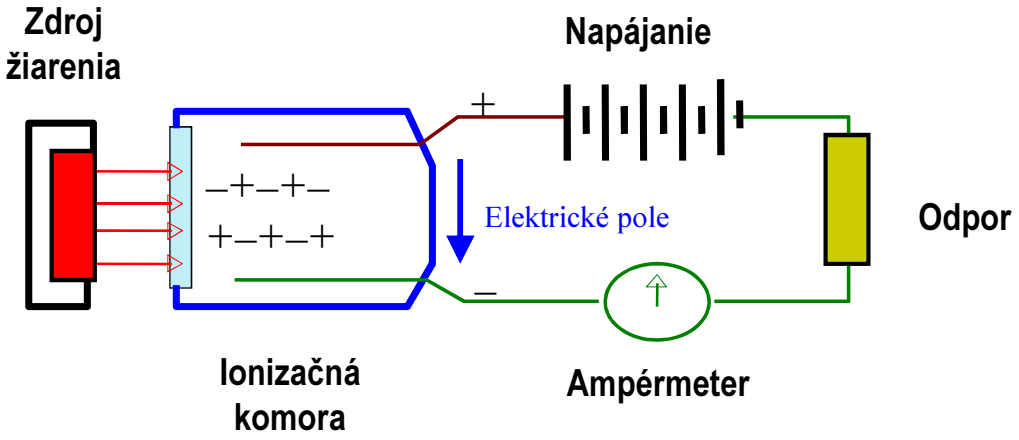
Detekcia a meranie ionizujúceho žiarenia 2

12. decembra 2016

doc. Ing. Róbert Hinca, PhD.

Princípy využitia ionizácie na detekciu žiarenia (plynom plnené detektory)

Ionizujúce žiarenie priamo alebo nepriamo ionizuje plynné prostredie detektora



Počet iónových párov N

Priemerný počet iónových párov, ktoré sa vytvoria po odovzdaní energie E od primárnej častice vrátane párov vytvorených sekundárnymi elektrónmi v plyne jednotkového objemu závisí od energie potrebnej na vytvorenie jedného iónového páru. Stredná energia potrebná na vytvorenie IP je ***w***.

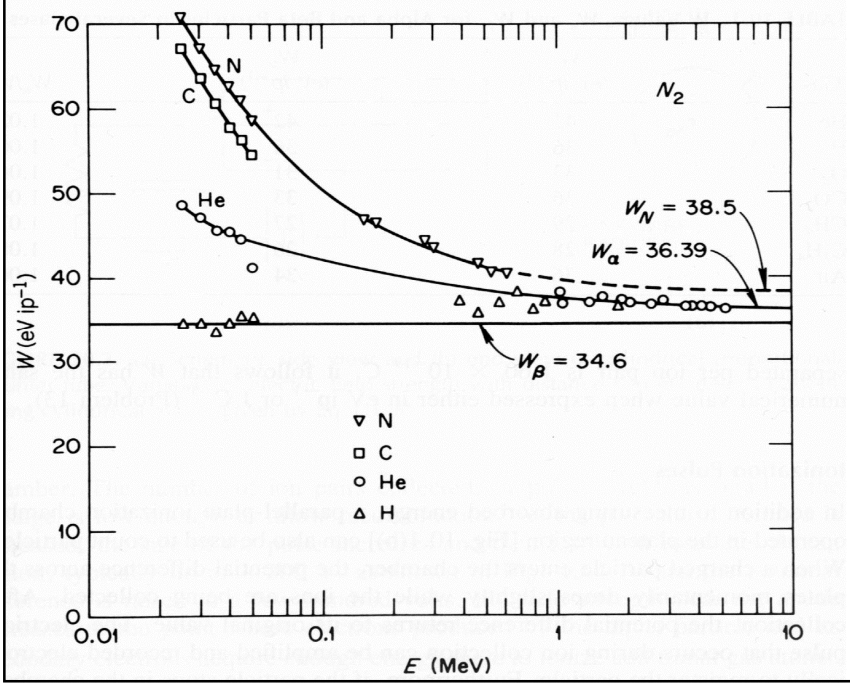
$$N = \frac{E}{V \cdot w}$$

E – energia častice vstupujúcej do detektora
w – stredná energia ionizácie plynu

$$N = \frac{\dot{\Phi} \cdot E}{V \cdot w} = \frac{\dot{\Psi}}{V \cdot w}$$

<u>Pre viac častíc:</u>
Príkon fluencie = hustota toku častíc ($cm^{-2}.s^{-1}$)
Príkon fluencie energie monoenergetických častíc s energiou E

Stredná energia ionizácie plynu *w*(eV/ip)



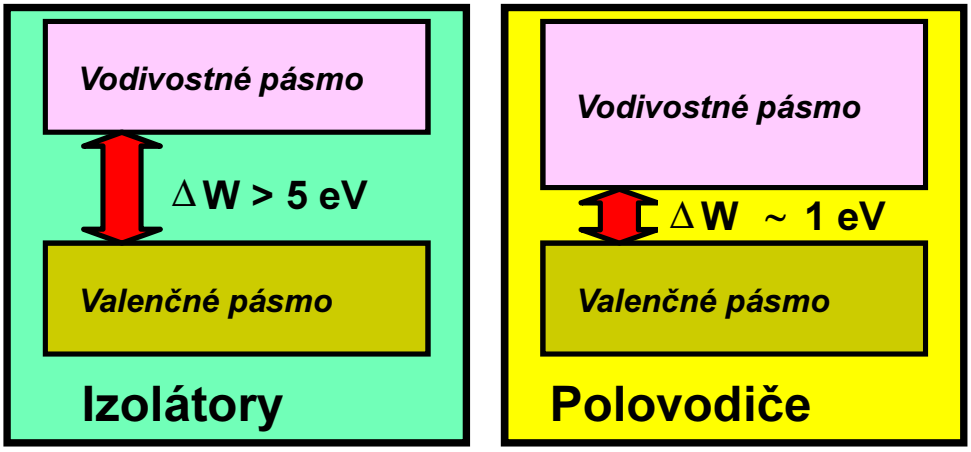
Hodnoty ***w*** v dusíku pre beta častice (elektróny aj protóny), alfa častice (jadrá He), jadrá uhlíka a dusíka v závislosti na ich energii.

Pre ťažšie častice energia potrebná na vytvorenie jedného IP je pri vysokých energiách približne konštantná (t.j. **energia častice môže byť odvodená od počtu vytvorených IP**) ale pri nízkych energiách narastá, pretože narastá podiel energie stratenej na **excitáciu** na úkor ionizácie.

Stredná energia ionizácie plynu w(eV/ip)

Plyn	Alfa žiarenie	Beta žiarenie	w_α/w_β
He	43	42	1,02
H_2	36	36	1,00
O_2	33	31	1,06
CO_2	36	33	1,09
CH_4	29	27	1,07
C_2H_4	28	26	1,08
Vzduch	36	34	1,06

Ionizácia v izolátoroch a polovodičoch
Šírka zakázaného pásma



Izolátorom je napríklad **plyn** argón, polovodičom je napríklad kremík (ΔW=1,12eV). Stredná energia potrebná na vytvorenie jedného iónového páru je pre polovodič **kremík 3.6 eV a pre argón 15 eV**.

Iónová bilancia v jednotke objemu ionizačnej komory

$$\frac{dn}{dt} = N - \alpha n^2 - \frac{i}{V \cdot e}$$

- N - počet iónov, ktoré vznikajú v jednotke objemu za jednotku času
- n - počet iónov, ktoré sa už v jednotkovom objeme nachádzajú
- α - koeficient rekombinácie
- i - ionizačný prúd prechádzajúci obvodom
- e - náboj iónu
- V - objem ionizačnej komory
- αn^2 - počet iónov, ktoré zanikli rekombináciou v jednotke objemu
- i/Ve - počet iónov pozbieraných elektródami

Iónová bilancia v stacionárnom stave

$$\frac{dn}{dt} = 0 \qquad \frac{dn}{dt} = N - \alpha n^2 - \frac{i}{V \cdot e}$$

- Ak elektrické pole nie je pripojené, $i = 0$ a teda $N = \alpha n^2$.
- Z toho dostaneme maximálny počet existujúcich iónových párov n.

$$n = \sqrt{\frac{N}{\alpha}}$$

Iónová bilancia v stacionárnom stave

$$\frac{dn}{dt} = 0 \qquad \frac{dn}{dt} = N - \alpha n^2 - \frac{i}{V \cdot e}$$

- Keď ionizačný prúd dosiahne hodnotu nasýtenia, $i = i_{nas}$, rekombinácia bude nulová $\alpha n^2 = 0$ a prúd z detektora bude i.
- Energia absorbovaná v celom objeme detektora bude rovná $E_{abs} = \Phi . E = i.w/e$
- ***Prúd nasýtenia je priamo úmerný energii absorbovanej v plyne.***

$$i = i_{nas} = VeN$$

$$i = \frac{e\,\dot{\Phi}\,E}{w}$$

$$E_{abs} = \frac{i \cdot w}{e}$$

Minimálny detekovateľný príkon fluencie energie

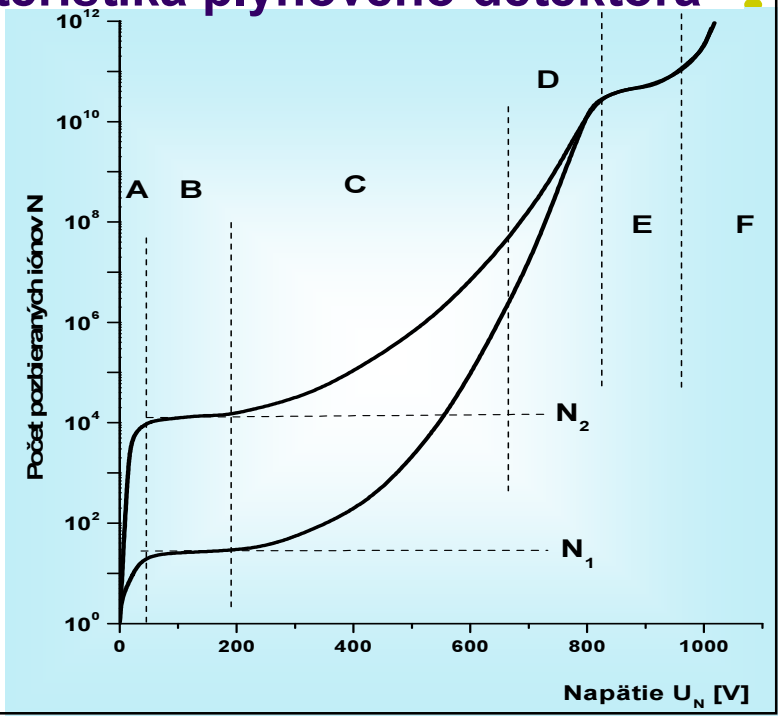
- Dobrý ampérmeter je schopný odmerať prúdy na úrovni 10^{-16} A.
- To zodpovedá energii absorbovanej v plyne detektora $E=iw/e$
- Nech máme plyn so strednou energiou ionizácie $w=30\ eV$.
- Vieme, že elementárny náboj je $e=1{,}6\cdot 10^{-19}\ C$.
- Vieme, že $1A=1C.s^{-1}$

$$E_{abs} = \frac{i \cdot w}{e} = \frac{(10^{-16}\ C \cdot s^{-1}) \times 30\ eV}{1{,}6 \times 10^{-19}\ C} = 1{,}88 \times 10^{4}\ eV \cdot s^{-1}$$

Taký prúd môže byť vytvorený napr. jednou beta časticou o energii 18,8 keV za sekundu, ktoré za zabrzdia v objeme detektora.

Voltampérová charakteristika plynového detektora

A. oblasť Ohmovho zákona, nevyužíva sa na detekciu IŽ
B. oblasť nasýteného prúdu, ionizačné komory
C. proporcionálna oblasť, plynové zosilneníe, propercionálne detektory
D. oblasť čiastočnej proporcionality, nevyužíva sa detekciu
E. Geiger - Müllerova oblasť
F. oblasť samovoľného výboja korónové a iskrové detektory

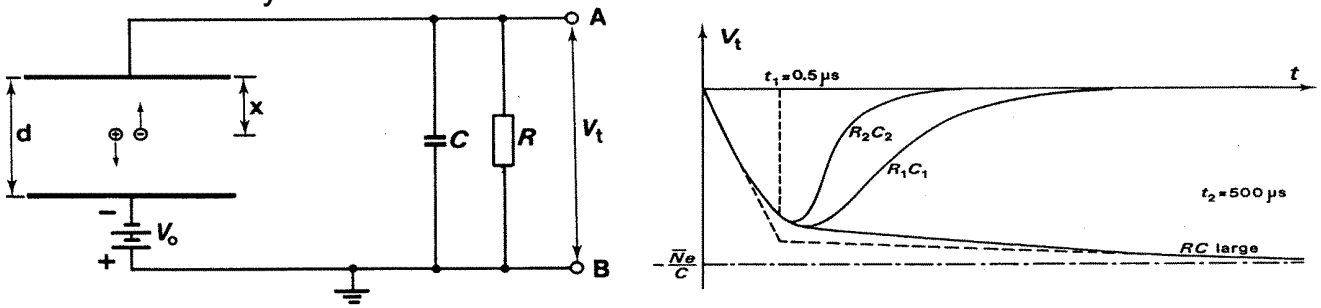


Ionizačná komora

- Ak sa určitý objem plynu v konštantnom radiačnom poli uzavrie v nádobe obsahujúcej dve elektródy, medzi ktorými sa udržiava rozdiel elektrického potenciálu, potom sa kladné ióny budú pohybovať smerom ku katóde a elektróny smerom k anóde a elektrický prúd, tzv. ionizačný prúd, potečie v plyne a vo vonkajšom okruhu.
- Takéto zariadenie sa nazýva ionizačná komora a hodnota ionizačného prúdu, pozorovaného vo vonkajšom okruhu, je mierou počtu plynových iónových párov vytvorených vo vnútri ionizačnej komory a teda aj množstva príslušného žiarenia, ktoré cez ňu prechádza.
- Usporiadanie komory je najčastejšie buď cylindrické, pozostávajúce z valcovej vonkajšej a vnútornej axiálnej elektródy, alebo pravouhlé, pozostávajúce z paralelných dosiek, alebo mriežok.

Impulzný ionizačný režim

Ak sa ionizačná komora opatrí vonkajším obvodom RC, potom pohyb elektrónov smerom k anóde a kladných iónov smerom ku katóde bude indukovať impulz napätia V_t na vysokoohmovom odpore R, pričom V_t je funkciou času t.
Pohyblivosti elektrónov sú asi 10^3 krát väčšie, ako pohyblivosti kladných iónov, takže počiatočný ostrý záporný sklon je spôsobený pohybom elektrónov smerom od katódy a pomalý návrat chvostu impulzu je spôsobený induktívnym účinkom kladných iónov smerom ku katóde.



Plynové zosilnenie - proporcionálne čítače

Ak sa po dosiahnutí saturácie napätie priložené na ionizačnú komoru ďalej zvyšuje, dosiahne sa stav, kedy elektróny urýchlené smerom k anóde dosiahnu medzi zrážkami s neutrálnymi molekulami rýchlosti a teda aj energie dostatočné na ionizáciu týchto molekúl a na tvorbu väčšieho počtu iónových párov, čím nastáva násobenie iónových párov, prevyšujúce počtom tie, ktoré sa vytvárajú dopadajúcim žiarením.

Nástup takéhoto násobenia nastáva pri valcovej ionizačnej komore pri menšom napätí, než pri ionizačnej komore s paralelnými doskami, obsahujúcej porovnateľnú hmotnosť daného plynu, pretože v blízkosti tyčovej, alebo drôtenej anódy s relatívne malým polomerom je oveľa vyššia intenzita elektrického poľa.

V dôsledku tohto násobenia iónových párov sa prúd tečúci vo vonkajšom okruhu pri zvyšovaní napätia ďalej zväčšuje.

GM detektory

V proporcionálnej oblasti sa reťazový násobiaci proces, pri ktorom jeden elektrón môže vyprodukovať veľký počet iónových párov, nazýva **Townsendova lavína**.

Primárna ionizačná udalosť normálne vytvorí strapec takýchto lavín, ktorých veľkosť a dĺžka pozdĺž anódového drôtu bude daná veľkosťou a sklonom primárnej udalosti.

