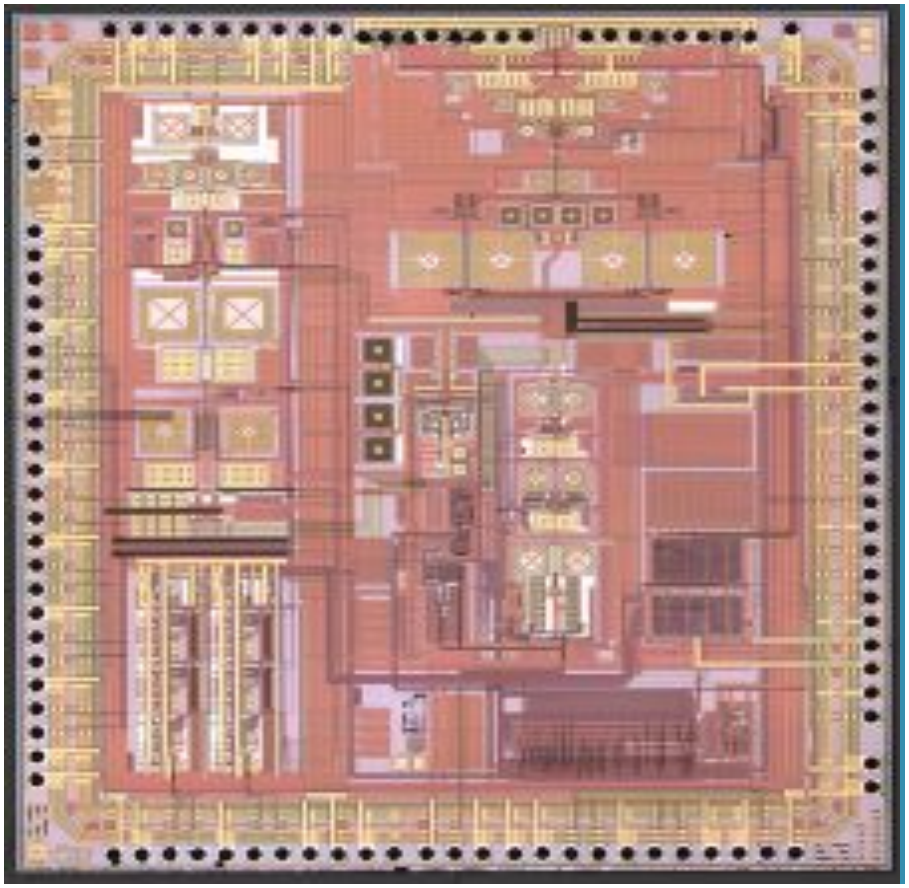


Analog Integrated Circuits

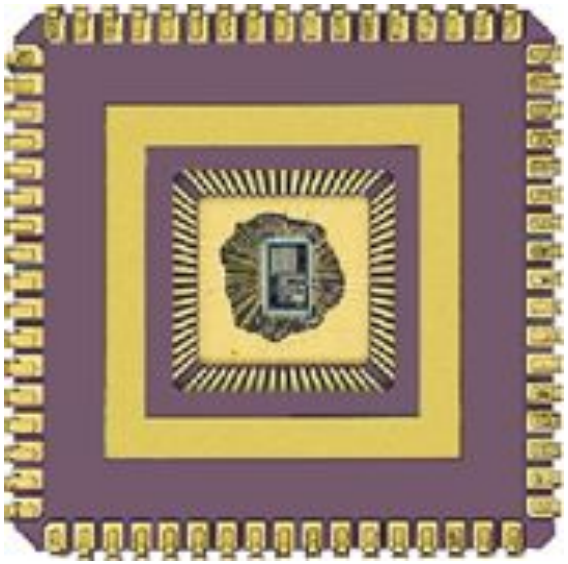
รศ. ดร. อภินันท์ ธนชยานนท์

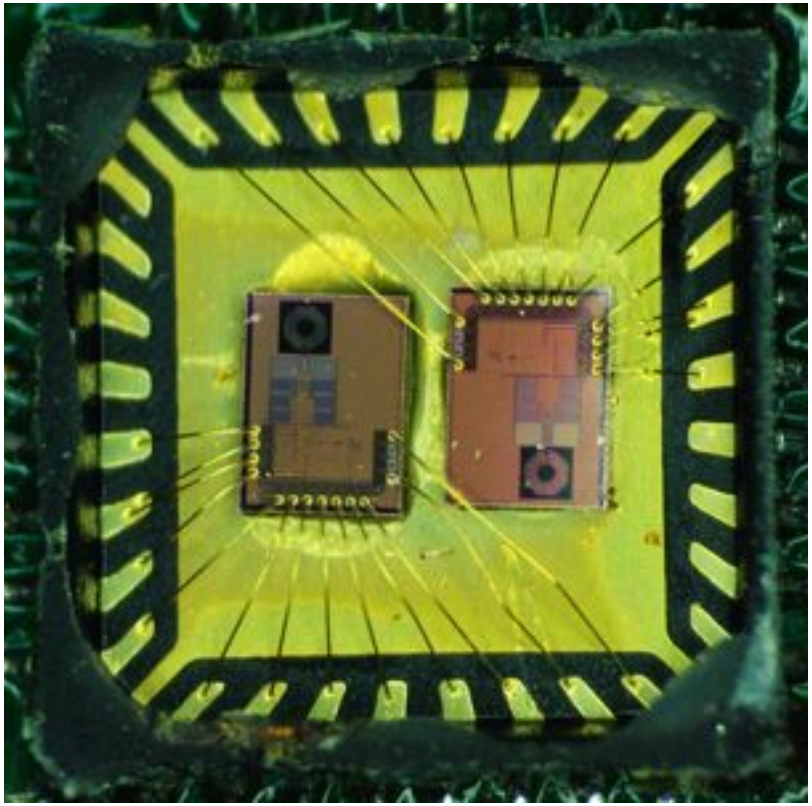
Apinunt Thanachayanont

ktapinun@kmitl.ac.th

วิชานี้เกี่ยวกับอะไร ?

- การออกแบบและวิเคราะห์ วงจรรวม และ ระบบไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับประมวลสัญญาณอนาลอก





PLL Frequency synthesizer

เนื้อหาวิชาโดยย่อ

- แนะนำเทคโนโลยีวงจรรวม และวงจรอนาลอก
- แบบจำลองและการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆในเทคโนโลยีวงจรรวม
- วงจรไบอัสต่างๆ
- วงจรขยายแบบพื้นฐานต่างๆ
- การตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยาย
- สัญญาณรบกวนในวงจรรวม
- การป้อนกลับและเสถียรภาพของวงจรขยาย
- วงจรขยายโอเปอเรชั่นแนล (ออปแอมป์)
- วงจรขยายโอเปอเรชั่นแนลขั้นก้าวหน้า

ตำราประกอบ

- CMOS analog circuit design, P.E. Allen and D. Holberg, Oxford university press, 2002

- Analysis and Design of Analog Integrated Circuits, P. R. Gray and R. G. Meyer, 5th-edition, Wiley, 2009

- Design of CMOS Analog Integrated Circuits, B. Razavi, McGraw-Hill, 2001

การประเมินผล

- สอบกลางภาค 30 %
- สอบปลายภาค 70 %
- การบ้าน 10 %
- ช่วงของเกรด (โดยประมาณ)
  - A: 76-100, B+: 71-75, B: 66-70, C+: 56-65, C: 41-55, D+: 36-40, D: 31-35, F: 0-30
- E-classroom
  - htttp://www.kmitl.ac.th/~ktapinun
  - http://apinunt.yolasite.com/analogic.php

บทที่ 1: บทนำและพื้นฐาน

1.1 การออกแบบวงจรรวมอนาลอก

1.2 ผลของเทคโนโลยีวงจรรวมต่อการออกแบบวงจรอนาลอก

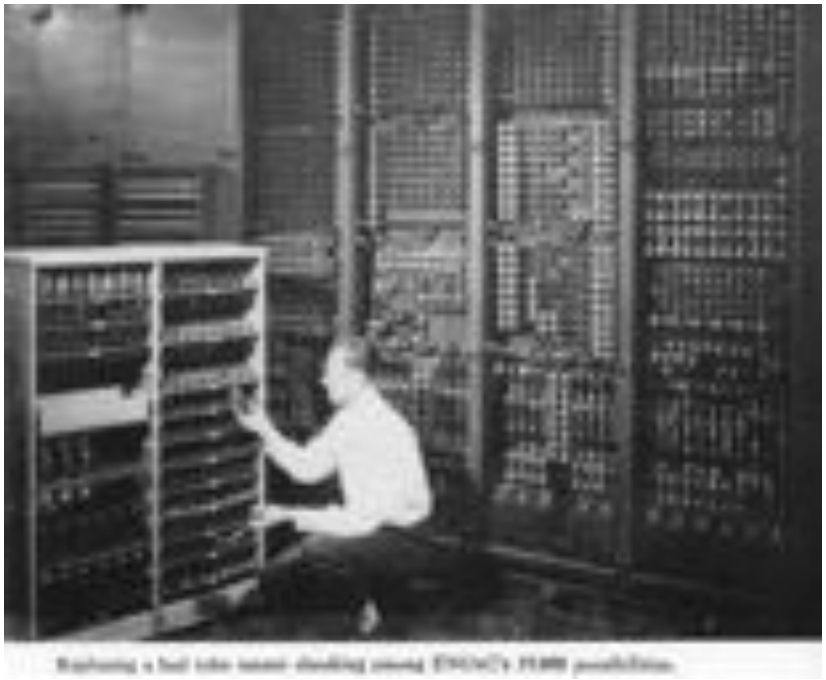
1.3 การประมวลสัญญาณอนาลอก

1.4 สัญลักษณ์

1.5 สรุป

Vacuum-tube electronics

ENIAC (1943-45)



20 by 40 foot room, weighed 30 tons, and used more than 18,000 vacuum tubes, 174,000 watts of heat

http://www.computersciencelab.com/ComputerHistory/HistoryPt4.htm

OSAKA University (1950)

1,500 vacuum tubes and 4,000 diodes. 1-MHz clock frequency

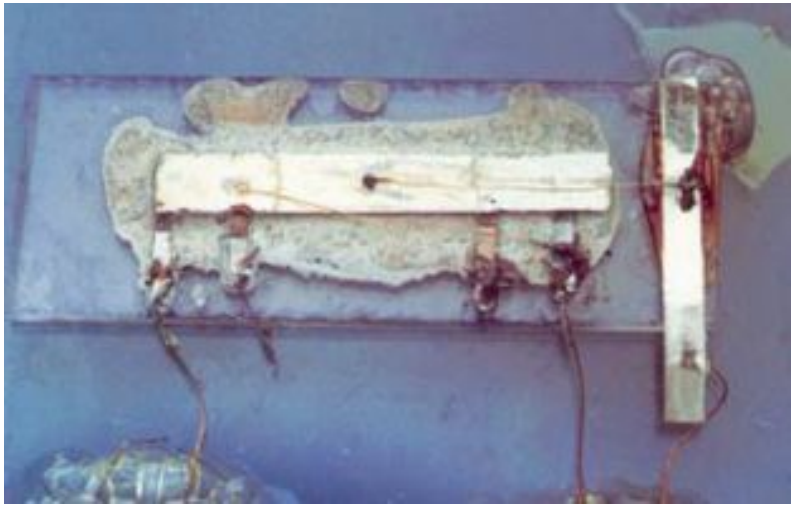
http://museum.ipsj.or.jp/en/heritage/handai-shinkukan.html

The Birth of the Transistor

- 1947 – John Bardeen (left), Walter H. Brattain (right), William B. Shockley (seated) at Bell Telephone Laboratories -> The Bipolar Transistor
- 1956: the Nobel Prize in Physics “for their researches on semiconductors and their discovery of the transistor effect”
- 1950 - William B. Shockley The Junction Transistor

(The theory and operation principle of transistor was first proposed by Lilienfield back in 1930, but there was no technology for implementation)

The beginning of ICs



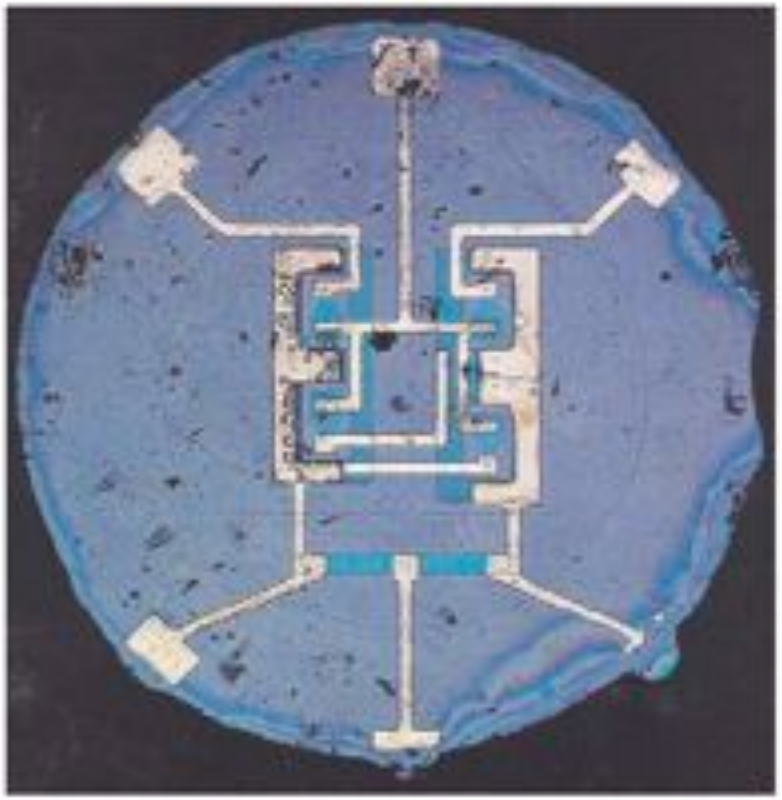
Jack S. Kilby

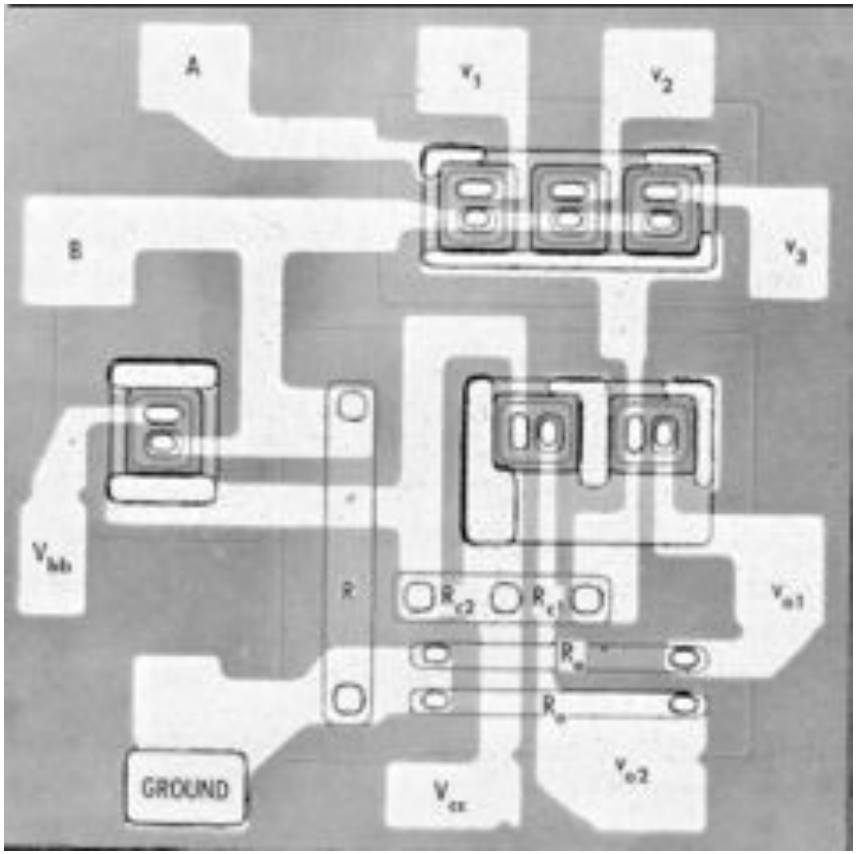
- 1951 industrial production of the bipolar transistor dev. by Shockley
- In 1952, G. Dummer proposed the concept of semiconductor IC implementation for the first time.
- 1954 the first transistor-based radio Texas Instruments makes first silicon transistor (price $250)
- In 1958, J. Kilby (Texas Instruments) manufactured the world's first IC (a phase shift oscillator)
- In 1959, R. Noyce and G. Moore (Fairchild semiconductor) invented the planar semiconductor fabrication technology for BJTs

