

AZ ELTE TTK KÉTSUGARAS PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSKÓPJA

DUAL BEAM SCANNING ELECTRONMICROSCOPE AT EÖTVÖS LORÁND UNIVERSITY

HAVANCSÁK KÁROLY¹, BARIS ADRIENN², KALÁCSKA SZILVIA³

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.

¹Az ELTE TTK KKMC SEM labor vezetője

²ELTE anyagtudomány MSc szakos diplomatervező hallgató

³ELTE fizika doktori iskola hallgatója

Honlap: <http://sem.elte.hu>

E-mail: hkaroly@caesar.elte.hu

Abstract

There are only a few device types available for today's researchers which are as useful and manifold as the dual-beam scanning electron microscope working at the Eötvös Loránd University. It is important to understand the operation and the possibilities offered by this instrument because of its utility in several science subjects and research areas. Therefore in the present article we summarize the relevant basic interactions between the components of the material as seen in the microscope and the applications of the main detectors, mentioning the latest research works in the institute. We can discover new perspectives in the precise and high resolution facilities of this instrument in the examinations of sensitive archaeological samples.

Kivonat

Kevés olyan hasznos és sokszínű eszköztípus áll a mai kutatók rendelkezésére, mint az ELTE-n is működő kétsugaras pásztázó elektronmikroszkóp. A számos tudományterületen és kutatási témában való felhasználhatóság miatt fontos megérteni ennek a modern eszköznek a működését és a készülékben rejlő lehetőségeket. Cikkünkben ezért az alapvető kölcsönhatások magyarázatán túl kitérünk a mikroszkóp felépítésére és a legfontosabb detektorok alkalmazhatóságára, megemlítve az intézetben folyó legfrissebb kutatásokat. A pontos, nagy felbontást igénylő régészeti minták vizsgálatában is új távlatokat nyit a készülék használata.

KEYWORDS: SCANNING ELECTRONMICROSCOPE, SEM, ELEMENT MAPPING, EBSD, FIB

KULCSSZAVAK: PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSKÓP, SEM, ELEMÉTKÉP, EBSD, FIB

Bevezetés

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Karán mintegy három éve működik a részben európai uniós forrásból beszerzett kétsugaras pásztázó elektronmikroszkóp. Ez az elektronmikroszkóp képességeit tekintve a világszínvonalat képviseli. Felszereltsége, és ennek eredményeképpen a mérési lehetőségei Európában a legjobbak közé sorolják. A pásztázó elektronmikroszkóp FEI Quanta 3D típusú, nagyfelbontású, kétsugaras készülék. A két sugár azt jelenti, hogy az elektronforráson kívül ionforrással is rendelkezik. Az elektronnaláb és az ionnyaláb egyaránt alkalmas arra, hogy mikroszkópi képet készíthessünk, ugyanakkor az ionnyaláb az anyagminta felületének megmunkálását is lehetővé teszi. Az **1. ábrán** a pásztázó elektronmikroszkóp központi egységének képét láthatjuk.



1. ábra: Az ELTE TTK Quanta 3D kétsugaras pásztázó elektronmikroszkópja

Fig. 1.: Quanta 3D dual beam scanning electron-microscope at Eötvös Loránd University

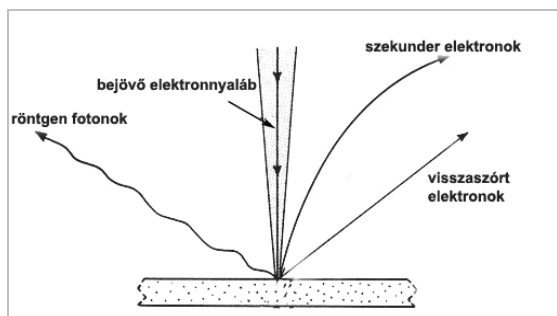
Az alábbiakban bemutatjuk, hogy mire képes ez a mikroszkóp, és kiragadott példákon keresztül azt, hogy az ELTE TTK kutatói milyen vizsgálatokhoz használják az új eszközt. Az új mikroszkóp bemutatása előtt ismerkedjünk meg általában a pásztázó elektronmikroszkópok működésének alapjaival.

A minta-elektron kölcsönhatás „termékei”

A hagyományos optikai mikroszkóp felbontóképessége a diffrakciós korlát miatt, optimális esetben sem jobb (200 – 300) nm-nél. A 20. század elején a tudomány fejlődése azonban ennél jobb felbontást igényelt, és ekkorra már a technikai feltételek is adottak voltak az elektronmikroszkópok kifejlesztéséhez. A fejlesztések két irányban indultak el. Ennek eredményeként Ernst Ruska munkássága nyomán 1931-ban működni kezdett az első átvilágító, ú. n. transzmissziós elektronmikroszkóp (TEM). A TEM-ben az elektronsugár vékony (jellemzően (100-500) nm vastagságú) mintát átvilágítva, elektromágneses lencserendszeren halad keresztül, és az optikai mikroszkópéhoz hasonló, párhuzamos képalkotást használva hoz létre nagyított képet. A párhuzamos képalkotás azt jelenti, hogy a mikroszkópi kép valamennyi képpontja egyszerre jön létre.

Az elektronmikroszkóp fejlesztés másik iránya a pásztázás elvét alkalmazza, amely a soros képalkotást használja. Az ilyen elven működő mikroszkópokban a kép pontjai nem egyszerre, hanem pontról-pontra, időben egymás után jönnek létre.

