

ÉRZÉKELŐK

Dr. Pődör Bálint

Óbudai Egyetem KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet

14. ELŐADÁS: SUGÁRZÁSÉRZÉKELŐK II



2010/2011 tanév 2. félév 1 1

14. 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 analizátor.
5. Sugárzás hatása elektronikai eszközökre.

2 2

"HAGYOMÁNYOS" SUGÁRZÁSÉRZÉKELŐK

A legfontosabb nem-mikroelektronikai sugárzásdetektorok:

Szcintillációs detektorok

Gáztöltésű detektorok, ezen belül

proporcionális számláló

Geiger-Müller cső

3 3

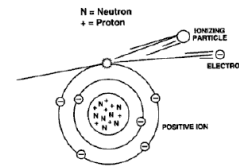
Sugárzások hatásai

Alfa és Beta sugárzások: részecskesugárzás

Ionizációs hatás:

a sugárzás a gázok atomjait ionizálja, így vezetőképességüket megváltoztatja. Fajtái:

- Ionizációs kamrák, pl. Geiger-számláló
- Proporcionális számláló (lavina üzemmód)



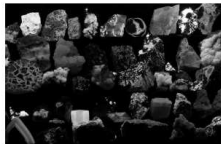
Sugárzások hatásai

Alfa és Beta sugárzások: részecskesugárzás

Fénykibocsátás:

a sugárzás egyes anyagokban többlépcsős kölcsönhatások eredményeképpen fotonemissziót eredményez. Ez a jelenség a fluoreszcencia, melynek során a gerjesztett atomok viszonylag nagy időállandóval alacsonyabb energiájú állapotba visszajutva fotont emittálnak.

A fluoreszcencia kis időállandójú esete a szcintilláció (szcintillációs detektorok). Hagyományos szcintillációs anyag a nátrium-jodid, újabban alkalmazott pl. a bizmut-germanát, a kadmium-volfuranát és a lutécium-oxiortoszilikát.



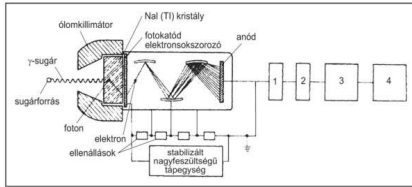
Sugárzások hatásai

Alfa és Beta sugárzások: részecskesugárzás

Szabad töltéshordozó generáció szilárd anyagokban: a félvezető anyagokban a töltéshordozók a vezetéshez szükséges szabad állapotok megfelelő energiaszintre kerülnek, amelyet az anyag ellenállásának megváltozása, illetve hetero- és homoátmenetekkel létrehozott eszközökben a karakterisztika eltolódása alapján lehet detektálni.

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 relaxáció-nál szcintillációs fotont bocsájtanak ki, melyeket a PÉM detektál. 7

SZCINTILLÁCIÓS DETEKTOR

A detektor maga egy szcintillációs kristály (talliummal aktivált nátrium-jodid, NaI(Tl) a Röntgen-, bizmut-germanát (BGO), kadmium-volframát (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 csökkenthetők a háttérsugárzás okozta zavarok. 8

SZCINTILLÁCIÓS DETEKTOR

Fotoelektron-sokszorozó (photoelectron multiplier, PEM)

Jó tulajdonságok:

egyedi fotonszámolás (single photon counting)
rendkívül kis zaj

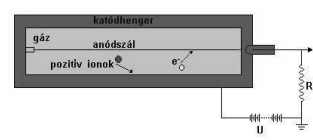
Hátrányok:

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

Helyettesítése (perspektivikusan):

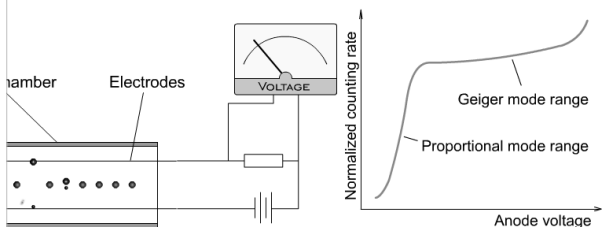
nagy felületű PIN és/vagy APD dióda 9

GEIGER-MÜLLER CSŐ/SZÁMLÁLÓ



Fém henger közepén, attól elszigetelten, egy vékony fémszál húzódik, amire 400-1600V-os feszültséget kapcsolunk. A fém henger alkohol 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.

