

# MOLEKULANYALÁB-EPITAXIA BERENDEZÉS AZ MTA KFKI RÉSZECSCKE- ÉS MAGFIZIKAI KUTATÓINTÉZETBEN

Tanczikó Ferenc, Major Márton, Nagy Dénes Lajos  
KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest

2003 végén állt üzembe és egy kétéves beüzemelési időszak után 2006 eleje óta működik teljes kapacitással Magyarország első molekulanyaláb-epitaxia (Molecular Beam Epitaxy, MBE) rendszere. Az „epitaxia” a vékonyrétegek növekedésének olyan módját jelenti, amelynek során az egyes – általában kémiaiilag egymástól különböző – rétegek kristályrácsai egymásra illeszkednek, ezért egykristályból készült hordozóra – mint berendezésünkben is – egykristályminták növeszthetők. A kísérleti berendezést a KFKI RMKI szervezte be az Oktatási Minisztérium és a Magyar Tudományos Akadémia anyagi, valamint a vékonyrétegek fizikájával, kémiájával és anyagtudományával foglalkozó magyar kutatóhelyek erkölcsi támogatásával. Az MBE-berendezés beszerzésével Magyarországon jelentősen javultak a felület- és vékonyréteg-kutatások kísérleti lehetőségei, hiszen megfelelő szervezéssel számos kutatócsoport „mintaéhségét” elégítheti ki ez a minta-előállító eszköz. Az RMKI MBE-berendezésének specialitása egy  $^{57}\text{Fe}$  forrás, amely lehetővé teszi Mössbauer-vizsgálatokra alkalmas rétegek előállítását. Az egyetemi oktatás szempontjából sem lebecsülendő, hogy az érdeklődő hallgatók egy csúcstechnológiai berendezésen tanulmányozhatják az ultranagyvákuum-technika szépségeit és ismerkedhetnek meg a mintakészítés rejtelmeivel. Az MBE-berendezés így módon hatékonyan bővíti a hazai felületfizika és vékonyréteg-kutatás már rendelkezésre álló mintakészítési eszköztárát.

Mielőtt rátérnénk az MBE részletes ismertetésre, pár szót kell szólnunk magáról a felületfizikáról. Különböző környezetekben más és más a fogalom jelentése. Ipari alkalmazásoknál a felületükön módosított anyagok (pl. nagy hőállóságú turbinalapátok, motoralkatrészek) vizsgálatát jelenti, míg a másik véglet szerint a felületfizikai kutatás tárgya a tömbi anyagok néhány nm-es felső tartománya, ahol az atomok elhelyezkedése és az elektronszerkezet lényegesen különbözik a tömbi anyagétól. Az MBE felületértelmezése az alapkutatáshoz áll közelebb, hiszen a megvalósítható mintavastagság a 0,01–1000 nm tartományba esik. Itt nem is mindig magán a felületen, hanem a vékony, ezért a megszokott tömbi anyagokétól eltérő tulajdonságú filmek, szerkezetek előállításán van a hangsúly; helyesebb is ilyenkor felületfizika helyett vékonyréteg-fizikáról beszélni. MBE-berendezéseket a gyakorlatban főleg kutatási részlegeknél találunk; ipari alkalmazásra inkább olcsóbb, ám kevésbé precíz módszereket használnak.

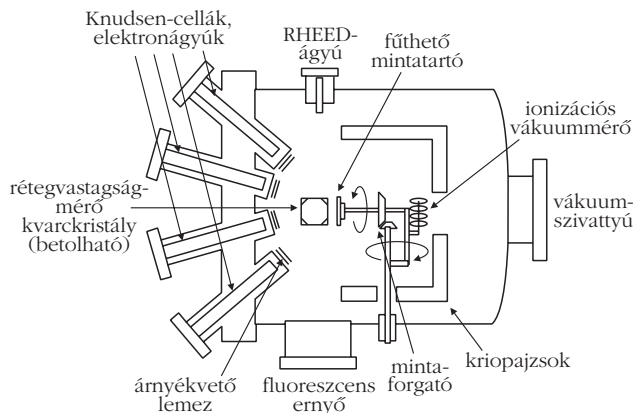
A felületfizika, mint különálló tudományág születése az 1960-as évekre tehető. A terület azóta is tartó terebélyesedése többek között a nagyvákuum-techno-

lógia és a számítástechnika fejlődésének, valamint az újabb és újabb kísérleti módszerek megjelenésének köszönhető. Nem véletlen, hogy az ultranagyvákuum (UHV) a felületkutatás leggyakrabban használt környezete. UHV nélkül lehetetlen tiszta felületeket előállítani, illetve a felület állandóságát biztosítani.