Az első pásztázó elektronmikroszkópot (scanning electron microscope = SEM) Max Knoll hozta létre 1935-ben. Az első kereskedelmi pásztázó elektronmikroszkóp azonban csak az 1960-as években jelent meg. Azóta a SEM jelentős fejlődésen ment keresztül és rendkívül elterjedt eszközzé vált, több tízezer példány működik szerte a világon.



2. ábra: Az elektron–anyag kölcsönhatás termékei
Fig. 2.: The products of electron–matter interaction

A népszerűség oka egyrészt az, hogy a vizsgálandó minta előkészítése viszonylag egyszerű, az transzmissziós elektron mikroszkóppal szemben vékonyítást nem igényel. Másrészt, bár jobbára csak a minta felületéhez közeli tartományokról kapható információ, a legjobb mikroszkópokkal topografikus, szerkezeti és összetételbeli adatokat is nyerhetünk.

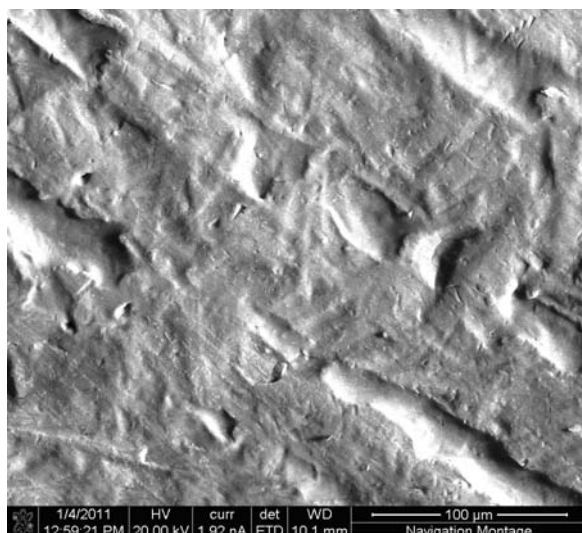
A pásztázó elektronmikroszkópban a fókuszált elektronnyaláb a minta felületét pásztázza, miközben különböző „termékeket” vált ki. Mivel többnyire vastag mintát használunk, ezért általában a bombázó nyaláb nem jut át a mintán. Ilyenkor a kölcsönhatás „termékei” csak a minta nyaláb felőli oldalán jelennek meg, ahogyan azt a **2. ábra** mutatja. A mikroszkópban a képek létrehozására az alábbi „termékeket” használjuk.

- *Szekunder elektronok.* Elsősorban gyengén kötött, a minta atomjainak külső elektronhéjain elhelyezkedő elektronok, amelyeket a nyaláb kiüt a helyükről. Ezeknek az elektronoknak kicsi az energiájuk, zömmel 5–10 eV. Összegyűjtve topografikus (felületi) információt adnak.

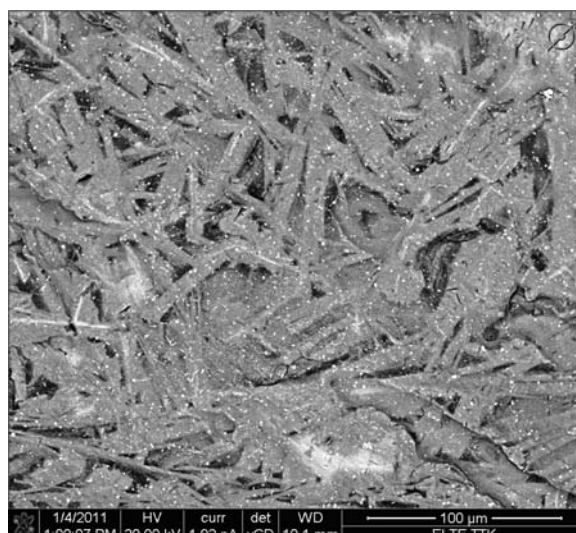
- *Visszaszórt (backscattered) elektronok.* Az eredeti nyalábból rugalmas, nagyszögű szórást szenvedett elektronok. Ezeknek az energiája általában 10 keV nagyságrendű. A visszaszórt elektronokkal létrehozott kép rendszám kontrasztot mutat, ami azt jelenti, hogy a különböző kémiai elemeket tartalmazó képrészek jól elkülönülnek a képen.

A fentieket illusztrálja **3. ábra** két képe. A **3a. ábrán** egy többfázisú minta szekunder elektron képét mutatjuk. Látszik, hogy a szekunder elektron kép a felület morfológiáját mutatja. A **3b. ábra** ugyanennek a felületrészletnek a visszaszórt elektron képét mutatja. Az látszik, hogy egyrészt „mélyebbre” látunk a mintában, jól kivehetők a fáziselemek, másrészt a magasabb rendszámú elemeket tartalmazó fázisok világos pöttyök formájában mutatkoznak meg a képen.

