



MIKROELEKTRONIKAI ÉRZÉKELŐK II

Dr. Pődör Bálint

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

1. ELŐADÁS

2008/2009 tanév 2. félév

1

1. ELŐADÁS

1. Általános bevezetés.
2. A második félév tematikája.
3. Sugárzások és sugárzásérzékelők I.

2

A 2. FÉLÉV TEMATIKAI VÁZLATA ÉS ISMERETANYAGA

1. Sugárzásérzékelők. Sugárzás intenzitás és besugárzás (dózis) alapfogalmi és mértékegységei. Radioaktív, nukleáris és ionizáló sugárzások tulajdonságai, biológiai és élettani hatások. Sugárzás és anyag kölcsönhatása, a sugárzás-érzékelés fizikai elvei. Félvezető és mikroelektronikai sugárzásérzékelők és elektronikus áramkörök.

2. Gázérzékelés és gázérzékelők. Érzékelési elvek és folyamatok. Ellenállás/vezetés típusú eszközök, polimer és fénoxid gázérzékelők. Gázadszorpció a felületen, fizikai és kémiai jelenségek. Piezoelektromos hatás, tömbi piezoelektromos (kvarc mikromérleg) és felületi akusztikus hullámú gázérzékelők. Optikai spektroszkópiai módszerek.

4

A 2. FÉLÉV TEMATIKAI VÁZLATA ÉS ISMERETANYAGA

3. Kémiai érzékelők. Ionérzékelők, nedvesség és páratartalom-érzékelők, pH érzékelők. Működési elvek, az érzékelés fizikai-kémiai folyamatai. FET tranzistoros kémiai érzékelők. Mikroelektronikai katalitikus érzékelők. Optikai spektroszkópiai és mikrohullámú módszerek.

4. Kémiai- és gázérzékelő mátrixok: illat- illetve szagérzékelők. Felhasznált érzékelőtípusok. Az "elektronikus orr" mint intelligens érzékelő rendszer elve, funkcionális felépítése és működése. Ízérezékelés elektronikus úton.

A 2. FÉLÉV TEMATIKAI VÁZLATA ÉS ISMERETANYAGA

5. Száloptikai érzékelők. Fotonikai alapok, fényvezető szálak alapvető tulajdonságai. Érzékelési elvek és érzékelő konstrukciók. Intrinsic és extrinsic száloptikai szenzorok, interferometriás érzékelők.

6. Orvosbiológiai érzékelők. Speciális követelmények és tulajdonságok, csoportosítás. Mechanikai és kémiai érzékelők orvosbiológiai alkalmazásai. Radiológiai nukleáris detektorok, képalkotás.

7. Bioérzékelők. Elméleti alapok és csoportosítás. Bioérzékelők általános felépítése, alkalmazási példák.

5

A 2. FÉLÉV TEMATIKAI VÁZLATA ÉS ISMERETANYAGA

8. Beavatkozók (aktuátorok) és mikro/nano-elektromechanikai eszközök (MEMS és NEMS). Piezoelektromos, magnetostrikciós, stb. beavatkozók. MEMS és NEMS. Mikromechanikai eszközök kialakítása felületi megmunkálással. Alkalmazási példák, mikromechanikai szelepek, szivattyúk, mikrofluidika, mikrokapcsolók, mikropozicionálás, stb. Lab-on-chip.

6

KÖTELEZŐ IRODALOM

Hahn Emil, Harsányi Gábor, Lepsényi Imre, Mizsei János, *Érzékelők és beavatkozók*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1999.

Szentiday Klára, Dávid Lajos: *Mikroelektronikai szenzorok és alkalmazástechnikájuk*, Marktech, Budapest, 2000.

Inzelt György, *A mérőkötől a nanomérlegig*, *Természet Világa* **134** (9) 404 (2003).

Mizsei János, Kolonits Pálné, *Vastagréteg technológiával megvalósítható gázérezékelők*, *Mérés és Automatika* **32** (4) 143 (1984).

Riesz Ferenc, *Korszerű fotodiódák vegyület-félvezetőkkel*, *Elektronikai Technológia - Mikrotechnika* **29** (1) 1 (1990).

Szabó János, *Fényvezető szálas érzékelők*, *Mérés és Automatika* **32** (4) 137 (1984).

Vásárhelyi Gábor, és tsai, *Tapintásérzékelő tömbök – tervezés és jelfeldolgozás*, *Híradástechnika* **62** (10) 47 (2007).

