



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

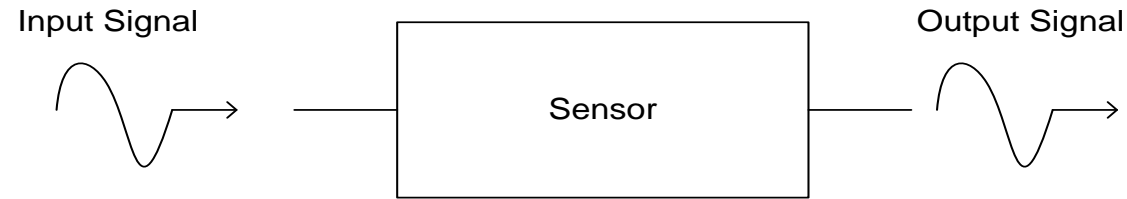
Elektronika alapjai

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

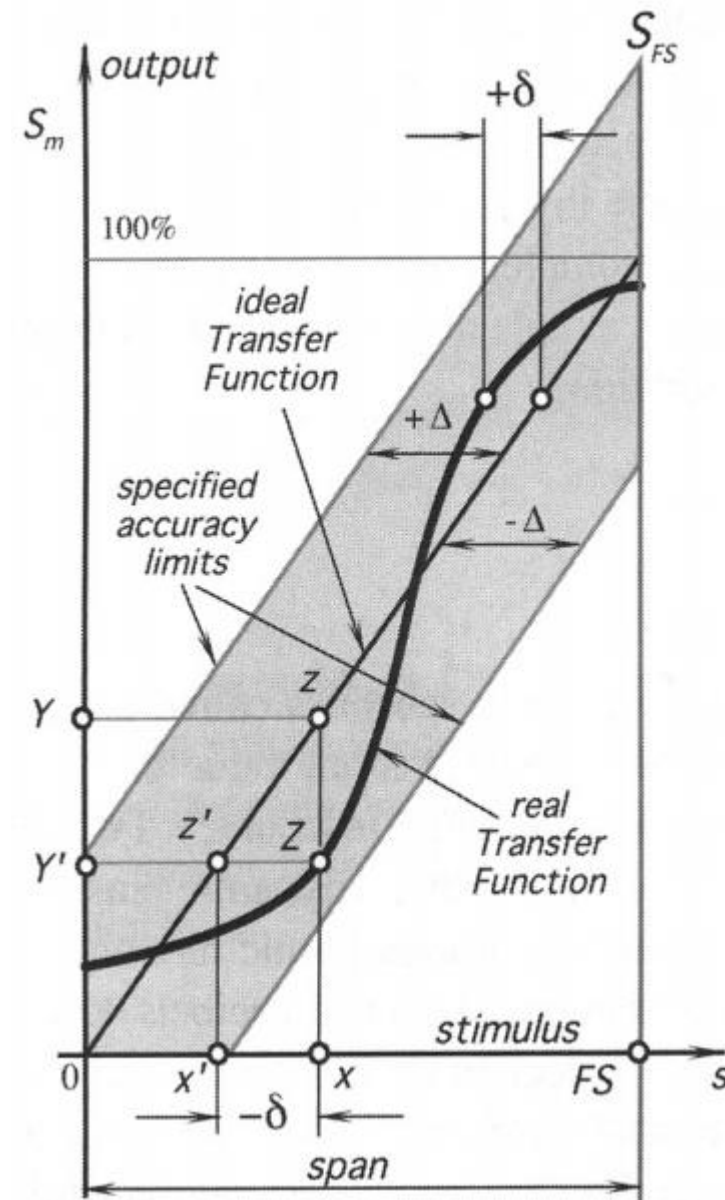
Átlagos mobiltelefon szenzorai



- 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. Ez azt jelenti, hogy a bemeneti teljes tartomány $1/2^{12}$ része. Bővebben ld. AD/DA előadás

▪ Válaszidő

- A szenzor kimenetén mennyi idő múlva jelenik meg a változás. Néha a reciprokát használjuk, maximális mintavételi frekvencia.

▪ 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), -40..85°C |
| Pontosság | 1hPa |
| Felbontás | Max. 20 bit; 0,01hPa (<10cm); 0,01°C |
| Offset | 1,5Pa/°C |
| Zaj | 1,3Pa |
| Hosszútávú stabilitás | ±1hPa, 12 hónap alatt |
| Átlagos mérési idő | 5,5ms |
| Tápfeszültség | 1,7..3,6V |
| Áramfogyasztás 1Hz-en (alvó állapotban) | 2,74µA (0,1µA) |

A transzfer karakterisztika modellezése

■ Lineáris szenzor

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

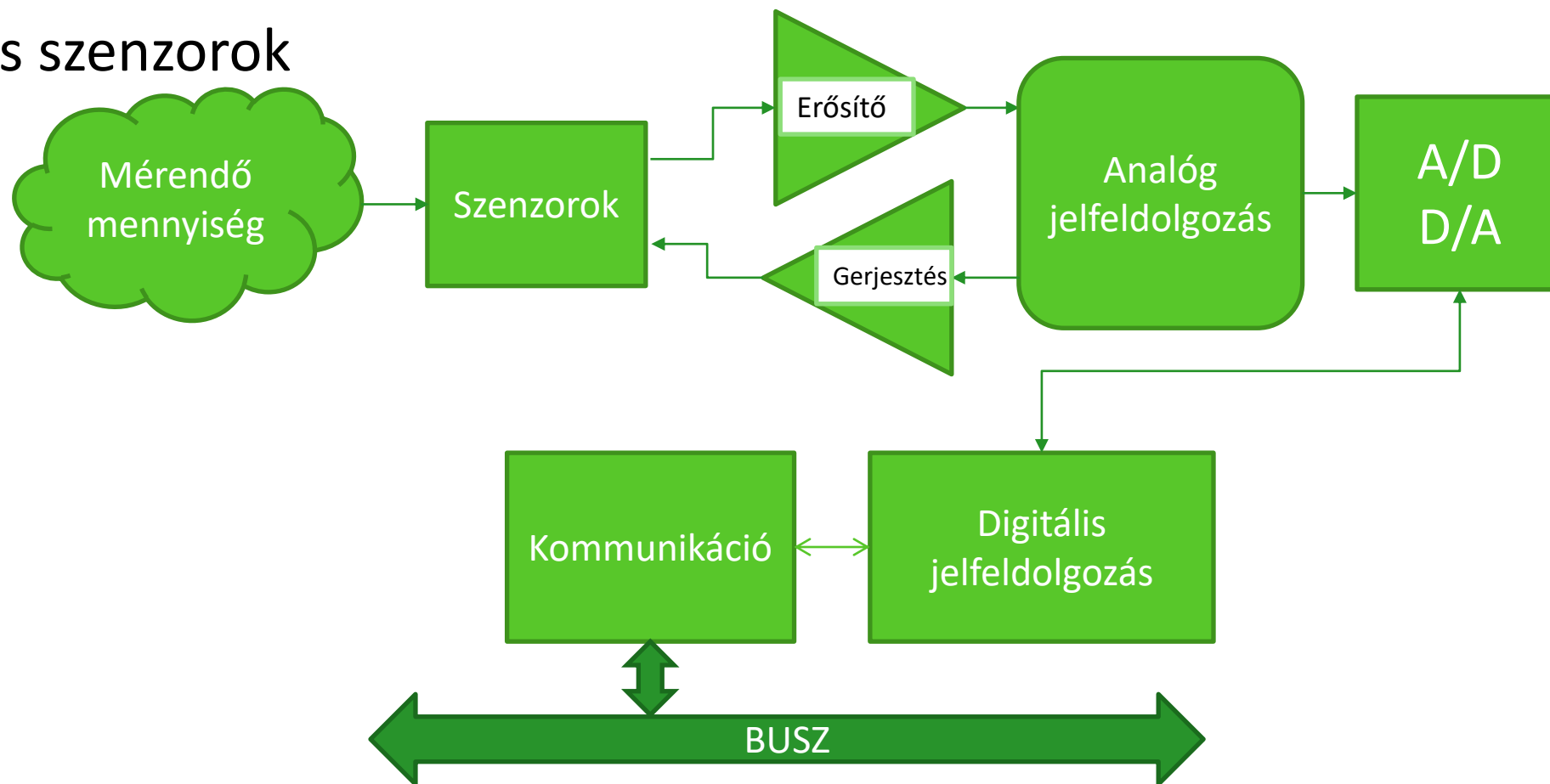
■ Nemlineáris szenzor

- Ha tudunk valamilyen fizikai modellt alkotni, akkor a fizikai modell alapján
 - Pl. exponenciális, logaritmikus, hatványfüggvény
- Ha illet 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 I²C az internetre kapcsolódásig terjed (IoT 😊)

