



# MIKROELEKTRONIKAI ÉRZÉKELŐK I

Dr. Pődör Bálint

BMF KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet  
és  
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet

## 5. ELŐADÁS (OPTIKAI SUGÁRZÁSÉRZÉKELŐK, 2. RÉSZ)

2008/2009 tanév 1. félév

1

# 5. ELŐADÁS

1. A megvilágított pn átmenet átmenet tulajdonságai
2. Fotodiódák
3. PIN fotodiódák
4. Lavina fotodiódák
5. Fototranzisztorok

2

## A FOTODIÓDA

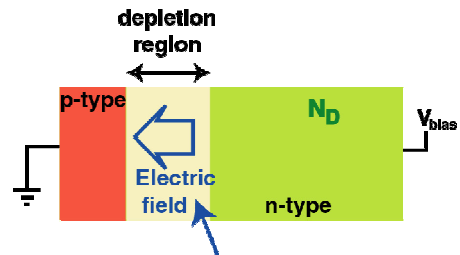
A fotodiódák, és az egykristályos napelemek lényegében pn-átmenetes eszközök. Fény hatására bennük fotoáram generálódik, mely hozzáadódik az ismert összefüggésekkel leírható diódaáramhoz

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

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

3

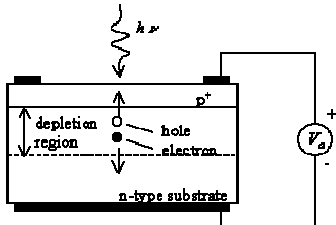
## PN ÁTMENET: BEÉPÍTETT ELEKTROMOS TÉR



Kiürített réteg és beépített elektromos tér záróirányban előfeszített pn-átmenetben

4

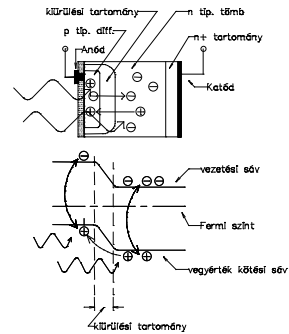
## A FOTOÁRAM GENERÁLÁSI MECHANIZMUSA



A fény által keltett töltéshordozók egy, a nyitóirányú árammal ellentétes irányú áramot hoznak létre.

5

## Elektron-folyamatok a megvilágított fényelemben



6

## Zárórteges fényelektromos hatás

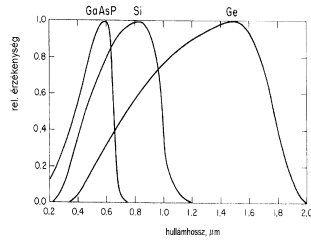
### Fényelem

külső tápforrás nélkül működik

### Fotodióda

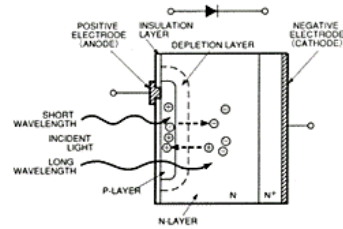
külső tápforrással működik

Félvezetők fényelem készítéshez



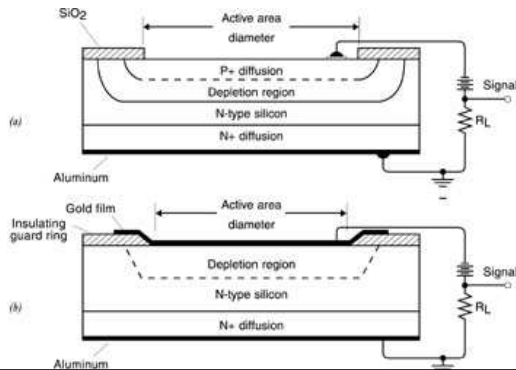
7

## PN-ÁTMENETES FOTODIÓDA



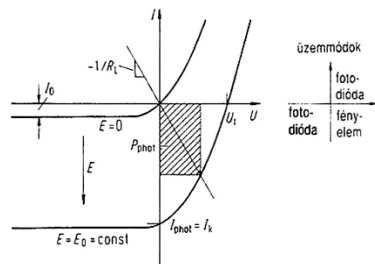
pn-átmenetes fotodióda felépítése. A fény által keltett elektron-lyuk párok a kiürített réteg elektromos terében szétválnak, az elektronok a katód (n+) a lyukak az anód (p) felé sodródnak. 8