AJÁNLOTT IRODALOM

S. M. Sze (szerk.): *Semiconductor Sensors*, Wiley, New York, 1994.

Mojzes Imre (szerk.): *Mikroelektronika és mikroelektronikai technológia*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1994. (6. fejezet, 243-256 old., 12.1-12.3. fejezet, 383-393 old.)

Mizsei János: *Félvezetős kémiai érzékelők*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1987.

Lajta György, Szép Iván (szerk.): *Fénytváltozó rendszerek és elemeik*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1987. (5. fejezet, 219-266 old. Fénydetektorok fizikája és technológiája.)

Mojzes Imre, Kökényesi Sándor: *Fotonikai anyagok és eszközök*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1997. (3.3. fejezet, 163-178 old., 6.3. fejezet, 289-305 old.)

8

SUGÁRZÁSOK ÉS SUGÁRZÁSÉRZÉKELŐK

1. A nukleáris és nagyenergiájú (ionizáló) sugárzások fajtái (α -, β -, neutron-, proton-, Röntgen- és γ -sugárzás).
2. Sugárzási intenzitás és besugárzás (dózis) mértékegységei.
3. Az (ionizáló) sugárzás (biológiai és élettani) hatásai.
4. Sugárzás és anyag kölcsönhatása. Érzékelési és mérési elvek.
5. Félvezető és mikroelektronikai sugárzásdetektorok.
6. Illesztő áramkörök, töltésérzékeny és áramérzékeny erősítők. Sokcsatornás analízátor.
7. Sugárzás hatása elektronikai eszközökre.

9

NUKLEÁRIS SUGÁRZÁSOK: TÖRTÉNETI VISSZATEKINTÉS

1896 – the birth of nuclear physics
Bequerel discovered radioactivity in uranium compounds
Rutherford showed the radiation had three types
Alpha (^4He nucleus)
Beta (electrons)
Gamma (high-energy photons)

1911 – Rutherford, Geiger and Marsden performed scattering experiments
Established the point mass nature of the nucleus
Nuclear force was a new type of force

1919 – Rutherford and coworkers first observed nuclear reactions in which naturally occurring alpha particles bombarded nitrogen nuclei to produce oxygen

1932 – Cockcroft and Walton first used artificially accelerated protons to produce nuclear reactions

1932 – Chadwick discovered the neutron
1933 – the Curies discovered artificial radioactivity

1938 – Hahn and Strassman discovered nuclear fission

1942 – Fermi achieved the first controlled nuclear fission reactor

10

SUGÁRZÁSOK FAJTÁI

A sugárzásérzékelők elektromos jellel alakítják át a rájuk beeső sugárzást, mely jel adatgyűjtés, adatfeldolgozás és adattárolás céljaira felhasználható.

Egy érzékelő kimenetén csak akkor jelenik meg kimenőjel, ha kölcsönhatás jön létre az érzékelő anyaga és az érzékelendő mennyiség között.

Ezért célszerű áttekinteni a sugárzások fajtáit és azok hatásait, tovább a detektoranyagok, elsősorban a félvezetők és a különféle sugárzások kölcsönhatásait.

11

SUGÁRZÁSOK FAJTÁI

Sugárzások csoportosítása:

elektromágneses (EM) sugárzás,
neutronok,
(gyors) elektronok (és pozitronok!),
töltött nehéz részecskék.

Az elektromágneses sugárzás (fotonok) és a neutronok semlegesek, nem szállítanak töltést, a (gyors) elektronok és a töltött nehéz részecskék töltéssel rendelkeznek, így töltést szállítanak.

12

SUGÁRZÁSOK FAJTÁI

Egy, némileg különböző csoportosítás:

Részecske- (korpuzkuláris) sugárzás: elektronok, protonok, neutronok, (ionizált) atomok.

Elektromágneses sugárzás: rádió (RF)- mikro- és mm-es hullámok, fény (infravörös (IR), látható, ultraibolya (UV)), Röntgen-sugárzás (lágy és kemény), γ -sugárzás.

Radioaktív sugárzás: a radioaktív bomlás során az atommagból kilépő sugárzás.

Mindenfajta sugárzás atomi vagy nukleáris folyamatokban keletkezik, és többnyire hasonló módszerek és technikák alkalmazhatók detektálásukra és érzékelésükre.

13

RADIOAKTÍV SUGÁRZÁS

A radioaktív sugárzások instabil atommagok bomlásakor keletkeznek.

