

# ÉRZÉKELŐK

**Dr. Pődör Bálint**

Óbudai Egyetem KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet

## 6. ELŐADÁS: OPTIKAI SUGÁRZÁSÉRZÉKELŐK I.



2010/2011 tanév 2. félév

1

## ESZKÖZÖK ÉS ALKALMAZÁSOK

Photoresistor  
Photodiode  
Phototransistor  
Photovoltaics  
Solar Cells  
Light Activated Silicon Controlled Rectifiers  
Optoisolators  
Dopler-light  
Optoswitches  
Sound measurement  
Fiber Optics

3

## 6. ELŐADÁS OPTIKAI SUGÁRZÁSÉRZÉKELŐK

1. A fény tulajdonságai
2. Félvezetőanyagok optikai tulajdonságai
3. Félvezető fényérzékелők (fotodetektorok) általános tulajdonságai
4. Fotoellenállások fizikája
5. Fotoellenállások konstrukciója, tulajdonságai és alkalmazásai

2

## ELŐNYÖK ÉS HÁTRÁNYOK

### Advantages

Cheap  
Non-contact

### Disadvantages

Non-linear response  
Distance  
Ambient light affects them

4

## A FÉNY KETTŐS TERMÉSZETE

Terjedés – a fény (többnyire...) **hullám**

Emisszió és abszorpció – a fény (többnyire...) **részecske**

A fény emissziója és abszorpciója: diszkrét „adagok” ezek a fény kvantumok azaz a **fotonok**

$$E_{\text{foton}} = h\nu$$

A foton energia a fény frekvenciájától függ de nem függ a fény intenzitásától.

A fényintenzitás a fotonok számával arányos.

5

## A FÉNY (EM HULLÁM) TULAJDONSÁGAI

A fény terjedési sebessége anyagban

$$v = c/\epsilon(\mu\epsilon) = c/n$$

törésmutató  $n = \epsilon(\mu\epsilon)$ .

A fény hullámhossza az egy periódus alatt megtett út

$$\lambda = v/f = c/(nf)$$

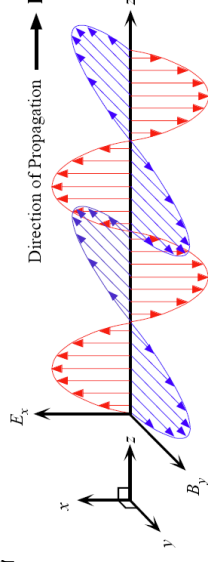
A törésmutató függ a hullámhossztól!

7

## A FÉNY: ELEKTROMÁGNES HULLÁM

A fény **elektromágneses hullám**, melynek elektromágneses terét egymáshoz csatolt elektromos tér, **E** és egy mágneses tér **B** vagy **H** (**B** =  $\mu\mathbf{H}$ ) alkotja.

**Síkhullám**: a két tervektor **E** és **B** továbbá a terjedés iránya (a **k** hullám-számvektor) egymásra kölcsönösen merőlegesek, és az **E**, **B**, **k** sorrendben jobbsodrású koordináta-rendszer tengelyeivel párhuzamosak.



A **hullámhossz**  $\lambda = 2\pi/k$  (λ a fény hullámhossza).

Síkhullám: **TEM**-módus (**T**ransverse **E**lectric and **M**agnetic mode).

6

## A HULLÁMEGYENLET MEGOLDÁSA

Ha a terjedés iránya a +z tengely, és az **E** elektromos tér az x tengellyel párhuzamos, ekkor **H** az y tengellyel párhuzamos, és  $\omega = kc = 2\pi c/\lambda$

$$E_x = E_{x0} \cos(\omega t - kz) = E_{x0} \cos 2\pi(\nu t - z/\lambda)$$

$$H_y = H_{y0} \cos(\omega t - kz) = H_{y0} \cos 2\pi(\nu t - z/\lambda)$$

EM hullámok (fény) sebessége vákuumban

$$c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} = 2,997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

A **c** fénysebesség rögzített érték mely az SI mértékegységrendszer egyik pillére. Az  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Vs/Am}$  értéke definiált, ezek együtt meghatározzák  $\epsilon_0$  értékét is.

8

## TELJESÍTMÉNYSŰRŰSÉG: A POYTING VEKTOR

Az EM hullám, és így a fény teljesítménysűrűsége (a hullámfront egységnyi keresztmetszetén időegység alatt áthaladó energia)

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

**S** a Poyting vektor, dimenziója [VA/m<sup>2</sup>].

Effektív értékekkel számolva a teljesítménysűrűség

$$P/A = c\epsilon_0 E^2 = cB^2/\mu_0$$

9

## A FÉNY: RÉSZECSCKE

*Albert Einstein* (1905):

**Minden sugárzás (EM sugárzás, fény) kvantált, független energiakvantumokból ("részecskék") áll.**

A fény (EM hullám) kvantuma a **foton**.

Közvetlen klasszikus kísérleti bizonyíték: fényelektromos jelenség, elektronok kilépése fémekből fényvel való megvilágítás hatására.

Einstein fizikai Nobel díj (1921) "érdemdús matematikai-fizikai kutatásaiért, különös tekintettel a fotelektromos-effektus törvényének felfedezéséért."

11

## A FÉNY: RÉSZECSCKE

*Max Planck* (1900): fekete test sugárzási spektruma úgy érthető meg, hogy a kisugárzott energia kvantált

$$E = hv = hc/\lambda$$



azaz a sugárzás és anyag kölcsönhatásakor az energiacsere csak diszkrét energiakvantumokban megy végbe.

A **Planck állandó**

$$h = 6,626\ 076 \times 10^{-34} \text{ VAs}^2,$$

a "**vonás**"  $\square = h/2\pi = 1,054\ 573 \times 10^{-34} \text{ VAs}^2.$

10

## RADIOMETRIAI ÉS FOTOMETRIAI EGYSÉGEK

**Radiometriai egységek:** a sugárzás által vitt energiára vonatkoznak, ezek az SI mértékrendszer részei.

**Fotometriai egységek:** Ezek az emberi szem által érzékelt spektrális tartományra és az ember "fényérzetére" vonatkoznak.