Robert Noyce

Early integrated circuits

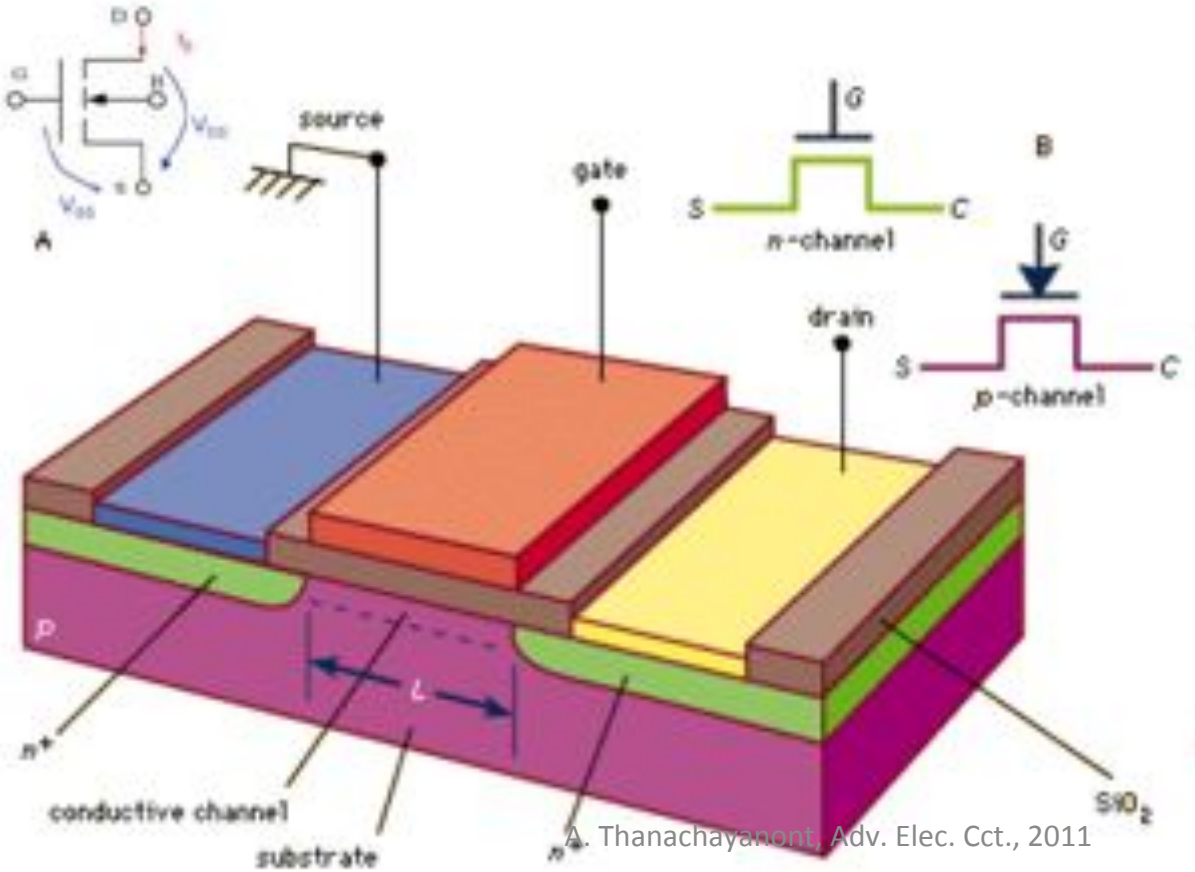
- Fairchild
- 1959 - Robert Noyce & Jean Hoerni
  - the most efficient way to make transistors
  - the breakthrough for the commercial ICs





A New Form of Transistor: MOSFET

- RCA' research laboratory, Princeton
- 1962 - Steven R. Hofstein & Frederic P. Heiman
- Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor



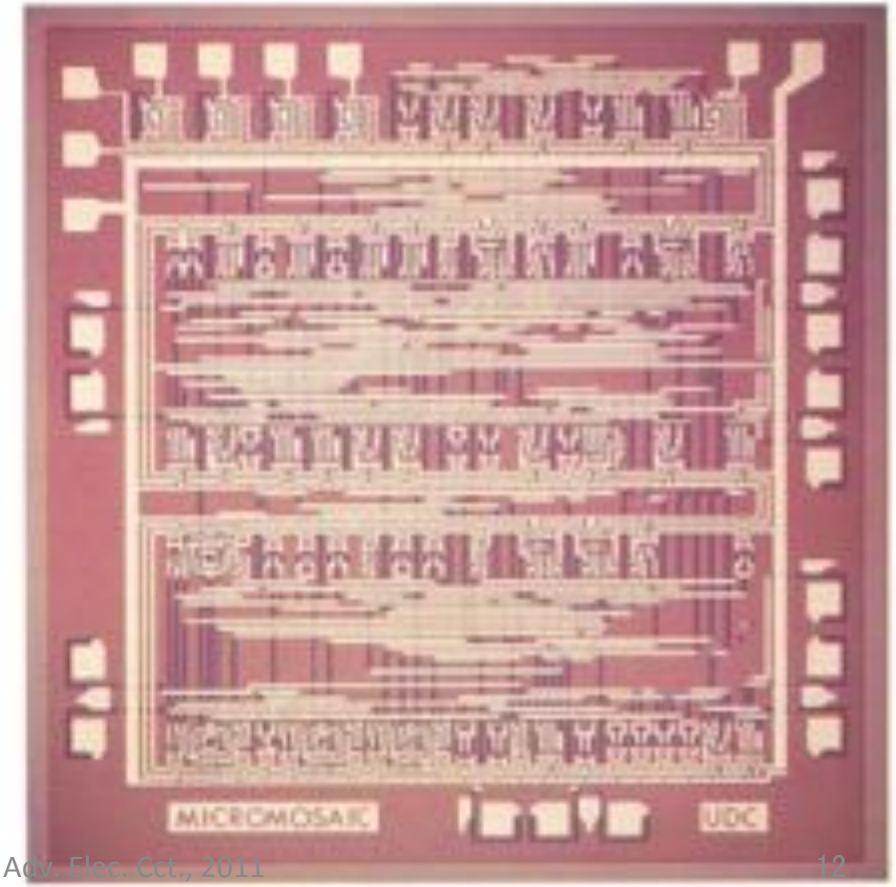
– MOSFET vs Bipolar
+ cheaper
+ smaller
+ easier to integrate
+ less power hungry
- slower

– Transfer resistor

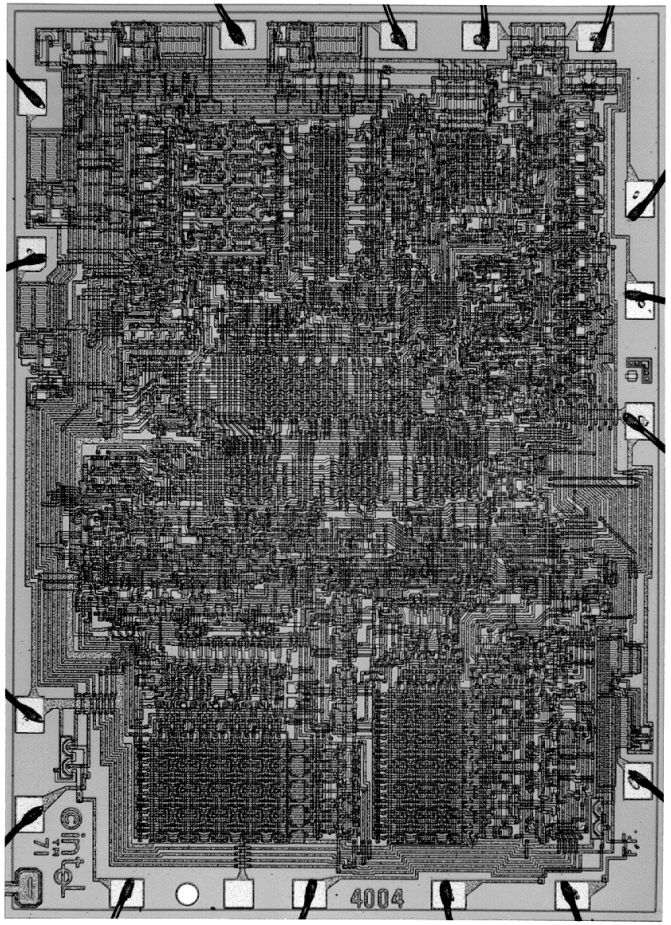
Early Integration & Computer Aided Design (CAD)

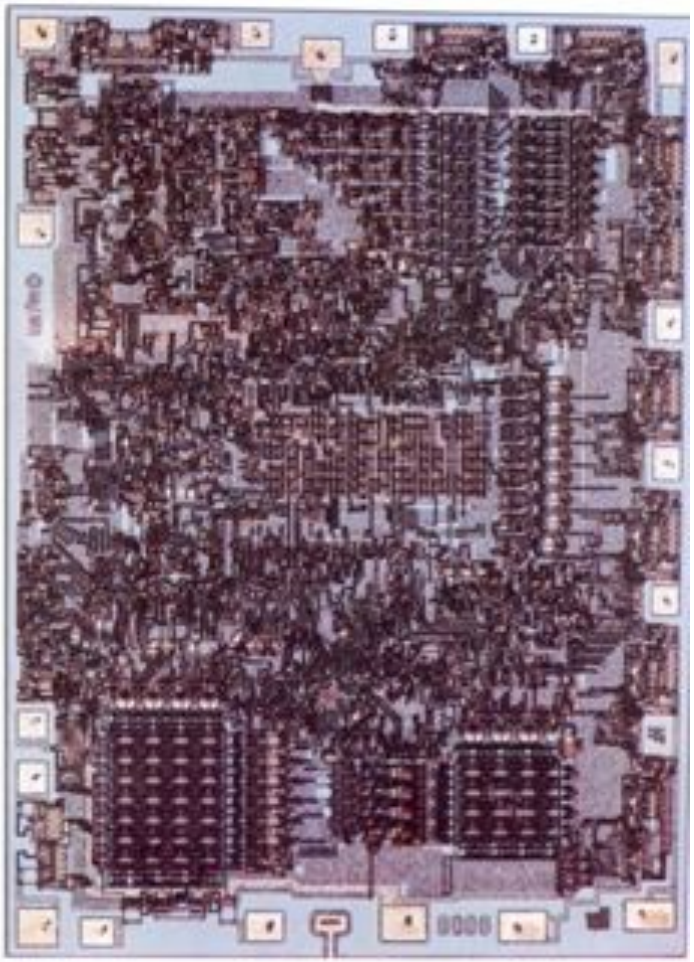
- In the year 1967, Fairchild markets the semicustom chip shown right. Transistors (organized in columns) could be easily rewired using a two-layer interconnect to create different circuits. This circuit contains ~ 150 logic gates.

- Today's sophisticated ICs are quasi impossible to be realised without the use of CAD tools

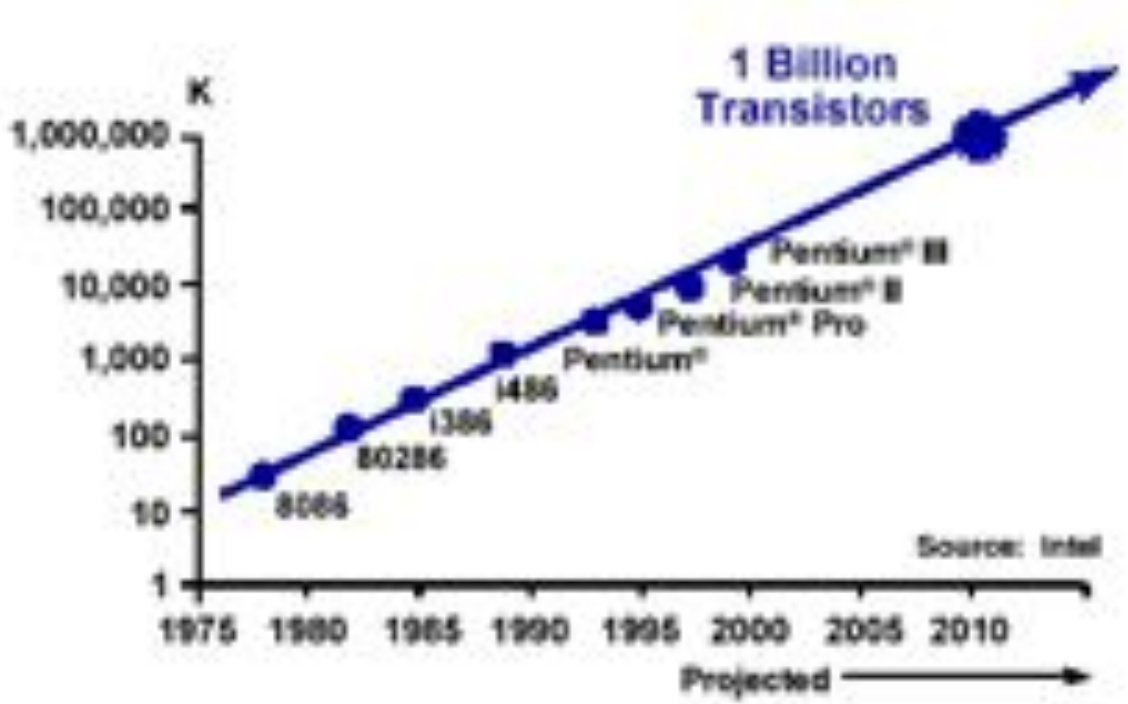


The Microprocessor Revolution



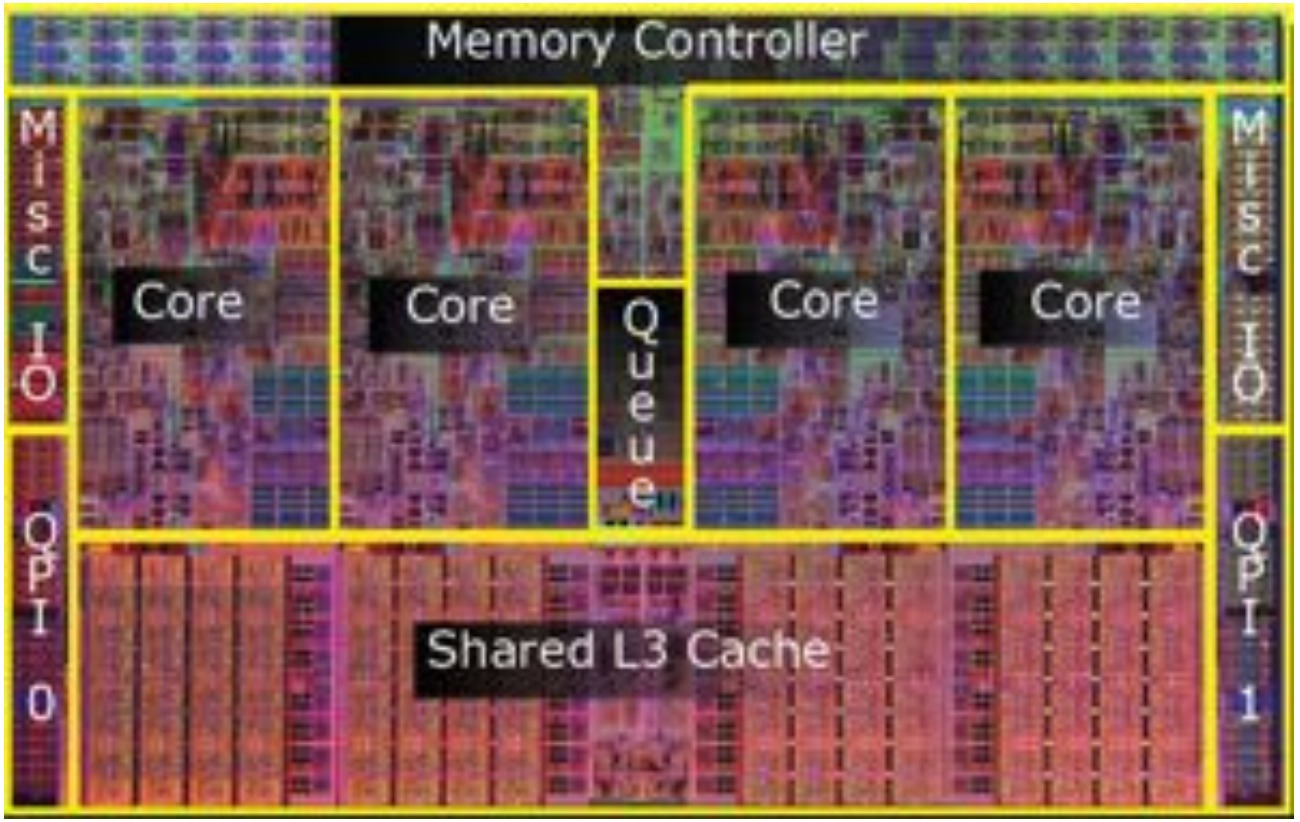


Moore's Law



- In 1965, Gordon Moore predicted that the number of transistors in a chip will double every 18-24 months
- The integrated circuit was invented in 1958.
- World transistor production has more than doubled every year for the past twenty years.
- Every year, more transistors are produced than in all previous years combined.
- Approximately 10^9 transistors were produced in a recent year.
- Roughly 50 transistors for every ant in the world .

