情報科学入門

#7 素子技術の発展・半導体製造業

Yutaka Yasuda

繰り返し処理

- (一般的) コンピュータの特長
  - 単純な装置で複雑な処理を可能にする
- 役割分担の存在
  - ハードウェアは単純・高速に
  - 複雑さはソフトウェアで実現
  - 複雑な処理は単純な処理の組み合わせや繰り返しに分解
- これがハードウェアに高速性が求められる理由

素子技術

- 演算（計算）する回路＝単純な回路（素子）の集合体
- 素子

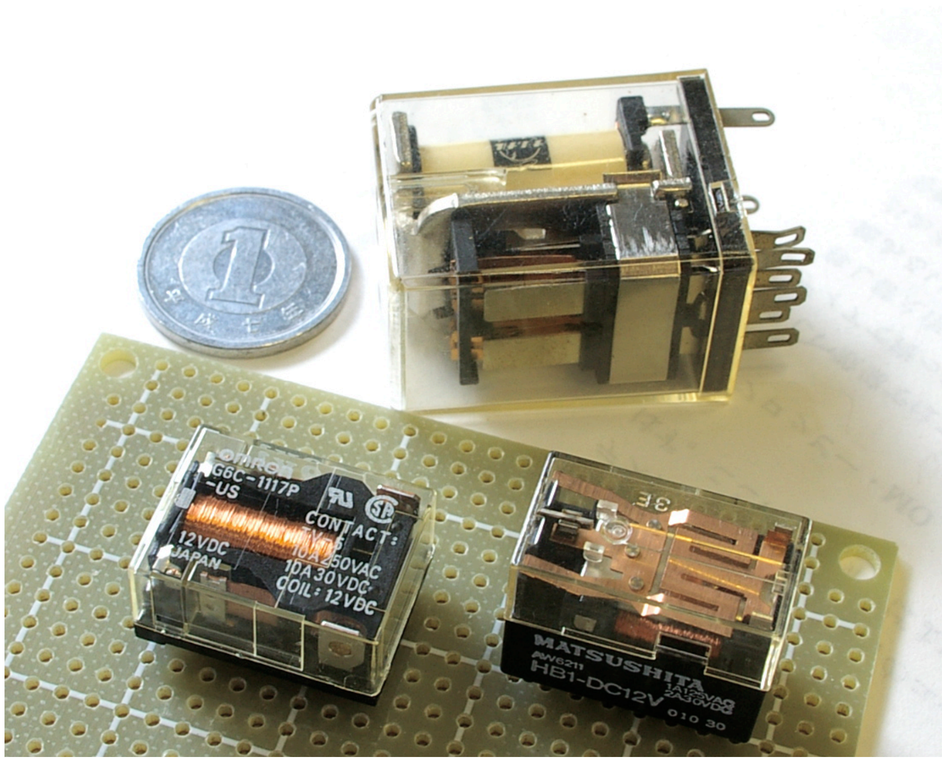
  最低単位となる計算を実現するもの

  これを繰り返せば必要な解を得られる
- 最小の回路単位：AND, OR, NOT 回路

  スイッチ（リレー）で実現できる

リレー

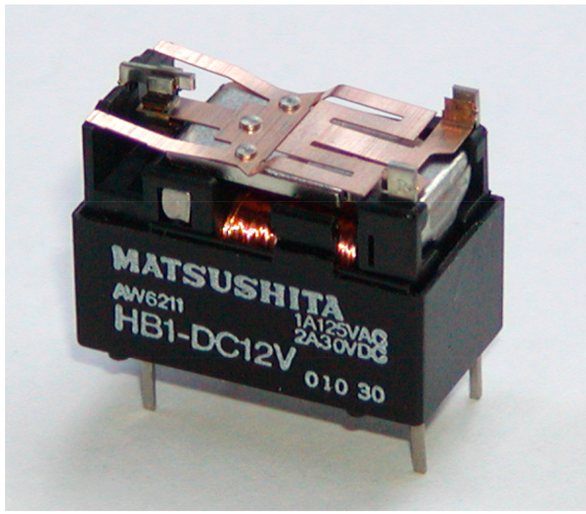
- 機械より早くできるもの
- リレー（電気スイッチ）を利用する



小型リレー

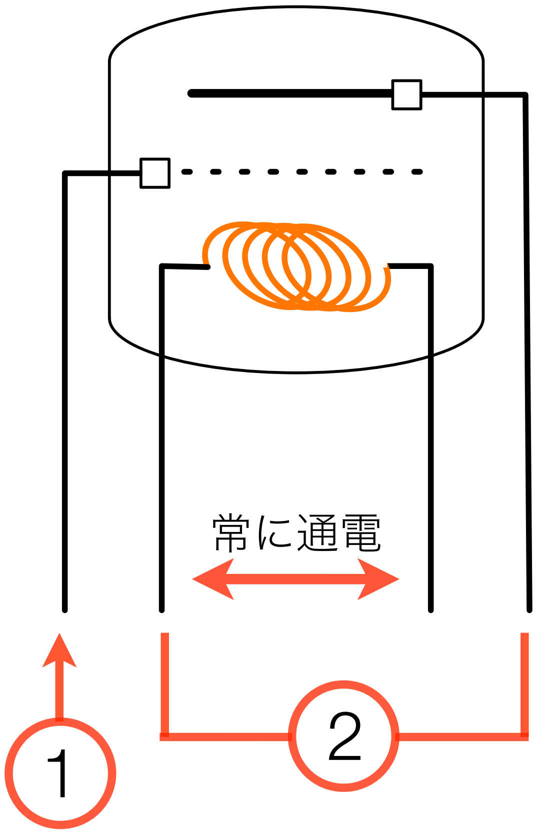
スイッチング回路

- 論理関数(AND, OR, NOT）が実現できれば良い
- リレーに限らず、スイッチとして機能すれば良い
- 切り替えに必要な時間が短ければ短いほど良い
- 素子：最低単位のスイッチ

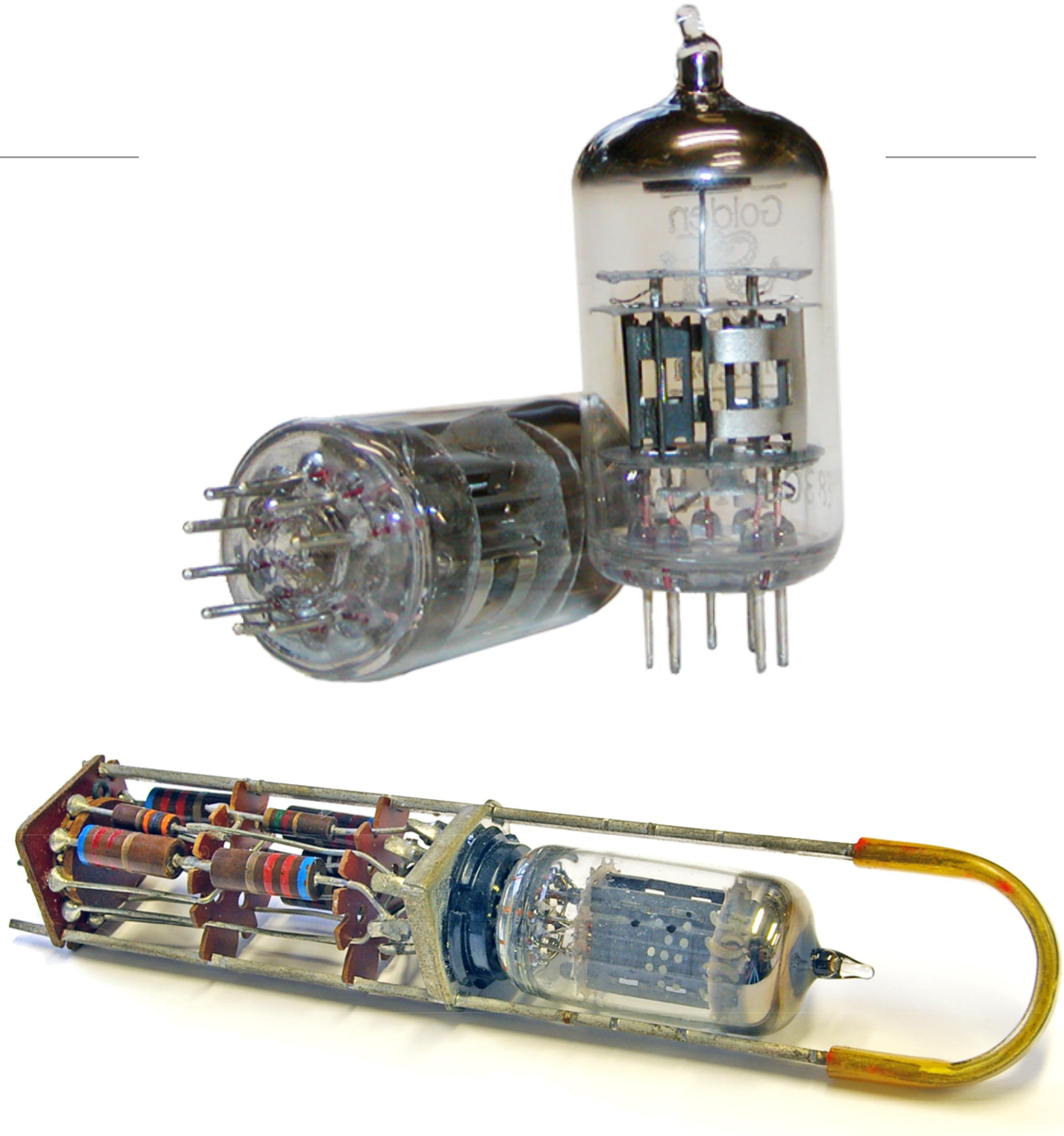


リレーの反応速度はミリ秒単位

真空管



①に通電する量で②間の電流量が増減する



真空管の反応速度はマイクロ秒単位

真空管

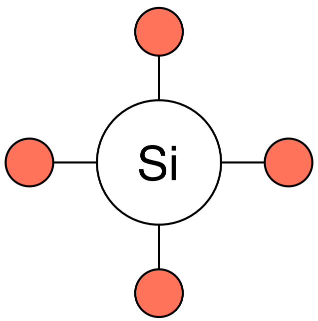
1948, IBM 604

真空管

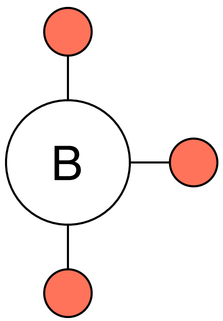
1956, FUJIC （科学博物館展示）

半導体

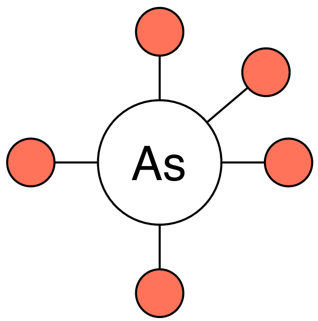
- 導体でも絶縁体でもない、中間的な性質をもつ物質
- シリコン（Si, 珪素）、ゲルマニウム（Ge）など各種
- 今日よく使われるのはシリコン
- ある種の不純物を混ぜた時の電気的な特性を応用する