α -sugarak: néhány MeV energiájú kétszeres töltésű 4He atommagok (két proton és két neutron).

β -sugarak: keV-MeV energiájú elektronok elektronok illetve pozitronok.

γ -sugarak: keV-MeV energiájú fotonok ($1 - 0,001$ nm).

neutron-sugarak: nagyobb rendszámú elemek hasadásakor (tipikusan atomreaktor vagy atombomba).

14

RADIOAKTIVITÁS FELFEDEZÉSE



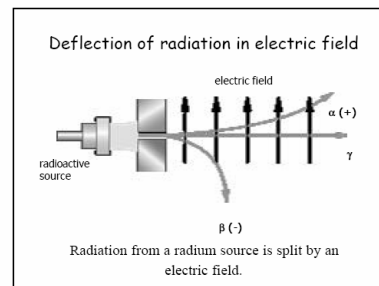
Antoine Becquerel
1903 Nobel Prize in Physics
for discovering radioactivity



Image of Becquerel's photographic plate which has been fogged by exposure to radiation from a uranium salt. The shadow of a metal Maltese Cross placed between the plate and the uranium salt is clearly visible. (1896)

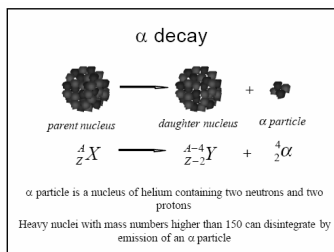
15

RADIOAKTÍV SUGÁRZÁSOK FAJTÁI



16

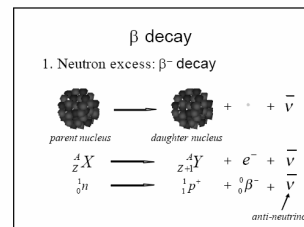
ALFA-BOMLÁS ÉS SUGÁRZÁS



α -sugarak: néhány MeV energiájú kétszeres töltésű 4He atommagok (két proton és két neutron). Hatótávolsága levegőben kb. 4 cm. Csekély áthatóképeség, már egy papírlap is felfogja, illetve leárnyékolja.

17

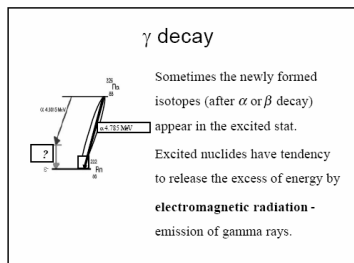
BETA-BOMLÁS ÉS SUGÁRZÁS



β -sugarak: keV-MeV energiájú elektronok elektronok illetve pozitronok. Hatótávolsága lényegesen nagyobb (mint az α -é) könnyű elemekből álló közegben (pl. testszövet). Nehéz elemekből álló anyagban (vas, ólom) csak néhány mm. Alumínium lemez felfogja illetve, leárnyékolja.

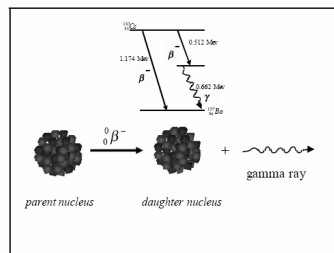
18

GAMMA-BOMLÁS ÉS SUGÁRZÁS



19

GAMMA-BOMLÁS ÉS SUGÁRZÁS



γ -sugarak: keV-MeV energiájú fotonok (1 - 0,001 nm).
Mivel semleges, gyengén lép a közeggel kölcsönhatásba, hatótávolsága nagy. Pl. betonfalon is áthatol.

20

NEUTRON SUGÁRZÁS

neutron-sugarak: nagyobb rendszámú elemek hasadásakor keletkeznek (tipikusan atomreaktor vagy atombomba).

Energiatartomány igen széles, néhány 10 meV (termikus neutronok), néhány MeV (magreakciók) néhány 10 MeV (részecskegyorsítók).

21

SUGÁRZÁSMÉRÉS, MÉRTÉKEGYSÉGEK

1. A sugárzás forrására vonatkozó mértékegységek.
2. A sugárzás elnyelésére (dózis) vonatkozó mértékegységek.

SI és tradicionális (ma már nem szabványos) mértékegységek egyaránt használatosak.

22

AKTIVITÁS

Egy sugárforrás erősségét az *aktivitás* jellemzi, ez az egységnyi idő (1 sec) alatt lejátszódó bomlások száma, SI egysége a *becquerel* (Bq). (Henri Becquerel francia fizikus 1852-1908, a radioaktivitás felfedezője).

