

Visszapillantás a transzmissziós elektronmikroszkópia (TEM) módszerek ásványtani és földtani alkalmazásának hazai történetére (1970–2020)

DÓDONY István

Pannon Egyetem, NANOLAB, Veszprém, Egyetem u. 10.

Recollections on the applications of transmission electron microscopy (TEM) methods in Hungarian mineralogy and geology (1970–2020)

Abstract

TEM methods have played an important role in mineralogical research and earth sciences over more than seven decades, and the impact of TEM continues to increase exponentially. There is no single technique which has contributed more to our knowledge on the texture, real structure, and the chemistry of matter at the highest spatial, and temporal resolution than TEM. Hungarian mineralogists started to use TEM in the 1970s and at that time introduced the topic into the curriculum at Eötvös University, Budapest. This short paper does not intend to look at the nature of TEM itself but is rather an inventory of the results obtained using TEM methods in Hungarian mineralogical and geological research in the period between 1970 and 2020.

Keywords: mineralogy, transmission electron microscopy, history of science, 1970–2020, Hungary

Összefoglalás

Az anyagvizsgálati eszközök és módszerek alkalmazása terén a TEM uralkodóvá vált a természettudományok orvosi biológiától meteoritikáig terjedő skáláján. Nincs egyetlen olyan módszer sem, amely nagyobb mértékben növelte volna ismereteink minőségét és mennyiségét az anyagok szerkezetéről, összetételéről, egymással való kapcsolatairól, elektromos és mágneses tulajdonságairól, mindezek változásáról a legnagyobb tér- és időbeli fölbontás mellett, mint a TEM. Az itt dokumentált történet az ásványtani TEM-vizsgálatok hazai eseményeinek összefoglalása.

Kulcsszavak: ásványtan, transzmissziós elektronmikroszkópia, tudománytörténet, 1970–2020, Magyarország

Bevezetés

Jelen jubileumi kötet témáinak tervezésekor az általánosabb „elektronoptikai módszerek” munkacím szerepelt, de a téma illetékesség okán a TEM-es módszerek ásványtani és földtani alkalmazása fejlődésének bemutatására szűkülte. Ez a bemutatás nem sztorizó, inkább leltár jellegű, ami nem ígér könnyed olvashatóságot. Publikációink dokumentálják a TEM hazai alkalmazásának történetét az ásványtanban és a földtanban. A TEM-mel rokon pásztázó elektronmikroszkópia (SEM) és a hullámhosszdiszperzív elemanalízis (WDS) hazai fejlődését tárgyalni a korábbi MTA Geokémiai Kutatólaboratórium (GKL) kutatói hivatottak. Jelen írásban röviden, de hivatkozhatóan próbálom dokumentálni a címben jelzett munkákat.

Kezdetek

A TEM-nek születésétől (KNOLL & RUSKA 1932, RUSKA et al. 1939) kezdve tárgya az élő és a szerves anyag, köztük az ásványi is. A „mikroszondák” elterjedése és hazai megjelenése könnyítette a TEM alkalmazásának terjedését az ásványtani, földtani kutatásokban. Az egyetemek szilárdtest-fizikai, biológiai és orvosi biológiai tanszékeiben, az MTA kutatóintézeteiben (pl. MTA Kísérleti Orvostudományi Kutatóintézet, MTA Műszaki Fizikai Kutatóintézet), valamint az ágazati kutatóintézetekben (1975-ig Fémipari Kutató Intézet, azután ALUTERV-FKI) a transzmissziós elektronmikroszkópok az 1960-as évekre már rutin vizsgálati eszközzé váltak. Csak a VIII. kerületben (az Üllői út mindkét oldalát ide véve) 12 TEM-berendezés működött a 70-es

évek közepén. Ebből látható, hogy más tudományágak (anyagtudomány, biológia stb.) milyen intenzíven és eredményesen használták a módszert saját területükön. Ilyen tudományos, infrastrukturális közegben kezdődhetek meg a TEM-vizsgálatok az ásványtanban, földtanban.

A földtani kutatásokban 1970-től — FÜLÖP József döntése eredményeként — az ELTE TTK-n indulhatott a transzmissziós elektronmikroszkópia alkalmazása a kutatásban. A beszerzett JEOL-100U TEM sokáig ládában állt a Múzeum körüli A épület előtt, az 1971-es installációját követően 1973-ban kapta meg működési engedélyét. A labor szervezetenként az ELTE Általános Földtani Tanszékén működő MTA-kutatócsoporthoz tartozott, de az ELTE Ásványtani Tanszék területén volt. Az új TEM-labor vezetője, IBRÁNYINÉ ÁRKOSI Klára és technikus, RUDNYÁNSZKY Lívia az ELTE TTK-n működő, ERDEY-GRÚZ Tibor vezette MTA-kutatócsoportból érkezett. Hozzájuk csatlakozott az 1968-ban diplomázott DÁVID Klára geológus, később MORLIN Jánosné technikus. IBRÁNYINÉ ÁRKOSI Klára kandidátusi értekezésében „Hazai agyagásványok elektronmikroszkópos és elektrondiffrakciós vizsgálata (1968)” címmel foglalta össze hazai és orléans-i tanulmányútján elért eredményeit. Az 1970-es évek elején IBRÁNYINÉ ÁRKOSI Klára megcélozta az elektrondiffrakció alkalmazását, de említhető eredmények nem születtek. Az agyagásványvizsgálatok 70-es évekbeni helyzetéről VOGL (1981) adott részletekbe menő áttekintést egy 1981-ben megjelent összegző írásában, éppen a Földtani Közöny hasábjain. IBRÁNYINÉ ÁRKOSI Klára 1972-től bekapcsolódott az egyetemi oktatásba, 1973 őszi szemeszterében NAGYMAROSY Andrásal közösen vettük föl az „Elektronmikroszkópos vizsgálatok az ásványtani kutatásban” című speciális kollégiumot.

1973-tól az Ásványtani Tanszéken fokozatosan növekedtek az igények a TEM használatára. 1974-ben már a KISS János tanszékvezető mellett diplomamunkáján dolgozó HARTAI Éva, az akkor fiatal tudományos segédmunkatárs (jelen szerző), valamint emlékem szerint még a Kőzetan-Geokémiai Tanszéken 1973-ban diplomázó PUSKÁS Zuárd heti rendszerességgel adtak munkát a labornak és tevékenykedtek ott. KISS János HARTAI Évát kérte/szánta IBRÁNYINÉ ÁRKOSI Klára utódjának, amit Éva személyes okokból nem vállalt. Ekkor, ellenkezésem dacára, én kerültem „célkeresztbe”. A — vélhetően — mérészolgáltatói feladatkör nem tűnt számomra kívánatos perspektívának. A parádsasvári paligorszkiton végzett elektrondiffrakciós munka (DÓDONY 1976, DÓDONY & KISS 1976) gyöngítette pozícióm. Győzött a tanszékvezető, „duzogva” vállaltam a TEM művelését. Mára már szép emlékké nemesült ez a turbulens periódus. 1978-ra az ELTE Ásványtani Tanszékére került a TEM-labor. Állandó személyzetként RUDNYÁNSZKY Lívia, MORLIN Jánosné és magam voltunk, de a jelenlévő TDK-zó, diplomamunkán, disszertáción dolgozó hallgatók egyenrangú társak voltak a közösen megfogalmazott célok elérésében. KISS János tanszékvezetése alatt a TEM-labort érintő törekvések (például szakkönyvbeszerzés, eszközfejlesztés stb.) — ha csatá-

rozások eredményeként is — mindig támogatást kaptak, a KISS Jánosét követő időszakról ezt nem mondhatom. Az elmúlt évtizedek tapasztalata alapján a tanszéki kollégák közül a LOVAS Györggyel való együttműködést hangsúlyozom.

A labor működtetése során három célt fogalmaztunk meg:

1. Megismerni a szakterület aktuális eredményeit, képessé válni azokat reprodukálni és alkalmazni még földtáratlan területeken.
2. Az ásványtan oktatásába bevonni a TEM nyújtotta kristálytani, kristálykémiai ismereteket.
3. Az ásványtanon kívüli területeken is alkalmazni a megszerzett ismereteket és gyakorlatot.

