

CAPITOLUL 3

TRADUCTOARE DE RADIAȚII NUCLEARE

3.1 Noțiuni fundamentale



Radiațiile nucleare sunt de mai multe tipuri. După modul de alcătuire, ele se clasifică astfel:

a. Radiații electromagnetice, formate din particule fără masă de repaus:

- radiații X ($\lambda = 10^{-8} \dots 10^{-11}$ m),
- radiații Γ ($\lambda = 10^{-11} \dots 10^{-14}$ m);

b. Radiații corpusculare, alcătuite din particule cu masă de repaus:

- fascicule de particule elementare: electroni, neutroni, protoni, etc;
- fascicule de nuclee de atomi: deuteroni, helioni, etc;
- fascicule de atomi ionizați în mișcare: He^+ , Li^+ , etc.

Radiațiile nucleare cu importanță deosebită în industrie sunt: radiațiile α (nuclee de He_2^4 încărcate), radiațiile β (electroni), radiațiile X și radiațiile Γ .

Un fascicul de particule se caracterizează fie prin numărul de particule, fie prin energia particulelor sale.

În timpul interacțiunii dintre radiația nucleară și substanță apar procese specifice prin care particula incidentă este scoasă din fascicul sau cedează o parte din energia sa atomilor substanței respective. Interacțiunea depinde de proprietățile particulei incidente și ale substanței și are rol decisiv în alegerea detectorului de radiații. Procesele de interacțiune predominante ale particulelor încărcate electric cu substanța sunt ionizarea și excitarea atomilor din mediu. Acestea conduc la pierderi succesive de energie din partea particulei incidente, datorită ciocnirilor ei cu electronii sau nucleele atomilor din substanță

Sursele de radiații nucleare au construcție simplă, specifică radiației pe care o emit. *Izotopii radioactivi* sunt surse nucleare artificiale care emit în mod spontan radiații.

Sursele Γ și sursele de neutroni sunt construite din cilindri de plumb sau oțel inoxidabil, prevăzuți cu fereastră pentru iradiere, incluși în ecrane de plumb sau oțel inoxidabil cu grosimea impusă de fondul de radiație admis pentru mediul înconjurător.

Sursele tipice de radiații Γ sunt: Co^{60} , care are timp de înjumătățire 5,3 ani, este foarte puternică, necesită condiții speciale de ecranare și protecție

și se folosește tot mai puțin, și Cs^{137} , care are timp de înjumătățire 30 ani și radiație scăzută.

Sursele α , fiind puțin penetrante, nu au condiții speciale de ecranare, iar sursele β au construcții specifice, în funcție de energia electronilor emiși.

3.2 Detectoare de radiații nucleare

3.2.1 Generalități

Detectorul de radiații nucleare convertește particulele incidente pe suprafața sa activă în semnal electric (sarcină sau tensiune) sub formă de impulsuri.

După modul de interacțiune a radiației cu partea activă a detectorului sunt două tipuri de detectoare:

- detectoare cu ionizare directă (camere de ionizare, contoare proporționale, contoare Geiger – Muller, detectoare cu semiconductoare),
- detectoare cu ionizare indirectă (cu scintilație, Cerenkov, etc.).

Pentru radiațiile X se folosesc detectoare umplute cu gaz, tip numărător proporțional, calorimetre, plăci microcanal, suprafețe de fotodetectoare, detectoare superconductoare cu joncțiune tunel, etc.

Caracteristicile specifice detectoarelor de radiații nucleare sunt:

- amplitudinea impulsului de ieșire,
- viteza de numărare, egală cu raportul dintre numărul total de impulsuri și timpul de măsurare,
- puterea de rezoluție, egală cu numărul de impulsuri de ieșire în unitatea de timp,
- eficacitatea, egală cu raportul dintre numărul de particule care dau impulsuri la ieșire și numărul total de particule incidente,
- selectivitatea față de radiație,
- volumul sensibil al detectorului.

3.2.2 Detectoare semiconductoare de radiații nucleare

3.2.2.1 Introducere

Energia necesară formării unei perechi de purtători într-un detector din material semiconductor este mai mică cu un ordin de mărime față de energia necesară în camerele de ionizare. În funcție de cristalul semiconductor folosit, detectoarele sunt *omogene* (n sau p) sau *heterogene* (joncțiuni p-n).

