

A lézerek elterjedésének köszönhetően a fénymikroszkópia jelentős fejlődésen ment keresztül az elmúlt három–négy évtizedben. Ezzel párhuzamosan, a fénymikroszkópiától függetlenül, az alagút-elektronmikroszkópia és több tűszondás mikroszkópiái ág is kifejlődött. Megtört az elektronmikroszkópia addigi vezető szerepe, a fény-, az elektron- és a tűszondás mikroszkópia egyenrangú partnerekké váltak. Az elektronmikroszkópiái konferenciák mikroszkópiái konferenciákká, az elektronmikroszkópiái társulatok mikroszkópiái társulattá alakultak, elhagyva az addig erősen hangsúlyozott elektron szót. Az elektronmikroszkóposok kezdetől fogva törekedtek lokális analitikai módszerek kifejlesztésére attól az alapvető kíváncsiságtól motiválva, hogy ha valamit látunk, akkor azt is tudni akarjuk, hogy az a valami milyen anyagból van. Ezért a különböző mikroszkópiák „szövetséget kötöttek” olyan lokális fizikai módszerekkel, amelyek a kémiai összetétel meghatározását szolgálják.

Az elektronmikroszkópia és a lokális analitika kapcsolata

Látni fogjuk, hogy egy-egy alapvető elv vagy készülék kifejlesztése után hosszú időt kellett várni az elfogadásra, esetenként az újrafelfedezésre. Nem volt elég nagyszerű alkotni, azt megfelelő időben kellett tenni. A múlt század első felét lassú fejlődési ütem jellemezte, az utóbbi évtizedekben viszont a fejlődés nagyon felgyorsult.

Az első transzmissziós elektronmikroszkópot *Knoll* és *Ruska* alkotta meg 1932–33-ban. Ruskának az elismerésre több mint 50 évet kellett várnia: 1986-ban kapta meg a Nobel-díjat. (*Rohrerrel* és *Binniggel* együtt, ők a pásztázó alagút-elektronmikroszkóp megalkotásáért). Hasonlóképpen hosszú idő telt el a pásztázás elvének felfedezése (*Knoll*, 1935) és az első pásztázó elektronmikroszkóp kereskedelmi forgalomba hozatala között (*Cambridge Instruments*, 1965). A pásztázás alapja az, hogy egy szonda (pl. fény-, elektron-, röntgensugár vagy fémtű) kivált egy jelet a vizsgálandó mintából, amellyel (többnyire erősítés után) moduláljuk egy megjelenítő képernyő fényességét. Tovább lépve a szondával a vizsgálandó mintán a következő adatot a képernyő következő pontjának fényességmodulálására használjuk. A pásztázás elve nagyon nagy jelentőségű, mert segítségével szinte bármelyik mérhető fizikai mennyiséget képalkotásra használhatjuk. Az elektronmikroszkópia és analitika összekapcsolódását röviden úgy jellemezhetjük, hogy az elektronmikroszkópia befogadta a különféle lokális analitikai módszereket.

Az első analitikai módszer az elektronmikroszkópiában az elektrondiffrakció volt (*Kossel* és *Möllenstedt*,

1939). A transzmissziós elektronmikroszkópban egyetlen mozdulattal át lehet váltani a képalkotásból a diffrakcióra. A kristályrács paramétereinek meghatározásával vegyületinformációt lehet szerezni.

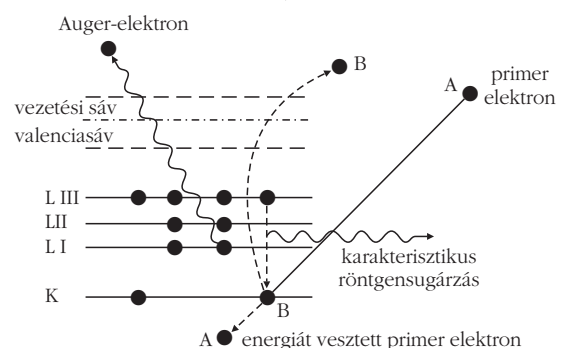
Az elektronmikroszkópban a karakterisztikus röntgensugárzást vagy Auger-emissziót előidéző „A” primer elektron (*1. ábra*) a magot elhagyva magán viseli azt az információt, hogy mennyi energiát veszített az atommal való kölcsönhatáskor. Energiájának megmérése révén (elektron-energiavesztési spektroszkópia) ugyanolyan, sőt részletesebb összetételi információhoz jutunk, mint a röntgen- vagy Auger-spektroszkópiával.