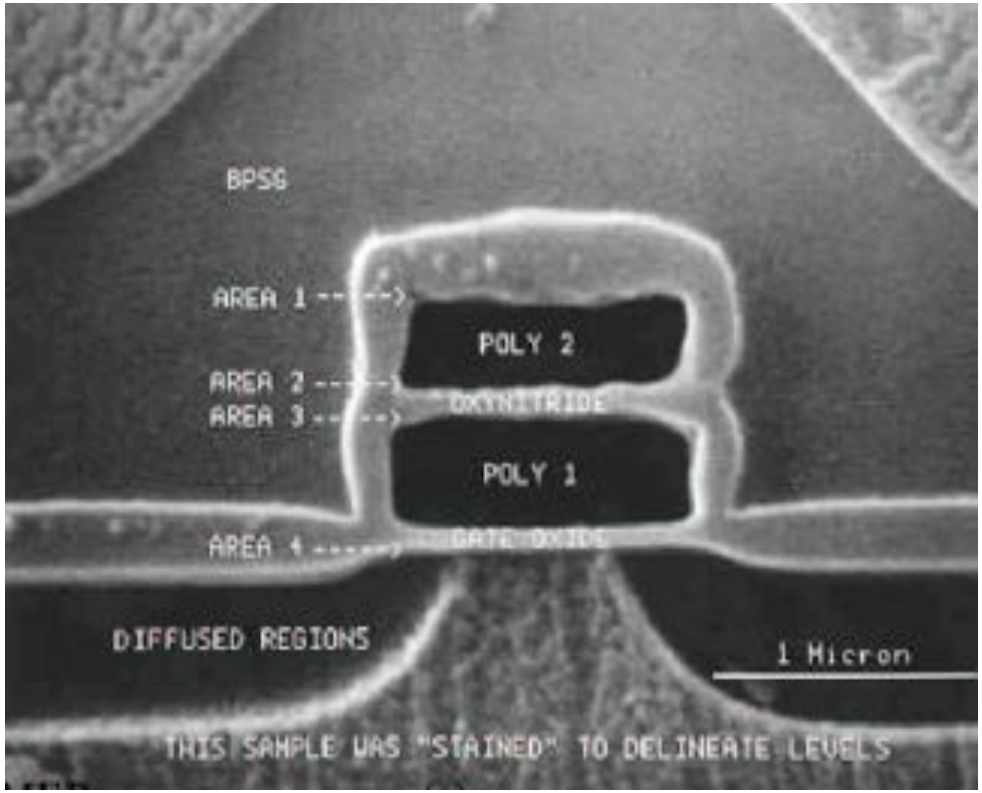
Intel core i7



4 cores, 2.2-GHz, 6-MB Cache, 32-nm CMOS technology, 1.17Billions transistor

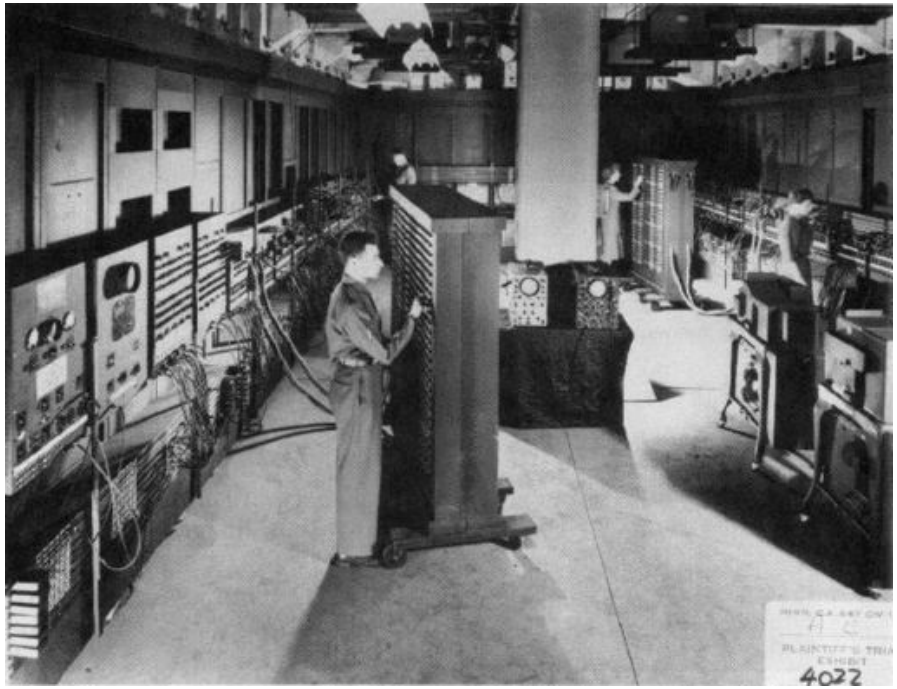
Transistor – Past and Present

- The world's first transistor (Bardeen, Brattain and Shockley, Bell labs, 1947)



- Typical modern sub-micron MOSFET

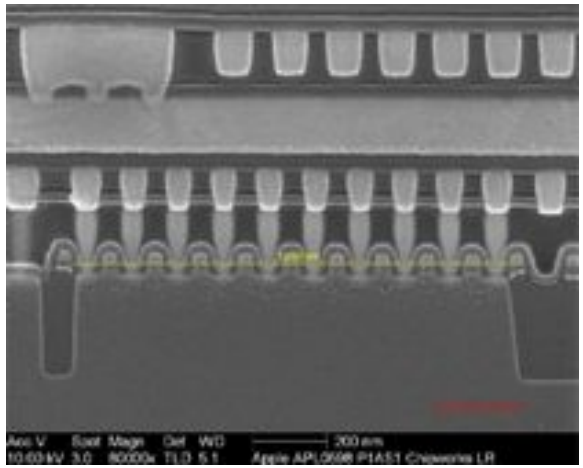
Computer – past and present



Electronic systems: Cellular telephone

Inside iPhone 5s

1. Computational processor
   - A7 ARM CPU, multi-tasking, 16/32GB Flash memory
2. Communications
   - GSM, 3G, 4G LTE, GPRS, WIFI, Bluetooth, GPS
3. Audio/Videos
   - Video controllers, 2 Mics, 8MP camera, Flash LED
4. Sensors
   - 3-axis gyroscope & accelerometer, Proximity & ambient light sensor, fingerprint sensor

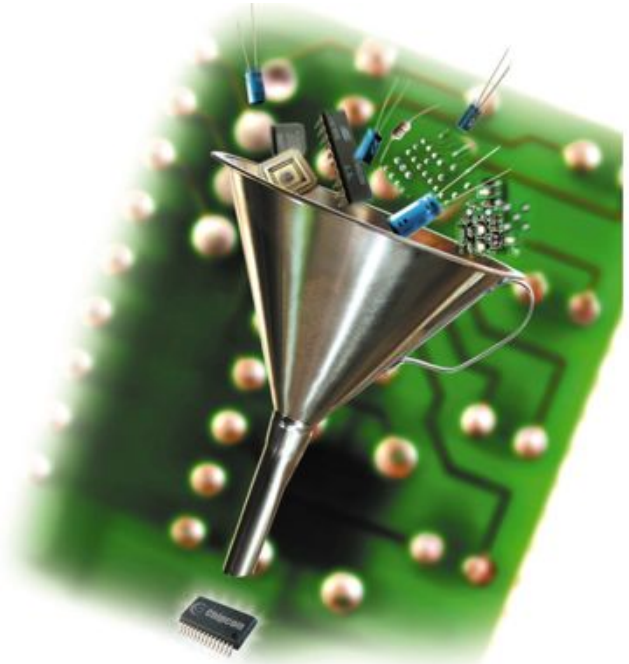


28-nm CMOS

http://www.chipworks.com/en/technical-competitive-analysis/resources/blog/inside-the-iphone-5s/

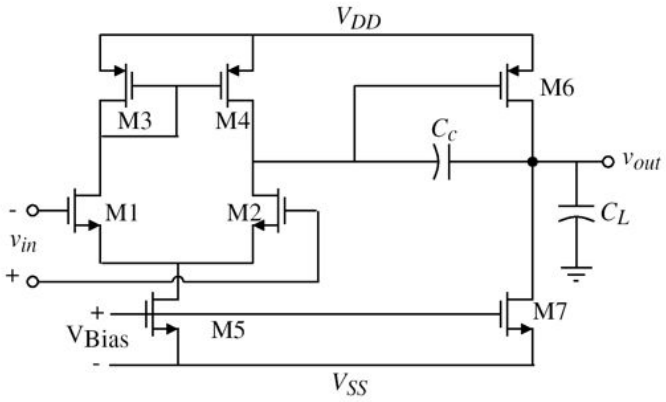
1.1 การออกแบบวงจรรวมอนาลอก

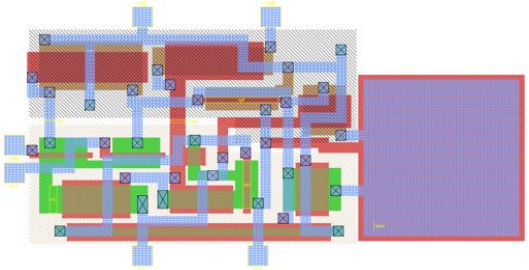
- วงจรรวมคืออะไร ?
  - วงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ

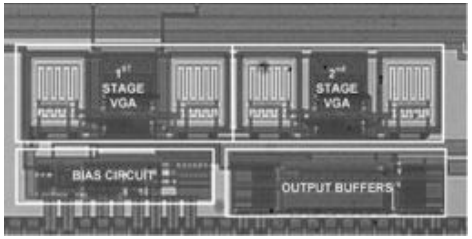


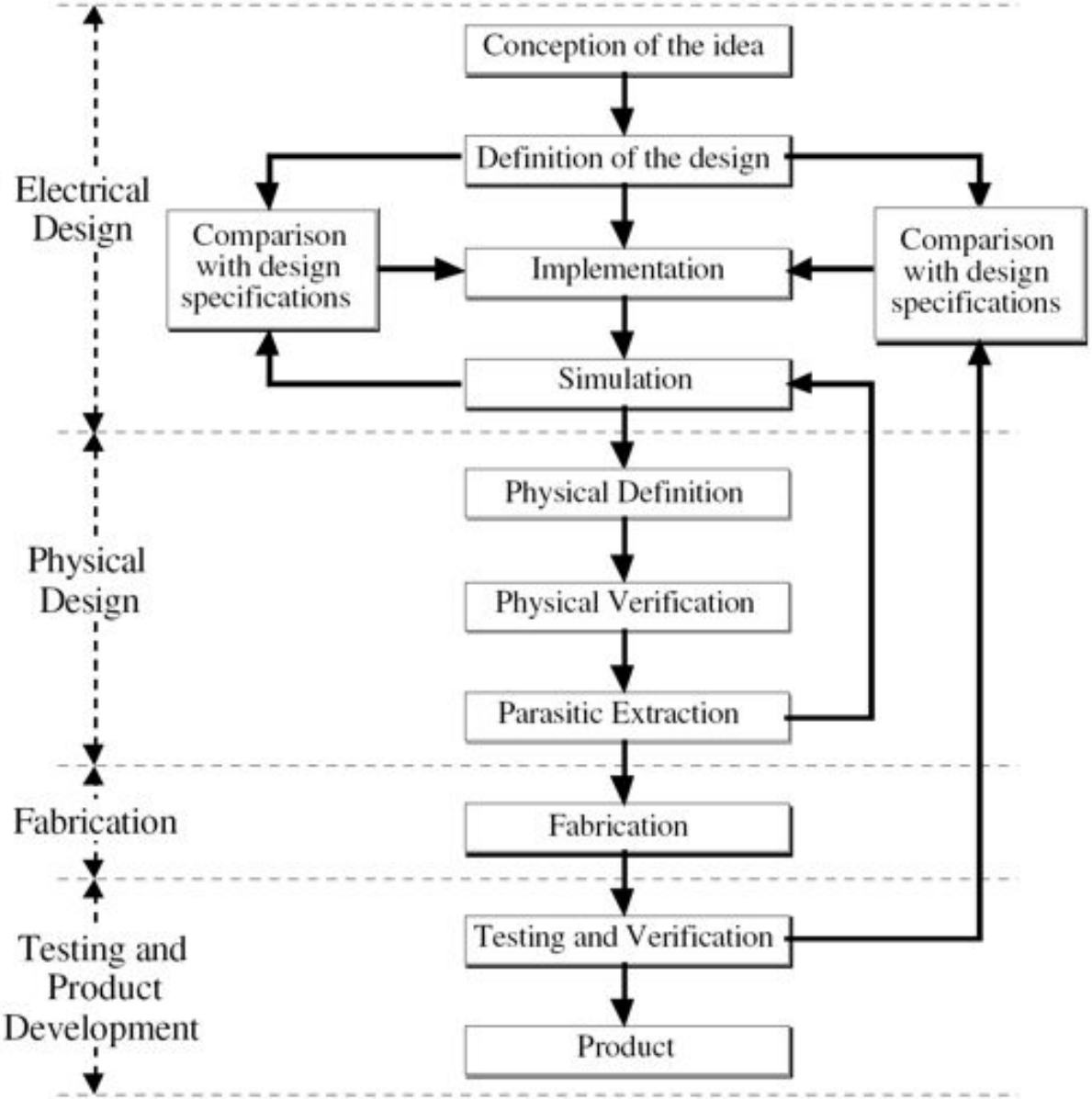
- ในวงจรรวมมีอะไรบ้าง ?
  - ชั้นตัวนำที่ใช้สร้างสายไฟ ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และขดลวดเหนี่ยวนำ
    - ชั้นโลหะ (metal layers) ชั้นฉนวน (silicon dioxide) ชั้นสารกึ่งตัวนำ (doped silicon)
  - ทรานซิสเตอร์ ซึ่งสร้างจากชั้นสารกึ่งตัวนำและฉนวน ที่อยู่ใต้ชั้นโลหะ
    - ทรานซิสเตอร์แบบรอยต่อไบโพล่าร์ (bipolar junction transistor, BJT)
    - ทรานซิสเตอร์แบบสนามไฟฟ้า (field effect transistor, FET)

ขั้นตอนการออกแบบวงจรรวมอนาลอก

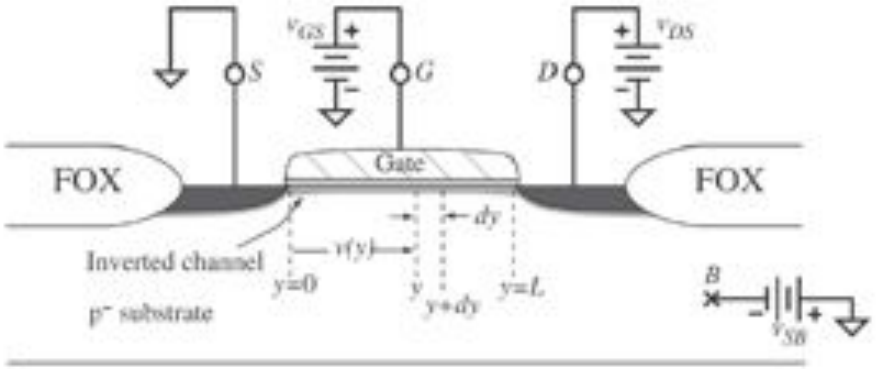




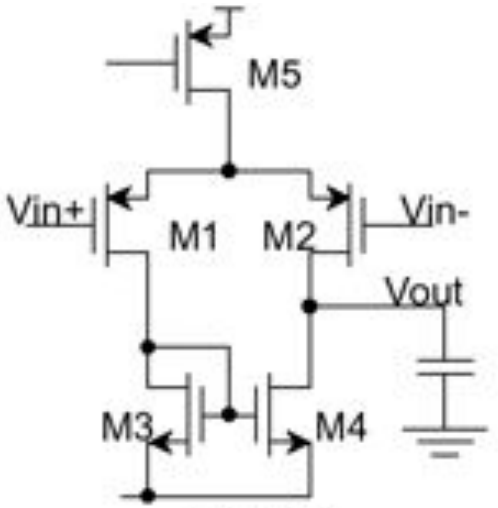




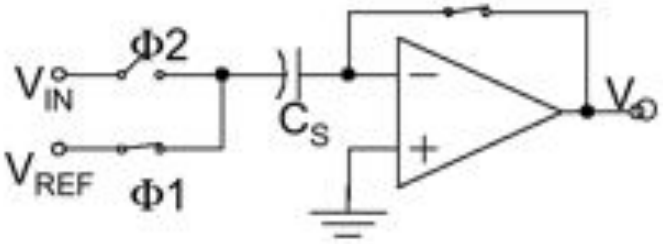
ระดับชั้นของการออกแบบวงจรอนาลอก



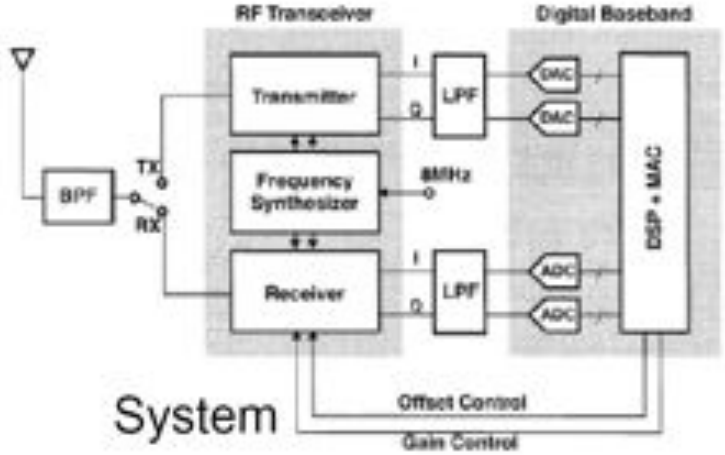
Device



Circuit



Architecture



System

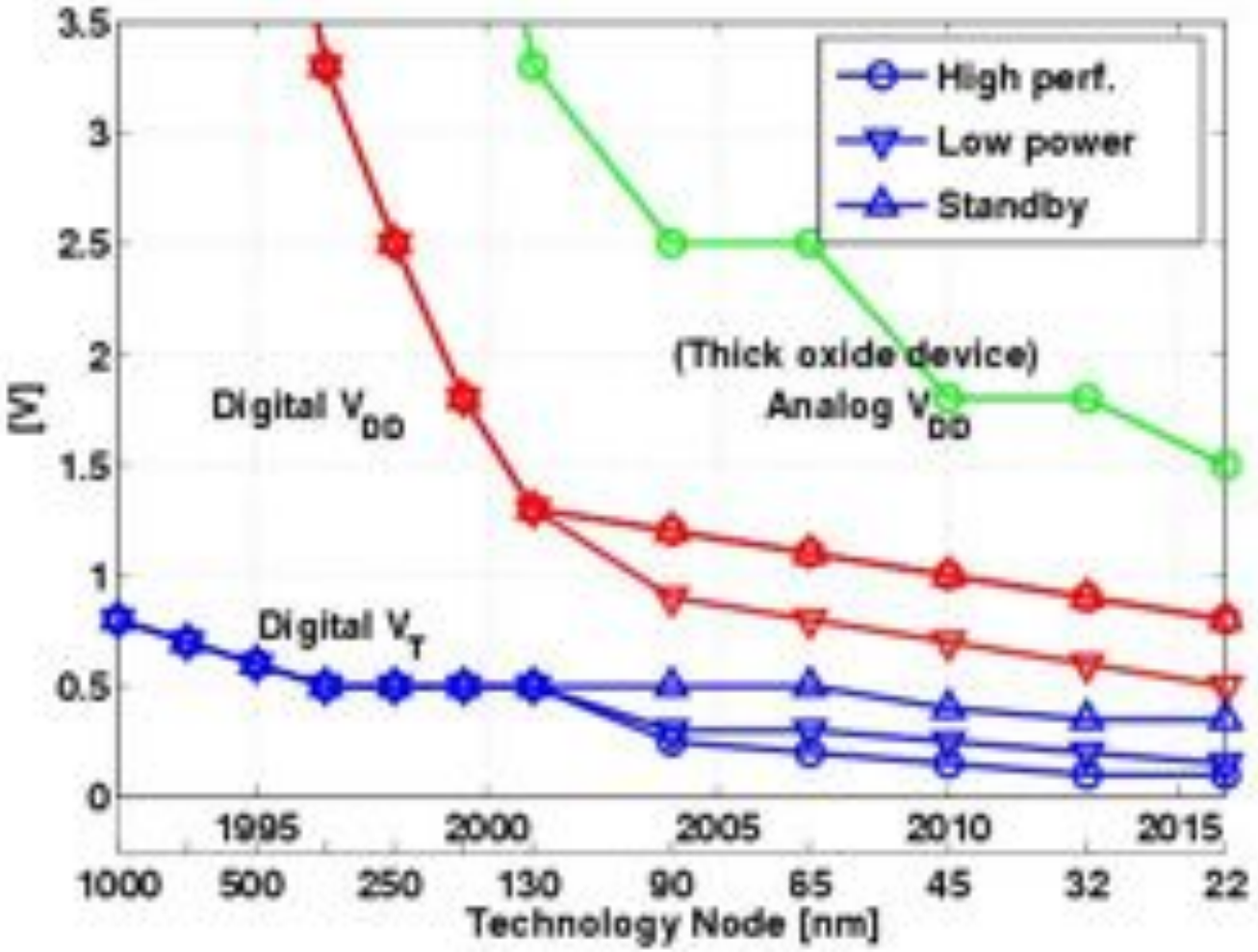
1.2 การพัฒนาเทคโนโลยีวงจรรวม

Technology Directions: SIA Roadmap

Year	1999	2002	2005	2008	2011	2014
Feature size (nm)	180	130	100	70	50	35
Mtrans/cm^2	7	14-26	47	115	284	701
Chip size (mm^2)	170	170-214	235	269	308	354
Signal pins/chip	768	1024	1024	1280	1408	1472
Clock rate (MHz)	600	800	1100	1400	1800	2200
Wiring levels	6-7	7-8	8-9	9	9-10	10
Power supply (V)	1.8	1.5	1.2	0.9	0.6	0.6
High-perf power (W)	90	130	160	170	174	183
Battery power (W)	1.4	2.0	2.4	2.0	2.2	2.4