Követelmények

- Egykoron
 - Linearitás, kis offszet, 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 áramkörüi 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 méreteknél.

Gyakran alkalmazott érzékelők

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

Elsősorban a mobil számítástechnikára koncentrálva

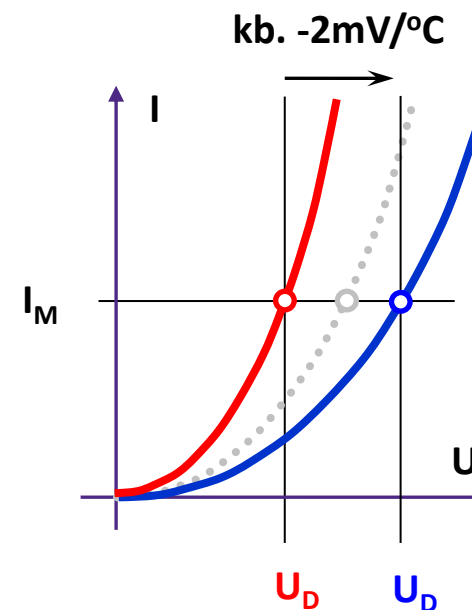
Hőmérséklet érzékelés

- 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
 - Folyadékhőmérő, 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
- **Félvezető, pn átmeneten (diódán) alapuló hőmérséklet mérés**
- **És ami még nem fért fel ide...**

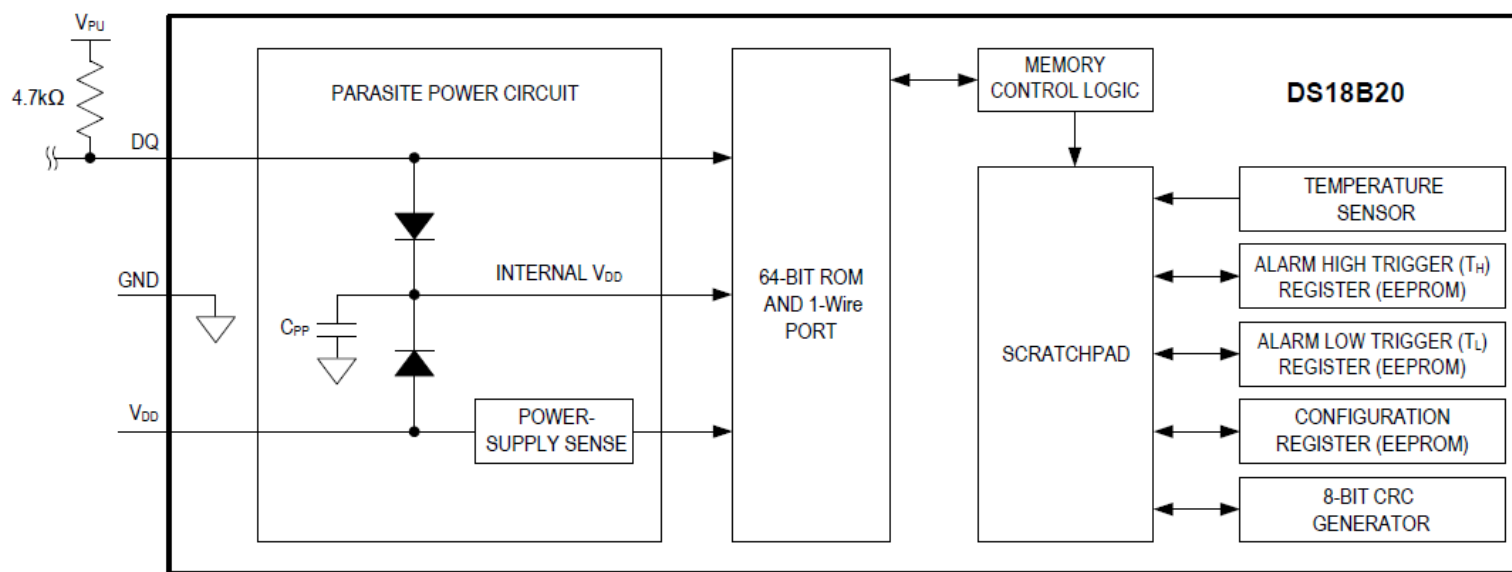
A pn átmenet hőmérsékletfüggése



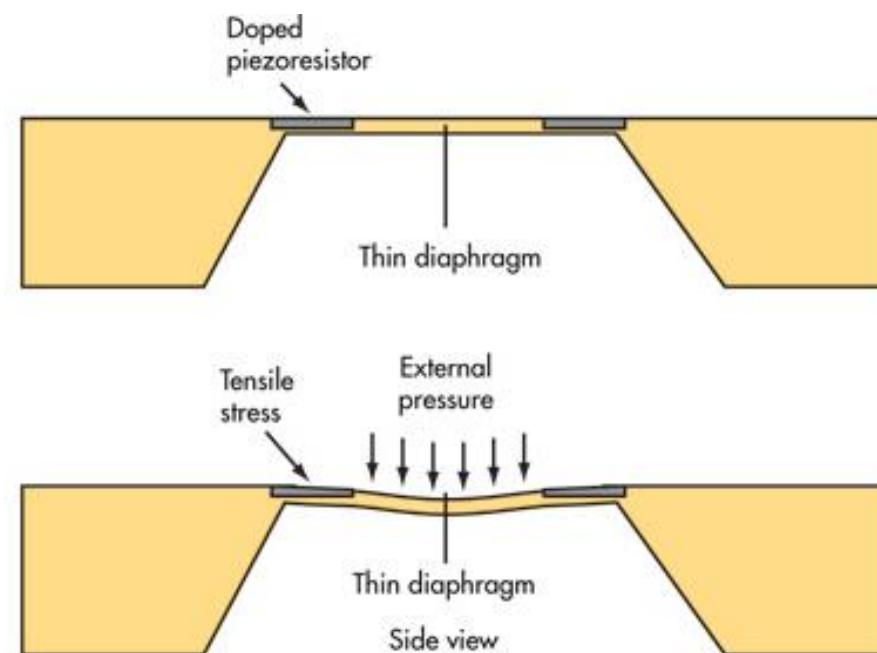
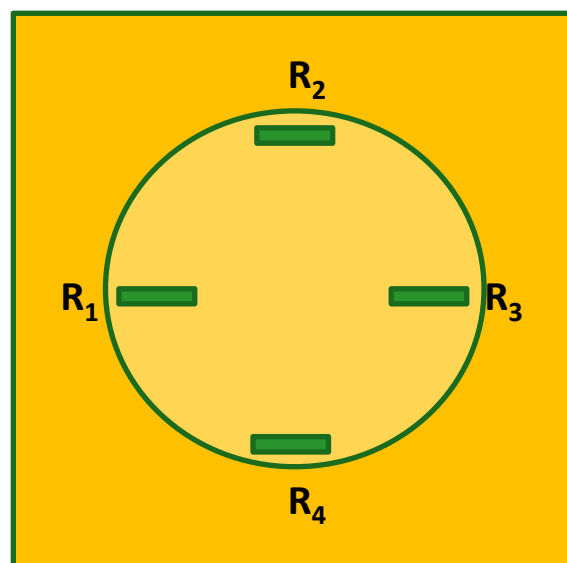
- Adott áram mellett a pn-átmenet feszültsége kb. 2mV-ot csökken 1°C hőmérsékletnövekedés hatására.
- Mivel a szilícium jó hővezető, ez lehetőséget teremt arra, hogy a chip hőmérsékletét közvetlenül mérjük.
 - (az ún. **junction temperature**)
- Széles hőmérséklettartományokban lineárisnak tekinthető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