chamber filled with a specially optimized gas mixture. The basic device is called counters are operated at voltages high enough for multiplication; thus, the output energy of the incident particle. Geiger counters are operated at higher voltages, in the 3, where the collected charge is entirely independent of the amount of initial



reszecskenel azonos nagysagu impulzust keletkezik. 11

DÓZISTELJESÍTMÉNY MÉRÉS

A Geiger-Müller számlálót dózisteljesítmény mérésre szokták beszállítani, vagy pedig CPM-re. Ez a Count Per Minute rövidítése, ami a percenkénti beütések számát jelöli. Utóbbi esetben a Geiger-Müller cső adatlapjáról kell kinézni, hogy az adott CPM érték mekkora dózisteljesítménynek felel meg.



12

SUGÁRZÁS ÉS (FÉLVEZETŐ)ANYAG KÖLCSÖNHATÁSA

Az érzékelő 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-positron párkeltés (kb. 1 MeV energia felett)

13

13

SUGÁRZÁSÉRZÉKELŐK

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

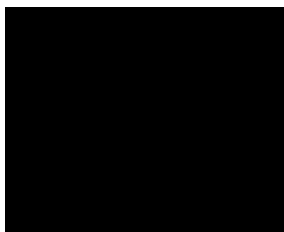
A záróirányban előfeszített félvezető dióda rendkívül hatékonyan választja szét és gyűjti össze külön-külön a kiürített rétegben a nagyenergiájú sugárzás elnyelését kísérő ionizáció által keltett töltéshordozókat. Mivel a nagyenergiájú sugárzások abszorpciós tényezője nem túl nagy ($10^{-1} - 10$ cm^{-1} , összehasonlításképpen, a sávil 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.

14

14

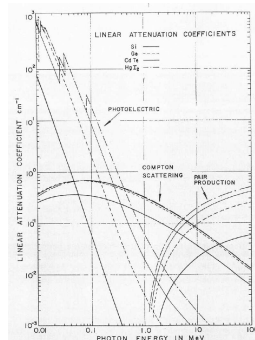
PN-ÁTMENETES NUKLEÁRIS RÉSZECSCKE ÉRZÉKELŐ

Pn-átmenetes (p-n-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.



15

NAGYENERGIÁJÚ γ -SUGÁRZÁS ABSZORPCIÓS TÉNYEZŐJE

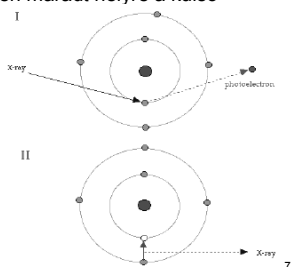


16

16

FOTOEFFEKTUS

Tipikusan $< 0,25$ MeV fotonenergiánál dominál. Fotoelektromos-effektus: a beeső foton egy belső héjon lévő elektront út ki. Az üresen maradt helyre a külső héjakról történik feltöltés, amely szekunder foton-emisszióval jár.



7

FOTOEFFEKTUS

A foton elektron-lyuk párokat kelt:

$$N = E/\epsilon$$

N - a keltett e-h pár 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.

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

18

18

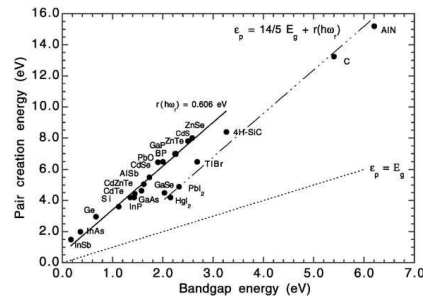
ELEKTRON-LYUK PÁRKELTÉSI ENERGIA

| Févezető 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 |
| HgI ₂ | 2,1 | 4,2 | 80, 53 |
| C (gyémánt) | 5,5 | 17 | 6 |

19

19

ELEKTRON-LYUK PÁRKELTÉSI ENERGIA



Average energy to create an electron-hole pair as a function of band-gap energy for a selection of semiconductors

ELEKTRON-LYUK PÁRKELTÉS

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.

