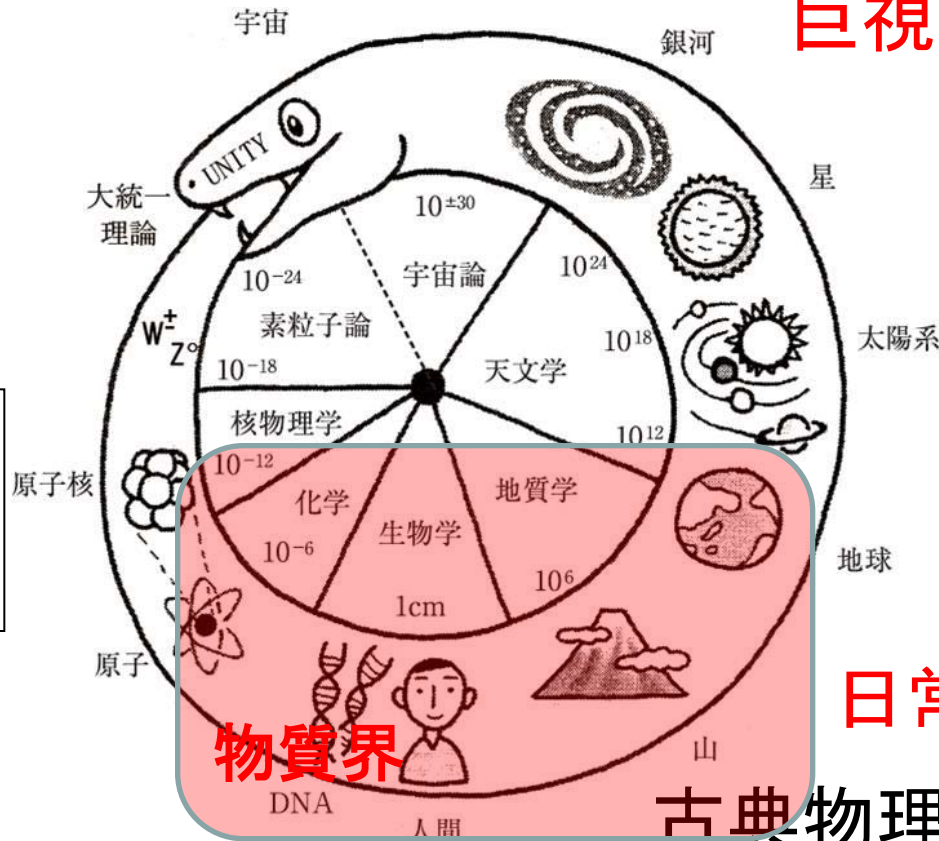
- ・ 時間、空間、物質の結びつき
- ・ 光速 c が無限大

とは見なせない

日常の世界

古典物理学(ニュートン力学)

- ・ 時間、空間、物質は独立な概念
- ・ $h_p \rightarrow 0$ ($c \rightarrow \infty$) の極限



※図の出典: 須藤靖『ものの大きさ』
東京大学出版会 2006年

イラスト: いずもり よう

物質界を把握する2つの軸

この軸に沿った講義の配置には特別な意味はない

人間・社会との関わり

統合性・応用の広がり

駒宮 家 小島

杉山

鳥海

小宮山

小関

理学(物理・化学)的な探求の広がり

10^{-10}

10^{-6}

10^{-2}

10^2

10^6

10^{10}

(m)

大きさ



物質界

図の出典: 須藤靖『ものの大きさ』
東京大学出版会 2006年

イラスト: いずもり よう

須藤

駒宮

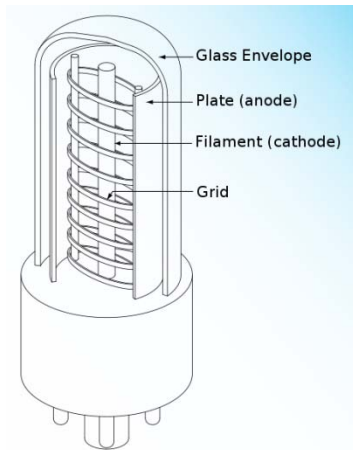
アウトライン

1. トランジスタからコンピュータへ
2. トランジスタの微細化・集積化
 1. シリコン、酸素、アルミ
 2. 結局トランジスタは何をしているのだろうか？
 3. 小さいこと、たくさんあることは、良いことだ！
3. 次のステップへむけて
 1. 三次元集積化
 2. 新材料への期待
 3. 新しい機能集積
4. 半導体技術と社会のつながり

真空管から電界効果トランジスタ (FET)へ

(1908)

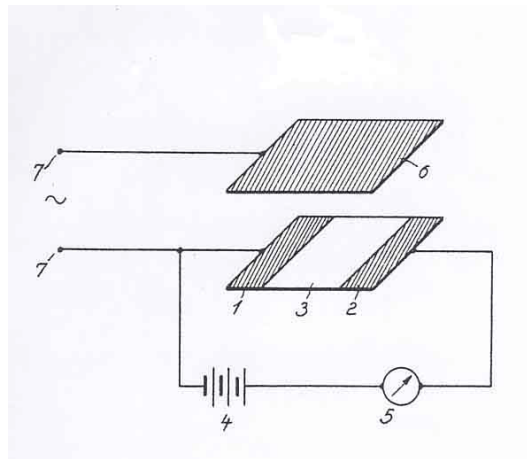
Lee De Forest



† http://en.wikipedia.org/wiki/File:Triode_tube_schematic.svg

(1935)

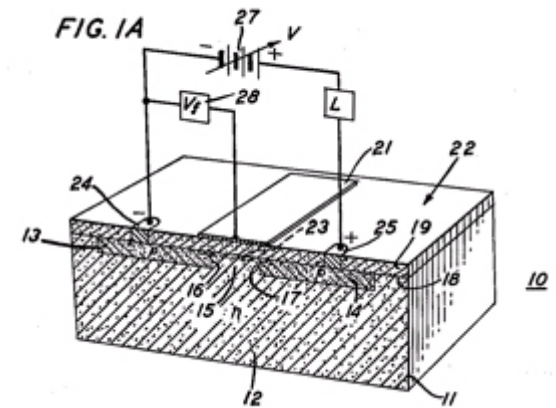
Osacar Heil



http://en.wikipedia.org/wiki/File:Heil_patent_figs.png

(1960)

Dawon Khang



<http://www.computerhistory.org/semiconductor/timeline/>

集積回路 (integrated circuit)

Jack Kilby (1958)

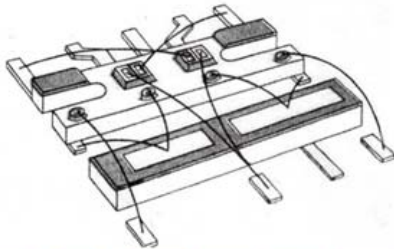


Robert Noyce (1960)



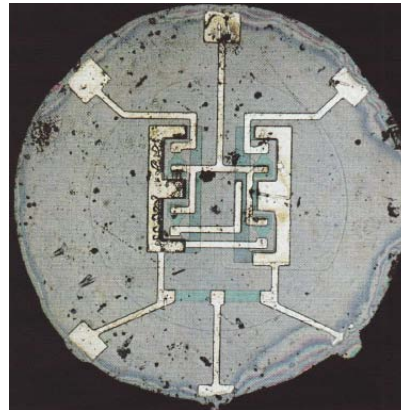
*Intel (45 nm quad core)
~10億トランジスタ*

†<http://www.computerhistory.org/semiconductor/timeline/>



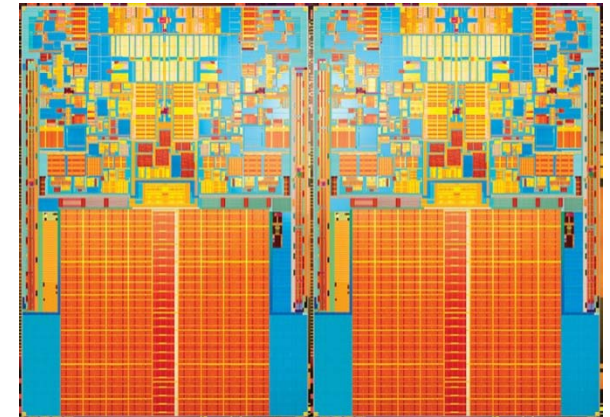
†"IEEE Computer Society"

<http://www.computer.org/portal/web/awards/noyce>



†"Image courtesy of Computer History Museum"

<http://www.computerhistory.org/semiconductor/timeline/1960-FirstIC.html>



†<http://www.intel.com/pressroom/kits/45nm/photos.htm>



†<http://www.computerhistory.org/semiconductor/timeline/1958-Miniaturized.html>

コンピューターの変化

ENIAC

Electronic Numerical Integrator and Computer

Pennsylvania University, Dec.1946



<http://www.seas.upenn.edu/about-seas/eniac/history.php>

‡17468 tubes, 70000 resistors, 10000 capacitors.
24mx2.5mx0.9m (WxHxD), 150kW

Mainframe Computer

IBM 360 (1964)