- *Röntgenfotonok.* A mintát bombázó elektronnyaláb rendelkezik akkora energiával, hogy a minta atomjainak belső héjáról elektront üthessen ki. Az ilyen elektronhiány instabil állapotot jelent, ezért magasabb energiájú elektronsugárral betöltődik, miközben a két héj energia-különbségének megfelelő energiájú röntgen-foton keletkezik. Minthogy ez az energia jellemző az öt kibocsátó atomra, ezért, ha a mintából távozó röntgenfotonok energiáját megmérjük, akkor információt nyerhetünk a minta kémiai összetételére.



a



b

3. ábra: Többfázisú minta szekunder elektron képe (a), és ugyanannak a területnek a visszaszórt elektron képe (b)

Fig. 3.: Secondary electron image of a multi-phase sample (a), and backscattered electron image from the same area (b)

Van olyan pásztázó elektronmikroszkóp is, amely vékony minták esetén, a minta túloldalán megjelenő jelekből is képes képet készíteni (scanning transmission electron microscope = STEM). Az ELTE TTK új mikroszkópja is ilyen. Az ilyen kép hasonló információt hordoz, mint a transzmissziós elektronmikroszkóp képe, hiszen ugyanazokat a nyalábokat használja (előre és kis szög alatt rugalmasan szórt elektronokat). A képalkotás módja természetesen ilyenkor is a pásztázó mikroszkópra jellemző soros képzés. A felbontóképesség kb. egy nagyságrenddel elmarad a manapság használatos dedikált nagyfelbontású transzmissziós mikroszkópokétól.

A pásztázó elektronmikroszkóp felépítése

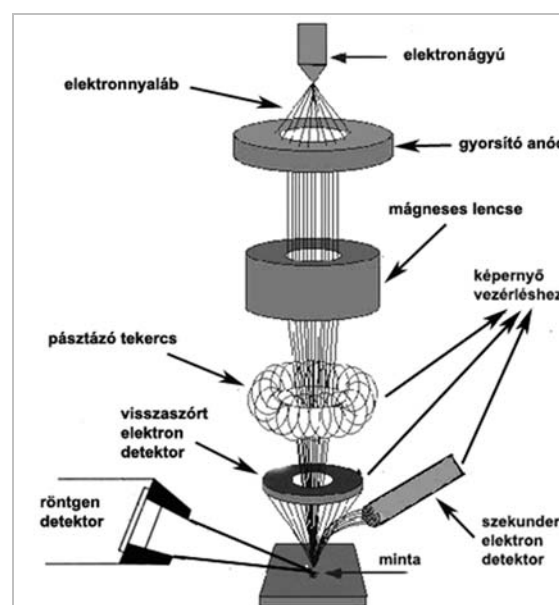
A pásztázó elektronmikroszkóp fontosabb egységei: elektronforrás, objektív lencse, pásztázó tekercsek, detektorok, mintatartó. A pásztázó elektronmikroszkóp elvi felépítését a **4. ábra** mutatja.

Az elektronmikroszkópokban az elektronok forrása az elektronágyú. Az elektronágyúban az elektronok a katódból vagy izzítás hatására (izzókatódos forrás), vagy pedig kihúzó elektromos tér hatására (téremissziós forrás) lépnek ki. A Quanta 3D mikroszkóp forrása egy harmadik típusba tartozik. Itt természetesen is segített téremissziót alkalmaznak (Schottky-forrás). A forrás anyaga volfrám, amelynek felülete kis elektron-kilépési energiával rendelkező cirkónium-dioxiddal (ZrO_2) van bevonva.

A katódból kilépő elektronokat elektromos tér gyorsítja a szükséges energiára. A pásztázó

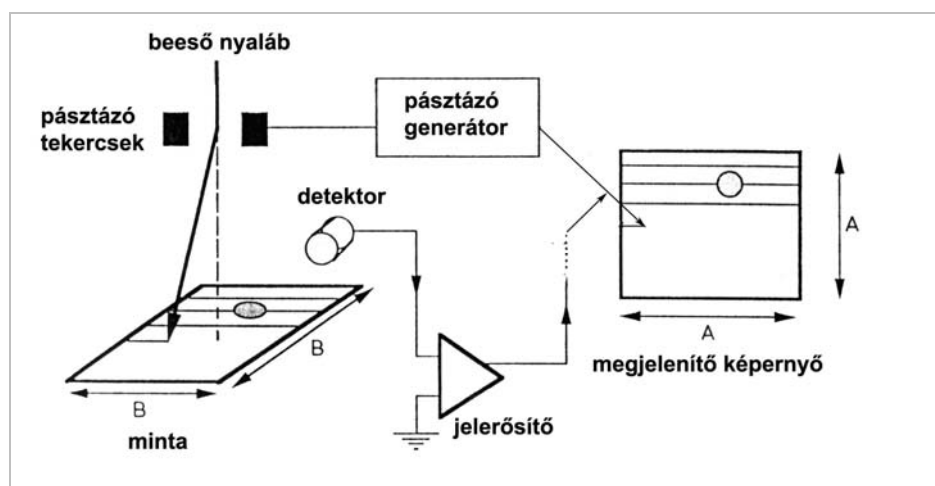
elektronmikroszkópokban az elektronok maximális energiája általában $E_{\text{max}} = 30 \text{ keV}$, és ez az energia a kisebb energiák felé állítható.

A forrásból kilépő nyalábot elektromágneses elven működő lencse fókuszálja. Az elektronmikroszkópokban alkalmazott elektron lencsék a Lorentz-erőhatás alapján működő mágneses lencsék.