シリコン
原子番号14



ホウ素
原子番号5



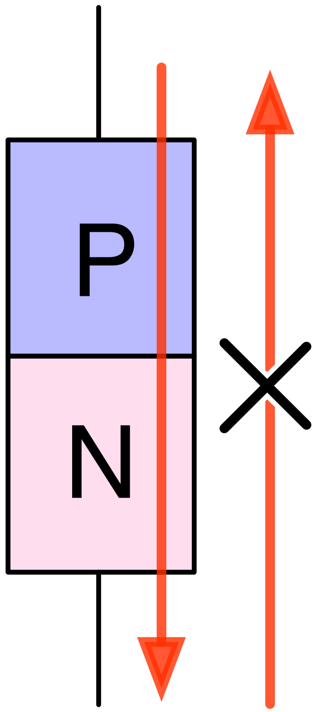
ヒ素
原子番号33

シリコン結晶

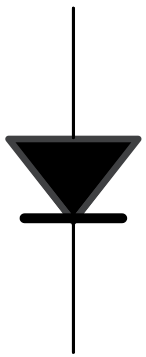
ダイオードへの応用

（ダイオードは半導体以前に真空管によるものが存在する）

P, N 二種の半導体材料を接合し、電極をつける。
両者の相違は微量に混入した不純物の違いによる。



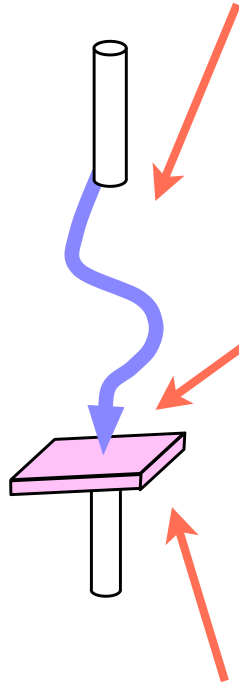
一方向にしか電流は流れない



このようなシンボルで図示する

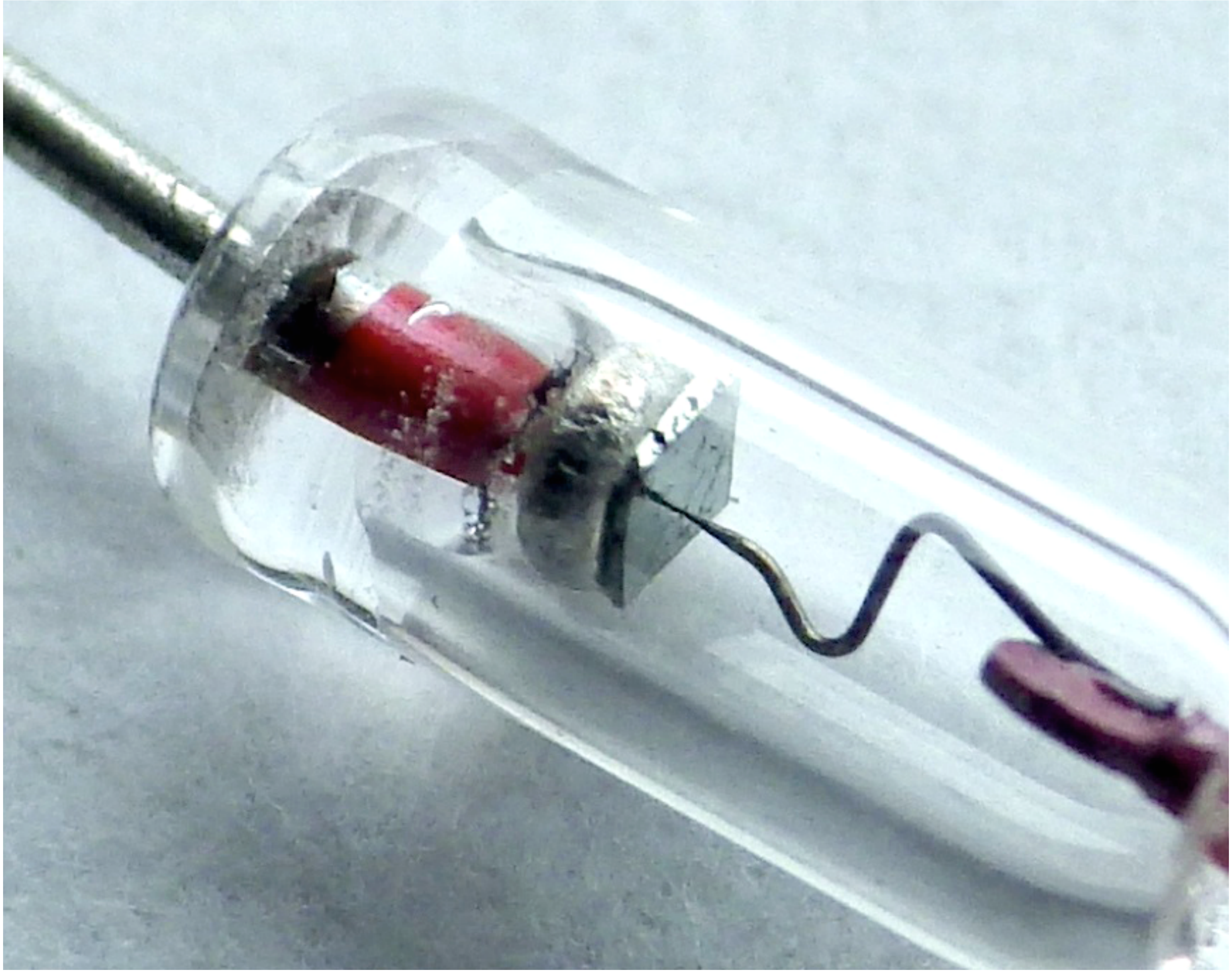
1K60 （ゲルマニウム点接触型である点に注意）

白金線（とインジウム）でP型を形成する）

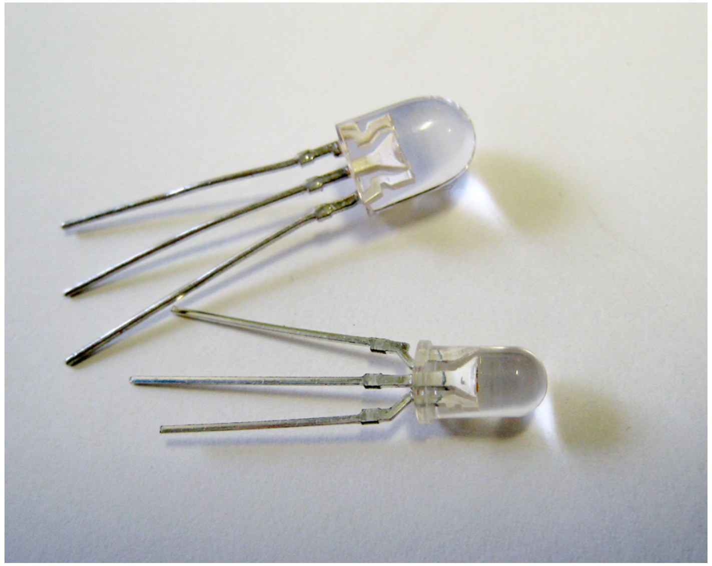


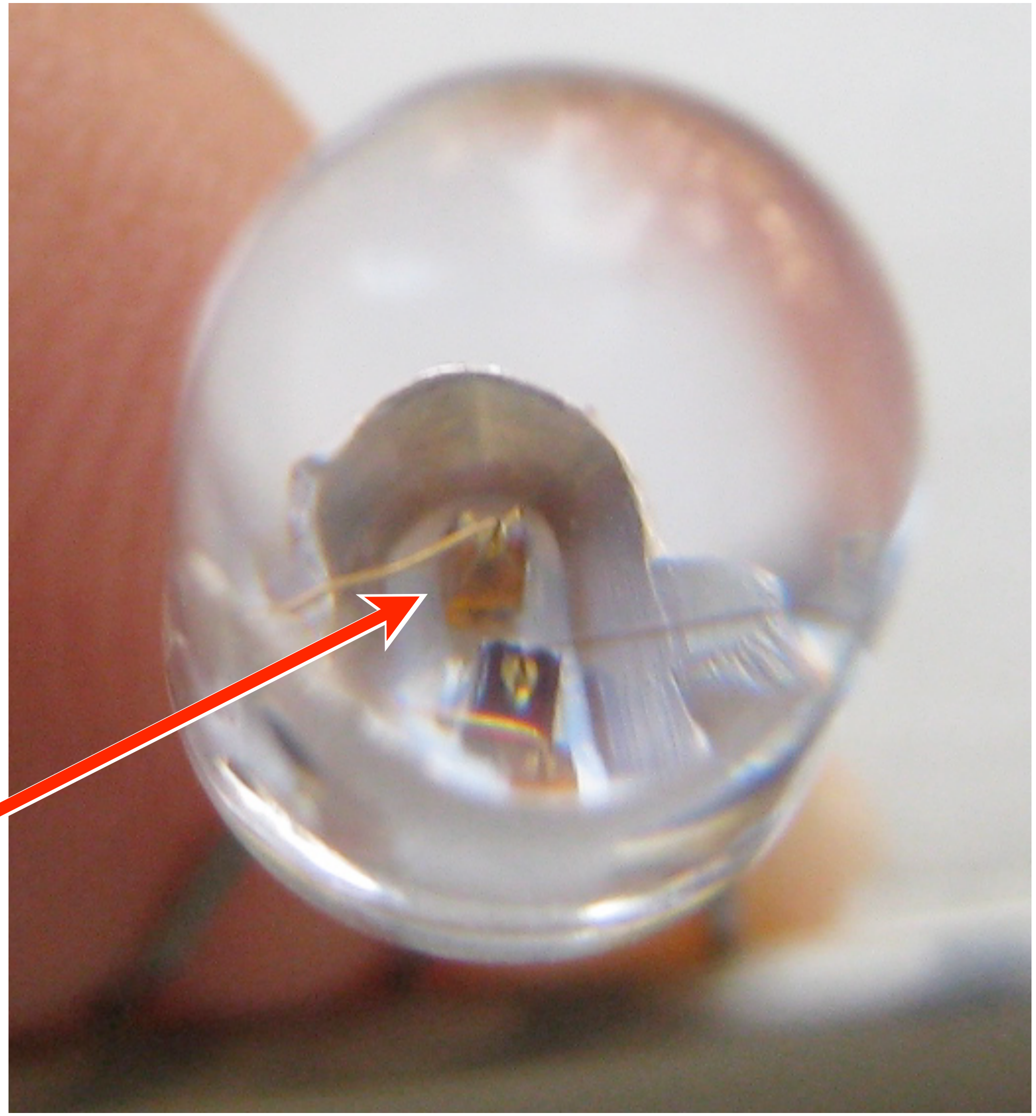
点で接触させる

N型
ゲルマニウム



発光ダイオード（LED）





結晶に細い電極
が付いている

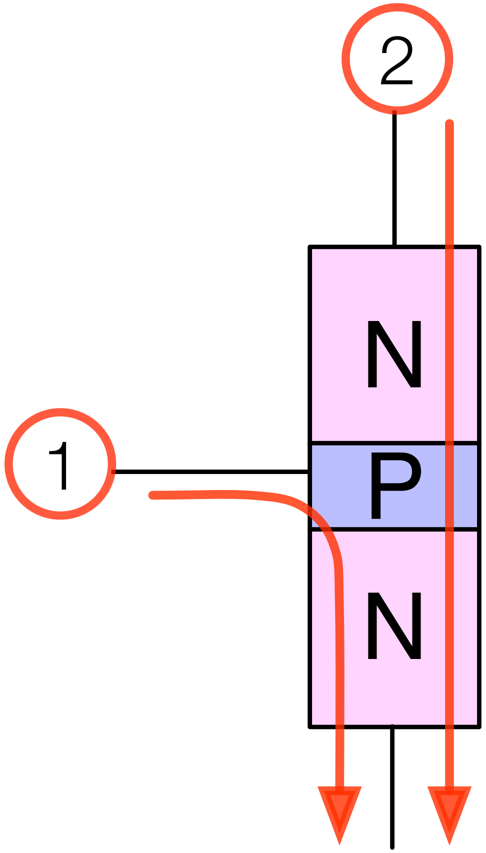
トランジスタの発明 （1948）

William Shockley (seated), John Bardeen, and Walter Brattain

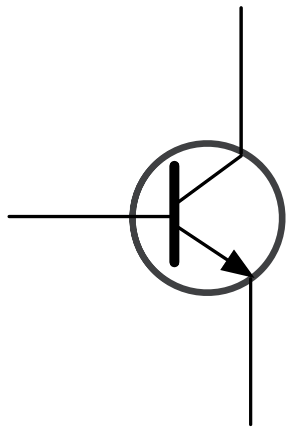
最初の（点接触型）トランジスタ

Milestones in AT&T History, http://www.corp.att.com/history/milestone_1947b.html

トランジスタ

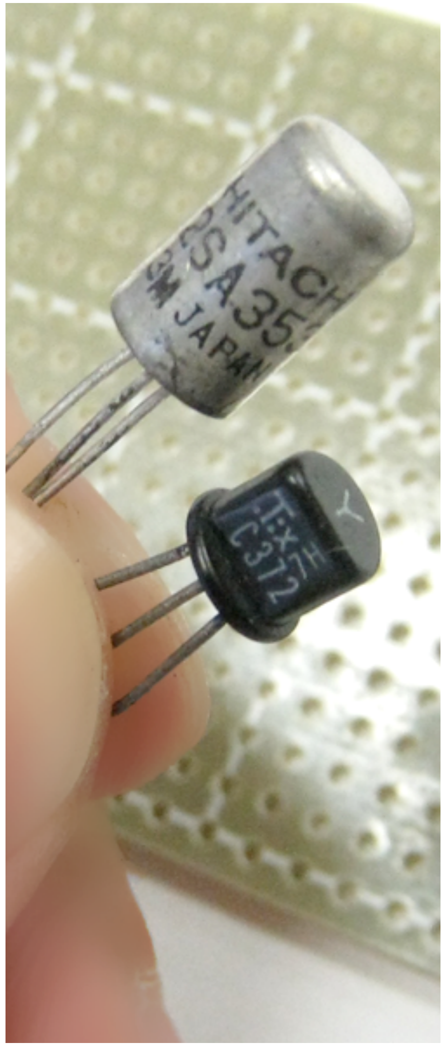


N型, P型半導体を接合して、
スイッチの機能を実現する

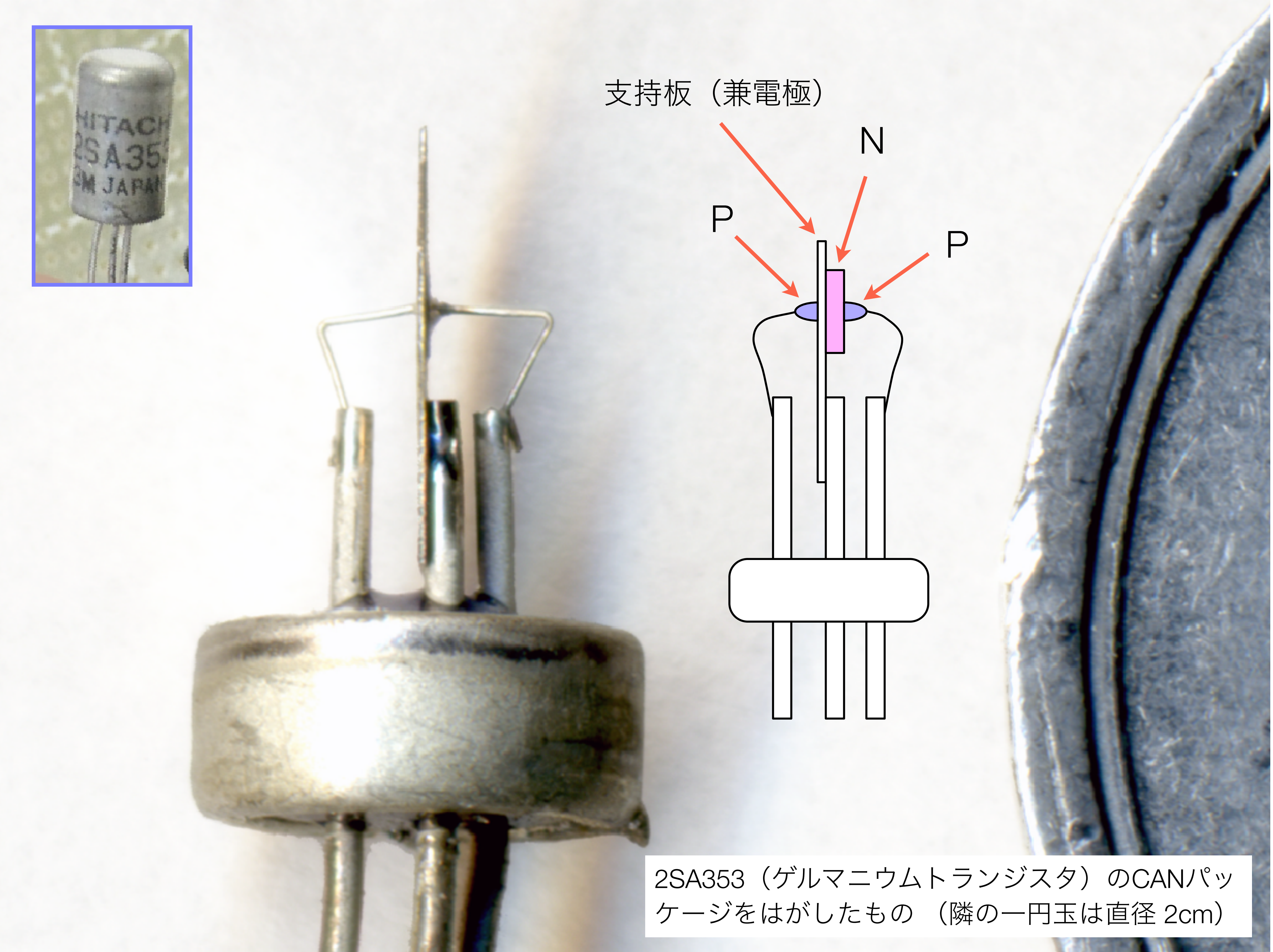


