



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Elektronikus Eszközök Tanszéke

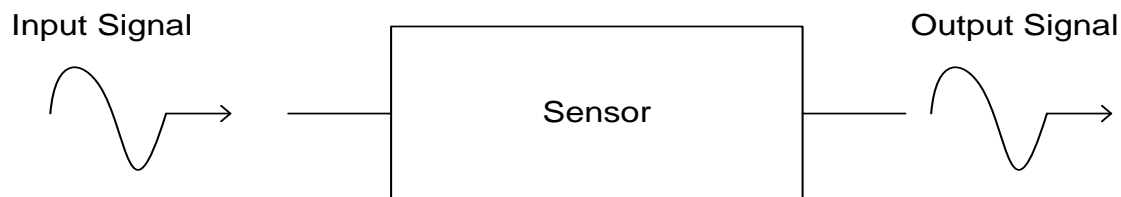
# IT eszközök technológiája

8. előadás

Szenzorok

- Szenzorok alapvető tulajdonságai
  - Szenzorok csoportosítása
  - Szenzor transzfer karakterisztikája, alapvető tulajdonságai
  - A transzfer karakterisztika modellezési lehetőségei
  - Intelligens szenzorok
- A mobil számítástechnika szenzorai
  - Hőmérséklet,nyomás
  - Gyorsulás, szögsebesség
  - Mágneses tér, közelség érzékelés
- Képerzékelők
  - CMOS, CCD

# Érzékelő / Szenzor



- A szenzor egy eszköz, amely **információ hordozó** jellé alakítja a mérendő mennyiséget.
- Az esetek nagyon nagy részében **elektromos jel**.
  - (optikai ill. mechanikai jellé átalakítás is elképzelhető)
- Elektromos jel:
  - Minden, ami elektronikus eszközökkel feldolgozható
  - Feszültség, áram, töltés
    - Feldolgozva: amplitúdó, polaritás, frekvencia, fázis stb.
    - Végül: digitális kód.
- Szenzor: energia átalakító
  - Az érzékeléshez energiatranszfer szükséges

- **Átalakítás módja szerint**
  - Direkt szenzor
    - a mérendő mennyiséget közvetlenül alakítja át elektromos jellé
  - Komplex szenzor
    - Több, egymást követő átalakítás történik, melynek végén egy közvetlen szenzor áll.
- **Energiaellátás módja szerint**
  - Passzív szenzorok
    - A mérendő mennyiség energiáját közvetlenül alakítják át elektromos jellé
    - Általában direkt szenzorok
  - Aktív szenzorok
    - Külső energiát igényel
- **Referencia szerint**
  - Abszolút: a kimenet arányos a mért mennyiség fizikai értékével
  - Relatív: egy adott referenciához képest mér különbséget

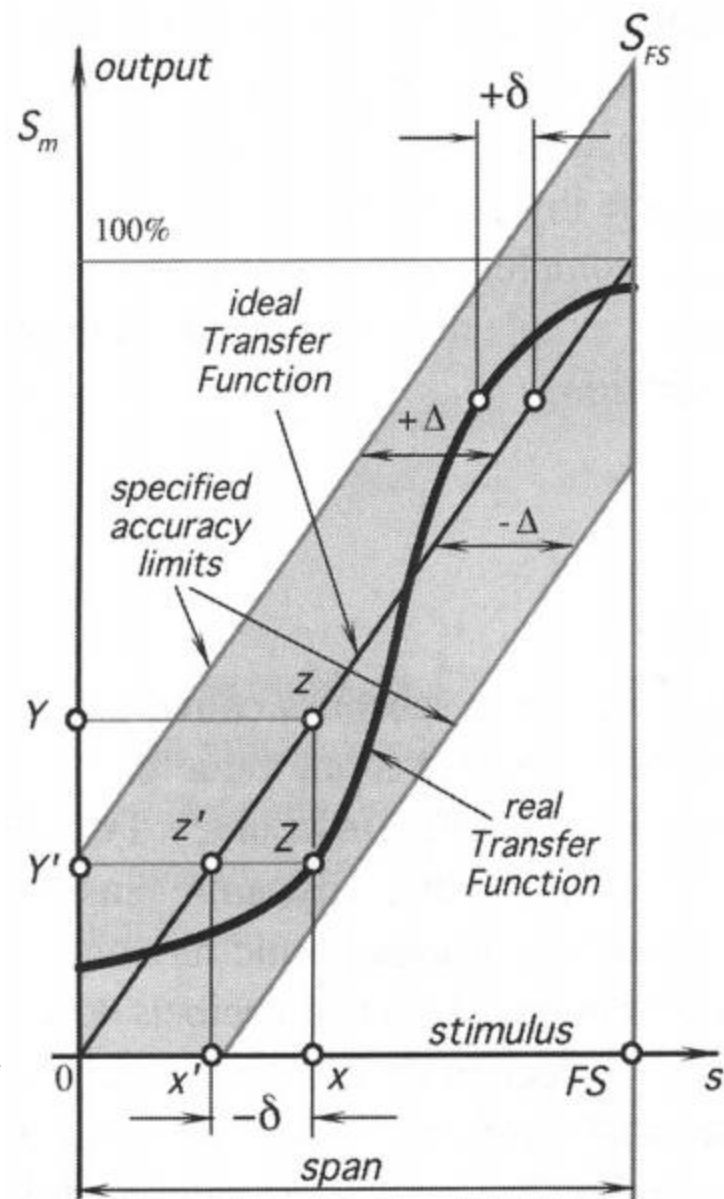
# Átlagos mobiltelefon szenzorai



- Érintőképernyő
- Gyorsulásmérő
  - Mindhárom irányban
- Giroszkóp
  - Szög elfordulás mérése, a tér három irányában
- Mágneses tér
- Hőmérséklet
- Fényerősség
- Légnyomás

## Transzfer karakterisztika

- Az  $S = f(s)$  függvény
  - Azaz az összefüggés a kimeneti jel ( $S$ ) és a mérendő jel ( $s$ ) között.
- Érzékenység
  - Mennyire érzékeny a szenzor a mérendő jel megváltozására?, azaz  $dS/ds$
- Érzékelési határ
  - A legkisebb mérhető mennyiség
- Bemeneti teljes tartomány (span, input full-scale, FS)
  - Amilyen tartományban a szenzor képes mérni a mérendő mennyiséget
- Kimeneti teljes tartomány
  - Analóg v. digitális szenzornál is a kimenet maximum-minimum értéke



## Főbb tulajdonságok

- **Felbontás**
  - A legkisebb változás a mérendő jelben, ami detektálható. Digitális szenzornál bitben adjuk meg, pl. 12 bit.
- **Válaszidő**
  - A szenzor kimenetén mennyi idő múlva jelenik meg a változás. Néha a reciprokát használjuk
- **Offset**
  - Gerjesztetlen bemenet esetén a kimeneti jel értéke
- **Linearitás**
  - Mennyire tér el a szenzor kimenete a „kívánatos (?)” lineáris választól
- **Hosszú távú stabilitás (drift)**
  - Változatlan körülmények között hosszú távon is ugyanazt az értéket kellene szolgáltatnia

## Bosch BMP280 nyomásérzékelő

Tulajdonság	
Bemeneti érzékelési tartomány	300 – 1100 hPa (9000m .. -500m)
Pontosság	1hPa
Felbontás	Max. 20 bit, 1.6Pa
Offset	1,5Pa/K
Zaj	1,3Pa
Hosszútávú stabilitás	±1hPa, 12 hónap alatt
Max. frekvencia	182Hz