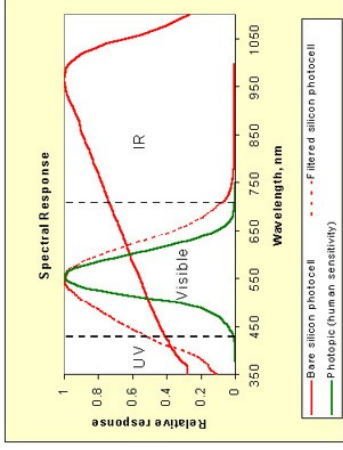
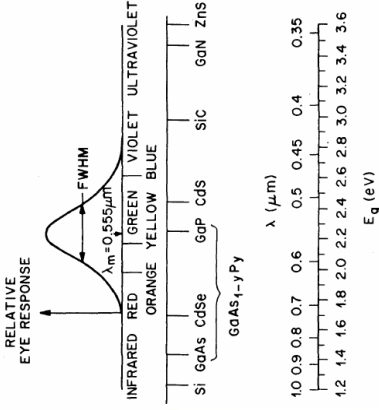
**CIE (Commission International d'Éclairage):**

Emberi szem standardizált érzékenységi görbéje szerint a relatív érzékenység maximuma  $\lambda = 0,550 \mu\text{m}$ -nél van, (sárgászöld), itt 1 watt sugárzási teljesítmény 680 lumennek egyenértékű (1 lm megfelel 1,47 mW-nak).

A relatív érzékenység 0,380  $\mu\text{m}$ -nél (ibolya) és 0,780  $\mu\text{m}$ -nél (vörös) válik nullává.

12

## AZ EMBERI SZEM ÉRZÉKENYSÉGI GÖRBÉJE ÉS A FÉLVEZETŐK



13

## RADIOMETRIA ÉS FOTOMETRIA

Mennyiség	Radiometria	Fotometria
Fényáram	W	lumen
Fényerősség	W/szteradián	kandela
Megvilágítás	W/m <sup>2</sup>	lux = lumen/m <sup>2</sup>

Fényerősség → egységnyi térszögbe kibocsátott fényáram

Egy kandela erősségű fényforrás 4π lument bocsát ki.

14

## RADIOMETRIA ÉS FOTOMETRIA

A kandela (cd) mai definíciója (1979):

Annak a fényforrásnak az erőssége, mely adott irányba  $540 \times 10^{12}$  Hz frekvenciájú monokromatikus fényt bocsát ki és sugárerőssége 1/683 W/szteradián.

Az adott frekvencia 556 nm hullámhossznak (zöld fény) felel meg.

Az így definiált kandela az SI rendszerben alapegység.

15

## FÉNY ÉS FÉLVEZETŐ

$$E = hv = hc/\lambda$$

$$E \text{ [eV]} = 1,24/\lambda \text{ [\mu m]} = 1240/\lambda \text{ [nm]}$$

E → a kölcsönhatás karakterisztikus energiája, pl. tiltott sáv, szennyezési centrum ionizációs energiája, stb.

Példa: látható zöld fény  $\lambda = 500$  nm,  $E = 2,48$  eV

Példa: szilícium tiltott sáv  $E = 1,12$  eV, fotováltozás  
kűszöbhullámhossza  $\lambda = 1107$  nm

16

## OPTIKAI TULAJDONSÁGOK: FÉNY ÉS FÉLVEZETŐ KÖLCÖNKHATÁSA

Optikai tulajdonságok: az energiasáv-szerkezet a meghatározó. Az EM sugárzás, így a fény is elnyelődik (elektron-lyuk párok keletkezése mellett), ha

$$h\nu = hc/\lambda_g \geq E_g$$

A hosszuhullámú levégás  $\lambda_g$  határhullámhossza

$$\lambda_g = hc/E_g, \text{ gyakorlati egységekben } \lambda_g [\text{m}] = 1,24/E_g [\text{eV}].$$

A tiltott sávnál kisebb energijú fotonok, illetve a határhullámhossznál hosszabb hullámhosszú fény számára a félvezető átlátszó. Ezt a határt abszorpciósnak is nevezzük.

17

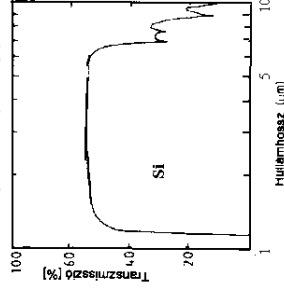
## SZILÍCIUM HATÁRHULLÁMHOSSZA ÉS TRANSZMISSZIÓJA

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1,603 \times 10^{-19}} = 1,11 \mu\text{m}$$

Ez a hullámhossz a közeli infravörös tartományba esik.

A Si elnyeli az ennél rövidebb hullámhosszúságú fényt, így a látható fény tartományában fotodiódaként, napelemként, stb. használható.

A  $\infty$ m-ben kifejezett  $\lambda$  hullámhossz és az eV-ban kifejezett E energia között tehát az átszámítási összefüggés  $\lambda = 1,24/E$ .



## FÉLVEZETŐK FÉNYELNYELÉSE ILLETVE ÁTLÁTSZÓSÁGA

Egy félvezetőkristály elnyeli a tiltott sávjánál nagyobb energijú fotonokkal jellemezhető fényt, a kisebb energijú fotonokból álló, azaz nagyobb hullámhosszú fényt pedig átengedi.

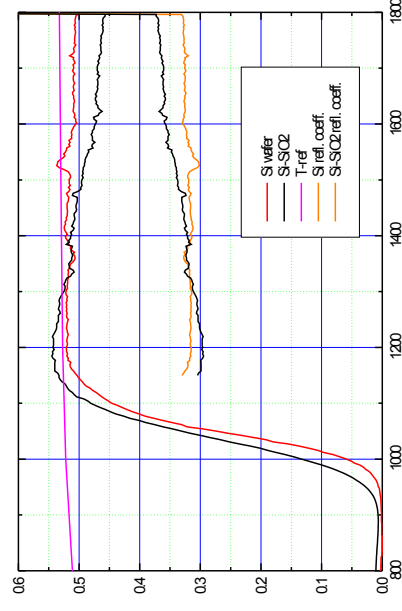
A küszöbhullámhossz és a félvezető tiltott sávja nagysága közötti kapcsolat szintén a Max Planck/Einstein-féle összefüggést tükrözi.