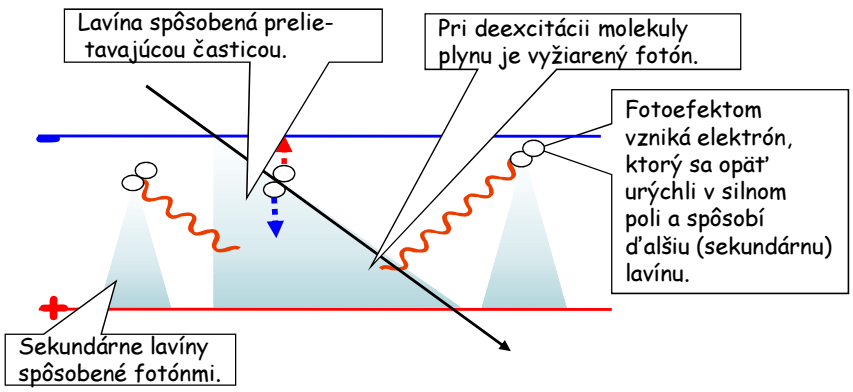
Keď je priložené napätie tak veľké, že elektrónovo-iónová pošva obalí celú dĺžku anódy, hovoríme, že ionizačná komora pracuje v Geigerovej oblasti.

Pri prevádzke v Geigerovej oblasti pri danom priloženom napätí je amplitúda všetkých výstupných impulzov z plynovej ionizačnej komory v rámci štatistických hraníc rovnaká, nezávislá na počte elektrón-iónových párov v primárnej ionizačnej udalosti.

Geiger-Müllerova trubica

Geiger-Müllerov počítač funguje pri tak vysokom napätí, že jediný pár spôsobí výboj v plyne. Dostávame veľký signál, ktorý nezávisí na energii a druhu dopadajúcej častice.

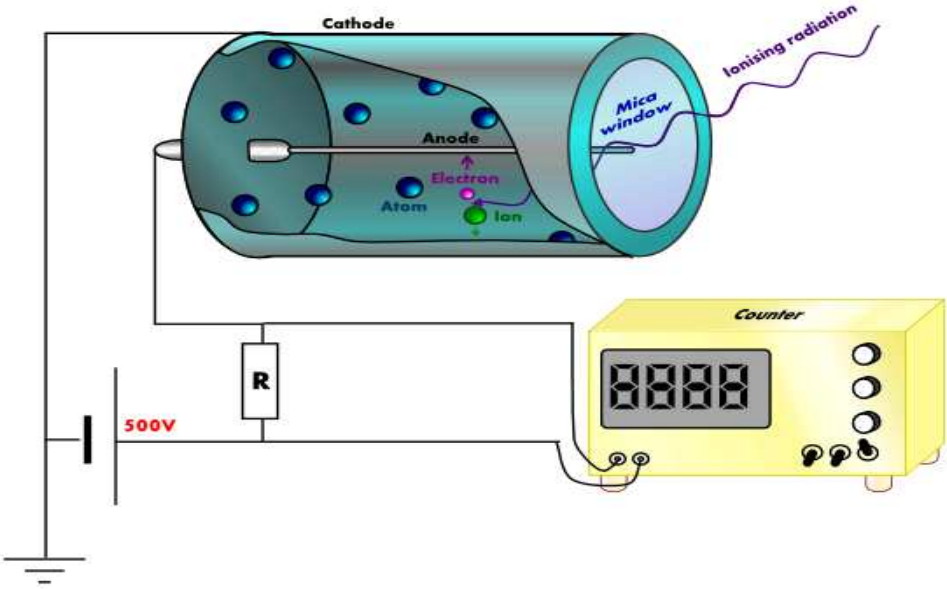
Namiesto jednej lavíny vzniká veľa lavín pozdĺž celej dĺžky anódy. Tieto sekundárne lavíny sú spôsobené fotónmi, ktoré sú emitované pri deexcitácii molekúl. Fotóny prelietavajú detektorom a spôsobujú ďalšiu ionizáciu.



Náplňou detektora sú vzácne plyny (argón), do ktorých sa pridáva prímes (napr. etylén), ktorý pohlcuje fotóny vznikajúce pri deexcitácii a tým preruší („zahasí“) výboj.

Geiger-Müllerov počítač

so sľudovým okienkom



Náplň detektorov s plynovým zosilnením

Plynové zosilnenie závisí od mobility elektrónov. Preto nie je žiaduce, aby sa v náplni elektróny zachytávali a vytvárali negatívne ióny na tzv. elektronegatívnych nečistotách. Takéto vlastnosti má napr. kyslík. Obsah 0,1% O_2 v plyne zníži o 10% množstvo elektrónov na trase 1 cm.
Nielen ionizácia ale aj excitácia molekúl plynu môže prispieť k signálu nepriamo, potom ako sa deexcitáciou vyžiari fotón UV, ktorý môže spôsobiť fotoelektrickú interakciu so slabšie viazaným elektrónom v plynovej náplni alebo v stene detektora. Takéto procesy sú žiaduce v GM detektoroch, lebo zosilňujú signál, ale v proporcionálnych detektoroch sú nežiaduce, lebo skresľujú proporcionalitu.
Na pohltenie takých fotónov a zabránenie následných výbojov sa do monoatómového plynu pridáva polyatómový plyn napr. do Ar sa pridáva CH_4.

Náplň detektorov s plynovým zosilnením

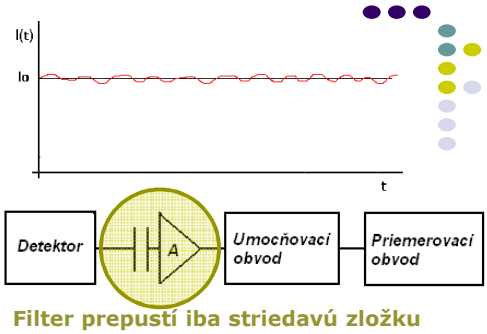
- Ar+5% metan (P-5) resp. Ar+10% metan (P-10) - dobré plynové zosilnenie a dobrá cena
- detekcia tepelných neutrónov - BF_3, ^3He
- spektroskopia rýchlych neutrónov - H_2, metán, ^3He
- dozimetrické merania s tkanivu-ekvivalentným zložením plynovej náplne: 64,4% metán + 32,4% CO_2 + 3,2% N_2
- napriek elektronegativite kyslíka je aj vzduch vhodný plyn

Vlastnosti GM detektorov

- sú lacné a nevyžadujú zložitú elektroniku
- fungujú v impulznom režime
- jeden impulz je tvorený 10^9-10^{10} IP a predstavujú amplitúdu niekoľko voltov. Takéto vysoké množstvo IP je potrebné na to aby pomalé kladné ióny, ktoré sú vytvorené najmä okolo kladnej anódy z drôtika zníži pôvodnú intenzitu elektrického poľa a prerušili lavínový výboj. (Kladné ióny akoby zväčšili polomer anódy).
- plynová náplň, ktorá sa neobnovuje môže vyhárať a preto majú také GM obmedzenú životnosť.
- na zhášanie sekundárnych výbojov sa pridáva polyatómový plyn napr. etylalkohol (má životnosť cca. 10^9 impulzov).
- Halogénové GM trubice s obsahom Cl_2 alebo Br_2 nevyhárajú ale výsledkom zhášacej funkcie je disociácia molekuly, ktorá sa po čase zasa spontánne spojí. Životnosť je preto neobmedzená.

Pracovný režim detektorov

Prúdový režim - priemerný prúd je proporcionálny na rýchlosti ***r (s⁻¹)*** a vzniknutému náboju pri registrácii ***Q (C)***, ktorá závisí od absorbovanej energie ***E (MeV)*** a ***W (MeV)*** je energia potrebná na vytvorenie jedného IP s elementárnym nábojom q = 1,6·10^{-19} C.



Filter prepustí iba striedavú zložku prúdu, ktorá predstavuje odchýlku

$$I = rQ = r\frac{E}{W}q$$

Campbellov alebo Mean Square Voltage MSV režim je založený na teoréme, že relatívna stredná kvadratická odchýlka registrovaného prúdu od prekrývajúcich sa impulzov je rovnaká ako relatívna stredná kvadratická odchýlka počtu zaregistrovaných impulzov:

$$\frac{\overline{\sigma_I(t)}}{I_0} = \frac{\sigma_n}{n} = \frac{\sqrt{rT}}{rt} = \frac{1}{\sqrt{rT}}$$

$$\overline{\sigma_I^2(t)} = \left(I_0 \cdot \frac{\sigma_n}{n}\right)^2 = \frac{(rQ)^2}{rT} = \frac{rQ^2}{T}$$

$$\sigma_n = \sqrt{n} = \sqrt{rT}$$

Príklady použitia GM detektorov

Osobné dozimetre

GM trubica ako monitor prostredia

- Detekované žiarenie: gama a X, energetická odozva zodpovedá priestorovému dávkovému ekvivalentu H*(10)
- Energetický rozsah: 50 keV až 3 MeV pre rozsah dávkového príkonu 0,01 μSv/h až 10 mSv/h a 80 keV až 3 MeV pre rozsah dávkového príkonu 10 mSv/h až 10 Sv/h
- Typ detektora: 2 halogenové samozhášacie energeticky kompenzované GM trubice

Plynové detektory neutrónov na báze He-3

$^{1}n + ^{3}He = ^{1}p + ^{3}T + 764$ keV

(1) The counter length can be agreed with the customer.
(2) PC–proportional counter mode (with gas amplification)
IIC–Impulse ionization chamber mode (without gas amplification)
(3) He-3 pressure in the counter CN-04 can be increased up to 6 atm, if ordered specifically
(4) In case of isotropic flow of thermal neutrons, registration efficiency increases if He-3 pressure is increased, too.

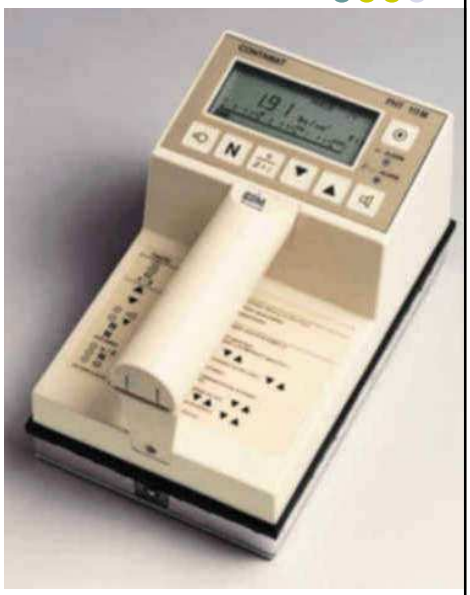
Counter type	CN-01	CN-03	CN-04
Diameter	30 mm	18 mm	30 mm
Length of the operating part (1)	900 mm	100 mm	970 mm
Operation mode (2)	IIC	PC	PC, IIC
He-3 pressure	2 atm	7 atm	2 atm (3)
Own background, not more	0.01 imp/s	0.001 imp/s	0.001 imp/s
Insulation resistance, not less	1011 Om	1011 Om	1011 Om
Operating voltage	400 V	1200 V	400-1200 V
Efficiency of registration of thermal neutrons(4), not less	50%	70%	60%
Charge collection time	4 mcs	2 mcs	2 mcs
Length of working plateau	–	200 V	200 V
Plateau tilt for 100V	–	1%	1%
Operating temperature range	± 50°C	± 50°C	± 50°C
Weight, not more than	0.6 kg	0.2 kg	0.5 kg

FHT 65 L/LX Monitor kontaminácie rúk a nôh

- **FHT 65 L:**
- prietokový plynový proporcionálny detektor **Ar+CH_4, Ar+CO_2 or CH_4 for alpha/beta** monitoring

- **FHT 65 LX:**
- Uzavretý **xenónový detektor na gama** monitoring

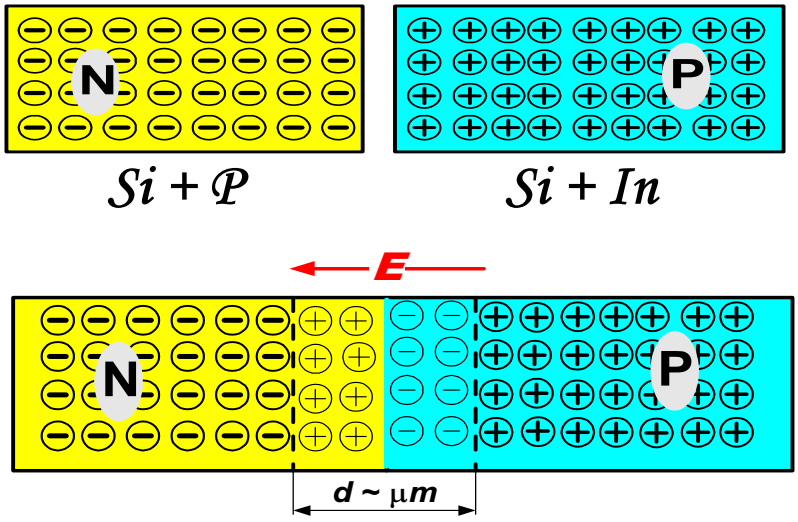
FHT 111 M Contamat ®



- Meranie povrchovej kontaminácie alfa, beta a gama rádionuklidmi.
- Používa veľkoplošný proporcionálny plynový detektor a mikroprocesor na výpočty.

- Výsledok merania v cps, Bq or Bq/cm^2
- Súčasné meranie alfa a beta
- 10 referenčných izotopov v pamäti
- alarmy
- vyhľadávací režim so zvukom
- možnosť odrátania pozadia
- pamäť pre 128 nameraných údajov

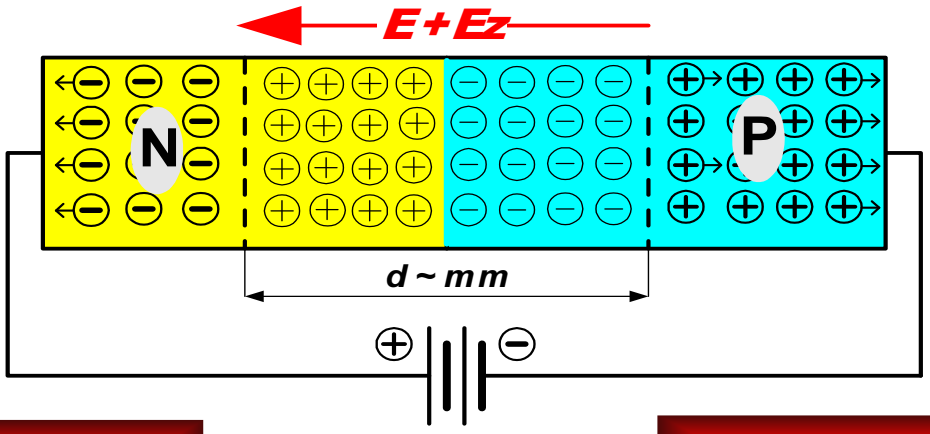
Polovodičové detektory
Vytvorenie ochudobnenej vrstvy



Pri spojení polovodiča typu p a n vznikne v okolí rozhrania oblasť priestorového náboja nazývaná tiež P-N prechod.

Oblasť kladného náboja je tvorená ionizovanými donormi v polovodičoch typu n a oblasť záporného náboja je tvorená ionizovanými akceptormi v polovodičoch typu p.