Sikerek

1976 tájékán a vezető, anyagtudománnyal kapcsolatos folyóiratok és tudományos könyvek „sztártémája” a nagy felbontású transzmissziós elektronmikroszkópia (HRTEM) és annak technikája volt. Ennek megfelelően sorban adták közre a téma új eredményeit (IJIMA 1975, WENK 1976, COWLEY & IJIMA 1976). A vezető laboratóriumokban megvalósult a kristályszerkezetek vizuális megfigyelhetősége atomi felbontással, valamint a kísérleti megfigyelések kristályszerkezeti értelmezésének számításokkal történő hitelesítése (SKARNULIS et al. 1976). Mindez akkor még idegennek tűnt köreinkben.

Hogy tudatlanságunkból kilépünk, a transzmissziós elektronmikroszkópia és a HRTEM témájában speciális előadásokat szerveztünk tanszéki érdeklődőknek, ezeket az ALUTERV-FKI antwerpeni tanulmányútjáról visszatért CSORDÁS Anna (ma PINTÉRNÉ CSORDÁS Anna) tartotta, időnként munkahelyi főnöke, GADÓ Pál részvételével. 1977-ben az MTA Műszerügyi Szolgálat akciójában került egy JEOL-100CX TEM-berendezés az akkori ORFI kórház NEUMARK Tamás vezette Szövetani Osztályára. Ennek a mikroszkópnak a felbontóképessége a gyakorlatban kicsit jobb volt, mint 4 Å. A Műszerügyi Szolgálat (WEISZBURG János) támogatásával heti rendszerességgel hozzáférést kaptam a műszerhez, „cserében” biopsziákat, porc- és csontmintákat is vizsgáltam. Ez a kapcsolat a rendszerváltásig működött, itt szerezhettem meg a mikroszkópia rutinját, köszönet érte. A HRTEM minőségében — kimerítve a JEOL-100CX TEM-berendezés kapacitását — közelítettük a kor 3–4 Å körüli felbontási érték korlátját. Eredményeink visszaigazolását és kontrollját keresve hazai és nemzetközi konferenciákon szerepeltünk (DÓDONY 1979a, b, c; DÓDONY & WEISZBURG 1979), hazai szakmai visszajelzést alig kaptunk — úttörők lévén a szakterületen —, külföldi kollégák azonban nagyon pozitívan vélekedtek eredményeinkről.

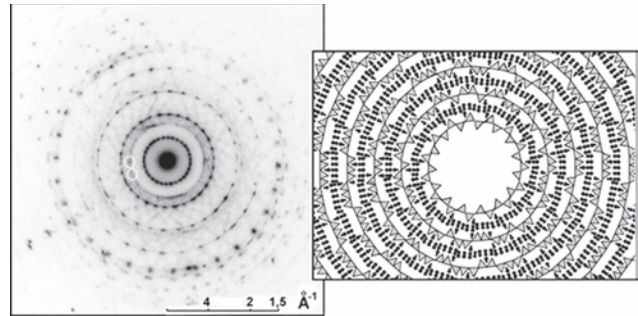
Az anyag-elektron kölcsönhatás részleteit 1957-től kezdődően COWLEY & MOODIE (1957) két évtized alatt tárta föl és írta le. Ez nyitott kaput arra, hogy a HRTEM-képeket kvantitatívan értékelhessük. SKARNULIS et al. (1976) számítógépes programcsomagot adtak mindarra, ami össze-

vethetővé teszi a kísérleti HRTEM-képeket egy kristályszerkezeti modellel és a kísérleti elektronoptikai adatokra szimulált képpel. A HRTEM-képek értelmezésének hitelesítésére a mai napig a HRTEM-képek egyetlen szimulálása szolgál. A kísérleti paraméterek ismeretében számítható egy HRTEM-kép az értelmezett kristályszerkezeti modellel, és ha a kísérleti és a szimulált kép az elfogadhatósági határig egyező, akkor az értelmezés (a szerkezet) helytálló.

A számítógépes háttér fejlesztésével szinkronban értük el SKARNULIS programcsomagját, és LOVAS Györggyel együttműködve kialakult a programcsomag használatának rutinja. 1980-ra nemzetközi szinten elismert szakértők (J. VAN LANDUYT, Antwerpen és J. S. ANDERSON, Oxford), valamint a hazai szakma illetékes képviselői (Magyar Diffrakciós Társaság) előtt sikerrel szerepeltünk HRTEM-képeink értelmezésének szimulációk útján végzett hitelesítésével (BOGNÁR et al. 1980, DÓDONY & LOVAS 1980). A 8th European Congress on Electron Microscopy rendezvényei 1984-ben hazánkban zajlottak, ahol — nem csak a magunk mércéjével — sikerrel szerepeltünk (DÓDONY & MALEEV 1984, DÓDONY & SOÓS 1984, DÓDONY et al. 1984). A nyolcvanas években szaporodtak és minőségileg javultak az elektrondiffrakciós és nagy felbontású technikákat használó megfigyeléseink (DÓDONY 1980, 1982, 1985a, b, 1986, 1987; DÓDONY & LOVAS, 1982a, b, 1983; MINDSZENTY et al. 1986), miközben a törekvéseink súlypontja az oktatás felé tolódott. 1987-ben jelent meg STADELMANN (1987) EMS-programcsomagja, amely elektrondiffrakciós felvételek és HRTEM-képek szimulációját szolgálta. Ez a programcsomag, a folyamatos fejlesztésének köszönhetően, a TEM-es mérések szimulációjának és értékelésének maig egyik legjobb eszköze.

A perovszkit alapszerkezetű kerámiák szupravezetését felismerő publikációt (BEDNORZ & MÜLLER 1986) követően, aki adott magára, ilyen anyagok vizsgálatával foglalkozott. Engem KIRSCHNER István először 1989-ben hívott egy közös, finnországi (Oului Egyetem) Eureka-projektben végzendő munkára, a szupravezető kerámia-rétegek szintetizálására és transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatára (KIRSCHNER et al. 1990, 1991, 1993a, b; HAGBERG et al. 1990; KÁRMÁN et al. 1990; UUSIMAKI et al. 1990; DÓDONY et al. 1991; LEPPAVUORI et al. 1992). Ez a cikkdömping számomra újdonság volt, amit a mai napig sem kedvelek.

Az 1990-es években eredményeink értéke nőtt, több tekintélyes folyóirat közölte az ez idő tájt született munkáinkat, ezeket a mai napig hivatkozzák és idézik. A minta-előkészítést forradalmian megújította a MFKI („MÜFI”)-ből beszerzett („BARNA Árpád-féle”) ionbombázásos vékonyító, melynek segítségével vékony ($>100 \text{ \AA}$), elektrontranszparens keresztmetszeti mintákat készíthettünk törékeny, hasadó anyagokból (pl. csillám, azbeszt) is. 1993-ban a közép-európai országok mikroszkópos társaságainak konferenciája Pármában volt, ahol a szerpentinitek mikroszerkezetéről tartottam előadást (DÓDONY 1993) (a lizardit szerkezetét meghatározó Marcello MELLINivel is diskurálhattam). Az itt megmutatott anyag több, szerpentinásvánnyal foglalkozó



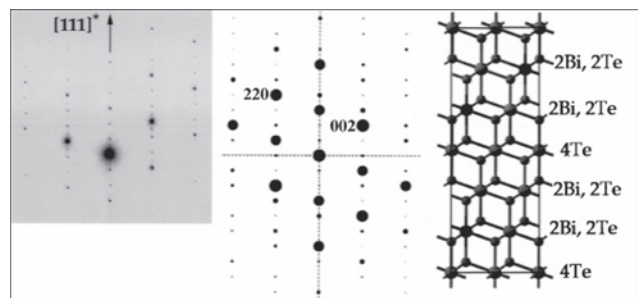
1. ábra. A 30-szektoros polygonális szerpentin határolt területű elektrondiffrakciós felvétele és kristályszerkezetének modellje, a szürke háromszögek a szilikáttetraédereket, a fekete pöttyök a Mg-központú oktaédereket mutatják (DÓDONY 1993)

Figure 1. Selected area electron diffraction pattern (on the left) and the corresponding structural model (on the right) of a 30-sectored polygonal serpentine (DÓDONY 1993). The gray triangles and black dots indicate the silicate tetrahedra and Mg-centered octahedral sheets, respectively

munkánk startköve volt. Az 1. ábra a polygonális szerpentin tengely irányú elektrondiffrakciós felvételének képét és kristályszerkezeti modelljét mutatja.

