

4

SÄTEILYN ILMAISIMET

Seppo Klemola

SISÄLLYSLUETTELO

4.1	Perusteet	116
4.2	Kaasutäytteiset ilmaisimet	116
4.3	Tuikeilmaisain	122
4.4	Puolijohdeilmaisain	126
4.5	Filmi	130
4.6	Termoloisteilmaisain	132

4.1 | Perusteet

Säteilyn ilmaiseminen perustuu aina säteilyn ja aineen vuorovaikutukseen. Vuorovaikutuksessa säteily menettää energiaa ionisoimalla ja viritämällä väliaineen atomeja sekä tuottamalla lämpöä. Väliaine voi olla kaasua, nestettä tai kiinteää ainetta. Säteilyn ilmaisemisen kannalta on oleellista, että aineessa syntyy muutoksia, jotka voidaan havaita. Signaalinkäsittelyjärjestelmä muuttaa havainnot sellaiseen muotoon, jota voidaan laskea, kerätä tai lajitella sen mukaan millaista tietoa säteilystä halutaan saada.

Säteilyn synnyttämät varauksenkuljettajat (ionit, elektronit ja aukot) saavat aikaan virran ilmaisimen elektrodien välille. Tähän perustuvat ilmaisimet ovat joko kaasutäytteisiä tai kiinteitä ainetta, tavallisesti puolijohdemateriaalia. Säteilyn aiheuttaman viritystilan purkautuminen voi synnyttää valoa, joka puolestaan rekisteröidään valoherkillä ilmaisimilla kuten valomonistinputkella, joka muuttaa valon sähkövirraksi. Tähän perustuvat tuikeilmaisimet ja Tsherenkov-ilmaisimet.

Säteilyn ilmaisimet voidaan myös jakaa niiden antaman informaation mukaan kahteen ryhmään: signaali-ilmaisimiin ja ratailmaisimiin. Signaali-ilmaisimien laskee säteilypulssien, hiukkasten ja kvanttien määrää ja laatua. Ratailmaisimella saadaan esiin hiukkasen tai säteen kulkema rata.

4.2 | Kaasutäytteiset ilmaisimet

Yksinkertaisin ilmaisimien on kaasun täyttämä tila kahden elektrodin välisessä sähkökentässä. Kun ionisoivaa säteilyä osuu tilaan, se synnyttää ionipareja, jotka kerätään elektrodeille. Sähkökentän voimakkuudesta riippuen ilmaisin toimii eri tavoilla, jolloin sitä sanotaan joko ionisaatiokammioiksi, verrannollisuuslaskuriksi tai geigerputkeksi. Näiden niin sanottujen kaasutäytteisten ilmaisimien toiminta-alueet nähdään kuvasta 4.1.

Ionisaatiokammio

Pienillä keräysjännitteen arvoilla (kuva 4.1, alue I) osa syntyneistä positiivisista ja negatiivisista ioneista ehtii yhtyä uudelleen neutraaleiksi atomeiksi eli rekombinoitua ennen saapumista elektrodeille. Alueella II keräysjännite on tarpeeksi suuri, niin että käytännöllisesti katsoen kaikki varaukset saadaan kerättyä ennen rekombinaatiota. Tällä ionisaatiokam-

mion toiminta-alueella saadaan ilmaisimesta signaali, jonka amplitudi on suoraan verrannollinen säteilyn luovuttamaan energiaan.

Rekombinaation todennäköisyys riippuu varaustiheydestä eli syntyvien ioniparien määrästä. Siten suuremmalla annosnopeudella tarvitaan suurempi keräysjännite, jotta kaikki varaukset saadaan kerättyä. Raskaimmat ionisoivat hiukkaset, kuten alfahiukkaset, aiheuttavat suuren paikallisen varaustiheyden ja tarvitsevat siten rekombinaation estämiseksi suuremman keräysjännitteen kuin beeta- ja gammasäteily.

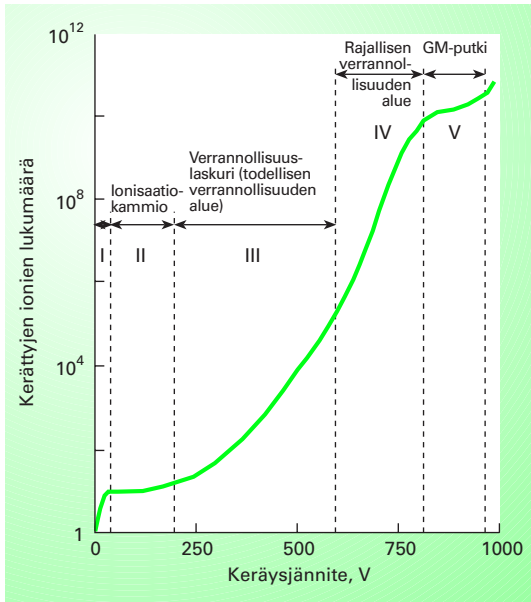
Suurilla annosnopeuksilla kammion varaustiheys voi olla niin suuri, että rekombinaatiota ehtii tapahtua, vaikka keräysjännite olisi toiminta-alueen ylärajalla. Tästä aiheutuva virhe on otettava huomioon tarkoituksissa. Ionisaatiokammion keräystehokkuus f määritellään elektrodeille kerätyn ja kammiossa syntyneen varauksen suhteena. Rekombinaatiokorjaus, jolla mitattu varaus on kerrottava on siten $1/f$. Korjauskerroin voidaan laskea teoreettisesti, mutta on yksinkertaisempaa ja käytännöllisempää määrittää se kokeellisesti. Yleisimmässä kokeellisessa menetelmässä mittaukset tehdään normaalin keräysjännitteen (V_1) lisäksi myös pienemmällä jännitteellä (V_2). Jos vastaavat kerätyt varaukset ovat Q_1 ja Q_2 , saadaan rekombinaatiokorjaus jännitteelle V_1

$$\frac{1}{f} = \frac{\frac{V_1^2}{V_2^2} - 1}{\frac{V_1^2}{V_2^2} - \frac{Q_1}{Q_2}} \quad (4.1)$$

Edellä oleva yhtälö pätee jatkuvalla säteilyllä, mutta vastaava voidaan johtaa myös pulssimuotoiselle säteilylle.

Ionisaatiokammiota käytetään yleensä mittaamalla ionisaatiosta aiheutuva keskimääräistä virtaa. Koska virta on verrannollinen syntyvien ioniparien lukumäärään, voidaan kammiolla määrittää säteilytys tai absorboitunut annos. Pulssi-ionisaatiokammiolla tarkastellaan ionisoivien hiukkasten aiheuttamia yksittäisiä virtapulsseja, jolloin laitetta voidaan käyttää hiukkasten energioiden tai lähteen aktiivisuuden määrittämiseen.

