

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LVI. évfolyam

4. szám

2006. április

SZUPRAVEZETŐ RÖNTGENDETEKTOROK

Pozsgai Imre
Richter Gedeon Rt.

Berényi Dénesnek ajánlva

A *Fizikai Szemle* 1967-es évfolyamának első száma a *Szupravezetés nébány alkalmazása* címmel cikket közölt Pozsgai Imre fizikus hallgató tollából. A rövid cikk még nem is utalt rá, hogy a tollat Berényi Dénes szemináriumvezető mozgatta. A kéziratot sokszor át kellett írnom, és Dénes nagy türelemmel és megértéssel segített munkámban.

A szupravezetés mint kapocs készítetett arra, hogy jelen cikkem megírjam, és utólag köszönetet mondjak Berényi Dénes akadémikusnak, egykori szemináriumvezetőmnek, aki mély nyomokat hagyott bennem és kis csoportunk valamennyi tagjában. Nehéz helyzetekben, amikor a szakmához és a tudományhoz való ragaszkodás volt a tét, az ő szavai jutottak mindig eszünkbe.

Az élet úgy hozta, hogy elektronmikroszkópiával, elektronsugaras mikroanalízissel és röntgenfluoreszcens analízissel foglalkoztam, illetve foglalkozom. Az, hogy a szupravezető mágneses lencsék alkalmazása előnyös lehet az elektronmikroszkópokban, már 1967-ben, az említett cikk írásakor is világos volt. Annak viszont még a gondolata sem merült fel, hogy a szupravezetés a röntgendetektálás területén is fontos szerepet tölthet be.

Hullámhosszdiszperzív (WDS) és energiadiszperzív (EDS) spektrometria

A szupravezetésen alapuló röntgendetektorok jelentőségét akkor látjuk kellő megvilágításban, ha megnézzük, hogy a fejlődés ezen fokát milyen konstrukciók előzték meg, és azok milyen teljesítményre voltak képesek.

Az első röntgenspektrométerrel ellátott pásztázó elektronmikroszkópot (vagy terminológiailag pontosabban, mikroszondát) R. Castaing alkotta meg PhD-munkája keretében 1951-ben. A munka elméletileg és gyakorlatilag oly teljes volt, hogy az utókornak keveset hagyott csiszolásra, finomításra. Ez a mikroszonda hullámhosszdiszperzív röntgenspektrométerrel volt felszerelve, amelyben egy analizátor kristály a Bragg-törvénynek megfelelően ($n\lambda = 2d\sin\theta$) szelektálja a különböző hullámhosszúságú (λ) röntgensugarakat. Detektorként proporcionális szám-

lálót alkalmazott. Ebben az elrendezésben követelmény, hogy az analizálandó minta, az analizátor kristály és a detektor, a proporcionális számláló egyetlen körön, a fókuszálókörön foglaljon helyet.

A mikroszonda manapság is fontos eszköz, mert hullámhossz- (vagy energia-)felbontása olyan jó, hogy például a geológiában – ahol nagyon sok mintakomponens egyidejű jelenlétével kell számolni – is ideális megoldásnak bizonyul. Az elektrongerjesztésen alapuló röntgenemissziós analitikai módszer elektronsugaras mikroanalízis néven vált ismertté a magyar szakirodalomban, míg a röntgenerjesztésen alapuló röntgenemissziós analitikát röntgenfluoreszcens analízisnek nevezzük.

Az elektronsugaras mikroanalízis roncsolásmentességével, kiváló abszolút detektálási határaival (10^{-14} – 10^{-15} g) és nagy laterális felbontásával (1–10 μm) tűnik ki, a röntgenfluoreszcens analízist a roncsolásmentességen kívül a nagyon jó relatív detektálási határok (1–100 ppm) jellemzik. A Bragg-törvényen alapuló hullámhossz-szelekciót mindkét módszerben egyaránt sikeresen alkalmazzák.