‡<http://www.computermuseum.li/Testpage/IBM-360-1964.htm>
IBM Corporate Archives

Solid Logic Technology

パーソナルコンピュータ (PC)の登場



Altair 8800, Intel 8080 (2MHz) (1974)
Micro Instrumentation and Telemetry Systems

⌘ http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Altair_8800.jpg



IBM PC5150 8088
4.77MHz (1981)

⌘ http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:IBM_PC_5150.jpg



Apple Macintosh, 8MHz
Macintosh128K(1984)

⌘ http://en.wikipedia.org/wiki/File:Macintosh_128k_transparency.png

NEC PC-9801, 8086
5MHz (1982)

PCを牽引してきた人

Bill Gates & Paul Allen



† http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bill_Gates_in_WEF_2007.jpg



† <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Paulallen.jpg>



http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ed_Roberts_2002_by_Spencer_Smith.jpg

Ed Roberts



† http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ed_Roberts_2002_by_Spencer_Smith.jpg

Steven Jobs



† http://en.wikipedia.org/wiki/File:Steve_Jobs_Headshot_2010-CROP.jpg



† http://en.wikipedia.org/wiki/File:Apple_I_Computer.jpg

Apple I (1976)

最初の “BASIC” Program (1976)

<http://ed-thelen.org/comp-hist/samp-collection.html>

そして現在は

Web Internet
Dispersion and Connection

YAHOO! Google
Amazon.com

Cloud Computing
Concentration and Connection

Personal Computer
Dispersion and Disconnection



Mainframe Computer
Concentration and Disconnection



† http://www-03.ibm.com/ibm/history/exhibits/mainframe/mainframe_PP2030.html

安延, 前川 & 田中, “ビッグトレンド” (アспект, 2009)

アウトライン

1. トランジスタからコンピュータへ
2. トランジスタの微細化・集積化
 1. シリコン、酸素、アルミ
 2. 結局トランジスタは何をしているのだろうか？
 3. 小さいこと、たくさんあることは、良いことだ！
3. 次のステップへむけて
 1. 三次元集積化
 2. 新材料への期待
 3. 新しい機能集積
4. 半導体技術と社会のつながり

シリコン集積回路を作っている基本材料



#NASA



シリコン

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Monokristalines_Silizium_für_die_Waferherstellung.jpg

#http://en.wikipedia.org/wiki/File:Monokristalines_Silizium_für_die_Waferherstellung.jpg

{

	Atom	Clarke #
1	O	49.5
2	Si	25.8
3	Al	7.56
4	Fe	4.7
5	Ca	3.39
6	Na	2.63
7	K	2.4
8	Mg	1.93
9	H	0.83
10	Ti	0.46
11	Cl	0.19
12	Mn	0.09
13	P	0.08
14	C	0.08
15	S	0.06
16	Na	0.03
17	F	0.03
18	Rb	0.03
19	Ba	0.023
20	Zr	0.02
21	Cr	0.02
22	Sr	0.02
23	V	0.015
24	Ni	0.01
25	Cu	0.01

そもそもスイッチとは？

ON



流れを良くせよ！

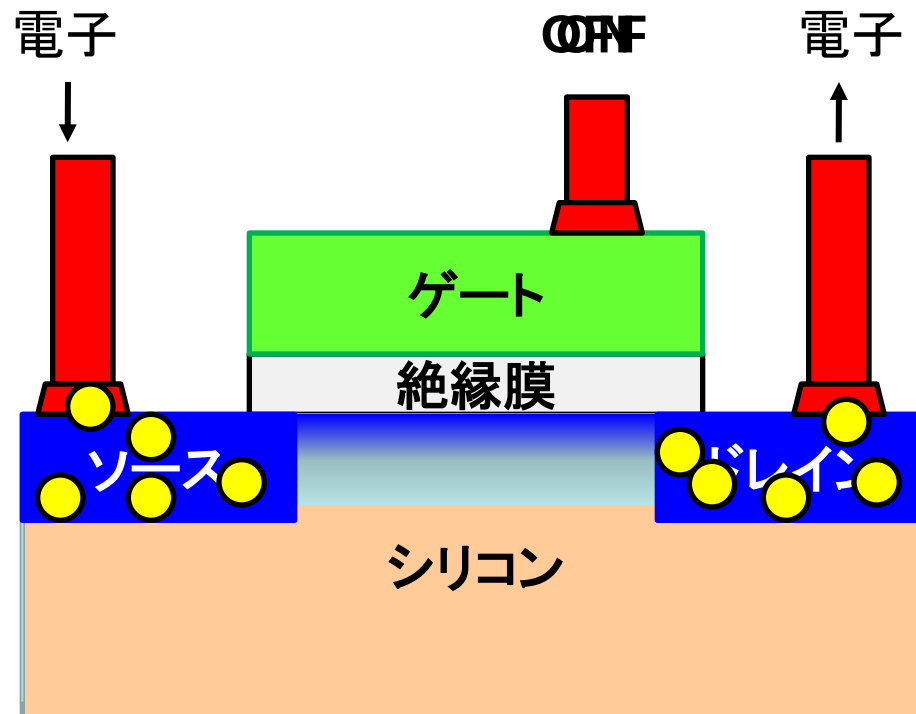
しっかり締めろ！

OFF



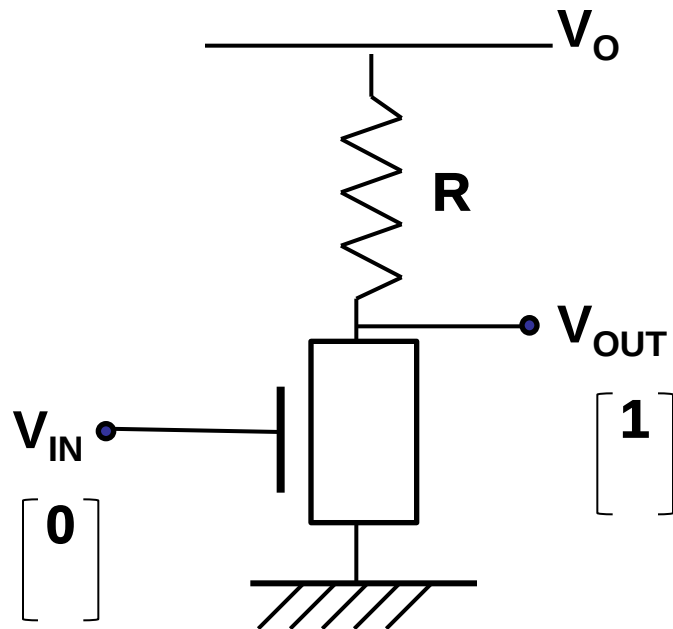
メリハリ(ON/OFF比)が大事！

現代の典型的スイッチ MOSFET

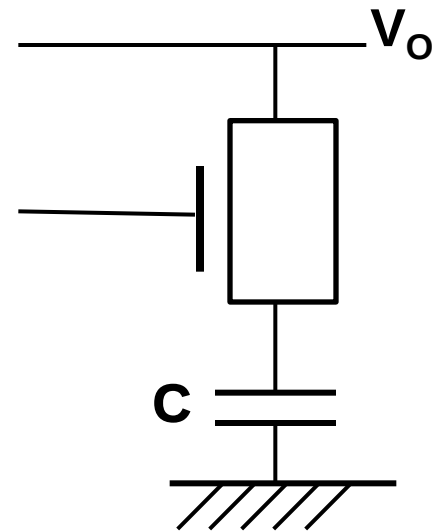


10桁以上のON/OFF比をとることができる！

スイッチをどう使う？



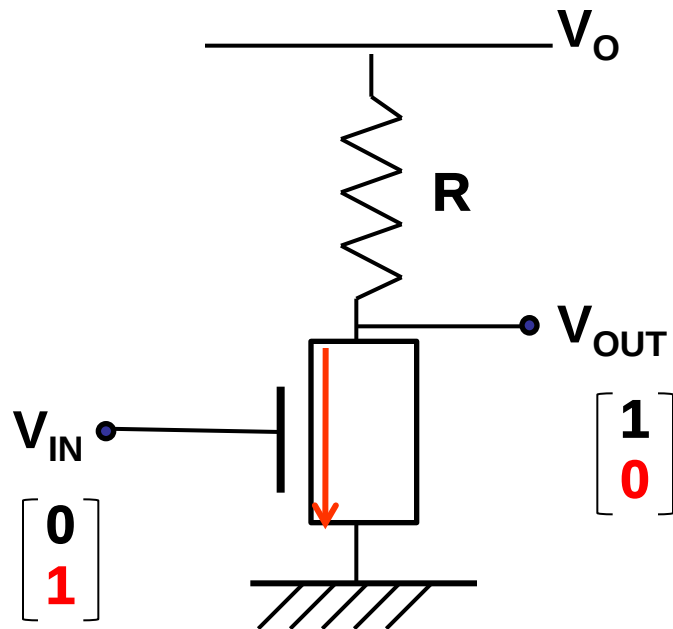
インバーター
(論理)