Egy lemezes szerkezetű, így kitűnően hasadó új ásványfaj, a buckhornit szerkezetét az ionbombázásos vékonyítónak köszönhetően sikerült elektrondiffrakciós felvételek alapján jellemeznünk (JOHAN et al. 1994). A most fontosnak mondottak mellett több rutinmunka is eredménnyel zárult (SZAKÁLL et al. 1994a, b, 1995, 1997; LOVAS & DÓDONY 1997; LÁBÁR et al. 1998; PAPP et al. 1999).

Az optikailag anizotrop grosszulár-andradit elegysor recski példányain azonosítottuk az anizotrópia kristályszerkezeti eredetét (DÓDONY et al. 1994a, b). A Szervetlen Kémiai Tanszék munkatársával és doktoranduszával vizsgáltuk az optoelektronikában jelentős bizmut-tellurát szerkezeit (SZALLER et al. 1996; LOVAS et al. 1998; lásd. 2. ábra). A pirít-markazit szerkezeti kapcsolatát tisztázó munka (DÓDONY et al. 1996) a mai napig élő kutatási témákban idézett eredménynek bizonyult. A lizardit-politípek listázása és diffrakciós sajátosságaik jellemzése fontossá vált a 2000-es évek munkáiban (DÓDONY 1997a).

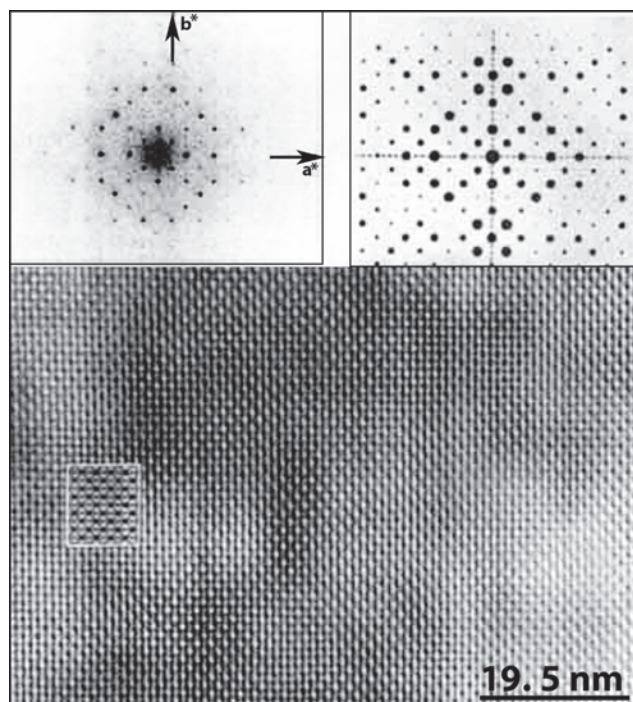


2. ábra. A fluoritrokon szerkezetű $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{O}_{11}$ [1-10] vetületű kísérleti (balra) és számított elektrondiffrakciós felvétele (középen), és a szerkezeti modell egy elemi cellája (jobbra)

Figure 2. Experimental (left) and simulated (middle) electron diffraction patterns of the fluorite-stuffed $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{O}_{11}$ in the [1-10] projection. The structural model is on the right

A szerpentinitek gyakori, de kevésbé ismert komponense, a korábban már bemutatott (DÓDONY et al. 1993) poligonális szerpentin szerkezeti modelljét a szélesebb nemzetközi szakmai közvélemény 1997-ben ismerhette meg (DÓDONY 1997b).

1999-ig a kollégákkal intenzíven dolgoztunk a fülle-
rénkomplexek szerkezeti és kristálykémiai aspektusainak



3. ábra. Egy $C_{60}S_{16}$ kristály [001] vetületű kísérleti (balra fent) és szimulált (jobbra fent) elektrondiffrakciós felvétele. A [001] vetületű kísérleti és a szimulált HRTEM-kép (fehéren keretezve) illeszkedése kielégítő

Figure 3. Experimental (top left) and simulated (top right) electron diffraction patterns of a $C_{60}S_{16}$ crystal in [001] projection. The match of the experimental and the inserted calculated HRTEM image (bottom) is satisfactory

tisztázásán (LOVAS et al. 1999a, b; RAUSCH et al. 1999a, b). Kiderült, hogy a kén hogyan alkot molekularácsú komplexet a Buckminster C_{60} fullerénnel (3. ábra)

Az 1990-es évek elején a tulajdoni és szervezeti viszonyok körüli turbulenciákban véget ért a JEOL-100CX TEM-hez való hozzáférés az ORFI-ban. Az ORFI Szövet-tani Osztályán az addig diagnosztikai és terápiás célú csont-és porcvizsgálatok kutatási célúvá váltak, és heti rendszerességgel az ELTE Ásványtani Tanszékén az öreg (már Rosinante becenevű) 100U berendezésen folytatódtak. De 2000-re gyakorlatilag véget ért a JEOL-100U TEM-labor működése is, mára múzeumi egységgé vált az ELTE TTK-n. Az ásványtani-földtani kutatások az MTA EK Vékonyréteg Osztályán működtetett Philips CM20 és JEOL 3010 TEM-berendezéseken és külföldön folytatódhattak. Számomra termékeny négy és fél évet töltöttem a TEM — John COWLEY-val fémjelzett — „Mekájában”, az Arizonai Állami Egyetemen (ASU, Phoenix, Tempe), az ott készült munkáink mai mércével mérve is helytállóak (DÓDONY &

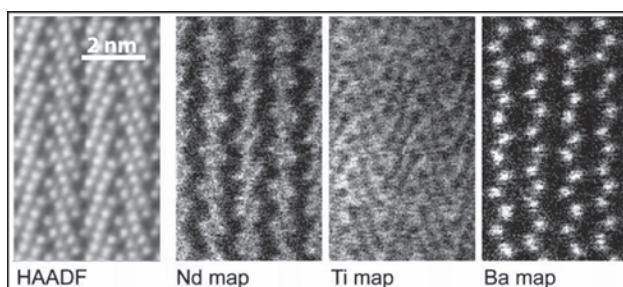
BUSECK 2001, 2004a, b; DÓDONY et al. 2002, 2006; KONISHI et al. 2002, 2003; ZEGA et al. 2004, 2006). Ezek mellett sikerült a hazai munkákkal is kapcsolatban maradni (KOVÁCS KIS & DÓDONY 1999; LÁBÁR et al. 2000; KOVÁCS KIS et al. 2006).

2000-től számítva az ELTE TTK Ásványtani Tanszék központi szerepe csökkent a TEM ásványtani, földtani alkalmazásában. Ennek a változásnak van örömteli oldala is, hiszen a tanszéken képzett kollégák más intézetekben elért eredményei visszaigazolják az oktatás hatékonyságát. De ha például 1990 táján SOÓS Miklós, PAPP Gábor és PÓSFAL Mihály, akik az idő tájt dolgoztak doktori munkáikon a tanszék TEM-laborjában, az ELTE-n maradhattak volna, akkor az elmúlt három évtizedben nem lett volna TEM-mentes az ELTE-n a kutatás.

A mikroszkópia gyakorlatát az Ásványtani Tanszéken megismerő volt hallgatók kiváló képviselői között KOVÁCSNÉ KIS Viktóriát (ELKH EK MFA), NÉMETH Pétert (ELKH TTK AKI) és CORA Ildikót (ELKH EK MFA) említve láthatjuk, hogy munkáik jelentős hányada a mai napig ásványtani, földtani (MTMT alapján a nevek fenti sorrendjében: 58/90, 31/63 illetve 23/57). 1991-ig hallgatónk és munkatársunk volt PÓSFAL Mihály, az ő munkáit itt nem illeszttem a hazai TEM ásványtani-földtani alkalmazásának áttekintésébe, az ő szakmai történetének és eredményeinek bemutatása meghaladja e rövid áttekintés kereteit (lásd PÓSFAL 2016).

Századunkban a TEM fejlődését az elektronkristallográfia (ZOU 2005, DÓDONY & CORA 2014) és a pásztázó transzmissziós elektronmikroszkópia (STEM) térhódítása jellemzi. Ez számos új hardver (érzékeny és lineárisan mérő detektorok, kamerák; krio-rendszerek stb.) és szoftver (ptychográfia, „compressed sensing”, tomográfia, holográfia, elektronsugaras direkt módszerek stb.) kifejlesztésével és bevezetésével járt (BÉCHÉ 2016, HAWKES & SPENCE 2019, PENNYCOOK et al. 2019).