http://www.itrs.net/reports.html

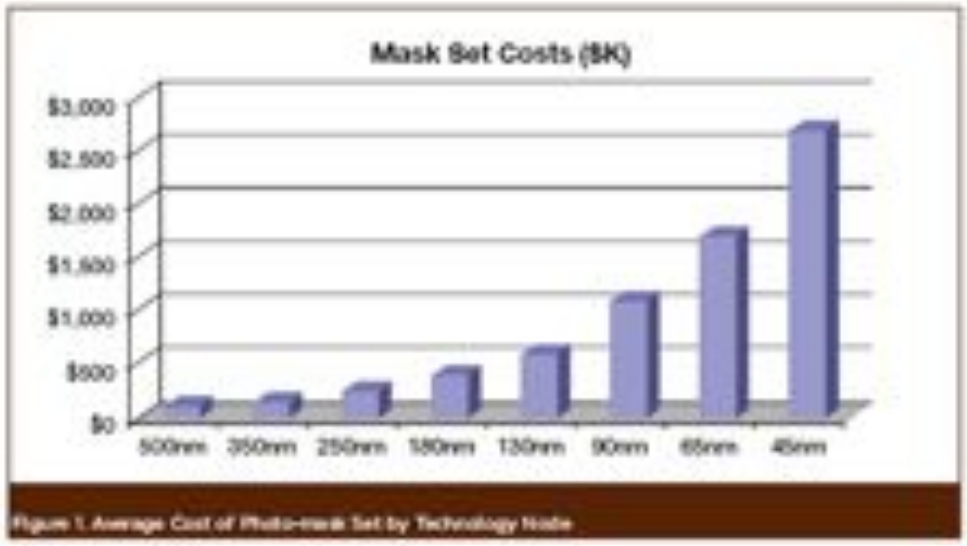
Supply voltage and threshold voltage scalings



http://www.itrs.net/reports.html

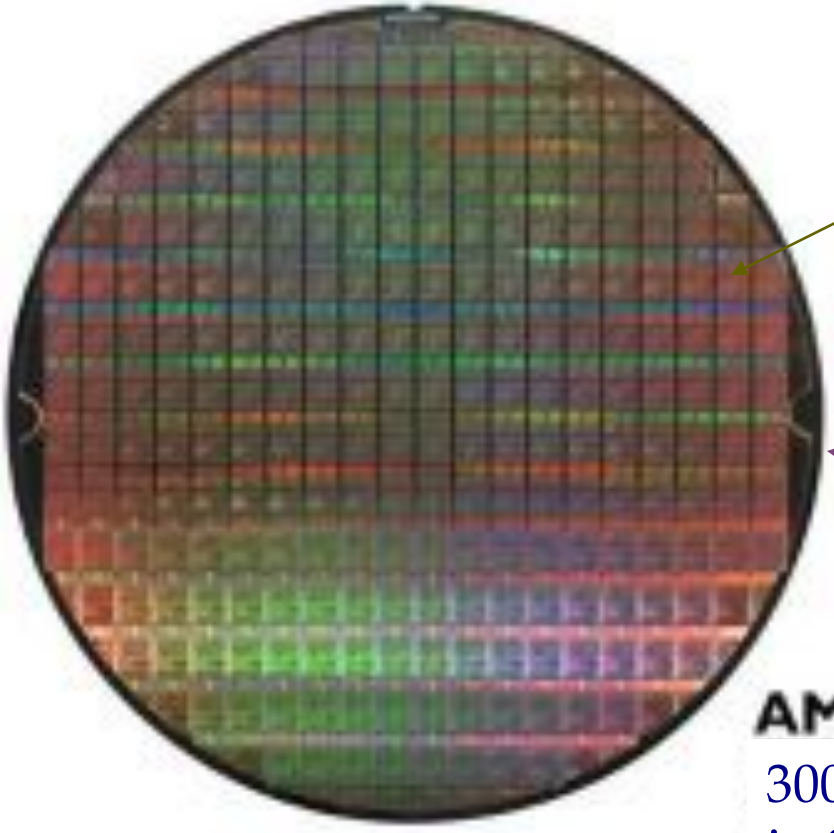
Cost of Integrated Circuits

- NRE (non-recurrent engineering) costs
  - design time and effort, mask generation
  - one-time cost factor
- Recurrent costs
  - silicon processing, packaging, test
  - proportional to volume
  - proportional to chip area



Die Cost

Single die



Wafer

AMD

300 mm
in 90 nm process

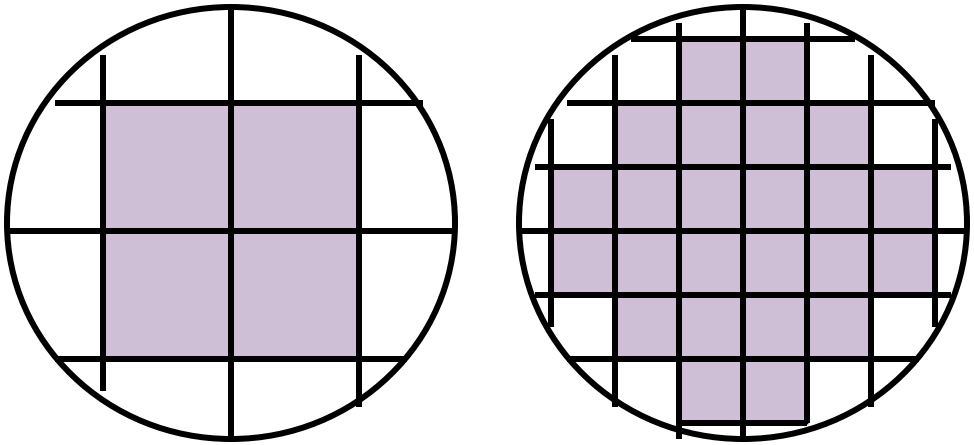
From http://www.amd.com

Yield

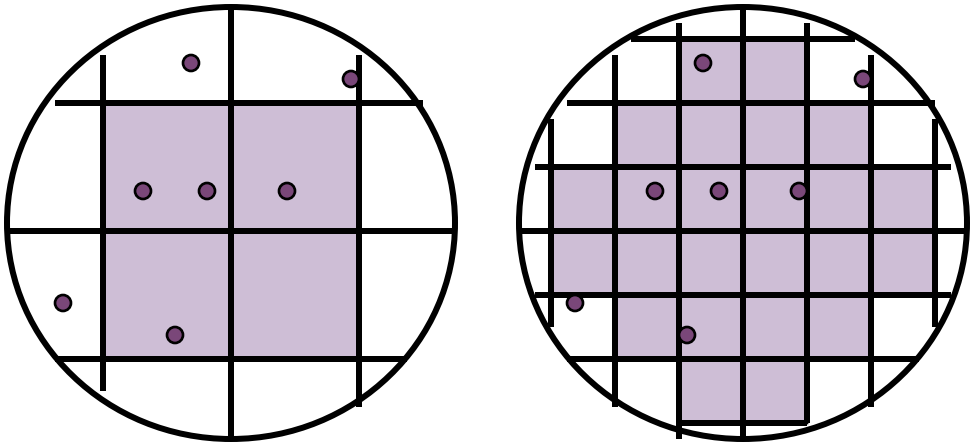
$$Y = \frac{\text{No. of good chips per wafer}}{\text{Total number of chips per wafer}} \times 100\%$$

$$\text{Die cost} = \frac{\text{Wafer cost}}{\text{Dies per wafer} \times \text{Die yield}}$$

$$\text{Dies per wafer} = \frac{\pi \times (\text{wafer diameter}/2)^2}{\text{die area}} - \frac{\pi \times \text{wafer diameter}}{\sqrt{2 \times \text{die area}}}$$



Defects



$$\text{die yield} = \left(1 + \frac{\text{defects per unit area} \times \text{die area}}{\alpha}\right)^{-\alpha}$$

α is approximately 3

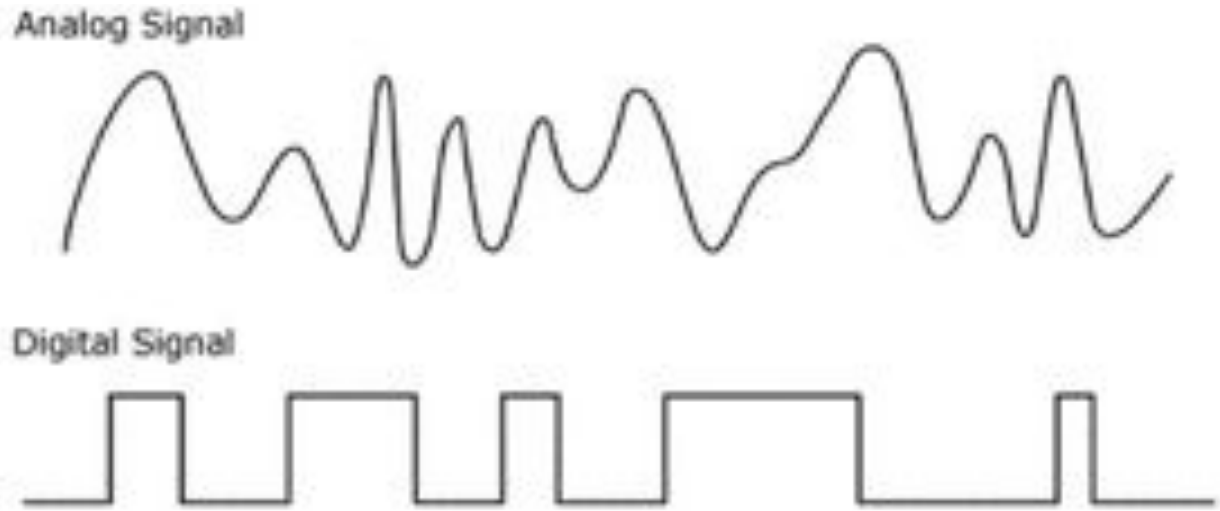
$$\text{die cost} = f(\text{die area})^4$$

Yield Example

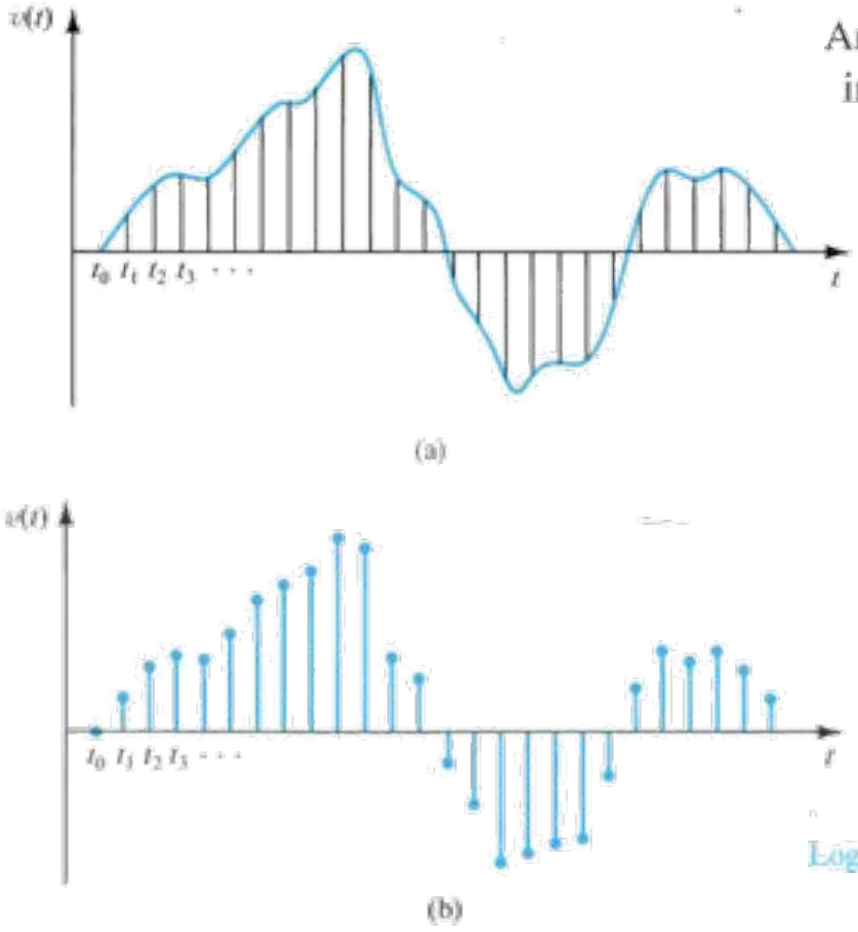
- Example
  - wafer size of 12 inches, die size of 2.5 cm2, 1 defects/cm2, $\alpha = 3$ (measure of manufacturing process complexity)
  - 252 dies/wafer (remember, wafers round & dies square)
  - die yield of 16%
  - 252 x 16% = only 40 dies/wafer die yield !
- Die cost is strong function of die area
  - proportional to the third or fourth power of the die area

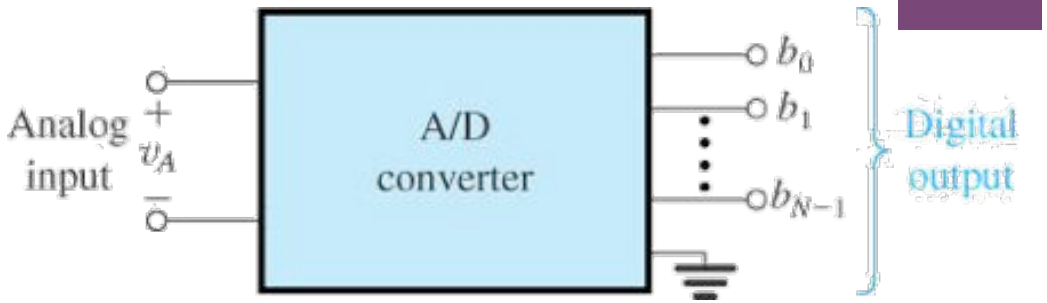
1.3 การประมวลสัญญาณอนาลอก

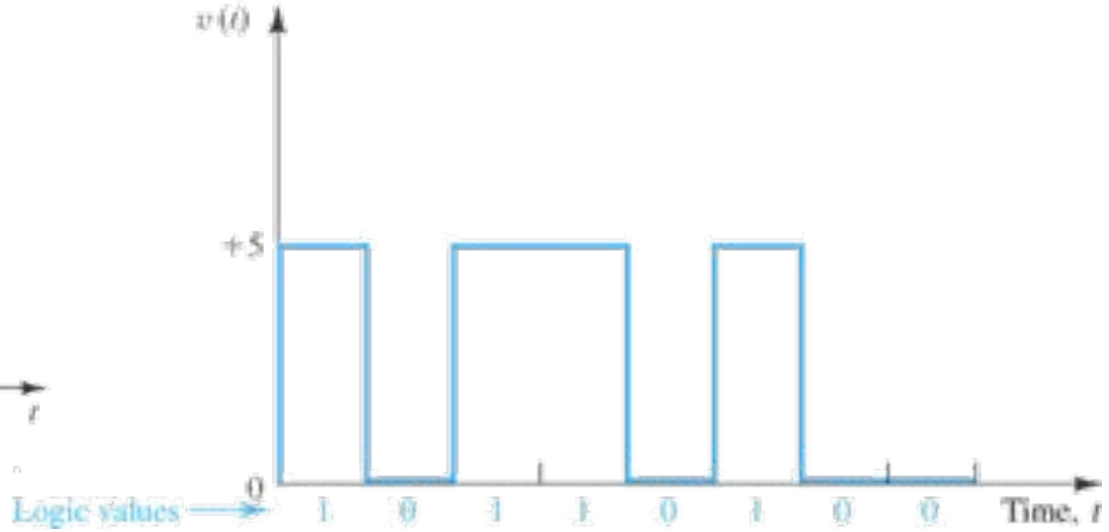
- สัญญาณอนาลอก คืออะไร ?
  - อนาลอก (analogue หรือ analog) เป็นคำที่ได้มาจาก Analogous แปลว่า เหมือนกัน (กับสัญญาณจริง)
  - สัญญาณอนาลอก จึงหมายถึง สัญญาณที่เหมือนกันกับสัญญาณจริงที่ได้รับมาจากโลกธรรมชาติ อาทิ แสง ความดัน เสียง และ อุณหภูมิ
  - ดังนั้น สัญญาณอนาลอก จึงเป็นสัญญาณที่มีความต่อเนื่องทางเวลา โดยที่ขนาดของสัญญาณแสดงถึงค่าของข้อมูล
  - โดยทั่วไป สัญญาณทางไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอนาลอก จะมาจากการแปลงสัญญาณจริงจากธรรมชาติ โดยใช้ตัวแปลง 'transducer'