Ionisaatiokammiossa syntyvien ioniparien lukumäärä ja edelleen virta on suoraan verrannollinen kammion täyttävän kaasun massa- ja tiheyteen. Yleisin täytekaasu on ilma, mutta myös argonia tai argonin ja metaanin seosta käytetään. Kaasu on tavallisesti normaalipaineessa, mutta erittäin



KUVA 4.1 Kaasutäytteisten ilmaisimien toiminta eri keräysjännitteillä

Koska kammion antama virta on yleensä hyvin pieni, tarvitaan sen mittaamiseen erittäin herkkä elektrometri ja lisäksi mahdolliset vuotovirrat on minimoitava. Kammio on yleensä hyvin stabiili pitkiäkin aikoja eikä tarvitse uudelleen kalibrointia edes vuosiin. Ionisaatiokammio soveltuu hyvin röntgen- ja gammasäteilyn mittaamiseen. Kammion vaste voidaan saada hyvin riippumattomaksi säteilyn energiasta.

Verrannollisuuslaskuri

Kun kaasutäytteisessä ilmaisimessa keräysjännitteen nostaminen lisää ionien ja erityisesti elektronien energiaa tarpeeksi, ne alkavat aiheuttaa lisää ionisaatiota törmäillessään kaasumolekyyleihin. Syntyneet uudet elektronit kiihtyvät myös sähkökentässä ja lisäävät edelleen ionisaatiota. Seurauksena on elektronivyöry, joka loppuu vasta, kun kaikki vapaat elektronit ovat kulkeutuneet anodille. Tätä sanotaan kaasumonistukseksi. Tyypillisessä ilmaisinkaasussa yhden ilmakedän paineessa alkaa kaasumonistusta tapahtua, kun sähkökentän voimakkuus on luokkaa 10^6 V/m. Vaikka elektrodille kertyvä varaus monituhatkertaistuu, se on kuitenkin yleensä verrannollinen alkuperäiseen ioniparien lukumäärään; tästä tulee nimi verrannollisuuslaskuri.

pieniä annosnopeuksia mitataan kammiolla, jonka kaasu on korkeassa (noin 25 bar) paineessa (paineionisaatiokammio).

Tarkoissa mittauksissa on käytettävä korjauskerrointa, joka ottaa huomioon ilman lämpötilan ja paineen mittaus- ja kalibrointitilanteessa. Korjauskerroin saadaan yhtälöstä

$$k_p = \frac{TP_{ref}}{pT_{ref}}, \quad (4.2)$$

missä T on lämpötila (K) ja p ilmanpaine mittaushetkellä sekä T_{ref} ja p_{ref} vastaavat kalibrointitilanteen arvot.

Verrannollisuuslaskurin toiminta-alueella (kuva 4.1, alue III) varauspulssin amplitudi kasvaa, kun keräysjännitettä nostetaan. Aluetta, jolla kaasumonistus on lineaarista, kutsutaan todellisen verrannollisuuden alueeksi. Jos keräysjännitettä nostetaan edelleen, tulee elektronivyöry niin suureksi, että sähkökenttä alkaa vääristyä anodin lähellä. Tämä johtuu siitä, että hitaammin liikkuvat positiiviset varaukset eivät ole ehtineet pois anodin luota. Niiden laajeneva pilvi tukahduttaa jatkuvan elektroninmonistuksen, jolloin syntyvä pulssi ei ole enää suoraan verrannollinen primaari-ionisaatioon. Näitä keräysjännitteen arvoja sanotaan rajallisen verrannollisuuden alueeksi (kuva 4.1, alue IV).

Tyypillinen verrannollisuuslaskuri on sylinteri, jonka akselilla oleva ohut lanka toimii anodina. Tämä järjestely on edullinen kahdesta syystä. Ensinnäkin, sylinterisymmetrian ansiosta sähkökenttä voimistuu putken akselia kohti ja saavuttaa kaasumonistuksen edellyttämän voimakkuuden. Toisaalta, kaikkialla putken alueella tapahtuvan ionisaation seurauksena vapautuvat elektronit vaeltavat voimakkaan kentän alueelle ja käytännöllisesti katsoen kaikki sekundaarielektronit syntyvät anodin välittömässä läheisyydessä. Näin kaikki elektronit saavat saman vahvistuksen riippumatta ionisaation tapahtumapaikasta, mikä on edellytyksenä laskurin hyvälle energianerotuskyvyille. Hyvä aikaerotuskyky, jopa 0,2–0,5 mikrosekuntia, seuraa siitä, että sekundaarielektronit saadaan myös kerättyä hyvin nopeasti. Jos laskuria käytetään hiukkasten energioiden mittaamiseen on erotusaika noin 100 mikrosekuntia.

Toisessa yleisessä verrannollisuuslaskurin konfiguraatiossa säteilylähde voidaan asettaa puolipallon muotoisen laskurin sisälle. Tällöin lähteen ja laskurin aktiivisen tilan välissä ei ole mitään absorboivia kerroksia ja laitteella voidaan tehokkaasti havaita myös pienienergistä gamma- tai röntgensäteilyä tai alfahiukkasia.

Verrannollisuuslaskurin täytekaasu suljetaan ilmatiiviisti ilmaisimen sisälle. Vaihtoehtoisesti kaasua joko kierrätetään ilmaisimen lävitse koko ajan tai huuhdellaan säännöllisin väliajoin. Kaasuna käytetään yleensä jotakin jalokaasua, johon on lisätty esimerkiksi metaania tai butaania; tavallisin on niin sanottu P-10-kaasuseos, jossa on 90 prosenttia argonia ja 10 prosenttia metaania. Dosimetrisissä tutkimuksissa voidaan käyttää täytekaasuna seosta, jonka alkuainekoostumus jäljittelee biologista kudosta. Tällainen on esimerkiksi metaanin, hiilidioksidin ja typen seos. Ilma ei elektronegatiivisena sovellu täytekaasuksi, koska siinä vapaat elektronit muodostavat helposti hitaasti liikkuvia negatiivisia ioneja kiinnittymällä typen ja hapen atomeihin eivätkä täten pääse osallistumaan pulssin muodostamiseen.

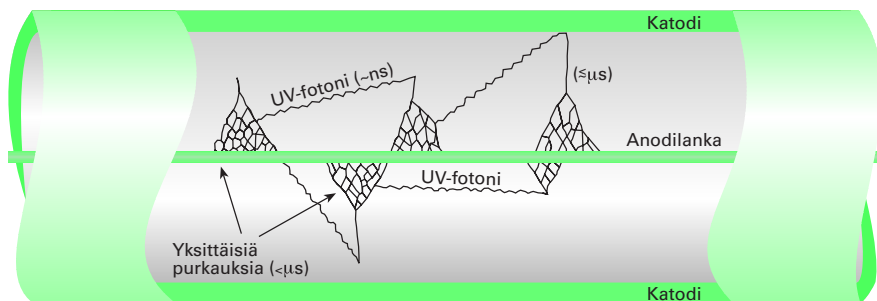
Säteilysuojelussa verrannollisuuslaskureita käytetään pintakontaminaation mittaamiseen, lähinnä alfa- ja beetasäteilyn ilmaisimina. Käyttämällä raskaampaa jalokaasua esimerkiksi krypton tai ksenonia täytekaasuna voidaan pienienergisien fotonisäteilyn havaitsemistehokkuutta parantaa. Neutroneja absorboivalla täytekaasulla varustettuna laskuria voidaan käyttää myös neutronien ilmaisuun.