A hullámhosszdiszperzív detektálásnak van egy hátránya: az analízis szekvenciális, egy időpontban egyetlen elemet tud csak detektálni, ezért időigényes. Az egymást követő elemek detektálásához az analizátorkristály helyzetét meg kell változtatni. A kvantitatív analízishez minden egyes elemre mérni kell a röntgenintenzitást a csúcspozícióban és két háttérpontban. Ráadásul ugyanezeket a méréseket az etalonokon is el kell végezni. A geológiában egy nyolckomponensű minta nem számít ritkaságnak, a fent vázoltak szerint az ilyen minta kvantitatív analíziséhez 48 mérést kell elvégezni.

Ezért a törekvés a szimultán detektálás irányában nagyon is kézenfekvő volt. A 60-as, 70-es években kerültek alkalmazásra a lítium adalékolásával készült (Li driftelt) szilícium (Si(Li)) detektorok, amelyek a szóban forgó igényt elégítették ki. A nátriumtól az uránig valamennyi elem egyidejűleg detektálhatóvá vált. Egy újabb fejlesztés a detektorablak konstrukciójában azt eredményezte, hogy a detektálható legkisebb rendszámú elem a nátrium helyett a bór lett. Mozgó alkatrészek nem lévén, a mérések

reprodukálhatósága annyira jó, hogy etalon nélküli eljárással is lehet kvantitatív analízist végezni, ami szintén az időmegtakarítás irányába hat.

A Si(Li) detektor egy p–i–n szerkezetet tartalmaz, amelyben az *saját vezetőség* (intrinsic) tartományt lítium driftelésével hozzák létre. Minthogy elektromos tér hatására a lítium a detektorban szobahőmérsékleten nem maradna helyén, a detektor cseppfolyós nitrogénnel való hűtése vált szükségessé.

A *saját vezetőség* tartomány úgy viselkedik, mint egy ionizációs kamra, csak akkor képződik benne töltés, ha oda ionizáló sugárzás jut be. A beérkező röntgenkvantum annyi elektron–lyuk párt hoz létre, ahányszor nagyobb a sugárzás energiája, mint a detektoranyag tiltottsáv-szélessége. ($\Delta E_{\text{Si}} = 1,1 \text{ eV}$. Ha a folyamat statisztikus jellegét is figyelembe vesszük, akkor egy elektron–lyuk pár keltéséhez szükséges átlagos energia szilíciumban nem 1,1 eV, hanem 3,6 eV). A röntgenfotonok energiájának meghatározása így elvileg elektronáram-mérésre vezethető vissza.

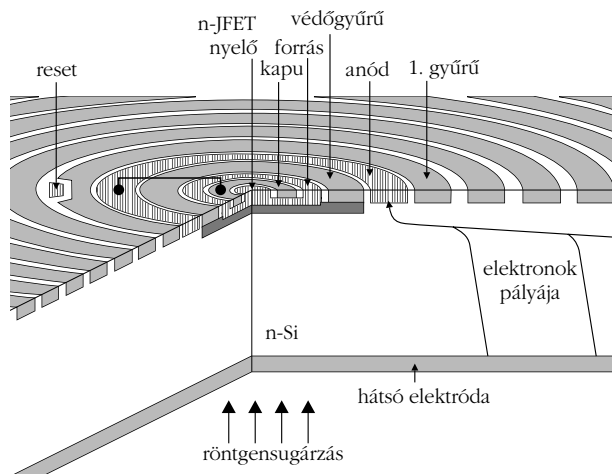
Bár ez az energiadisziperzív spektrometria (EDS) további előnyöket is hozott a hullámhosszdisziperzív detektáláshoz képest, például a detektálás nagy hatásfoka miatt kisebb besugárzó elektronáramokkal lehetett dolgozni, mint WDS-sel, ami végső soron a minta hőterhelésének a csökkentéséhez vezetett. Az öröm mégsem volt teljes, mert az EDS-detektálás energia-felbontóképessége 120–130 eV (a $\text{MnK}\alpha$ sugárzás 5,9 keV-es vonalánál mérve) sokkal rosszabb, mint a WDS 1–10 eV-os energiafelbontása. A nagytisztaságú germániumból készült detektorok valamit javítottak a helyzeten, de elvileg 90 eV-os felbontásnál jobbra nem lehet számítani a félvezető detektoroknál.