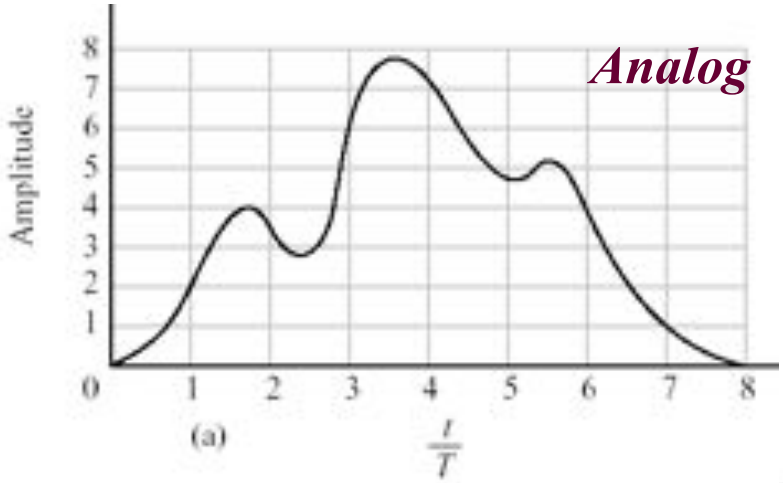
Analog vs. digital signals

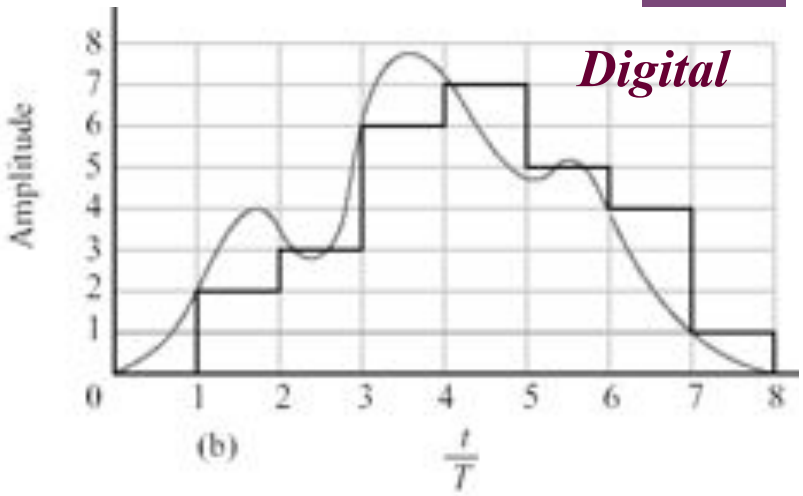


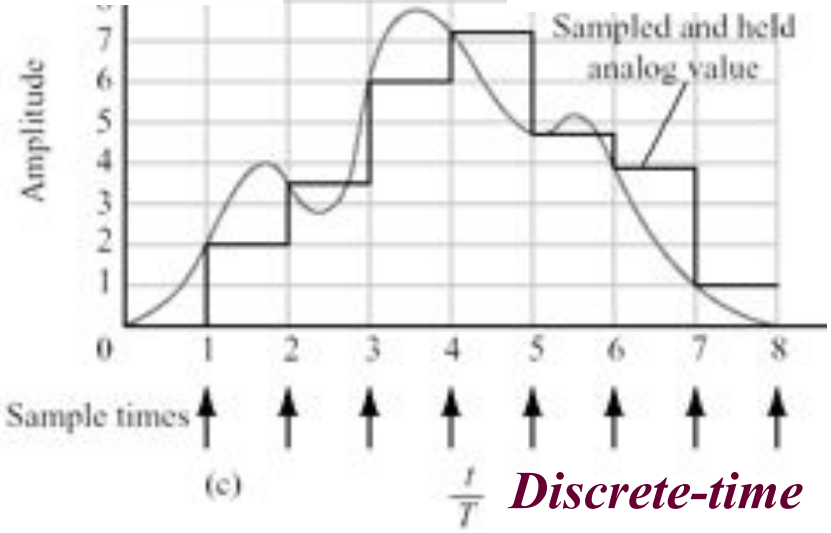




รูปแบบสัญญาณ





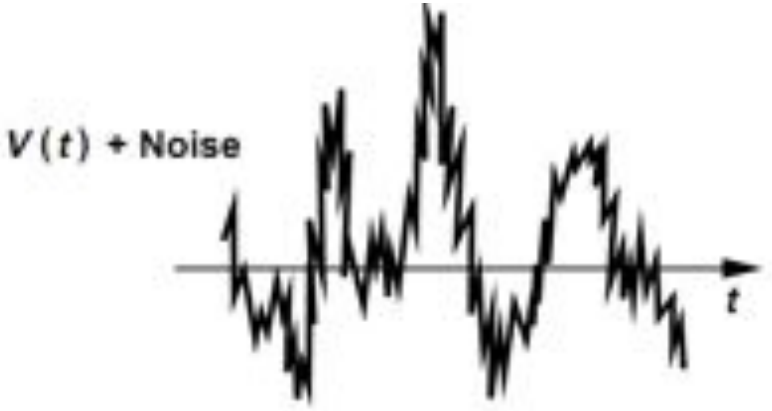


การสุ่มสัญญาณ (sampling)

การแบ่งขั้นขนาดสัญญาณ (quantisation)

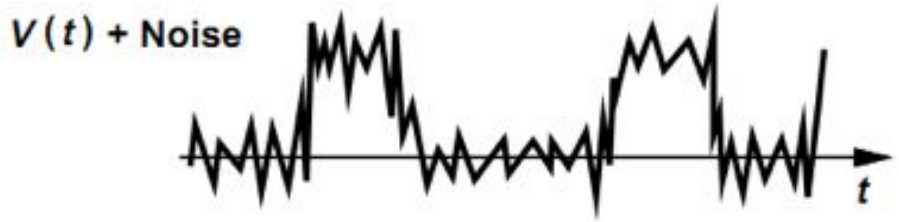
Effects of noise on analog & digital signals

(a)



(b)

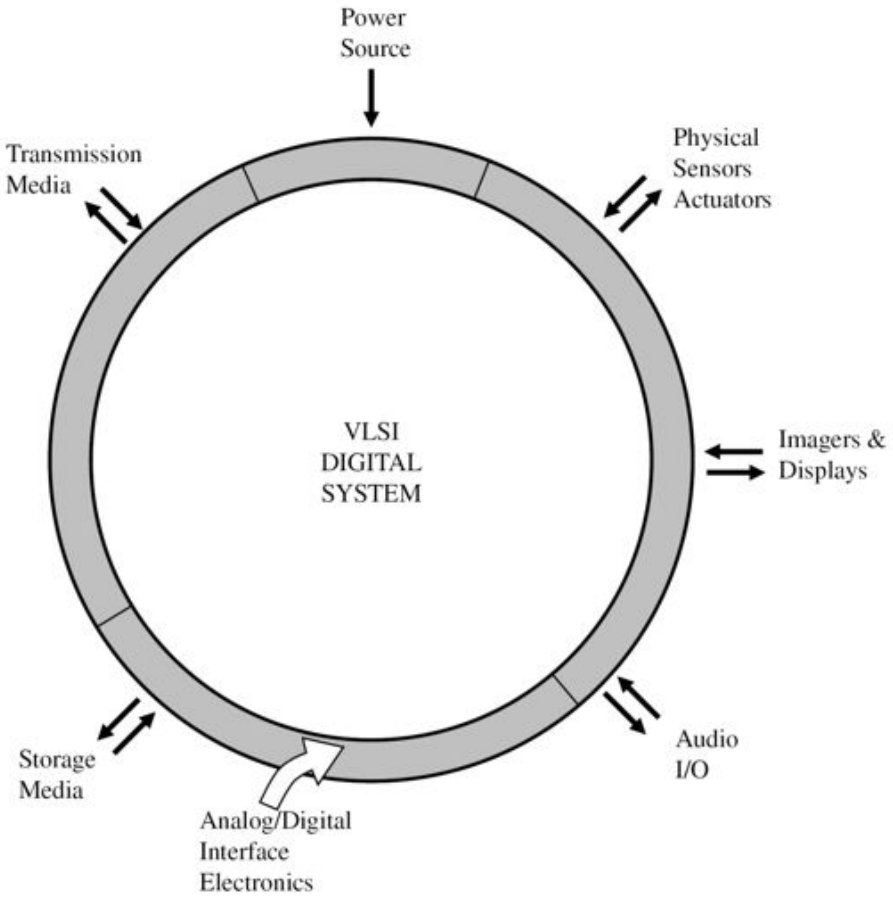
(a)



(b)

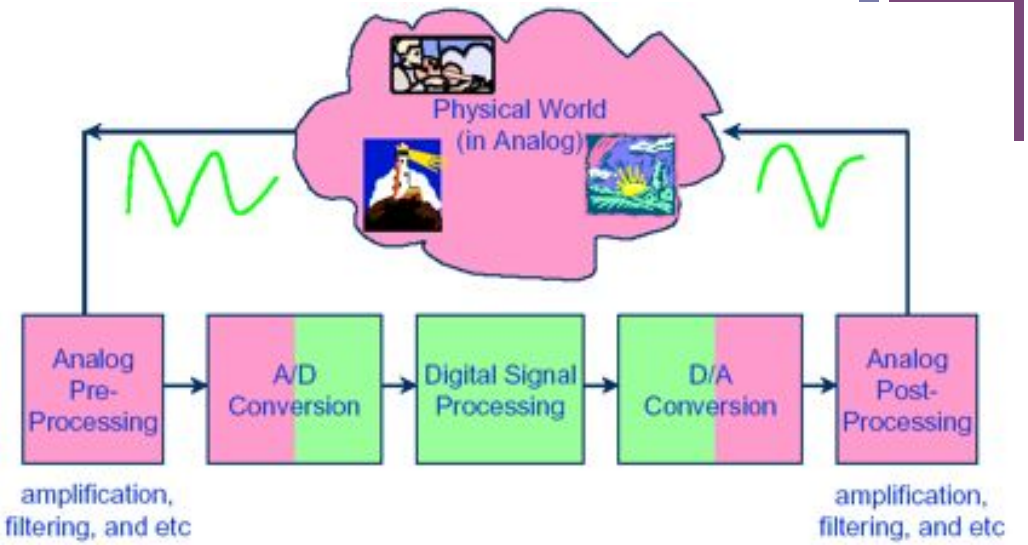
วงจรอนาลอกเสมือนเปลือกไข่

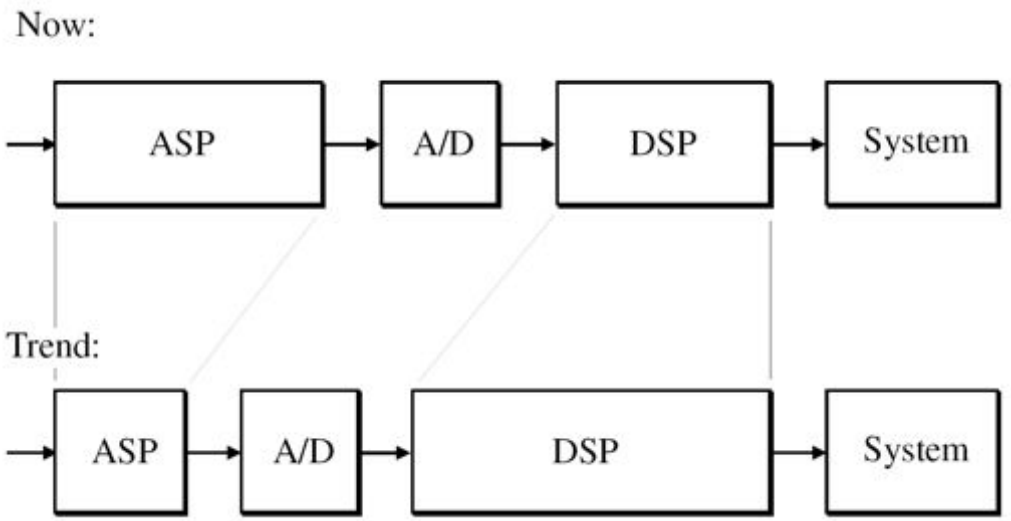
- เนื่องจากโลกธรรมชาติเป็นอนาลอก ดังนั้น วงจรอนาลอกมีบทบาทที่สำคัญอย่างยิ่งในการเชื่อมโยงระหว่างโลกธรรมชาติกับโลกของการประมวลผลแบบดิจิตอล
  - ปรับแต่งสัญญาณที่ได้รับมาจากตัวแปลง เช่น การขยายขนาดสัญญาณ การกรองสัญญาณ
  - การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล และ ดิจิตอลกลับเป็นอนาลอก



การประมวลสัญญาณอนาลอกในโลกดิจิตอล

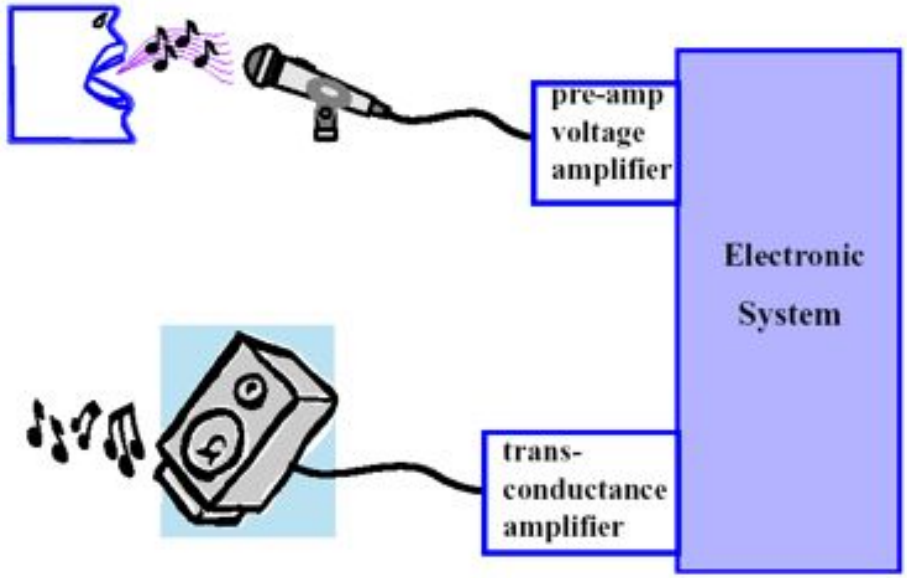
- สัดส่วนของวงจรอนาลอกต่อวงจรดิจิตอลถูกกำหนดโดยลักษณะและความต้องการของงานที่ใช้
  - การโปรแกรมได้
  - การปรับเปลี่ยนได้
  - การทดสอบ
  - การออกแบบ





การประยุกต์ใช้งานวงจรอนาลอก – ในระบบเสียง

- ไมโครโฟนแปลงเสียงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เนื่องจากสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากตัวแปลง มีขนาดเล็กมาก (ระดับ mV) จึงต้องมีการขยายขนาดของสัญญาณก่อนที่จะนำไปประมวลผลต่อไป
- สัญญาณทางไฟฟ้าที่ออกมาจากระบบประมวลผล ต้องนำมาผ่านวงจรขยายกำลัง เพื่อที่ขับลำโพงซึ่งมีค่าความต้านทานที่ต่ำ
- สัญญาณทางไฟฟ้าที่ถูกขยายแล้ว ส่งไปยังลำโพงเพื่อแปลงกลับเป็นเสียง



Analog IC market

- Market Drivers
  - Automotive electronics
  - Consumer electronics
  - Energy
  - Mobility
  - Security
  - Healthcare