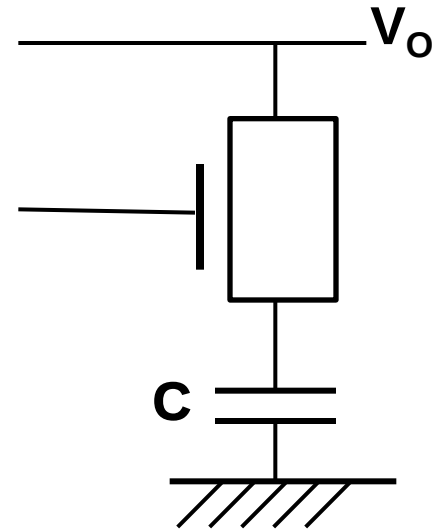
DRAM
(メモリー)

スイッチと抵抗とコンデンサーであらゆるデジタル処理をこなす。

スイッチをどう使う？



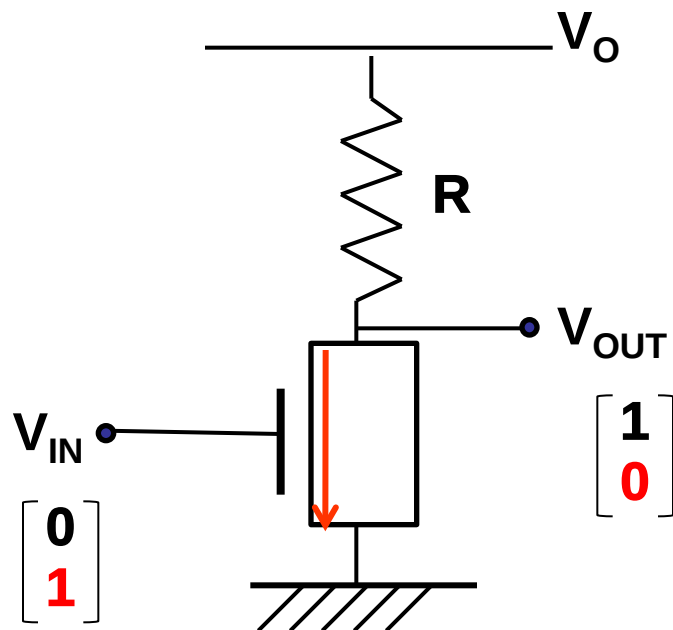
インバーター
(論理)



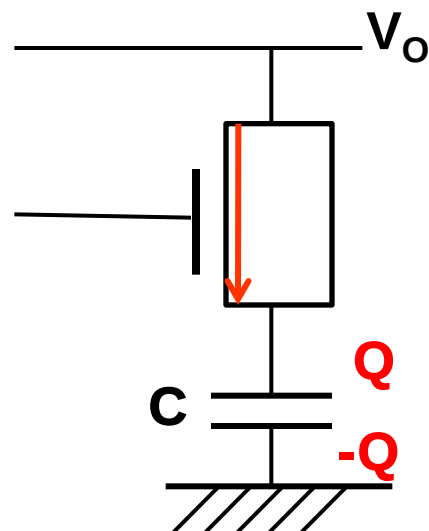
DRAM
(メモリー)

スイッチと抵抗とコンデンサーであらゆるデジタル処理をこなす。

スイッチをどう使う？



インバーター
(論理)



DRAM
(メモリー)

スイッチと抵抗とコンデンサーであらゆるデジタル処理をこなす。

現代シリコン技術の三つの指導原理

Moore's Law

Gordon Moore
(1965)



† intel

変化はすべて指数関数的

Scaling

Robert Dennard
(1974)



小さいものを正しく動作させる
には？

Roadmap

Paolo Gargini
(ITRS/2001)

次の具体的技術ターゲットは？

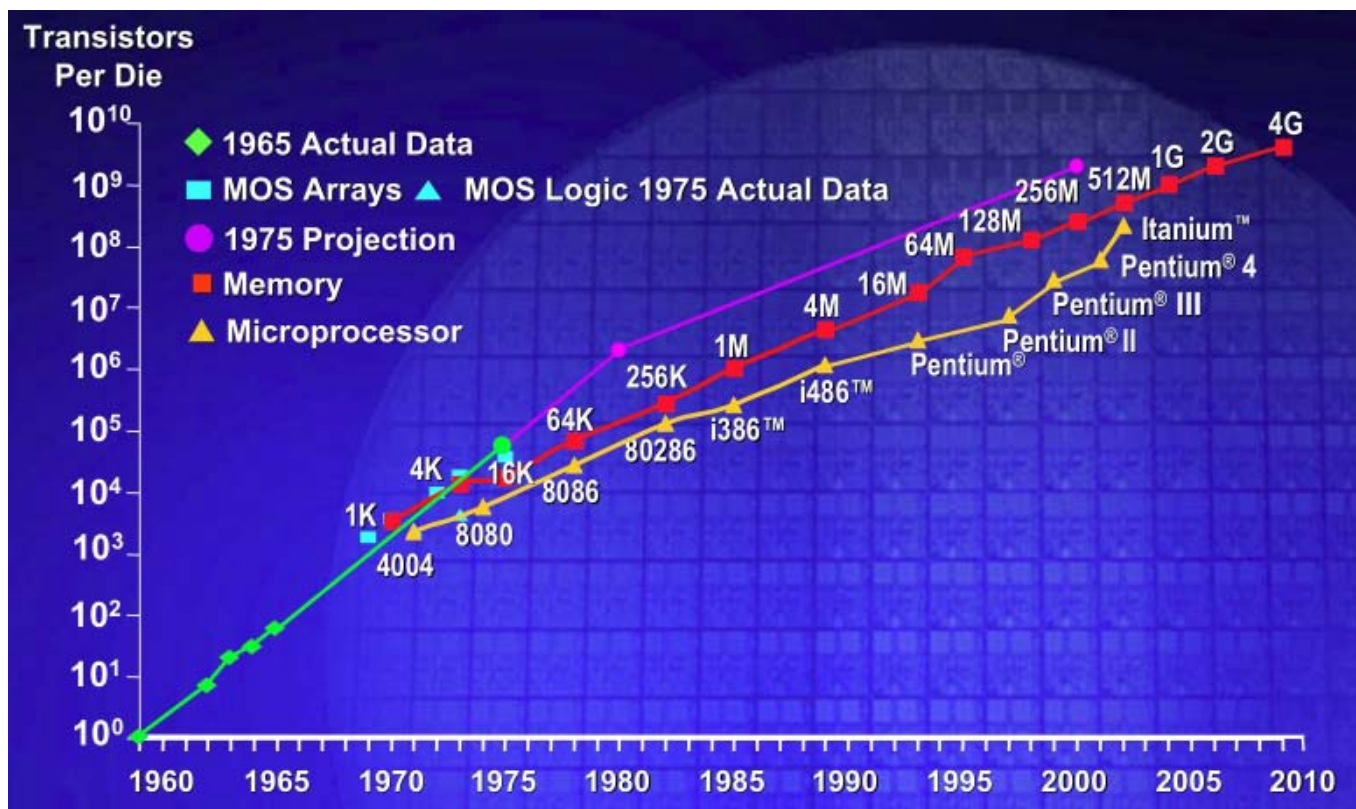
(NTRS/1992)