Vytvorenie ochudobnenej vrstvy

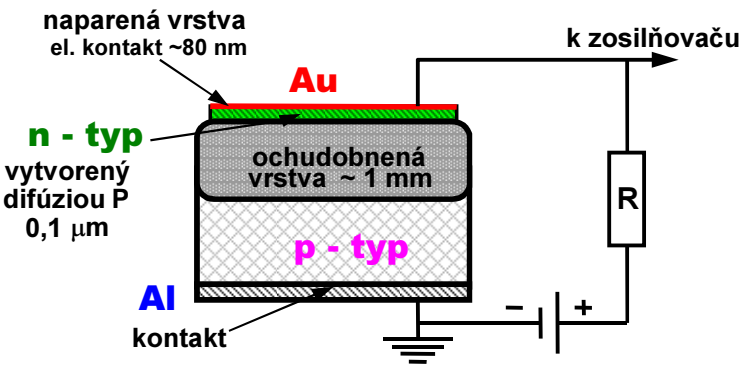


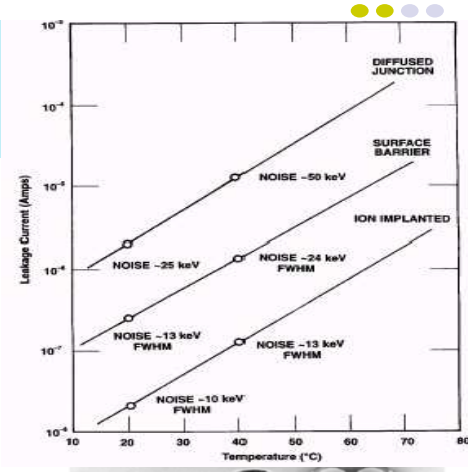
$^{28}_{14}Si$

$^{73}_{32}Ge$

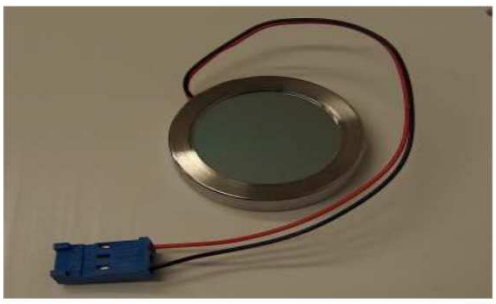
Polovodičové kremíkové detektory

1. **DJ** - detektory s difúznou vrstvou (Diffused Junction)
2. **SBD** - detektory s povrchovou bariérou (Surface Barrier Detector)
3. **PIPS** - pasivované detektory s ióno-implantovaným kontaktom (Passivated Implanted Planar Silicon)





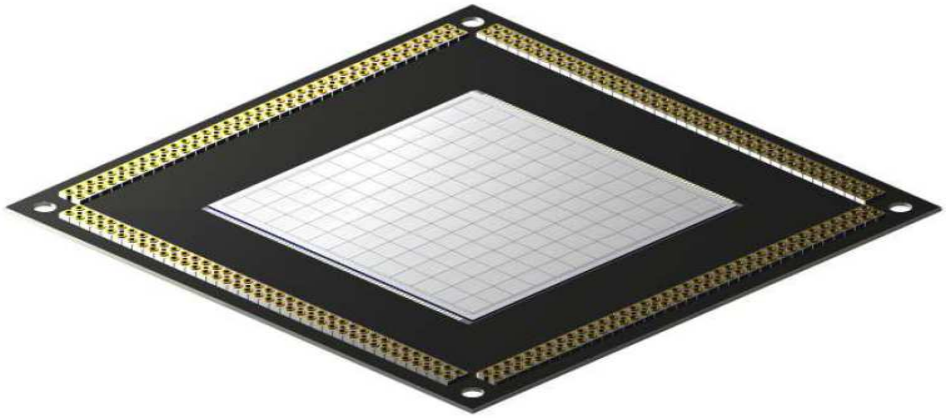
Single area totally depleted ion implanted



MSD024 detector supplied as an alpha monitor.

RADIATION HARDNESS:	Survival to 10^{14} Neutrons, 10^{15} Protons
CAPACITANCE:	Subject to depletion depth e.g. 40 pF/cm for 300 μm
LEAKAGE CURRENT:	1 nA/cm to 8 nA/cm subject to active area and depletion depth.
OPERATING TEMPERATURE RANGE:	-65°C to +125°C
ENVIRONMENTAL TESTING OPTIONS:	Space qualified, military, industrial, research, physics projects.

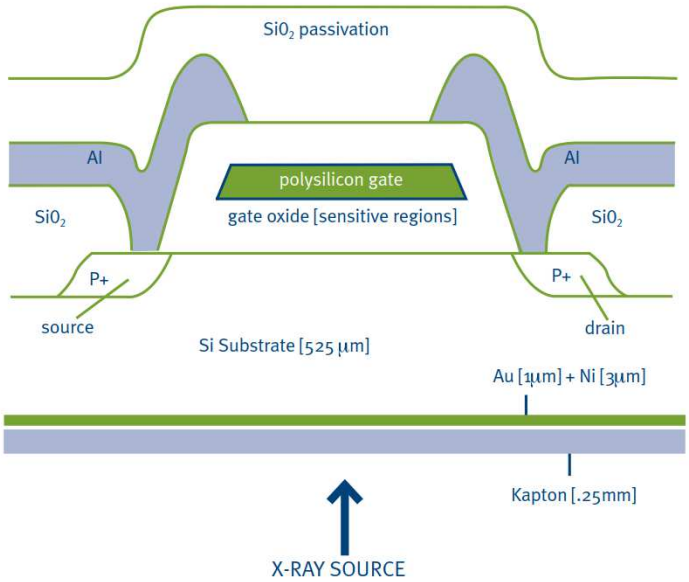
Silicon position sensitive pixel detector



MSPX 12x12 with double metal tracking mounted on a double stack transmission PCB.

MOSFET dozimetre.

Príklad detektora s p+ kanálom v polovodiči typu n pre nízkoenergetické fotónové žiarenie.



Na obrázku je štrukturálna schéma MOSFET detektora vytvoreného na kremíkovom substráte typu n s kanálom P+ s polysilikónovým oxidickým hradlom (gate oxid).

Po priložení dostatočne vysokého napätia V_{TH} (treshold voltage) medzi source a drain prechádza prúd I_{ds} , ktorý závisí od množstva nosičov náboja vytvorených Si substráte.

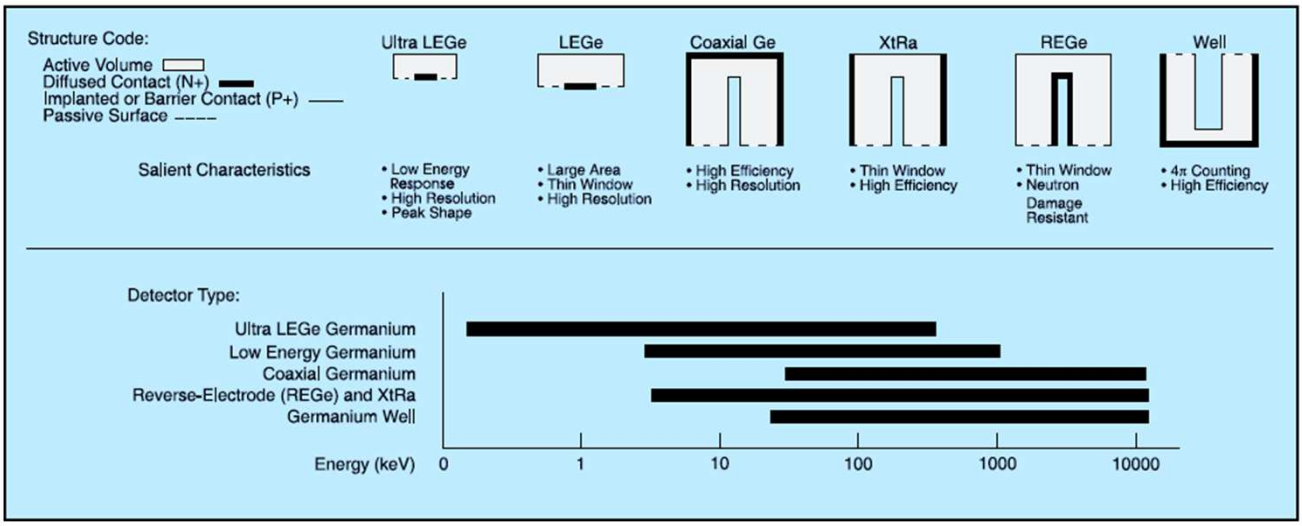
Použitie ako integrálny dozimeter:
Pri ožarovaní ionizujúcim žiarením vznikajú nosiče náboja v oblasti polysilicon gate, pričom dierové nosiče, kvôli nízkej pohyblivosti zostávajú zachytené v pascách oxidickej štruktúry. Koncentrácia zachytených dierových nosičov náboja je úmerná dávke ožiarenia kým nenastane nasýtenie. Zachytené dierové nosiče pri vyhodnocovaní dozimetrov spôsobia zmenu ΔV_{TH} , ktorej zmeranie je základom vyhodnotenia dávky.

Pravdepodobnosť prechodu elektrónov z valenčného do vodivostného pásma vplyvom tepelných excitácií.

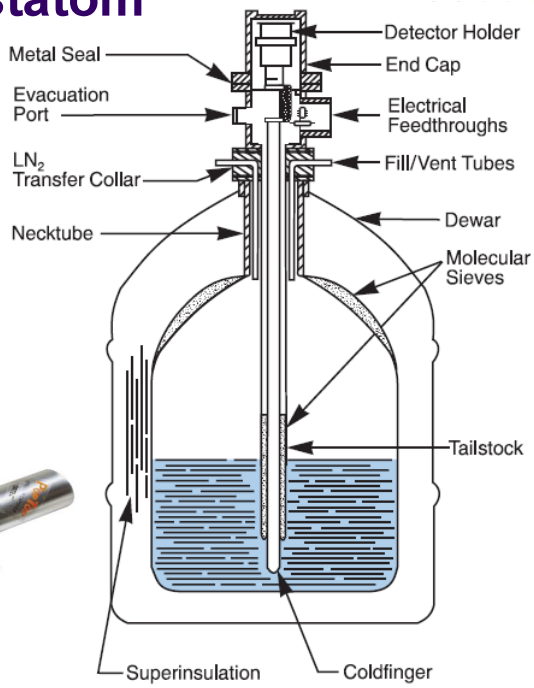
$$p(T) = const \cdot T^{3/2} \cdot exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right)$$

- Šírka zakázaného pásma ΔW
- pri T=300 K: ΔW_{Si} = 1,115 eV ΔW_{Ge}= 0,665 eV
- pri T= 0 K: ΔW_{Si} = 1,165 eV ΔW_{Ge}= 0,746 eV
- Nosiče náboja, ktoré sa vytvárajú v pracovnom objeme polovodiča vplyvom tepelných excitácií spôsobujú v detekčnom obvode šumový prúd.
- Šumový prúd by nemal presahovať 10^{-10} - 10^{-8} A, aby sme mohli registrovať prúd vznikajúci ionizujúcim žiarením.
- Túto podmienku spĺňa:
- kremík už pri izbovej teplote,
- germánium sa musí chladiť na teplotu kvapalného dusíka (T = 77 K).

Rôzne typy Ge detektorov a ich vlastnosti



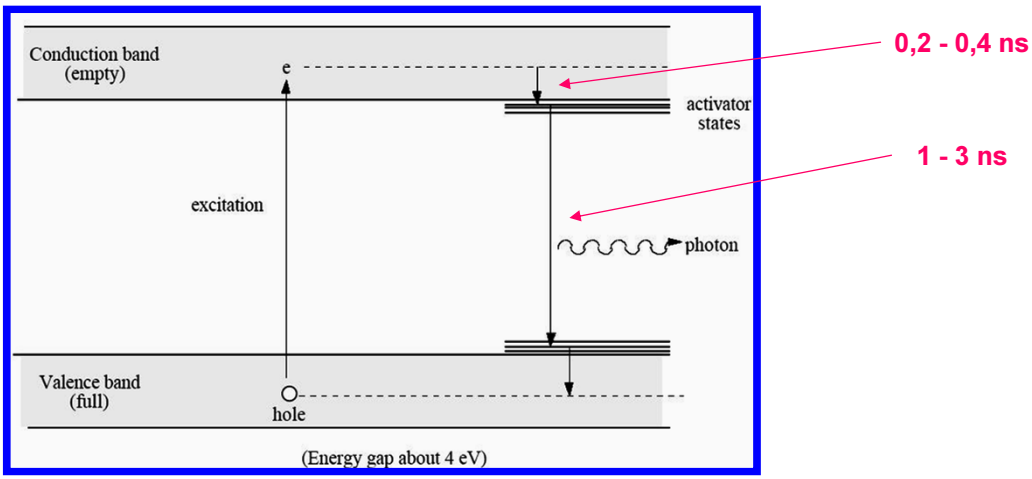
Polovodičový detektor s kryostatom



Luminiscencia

- **Luminiscencia** predstavuje emisiu svetla niektorými látkami - luminofórmi. Luminofóry môžu absorbovať energiu, časť tejto energie si uchovať a premeniť ju na svetelné žiarenie.
- **Scintilácia** - okamžitá, nestimulovaná, rýchla luminiscencia, vyvolaná dopadom ionizujúceho žiarenia
- **Termoluminiscencia** - oneskorená luminiscencia stimulovaná teplom
- **Rádiotermoluminiscencia** - termoluminiscencia, ktorá vzniká len po predchádzajúcom ožiarení ionizujúcim žiarením
- **Fotoluminiscencia** - luminiscencia stimulovaná svetlom
- **Fluorescencia** - fotoluminiscencia, ktorá trvá len dovtedy kým trvá osvetlenie
- **Fosforescencia** - fotoluminiscencia, ktorá trvá aj po prerušení osvetlenia

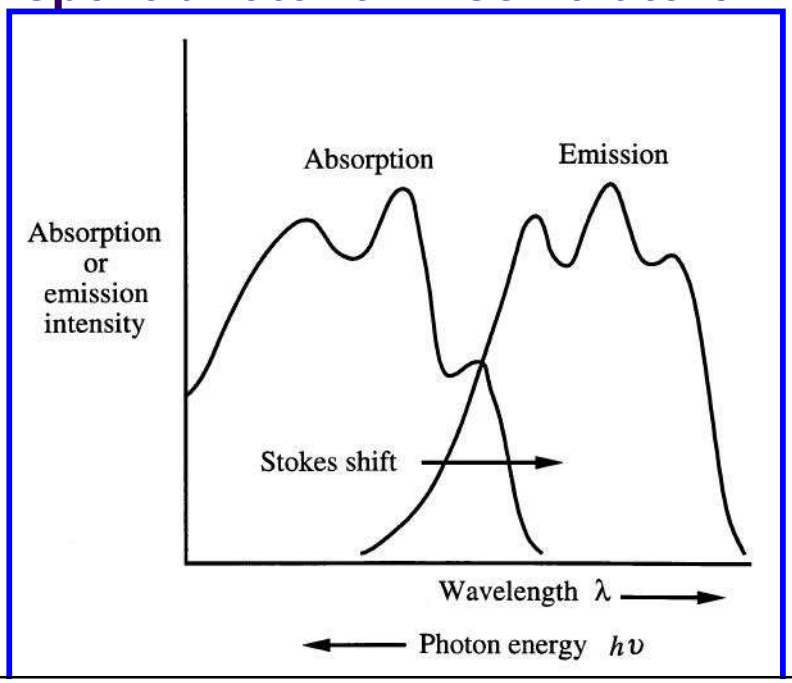
Vznik scintilácií



Inorganické scintilátory, ako napr. NaI(Tl) generujú svetelné záblesky pri deexcitácii na energetických hladinách aktivátora.

Organické scintilátory, ako napr. polystyrén $(C_5H_8O_2)_n$ zasa pri deexcitácii z molekulových hladín (UV záblesky).