Az EDS rosszabb energiafelbontása gyakoribb csúcsátlapolásokat eredményezett, mint a WDS-nél és ezért természetesen volt a törekvés olyan röntgendetektor kifejlesztésére, amely párhuzamosan detektál, ezért olyan gyors, mint az EDS, de energiafelbontása olyan jó, mint a WDS-é. Ez az, amit meg lehet valósítani a modern szupravezető detektorokkal!

Mielőtt ilyen nagyot ugranánk az időben, említsük meg a szilícium saját vezetőségű tartományát hasznosító másik két detektortípust, a PIN diódát és a szilícium drift diódát (SDD). Ezek abban az értelemben képezik a fejlődés újabb lépcsőfokát, hogy sikerült olyan nagy tisztaságú saját vezetőségű szilíciumréteget készíteni, hogy lítium-driftelésre már nem volt szükség, és a cseppfolyós nitrogénnel való hűtéstől meg lehetett szabadulni.

Si-PIN dióda detektorok

A Si-PIN diódák detektálási mechanizmusa lényegében megegyezik a Si(Li) detektorokéval. A beérkező sugárzás (α , β , γ vagy röntgensugárzás) töltéshordozó párokat hoz létre 3,6 eV átlagos gerjesztési energia révén. A PIN diódák saját vezetőségű tartományában nincs lítium, hanem egy nagy ellenállású 8000–12000 Ωcm -es réteg képezi az i-típusú (szigetelő) részt. A tartomány teljes kiürülését 50 V-os záró irányú feszültséggel szokták elősegíteni. Cseppfolyós nitrogénnel való hűtésre nincs szükség, a Peltier-effektussal elért $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ elég. Bár a PIN diódák energiafel-



1. ábra. A szilícium drift dióda vázlat

bontása valamivel rosszabb, mint a Si(Li) detektoré, a hűtés egyszerűsége számos alkalmazásban előnyösebbé teszi azokat a Si(Li) detektoroknál.

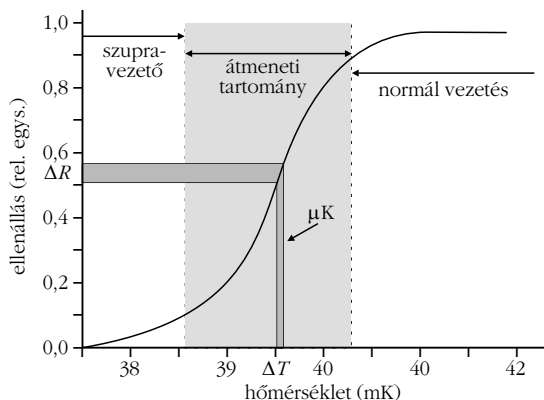
Szilícium drift dióda detektorok

A szilícium drift dióda sémáját az 1. ábra mutatja. Körkörös szerkezetével kedvező töltéshordozó begyűjtést érnek el. (A szilícium drift diódák XFlash védjeggyel ellátott termékek.) Energiafelbontásuk jobb, mint a PIN detektoroké, és a Si(Li) detektorokétól is kevésbé marad el. Versenyképességüket az biztosítja a Si(Li) detektorokkal szemben, hogy cseppfolyós nitrogénhűtésre nincs szükség, a Peltier-hűtő elégnek bizonyul.

Nagy előnye, hogy a téreffektus-tranzisztoros erősítő (JFET, Junction Field Effect Transistor) a detektor felületére lehet integrálni, ezáltal alacsony az anódkapacitás, ezért nagy a detektálási sebességük (10^6 imp/s nagyságrendű). A FET-nek az SDD-re való integrálása alacsony zajt is biztosít. Ha a fenti sémától eltérő módon nem középen, hanem aszimmetrikusan helyezik el az anódot, további javulást érnek el az energiafelbontásban. (133 eV 1000 imp/s bemeneti sebességnél.) Ezt a konstrukciót „szilícium drift droplet” detektoroknak nevezik és SD^3 -mal jelölik. Mind a PIN diódáknak, mind pedig a SDD-knek megvannak a Si(Li)-től eltérő speciális alkalmazási területeik, például a PIN diódák asztali röntgenfluoreszcens spektrométerekben, az SSD-k pedig kiválóan alkalmasak gyors térképezésre a pásztázó elektronmikroszkópban.