A szilíciumban tiltott sávja 1,12 eV. A fényspektrum milyen tartományába esik a levégási hullámhossz?

A levégási hullámhossz lényegében az adott energióval (tiltott sáv) egyenértékű hullámhossz. A megoldáshoz az eV-ban megadott energiát át kell számítani SI egységbe!

18

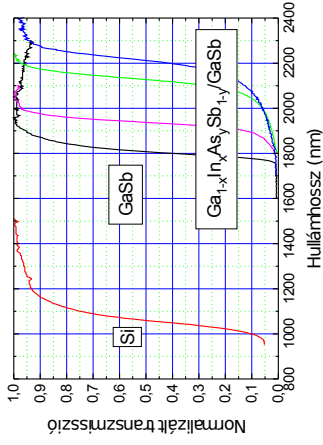
## SZILÍCIUM SZELET TRANSZMISSZIÓJA



380  $\mu\text{m}$  Si szelet transzmissziója. 1200 nm felett a be- és kilépési felületeken való reflexió határozza meg a fényáteresztést.

20

## FÉNYATERESZTÉS A HULLÁMHOSSZ FÜGGVÉNYÉBEN

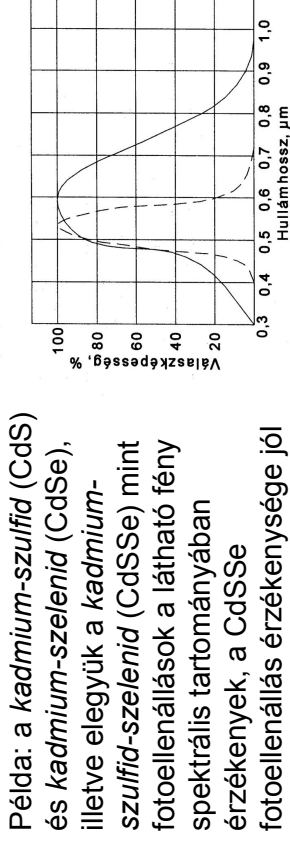


Különböző félvezető anyagok fényáteresztése a hullámhossz függvényében. A határhullámhosszra, illetve a tiltott sávra jó közelítő érték adódik az 50 %-os transzmisszióból (OTKA 30395 projekt).

21

## HATÁRHULLÁMHOSSZ

A  $\lambda_g$  III-V típusú félvezetőkben a tiltott sávnak megfelelően kb. 0,35  $\mu\text{m}$  (AIP) és 6,9  $\mu\text{m}$  (InSb) közé esik. Ez átfogja a teljes látható és a közeli infravörös tartományt.



Példa: a *kadmium-szulfid* (CdS) és *kadmium-szelenid* (CdSe), illetve elegyük a *kadmium-szulfid-szelenid* (CdSSe) mint fotoellenállások a látható fény spektrális tartományában érzékenyek, a CdSSe fotoellenállás érzékenysége jól követi az emberi szemét.

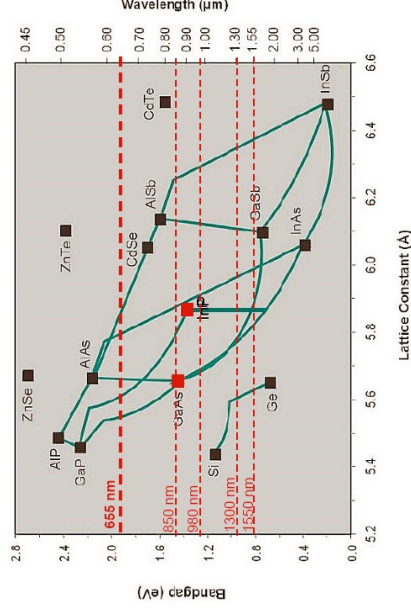
CdS fotoellenállás karakterisztikája. A szaggatott vonal az emberi szem hullámhossz-érzékenysége.

22

## ELEMI ÉS VEGYÜLET-FÉLVEZETŐK

Elements	Compounds IV-IV	Compounds III-V	Compounds II-VI	Compounds IV-VI
Si	SiC	AlAs	CdS	PbS
Ge		AlSb	CdSe	PbTe
		BN	CdTe	
		GaAs	ZnS	
		GaP	ZnSe	
		GaSb	ZnTe	
		InAs		
		InP		
		InSb		

## TILTOTT SÁV ÉS HATÁRHULLÁMHOSSZ



A tiltott sáv szélessége, a határhullámhossz (abszorpciós él) és a kristály rácsállandójának kapcsolata különböző félvezetőkben.

24

## HATÁRHULLÁMHOSSZ: IR

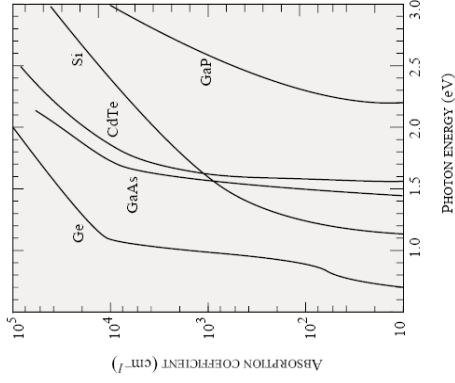
A közeli infravörös tartományban érzékeny az *ólomszulfid* (PbS  $E_G = 0,41$  eV,  $\lambda_G = 3,02$   $\mu\text{m}$ ) fotoellenállás, melynek érzékenységi spektrális tartománya 1...4  $\mu\text{m}$ .

*Kadmium-higany-tellurid* (CdHgTe) vegyület-félvezetővel 0,1 eV nagyságrendű tiltott sáv realizálható, az ebből készült fotoellenállás érzékeny pl. a 8 - 12  $\mu\text{m}$  spektrális tartományban (éjjel látó készülék, *night vision*).

