

Képalkotás, kémiai analízis és szerkezeti vizsgálat
a korszerű pásztázó elektronmikroszkópban

További olvasnivaló a kiadó kínálatából:

Patkós András: Bevezetés a kvantumfizikába

Bódizs Dénes: Atommagsugárzások mérés technikái

Frei Zsolt – Patkós András: Inflációs kozmológia

Geszti Tamás: Kvantummechanika

Hraskó Péter: A relativitáselmélet alapjai

John D. Jackson: Klasszikus elektrodinamika

Patkós András – Polónyi János: Sugárzás és részecskék

Edwin F. Taylor – John A. Wheeler: Térdőfizika

Pozsgai Imre

**KÉPALKOTÁS,
KÉMIAI ANALÍZIS ÉS
SZERKEZETI VIZSGÁLAT
A KORSZERŰ PÁSZTÁZÓ
ELEKTRONMIKROSKÓPBAN**





A kiadvány a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával készült.

© Pozsgai Imre, Typotex, Budapest, 2016

Engedély nélkül semmilyen formában nem másolható!

ISBN 978 963 279 908 7

ISSN 1788-2494

Témakör: *fizika*

Kedves Olvasó!

Köszönjük, hogy kínálatunkból választott olvasnivalót!



Újabb kiadványainkról és akcióinkról
a www.typotex.hu és a facebook.com/typotexkiado
oldalakon értesülhet.

Kiadja a Typotex Elektronikus Kiadó Kft.
Felelős vezető: Votisky Zsuzsa
Főszerkesztő: Horváth Balázs
A kötetet gondozta: Erő Zsuzsa
A borítót és az ábrákat készítette: Szalay Éva
Készült a Kódex Könyvgyártó Kft. nyomdájában
Felelős vezető: Marosi Attila

Tartalomjegyzék

Előszó	1
1. Az alapok	3
1.1. A pásztázó elektronmikroszkópia helye a korszerű tudományban	3
Irodalom	6
1.2. Elektron–anyag kölcsönhatás	7
1.2.1. Rugalmas szórás	12
1.2.2. Rugalmatlan szórás	15
1.2.3. Kölcsönhatási térfogat, átlagos teljes úthossz	19
1.2.4. Monte-Carlo-szimuláció	20
Irodalom	23
1.3. A pásztázó elektronmikroszkóp felépítése	24
1.3.1. A vákuumrendszer	24
1.3.2. Az elektronágyú	26
1.3.2.1. Termikus volfrámkatód	27
1.3.3. Mágneses lencsék	37
1.3.3.1. Termikus volfrámkatód	41
1.3.3.2. A legkisebb nyalábátmérő	46
1.3.4. Pásztázó tekercsek	48
Irodalom	50
1.4. Képalkotás a pásztázó elektronmikroszkópiában	51
1.4.1. A képalkotás alapfogalmai	51
1.4.1.1. Képpont	51
1.4.1.2. Mélységélesség	51
1.4.1.3. Kontraszt	53
1.4.1.4. Jel/zaj viszony	54
1.4.1.5. Laterális felbontóképesség	55
1.4.2. Szekunder- és visszaszórtelektron-kép Everhart–Thornley-detektorral	57
1.4.2.1. Everhart–Thornley-detektor	57
1.4.2.2. Szekunder elektronok a képalkotásban	59
1.4.2.3. Visszaszórt elektronok a képalkotásban	62
1.4.2.4. A minta megvilágításának fényoptikai analógiája	64
1.4.3. Visszaszórtelektron-kép szilárdtest-detektorokkal	67
1.4.3.1. Félvezető detektorok	67
1.4.3.2. Robinson-detektor	69
1.4.3.3. Austrata-detektor	70
1.4.4. Mintaáramkép	71

