

# ÉRZÉKELŐK I

Dr. Pődör Bálint

Óbudai Egyetem KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet

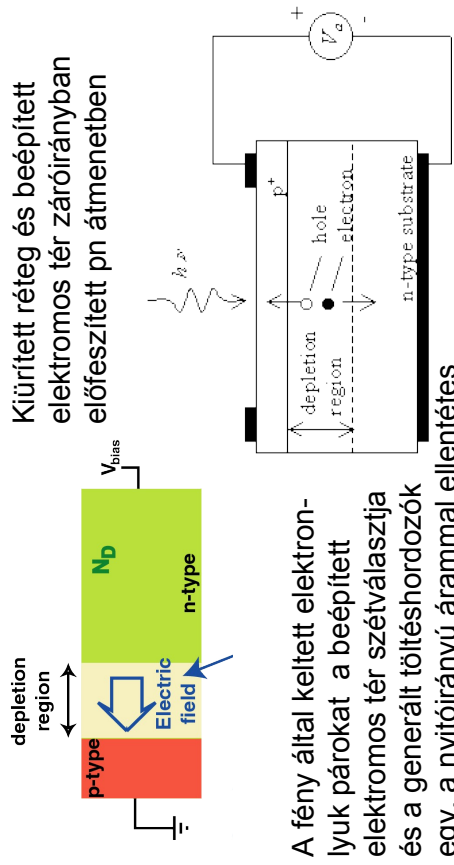
## 7. ELŐADÁS: OPTIKAI SUGÁRZÁSÉRZÉKELŐK II.



2010/2011 tanév 2. félév

1

### A FOTOÁRAM GENERÁLÁSI MECHANIZMUSA



A fény által keltett elektron-lyuk párokat a beépített elektromos tér szétválasztja és a generált töltéshordozók egy, a nyitóirányú árammal ellentétes irányú áramot hoznak létre.

Kiürített réteg és beépített elektromos tér zároirányban előfeszített pn átmenetben

3

## 5. ELŐADÁS

1. A megvilágított pn átmenet átmenet tulajdonságai

2. Fotodiódák

3. PIN fotodiódák

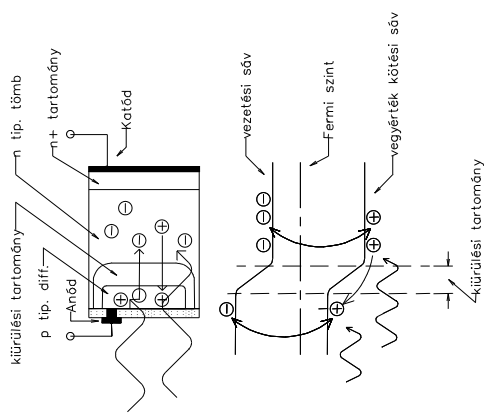
4. Lavina fotodiódák

5. Fototranzisztorok



2

### ELEKTRON-FOLYAMATOK A MEGVILÁGÍTOTT PN ÁTMENETBEN

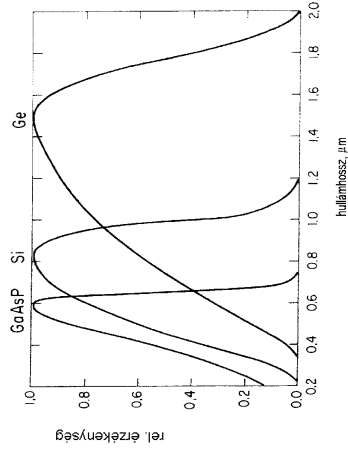


4

## FÉNYELEM/FOTODIÓDA

**Fényelem**  
külső tápforrás  
nélkül működik

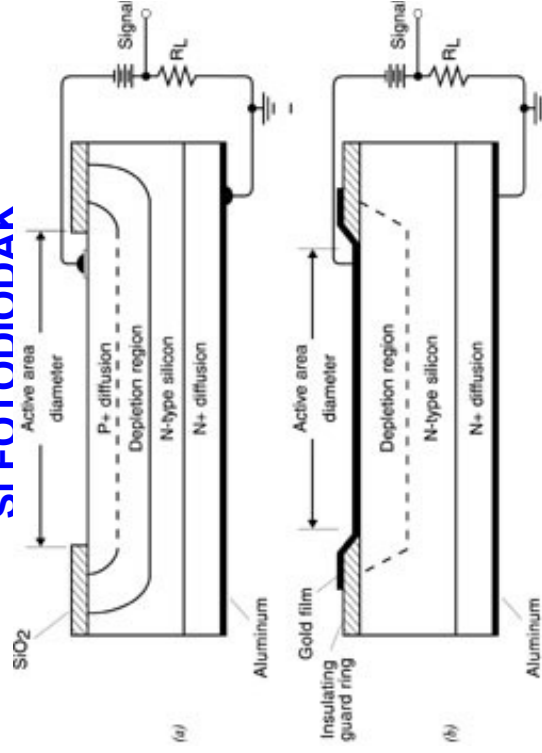
**Fotodióda**  
külső tápforrással  
működik



Félvezetők fényelem/fotodióda készítéséhez

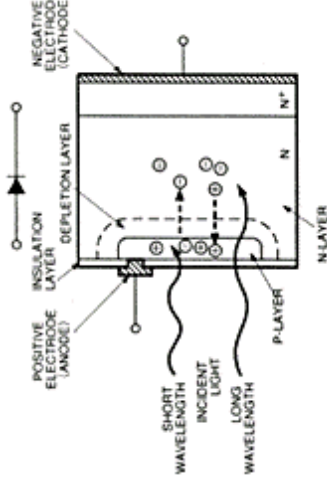
5

## PN- ÉS FÉM-FÉLVezető (SCHOTTKY-) Si FOTODIÓDÁK



7

## PN ÁTMEENETES FOTODIÓDA



pn-átmenetes fotodióda felépítése. A fény által keltett elektron-lyuk párok a kiüritett réteg elektromos terében szétválnak, az elektronok a katód (n+) a lyukak az anód (p) felé sodródnak. <sup>6</sup>

## A FOTODIÓDA

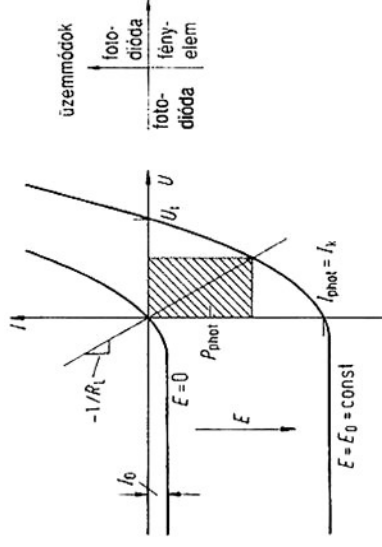
A fotodiódák, és az egykristályos napelemek lényegében pn-átmenetes eszközök. Fény hatására bennük fotoáram generálódik, mely hozzáadódik az ismert összefüggésekkel leírható diódaáramhoz

$$I = I_s \left( \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right) - I_{ph}$$

Az  $I_{ph}$  fotoáramot a keltett elektronok és lyukak hozták létre. A kiüritett rétegbe beépített elektromos tér az elektronokat az n-típusú, a lyukakat a p-típusú tartomány felé sodorja.