25

## FÉLVEZETŐK ABSZORPCIÓS TÉNYEZŐJE

Az abszorpciós él feletti energiáknál az  $\alpha$  abszorpciós tényező igen nagy.  $\alpha$  nagyobb és gyorsabban emelkedik az ún. **direkt** sávszerkezetű félvezetőkben (pl. GaAs, CdTe) mint az ún. **indirekt** sávszerkezetű-ekben (pl. Si, Ge, GaP).



27

## ABSZORPCIÓS TÉNYEZŐ

**Bouguer-Lambert törvény:** az anyagon áthaladó fény intenzitásának a távolsággal ( $x$ ) való változását (csökkenését) írja le

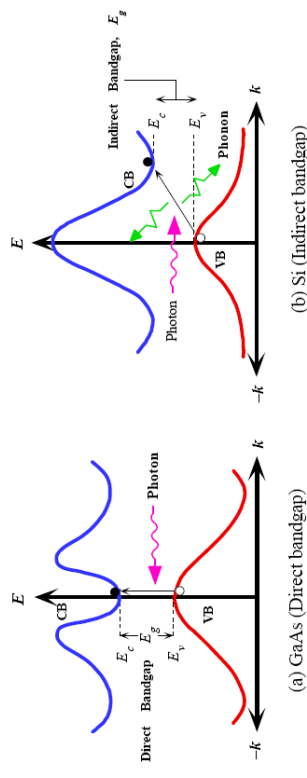
$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x)$$

$\alpha$  [ $\text{m}^{-1}$ ] az **abszorpciós (elnyelési) tényező**.

Az abszorpciós él feletti energiáknál az elnyelési tényező igen nagy ( $10^3$ - $10^5$   $\text{cm}^{-1}$ ).  $\alpha$  nagyobb és gyorsabban emelkedik az ún. **direkt** sávszerkezetű félvezetőkben (pl. GaAs, InP, GaN, CdS) mint az ún. **indirekt** sávszerkezetű-ekben (pl. Si, Ge, GaP, SiC).

26

## OPTIKAI ÁTMENETEK FIZIKÁJA



Optikai átmenetek az energia-impulzus (hullámszám) diagramon. a. direkt sáv szerkezet (pl. GaAs); b. indirekt sáv szerkezet (pl. Si).

28

## DIREKT ÉS INDIREKT ÁTMENET

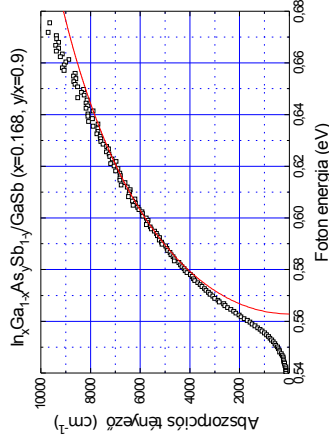
A sávok közötti átmenetek: energia és impulzus-megmaradás!

Egy elektron-lyuk pár keltéséhez két sáv energiája különbségének megfelelő energiájú foton szükséges. Mivel a foton impulzusa elhanyagolhatóan kicsi a töltéshordozók tipikus impulzusaihoz képest, ezért az impulzus-megmaradás megköveteli, hogy közvetlen (direkt) elektron-lyuk keltésnél csak azonos impulzusú töltéshordozók keletkezhetnek.

Eltérő impulzusú elektron és lyuk csak egy, az impulzus-megmaradás feltételét biztosító harmadik részecske, esetünkben egy vagy több fonon (a rácsrezgés kvantuma) részvételével mehet végbe (indirekt folyamat).

29

## ABSZORPCIÓS TÉNYEZŐ MÉRÉSE



Az  $\alpha$  abszorpciós tényező a felvevő optikai transzmissziós spektrumának méréséből határozható meg. *Indium-gallium-arzenid-antimonid* elegykristály esetén mely az adott összetételben a GaSb-hoz illeszkedik rácsállandóját tekintve. A folytonos vonal az  $\alpha$  abszorpciós tényező elméleti képletének a mért adatokhoz való illesztésének eredménye,  $E_G = 0.5629$  eV,  $\lambda_G = 2202$  nm adódik. (OTKA 30395 projekt).

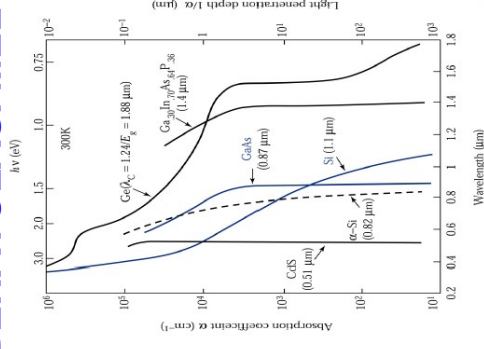
31

## Direct and Indirect Materials

- Only specific materials have a direct bandgap
- Material determines the bandgap

Material	Element Group	Bandgap Energy $E_g$ (eV)	Bandgap wavelength $\lambda_g$ (cm)	Type
Ge	IV	0.66	1.88	I
Si	IV	1.11	1.15	I
AlP	III-V	2.45	0.52	I
AlAs	III-V	2.16	0.57	I
AlSb	III-V	1.58	0.75	I
GaP	III-V	2.26	0.55	I
GaAs	III-V	1.42	0.87	D
GaSb	III-V	0.73	1.70	D
InP	III-V	1.35	0.92	D
InAs	III-V	0.36	3.5	D
AnSb	III-V	0.17	7.3	D

## BEHATOLÁSI MÉLYSÉG



Behatolási mélység  $d = 1/\alpha$ , a fényintenzitás  $1/e$  részre (kb. 37 %) csökken ( $I(x) = I_0 \exp(-\alpha x)$ ).