# A transzfer karakterisztika modellezése

## ■ Lineáris szenzor

- $S = As + B$ 
  - Itt A az érzékenység, B az offset

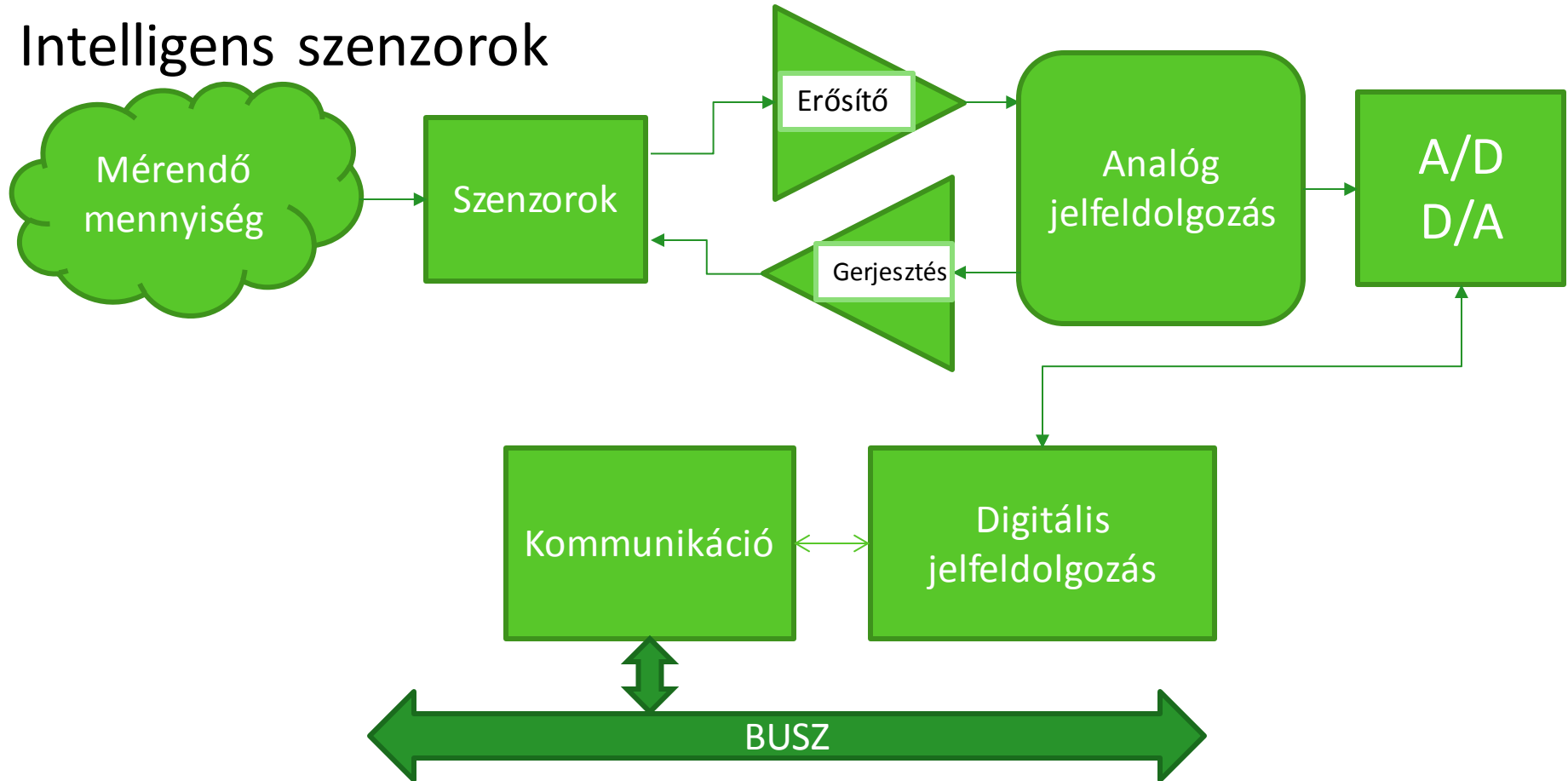
## ■ Nemlineáris szenzor

- Ha tudunk valamilyen fizikai modellt alkotni, akkor a fizikai modell alapján
  - Pl. exponenciális, logaritmikus, hatványfüggvény
- Ha ilyet nem tudunk, akkor közelítést alkalmazunk
  - Polinomiális
  - Lineáris vagy köbös interpoláció biz. pontok között.

## ■ Kalibráció

- A szenzor transzfer karakterisztikájának mérése
  - Pontosabb szenzort igényel, mint a mérendő!
- A mért karakterisztika alapján a modell paramétereinek meghatározása

# Intelligens szenzorok



- Egy rendszerbe integrálja az érzékeléstől a mért eredmény digitális kommunikációjáig a teljes jelfeldolgozást.
- A gyakorlatban a busz egy egyszerű soros busztól SPI vagy I<sup>2</sup>C az internetre kapcsolódásig terjed (IoT 😊)

# Követelmények

- Egykoron
  - Linearitás, kis offset, hőmérsékletfüggetlenség, hosszú távú stabilitás
- Az intelligens szenzorok esetén azonban ezek nem a legfontosabb tényezők
  - Hiszen a felsoroltak jelfeldolgozással kezelhetők
    - A nemlineáris karakterisztika linearizálható
    - A hőmérséklettel, más hatásokkal a mért érték korrigálható
    - Akár működés közben is a szenzor újraprogramozható
- Ehelyett a legfontosabb követelmények
  - **CMOS kompatibilitás**, azaz integrált áramköri környezetbe integrálható
  - Tömeggyárthatóság (valójában az előzőből következik)
  - Olcsó ár (szintén az előző kettőből következik.)
  - Lehetőség szerint a legkevesebb külső alkatrész!
- **MEMS – Micro-Electro-Mechanical Systems**
  - A szilícium technológia eszközkészletével épített kisméretű elektromechanikai rendszerek
  - A szilícium jó alapanyag kis méretekben.



## Gyakran alkalmazott érzékelők

(még véletlenül sem teljes a felsorolás, nem is lehet az...)

Elsősorban a mobil számítástechnikára koncentrálva

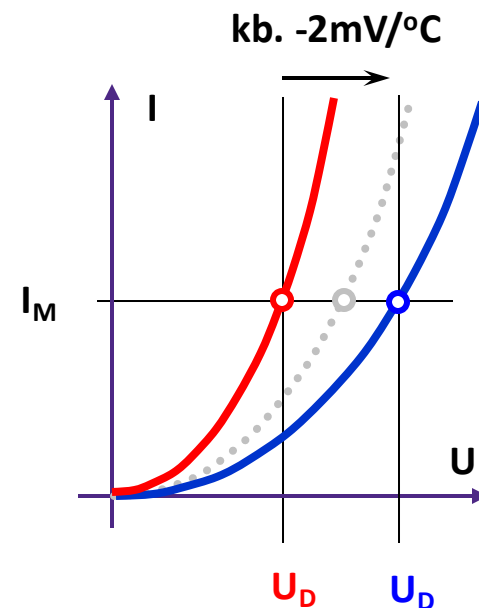
# Hőmérséklet érzékelés

- Az egyik legfontosabb paraméter
- Nemcsak önmagában érdekes
  - A szenzorok nagy részének hőmérsékletfüggő a karakterisztikája
  - Azaz ismerni kell a szenzor hőmérsékletét is, hogy a mért értéken a hőmérsékletfüggő korrekciót el tudjuk végezni.
  - Emiatt a legtöbb integrált érzékelő tartalmaz hőmérőt is.
- Mivel minden fizikai jelenség hőmérsékletfüggő, ezért az érzékelés módjai is változatosak
- Példaképpen a legfontosabb módokat bemutatjuk
  - Modern eszközökben azonban nagyrészt az integrált áramkörben használható megoldások találhatók

## Példaképpen egy áttekintés a hőmérsékletmérés lehetőségeiről

- Hőtágulás
  - Folyadék hőmérő, bimetál stb.
- Termoelem
  - Két különböző fém összehegesztésével. A kontakt potenciálkülönbség miatt kb.  $10\text{-}50\mu\text{V/K}$  feszültség mérhető a mérendő és a fix hőmérsékleten tartott pont között.
- Ellenállásmérés
  - NTC – negatív hőmérsékleti együttható, a hőmérséklet növelésével csökken az ellenállás.
  - PTC – pozitív hőmérsékleti együttható
- Infravörös sugárzás mérők
  - $700\text{nm} - 1\text{mm}$  hullámhossz
- Folyadékkristályos hőmérők
  - Az LCD állapota megváltozik, pl. fázisváltozás
- Hőérzékeny anyagok, pl. festékek
- Rezgés frekvenciájának változása
- **Félvezető, pn átmeneten (diódád) alapuló hőmérséklet mérés**
- **És ami még nem fért fel ide...**

## A pn átmenet hőmérsékletfüggése



- Adott áram mellett a pn-átmenet feszültsége kb. 2mV-ot csökken  $1^{\circ}\text{C}$  hőmérsékletnövekedés hatására.
- Mivel a szilícium jó hővezető, ez lehetőséget teremt arra, hogy a chip hőmérsékletét közvetlenül mérjük.
  - (az ún. **junction temperture**)
- Széles hőmérséklettartományokban lineárisnak tekinthető
  - Nem szükséges általában korrekció

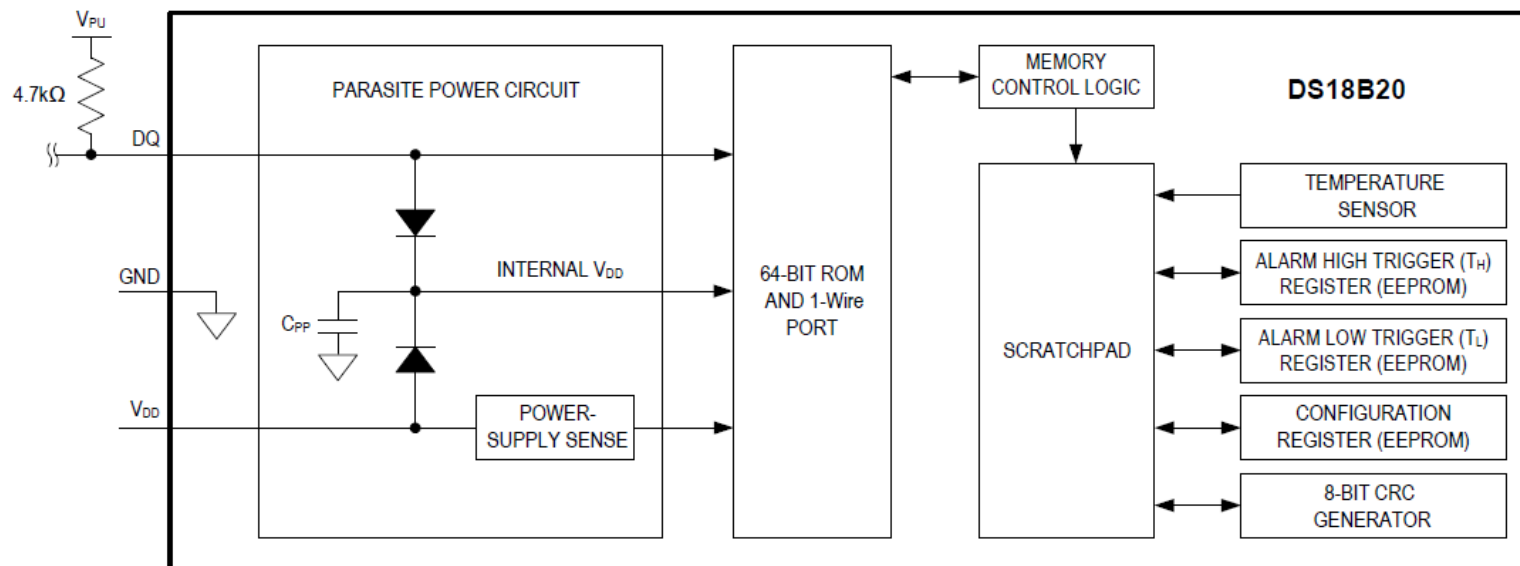
## Abszolút hőmérséklet mérése

- Az előzően bemutatott megoldás hátránya, hogy pontos áram előállítás igényel.
  - Mivel az áramgenerátor is alapesetben hőmérsékletfüggő, ez nem egyszerű feladat
- Egy ravasz kapcsolással az áramfüggést ki lehet iktatni.
  - Egy pn átmenet árama a feszültség függvényében:
  - $$I = I_0 \left( e^{\frac{U}{nU_T}} - 1 \right)$$
  - Ebben az összefüggésben a szaturációs áramkonstans ( $I_0$ ) egyenesen arányos a felülettel. Ha két pn átmenetre, aminek a felületének aránya  $N$  ugyanazt az áramot kapcsoljuk, akkor
  - $$\Delta U = U_T \ln N = \frac{kT}{q} \ln N$$
  - Ami az abszolút hőmérséklettel egyenesen arányos