8

## MEGVILÁGÍTOTT PN-ÁTMENET ÁRAM-FESZÜLTÉSÉGI KARAKTERISZTIKÁJA



$I_{phot}$  rövidzárási fotóáram  $I_0$  Shockley-féle telítési áram  
 $U_i$  üresjárási fotofeszültség  $E, E_0$  besugárzás erőssége  
 $P_{phot}$  fototeljesítmény  $W/m^2$ -ben vagy megvilágítás erőssége lux-ban

9

## RÖVIDZÁRÁSI (FOTO-) ÁRAM

Megvilágítva a többletáram  $-I_{ph}$ , és az  $I - U$  karakterisztika

$$I = I_s \left( \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right) - I_{ph}$$

A pn átmenet rövidzárási árama ( $U = 0$ , fotóáram),  $I_{sc} = -I_{ph}$

A megvilágított pn átmenet (és így a fotodióda) rövidzárási árama a fotoárammal egyenlő, és így arányos a fényteljesítménnyel.

11

## PN ÁTMENET ÁRAM-FESZÜLTÉGI KARAKTERISZTIKÁJA

Az ideális pn átmenet áram-feszültség karakterisztikája (megvilágítás nélkül)

$$I = I_s \left( \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right)$$

$$I_s = A(j_p + j_n) = A \left( \frac{qD_p p_n}{L_p} + \frac{qD_n n_p}{L_n} \right)$$

$D$  - diffúziós állandó,  $L$  - diffúziós hossz,  $A$  - keresztmetszet.  
 $A$  telítési áram a kisebbségi töltéshordozók (n-oldalon lyukak, p oldalon elektronok diffúziós árama (**Shockley egyenlet**)).

10

## ÜRESJÁRÁSI (FOTO-) FESZÜLTÉSÉGI

Megvilágítva a többletáram  $-I_{ph}$ , és az  $I - U$  karakterisztika

$$I = I_s \left( \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right) - I_{ph}$$

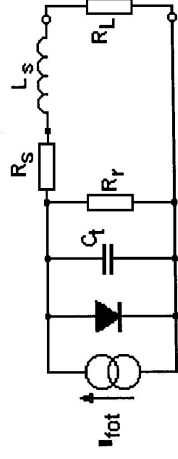
Az üresjárási feszültség ( $I = 0$ , fotofeszültség)  $U_{oc}$

$$U_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left( 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \approx \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} \right)$$

A megvilágított pn átmenet (és így a fotodióda) üresjárási feszültsége (fotofeszültség) legalább is erős megalapításkor, logaritmikusan függ a fényintenzitástól.

12

## FOTODIÓDA HELYETTESÍTŐ KÉPE

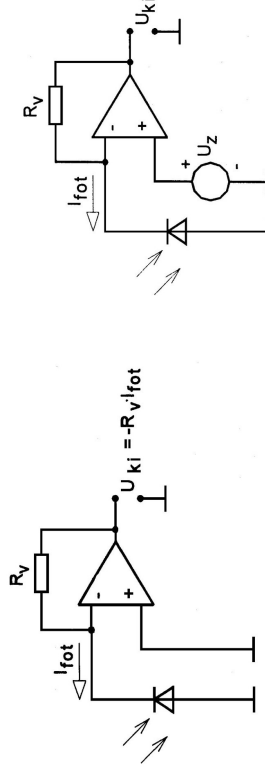


dióda – ideális dióda, áramgenerátor – fotoáram, kondenzátor – pn-átmenet kapacitása záróirányban, párhuzamos ellenállás – szivárgás, stb., soros ellenállás – felvezető chip nem kiürített tartománya, induktivitás – hozzávezetések

$R_{shunt}$  100 kom – 1 Gohm,  $R_{series}$  10 -500 ohm

13

## FOTOÁRAM MÉRÉSE



Fotodióda áram-feszültség átalakítása előfeszítés nélküli (rövidzár) illetve előfeszítéses üzemmódban.

14

## PIN DIÓDA

Introduction to p-i-n Diodes



• primary transport by diffusion

$$J = -q\Delta G (L_n + L_p)$$

• slow carrier movement by diffusion

• small depletion width - high capacitance

$$C_j = \frac{\epsilon A}{x_p + x_n}$$

• can't change bandgap to reduce parasitic absorption



• primary transport by drift

$$J = -q(1 - R) \left( \frac{P_0}{Ah\nu} \right) (1 - e^{-\alpha W})$$

• low capacitance

$$C_j = \frac{\epsilon A}{x_p + x_n + W}$$

• can engineer bandgap so absorption is only in depletion region

5

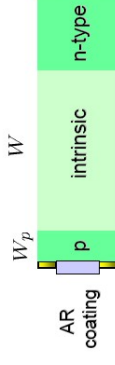
## PIN DIÓDA

Photodetector Quantum Efficiency

$$\eta = \frac{J/q}{P_0/(Ah\nu)} = (1 - R) (1 - e^{-\alpha W})$$

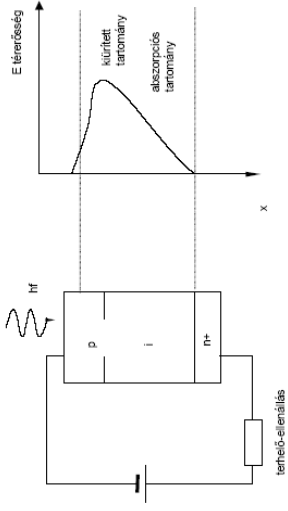
Design for high quantum efficiency:

- Long intrinsic absorbing region  $W > \frac{1}{\alpha}$
- Low reflectivity surface  $R \approx 0$
- Small doped p-region  $W_p \ll \frac{1}{\alpha}$



16

## PIN FOTODIÓDA



i-tartomány (közel "intrinsic"): alacsony adalékolású

A pn átmenet drift áram lesz domináns a diffúziós áram felett (nincs torzulás, diszperzió).