1.4.5.	Potenciálkontraszt-üzemmód	72
1.4.5.1.	Kvantitatív feszültségmérés potenciálkontraszt alapján	74
1.4.5.2.	Stroboszkópos vizsgálatok	77
1.4.6.	Képkeltetés elektronsugár-indukálta árammal (EBIC)	79
1.4.7.	Katódlumineszcens üzemmód	85
1.4.8.	Mágneses anyagok leképezése	87
1.4.8.1.	Az I. típusú mágneses kontraszt	88
1.4.8.2.	A II. típusú mágneses kontraszt	90
1.4.8.3.	A III. típusú mágneses kontraszt	94
1.4.9.	Kristályszerkezet vizsgálata csatornahatás alapján	94
1.4.9.1.	A csatornahatás	94
1.4.9.2.	A csatornadiagram megjelenésének feltételei	99
1.4.9.3.	Határolt területű csatornadiagram	102
1.4.9.4.	A csatornadiagramok információs tartalma	103
1.4.10.	Képtorzítások és egyéb műtermékek	105
1.4.10.1.	Képtorzítások a minta döntése miatt	106
1.4.10.2.	A pásztázás torzítása	107
1.4.10.3.	Moire-effektus	107
1.4.10.4.	Képhiha elektromos feltöltődés miatt	107
1.4.10.5.	Képhiha külső mágneses tér miatt	109
1.4.10.6.	Képhiha mechanikai rezgés miatt	109
1.4.10.7.	Képhiabák a mikroszkóp hibái miatt	110
1.4.10.8.	Sugárkárosodás, mintaszennyeződés	111
	Irodalom	115
1.5.	Minta-előkészítés a pásztázó elektronmikroszkópiában	116
1.5.1.	Vezetőbevonat készítése vákuumpárolgatással	117
1.5.2.	Katódporlasztás	120
1.5.3.	Biológiai minták előkészítése	122
1.5.3.1.	Fixálás	123
1.5.3.2.	Víztelenítés	123
1.5.3.2.1.	Kritikus ponton való szárítás	123
1.5.3.2.2.	Fagyasztva szárítás	124
1.5.3.2.3.	Fagyasztásos helyettesítés	125
1.5.3.3.	Egyéb minta-előkészítési folyamatok	125
	Irodalom	126
1.6.	Elektronsugaras mikroanalízis a pásztázó elektronmikroszkópban	127
1.6.1.	Az elektronsugaras mikroanalízis terminológiája és helye az analitikában	127
1.6.2.	A röntgensugárzás keletkezése és kölcsönhatása az anyaggal	129
1.6.2.1.	A röntgensugárzás keletkezése	129
1.6.2.2.	A röntgensugárzásnak az anyaggal való kölcsönhatása	135
1.6.3.	A hullámhosszdiszperzív röntgenspektrométer (WDS)	137
1.6.3.1.	Analizátorkristály	138
1.6.3.2.	Proporcionális számláló	139
1.6.3.3.	Jelfeldolgozó elektronika	140
1.6.4.	Az energiadiszperzív röntgenspektrométer	142

1.6.4.1. A detektálás mechanizmusa	142
1.6.4.2. A Si(Li)-detektor	143
1.6.4.3. Az energiadiszperzív röntgenspektrométer elektronikája	147
1.6.4.4. Az energiadiszperzív és hullámhosszdiszperzív technika összehasonlítása	152
1.6.5. Az elektronsugaras mikroanalízis gyakorlata	153
1.6.5.1. Minta-előkészítés	153
1.6.5.2. Minőségi analízis	154
1.6.5.2.1. Optimális mérési feltételek beállítása	154
1.6.5.2.2. A röntgenintenzitások mérése	156
1.6.5.2.3. Vonalmenti analízis és térképezés	157
Irodalom	158
2. Csúcstechnika	159
2.7. Az ipar és orvostudomány mint a fejlődés hajtóereje	159
Irodalom	162
2.8. A téremissziós pásztázó elektronmikroszkópok felépítése	163
2.8.1. Az első generációk	163
2.8.2. Három modern optikai oszlop	164
2.8.3. A leképező elektronok szerepének részletesebb megvilágítása	168
2.8.4. Detektorok és energiaszűrés	171
Irodalom	176
2.9. Kisfeszültségű és kis energiás pásztázó elektronmikroszkópia	178
2.9.1. SEM és FESEM alacsony gyorsítófeszültségen	178
2.9.2. Az alacsony feszültségű SEM fizikai vonatkozásai	180
2.9.2.1. Az elektronágyú szerepe	180
2.9.2.2. Gerjesztési térfogat	180
2.9.2.3. A rugalmasan szórt elektronok közepes szabad úthossza	182
2.9.2.4. Szekunderelektron-hozam és visszaszórási koefficiens	183
2.9.2.5. Lencsehibák alacsony gyorsítófeszültségen	186
2.9.2.6. Nyalábfékezés (kis energiás pásztázó elektronmikroszkópia)	187
2.9.2.7. A minta elektromos feltöltődése	189
2.9.3. Sugárkárosodás, mintaszennyeződés alacsony gyorsítófeszültségen	190
2.9.4. Alkalmazások	193
Irodalom	193
2.10. Transzmissziós üzemmód a téremissziós pásztázó elektronmikroszkópban	195
2.10.1. Világos és sötét látóterű leképezés	195
2.10.2. A transzmissziós üzemmód	197
2.10.3. Transzmissziós mintatartó a FESEM-hez	198
2.10.4. Biológiai alkalmazás	199
Irodalom	200
2.11. Környezeti elektronmikroszkópia	201
2.11.1. Az ESEM vákuumrendszere	202
2.11.2. Gáz alapú detektorok	203

