



MIKROELEKTRONIKAI ÉRZÉKELŐK II

Dr. Pődör Bálint

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

2. ELŐADÁS: SUGÁRZÁSÉRZÉKELŐK II

2008/2009 tanév 2. félév

1

2. ELŐADÁS: SUGÁRZÁSÉRZÉKELŐK II

1. Nem-mikroelektronikai (hagyományos) érzékelők.
2. Sugárzás és félvezetőanyag kölcsönhatása.
3. Félvezető és mikroelektronikai sugárzásdetektorok.
4. Illesztő áramkörök, töltésérzékeny és áramérzékeny erősítők. Sokcsatornás analízátor.
5. Sugárzás hatása elektronikai eszközökre.

2

"HAGYOMÁNYOS" SUGÁRZÁSÉRZÉKELŐK

A legfontosabb nem-mikroelektronikai sugárzásdetektorok:

Szcintillációs detektorok

Gáztöltésű detektorok, ezen belül

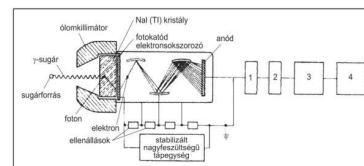
proporcionális számláló

Geiger-Müller cső

3

SZCINTILLÁCIÓS DETEKTOR

A szcintilláció látható és/vagy UV fény felvillanását jelenti. A szcintillációs detektor szcintillációs anyagból és fotoelektron-sokszorozóból áll.



A szcintillációs anyagon áthaladó γ -foton vagy elektron gerjeszti az atomokat, amelyek az alapállapotba való relaxációnál szcintillációs fotont bocsátanak ki, ezeket a PEM detektálja.

4

SZCINTILLÁCIÓS DETEKTOR

A detektor maga egy szcintillációs kristály (talliummal aktivált nátrium-jodid, NaI(Tl) a Röntgen-, bizmut-germanát (BGO), kadmium-volfrámát (CWO), illetve lutécium-oxiortoszilikát (LSO) a γ -tartományban), ami a beérkező sugárzás hatására a látható fény tartományába eső fényfelvillanást hoz létre. A fény egy fotoelektron-sokszorozóra jut, ami fényt elektromos jellé alakítja és fel is erősíti.

A fotoelektron-sokszorozó kimenetéről a jel egy nagy bemenő ellenállású előerősítőre jut, majd egy nagy erősítésű erősítő következik. Az erősítő láncot egy amplitúdó-diszkriminátor követi, amit már a kijelző egység követ. Az amplitúdó-diszkriminátor lehetővé teszi egy energia szint beállítását, ami alatti jeleket a kijelző egység figyelmen kívül hagy. Így csökkenthető a háttérsugárzás okozta zavarok. 5

5

SZCINTILLÁCIÓS DETEKTOR

Fotoelektron-sokszorozó (photoelectron multiplier, PEM)

Jó tulajdonságok:

egyedi fotonszámlálás (single photon counting)
rendkívül kis zaj

Hátrányok:

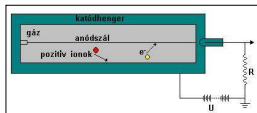
viszonylag nagy méret
mechanikai érzékenység
mágneses tér zavarja
nagy feszültséget (kV) igényel

Helyettesítése (perspektivikusan):

nagy felületű PIN és/vagy APD dióda

6

GEIGER-MÜLLER CSŐ/SZÁMLÁLÓ



Fém henger közepén, attól elszigetelten, egy vékony fémszál húzódik, amire 400-1600V-os feszültséget kapcsolunk. A fém henger alkohollal gőzzel és egyéb gázok keverékével van töltve vagy csak halogén gázokkal, attól függően, hogy a cső önkeltő típus-e vagy sem. Az ionizáló sugárzás hatására a töltőgáz ionizálódik és a rákapcsolt nagy feszültség miatt lavinaszerűen megindul rajta az áram. A csővel sorba kapcsolt munkaellenálláson ekkor feszültség impulzus jelenik meg, amit felerősítve a számláló egységre vezetnek.

7

G-M CSŐ ÜZEMMÓDjai

Proporcionális üzemmód:

Alacsony anódfeszültségnél az áramerősség arányos a primér részecskék által keltett töltéssel. Ekkor mérhető a részecske által a detektorban leadott energia.

Számláló üzemmód:

Nagy anódfeszültségnél az eszköz áram-feszültség karakterisztikája telítést mutat (plátó), minden ionizáló részecskénél azonos nagyságú impulzust keletkeztet.