A STEM mára lehetőséget biztosít egyedi atomok lokalizálására és azonosítására, sőt azok együttesének 3D leképezésére is. Az elemterképezésre jó példát ad SCHAFFER et al. (2011) munkája, amelyben a $Ba_{6-3x}Nd_{8+2x}Ti_{18}O_{54}$ alkotóinak atomi fölbontású rendszámárnyos kontrasztú (a



4. ábra. Nagy fölbontású – STEM HAADF – kép $Ba_{6-3x}Nd_{8+2x}Ti_{18}O_{54}$ kristályról és az egyes alkotók elemterképei EELS-spektrumok alapján (SCHAFFER et al. 2011 után)

Figure 4. High resolution HAADF image of $Ba_{6-3x}Nd_{8+2x}Ti_{18}O_{54}$ crystal and elemental maps for Nd, Ti and Ba derived from STEM EELS. (after SCHAFFER et al. 2011)

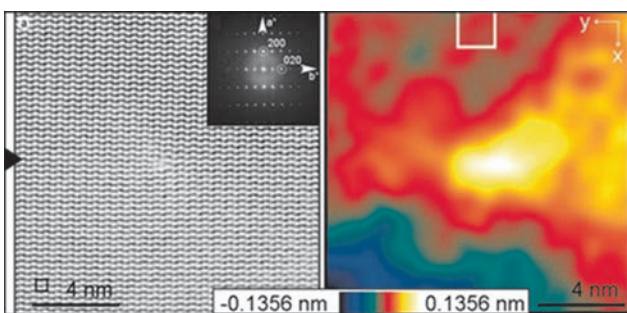
Rutherford-szórás detektáló) HAADF-képét és az egyes elemek elektron-energiavesztéses spektroszkópiával alkotott térképeit mutatja (4. ábra).

A negyedik dimenzió, az idő is mikroszkopizálhatóvá vált. A kémiai és szerkezetátalakulási folyamatok leképezésének tér- és időbeli felbontása a H^+ ion megfigyelhetősége mellett (CLABBERS et al. 2019), időben az atto- és femtoszekundumos tartományban van (FLANNIGAN & LINDENBERG 2018).

A szöveti, orientációs és fáziseloszlás-térképezés a nanométeres tartományban is rutineljárásá vált (RAUCH et al. 2010). Az orientációs térképezés eszközeit és programcsomagját (NanoMegas ASTAR) az akkori Bay-Nano (Miskolc) intézetben beszereztük és eredményesen kezdtük használni (RONTÓ et al. 2013; BIRÓ et al. 2014; BARNÁK et al. 2019), de az alapítványok közös sorsa (2010-et követően az alapítványok zöme megszűnt/átalakult) véget vetett az ASTAR hazai alkalmazásának. TEM-ben a lokális feszültség és deformáció is szub-Å felbontással vizsgálható (l. például GALINDO et al. 2007; WANG et al. 2015). Mi a geometriai fáziselemzés technikáját alkalmazva rácshibát vizsgáltunk piritben (NÉMETH et al. 2013), ahol a deformációt (elmozdulásértékeket) mértük (5. ábra).

A szervesetlen anyagok hazai elektronkristallográfiái eredményei — köreinkben — jelentősnek mondhatók. Az ICSD (Inorganic Crystal Structure Database) szerkezeti adatbázisában 2016-tal bezárólag nyolc kristályszerkezet meghatározásunk szerepel. Azóta születtek még említésre méltó újabb szerkezetmeghatározásaink transzmissziós elektronmikroszkópos technikák alkalmazásával (pl. DÓDONY et al. 2012; CORA et al. 2014, 2015, 2017; DÓDONY et al. 2019), de 2016-tól megszűnt az adatbázishoz való további hozzáférésünk.

Az oktatást a végzett hallgatók eredményei minősítik. Elfogulatlan értékelést személyes érintettségem miatt nem



5. ábra. Pirit [001] vetületű HRTEM-képe (balra) és annak Fourier-transzformja. Egy éldiszlokációt idézően végződő rácshibát fekete nyílhegy mutat balról. Jobbra az ideális szerkezeti pozíciókhoz viszonyított elmozdulás értékeket mutatja az ábra alján lévő — léptékkel jelzett — színskála (NÉMETH et al. 2013 után)

Figure 5. [001] projected HRTEM image of pyrite (on the left) and its Fourier transform (inserted). The black arrowhead points to a virtual edge dislocation, which terminates in the middle of the HRTEM image. On the image of the experimental u_y displacement field (on the right) around the termination, the colour at a given place represents the value of displacement along y , referred to the ideal (undeformed) position. The colour range is from 0 to 0.2714 nm. (after NÉMETH et al. 2013, coloured in online)

adhatok, de néhány kolléga — TEM-módszerekkel elért — eredményeit kirakatba lehet tenni. Többek közt SOÓS Miklós, PAPP Gábor, PÓSFAL Mihály, KIS Viktória, NÉMETH Péter, PEKKER Péter, CORA Ildikó tevékenysége jelenleg is visszaigazolja az oktatásban kitűzött céljaink megvalósulását. Nem tudom szó nélkül hagyni, hogy a néhány évtizeddel korábbi feladatok megoldását a mai hallgatók átlagától elvárni reménytelen.

Az egyetemi oktatás legintenzívebb formája a közös kutatómunka és az eredmények közös publikálása (a teljesség igénye nélkül: DALLOS et al. 2020; DÓDONY & BALOG 1982; DÓDONY & PÓSFAL 1989; DÓDONY & TAKÁCS 1980, 1982, 1986; DÓDONY & WEISZBURG 1971, 1982, 1983; KOVÁCS-KIS & DÓDONY 1999, 2003, 2004; DÓDONY et al. 2003; KOVÁCS-KIS et al. 2004; MENYHÁRT et al. 2011; ORMÁNDI & DÓDONY 2016; PÓSFAL & DÓDONY 1990; SOÓS & DÓDONY 1989; SOÓS et al. 1991).

Az ásványtannal szoros kapcsolatban nem lévő területeken is alkalmaztuk a TEM-et, a korábban említett szupravezető anyagok mellett építőanyagok, katalizátorok, talajok, pegmatitok és metamorfitek vizsgálatában (DÓDONY 1981, PETRÓ et al. 2000, SIPOS et al. 2005, BERMANEC et al. 2012, ÁRKAI et al. 2012, NÉMETH et al. 2016, ORMÁNDI & DÓDONY 2016), számos kutatási jelentésünket itt nem sorolom.

Remények

Az elektronoptikai módszerek témájú kurzusokat lezáró, majd a gyakorlati oktatást eredménnyel végző hallgatók zöme, ha nem is dolgozik közvetlenül TEM-témákban, de a maguk területén is közvetlen hatással van a TEM-es alkalmazások elterjedésére. Például Soós Miklós cégével (Auro-Science Kft.) a Nikon, a FEI, az Oxford Instruments és számos más nagy mikroszkópgyártó hivatalos hazai képviselője, a Magyar Mikroszkópos Társaság mecénása. A jövőt tekintve nagy bizalommal lehetünk a Pannon Egyetemen működő, PÓSFAL Mihály vezette NANOLAB (<http://nanolab.uni-pannon.hu/>) tevékenységét illetően. A 2018 óta működő Talos F200X G2 (S)TEM (Thermo Scientific (FEI)) mikroszkóp és a körülötte lévő, arányosan kialakított infrastruktúra, valamint a munkatársak képessége és motiváltsága ígéretes. A földtani kutatásokat művelők körében lassan, de folytonosan nő azok száma (és szakmai súlya), akik fölismerték a TEM-STEM szerepét az analitikában és a reális kristályszerkezetek 3D-s jellemzésében.