このようなシンボルで図示する

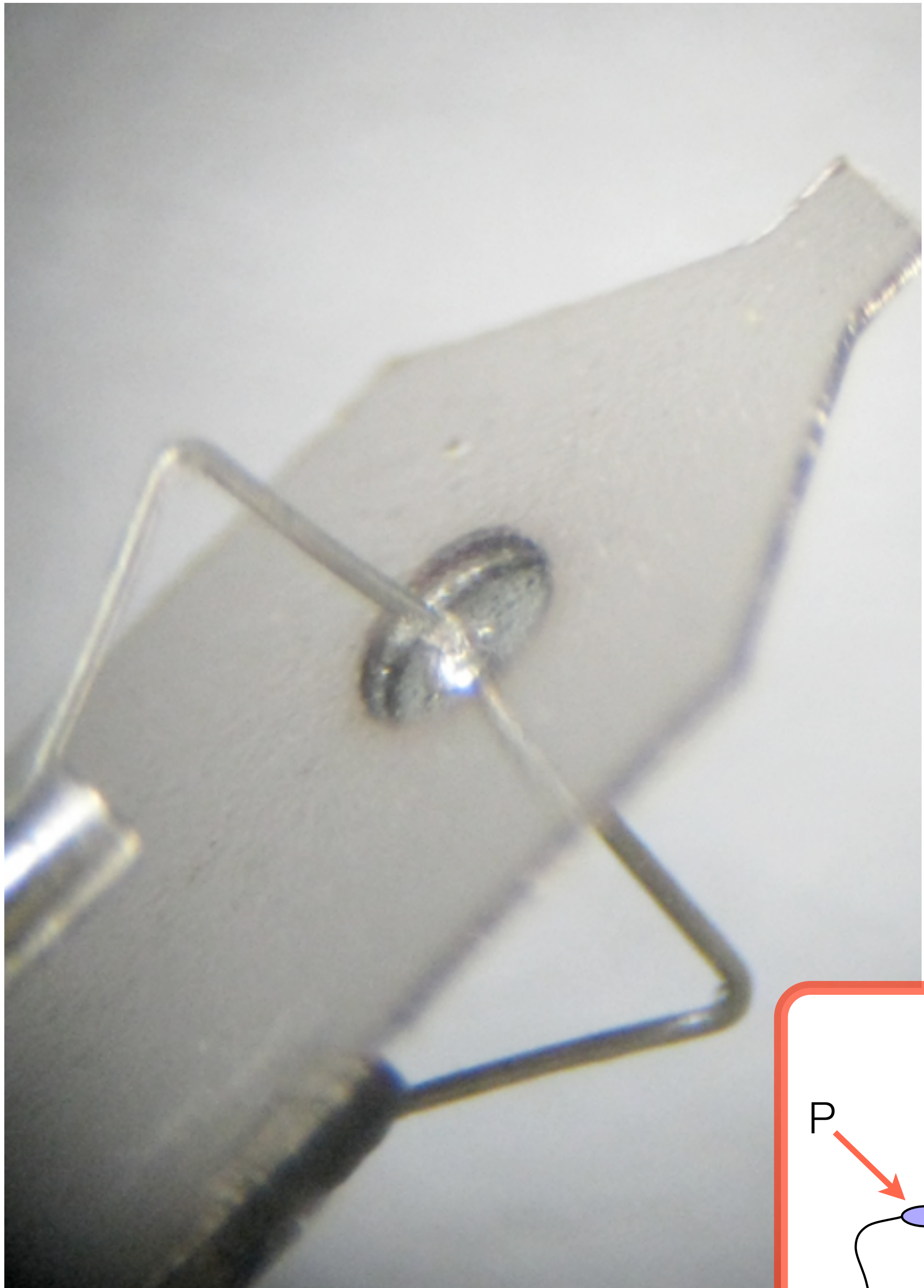
1に通電する量で2に流れる電流が増減する

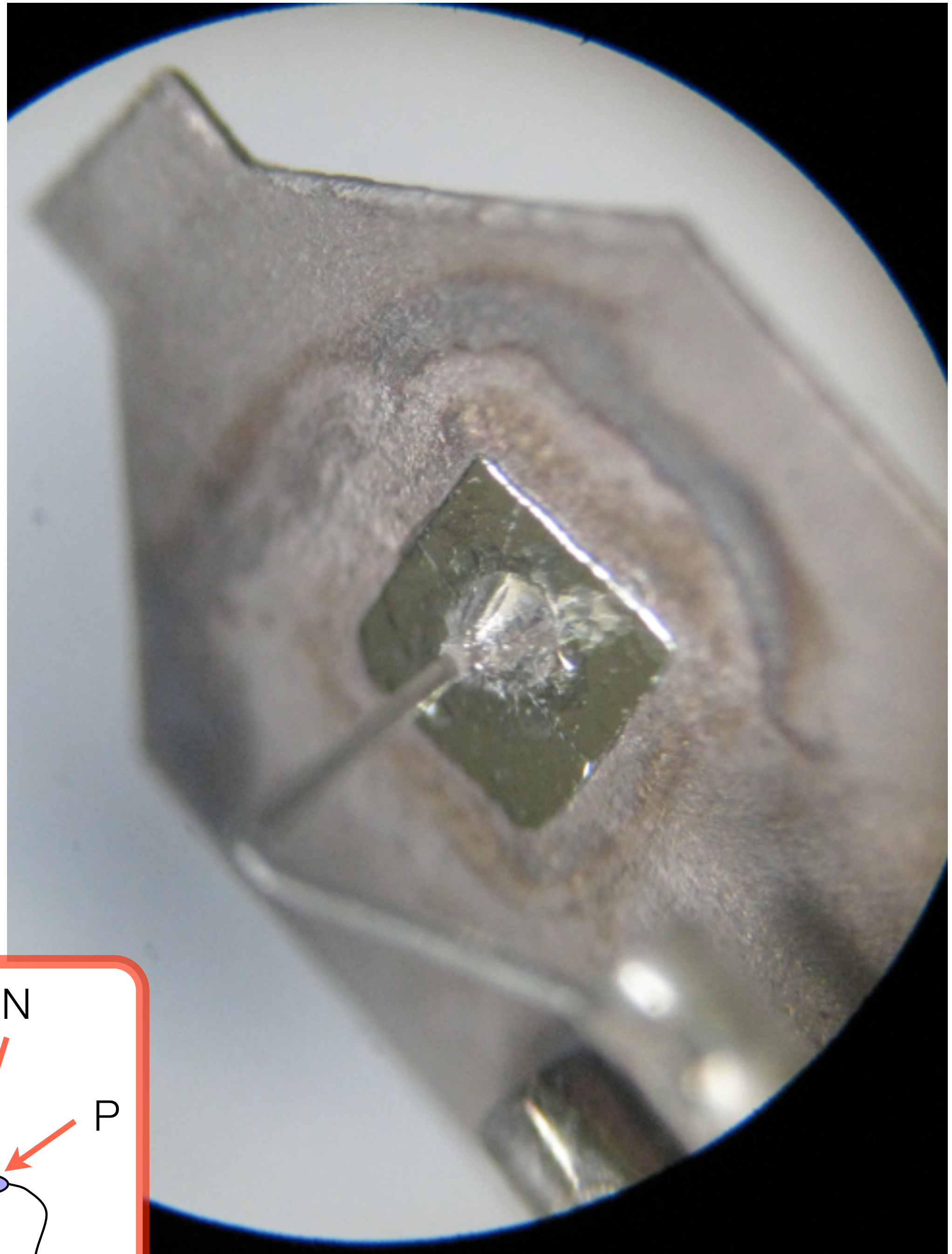


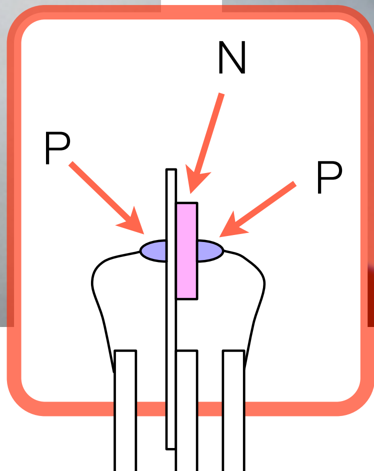
トランジスタの反応速度はマイクロ秒以下（ナノ秒台）



2SA353（ゲルマニウムトランジスタ）のCANパッケージをはがしたもの （隣の一円玉は直径 2cm）



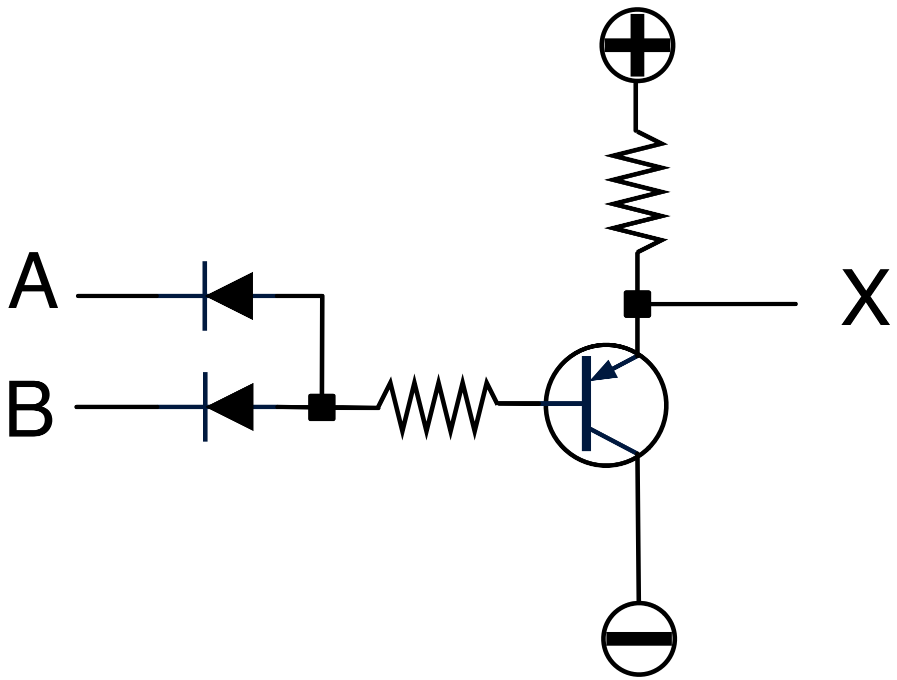


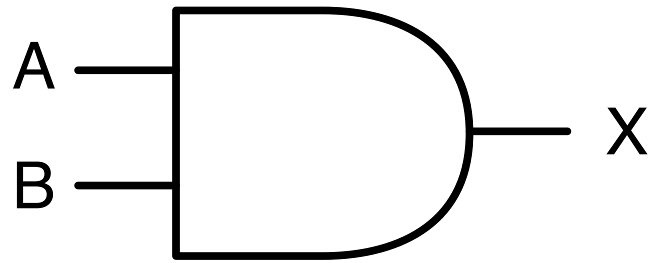


図は材料自体がP型半導体に見えるがそうではない

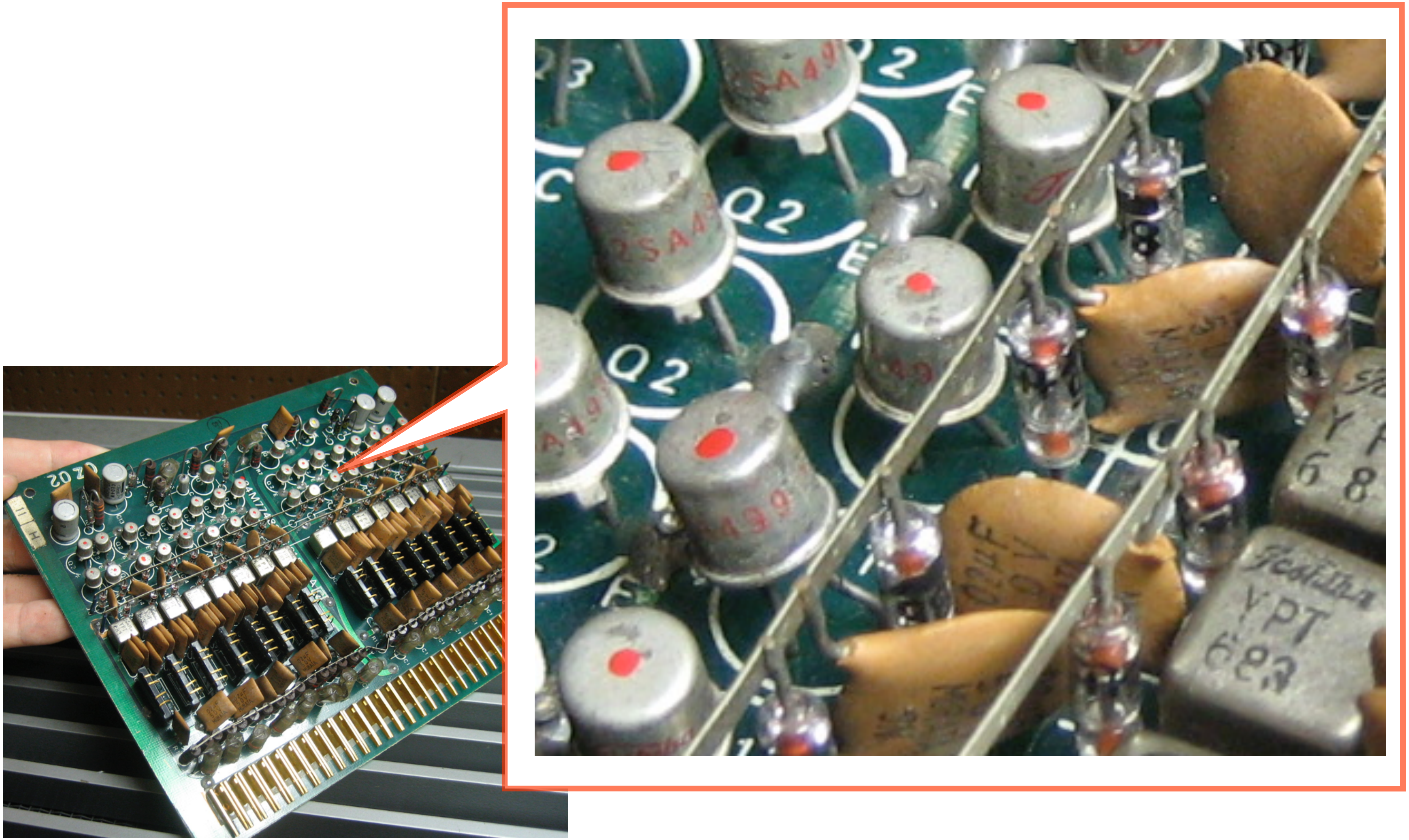
トランジスタとダイオードによる論理回路

トランジスタとダイオードによって AND 論理回路（ゲート）を実現する

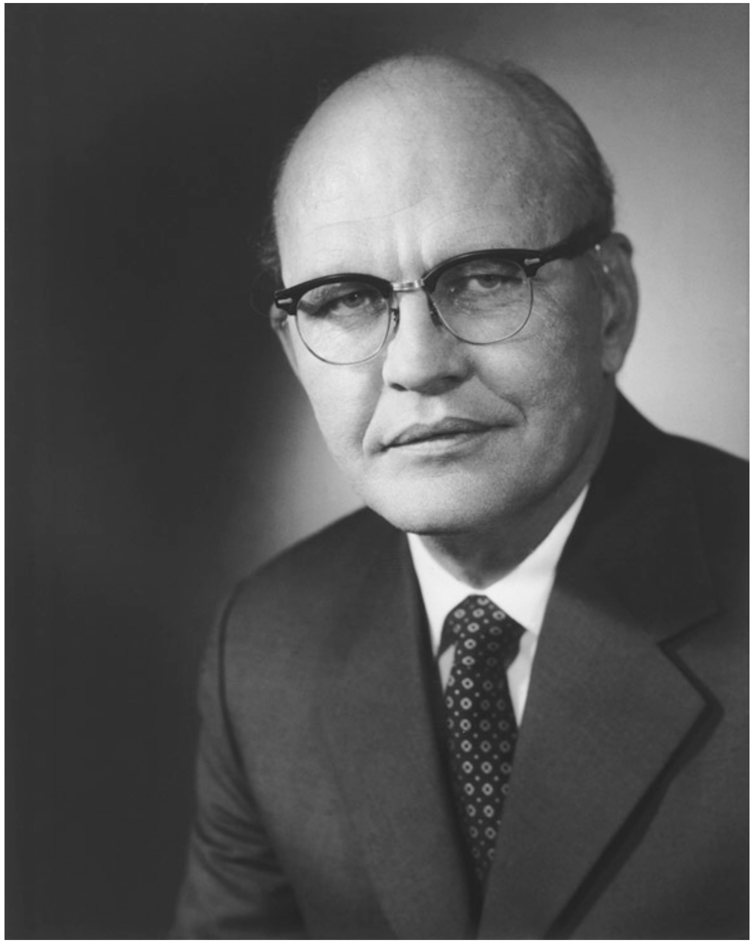




トランジスタとダイオードによる回路基板

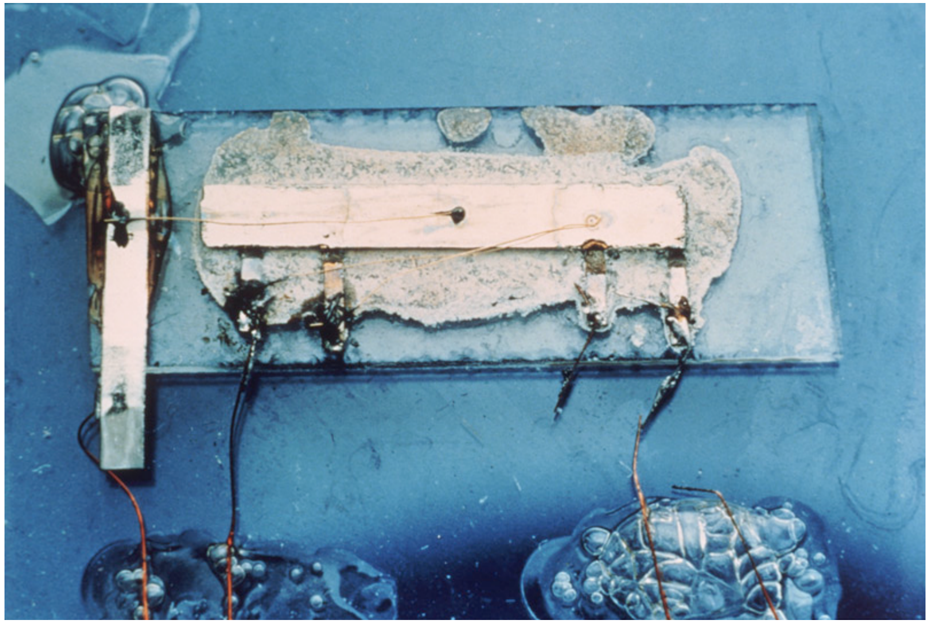


IC : 集積回路の発明



Jack Kilby, at Texas Instruments Inc.

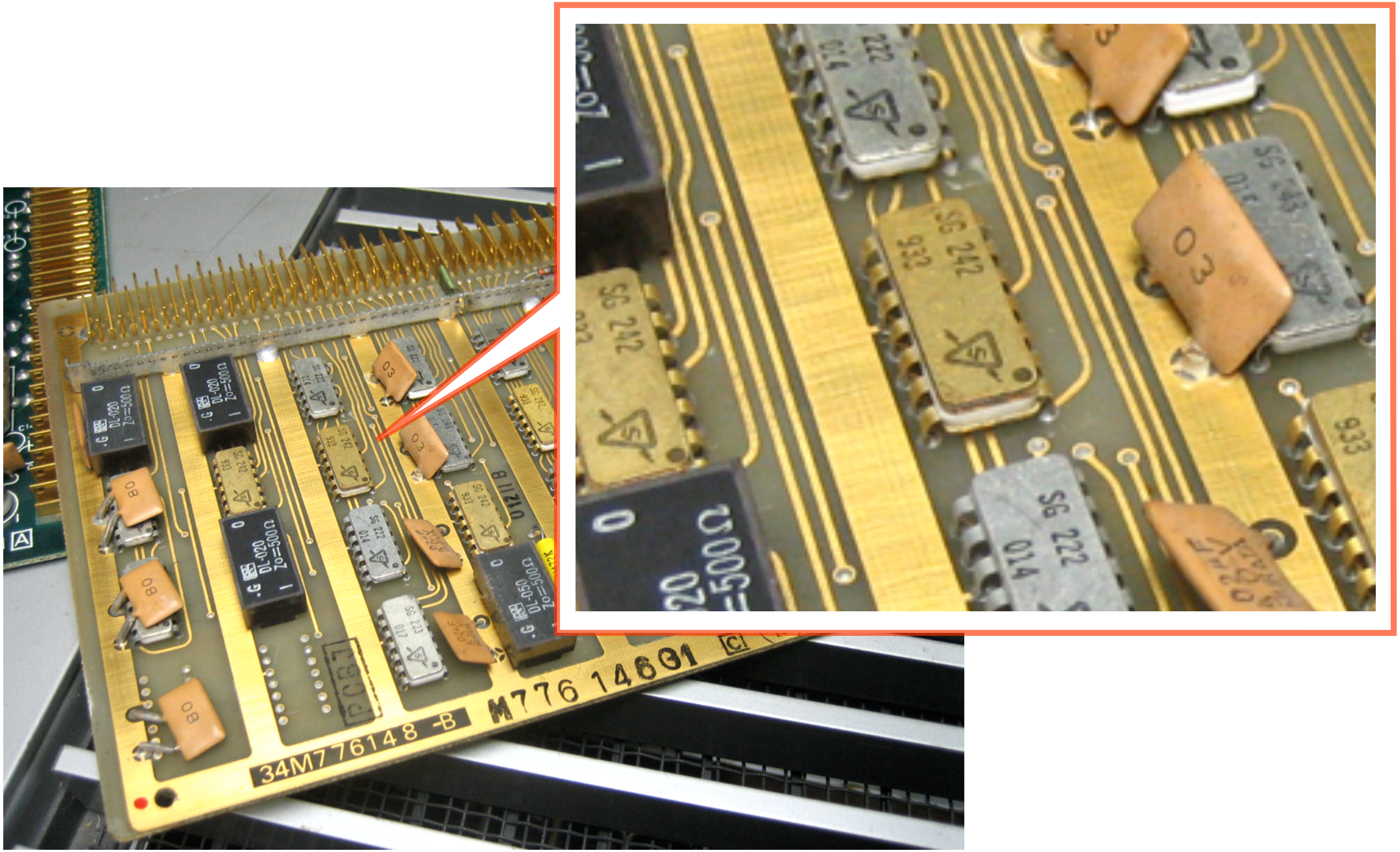
IC : Integrated Circuit



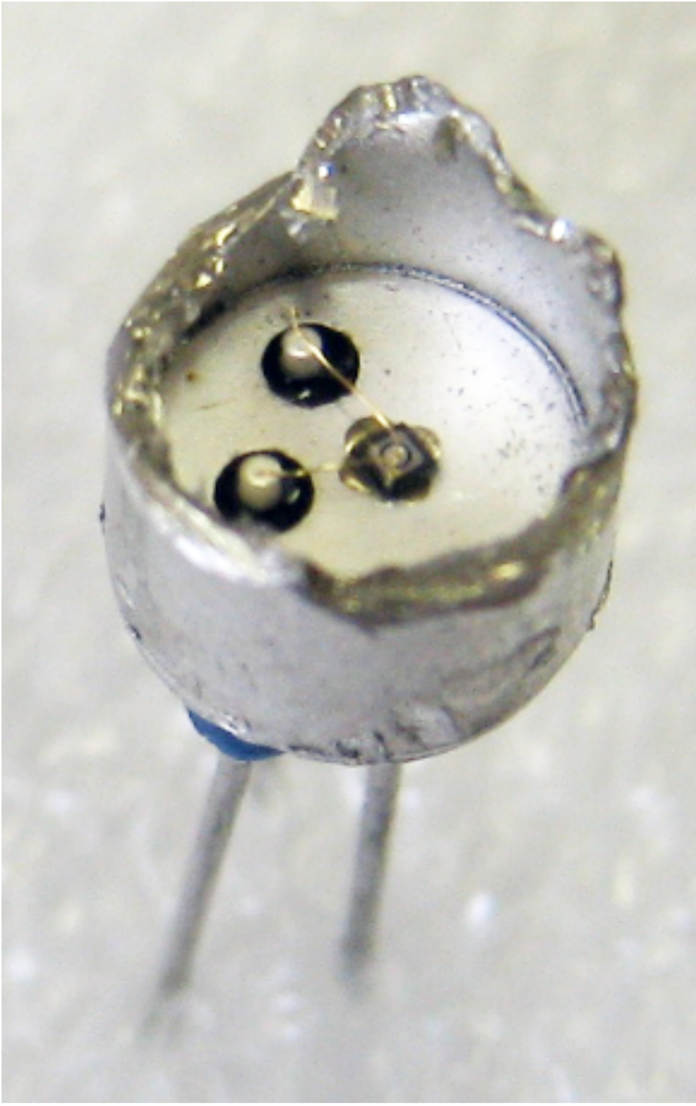
1958, 最初のIC

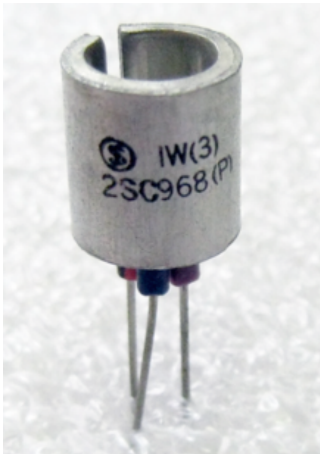
TI People - Jack Kilby, at TI, http://www.ti.com/corp/docs/kilbyctr/downloadphotos.shtml