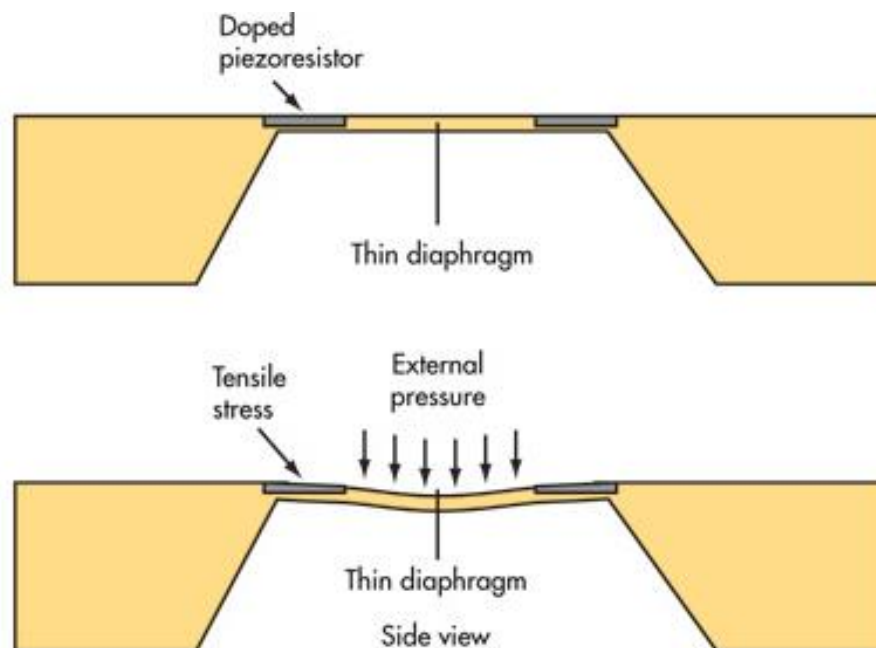
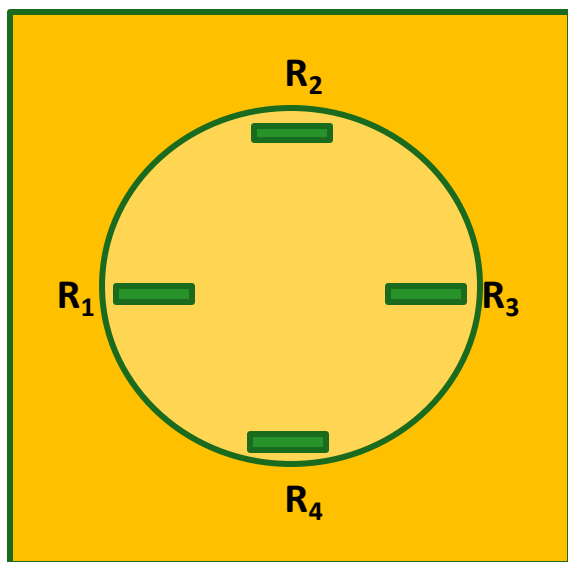


# Dallas DS18B20

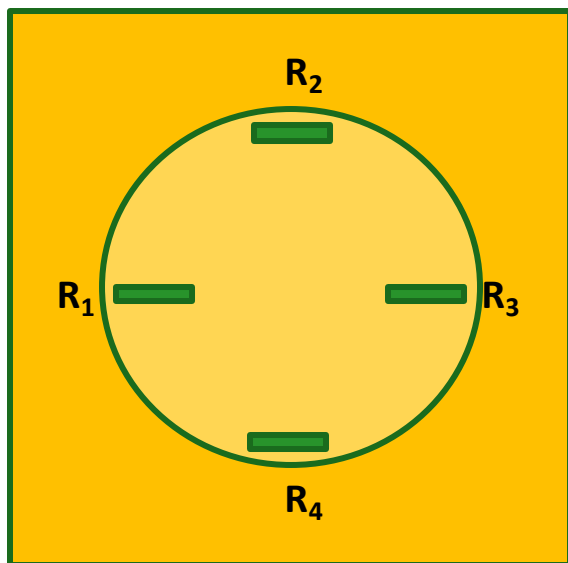
- Pontosság:  $0,5^{\circ}\text{C}$ 
  - Felbontás: 9 vagy 12 bit (konverziós idő vs. pontosság)
  - Drift:  $0,2^{\circ}\text{C}$  1000h alatt
- Busz: 1-Wire
  - Egy adat és egy föld összeköttetést igényel
  - Half-duplex soros kommunikáció, lehetséges a szenzor táplálása adatvonalon keresztül.



# Nyomásérzékelés



- Egyik legrégebbi szenzortípus, 1970-es évek vége óta gyártják
- A szilíciumot elvékonyítják, egy membránt alakítanak ki
  - A Si nagy nyomást elvisel, jól deformálódik, az alakváltozás rugalmas
  - Adalékolással mérőellenállásokat alakítanak ki, p – típusú szilíciumból



$$R_1 = R_0 - \Delta R$$

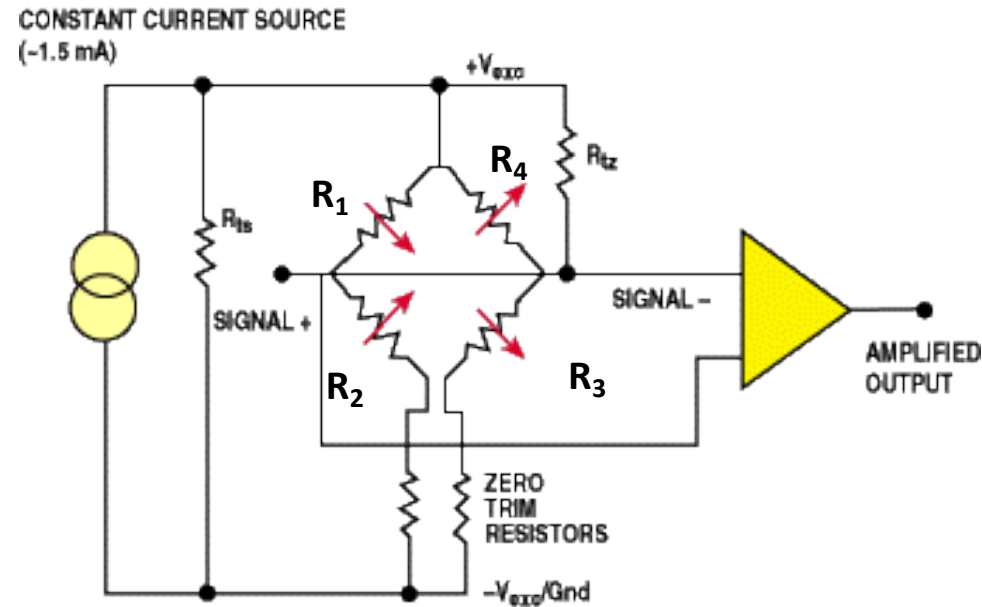
$$R_2 = R_0 + \Delta R$$

$$R_3 = R_0 - \Delta R$$

$$R_4 = R_0 + \Delta R$$

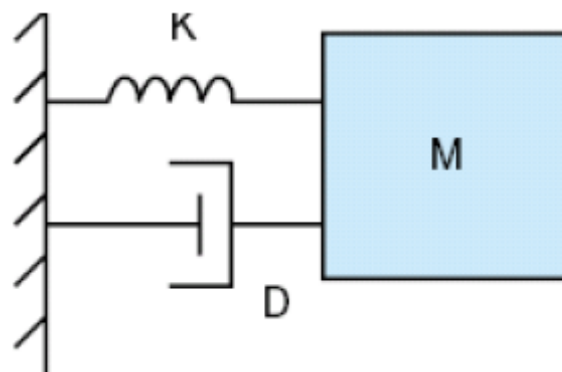
## ■ Az ellenállások piezo-rezisztívek

- azaz mechanikai feszültség hatására (nyúlás vagy összenyomódás) az ellenállásuk megváltozik, méghozzá irányfüggően.
- Az ellenállásváltozás függ az orientációtól, a hőmérséklettől és a
- $\Delta R = R_0(1 \pm S(T)P)$
- Mindenféléképpen hőmérséklet-kompenzációt igényel.