Talán nem szerénytelenség ezt az összegzést azzal zárni, hogy közel öt évtizeddel ezelőtt sikeresen kezdtünk fölzárkózni a TEM-alkalmazások világszínvonalához, majd lépést tartottunk a módszer robbanásszerű fejlődésével. Az egyetemi képzés sikerét igazolja, hogy kollégáink egyre szorosabba fűzik az együttműködést a földtani gyökerű ásványtani vizsgálatok és a hazai anyagtudomány központjai (MTA Energiatudományi Kutatóközpont, MTA Természettudományi Kutatóközpont) között. A Pannon Egyetem NANOLAB Környezeti Ásványtan Kutatócsoporttal

együttműködő külföldi és hazai intézetek és kutatási témák spektruma reális képet ad az ásványtan és TEM kapcsolatáról (lásd a Nanolab honlapon a *Témák/Felhasználók* alatti témákat). Az intézetek/témák száma: Földtudományok 12/15, Anyagtudomány/Nanotechnológia 5/12, Kémia I, Biológia 4/5, Alkalmazott kutatás 3/3.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm KOVÁCS KIS Viktória, NÉMETH Tibor, PAPP Gábor és PÓSFALY Mihály konstruktív kritikáját és segítségét eme rövid munka szövegezésében.

Irodalom — References

- ÁRKAI, P., ABAD, I., NIETO, F., NÉMETH, T., HORVÁTH, P., KIS, V., JUDIK, K. & JIMÉNEZ-MILLÁN, J. 2012: Retrograde alterations of pylosilicates in low-grade metapelite: a case study from the Szendrő Paleozoic, NE-Hungary. — *Swiss Journal of Geosciences* **105**, 263–282., <https://doi.org/10.1007/s00015-012-0097-1>
- BARNA, P. B., BIRO, D. F., HASANEEN, M., SZÉKELY, L., MENYHÁRD, M., SÜLYOK, A., HORVÁTH, Z. E., PEKKER, P., DÓDONY, I. & RADNÓCZI, G. 2019: Cross sectional complex structure analysis is a key issue of thin film research: A case study on the preferential orientation crossover in TiN thin films. — *Thin Solid Films* **688**, 31 October 2019, 9 p., <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.137478>
- BEDNORZ, J. G. & MÜLLER, K. A. 1986: Possible High Tc Superconductivity in the Ba–La–Cu–O System. — *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter* **64**, 189–193.
- BÉCHÉ, A., GORIS, B., FREITAG, B. & VERBEECK, J. 2016: Development of a fast electromagnetic beam blower for compressed sensing in scanning transmission electron microscopy. — *Applied Physics Letters* **108**, 093103, <https://doi.org/10.1063/1.4943086>
- BERMANEC, V., HORVAT, M., GOBAC, Z. Z., ZEBEC, V., SCHOLZ, R., SKODA, R., DE BRITTO BARRETO, S. & DÓDONY, I. 2012: Pseudomorphs of low microcline after adularia fourlings from the Alto da Cabeça (Boqueirão) and Morro Redondo pegmatites, Brazil. — *The Canadian Mineralogist* **50**, 975–987., <https://doi.org/10.3749/canmin.50.4.975>
- BIRÓ, D., HASANEEN, M. P., SZÉKELY, L., MENYHÁRD, M., GURBÁN, S., PEKKER, P., DÓDONY, I. & BARNA, P. B. 2014: Texture change of TiN films due to anisotropic incorporation of oxygen. — *Vacuum* **103**, 78–86., <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2013.12.013>
- BOGNÁR, L., DÓDONY, I. & LOVAS, A. GY. 1980: Crystalline phases forming Kaolinite–CaO system at various temperatures and compositions. Real structure of gehlenite. — *X. Hungarian Diffraction Conference, 25–30 April, 1980 Balatonaliga. Collected Abstracts*.
- CLABBERS, MAX T. B., GRUENE, T., VAN GENDEREN, E. & ABRAHAMS, J. P. 2019: Reducing dynamical electron scattering reveals hydrogen atoms. — *Acta Crystallographica A* **75**, 82–93., <https://doi.org/10.1107/s2053273318013918>
- CORA, I., DÓDONY, I. & PEKKER, P. 2014: Electron crystallographic study of a kaolinite single crystal. — *Applied Clay Science* **90**, 6–10., <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.12.034>
- CORA, I., PEKKER, P., DÓDONY, I. & JANOVSKY, D. 2015: Single crystal structure determination and refinement of Ag₂ZrCu₄ and Ag containing Cu₁₀Zr₇ by precession electron diffraction and tomography techniques. — *Journal of Alloys and Compounds* **658**, 678–683., <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.10.230>
- CORA, I., MEZZADRI, F., BOSCHI, F., BOSI, M., ČAPLOVIČOVÁ, M., CALESTANI, G., DÓDONY, I., PÉCZ, B. & FORNARIC, R. 2017: The real structure of ε-Ga₂O₃ and its relation to κ-phase. — *CrystEngComm* **19**, 1509–1516., <https://doi.org/10.1039/c7ce00123a>
- COWLEY, J. M. & IJIMA, S. 1976: *The Direct Imaging of Crystal Structures*. In: WENK, H.-R. (Coord. ed.): *Electron Microscopy in Mineralogy*. — Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 123–136., https://doi.org/10.1007/978-3-642-66196-9_6
- COWLEY, J. M. & MOODIE, A. F. 1957: The Scattering of Electrons by Atoms and Crystals. I. A New Theoretical Approach. — *Acta Crystallographica* **10**, 609–619., <https://doi.org/10.1107/s0365110x57002194>
- DALLOS, ZS., KOVÁCS KIS, V., KRISTÁLY, F. & DÓDONY, I. 2020: Leaching mechanism of bioapatite in carbonate saturated water. — *CrystEngComm* **22**, 2788–2792., <https://doi.org/10.1039/C9CE01228A>
- DÓDONY, E., RADNÓCZI, GY. Z. & DÓDONY, I. 2019: Low temperature formation of copper rich silicides. — *Intermetallics* **107**, 108–115., <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2019.01.010>
- DÓDONY, I. 1976 : Crystal structures and genetical studies on the Palygorskite–Sepiolite–Saponite (Montmorillonite) group. — *7th Conference on Clay Mineralogy and Petrology, September 28 – October 3, 1976, Karlovy Vary, Coll. Abstracts*.
- DÓDONY, I. 1979a: Rétegszerkezetű szilikátásványok. — *XI. Magyar Elektronmikroszkópos és Mikroanalízis Konferencia, 1979. augusztus 29 – szeptember 1., Szeged*.
- DÓDONY I. 1979b: HRTEM study of Zinckenite PbSb₂S₄. — *Proceedings of the 11th Soviet All-Union Conference on Electron Microscopy, Tallin, October 1979, Izv. Akad. Nauk. SSSR (Ser. Fiz.) or Bull Acad.Sci. USSR (Phys Ser.) 44 (1980) Nos. 6 and 10*.
- DÓDONY I. 1979c: Real structure of Ottrelite and unusual Chrysotile in HRTEM. — *XII. All Union Conference on Electron Microscopy, Tallin, Collected Abstracts*.
- DÓDONY, I. 1980: HRTEM study of Dioptase and Cu-Wollastonite. — *International Mineralogical Association, Collected abstracts, 12th General Meeting, Orleans, France (July 4–6, 1980)*, p. 102.
- DÓDONY, I. 1982: High Resolution Transmission Electron Microscopical Study of Polytypism in Stilpnomelane. — In: CSANÁDY, A., RÖHLICH, P. & SZABÓ, D. (eds): *Abstracts booklet. 5th Multinational Philips Conference on the Application of Electron Microscopes for Research in Biology, Medicine and Technology, Visegrád, 1–2 April 1982*.