IC : 集積回路による回路基板

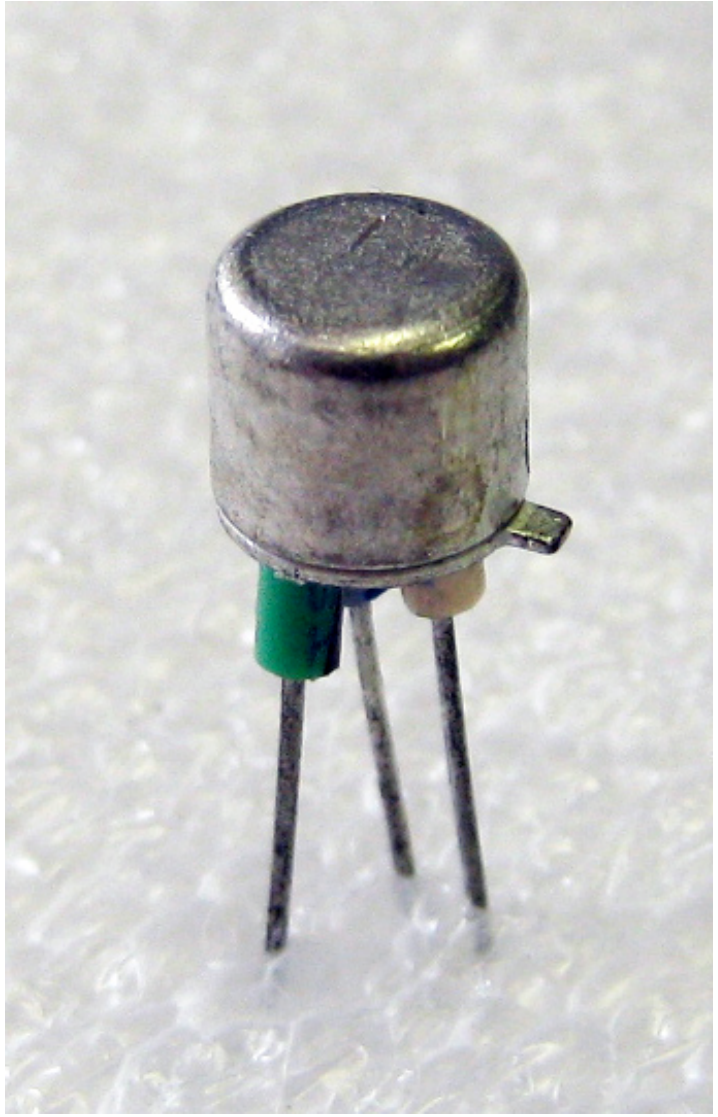


プレーナ型トランジスタ





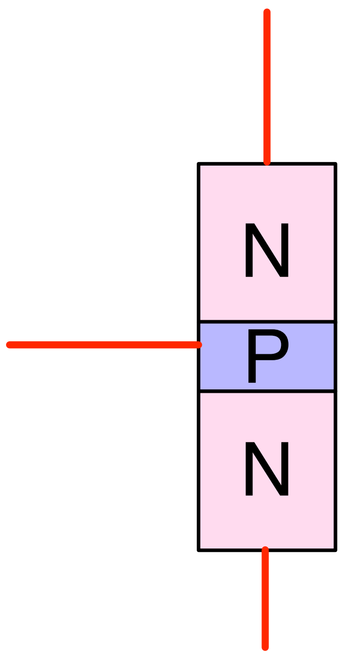
2SC968, Fujitsu
シリコントランジスタ



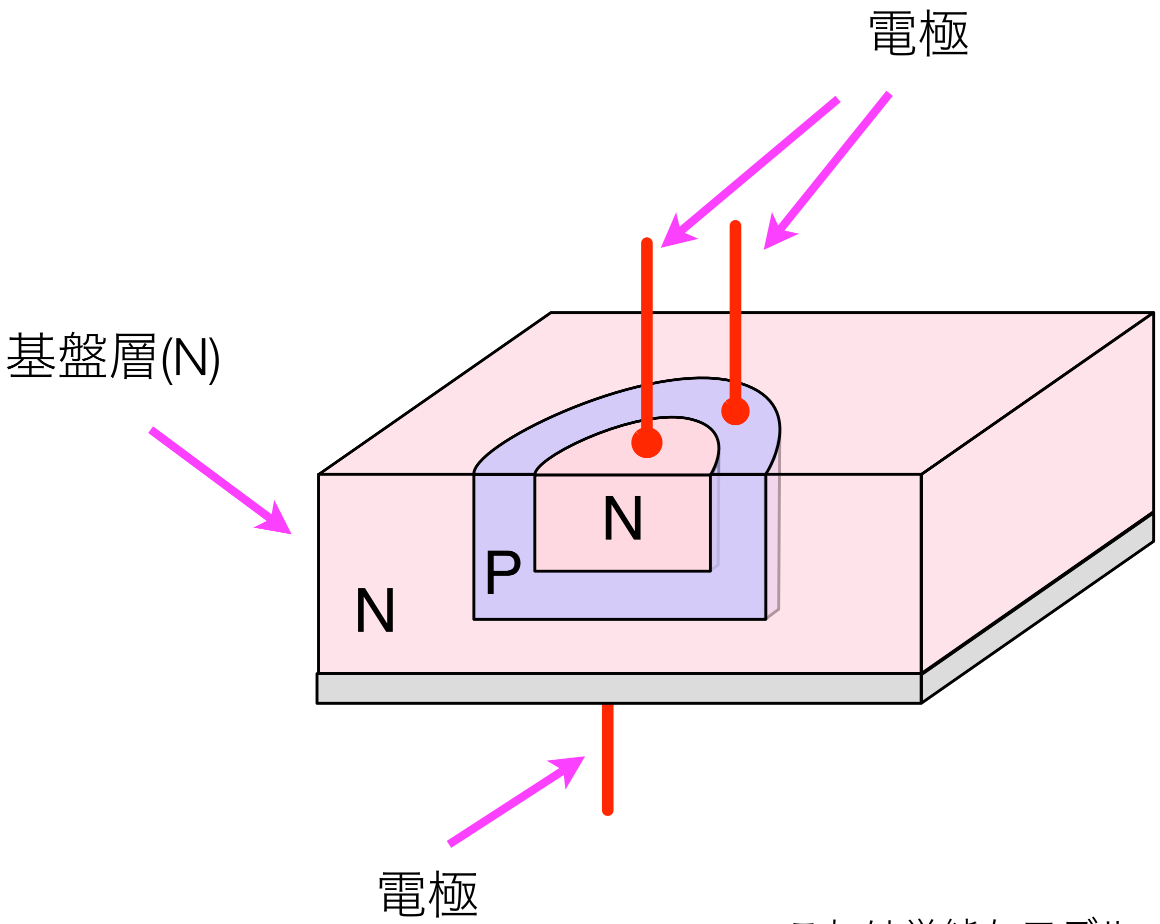
放熱のためにアルミでパッケージを巻いてある）

プレーナ型トランジスタ

半導体（シリコン）基盤の上にエッチング等によってN, P 型半導体を配置し、トランジスタを構築する

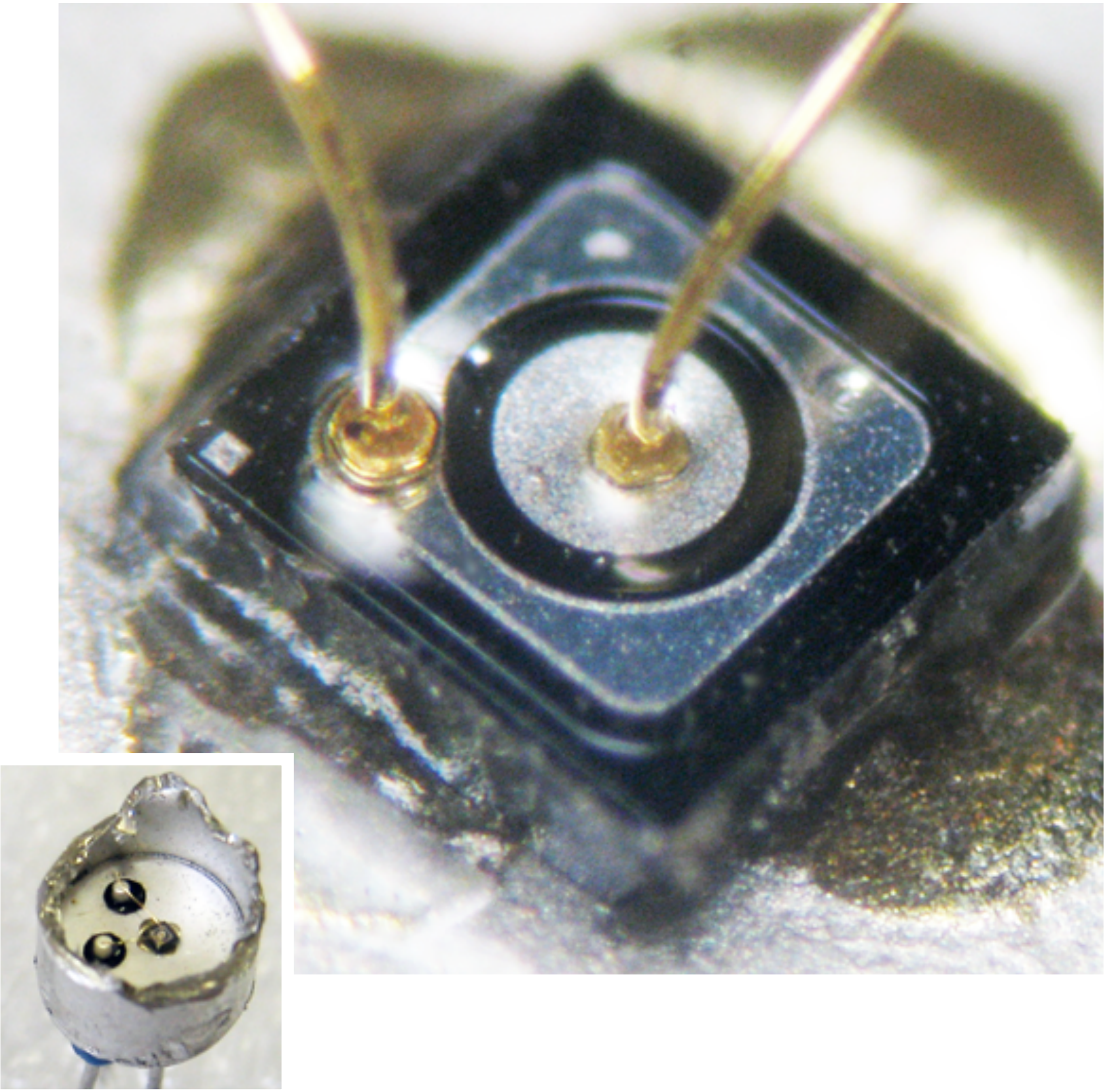


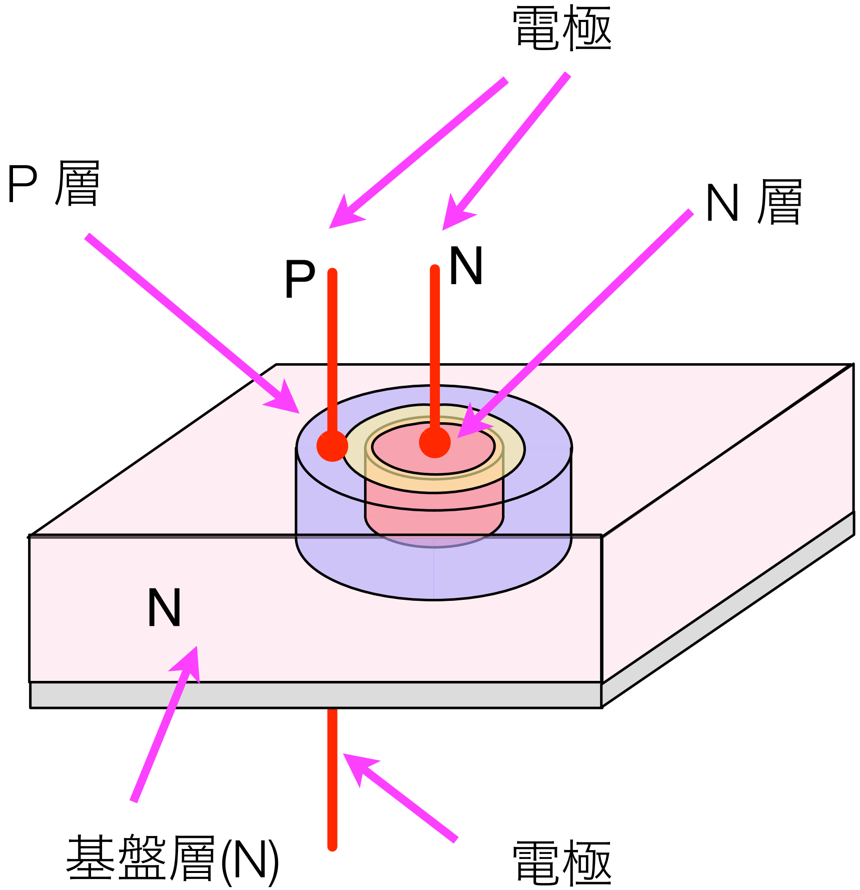
このトランジスタ（接合型）を右図のように構成する（プレーナ型と呼ぶ）



これは単純なモデルであり実際の構造や形状は図とは異なる

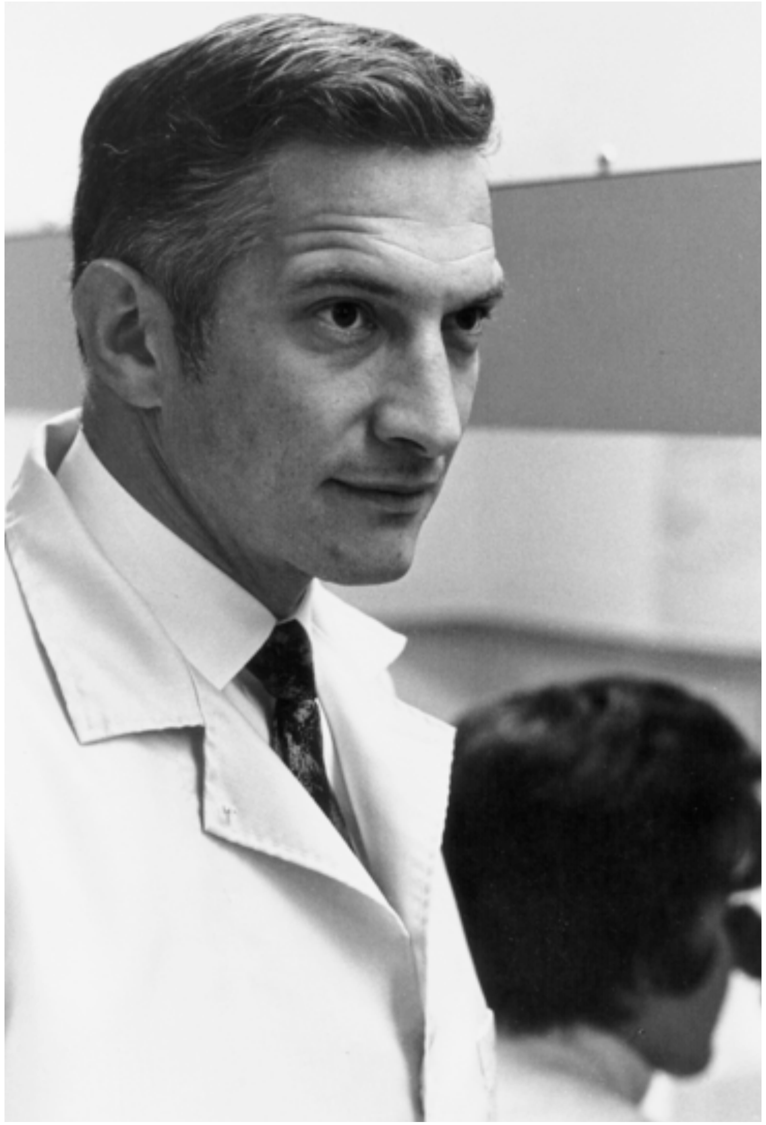
プレーナ型トランジスタ



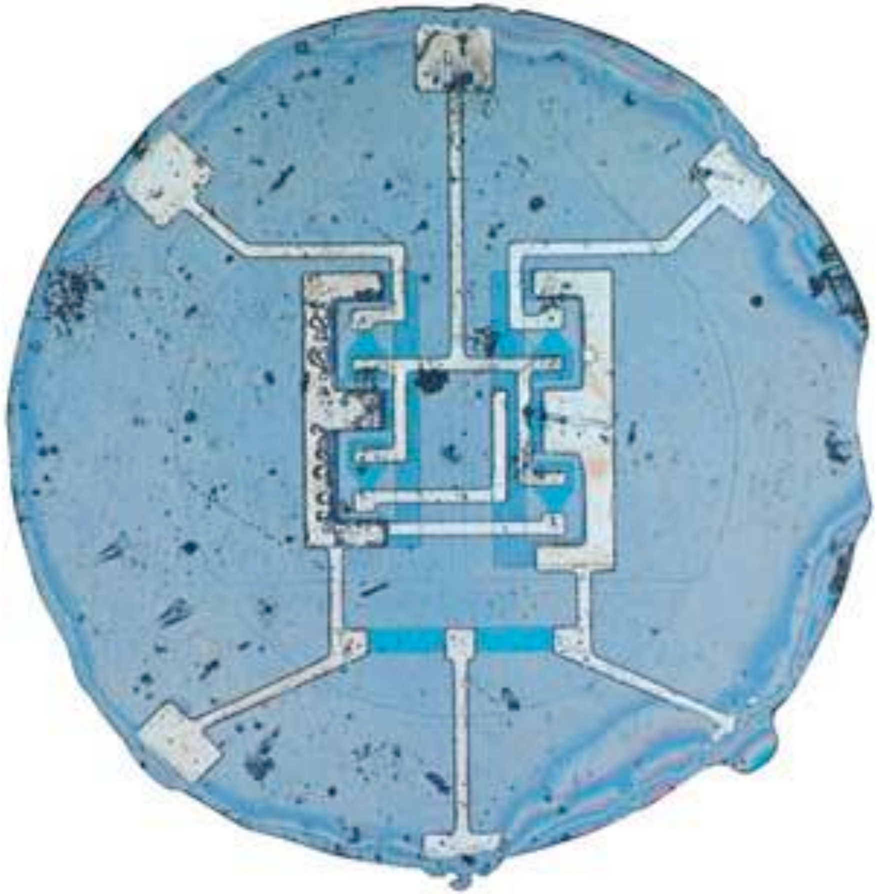


これは単純なモデルであり実際の構造や形状は図とは異なる

IC : 集積回路の発明



Robert Noyce, 1960頃, from Intel Museum

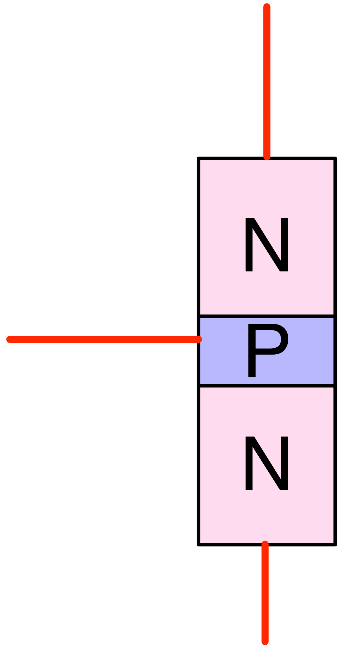


1961, Firechild, 最初の商用 IC （プレーナ型）

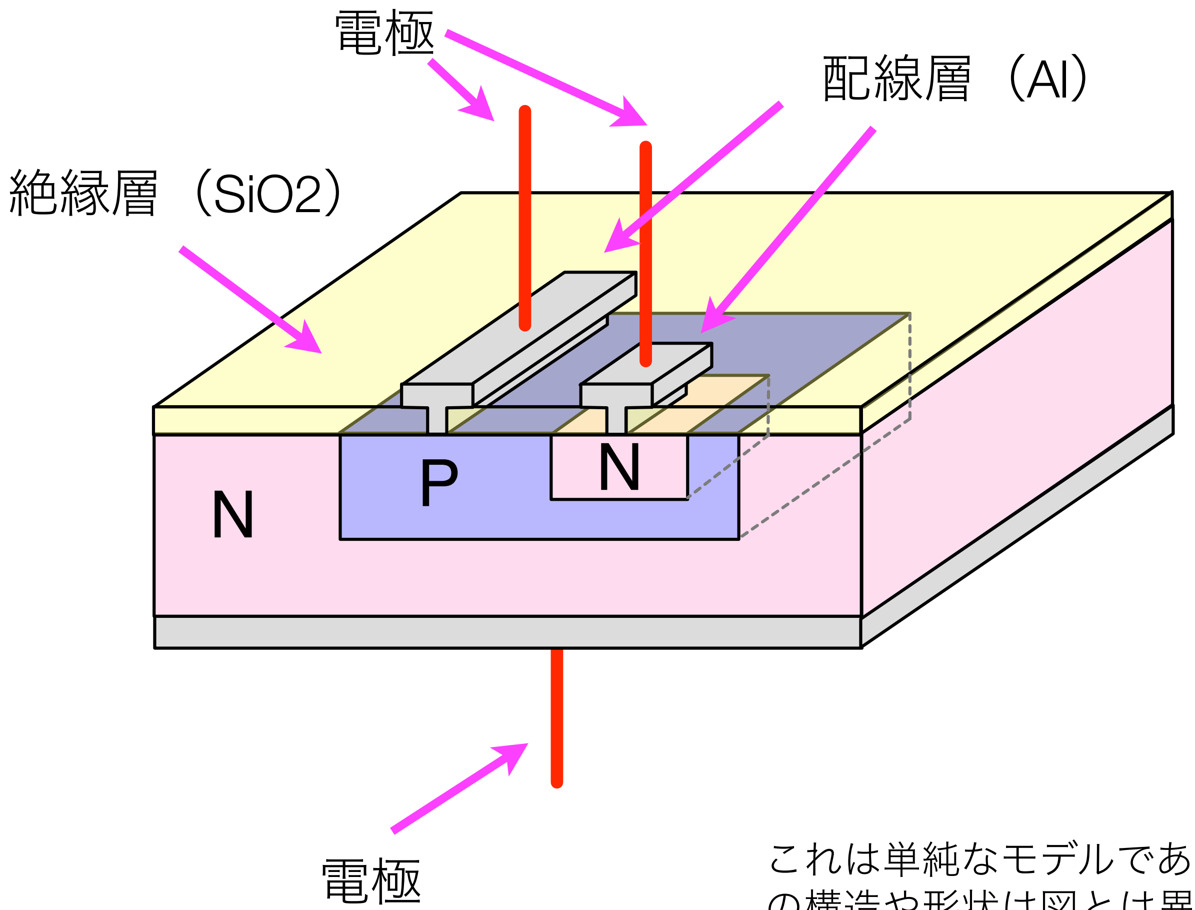
IC : 集積回路の発明

IC : Integrated Circuit