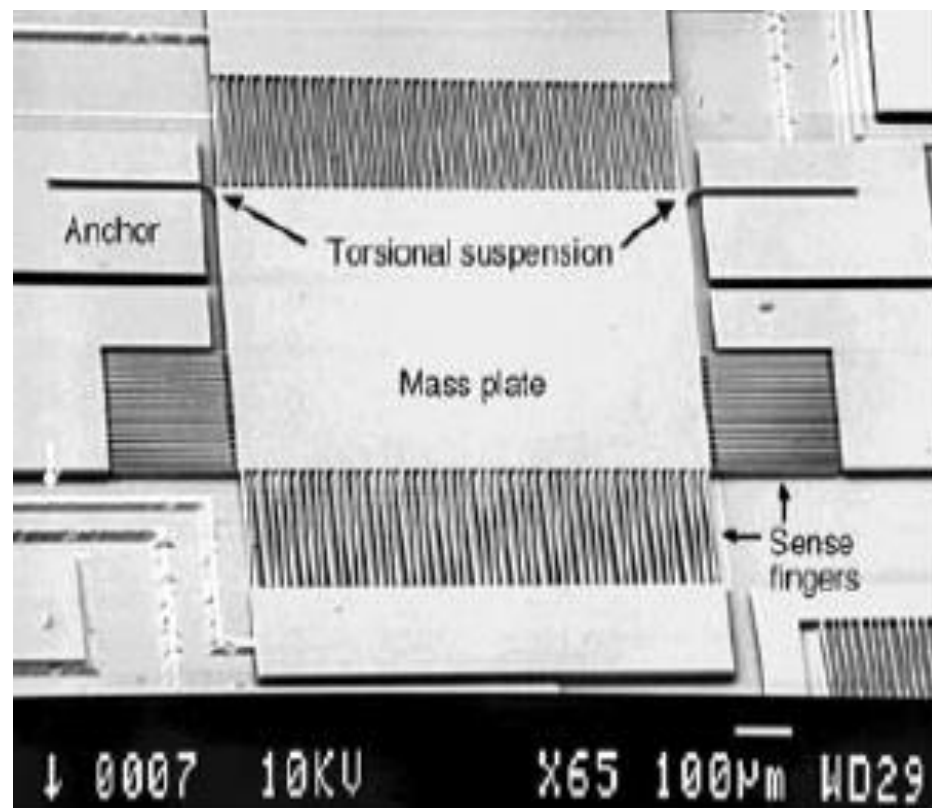
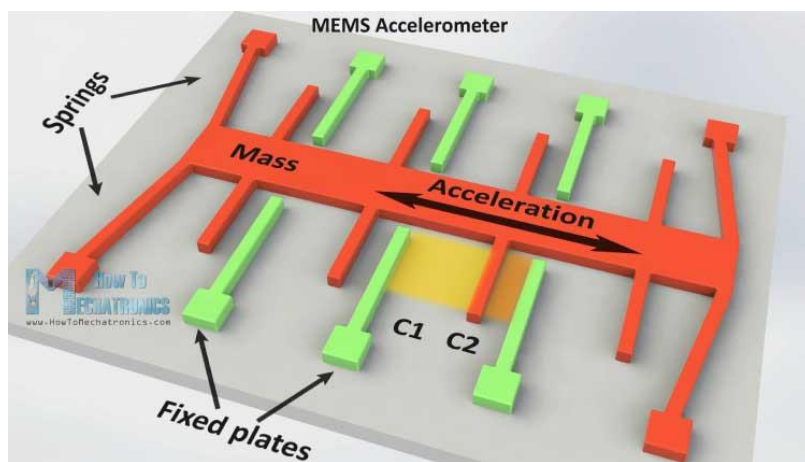
- Kiolvasáshoz a négy ellenállást Wheatstone hídbe kapcsolják.
- A mért feszültség:  $V_{WB} = V_{EX} \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = 2V_{EX} \Delta R / R_0$ 
  - (abszolút érték)

## Gyorsulásmérő



- A rendszer modellje: mozgó tömeg, egy csillapított rugós felfüggesztésen.
- Ha a csillapítást elhanyagoljuk:
- $Ma = Kx$
- ( $x$  az egyensúlytól vett eltérés)
- $x$  ismeretében a gyorsulás meghatározható

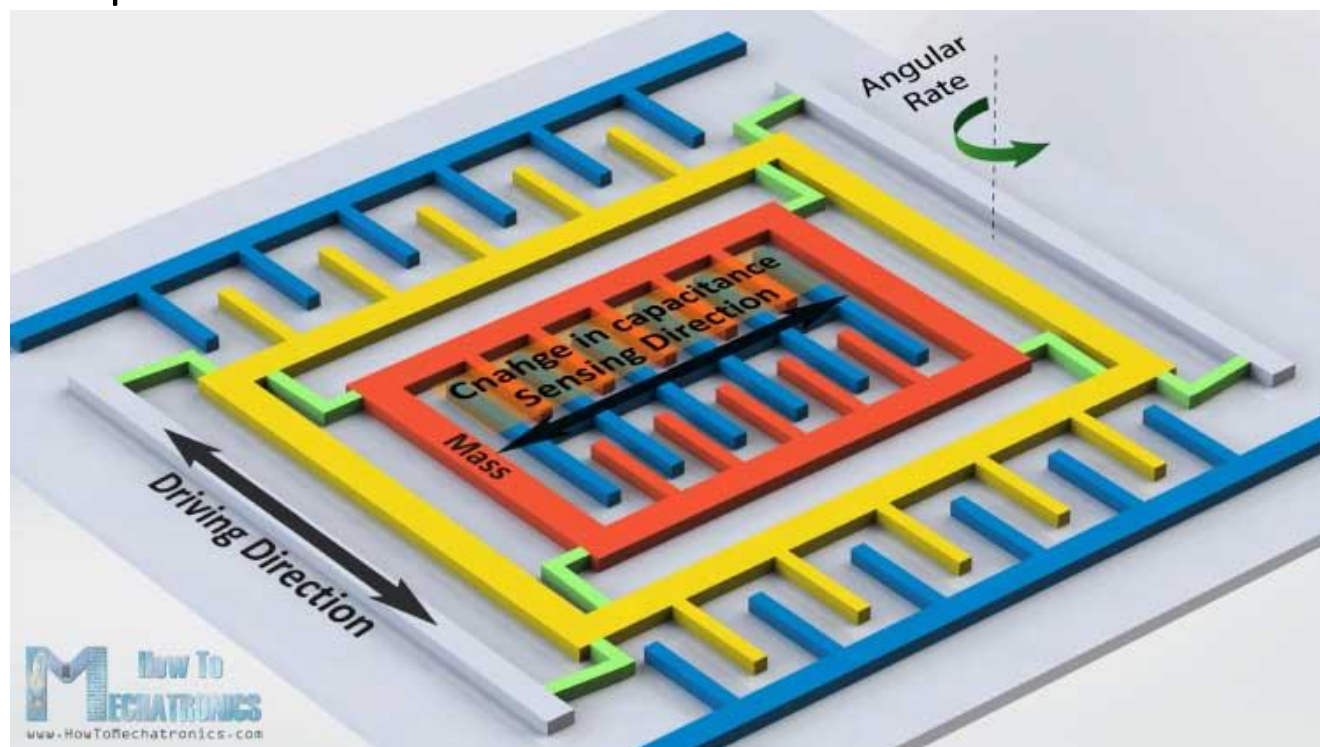
## Kiolvasás kapacitív úton



- Az elmozdulást kapacitív úton meg lehet mérni.
- Így a gyorsulás meghatározható.

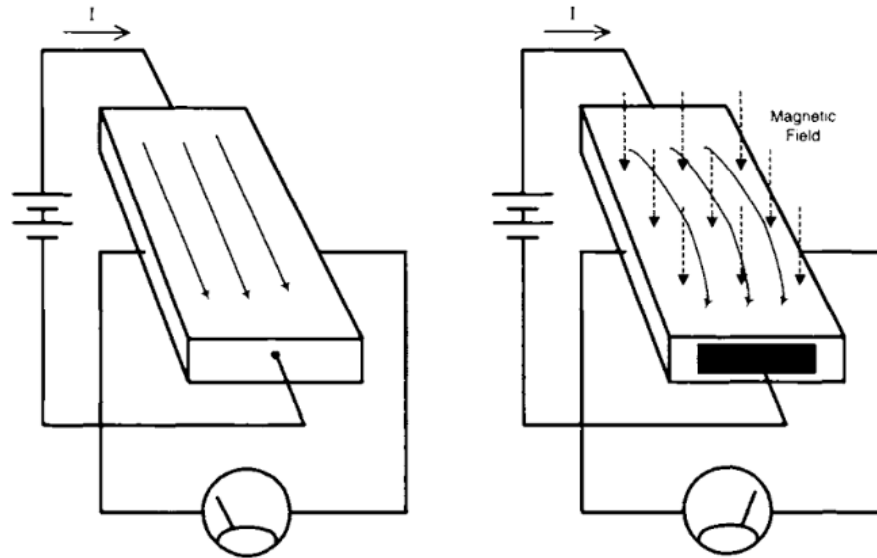
# Giroszkóp

- Szögsebesség mérésére
- A Coriolis erő hat egy elektrosztatikus térrel mozgatott tömegre.
  - $F_C = -2m\omega \times v$
  - A kiolvasás kapacitív



## Mágneses tér érzékelése

- Magnetorezisztivitás vagy Hall-effektus mérése a tér 3 irányában.
- Hall effektus

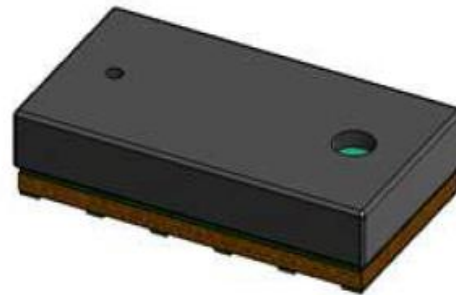


- Általában Wheatstone-híd segítségével.
- Ennek a szenzornak az egyszerűbb - 1 bites változata alkalmas pl. a tablet tok jelenlétének detektálására



## Közelség érzékelés (proximity)

- Közeli infravörös fénnel (pl. 940nm) történő megvilágítás után méri a legközelebbi tárgy távolságát egy fotodiódával.
  - Felhasználó detektálása
  - Mobiltelefonban pl. a képernyő kikapcsolása beszélgetéskor.
  - Kézetektálás (mosdó, szappanadagoló)
  - Autofókusz fényképezéskor





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Elektronikus Eszközök Tanszéke

# Képerzékelők

# Képzékelők

## ■ Képzékelő:

- Az elektromágneses sugárzást elektromos információvá alakítja.
- (látható fény, IR, UV, RTG stb.)
- Leggyakrabban mátrix elrendezésű

## ■ Alapvetően két típusú képzékelőt gyártanak

### 1. CCD (Charge Coupled Device)

- A látható fényt feldolgozó kereskedelmi eszközökből kiszorult, nagyrészt csak professzionális és mérés technikai felhasználásra készül.