- DÓDONY I. 1985: Példák a TEM ásványtani kutatásokban való alkalmazására. — In: GATTER I. (szerk.): *Ásványtan–geokémiai szemelvények. MFT kiadvány*, Budapest, 3–18.
- DÓDONY I. 1985: Milyenek a cinkszulfid ásványok? — *Ásványgyűjtő Figyelő* **2**, 4–11.
- DÓDONY I. 1986: A wehrilit meghatározása. — *Ásványgyűjtő Figyelő* **2**, 26–37.
- DÓDONY I. 1987: A gyöngyösorszi antimonit ásványtani újdonság. — *Ásványgyűjtő Figyelő* **3**, 19–24.
- DÓDONY, I. 1993: Microstructures in serpentinites. — *Microscopia Elettronica* **14 Suppl.**, 249–252.
- DÓDONY, I. 1997a: Theoretical derivation and identification of possible two-layered lizardite polytypes. — In: MERLINO, S. (ed.): *Modular Aspects of Minerals. EMU Notes in Mineralogy 1*. Eötvös University Press, 57–80., <https://doi.org/10.1180/emu-notes.1.3>
- DÓDONY, I. 1997b: Structure of the 30-sectored polygonal serpentine. A model based on TEM and SAED studies. — *Physics and Chemistry of Minerals* **24**, 39–49., <https://doi.org/10.1007/s002690050015>
- DÓDONY, I. & BALOG, A. 1982: Mineralogical study on vaterite and other related minerals of thermal water origin. — *Annales Universitatis Scientiarum Budapestinensis de Rolando Eotvos Nominatae* **24**, 63–71.
- DÓDONY, I. & BUSECK, P. R. 2001: Polysomatism and modules of gehlenite composition and structure in the Hanc phase ($\text{Ca}_3\text{Al}_6\text{MgSiO}_{17}$). — *Physics and Chemistry of Minerals* **28**, 428–434., <https://doi.org/10.1007/s002690100164>
- DÓDONY I. & BUSECK, P. R. 2004a: Serpentine close-up and intimate: An HRTEM view. — *International Geology Review* **46**, 507–527., <https://doi.org/10.2747/0020-6814.46.6.507>
- DÓDONY, I. & BUSECK, P. R. 2004b: Lizardite-chlorite structural relationships and an inferred high-pressure lizardite polytype. — *American Mineralogist* **89**, 1631–1639., <https://doi.org/10.2138/am-2004-11-1207>
- DÓDONY I. & CORA I. 2014: Elektron-krisztallográfia a krisztallográfia nemzetközi évében. — *Fizikai Szemle* **10**, 347–351.
- DÓDONY, I. & KISS, J. 1976: Crystal Structures and Genetical studies on the Palygorskite–Sepiolite–Saponite (Montmorillonite) group. — *Acta Geologica Hungarica* **20**, 1–17.
- DÓDONY, I. & LOVAS, A. Gy. 1980: HRTEM study of Dioptase $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. — *X. Hungarian Diffraction Conference, 25–30 April, 1980 Balatonaliga. Collected Abstracts*.
- DÓDONY, I. & LOVAS, A. Gy. 1982: HRTEM study of Pseudowollastonite and Wollastonite. — *XII. Magyar Elektronmikroszkópos és Mikroanalízis Konferencia, Eger, Kivonatok* p. 21.
- DÓDONY, I. & LOVAS, A. Gy. 1982: Real structure of Pyrosmalite. — *Proceedings of the 13th General Meeting of the International Mineralogical Association (IMA): Varna, September 19–25, 1982.*, p. 436.
- DÓDONY, I. & LOVAS, A. Gy. 1983: HRTEM study of Pseudowollastonite and Wollastonite. — *Mikroszkopie* **40**, 140–154.
- DÓDONY, I. & MALEEV, M. 1984: Chain periodicity fault terminations in Rhodonite. — *Proceedings of the Eighth European Congress on Electron Microscopy. 13 to 18 August 1984, Budapest 2.*, 1027–1028.
- DÓDONY, I. & PÓSFAL, M. 1989: Polymorphism of 4C and 5C pyrrhotites. — *Zeitschrift für Kristallografie Suppl.* **2**, p. 55.
- DÓDONY, I. & PÓSFAL, M. 1990: Polymorphism of pyrrhotite, Part II. A TEM study of 4C and 5C polymorphs. — *European Journal of Mineralogy* **2**, 529–535., <https://doi.org/10.1127/ejm/2/4/0529>
- DÓDONY, I. & SOÓS, M. 1984: Crystallochemical relations in the mica-illite serial. — *Proceedings of the Eighth European Congress on Electron Microscopy. 13 to 18 August 1984, Budapest 2.*, 1031–1032.
- DÓDONY, I. & SOÓS, M. 1986: A new member of the biopiribole. Recskite. — *CBGA, Krakow, Abstracts*
- DÓDONY, I. & TAKÁCS, J. 1980: Structure of precious opal from Cervenica. — *Annales Universitatis Scientiarum Budapestinensis de Rolando Eotvos Nominatae* **22**, 37–50.
- DÓDONY, I. & TAKÁCS, J. 1982: The structural and chemical study of Galena with low Sb content. — *Proceedings of the 13th General Meeting of the International Mineralogical Association (IMA): Varna, September 19–25, 1982.* p. 67.
- DÓDONY, I. & TAKÁCS, J. 1986: Play of colours of noble opal in Vörösvágás. — *Natura Borsodiensis* 7–20.
- DÓDONY, I. & WEISZBURG, T. 1979: Crystal structure of Wad in HRTEM. — *XII. All Union Conference on Electron Microscopy, Tallin, Collected Abstracts*.
- DÓDONY, I. & WEISZBURG, T. 1982: The structure of a “Wad” sample from Dognacea (Rumania). — *Annales Universitatis Scientiarum Budapestinensis de Rolando Eotvos Nominatae* **24**, 53–62.
- DÓDONY, I. & WEISZBURG, T. 1983: The real structure of Ludwigite. — *Mikroszkopie* **40**, 140–154.
- DÓDONY, I., DIMOV, V. & LOVAS, A. Gy. 1984: Polytypism of Chloritoid: A new three-layered modification. — *Proceedings of the Eighth European Congress on Electron Microscopy. 13 to 18 August 1984, Budapest 2.*, 1029–1030.
- DÓDONY, I., HALÁSZ, I., KIRSCHNER, I., ZSOLT, G., PORJESZ, R., KOVÁCS, Gy., PORJESZ, T. & KÁRMÁN, T. 1991: TEM Investigations on Phases of Ceramic Samples of the Ti–Ca–Ba–Cu–O System. — *Periodica Polytechnica* **34**, 335–342.
- DÓDONY, I., LOVAS, A. Gy. & SOÓS, M. 1994a: XRD and TEM study of the anisotropy of an anomalous grandite garnet from Recsk, Mátra Mts. (N Hungary). — *Material Science Forum* **166–169**, 637–642., <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.166-169.637>
- DÓDONY, I., LOVAS, A. Gy. & SOÓS, M. 1994b: Anomalous grandite garnet from Recsk, Mátra Mts. (North Hungary). — *Acta Mineralogica–Petrographica* **35**, 33–45.
- DÓDONY, I., PÓSFAL, M. & BUSECK, P. R. 1996: Structural relationship between pyrite and marcasite. — *American Mineralogist* **81**, 119–125., <https://doi.org/10.2138/am-1996-1-215>
- DÓDONY, I., PÓSFAL, M. & BUSECK, P. R. 2002: Revised structure models for antigorite: A HRTEM study. — *American Mineralogist* **87**, 1443–1457., <https://doi.org/10.2138/am-2002-1022>
- DÓDONY, I., NÉMETH, P. & BELLUSO, E. 2003: Vesuvianites and garnets from the Szár Hill, Polgárdi, Hungary. — *Topographia Mineralogica Hungariae* **8**, 115–134.
- DÓDONY, I., PÓSFAL, M. & BUSECK, P. R. 2006: Does antigorite really contain 4- and 8-membered rings of tetrahedra? — *American Mineralogist* **91**, 1831–1838., <https://doi.org/10.2138/am.2006.1971>