† intel

Mooreの法則



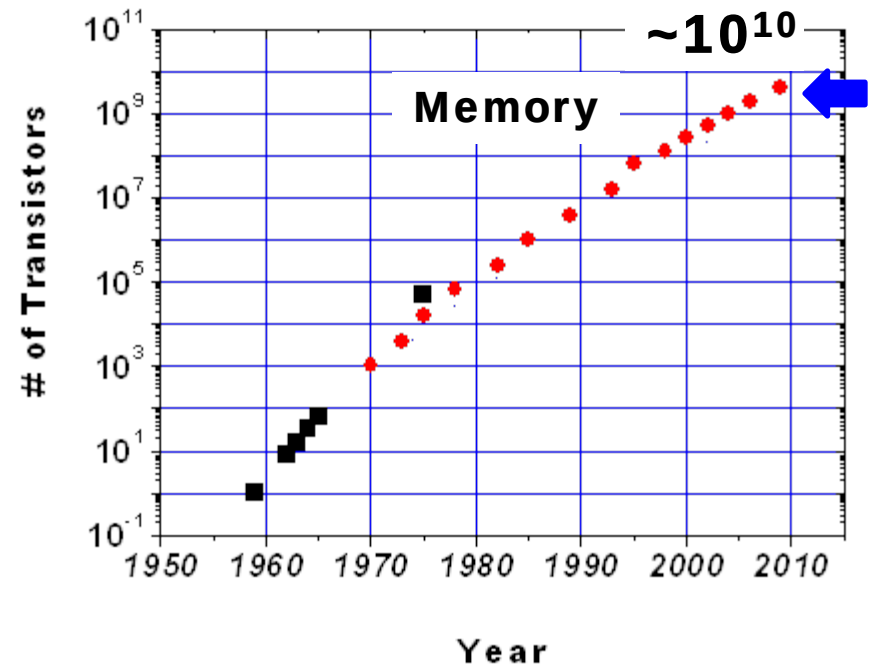
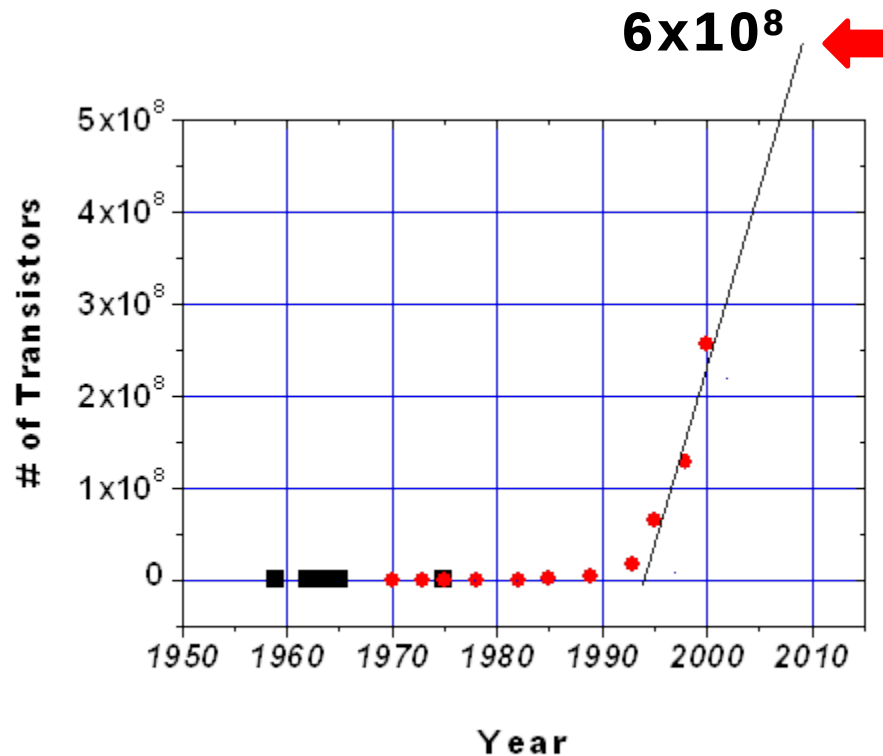
† <http://www.intel.com/technology/mooreslaw/>



† ftp://download.intel.com/research/silicon/Gordon_Moore_ISSCC_021003.pdf

近くでゆっくり、遠くで速く

Moore's Law



“We often mistake the future projection, because we forecast the future in the linear scale rather than in the actual exponential evolution” (R. Kurzweil).

比例縮小則(Scaling則)

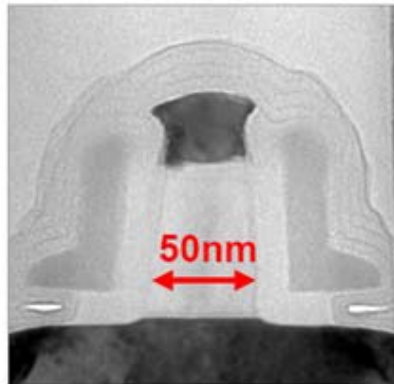
すべてのサイズと電圧を α 倍してみよう($\alpha < 1$)。(スケーリング)

素子面積	α^2 微細化
電圧	α
電界	1
FET電流	α
遅延時間	α 高速化
消費電力	α^2 低消費電力化

良いことだらけの技術！こんなおいしい事は滅多にない。
それでは何が問題なのか？

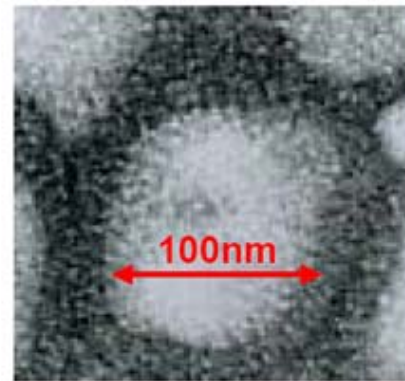
トランジスタはどのくらい小さいか？

すでにウィルスより小さい！
現在は45nmプロセスが実現



**Transistor for
90nm process**

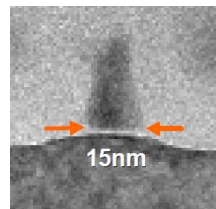
† 画像提供: インテル株式会社



Influenza virus

† Source: CDC

{Dr. Erskine Palmer, Centers for Disease Control and
Prevention Public Health Image Library}



† intel

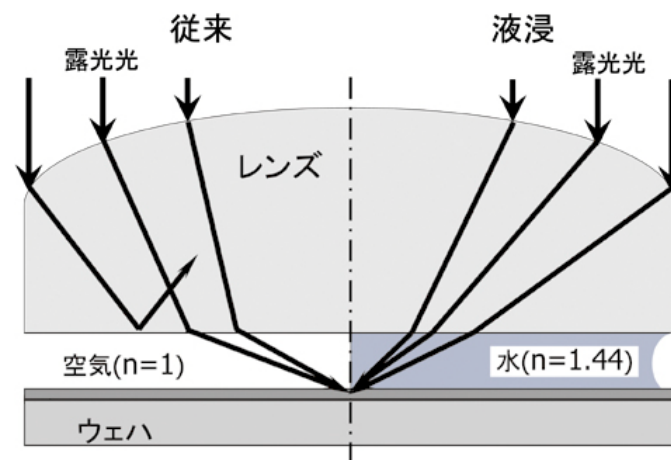
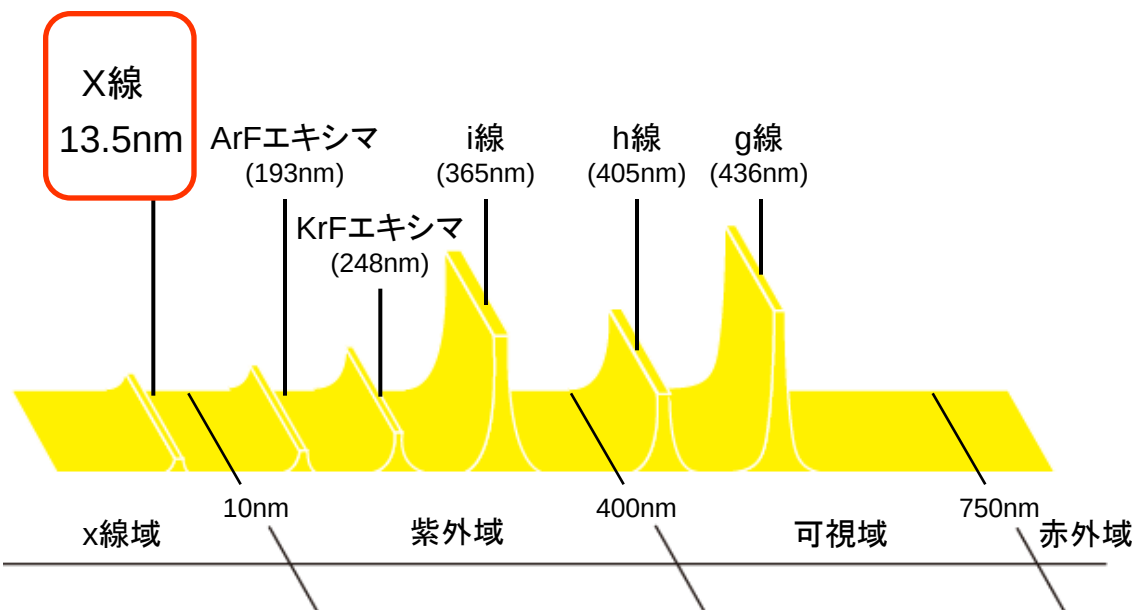
† 2008年【学術俯瞰講義】
多彩な物質の世界—宇宙から地球への遙かなる旅—
第12回 小宮山宏教授 講義資料より