## PN- ÉS FÉM-FÉLVEZETŐ (SCHOTTKY-) SI FOTODIÓDÁK



9

## MEGVILÁGÍTOTT PN-ÁTMENET ÁRAM-FESZÜLTÉG KARAKTERISZTIKÁJA



$I_{phot}$  rövidzárási fotoáram  $I_0$  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

10

## PN ÁTMENET ÁRAM-FESZÜLTÉG 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).

11

## A MEGVILÁGÍTOTT PN ÁTMENET

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 fényteltjesítménnyel.

12

## A MEGVILÁGÍTOTT PN ÁTMENET

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

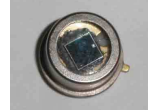
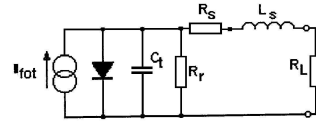
$$I = I_s \left( \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right) - I_{ph}$$

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

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

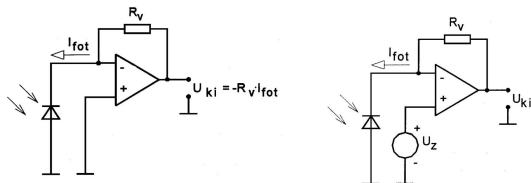
A megvilágított pn átmenet (és így a fotodióda) üresjárás feszültsége (fotofeszültség) legalább is erős megvilágításkor, logaritmikusan függ a fényintenzitástól. 13

## FOTODIÓDA HELYETTESÍTŐ KÉPE



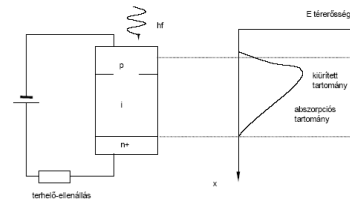
dióda – ideális dióda, áramgenerátor – fotoáram, kondenzátor – pn-átmenet kapacitása záróirányban, párhuzamos ellenállás – szivárgás, stb., soros ellenállás – félvezető chip nem kiürített tartománya, induktivitás – hozzávetések  
Rshunt 100 kom – 1 Gohm, Rseries 10 -500 ohm 14

## FOTOÁRAM MÉRÉSE



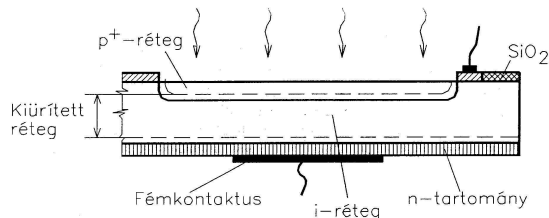
Fotodióda áram-feszültség átalakítása előfeszítés nélküli (rövidzár) illetve előfeszítéses üzemmódban. 15

## 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. 16

## PIN FOTODIÓDA FELÉPÍTÉSE



17

## PIN FOTODIÓDA 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 % ?

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

$R = 0,84 \text{ A/W}$ , illetve  $1 \text{ A/W}$ . Az érzékenység hullámhosszfüggése abból adódik, hogy  $\lambda$  növelésével egyre kisebb energiájú foton kelti az elektron-lyuk párokat. 18

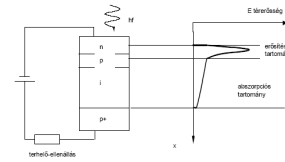
## PIN FOTODIÓDA

Az adott hullámhossztartományt (foton energiában 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 tulajdonságaik is vannak.