Szupravezetésen alapuló röntgendetektorok

A szupravezetésen alapuló röntgenspektrométerek kifejlesztését az a törekvés vezérelte, hogy legyenek gyorsak, mint a Si(Li) detektorral működő spektrométerek, de energiafelbontásuk legyen olyan jó, mint a hullámhosszdisziperzív spektrométereké. Az új típusú röntgendetektorok közül kettőt tárgyalunk itt részletesebben: az első a mikro-kaloriméter, a másik a szupravezető alagúteffektuson alapuló STJ spektrométer (STJ – superconducting tunnel junction).



2. ábra. A szupravezető hőmérő (TES) ellenállásának hőmérsékletfüggése, arany-íridium példáján

Mikro-kaloriméter detektor

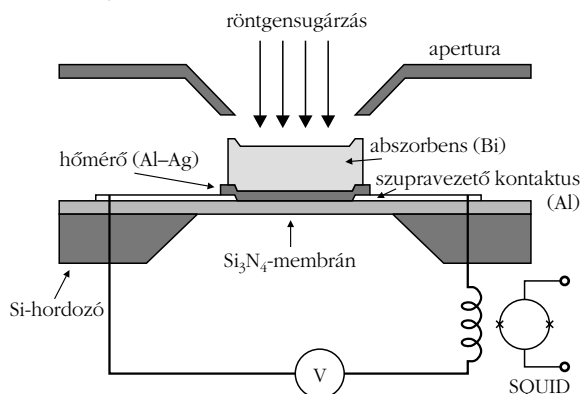
A mikro-kaloriméter (Transition Edge Sensor, TES) egy detektor abszorbensből és egy nagyon érzékeny hőmérőből áll. A beérkező (röntgen)sugárzás energiája hővé alakul át az abszorbensben, és a hőmérő méri ezt a hőmérséklet-változást. Szükség van egy olyan („yenge”) kapcsolatra a környezettel, amely biztosítja, hogy a hő kifelé ne távozzon el, és az abszorbensből és hőmérőből álló rendszer a lehető leggyorsabban visszatérjen alapállapotába, hogy képes legyen a következő röntgenkvantum detektálására.

1996-ben *K.D. Irwin* és munkatársai az amerikai National Institute for Standards and Technologyban kidolgoztak egy olyan nagy energiafelbontású röntgendetektort, amely mikro-kaloriméter elven működik.

A detektor legkritikusabb része az igen érzékeny hőmérő, amely a normál elektromos vezetés és szupravezetés közötti átmenet (transition edge) (2. ábra) kihasználásán alapszik. A szupravezető állapotból a normál állapotban való átmenet akkora ellenállás-változást okoz, hogy mikrokelvin hőmérséklet-változások mérését is lehetővé teszi. Ezért vonult be az irodalomba Transition Edge Sensor néven ez a mikro-kaloriméter.

A mérőelrendezést, illetve annak a sémáját a 3. ábra mutatja. A beérkező röntgensugarak energiájukat a (néhány mikrométer vastag) normál állapotú bizmut abszorbens rétegben adják le. A bizmutban bekövetkező hőmérő

3. ábra. Irwin és munkatársainak szupravezető röntgendetektora (mikro-kaloriméter)



séklet-növekedést érzékeli a szupravezető Al és normál vezetőségű Ag kettős rétegből álló hőmérő. Röntgenbesugárzás hatására a hőmérő áramkörében ellenállás-növekedés és impulzusszerű áramcsökkenés jelentkezik a szupravezető kvantuminterferencia-berendezés (SQUID – Superconducting Quantum Interference Device) bemenetén.

Az elrendezés előnye, hogy a normál vezetés és szupravezetés közötti átmenet nagyon meredekké tehető, ezáltal a hőmérő nagyon érzékenyvé válik. A detektor energiafelbontása 4,5 keV-en 14 eV. (Két másik berendezésben 1 keV-en 2,6 eV és 4 eV-nál 0,2 eV felbontást mértek.) Összehasonlításképpen a konvencionális félvezető EDS-ek energiája kedvező esetben 120 eV (5,9 keV-nél).