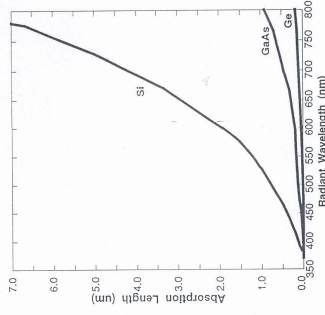
32



## FOTONOK BEHATOLÁSI MÉLYSÉGE FÉLVEZETŐKBEN

Nagyíztaságú (alacsony adalékolású) szilíciumban (pl. napelem) a fotonok behatolási mélysége az elnyelési küszöb környékén, illetve az elnyelési tartományban

Hullámhossz Behatolási mélység (μm)	mélység (μm)
1,064	300
0,90	30
0,70	5



## FÉLVEZETŐ FÉNYÉRZÉKELŐK

**Szilícium technológia:** nagyon érett, viszonylag olcsó, de a Si fizikai tulajdonságai miatt nem alkalmazható mindenütt!

**Eszközők:**

- fotoellenállás,
- pn-átmenetes dióda (PIN- és lavina-fotodióda),
- fém-félvezető átmenetes dióda,
- fototranzisztor,
- napelem.

## FÉLVEZETŐ FÉNYÉRZÉKELŐK

Fotodetektorok jellemzői:

**Optikai:** spektrális karakterisztika, kvantumhatások, stb.

**Elektromos:** sötétáram, érzékenység, válaszidő, zaj, egyedi foton-detektálási valószínűség, fotonszámlálási hatások, detektálási küszöb, stb.

**Félvezető detektorok:** töltött részecske-, illetve foton-detektálás ionizáció azaz töltéshordozó-generálás alapján. Kvantum-detektor.

**Félvezető anyag megválasztása szempontjai:** Szilícium és vegyület-félvezetők (főleg a III-V típusúak): Fizikai tulajdonságok, elérhetőség, egyszerű használhatóság, költség. <sup>34</sup>

## FÉNYDETEKTÁLÁS FÉVEZETŐVEL

**Fizikai mechanizmus:** optikai abszorpció töltéshordozó (elektron-lyuk pár) keltés által.

**Kvantum feltétel:**  $h\nu = hc/\lambda > E_G$

**Detektálás:** fotóáram, fotófeszültség, ellenállás változás. A detektálási folyamat kvantumos jelenségen alapul:

kvantum-hatású ill. foton-detektor.

## ÉRZÉKENYSÉG ÉS KVANTUMHATÁSFOK

A fotoáram (fotoválasz) arányos a beeső fényteljesítménnyel

$$I_{\text{foto}} = R P_{\text{opt}}$$

R (A/W) – (áram-)érzékenység (*responsivity*).

*Kvantumhatásfok*  $\eta$ :

$$\eta = \frac{\text{elektron-generálás/idő}}{\text{fotonszám/idő}} = \frac{I_{\text{foto}}/q}{P_{\text{opt}}/h\nu} = \frac{R}{q} \frac{h\nu}{P_{\text{opt}}} = \frac{R}{q} \frac{h\nu}{P_{\text{opt}}}$$

37

## KVANTUMHATÁSFOK

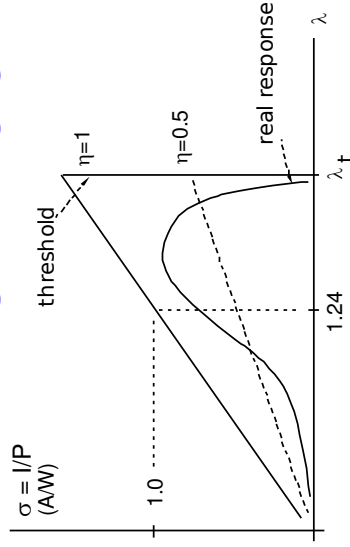
$$\eta = \frac{\text{elektron-generálás/idő}}{\text{fotonszám/idő}} = \frac{I_{\text{foto}}/q}{P_{\text{opt}}/h\nu} = \frac{R}{q} \frac{h\nu}{P_{\text{opt}}}$$

$$R = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta \lambda [\text{nm}]}{1,24}$$

Egy fotodetektor R (áram-)érzékenysége a  $\lambda$  hullámhosszal nő amiatt, hogy ugyanazon áram egyre kisebb energiájú fotonokkal keletkezik. A  $\lambda_g$  határhullámhossz elérésekor R eléri maximumát, utána az  $\eta$  kvantumhatásfok és így R is meredeken nullára esik le.

38

## FOTODETEKTOROK KVANTUMHATÁSFOKA

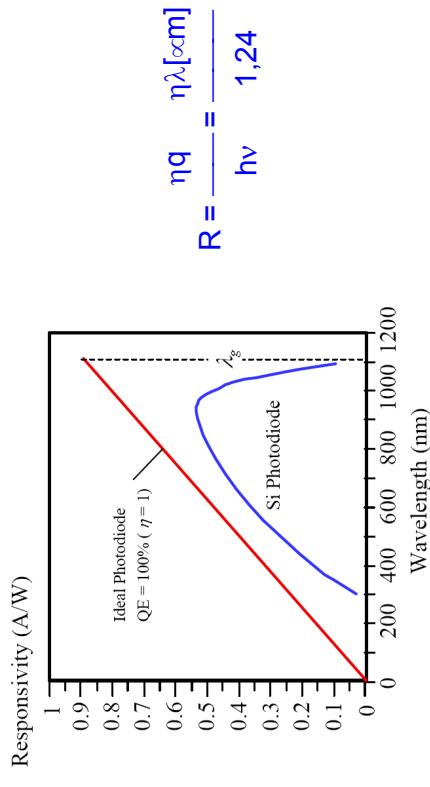


A kvantum-detektor általános karakterisztikája (válaszgörbéje):

Ha  $P = \text{const}$ , az áram lineárisan nő  $\lambda$ -val, majd meredeken 0-ára csökken a fotoelektromos küszöbnél.

Reális detektornál a válaszgörbe a háromszögtől eltérő görbe.

## PÉLDA: SI FOTODIÓDA KARAKTERISZTIKÁI



$$R = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta \lambda [\text{nm}]}{1,24}$$

Si fotodióda spektrális karakterisztikái. Jól látható az R érzékenység lineáris növekedése majd a határhullámhossz elérése utáni meredek lecsökkenése.