2.11.3. Optikai mikroszkóppal kombinált atmoszferikus SEM	207
Irodalom	208
2.12. Pásztázó krio-elektronmikroszkópia	209
Irodalom	214
2.13. Visszaszórtelektron-diffrakció	216
2.13.1. Sztereografikus vetület	220
2.13.2. Euler-háromszögek	223
2.13.3. Gnomonikus vetület	224
2.13.4. Az EBSD-kép kiértékelése	225
2.13.5. Az EBSD-képek információs tartalmának megjelenítése	229
2.13.6. Követelmények a minta felületével szemben	230
2.13.7. CCD-kamera	231
2.13.8. Előreszórtelektron-detektorok	235
2.13.9. Kikuchi-transzmissziós diagram	236
2.13.10. Az EBSD összehasonlítása más módszerekkel	239
2.13.11. Alkalmazások	240
Irodalom	240
2.14. Röntgenanalitika a pásztázó elektronmikroszkópban	242
2.14.1. Szilícium-drift-röntgendetektorok	243
2.14.1.1. Szilícium-drift-röntgendetektorok felépítése	243
2.14.1.2. Az SDD és Si(Li) összehasonlítása	245
2.14.1.3. Energiafelbontás (felbontóképesség)	246
2.14.1.4. Az energiafelbontás stabilitása	248
2.14.1.5. Impulzusátvitel	249
2.14.1.6. Analízis-szoftver	250
2.14.2. Szupravezetésen alapuló röntgendetektorok	250
2.14.2.1. Mikrokaloriméter detektor (Transition Edge Sensor)	250
2.14.2.2. Szupravezető alagútdetektorok	253
2.14.2.3. Energiafelbontás	255
2.14.2.4. Az alacsony hőmérséklet előállítása	257
2.14.2.5. Alkalmazások	257
2.14.3. Hullámhosszdiszperzív (WDS) spektrometria	259
2.14.3.1. Hullámhosszdiszperzív analízis diffrakciós rács segítségével	261
2.14.3.2. Zónalemezes hullámhosszdiszperzív röntgenspektrométer	264
2.14.4. Mikro-röntgenfluoreszcens analízis (μ XRF)	267
2.14.4.1. Kapilláris optika	268
2.14.4.2. μ XRF polikapilláris fókuszálással	270
Irodalom	273
2.15. Ionsugaras pásztázó elektronmikroszkópok	276
2.15.1. Kétsugaras pásztázó elektronmikroszkóp (elektron- és ionsugárral, FIB-SEM)	277
2.15.2. Galliumion-sugaras oszlop	278
2.15.3. A galliumionok kölcsönhatása az anyaggal	280
2.15.4. A FIB-SEM működése	282
2.15.5. Alkalmazások	284
2.15.5.1. Biológiai minták tomográfiája	285

2.15.5.1.1. Ultramikrotommal ellátott FESEM	286
2.15.5.1.2. Minta-előkészítés FIB-SEM-mel TEM-tomográfiához	287
2.15.6. Pásztázó héliumion-mikroszkóp (HIM)	288
2.15.6.2. A héliumion-mikroszkóp felépítése	289
2.15.6.2. Szekunderelektron-kép a héliumion-mikroszkópban	291
2.15.6.3. Leképezés visszaszórt héliumionokkal és héliumatomokkal	293
Irodalom	294
2.16. Függelék	297
2.16.1. Kristálytani és diffrakciós ismeretek	297
2.16.1.1. A diffrakcióval nyerhető információk	297
2.16.1.2. Kristálytani alapfogalmak	298
2.16.2. A diffrakció kinematikus elmélete	303
2.16.2.1. Egyetlen atom szórása	304
2.16.2.2. Az elemi cella szórása	306
2.16.2.3. A kristály szórása	308
2.16.3. Hough-transzformáció	310
2.16.4. Mennyiségi analízis elektronsugaras mikroanalízissel	313
2.16.4.1. Rendszámkorrekció	315
2.16.4.2. Abszorpciókorrekció	317
2.16.4.3. Fluoreszcenciakorrekció	318
2.16.4.4. Etalon nélküli analízis	319
2.16.4.5. A röntgensugárzás mélységi eloszlási függvényén alapuló mennyiségi analízis	320
2.16.4.5.1. A $\Phi(\rho z)$ meghatározása paraméteres formában	323
Irodalom	329
Néhány rövidítés angol és magyar jelentése	330