Kulcsfontosságú paraméterek az

- abszorbens hővezető-képessége és
- a hőmérő hőkapacitása.

Az abszorbens jó hővezető-képessége biztosítja, hogy a röntgenfoton elnyelése és energiájának termikus energiává való átalakítása után az abszorbens mielőbb visszatérhessen abba az alapállapotába, amelyhez viszonyítjuk a hőmérséklet-emelkedést. A jobb hővezetés miatt a fém abszorbensnek segítségével elérhető időállandók kisebbek (1 μ s), mint a félvezető abszorbenssekkel (1 ms). Az abszorbens vastagsága is hangolási paraméter: vékonyabb abszorbens rétegekkel jobb energiafelbontást lehet elérni, a vastagabb rétegek viszont szélesebb röntgenenergia-tartományban használhatók.

A hőmérő hőkapacitása abból a szempontból fontos, hogy minél kisebb röntgenkvantum-energiát, minél nagyobb hőmérséklet-változással lehessen átalakítani. Az E_x energiájú röntgenfoton Q_x hőmennyiséggé való átalakulásakor a ΔT hőmérséklet-változást a hőmérő C hőkapacitása határozza meg:

$$\Delta T = \frac{Q_x}{C} = \frac{Q_x}{c m}, \quad (1)$$

ahol c -vel a fajhőt, azaz az egységnyi tömegre vonatkoztatott hőkapacitást jelöljük.

Míg a különböző anyagok fajhője a szobahőmérséklet környezetében függetlennek tekinthető a hőmérséklettől, addig alacsony hőmérsékleten a fajhő T^3 -al arányosan csökken. A 0,1 K körüli hőmérsékleten működő mikro-kaloriméter szupravezető hőmérőjének hőkapacitása rendkívül kicsi, ezért a hőmérséklet-konverzió érzékenysége nagyon jó.

Irwin és munkatársai a bizmut abszorbenshez hőmérőként ezüst-alumínium kettősréteget használtak. E kettősrétegben a rétegek egymáshoz viszonyított relatív vastagságát változtatva olyan hőmérők voltak előállíthatók, amelyben a normál vezető – szupravezető átmenet nagyon meredek (100 μ K széles) és a kritikus hőmérséklet (amelynél szupravezető állapotba megy át) az 50–100 mK közti hőmérséklet-tartományba esett (jóllehet a szupravezető komponens a tiszta alumínium kritikus hőmérséklete 1 K körül van).

Az árammérő SQUID a Josephson-effektuson alapul: vékony szigetelővel elválasztott két szupravezető között alagúteffektus révén áram tud folyni a szigetelőn keresztül anélkül, hogy feszültséget alkalmaznának. Az alagút-

áram rendkívül érzékeny a külső mágneses tér megváltozására, és ezt a jelenséget használják fel a SQUID-ben mágneses térerő (illetve az ezt létrehozó elektromos áram) változásainak mérésére.

Höbne és munkatársai mikro-kaloriméterükben arany abszorbenst és irídium–arany kettősréteget használtak hőmérőként (lásd az 1. ábrát, ebben a kombinációban az irídium a szupravezető). Ők nem TES-nek, hanem SPT-nek (Superconducting Phase-Transition Thermometer) nevezték detektorukat, de lényegét tekintve mindkét rendszer a normál fémes vezetésből a szupravezető állapotba, illetve az onnan való „visszabillenést” használja ki.