小さいものをどのように作るか？

リソグラフィ

解像度(resolution) $R=k_1(\lambda/NA)$

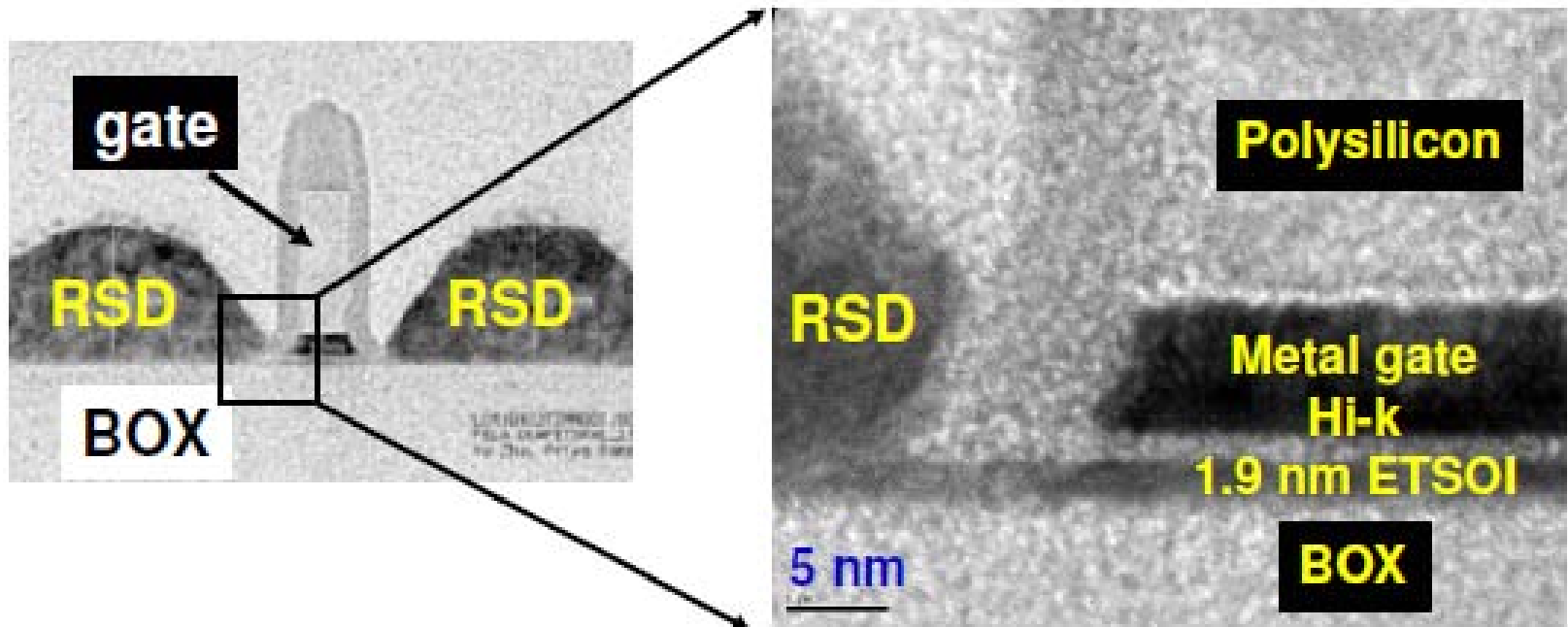
焦点深度(depth of focus) $DOF=k_2(\lambda/NA^2)$



✚ 内山貴之(2009)液浸リソグラフィの開発、
NEC技報、Vol.62 No.1 p.65

超薄シリコントランジスタ

シリコンの厚さは1.9nm !



† *K. Cheng et al., VLSI Symp. (2009)11A-3*

微細化による超省エネ・コンピューティング

Energy efficiency in computing

1997

1 TeraFLOPs in a room

Size: 2,75 m²

Power: 500,000 W



2007

1 TeraFLOPs on a chip

Size: 275 mm²

Power: 62 W



⌘ Source: HPC User Forum, 2008, Sandia National Lab.

ITRS 国際半導体技術ロードマップ

ITRS 2009 : MAIN FEATURES (1)



ITRS 2009 HP	Year	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Lgate HP	nm	29	27	24	22	20	18	17	15.3	14.0	12.8	11.7	10.7	9.7	8.9	8.1	7.4
Vdd	V	1.00	0.97	0.93	0.90	0.87	0.84	0.81	0.78	0.76	0.73	0.71	0.68	0.66	0.64	0.62	0.60
EOT, Bulk	nm	1	0.95	0.88	0.75	0.65	0.55	0.53									
..... SOI	"		-	-	-	0.7	0.68	0.60	0.57	0.57	0.54	0.5					
..... DG	"			-	-	-	-	0.77	0.7	0.67	0.64	0.62	0.59	0.57	0.55	0.53	0.5

ITRS 2009 LOP	Year	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Lgate LOP	nm	32	29	27	24	22	18	17	15.3	14.0	12.8	11.7	10.7	9.7	8.9	8.1	7.4
Vdd	V	0.95	0.95	0.85	0.85	0.8	0.8	0.75	0.75	0.7	0.7	0.65	0.65	0.6	0.6	0.6	0.6
EOT, Bulk	nm	1	0.9	0.9	0.85	0.8											
..... SOI				-	-	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7	0.65						
..... DG				-	-	-	-	0.8	0.8	0.75	0.73	0.7	0.7	0.65	0.65	0.6	0.6

ITRS 2009 LSTP	Year	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Lgate LSTP	nm	38	32	29	27	22	18	17	15.3	14.0	12.8	11.7	10.7	9.7	8.9	8.1	7.4
Vdd	V	1.05	1.05	1.05	1.00	0.95	0.95	0.95	0.85	0.85	0.85	0.85	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
EOT, Bulk	nm	1.2	1.2	1.2	1	0.9											
..... SOI					-	1	0.95	0.9	0.85	0.8							
..... DG					-	-	-	1.1	1.1	1	1	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7

問題点の明確化
困難度の明示
優先順位の明確化



† intel

Thomas Skotnicki

IEDM 2010 Short Course • CMOS Technologies – Trends, Scaling and Issues

†

しかし、危機は近づいている！

著作権上の都合により
ここに挿入されていた図表は
削除致しました。

■ 2001 ~ several 10W/cm²



Hot plate

■ 2006 ~ several 100W/cm²



Nuclear reactor

■ 2010 ~ several kW/cm²

■ 2016 ~ several 10kW/cm²



the Sun

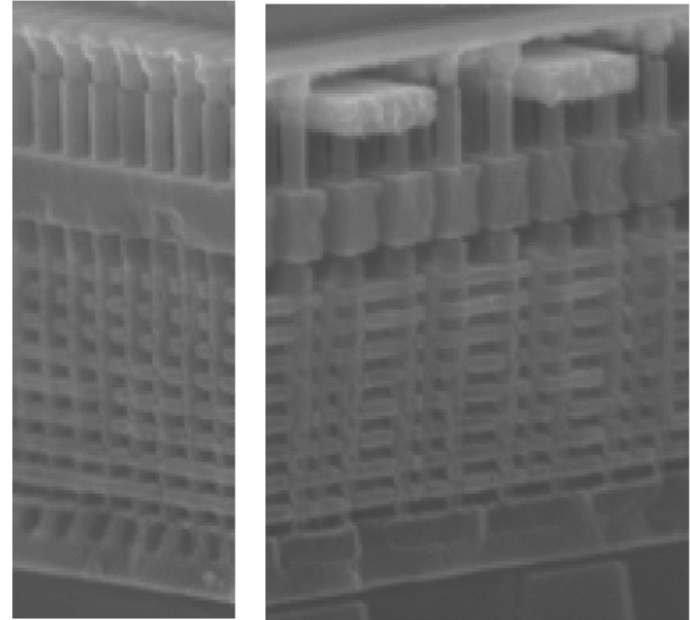
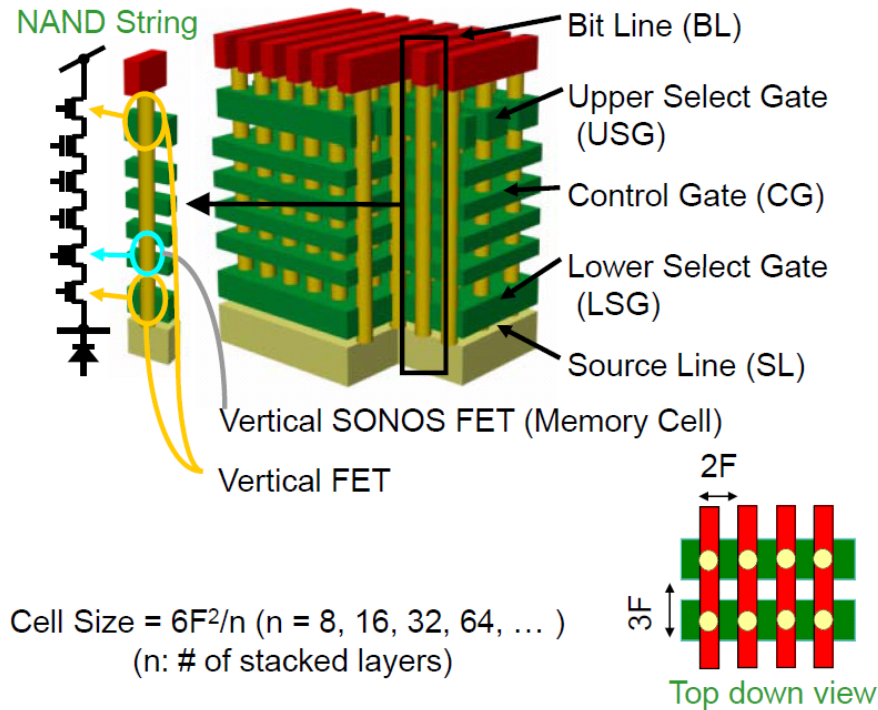
‡ Provided by Dr. Thomas Y. Hoffmann