Geigerputki

Geigerputki (Geiger-Müller-ilmaisim) on yksi vanhimmista säteilyn ilmaisimista, joka on edelleen käytössä. Geigerputken toiminta-alueella (kuva 4.1, alue V) kaasutäyteisen ilmaisimen antama pulssi on aina samansuuruinen säteilyn ominaisuuksista riippumatta. Tällä alueella positiivisten varausten pilvi on niin suuri, että sähkökenttä pienenee alle kaasumonistuksen kynnyksarvon ja elektronipurkaus lakkaa.

Elektronivyöry tuottaa geigerputkessa ionien lisäksi myös paljon viritetyitä molekyyliä. Virityksen purkautuessa syntyy fotoneja, jotka absorboituvat täyteaineen kaasuun tai putken katodiin. Absorptio irrottaa fotoelektroneja, jotka vaeltaessaan anodille aiheuttavat uusia vyöryjä (kuva 4.2). Kaikkiialla putkessa syntyy jatkuvasti lisää elektronivyöryjä; yksi vyöry kestää alle mikrosekunnin ja koko purkaus noin yhden mikrosekunnin. Koska purkausaika on lyhyempi kuin yksittäisen vyöryn aiheuttaman pulssin muodostumiseen tarvittava, on geigerputken pulssin amplitudi koko purkauksen kaikkien vyöryjen yhteisvaikutus. Geigerputken kaasumonistuskertoimen on 10^6 – 10^8 .

Paljon elektroneja hitaammin liikkuvat positiiviset varaukset sammuttavat geigerputken purkauksen. Näiden keräämiseen katodille kuluu huomattavasti aikaa, jolloin uutta purkausta ei voi syntyä. Kun ionit liikkuvat



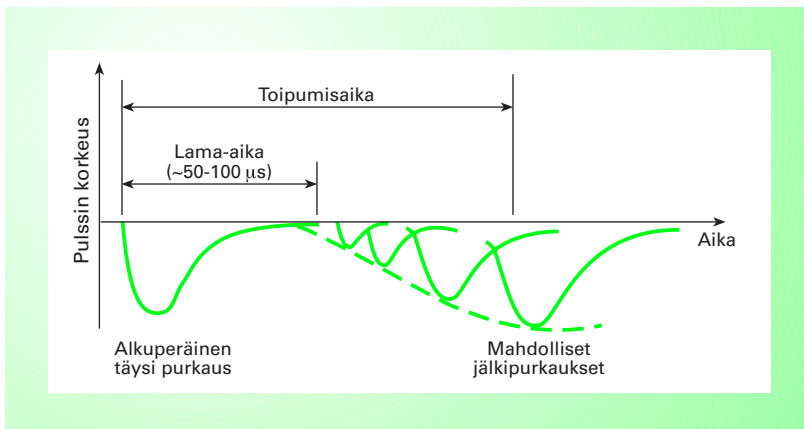
KUVA 4.2 Geigerputkessa tapahtuvien lisäpurkausten synty

ulospäin, niiden muodostama varaustiheys pienenee ja sähkökenttä palautuu lopulta alkuperäiseen arvoonsa. Uusi purkaus voi tapahtua jo ennen täydellistä palautumista mutta tällöin pulssin amplitudi jää normaalia pienemmäksi (pulssin sammuttamiseen tarvitaan vähemmän positiivisia ioneja).

Aikaa, joka kuluu täydellisen pulssin synnystä uuteen purkaukseen, kutsutaan geigerputken lama-ajaksi (hukka-aika, kuollut aika). Tyypillinen lama-aika on noin 50–100 mikrosekuntia. Käytännössä laskentapiiri havaitsee pulssin vasta, kun sen amplitudi ylittää tietyn rajan. Aikaa, jonka kuluttua pulssin amplitudi on noussut yli hylkäysrajan, kutsutaan erotusajaksi. Vasta toipumisajan kuluttua syntyvän signaalin amplitudi saavuttaa normaalin arvon (kuva 4.3).

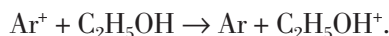
Kuten verrannollisuuslaskurissa myös geigerputkessa käytetään sellaista täytekaasua, jonka atomeihin elektronit eivät kiinnity. Yleisimmin käytettyjä ovat argon ja helium.

Kerran syntynyt purkaus voi aiheuttaa jatkuvasti uusia purkauksia, mikä vuoksi geigerputkessa tarvitaan ylimääräisten pulssien estomekanismeja eli sammutusta (quenching). Ylimääräisiä purkauksia aiheutuu katoilla neutralisoituvista positiivisista ioneista edellyttäen, että kaasun ionisaatioenergia on tarpeeksi suuri. Tällöin neutralisoinnissa vapautuva energia riittää toisen ylimääräisen elektronin irrottamiseen. Vaikka tämän tapahtuman todennäköisyys on pieni, niin irtoamia kuitenkin tapahtuu suuresta ionimäärästä johtuen. Ylimääräiset elektronit tuottavat anodille vaeltaessaan uuden täydellisen geigerpurkauksen.



KUVA 4.3 Geigerputken pulssi ja aikakäyttäytyminen

Geigerputken sammutus voidaan toteuttaa sisäisesti tai ulkoisesti. Sisäisessä menetelmässä täytekaasuun lisätään erityinen sammutuskomponentti, jonka suhteellinen osuus on tyypillisesti 5–10 prosenttia täytekaasusta. Sammutuskaasu on yleensä moniatomista orgaanista kaasua (metaani, etyylialkoholi) tai halogeenia (kloori, bromi). Näiden ionisaatio-energiat ovat pienempiä kuin varsinaisen täytekaasun. Tästä johtuu, että täytekaasun positiivisten ionien varaus siirtyy vaelluksen aikana sammutuskaasun molekyyleille, esimerkiksi



Sammutuskaasun molekyyli rakenne on sen verran löyhä, että neutralisointumisessa vapautuva energia ennemmin hajottaa molekyylin kuin irrottaa elektronin katodilta. Näin ollen ylimääräisiä purkauksia ei pääse syntymään. Hajonneet orgaaniset molekyyli radikaalit eivät yhdisty uudelleen, joten tällaisen putken käyttöikä on rajallinen, yleensä noin 10^9 pulssia. Ikää voidaan pidentää käyttämällä sammutuskaasuna halogeenia, jonka atomit yhtyvät uudelleen molekyyliksi. Toisaalta näidenkin putkien ikää rajoittaa purkausten aiheuttama kaasun ja anodin pinnan muuttuminen.

Paljon harvinaisempi menetelmä on ulkoinen sammutus, jossa putken jännitettä pienennetään jokaisen pulssin jälkeen tietyn aksiksi. Tällöin jännite ei riitä ylläpitämään kaasumonistusta eikä ylimääräisiä purkauksia synny. Putken lama-aika kasvaa entisestään, minkä vuoksi ulkoista sammutusta ei juuri käytetä.