Szupravezető alagút detektorok

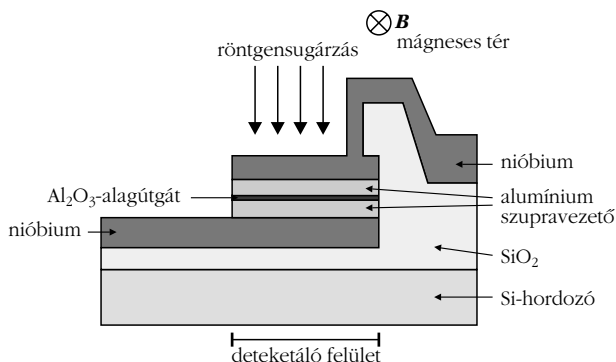
A szupravezető alagútátmenet (Superconducting Tunnel Junction, STJ) egy hordozóra párologtatott két (50–50 nm vastag) szupravezető alumíniumrétegből áll (3. ábra), amelyek között vékony (0,2 nm) szigetelő Al_2O_3 réteg van. A szóban forgó munkában nióbbium elektródokat alkalmaztak, és az elrendezést 500 mK hőmérsékletre hűtötték le. Maga a detektorfelület kicsi, $141 \times 141 \mu\text{m}^2$. Ha a szigetelő réteg elég vékony, akkor Cooper-párok tudnak áthaladni az egyik szupravezetőből a másikba kvantummechanikai alagúteffektus révén (Josephson-áram). A szigetelőre merőleges irányban kis előfeszítést ($\sim 0,4$ mV) és a szigetelővel párhuzamosan külső mágneses teret ($B \sim 100$ gauss) alkalmaznak, hogy a Josephson-áramot megszüntessék.

A detektor működési elve a következő: a mérendő röntgensugárzás energiája a Cooper-párokat kvázirészecskékre (két különálló elektronra) bontja szét, és ezek az elektronok alagúteffektus révén átjutnak a szigetelőn, és a körben áramot hoznak létre. A létrejött áram arányos a sugárzás energiájával.

A mikro-kaloriméterektől eltérően itt külső mágneses teret is kell alkalmazni. A detektáló rétegek vékonyak, a berendezés gyorsabb, mint a mikro-kaloriméterek: 10^4 impulzus/s sebességet is el lehetett érni. Az energiafelbontás viszont valamelyest gyengébb: 6–15 eV energiafelbontást értek el a 180–1100 eV energiatarományban.

A rétegek vékonyságával függ össze, hogy az 1 keV alatti energiatarományban, bór, szén, oxigén és fluor K-vonalainak és az átmeneti fémek L-vonalainak analízis-szor értéke el vele kimagasló eredményeket.

4. ábra. A szupravezető alagúteffektuson alapuló röntgendetektor (STJ) vázlata



Egy másik munkában szintén szupravezető alagútátmenettel ($\text{Al} / \text{Al}_x\text{O}_y / \text{Al}$), de vastagabb Al rétegekkel (290 nm) 12 eV felbontást értek el a $\text{Mn K}\alpha$ vonal 5,9 keV-es vonalára vonatkoztatva.

Tekintettel arra, hogy a röntgendetektor felülete kicsi, üvegkapillárisokból álló lencsével (Kumakov-lencse) fókuszálják a röntgensugarakat a detektor felületére.

Energiafelbontás

Felmerül a kérdés, hogy mi teszi lehetővé azt, hogy a szupravezetővel működő röntgendetektorok energiafelbontó-képessége sokkal jobb, mint a hagyományos félvezető Si(Li) és Ge detektoroké.

A félvezető detektorokban a röntgenkvantumok energiája elektron–lyuk párok létesítésére fordítódik, amelyek számát úgy kapjuk meg, hogy a röntgenkvantum energiáját elosztjuk az egy elektron–lyuk pár létrehozásához szükséges átlagos energiával.

A szupravezető detektoroknál viszont olyan gerjesztési folyamat megy végbe (lásd alább), amelyhez szükséges energia sokkal kisebb, következésképpen a gerjesztések száma nagyságrendekkel nagyobb, mint a félvezető detektoroknál, természetesen ugyanazon energiájú röntgenfotonok detektálására vonatkoztatva.

A detektorok energiafelbontására (ΔE érvényes a következő összefüggés:

$$\frac{\Delta E}{E} \sim \frac{1}{\sqrt{N}}, \quad (2)$$

ahol N a detektálási folyamat alapját képező gerjesztések száma.

A BCS-elmélet (*Bardeen, Cooper, Schrieffer*) szerint szupravezetékben az elektronokból Cooper-párok alakulnak ki, melyek egymástól viszonylag nagy távolságra (μm) lévő, egymáshoz lazán kötött elektronpárokat jelentenek.