4. ábra: A pásztázó elektronmikroszkóp felépítése

Fig. 4.: The structure of a scanning electron-microscope



5. ábra:

A pásztázó elektronmikroszkóp működésének elve

Fig. 5.:

Principle of operation of the scanning electron microscope

A lencse fókusz távolsága és a nyaláb mérete a mintán az elektromágnes áramával szabályozható. A nyaláb minimális átmérője a mintán ~ 1 nm.

A pásztázó tekercsek segítségével a nyaláb sorról-sorra végigpásztázza a minta felületét. Az elektronnyaláb által a mintából kiváltott szekunder elektronokat (SE), visszaszórt elektronokat (back-scattered electron = BSE) és röntgenfotonokat a minta felett elhelyezett detektorok érzékelik. A legegyszerűbb pásztázó elektronmikroszkópokban csak szekunder elektron detektor van, a Quanta 3D mikroszkóp azonban mindhárom „termékre” rendelkezik detektorokkal.

A képképzés elve

A kép létrehozásában a lencséknek nincs közvetlen szerepe, ezért a pásztázó mikroszkópok esetén nem is érvényes a párhuzamos képképzés mikroszkópok (pl. TEM, optikai mikroszkóp) felbontására vonatkozó Abbe-feltétel. A soros képképzés esetén a felbontást meghatározó tényezők: a nyaláb mérete a minta felületén, a nyaláb által a felület alatt gerjesztett térfogat, illetve a mintából kilépő termék energiája.

Hogyan jön létre a kép? A képképzés elvét az 5. ábra mutatja. A minta felületét pásztázó elektronnyalábot egy pásztázó generátor vezérli. Ugyanez a generátor vezérli pontról-pontra a képernyő pontjainak aktiválását. A nyaláb által kiváltott elektronok vagy röntgenfotonok intenzitását az adott termékre érzékeny detektor érzékeli. A detektorok jele modulálja a megjelenítő képernyő képpontjainak intenzitását. Ha a minta felületének emissziója változik, akkor ez a változás látszik a képernyőn, és pontról-pontra így alakul ki a képernyőn a minta felületének emisszióját jellemző kép. A kép mérete állandó, hiszen ez a képernyő mérete. A nagyítás attól függ, hogy a minta felületén mozgó elektronnyaláb mekkora felületet pásztáz. Ha kis felületrészt pásztázunk,

akkor nagy a nagyítás (ez akár milliószoros is lehet), ha nagyobb, akkor csökken a nagyítás.

A mikroszkópban az elektronnyaláb vákuumban halad, de a mikroszkóp egyes részeiben a vákuum értéke különböző. A legnagyobb vákuumot a forrás igényli. Itt 10^{-7} Pa a nyomás. A legkisebb vákuum a mintatérben van. Itt a leggyakrabban alkalmazott üzemmódban ($10^{-2} - 10^{-3}$) Pa uralkodik. A két érték között a mikroszkóp oszlopa mentén elhelyezett vákuumszivattyúk hatására a nyomás folytonosan változik.

A pásztázó elektronmikroszkóp működéséből következik, hogy az elektronnyaláb töltést juttat a felületre. Az nem engedhető meg, hogy a töltés felhalmozódjon a minta felületén, mert a felhalmozódó töltések elektromos tere kölcsönhat a pásztázó nyaláb elektronjaival, ami meghamisítja a képet, lehetetlenné téve a felületi objektumok vizsgálatát. Vezető minta esetén nem nehéz megakadályozni a feltöltődést. Ehhez elegendő az, hogy a mintát vezető ragasztóval rögzítsük a leföldelt mintatartóhoz.

Ha a minta szigetelő (pl. kőzetek, biológiai minták), akkor a töltés elvezetésének hagyományos megoldása az, hogy vékony vezető réteggel vonják be a felületet. Ez a réteg általában arany vagy szén, amelyet párologtatással lehet a felületre juttatni.

A Quanta 3D mikroszkóp sajátosságai

A mikroszkóp üzemmódjai

A Quanta 3D mikroszkóp többféle üzemmóddal is rendelkezik. Vezető minták esetén a nagyvákuum üzemmód használatos. Mint ahogy korábban megjegyeztük, ilyenkor a minta felületéről könnyen eltávozik a rájutó elektromos töltés, így nem zavarja a képképzést. Szigetelő minták vezető réteg rápárolgatásával vezetővé tehetők, és így vizsgálhatók a nagyvákuumos üzemmódban. Ebben az üzemmódban a szekunder elektron detektorral ideális esetben 1 nm maximális felbontás érhető el.

A szekunder elektron képek topografikus információt hordoznak és jellemzőjük, különösen kisebb nagyítás esetén, a nagy mélységélesség.

A párologtatás azonban nem mindig előnyös. Különösen nem előnyös a nanoméretű objektumok esetén, hiszen elfedi, sőt megváltoztatja a felület tulajdonságait. Ezért a Quanta 3D mikroszkóp más megoldást is kínál. Az ún. alacsony-vákuumos üzemmódban a mintatérben (70–130) Pa nyomású vígőz van. A vígőzben haladó elektronnyaláb ionizálja a molekulákat. Az így keletkező pozitív ionok a mintára jutva képesek semlegesíteni a felületre jutó negatív töltéseket (elektronokat).