アウトライン

1. トランジスタからコンピュータへ
2. トランジスタの微細化・集積化
 1. シリコン、酸素、アルミ
 2. 結局トランジスタは何をしているのだろうか？
 3. 小さいこと、たくさんあることは、良いことだ！
3. 次のステップへむけて
 1. 新しい材料は何を変えるか？
 2. 新しい集積化と新しい機能に実現
4. 半導体技術と社会のつながり

現実に進む三次元集積化

三次元フラッシュメモリー



‡ A. Nitayama, IEDM (2009) SC

ちょっと休憩 / 各種USBメモリー



⌘ http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:PC_Mass_storage_device_USB_flash_drives.jpg



⌘ 株式会社ソリッドアライアンス



⌘ 株式会社ソリッドアライアンス



⌘ [http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Sushi_USB_Memory_\(1066586\).jpg](http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:Sushi_USB_Memory_(1066586).jpg)



⌘ 株式会社ソリッドアライアンス

USB : Universal Serial Bus

トランジスタ材料の変更

単位時間当たりは何個の電子が流れるかが電流。

$$[A] = [Coulomb / sec]$$

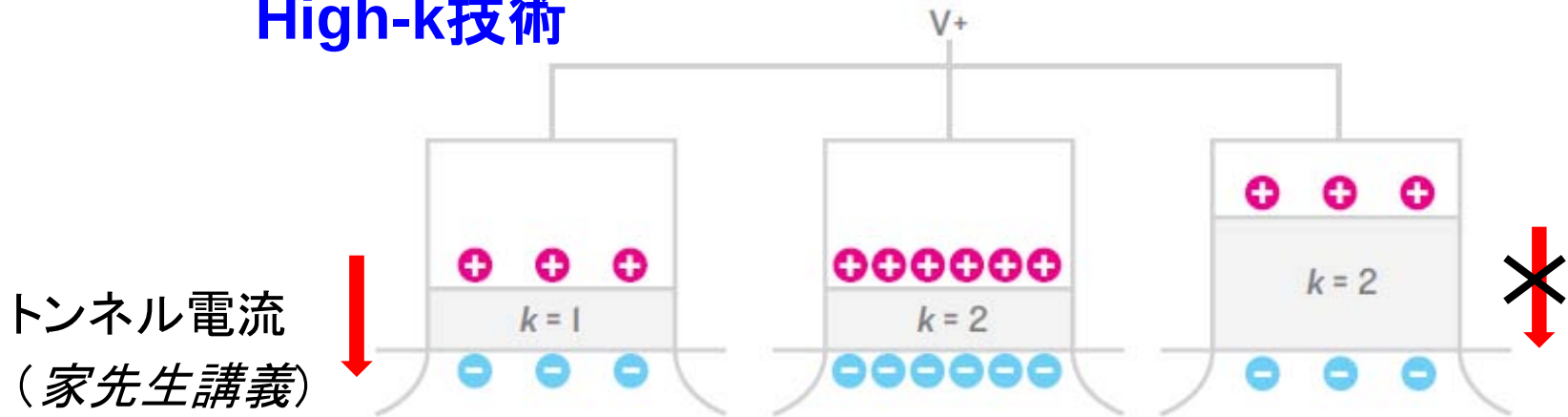
$$\begin{aligned} J &= nev \\ &= ne\mu \cdot E \quad (v = \mu E) \end{aligned}$$

FETの高性能化への要求

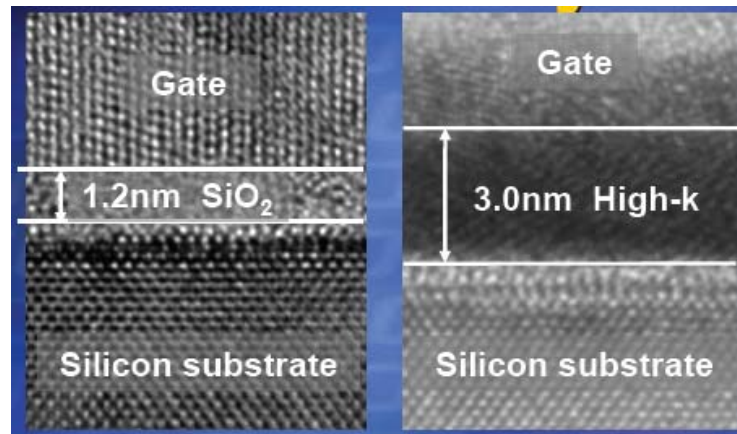
電荷の量(n)と移動度(μ)

等価的に絶縁膜を薄く (Equivalent Scaling)

High-k技術



SiO_2



HfO_2

† M. Bohr et al., *IEEE Spectrum* Oct. (2007) p. 29.

トンネル電流を抑えつつ、容量を上げる

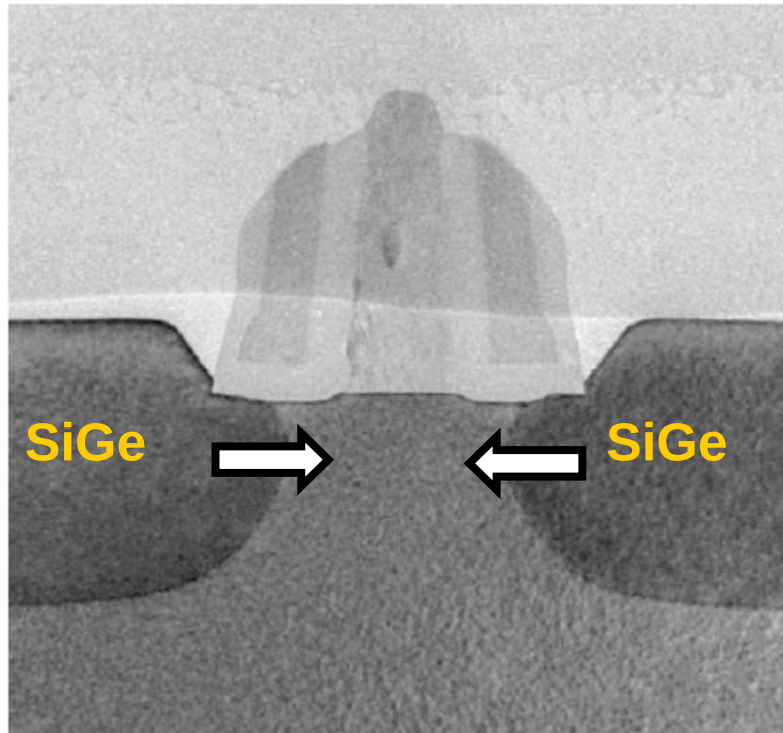
周期表

1																	18
1 <u>H</u>	2											13	14	15	16	17	2 <u>He</u>
3 <u>Li</u>	4 <u>Be</u>											5 <u>B</u>	6 <u>C</u>	7 <u>N</u>	8 <u>O</u>	9 <u>F</u>	10 <u>Ne</u>
11 <u>Na</u>	12 <u>Mg</u>	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 <u>Al</u>	14 <u>Si</u>	15 <u>P</u>	16 <u>S</u>	17 <u>Cl</u>	18 <u>Ar</u>
19 <u>K</u>	20 <u>Ca</u>	21 <u>Sc</u>	22 <u>Ti</u>	23 <u>V</u>	24 <u>Cr</u>	25 <u>Mn</u>	26 <u>Fe</u>	27 <u>Co</u>	28 <u>Ni</u>	29 <u>Cu</u>	30 <u>Zn</u>	31 <u>Ga</u>	32 <u>Ge</u>	33 <u>As</u>	34 <u>Se</u>	35 <u>Br</u>	36 <u>Kr</u>
37 <u>Rb</u>	38 <u>Sr</u>	39 <u>Y</u>	40 <u>Zr</u>	41 <u>Nb</u>	42 <u>Mo</u>	43 <u>Tc</u>	44 <u>Ru</u>	45 <u>Rh</u>	46 <u>Pd</u>	47 <u>Ag</u>	48 <u>Cd</u>	49 <u>In</u>	50 <u>Sn</u>	51 <u>Sb</u>	52 <u>Te</u>	53 <u>I</u>	54 <u>Xe</u>
55 <u>Cs</u>	56 <u>Ba</u>	*1	72 <u>Hf</u>	73 <u>Ta</u>	74 <u>W</u>	75 <u>Re</u>	76 <u>Os</u>	77 <u>Ir</u>	78 <u>Pt</u>	79 <u>Au</u>	80 <u>Hg</u>	81 <u>Tl</u>	82 <u>Pb</u>	83 <u>Bi</u>	84 <u>Po</u>	85 <u>At</u>	86 <u>Rn</u>
87 <u>Fr</u>	88 <u>Ra</u>	*2	104 <u>Rf</u>	105 <u>Db</u>	106 <u>Sg</u>	107 <u>Bh</u>	108 <u>Hs</u>	109 <u>Mt</u>	110 <u>Ds</u>	111 <u>Rg</u>	112 <u>Uub</u>	113 <u>Uut</u>	114 <u>Uuq</u>	115 <u>Uup</u>	116 <u>Uuh</u>	117 <u>Uus</u>	118 <u>Uuo</u>