Detectoarele omogene se realizează din material cu rezistivitate mare ($>10^8 \Omega\text{cm}$), pentru a avea zgomot mic. Sunt utilizate pentru detecția particulelor penetrante.

Detectoarele heterogene (joncțiuni p-n) sunt polarizate invers și se deosebesc de joncțiunile diodelor uzuale, prin faptul că au o regiune de sarcină spațială mai groasă (pentru volum mare) și mai apropiată de suprafață (pentru ca fereastra detectorului să aibă o grosime neglijabilă).

Timpul de răspuns este mic și se poate micșora mai mult dacă se modifică dimensiunile geometrice ale joncțiunii.

Pentru detecția radiațiilor X de energie mică se folosesc *foto diode Schottky* din siliciu, cu electrozi transparenți și acoperiri antireflectorizante. Pentru a evita ineficiența de colectare datorată recombinării de suprafață cu coeficienți mari de absorbție, se folosesc foto diode cu heterojoncțiuni iradiate prin materialul cu banda interzisă mare.

Un alt tip de fotodiodă folosit la detecția radiațiilor electromagnetice de mare energie și a particulelor nucleare este *fotodioda PIN relativ groasă*, cu substraturi semiconductoare intrinseci. Când tensiunea de polarizare inversă este mare (pentru a sărăci întreaga regiune intrinsecă), volumul sensibil al detectorului este egal cu volumul dintre electrozi.

Se folosesc adesea și *fotodiode cu avalanșă* datorită câștigului intern mare, însă necesită circuite de procesare pentru control. Ca adaptor electronic se utilizează un convertor sarcină-tensiune cu amplificator operațional cu rezistență mare de intrare, cu TECMOS sau TECj.

Pentru detecția radiațiilor nucleare cu fototranziatoare bipolare este nevoie de o joncțiune mare colector-bază.

3.2.2.2 Fotodiode pentru energii mari

Pentru detecția radiației de mare energie și a particulelor nucleare se folosesc *fotodiode PIN*.

Materialele utilizate în construcția lor sunt Si (pentru energii mai mici) și Ge (pentru energii mai mari). Se aleg cristale de mare puritate, rezistivitate mare și concentrație mică la defecte structurale. Pentru a reduce concentrația de dopant se folosesc ioni de Li. Alte materiale folosite pentru fotodiode PIN la temperatura camerei sunt CdTe și GaAs. Din cauza dificultății obținerii cristalelor de mare puritate, aceste fotodiode sunt mult mai lente decât cele din Si sau Ge.

3.2.2.3 Senzori de poziție pentru radiații X

Pentru determinarea poziției radiației nucleare pe o singură dimensiune, se divide electrodul superior al senzorului în benzi. Dacă senzorul este din siliciu, el este prescurtat SSD (*Silicon Strip Detector*). Fiecare bandă funcționează ca element de detecție separat, ceea ce determină o rezoluție spațială pe o singură dimensiune, de ordinul 5 μm .

Pentru detecția bidimensională a radiației nucleare, se folosesc SSD cu două fețe, care au benzi p pe fața superioară supusă la radiație și benzi n pe fața posterioară, perpendiculare pe benzile p. Dimensiunile unui astfel de senzor sunt de ordinul 5 cm. Dezavantajul SSD bidimensionale constă în faptul că trebuie citite mii de canale, fiecare cu circuite de preamplificare de zgomot redus, convertoare analog-numerice și circuite de memorare și analiză.

Pentru a minimiza numărul canalelor care trebuie citite, s-a realizat un senzor bazat pe o schemă de transport denumit SDC (*Semiconductor Drift Chamber*) cu cameră de deviație.

Structura senzorului SDC este prezentată în fig. 3.1.