Vastagabb elnyelőréteg –  $\eta$  és  $R$  megnő, de a válaszidő (futási idő) lecsökken.

17

## PIN FOTÓDIÓDA ÉRZÉKENYSÉGE

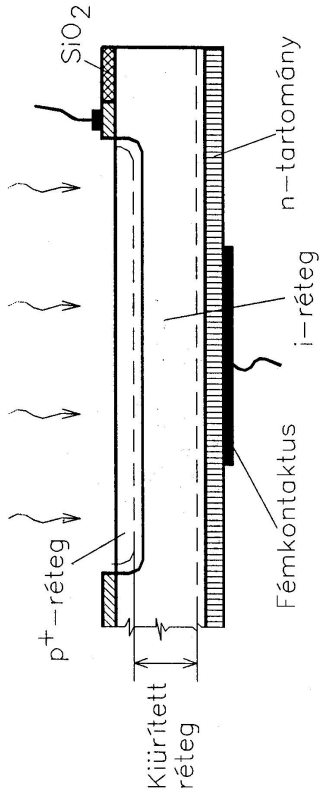
Mekkora egy PIN fotodióda érzékenysége az  $1,3 \mu\text{m}$  és  $1,55 \mu\text{m}$  távközlési hullámhosszakon, ha a kvantum-hatásfok  $80\%$  ?

$$R = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta \lambda [\mu\text{m}]}{1,24} [A/W]$$

$R = 0,84 A/W$ , illetve  $1 A/W$ . Az érzékenység hullámhosszfüggése abból adódik, hogy  $\lambda$  növelésével egyre kisebb energiájú foton kelti az elektron-lyuk párokat.

19

## PIN FOTODIÓDA FELÉPÍTÉSE



18

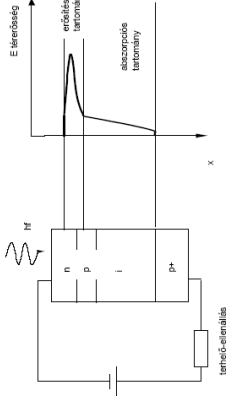
## PIN FOTODIÓDA

Az adott hullámhossztartományt (fotonenergiában kifejezve  $0,8 \text{ eV} - 0,95 \text{ eV}$ ) az InP szubsztrátra rácstorzulás nélkül növeszthető  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  átfogja (levágási hullámhossza kb.  $1,63 \mu\text{m}$ ), ma ez az elfogadott megoldás.

A tiltott sávját tekintve a germánium is megfelelne, de az abból készült diódák zajosak, és más hátrányos tulajdonságai is vannak.

20

## LAVINA FOTÓDIÓDA

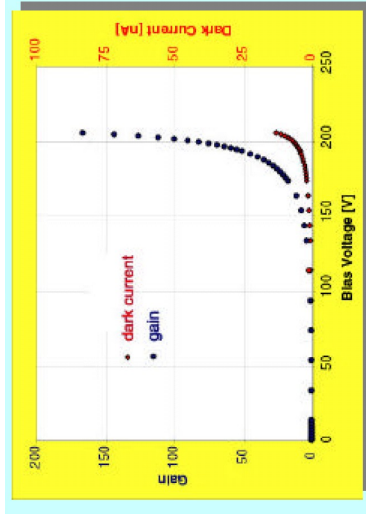


Lavina fotódióda (avalanche photodiode, APD)

Az ütközési ionizáció töltéshordozósokszorozódást hoz létre (erősítés)

21

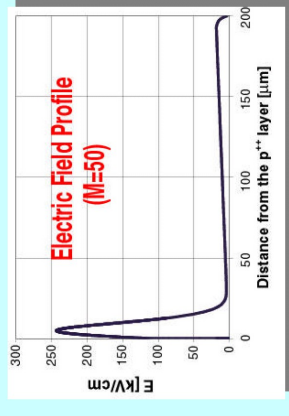
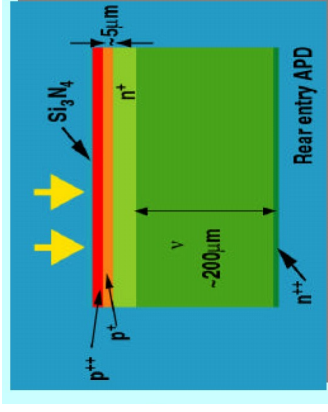
## LAVINA FOTÓDIÓDA



I-U karakterisztika (sötétáram), erősítés (lavinasokszorozási tényező) feszültségfüggése.

23

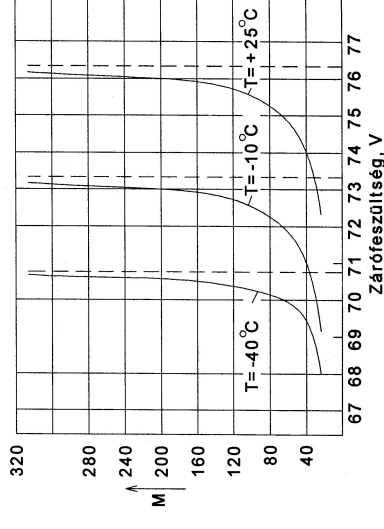
## LAVINA FOTÓDIÓDA



Si lavina fotódióda szerkezete, és az elektromos térerősség eloszlása

22

## LAVINA FOTÓDIÓDA



Si lavinafotódióda multiplikációs tényezője a zárófeszültség függvényében

24

## LAVIASOKSZOROZÁSI TÉNYEZŐ

A lavinasokszorozási (multiplikációs) tényező empirikusan írható le

$$M = \frac{1}{1 - (U/U_b)^n}$$

$U_b$  – letörési feszültség  
 $n \approx 3 \dots 5$

25

## LAVINA FOTODIÓDA: PÉLDA

Egy 6 A/W érzékenységű lavinadióda,  $10^{10} \text{ sec}^{-1}$  foton-áramot fogad  $1,5 \text{ } \mu\text{m}$ -en. Ha a lavinasokszorozási tényező 10, mekkora a kvantumhatásfok, és mekkora a fotoáram?