A vezető és szigetelő mintákon kívül van a mintáknak egy harmadik csoportja, mégpedig általában a biológiai eredetű minták, amelyek víztartalmuk gyors elvesztése miatt nehezen viselik a vákuumot. Az ilyen minták mérésére a Quanta 3D mikroszkóp egy harmadik üzemmódot kínál. Ebben az üzemmódban a minta 1000 Pa nagyságrendű nyomáson közel 100% páratartalmú közegben van, így nem következik be vízvesztés. Ezt az üzemmódot környezeti üzemmódnak nevezzük.

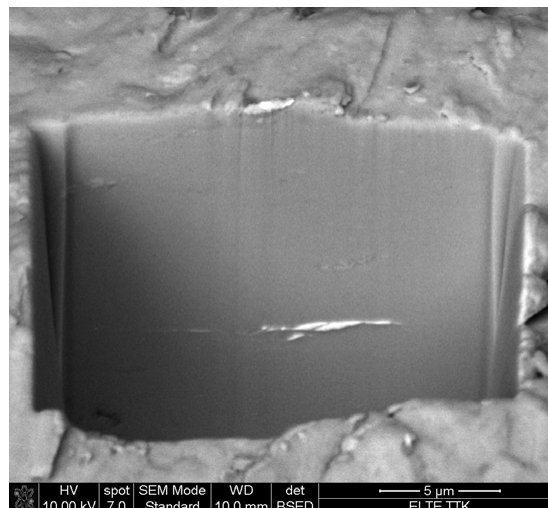
Minden üzemmódban lehet szekunder- és visszaszórt elektron képet készíteni, valamint röntgenanalízist végezni.

Fókuszált ionsugaras berendezés

A kétsugaras Quanta 3D mikroszkóp második nyalábja fókuszált ionsugár (focused ion beam = FIB). Az ionágyú Ga-ionokat gyorsít $E_{\max} = 30$ keV maximális energiára. Az ionnyaláb forrása, a fókuszálása és a pásztázása sok tekintetben hasonlít az elektronnyaláb esetében elmondottakhoz. Az ionsugár jelenléte megsokszorozza a mikroszkóp lehetőségeit. Az ionnyaláb ugyanis akkora energiával rendelkezik, hogy porlasztás útján képes a minta felületének alakítására. Például az ionnyalábbal a minta felületébe belevágva és egy sima felületet kialakítva, a keresztmetszet mentén is lehetségessé válik a minta tulajdonságainak vizsgálata. A **6. ábrán** ilyen keresztmetszeti bemetszést láthatunk.

Az ionnyalábbal a minta elvékonyítása is lehetséges, amivel a transzmissziós elektronmikroszkóp számára készíthetünk vékony mintákat. Ha a vizsgálatok szükségessé teszik, akkor a mintából tetszőleges alakú objektumok faraghatók ki, amiket azután, esetleg más eszközökben, további vizsgálatoknak lehet alávetni.

A FIB berendezés nanolitográfia készítésére is alkalmas. Ez azt jelenti, hogy akár néhányszor 10 nm szélességű Pt, C vagy szigetelő réteg leválasztása is lehetséges a minta felületére.



6. ábra: A FIB-bel kialakított keresztmetszeti felületen vizsgálható minta belsejének szerkezete

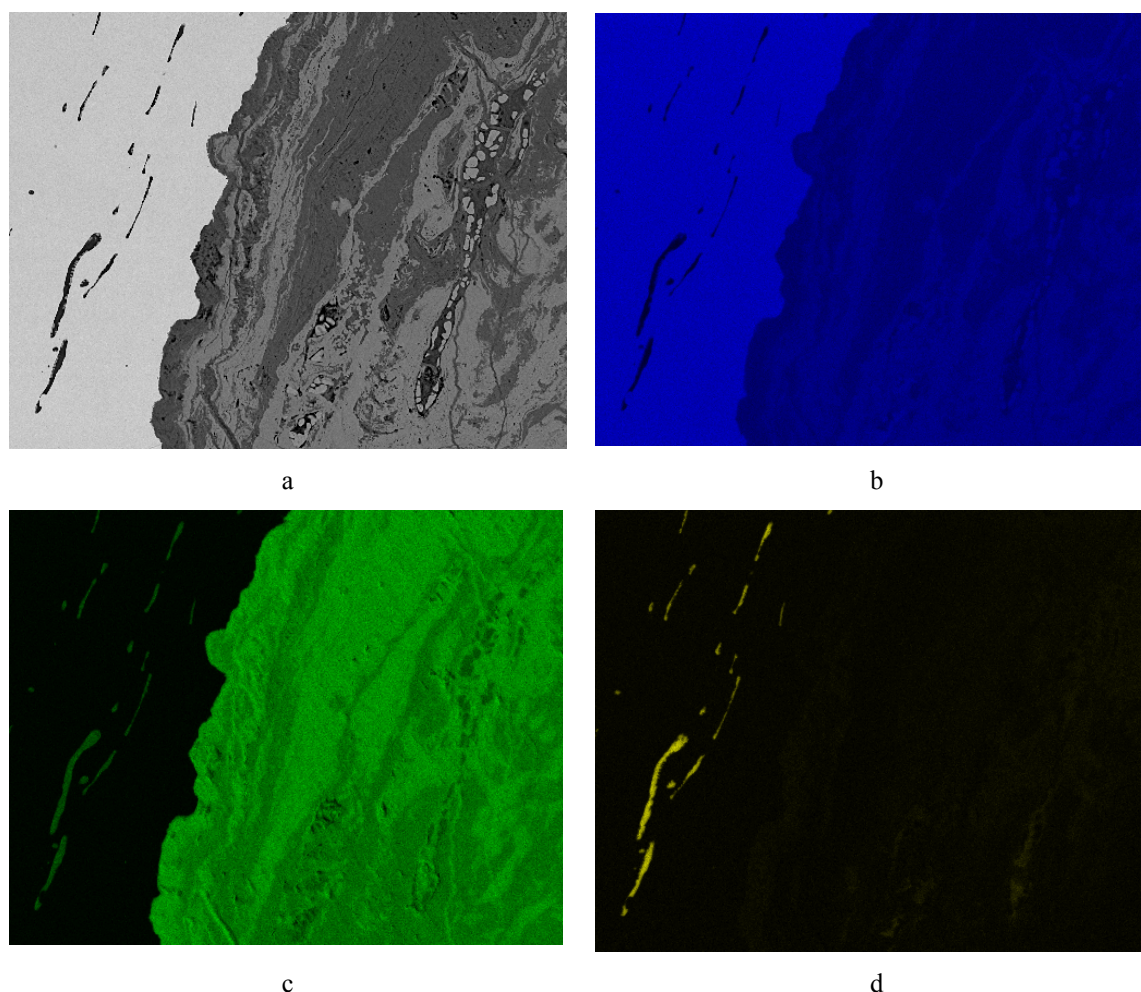
Fig. 6.: The internal structure of a sample can be examined by the FIB-made cross-sectional surface