A felfedezéstől az újrafelfedezésig itt is rögös volt az út: *Baker* és *Hillier* 1944-ben mérte az első energiavesztési spektrumot, majd az eljárást *Wittry*, *Ferrier* és *Cosslett* 1969-ben újra felfedezte. (Az elektron-energiavesztési spektroszkópiáról [1]-ben 50 oldalas magyar nyelvű áttekintést találhatók.)

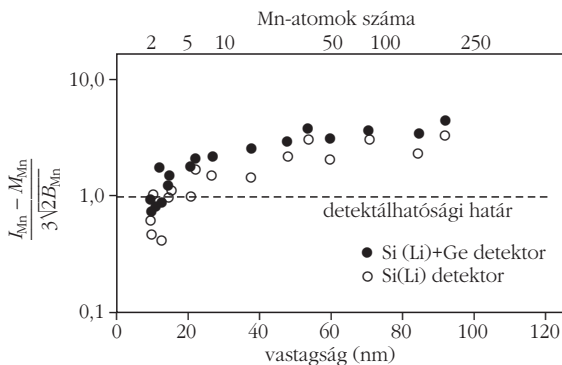
Az első elektronsugaras (röntgen) mikroanalízisre szolgáló mikroszondát (amely lényegében egy hullámhosszdiszperzív röntgenspektrométerrel ellátott elektronmikroszkóp) 1951-ben *Castaing* építette meg Ph.D. munkája keretében. Az elektronsugaras mikroanalízist nemcsak műszeresen, de elméletileg is nagyszerűen megalkotta. A röntgenanalízisben a következő jelentős lépést a lítiummal adalékolt szilícium-detektorok jelentették az 1970-es években. Az új úgynevezett energiadiszperzív röntgenspektrométereknek (EDS) sok előnyük van a hullámhosszdiszperzív változathoz képest azáltal, hogy a soros detektálást a párhuzamos detektálás váltotta fel: az egész spektrumot a nátriumtól az uránig egyidejűleg lehet megjeleníteni. (A fejlődés következő lépcsőfokán a vékony detektorablakok révén a legkisebb rendszámú detektálható elem a bór lett.)

A transzmissziós elektronmikroszkópok felbontása napjainkban 0,1 nm (azaz 1 angström) alá került, hogy csak a Carl Zeiss SATEM típusú vagy a Philips Titan 80-300 típusú mikroszkópokat említsem. Az álom, hogy különböző atomokat lehessen detektálni, már jóval korábban megvalósult. Az energiadiszperzív röntgenspektrométerek (EDS) detektálási határa elérte a 2 atomot (*2. ábra*), miközben a laterális felbontás körülbelül 1 nm volt (*D.B. Williams*).

1. ábra. Analitikára alkalmas jelek elektron-besugárzásakor.



A Magyar Mikroszkópos Konferencián, Balatonalmádiban 2005 májusában elhangzott előadás rövidített változata.



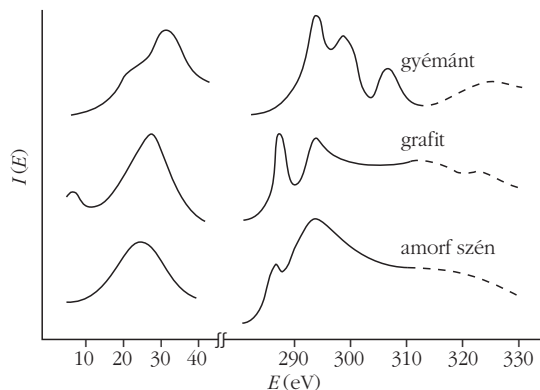
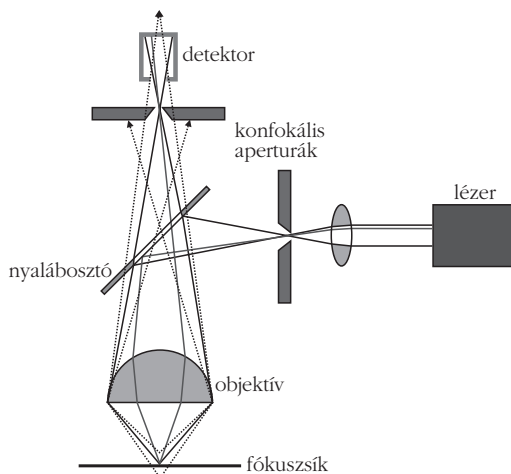
2. ábra. Az energiadiszipatív röntgenspektrométer abszolút detektálási határának függése a minta vastagságától.