Előszó

A pásztázó elektronmikroszkópia és az elektronsugaras mikroanalízis gyakorlati fontossága és a hazánkban meglévő berendezések viszonylag nagy száma megkívánja, hogy az egyetemi oktatásban is foglalkozzunk e két tudományterülettel. Termikus volfrámkatódú mikroszkópból viszonylag sok van, de a modern téremissziós berendezésekből kevés. Ennek ellenére a gyorsuló idő megköveteli, hogy a fejlődéssel lépést tartsunk.

A könyv első részének célja egyszerű eszközökkel bevezetni az olvasót a pásztázó elektronmikroszkópia és az elektronsugaras mikroanalízis alapismereteibe. A pásztázó elektronmikroszkópiáról magyarul eddig csak egy monográfia jelent meg (POZSGAI 1995). A csatlakozó területek, mint a visszaszórtelektron-diffrakció, elektronsugaras mikroanalízis, röntgenfluoreszcens analízis magyar nyelvű irodalma is nagyon korlátozott. Jelen munka első része, „Az alapok” az 1995-ben megjelent könyv átdolgozott változata, a második része pedig az eltelt húsz esztendő fejlődésének bemutatása. Angol nyelven kitűnő szakkönyvek kaphatók, de az internet szerepét sem lehet eléggé hangsúlyozni. A szakirodalomban angolul scanning electron microscope, németül Rasterelektronenmikroskop néven találkozhatunk a pásztázó elektronmikroszkóppal. A könyvben szinte mindenütt megemlítjük a megfelelő angol elnevezést is, hogy ezzel is segítsük a további tájékozódást. A gyakrabban használt angol rövidítések jegyzéke a könyv végén található.