- DÓDONY, I., PEKKER, P. & CORA, I. 2012: Structural study of a kaolinite single-crystal using PED and diffraction tomography. — *Acta Mineralogica–Petrographica, Abstract Series* **7**, p. 39.
- FLANNIGAN DAVID J. & LINDENBERG AARON M. (eds) (2018): Atomic-scale imaging of ultrafast materials dynamics. — *MRS Bulletin* **43/7**, 485–490., <https://doi.org/10.1557/mrs.2018.146>
- GALINDO, P. L., KRET, S., SANCHEZ, A. M., LAVAL, J.-Y., YANEZ, A., PIZARRO, J., GUERRERO, E., BEN, T. & MOLINA, S. I. 2007: The Peak Pairs algorithm for strain mapping from HRTEM images. — *Ultramicroscopy* **107**, 1186–1193.
- HAGBERG, J., LAHDERANTA, E., ZSOLT, G., LEPPAVUORI, S., KIRSCHNER, I., LAIHO, R., UUSUMAKI, A., PORJESZ, T., DÓDONY, I., KOVÁCS, GY., LEVOSKA, J. & KÁRMÁN, T. 1990: Hyper-diamagnetism in Bi(Pb)–Ca–Sr–Cu–O thick film. — *Journal of Less-Common Metals* **164–165**, 730–738., [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(90\)90282-o](https://doi.org/10.1016/0022-5088(90)90282-o)
- HAWKES, P. W. & SPENCE, J. C. H. (eds) 2019: *Springer Handbook of Microscopy*. — Springer Verlag, 674 p., <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00069-1>
- IJIMA, S. 1975: Ordering of the point defects in nonstoichiometric crystals of Nb₁₂O₂₉. — *Acta Crystallographica A* **31**, 784–790.
- JOHAN, Z., DÓDONY, I., MORÁVEK, P. & PASAVA, J. 1994: La buchornite, Pb₂AuBiTe₂S₃, du gisement d'or de Jílové, République tchèque. Buckhornite, Pb₂AuBiTe₂S₃, from Jilove gold deposit, Czech Republic. — *Comptes Rendus de l'Académie des sciences Paris* **318/II**, 1225–1231.
- KÁRMÁN, T., LAHDERANTA, E., LEPPAVUORI, S., HALÁSZ, I., DÓDONY, I., ZSOLT, G., PORJESZ, T., LAIHO, R., UUSIMAKI, A., KIRSCHNER, I. & KOVÁCS, GY. 1990: Observation of a diamagnetic signal up to 132 K in a Ti–Ca–Ba–Cu–O compound. — *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter* **78**, 169–175., <https://doi.org/10.1007/bf01307832>
- KIRSCHNER, I., LEPPAVUORI, S., LAIHO, R., UUSIMAKI, A., PORJESZ, T., HAGBERG, J., DÓDONY, I., LAHDERANTA, E., ZSOLT, G. & KOVÁCS, GY. 1990: Parameters of High Temperature Hyper-Diamagnetism Observed in Bi-Based Superconducting Thick Films. — *XIX. International Conference on Low Temperature Physics*, AD.P25, Brighton.
- KIRSCHNER, I., LEPPAVUORI, S., LAIHO, R., ALTFEDER, I., DÓDONY, I., UUSIMAKI, A., PORJESZ, T., HAGBERG, J., KOVÁCS, GY., LAHDERANTA, E., VOLODIN, A. & ZSOLT, G. 1991: Electrical and magnetic properties of variously annealed Bi(Pb)–Sr–Ca–Cu–O thick films. — *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter* **85**, 175–186., <https://doi.org/10.1007/bf01313218>
- KIRSCHNER, I., LEPPAVUORI, S., BODI, S. & DÓDONY, I. 1992: Direct measurement of inhomogeneous superconducting-normal transition in high T_c compounds. — *World Congress on Superconductivity: Proceedings of the 3rd International Conference and Exhibition, 15–18 September 1992, Munich, Germany*.
- KIRSCHNER, I., BÓDI, A. C., LEPPAVUORI, S., UUSIMAKI, A., DÓDONY, I. & PORJESZ, T. 1993a: Tracing of the effect of thermal cycling by thermometric mapping method in Y–Ba–Cu–O superconductors. — *Physics Letters A* **178**, 315–319., [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(93\)91108-h](https://doi.org/10.1016/0375-9601(93)91108-h)
- KIRSCHNER, I., LEPPAVUORI, S., BÓDI, A. C., UUSIMAKI, A. & DÓDONY, I. 1993b: Direct measurement of inhomogeneous superconducting-normal transition in high-T_c compounds. — *Applied Superconductivity* **1**, 1721–1726., [https://doi.org/10.1016/0964-1807\(93\)90320-2](https://doi.org/10.1016/0964-1807(93)90320-2)
- KNOLL, M. & RUSKA, E. 1932: Das Elektronenmikroskop. — *Zeitschrift für Physik* **78**, 318–339
- KONISHI, H., DÓDONY, I. & BUSECK, P. R. 2002: Protoanthophyllite from three metamorphosed serpentinites. — *American Mineralogist* **87**, 1096–1103., <https://doi.org/10.2138/am-2002-8-906>
- KONISHI, H., GROU, T. L., DÓDONY, I., MIYAWAKI, R., MATSUBARA, S. & BUSECK, P. R. 2003: Crystal structure of protoanthophyllite: A new mineral from the Takase ultramafic complex, Japan. — *American Mineralogist* **88/11–12**, 1718–1723., <https://doi.org/10.2138/am-2003-11-1212>
- KOVÁCS KIS, V. & DÓDONY, I. 1999: Structural disorder in natural cubic HgS. — *Acta Mineralogica–Petrographica* **40**, 3–10.
- KOVÁCS KIS V. & DÓDONY I. 2003: A tűzkő ásványtani és kristályszerkezeti vizsgálata. — *Földtani Közlemény* **133**, 309–323.
- KOVÁCS KIS, V. & DÓDONY, I. 2004: Mineralogical study of fibrous microcrystalline silica: chalcedony from Gyöngyössolymos, Northern Hungary. — *Acta Mineralogica–Petrographica* **45**, 101–106.
- KOVÁCS KIS, V., HORVAT, M. & DÓDONY, I. 2004: Microstructures in Two Alkali Feldspar Megacrysts from the Papuk Mt., Croatia. — *Geologia Croatica* **57**, 149–158.
- KOVÁCS KIS, V., DÓDONY, I. & LÁBÁR, J. L. 2006: Amorphous and partly ordered structures in SiO₂ rich volcanic glasses. An electron diffraction study. — *European Journal of Mineralogy* **18/6**, 745–752., <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2006/0018-0745>
- LÁBÁR, J. L., ADAMIK, M. & DÓDONY, I. 1998: Contamination in analytical electron microscopy and in ALCHEMI. — *Microchimica Acta* **15**, 65–71., https://doi.org/10.1007/978-3-7091-7506-4_8
- LÁBÁR, J. L., MORGIEL, J., TÓTH, L. & DÓDONY, I. 2000: Sites are separable in garnets with ALCHEMI. — *Mikrochimica Acta* **132**, 489–492., <https://doi.org/10.1007/s006040050098>
- LEPPAVUORI, S., KIRSCHNER, I., UUSIMAKI, A., PORJESZ, T., KOVÁCS, GY., DÓDONY, I., LAIHO, R. & ZSOLT, G. 1992: Comparison of superconductive parameters of variously prepared and treated thin films. — In: CORRERA, L. (ed.): *High T_c superconductor thin films*. 581–586., <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-89353-6.50094-4>
- LOVAS, GY. A. & DÓDONY, I. 1997: A structural study on saibélyite from its type-locality (Rézbánya, Bihar Mts., Rumania). — *Acta Mineralogica–Petrographica* **37 Suppl.**, 89–99.
- LOVAS, GY. A., DÓDONY, I., PÖPPL, L. & SZALLER, ZS. 1998: On the phase transitions of Bi₂Te₄O₁₁. — *Journal of Solid State Chemistry* **135**, 175–181., <https://doi.org/10.1006/jssc.1997.7594>
- LOVAS, GY., DÓDONY, I., BRAUN, T. & RAUSCH, H. 1999a: The form of sulphur impurity in commercial C₆₀. — *Magyar Kémiai Folyóirat* **105**, 363–371.
- LOVAS, GY., DÓDONY, I., BRAUN, T. & RAUSCH, H. 1999b: The form of sulphur impurity in commercial C₆₀. — *Fullerene Science and Technology* **7**, 855–870., <https://doi.org/10.1080/10641229909351383>
- MENYHÁRT A., DÓDONY I. & PEKKER P. 2011: Új ásványtani adatok a Mád környéki savanyú vulkanitokból. (Tokaji-hegység). — *Földtani Közlemény* **141/3**, 257–266.