40

## FOTODIÓDA KVANTUMHATÁSFOKA

Egy kereskedelmi Si PIN fotodióda (HP 5082-4200-as sorozat, az egyes típusok az érzékeny felület nagyságában illetve a tokozásban különböznek) érzékenysége 770 nm-en  $0,5 \alpha/W$ . A kvantumhatásfoka

$$\eta = \frac{(I_{\text{opt}}/q)}{(P_{\text{opt}}/hv)} = \frac{hvR}{q} = \frac{hcR}{q\lambda} = \frac{1,24R[A/W]}{\lambda[\text{cm}]} = 0,81 = 81 \%$$

41

## FOTOVEZETÉS FIZIKÁJA

A fotoellenállás (más néven fotokonduktív cella) olyan passzív elem, melynek megvilágítás hatására lecsökken az ellenállása. Alapanyaga valamely félvezető, melynek vezetőképessége az elnyelt fény által generált elektronok és lyukak koncentrációja arányában növekszik. A változás mértéke a megvilágítás erősségétől logaritmikusan függ.

$$\sigma = q[(n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p)\mu_p] = \sigma_0 + \Delta\sigma$$

$$\Delta\sigma = q(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p) = q\mu_n(1 + \mu_p/\mu_n)\Delta n, \text{ mivel } \Delta n = \Delta p$$

Mivel általában az elektronok mozgékonyasága jóval nagyobb mint a lyukaké

$$\Delta\sigma \approx q \mu_n \Delta n$$

43

## A KVANTUMHATÁSFOK

Az  $\alpha$  abszorpció tényező hullámhosszfüggésén keresztül  $\eta$  függ  $\lambda$ -tól.  $d$  vastagságú elnyelő réteg (antireflexiós bevonat esetén el lehet tekinteni a reflexiós veszteségtől):

$$P_{\text{tr}} = \exp(-\alpha d) P_{\text{in}} \text{ és } P_{\text{abs}} = P_{\text{in}} - P_{\text{tr}} = (1 - \exp(-\alpha d))P_{\text{in}}$$

mivel minden elnyelt foton egy elektron-lyuk párt kelt

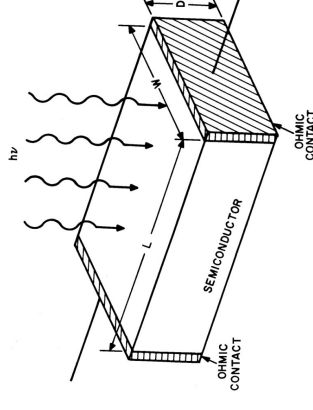
$$\eta = P_{\text{abs}}/P_{\text{in}} = 1 - \exp(-\alpha d)$$

$\eta = 0$  ha  $\alpha = 0$ ,  $\eta \rightarrow 1$  ha  $\alpha d \gg 1$  (ha az elnyelő réteg  $d$  vastagsága jóval nagyobb mint az  $1/\alpha$  optikai vastagság). Szinte minden félvezetőben nagy  $\alpha$  értékek ( $\sim 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ) realizálhatók, így  $d \gg 10 \alpha \text{ m}$ -nél  $\eta$  megközelíti 1-et.

**A félvezetők igen hatékony fotodetektorok!**

42

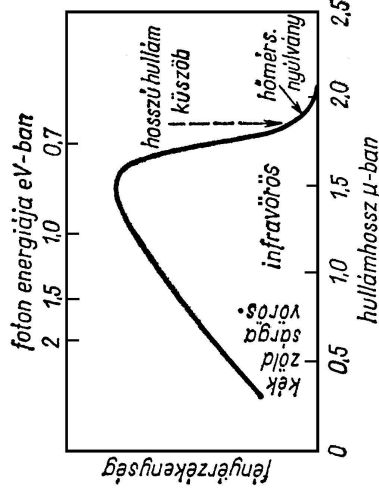
## FOTOELLENÁLLÁS



A fotoellenállás egy félvezető darab vagy réteg, melynek két végén ohmos kontaktus van.

44

## FOTOELLENÁLLÁS (Ge)



Ge fotoellenállás (határhullámhossz 1,88  $\mu\text{m}$ ) spektrális érzékenysége. Az érzékenység csak a határhullámhossz felett  $\sim kT$ -nek (kb. 26 meV) megfelelő hullámhosszaknál csökken nullára.

## FOTODETEKTOROK ANYAGAI

A közeli infravörös tartományban érzékeny az ólomszulfid (PbS  $E_G = 0,42$  eV,  $\lambda_G = 2,95$   $\mu\text{m}$ ) fotoellenállás, spektrális tartománya 1...4  $\mu\text{m}$ . Legnagyobb érzékenységük 2  $\mu\text{m}$  körül van. Időállandójuk kb. 1 msec bagyságrendű.

*Kadmium-higany-tellurid* (CdHgTe) vegyület-félvezetővel (a Cd/Hg aránytól függően a tiltott sáv 1,6 eV és 0 eV között van, a CdTe félvezető, a HgTe fél-fém) 0,1 eV nagyságrendű tiltott sáv realizálható, az ebből készült fotoellenállás érzékeny pl. a 8 - 12  $\mu\text{m}$  spektrális tartományban (éjjel látó készülék, *night vision*).

47

## FOTODETEKTOROK ANYAGAI

*Szilícium*  $E_G = 1,12$  eV,  $\lambda_G = 1,11$   $\mu\text{m}$ ,

*germánium*  $E_G = 0,66$  eV,  $\lambda_G = 1,88$   $\mu\text{m}$

Mindkét érték a közeli infravörös tartományba (NIR) esik.