Az elektron-energiavesztési spektrométerek (EELS) felbontása olyan jó (0,1 eV), hogy korlátot már nem a spektrométer, hanem az elektronforrásban meglévő energiakisélesedés jelent. Az elemösszetételen kívül még nagyon sok információt képes szolgáltatni az EELS: a polimorfától kezdve a vizsgált anyag sáv szerkezeti tulajdonságáig, beleértve a permittivitást (komplex dielektromos állandót), a vizsgált atom körüli szomszédos atomok számát (koordinációs számot) és azok egymástól való távolságát. Ez már a szó tágabb értelmében vett analitika (3. ábra).

Az elektronnyaláb pásztázása révén mind a karakterisztikus röntgensugárzást, mind az energiavesztési spektrumot fel lehet használni a mintát alkotó kémiai elemek kétdimenziós eloszlásának megjelenítésére, „térképezésére”. Az analitikai eljárások kedvezően hatottak vissza magára a leképezésre, a mikroszkópiára is. Ha energiaszűrővel meghatározott energiájú elektronokat használnak képkalkotásra, akkor a mikroszkópos kép jobb minőségű lesz. Gondoljunk arra, hogy ha szűk energiatarományba eső elektronokkal készítünk képet, akkor a színi hiba (kromatikus aberráció) minimálisra csökkenthető. Energiaszűrővel a diffrakciós képek minősége is javítható.

Az elektronmikroszkópia fejlődésében az egyik kulcsfontosságú elem az elektronforrás fényességének javítása volt. A termikus volfrámkatód fényessége 10^5 – 10^6 A/cm²/sr, a modern téremissziós katódoké 10^8 – 10^9 A/cm²/sr. A for-

4. ábra. A konfokális mikroszkóp elve.



3. ábra. Szén, grafit, gyémánt EELS spektruma (R. Egerton).

rás fényességében bekövetkezett nagymértékű javulás hatása megnyilvánul mind a leképezés felbontásának, mind pedig az analitikai módszerek detektálási határának javulásában. A másik két kulcselemet, a párhuzamos detektálásra való áttérést, valamint a pásztázás elvének alkalmazását már érintettük. Nem szabad megfeledkezni az adattárolás és adatfeldolgozás lehetőségeinek, szintén kulcsfontosságú, bővüléséről sem.

Fénymikroszkópia és lokális analitika

A tudománytörténet *Anton van Leeuwenhoek*-ot tekinti a fénymikroszkóp megalkotójának, aki 1675 körül mikroszkópjával 300-szoros nagyítást ér el. A fénymikroszkópia versenyképessége csak a konfokális mikroszkópia és a közelteres mikroszkópia jelenkori kidolgozása után kezdődött. Ezek pedig a lézerek tömeges elterjedéséig vártak magukra.

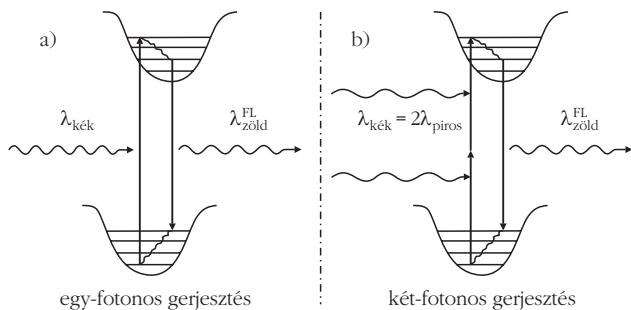
A fénymikroszkópia teljesítőképességét a diffrakció jelensége korlátozza. *Ernst Abbe* (1872) fogalmazta meg a formulát, amely szerint a fénymikroszkóp felbontása (D):

$$D = \frac{0,61 \lambda}{n \sin u},$$

ahol λ a megvilágító fény hullámhossza, n a törésmutató, $n \sin u$ pedig a numerikus apertúra. A képlet értelmében a fénymikroszkóp felbontása közelítőleg $\lambda/2$ – $\lambda/3$ -mal egyenlő. Az első eset ($\lambda/2$) az immerziós olaj nélküli felbontásra vonatkozik és értéke körülbelül 250 nm, a második esetben ($\lambda/3$) a felbontás körülbelül 160 nm, $n = 1,5$ -es törésmutatójú immerziós olaj használatát feltételezve.