A leválasztandó anyag atomjait prekursor gáz tartalmazza, amelyet fűvókák juttatnak a minta felületére. Ahol az ionnyaláb éri a felületet, ott a prekursor gáz szétbomlik, és a leválasztandó atomot a felületen hagyja. Az ilyen leválasztás segíti a keresztmetszeti- és a TEM minták készítését, de alkalmas területek megjelölésére, vagy nanoméretű elektromos hozzávezetések készítésére is.

Röntgenanalízis

A minta felületéről távozó röntgenfotonok a mintában található elemekre jellemző energiával rendelkeznek, számuk pedig első közelítésben arányos az elemek koncentrációjával. Az energia és a beütésszám mérésével tehát kvalitatív és kvantitatív elemanalízis végezhető.

A hagyományos röntgendetektor lítiummal adalékolt szilícium félvezető detektor. Ennek hátránya a viszonylagos lassúság, és az, hogy állandóan folyékony nitrogén hőmérsékleten (-196 °C) kell tartani. A Quanta 3D mikroszkóp újfajta, ún. szilícium drift detektorral rendelkezik. A szilícium drift detektor anyaga nagy tisztaságú szilícium, ezért működés közben elegendő Peltier-elemes hűtést alkalmazni, amely kb. -60 °C-on tartja a detektort. A detektor holtideje kicsi, ezért gyors jelfeldolgozást tesz lehetővé, ami azt jelenti, hogy másodpercenként 10^5 foton fogadására alkalmas. Az energia felbontás is jobb a hagyományos félvezető detektorokhoz képest. A Mn K_{α} 5,9 keV energiájú vonalára az energiafelbontás $\Delta E = 130$ eV.



7. ábra: A 4. századból származó vasminta (avar kengyel) szekunder elektron képe (a) és néhány elem elem térképe: vas (b), oxigén (c) és szilícium (d)

Fig. 7.: Secondary electron image of a 4th century iron sample (Avar period stirrup) (a) and element map of iron (b), oxygen (c) and silicon (d)

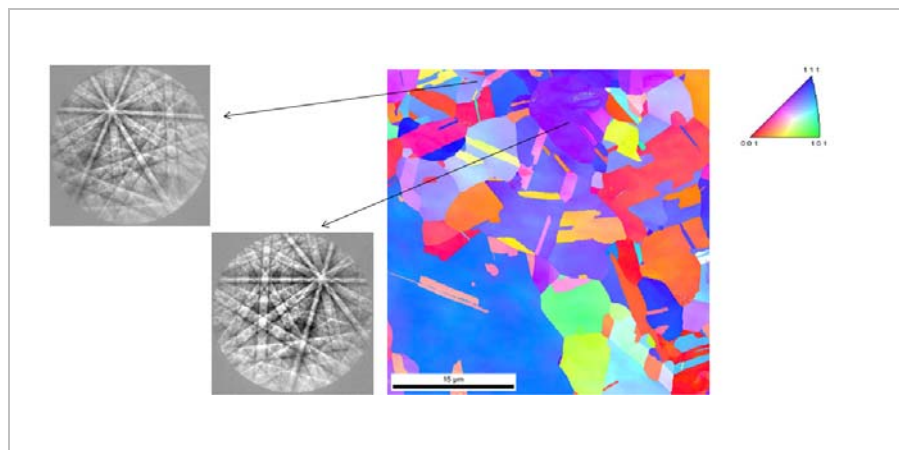
Elemanalízis végezhető a minta egy pontján, vagy egy kijelölt területén. Ilyenkor az elsődleges eredmény röntgenspektrum formájában jelenik meg. A spektrumból meghatározható a minta elemösszetétele, és az is, hogy az elemek milyen koncentrációban vannak jelen. A koncentráció-mérés pontossága standard minta nélkül (1–5 %). A mérendő mintával azonos elemösszetételű és ismert koncentrációjú standard minta birtokában a koncentráció-mérés relatív pontossága akár 0,1 % is lehet.