19

## LAVINA FOTODIÓDA

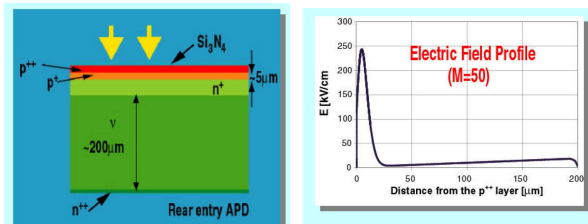


Lavina fotodióda (avalanche photodiode, APD)

Az ütközési ionizáció töltéshordozósokszorozódást hoz létre (erősítés)

20

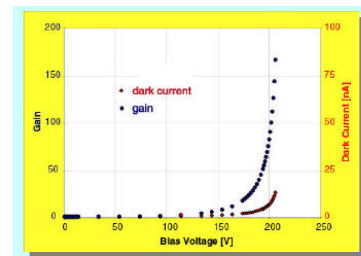
## LAVINA FOTODIÓDA



Si lavina fotodióda szerkezete, és az elektromos térerősség eloszlása

21

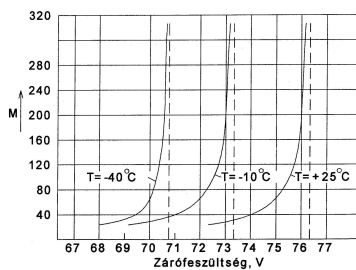
## LAVINA FOTODIÓDA



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

22

## LAVINA FOTODIÓDA



Si lavina fotodióda multiplikációs tényezője a zárófeszültség függvényében

23

## LAVINSOKSZORÓZÁSI TÉNYEZŐ

A lavinasokszorozási (multiplikációs) tényező empirikusan írható le

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

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

24

## LAVINA FOTODIÓDA: PÉLDA

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

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

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

A fotoáram

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

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

25

## PIN ÉS APD FOTODIÓDÁK

	Válaszidő [ns]	Hullámhossz [nm]	Maximális érzékenység hullámhossza [nm]	Érzékenység [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=1.50)	<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

26

## FOTOTRANZISZTOR

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

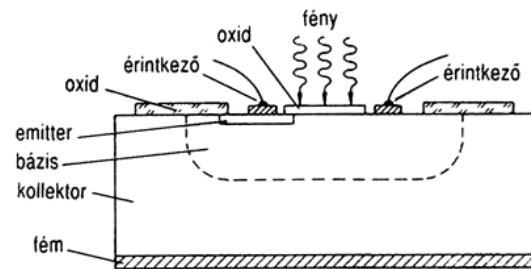
$$I_{\text{foto}}(\text{CE}) = (1 + \beta) I_{\text{foto}}(\text{BC}) = (1 + \beta) R P_{\text{opt}}$$

R - a kollektor-bázis dióda fotoérzékenysége.

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

27

## Si FOTOTRANZISZTOR FELÉPÍTÉSE



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

28

## 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, közbűlső finom átmenet nincs. Ilyenek a digitális leolvasók, jelenlét-érzékelők, fénySOROMPÓK, fordulatszám-érzékelők, stb.

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

29

## FOTOTRANZISZTOR

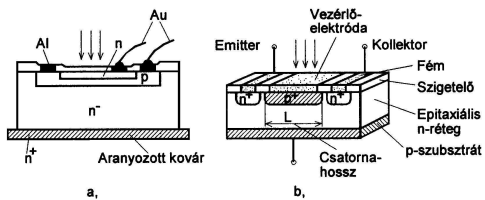
Foto-Darlington: többeszeres áramerősítés, de tovább romlik a linearitás.

Frekveciamenet: nagy bázis-kollektor kapacitás a meghatározó.

Fototranzisztor: néhány pusec  
Foto-Darlington: néhánysor 10 pusec  
(Fotodióda: ~nsec)

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

31

## 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 keltett 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.

32

## FOTODETEKTOROK ERŐSÍTÉSE ÉS VÁLASZIDEJE

Fotódetektor	Erősítés	Válaszidő sec	Működési hőmérséklet, K
Fotoellenállás	$1-10^6$	$10^{-3}-10^{-8}$	4,2-300
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
Térvezérlésű fototranzisztor	$10^2$	$10^{-7}$	300

33

## VÉGE

34