A fénymikroszkópia fejlődésében nagy lépés volt a *konfokális leképezés elvének* – 4. ábra – felismerése (*M. Minsky*, 1957).

A konfokális mikroszkóp egyetlen síkból, a fókusz síkból enged fényt jutni a detektorba. Az ábrán látható szaggatott vonallal jelölt sugarak elrontanák a kép élességét, ha be tudnának jutni a detektorba. A konfokális elv csak akkor vált jól használhatóvá, amikor fényforrásként lézert alkalmaztak. A lézerek előnye: a nagy fényesség, kis divergencia, könnyű fókuszálhatóság és stabilitás. A konfokális képkalkotást a fénynyaláb pásztázása, vagy a minta pásztázó mozgatása teszi lehetővé. Így alakult ki a pásztázó konfokális lézermikroszkópia, (Confocal Laser Scan-



5. ábra. A két-fotonos elv.

ning Microscopy, CLSM vagy Laser Scanning Confocal Microscopy, LSCM), amely bár a diffrakciós határt nem döntötte le, a mélységi felbontás ($1,6 \mu\text{m}$) javítását, éles képek készítését és vastag minták vizsgálatát lehetővé tette. A konfokális mikroszkópiát többnyire világító festékekkel együtt alkalmazzák: a minta meg van festve fény hatására fényt emittáló fluorofórokkal (vagy más néven kromofórokkal), egyidejűleg akár többel is. Ezek a festékek specifikusan kötődnek például egy biológiai szövet meghatározott alkotórészéhez, így a leképezéssel egyidejűleg az emittált fény színe kémiaiilag is azonosítja a vizsgált mintarészlet anyagát.

A minta optikai tengely mentén történő elmozdításával a fókuszszík a minta felszínétől egyre mélyebbre helyezhető, ezáltal egy úgynevezett optikai szeletelés válik lehetővé, amelyet háromdimenziós képrekonstrukció követhet. A konfokális fluoreszcens mikroszkóp a biológusok „komputer-tomográfja”. A konfokális leképezés elve nem kötődik kizárólag a fluoreszcens mikroszkópiához, például Raman-mikroszkópiával szintén kombinálható.

A konfokális elvnek konkurense is adódott a vastag minták leképezésében, a két-fotonos elv megvalósítása nyomán.

Az 5.a ábra szerinti példában az egy-fotonos gerjesztéssel kék fényvel zöld színű fluoreszcens fényt váltunk ki. Az ábra jobb oldali sémája (5.b ábra) szerint ugyancsak zöld fluoreszcens fényt válthatunk ki, ha két piros foton időben olyan közel érkezik egymás után a gerjesztendő mintába, hogy abban egyetlen, kék fotonnak érződik. Ennek gyakorlati megvalósításához femto-szekundumos lézere van szükség. Az effektus megdöbbentő, a gerjesztés helye még jobban lokalizálódik, mint a konfo-

kális technikánál. Egy fluorofórral megfestett folyadékban két-fotonos gerjesztéskor egyetlen pont világít, az a hely, ahol a két foton energiája összegződik. A többi helyen a fluorofór a gerjedés és abszorpció szempontjából gyakorlatilag érzéketlen a beérkező, illetve távozó fényre. Míg a konfokális mikroszkóppal maximálisan $40 \mu\text{m}$ vastag mintát vagyunk képesek élesen leképezni, addig a két-fotonos technikával $1 \mu\text{m}$ vastagságút. Sem a konfokális, sem a két-fotonos (sem pedig a multifotonos) technika nem töri át a diffrakciós határt.

A lézer feltalálása (1960) után D. Pohl és A. Lewis (1984) valósította a megközelítés leképezést, amely először törte át a diffrakciós határt. A pásztázó közelteres mikroszkópiában (SNOM – Scanning Near-field Optical Microscopy vagy NSOM – Near-field Scanning Optical Microscopy) a fényforrás a fény hullámhosszánál sokkal kisebb távolságra van a vizsgálandó minta felszínétől és mérete is sokkal kisebb, mint a fény hullámhossza.