Geigerputki on kannettavien säteilysojelumittareiden yleisin ilmaisin. Putken suosio perustuu suureen herkkyyteen, yksinkertaiseen elektronikkaan sekä hintaan. Monikertaisia vahvistuspiirejä ei tarvita, koska putken antamat jännitepulssit ovat tarpeeksi suuria (0,1–1 V, vertaa ionisaatiokammio: 0,1 mV). Putkia valmistetaan moneen muotoon ja kokoon: halkaisija voi vaihdella millimetrinä useisiin sentteihin ja pituus sentistä lähes metriin. Putkella voi olla ohut päätyikkuna, joka on tavallisesti kiillettä. Orgaanista sammutuskaasua käyttävän putken jännite on yleensä 1200–1500 voltia. 'Halogeeniputket' toimivat alemmilla jännitteillä.

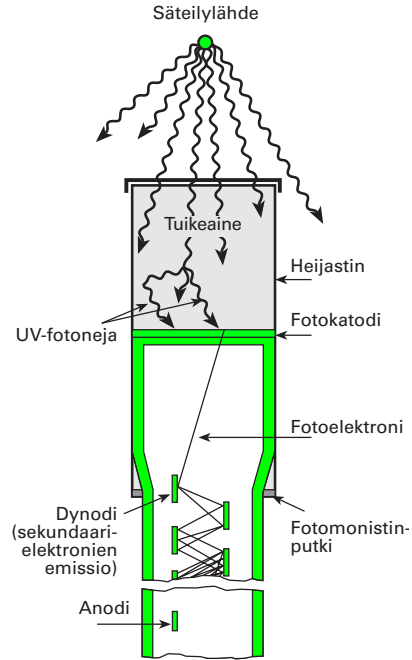
4.3 | Tuikeilmaisimien

Kuvissa 4.4a ja b on esitetty tuikeilmaisimen ja nestetuikespektrometrin rakenteet. Ilmaisimen tärkeimmät komponentit ovat tuikeaine (skintillaattori) ja valomonistinputki. Orgaaninen tuikeaine voi olla kaasua, nestettä tai

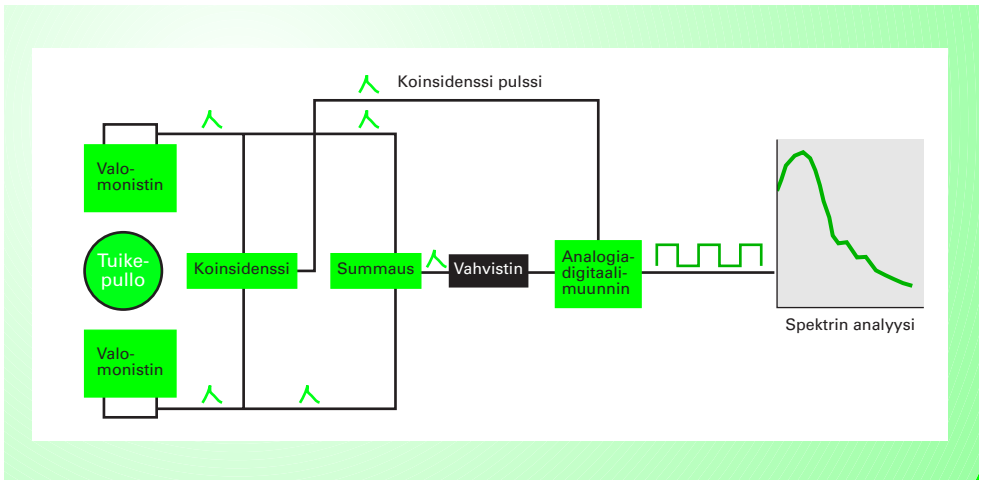
kiinteää ainetta. Epäorgaanisista aineista jalokaasut ja tietyt kiteet voivat toimia tuikeaineena. Yhdistämällä eri tuikeaineita kerroksittain samaan ilmaisimeen voidaan erotella eri säteilylajeja ja esimerkiksi mitata samanaikaisesti erikseen sekä alfa- että beeta- ja gammasäteilyä.

Tuikeaineet

Säteilyenergian absorboituminen viritää atomin energiatilalle, joka purkautuu emittoimalla näkyvää valoa tai ultraviolettifotoneja. Toimiakseen skintillaattorina aineella täytyy olla tiettyjä ominaisuuksia. Kiinteiden ja nestemäisten tuikeaineiden tiheys on tarpeeksi suuri, että säteilyn absorptiotodennäköi-



KUVA 4.4a Tuikeilmaisin



KUVA 4.4b Nestetuike spektrometrin toimintaperiaate

syys on riittävä. Absorptiota tulee seurata tarpeeksi voimakas luminesenssi ja tuikeaineen on oltava läpinäkyvä tälle valolle. Lopuksi, emittoituvan valon aallonpituus on oltava valomonistinputken herkkyyalueella. Jälkimmäinen ehto ei aina täyty (erityisesti nestetuikeaineilla), jolloin tuikeaineeseen lisätään ainetta, jonka loistevalon karakteristinen aallonpi-

tuus on pitempi kuin absorboivan aineen (wavelength shifter). Tällöin käytetään hyväksi ilmiötä, jossa absorboitunut energia siirtyy molekyylliltä toiselle, suuremman aallonpituuden molekyyllille.

Orgaanisista aineista aromaattiset hiilivedyt kuten antraseeni ($C_{14}H_{10}$) ja stilbeeni ($C_{14}H_{12}$) ovat erinomaisia tuikeaineita, joita käytetään varsinkin beetasäteilyn mittaamiseen. Myös kiinteitä ja nestemäisiä orgaanisten aineiden seoksia (esimerkiksi ksyleeni ja p-terfenyyli) voidaan käyttää skintillaattoreina. Erityisesti muovituikeaineita on saatavana monenkoisina ja -muotoisina sekä myös ohuina kuituina tai kalvona. Muovituikeaineet ovat yleisiä beetasäteilyn ilmaisimissa ja muokattavuuden sekä tuottamiensa lyhyiden valopulssien ansiosta suosittuja varsinkin ydinfysiikan tutkimuksessa.

Pienten beetaenergioiden (esimerkiksi 3H ja ^{14}C) mittaamiseen käytetään usein nestetuikeilmaisimia. Nestetuikelaskennassa näyte liuotetaan suoraan tuikeliuokseen, jolloin vältetään useita näytemittausten ongelmia kuten säteilyn absorptio ilmaisimen rakenteisiin tai itse näytteeseen. Näyttemateriaalin sekoittaminen tuikeaineeseen aiheuttaa kuitenkin ilmiöitä, joiden seurauksena emittoituvan valon määrä yleensä vähenee huomattavasti (vaimennus). Erityisesti heikkenee pienten beetaenergioiden havaitsemistehokkuus, joka muuten olisi lähes 100 prosenttia. Nestetuikeilmaisilla voidaan mitata myös alfasäteilyä, jonka havaitsemistehokkuus on yleensä lähes 100 prosenttia, mutta energian erotuskyky on parhaimmillaankin vain 5–10 prosenttia. Nestetuikelaskentaa käsitellään tarkemmin kappaleessa 5.4.