### 2. CMOS (más néven APS, Active Pixel Sensing)

- gyártástechnológiai előnyösebb, mivel ugyanazzal a technológiával készül, mint az integrált áramkör
- A fő különbség az érzékelő típusában és a kiolvasás módjában van, bár az alapjelenség ugyanaz.



## A képérzékelés elve

- Félvezető anyagokban a beeső fény elektron-lyuk párokat kelt
- Azaz a foton energiája segítségével egy elektron a vegyértéksávból a vezetési sávba kerül.
- Ez a folyamat az ún. generáció
  - A fény energiája meg kell, hogy haladja tiltott sáv szélességét
  - Pl. szilícium esetén  $E_G = 1,12eV$
  - Az ehhez tartozó hullámhossz:  $\lambda = \frac{hc}{E_G} = 1110nm$
  - (A látható fény 400-700nm)
  - A tiltott sáv szélességénél kisebb energiájú fotonok nem keltenek elektron-lyuk párokat, tehát távoli infravörös tartományban a szilícium átlátszó. A közeli infravöröst viszont érzékeli – ezért IR szűrővel védekeznek pl. kamerákon.
  - (nagy intenzitás esetén persze nem sokat ér, távirányító vs mobil...)

## ■ Kvantum hatások

- $\eta_Q$  = Elektromos teljesítmény/elnyelt fényteliesség
- Ez fogja meghatározni a fény (sugárzás) intenzitás érzékenységet
- Emberi szem: 20%, hagyományos film 10%, képérzékelők: 80%-ot is elérheti. (hullámhosszfüggő)

## ■ Fill factor

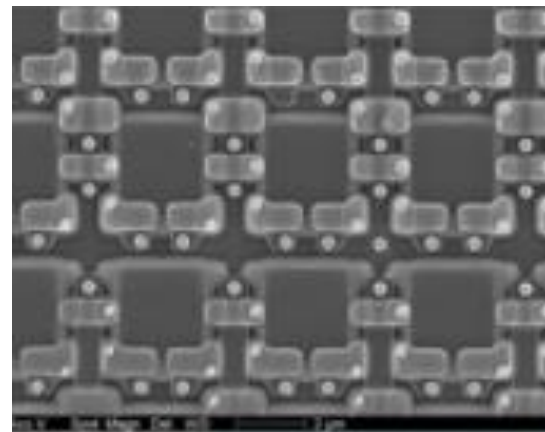
- FF= Aktív pixel terület/Teljes pixel terület
- Minél nagyobb, annál kedvezőbb.
- Mikrolencsékkel javítható ez a tényező

## ■ Felbontás

- Általában Mpixel-ben adják meg. A képarány szokásosan 2:3, vagy számítógép/mobil eszköz képernyőjéhez igazodik

## ■ Méret:

- 1/3", 1/2" 2/3" 1" stb. Full frame (35mm-es film, 36x24mm)



# Képerzékelők összehasonlítása

## ■ CCD

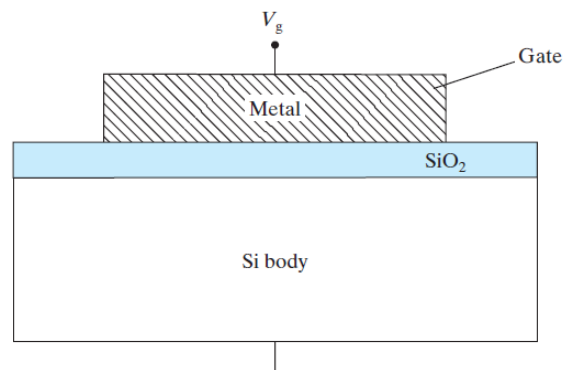
- Speciális gyártást igények, nehezen integrálható össze a feldolgozó elektronikával
- Nagy kvantumhatásfok, fill factor és kis zaj
- A kiolvasás nem véletlen elérésű és lassú
- Több, viszonylag nagy feszültségre van szükség.

## ■ CMOS

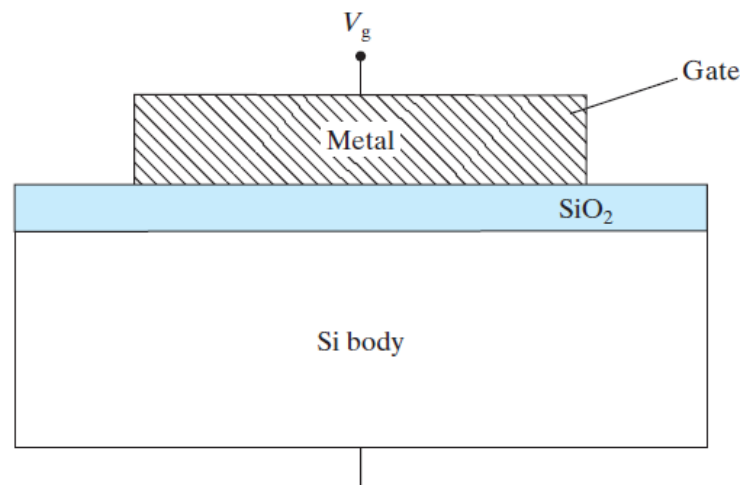
- Alacsonyfeszültségű és kisteljesítményű (hordozható eszközökben ez nagyon fontos szempont!)
- A kiolvasás gyors, az elérés véletlen
  - Azaz az egyes pixelek címezhetőek
- CMOS kompatibilis, azaz egybeintegrálható a feldolgozó elektronikával
  - (bemenet: fény kimenet: JPEG formátumú kép...)

## A CCD

- AT&T Bell Labs, 1969
- Eredetileg nem képérzékelésre szánták, hanem memóriának fejlesztették
- Kodak, 1975 100px × 100px digitális fényképezőgép
- 1976 – 800px × 800px, az első alkalmazása, katonai kéműholdban
- Működése az ún. MOS kapacitáson alapul.

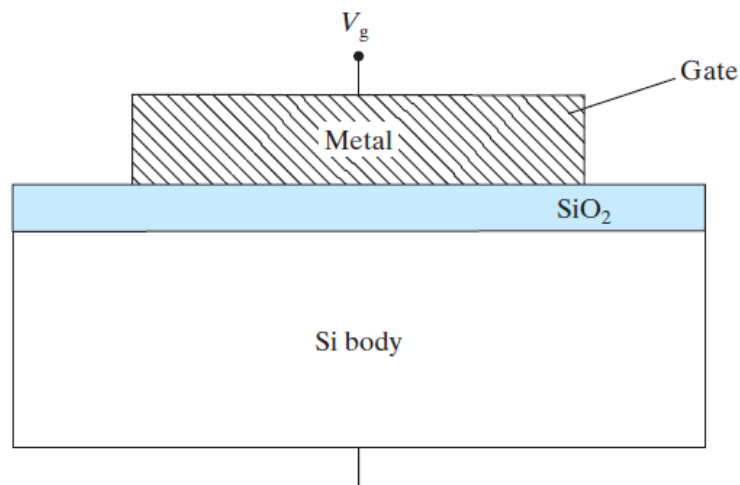


# A MOS kapacitás



- Látjuk, hogy hasonlít a MOS tranzisztorhoz, de a source és drain elektróda hiányzik.
- Emlékeztető: MOS tranzisztor.
  - Ha a gate-re a küszöb feszültségnél nagyobb feszültséget kapcsolunk, akkor létrejön egy ún. inverziós réteg, egy csatorna a source és a drain között, és a tranzisztor vezet
  - Az inverziós réteg töltéshordozói tehát a source-ból származnak.