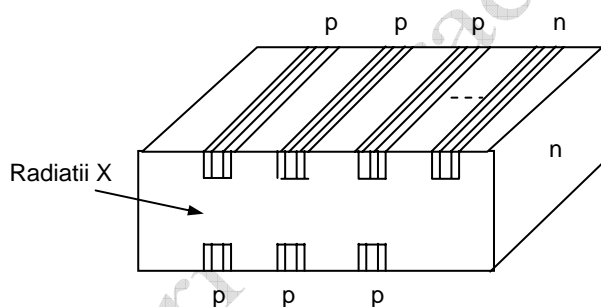


Fig. 3.1

Pe un substrat de tip n se realizează benzi p paralele, pe ambele fețe. Pe una din fețe se realizează și o bandă n. Când dispozitivul este polarizat invers, regiunile de sărăcire se extind în volum, de la joncțiunile p - n de pe cele două fețe. La creșterea polarizării, adâncimea regiunilor de sărăcire crește până când acestea se întâlnesc în mijlocul dispozitivului. În punctul lor de unire apare un canal de electroni de potențial minim, paralel cu suprafața. Un al doilea câmp electric, independent de primul, se suprapune pentru a transporta electronii colectați în canal spre contactul de anod n^+ , prin polarizarea corespunzătoare a celor două suprafețe de electrozi p^+ . Electronii creați de absorbția radiației X sunt focalizați spre canalul îngropat și se deplasează prin deviere și difuzie la anodul de colectare. Când ajunge aproape de anod, norul de electroni dă un

impuls la ieșire. Sarcina colectată este o măsură a energiei radiației. Golurile sunt colectate la cea mai apropiată bandă p^+ și impulsul rezultat este folosit pentru declanșarea începerii măsurării timpului în care norul de electroni ajunge la anod. Numărul ieșirilor necesare unui senzor SDC este de sute de ori mai mic decât la un SSD cu aceleași dimensiuni.

Un alt avantaj al senzorului cu cameră de deviație (SDC) față de alți senzori de radiație din semiconductoare este capacitatea electrică mică a anodului de colectare și independență de suprafața activă a detectorului. Se poate astfel realiza un detector cu suprafață mare și capacitate electrică de ieșire mică, reducându-se zgomotul.

Preamplificatoarele folosite trebuie să aibă rezistență foarte mare de intrare, tipic cu tranzistoare cu efect de câmp și capacități de intrare mici, de 2...3 pF. Banda de frecvență trebuie să fie peste 200 MHz și sistemul să aibă posibilitatea memorării pe condensator.

3.2.2.4 Măsurarea dozei de radiații cu tranzistoare TECMOS

Pentru măsurarea cantității de radiații emise se folosesc *dozimetre*. Un dozimetru MOS este un tranzistor MOS cu o poartă izolatoare specială (tipic din SiO_2 omogen), cu canal n sau p (cele cu canal p au zgomot mai mic), fig. 3.2.

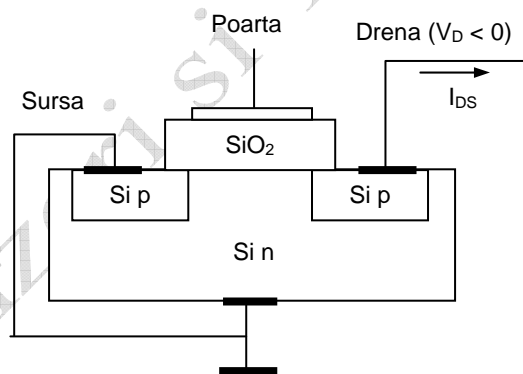


Fig. 3.2

Avantajele dozimetrelor MOS față de alte tipuri sunt: preț scăzut, dimensiuni și greutate reduse, robustețe, acuratețe, gamă dinamică mare, sensibilitate la radiații de energii scăzute, citire în timp real sau întârziată, memorarea informației, posibilitatea integrării monolitice cu alți senzori și

circuite de măsurare, condiționarea semnalului, procesarea informației și posibilitatea folosirii fără tensiune de polarizare.

Partea sensibilă a tranzistorului MOS este poarta izolatoare. Iradierea crează perechi electron – gol în întreg volumul. În funcție de câmpul electric din izolator, anumite perechi generate se recombină, iar cele care rămân sunt separate. Electronii sunt respinși de izolator iar golurile se mișcă lent spre catod, câteva fiind prinse într-o regiune îngustă de lângă catod, în capcane de goluri generate anterior în procesul de producție. Stările de interfață sunt create în timpul iradierii la interfața izolator - Si.

Rezultatul este apariția unei sarcini pozitive permanente, care modifică tensiunea de prag V_p a tranzistorului cu o cantitate ΔV_p . Această variație depinde de doza de radiații absorbită, polarizarea porții în timpul iradierii, tipul și energia radiației și grosimea izolatorului. Parametrul măsurat este ΔV_r și se obține în timpul și după iradiere, folosind schema de măsurare din fig. 3.3, unde I_{D0} este o sursă de curent constant.