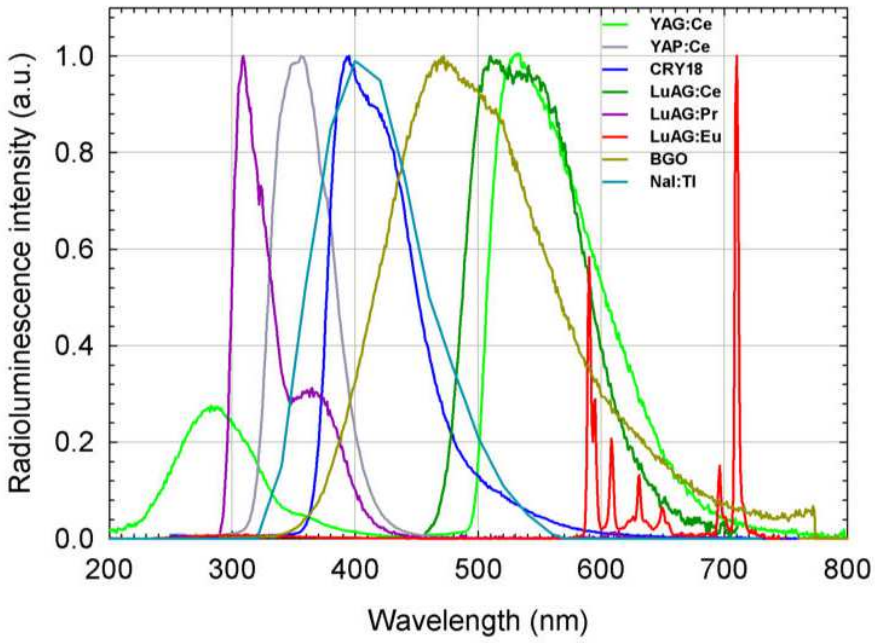
Posun spektra fotónov v scintilátore



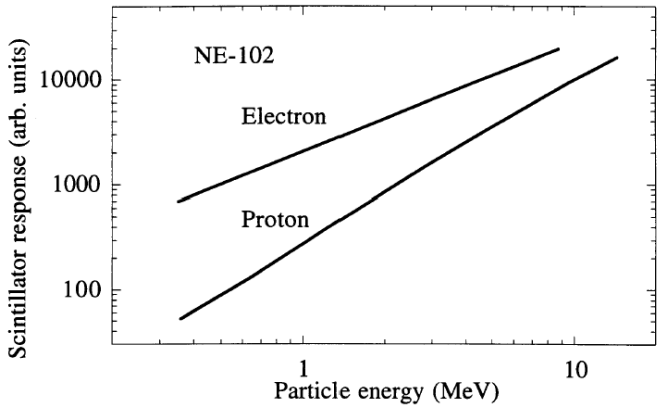
Požiadavky na scintilátory

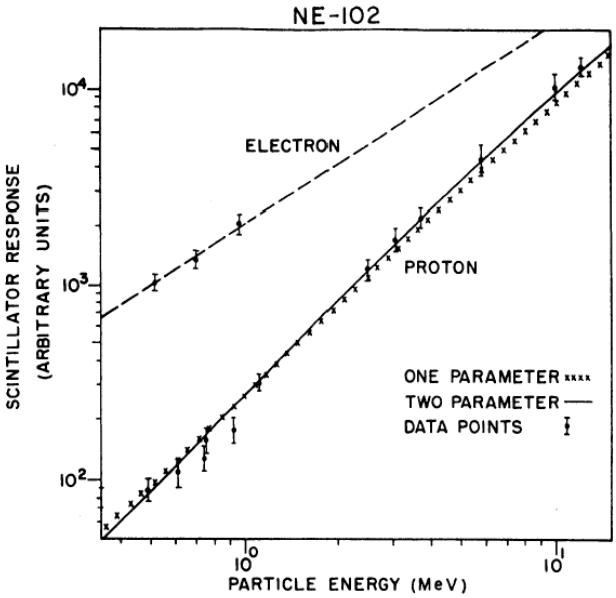
- Vysoká **luminiscenčná účinnosť** - pomer absorbovanej a emitovanej energie. Relatívna liminiscenčná účinnosť udáva pomer k štandardu, ktorým je NaI(Tl) pre gama žiarenie a antracén pre beta.
- Maximum intenzity vyžarovaného svetla (λ_{max}) musí ležať v oblasti maximálnej citlivosti použitého fotonásobiča.
- Scintilátor musí byť čo **najprehľadnejší** pre vyžarované svetlo.
- **Dosvit** scintilátora má byť čo najkratší, aby mal detektor vysokú rozlišovaciu schopnosť.
- **Hustota** scintilátora by mala byť čo najväčšia, aby mali väčšiu schopnosť absorbovať gama žiarenie.
- Intenzita vyžarovaného svetla má byť **úmerná** energii žiarenia (mernej ionizácii). To umožňuje použiť scintilátory na spektrometriu.

Emisné spektrum scintilátorov

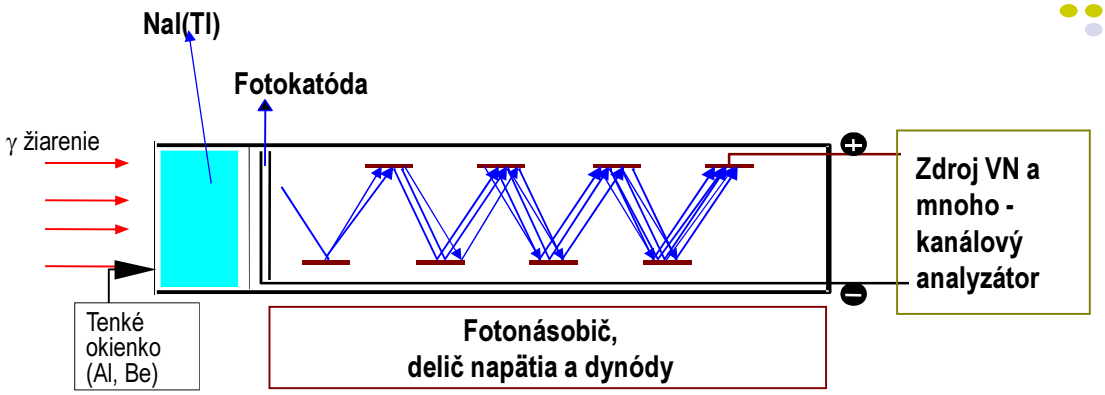


Intenzita vyžarovaného svetla je úmerná energii žiarenia (mernej ionizácii)

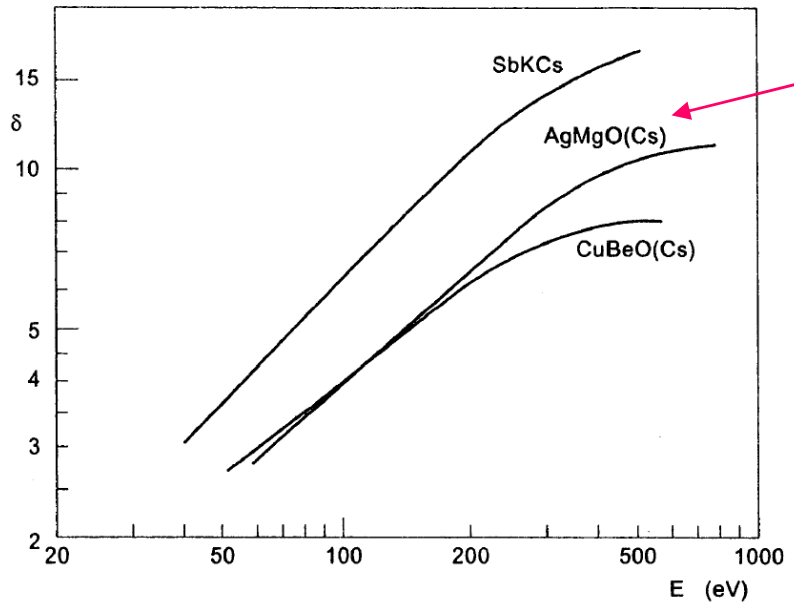




Principiálna schéma scintilačného detektora

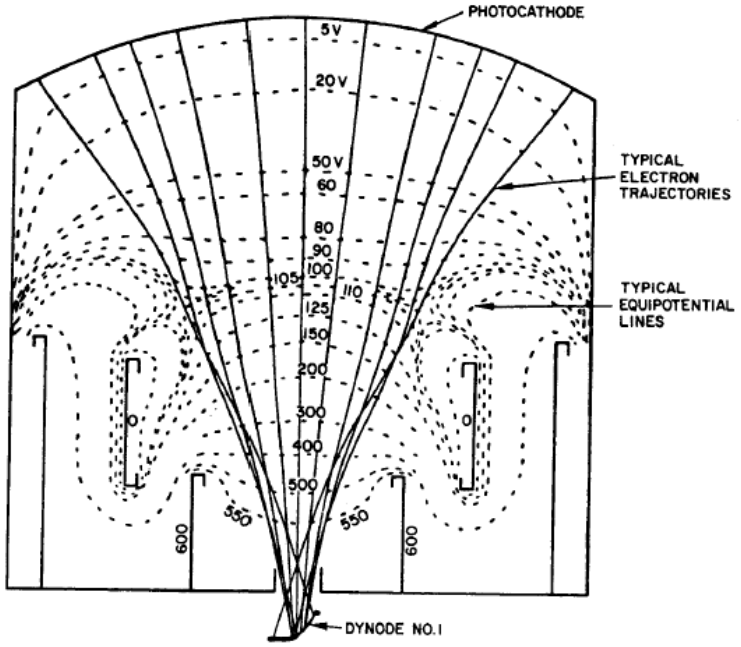


Výťažok elektrónov na dynódach v závislosti od ich energie



Materiál dynód

Usmernenie elektrónov z fotokatódy na prvú dynódu

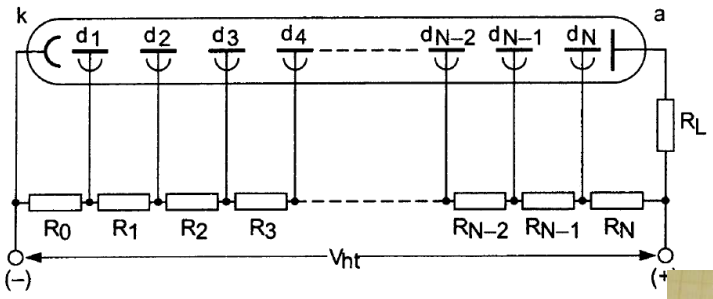


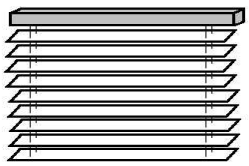
Materiál fotokatódy

QE - Quantum Efficiency

Cathode type	Composition	Peak QE	Peak λ
S1	AgOCs	0.4%	800 nm
S10	BiAgOCs	7%	420 nm
S11	CS_3SbO	21%	390 nm
S20 (multi-alkali)	Na_2KSbCs	22%	380 nm
Bialkali	K_2CsSb	27%	380 nm
Bialkali (high temp)	Na_2KSb	21%	360 nm
Bialkali (high temp)	KCsRbSb	24%	440 nm
Bialkali	RbCsSb	25%	450 nm
Solar blind	CeTe	18%	200 nm
Solar blind	CsI	15%	135 nm

Delič napätia fotonásobiča
Fotonásobič typu benátska roleta





Spravidla dosahuje pripojené VN 1-2 kV, pričom je rozdelené na 8-14 dynód s potenciálovým rozdielom 100 - 150 V.

Aby sa lepšie zozbieral náboj na prvej dynóde, je tam potenciálový rozdiel väčší ($R_0 = 3 \cdot R_1$)

Rôzne usporiadanie dynód

a) **Venetian blind** – **benátska roleta**
Allows simple input system with high collection efficiency. Good gain stability, but mediocre timing performance

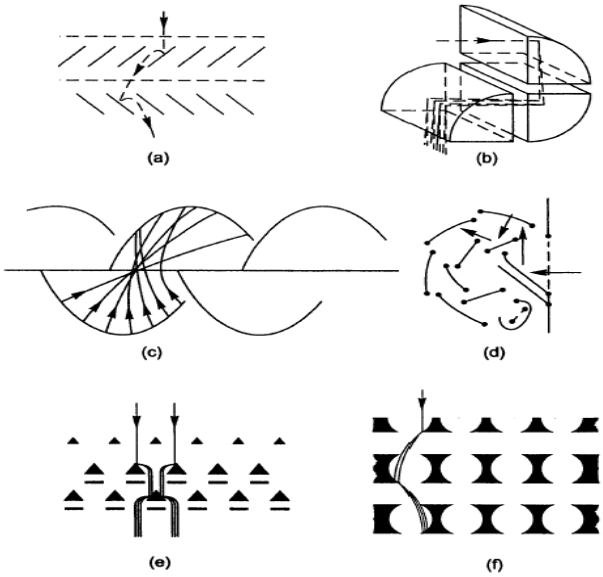
b) **Box and Grid**: characteristics similar to a)

c) **Linear focusing – časovo fokusované**: good timing characteristics

d) **Circular cage** – **kruhová sieťka**: compact

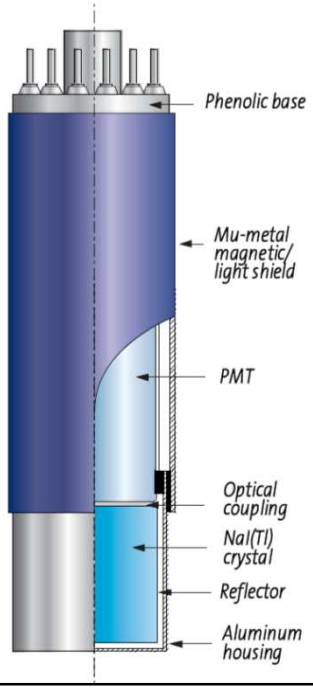
e) Mesh dynodes – **sieť dynód**:
f) low gain, but usable up to *B*=1T

g) Foil dynodes – **dierkovaná fólia**:
perforated metal foils – particularly useful for multi-channel anodes



Napájacia pätica a scintilačný detektor s integrovaným fotonásobičom

Scintilačný kryštál, napr. NaI(Tl) je umiestnený v hermetickom puzdre z ľahkého kovu (Al) natretom z vnútra svetelným reflektorom.
Optickým spojom je pripojený k okienku **fotonásobiča (PMT – photomultiplier tube),** ktorý je vo svetlotesnom magneticky odtienenom púzdre. Detekčná časť je ukončená bázovými kontaktami uchytenými v izolátore (fenoplast).
Napájacia pätica obsahuje deličku vysokého napätia pre fotonásobič, predzosilňovač impulzov a v moderných prístrojoch aj mnohokanálový analyzátor impulzov.



Parametre moderných scintilátorov

Physical properties	NaI:Tl	YAG:Ce	LuAG:Ce	YAP:Ce	BGO	CaF:Eu	CsI:Tl
Density[g/cm3]	**3.67**	**4.57**	**6.73**	**5.37**	**7.13**	**3.18**	**4.51**
Hardness [Mho]	28.5	8.5	8.6	-	4	2	5.8
Index of refraction	1.85	1.82	1.84	1.95	2.15	1.44	1.78
Crystal structure	Cubic	Cubic	Cubic	Rhombic	Cubic	Cubic	Cubic
Melting point [°C]	651	1970	2020	1875	1050	1360	621
Hygroscopic	Yes	No	No	No	No	No	Slightly
Linear coef. thermal expansion [10^{-5}/K]	4.75	0.8-0.9	-	0.4-1.1	0.7	1.95	5
Chemical formula	**NaI**	**$Y_3Al_5O_{12}$**	**$Lu_3Al_5O_{12}$**	**$YAlO_3$**	**$Bi_4(GeO_4)_3$**	**CaF_2**	**CsI**
Luminescence properties							
Integrated light output [% NaI:Tl]	100	40	20	70	15-20	50	45
Wavelength of max. emission [nm]	415	550	535	370	480	435	550
Decay constant [ns]	230	70	70	25	300	940	900
Afterglow [% at 6 ms]	0.5-5	<0.005	-	<0.005	<0.005	<0.3	<2
Radiation length [cm] for 511 keV	2.9	3.5	-	2.7	1.1	3.05	1.86
Photon yield at 300 K [103 Ph/MeV]	38	35	20	25	8-10	23	52

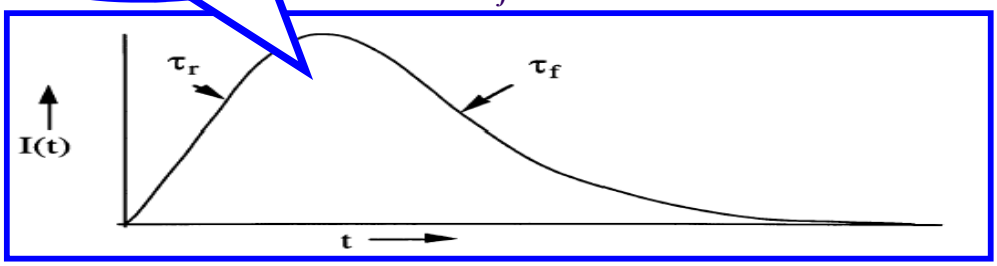
Rozlišovacia schopnosť scintilátora závisí od dosvitu

Časový priebeh svetelného záblesku v scintilátore s časovými konštantami τ_r a τ_f

$$I(t) = I_0\left(e^{-t/\tau_f} - e^{t/\tau_r}\right)$$

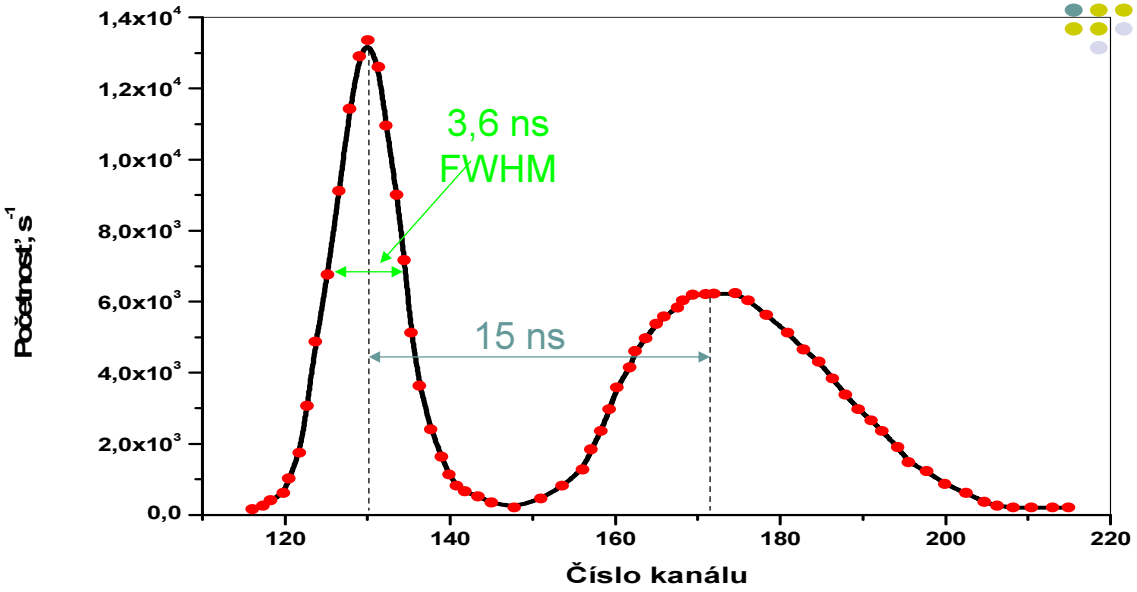
τ_r - rise, vzostup

τ_f - fall, pokles resp. dosvit



τ_f - dosvit charakterizuje čas, za ktorý klesne intenzita svetelného záblesku e - krát, má byť čo najkratší!