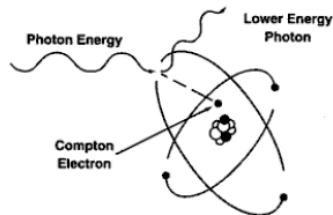
C = 1 pF kondenzátoron $U = Q/C = 44$ mV feszültséget hoz létre.

21

21

COMPTON SZÓRÓDÁS

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



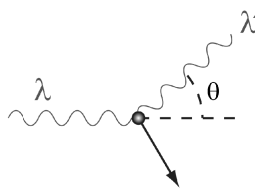
Compton-effektus: a beeső fotonok az atomok külső héján lévő elektronokon szóródnak, az atomot ionizálva szabad elektronokat keltnek.

22

22

COMPTON SZÓRÓDÁS

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 $m_0 c^2$ nyugalmi tömegű és zérusimpulzusú elektronnal a relativisztikus mechanika törvényeivel (energia- és impulzus-megmaradás) írható le.



23

23

COMPTON SZÓRÓDÁS

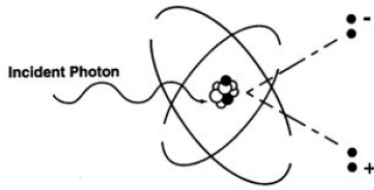
A Compton effektus a fotoeffektus mellett a fény részecsketermészetének másik klasszikus kísérleti bizonyítéka, (fizikai Nobel-díj, 1927).

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

24

24

ELEKTRON-POZITRON PÁR KÉPZŐDÉS



Nagy energiáknál ($E > 2m_0c^2 = 1,02 \text{ MeV}$) 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.

25

25

RÉSZECSCKE-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.

26

26

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).

27

27

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

28

28

FÉLVEZETŐK DETEKTOROKBAN

| Félvezető anyag | $N_D - N_A$ [cm^{-3}] |
|---|----------------------------------|
| Nagy tisztaságú Si (hpSi) | 3×10^{10} |
| Lítiummal (Li) kompenzált Ge vagy Si (77 K) | $> 10^8$ |
| Nagy tisztaságú Ge (77 K) (hpGe) | $> 5 \times 10^9$ |
| CdTe, nagy tisztaságú | $10^{12} - 10^{13}$ |
| CdTe, kompenzált | $< 10^{10}$ |
| GaAs, epitaxiás réteg ($v < 200 \text{ m}$) | 10^{13} |
| GaAs, tömb, félszigetelő ($v < 1 \text{ mm}$) | 10^{12} |
| SiC | $10^{15} - 10^{17}$ |
| HgI ₂ | félszigetelő |
| C (gyémánt) | szigetelő |

29

29

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

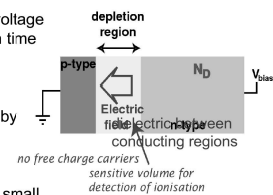
noise from amplification $\sim C$, defined by geometry, permittivity and thickness
circuit response time $\sim [R] \times C$

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

30

30

Silicon as a particle detector

Signal sizes
 typical H.E. particle ~ 25000 e 300µm Si
 10keV x-ray photon ~ 2800e

no in-built amplification
 $E <$ field for impact ionisation

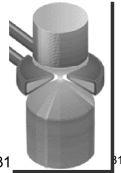
Voltage required to deplete entire wafer thickness
 $V_{depletion} \approx (q/2\epsilon)N_b d^2$ N_b = substrate doping concentration
 $N_b \approx 10^{12} \text{ cm}^{-3} \Rightarrow \rho = (q\mu N_b)^{-1} \approx 4.5 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$
 $V_{depletion} \approx 70 \text{ V}$ for 300µm

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

$N_b = 10^{12}$; $N_{Si} \sim 1 : 10^{19}$ 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 |



PIN DIÓDÁK MINT NUKLEÁRIS DETEKTOROK

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

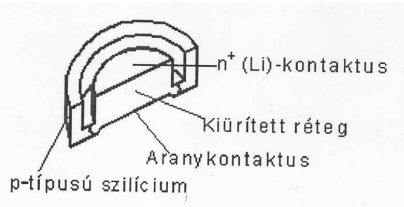
Specifikus különbségek:

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

32

32

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.