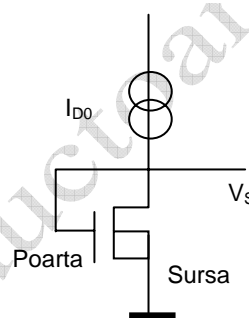


Fig. 3.3

ΔV_p se obține prin măsurarea tensiunii de ieșire V_s înainte și după o perioadă fixă de iradiere.

Răspunsul dozimetruului la iradiere depinde de polarizarea aplicată porții față de substrat și este reprezentat în fig. 3.4.

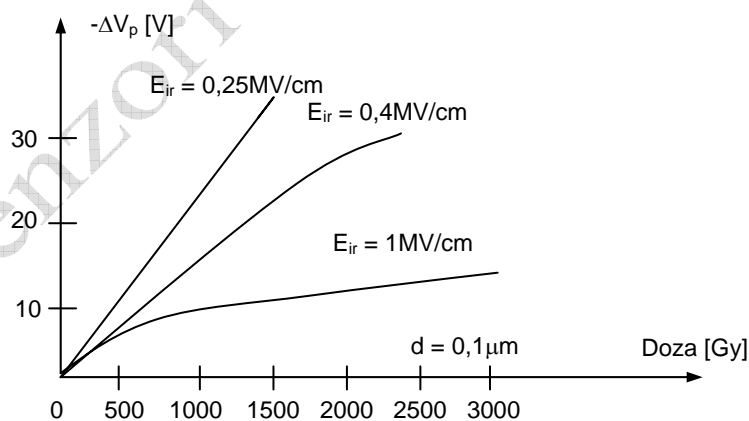


Fig. 3.4

3.2.3 Detectoare de radiații cu gaz cu microbenzi

Detectorul de radiații cu gaz cu microbenzi este o suprafață paralelă de numărătoare proporționale realizate fotografic pe un substrat rigid, ca în fig. 3.5.

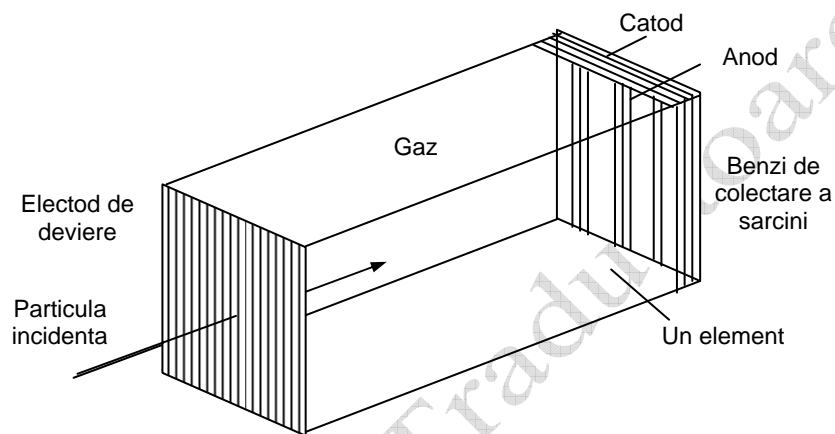


Fig. 3.5

La pătrunderea radiației în volumul detectorului, electronii ionizați sunt atrași spre anodi. Regiunea de câmp electric puternic de lângă anodi produce o multiplicare proporțională mare a numărului de electroni.

Sarcina rezultantă colectată la anodi este dată de relația:

$$Q = M \cdot \frac{E_{AB}}{W},$$

unde E_{AB} este energia absorbită de detector, W este energia medie necesară creerii unei perechi electron - gol în gaz și M reprezintă multiplicarea, cu valori de 100 ... 1000.

Detectorul cu gaz cu microbenzi este o îmbunătățire față de camera proporțională cu multe fire. Datorită spațierii fine, de 0,2 mm între anodi, se obține o rezoluție spațială mai bună decât la camera proporțională cu multe fire. Apropierea catodilor de anodi are ca efect evacuarea mai rapidă a ionilor pozitivi din regiunea de multiplicare a gazului.

Detectorul cu gaz cu microbenzi are viteza de numărare mai mare decât a camerelor proporționale cu mai multe fire și anume peste $10^6 \text{ s}^{-1}\text{m}^{-2}$ și acuratețe mare, fiind folosit în radiografia numerică, la măsurarea energiei și poziției fotonilor individuali de radiație X la viteze de numărare radiologice.