Dosvit po ožiarení neutrónmi a gama žiarením



Prehľad anorganických (kryštalických) scintilačných materiálov

Materiál	λ_{max} (nm)	τ_f (ns)	ρ (g/cm3)	Fotónov na 1 MeV
NaI(Tl) (20°C)	415	230	3.67	38 000
pure NaI (-196°C)	303	60	3.67	76 000
$Bi_4Ge_3O_{12}$ (20°C)	480	300	7.13	8 200
$Bi_4Ge_3O_{12}$ (-100°C)	480	2000	7.13	24 000
CsI(Na)	420	630	4.51	39 000
CsI(Tl)	540	800	4.51	60 000
CsI(pure)	315	16	4.51	2 300
CsF	390	2	4.64	2 500
BaF_2(slow)	310	630	4.9	10 000
BaF_2(fast)	220	0.8	4.9	1 800
Gd_2SiO_5(Ce)	440	60	6.71	10 000
$CdWO_4$	530	15000	7.9	7 000
CaWO4	430	6000	6.1	6 000
CeF_3	340	27	6.16	4 400
PbWO4	460	2, 10, 38	8.2	500
Lu_2SiO_5(Ce)	420	40	7.4	30 000
$YAlO_3$(Ce)	390	31	5.35	19 700
Y_2SiO_5(Ce)	420	70	2.70	45 000

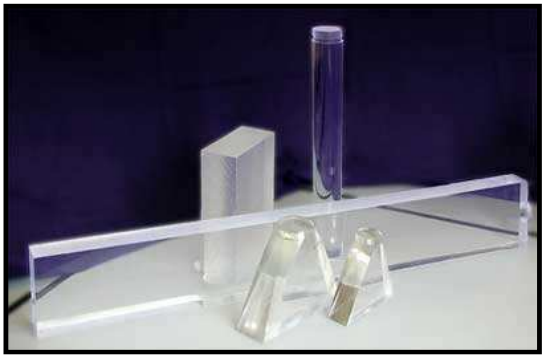
Mnohonásobná emisia

Vlastnosti organických scintilátorov

Material	State	λ_{max} [nm]	τ_f [ns]	ρ [g/cm^3]	photons/MeV
Anthracene	crystal	447	30	1.25	$1.6 \cdot 10^4$
Pilot U	plastic	391	1.4	1.03	$1.0 \cdot 10^4$
NE104	plastic	406	1.8	1.03	$1.0 \cdot 10^4$
NE102	liquid	425	2.6	1.51	$1.2 \cdot 10^4$

Svetlovody - light guides

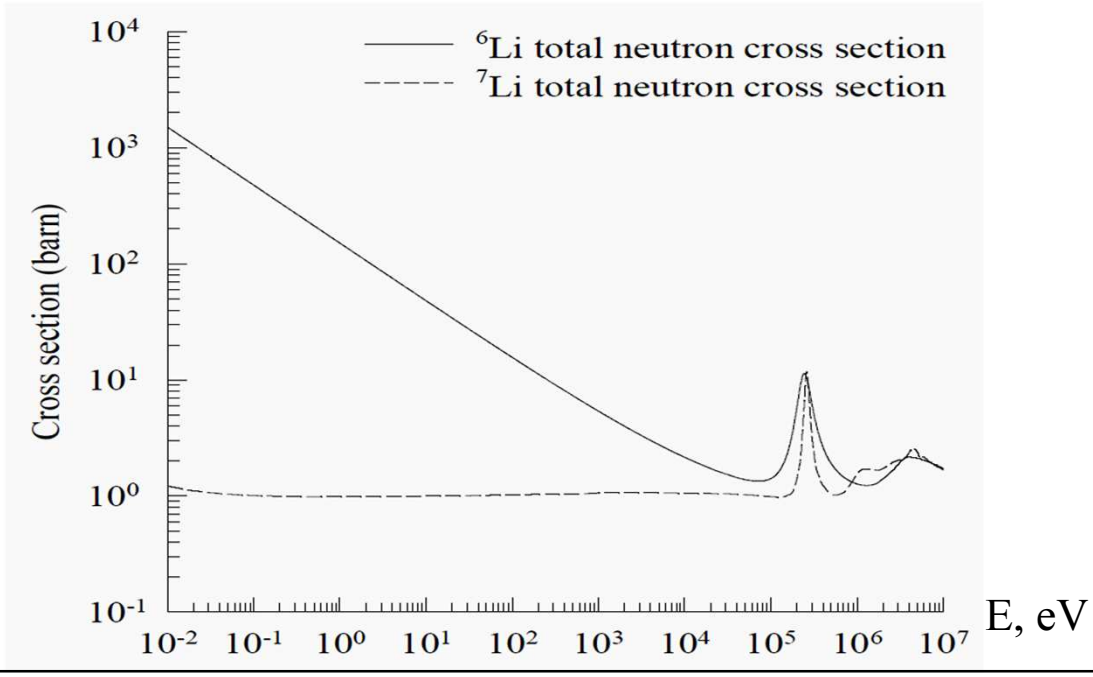
- A variety of raw materials are used depending on the scintillation material and application:
  - organic glass (PMMA)
  - special organic glass for near UV
  - optical glass (BK7)
  - quartz glass
  - organic glass or quartz glass fibers
  - fiber optic plate (FOP) or taper
  - sapphire
  - YAG(pure)



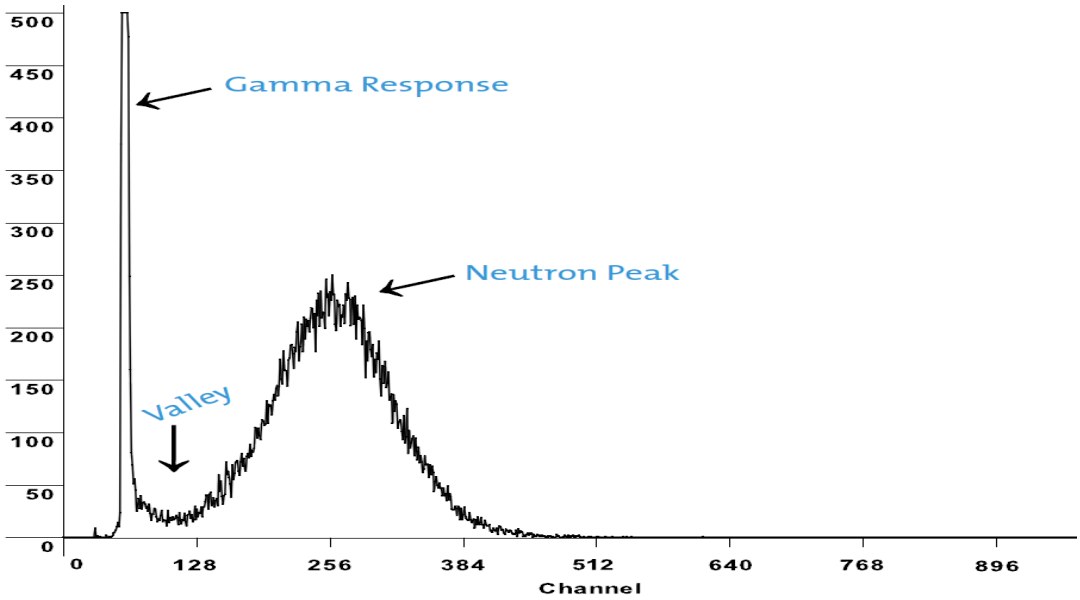
Scintilačný detektor neutrónov na báze ^{6}Li

- ^{6}LiF + ZnS(Ag) je homogénne zmiešané so spojivom a vylisované na 100 μm tenké fólie
- Využíva sa reakcia **^{6}Li + n = ^{4}He + ^{3}H + 4.8 MeV**
- Produkty reakcie spôsobujú v ZnS záblesky, ktoré sa svetlovodom s vlnovým posunom vedú k fotonásobiču
- Impulzy od gama žiarenia sa oddeľujú diskriminátorom (PSD – Pulse Shape Discriminator)

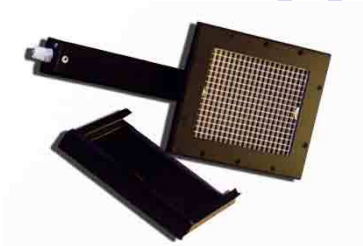
Mikroskopický účinný prierez lítia



Scintilačný detektor neutrónov na báze ^{6}Li



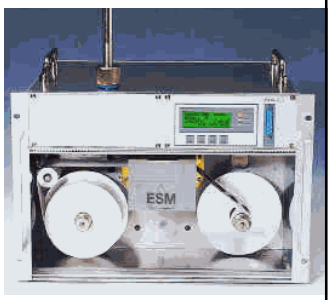
ALPHA-BETA SURFACE CONTAMINATION DETECTOR



Detector	Plastic scintillator + ZnS
Measurement range of alpha radiation energy	3–10 MeV
Measurement range of beta radiation energy	0.3–3 MeV
Measurement range of alpha flux density	1.5× 10^3 p/min cm^2
Measurement range of beta flux density	2–5× 10^3 p/min cm^2
Measurement error	± 20%
Protection	IP54
Working temperature	0 to + 50° C (or - 25 to + 50° C)
Power supply	9–18 V, 40 mA

FHT 59 C, FHT 59 Si... Monitor aerosólov

- Meranie **celkovej alfa a beta aktivity** aerosólov v plynných výpustiach jadrových zariadení. Detektor: scintilačný resp. polovodičový kremíkový (s povrchovou bariérou alebo PIPS).
- **Celková aktivita** sa líši od **sumárnej aktivity** tým, že pri meraní sa používa spoločná účinnosť detekcie pre všetky detekovateľné rádionuklidy.
- Pre alfa aktivitu sa používa účinnosť pre amerícium ^{241}Am a pre beta aktivitu účinnosť pre ^{90}Sr.



Stacionárne meradlo skrytej rádioaktivity

- Použitie:
- monitorovanie rádioaktivity v doprave (autá, vlaky, lode)
- na hraničných prechodoch, na letiskách, v železiarňach, šrotoviskách, jadrových zariadeniach.
- Modulárne usporiadanie umožňuje použitie 2 až 8 veľkoplošných plastických scintilačných detektorov 100 x 50 x 5 cm typ FHT 1388

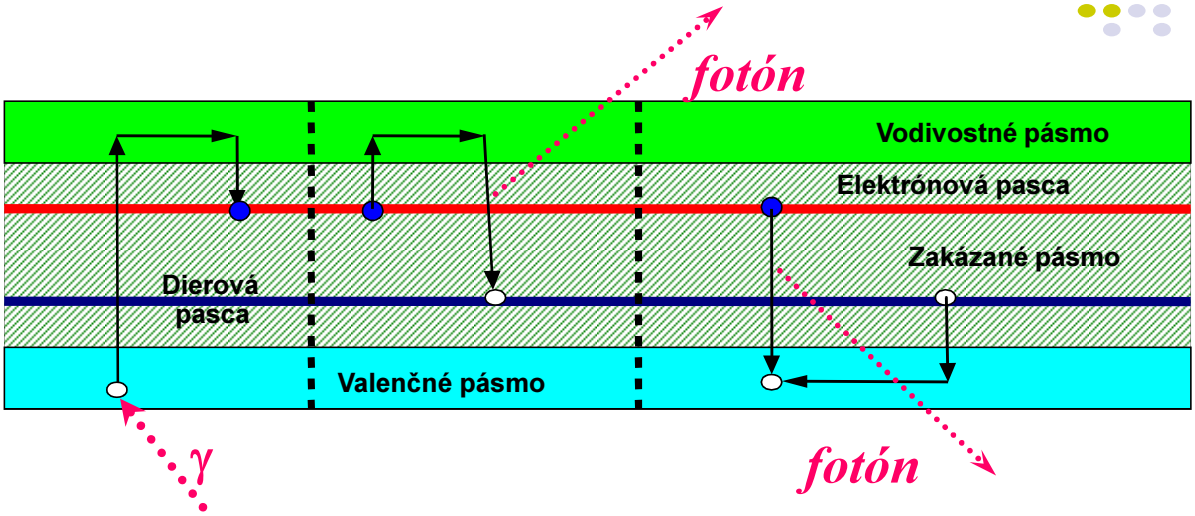
TLD dozimetre

- **Luminiscencia** predstavuje emisiu svetla niektorými látkami - luminofórmi. Luminofóry môžu absorbovať energiu, časť tejto energie si uchovať a premeniť ju na svetelné žiarenie.

<u>Využitie v dozimetrii:</u>

- Scintilácia - okamžitá, nestimulovaná, rýchla luminiscencia
- Termoluminiscencia - oneskorená luminiscencia stimulovaná teplom
- Fotoluminiscencia - oneskorená luminiscencia stimulovaná svetlom (UV)

Podstata TLD



Charakteristiky materiálov TLD

Charakteristiky niektorých termoluminiscenčných materiálov					
Typ TLD	Z_{ef}	Hlavný pík (°C)	Emisné maximum (nm)	Relatívna citlivosť	Fading (pri 25 °C)
LiF:Ti,Mg	8,3	200	400	1	5%/rok
LiF:Na,Mg	8,3	200	400	1	5%/rok
LiF:Mg,Cu,P	8,3	210	400	25	5%/rok
$Li_2B_4O_7$:Mn	7,3	220	605	0,2	4%/mesiac
$Li_2B_4O_7$:Cu	7,3	205	368	2	10%/2mesiace
$Mg_2B_4O_7$:Dy	8,4	190	490	10	4%/mesiac
BeO	7,1	190	200-400	0,2	8%/2mesiace
$CaSO_4$:Dy	14,5	220	480-570	30	1%/2mesiace
$CaSO_4$:Tm	14,5	220	452	30	1-2%/2mesiace
CaF_2:Mn	16,3	260	500	5	16%/2týždne
CaF_2 (prír.)	16,3	260	380	23	veľmi malý
CaF_2:Dy	16,3	215	480-570	15	8%/2mesiace

Používanie TLD dozimetrov

TLD dozimetre SLM

1. **TLD typu BG2 je schopný monitorovať:**
   - fotónové žiarenie v energetickom rozsahu 20 keV – 10 MeV (t.j. aj X žiarenie)
   - beta žiarenie v energetickom rozsahu 170 keV – 2,7 MeV fotónového a beta žiarenia
2. **TLD typu NBG je schopný monitorovať** okrem fotónového a beta žiarenia vo vyššie uvedených rozsahoch aj tepelné neutróny (albedo dozimeter)
3. **Prstový aj náramkový TLD** je určený ako doplnkový dozimeter pre použitie na pracoviskách so zvýšeným rizikom ožiarenia prstov, resp. rúk, kde sa vyskytujú zdroje fotónového žiarenia energie 20 keV až 10 MeV. Výsledok merania odozvy dozimetra sa udáva ako **ekvivalentná dávka** v mieste umiestnenia TLD (na najexponovanejšom mieste končatín) v jednotkách Sievert. Bez bližšej špecifikácie ožarovacích podmienok možno prstovým a náramkovým TLD merať hodnoty od 0,1 mSv do 20 Sv s presnosťou do ± 35%.