A *kadmium-szulfid* (CdS  $E_G = 2,58$  eV,  $\lambda_G = 0,502$   $\mu\text{m}$ ) és *kadmium-szelenid* (CdSe  $E_G = 1,73$  eV,  $\lambda_G = 0,749$   $\mu\text{m}$ ), illetve elegyük a *kadmium-szulfid-szelenid* (CdSSe) mint fotoellenállások a látható tartományában érzékenyek, a CdSSe fotoellenállás érzékenysége jól követi az emberi szemét. Ezek az eszközök polikristályosak. Az eszközöknek nagy az erősítése, de eléggé nagy az időállandójuk (10-100 msec).

46

## FOTODETEKTOROK ANYAGAI: TÁVOLI IR

A távoli infravörös tartományban arannyal adalékolt germánium (Ge:Au), illetve ZnCdTe vagy HgCdTe a detektor anyaga. A Zn/Cd, illetve Hg/Cd arány megfelelő beállításával a tiltott sáv akár 0,01 eV-ra is csökkenthető.

Alkalmazás: 50  $\mu\text{m}$ -es infravörös sugárzási tartományra. Orvosi alkalmazás a termográfia, mint diagnosztikai módszer, amikor az emberi test hőterképét felvéve gyulladások és daganatok helye deríthető fel.

48

## AZ INFRAVÖRÖS SPEKTRUM ÉS AZ ALKALMAS FÉLVEZETŐK

Near-infrared (NIR) (IR-A DIN)	0,75-1,4 μm	Si
Short-wave IR (SWIR) nagyátvitelű optikai átvitel)	1,4-3 μm (ezen belül 1530-1560 nm, InGaAs)	
Mid-wave IR (MWIR) (IR-B DIN)	3-8 μm	InSb, HgCdTe, PbSe
Long-wave IR (LWIR) (IR-C DIN)	8-15 μm	HgCdTe
Far-infrared (FIR)	15-1000 μm	adalékolt Si, Ge

49

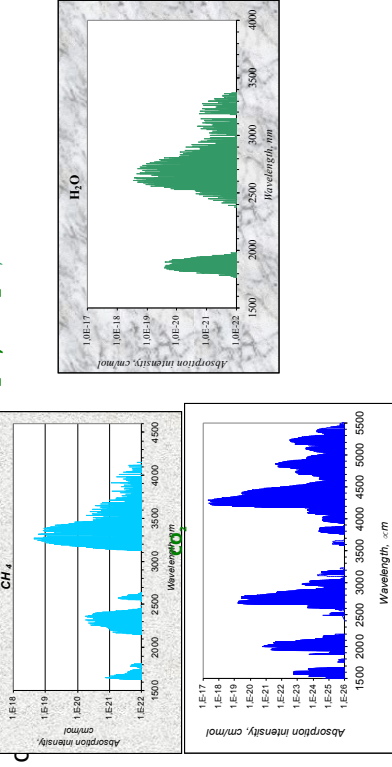
## A KÖZELI IR SPEKTRUMTARTOMÁNY JELENTŐSÉGE

The spectral range of 1.6-4.6 μm is very important for different applications such as medical diagnostics (noninvasive method for measuring glucose in blood), environment monitoring (measuring contents of oil in water, measuring contents of water in oil) and so on. A number of such relevant gases as H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HF and others have strong fundamental absorption lines in the mid-infrared spectral range that are 50-500 times stronger in comparison with near-infrared overtone bands at shorter wavelength. Therefore such mid-IR LEDs and PDs can be used to build low power consumption optical portable gas analyzers, and environmental monitors.

50

## Absorption bands of gases in the range 1.6-5.0 μm

In Mid infrared spectral range 1600-5000 nm lies strong absorption bands of such important gases and liquids as CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>Cl, OCS, HCl, HOCl, HBr, H<sub>2</sub>S, HCN, NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, glucose and many

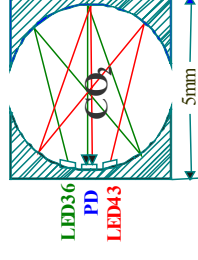
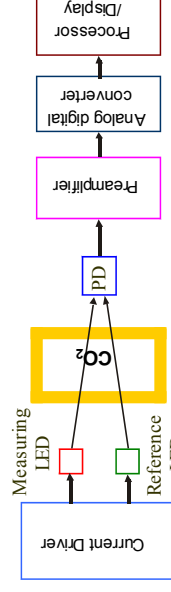


51

## Application of Mid Infrared LED and PD in Gas Sensors

Optical sensors are the only ones, which are truly gas specific and therefore reliable.

NEW mid infrared sources for gas sensors- Mid-IR LEDs cover all spectral range 1.6-5.0 μm. This light source is much smaller, high speed, with low power consumption and don't need filters.



Félvezető: GaSb, InAs, GaInAsSb



## INFRAVÖRÖS TARTOMÁNYBAN ÉRZÉKENY FOTOELLENÁLLÁSOK

Félvezető	Max. érzékeny- ség helye, $\mu\text{m}$	Spektrális tart., $\mu\text{m}$	Hőmérséklet K
Ólom-szulfid (PbS)	1,9	1,5-3 (Ge szűrővel)	300
Ólom-szulfid (PbS)	2,2	0,3-3,5	300
Indium-antimonid (InSb)		VIS-7,5	300
Indium-antimonid	6-6,3		77
HgCdTe		9,6-15	77
Ge:Hg		10-11	35
Ge:Hg		15	4,2

53

## FOTOELLENÁLLÁSOK A GYAKORLATBAN

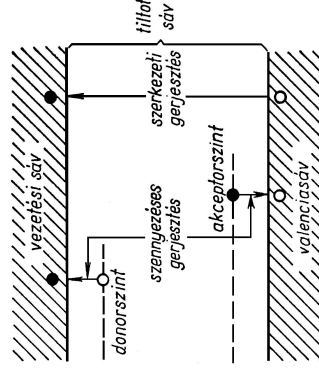
Technikai kivitelüket tekintve a fotoellenállások vákuumpárolgatott vagy kémiai úton egy megfelelő hordozóra felvitt vékony félvezető rétegből állnak meander, vagy fésűs szerkezetben. Sötétellenállásuk igen nagy, tipikusan 1...100 Mohm.