Fényes Imre emlékére

1. rész

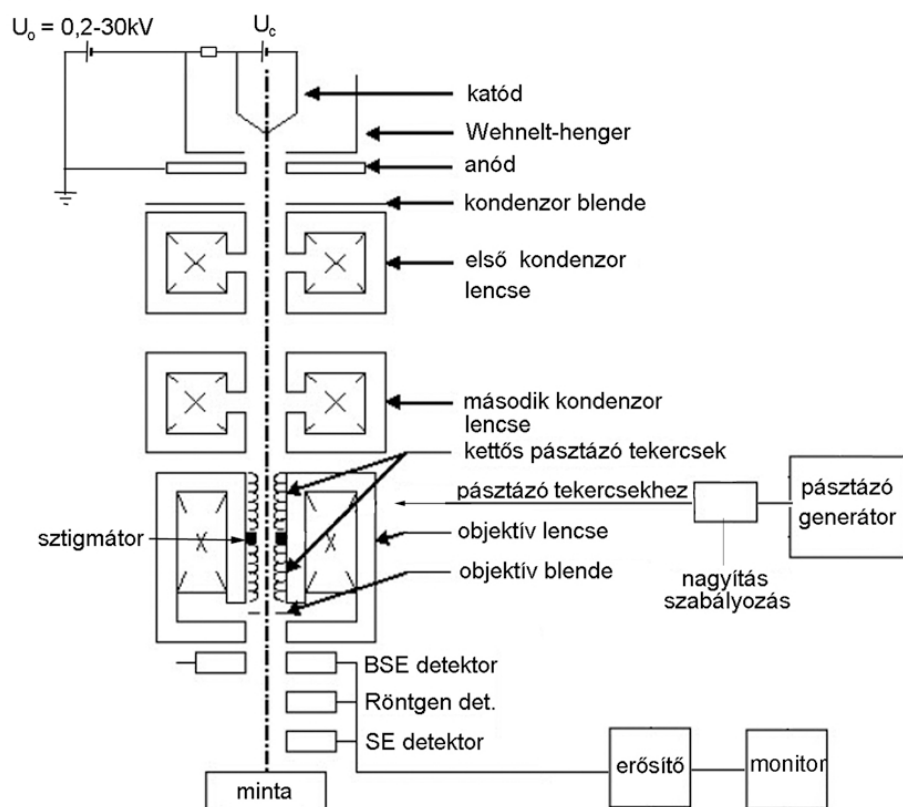
Az alapok

1.1. A pásztázó elektronmikroszkópia helye a korszerű tudományban

A pásztázó elektronmikroszkóp olyan berendezés (1.1.1. ábra), amelyben jól fókuszált elektronnyalábbal végigpásztázzuk a vizsgálandó minta felületét, és a mintából kilépő szekunder elektronokkal (vagy a mintából származó egyéb jelekkel, mint pl. visszaszórt elektronokkal, röntgensugárzással stb.) leképezzük oly módon, hogy a mintáról kapott jelet pontról pontra megjelenítjük egy katódsugárcsővön vagy a számítógép képernyőjén.

A televíziós képcsövekben szokásos pásztázás elvét sok modern berendezés alkalmazza, így például a transzmissziós elektronmikroszkópokat is el lehet látni pásztázó feltétellel. Jelen könyvünkben pásztázó elektronmikroszkóp névvel a reflexiós üzemmódban, általában maximum 40 kV gyorsítófeszültséggel dolgozó pásztázó elektronmikroszkópokat illetjük. A nagyobb gyorsítófeszültségen dolgozó ($U \geq 100$ kV) pásztázó elektronmikroszkópok, amelyek rendszerint vékony minták vizsgálatára szolgálnak, pásztázó transzmissziós elektronmikroszkóp (STEM) néven szerepelnek az irodalomban. A fenti megfogalmazás nem zárja ki, hogy a 40 kV alatt működő pásztázó mikroszkópokat transzmissziós feltétellel lásák el.

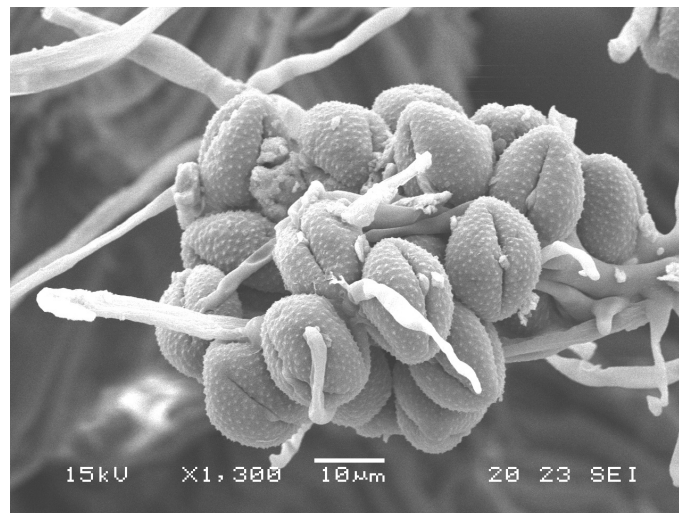
A pásztázás elve Knolltól származik (KNOLL 1935). A jelenkori mikroszkópokkal azonos elven működő első pásztázó elektronmikroszkópot, amellyel tömbanyagot lehetett szekunder elektronokkal leképezni, Zwoykin és munkatársai készítették 1942-ben (ZWORYKIN 1942). A kereskedelmi forgalomban az első pásztázó elektronmikroszkóp 1965-ben jelent meg. Kezdeti népszerűségét elsősorban nagy mélységélességének köszönhetette. Olyan plasztikus képek nyerhetők pásztázó elektronmikroszkóppal (1.1.2. ábra), amelyekhez hasonlókat sem fénymikroszkóppal, sem pedig transzmissziós elektronmikroszkóppal nem lehet előállítani.



1.1.1. ábra. A pásztázó elektronmikroszkóp vázlatos felépítése

Kis nagyítások esetén a pásztázó elektronmikroszkóp mélységélessége elérheti a 3–4 mm-t is, szemben a fénymikroszkóp 1–10 μm -es mélységélességével. Nemcsak a mélységélesség, de a felbontóképesség tekintetében is a pásztázó elektronmikroszkóp javára billen a mérleg. A téremissziós katóddal működő modern pásztázó elektronmikroszkópok felbontása 0,4 nm is lehet (HITACHI SU9000), míg a szuperfelbontású fénymikroszkópos technikákkal 20 nm-t lehet elérni (WIKIPEDIA). A pásztázó elektronmikroszkóp nagy értéke abban rejlik, hogy kellő felszereltség esetén a nagy nagyítású képek előállításával párhuzamosan nagy felbontású lokális kémiai és anyagszerkezeti információkat is nyerhetünk. Újabban háromdimenziós információ szerzése is lehetséges. A kívánt kép elkészítése után a minta felszíni rétegét eltávolítják és leképezik az alatta lévő réteget. Ezt a folyamatot sokszor megismétlik, majd a képeket