Cele mai multe tehnici radiografice folosesc în prezent o combinație de ecran fluorescent și film fotografic. Cu toate că această tehnologie este convenabilă, are rezoluție bună și este optimizată, ea are limitări semnificative cum ar fi eficiența de detecție cuantică scăzută și zgomotul granulației filmului, care elimină detaliile imaginii la frecvențe spațiale mari. De asemenea, cu un contrast de afișare fix și gamă dinamică limitată, detaliile sunt pierdute în zonele de supraexpunere sau subexpunere din imaginea de pe film.

Sistemele radiografice numerice, concepute pentru a elimina limitările sistemului cu ecran și film, sunt următoarele: fluoroscopie numerică, radiografie pe calculator, sisteme bazate pe dispozitive cuplate prin sarcină (CCD) și tehnici de conversie directe bazate pe seleniu amorf. Toate aceste sisteme funcționează în modul de integrare a energiei. Nici una din tehnologiile enumerate nu are posibilitatea de numărare a fotonilor la vitezele sistemelor de preluare a imaginilor în domeniul radiațiilor X.

Un sistem numeric de preluare a imaginilor bazat pe detector cu microbenzi are contrast ajustabil al imaginii, într-o gamă dinamică determinată doar de statistica de numărare a fotonilor, ceea ce este un avantaj față de film. În plus, acest sistem are și alte avantaje:

- eficiență cuantică de detecție mare,
- posibilitatea de îmbunătățire ulterioară a caracteristicilor imaginii folosind energia măsurată a radiațiilor X.

Detectoarele cu gaz cu microbenzi sunt folosite și pentru microdozimetrie, în centralele nucleare care au câmpuri complexe de radiație (spectru larg de câmpuri de neutroni în prezența unei radiații Γ de fond).

3.2.4 Detectoare numerice pentru radiații X

Un detector cu suprafață mare este esențial în radiologia medicală. În mod curent există două tendințe principale pentru realizarea radiografiilor numerice:

- digitizarea semnalului de la o cameră video cuplată la un intensificator de imagini pentru radiații X (instalație voluminoasă) și
- sistemul cu material fosforescent stimulabil.

Ambele sisteme sunt disponibile în variante care permit citirea instantanee, cu toate că varianta cea mai uzuală a sistemului cu material fosforescent stimulabil necesită transportul casei la scanner cu laser pentru citire. Însă calitățile acestor sisteme nu le fac acceptabile pentru toate utilizările. De

aceea, există detectoare numerice care pot funcționa în toate modalitățile radiologice curente, inclusiv radiografia și fluoroscopia.

Detectorul este o suprafață mare, plată, care se potrivește dimensional cu sistemele convenționale. Folosind unul sau mai multe straturi pentru absorbția radiațiilor X, el convertește energia în sarcină electrică folosind o suprafață integrată matricială activă pentru autoscanarea sarcinii electrice a imaginii.

Pentru realizarea conversiei se folosesc două metode:

- metoda directă, care folosește suprafață fotorezistivă pentru conversia radiațiilor X în sarcini electrice și
- metoda indirectă, cu strat din material fosforescent și suprafață de fotodiode. Modelarea teoretică arată că fluoroscopia este dificilă datorită semnalelor mici și citirii în timp real.

O comparație între senzorii medicali convenționali pentru radiații X și anume cu strat din pudră de material fosforescent și cu material fosforescent structurat, sau cu straturi fotorezistive arată creșterea rezoluției la cei din urmă. Radiațiile X absorbite într-un ecran din material fosforescent eliberează lumină care trebuie să ajungă la suprafață pentru a crea o imagine. Împrăștierea laterală a luminii este limitată doar de difuzie. Astfel, diametrul elementului de imagine este comparabil cu grosimea ecranului. Cu cât ecranul este mai gros (pentru a crește eficiența de absorbție cuantică) scade rezoluția imaginii. Folosind ecran fosforescent, crește rezoluția imaginii.

O altă metodă este utilizarea unei suprafețe fotorezistive nestructurate. Radiațiile X care interacționează cu placa fotorezistivă eliberează electronii și golurile, ghidându-i direct la suprafețele plăcii fotorezistive.