Hőközléssel, bizonyos aktivációs energiával a Cooper-párokat kvázirészecskékké (két elektronná) alakíthatjuk át. A BCS-elmélet megjósolta azt a minimális energiát (Δ), amellyel a T_c kritikus hőmérsékletű rendelkező szupravezetőre ez a bontás véghez vihető:

$$\Delta = 1,76 k T_c, \quad (3)$$

ahol a k Boltzman-állandó értéke $1,38 \times 10^{-23}$ J/K.

Figyelembe véve, hogy $1 \text{ eV} = 1,9 \times 10^{-19}$ J, akkor a Δ -ra (vagy más néven sávparaméterre) 10^{-3} – 10^{-5} eV körüli értékeket kapunk.

Mint ahogy a konvencionális félvezető detektoroknál eV, a szupravezető detektoroknál meV nagyságrendű gerjesztési energiát kell befektetnünk, ezért a (2) képlet szerint elméletileg $\sqrt{1000}$ -szer, azaz körülbelül 30-szor jobb energiafelbontást érhetünk el egy adott besugárzó energiára vonatkozóan szupravezető detektorral, mint hagyományos félvezető detektorral.

A valóságban a konvencionális EDS 120 eV felbontó-képességet ér el a $\text{Mn K}\alpha$ 5,9 keV-es vonalára vonatkozóan, míg a szupravezető detektor felbontása ugyanerre az energiára vonatkoztatva jobb, mint 6 eV.

| 1. táblázat | | |
|---|-----------------------|------------------------------------|
| Energiadisziperzív röntgendetektlások energiafelbontásai és elérhető impulzussebességei | | |
| | energiafelbontás (eV) | maximális impulzussebesség (imp/s) |
| Si(Li) | 120–140 | 10^5 |
| mikro-kaloriméter | 3–7 | $5 \times 10^2 - 10^3$ |
| alagútátmenet | 4–15 | 10^4 |

Az 1. táblázat összehasonlítja az eddig ismertett háromféle energiadiszperzív röntgendetektlás energiafelbontását és az elérhető impulzussebességeket. A táblázat szerint a mikro-kaloriméter energiafelbontása valamelyest jobb, mint a szupravezető alagútátmeneté, viszont az alagútátmenet révén több mint egy nagyságrenddel nagyobb impulzussebességet lehet elérni.