Dallas DS18B20

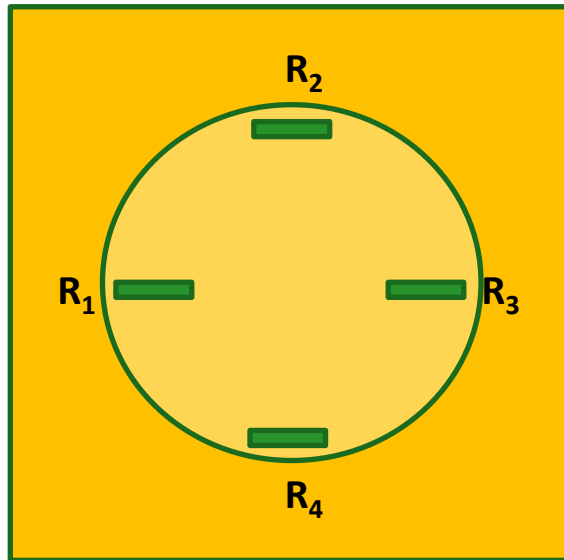
- Pontosság: $0,5^{\circ}\text{C}$
 - Felbontás: 9 vagy 12 bit (konverziós idő vs. pontosság)
 - Drift: $0,2^{\circ}\text{C}$ 1000h alatt
- Busz: 1-Wire
 - Egy adat és egy föld összeköttetést igényel
 - Half-duplex soros kommunikáció, lehetséges a szenzor táplálása adatvonalon keresztül.



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



$$R_1 = R_0 + \Delta R$$

$$R_2 = R_0 - \Delta R$$

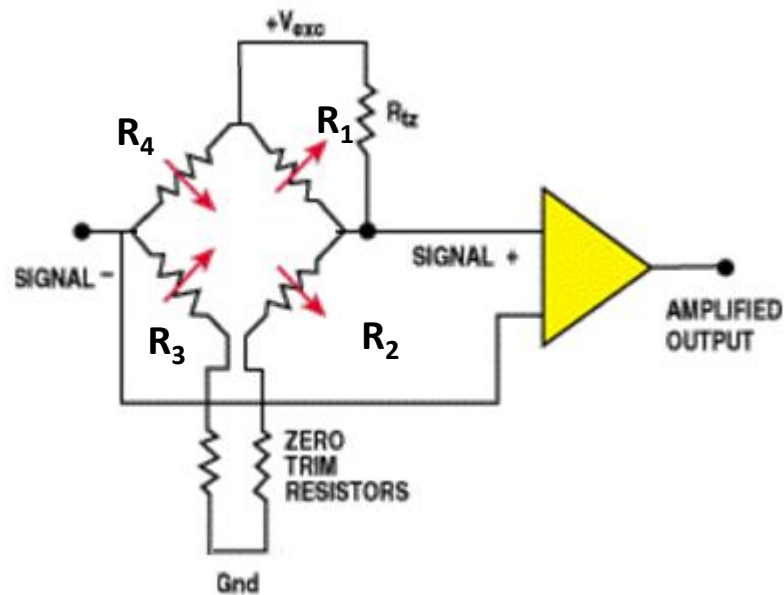
$$R_3 = R_0 + \Delta R$$

$$R_4 = R_0 - \Delta R$$

■ Az ellenállások piezo-rezisztívek

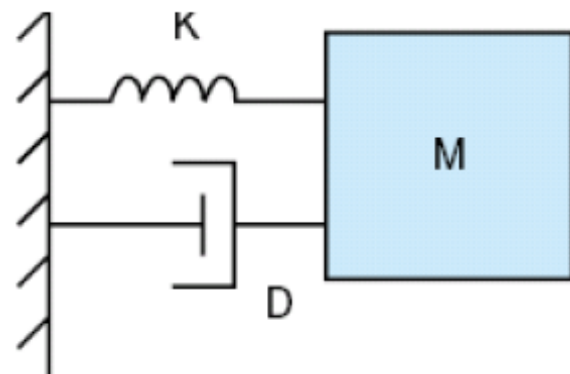
- azaz mechanikai feszültség hatására (nyúlás vagy összenyomódás) az ellenállásuk megváltozik, méghozzá irányfüggően.
- Az ellenállásváltozás függ az orientációtól, a hőmérséklettől és a
- $\Delta R = R_0(1 \pm S(T)p)$
- Mindenféleképpen hőmérséklet-kompenzációt igényel.

$$\begin{aligned} R_1 &= R_0 + \Delta R \\ R_2 &= R_0 - \Delta R \\ R_3 &= R_0 + \Delta R \\ R_4 &= R_0 - \Delta R \end{aligned}$$