33

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^+ ionként donor, és így kompenzálja a kristály p-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.

34

34

Ge(Li) ÉS Si(Li) DETEKTOR

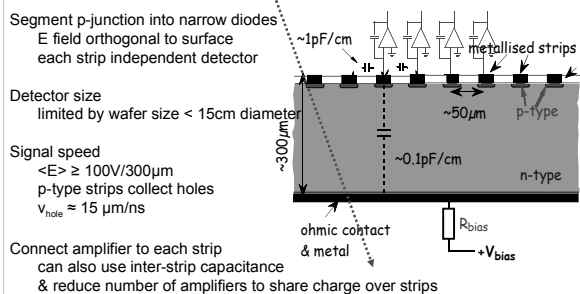
A Li driftelt detektor univerzális, alkalmas részecske-sugárzás (pl. α -, β sugárzás), vagy elektromágneses sugárzás (ρ -, Röntgen-sugárzás) érzékelésére és mérésére.

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.

35

35

Silicon microstrip detectors



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

36

36

JELFELDOLGOZÁS

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

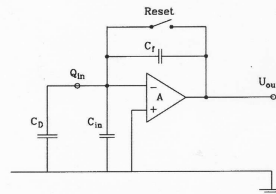
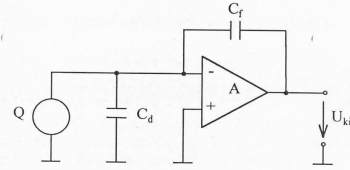
A részecske- vagy kvantumdetektorban egyedi töltések, illetve töltéscsomagok keletkeznek, a töltésfelhalmozódás ideje nagyjából a kiürített rétegben való áthaladás ideje, tipikusan néhány nanosec – néhány tíz nanosec.

A töltéscsomag mérése kapacitív impedancia révén történhet.

37

37

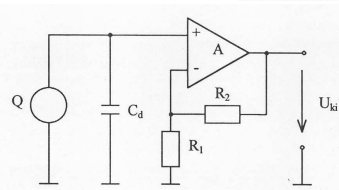
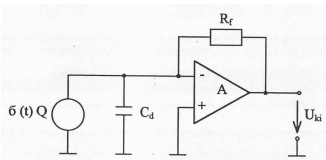
TÖLTÉSÉRZÉKELÉS



38

38

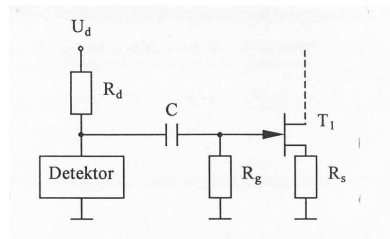
TÖLTÉSCSOMAG ÉRZÉKELÉSE



39

39

FET ELŐERŐSÍTŐ

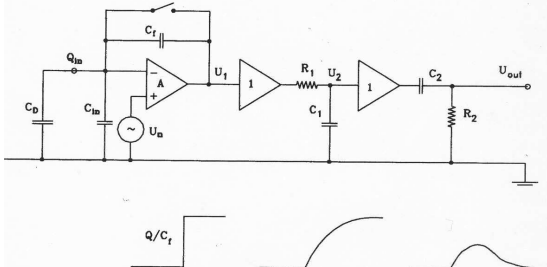


Félvezető detektor illesztése nagy bemeneti impedanciájú erősítőhöz.

40

40

TÖLTÉSÉRZÉKÉNY ERŐSÍTŐ

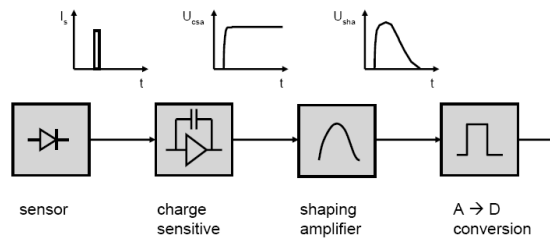


Töltésérzékes erősítő jelének zavarcsökkentése és a jelalak formálása RC és CR szűrővel. A két egységnyi erősítésű fokozat szerepe a töltésérzékes erősítő, az integráló tag (RC), és a differenciáló tag (CR) funkcióinak szétválasztása.