A fotoellenállást áramgenerátoros kapcsolatban célszerű használni. Az infravörös érzékelőket általában alacsony hőmérsékleten (pl. 77 K) működtetik, és az érzékelendő sugárzást valamilyen módon (pl. mechanikus szaggatóval) modulálják.

Példa: CdS fotoellenállás "sötét"  $\geq 2\text{M}\Omega$   
 "normál szoba"  $\sim 3\text{ k}\Omega$   
 "erős napfény"  $\sim 120\text{ }\Omega$

55

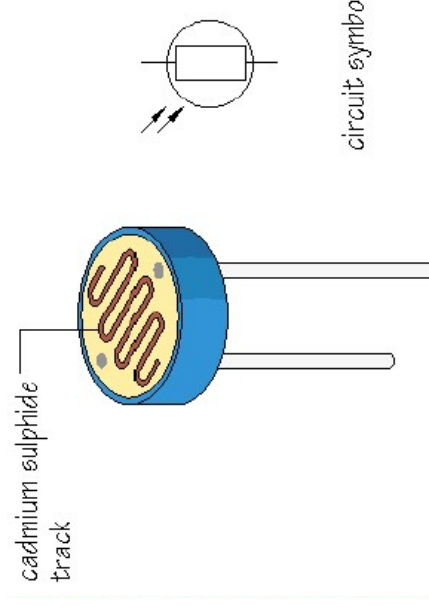
## A FOTOVEZETÉS GERJESZTÉSI MECHANIZMUSAI



Sáv-sáv (intrinsic) gerjesztés, donorszint-vezetési sáv, illetve vegyértéksáv-akceptorszint (extrinsic) gerjesztés. Ge:Hg estén az akceptorszint energiája  $\sim 90\text{ meV}$  a spektrális érzékenység tartománya  $\lambda \geq 10\text{ }\mu\text{m}$ .

54

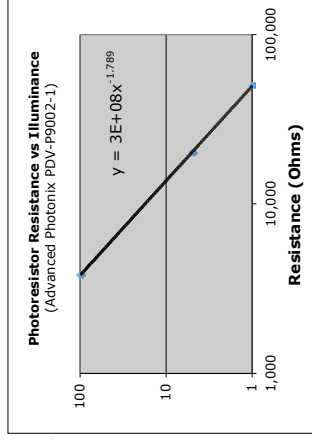
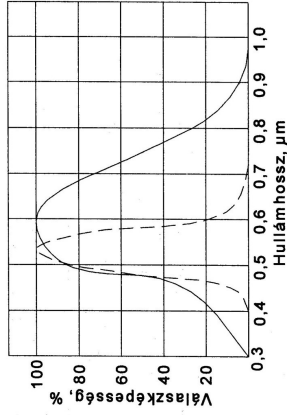
## FOTOELLENÁLLÁS



A meanderszerkezettel növelhető a hossz és csökkenthető a keresztmetszet így a sötétellenállás igen nagy lehet, tipikusan 10...100 Mohm.

56

## CdS FOTOELLENÁLLÁS



A Mullard ORP12 CdS fotoellenállás karakterisztikája. A szaggatott vonal az emberi szem hullámhossz-érzékenysége. A sötétellenállás kb. 10 Mohm, az ellenállás 50 lx megvilágításnál 2-3 kohm.

57

## ERŐSÍTÉS

Fontos jellemzője még a fotoellenállásnak (és általában minden fotódetektornak) az erősítés. Fotoellenállásnál az erősítés az elektródák között az időegység alatt áthaladó töltéshordozók számának és az időegység alatt elnyelt fotonok számának hányadosa. Egyszerű modell alapján az erősítés mint a keltett töltéshordozók élettartama és a futási idő (a töltéscsomagnak az eszközön való áthaladási ideje) viszonya adható meg. A fotoellenállás erősítése az élettartam-mozgékonyság szorzattal azaz  $T_n \mu_n$ -nel arányos, ugyanakkor az eszköz felső határfrekvenciája pedig a  $T_n$ -nel fordítva arányos.

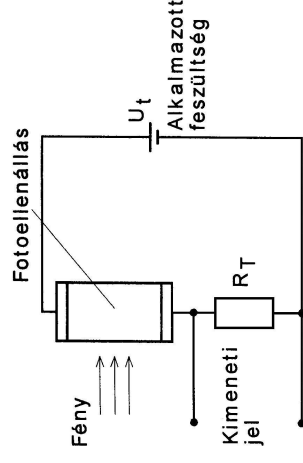
58

## FOTODETEKTOROK ERŐSÍTÉSE ÉS VÁLASZIDEJE

Fotódetektor	Erősítés	Válaszidő sec	Működési hő- mérséklet, K
Fotoellenállás	$1-10^6$	$10^{-3}-10^{-8}, 2-300$	
PN dióda	1	$10^{-11}$	300
PIN dióda	1	$10^{-8}-10^{-11}$	300
Fém-félvezető dióda	1	$10^{-11}$	300
Lavina fotodióda	$10^2-10^4$	$10^{-10}$	300
Bipoláris fototranzisztor	$10^2$	$10^{-8}$	300
Térvézérlésű fototranzisztor	$10^2$	$10^{-7}$	300

59

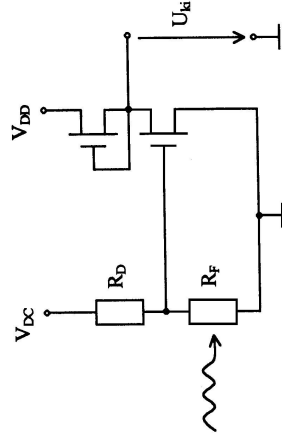
## FOTOELLENÁLLÁS MŰKÖDTETÉSE



A fotoellenállás áramgenerátoros meghajtást igényel. Mivel megvilágítva az ellenállás több (4-5) nagyságrenddel is változik, ezért a munkaelenállást a megvilágítási szintnek megfelelően kell átkapcsolni.

60

## FET-ES ILLESZTŐKAPCSOLÁS FOTOELLENÁLLÁSHOZ



VÉGE

A kapcsolás mind analóg, mind digitális jelekkel való működtetés esetén alkalmazható.