8

SUGÁRZÁS ÉS (FÉLVEZETŐ)ANYAG KÖLCSÖNHATÁSA

Az érzékelőn akkor van kimenőjel, ha kölcsönhatás van az érzékelő anyaga és az érzékelendő jel, mennyiség között.

Félvezetők és EM sugárzás (γ -, Röntgen-, stb.) kölcsönhatása (három fő mechanizmus):

- Fotoeffektus (tipikusan $<0,25$ MeV fotonenergiánál)
- Compton szórási (néhány száz keV és néhány MeV közötti energiáknál)
- Elektron-pozitron párkeltés (kb. 1 MeV energia felett)

9

SUGÁRZÁSÉRZÉKELŐK

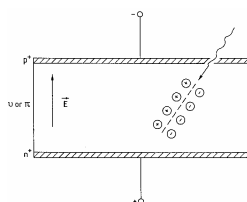
A legfontosabb és legelterjedtebb, nagyenergiájú EM sugárzás, illetve a nagyenergiájú részecske (nukleáris) sugárzás érzékelő a pin dióda.

A záróirányban előfeszített félvezető dióda rendkívül hatékonyan választja szét és gyűjti össze külön-külön a kiürített rétegben a nagyenergiájú sugárzás elnyelését kísérő ionizáció által keltett töltéshordozókat. Mivel a nagyenergiájú sugárzások abszorpciós tényezője nem túl nagy ($10^{-1} - 10$ cm⁻¹, összehasonlításképpen, a sávéli környékén a látható- vagy infravörös tartományban ez $10^4 - 10^6$ cm⁻¹), ezért az elegendően nagy elnyelési hossz csak igen nagy fajlagos ellenállású illetve erősen kompenzált félvezetőanyaggal érhető el.

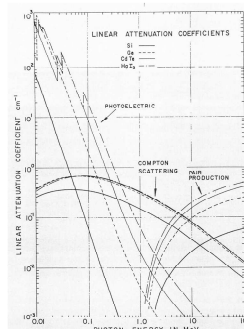
10

PN-ÁTMENETES NUKLEÁRIS RÉSZECSCKE ÉRZÉKELŐ

Pn-átmenetes (p⁺-n⁻ dióda) sugárzásérzékelő: kb. 3eV energia kelt egy elektron-lyukpárt, magasabb jelszint mint a klasszikus gáztöltésű érzékelőknél, jó linearitás széles energiatarományban, nagyobb érzékenység, kisebb helyfoglalás.



NAGYENERGIÁJÚ γ -SUGÁRZÁS ABSZORPCIÓS TÉNYEZŐJE



12

FOTOEFFEKTUS

Tipikusan < 0,25 MeV fotonenergiánál dominál. A foton elektron-lyuk párokat kelt:

$$N = E/\epsilon$$

N - a keltett e-h párok száma;
E - beeső γ -, Röntgen-, stb. foton energiája;
 ϵ - egy e-h pár keltéséhez szükséges energia.

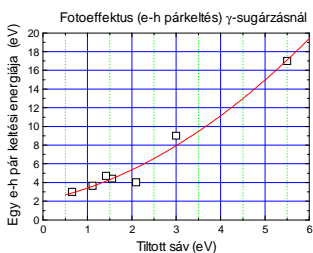
Az elnyelési mélység az atomok rendszámától Z^5 szerint függ.

$$\alpha = \text{const} \times (h\nu)^{-7/2} \rho_d Z^5$$

13

Félvezető anyag	Tiltott sáv (eV)	Energia-vesztés egy e-h párra	Rendszám Z
Ge	0,66	3,0	32
Si	1,12	3,65	14
CdTe	1,56	4,4	48, 52
GaAs	1,42	4,7	31, 33
SiC	3,0	9	14, 6
Hg ₂	2,1	4,2	80, 53
C (gyémánt)	5,5	17	6

14



Numerikus példa: 1 MeV energiájú γ -foton szilícium (Si) detektorban
 $N = 1 \times 10^6 / 3,65 = 2,74 \times 10^5$ elektron-lyuk párt kelt.
 A töltéscsomag össztöltése $Q = 4,4$ fCb.
 $C = 1$ pF kondenzátoron $U = Q/C = 44$ mV feszültséget hoz létre.

15

COMPTON SZÓRÓDÁS

Néhány 100 keV és néhány MeV között a meghatározó kölcsönhatási illetve elnyelési folyamat.