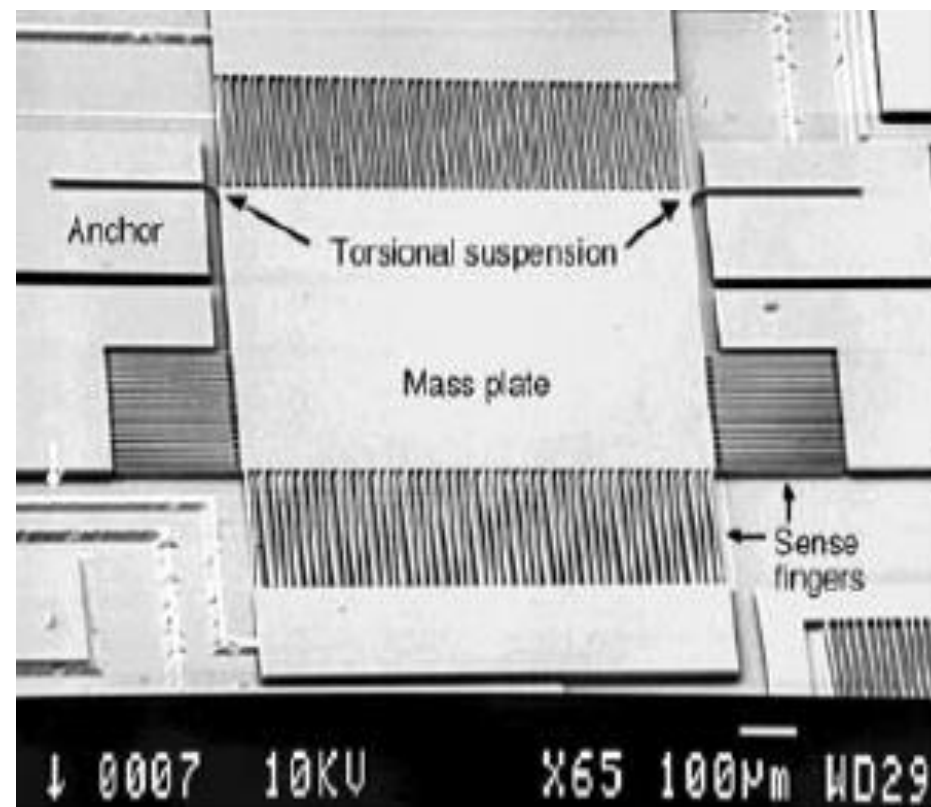
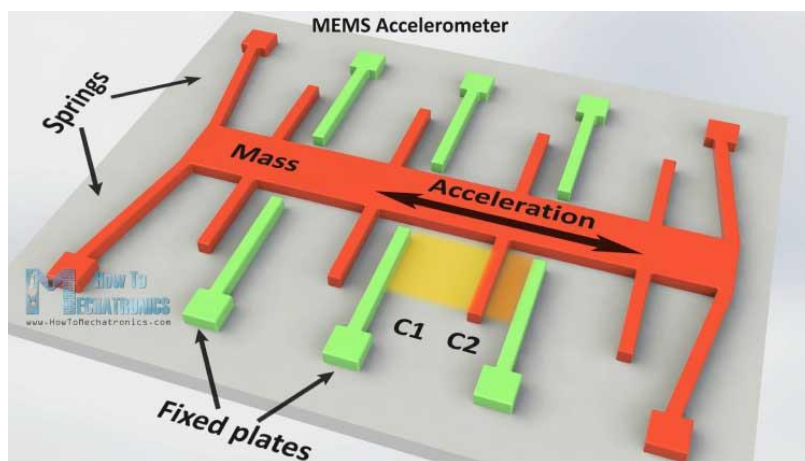
- Kiolvasáshoz a négy ellenállást Wheatstone hídba kapcsolják.
- A mért feszültség: $V_{WB} = V_{EX} \left(\frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{R_3}{R_3+R_4} \right) = -V_{EX} \Delta R / R_0$

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

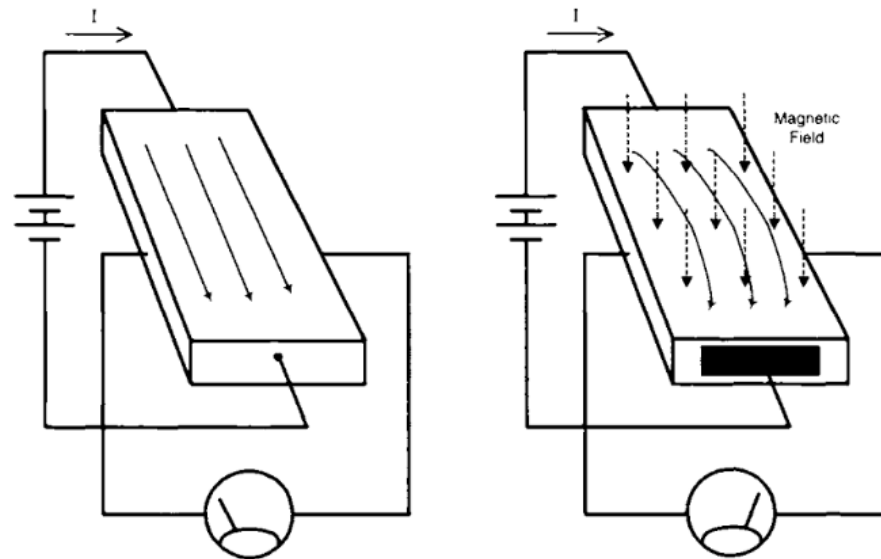
Kiolvasás kapacitív úton



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

Mágneses tér érzékelése

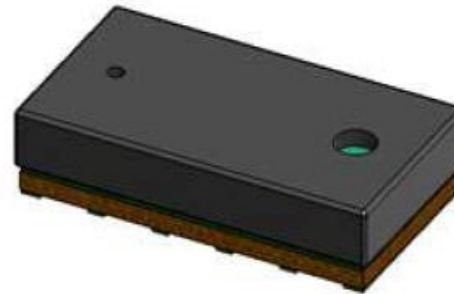
- Magnetorezisztivitás vagy Hall-effektus mérése a tér 3 irányában.
- Hall effektus



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

Közelség érzékelés (proximity)

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





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Képzérelők

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

- η_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

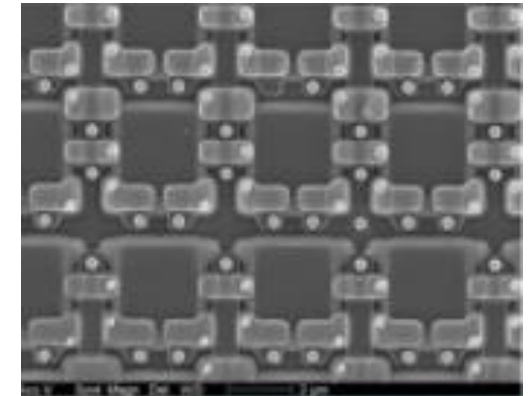
- FF= Aktív pixel terület/Teljes pixel terület
- Minél nagyobb, annál kedvezőbb.
- Mikrolencsékkel javítható ez a tényező

■ Felbontás

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

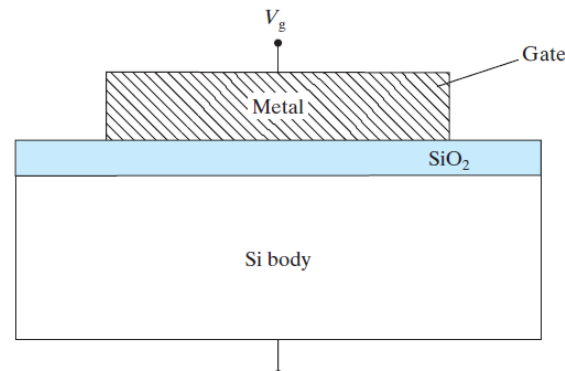
■ Méret:

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

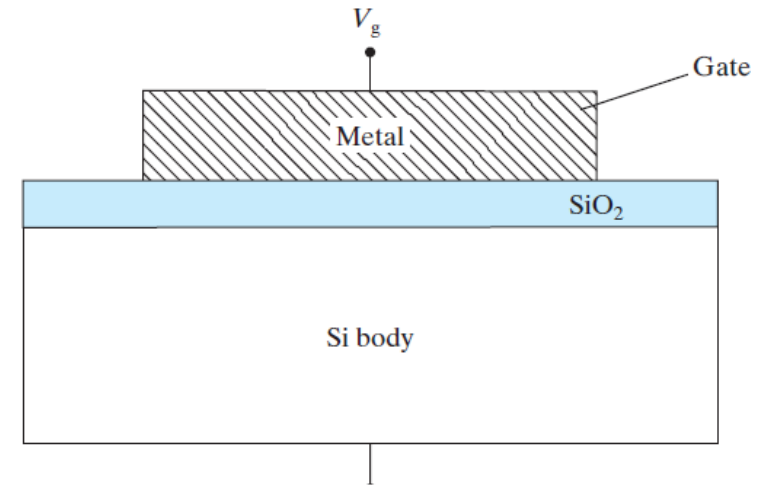


A CCD

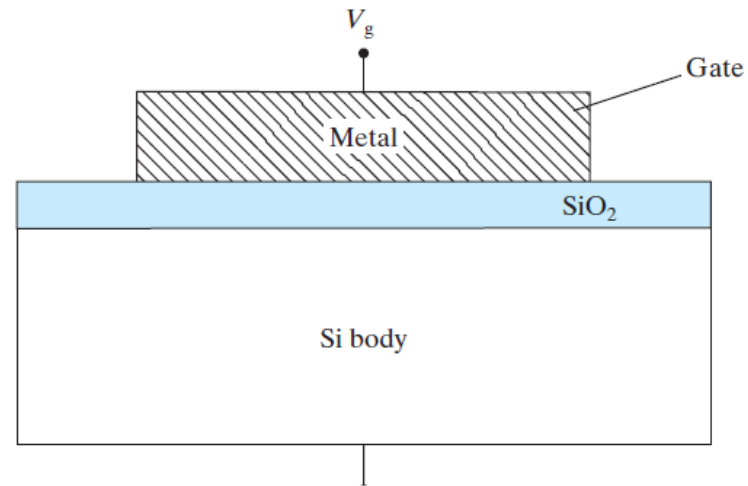
- AT&T Bell Labs, 1969
- Eredetileg nem képérzékelésre szánták, hanem memóriának fejlesztették
- Kodak, 1975 100px × 100px digitális fényképezőgép
- 1976 – 800px × 800px, az első alkalmazása, katonai kéműholdban
- Működése az ún. MOS kapacitáson alapul.



A MOS kapacitás



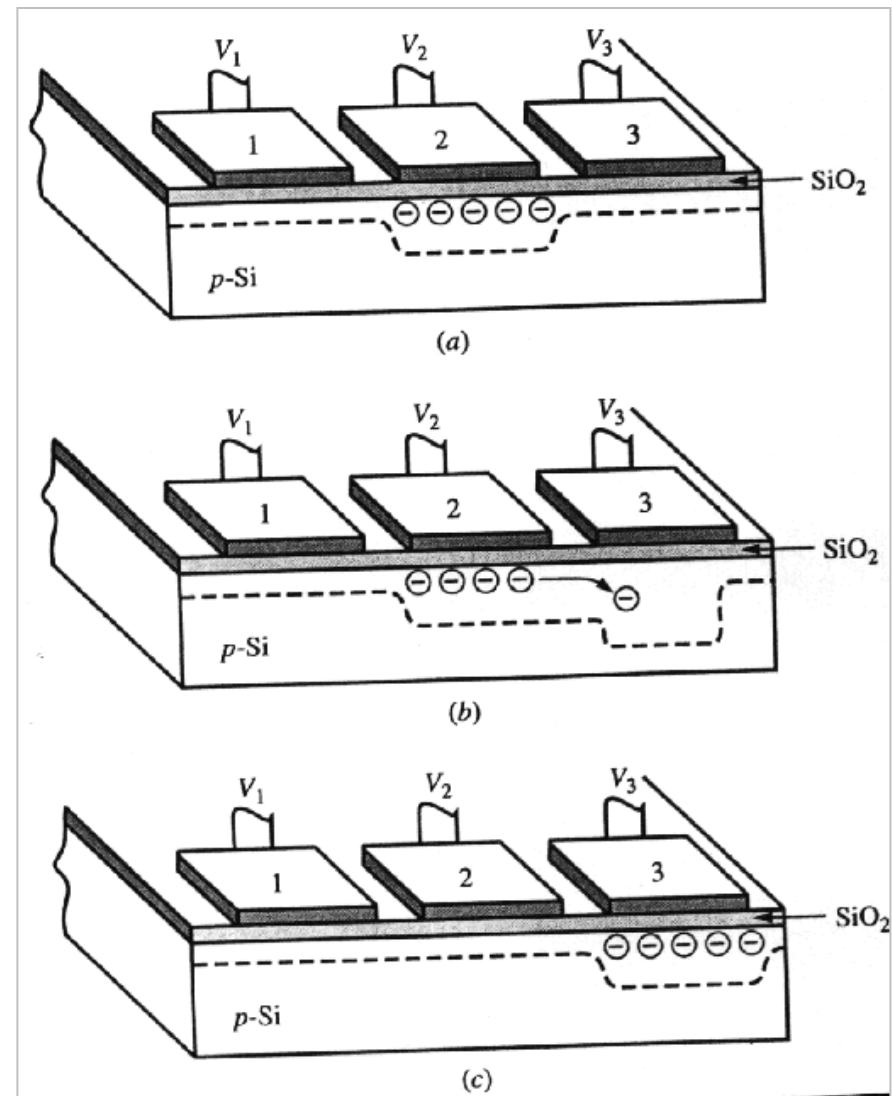
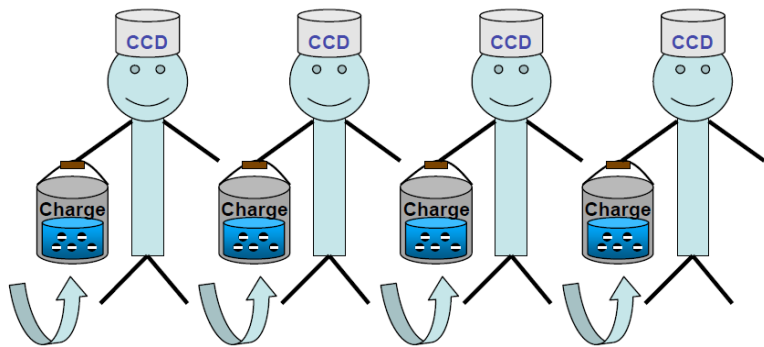
- Látjuk, hogy hasonlít a MOS tranzisztorhoz, de a source és drain elektróda hiányzik.
- Emlékeztető: MOS tranzisztor.
 - Ha a gate-re a küszöb feszültségnél nagyobb feszültséget kapcsolunk, akkor létrejön egy ún. inverziós réteg, egy csatorna a source és a drain között, és a tranzisztor vezet
 - Az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