Cerințele unui detector de radiații X numeric, ideal sunt:

- să accepte imaginea în același timp (detector cu integrarea imaginii),
- citirea trebuie să fie imediată și electronică (fără casetă în mișcare),
- calitatea imaginii trebuie să fie apropiată de limita teoretică pentru toți parametrii relevanți ai operațiunilor de preluare de imagini care interesează (eficiență cuantică mare de absorbție a radiațiilor X și nu trebuie să se degradeze semnificativ imaginea prin zgomotul excesiv de fluctuație al câștigului, zgomotul amplificatorului folosit sau zgomotul cuantic secundar).

Într-o structură cu citire și autoscanare imaginea creată într-un anumit plan este citită în același plan. Când sunt necesare dispozitive cu suprafață foarte mare (de exemplu, 30 cm x 30 cm), nu se pot folosi circuite integrate din siliciu de mare puritate. Se utilizează circuite mai simple, denumite matriciale active, cu substraturi ieftine, de exemplu sticlă.

Cel mai folosit semiconductor în suprafețele matriciale active cu straturi subțiri este siliciul amorf hidrogenat a – Si : H. Acesta are un număr mic de dispozitive (condensatoare mici 1 ... 2 pF, tranzistoare cu strat subțire).

Elementul de control al tranzistorului cu strat subțire este poarta ce permite deschiderea și închiderea tranzistorului, variind potențialul porții (fig. 3.6).

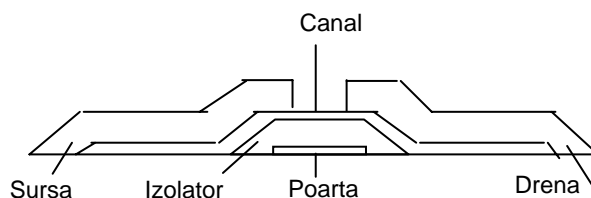


Fig.3.6

O asemenea suprafață mare poate fi folosită ca afișaj sau ca senzor. În ambele cazuri scanarea se face prin activarea liniei comune de grilă pentru un rând, activând astfel câte un rând de tranzistoare cu strat subțire. Sarcina poate fi citită (pentru senzori) de la un rând, folosind liniile de date conectate la fiecare coloană. După citirea unui rând, linia porților blochează tranzistoarele din acel rând. Secvența se repetă citindu-se întreaga suprafață.

Pentru utilizare ca senzor de radiații X, se depune un strat fotorezistiv astfel încât fiecare electrod citește imaginea latentă a sarcinilor creată de acțiunea radiațiilor X. Acest lucru se realizează fie direct (în stratul fotorezistiv), fie indirect folosind un strat fosforescent pentru a converti energia radiațiilor X în lumină, care ulterior este detectată în stratul fotorezistiv.

3.2.5 Dozimetre cu fibre optice

Dacă absorbția optică indusă într-o fibră optică multimod de radiația ionizantă depinde doar de doza absorbită, fibra optică conectată la un reflectometru optic în domeniul timp (OTDR) este folosită pentru monitorizarea distribuită la distanță, pe termen lung a dozei de radiații pe o suprafață mare.

Se pot folosi fibre optice din silică dopate cu fosfor, pământuri rare sau plumb, dopanți care produc centre de culoare stabile induse de radiație.

Informația dată de dozimetru depinde de doză și de temperatură, fiind parțial ștersă când se oprește radiația. La creșterea dozei de radiații, absorbția este saturată. De exemplu, fibra optică de silică dopată cu fosfor nu poate fi folosită la măsurarea dozelor mari.

Un efect reversibil indus de radiație este difuzia hidrogenului din învelișul cu număr mare de grupări hidroxil OH spre miezul cu număr mic de grupări OH a unei fibre optice, determinând creșterea benzilor de absorbție ale

grupărilor OH. În fibrele optice cu miez din silică nedopat, înveliș cu număr mare de grupări OH și miez cu număr mic de grupări OH, radiația ionizată desface legăturile O-H și lasă hidrogenul să difuzeze din înveliș spre miez, unde face din nou legături cu oxigenul. Ca rezultat, amplitudinea benzilor de absorbție ale grupării OH crește.

Pentru a determina variația benzii de absorbție optică a grupării OH se pot măsura pierderile optice la două lungimi de undă apropiate, situate pe unul din flancurile benzii. O altă cale de a extrage semnalul util este să se folosească trei lungimi de undă.

Senzori si Traductoare