半導体（シリコン）の上にエッチング、イオン注入、スパッタリング等によって配線層、絶縁層、N, P 型半導体を配置し、トランジスタを構築する



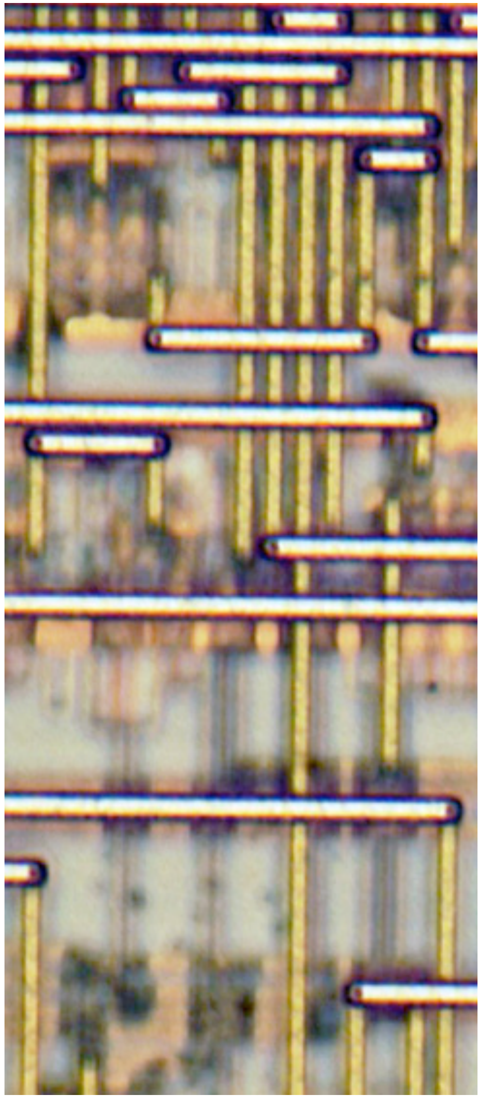
このトランジスタ（接合型）を右図のように構成する（プレーナ型と呼ぶ）



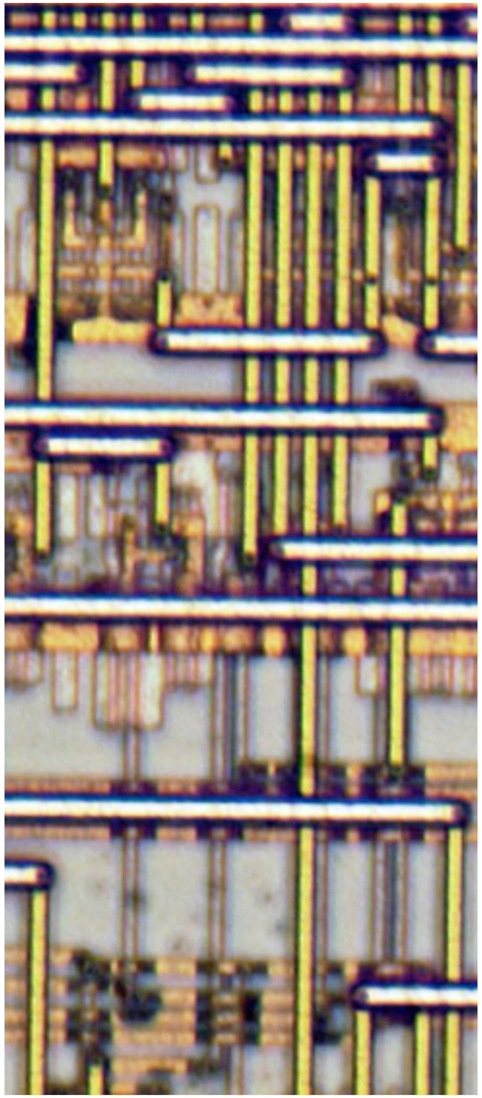
これは単純なモデルであり実際の構造や形状は図とは異なる

IC : 集積回路の発明

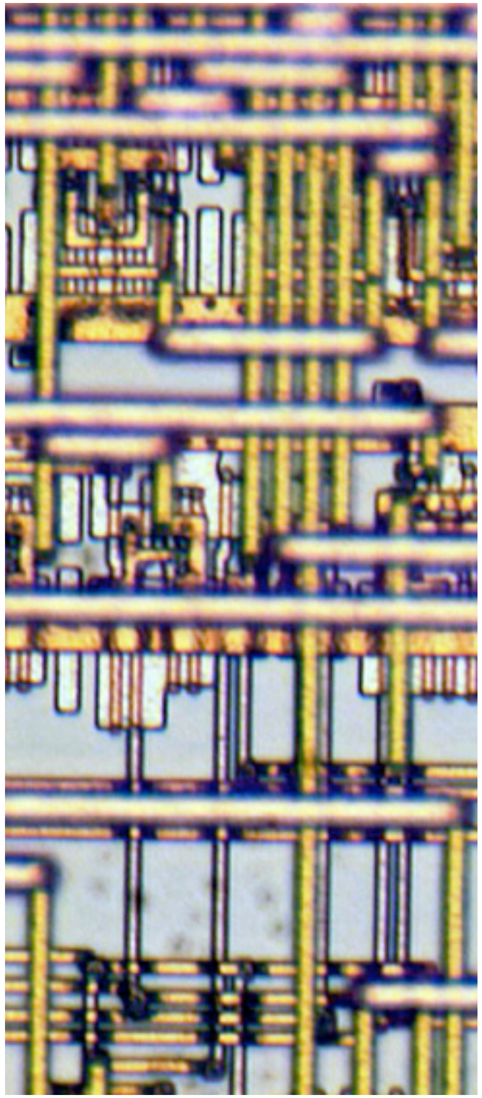
Intel i860XP, 40MHz, 1990, 1μm



最上層（横向けの配線層）



中層（縦の配線層）

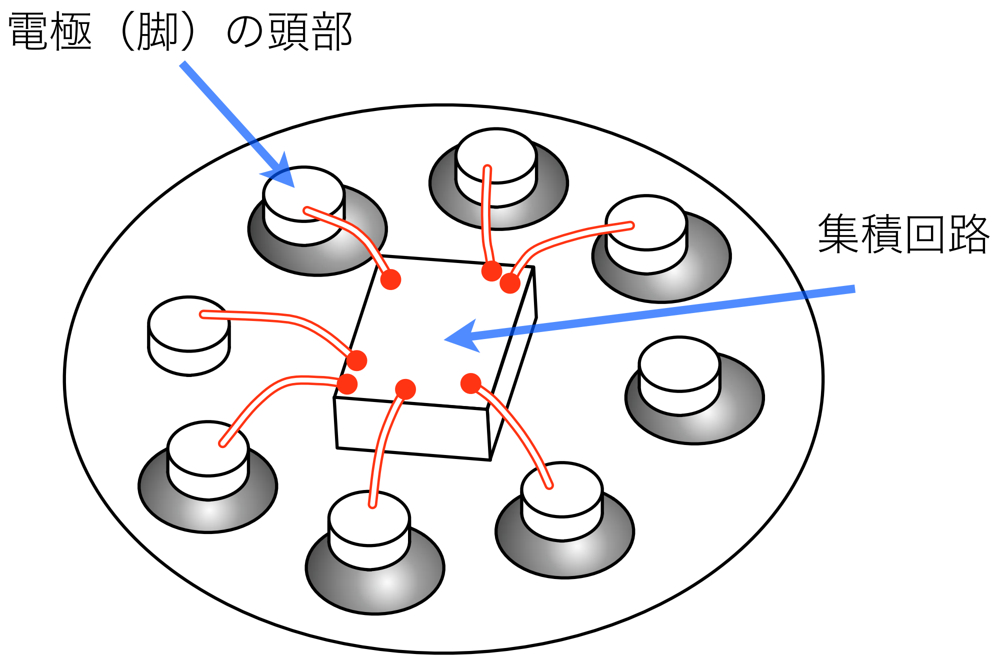


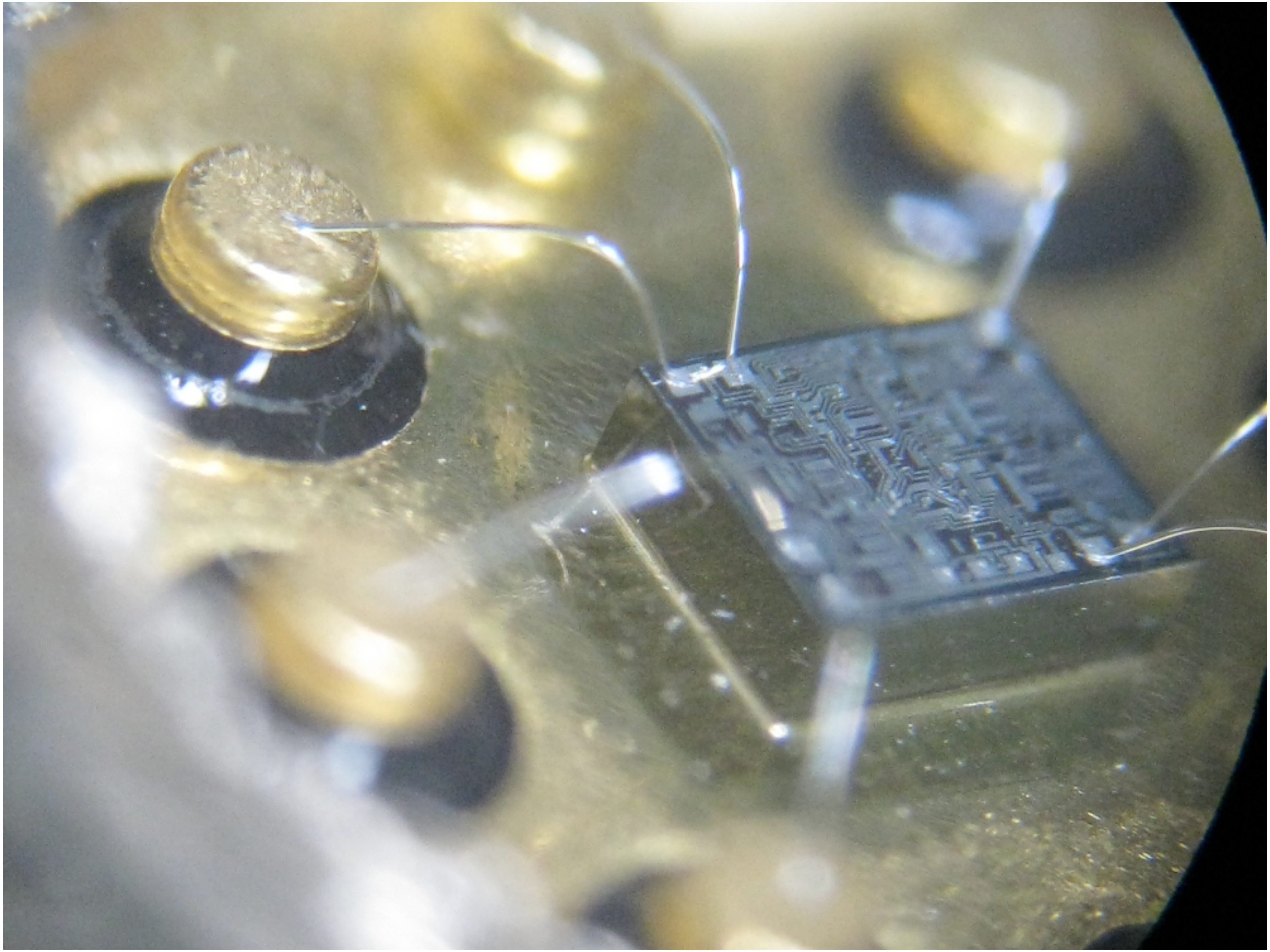
その下層（半導体の回路）

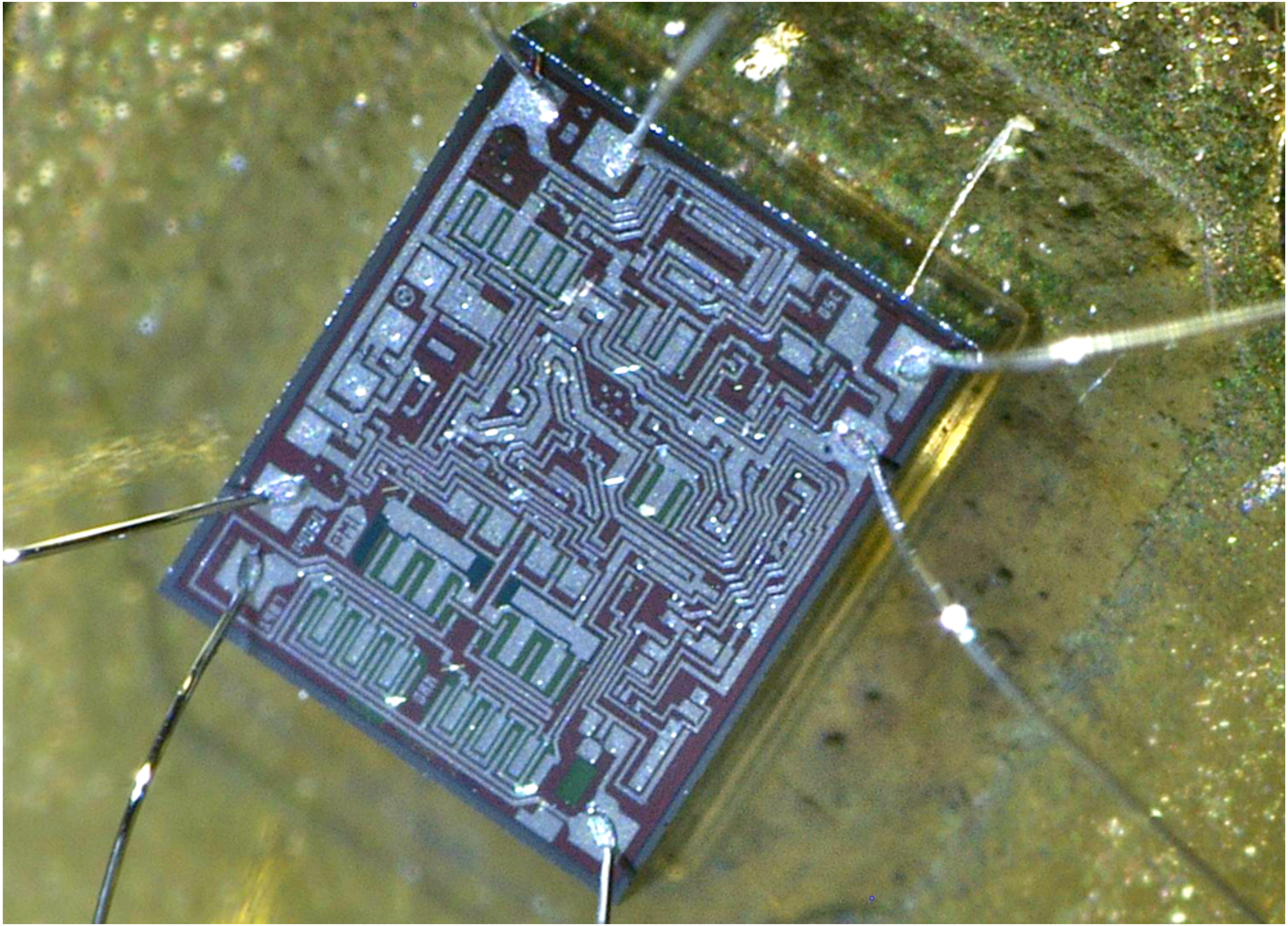
パッケージング

金属パッケージの内部に集積回路が置かれ、電極から伸びる細線で空中配線。

OP15, オペアンプ
（8pin, CANパッケージ）

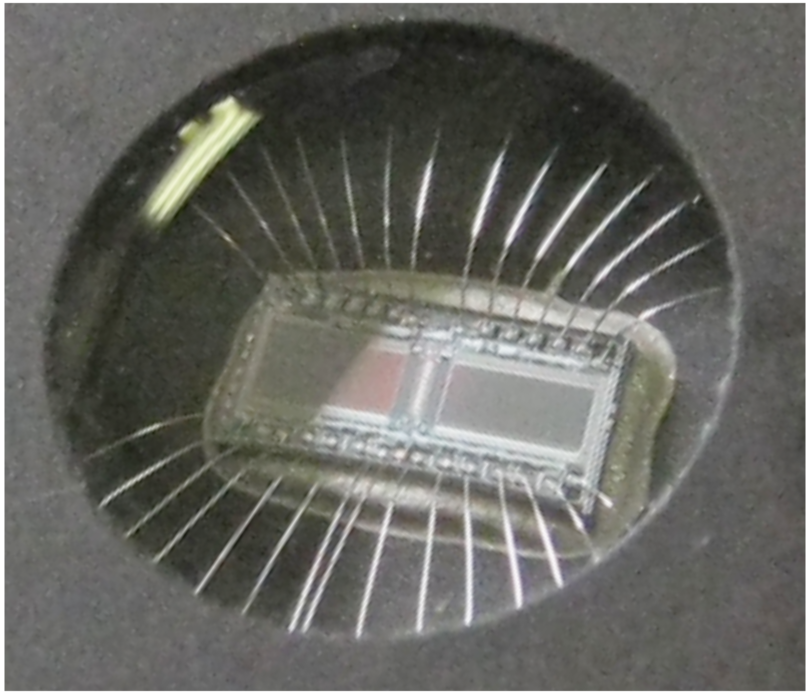




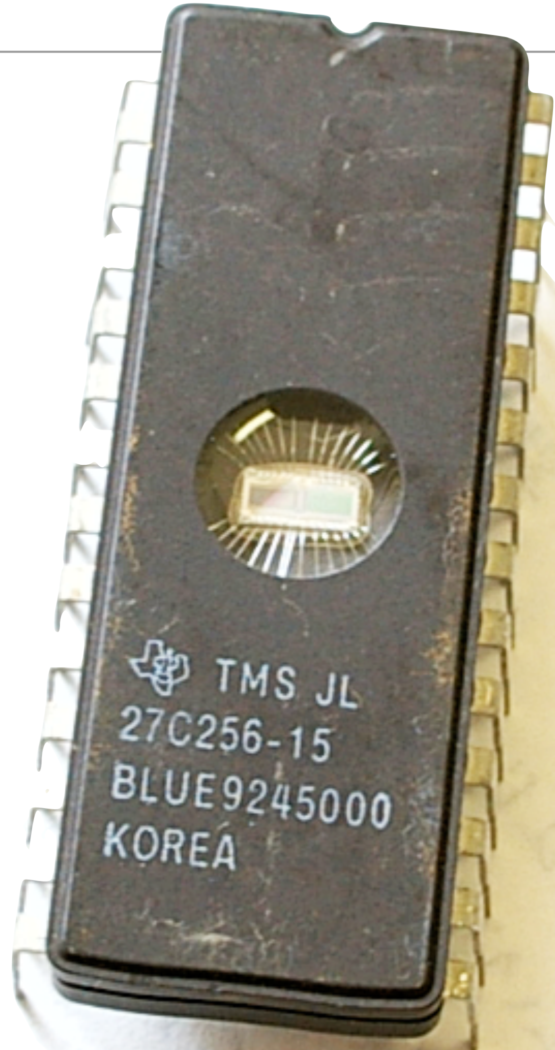


パッケージング

二列に電極が並んだパッケージもある（DIPと呼ばれる）



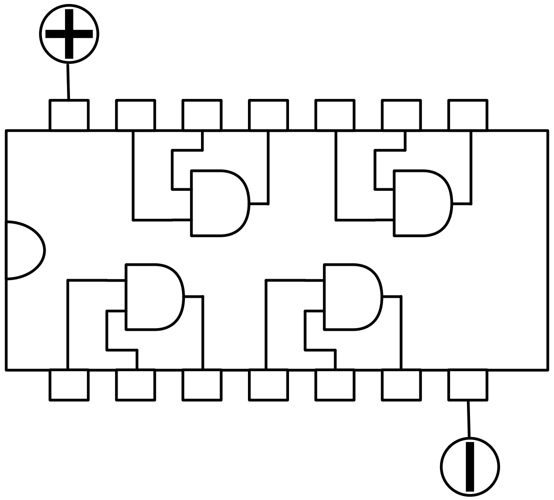
この製品では配線が見えている



27C256, UV-EPROM
28pin DIP

ゲート IC

SN7409 (2-in AND x 4)