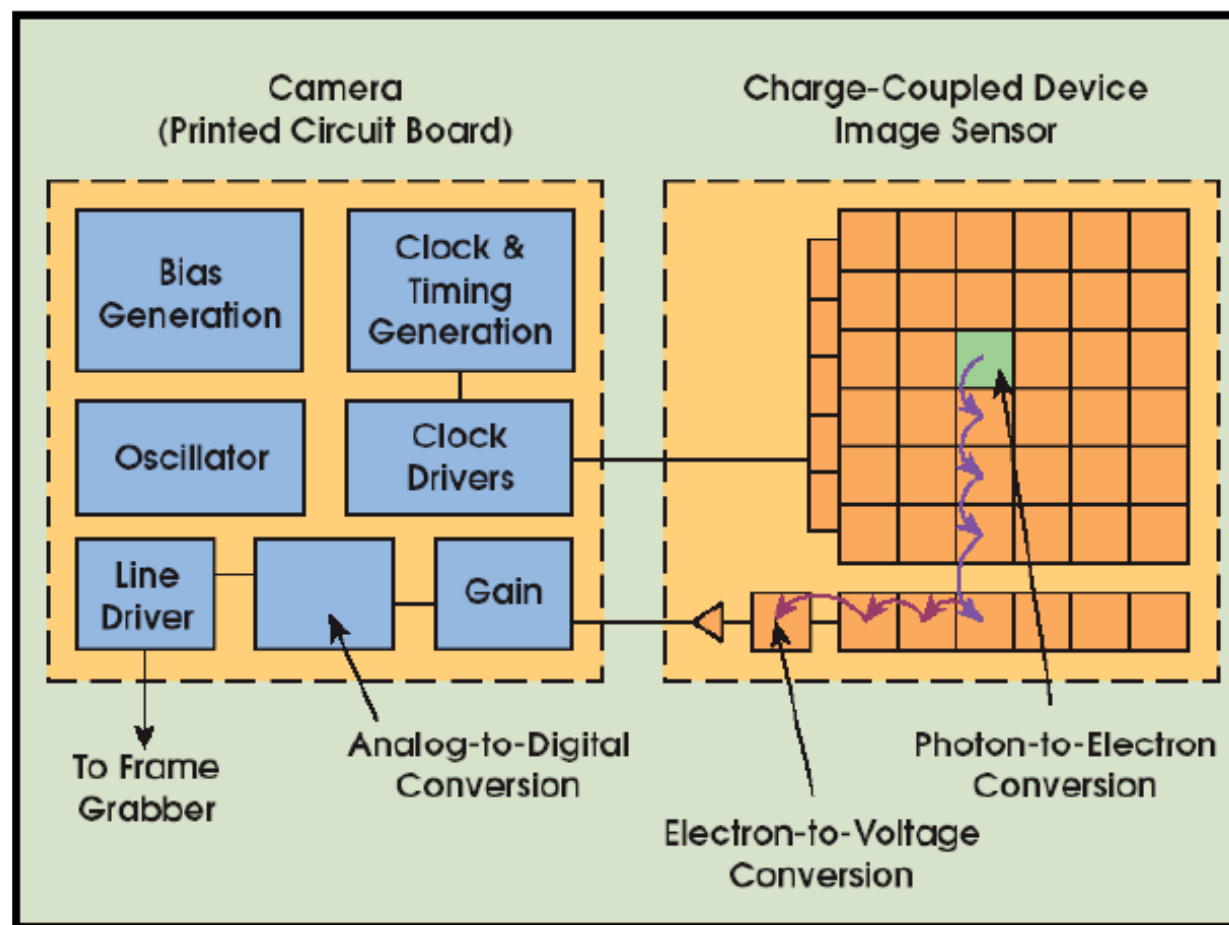


- MOS kapacitás esetén nincs forrás elektróda!
 - A töltéshordozók vagy termikusan generálódnak (ami lassú folyamat, szélsőséges esetben hűtött kristály esetén napok!)
 - Az így keletkezett töltések adják a zajt, az ún. sötétáramot.
 - Vagy **a beeső fény generálja** őket.
 - A keletkezett töltéshordozók 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 hármás jelű kapacitás alá mozdul.
- $V_3 > V_T$, $V_1=V_2=0V$: a töltés a hármás 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 gyártás
 - Túltelítődés (pixel saturation, pixel blooming)
 - Nagy fényerősség esetén a keletkezett töltéshordozó elvándorolnak, így hamis pixel információt kapunk.

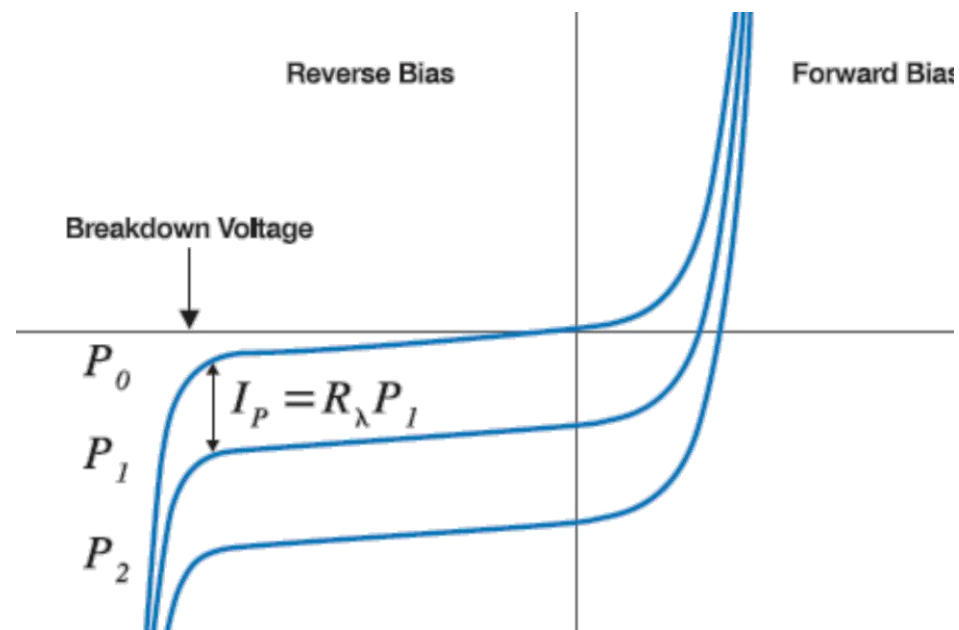




Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

CMOS (APS) képérzékelő

Érzékelés



- Záróirányú pn átmenet (fotodióda)