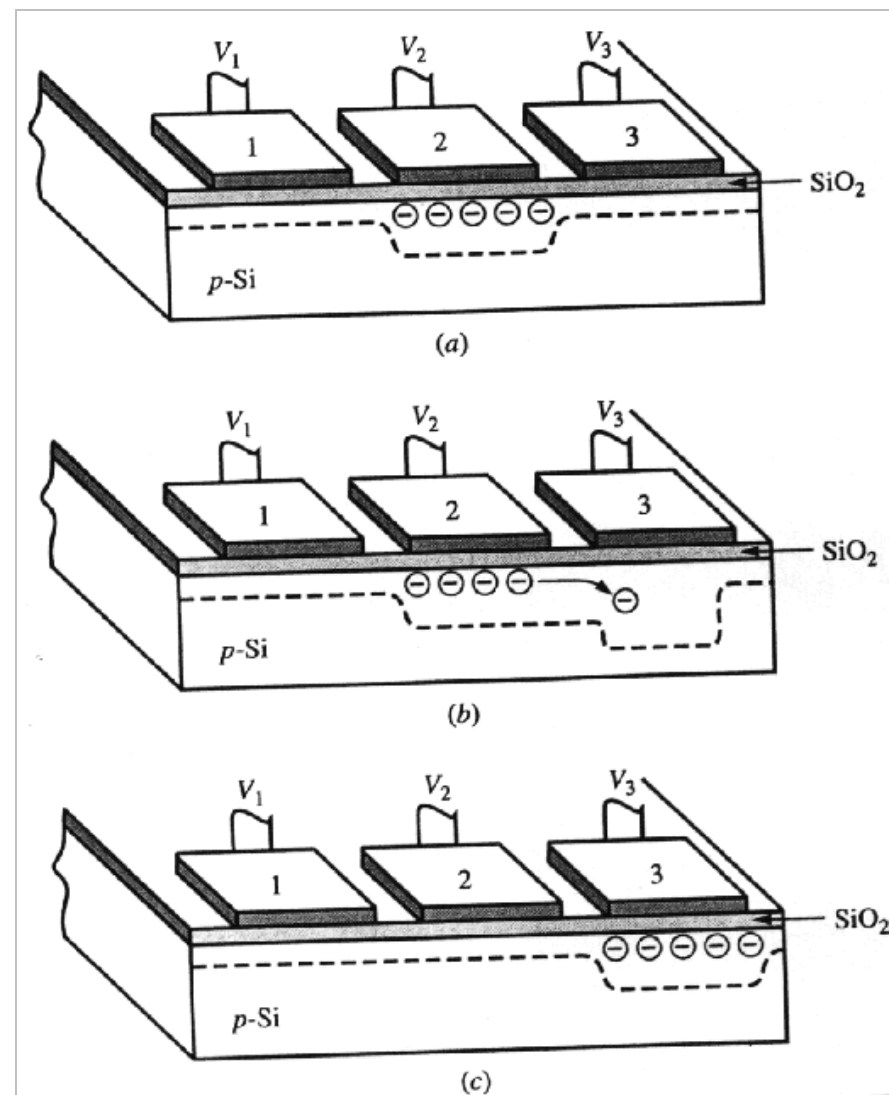
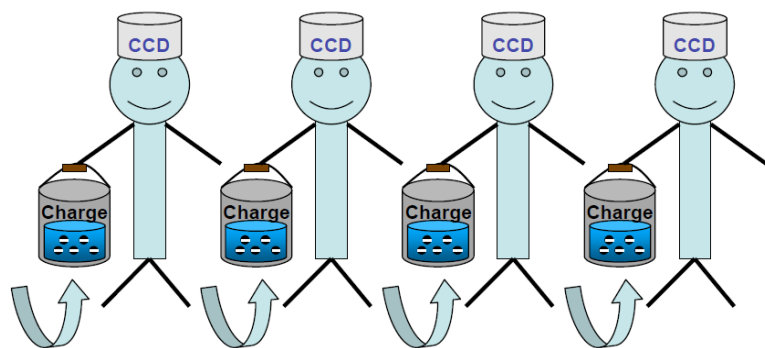


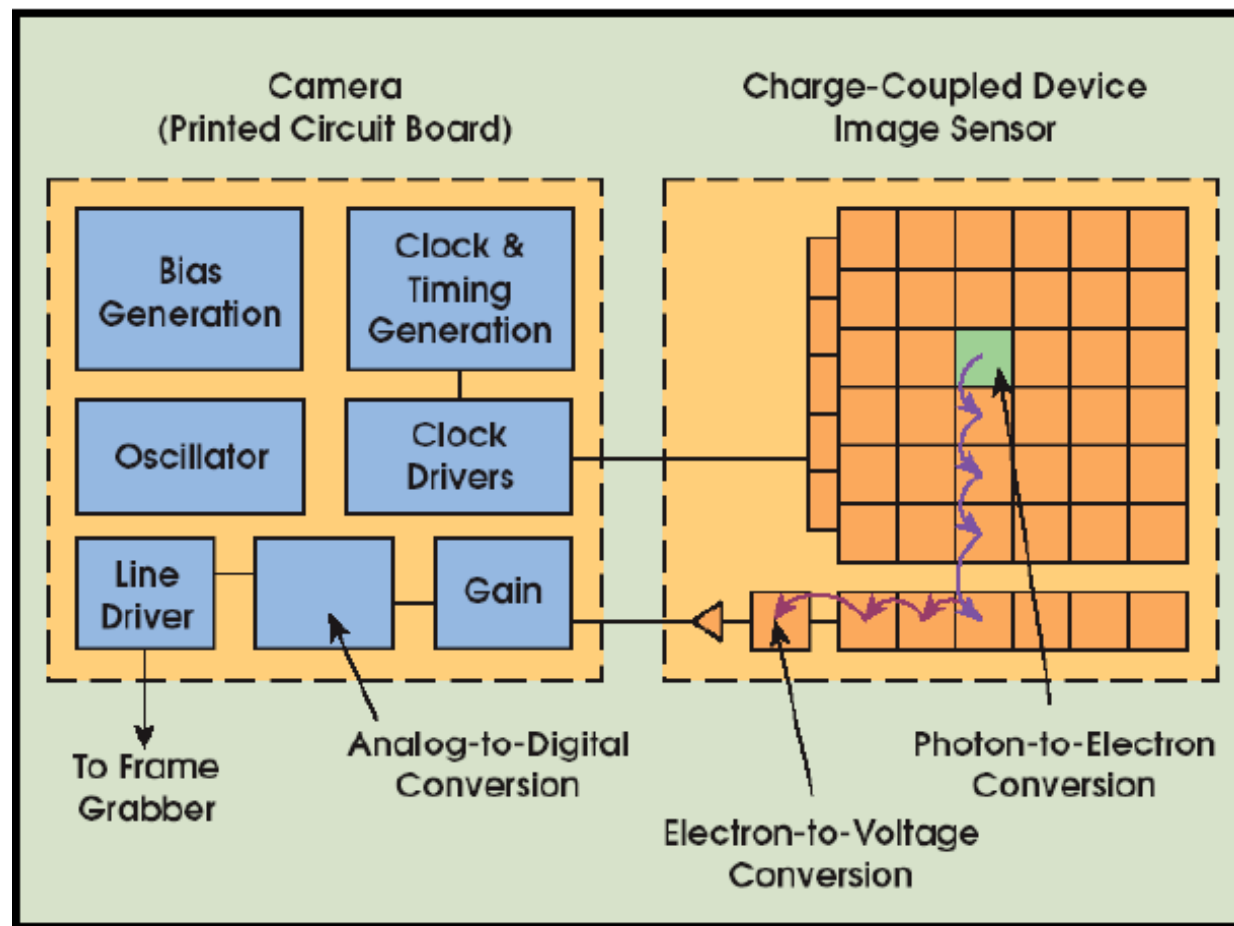


- MOS kapacitás esetén nincs forrás elektróda!
  - A töltéshordozók vagy termikusan generálódnak (ami lassú folyamat, szélsőséges esetben hűtött kristály esetén napok!)
    - Az így keletkezett töltések adják a zajt, az ún. sötétáramot.
  - Vagy **a beeső fény generálja** őket.
  - A keletkezett töltéshordozók a gate alól nem tudnak „megszökni”
  - (ún. potenciál lyukban vannak)
  - Ha több elektróda található egymás mellett, akkor ezek vezérlésével a töltés mozgatható (shiftelhető)

■ Megfelelő feszültségek alkalmazásával a töltés mozgatható.

- $V_2 > V_T$ ,  $V_1 = V_3 = 0$ : a töltés a kettős jelű kapacitás alatt marad.
- $V_3 > V_2 > V_T$ ,  $V_1 = 0V$ : a töltés a hármas jelű kapacitás alá mozdul.
- $V_3 > V_T$ ,  $V_1 = V_2 = 0V$ : a töltés a hármas jelű kapacitás alatt marad.





- A CCD alapvetően analóg kimenetet szolgáltat.
- Egy különálló CMOS áramkör végzi el a vezérlést, az A/D átalakítást stb.

# Összefoglalva

## ■ Előnyök

- Kis zaj
- Az érzékelő terület aránya nagy, így a jel/zaj viszony jobb.
- Régóta ismert, bevált technológia

## ■ Hátrányok

- Lassú kiolvasás (kétszeres shiftelés)
- Analóg kimenet, amit egy másik áramkörnek kell feldolgoznia
- Speciális, nem CMOS kompatibilis gyártás
- Túltelítődés (pixel saturation, pixel blooming)
  - Nagy fényerősség esetén a keletkezett töltéshordozó elvándorolnak, így hamis pixel információt kapunk.

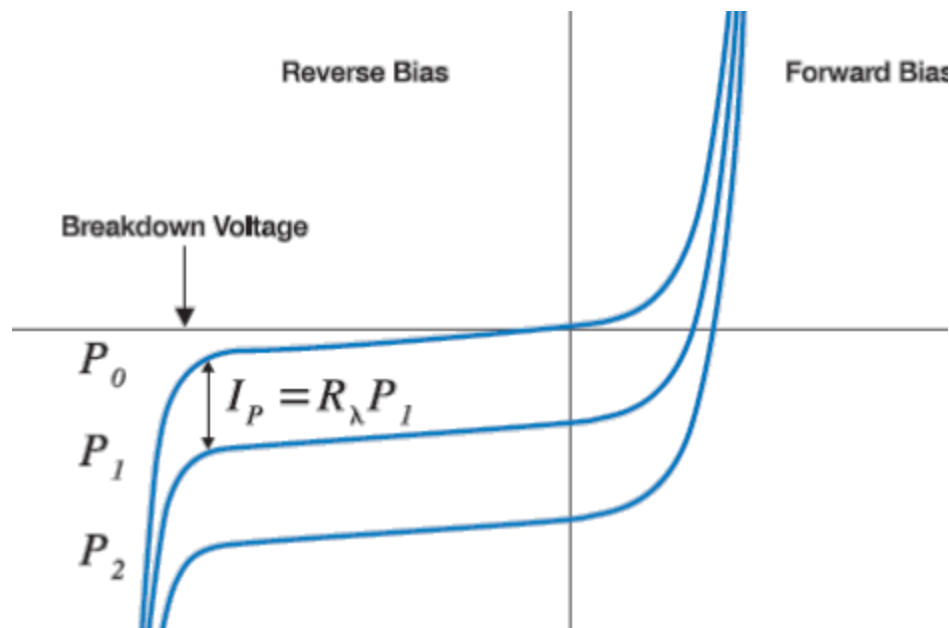




Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Elektronikus Eszközök Tanszéke