A belső erősítés megnöveli az érzékenységet, ezt figyelembe kell venni a kvantumhatásfok kiszámításánál:

$$R = M (\eta q / hf) = M (\eta \lambda [\text{ } \mu\text{m}] / 1,24), \text{ ebből } \eta \oplus 50 \% \text{ adódik.}$$

A fotoáram

$$I_{\text{fot}} = R P_{\text{opt}} = R n h (c/\lambda) =$$

$$6 \times 10^{10} \times 6,626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / 1,5 \times 10^{-6} = 7,95 \times 10^{-9} \text{ A}$$

26

## PIN ÉS APD FOTÓDIÓDÁK

	Válaszidő [ns]	Hullámhossz [nm]	Maximális érzékenység hullámhossza [nm]	Erzékenység [A/W]	Sötétáram [nA]
Si-PIN	<0.5	300-1100	800	0.5	1
Ge-PIN	<0.1	500-1850	1550	0.7	200
InGaAs-PIN	<0.3	900-1700	1700	0.6	10
Si-APD (m=150)	<0.5	300-1100	800	75	15
Ge-APD (m=50)	<1	500-1850	1550	35	700
InGaAs-APD (m=50)	<0.25	900-1700	1700	12	100

27

## FOTOTRANZISZTOR

Szerkezetileg a fototranzisztor egy npn vagy pnp tranzisztorhoz hasonló, és egy beépített abiak biztosítja a fény behatolását az emitter rétegen keresztül a bázisba. A kollektor-bázis dióda fotoárama a tranzisztorhatás révén felerősödve jelentkezik mint kollektoráram

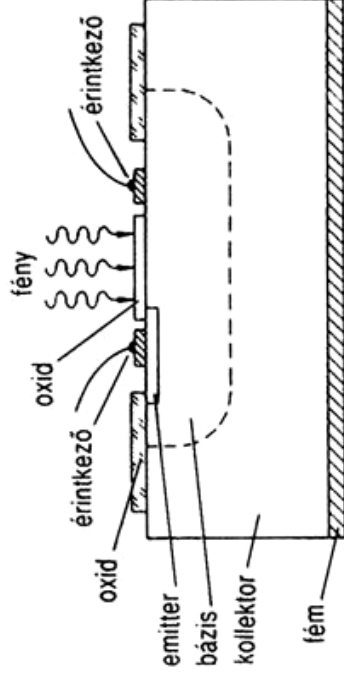
$$I_{\text{foto}}(\text{CE}) = (1 + \beta) I_{\text{foto}}(\text{BC}) = (1 + \beta) R P_{\text{opt}}$$

R - a kollektor-bázis dióda fotoérzékenysége.

Az eszköz úgy működik, mint egy közös emitteres erősítő, ahol a bázisáramnak a fotoáram felel meg.

28

## SI FOTOTRANZISZTOR FELÉPÍTÉSE



A nagyfelületű kollektor-bázis átmenetiben mint fotodiódában fotoáram generálódik, melyet a tranzisztor hatás felerősít

29

## FOTOTRANZISZTOR

Foto-Darlington: többzseres áramerősítés, de tovább romlik a linearitás.

Frekvenciament: nagy bázis-kollektor kapacitás a meghatározó.

Fototranzisztor: néhány  $\mu\text{sec}$

Foto-Darlington: néhány sor 10  $\mu\text{sec}$   
(Fotodióda:  $\sim\text{nsec}$ )

31

## FOTOTRANZISZTOR

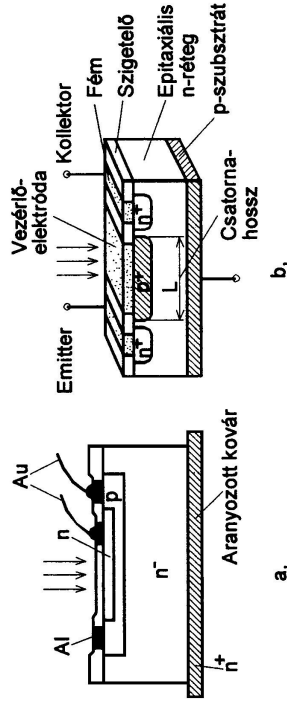
A fototranzisztor működése csak szűkebb megvilágítás-tartományban lineáris amiatt hogy a  $\beta$  áramerősítési tényező szintfüggő, mind a kisebb mind a nagyobb megvilágítási tartományokban (kollektoráramnál) lecsökken.

Sok esetben nincs is szükség lineáris jelleggörbére, mert a sötét-világos érzékelése között több nagyságrendi különbség van, közbülső finom átmenet nincs. Ilyenek a digitális leolvasók, jelenlét-érzékelők, fénysorompók, fordulatszám-érzékelők, stb.

Foto-Darlington: többzseres áramerősítés, de tovább romlik a linearitás.

30

## FOTOTRANZISZTOROK FELÉPÍTÉSE



a. Planár diffúziós technikával készített fototranzisztor metszete. A tokon ablakot nyitnak, melyet síküveggel, lencsével, vagy műanyagfedéssel látnak el.

b. Foto-FET felépítése

32



## FOTO-FET

A foto FET lényegében egy fotodióda és egy nagy bemeneti impedanciájú erősítő integrált megvalósításának tekinthető. A megvilágítás a vezérlő- (gate-) elektródán keresztül történik. Az így keletkezett fotoáram hozzáadódik a forrás (S) és a nyelő (D) közötti áramhoz. A vezérlő elektróda feszültségét úgy kell beállítani, hogy a foto-FET sötétben zárjon.

Előnyök: működése lineáris, és a linearitás független a szinttől.

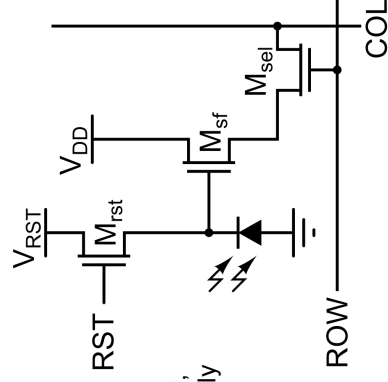
Általában integrált formában (foto-FET hálózatok és mátrixok) készülnek (pl. CMOS képfelvevők).