Analog IC market

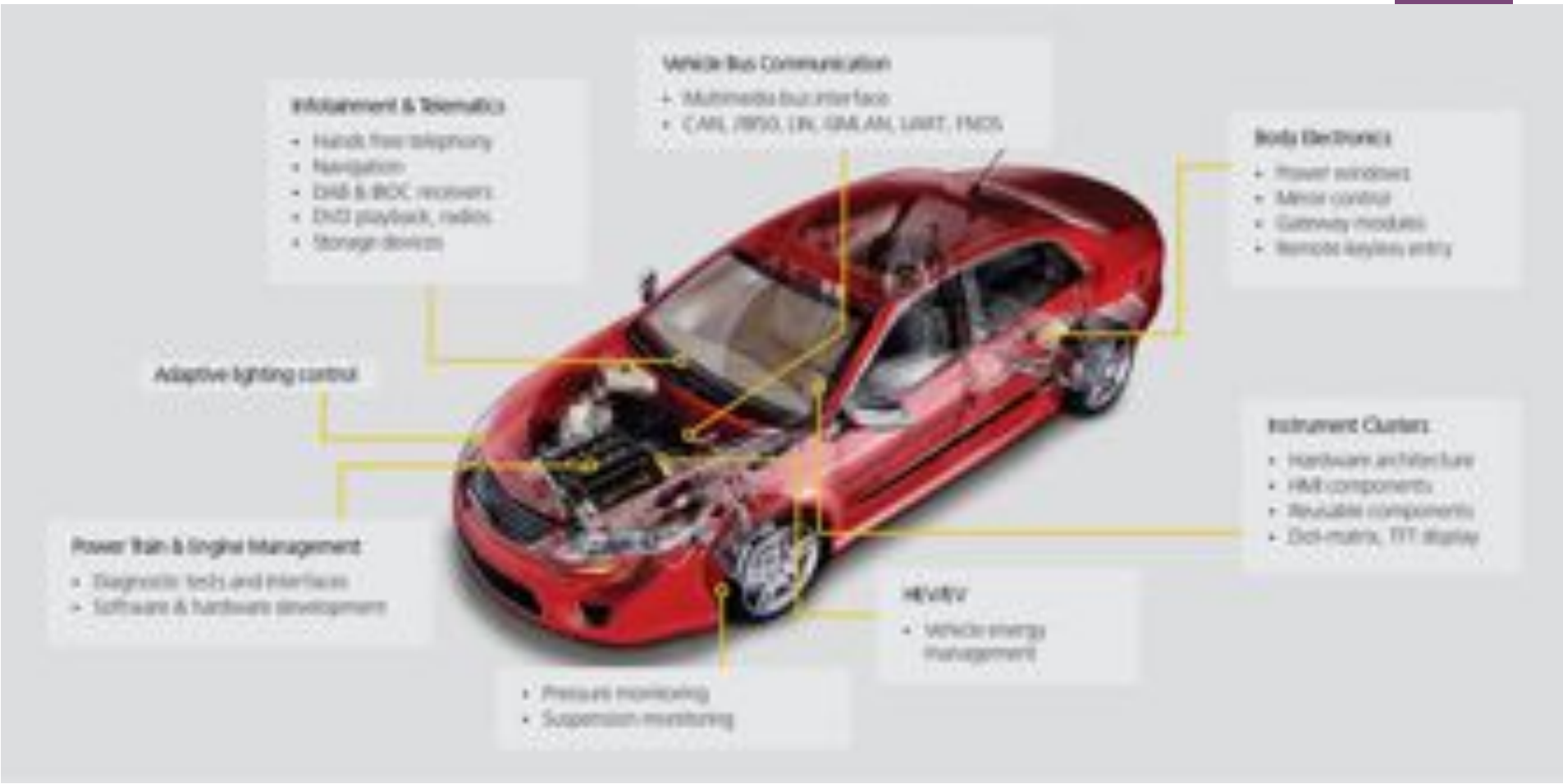
- Application Specific
  - Analog ICs that perform specific functions - timing control, RF transceivers, touch sensors, display drivers, LED drivers, SerDes, etc.
  - $26.3B in 2011, $40.5B in 2016, CAGR 9%
- General Purpose
  - Analog ICs that fit into multiple applications such as amplifiers, comparators, data converters, etc.
  - $18.8B in 2011, $32.9B by 2016, CAGR 12%

Analog IC applications

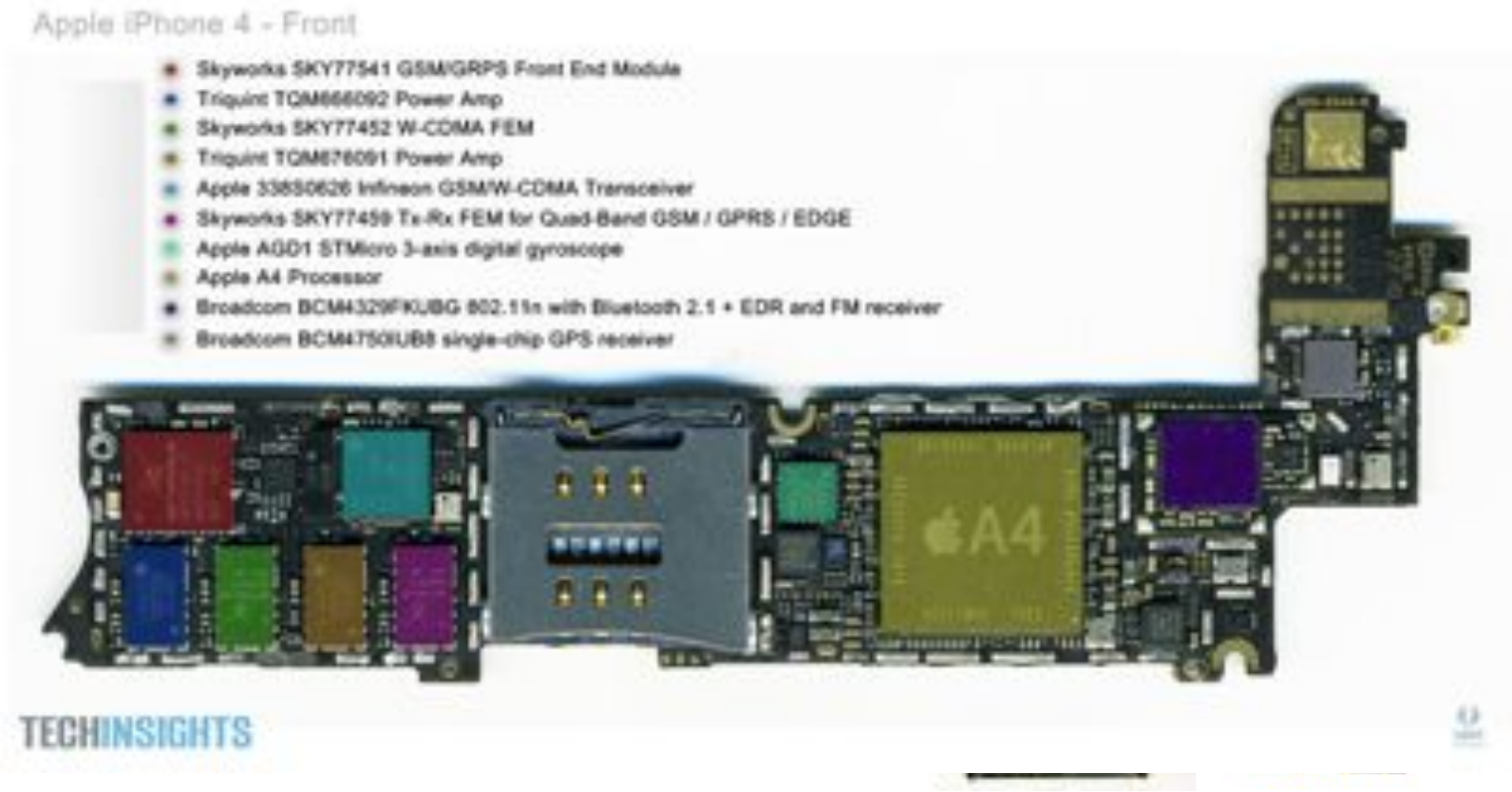
- Audio and Video
- Clock and Timing
- Data Conversion - $3.8B in 2010 (iSuppli)
- Energy Measurement and Metering
- Interface
- LED Lighting
- Power Management - $9.1B in 2010 (iSuppli)
- Signal Conditioning
- Thermal Management and Sensors
- Wireless and RF

- Applications by industry segments
  - Automotive
  - Communications
  - Computing and Storage
  - Consumer Electronics
  - Industrial
  - Medical

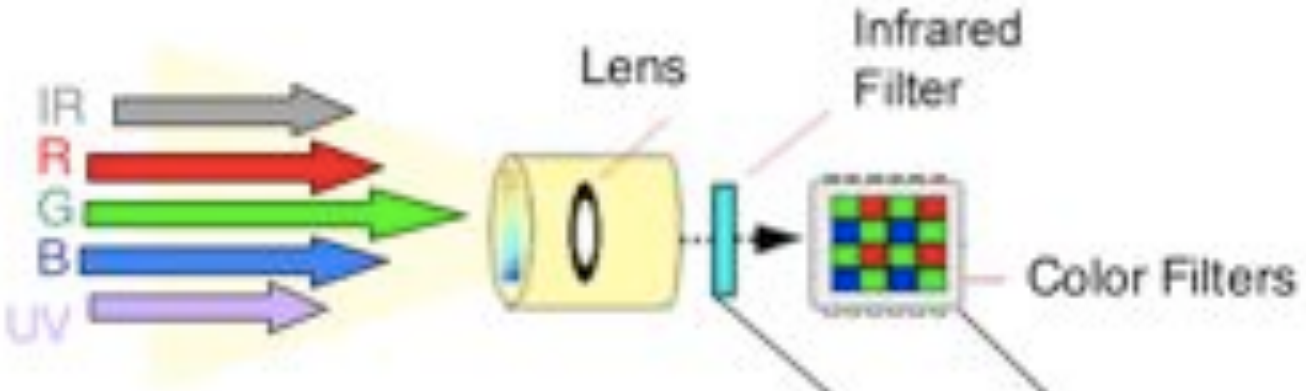
Automotive electronics



Wireless communications



Digital camera

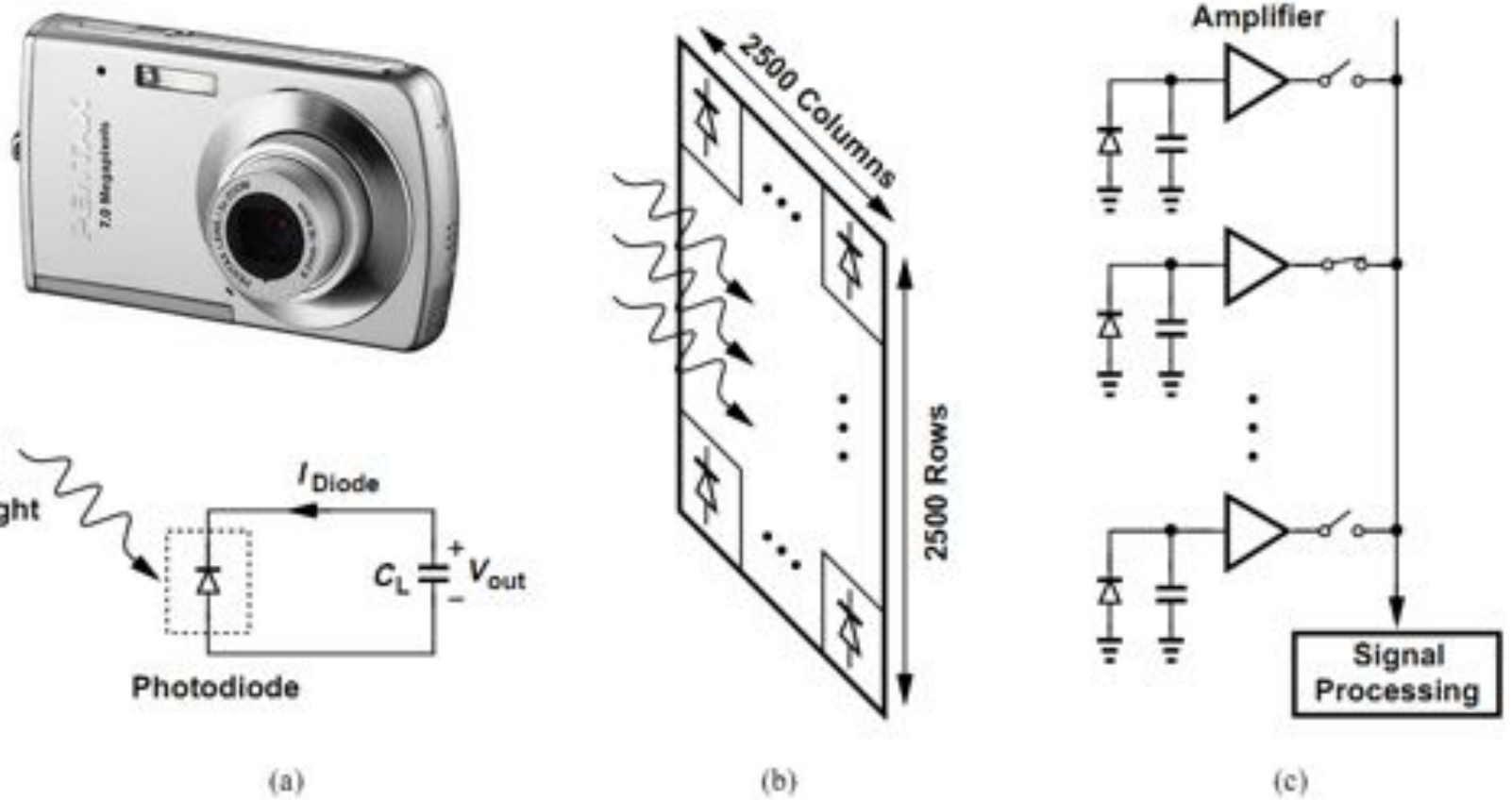


Sensor
(with IR &
color filter)

Note: Glass in camera lens blocks most UV from reaching sensor

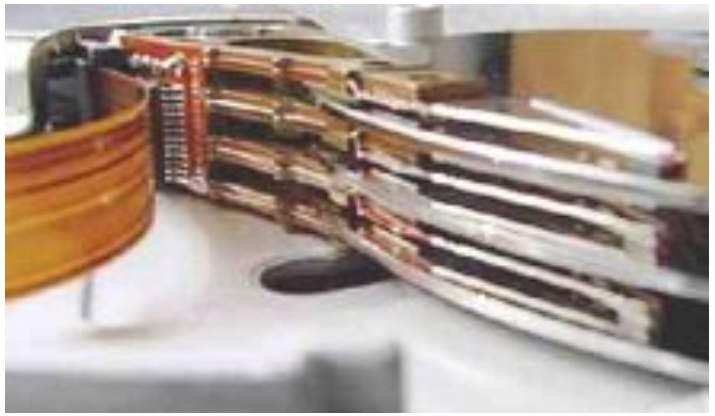
Digital camera

- Convert light intensity to electrical signal using photodiodes

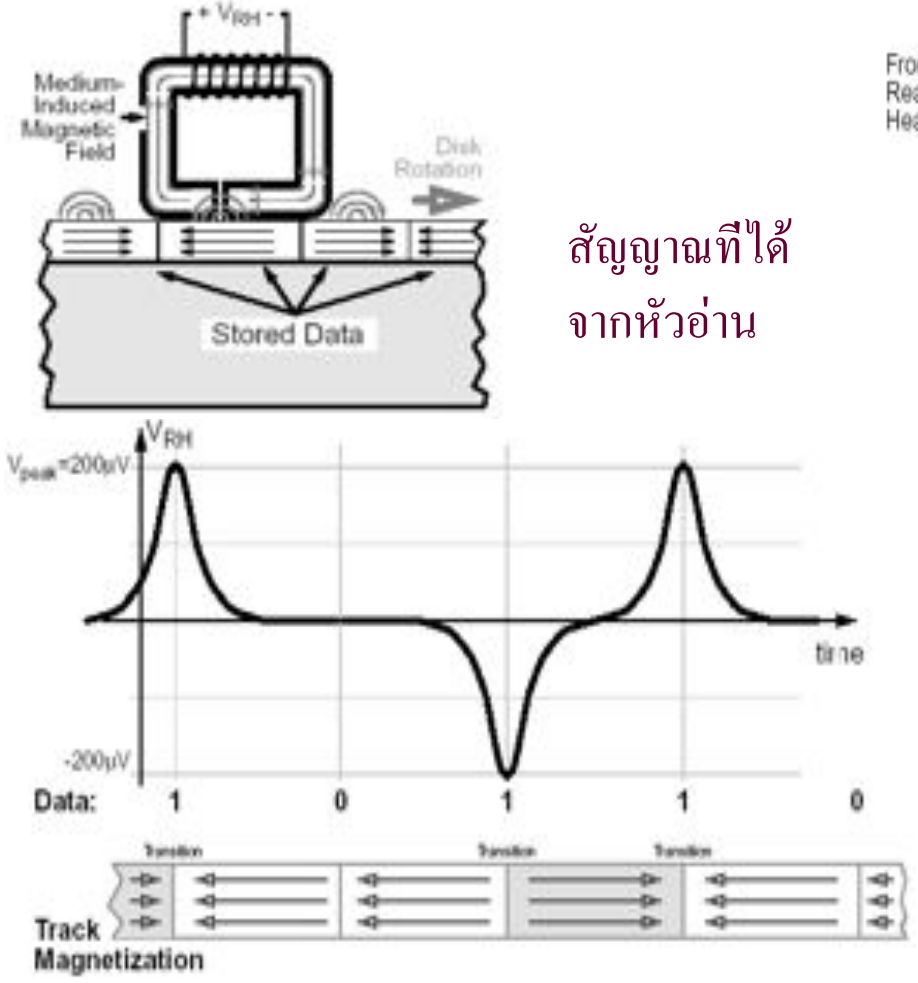


Storage – Hard Disk Drive

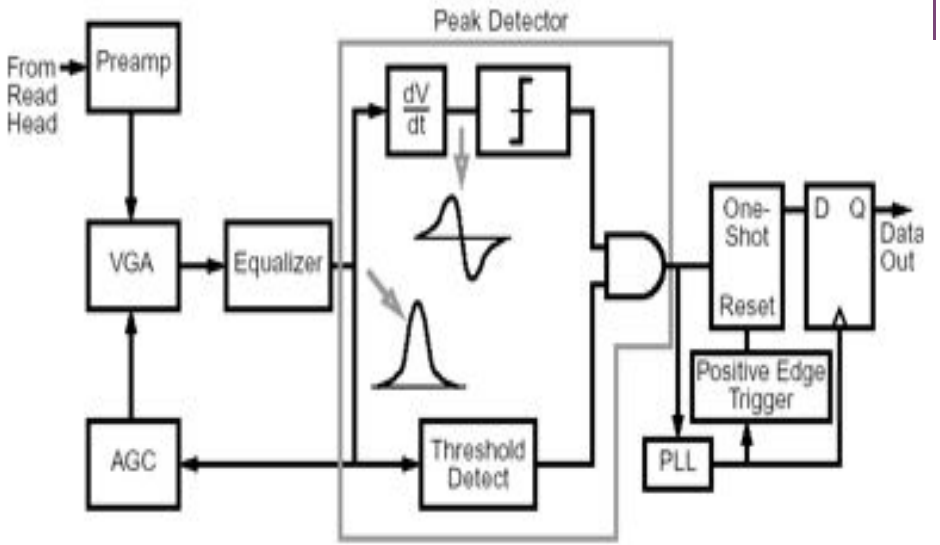
- ข้อมูลดิจิตอลที่เก็บไว้ใน Hard Disk ต้องถูกอ่านด้วยหัวอ่านแม่เหล็กที่ความเร็วสูง (300-15000 RPM)
- สัญญาณที่อ่านได้มีขนาดเล็ก และมีความผิดเพี้ยนมากจนเหมือนกับเป็นสัญญาณ อนาลอก
- จึงต้องใช้วงจรอนาลอก เช่น วงจรขยาย วงจรตรวจจับข้อมูล วงจร Timing recovery เพื่อสร้างข้อมูลดิจิตอลที่ถูกต้องกลับคืนมา



Storage – Hard Disk Drive



สัญญาณที่ได้จากหัวอ่าน



ระบบการอ่านข้อมูล ที่ใช้การตรวจจับจุดสูงสุดของสัญญาณ

The Google Glass

Display 640x360
High resolution display is the equivalent of a 25 inch high definition screen from eight feet away.