szoftver alakítja háromdimenziós objektummá. A rétegek eltávolítása az elektronmikroszkópon belül történik: vagy ionsugárral, vagy biológiai minták esetén ultramikrotommal.



1.1.2. ábra. Parlagfű pollenjeinek 1300-szoros nagyítású képe

A transzmissziós elektronmikroszkópia, bár felbontóképességével (0,052 nm) felülmúlja a pásztázó elektronmikroszkópiát, mégsem tekinthető a konkurensének, minthogy csak igen vékony minták vizsgálatára alkalmas, a tömbanyagú minták felülete pedig csak közvetve, lenyomatkészítés segítségével vizsgálható a transzmissziós elektronmikroszkópban. Fontos az a körülmény is, hogy a lenyomatkészítés időigényes, és az esetek többségében roncsolásos eljárást jelent. A leképezés szempontjából jelentős a különbség van a pásztázó elektronmikroszkópia és a transzmissziós elektronmikroszkópia között. Míg a transzmissziós elektronmikroszkópiában a leképezés hasonló módon történik, mint a fénymikroszkópiában (azaz a geometriai optika törvényeinek figyelembevételével megszerkeszthető a sugármenet és a tárgy képe), addig a pásztázó elektronmikroszkóp lencségei a kisméretű, jól fókuszált elektronnyaláb előállítására szolgálnak. Az elektronnyaláb pásztázása miatt az alkalmazott detektor nem egyszerre nyeri a képi információt, hanem pontról pontra, időben egymás után. Ezért mondjuk azt, hogy a pásztázó elektronmikroszkópiában hiányzik a fénymikroszkópos értelemben vett leképezés.

Irodalom

HITACHI SU9000

http://www.hitachi-hightech.com/eu/product_detail/?pn=em-su9000

(Letöltés ideje: 2015. március 7.)

KNOLL, M. (1935): Aufladepotential und Sekundäremission elektronenbestrahlter Körper, *Zeitschrift für technische Physik* **16**, 467–475.

POZSGAI I. (1995): *A pásztázó elektronmikroszkópia és elektronsugaras mikroanalízis alapjai*, ELTE Eötvös Kiadó.

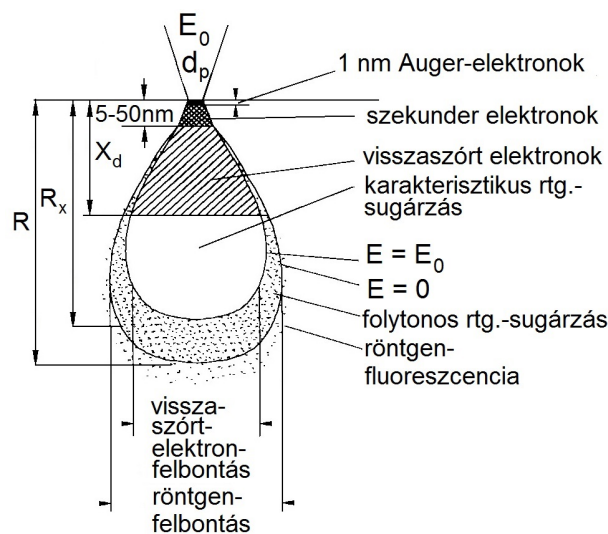
ZWORYKIN, V. A. et al. (1942): A scanning electron microscope, *ASTM Bull* **117**, 15–23.

http://en.wikipedia.org/wiki/Superresolution_microscopy#STORM.

2C_PALM_and_FPALM (Letöltés ideje: 2015. március 7.)

1.2. Elektron–anyag kölcsönhatás

Mielőtt megismerkednénk az elektron–anyag kölcsönhatás fizikai hátterével, tekintsük át, milyen formában jelentkeznek e kölcsönhatás eredményei a vizsgálatokat végző mikroszkópos számára! A pásztázó elektron-mikroszkópban a gyorsított és fókuszált elektronnyaláb a minta anyagával kölcsönhatásban az 1.2.1. ábrán látható gerjesztési térfogatban egy sor, az anyagra jellemző jelet hoz létre.