A röntgenanalízis felhasználható elem térképek készítésére is. Ilyenkor a nyaláb a minta felületét pásztázza, és az elemspektrum vonalai közül kiválaszthatók azok, amelyeknek felületi eloszlását különböző színekkel megjeleníteni kívánjuk. Az elem térképek rátehetők egymásra is és az elektronokkal készített képekre is, így az egyes felületi objektumok elemösszetétele láthatóvá tehető és könnyen azonosítható. A **7. ábrán** egy 4. századi avar kengyeltől nyert minta egy kis részletének szekunder elektron képe (a), valamint

ugyanezen a felületen a vas (b), az oxigén (c) és a szilícium (d) elem térképe látható. A képen jól látszik a tiszta vas és a vasoxidok jól elhatárolódó területe, és az is, hogy a zárványok szilíciumot is tartalmaznak.

Visszaszórt elektron diffrakció

A visszaszórt elektronok diffrakcióra is alkalmasak (electron backscattered diffraction = EBSD). A transzmissziós elektronmikroszkópban vékony mintákon kapható diffrakciós kép egykristály esetén diffrakciós pontokból álló ábrát ad, amely ábrából a kristályszerkezetre és a kristály orientációra vonatkozó információ nyerhető. Hasonló információt kaphatunk a pásztázó elektronmikroszkópban a visszaszórt elektronok által létrehozott diffrakciós képből. A pásztázó elektronmikroszkópban azonban általában vastag mintákat használunk, ezért a diffrakciós ábra nem pontokból áll, hanem diffrakciós sávokat (ún. Kikuchi-sávokat) látunk.

**8. ábra:**

Hőkezelt Cu minta EBSD orientációs térképe és két orientációhoz tartozó Kikuchi-ábrák

Fig. 8.:

EBSD orientation map of an annealed copper sample and two Kikuchi-images related to different orientations

A diffrakciós kép a mikroszkópon belül elhelyezkedő fluoreszcens ernyőn jelenik meg, ezt a mögötte elhelyezkedő CCD kamera digitális képpé alakítja és jeleníti meg a képernyőn. A Kikuchi-sávok irányából és egymáshoz viszonyított helyzetéből meghatározható a mintát alkotó kristályszerkezet és orientációja. A pásztázó elektronmikroszkóp, a mérés előtt beprogramozott lépéstávolságban, pontonként megméri a Kikuchi-ábrákat. Az ábrák alapján meghatározott orientációkat a számítógépes program felrajzolja, és így orientációs térképhez jutunk. Az orientációs térkép alkalmas a minta textúrájának vizsgálatára. A különböző orientációjú szemcsék különböző színekkel jeleníthetők meg, és így a minta kijelölt területén láthatóvá válnak a szemcsék és azok orientációja is. A **8. ábra** hőkezelt Cu minta orientációs térképét, és a szemcsékre jellemző Kikuchi-ábrákat mutat.

Az ELTE TTK-n a SEM/FIB rendszerrel kapcsolatos kutatások

A fentiekben láttuk, hogy a Quanta 3D SEM/FIB rendszer sokoldalú kísérleti munkát tesz lehetővé. Ennek megfelelően az ELTE Természettudományi Karon rendkívül széles skálán használjuk ki a mikroszkóp adta lehetőségeket. Szubmikronos és nanotartománybeli fizikai, kémiai, biológiai, anyagtudományi, geológiai és interdiszciplináris kutatások folynak a mikroszkópon. Valamennyi témát itt most nem tudjuk felsorolni, de jellemzőképpen néhányat közülük megemlíthetünk.

Nanométerű kolloidális gömböcskék előállítása és tulajdonságainak vizsgálata gyógyszer-hordozó tulajdonságainak megismerése céljából (Kiss 2011). A részecskék méreteloszlásának, alakjának és felületi tulajdonságainak vizsgálatában a SEM/FIB rendszer egyedülálló.

FIB-bel kialakított (100-1000) nm átmérőjű fém egykristály hengerek (mikropillárok) előállítása és vizsgálata (Hegyí et al. 2012). Az ilyen mikropillárok különleges mechanikai tulajdonságokkal

rendelkeznek, amelyek a kialakítást követően nanoindenterrel vizsgálhatók.

Ferromágneses nanorészecskék előállítása és tulajdonságainak, méreteloszlásának vizsgálata (Sinkó et al. 2011). Az ilyen ferromágneses nanorészecskék a humán gyógyászatban használhatók irányított gyógyszertranszport céljaira.

Több kutatócsoport is vizsgálja a rendkívül nagy deformációval előállított nanoszemcsés fémek tulajdonságait (Gubicza et al. 2012; Hegedűs et al. 2012; Dirras et al. 2011). Az ilyen anyagok kiemelkedően jó mechanikai-, elektromos- és korrózióálló tulajdonságokat mutatnak.

Egy másik csoport meteoritok szerkezetét vizsgálja. A kétsugaras mikroszkóppal vizsgálhatók pl. azok a nagy nyomáson kialakuló fázisok, amelyeket a légkörbe való belépés során kialakuló lökéshullám hozott létre (Bérczi et al. 2011).