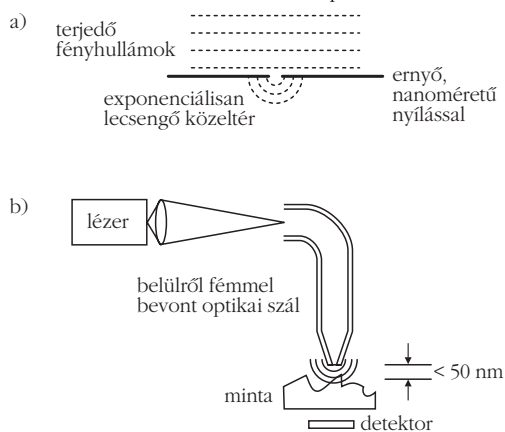
Az NSOM gondolata még 1928-ból származik E. Synge-től, és először csak 1972-ben sikerült megvalósítani mikrohullámmal (E. Ash és G. Nicholls). A nanométeres fényforrásnak a minta felszínéhez közeli ($10\text{--}50 \text{ nm}$) pásztázó mozgatásához olyan kifinomult eljárásra volt szükség, amely csak a pásztázó alagútmikroszkóp (1981) kidolgozása után állt rendelkezésre.

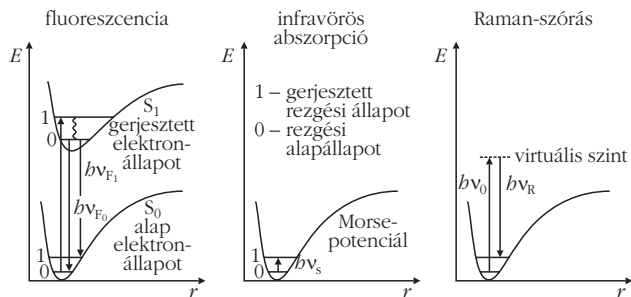
Ha egy szubnanométeres apertúrát fényvel világítunk meg, akkor az apertúra mögött a fény hullámhosszánál rövidebb távolságban (az ún. köztérben) egy exponenciálisan lecsengő (nem tovaterjedő) fényhullámot kapunk (6.a ábra). A közelteres fénymikroszkópia e fényhullám rendkívüli lokalizáltságát használja fel. (A konvencionális fénymikroszkópiát ennek megfelelően távolteres mikroszkópiának nevezhetjük.) Fényforrásként fémmel belülről bevont elvékonyodó optikai szálat (6.b ábra), vagy világító anyaggal kitöltött nanopipettát, vagy az atomerő-mikroszkóp furattal ellátott piramidális tujét használják. A detektálás történhet reflexióban és transzmisszióban egyaránt.

A megvalósítás egy másik módja, hogy a vizsgálandó vékony mintát üveg felszínére visszük fel oldatból, oldalról lézerral megvilágítjuk, kihasználva az üveg totálreflexióját. A minta felszínére a köztérbe beleeresztjük az előbb említett fémmel bevont elvékonyodó optikai szálat és ezzel „kicsatoljuk” a közelteres információt egy fotoelektron-sokszorozóba. Ez a megoldás leginkább a minta és az apertúra között végbemenő foton-alagúteffektussal szemléltethető. Innen származott a közelteres mikroszkópia első elnevezése is Photon Scanning Tunneling Microscopy. A szonda és minta közötti kölcsönhatás – több tekintetben is – még nem eléggé tisztázott. Klasszikus optikai módon nem írható le, ezért a szonda optimalizálása kísérleti úton történik. Az viszont minden pásztázó technikára igaz, hogy a szonda mérete határozza meg a felbontóképességet. Az 50 nm -es felbontás jelentősen felülmúlta a konvencionális fénymikroszkóp felbontását.

A SNOM módszerében a besugárzó fényfolt mérete nem csökkenthető 30 nm alá. Gondoljunk arra, hogy a belülről fémmel bevont, elkeskenyedő optikai szálaban a fény bizonyos mértékig a fémbe is behatol, ezáltal a kilépő fénynyaláb mérete nagyobb, mint az apertúra fizikai mérete. Így jutottak el az apertúra nélküli SNOM gondolatához.

6. ábra. A közelteres mikroszkópia elvi vázlata.





7. ábra. Fluoreszcencia, infravörös abszorpció és Raman-szórás mechanizmusa.