- MINDSZENTY, A., GALÁ CZ, A., DÓDONY, I. & CRONAN, D. S. 1986: Paleoenvironmental significance of ferromanganese oxide concretions from the Hungarian Jurassic. — *Chemie der Erde* **45**, 177–190.
- NÉMETH, P., DÓDONY, I., PÓSFAL, M. & BUSECK, P. R. 2013: Complex Defect in Pyrite and Its Structure Model Derived from Geometric Phase Analysis. — *Microscopy & Microanalysis* **19**, 1–5, <https://doi.org/10.1017/S1431927613001839>
- NÉMETH, T., MÁTHÉ, Z., PEKKER, P., DÓDONY, I., KOVÁCS-KIS, V., SIPOS, P., CORA, I. & KOVÁCS, I. 2016: Clay mineralogy of the Boda Claystone Formation (Mecsek Mts., SW Hungary). — *Open Geosciences* **8**, 259–274., <https://doi.org/10.1515/geo-2016-0024>
- ORMÁNDI, SZ. & DÓDONY, I. 2016: Synthesis and structural study of the Linde Type-A zeolite prepared from kaolinite. — *Zastita Materijala* **57/4**, 565–570., <https://doi.org/10.5937/zasmat1604565o>
- PAPP G., DÓDONY I., FÖLDVÁRI M. & LOVAS GY. 1999: A dunabogdányi „hidroantigorit”. — *Topographia Mineralogica Hungariae* **6**, 127–136.
- PENNYCOOK, T. J., MARTINEZ, G. T., NELLIST, P. D. & MEYER, J. C. 2019: High dose efficiency atomic resolution imaging via electron ptychography. — *Ultramicroscopy* **196**, 131–135., <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2018.10.005>
- PETRÓ, J., BÓTA, A., LÁSZLÓ, K., BEYER, H., KÁLMÁN, E. & DÓDONY, I. 2000: A new alumina-supported, not pyrophoric Raney-type Ni-catalist. — *Applied Catalysis A: General* **190**, 73–86., [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(99\)00267-7](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(99)00267-7)
- PÓSFAL, M. 2016: Nano-mozaik. — In: HORN J. (szerk.): *Életutak*. Bányász Kultúráért Alapítvány, Budapest, 261–304.
- PÓSFAL, M. & DÓDONY, I. 1990: Polymorphism of pyrrhotite, Part I.: Fundamental structures of NC (N = 2, 3, 4 and 5) types. — *European Journal of Mineralogy* **2**, 525–528., <https://doi.org/10.1127/ejm/2/4/0525>
- RAUSH, H., DÓDONY, I., LOVAS, GY. & BRAUN, T. 1999a: Determination of sulphur as an impurity in commercial C₆₀ soot and sublimated C₆₀ polycrystals by INAA. — *Magyar Kémiai Folyóirat* **105**, 229–233.
- RAUSH, H., BRAUN T., DÓDONY, I. & LOVAS, GY. 1999b: Determination of sulphur as an impurity in commercial C60 soot and sublimated C60 polycrystals by INAA. — *Analyst* **124**, 417–419., <https://doi.org/10.1039/a808657e>
- RAUCH, E. F., PORTILLO, J., NICOLOPOULOS, S., BULTREYS, D., ROUVIMOV, S. & MOECK, P. 2010: Automated nanocrystal orientation and phase mapping in the transmission electron microscope on the basis of precession electron diffraction. — *Zeitschrift für Kristallographie* **225**, 103–109. <https://doi.org/10.1524/zkri.2010.1205>
- RONTÓ, V., SÓLYOM, J., KOVÁCS, Á., PEKKER, P. & DÓDONY, I. 2013: Microstructure and phase analysis by TEM in Cu–Hf–Ti alloys. — *Materials Science Forum* **729**, 266–271., <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.729.266>
- RUSKA, H., VON BORRIES, B. & RUSKA, E. 1939: Die Bedeutung der Übermikroskopie für die Virusforschung. — *Archiv für die gesamte Virusforschung* **1/1**, 155–169.
- SCHAFFER, B., SCHAFFER, M., RAMASSE, Q., AZOUGH, F., ABOU-RAS, D., MACLAREN, I. & CRAVEN, A. 2011: Application of atomically resolved EELS mcted apping and HAADF imaging in aberration corrected STEM. — *10th Multinational Congress on Microscopy September 4–9, 2011, Urbino, Italy*, 15–16.
- SIPOS, P., NÉMETH, T., MOHAI, I. & DÓDONY, I. 2005: Effect of soil composition on adsorption of lead as reflected by a study on a natural forest soil profile. — *Geoderma* **124**, 363–374., <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.011>
- SKARNULIS, A. J., IJIMA, S. & COWLEY, C. M. 1976: Refinement of the Defect Structure of “GeNb₉O₂₅” by High-Resolution Electron Microscopy. — *Acta Crystallographica A* **32**, 799–805., <https://doi.org/10.1107/s0567739476001630>
- SOÓS, M. & DÓDONY, I. 1989: A TEM study of “orthopyroxene” from a lherzolite nodule. — *Zeitschrift für Kristallografie Suppl.* **2**, p. 157.
- SOÓS, M., JÁNOSI, M., DÓDONY, I. & LOVAS, G. 1991: Anomalous grandite garnet from Recsk, Mátra Mts. (N Hungary) Part.I. Chemical composition, optical and diffraction properties. — *Neues Jahrbuch für Mineralogie Monatshefte* **2**, 76–86.
- STADELMANN, P. A. 1987: EMS-A Software Package for Electron Diffraction Analysis and HREM Image Simulation in Material Science. — *Ultramicroscopy* **21**, 131–146. [https://doi.org/10.1016/0304-3991\(87\)90080-5](https://doi.org/10.1016/0304-3991(87)90080-5)
- SZAKÁLL, S., MOLNÁR, F., KOVÁCS, Á. & DÓDONY, I. 1994b: A telkibányai ércesedés szulfidásványai. — *Topographica Mineralogica Hungariae* **2**, 149–179.
- SZAKÁLL S., DÓDONY I. & KOVÁCS Á. 1994a: A telkibányai ércesedés halogenidjei. — *Topographica Mineralogica Hungariae* **2**, 253–257.
- SZAKÁLL S., KOVÁCS Á. & DÓDONY I. 1995: Volframásványok a nagybörzsönyi ércesedésből. — *Folia Historico Naturalia Musei Matraensis* **20**, 5–12.
- SZAKÁLL S., FÖLDVÁRI M. & DÓDONY I. 1997: Karbonáthidroxilapatitos ásványparagenezis az Esztramos-hegyről. — *Topographia Mineralogica Hungariae* **5**, 123–130.
- SZALLER, ZS., PÖPPL, L., LOVAS, GY. & DÓDONY, I. 1996: Study of the formation of Bi₂Te₄O₁₁. — *Journal of Solid-State Chemistry* **121**, 251–261., <https://doi.org/10.1006/jssc.1996.0036>
- USIMAKI, A., KIRSCHNER, I., LEVOSKA, J., HAGBERG, J., ZSOLT, G., KOVÁCS, GY., PORJESZ, T., DÓDONY, I., LEPPAVUORI, S. & LAIHO, R. 1990: Relationship between microstructure and critical parameters in high T_c superconducting Bi–Pb–Sr–Ca–Cu–O thick films. — *Cryogenics* **30**, 593–598., [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(90\)90290-s](https://doi.org/10.1016/0011-2275(90)90290-s)
- VOGL M. 1981: Az agyagásványok vizsgálati módszereinek hazai fejlődése az elmúlt 20 év alatt. — *Földtani Közlöny* **111**, 31–39.
- WANG, Y. X., LIU, P. & QIN, G. W. 2015: Strain analysis of misfit dislocations in α-Fe₂O₃/α-Al₂O₃ heterostructure interface by geometric phase analysis. — *Micron* **69**, 21–24., <https://doi.org/10.1016/j.micron.2014.11.001>
- WENK, H.-R. (Coord. ed.) 1976: *Electron Microscopy in Mineralogy*. — Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 564 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-66196-9>
- ZEGA, T. J., GARVIE, L. A. J., DÓDONY, I. & BUSECK, P. R. 2004: Serpentine nanotubes in the Mighei CM chondrite. — *Earth and Planetary Science Letters* **223**, 141–146.
- ZEGA, T. J., GARVIE, L. A. J., DÓDONY, I., FRIEDRICH, H., STROUD, R. M. & BUSECK, P. R. 2006: Polyhedral serpentine grains in CM chondrites. — *Meteoritics and Planetary Science* **41**, 681–688., <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2006.tb00984.x>

ZOU, X. 2005: What is Electron Crystallography? — In: WEIRICH, T. E., LÁBÁR, J. L. & XIAODONG, Z. (eds): *Electron Crystallography*. Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 3–16., https://doi.org/10.1007/1-4020-3920-4_1

Kézirat beérkezett: 2020. 03. 25.