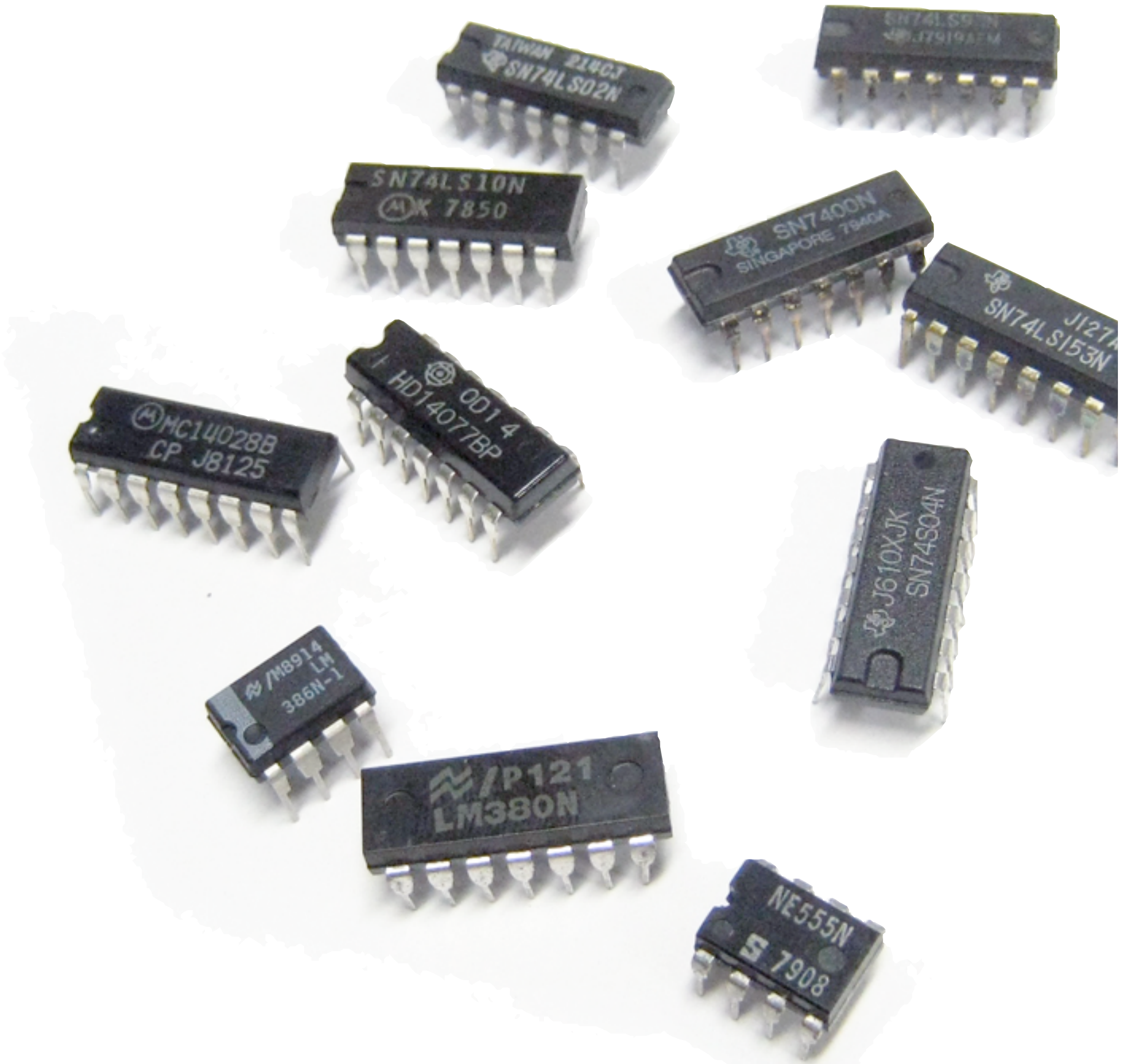
ICの反応速度は数十ナノ秒

ゲートが幾つか集積されて一つのパッケージに入っているため、回路全体がさらに小さくなる。

故障も減り、配線などの工数が減って製造コストも下がる。

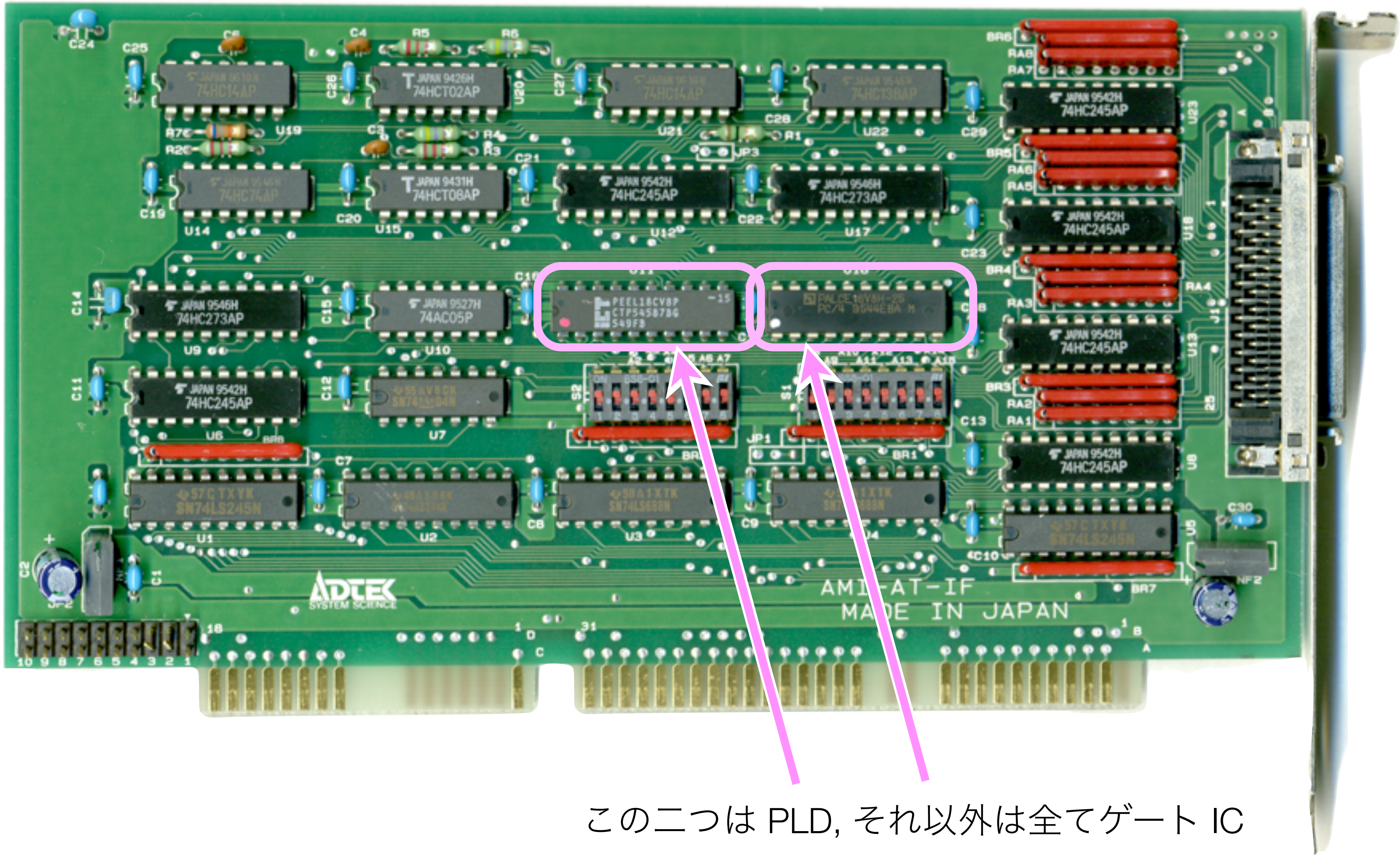
各種 IC

いろいろな回路が集積された製品があり、これらを組み合わせてシステム全体を作る。



ピン数、種別はさまざま。論理回路だけでなくアンプなどのアナログ用途の集積回路もある。

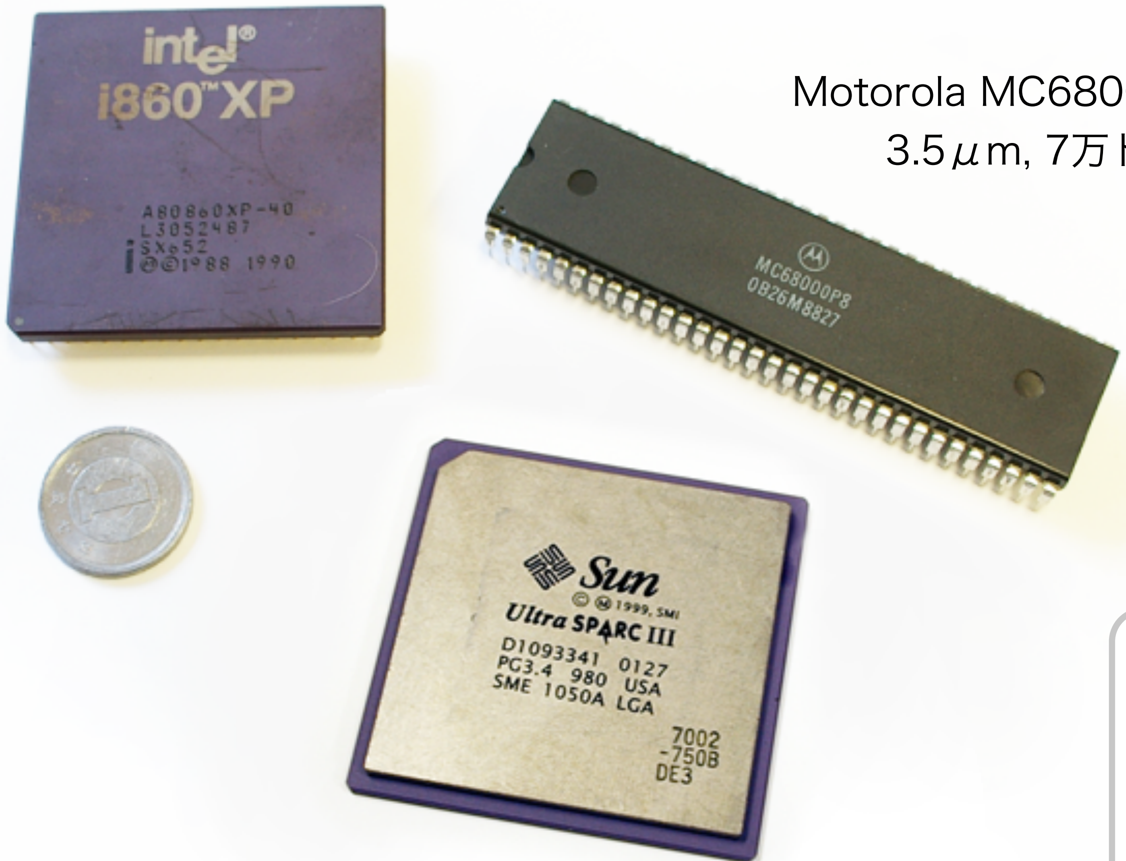
IC を組み合わせた製品



この二つは PLD, それ以外は全てゲート IC

LSI : 大規模集積回路

Intel i860XP, 40MHz, 1990
1 μm, 120万トランジスタ



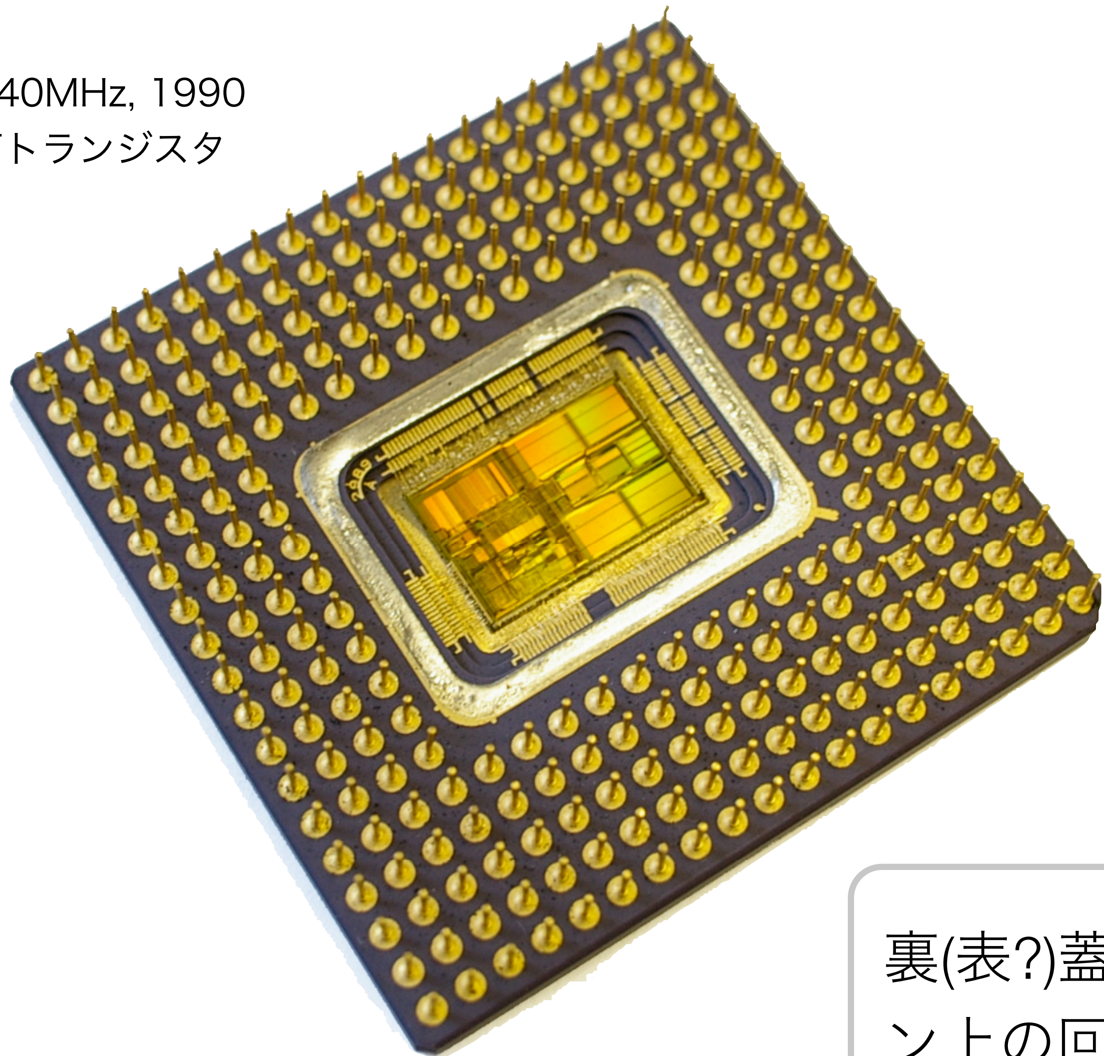
Motorola MC68000, 8MHz, 1980
3.5 μm, 7万トランジスタ