Camera
- Photos - 5 MP
- Videos - 720p

Audio
- Bone Conduction Transducer

Connectivity
- Wifi - 802.11b/g
- Bluetooth

Storage
- 12 GB of usable memory, synced with Google cloud storage. 16 GB Flash total.

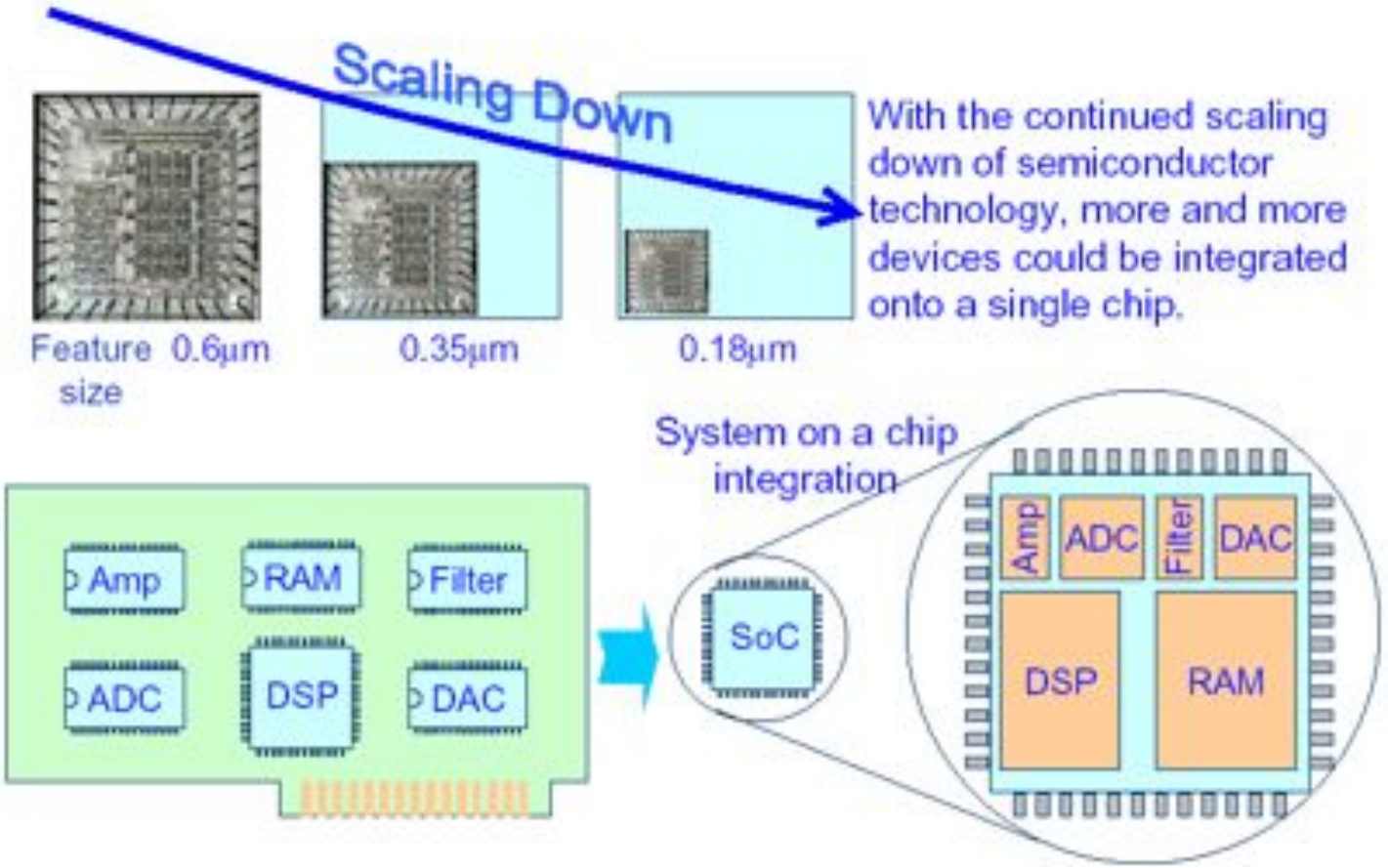
Battery 570 mAh
One day of typical use. Some features, like video calls and video recording, are more battery intensive.

http://www.catwig.com/google-glass-teardown/

The Google Glass

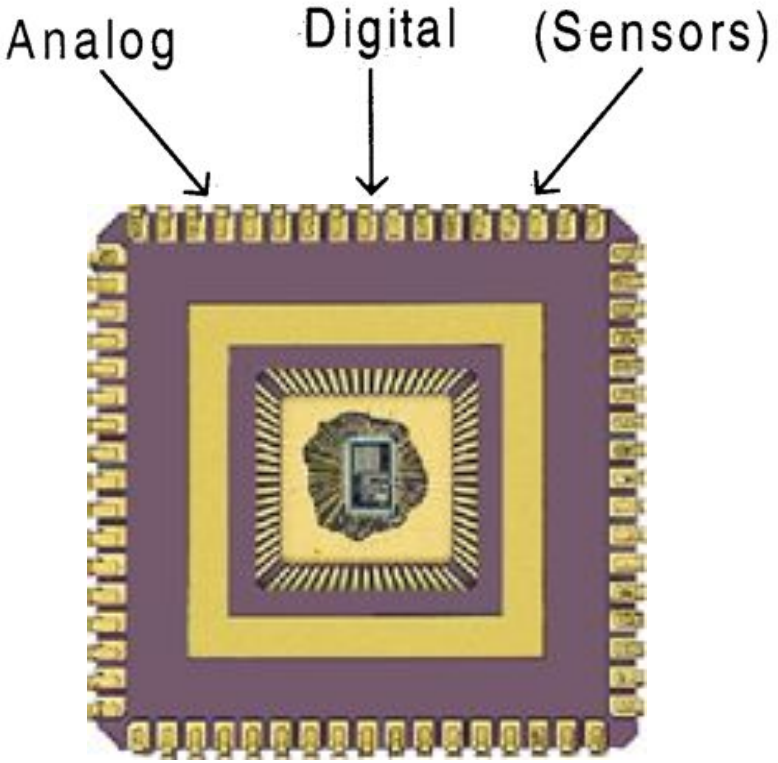
อนาคตของการออกแบบวงจรรวมอนาลอก

- System-on-chip (SoC)



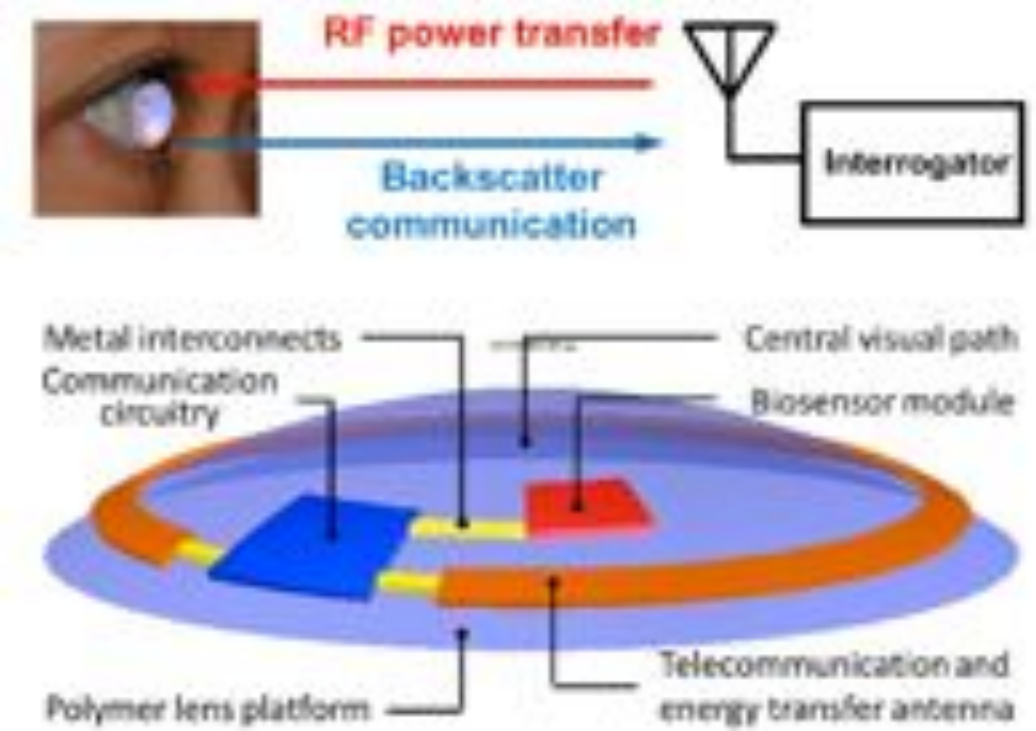
อนาคตของการออกแบบวงจรรวมอนาลอก

- ลดขนาดและต้นทุน และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน
- ระบบบนชิพ (System-On-Chip, SOC)
  - ตัวแปลง (transducer/ actuator)
  - วงจรอนาลอก (Analog circuits)
  - วงจรดิจิตอล (Digital circuits)



Functional contact lens for biomedical sensing

http://wireless.ee.washington.edu/research-2/



Functional contact lens

Second Window: a Functional Contact Lens for Continuous Health Status Monitoring

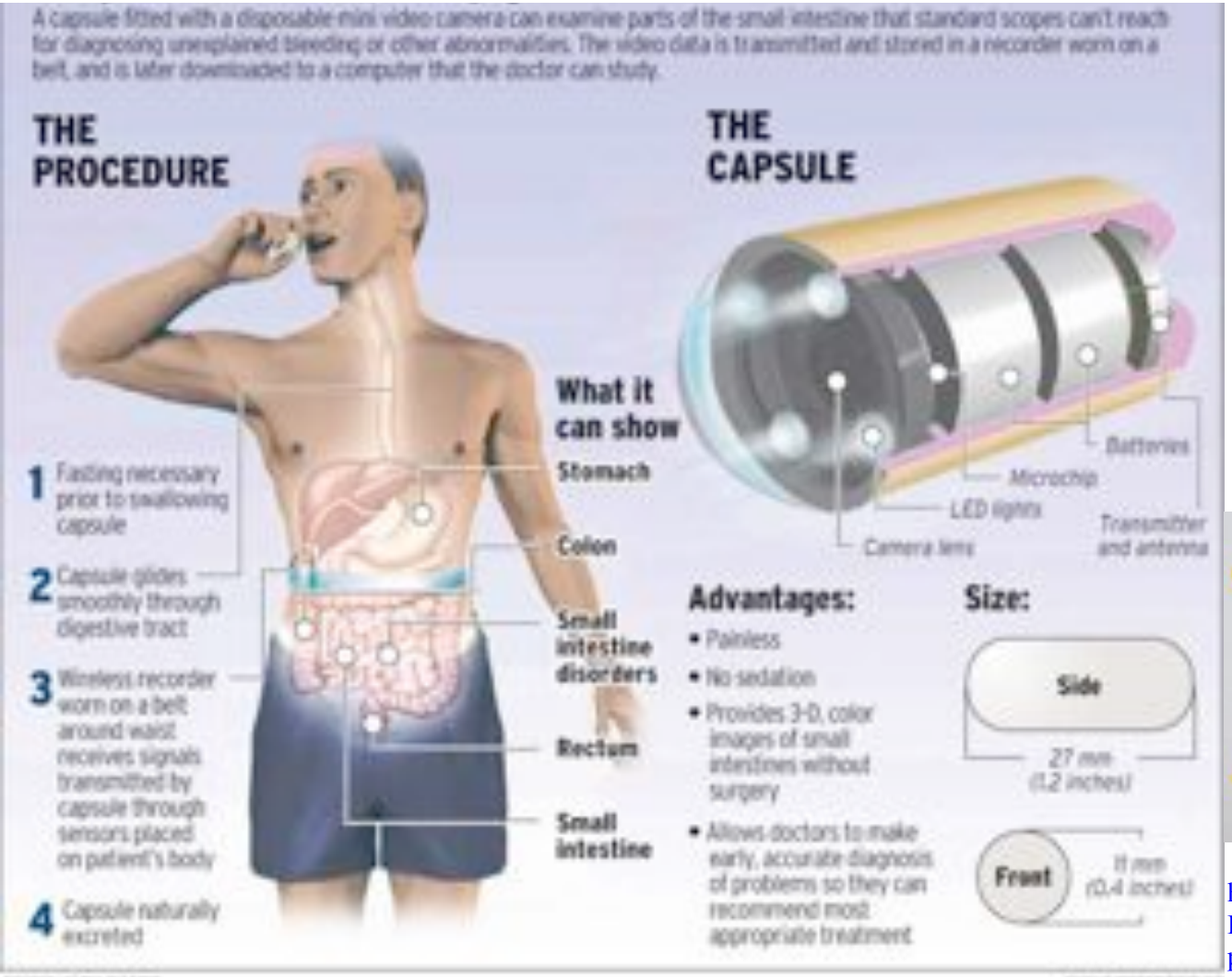
University of Washington, Seattle, WA

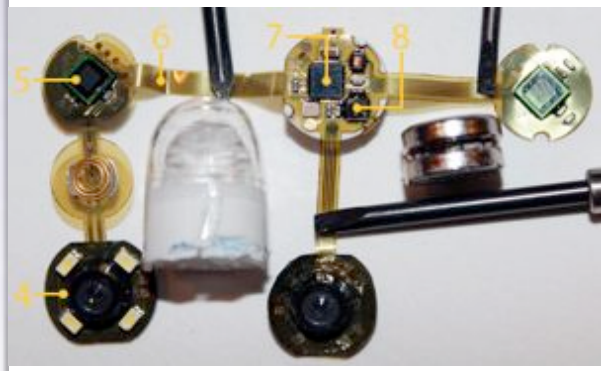
Wireless pacemaker

http://spectrum.ieee.org/tech-talk/biomedical/devices/teeny-tiny-pacemaker-fits-inside-the-heart

Capsule endoscopy

http://www.givenimaging.com/en-us/Innovative-Solutions/Capsule-Endoscopy/Pillcam-SB/PillCam-SB-3/Pages/default.aspx

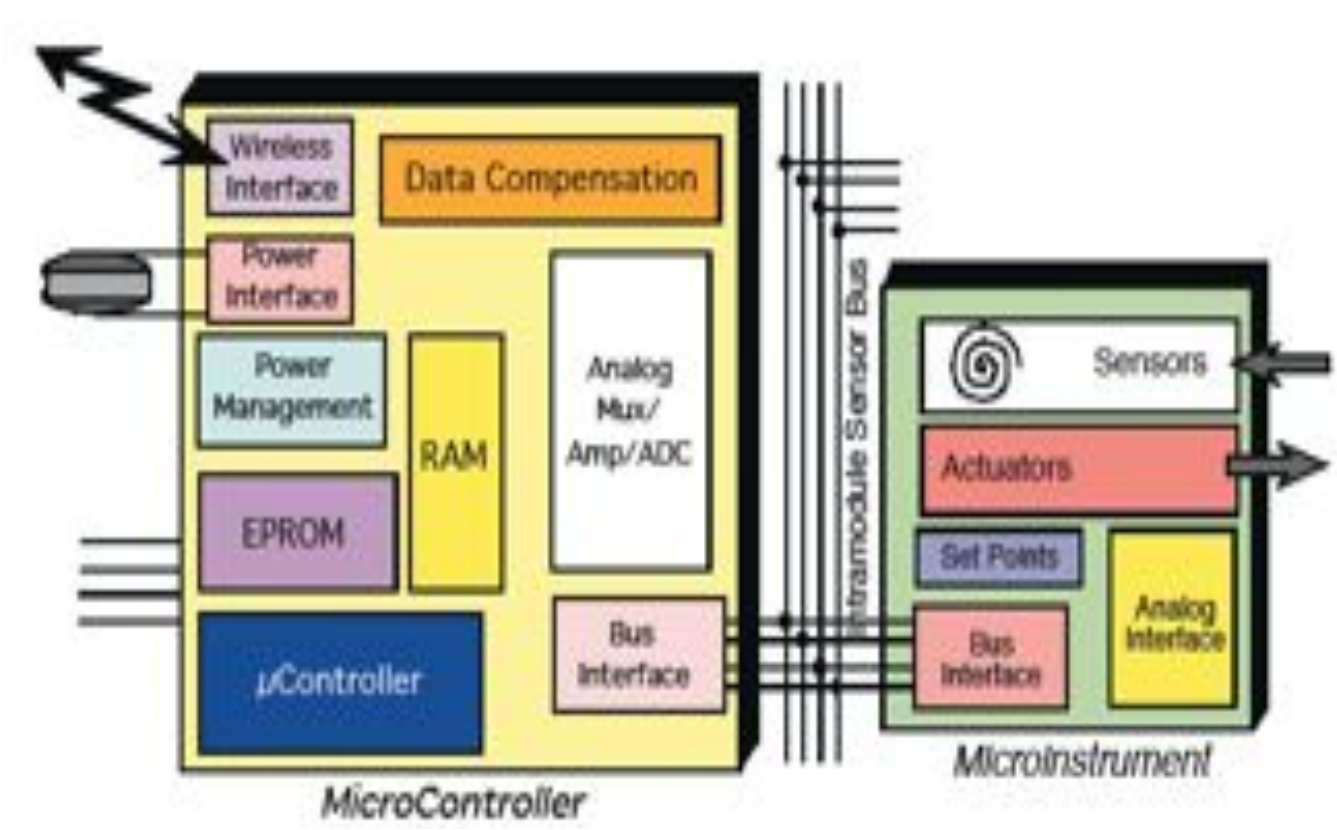


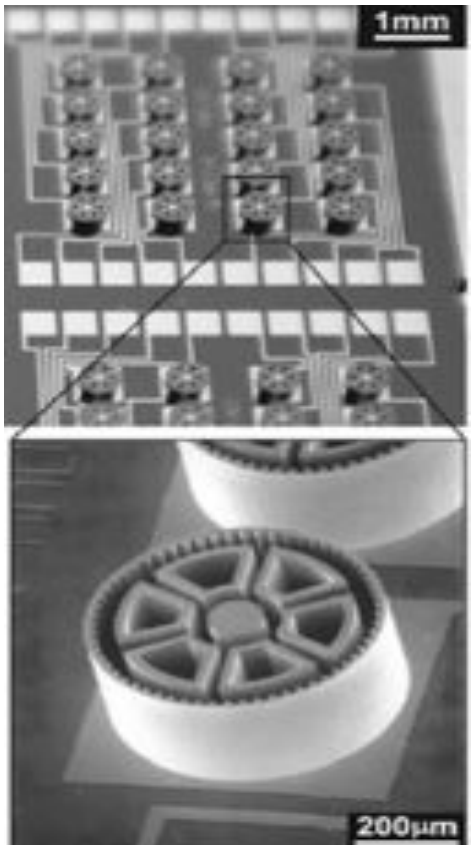


http://www.edn.com/design/medical/4397880/2/Pillcam-uses-latest-in-wireless--imaging--packaging-to-expose-your-innards