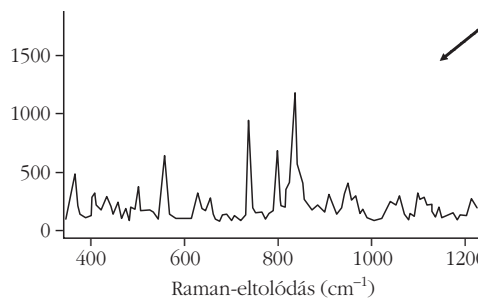
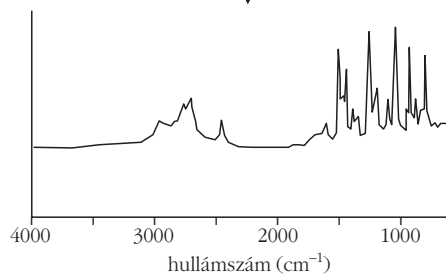
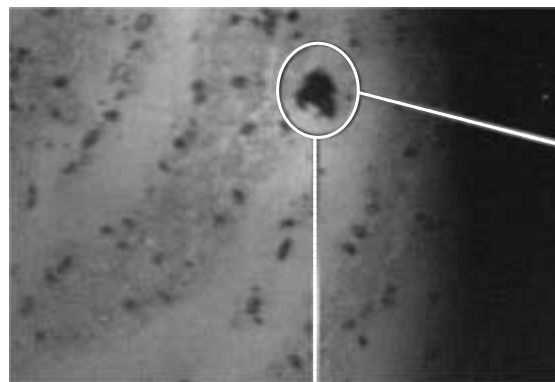
Az apertúra nélküli SNOM-ban a közeltérben lévő információt egy fémtű segítségével vesszük ki. Ez már nem optikai kicsatolás, hanem a szórt elektromos teret veszi fel a szonda. Lényegesen javítja a helyzetet, hogy nem fényt kell továbbítani egy nagyon kis átmérőjű szondán keresztül. A szonda végére fém nanorészecskét lehet felerősíteni, így a felbontóképesség javul az apertúrából álló (optikai) szondához képest. *Zenbausern* 1995-ben 1 nm-es (!) felbontásról számol be apertúra nélküli SNOM alkalmazásával. Az apertúra nélküli SNOM működését a minta polarizálhatóságának a szonda dipólmomentumával való kölcsönhatásával magyarázzák, de a jelenség megértése még nem tökéletes.

Az anyag fluoreszcens megfestésén túlmenően, a fénynek kémiai anyagazonosításra használt két legismertebb formája az infravörös spektroszkópia és a Raman-spektroszkópia. Míg a fluoreszcencia jelensége elektronátmenetekkel kapcsolatos, addig az infravörös abszorpció és a Raman-szórás az anyag molekuláris tulajdonságainak függvénye (7. ábra).

Az infravörös spektroszkópiában folytonos spektrumú fényvel világítjuk meg a mintát, és a minta választja ki a rezonancia alapján azt a számára kedvező hullámhosszat, amelyet elnyel. A Raman-spektroszkópiában monokromatikus lézertérrel sugározzuk be a mintát és a besugárzó fotonok nagyon kis hányada (10^{-7} – 10^{-8} része) rugalmatlan ütközéssel, hullámhosszváltozással szóródik. Csupán ezek a fotonok szolgálnak kémiai anyagazonosításra a Raman-spektroszkópiában. Mind az infravörös spektroszkópia, mind pedig a Raman-spektroszkópia a vizsgált anyag ujjlenyomatyszerű azonosítását adja (8. ábra). A két módszer egymást kiegészíti, a kovalens aszimmetrikus kötések infra-aktívak, a szimmetrikusak Raman-aktívak.

A fénymikroszkópia és analitika összefonódása más úton ment végbe, mint az elektronmikroszkópia és analitika esetében. Itt a fluoreszcens, az infravörös, és Raman-spektroszkópiákat pásztázás révén alkalmassá tették leképezésre, így alakult ki a fluoreszcens (lézer pásztázó mikroszkópia) infravörös és a Raman-mikroszkópia.

A fluoreszcens mikroszkópia a biológiában és az orvostudomány területén bír igen nagy jelentőséggel. Ha figyelembe vesszük, hogy évszázadunk várhatóan a biológia évszázada lesz, akkor a fluoreszcens mikroszkópia jelentősége még inkább érthetővé válik. Segítségével aminosavak, DNS, Ca-ionok és elemi biológiai folyamatok válnak láthatóvá és követhetővé akár élő anyagon is. *A Fizikai Szemle* 2004. októberi száma kitűnő cikket kö-



8. ábra. Ecstasy tabletta maradványa az ujjlenyomaton, valamint infravörös spektruma (fent) és Raman-spektruma (lent).

zött a fluoreszcens mikroszkópia biológiai alkalmazásáról [2]. Az infravörös mikroszkópia és Raman-mikroszkópia leginkább a szerves vegyiparban, gyógyszeriparban és bűnügyi technikában terjedt el.