41

Detector Signal Processing

- signal chain with function blocks (generic)



sensor

charge sensitive amplifier

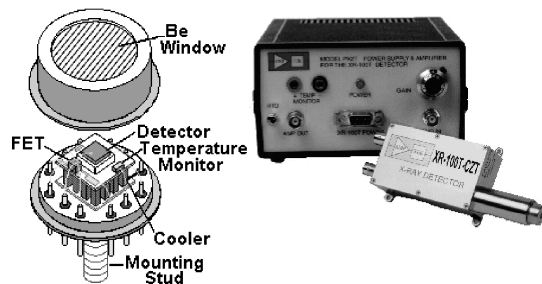
shaping amplifier

A → D conversion

Silicon detector radiation damage

- As with all sensors, prolonged exposure to radiation creates some permanent damage - two main effects
 - Surface damage** Extra positive charge collects in oxide
 - all ionising particles generate such damage
 - MOS devices - eg CCDs - are particularly prone to such damage
 - Microstrips - signal sharing & increased interstrip capacitance - noise
- Bulk damage** atomic displacement damages lattice and creates traps in band-gap
 - only heavy particles (p, n, π , ...) cause significant damage
 - increased leakage currents - increased noise
 - changes in substrate doping

CdTe (CdZnTe) ALAPÚ ENERGIA-SPEKTRÁLIS ÉRZÉKELŐ



CdTe (CdZnTe) ALAPÚ ENERGIA-SPEKTRÁLIS ÉRZÉKELŐ

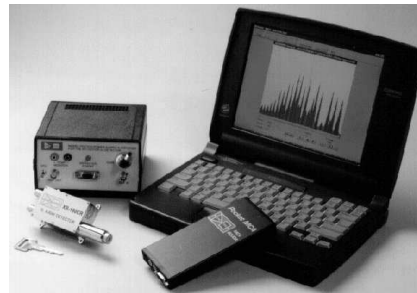
High performance X-ray and γ -ray detection systems based upon planar semiconductor radiation detector, mounted on a thermoelectric cooler inside a small hybrid package.

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.

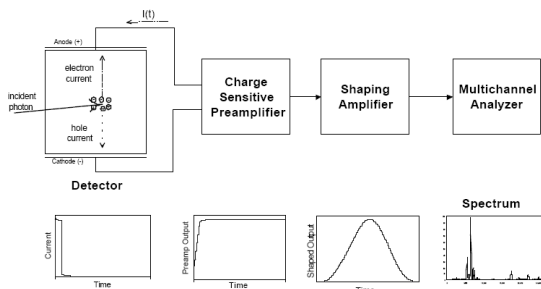
Fields of application:

- chemical analyses using X-Ray Fluorescence under field conditions,
- isotopic measurements for environmental remediation,
- medical uses,
- for national security measurements,
- etc.

CdTe (CdZnTe) ALAPÚ ENERGIA-SPEKTRÁLIS ÉRZÉKELŐ



SOKCSATORNÁS ANALIZÁTOR



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

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 charge-sensitive 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. T

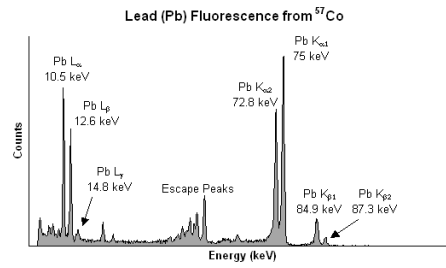
MULTICHANNEL ANALYZER: ENERGY SPECTRUM

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.

49

49

ÓLOM (Pb) RÖNTGEN SPEKTRUMA

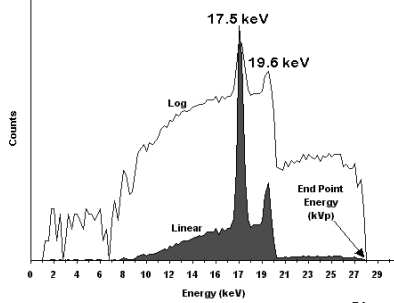


Representative spectrum from Pb X-Rays measured using an Amptek XR-100T-CdTe system. 50

50

Mo RÖNTGEN-FORRÁS SPEKTRUMA

Direct Molybdenum (Mo) Spectrum at 28 kVp



51

51

VÉGE

52

52