# CMOS (APS) képérzékelő

# Érzékelés



## ■ Záróirányú pn átmenet (fotodióda)

- Emlékeztető: ideális dióda árama  $I = I_0 \left( e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$

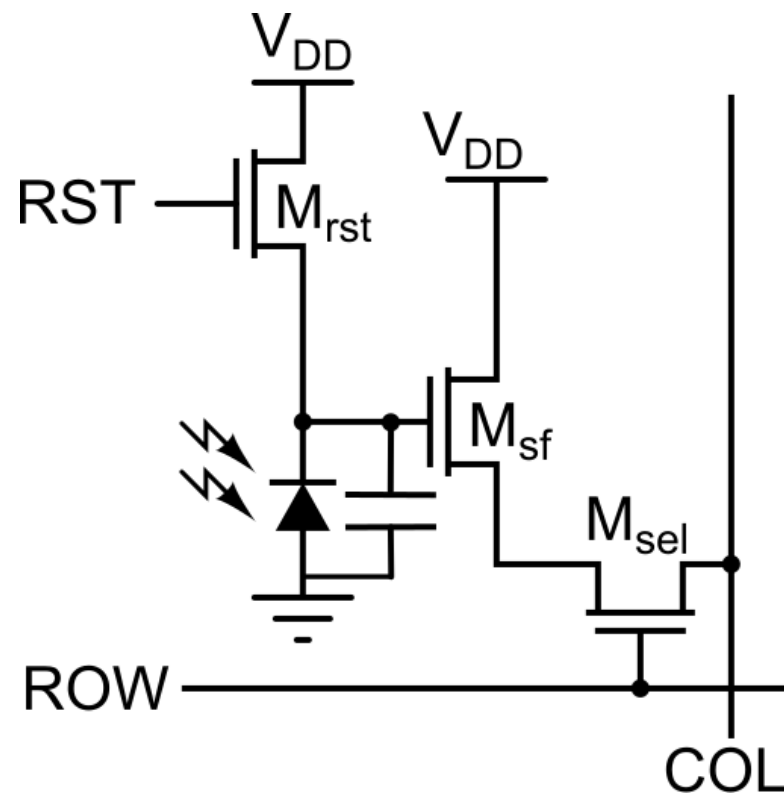
## ■ Megvilágítás hatása

- A generálódó töltéshordozókat az elektromos tér elválasztja egymástól, így a megvilágítással egyenesen arányos áram keletkezik, ez az ún. fotoáram

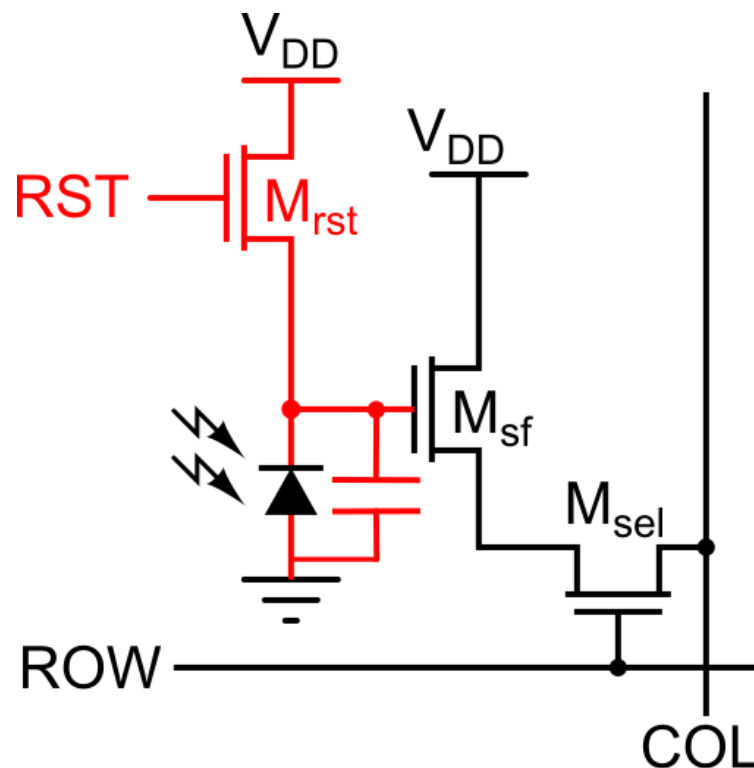
# A fotoáram

- A pn átmenet árama tehát:
  - $|I| \approx I_0 + I_P$
  - Azaz a **sötétáram** és a generált fotoáram összege.
  - A sötétáram nem részletezett jelenségek miatt több, mint az elméletileg számítható, de a fotoáramnál nagyságrendekkel kisebb az érzékelőben.
- A fotoáram függ
  - A fény (sugárzás) spektrális eloszlásától
  - A félvezető anyagtól
  - (meglehetősen bonyolultan...)

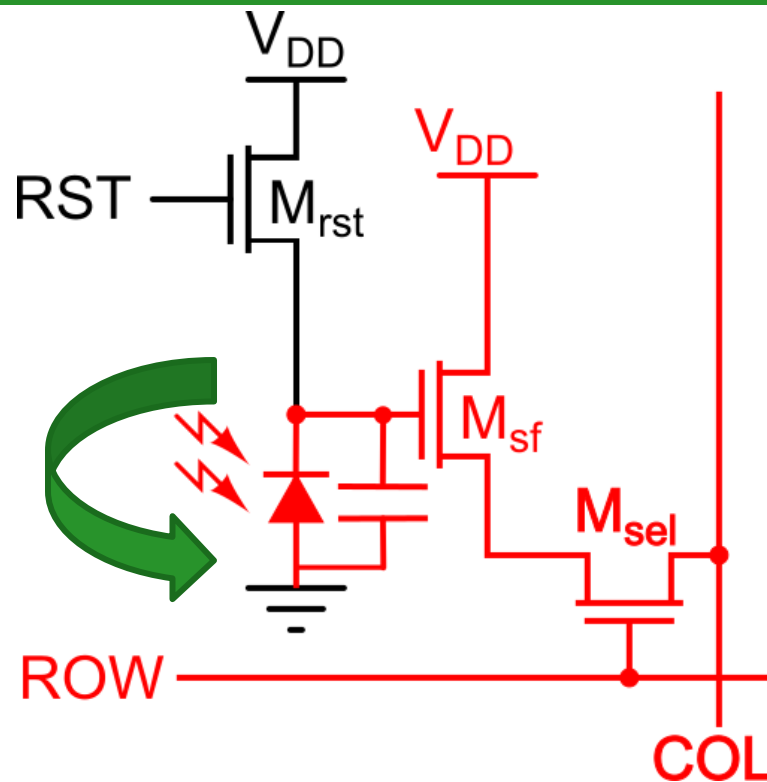
- A fotoérzékelő dióda fotoáramának kiolvasásához néhány tranzisztor szükséges
- Az érzékelőket a memóriákhoz hasonlóan mátrixba szervezik
  - Van szóvonal (ROW), ami egy sor érzékelőt aktivál, amelyek a bitvonalra kényszerítik a (megvilágításfüggő) áramot
  - A kapacitás szórt kapacitás (az érzékelő dióda és a tranzisztor kapacitása)
    - Hasonlóan a dinamikus CMOS logikához!







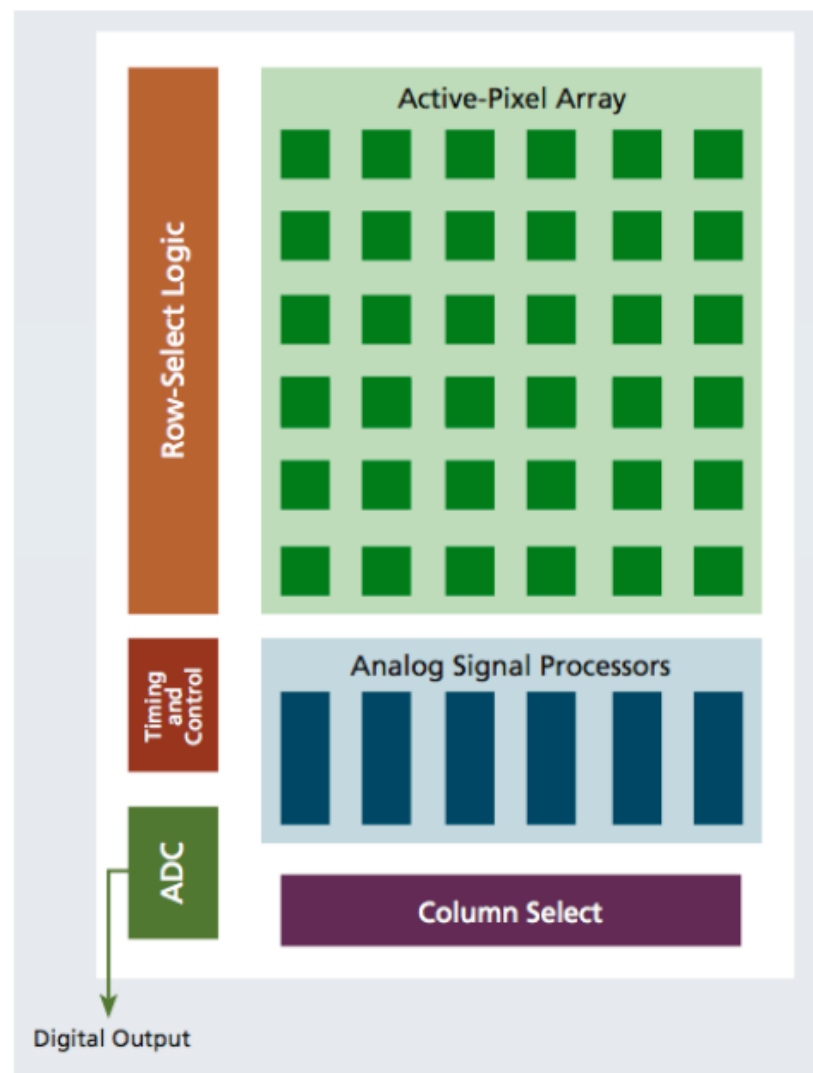
- RST=1 esetén (ez megfelel a zárt blendének...) a szórt kapacitás tápfeszültségre töltődik fel.
  - Függetlenül attól, hogy meg van-e világítva a szenzor, vagy sem. Tehát az  $M_{rst}$  tranzisztor valójában a blende szerepét tölti be.
  - (feltételezzük, hogy a tranzisztor árama jóval nagyobb, mint a fotoáram)



- Aktiváljuk a sort,  $ROW=1$ ,  $RST=0$
- A szórt kapacitást a fény által generált fotoáram sűti ki, a feszültsége annál jobban csökken, minél nagyobb intenzitású a megvilágítás
- Az  $M_{sel}$  tranzisztor az oszlop vonalra kapcsolja az  $M_{sf}$  tranzisztert
- Az  $M_{sf}$  tranzisztor erősítő!
  - Mivel a gate-source feszültsége a szórt kapacitás feszültsége, az árama pedig négyzetesen függ!