Sun UltraSPARC III, 600MHz, 1999
0.18 μm, 2900万トランジスタ

年ごとに配線幅は狭く、高速になり、また集積素子数も増える。

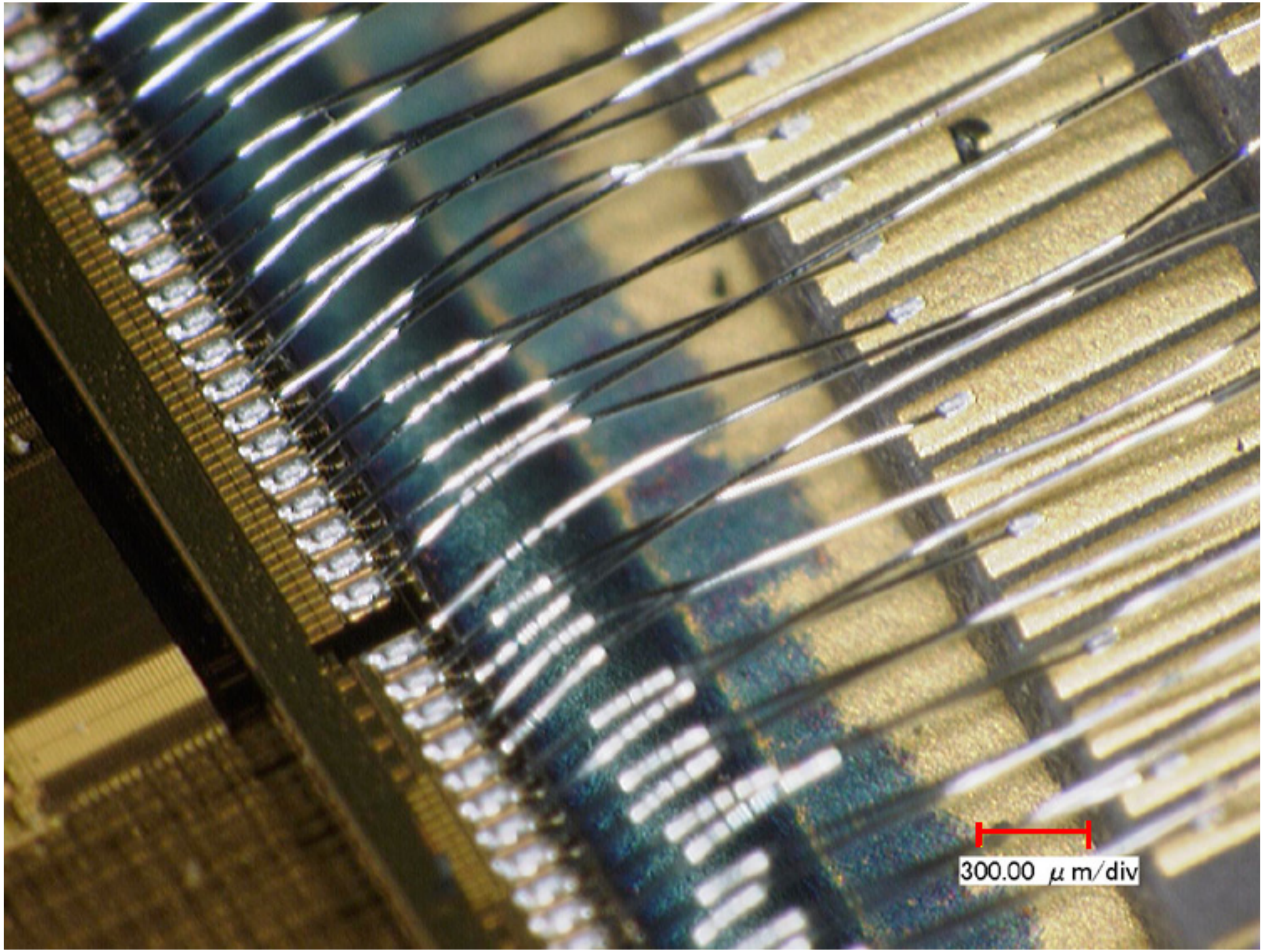
LSI : 大規模集積回路

Intel i860XP, 40MHz, 1990
1μm, 120万トランジスタ



裏(表?)蓋を開けるとシリコン上の回路と配線が見える

LSI : 大規模集積回路



マイクロプロセッサの成功

- いわゆるCPU

  半導体の微細化、集積化による高速化技術を追及

  他の高速化手法を大きく抜いて成功

- ムーアの法則(Moore,1965)の体現者

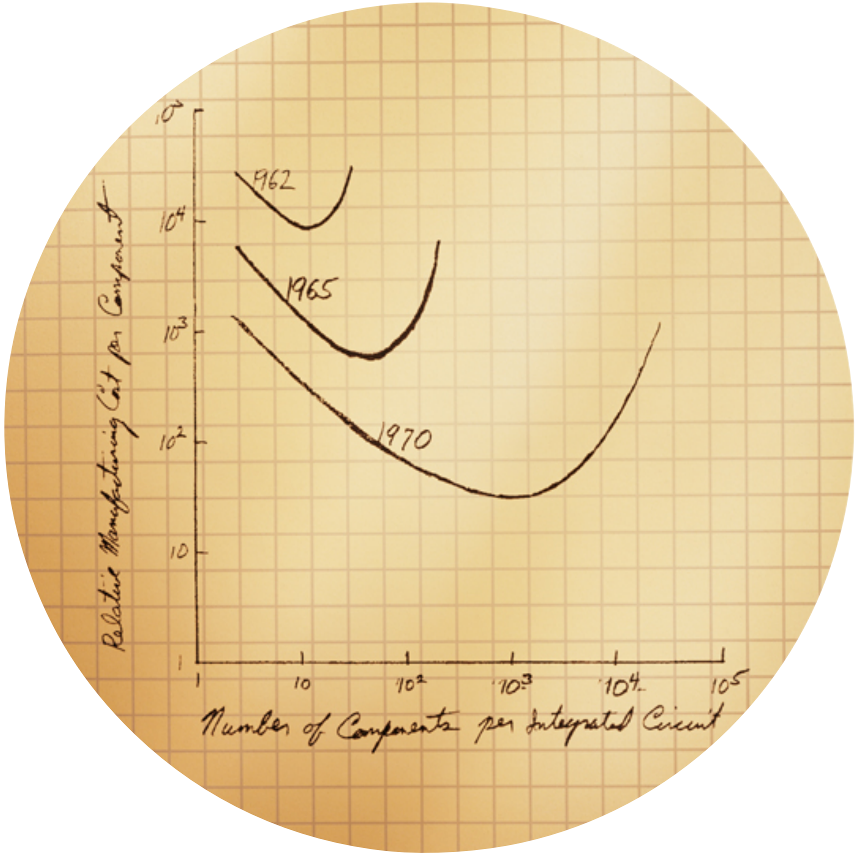
  半導体回路の集積度は18-24ヶ月ごとに倍になる

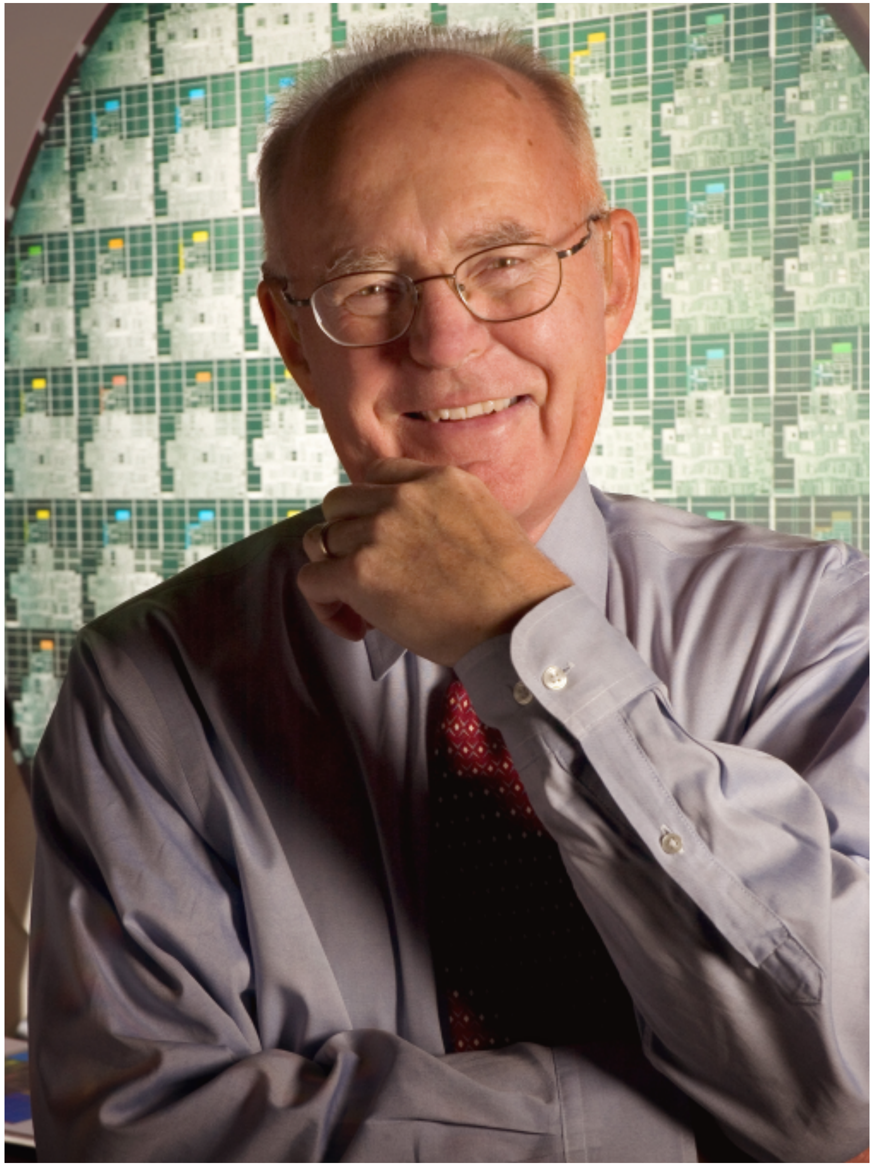
- チップ価格＝開発費用 / 生産数

  共通品、量販品としての PC の成功

  最高速製品が最廉価品であるという矛盾

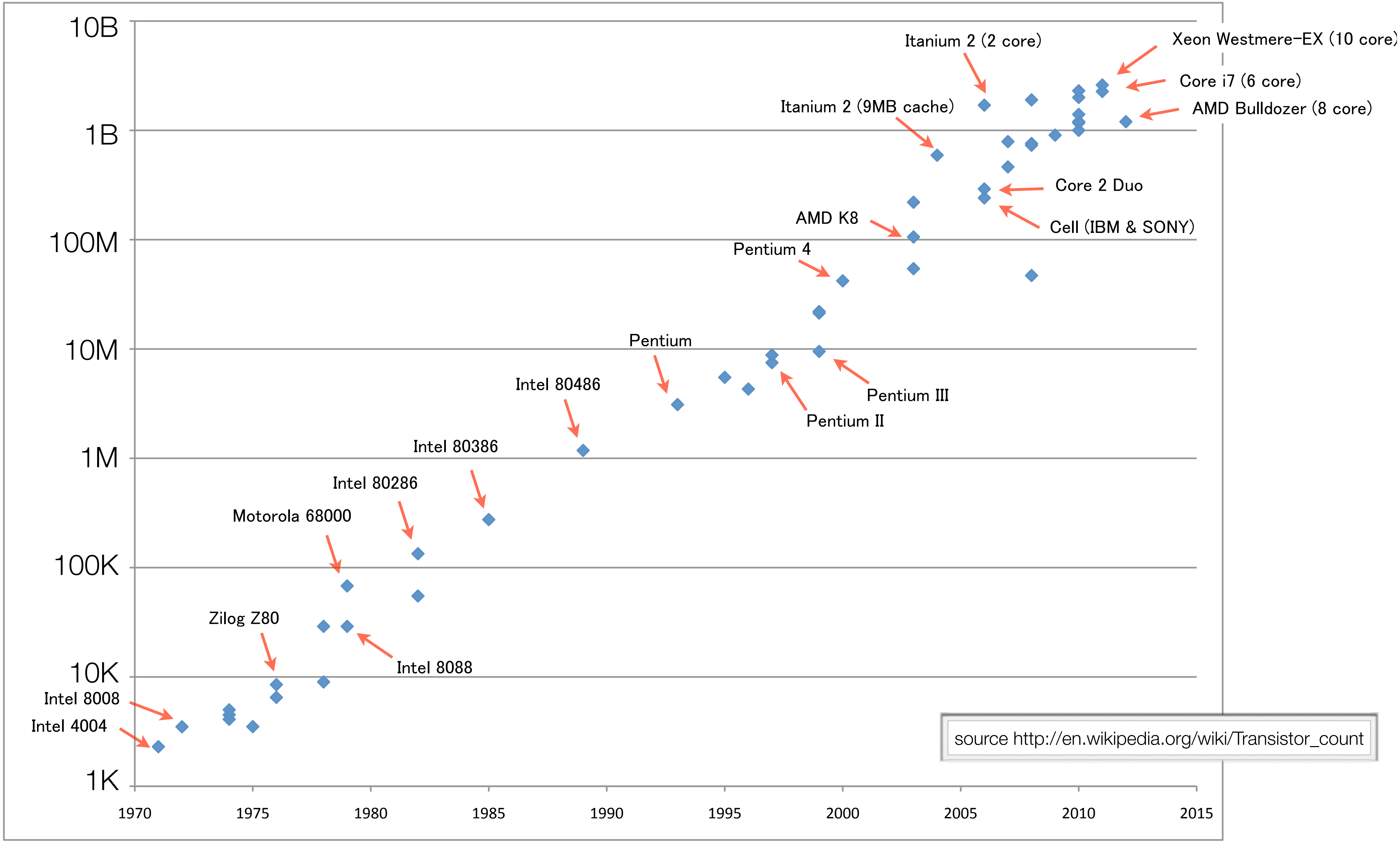
Gordon Moore



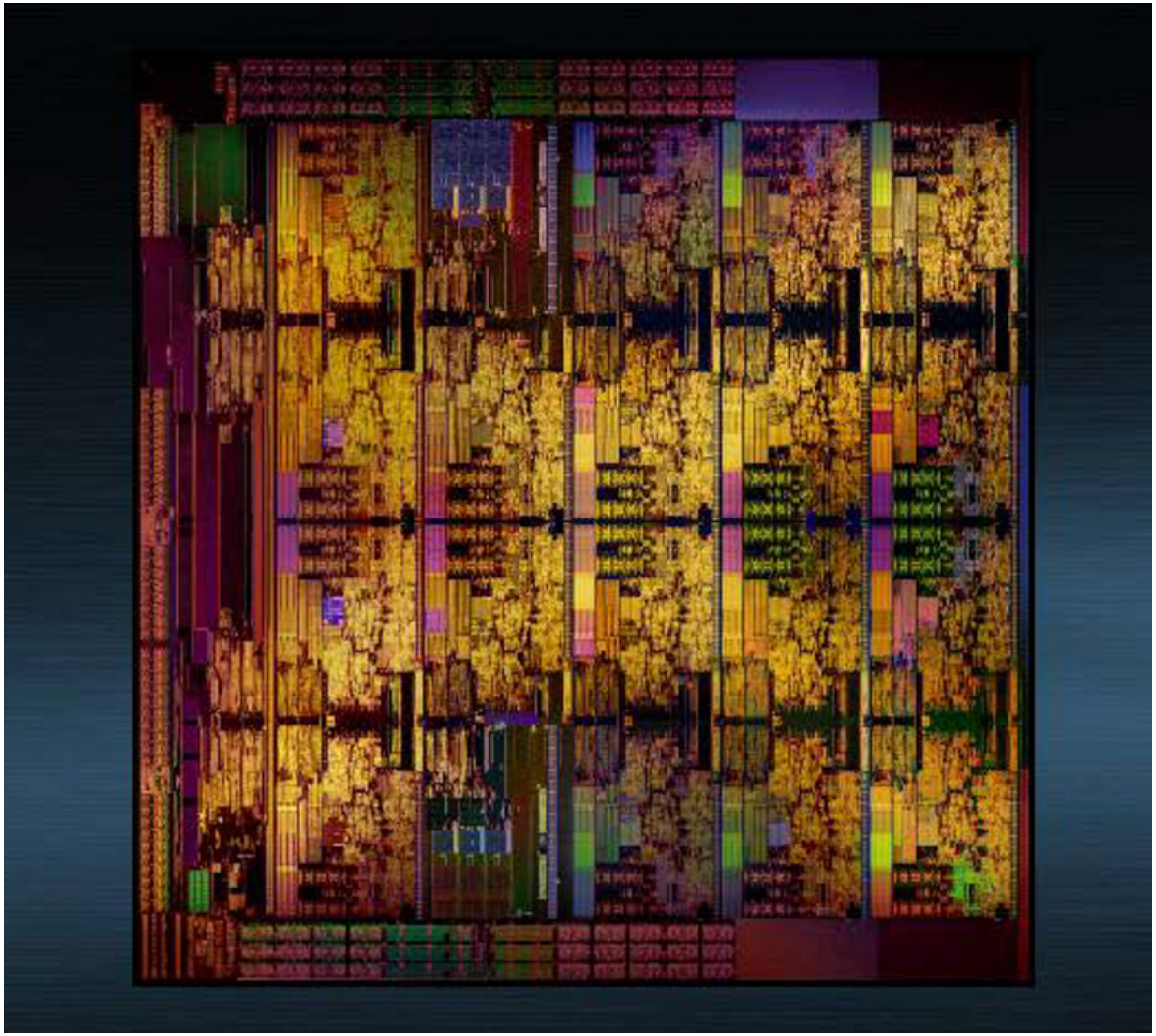


Intel , Moore’s law 40th anniversary. http://www.intel.com/pressroom/kits/events/moores_law_40th/

proof of the law, in real world



Intel Xeon Core i9-7980XE (Skylake-X, 2017/5)



Core i9-7980XE
18コア / 2.6GHz / 165W

14nm
70億トランジスタ（推定）

https://pc.watch.impress.co.jp/docs/column/ubiq/1062361.html

集積回路の製造

集積回路の製造

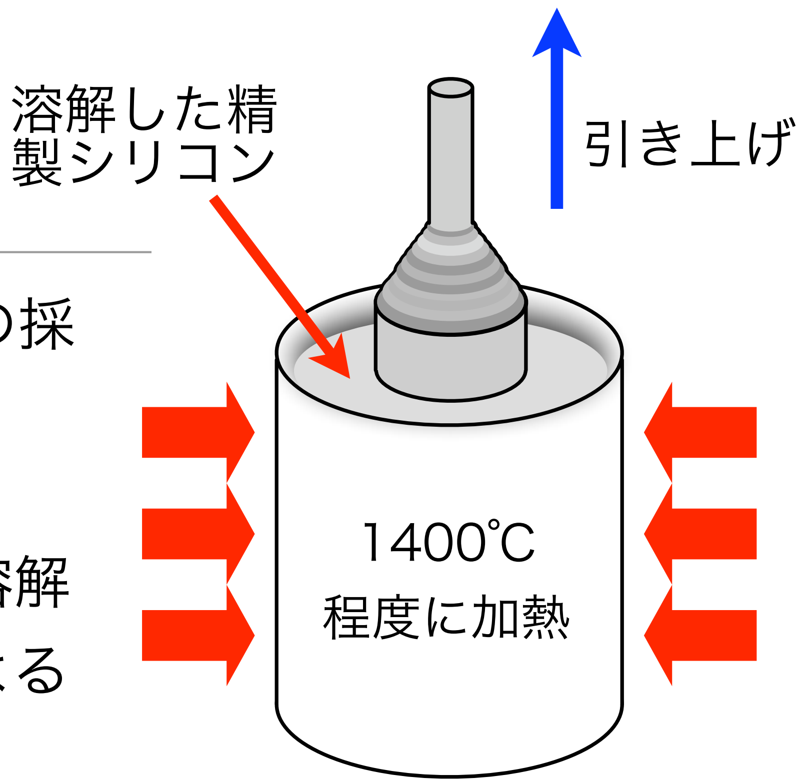
- シリコン結晶化
- ウェハー切り出し
- リソグラフィ・
  不純物拡散・配線
- ダイシング
- パッケージング

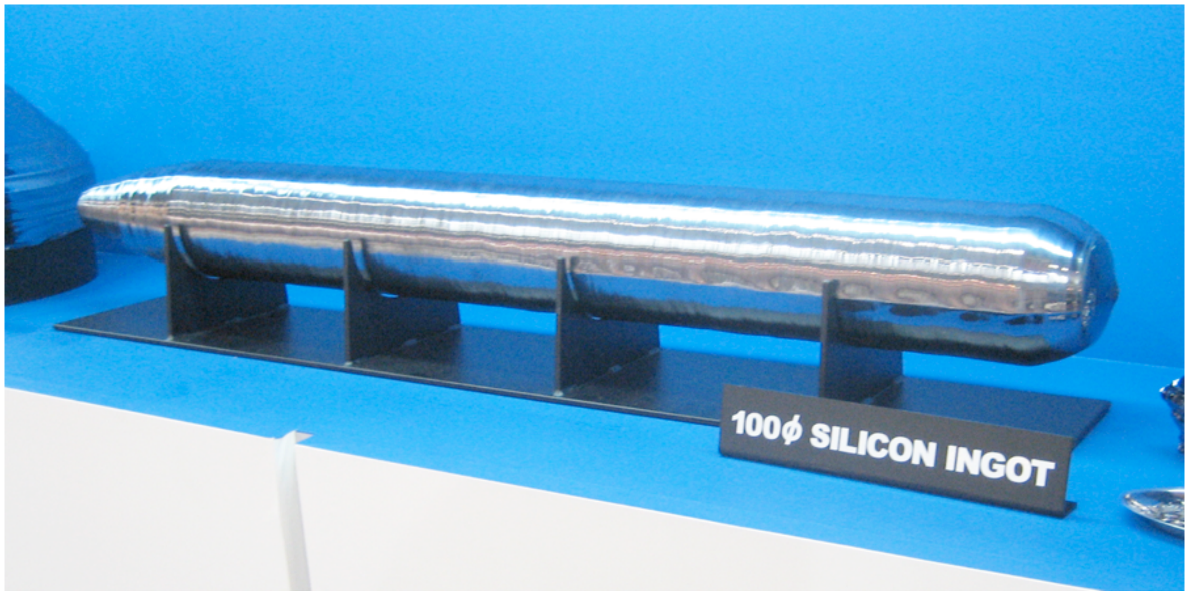
参考：よくわかる最新半導体の基本と仕組み, 西久保靖彦

集積回路の製造

- シリコン結晶化
- ウェハー切り出し
- リソグラフィ・不純物拡散・配線
- ダイシング
- パッケージング

1. 珪石(SiO2)の採掘
2. 精製
3. 炉で加熱・溶解
4. 引き上げによる単結晶化



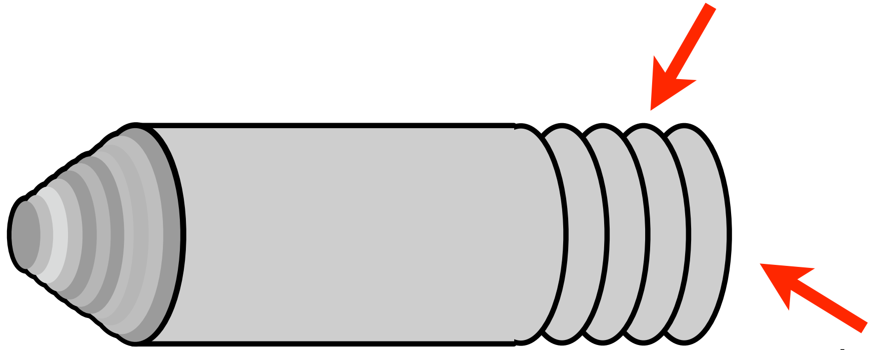


100mm 径のシリコン・インゴット（最新の設備では300mm径が多い）

集積回路の製造

- シリコン結晶化
- ウェハー切り出し
- リソグラフィ・不純物拡散・配線
- ダイシング
- パッケージング

スライスして円盤状に



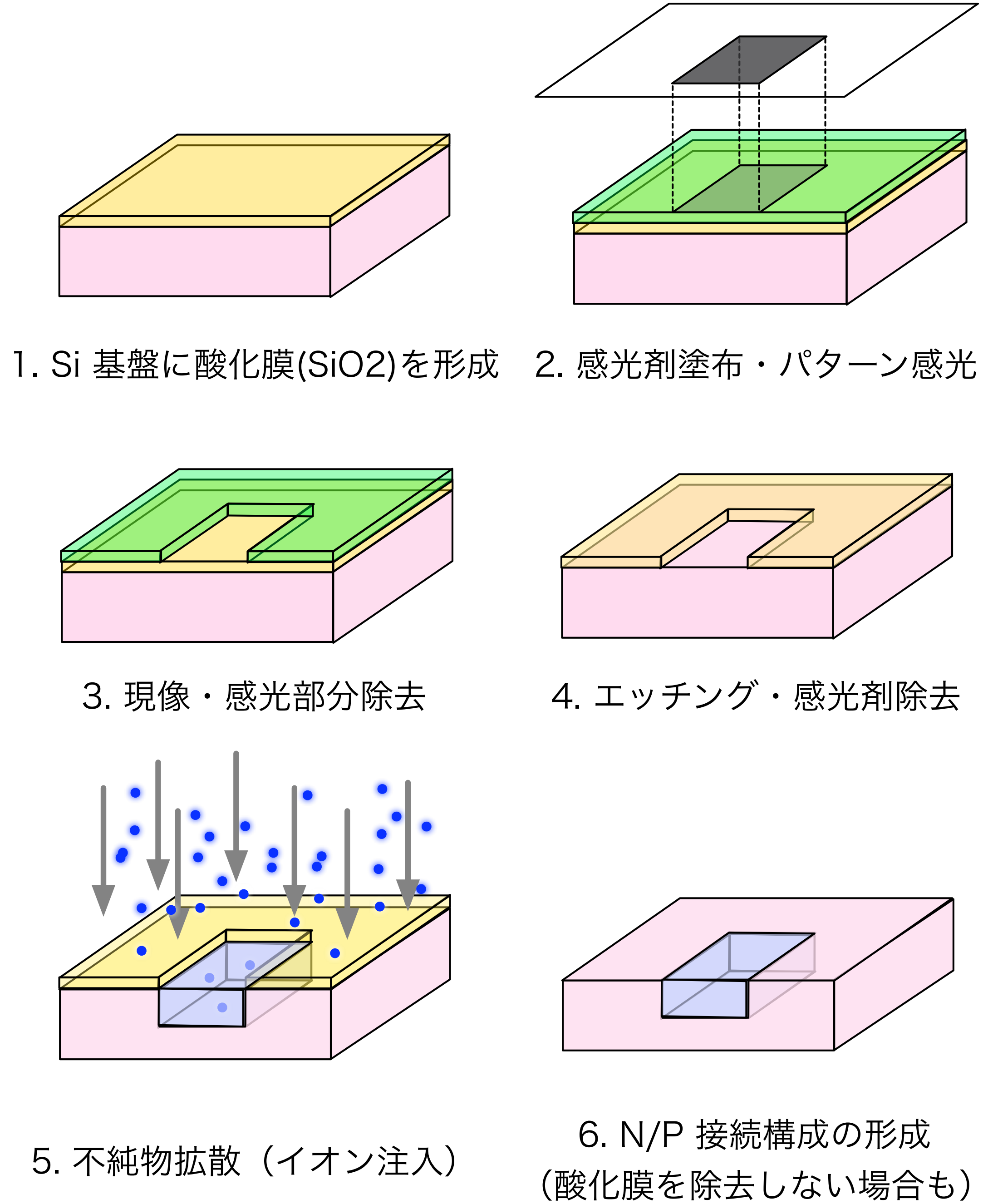
表面は研磨する

200mm径のウェハー

300mm径用の研磨装置

集積回路の製造

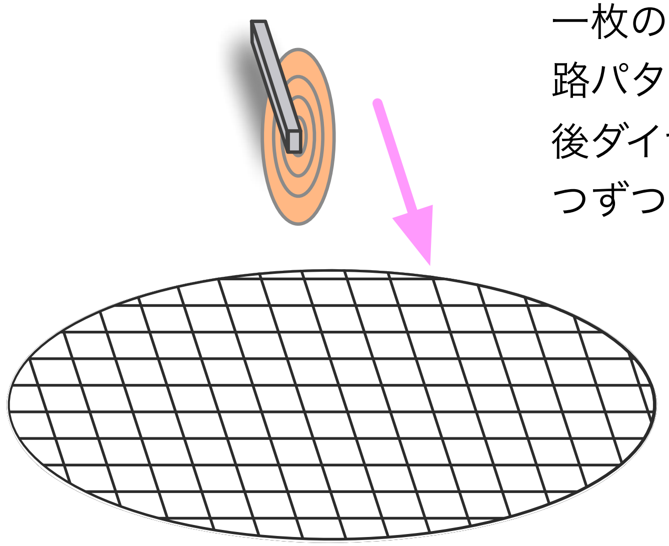
- シリコン結晶化
- ウェハー切り出し
- リソグラフィ・
  不純物拡散・配線
- ダイシング
- パッケージング