Az anyagazonosításon túlmenően e két módszer képes a polimorfia (azonos kémiai összetétel, különböző kristályszerkezet) jelenségének kimutatására is. Ennek többek között a gyógyszeriparban van nagy jelentősége, ahol a polimorfok különböző oldódási és biohasznosulási tulajdonságokkal rendelkeznek.

Az infravörös detektálás határai nem túl jók (0,01–5%) legalábbis az igényekhez képest, és erősen anyagfüggők. Ezért a mikroszkópia szempontjából azok az új fejlesztések perspektivikusak, amelyek valamilyen rezonanciajelenség révén jelentős javulást mutatnak fel a detektálási határ tekintetében. Ilyen a besugárzó lézertörés hullámhosszának a hangolásával kiváltható rezonancia, vagy a vékony fémhordozókban (Au, Ag stb.) lézertel gerjesztett felületi plazmonok hasznosítása felület által erősített Raman-szórás (Surface Enhanced Raman Spectroscopy, SERS), vagy tűszondák csúcsának elektromos tere által keltett erősítés (Tip-Enhanced Raman Spectroscopy, TERS). E technikák kombinációja olyan hatásos, hogy egyetlen molekula detektálhatóságát is bizonyították már

Raman-spektroszkópiával. A nagy laterális felbontású kémiai leképezés (téreképezés) pedig gyakorlati szempontból elfogadható hosszúságú időre redukálódik, ha nem a normál Raman-szórás, hanem annak valamelyik rezonanciaváltozatát használjuk fel.

Tűszondás mikroszkópia és lokális analitika

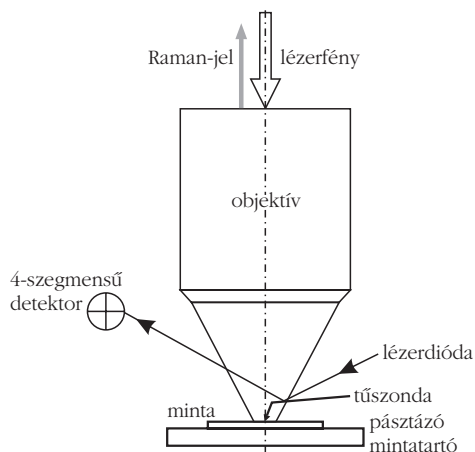
A tűszondás mikroszkópok első típusa a pásztázó alagút-mikroszkóp (STM), Binnig és Rohrer műve (1981), azon alapul, hogy az elektronok alagútáramának erőssége egy tű és egy fémfelület között exponenciálisan függ a kettő közötti távolságtól. Minthogy leképező lencse nem vesz részt a folyamatban, a lencsehibák, amelyek jellemzőek az optikai eszközökre, nem játszanak szerepet. Kedvező körülmények között 0,1 nm-es laterális és 0,001 nm-es függőleges irányú felbontást lehet elérni. A pásztázó tűszondás mikroszkópiáról magyar nyelvű szakirodalmat is találhatunk *Kálmán Erika* és *Nagy Péter* munkája nyomán [2].

A fejlődéstörténet itt sem nélkülözi az érdekességeket: Rohrert és Binniget 10 évvel megelőzve *R. Young* készítette el az alagút-mikroszkóp „ősét”, de az ő elismerése elmaradt.

A pásztázó közelterez optikai mikroszkóp két évvel megelőzte az atomerő-mikroszkópot (1986), amelyet már nemcsak fém, hanem félvezető vagy szigetelő felületek vizsgálatára is lehetett használni. Mint említettük, a SNOM már azt a technikai háteret használta fel a fényforrás mozgatásához, amely a tűszondás mikroszkópia alapja is volt, így a SNOM esetében az optikai és tűszondás mikroszkópia között a határ elmosódik.