A Compton effektusnál a $h\nu$ energiájú foton mint részecske ütközik egy (nyugalomban lévő) elektronnal, és energiája egy részét annak átadja. Az ütközésben az elektron mozgási energiára és impulzusra tesz szert, a fotonnak megváltozik az impulzusa (iránya), és energiát veszítve csökken a frekvenciája ($h\nu'$). A $h\nu$ energiájú és h/c impulzusú foton ütközése az m_0c^2 nyugalmi tömegű és zérusimpulzusú elektronnal a relativisztikus mechanika törvényeivel (energia- és impulzus-megmaradás) írható le.

16

COMPTON SZÓRÓDÁS

A Compton effektus a fotoeffektus mellett a fény részecsketermészetének másik klasszikus kísérleti bizonyítéka, (fizikai Nobel-díj, 1927).

A foton a kölcsönhatásban nem nyelődik el, csak veszít az energiájából, majd újabb szóródás - vagy ha az energiája eléggé lecsökkent - fotoelektromos gerjesztés következhet.

17

ELEKTRON-POZITRON PÁR KÉPZŐDÉS

Nagy energiáknál ($E > 2m_0c^2 = 1,02$ MeV) elektron- pozitron párkeltés lehetséges. Ezek sorozatos ütközések miatt elveszítik energiájukat, majd a pozitron egyesül egy rácselektronnal, és két nagyenergiájú foton keletkezik, melyek Compton-szóródással nyelődnek el.

18

RÉSZECSEK-SUGÁRZÁS ELNYELÉSI MECHANIZMUSAI

A töltött részecskéket tartalmazó sugárzás (α -, β -, proton-sugárzás, stb.) Coulomb-kölcsönhatások sorozatát indítja el a szilárd test elektronjaival.

A β -sugárzás energiájának jelentős része az atomok gerjesztésére és ionizációjára fordítódik. Az atomok különböző elektronhéjairól elektronok lökődnek ki, és a belső pályákon így keletkezett helyekre a külső pályákról elektronok hullanak be, melyet a megfelelő elektromágneses hullám (látható fény, UV fény, vagy Röntgen-sugárzás kísér).

19

RÉSZECSEK-SUGÁRZÁS ELNYELÉSI MECHANIZMUSAI

A folyamatos kölcsönhatások következtében fékeződő elektron elektromágneses sugárzó, és így mozgási energiájának egy része folytonos spektrumú Röntgen-sugárzássá alakul.

A β -sugárzás anyagban való elnyelésére csak közelítőleg érvényes összefüggés:

$$I = I_0 \exp(-mx)$$

(x - rétegvastagság, m - abszorpciós együttható).

20

Semiconductor sensors

Semiconductors widely used for charged particle and photon detection based on ionisation - same principles for all types of radiation

What determines choice of material for sensor?

Silicon and III-V materials widely used
physical properties
availability
ease of use
cost

silicon technology is very mature
high quality crystal material
relatively low cost
but physical properties do not permit it to be used for all applications

21

FÉLVEZETŐK DETEKTOROKBAN

Félvezető anyag	ND - NA [cm-3]
Nagy tisztaságú Si (hpSi)	3x1010
Lítiummal (Li) kompenzált Ge vagy Si (77 K)	> 108
Nagy tisztaságú Ge (77 K) (hpGe)	> 5x109
CdTe, nagy tisztaságú	1012 - 1013
CdTe, kompenzált	< 1010
GaAs, epitaxiás réteg ($v < 200$ m)	1013
GaAs, tömb, félszigetelő ($v < 1$ mm))	1012
SiC	1015 - 1017
HgI2	félszigetelő
C (gyémánt)	szigetelő

22

Requirements on diodes for sensors

Operate with reverse bias

should be able to sustain reasonable voltage

larger E (V) = shorter charge collection time

Dark (leakage) current should be low

noise source, ohmic current = power

Capacitance should be small

noise from amplification $\sim C$, defined by

geometry, permittivity and thickness

circuit response time $\sim [R] \times C$

Photodetection

thin detector: high E but high C unless

small area

X-ray and charged particle detection

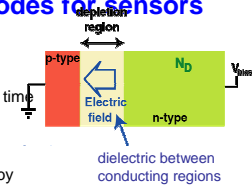
"thick" detectors required for many

applications

efficiency for x-rays

larger signals for energetic charged

particles



commercial packaged photodiodes

23

Silicon as a particle detector

Signal sizes

typical H.E. particle ~ 25000 e $300\mu\text{m}$ Si

10keV x-ray photon ~ 2800 e

no in-built amplification

$E <$ field for impact ionisation

Voltage required to deplete entire wafer thickness

$V_{\text{depletion}} \approx (q/2\epsilon)N_D d^2$ N_D = substrate doping concentration

$N_D \approx 10^{12} \text{ cm}^{-3} \Rightarrow \rho = (q\mu N_D)^{-1} \approx 4.5 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$