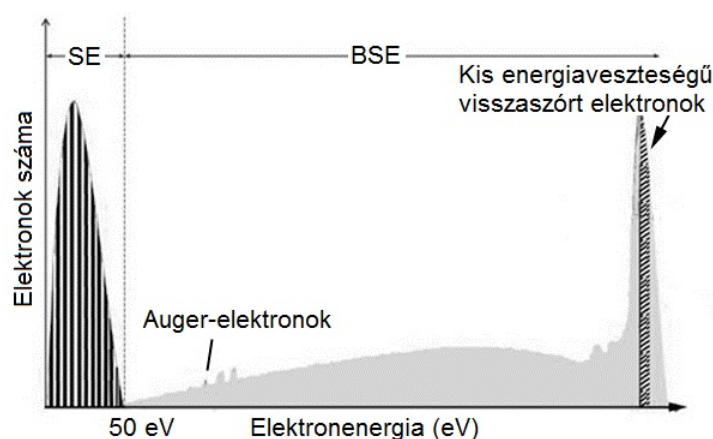
1.2.1. ábra. Különböző jelek gerjesztési térfogata

Áttekintésképpen jellemezzük röviden a keletkező jeleket!

a) Szekunder elektronok

A nagy energiával becsapódó elektronok energiája többféle folyamat révén adódik át a besugárzott mintának, és elektronokat vált ki belőle. Az 50 eV-nál kisebb energiájú elektronokat egyezményesen szekunder elektronoknak (SE) nevezik. Ezek nagy része onnan származik, hogy a besugárzó elektronnyaláb a minta atomjaival kölcsönhatásba lépve leszakítja az azok külső elektronhéjain leglazábban kötött elektronokat, a másik része viszont kis energiájú, visszaszórt elektron. Fontos továbbá az is, hogy a besugárzó nyaláb elektronjai nemcsak közvetlenül, hanem a mintában keletkezett visszaszórt elektronok révén is kiveszik részüket a szekunder elektronok létrehozásából. A szekunder elektronok a minta felszínének

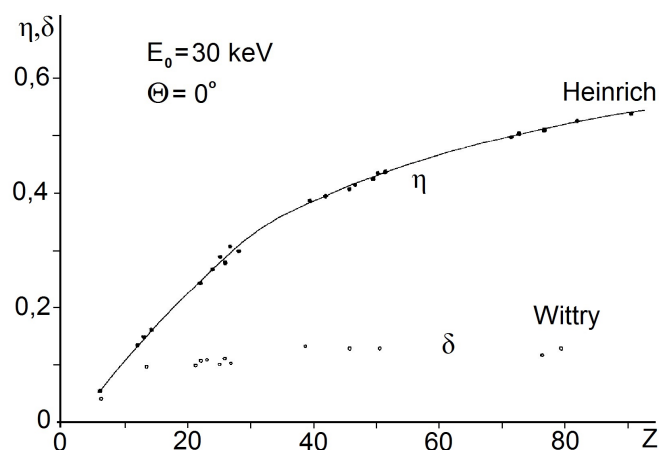
geometriai egyenetlenségeiről hordoznak információt, és velük készíthetjük a legjobb felbontású képet, tekintettel arra, hogy kis energiájuk miatt kisebb mintapontokból származnak, mint a többi jel (1.2.1. ábra). A szekunder elektronokkal való leképezésnek egy speciális formája az, amelyben elektromosan előfeszített áramköri elemeket vizsgálunk segítségével (lásd később a feszültségkontraszt-üzemmódot). Ez az eljárás jó lehetőséget nyújt pl. az integrált áramkörök tervezési hibáinak vagy technológiai okokból bekövetkező meghibásodásának a felderítésére.



1.2.2. ábra. Szekunder (SE) és visszaszórt elektronok (BSE) energiafüggése

A modern pásztázó elektronmikroszkópiában célszerűnek tartják a szekunder elektronok további kategorizálását, mert ez hozzásegít a jobb minőségű képek készítéséhez. Nevezetesen a besugárzó nyaláb közvetlen környezetében keletkező szekunder elektronokat SE1-gyel jelölik, mert ezekkel érhető el a legjobb minőségű topográfiai kép. A besugárzó nyalábtól távolabb keletkezett SE2 elektronok már a visszaszórt elektronok által közvetített kémiai információt is magukon hordozzák. Szekunder elektronok jöhetnek létre az objektívlencse alsó részén is (SE3), amit a visszaszórt elektronok váltanak ki, és ezeknek már kevés közük van a vizsgálandó minták morfológiájához.