33

## APS PIXEL

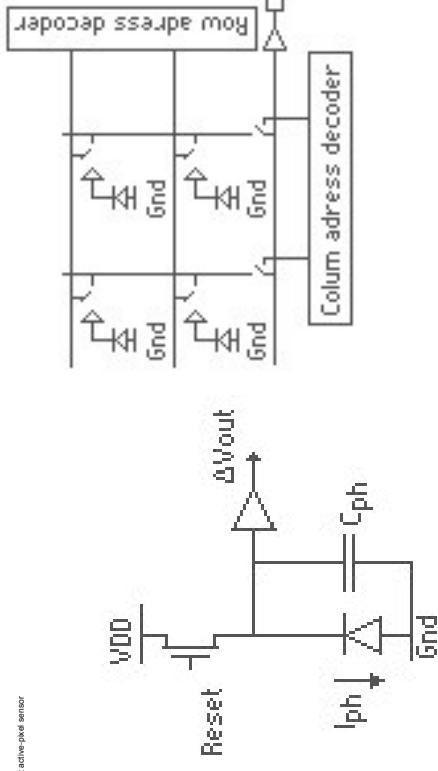
The 3T CMOS APS pixel comprises a photo diode and three MOSFETs. The reset transistor,  $M_{rst}$ , acts as a switch to reset the floating diffusion which acts in this case as the photo diode. When it is turned on, the photodiode is connected to the power supply,  $V_{RST}$ , clearing all integrated charge.

The read-out transistor,  $M_{sf}$ , acts as a buffer amplifier (source follower), allowing the pixel voltage to be observed without removing the accumulated charge. Its power supply,  $V_{DD}$ , is typically tied to the power supply of the reset transistor. The select transistor,  $M_{sel}$ , allows a single row of the pixel array to be read by the read-out electronics.



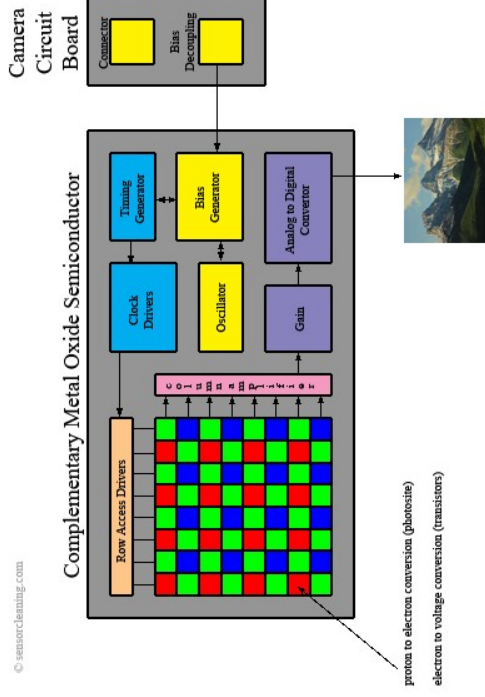
## CMOS LIGHT/IMAGE SENSORS

APS: active pixel sensor



34/10

## APS/CMOS SENSOR: CIRCUITRY



photon to electron conversion (photodiode)  
electron to voltage conversion (transistors)

\_6

## FOTODETEKTOROK ERŐSÍTÉSE ÉS VÁLASZIDEJE

Fotodetektor	Erősítés	Válaszidő sec	Működési hő- mérséklet, K
Fotoellenállás	1-10 <sup>6</sup>	10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-8</sup> , 2-300	
PN dióda	1	10 <sup>-11</sup>	300
PIN dióda	1	10 <sup>-8</sup> -10 <sup>-11</sup>	300
Fém-félvezető dióda	1	10 <sup>-11</sup>	300
Lavina fotodióda	10 <sup>2</sup> -10 <sup>4</sup>	10 <sup>-10</sup>	300
Bipoláris fototranzisztor	10 <sup>2</sup>	10 <sup>-8</sup>	300
Térvérelésű fototranzisztor	10 <sup>2</sup>	10 <sup>-7</sup>	300

37

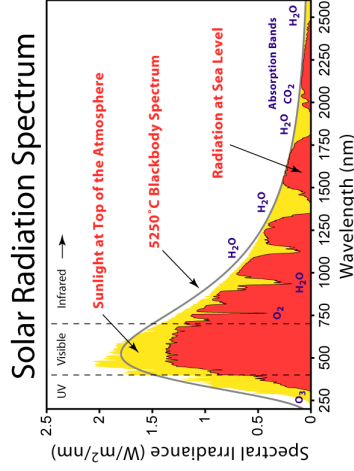
## NAPELEM

A napelem fizikai működését tekintve lényegében egy nagy felületű pn-átmenetes fotodióda, mely az áram-feszültség karakterisztika negyedik negyedében (generátoros üzem) működik. A működési mechanizmus a és a fotovoltaiikus hatáson alapul.

A napelemet a napfény világítja meg, és az a rendeltetése hogy a nap (sugárzás) energiáját közvetlenül elektromos energiává alakítsa át.

38

## A NAP SUGÁRZÁSI SPECTRUMA



A nap sugárzása széles spektrumú EM sugárzás, mely egy  $T = 5800$  K hőmérsékletű fekete-testével írható le. A spektrum maximuma  $\lambda = 0,5$   $\mu\text{m}$  hullámhossznál (zöld), illetve az ennek megfelelő  $h\nu = 2,48$  eV energiánál van (Wien-féle eltolódási törvény,  $\lambda_m T = \text{const}$ ). A nap spektrumának jelentős része esik a látható (380-780 m) tartományba.

39

## NAP SUGÁRZÁSA

A napsugárzás átlagos intenzitása a Naptól a Nap-Föld távolságnak megfelelő távolságra, de a Föld légkörén kívüli 1353 W/m<sup>2</sup> (napállandó).

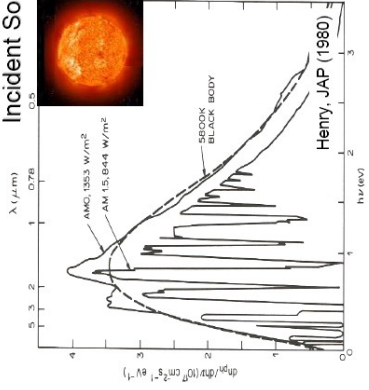
A föld felszínén az atmoszférikus abszorpció és szóródás, valamint a beesési szög függvényében a sugárzási intenzitás jóval kisebb, zeniten lévő Nap és merőleges beesés esetén 925 W/m<sup>2</sup>. Az előző az AM0, az utóbbi az AM1 spektrumnak felel meg (AM: air mass).

Referenciaként gyakran használják az AM1 értékhez közel eső 1000 W/m<sup>2</sup> = 100 mW/cm<sup>2</sup> értéket.