$V_{\text{depletion}} \approx 70\text{V}$ for $300\mu\text{m}$

electronic grade silicon $N_D > 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

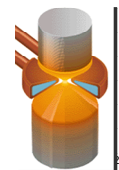
$N_D = 10^{12}$: $N_{\text{Si}} \sim 1$: 10^{13} ultra high purity!

further refining required

Float Zone method: local crystal melting with

RF heating coil

Ge	large crystals possible higher Z must cool for low noise
GaAs	less good material - electronic grade crystals less good charge collection



24

PIN DIÓDÁK MINT NUKLEÁRIS DETEKTOROK

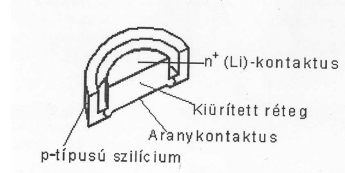
A félvezető sugárdetektorok lényegében pn-átmenetes, vagy p-i-n szerkezetű diódák, elvileg igen hasonlóak a fotodiódákhoz.

Specifikus különbségek:

- nagyobb rekombinációs veszteség, kisebb kvantum-hatásfok;
- kis elnyelési tényező, igen vastag kiürített rétegre van szükség.

25

Ge(Li) ÉS Si(Li) DETEKTOR



Li-iondrift technológiával készült detektor vázlatja.

"Driftelt" Ge(Li) és Si(Li) detektorok: lényegében PIN diódák. Az intrinsic réteget Li ionok elektromos térrel segített alacsony hőmérsékleti diffúziójával alakítják ki.

26

Ge(Li) ÉS Si(Li) DETEKTOR

A lítium I. oszlopbeli elem, igen kicsi az atomsugara, ezért rácsközi atomként épül be a félvezető kristályrácsába, ott ionizálva Li⁺ ionént donor, és így kompenzálja a kristály δ -típusú háttérszennyezőit. A Li⁺ ion a kristályrácsban annyira mozgékony, hogy a Ge(Li) detektoroknak még a tárolási hőmérséklete is jóval a szobahőmérséklet alatt van!

A Ge(Li) detektor természetesen csak alacsony hőmérsékleten (pl. 77 K) üzemeltethető. A Si(Li) detektort is 77 K-en szokás üzemeltetni, a zaj lecsökkentése céljából.

27

Ge(Li) ÉS Si(Li) DETEKTOR

A Li driftelt detektor univerzális, alkalmas részecske-sugárzás (pl. α -, β -sugárzás), vagy elektromágneses sugárzás (p-, Röntgen-sugárzás) érzékelésére és mérésére.

Ha csak a korpuszkuláris sugárzás érzékelése a cél, az ablakra igen vékony alumínium réteget kell felvinni, mely átengedi az α - és γ -részecskéket, de elnyeli a fotonokat, így a háttérzaj kiszűrhető.

28

Silicon microstrip detectors

Segment p-junction into narrow diodes
E field orthogonal to surface
each strip independent detector

Detector size
limited by wafer size < 15cm diameter

Signal speed
$\langle E \rangle \geq 100V/300\mu m$
p-type strips collect holes
 $v_{hole} \approx 15 \mu m/ns$

Connect amplifier to each strip
can also use inter-strip capacitance
& reduce number of amplifiers to share charge over strips

Spatial measurement precision
defined by strip dimensions and readout method
ultimately limited by charge diffusion $\sigma \sim 5-10\mu m$

29

JELFELDOLGOZÁS

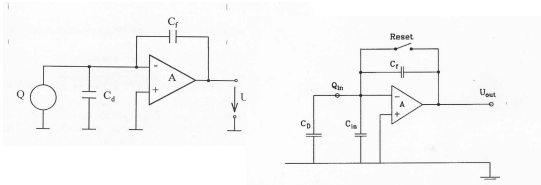
A záróirányban előfeszített pn átmeneten alapuló sugárzásérzékelők más típusú jelfeldolgozó áramkört igényelnek mint a hasonló szerkezeti kialakítású optikai sugárdetektorok.

A részecske- vagy kvantumdetektorban egyedi töltések, illetve töltéscsomagok keletkeznek, a töltésfelhalmozódás ideje nagyjából a kiürített rétegben való áthaladás ideje, tipikusan néhány nanosec – néhány tíz nanosec.

A töltéscsomag mérése kapacitív impedancia révén történhet.