Az atomerő-mikroszkópia (AFM) egyik változata a *laterális erőmikroszkópia*, amelyben a tű elmozdulását és a kar „elferdülését” 4 fénydetektorral mérik. A laterális erőmikroszkópia speciális esete a *kémiai erőmikroszkópia*: a tűt olyan kémiai anyag monorétegével vonják be, amelyet a vizsgálandó felülettel reakcióba akarnak hozni, és a kémiai kölcsönhatás következtében megváltozó adhéziós erőket mérik. Nem valószínű, hogy a kémiai erőmikroszkópia lesz az a terület, ahol a tűszondás mikroszkópia és a lokális kémiai analízis találkozása az optimu-

9. ábra. Apertúra nélküli, reflexiós üzemmódú közelterez Raman-mikroszkóp sémája.



mot hozza, mivel egy tű preparálása nehézkes és a vizsgálandó felülettől függően más és más.

Az utóbbi időben gyorsan fejlődnek a Raman-spektroszkópia azon területei, amelyekben valamilyen rezonanciajelenséggel megnövelik a Raman-szórás hatásfokát. Az egyik ilyen terület a már említett felület által erősített Raman-szórás: a vizsgálandó minta és az üveg hordozó közé vékony arany- vagy ezüstkolloidot visznek fel, hogy bennük lézerral felületi plazmonokat gerjesszenek. A plazmonok nagyságrendekkel hatásosabban idéznek elő Raman-szórás, mint az a fémréteg mellőzésekor történik. Jelenleg ez a módszer csak vékony minták vizsgálatára alkalmas, amelyeket oldatból szárítanak be az átlátszó arany- vagy ezüstréteg felületére. Azért, hogy tömbanyagot is lehessen vizsgálni a felület által erősített Raman-szórással, az említett kolloidális aranyat vagy ezüstöt egy tűszondára viszik fel. Egy fém tűszonda – arany- és ezüstkolloid nélkül is – a tű körül kialakuló elektromos erőter miatt nagymértékben (10^4 faktorral) képes megnövelni a Raman-szórás hatásfokát.

A terület rendkívül gyorsan fejlődik, a tömbanyagú minták felületének nagyfelbontású leképezésére és kémiai analízisére jelenleg az apertúra nélküli SNOM és Raman-spektroszkópia kombinációja, a közelterez pásztázó Raman-mikroszkópia (Near-Field Scanning Raman Microscopy, NSRM) látszik a legalkalmasabbnak.

Míg infravörös mikroszkópiával 10 μm -es felbontást lehet elérni az alkalmazott nagy hullámhossz miatt és a (konvencionális, távolterez) mikro-Raman-spektroszkópia felbontási határa 0,5 μm , addig a közelterez pásztázó Raman-mikroszkópiával az alkalmazott tű mérete által meghatározott 100 nm-es felbontást értek el, reflexiós üzemmódban (*W.X. Sun* és *Z.X. Shen*, 2001). Külön hangsúlyozzuk a reflexiós üzemmódot, mert ez alkalmas tömbanyagok vizsgálatára, és mert alkalmazásával elkerülhetjük a vékony minták preparálásánál felmerülő, sokszor nem megengedhető műveleteket, mint például az oldatba vitelt és beszárítást. A 9. ábrán látott elrendezésben az argonlézer 488 nm hosszú vonalát használták és a tű által kiváltott erősítés a konvencionális Ramanhoz képest 10^4 -szeres volt. Jó minőségű Raman-spektrumot lehetett gyűjteni alacsony lézere energiáknál (~ 100 nW) és 1 s-nál rövidebb integrációs idő mellett.



Összefoglalásként megállapíthatjuk, hogy az analitikai módszerek nélkülözhetetlen elemei a lokális leképező módszereknek, a leképezés történjen akár fényvel, elektronokkal vagy pásztázó tűszondával. Az elektronmikroszkópia képviseli a „legérettebb” területet, a fény- és tűsugaras módszerek gyors fejlődése viszont beláthatatlan perspektívákat nyit a biológiai preparátumok és az élő anyag vizsgálatában.

Irodalom

1. POZSGAI I.: *Analitikai elektronmikroszkópia alapjai* – ELTE Eötvös Kiadó, 1996.
2. BODNÁR A., DAMJANOVICH S., VÁMOSI GY.: *Nanotechnológia a biofizikában* – Fizikai Szemle 54/10 (2004) 325
3. KÁLMÁN E., NAGY P.: *Pásztázó tűszondás mikroszkópia* – in Műszaki felülettudomány és orvosi biológiai alkalmazásai, szerk.: Bertóti I., Marosi Gy., Tóth A., B+V Lap- és Könyvkiadó Kft. 2003.