57 <u>La</u>	58 <u>Ce</u>	59 <u>Pr</u>	60 <u>Nd</u>	61 <u>Pm</u>	62 <u>Sm</u>	63 <u>Eu</u>	64 <u>Gd</u>	65 <u>Tb</u>	66 <u>Dy</u>	67 <u>Ho</u>	68 <u>Er</u>	69 <u>Tm</u>	70 <u>Yb</u>	71 <u>Lu</u>
89 <u>Ac</u>	90 <u>Th</u>	91 <u>Pa</u>	92 <u>U</u>	93 <u>Np</u>	94 <u>Pu</u>	95 <u>Am</u>	96 <u>Cm</u>	97 <u>Bk</u>	98 <u>Cf</u>	99 <u>Es</u>	100 <u>Fm</u>	101 <u>Md</u>	102 <u>No</u>	103 <u>Lr</u>

シリコンの物性を変えてしまおう！

歪みシリコン技術



$$\mu = \frac{q \langle \tau \rangle}{m_{\text{eff}}}$$

結晶を歪ませることによって

- ① 散乱確率 $\langle \tau \rangle$ を変える
- ② 有効質量 m_{eff} を変える

結果として μ を大きくする！

‡ T. Ghani et. al. IEDM, 2003

シリコンからの旅立ちはあるか？

個別の性質が優れているものが現実に使われるわけではない ！

	Ge	Si	GaAs	InAs	graphene
移動度, 電子	3,900	1,600	9,200	40,000	>10,000
移動度, 正孔	1,900	430	400	500	>10,000
バンドギャップ	0.66	1.12	1.42	0.36	0
誘電率	16	11.8	12	14.8	

1950~ ↓

1980~ ↓

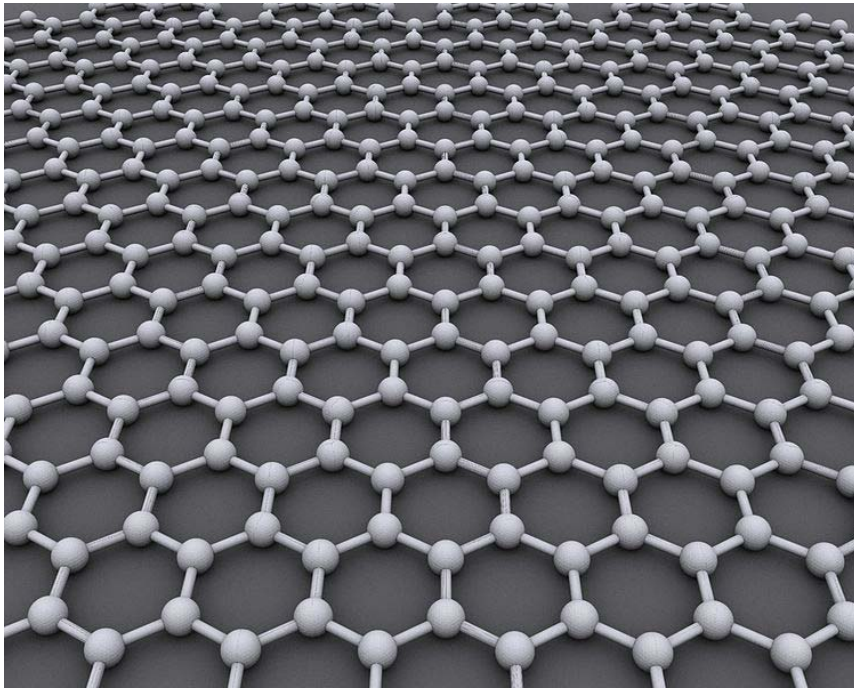
2005~ ↗

Ge ↗
InGaAs ↗

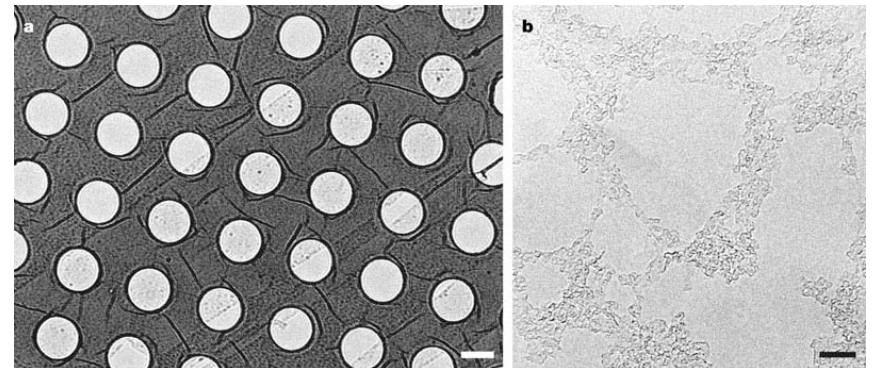
1960~ →

グラフェンって何？

ノーベル物理学賞 (2010)

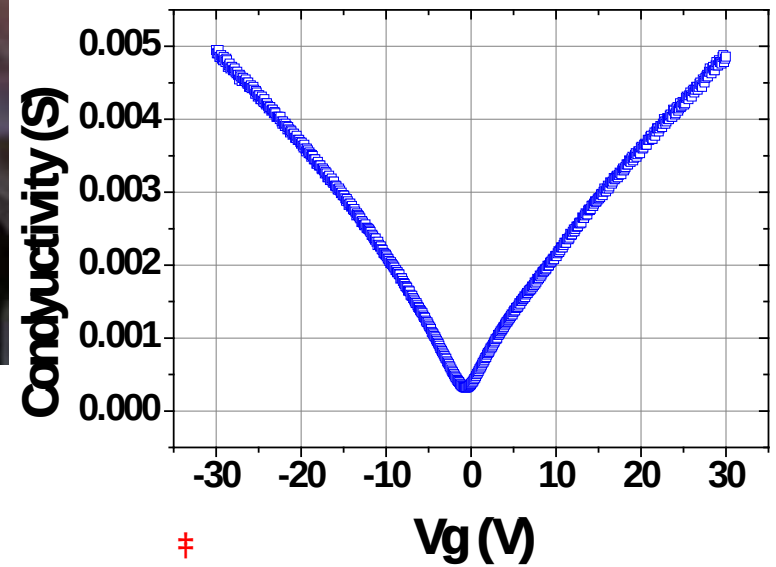
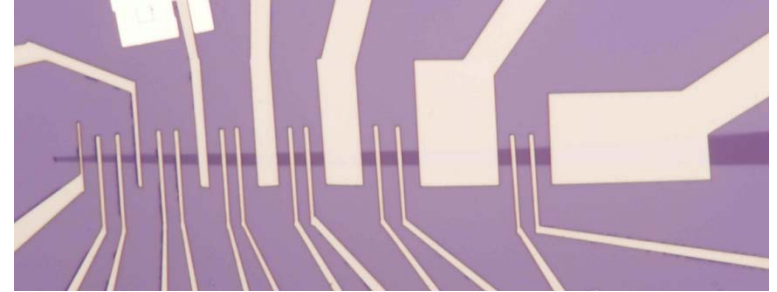


<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Graphen.jpg>



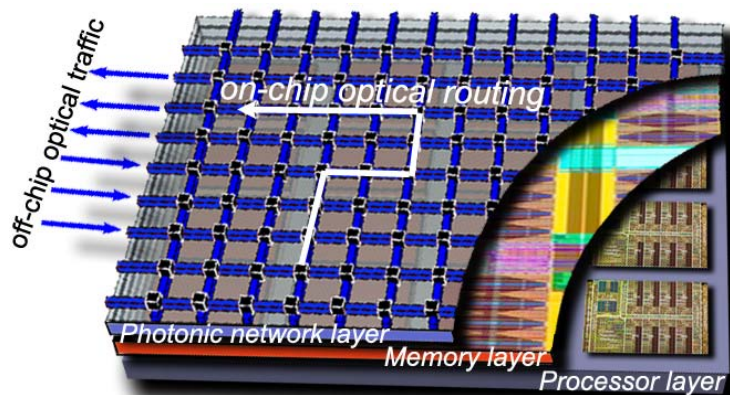
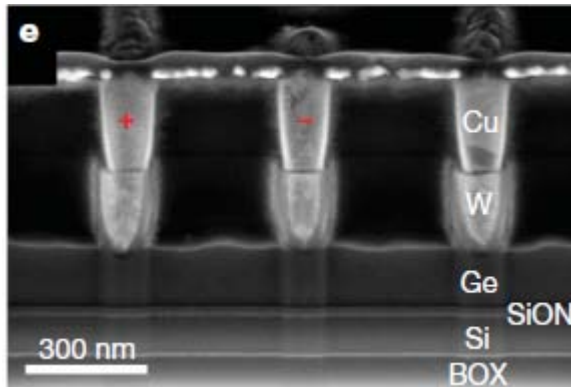
透過電子顕微鏡写真(TEM)