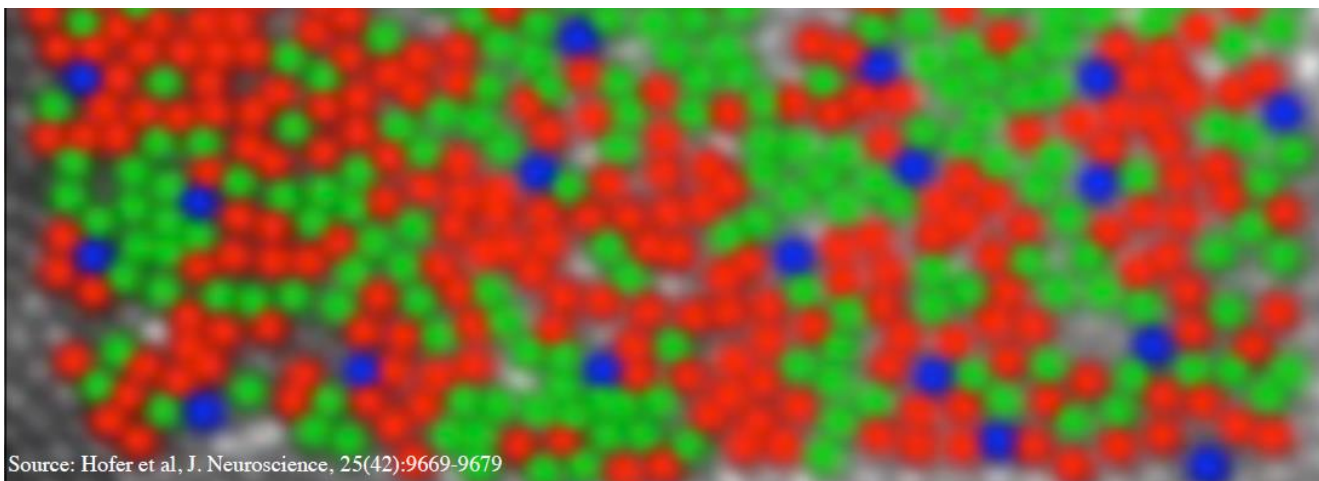
# Kiolvasás

- A kiolvasás sorról sorra történik
  - (ezt könnyű észrevenni gyorsan mozgó objektumok esetén)
- A „feldolgozó” elektronika csökkenti a kitöltést (fill factor)
- A méretcsökkentés lehetővé tette a pixel méretének további csökkentését

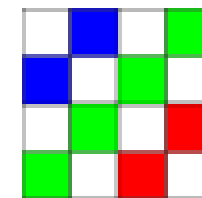
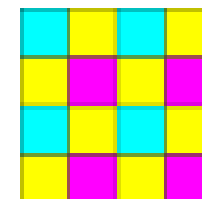
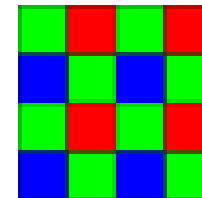


# Színérzékelés

- Alapvetően intenzitást érzékel a félvezető
  - Azaz „fekete-fehér” képet!
- Szokásosan színszűrőkkel oldják meg a színekre bontást
  - Professzionális eszközökben színbontás és 3 vagy több érzékelő
  - Általános fogyasztási célú eszközökben színmaszkot használnak az érzékelő terület felett.
  - Az emberi szem is hasonlóan lát!

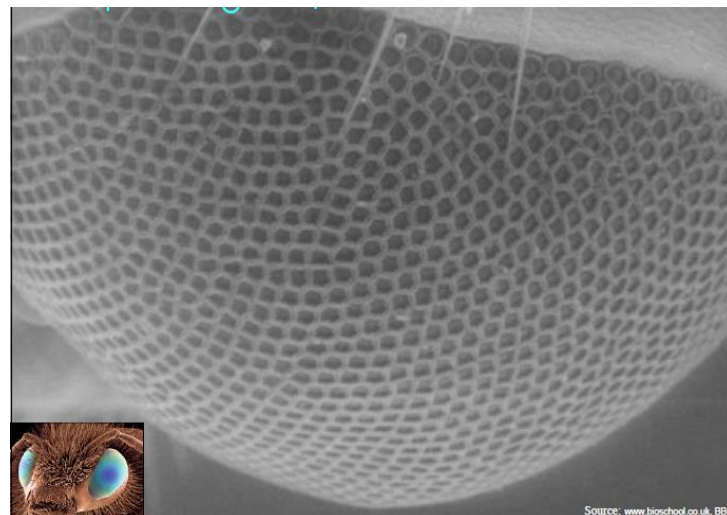
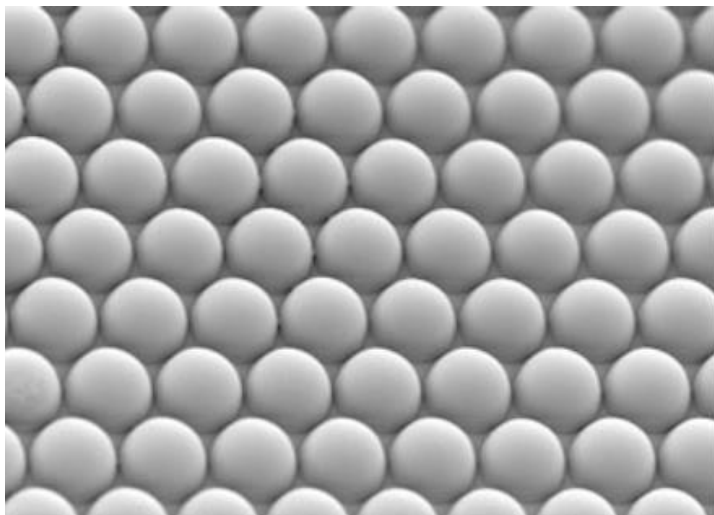


- Különböző elrendezések léteznek.
- RGB szűrő
  - Bayer szűrő 2x2
  - A zöld színre a legérzékenyebb az emberi szem.
  - Egy pixel intenzitása a beeső fény és a szűrőkarakterisztikától függ.
  - A „hiányzó” adott színű pixeleket interpolációval állítják elő.
- CMY szűrő
  - A komplementer szín intenzitását méri.
  - Elméletileg jobb jel/zaj arány érhető el
- RGBW szűrő
  - A szem felbontóképessége intenzitásra sokkal jobb, mint színekre
  - 4x4-es szűrő
  - A szűrő a képpontok felén átereszt, ezek a pontok fényintenzitást mérnek

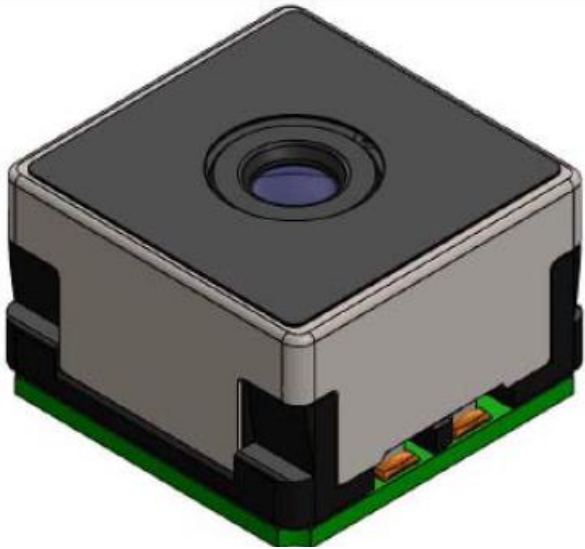


# Mikrolencsék

- Ötlet: a rovarok összetett szeme
- A fotoérzékelő felett egy mikrolencse megnöveli a hatásfokot.



## Példa: VB6955CM / ST Microelectronics



Feature	Detail
Pixel resolution	2600x 1952 with border pixels
Sensor technology	ST IMG140 FSI Gen2 based CMOS imaging process
Pixel size	1.4 $\mu\text{m}$ x 1.4 $\mu\text{m}$
Analog gain	+ 24 dB
Digital gain	+ 6 dB
Dynamic range	60 dB
Signal to noise	36 dB (@ 100 lux)
Supply voltages	Analog: 2.6 to 2.9V Digital: 1.7 to 1.9 V VBAT: 2.5 to 4.8V
Typical power consumption 30 fps	130 mA (typical)

- Integrált autofókusz
- CSI-2 interfész(2×840Mbit/s) – képadatok soros továbbítására
- CCI (I2C) parancsinterfész