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

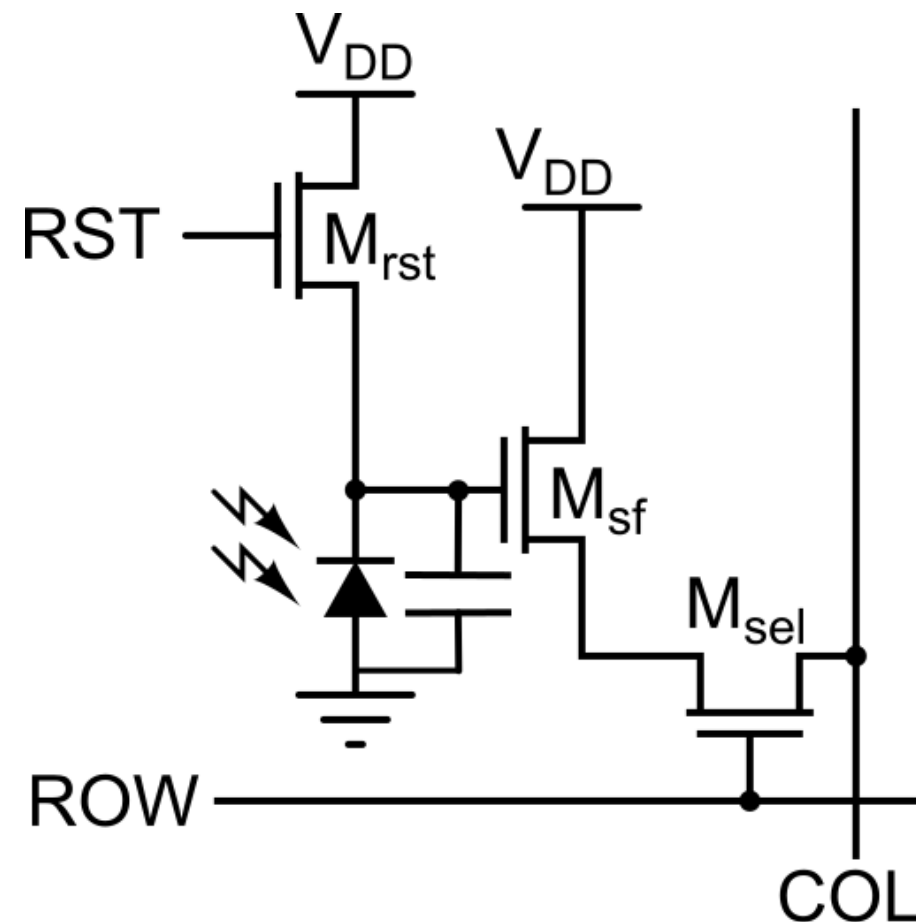
- Megvilágítás hatása

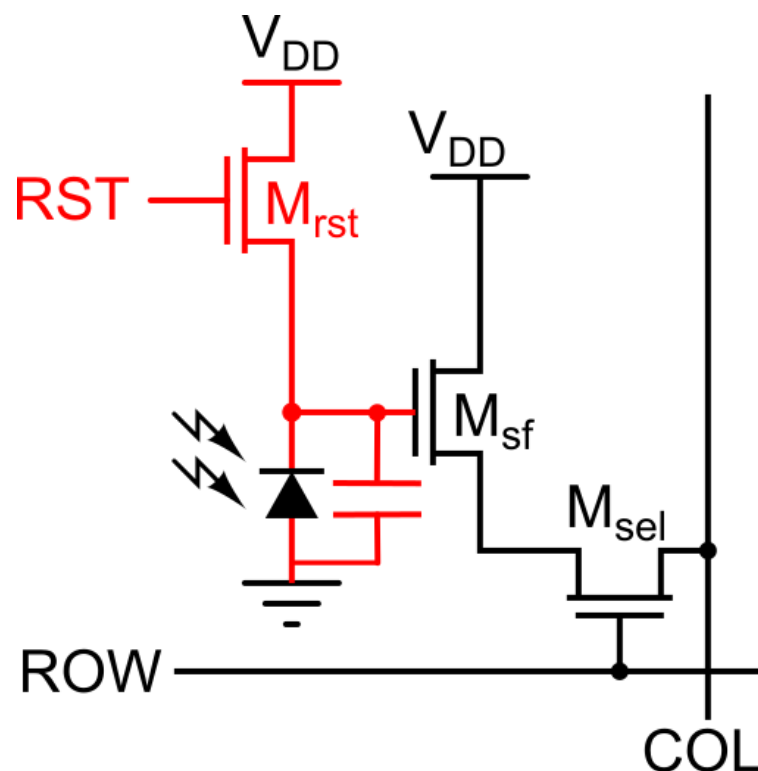
- A generálódó töltéshordozókat az elektromos tér elválasztja egymástól, így a megvilágítással egyenesen arányos áram keletkezik, ez az ún. fotoáram

A fotoáram

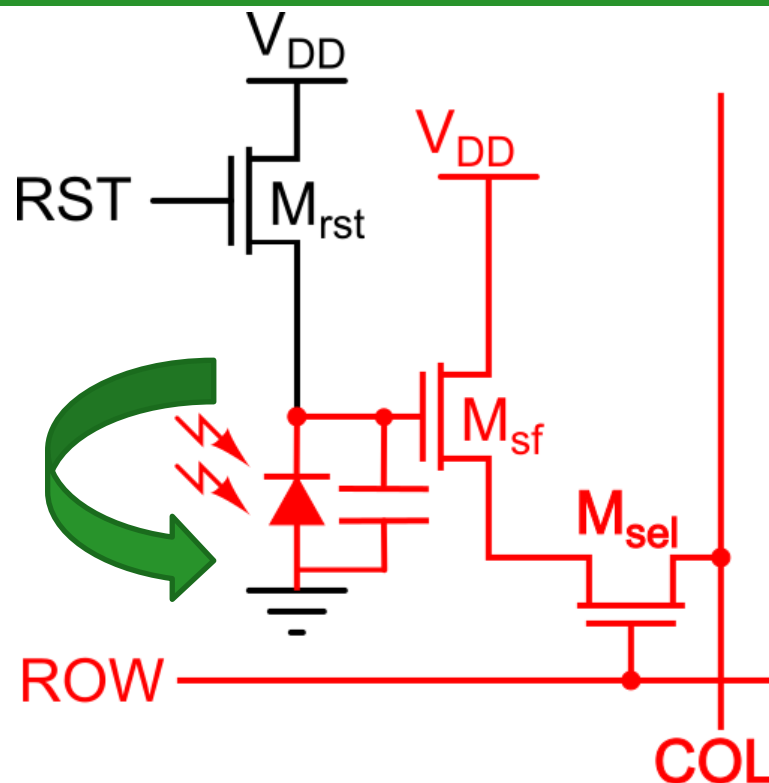
- A pn átmenet árama tehát:
 - $|I| \approx I_0 + I_P$
 - Azaz a **sötétáram** és a generált fotoáram összege.
 - A sötétáram nem részletezett jelenségek miatt több, mint az elméletileg számítható, de a fotoáramnál nagyságrendekkel kisebb az érzékelőben.
- A fotoáram függ
 - A fény (sugárzás) spektrális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

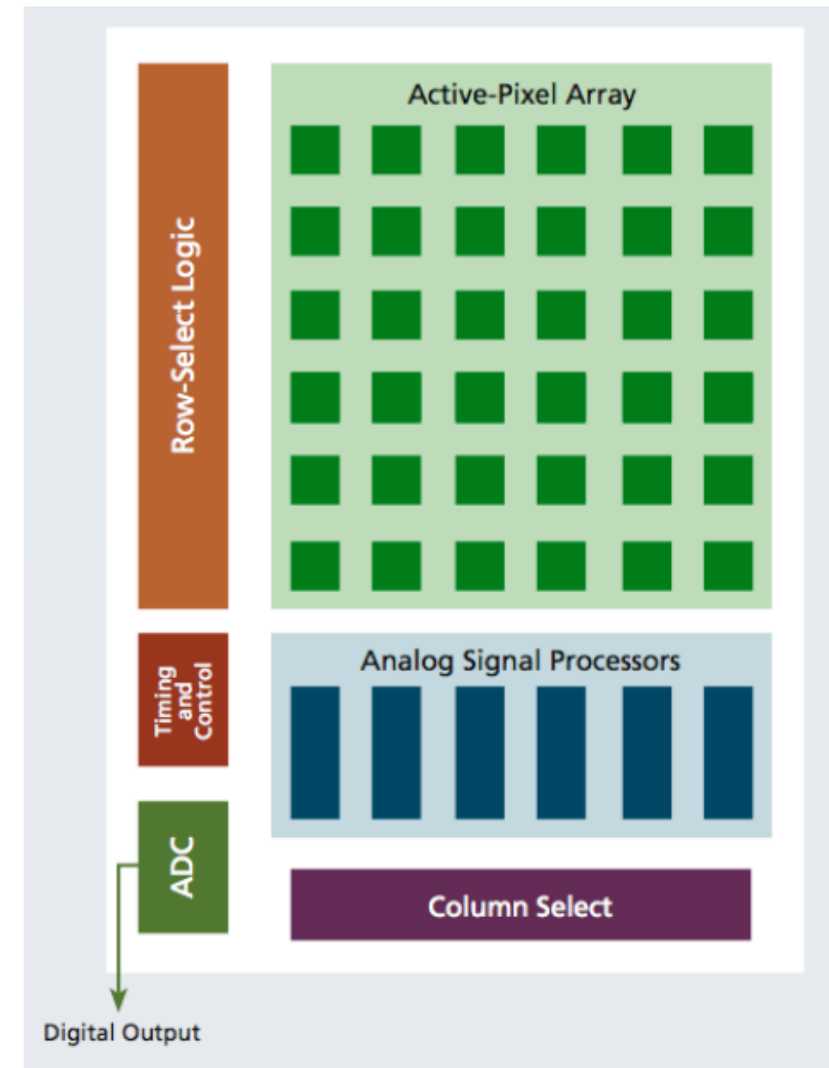


- Aktiváljuk a sort, ROW=1, RST=0
- A szórt kapacitást a fény által generált fotoáram süti ki, a feszültsége annál jobban csökken, minél nagyobb intenzitású a megvilágítás
- Az M_{sel} tranzisztor az oszlop vonalra kapcsolja az M_{sf} tranzisztort
- Az M_{sf} tranzisztor erősítő!
 - Mivel a gate-source 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 és a FF növelését