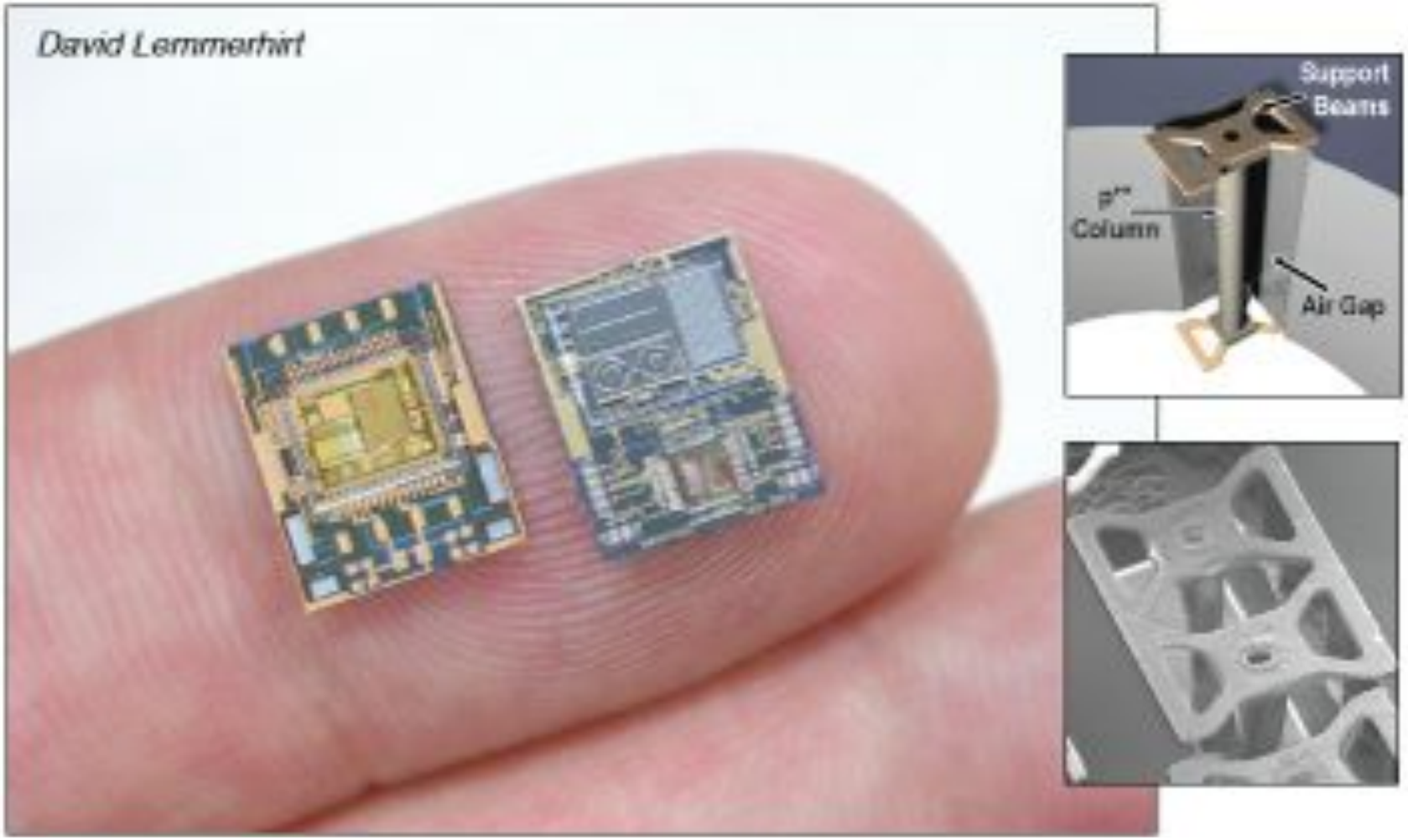
Fully integrated microsystem

- Micropower Circuits, Wireless Interfaces, Environmental Sensors and Subsystems, Biomedical Sensors and Subsystems, MEMS sensors, Micropackaging

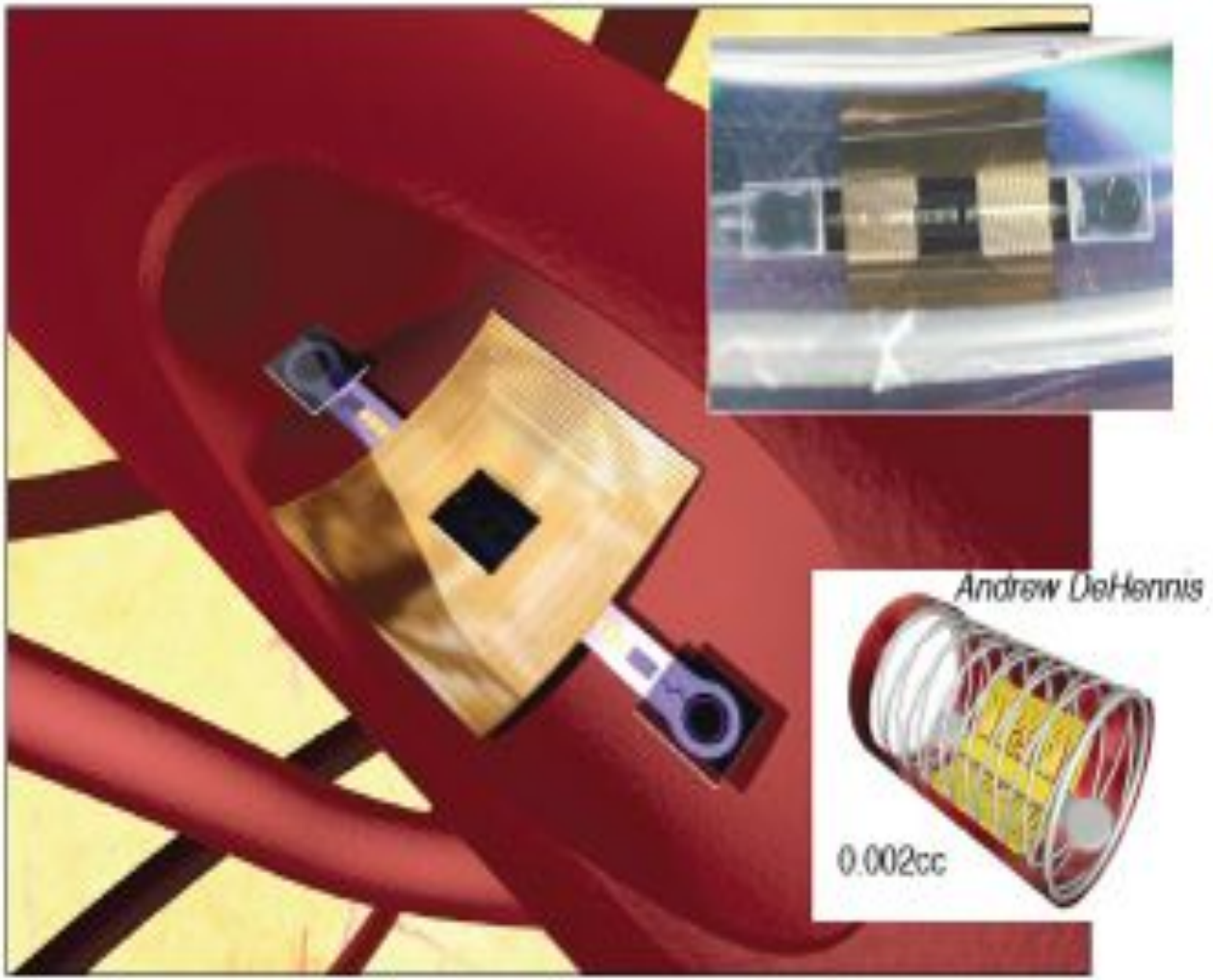




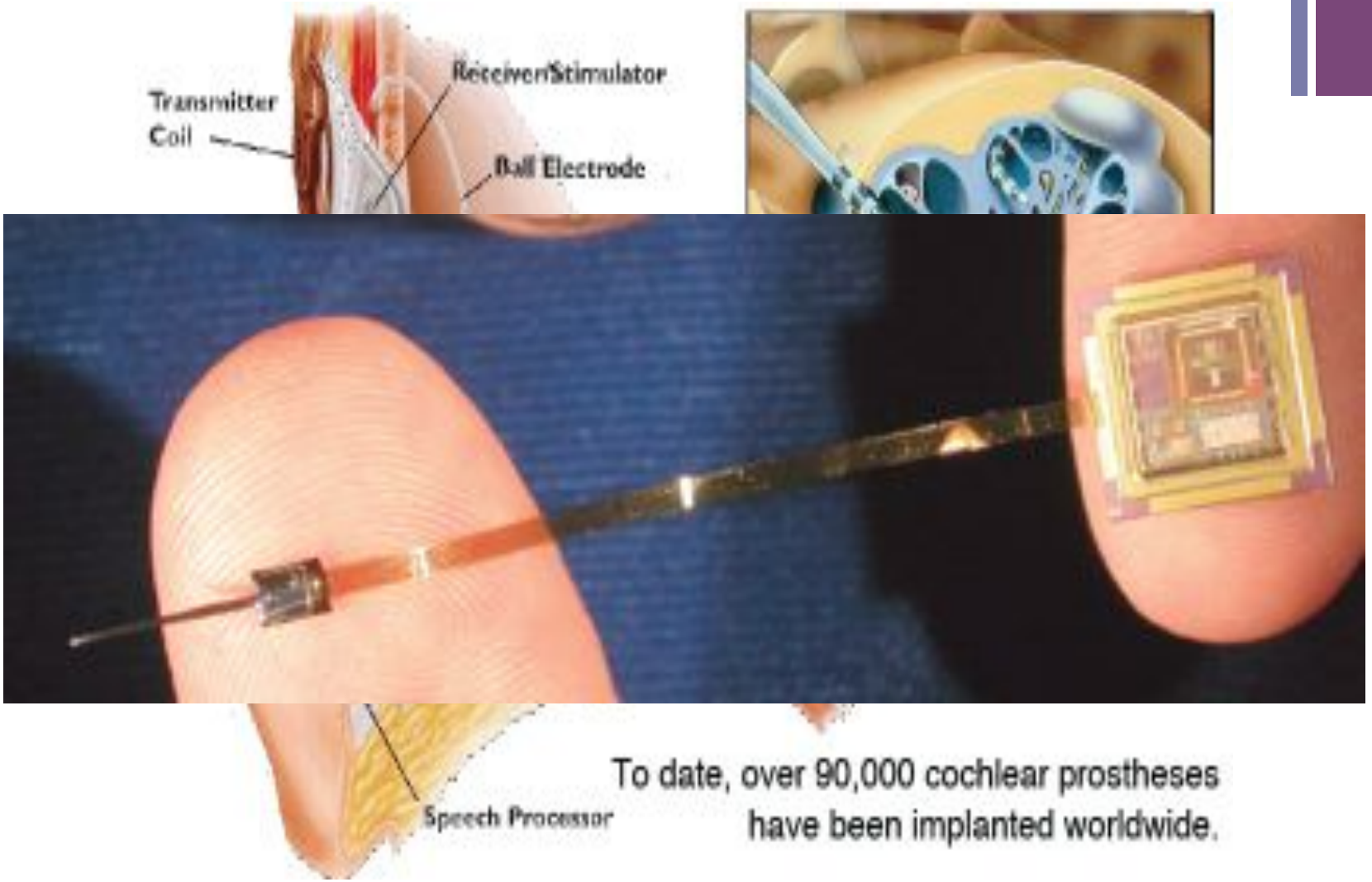
Autonomous wireless environmental monitoring system



Wireless Readout of Intra-Arterial Pressure/Flow

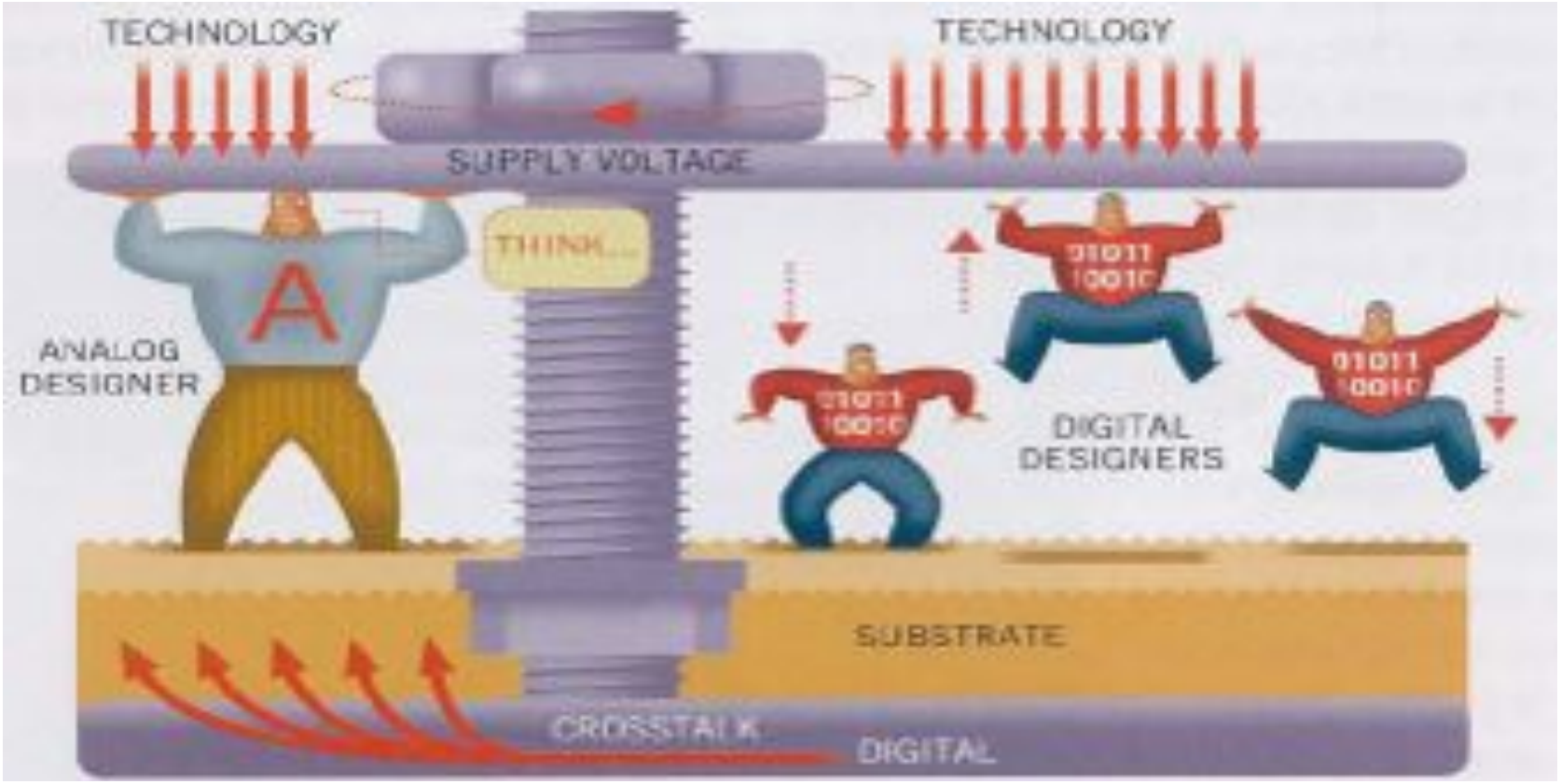


COCHLEAR PROSTHESES



To date, over 90,000 cochlear prostheses have been implanted worldwide.

Analog design challenge



Analog IC design job – where?

Company	2012 Rank	2012 $M	2012 Share	2011 Rank	2011 $M	2011 Share	Y/Y %
Texas Instruments	1	6,573	16.7%	1	6,524	15.4%	1%
STMicroelectronics	2	3,617	9.2%	2	4,148	9.8%	-13%
Analog Devices	3	2,252	5.7%	4	2,450	5.8%	-8%
Infineon Technologies	4	2,227	5.7%	3	2,510	5.9%	-11%
Qualcomm	5	2,223	5.7%	5	2,086	4.9%	7%
Others		22,411	57.0%		24,620	58.2%	-9%
Total		**39,303**			**42,338**		**-7%**

- Silicon craft (www.sic.co.th)