Kun epäorgaanisiin kiteisiin lisätään pieni määrä epäpuhtausatomeja, syntyy kiteeseen energiatasoja, joiden ansiosta luminesenssi voi tapahtua. Alfasäteilyn ilmaisimena on perinteisesti käytetty sinkkisulfidia, johon on lisätty hopeaa ($ZnS(Ag)$). Talliumilla aktivoitu natriumjodidikide, $NaI(Tl)$, on hyvin yleisesti käytetty fotonisäteilyn tuikeilmaisimena. Toinen paljon käytetty skintillaattori on $CsI(Tl)$, jota voidaan helposti muovata haluttuun muotoon. $LiI(Eu)$ soveltuu erityisesti neutronien havaitsemiseen.

Epäorgaanisten tuikeaineiden suuri tiheys tekee niistä sopivia gammasäteilyn ilmaisulle. Varsinkin $Bi_4Ge_3O_{12:n}$ (lyhennetään BGO) havaitsemistehokkuus on suuren tiheyden ($7,13\text{ g/cm}^3$) ansiosta hyvä myös suurienergiselle gammasäteilylle. Toisaalta energian erotuskyky on selvästi huonompi kuin $NaI(Tl):n$.

Valomonistinputki

Tuikeaineesta fotonit ohjataan heijastavien pintojen avulla valomonistinputken fotokatodille, johon tuikeaine on kytketty optisesti. Sekä tuikeaine että valomonistin on suojeltava valolta. Valomonistinputken valoherkkä fotokatodi on puoliläpäisevää materiaalia kuten Cs_3Sb , joka emittoi elektroneja, kun valo osuu siihen. Ilmaisimen toiminta edellyttää lämpötilan pitämistä vakiona, sillä elektronien emissiotaajuus fotokatodilla on verrannollinen tekijään $T^{1.5}$. Elektronit kiihdytetään sarjalla elektrodeja (dynodit), joita voi olla 10–14 kappaletta. Elektronin osuessa dynodiin emittoituu siitä useita uusia elektroneja, joten määrä moninkertaistuu jokaisella dynodilla. Katodin ja anodin välillä on 1 000–2 000 voltin jännite ja katodilta dynodisarjan kautta anodille kulkeutuvien elektronien määrä lisääntyy noin miljoonakertaiseksi. Anodille saapuva elektronipulssi on verrannollinen tuikeaineeseen osuneen fotonin energiaan. Monistuskerroin on

$$M = AkV_d^{0.7n}, \quad (4.3)$$

missä A on aineesta riippuva vakio, k katodin konversiokerroin eli yhtä katodille osuvaa fonia kohti emittoituneiden elektronien lukumäärä, V_d peräkkäisten dynodien välinen jännite ja n dynodien lukumäärä. Koska monistuskerroin riippuu suuresti dynodien välisestä jännitteestä, on jännitelähteen oltava hyvin stabiili.

Valomonistinputken sijasta voidaan joissakin sovelluksissa nykyään käyttää myös puolijohteesta valmistettua fotodiodia. Diodilla on mahdollista saavuttaa parempi energian erotuskyky, lisäksi se tarvitsee vähemmän sähkötehoa ja on yleensä pienempi ja kestävämpi kuin valomonistinputki.

Toinen valomonistinputken vaihtoehto on hybridivalomonistinputki (hybride photomultiplier tube, HPMT) eli hybrididiodi (hybride diode, HPD). Hybridiputkessa fotokatodilta irronneet elektronit kiihdytetään korkealla jännitteellä, tyypillisesti 10–15 kilovolttia, kohti pii-ilmaisinta, jossa niiden kineettinen energia synnyttää elektroni-aukko-pareja. Vaikka tällä tavalla aikaansaatu vahvistus on huomattavasti pienempi kuin konventionaalisella valomonistinputkella, niin saatava signaali on kuitenkin tarpeeksi voimakas, että se voidaan välittää edelleen elektronisten komponenttien avulla vahvistettavaksi.

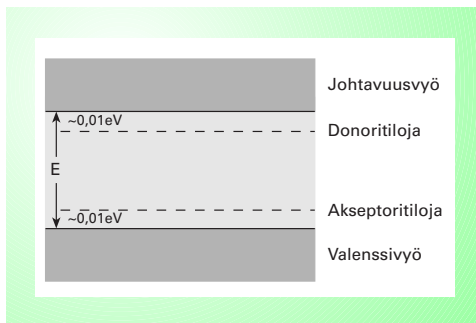
Tsherenkov-ilmaisain

Kun varauksinen hiukkanen liikkuu aineessa nopeudella, joka on suurempi kuin valon nopeus kyseessä olevassa aineessa, syntyy sähkömagneettista säteilyä, jota sanotaan Tsherenkovin säteilyksi. Emittoituvien fotonien energia on ultravioletin ja osittain myös näkyvän valon alueella. Ainoat hiukkaset, jotka – suurenergiafysiikan alue pois lukien – saavuttavat tarvittavan nopeuden, ovat suurenergiset elektronit. Koska vain noin 1/1000 hiukkasen energiasta muuttuu valoksi, saadaan riittävä laskentatehokkuus beetahiukkasille, joiden maksimienergian on yli 750 keV. Tsherenkovin säteilyn mittaamiseen voidaan käyttää tavallista tukeilmaisinta (katso luku 5.4).

4.4 Puolijohdeilmaisain

Puolijohdeilmaisimen toimintaperiaate on sama ionisaatiokammion, mutta kiinteässä aineessa säteily tuottaa ionien sijasta elektroni-aukko-pareja. Puolijohdeilmaisain on 10 000 kertaa herkempi kuin samankokoinen ionisaatiokammio. Tämä johtuu toisaalta suuremmasta tiheydestä, toisaalta siitä, että yhden elektroni-aukko-parin muodostumiseen tarvitaan vain kymmenesosa siitä energiasta, joka tarvitaan ioniparin muodostumiseen kaasussa. Syntyvien varausten määrän suhteellinen hajonta on pienempi, mistä seuraa erinomainen energian erotuskyky. Puolijohdeilmaisimia käytetäänkin pääasiallisesti spektrometrissä mittauksissa.

Puolijohdeilmaisain on käytännössä estosuuntaan kytketty diodi. Puolijohdemateriaalin lähes kaikki elektronit ovat valenssielektroneita eli yksittäisiin atomeihin sidottuja. Kun valenssielektroni saa riittävästi energiaa, se voi siirtyä johtavuusvyölle, jota myöten se pääsee liikkumaan kiinteässä. Valenssivyön ja johtavuusvyön välinen vyöhyke on tyypillisesti noin 1–5 eV. Valenssielektronin siirtymiseen tarvittava energia voi tulla lämpöliikkeestä tai säteilystä (kuva 4.5).