TLD dozimetre SLM

- Výsledok merania odozvy uvedených TLD je podľa Nariadenia vlády č. 345/2006 Z.z. uvádzaný v jednotkách Sievert (Sv) ako:
  - **osobný dávkový ekvivalent Hp(10)**
    osobný dávkový ekvivalent v hĺbke 10 mm
  - **ekvivalentná dávka v očnej šošovke Hp(3)**
    osobný dávkový ekvivalent v hĺbke 3 mm
  - **ekvivalentná dávka v koži a končatinách Hp(0,07)**
    osobný dávkový ekvivalent v hĺbke 0,07 mm
  - **osobný dávkový ekvivalent od neutrónov Hpn(10)**
- Z hodnôt vyššie uvedených veličín sa dá stanoviť aj efektívna dávka z externých zdrojov IŽ (E_{ext}).
- Bez bližšej špecifikácie ožarovacích podmienok možno uvedenými celotelovými osobnými TLD merať hodnoty od 0,05 mSv do 20 Sv s presnosťou lepšou ako ±35%.
- Odozva TLD mierne klesá s časom a pri spracovaní nameraných dát sa uvažuje s korekciou.

Fyzikálne parametre TLD

- TLD z LiF materiálov, používané pri vyhodnocovaní systémov HARSHAW 6600 sú charakterizované veľmi dobrou **lineárnou závislosťou odozvy** dávky v rozsahu od 0,01 mGy do 1 Gy a supralineárnou závislosťou od 1 do 20 Gy.
- Súčasne sú charakteristické **nízkou energetickou závislosťou** v oblasti pod 100 keV (30 keV/137Cs = cca 1,3) a prakticky nezávislosťou odozvy v celom zvyšnom rozsahu energií detekovaného gama žiarenia.
- Odozva meraného signálu TLD voči prijatej dávke nelineárne klesá s časom, ale pri vyhodnocovaní je korigovaná diferencovanou kalibráciou pre rôzne typy dozimetrov a rôzne doby expozície.

Fyzikálne parametre TLD – vplyv okolia

- Vzhľadom na intregrálny charakter TLD, každý integruje aj informáciu o dávke z externého IŽ z prírodných zdrojov, t.j. aj v dobe, keď ho pracovník nepoužíva priamo pri práci so zdrojmi IŽ, ako aj počas jeho uloženia a transportu od užívateľa do OOD SLM a späť.
- **Úroveň prírodného pozadia** v našej zemepisnej oblasti, na základe dlhodobých meraní TL dozimetrami sa pohybuje od cca 0,04 do 0,08 mSv/ mesiac, v závislosti od časových variácií kozmického žiarenia a skutočných radiačných parametrov okolia.
- Informáciu o dávke môže nepriaznivo ovplyvniť tiež **teplota** okolia (vysoké teploty nad 35°C) a ďalšie fyzikálne podmienky (priame UV žiarenie, el. výboj a pod.) ako aj **znečistenie** citlivých častí TLD (mastné kyseliny, prach a pod.). Je dôležité preto chrániť TLD pred všetkými škodlivými vplyvmi prostredia, puzdra zbytočne neotvárať a TLD udržiavať v čistote.

Výhody TLD Dozimetrie:

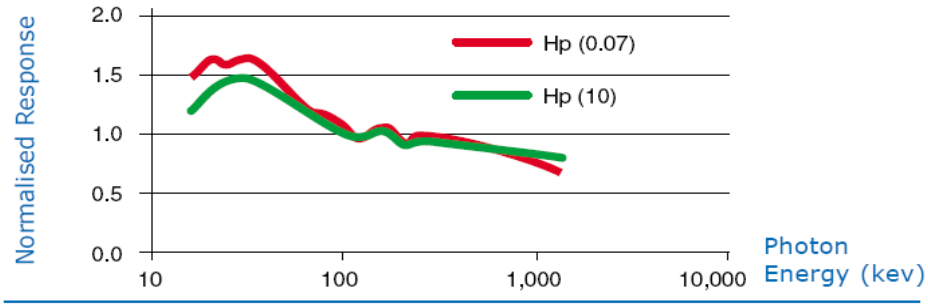
1. Široký **interval** merania dávok gama žiarenia.
2. Vysoká **citlivosť**, jednoduché použitie, malé rozmery.
3. **Malý fading** (strata údajov), čo umožňuje dlhodobé použitie.
4. Vyhodnocovaný svetelný signál je priamo **úmerný** absorbovanej dávke čo uľahčuje kalibráciu meraní.
5. LiF kryštál je pre osobnú dozimetriu gama žiarenia vhodný **tkanivu ekvivalentný** materiál. (To neplatí pre neutróny. Svetelný signál je veľmi závislý od energie neutrónov).

Nevýhody TLD dozimetrov.

1. Vyhodnocovanie dozimetrov **zničí** nameraný záznam a preto môže byť vykonané len raz.
2. Bez vyhodnocovania sa nedá povedať, či bol detektor ožiarený alebo nie. Je treba všetky dozimetre **vyhodnotiť** a žíhaním pripraviť pre použitie v ďalšom období.
3. Prach na detektore môže pri vyhodnocovaní splanúť a byť zaregistrovaný ako **falošný** signál.
4. TLD materiál je citlivý na **UV** svetlo a preto musí byť uzavretý do nepriehľadného obalu.

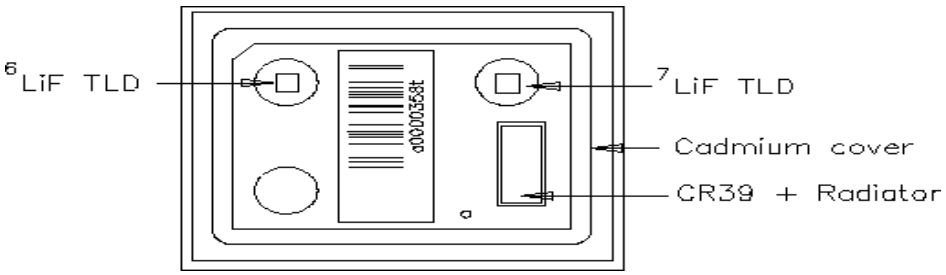
Gama a beta TLD dozimetre

Detection	X-ray and Gamma-ray	Beta Particles
Dose Range Measured	0.05 mSv to 10 Sv	0.05 mSv to 10 Sv
Energy Range Detected	10 keV to 10 MeV for Hp (0.07) 15 keV to 10 MeV for Hp (10)	700 keV to 3.5 MeV (E_{max}) for Hp (0.07)
Periods of Use	2, 4, 8, 13 weekly (calendar issue periods are also available)	2, 4, 8, 13 weekly (calendar issue periods are also available)



Závislosť odozvy TLD dozimetra od energie pre Hp(10) a Hp(0.07) normalizovaná k žiareniu cézia-137 na hodnotu 0,9.

TLD osobný dozimeter neutrónov



Izotopy ^{6}Li a ^{7}Li sú citlivé na beta a gama žiarenie.
Len ^{6}Li je citlivý na tepelné neutróny (0.025 eV to 0.6 MeV) reakciou

$$^6Li(n,\alpha)^3H.$$

Dozimeter obsahuje tabletky ^{7}LiF a ^{6}LiF. Celý je pokrytý kadmiovým plieškom aby odtienil priame pomalé neutróny. Detektor potom detekuje iba neutróny, ktorých zdrojom sú nadtepelné neutróny, spomalené v tele pracovníka a odrazili sa z vnútra tela späť do detektora. Taký dozimeter sa nazýva albedo dozimeter.
Na detekciu rýchlych neutrónov sa používa stopový detektor CR39+radiator.

Filmové dozimetre

$$Ag^{+}Br^{-}(kryštál) + h\nu(žiarenie) \rightarrow Ag^{+} + Br + e^{-} \rightarrow Ag + Br$$

- **Ich činnosť je založená na schopnosti ionizujúceho žiarenia spôsobiť sčernenie citlivej fotografickej vrstvy (vytvorenej suspenziou zŕn halogenidov striebra AgBr v želatíne).**
- **Stupeň sčernenia citlivej vrstvy je úmerný dávke žiarenia, ktoré na ňu dopadne a vyhodnocuje sa densitometrom.**
- **Za predpokladu správnej expozície (spredu) je citlivosť filmových dozimetrov na fotóny (E>0,1 MeV) 0,10 mGy až 0,15 Gy pre rutinnú dozimetriu a 0,05 Gy až 10 Gy pre dozimetriu havarijnú.**

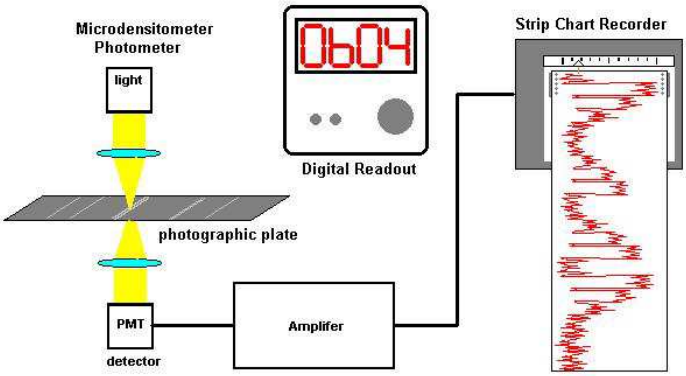
Neistoty merania filmovými dozimetrami

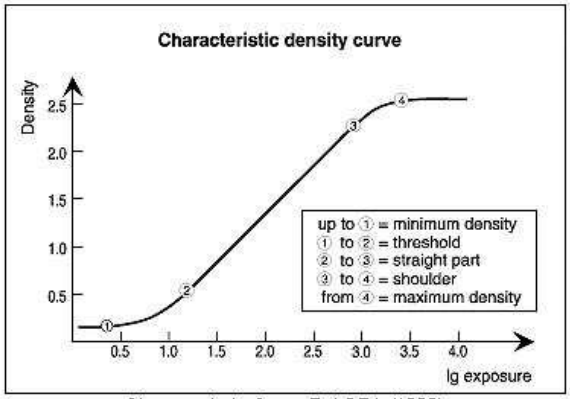
- Neistoty v údajoch filmových dozimetrov súvisia najmä s týmito faktormi:
  - energetická závislosť filmu,
  - smerová závislosť veľkosti sčernania od dávky,
  - nepresnosť pri ciachovaní,
  - nehomogenita emulzie a
  - chyby merania optickej hustoty densitometrom.

Citlivosť filmových dozimetrov

Typ žiarenia	Rutinná dozimetria	Havarijná dozimetria	Presnosť merania
γ (E>0,1 MeV)	0,1-150 mGy	0,05-10 Gy	± 25 %
β (E>0,7 MeV)	0,1-150 mGy	0,05-10 Gy	± 25 %

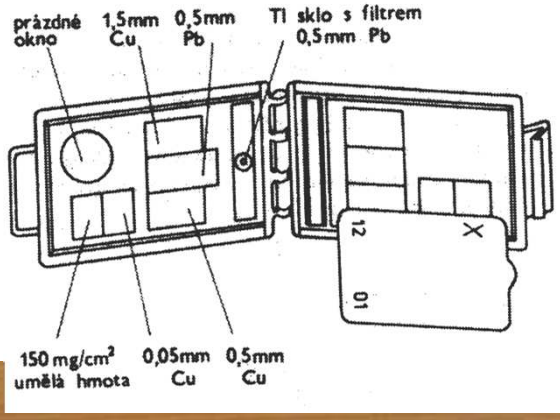
Vyhodnocovanie filmových dozimetrov

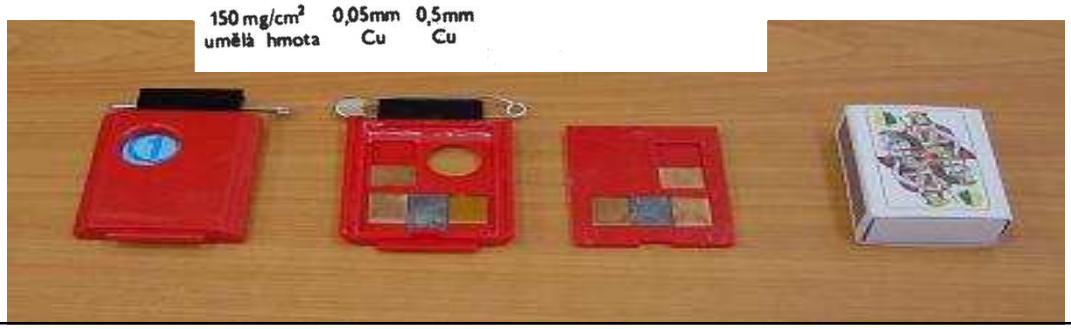




Characteristic Curve ® AGFA (1999)

Filmové dozimetre s filtrami





Základné metódy osobnej dozimetrie

filmová dozimetria (FD)

Detekčný limit: 0,1mSv

\+
permanentný záznam
možnosť určenia smeru ožiarenia

\-
citlivosť na vonkajšie vplyvy (teplo, vlhko)
obmedzená možnosť doby monitorovania
fading
komplikovaný a zdĺhavý proces vyhodnotenia

termoluminiscencia (TLD)

Detekčný limit: 0,1mSv

\+
necitlivosť na vonkajšie vplyvy
nízky fading
malé rozmery detektora

\-
neposkytuje permanentný záznam
nemožnosť určenia smeru ožiarenia
náročný proces vyhodnocovania
(*ale rýchly a s možnosťou automatizácie*)

Základní metody osobní dozimetrie

opticky stimulovaná luminiscencia (OSL)

Detekčný limit: 0,05mSv

\+
necitlivosť na vonkajšie vplyvy (teplo, vlhko)
permanentný záznam
možnosť určenia smeru ožiarenia
rýchly proces vyhodnotenia s možnosťou automatizácie
možnosť priebežného vyhodnocovania

\-
citlivosť na intenzívne svetlo (detekčný materiál musí byť v púzdre)

elektronické osobné dozimetre (EPD)

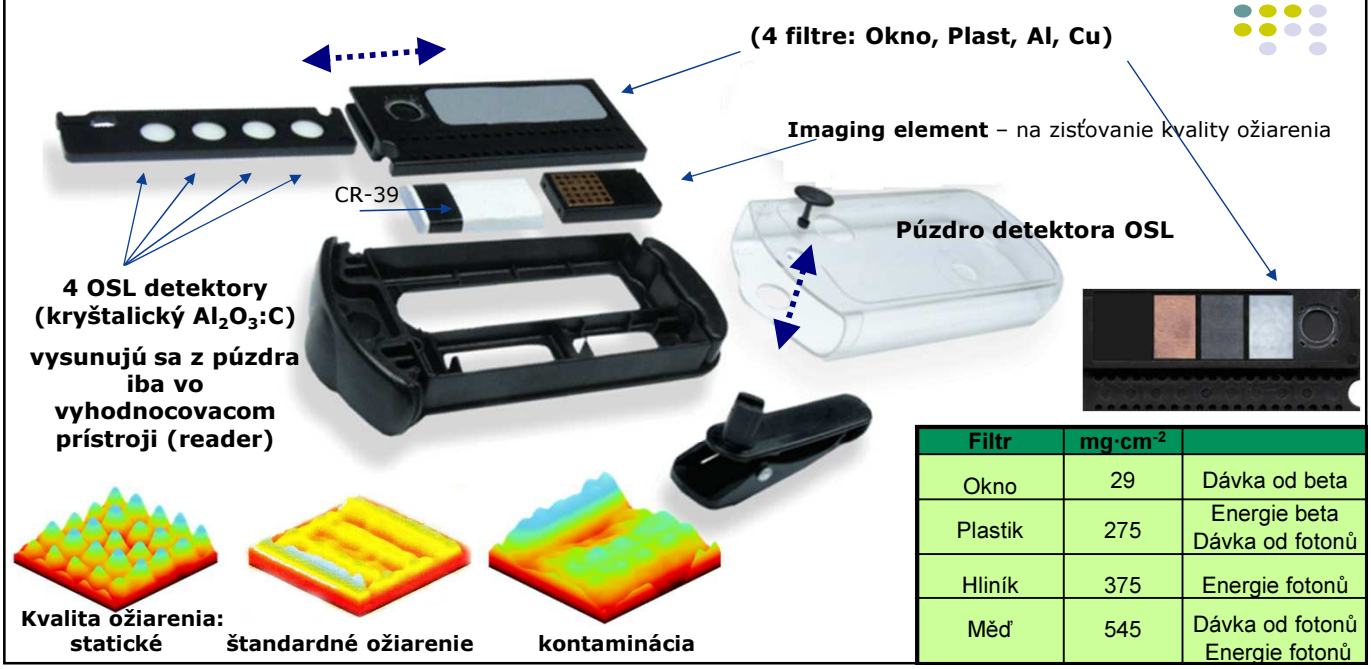
\+
zobrazenie aktuálnej hodnoty
možnosť využitia alarmu