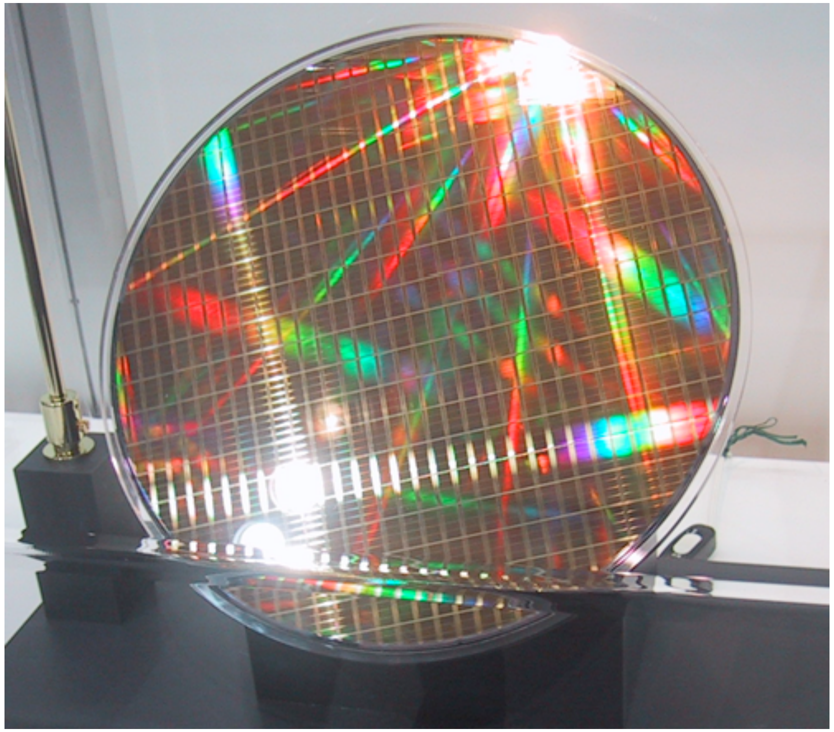
必要に応じて絶縁層、配線層（アルミ）などを同様に構築し、この工程を繰り返す

集積回路の製造

- シリコン結晶化
- ウェハー切り出し
- リソグラフィ・
  不純物拡散・配線
- ダイシング
- パッケージング



一枚のウェファーに同一の回路パターンを多数作り、その後ダイヤモンドカッターで一つずつカットする。

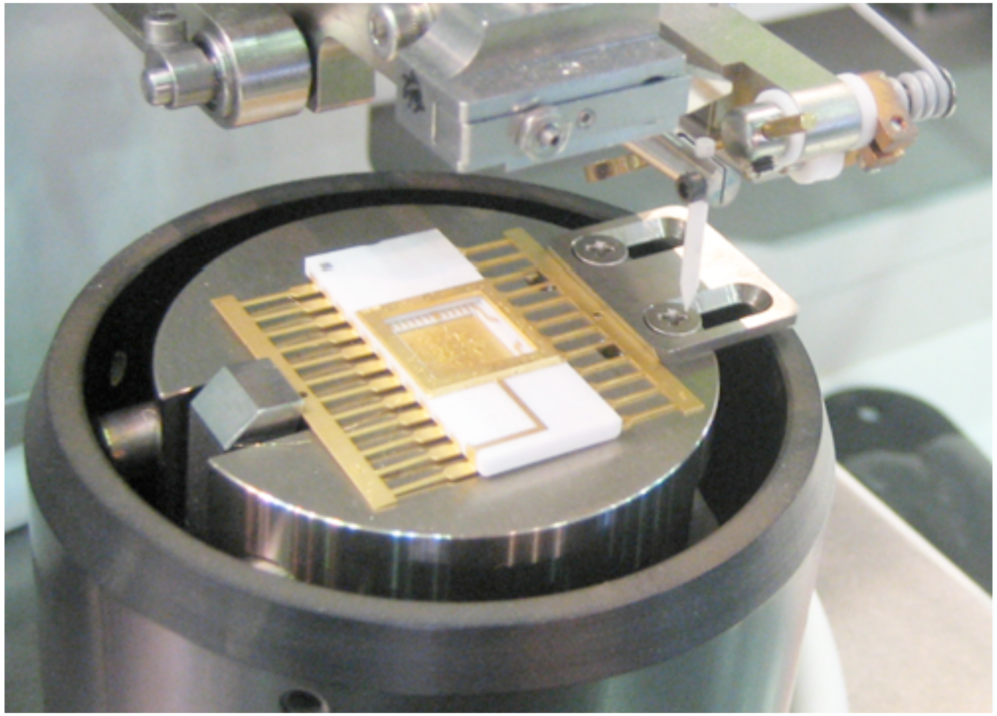


300mm ウェファー（東芝NANDフラッシュ）

集積回路の製造

- シリコン結晶化
- ウェハー切り出し
- リソグラフィ・
  不純物拡散・配線
- ダイシング
- パッケージング

1. リードフレームに載せる
2. ボンディングによってシリコン部と結線
3. 保護材で密封
4. リードを立て、マークを入れて出荷

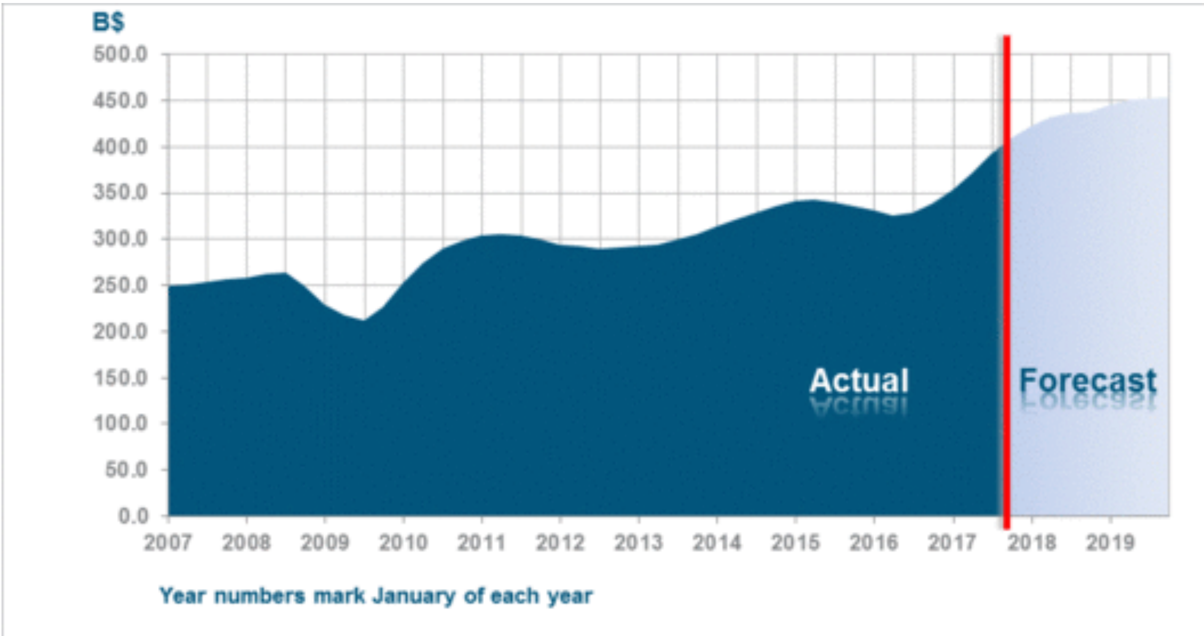


リードフレーム（電極の元になる）の上に載せて
シリコン部とリードを結線する（ボンディング）

産業（ビジネス）としての半導体製造

半導体製造産業における寡占化

- 世界半導体市場規模 40B ドル（4.3兆円）/月超
  (source: WSTS, Historical Billing Record, 2018/3)
- Sumsung 売上高 61B ドル（7.2兆円）/年超
  (source:Gartner, Press Release, STAMFORD, Conn., January 4, 2018)
- 最新プロセッサの製造は寡占から独占へ
- DRAM, Flash Memory も寡占化が進行中



World Semiconductor Trade Statistics, 2017
(per 12 months rolling average)
http://www.wsts.org

半導体売上高トップ10

メモリ特需的な状況？

2017 Rank	2016 Rank	Vendor	2017 Revenue	2017 Market Share (%)	2016 Revenue	2016-2017 Growth (%)
1	2	Samsung Electronics	61,215	14.6	40,104	52.6
2	1	Intel	57,712	13.8	54,091	6.7
3	4	SK Hynix	26,309	6.3	14,700	79
4	6	Micron Technology	23,062	5.5	12,950	78.1
5	3	Qualcomm	17,063	4.1	15,415	10.7
6	5	Broadcom	15,490	3.7	13,223	17.1
7	7	Texas Instruments	13,806	3.3	11,901	16.0
8	8	Toshiba	12,813	3.1	9,918	29.2
9	17	Western Digital	9,181	2.2	4,170	120.2
10	9	NXP	8,651	2.1	9,306	-7.0
		Others	**174,418**	**41.6**	**157,736**	**10.6**
		Total Market	**419,720**	**100.0**	**343,514**	**22.2**

45兆円

Top 10 社で38.4% share

（Intel が20年来のトップをSamsungに譲ったが、これは今年だけ？）

“Gartner Says Worldwide Semiconductor Revenue Grew 22.2 Percent in 2017; Samsung Takes Over No. 1 Position”, Gartner, 2018/1
https://www.gartner.com/newsroom/id/3842666

ファウンドリ（受託生産会社）の存在感

2017年半導体全体 $419B（45兆円）のうち $62B (15%) がファウンドリ

Major 2017 Foundries (Pure-Play and IDM)

2017 Rank	2016 Rank	Company	Foundry Type	Location	2015 Sales ($M)	2016 Sales ($M)	2016/2015 Change (%)	2017 Sales ($M)	2017/2016 Change (%)
1	1	TSMC	Pure-Play	Taiwan	26,574	29,488	11%	32,163	9%
2	2	GlobalFoundries	Pure-Play	U.S.	5,019	5,495	9%	6,060	10%
3	3	UMC	Pure-Play	Taiwan	4,464	4,582	3%	4,898	7%
4	4	Samsung	IDM	South Korea	2,670	4,410	65%	4,600	4%
5	5	SMIC	Pure-Play	China	2,236	2,914	30%	3,101	6%
6	6	Powerchip	Pure-Play	Taiwan	1,268	1,275	1%	1,498	17%
7	8	Huahong Group*	Pure-Play	China	971	1,184	22%	1,395	18%
8	7	TowerJazz	Pure-Play	Israel	961	1,250	30%	1,388	11%
—	—	Top 8 Total	—	—	44,163	50,598	15%	55,103	9%
—	—	Top 8 Share	—	—	87%	88%	—	88%	—
—	—	Other Foundry	—	—	6,597	7,112	8%	7,207	1%
—	—	Total Foundry	—	—	50,760	57,710	14%	62,310	8%

*Includes Huahong Grace and Shanghai Huali.

Source: IC Insights, company reports

2017年の半導体ファウンドリ売上高ランキング・トップ8 (7位のHuahongグループは、傘下のHuahong GraceとShanghai Hualiの売り上げを含む。Samsungの売り上げは半導体事業の中におけるファウンドリ部門のみ計上したもの) (出所:IC Insights)

“売上高が10億ドルを上回るファウンドリは8社で、その合計額は623億ドル、ファウンドリ市場におけるシェアは88%となった”

2017年の半導体ファウンドリランキング - 売上高10億ドル超は8社, マイナビニュース, 2018/04/27
https://news.mynavi.jp/article/20180427-622956/

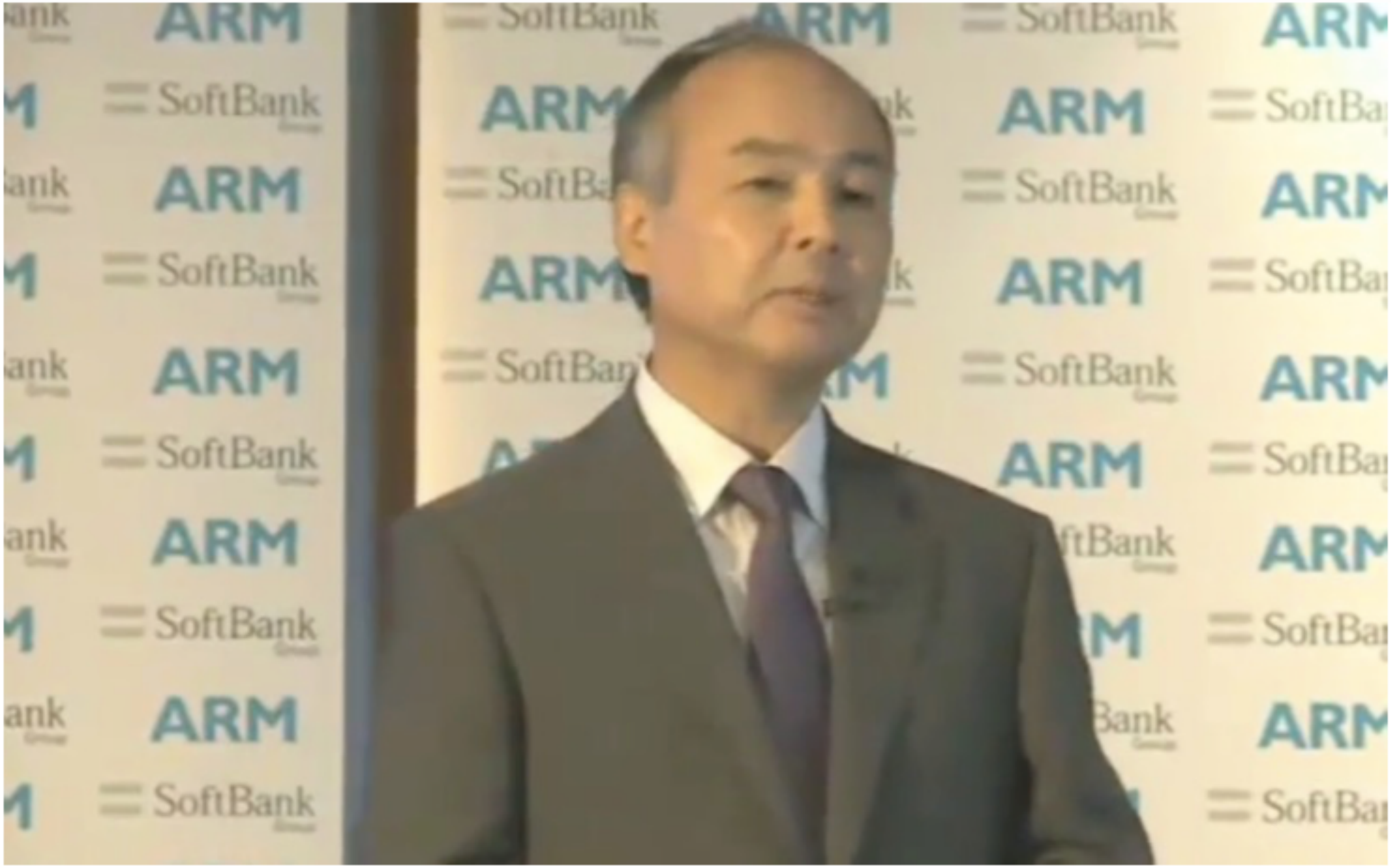
製造設備への投資

- （TSMC は）台湾・新竹にある生産施設の拡大に向けて4000億台湾ドル（約１兆5000億円）を投じる

“ＴＳＭＣ：約1.5兆円の投資計画ー新竹の生産施設を拡大へ”, Bloomberg, 2018/04/27
https://www.bloomberg.co.jp/news/articles/2018-04-27/P7TTP56TTDS801

- IC Insightsでは、Samsungの2018年の半導体設備投資額は200億ドル前後と見ている

“2018年の半導体設備投資額、史上初の1000億ドル突破の見込み - IC Insights”, マイナビニュース, 2018/05/24
https://news.mynavi.jp/article/20180524-635238/



ソフトバンクグループは7月18日、英半導体大手のARMを約3兆3000億円(240億ポンド)で買収すると発表しました。ロンドンでの記者会見に登壇した孫正義氏は「いよいよその日が来た」と興奮気味に買収の詳細や経緯について説明しました。

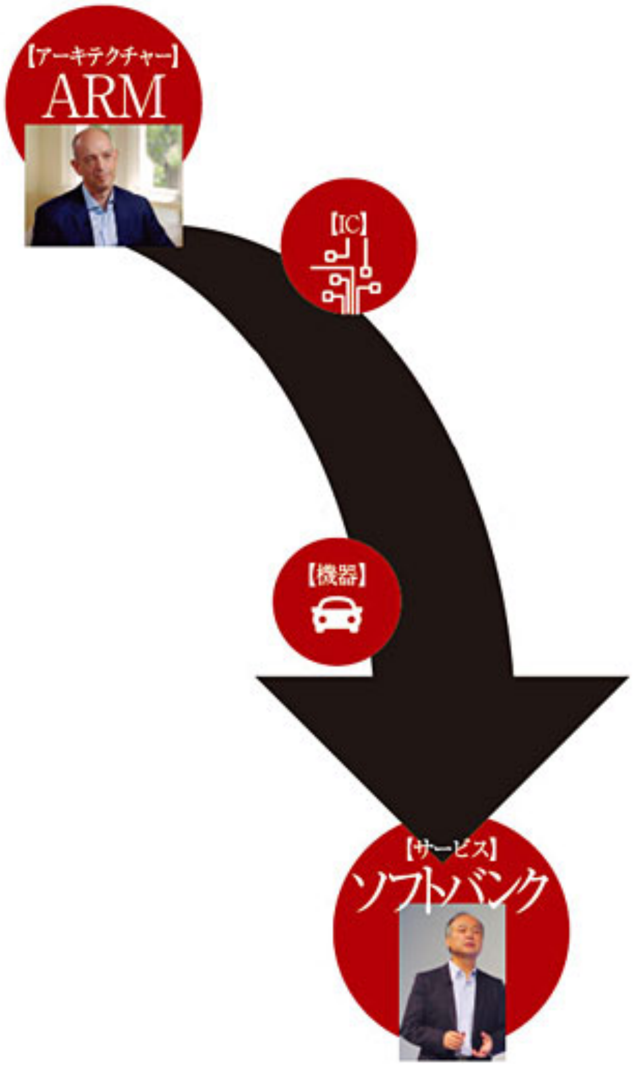
2016年07月19日 Engadget Japan ソフトバンク孫氏、ARM買収「たかが3兆円」。英政府「歓迎できる

http://japanese.engadget.com/2016/07/18/arm-3-3-iot/

Sources of innovation
日経エレクトロニクス
NIKKEI ELECTRONICS

2016年9月号
Special Report緊急レポート

孫正義氏の野望をARMは叶えられるのか



7月の連休最終日である海の日。エレクトロニクス業界に激震が走った。ソフトバンクグループが3兆3000億円という大金を投じて、年商1800億円にすぎない英ARM Holdings社を買収するというニュースが流れたからだ。ソフトバンクグループを率いる孫正義氏の真の狙いは何か、それを実現する実力をARMは持っているのかを探った。

http://techon.nikkeibp.co.jp/atcl/mag/15/091000005/080800002/index.html