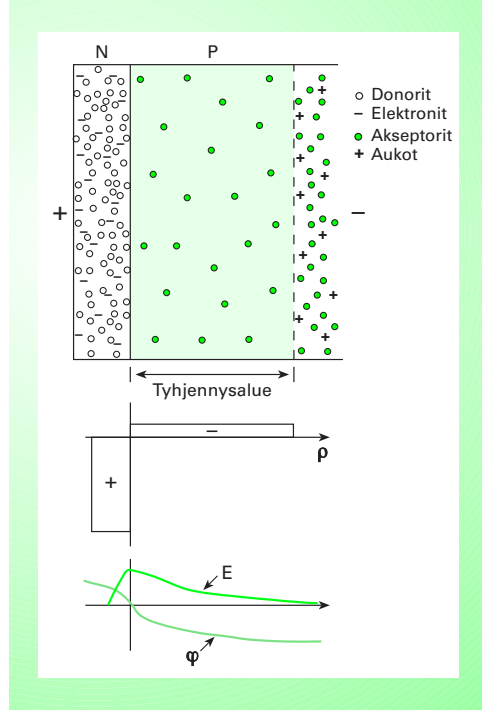
KUVA 4.5 Elektronien energiatilat puolijohdeessa

Puolijohteen sähkönjohtavuutta voidaan säädellä lisäämällä materiaaliin pieni määrä epäpuhtausatomeja, joissa on joko ylimääräinen valenssielektroni tai vastaavasti valenssielektronin vajuus. Epäpuhtausatomeja, joilla on ylimääräinen elektroni, sanotaan donoreiksi. Donoreilla on hieman johtavuusvyön alapuolella energiatila, josta elektroni siirtyy helposti johtavuusvyöhön (n-johtavuus). Atomeja, joilla on yhden valenssielektronin vajuus, kutsutaan akseptoreiksi. Niillä on hieman valenssivyön yläpuolella energiatila, johon elektroni voi helposti siirtyä. Elektroni jättää valenssivyöhön aukon, joka voi valenssielektronien vaihdon avulla liikkua kiteessä (p-johtavuus).

Kun p- ja n-tyyppin puolijohdeyt kytetään yhteen, syntyy rajapinta-alue, jossa on hyvin vähän vapaita varauksenkuljettajia (liitoskohdan yli vaeltaneet elektronit täyttävät p-tyyppissä aukkoja ja vastaavasti aukot täyttyvät n-tyyppissä elektroneilla). Tämän niin sanotun katoalueen leveys on vain muutamia mikrometrejä. Jos liitoksen yli kytetään estosuuntainen jännite, saadaan elektronit ja aukot vaeltamaan pois liitosalueelta ja katoalue laajenee. p-n-liitoksen rakenne ja toiminta on esitetty kuvassa 4.6. Katoalue on ilmaisimen aktiivinen alue, jossa syntyneet elektroni-aukko-parit kerätään jännitteen avulla signaaliksi. Säteilyn puolijohdeilmaisimeen tuottama varaus saadaan yhtälöstä

$$\Delta Q = 1,60 \times 10^{-19} E_1 \eta/w, \quad (4.4)$$

missä η (varauksen keräyksen tehokkuus) on yleensä hyvin lähellä 1, w on piille 3,62 eV (lämpötila 300 K) ja germaniumille 2,96 eV (lämpötila 77 K). Yhtälön (4.4) mukaan signaali on suoraan verrannollinen absorboituneeseen energiaan edellyttäen, että η on vakio.



KUVA 4.6 p-n-liitos ja tyhjennysalue

Elektronien ja aukkojen kulkeutuminen rajapinnan yli aiheuttaa varausjakauman ρ , potentiaalilin φ ja kentän E .

Suurin osa puolijohteeseen absorboituneen säteilyn energiasta kuluu ki-
teen hilavärähtelyjen kvanttien, fononien synnyttämiseen. Jos fotonin
primaarielektronille luovuttama energia kuluisi kokonaan elektroni-auk-
ko-parien muodostamiseen, saataisiin täydellisen absorption seuraukse-
na aina yhtä monta paria:

$$N = \frac{E}{\varepsilon}, \quad (4.5)$$

missä N on parien lukumäärä, E fotonin energia ja ε energia, joka tarvi-
taan elektroni-aukkoparin muodostumiseen. Alkuperäisen fotonin ener-
gian jakautuminen elektroneille ja fononeille on statistinen ilmiö. Energi-
an jakautumista kilpailevien prosessien kesken kuvaa Fano-tekijä F , joka
määrittellään siten, että

$$\sigma_g^2 = F \frac{E}{\varepsilon}, \quad (4.6)$$

missä σ_g on normaalijakauman hajonta. Useimpien mittaustulosten mu-
kaan germaniumin Fano-tekijä on selvästi pienempi kuin 0,1.

Suurin osa puolijohdeilmaisimista perustuu piihin tai germaniumiin.
Puolijohtevien yhdistemateriaalien kehittäminen säteilynlmaisimiksi
on ollut huomattavasti hitaampaa. Eniten tutkittuja ovat olleet CdTe,
Cd_{1-x}Zn_xTe ja HgI₂ ja näihin perustuvia ilmaisimia on jo kaupallisesti saa-
tavina.

Pintaesteilmaisim

Pintaesteilmaisim on p-n-diodi, jonka katoalue on melko ohut. Ilmaisim
valmistetaan yleensä n-tyyppin piistä, jonka toiselle pinnalle höyrystetään
ohut kerros kultaa ja toiselle alumiinia. Pintaesteilmaisimia käytetään
pääasiassa alfa- ja beetaspektrometriassa, jolloin ilmaisim sijoitetaan tyh-
jiöön. Tyypillisen alfaspektrometriassa käytettävä pintaesteilmaisimen
pinta-ala on 300 mm², katoalue 300 μm, energian erotuskyky (puoliarvo-
leveys, FWHM) 20 keV ja se toimii 40–100 V positiivisella jännitteellä.
Ajan erotuskyky on noin 10⁻⁸ sekuntia. Pintaesteilmaisimen käyttöikä
alfahiukkasten havaitsemiseen rajoittavat säteilyvauriot, joiden määrä
riippuu käyttöjännitteestä ja ilmaisimeen osuvien hiukkasten massasta
(katso luku 5.3).

Diodi voidaan valmistaa vaihtoehtoisesti myös ioni-istutustekniikalla,
jossa puolijohteen pinnan epäpuhtauskerros synnytetään ionisuihkulla.

Vielä uudempi tekniikka on integroitujen piirien valmistamiseen käytettävän valolitografian ja ioni-istutustekniikan yhdistelmä.