\-
elektronické zariadenie napájané batériou
nemožnosť určenia smeru ožiarenia
potreba nadstavbového systému pre evidenciu dávok
komplikovaná kalibrácia

Základný princíp OSL je podobný na TLD

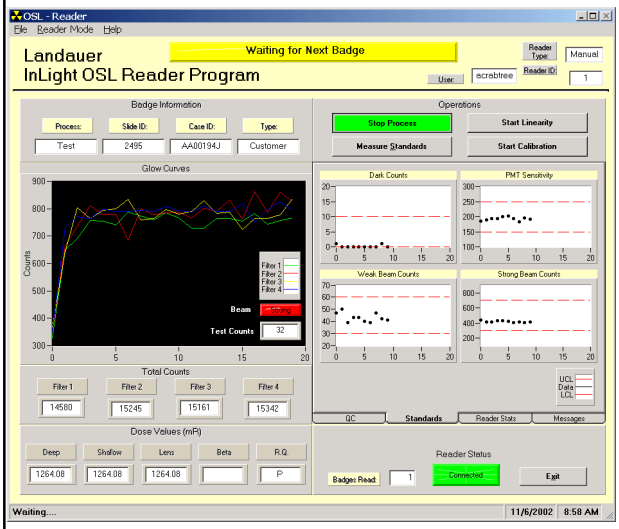
- **Materiál detektora je zafír Al_2O_3:C**
- Po ožiarení detektora dochádza k záchytu excitovaných elektrónov v elektrónových pascách
- Pri vyhodnotení dochádza ku stimulácii detektora zeleným svetlom LED diódy (532nm) a uvoľneniu zachytených elektrónov z pascí. Prechod elektrónov do základného stavu je sprevádzaný emisiou modrého svetla (420nm).
- Vyžiarené svetlo je úmerné obdržanej dávke

Celotelový dozimeter LANDAUER typ InLight



Filtr	$mg \cdot cm^{-2}$	
Okno	29	Dávka od beta
Plastik	275	Energie beta Dávka od fotonů
Hliník	375	Energie fotonů
Měď	545	Dávka od fotonů Energie fotonů

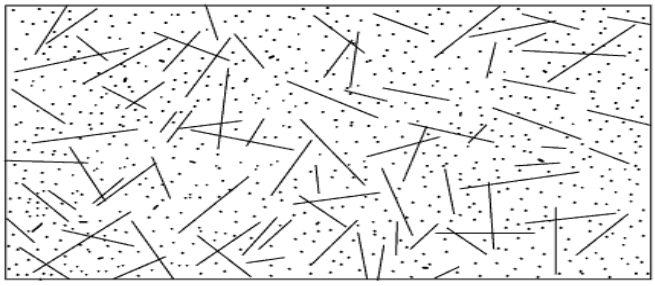
Vyhodnocovacie zariadenie – reader InLight 200a



Zásobníky s kazetami na 200ks (4x50ks) dozimetrov

Stopové detektory

- **Žiarenie pri interakcii v tuhých látkach vytvára reťazové defekty - stopy (tracks), ktoré sú viditeľné pod elektrónovým mikroskopom, alebo po chemickom leptaní sa dajú zväčšiť a sú viditeľné aj pod obyčajným mikroskopom.**
- **Sú vhodné hlavne na meranie nabitých častíc a neutrónov (hlavne meranie radónu v ovzduší).**
- **Dávka sa určuje počítaním stôp na jednotke plochy detektora.**



Positions of Measured Particle Tracks in the Cellulose Nitrate (CN) Layer of the PNTD Stack Flown on Cosmos 936

Aktivačné detektory

Sa používajú na určovanie hustoty toku neutrónov (φ) a energetického spektra neutrónov, od ktorých závisí indukovaná aktivita A_i v materiáli aktivačného detektora.

$$A_i = (1 - e^{-\lambda t}) \cdot \varphi \cdot \sigma_a \cdot \frac{p \cdot N_A \cdot M}{A}$$

σ_a - účinný prierez aktivácie
p - obsah nuklidu na 1 kg prvku
N_A - Avogadrova konštanta
M - hmotnosť prvku v detektore
A - atómová hmotnosť

Charakteristiky aktivačných detektorov

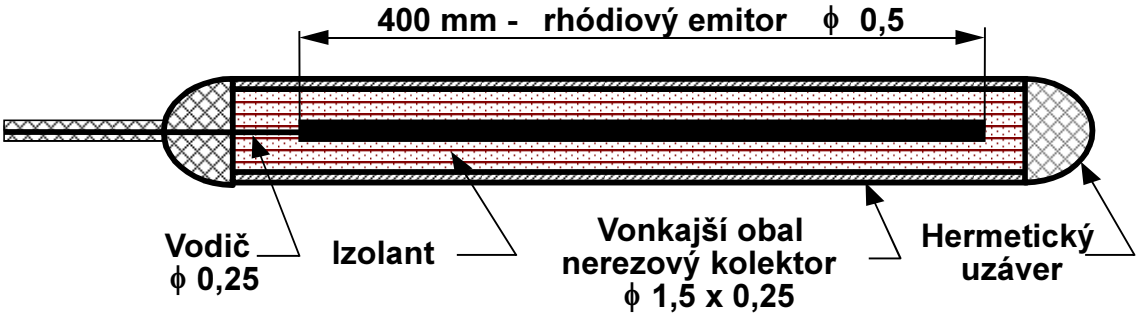
Vybrané prahové aktivačné detektory

Prvok	$T_{½}$	Prah (MeV)
$^{19}F(n,2n)$	109,7 min	11,6
$^{27}Al(n,\alpha)$	15,0 h	4,9
$^{27}Al(n,p)$	9,46 min	3,8
$^{64}Zn(n,p)$	12,7 h	2,0
$^{115}In(n,n')$	4,5 h	0,5
$^{7}Li(n,\alpha)$	12,3 r	3,8
$^{24}Mg(n,p)$	15,0 h	6,0

Aktivačné detektory tepelných neutrónov

Prvok	$T_{½}$	Prvok	$T_{½}$
^{55}Mn	2,58 h	^{107}Ag	2,3 min
^{59}Co	10,4 min	^{115}In	54,1 min
^{63}Cu	12,87 h	^{164}Dy	1,3 min
^{65}Cu	5,14 min	^{197}Au	2,695 d

Schéma samonapájacieho detektora



Materiál emitorov: Rh, Pt, Hf, V, Co, Ag

Používané izolátory: Al_2O_3, MgO ($R_{300°C} = 10^8\ \Omega$)

Materiál kolektorov: nerez, inconel 600 (Ni 60%, Cr 23%, Fe15%)

Charakteristiky emitorov

Emitter Material	Rhodium	Vanadium	Cobalt	Hafnia ($Hf0_2$)	Silver	Platinum
Emitter Diameter mm	0.46	2.0	2.0	1.24	0.65	0.51
Emitter Length mm	400	100	210	7000	7000	3050
Insulator Type	Al_2O_3	Al_2O_3	Al_2O_3	M_g0	M_g0	Al_20_3
Collector Material	Inconel	Inconel	Inconel	Stainless Steel	Stainless Steel	Inconel
Collector Diameter mm	1.57	3.5	3.5	3.0	3.0	1.6
Thermal Neutron Sensitivity A/nv	$3.6x10^{-20}$	$4.8x10^{-21}$	$5.4x10^{-21}$	$7.9x10^{-20}$	$42x10^{-20}$	$2.5x10^{-22}$
Co^{60} Gamma Sensitivity A/R/HR	$7.0x10^{-17}$	$4.0x10^{-17}$	$5.6x10^{-17}$	$2.8x10^{-16}$	$13.5x10^{-16}$	$3.4x10^{-16}$
Insulation Resistance ohms 20°C 300°C	$>10^{12}$ $>10^{8}$	$>10^{12}$ $>10^{8}$	$>10^{12}$ $>10^{8}$	$>10^{10}$ $>10^{8}$	$>10^{9}$ $>10^{7}$	$>10^{12}$ $>10^{8}$
Response Time (0-63%)	1.1 Minutes	5.5 Minutes	Prompt	Prompt	0.5 Minutes	Prompt
Burn-up Rate %/month at 10^{13}nv	0.39	0.01	0.09	0.30	0.16	0.03

Charakteristiky materiálov emitorov

Emitter Material	Stable Isotope	% Composition	Activation Cross-section (barns)	Resulting Nuclide	Half-life
Vanadium	$_{23}V^{50}$	0.24	100	$_{23}V^{51}$	Stable
	$_{23}V^{51}$	99.76	4.9	$_{23}V^{52}$	3.76 Minutes
Rhodium	$_{45}Rh^{103}$	100	11(8%)	$_{45}Rh^{104m}$	4.4 Minutes
			135(92%)	$_{45}Rh^{104}$	42 seconds
Cobalt	$_{27}Co^{59}$	100	37	$_{27}Co^{60}$	5.27 years
Hafnia	$_{72}Hf^{174}$	0.18	390	$_{72}Hf^{175}$	70 days
	$_{72}Hf^{176}$	5.20	15	$_{72}Hf^{177m}$	51.4 min
	$_{72}Hf^{177}$	18.50	380	$_{72}Hf^{178m}$	31 years
	$_{72}Hf^{178}$	27.14	75	$_{72}Hf^{179m}$	25.1 days
	$_{72}Hf^{179}$	13.75	65	$_{72}Hf^{180m}$	5.5 hours
	$_{72}Hf^{180}$	35.23	14	$_{72}Hf^{181m}$	42.4 days
Silver	$_{47}Ag^{107}$	51.82	35	$_{47}Ag^{108}$	2.42 min
	$_{47}Ag^{109}$	48.18	93	$_{47}Ag^{110}$	24.4 seconds
Platinum	$_{78}Pt^{192}$	0.78	14	$_{78}Pt^{193m}$	4.3 days
	$_{78}Pt^{194}$	32.90	2	$_{78}Pt^{195m}$	4.1 days
	$_{78}Pt^{195}$	33.80	24	$_{78}Pt^{196}$	Stable
	$_{78}Pt^{196}$	25.30	1	$_{78}Pt^{197m}$	1.3 hours
	$_{78}Pt^{198}$	7.22	4	$_{78}Pt^{199}$	30.8 min.

Použitie SPND

- **Mapovanie hustoty toku neutrónov v aktívnej zóne**
- **Regulácia reaktora (okamžité SPND)**
- **Lokálna ochrana aktívnej zóny (okamžité SPND v LWR, RBMK)**

Charakteristiky rhódiového emitora ^{103}Rh

- **^{103}Rh charakterizuje reakcia (n,β) s účinným prierezom 145 barn pre tepelné neutróny a rezonanciou pri E=1,25 eV.**
- **Burn-up rate (vyhorenie) dosahuje 0.39% za mesiac v poli tep. neutrónov s hustotou toku 10^{13} $cm^{-2}s^{-1}$.**
- **Beta emisia s energiou 2.44 MeV.**
- **SPND s rhódiovým emitorom má relatívne vysokú senzivitu ale vysoké vyhorenie,**
- **92% signálu má polčas premeny 42 s.**
- **8% signálu má polčas premeny 4.4 min.**

SPND na báze ^{51}V

- ^{51}V má účinný prierez **n-beta** interakcie s tepelnými neutrónmi 4.9 barnov
- 1/v závislosť účinného prierezu bez rezonancií v oblasti tepelných a epitepelných neutrónov.
- Rýchlosť vyhorenia je nízka **0.012%/mesiac** v poli tep. neutrónov s hustotou toku 10^{13} $cm^{-2}s^{-1}$.
- 99% signálu má polčas rozpadu 3.76 minutes, 1% signálu je okamžitá.
- Paralelná beta emisia 2.6 Mev.
- Má relatívne nízku citlivosť a malú rýchlosť vyhorenia,
- Veľmi oneskorený signál.

SPND na báze ^{195}Pt

- ^{195}Pt has a **n-gamma** interaction with a 24 barn thermal neutron cross-section and a parallel gamma-photon reaction.
- The burn-up rate is 0,03%/month in a thermal neutron flux of 10^{13} $cm^{-2}s^{-1}$.
- The signal is **prompt** and has both neutron and gamma components.
- A SPND with a platinum emitter is sensitive to both gamma and neutron fluxes with **93% of the signal current due to gamma flux** response and **7% due to neutron flux** response in a typical light water reactor core.
- A SPND with a platinum emitter has a relatively low sensitivity, low burn-up rate and a prompt signal.

SPND na báze ^{59}Co

- ^{59}Co má n-gamma interakciu s účinným prierezom 37 barn pre tepelné neutróny.
- Rýchlosť vyhárania je 0,094%/mesiac v poli tepelných neutrónov 10^{13} $cm^{-2}s^{-1}$.
- Signál je okamžitý ale vyžaduje si dlhodobú kompenzáciu signálu od vznikajúcich izotopov ^{60}Co and ^{61}Co.
- Má relatívne nízku senzitivitu, strednú rýchlosť vyhorenia a okamžitú odozvu.

SPND na báze Hf

- Hf has a n-gamma interaction with a 115 barn thermal neutron cross-section and parallel gamma-photon reaction.
- The average burn-up rate is 0.3%/month in a thermal neutron flux of 10^{13} $cm^{-2}s^{-1}$.
- 96% of the signal is prompt, 4% of signal is delayed as gamma-radiation from fission products.
- A SPND with a hafnia emitter has relatively low sensitivity, high burn-up rate, perturbs the local power density and has a prompt signal.

SPND na báze Ag

Ag has a n-beta interaction with a 64.8 barn cross-section for thermal neutrons and a few resonances in the range 5-134 eV.

The burn-up rate is 0.16%/ month in a thermal neutron flux of 10^{13} $cm^{-2}s^{-1}$.

66% of the initial signal has a half-life of 24.4 seconds.

25% of the signal has a half-life of 2.42 minutes.

9% of the signal is a prompt signal.

A SPND with a silver emitter has an average sensitivity, average burn-up rate, average perturbation of local power density and has a (two-fold) delayed signal.

Ďakujem za pozornosť

Ing. Róbert Hinca, PhD.

Príklad pre meranie a analýzu neistôt merania povrchovej kontaminácie

- Na meranie sa vzťahuje norma IEC 60325:2002 - Radiation protection instrumentation – Alpha, beta and alpha/beta (beta energy > 60keV) contamination meters and monitors.