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ bomlás/sec.}$$

Régi egysége a *curie* (Ci):

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ bomlás/sec} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq.}$$

A becquerel nagyon kis egység!

Fajlagos aktivitás (radiológiai koncentráció) Bq/m³ illetve Ci/lit vagy Ci/cm³.

23

BOMLÁSI TÖRVÉNY

A radioaktív bomlás törvénye (az aktivitás időbeli csökkenése)

$$a(t) = a_0 \exp(-\lambda t)$$

Felezési idő: a T_f felezési idő elteltével az aktivitás a kiindulási érték felére csökken.

$$T_f = \ln 2 / \lambda$$

Részecskeszámláló műszerrel való mérés esetén (η a berendezés számlálási hatásfoka):

$$1 \text{ Bq} = 60 \eta^{-1} \text{ impulzus/min}$$

$$1 \text{ Ci} = 2.22 \times 10^{12} \eta^{-1} \text{ impulzus/min}$$

24

RADIOAKTÍV BOMLÁSI TÖRVÉNY

Radioactive decay law

Differential form $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$

λ : decay constant (measure: 1/s)
constant for a certain isotope

Activity depends both on the

- size of the population of radioactive atoms
- type of the isotope

25

RADIOAKTÍV BOMLÁSI TÖRVÉNY

$$\left| \frac{dN}{dt} \right| = -\lambda N$$

Solution of this equation yields

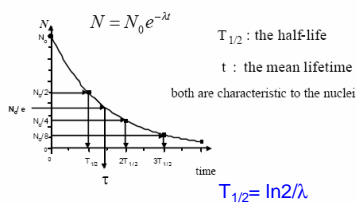
$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{Integral form}$$

N_0 : number of radioactive nuclei at $t = 0$,
 N : the number radioactive of nuclei remaining
after a period t

26

RADIOAKTÍV BOMLÁSI TÖRVÉNY

Graphical representation



27

FELEZÉSI IDŐ: PÉLDÁK

$^{137}\text{Cs}^{55}$ (γ -forrás):	33 év
$^{60}\text{Co}_{27}$ (γ -forrás):	5,27 év
$^{131}\text{I}_{53}$ ("kritikus" szennyező, felhalmozódik a pajzsmirigyben)	8,04 nap
$^{90}\text{Sr}_{38}$ ("kritikus" szennyező, beépül a csontba a Ca helyébe)	28,8 év
Ra (rádium)	1600 év
Pu (238,239,240,241 izotópok)	15 -25000 év

28

GYÓGYÁSZATI IZOTÓPOK

Half-lives in medical uses

Iodine - ^{131}I ($T_{1/2} = 8$ days)
Thyroid treatment

Technetium-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) - $T_{1/2} = 6$ hours
Isotope diagnostics

Gold-198 (^{198}Au) - $T_{1/2} = 2,7$ days
Tumor therapy

29

AKTIVITÁS: TERMÉSZETES ÉS MESTERSÉGES KÖRNYEZET

Forrásvizek természetes rádióaktivitása: közepesen aktív források ($10-100$) $\times 10^{-10}$ Ci/lit (40-400 Bq/lit).

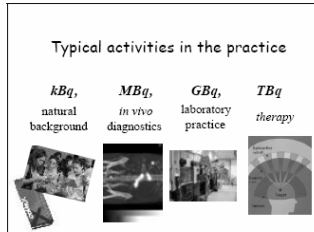
Magyarország legerősebb radioaktív forrása: Rudas fürdő, *Juventus*-forrás, fajlagos aktivitása kb. 56×10^{-10} Ci/lit (kb. 200 Bq/lit), rádium tartalma 245×10^{-7} mgr/lit.

C-szintű izotóp labor (hatósági szabályozás): 20 mCi (kb. $7,4 \times 10^8$ Bq azaz kb. 1GBq) aktivitás felett.

Gyógyászat: "kobaltágyú" $^{60}\text{Co}_{27}$ γ -forrás, 10-100 Ci (4×10^{11} - 4×10^{12} Bq) (igen erős védelem!)

30

AKTIVITÁS: TERMÉSZETES ÉS MESTERSÉGES KÖRNYEZET



31

AKTIVITÁS: CSERNOBILI KATASZTRÓFA ÉS ATOMKÍSÉRLETEK

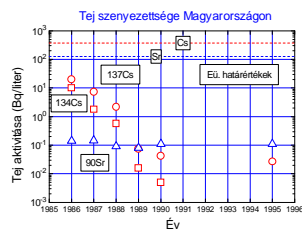
Csernobil-katasztrófa: a kiszóródott radioaktív anyagok becsült teljes aktivitását 50 millió és 140 millió curie (2×10^{18} , illetve 5×10^{18} Bq) közé teszik.