40

## ENERGIA ...

### Incident Solar Radiation



Incident intensity (AM1.5):

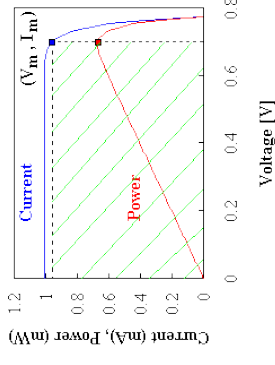
$$844 \text{ W/m}^2 = 5.2 \times 10^{17} \text{ eV/cm}^2/\text{s}$$

(AM1.5 is through atmosphere at 37°)

• The average power incident upon the surface of the Earth from sunlight is ~10,000 times the average global power consumption.

• The average power incident upon the continental United States is ~500 times our national consumption (total energy consumption, not just electricity). 10% efficient PV systems over 2% of the US.

## NAPELEM: MUNKAPONT



A napelem teljesítménye, ha az  $U$  feszültség függvényében vizsgáljuk, eleinte közel lineárisan nő a cella feszültségével, de még a pn átmenet "nyitófeszültsége" elérése előtt eléri maximumát, és utána meredeken zérusra csökken a nyitófeszültség környékén.

42

## TEJESÍTMÉNY ÉS KITÖLTÉSI TÉNYEZŐ

FF kitöltési tényező (*fill factor*): napelem maximális teljesítménye és az  $U_{oc} I_{sc}$  szorzat (üresjárási feszültség és rövidzárási áram szorzata) hányadosa

$$FF = \frac{P_m}{U_{oc} I_{sc}}$$

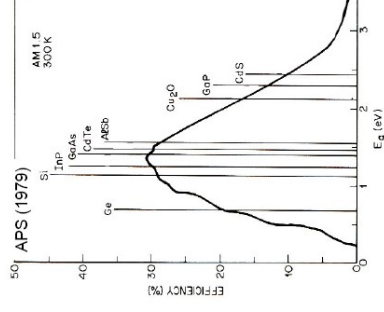
A napelemből kivehető teljesítmény az  $I_{sc}$  fotoáram növelésével illetve az átmenet telítési áramának csökkentésével növelhető. Az előzőt a rendelkezésre álló napsugárzás erőssége határozza meg illetve, limitálja, az utóbbit a félvezető intrinszc töltéshordozó-koncentrációja. Szilícium napelemek tipikus adatai  $U_{oc} = 0,5 - 0,8 \text{ V}$ , és

$$I = 10 - 40 \text{ mA/cm}^2$$

43

## MAXIMÁLIS HATÁSFOK

### Maximum Power and Efficiency



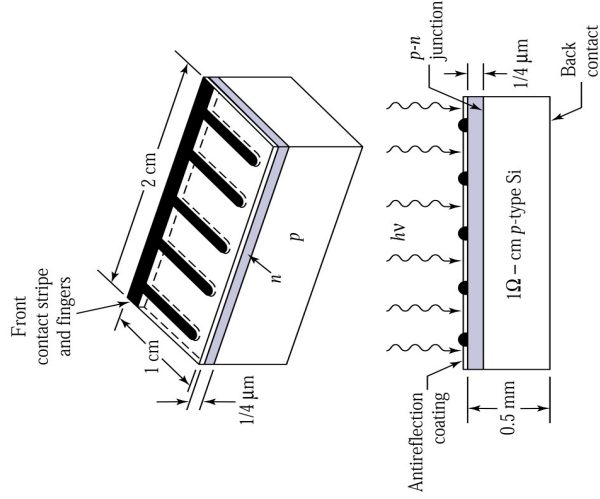
- Increasing  $E_g$  improves voltage for a given total input power
- Reducing  $E_g$  improves current since more light is collected

44

## NAPELEM HATÁSFOKA

Az ideális pn-átmenetes napelem hatásfoka adott sugárzási spektrum mellett a cella anyagát képező félvezető tiltott sávjának függvénye. A Nap sugárzási spektruma esetén ~1,4 eV tiltott sáv esetén van az ideális hatásfok maximuma, és ez ~31 %. Eszerint GaAs vagy InP lenne a legjobb félvezető a napelem céljára, azonban a Si technológia fejlettsége és olcsósága nagy előny a gyakorlati alkalmazásokban. Az egykristályos Si alapú napelemek hatásfoka eléri a 22 %-ot. Úrbeli alkalmazásokban azonban, ahol a hatások (és a tömeg) a kritikus, és a költségek másodlagosak, a GaAs alapú napelemek elterjedtek.