Litiumilla kompensoidut ilmaisimet

Koska pintaesteilmaisimen katoalue on ohut, gammasäteilyn vuorovaikutustodennäköisyys niissä on hyvin pieni. Katoalueen syvyys on verrannollinen lausekkeeseen $\sqrt{V / N}$, missä V on ulkoinen jännite ja N epäpuhtauksien nettokonsentraatio. Syvyyttä voidaan siis lisätä suurentamalla jännitettä tai pienentämällä epäpuhtauksien määrää. Kun puolijohteiden käyttö säteilyn ilmaisimina alkoi 1950-luvulla, voitiin saavuttaa korkeintaan 2–3 millimetriä paksu katoalue. Puhtain saatavissa oleva germanium on yleensä p-tyyppistä eli siinä on enemmistönä akseptori-atomit. Jotta niiden vaikutus kompensoituu, materiaaliin on lisättävä donoreita. Näitä ovat muun muassa alkalimetallit litium, natrium ja kalium, jotka asettuvat puolijohteessa kidehilan väleihin. Edellä mainituista vain litium-ioneilla on pienen kokonsa ansiosta tarvittava liikkuvuus niin, että ne voidaan ajaa pintaan germanium-kiteeseen tarpeeksi syvälle korkeassa lämpötilassa sähkökentän avulla. Litium-ionit pyrkivät tällöin jakaumaan, jossa kokonaisnettovaraus on kaikkialla nolla ja tuloksena on lähes täydellinen kompensointi. Huolellisella valmistustekniikalla saadaan kiteitä, joissa kompensoimattomien epäpuhtauksien pitoisuus jää alle 10^9 atomia/cm³ (suhteellinen pitoisuus pienempi kuin $1:10^{14}$). Ensimmäiset litiumilla kompensoidut ilmaisimet, Si(Li) tai Ge(Li), olivat tasomaisia. Litium-ylimäärä pinnalla muodostaa n⁺-tyyppisen kerroksen, joka toimii positiivisena elektrodina. Kompensoimaton p-tyypin germanium puolestaan vastaa negatiivista elektrodia.

Litiumin liikkuvuus germaniumissa on niin suuri, että ilmaisimien ehdottomasti pidettävä koko ajan alhaisessa lämpötilassa. Litium-ionit pysyvät paikallaan kidehilassa, kun ilmaisimen lämpötila on lähellä nestetyypen kiehumispistettä, 77 K. Nykyään Ge(Li)-ilmaisimet on lähes kaikissa sovelluksissa korvattu puhtaasta germaniumista valmistetuilla kiteillä (HPGe). Sen sijaan Si(Li)-ilmaisimia käytetään edelleen erityisesti röntgenspektroskopiassa.

HPGe-ilmaisimet

Käyttämällä kiteitä, joiden nettoepäpuhtauskonsentraatio on suuruusluokkaa 10^{10} epäpuhtausatomia/cm³, saadaan ilmaisimien, jolla on pääosin samat ominaisuudet kuin vastaavankokoisella Ge(Li)-ilmaisimella, mutta

jonka ominaisuudet säilyvät myös huoneenlämpötilassa. Vuotovirran vähentämiseksi toimintalämpötilan on kuitenkin oltava alhainen.

Ensimmäiset HPGe-ilmaisimet olivat p-tyyppin germaniumia, jossa epäpuhtausatomien enemmistö on akseptoreita. Ilmaisimen valmistusprosessin alussa kide sorvataan sylinteriksi ja toisen pään reunoja pyöristetään hie-man. Positiivinen n^+ -tyyppinen kontakti muodostetaan diffundoimalla kiteen ulkopintaan noin puolen millimetrin kerros litiumia. Koska puhtaasta germaniumista valmistetuissa kiteissä ei ole p^+ -tyypin ydintä, sylinterin keskelle on porattava reikä, jonka pinta toimii negatiivisena elektrodina. Tarvittava p^+ -kerros valmistetaan ioni-istutustekniikalla; luotettavin tulos on saavutettu käyttämällä booria. Reiän läpimitta on yleensä noin 8 millimetriä ja se ulottuu 10–15 millimetrin etäisyydelle kiteen pästä. Suhteellisen syvä reikä ja pyöristetyt kulmat kiteen umpinaisessa päässä parantavat ilmaisimen varauksenkeräysominaisuuksia. Puhtaasta germaniumista on valmistettu kiteitä, joiden tilavuus on yli 600 cm^3 .

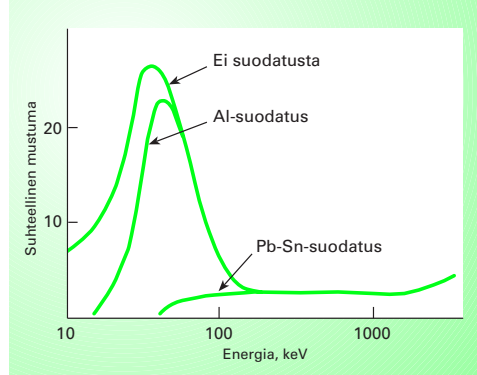
N-tyypin germaniumista valmistetuilla kiteillä on muutamia etuja, joiden ansiosta niitä voidaan käyttää vaativammissa sovelluksissa kuin p-tyypisiä. Litium-kerros p-tyypin kiteen ulkopinnassa absorboi huomattavan osan alle 60 keV:n fotoneista, mikä estää ilmaisimen tehokkaan käytön tällä energia-alueella. Jos jännitteen suunta kiteessä käännetään niin, että negatiivinen elektrodi on ulkopuolella, voidaan paksu, positiivinen litium-kontakti valmistaa kiteen sisäpinnalle. Koska ioni-istutustekniikalla valmistettu p^+ -kerros on erittäin ohut, se läpäisee hyvin vielä alle 10 keV:n gamma- ja röntgensäteilyä. Lisäksi käännetyn sähkökentän ansiosta kide kestää myös huomattavasti paremmin hiukkassäteilyä kuin normaali p-tyypin kide.

4.5 | Filmi

Yksi vanhimpia ja käytetyimpiä säteilynlmaisimia on valokuvausfilmi. Ionisoiva säteily aiheuttaa valoherkkään emulsioon, filmiin, mustuman, jonka määrä on verrannollinen säteilyannokseen. Filmin säteilyherkkä osa koostuu kerroksesta hopeabromidi- ja hopeajodidikiteitä, jotka ovat jakautuneet gelatiinimatriisiin. Emulsiokerroksen paksuus on tavallisesti 5–20 mikrometriä. Filmin tukirakenteena on 0,1–0,2 millimetriä paksu polyesteri- tai selluloosa-asettaattiliuska.

Absorboituva säteily irrottaa hopeahalogenidirakeista elektroneja, jotka vaeltavat emulsiossa luovuttaen energiaansa. Lopulta ne jäävät kiteissä ole-

vien epäpuhtauksien aiheuttamiin loukkuihin. Hopea-atomit ja -ionit pääsevät liikkumaan gelatiinikalvossa. Positiiviset hopeaionit pelkistyvät kohdattaessaan loukkuun jääneen elektronin. Neutraalit Ag-atomit muodostavat Ag^+ -ionien kanssa Ag_2^+ -ioneja, jotka vuorostaan neutraloituvat ja niin edelleen. Näin muodostuu 4–6 atomin piilokuvakeskuksia.



KUVA 4.7 Filmidosimetrim suhteellinen mustuma fotonin energian funktiona ja suodattimien vaikutus mustumaan

Filmin kehityksessä pelkistävän liuoksen elektronit tunkeutuvat emulsioon ja muuttavat hopeaioneja metalliseksi hopeaksi piilokuvakeskusten toimiessa katalysaattoreina. Hopean määrä lisääntyy 10^8 – 10^{10} -kertaiseksi, jolloin piilokuva muuttuu näkyväksi. Yksi piilokuvakeskus riittää katalysoimaan mikrokiteen kasvun näkyväksi rakeeksi. Rakeissa, joissa ei ole piilokuvakeskuksia, prosessi on niin hidas, että rae ei ehdi kasvaa kehitysaikana.