Szatmáry Zoltán és Aszódi Attila: *Csernobil: tények, okok, hiedelmek*, Typotex, Budapest, 2005 a NAÜ számára készített jelentésre hivatkozva 3×10^{18} Bq adatot közöl.

Egyéb összehasonlítások: A csernobili katasztrófában kibocsátott radioaktivitás kb. 400-szorosa volt a Hirosimára ledobott atombombáénak, ugyanakkor az 1950-1960-as években végzett magaslégköri atombomba-kísérletek 100-1000-szer több radioaktivitást szórak szét a légkörben, mint a csernobili robbanás.

32

CSERNOBIL: MAGYAROSZÁG SZENYEZŐDÉSE: PÉLDA A TEJ



A tej I (jód) szennyezettsége kb. két hónap alatt gyakorlatilag megszűnt, azonban a Cs (cézium) több évig is megmaradt. Számottevő maradt még a Sr (stroncium) de ez jelentős részben még az atombomba-kísérletek maradványa.

33

ELNYELT SUGÁRZÁS (DÓZIS) MÉRTÉKEGYSÉGEI

Az atomokkal való kölcsönhatás útján a sugárzások energiát adnak át annak a közegnek, amelyen áthaladnak. A közeg egységnyi tömegével közölt energia a **dózis**.

Elnyelt dózis: egységnyi tömegnek az ionizáló részecskék által átadott energia. Si egysége a **gray** (Gy) (L. H. Gray brit fizikus és radiológus, 1905-1965):

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

A gray nagy egység, inkább a törtrészeit használják, mGy, μ Gy, nGy.

34

DÓZISEGYENÉRTÉK

Az energiaátadás módja és mértéke függ a sugárzás fajtájától, emiatt a különböző sugárzások másképp hatnak az élő szervezetre. A neutronsugárzás például a sugárzásból elnyelt azonos dózis mellett jóval nagyobb szövetkárosodást idéz elő, mint a γ -sugárzás.

A Q.F. annak a mértéke, hogy az adott sugárzás hányszor nagyobb biológiai hatékonyságú, illetve hányszor nagyobb károsodást okoz, mint az alapul vett Röntgen- vagy γ -sugárzás.

35

DÓZISEGYENÉRTÉK

Dózisegyenérték: a sugárzás biológiai hatását jellemzi, az elnyelt dózison kívül függ a sugárzás fajtájától és a besugárzás körülményeitől, egysége a **sievert** (Sv) (Rolf Sievert svéd fizikus, 1896-1966):

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$

$$H = QF \times D$$

dózisegyenérték (vagy biológiai dózis) = QF x elnyelt dózis

Sugárzások élettani hatására jellemző QF minőségi tényező (quality factor), a γ -sugárzás hatására vonatkoztatva.

36

ÉLETTANI HATÁS

Sugárzás fajtája	Q.F.
Röntgen- és γ -sugárzás	1
Elektronok (β -sugárzás)	1
He atommagok (α -sugárzás)	10-20
Lassú neutronok	4-5
Gyors neutron- és proton-sugarak	10
Nehéz-ion sugárzás	20

37

DÓZISINTENZITÁS

Sugárkárosodás és sugárvédelem: a fő tényező, hogy a sugárzási térben időegység alatt mekkora dózist kap egy személy.

Dózisintenzitás: időegység alatt elnyelt dózis, illetve dóziségyenérték: Gy/óra, Gy/év, illetve Sv/óra, Sv/év.

Dóziskorlát (jogszabály háttér), a nem természetes forrásokból eredő dózisosokra:

Jelenleg a lakosságra személyenként 1 mS/év
Sugárveszélyes helyen dolgozókra 20 mS/év

38

TERMÉSZETES ÉS MESTERSÉGES HÁTTÉRSUGÁRZÁS

Természetes háttérsugárzás: kozmikus sugárzás, a Földön lévő radioaktív anyagok sugárzása (elősorban a radon gáz és az emberi szervezetben lévő természetes radioizotópok a jelentősek).