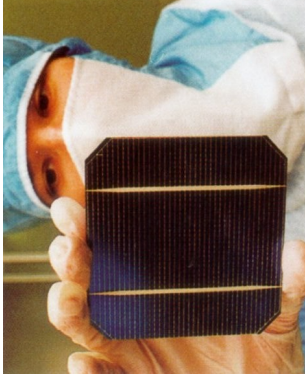
45



47

## NAPELEM TÍPUSOK

Fontosabb típusok, illetve szerkezetek



Egykristályos Si, GaAs

Vastagréteg amorf-Si

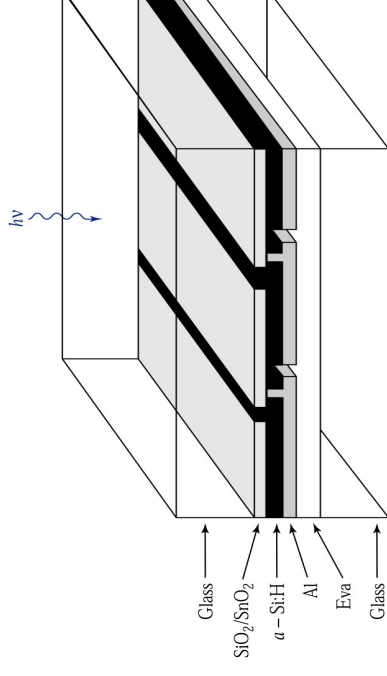
Vastagréteg CIS és CIGS

CIS napelem: n-CdS/p-CuInSe<sub>2</sub>

CIGS napelem: n-CdS/p-CuInGaSe<sub>2</sub>

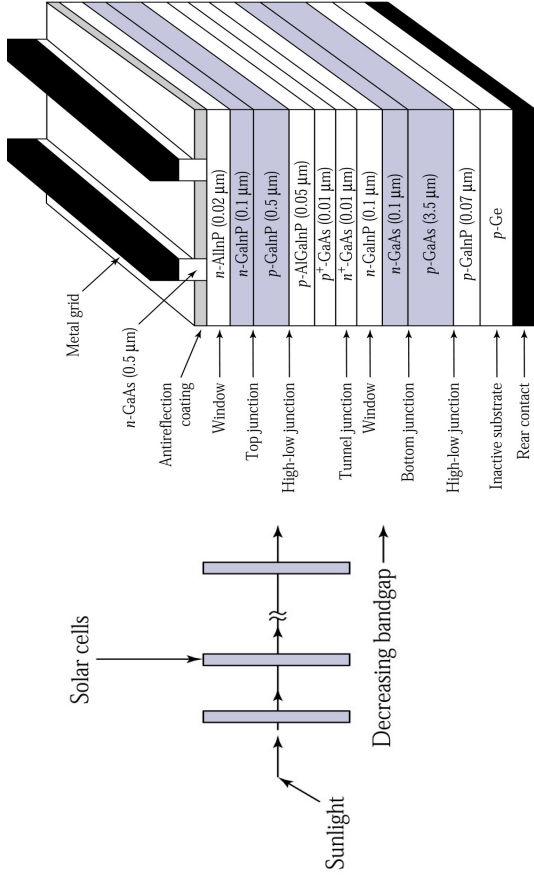
46

## a-Si napelem

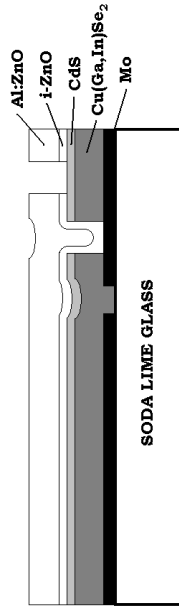


Series-interconnected a-Si solar cells deposited on a glass substrate with a rear glass cover bonded using ethylene vinyl acetate.

# TANDEM NAPELEM



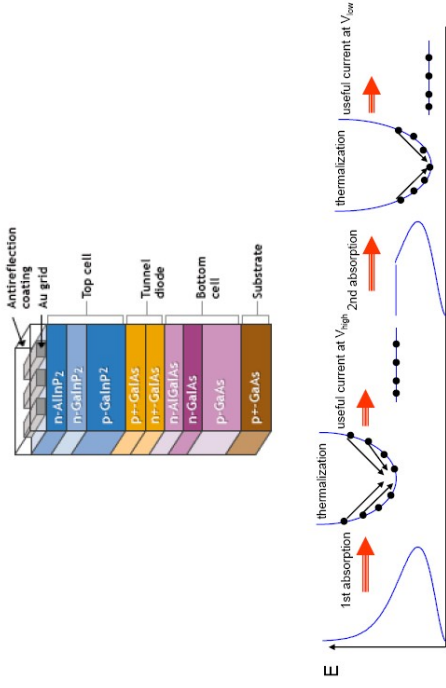
# CIGS NAPELEM



Cu(Ga,In)Se<sub>2</sub> (kalkopirit rácúsvagyület-félvezető)  
 1,0-1,1 eV tiltott sáv, p-típus (fényelnyelő réteg)  
 CdS 2,42 eV tiltott sáv, n-típus  
 ZnO 3,2 eV tiltott sáv, n-típus, nagyellenállású,

(ablak/antireflexiós réteg)  
 ZnO:Al n-típus, kis ellenállás, átlátszó kontaktusréteg

# Multijunction Cells



# CIGS NAPELEM PILOT-LINE: MTA MFA

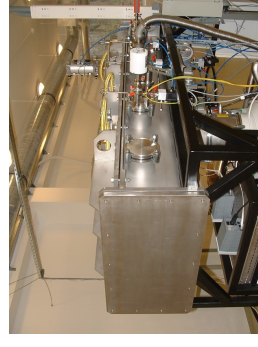
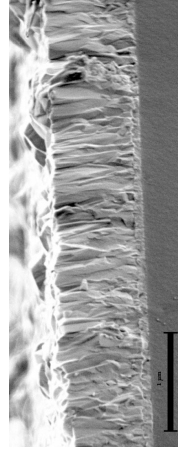
Rétegleválasztási technológia:

Porlasztás:

ZnO, Mo rétegek

Párolgattatás:

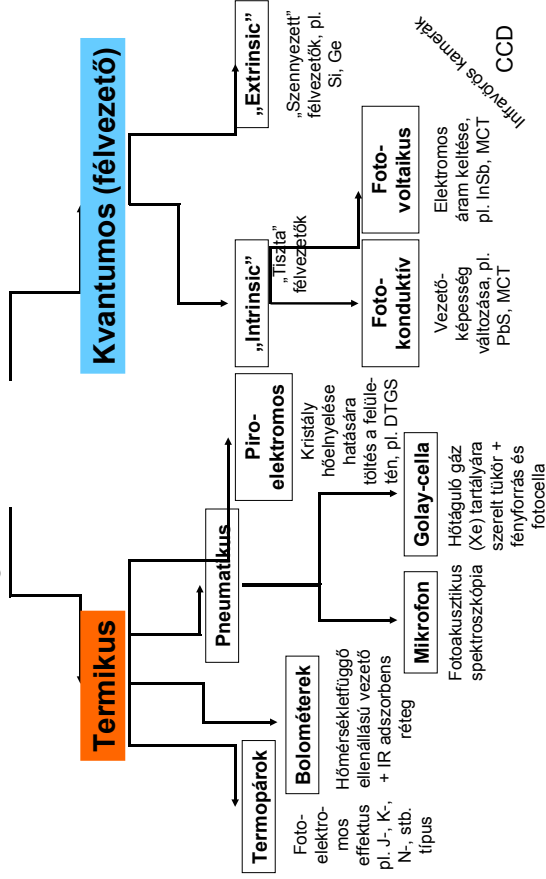
CIGS réteg



Porlasztással leválasztott  
 ZnO:Al réteg

# SUGÁRZÁSDETEKTOROK

Sugárzás (IR) detektorok

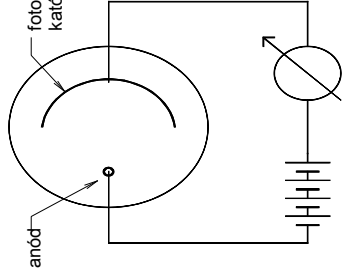


# SUGÁRZÁSÉRZÉKLÉS: TERMIKUS EFFEKTUSOK

Termikus hatás:

A sugárzás által közvetített energia elnyelése az elnyelő közeg hőmérsékletének emelkedéséhez vezet, ami közvetve (bolométer, piroelektromos érzékelők) felhasználható a detektálásra. A termikus hatás tehát közvetett érzékelés.