Biológusok, geológusok és fizikusok együtt vizsgálják a budai meleg forrásokban élő baktériumtörzseknek a barlangképződésben és a rádium felhalmozásában játszott szerepét (Erőss et al. 2011). A mikroszkóp környezeti üzemmódja vizes környezetben is vizsgálhatóvá teszi a baktériumtelepeket.

Geológusok vizsgálják az ősi vulkáni kőzetekben bezáródott olvadékszárványok tulajdonságait. A szárványok feltárásában a fókuszált ionnyaláb egyedülálló lehetőséget kínál (Berkési et al. 2012).

A régészet is kezdi meghódítani a nanotartományt. Az egyik régészeti témában a Kárpát-medencében feltárt avarkori kengyelek vasanyagának származása és a megmunkálás technológiája a kutatás tárgya. Az eredményeket leíró közlemény elkészítése folyamatban van. A másik régészeti téma azt vizsgálja, hogy a középkori magyar aranyművesek milyen eljárással készítették a ruhák, ékszerek és kegytárgyak díszítésére használt nemesfém lemezeket és huzalokat (Gherdán et al. 2013).

Számos más téma is használja a Quanta 3D mikroszkóp különleges tulajdonságait, hiszen nagy előny az, hogy ezek a mérési lehetőségek egy rendszerben találhatók meg, és az is, hogy egy ilyen világszínvonalú eszköz használata céljából nem kell távoli országok kutatóintézteit felkeresni.

A rendszer külső felhasználók számára is nyitott. A kétsugaras mikroszkópon máris több egyetemen kívüli hazai és külföldi csoport dolgozik.

Aki a rendszer tulajdonságaival és a rajta folyó kutatási témákkal kapcsolatban szeretne bővebb információhoz jutni, annak rendelkezésére áll a laboratórium honlapja, amelynek internetes címe: <http://sem.elte.hu>.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki Dankházi Zoltánnak és Varga Gábornak, akik részt vettek a mikroszkópi felvételek elkészítésében, és a végső szöveg finomításában is segítettek.

Irodalomjegyzék

BERKESI, M., GUZMICS, T., SZABÓ, Cs., DUBESSY, J., BODNAR, R.J., HIDAS, K. & RATTER, K. (2012): The role of CO₂-rich fluids in trace element transport and metasomatism in the lithospheric mantle beneath the Central Pannonian Basin, Hungary, based on fluid inclusions in mantle xenoliths. *Earth and Planetary Science Letters* **331**-**332** 8–20.

BÉRCZI, SZ., NAGY, SZ., GYOLLAI, I., JÓZSA, S., HAVANCSÁK, K., VARGA, G., PÁL-MOLNÁR, E. & GUCSIK, A. (2011): [Shocked Minerals in NWA 5011 L6 Chondritic Meteorite](http://szft.elte.hu/oktat/hkaroly/letoltesek/NIPR_High_Press_Miner.pdf). 34th Symposium on Antarctic Meteorites, Tokyo, 2011, november 17–18. http://szft.elte.hu/oktat/hkaroly/letoltesek/NIPR_High_Press_Miner.pdf

DIRRAS, G., OUAREM, A., COUQUE, H., GUBICZA, J., SZOMMER, P. & BRINZA, O. (2011): Microstructure and nanohardness distribution in a polycrystalline Zn deformed by high strain rate impact. *Materials Characterization* **62/5** 480–487.

ERŐSS, A., MINDSZENTY, A. & HAVANCSÁK, K. (2011): [Cave development in nano-scale](http://szft.elte.hu/oktat/hkaroly/letoltesek/EURONANOFORUM_POSTER_EA.pdf). Euronano Forum Budapest. http://szft.elte.hu/oktat/hkaroly/letoltesek/EURONANOFORUM_POSTER_EA.pdf

GHERDÁN, K., WEISZBURG, T., RATTER, K.; ZAJZON, N., BENDŐ, Zs., VARGA, G. & SZAKMÁNY, Gy. (2013): A soproni Kecsketemplomban feltárt sírlelet körgallérjáról származó fémfonalak mikro- és nanoléptékű morfológiai és kémiai vizsgálata. *Műtárgyvédelem* **36** 57–72.

GUBICZA, J., JENEI, P., YOON, E. Y. & KIM, H. S. (2012): X-ray diffraction study on the microstructure of a Mg–Zn–Y alloy consolidated by high-pressure torsion. *Journal of Alloys and Compounds* **539**(Oct.) 32–35.

HEGEDŰS, Z., GUBICZA, J., KAWASAKI, M., CHINH, N.Q. & FOGARASSY, Zs. (2012): Microstructure of low stacking fault energy silver processed by different routes of severe plastic deformation. *Journal of Alloys and Compounds* **536** (Suppl. 1, September 25.) 190–193.

HEGYI, Á., RATTER, K., ISPANOVITS, P. & GROMA, I. (2012): Mikroméretű minták deformációinak vizsgálata. *Fizikai Szemle* **LXII** 77–83.

KISS, É. (2011): Gyógyszerhordozó nanorészecskék. *Fizikai Szemle* **LXI** 413–417.

SINKÓ, K., SZABÓ, G. & ZRÍNYI, M. (2011): Liquid-Phase Synthesis of Cobalt Oxide Nanoparticles. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* **11/5** 1–9.