“先端剝離”技術！

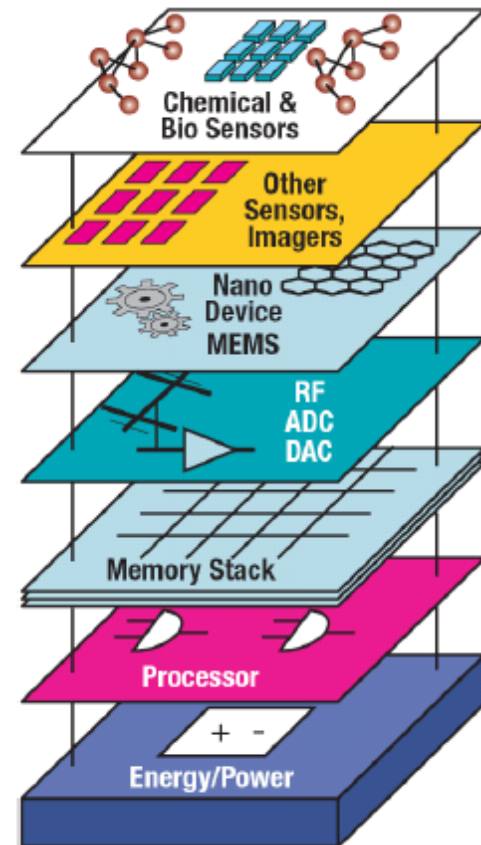


三次元機能集積化

ナノフォトニクススイッチ



三次元超集積



‡ S. Assefa et al., *Nature* 464(2010)80.

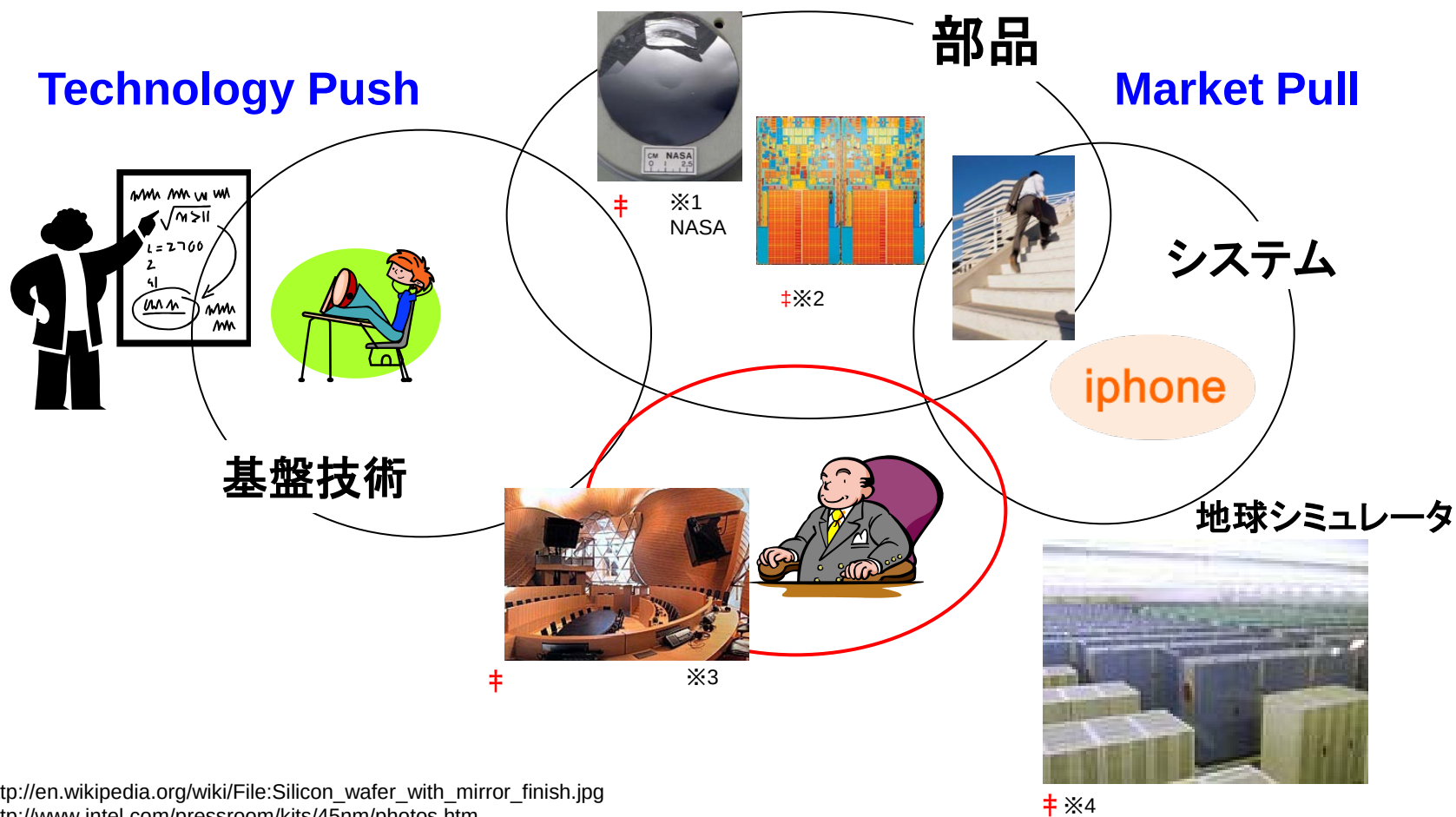
‡ J. -Q. Lu, *Proc. IEEE* 97 (2009)18.

アウトライン

1. トランジスタからコンピュータへ
2. トランジスタの微細化・集積化
 1. シリコン、酸素、アルミ
 2. 結局トランジスタは何をしているのだろうか？
 3. 小さいこと、たくさんあることは、良いことだ！
3. 次のステップへむけて
 1. 三次元集積化
 2. 新材料への期待
 3. 新しい機能集積
4. 半導体技術と社会のつながり

半導体の研究から応用へ

魔の川～死の谷～ダーウィンの海



※1 http://en.wikipedia.org/wiki/File:Silicon_wafer_with_mirror_finish.jpg

※2 <http://www.intel.com/pressroom/kits/45nm/photos.htm>

※3 <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gehry.jpg>

※4 <http://ja.wikipedia.org/wiki/ファイル:EarthSimulator.jpg>

日本のおかれている状況？

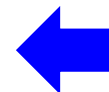
日経新聞20070326

著作権の都合で画像を削除しました。

日経新聞 2007年03月26日
夕刊 19面（夕&Eye）
ニッキィの大疑問
半導体 日本の実力は？

シリコン時代における技術の特徴 (1)

人を単純作業から解放
人のできない高度作業の実現



自動化
高精度デジタル処理

物流(食料管理)
文化(同時通訳)
医療(遠隔治療)
安全(無人交通)

・
・

情報の伝達と処理
の同時性

警察内部文書
尖閣のYouTube
WikiLeaks

格差の拡大
デジタルデバイド

利便性から同時性・高信頼性という新しいパラダイム

シリコン時代における技術の特徴 (2)

先に述べた事項は単に半導体技術だけの問題ではなく、国の有り様といったきわめて政治的な問題とも結びついている。

半導体技術は、ある機能を発揮する臓器というよりも、現代社会の中ではすでに血液であり神経を構成しており、超高度科学技術インフラとしての役割もきわめて高い。

その基盤を構築・維持・展開するために半導体技術は物理・化学の最先端を追い続け、物理・化学はその技術を使うことでさらに深い物理・化学を極めている。このことは半導体技術をどのように扱うかは、一技術の限界論の問題ではなく、社会をどのように成り立たせるかという血液・神経の活性化の問題であることを意味している。

工学は、まずはサイズの大きな等身大の大きさの技術開発から始まって、物理化学の知識を使いながら、次第に宇宙空間あるいはナノの世界へ手を伸ばしはじめている。ここが工学の面白さであり醍醐味である。

そのインフラとしての鉄と半導体という材料は、産業力として多くの問題も抱えているが、体で言えば骨格であり血液であり神経であるという点において人間社会と強く結びついた基盤技術と言える。