- V príklade budeme uvažovať kontamináciu povrchu nuklidom ^{14}C.
- Merací rozsah v impulzoch za sekundu : (10 ÷ 10 000) s^{-1}
- Plocha detektora: 100 cm^2

Model function – funkcia pre výpočet aktivity obecne

$$M = F \cdot K \cdot (C - B)$$

- M – meraná veličina, teda plošná aktivita v $Bq.m^{-2}$
- F – kalibračný faktor $Bq.m^{-2}/s^{-1}=Bq.m^{-2}.s$
- K – korekčný faktor
- C – indikovaná hodnota s^{-1}
- B – pozadie

Model merania – funkcia pre výpočet aktivity

$$A = F \cdot \frac{(C - B)}{D} \cdot K_n K_{HV} K_{temp} K_{hum} K_{d,air} K_{d,geo} K_{uni} K_{sur}$$

- **A – nameraná hodnota plošnej aktivity ^{14}C, $Bq.cm^{-2}$**
- **B – nameraná hodnota pozadia, s^{-1}**
- **C – nameraná hodnota početnosti impulzov, s^{-1}**
- **D – plocha detektora v cm^2**
- **F – kalibračný faktor pre referenčný beta rádionuklid, $Bq.cm^{-2}/s^{-1}$**
- **K_n – korekčný faktor pre nelinearitu**
- **K_{HV} – korekčný faktor pre nestabilitu zdroja napájania**
- **K_{temp} – korekčný faktor pre okolitú teplotu**
- **K_{hum} – korekčný faktor pre vlhkosť**
- **$K_{d,air}$ – korekčný faktor pre absorpciu vo vzduchu medzi detektorom a vzorkou**
- **$K_{d,geo}$ – korekčný faktor pre geometriu merania**
- **K_{uni} – korekčný faktor pre nehomogenitu kontaminácie (non-uniformity)**
- **K_{sur} – korekčný faktor na absorpciu beta na povrchu**

Celkový výsledok merania plošnej aktivity

- **Výpočet hodnôt K_{uni} a K_{sur} nie je v norme špecifikovaný.**
- **Nech sú v príklade nasledovné hodnoty:**
- **$C = 1600\ s^{-1}$**
- **$B = 4\ s^{-1}$**
- **$D = (100 \pm 1) cm^2$**
- **$F=(40 \pm 8)\ Bq.cm^{-2}/s^{-1}$**
- **d = (10 ± 2) mm - vzdialenosť detektor vzorka**
- **Pri kalibrácii bola vzdialenosť detektor vzorka 5 mm.**
- **Toto treba vziať do úvahy pri výpočte $K_{d,air}$ a $K_{d,geo}$**

Vplyv vzdialenosti $K_{d,air}$

- Norma nešpecifikuje vzdialenosť povrch – detektor počas merania, my budeme uvažovať 10mm.
- Vzdialenosť počas merania nie je fixovaná.
- Pre nízkoenergetické beta žiarenie, ako je to u ^{14}C (155 keV), je presná vzdialenosť významná.
- Pri zmene vzdialenosti na 8mm, 10mm a 12mm sa mení účinnosť o 15%, 19% a 23%.
- Potom $K_{d,air}$ sa mení v rozmedzí od 1/(1-0,15) do 1/(1-0,23) teda od 1,18 do 1,3. Platí: $K_{d,air}$ = 1,24 ± 0,06

Vplyv vzdialenosti $K_{d,geo}$

- Zmena vzdialenosti mení uhol medzi detektorom a zdrojom – priestorový uhol (solid angle).
- Pre nekonečný rovnomerne kontaminovaný povrch bude vplyv zmeny vzdialenosti na uhol nulový. Naopak najväčší bude pre bodový zdroj.
- Budeme uvažovať zmenu vzdialenosti v rozmedzí (10 ± 2) mm od veľkoplošného detektora 100mm x 100mm. Účinnosť v tomto prípade bude nižšia o (10 ± 2)%, potom $K_{d,geo}$ =1,11 ± 0,02.
- Takúto zmenu potom môžeme považovať za najvyšší odhad vplyvu geometrie pri meraní v rozmedzí vzdialeností od 5mm do 15 mm.

Vplyv nehomogenity, K_{uni}

- Vplyv nie je v norme presne špecifikovaný.
- Nehomogenity rozloženia aktivity sa dajú identifikovať inými meraniami. Vieme zobrať do úvahy nehomogenitu detekcie žiarenia v detektore.
- Tieto dve hodnoty sú pre dané meranie porovnateľné a boli stanovené na K_{uni}=1,0±0,025.

Absorbcia na povrchu K_{sur}

- Na povrchu sa môžu nachádzať odstrániteľné mastnoty alebo iné nečistoty.
- Iné vplyvy netreba brať do úvahy
- Uvažujme, že vrstva je v rozmedzí od (0 ÷ 10) $mg.cm^{-2}$
- To predstavuje pre ^{14}C redukciu účinnosti (0 ÷ 76)% čo sa znamená že $1 \leq K_{sur} \leq 4{,}17$ teda $K_{sur} = 2{,}59 \pm 1{,}59$

Ostatné korekčné faktory

- Pre tento príklad budeme uvažovať hodnoty ostatných korekčných faktorov na úrovni maximálnej prípustnej hodnoty:
- $K_n = 1{,}0 \pm 0{,}1$;
- $K_{hv} = 1{,}00 \pm 0{,}01$;
- $K_{temp} = 1{,}0 \pm 0{,}05$;
- $K_{hum} = 1{,}0 \pm 0{,}025$;

Bilancia neistôt

Veličina	Najlepší odhad	Štandardná neistota	Rozdelenie	Koeficient citlivosti	Príspevok neistoty k výslednej hodnote
C	1600 s^{-1}	40 s^{-1} sqrt(1600)	Normálne	1,43 cm^{-2}	57 $s^{-1}cm^{-2}$
B	4 s^{-1}	2 s^{-1}sqrt(4)	Normálne	1,43 cm^{-2}	3 $s^{-1}cm^{-2}$
D	100 cm^2	0,6 cm^2	Rovnomerné	-22,8cm^{-4}	-14 $s^{-1}cm^{-2}$
F	40	8	Normálne	56,9s^{-1}	455 $s^{-1}cm^{-2}$
K_n	1,0	0,1/√3=0,058	Rovnomerné	2276$s^{-1}cm^{-2}$	132 $s^{-1}cm^{-2}$
K_{HV}	1,0	0,01/√3=0,006	Rovnomerné	2276$s^{-1}cm^{-2}$	13 $s^{-1}cm^{-2}$
K_{temp}	1,0	0,05/√3=0,029	Rovnomerné	2276$s^{-1}cm^{-2}$	66 $s^{-1}cm^{-2}$
K_{hum}	1,0	0,025/√3=0,014	Rovnomerné	2276$s^{-1}cm^{-2}$	32 $s^{-1}cm^{-2}$
$K_{d,air}$	1,24	0,06/√3=0,035	Rovnomerné	1835$s^{-1}cm^{-2}$	64 $s^{-1}cm^{-2}$
$K_{d,geo}$	1,11	0,02/√3=0,012	Rovnomerné	2050$s^{-1}cm^{-2}$	25 $s^{-1}cm^{-2}$
K_{uni}	1,0	0,025/√3=0,014	Rovnomerné	2276$s^{-1}cm^{-2}$	32 $s^{-1}cm^{-2}$
K_{sur}	2,59	1,59/√3=0,918	Rovnomerné	879$s^{-1}cm^{-2}$	807 $s^{-1}cm^{-2}$

$$A = (2276 \pm 944)\ s^{-1}.cm^{-2}$$

Výsledok merania povrchovej emisie

$$A = (2,3 \pm 1,9) \cdot 10^3\ s^{-1}cm^{-2}$$

Uvedená rozšírená neistota merania je stanovená vynásobením štandardnej neistoty merania koeficientom rozšírenia k=2, ktorý pre normálne rozdelenie zodpovedá pravdepodobnosti pokrytia približne 95%.

Koeficienty citlivosti charakterizujú ako sa mení výsledok merania pri zmene vstupného parametra $\Delta F/\Delta x_i$ a získava sa ako parciálna derivácia funkcie merania F od vstupného parametra X_i.

Potom platí: $\Delta y_i = (\partial F/\partial x_i) \cdot \Delta x_i$

Kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach

- IEC 60761-1:2002 Zariadenie pre kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach. Časť 1: Všeobecné požiadavky.
- IEC 60761-2:2002 Zariadenie pre kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach. Časť 2: Zvláštne požiadavky pre monitory **aerosólov** vrátane transuránových aerosólov.
- IEC 60761-3:2002 Zariadenie pre kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach. Časť 3: Zvláštne požiadavky pre monitory **vzácnych plynov**
- IEC 60761-4:2002 Zariadenie pre kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach. Časť 4: Zvláštne požiadavky pre monitory **iódu**
- IEC 60761-5:2002 Zariadenie pre kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach. Časť 5: Zvláštne požiadavky pre monitory **trícia**

IEC 60761-2:2002 Časť 2: Zvláštne požiadavky pre monitory aerosólov vrátane transuránových aerosólov.

- Aerosóly sa zo vzdušniny zachytávajú na statický filter alebo kazetu (kártridž) alebo pohyblivý filter, filtračnú pásku pod kruhovou alebo štvorcovou geometriou.
- Pri meraní alfa aktivity je dôležité minimalizovať absorbciu žiarenia vo filtri.
- Zabezpečiť rovnomerné rozloženie aktivity po ploche filtra.
- Zabezpečiť aby sa aerosól neukladal na ostatných častiach zariadenia.
- Treba minimalizovať vplyv pozadia – ^{41}Ar, ^{85}Kr, ^{133}Xe ...
- Zamedziť únikom vzdušniny cez netesnosti.
- Zariadenie má zabezpečiť aj zber vzorky pre doplnkové resp. zálohové laboratórne meranie, použiteľné aj pre overenie správnosti merania.

Meradlo aerosólov. Detektor.

- Veľkosť pracovnej plochy detektora by mala korešpondovať s veľkosťou aktívnej časti meranej vzorky.
  - Pri meraní celkovej aktivity alfa/beta môže byť detektor väčší ako vzorka,
  - pri alfa spektrometrickom meraní by plochy mali byť podobné.
- Detektorové okienko musí byť z materiálu o hrúbke:
  - Pri meraní celkovej aktivity alfa menej ako 2 mg/cm^2 (to zodpovedá ekvivalentnej strate energie 3,2 MeV)
  - Pri meraní celkovej beta aktivity musí hrúbka zodpovedať energetickému spektru meraných častíc. Môže ju stanoviť výrobca.
  - Pri použití alfa spektrometrického merania musí výrobca špecifikovať rozlišovaciu schopnosť zariadenia a vplyv pozadia resp. spôsob kompenzácie prírodných rádionuklidov (radón, tórium - oneskorené meranie).

Referenčný materiál pre kalibráciu

- Pri typovej skúške sa používa rádioaktívny aerosól so stanovenou certifikovanou objemovou aktivitou a známym AMAD (activity median aerodynamic diameter). Napr. AMAD=0,4 μm.

- Ako referenčný materiál môžu byť použité rádionuklidy:
- ^{36}Cl, ^{204}Tl alebo ^{137}Cs pre beta žiarenie
- ^{239}Pu alebo ^{241}Am pre alfa.
- Rozšírená kombinovaná štandardná neistota referenčných materiálov musí byť menšia ako ±10% (k=2).

Referenčná odozva pri meraní aerosólov

- Referenčná odozva sa nesmie líšiť o viac ako 20% od hodnoty deklarovanej výrobcom.

- Pri meraní zmiešanej alfa/beta rádioaktivity nesmie krížová účinnosť (crossover) beta žiarenia v alfa kanáli prekročiť 2% a alfa žiarenia v beta kanáli 25%.

Zmena detekčnej účinnosti pri zmene energie beta žiarenia

- Test sa robí minimálne s tromi zdrojmi:
  - $E_{b,max} \leq 0{,}4$ MeV (^{60}Co)
  - $E_{b,max}$ v rozmedzí od 0,4 do 1 MeV (^{137}Cs)
  - $E_{b,max} \geq 1$ MeV (^{89}Sr, ^{32}P, ^{90}Y)

- Pre alfa žiarenie sa test nevyžaduje, lebo účinnosť nevykazuje závislosť na energii alfa žiarenia.

Zoznam vhodných beta rádionuklidov pre meradlá aerosolov

Rádionuklid	Polčas	Maximálna energia beta spektra MeV
^{63}Ni	96 y	0,0659
^{14}C	5730 y	0,1565
^{203}Hg	46,6 d	0,2122
^{147}Pm	2,6234 y	0,2247
^{45}Ca	163 d	0,2569
^{60}Co	5,271 y	0,3179
^{137}Cs	30,0 y	0,51155(94,6%) a 1,1732(5,4%)
^{185}W	75,1 d	0,4324
^{204}Tl	3,779 y	0,7634 (97,4%)
^{36}Cl	$3{,}01 \times 10^{5}$ y	0,70955 (98,1%)
^{198}Au	2,696 d	0,28241 (1,3 %) 0,9607 (98,7%)
^{89}Sr	50,5 d	1,4913
^{32}P	14,29 d	1,7104
$^{90}Sr+^{90}Y$	29,12 y	0,545 a 2,2839

Beta s energiou menšou ako 0,01MeV a výťažkom menej ako 1% nie je uvedené

Referenčná odozva pri meraní vzácnych plynov

- Relatívna chyba merania nesmie byť väčšia ako 15 % pri štandardných podmienkach merania a pri kalibrácii urobenej v súlade s predpisom výrobcu.
- Merať je možné gama alebo beta žiarenie. Pri gama-spektrometrickom meraní musí výrobca špecifikovať rozlíšenie prístroja.

Zoznam vhodných rádionuklidov pre meradlá vzácnych plynov

Plynný žiarič	Pevný žiarič	E_{beta} stred, MeV	E_{beta} max, MeV	E_{gama} , MeV	polčas
^{85}Kr		0,251	0,67		10,72 y
	^{185}W	0,127	0,427	-	75,1d
	^{204}Tl	0,244	0,766	-	3,779 y
^{133}Xe		0,101	0,346	0,081	5,245 d
	^{241}Am	-	-	0,060	432,2 y
	^{185}W	0,127	0,427	-	75,1 d
^{135}Xe		0,307	0,92	0,25	9,09 h
	^{143}Pr	0,314	0,933	-	13,56 d
	^{204}Tl	0,244	0,766	-	3,779 y
	^{203}Hg	0,058	0,214	0,279	46,6 d
^{41}Ar		0,459	0,198	1,29	1,827 h
	^{89}Sr	0,583	0,463	-	50,5 d
	^{60}Co	0,096	0,314	1,17/1,33	5,271 y
	$^{137}Cs/^{137}Ba$	0,173/0,425	0,514/1,176	0,662	30,0 y
	$^{90}Sr/^{90}Y$	0,196/0,935	0,546/2,27	-	29,12 y

Beta s energiou menšou ako 0,01MeV a výťažkom menej ako 1% nie je uvedené

Referenčná odozva pri meraní iódu

- Referenčná odozva sa nesmie líšiť o viac ako 20% od hodnoty deklarovanej výrobcom.
- Chemická forma iódu musí zodpovedať tej, na ktorú bolo meradlo vyrobené. Môže sa použiť iód ^{131}I vo forme molekulového iódu alebo v organickej forme ako ICH_3 (metyliodid) alebo HIO_3 (kyselina iodičná).
- Zámeny nuklidov sú možné kvôli malému polčasu referenčných zdrojov:
  - ^{133}Ba miesto ^{131}I a ^{129}I miesto ^{125}I.

Referenčná odozva pri meraní trícia

- Referenčná odozva sa nesmie líšiť o viac ako 15% od hodnoty deklarovanej výrobcom.
- Na meranie referenčnej odozvy sa používa plynný referenčný materiál s obsahom trícia v chemickej forme na akú bolo meradlo vyrobené.
- Neistota stanovenia objemovej aktivity trícia nesmie presiahnuť 7%(k=2).

Kontinuálne monitorovanie aktivity v plynných výpustiach

- STN IEC 60 861:2006 Zariadenie na kontinuálne monitorovanie rádionuklidov emitujúcich žiarenie beta a gama vo vypúšťaných kvapalinách.
- Nahradzujúce normy: STN EN 60 861:2009-01 (35 6567) platí od 1.1.2009

Detektory na meranie aktivity v kvapalných výpustiach

- Môžu sa použiť detektory beta žiarenia, pričom treba zobrať do úvahy efektívnu plochu detektora, hrúbku, geometriu merania a závislosť účinnosti na energii žiarenia.
- Pri meraní gama žiarenia treba určiť energetickú závislosť účinnosti detektora a pri použití gamaspektrometrickej analýzy energetickú závislosť rozlíšenia detektora.
- Na zníženie vplyvu pozadia treba použiť tienenie alebo kompenzačné meranie iným detektorom.

Referenčná odozva pri meraní kvapalných výpustí

- Relatívna chyba merania nesmie prekročiť 15% .
- Na meranie referenčnej odozvy sa používa kvapalný referenčný materiál s obsahom nuklidu:
- Pre gama monitory – ^{133}Xe, ^{133}Ba, ^{137}Cs, ^{60}Co
- Pre beta monitory – ako v tabuľke pre aerosóly.