Mint később látni fogjuk, szekunder elektronokat közvetve is elő lehet állítani visszaszórt elektronokkal a mikroszkóp oszlopában az optikai tengelyhez képest szimmetrikusan elhelyezett elektródák segítségével.



1.2.3. ábra. A visszaszórási koeficiens η és a szekunderelektron-hozam δ rendszámfüggése (HEINRICH 1996, WITTRY 1996)

b) Visszaszórt elektronok

A minta felszínét elhagyó 50 eV-nál nagyobb energiájú elektronok tartoznak a visszaszórt elektronok (BSE) csoportjába. Szemben a szekunder elektronokkal, a felszíni geometriai (topográfiai) információkon kívül kémiai összetételi (kompozíciós) információt is hordoznak magukban. Ez teszi a visszaszórt elektronokat az elektronsugaras mikroanalízis fontos segédeszközévé, ugyanis könnyebben ki tudjuk választani a szükséges terepet a mikroanalízisre, ha előtte visszaszórtelektron-képet készítünk a mintáról. Az 1.2.3. ábra szerint a visszaszórási koeficiens η (amely definíció szerint a visszaszórt elektronoknak a besugárzó elektronokhoz viszonyított hányada) rendszámfüggése monoton növekvő, ezért a mikroszkópos képen a nagy rendszámú elemekben dús terep világosan jelenik meg egy könnyű rendszámú elemekből álló másik terephez képest. (Kivétel természetesen az, amikor a kontrasztot elektronikusan megfordítjuk.) Az 5 kV-nál alacsonyabb gyorsítófeszültségeken nem teljesül a visszaszórási koeficiensnek a rendszámmal való monoton növekedése.

c) Abszorbeált elektronok

A besugárzó áramból a mintában abszorbeált elektronok alkotják az ún. mintaáramot, amelynek segítségével szintén képet lehet készíteni. Ez a

kép a visszaszórtelektron-képhez hasonlóan tartalmaz kémiai információkat a mintáról, viszont a kontrasztja éppen a fordítottja.

d) Karakterisztikus röntgensugárzás

A besugárzó elektronnyaláb a mintán mind rugalmas, mind pedig rugalmatlan ütközést szenved. A röntgensugárzás gerjesztése szempontjából az energiaveszteséggel járó rugalmatlan ütközések a fontosak. A karakterisztikus röntgensugárzás keletkezésének feltétele, hogy a besugárzó elektron a kölcsönhatásba lépő atom belső héjáról elektront távolítson el, azaz a szóban forgó héjat ionizálja. Azt a minimális energiaértéket, amely ahhoz szükséges, hogy egy K, L vagy M héjat ionizáljunk, az illető héj kritikus gerjesztési energiájának nevezzük. Az ionizált héjra egy külső héjról beugró elektron az energiafeleslegét vagy röntgenfoton formájában sugározza ki, vagy sugárzás nélküli átmenettel egy ún. Auger-elektron viszi el a szóban forgó héjak közötti energiakülönbséget. (Ez képileg úgy képzelhető el, hogy a gerjesztett röntgensugárzás még az atomon belül egy elektron eltávolítására fordítja energiáját.)

e) Folytonos röntgensugárzás

Míthogy a lassuló elektronok energiát sugároznak, ezért folytonos röntgensugárzás keletkezik, amint a besugárzó elektronok a minta felszínét elérik. A besugárzó elektronok lelassulását a minta atommagjainak árnyékolt Coulomb-potenciálja okozza. A folytonos röntgensugárzást a szakirodalom említi még kontinuum-sugárzás, fékezési sugárzás vagy német megfelelője, a Bremsstrahlung néven is.

f) Fényemisszió

A mintát érő nagy energiájú elektronok sok esetben fényt gerjesztenek a vizsgált mintában. A jelenséget katódlumineszcenciának nevezzük. A kibocsátott fényt felhasználva a minta felületének leképezésére információt nyerhetünk azokról a rekombinációs centrumokról, amelyek a fénykibocsátás szempontjából játszanak szerepet. A katódlumineszcens vizsgálatoknak főként a félvezetők (pl. világító diódák, szilárdtestlézerek) és geológiai minták vizsgálatában van szerepe.