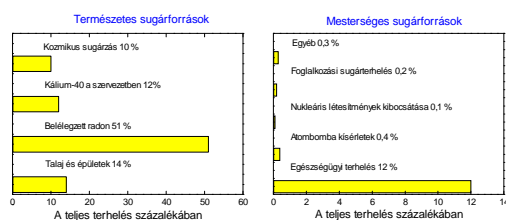
Emberi tevékenységből eredő háttérsugárzás: ipar, gyógyászat, atomerőművek, atombomba-kísérletek.

Magyarországon: 2,4 mS/év (87 % 2,1 mS/év természetes eredetű, 13 % 0,3 mS/év emberi tevékenységből eredő).

Csernobil hatása Magyarországon: a ma élő generáció által kapott és még várható többletdózis személyenként nem nagy mint 1 mSv (70 éves átlagéletkorral). Ez kevesebb mint a természetes háttérsugárzási terhelés 1 %-a.

39

HÁTTÉRSUGÁRZÁSI DÓZISOK MAGYARORSZÁGON



Teljes terhelés: 2,4 mS/év.

A fenti százalékos eloszlás általában jellemző a világ többi országaira is. A természetes háttérsugárzás túlnyomó része a természetben található radon gáztól származik.

40

HÁTTÉRSUGÁRZÁSI DÓZISOK AUSZTRÁLIÁBAN

Forrás	Dózis (mSv/év)
Természetes:	
Kozmikus sugárzás tengerszinten	0,3
Talaj, közet, épületek anyaga	0,3
Testszövetek (40K, 226Ra)	0,4
Légköri radon (222Rn)	2
Természetes összesen:	3
Mesterséges:	
Orvosi és fogászati Röntgen	0,4
Nukleáris medicina	0,1
Atomerőművek	0,01
TV képcső, ipari tevékenység	0,02
Légköri atombombabarobantások	0,04
Mesterséges összesen:	0,6
Minden forrásból összesen:	3,6

Dózis terhelés Ausztráliában (3,6 mSv/év)

41

REPÜLÉS: DÓZISTERHELÉS

Kozmikus sugarak által okozott besugárzási dózis és repülés

Magasság	Tengerszint	Repülő 10 km magasság	Repülő 17 km magasság	Űrhajós*
Dózis mSv/év	0,5	26	100	200
Dózis mSv/óra	0,0001	0,003	0,01	0,02
"Repülési" idő 1 mSv eléréséhez	2 év	300 óra	100 óra	50 óra

* Csak a galaktikus kozmikus sugárzásból, nem tartalmazza a van Allen övezet hatását (3 mSv egy áthaladásra) és a napkitörések hatását (1000 mSv).

Egy évben kb. 400-szor kell átrepülni az Atlanti óceánt ahhoz, hogy valaki a foglalkozási egészségügyi limitnek (20 mSv) megfelelő dózist elérje.

42

HÁTTÉRDÓZIS A VILÁGBAN

Ország, táj	Háttérdózis (mS/év)
Franciao. (Burgundia)	3,5
USA (átlag)	3,6
Egyiptom (Nilus delta)	4,0
Brazília (tengerpart)	5,0
Niue Island (Csendes ó.)	10,0
India (Kerala állam)	13,0

A különbségeknek nincs semmiféle egészségügyi hatása!

43

SUGÁRZÁS: EGÉSZSÉG, BETEGSÉG, HALÁL

Sugárterhelés	Következmény
5 Sv/alkalom felett	Halálos sugárbetegség
3,5 Sv/alkalom	50 %-ban halálos sugárbetegség
1 Sv/alkalom	Klinikai tünetekkel járó enyhe sugárbetegség alsó határa
0,15 Sv/alkalom	Kimutatható, de még tünetmentes sugárátalom alsó határa
0,02 Sv/év	Foglalkozási dóziskorlát

Félhalálos dózis: ennek hatására az emberk 50 %-a meghal. Ennek nagysága 3-4 Sv.

44

SUGÁRZÁS ÉS 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)

45

SUGÁRZÁSÉRZÉKELŐK

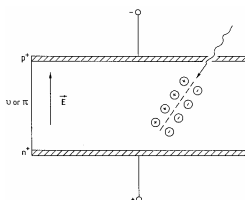
A legfontosabb és legelterjedtebb, nagyenergiájú EM sugárzás, illetve a nagyenergiájú részecske (nukleáris) sugárzás érzékelő a pin dióda.

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.

46

PN-ÁTMENETES NUKLEÁRIS RÉSZECSCSE ÉRZÉKELŐ

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



VÉGE

(AZ ELSŐ ELŐADÁSNAK)

48