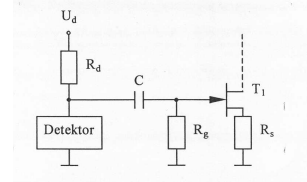
30

TÖLTÉSÉRZÉKENY ERŐSÍTŐ



31

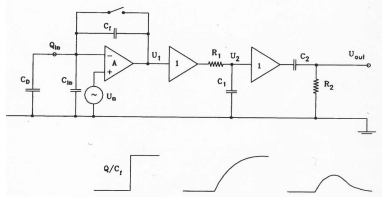
FET ELŐERŐSÍTŐ



Félvezetető detektor illesztése nagy bemeneti impedanciájú erősítőhöz.

32

TÖLTÉSÉRZÉKENY ERŐSÍTŐ

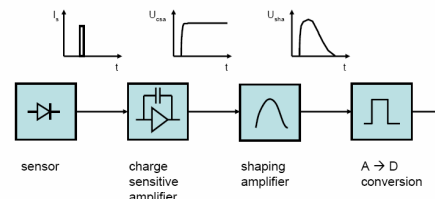


Töltésérzékeny erősítő jelének zavarszűrése és a jelalak formálása RC és CR szűrővel. A két egységnyi erősítésű fokozat szerepe a töltésérzékeny erősítő, az integráló tag (RC), és a differenciáló tag (CR) funkcióinak szétválasztása.

33

DETECTOR SIGNAL PROCESSING

- signal chain with function blocks (generic)



34

CdTe (CdZnTe) ALAPÚ ENERGIA-SPEKTRÁLIS ÉRZÉKELŐ



35

CdTe (CdZnTe) ALAPÚ ENERGIA-SPEKTRÁLIS ÉRZÉKELŐ

The XR-100T-CdTe and -CZT are high performance X-ray and g-ray detection systems. They are based upon planar semiconductor radiation detector, mounted on a thermoelectric cooler inside a small hybrid package. Thermoelectric cooling permits very high energy resolution without cryogenic cooling. This system is well-suited for X-ray and γ -ray spectroscopy applications requiring high energy resolution but where the use of liquid nitrogen is inconvenient or impossible. They are finding increasing applications in fields as diverse as chemical analyses using X-Ray Fluorescence under field conditions, isotopic measurements for environmental remediation and for national security measurements, medical uses, and many research uses.

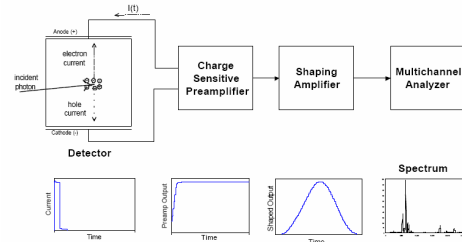
36

CdTe (CdZnTe) ALAPÚ ENERGIA-SPEKTRÁLIS ÉRZÉKELŐ



37

SOKCSATORNÁS ANALIZÁTOR



Schematic diagram of the detector and electronics. Typical outputs from each stage of the processing electronics are sketched below.

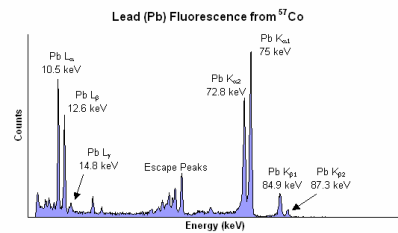
38

MULTICHANNEL ANALYZER: ENERGY SPECTRUM

In most applications, one is interested in measuring the deposited energy, which is proportional to the total charge rather than the current. Charge is the integral of current so the detector is attached to a chargesensitive preamplifier, which produces an output pulse with a voltage step directly proportional to the time integral of the current. The preamp output is then sent to a shaping amplifier, which shapes the pulse to allow accurate measurements under realistic conditions, amplifies them, and filters out noise to maximize the signal-to-noise ratio. The shaped and amplified pulse, a voltage pulse with peak amplitude proportional to the deposited energy, is then sent to a multichannel analyzer, which measures the peak amplitude of many pulses, producing a histogram showing the number of pulses with amplitude measured within the range of each channel. This is the output spectrum.

39

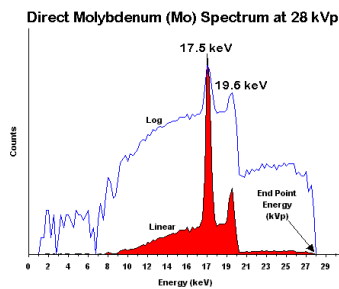
ÓLOM (Pb) RÖNTGEN SPEKTRUMA



Representative spectrum from Pb X-Rays measured using an Amptek XR-100T-CdTe system.

40

Mo RÖNTGEN-FORRÁS SPEKTRUMA



41

VÉGE

(A MÁSODIK ELŐADÁSNAK)

42