Képzékelők összehasonlítása

■ CCD

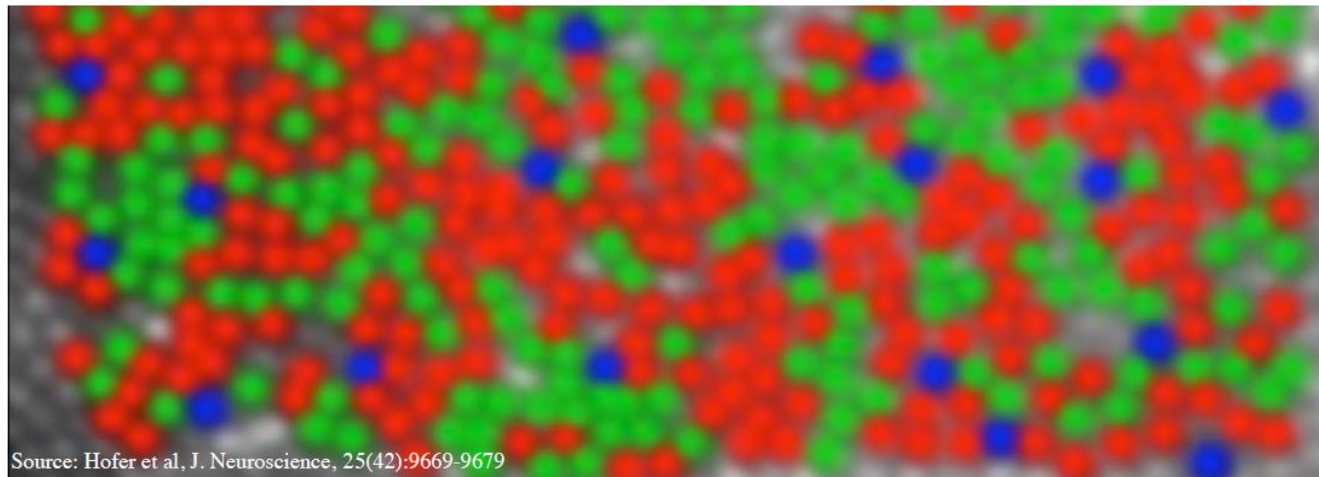
- Speciális gyártást igények, nehezen integrálható össze a feldolgozó elektronikával
- **Nagy kvantumhatásfok, fill factor és kis zaj**
- A kiolvasás nem véletlen elérésű és lassú
- Több, viszonylag nagy feszültségre van szükség.

■ 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...)

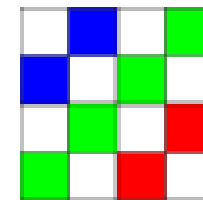
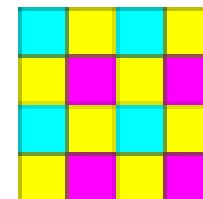
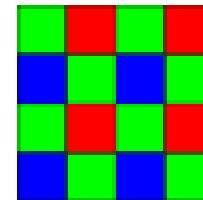
Színérzékelés

- 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!



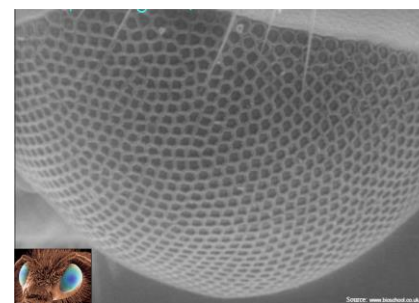
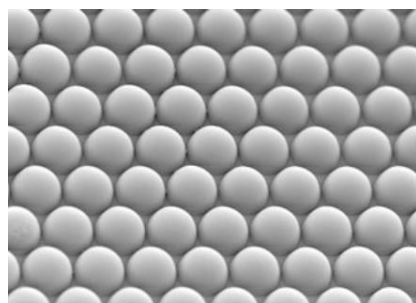
Source: Hofer et al, J. Neuroscience, 25(42):9669-9679

- 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

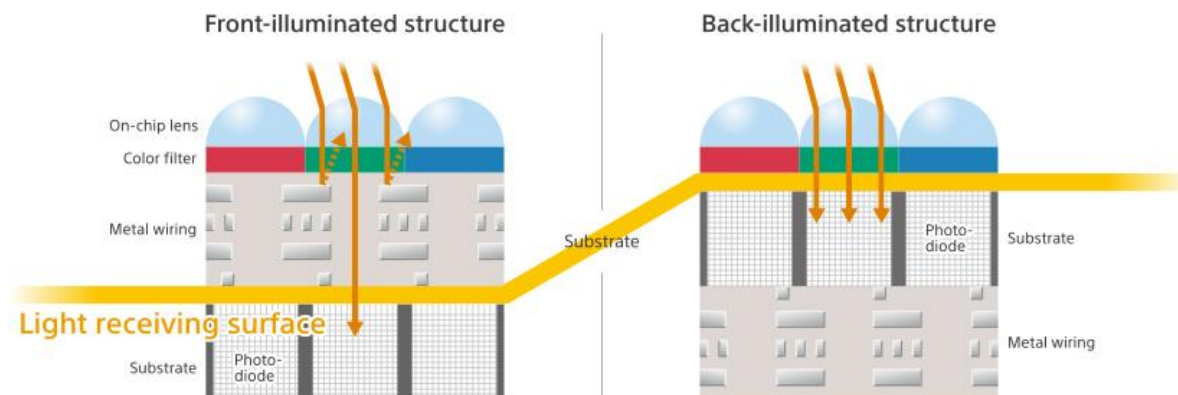


Az érzékenység javítása

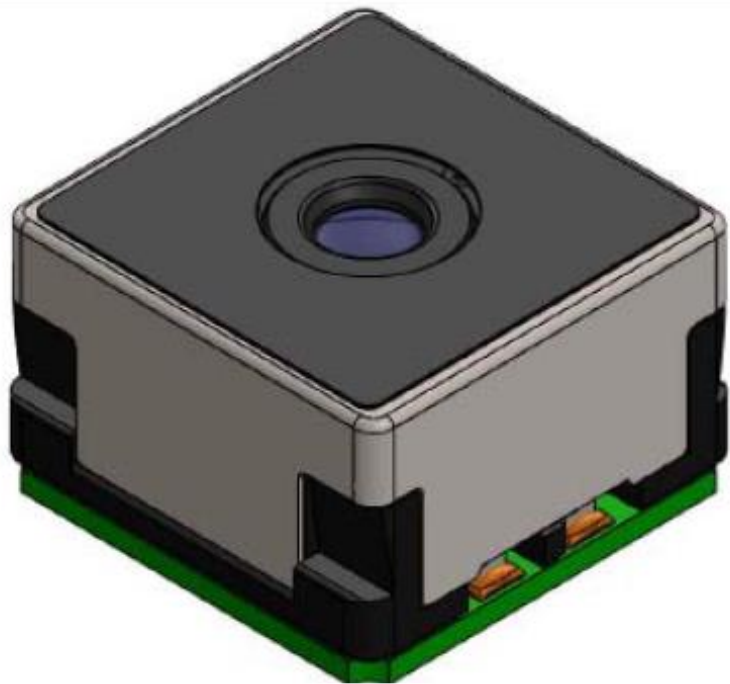
- Mikrolencsék: ötlet: a rovarok összetett szeme
- A fotoérzékelő felett egy mikrolencse megnöveli a hatásfokot.



- Hátsó megvilágítás (back illumination)



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 μm x 1.4 μm |
| 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

Források, ajánlott irodalom, érdekességek

- [BMP 280 szenzor](#) adatlapja
- [DS18B20](#) adatlap
- [VB6955CM](#) adatlap
- [Sony Semiconductor Solutions](#) érdemes átnézni a technológiáról szóló részt.