# KÜLSŐ FOTELEKTROMOS EFFEKTUS: FOTOCÉLLA



Működési mechanizmus:  
 Külső fotoelektromos hatás  
 Vákuum- vagy gáztöltésű „cső”  
 Gáztöltés – szekunder ionizáció – nagyobb érzékenység, de nemlineáris karakterisztika



A fotoemisszió vázlatos sávképe  
 Kvantumfeltétel:  $h\nu \geq E$

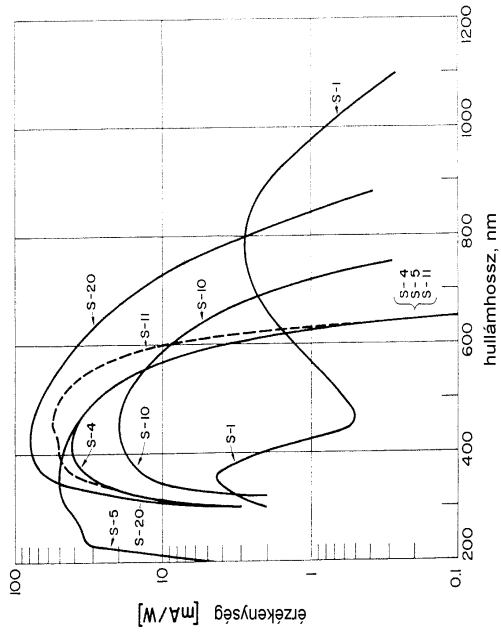
$$h\nu \geq E$$

# SUGÁRZÁSÉRZÉKLÉS: KVANTUMOS EFFEKTUSOK

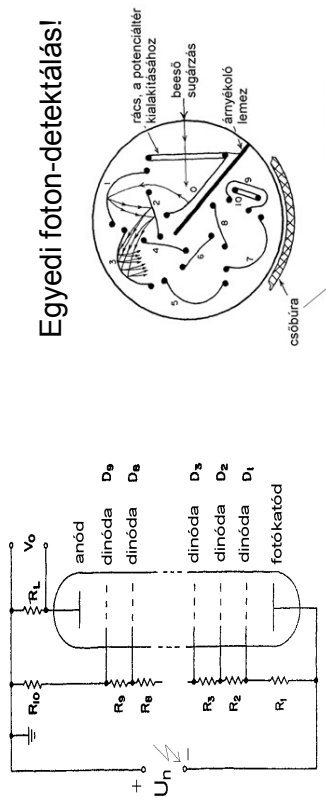
Kis energiák (néhány eV) illetve a látható, és a láthatóhoz közeli (infravörös, ultraibolya) hullámhossznál:

Külső fotoelektromos effektus  
 Töltéshordozó (elektron-lyuk pár) generálás

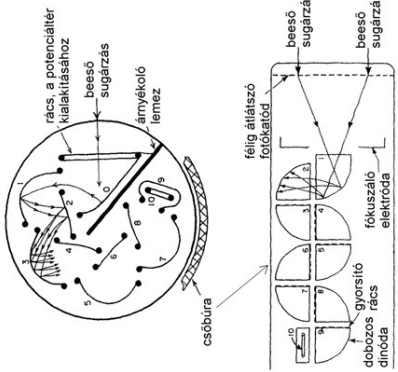
# FOTOKATÓDOK SPEKTRÁLIS ÉRZÉKENYSÉGE



# FOTOELEKTRONSOKSZORÓZÓ (PEM)



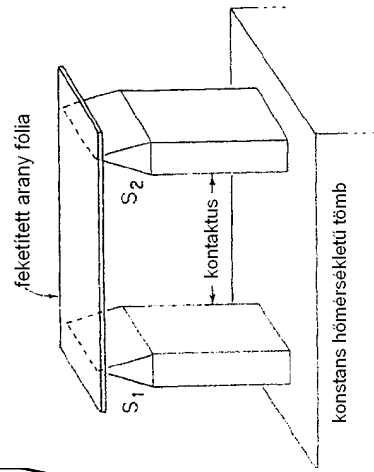
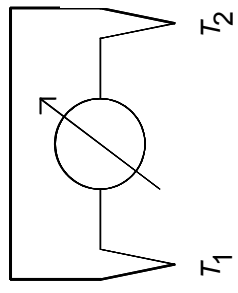
Egyedi foton-detektálás!



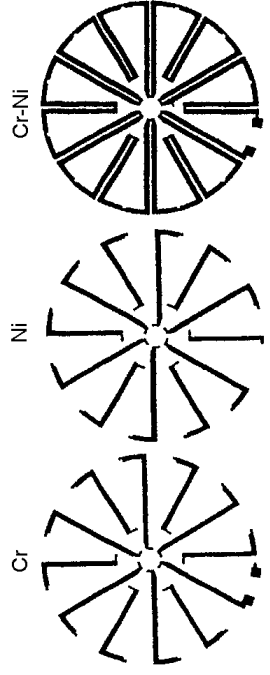
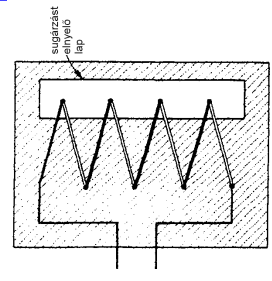
Általában 12 elektroda (dinóda)  
1200-1400 V dc

$$M = (1 - \delta) k^n \oplus 10^{5-10^6}$$

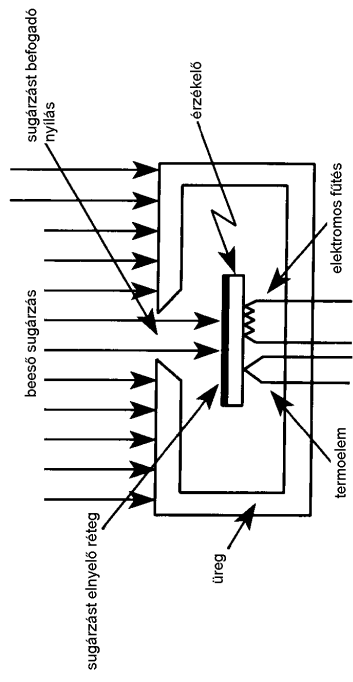
# TERMIKUS DETEKTOROK



# TERMOOSZLOP



# ÜREG DETEKTOR



Abszolút, elektromosan kompenzált üreg-detektor

61

VÉGE

62