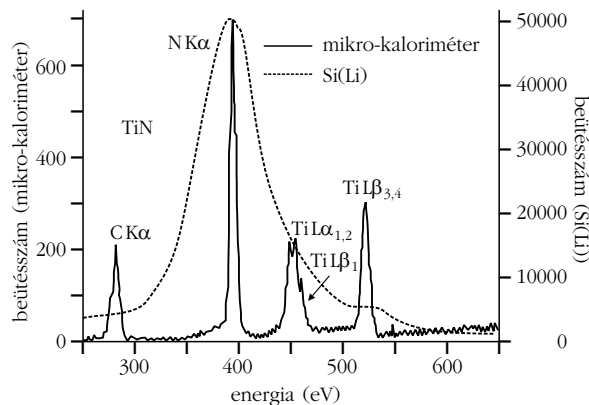
Az alacsony hőmérséklet előállítása

A cseppfolyós nitrogén és hélium alkalmazásának szükségessége megnehezítené az ilyen detektorok elterjedését, ezért a CPS nevű német cég olyan detektort fejlesztett ki, amelyben a 4 K hőmérsékletet cseppfolyós hűtőközeg nélkül, tisztán mechanikai úton való hűtéssel érik el. A hűtés utolsó lépéseként a 0,1 K felé ekkor is az adiabatikus demagnetizáció marad. A 0,1 K-en működő detektorok hűtőtartálya hasonló méretű, mint a korábbi, konvencionális félvezető energiadiszperzív röntgendetektoroké, és a pásztázó elektronmikroszkópra ugyanúgy felszerelhető. A hűtő egy kompresszorból és egy rotációs szelepből áll, amely a detektortól távolabb van elhelyezve és rugalmas cső köti össze a hűtő másik részével, amely a detektort is tartalmazza. A rugalmas csőre azért van szükség, hogy a hűtő mechanikai részének rezgéseit ne vigyék át a detektorra és az ahhoz csatolt elektronmikroszkópra. A 0,1 K hőmérséklet elérése adiabatikus demagnetizációval 60–80 percet vesz igénybe, és akkor ez az állapot akár 8–30 órán át is fenntartható, attól függően, hogy mekkora a rendszer hőterhelése és egy vagy két paramágneses sötét használtnak a hűtőben. A demagnetizációs hűtést az említett 8–30 óra eltelté után meg kell ismétlni. Az irodalomban leírt hűtőberendezés 30 mK-nél alacsonyabb hőmérsékletet is képes előállítani.

Alkalmazások

A konvencionális Si(Li) detektorban a TiL vonalai átlapolnak a NK α vonalával. A mikro-kaloriméterrel nagyon sokat javul a helyzet, mint azt az 5. ábra mutatja.

A szupravezetően alapuló röntgendetektorok (kriodetektor néven is szokás említeni) előnye a konvencionális félvezető detektorokéhoz képest a könnyű elemek tartományában mutatkozik meg leginkább. A kis energiájú sugárzások tartományában a csúcsok megsokasodnak: a könnyű elemek K vonalai átlapolnak a közepes rendszámú elemek L vonalaival. A jó energiafelbontásra itt nagyobb szükség van, mint a nagyobb energiájú tartományokban.



5. ábra. TiN röntgenspektruma kétféle energiadiszperzív röntgendetektorttal: konvencionális Si(Li) detektor és szupravezető mikro-kaloriméter

Fontos alkalmazási terület a nagy laterális felbontású analízis, különösen a félvezetőiparban, ahol az integrált áramkörök vonalszélessége 0,1 μm alatt van (45 nm 2006 elején). Az elektronsugaras mikroanalízis laterális felbontóképességét úgy is javíthatjuk, hogy például K vonal helyett L vonalat analizálunk, mert az utóbbi kisebb gyorsítófeszültség alkalmazását engedi meg.

Hasonlóan fontos az úgynevezett kémiai eltolódás mérése. A röntgenanalízis általában eleminformációt és nem vegyületinformációt ad. Kivétel a könnyű elemek tartománya, ahol a spektrumok alakja, a csúcsok torzulása fontos információt tartalmaz a kémiai kötésiállapotról. Ezt a tulajdonságot eddig is kihasználták, de csak a hullámhosszdisperzív spektrométer volt elég jó ilyen célokra. A kriodetektorok ezen a területen is nagy jelentőségre tehetnek azért a nagy energiafelbontásuk révén.

A kiváló energiafelbontás miatt a kriodetektorok számos egyéb területen nagyon ígéretesek, mint például a sötét anyag kutatása, neutrínófizika, röntgenszállás [1], szinkrotronsugárzás stb.

Összefoglalás

A proporcionális számlálókat követő félvezető alapú röntgendetektorok (Si(Li) és Ge) szimultán detektálásuk és az ebből következő gyorsaságuk révén kerültek kedvező pozícióba. A PIN diódák és a szilícium drift diódák a cseppfolyós nitrogén, mint hűtőközeg nélkülözhetőségét és nagy detektálási sebességet hoztak magukkal előnyként, energiafelbontásban közel állnak a Si(Li) detektorokhoz.

A szupravezetően alapuló kriodetektorok két fajtája a mikro-kaloriméter típusú és a szupravezető alagúteffektuson alapuló STJ csillantják fel a reményt a teljesen új megoldás irányába, ahol nagy energiafelbontást és szimultán detektálást egyidejűleg lehet elérni. Ezek a detektorok a szokásos röntgenanalitikai alkalmazásokon túlmenően várhatóan az elemi részecskék fizikájában és a röntgenszállásban is fontos mérőeszközök lesznek hamarosan.

Irodalom

1. X-ray Astrophysics, http://wisp11.physics.wisc.edu/xray/xr_microcalorimeters.htm