Filmin herkkyys riippuu hopeabromidin ja gelatiinin määrien suhteesta, emulsion paksuudesta sekä hiukkasten koosta ja rakenteesta.

Filmiä käytetään erityisesti henkilöannosmittareiden ilmaisimena sekä autoradiografiassa. Filmidosimetreissä filmin vasteen energiariippuvuutta pienennetään metallisuodattimilla, jolloin saadaan – erilaisen läpäisyn perusteella – selville myös säteilyn laatu (kuva 4.7).

DIS-dosimetri

Filmin käytölle säteilynlmaisimena – kuten myös tavallisessa valokuvauksessa – on aivan viime vuosina tullut elektroninen vaihtoehto. Tämä uusi laite on DIS-dosimetri (direct ion storage). Se perustuu puolijohdehilaan, jonka muistiin on tallennettu sähkövarausta. Hila (floating gate) on sijoitettu muovilla tai alumiinilla suljettuun pieneen ilmatilaan. Ionisoivan säteilyn vaikutuksesta rakennemateriaalista irtoaa elektroneja, jotka sitoutuvat ilman happimolekyyleihin synnyttäen ioneja. Ionit kulkeutuvat hilalle muuttaen sen sähkövarausta. Dosimetria luettaessa muuttunutta

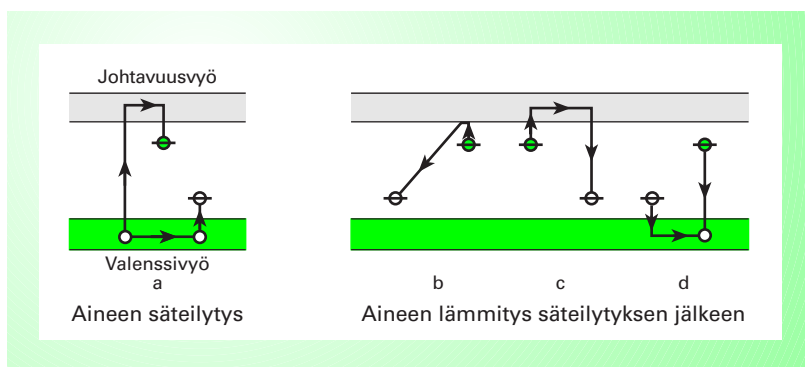
varausta verrataan siihen alun perin tallennettuun. Erotuksesta saadaan suoraan säteilyannos.

DIS-dosimetrimin etuna filmiin verrattuna on sen jatkuva käyttötapa: säteilyannoksen voi lukea periaatteessa koska tahansa.

4.6 | Termoloisteilmaisain

Kuten valokuvausfilmi myös termoloisteilmaisain (thermoluminescence dosimeter, TLD) on passiivinen säteilyilmaisin. Termoloisteilmaisain perustuu siihen, että tiettyjä kiteisiä aineita säteilytettäessä osa absorboituvasta energiasta varastoituu metastabiileihin energiatiloihin ja vapautuu myöhemmin kuumennettaessa. Osa vapautuvasta energiasta emittoituu valona, joka voidaan havaita valomonistinputkella. Valon intensiteetti on verrannollinen absorboituneeseen annokseen. Termoloisteilmaisain on tyypiltään passiivinen, koska tulos saadaan vasta erityisellä lukulaitteella jälkikäteen.

Termoloisteilmiö liittyy elektronien energiatiloihin epäorgaanisessa kidehilassa (kuva 4.8). Jos elektroni saa ilmaisimeen osuvilta hiukkasilta tarpeeksi energiaa, se voi nousta valenssivyöltä johtavuusvyöhön. Valenssivyöhön jää aukko, joka voi liikkua vapaan varauksen tavoin. Aiheuttamalla kiteeseen hilavirheitä, esimerkiksi lisäämällä epäpuhtauksia, voidaan valenssi- ja johtavuusvyön välille synnyttää paikallisia energiatasoja, joille elektronit tai aukot voivat siirtyä. Säteilyn johtavuusvyöhön nostamista elektroneista ja valenssivyöhön jääneistä aukoista osa rekombinoituu, mutta osa jää välissä oleville energiatiloille eli loukkuihin. Kun termoloisteaineen lämpötilaa nostetaan, vapautuvat elektronit ja aukot



KUVA 4.8 Termoloisteilmaisimen toimintaperiaate

loukuista ja palaavat valenssivyöhön. Tällöin osa viritysenenergiasta muuttuu valoksi. Aukkojen ja elektronien vapautuminen riippuu lämpötilasta ja loukkujen syvyydestä. Yleensä jo huoneen lämpötilassa tapahtuu vapautumisia ja osa informaatiosta menetetään ennen ilmaisimen lämmittämistä eli luentaa. Tämä näyttämän häipyminen (fading) heikentää termoloistedosimetrien tarkkuutta. Kun kiteen viritystilat on tyhjennetty kuumentamalla, sitä voidaan käyttää uudelleen.

Yleisimmin käytettyjä termoloistekiteitä ovat LiF, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ja CaSO_4 , joista varsinkin LiF-kiteen energiariippuvuus on hyvin pieni. Näihin kiteisiin lisätään yleensä epäpuhtausatomeja, kuten mangaania tai magnesiumia, jotka toimivat aktivaattoreina.

Kuvantamislevy

Kvantamislevy perustuu fosforiin, jolla on samanlainen varauksen tallennusominaisuus kuin TLD-materiaaleilla. Ohueen fosforoivaan kerroksen osuva säteily nostaa varauksia loukkuihin lähellä vuorovaikutuskohtaa muodostaen piilevän kuvan säteilyn intensiteetin jakaumasta. Kuva luetaan lasersäteen ja valomonistinputken avulla ja muutetaan digitaaliseen muotoon. Luennan jälkeen levy 'tyhjennetään' voimakkaalla valolla, minkä jälkeen sitä voidaan käyttää uudelleen. Kvantamislevyn etuna on erittäin suuri dynamiikka: saturaation aiheuttava säteilytys on 10^5 – 10^8 kertaa suurempi kuin heikoin havaittava intensiteetti. Levyn paikkaresoluutio voi olla tyypillisesti 100–200 mikrometriä, mikä saavutetaan ohuilla levyillä, joilla havaitsemistehokkuus on vastaavasti pienempi. Vaikka kuvantamislevyä käytetäänkin pääasiassa kuvaamiseen röntgensäteilyllä, niin se on osoittautunut hyödylliseksi myös esimerkiksi erittäin pienaktiivisten näytteiden autoradiografiassa.

KIRJALLISUUTTA

Knoll GF. Radiation Detection and Measurement, 3rd ed., New York: John Wiley & Sons, 2000.

Choppin G, Rydberg J, Liljenzin JO. Radiochemistry and Nuclear Chemistry, 2nd ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995.

L'Annunziata MF, (ed.). Handbook of radioactivity analysis, San Diego, USA: Academic Press, 1998.

Debertin K, Helmer RG. Gamma- and X-ray spectrometry with semiconductor detectors, Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1988.