## Az MBE-módszer

A molekulanyaláb-epitaxia egy olyan mintanövesztési módszer, amelynek lényege, hogy a hordozóra ultranagyvákuumban párologtatjuk fel az atomokat, illetve a molekulákat. Az ultranagyvákuum biztosítja, hogy csak az általunk kívánt atomok jussanak a hordozóra, és az ne szennyeződjék maradékgáz-molekulákkal. A „molekulanyaláb” jelző a párologtatás módjára utal. Ellentétben a legtöbb módszerrel, ahol nagyobb anyagcsomókat („klasztereket”) visznek fel egy lépésben, az MBE-nél ténylegesen egyedi atomok, molekulák találhatók a forrástól érkező nyálábban. Az UHV teszi azt is lehetővé, hogy a rétegeket lassan és nagy pontossággal növezzük. A „nanotechnológia” kifejezés itt szó szerint értendő, hiszen nem probléma a nanométer alatti pontosság elérése, sőt atomi rétegvastagság alatti átlagos lefedettséget is meg lehet valósítani. Az RMKI MBE-berendezésének specifikáció szerinti növesztési sebességtartománya a 0,001–0,1 nm/s tartományba esik. Az alsó határ meglepően alacsonynak tűnhet, hiszen az atomok méretének 0,1 nm-es nagyságrendjét figyelembe véve ez azt jelenti, hogy a réteg 1–2 perces párologtatás után vastagodik egy atomnyit. Ezt természetesen nem úgy kell érteni, hogy ennél rövidebb párologtatási idő esetén „atomdarabokat” növesztünk, hanem ilyenkor átlagos lefedettségről van szó (pl. a felület 1%-án vannak atomok). A mérőfej felülete néhány  $\text{mm}^2$ , ami atomi méretekben óriási, ezért nem alakul ki azonnal egy teljes atomnyi vastagságú réteg. A későbbiekben látni fogjuk, hogy a növesztés sebessége tetszőlegesen kicsi lehet, a növesztési idő növelésének csak az ultranagyvákuum minősége szab határt.

Az 1. ábrán egy MBE növesztési kamra vázlatos rajza látható. Az MBE berendezéseknek több típusa létezik a bennük előállított minták anyagfajtai szerint. Leggyakrabban a *félvezető MBE*-t használják, ami a félvezetők kutatásában és gyártásában kerül alkalmazásra. Ilyenkor rendkívül fontos a környezet pormenetsége (tisztaszoba) és a belső rendszer tisztasága. Félvezetők adalékolási szintjeinek pontos beállítása lehetetlen egy „fémmergezt” berendezésen. Az RMKI-ban üzembe állított MBE típusa, a *fém MBE*-t



1. ábra. Egy MBE növesztő kamra vázlatos, nem méretarányos rajza; a főbb egységeket és azok szerepét a cikk második felében részletesen bemutatjuk.

általában az alapkutatásban használják, és az – nevének megfelelően – főleg fémes rendszerek növesztésére szolgál. Ebben az esetben a külső tisztaságra vonatkozó feltételek nem olyan szigorúak, és nem okoznak gondot az MBE-kamra falára párologtatott különféle fémrétegek sem. A különbség tehát alapvetően nem az MBE elvében, hanem az alkalmazott környezeti feltételekben van.

## Vákuumkövetelmények

Amint már említettük, a legfontosabb a jó vákuum biztosítása. Erre egyrészt azért van szükség, hogy a forrásból elpárolgó molekulák egyenes vonalban érjék el a hordozót, másrészt, hogy a szennyező atomok lerakódása lassabb legyen, mint a növesztendő atomoké. Nem elhanyagolható szempont, hogy a már elkészült felületek se szennyeződjenek a mérés alatt. Az ideális eset a nulla szennyező lenne, de ezt természetesen lehetetlen elérni. A szabad úthosszra vonatkozó feltétel már a  $10^{-4}$  mbar nyomástartományban teljesül, míg a szennyezőkoncentráció leszorításához tovább kell mennünk. Ha egynek vesszük a felületet érő molekulák megtapadási valószínűségét, akkor jó közelítésben  $10^{-9}$  mbar nyomás esetén nő egy atomi (vagy

molekula) réteg szennyező a minta felületére egy óra alatt. A  $10^{-9}$  mbar-nál jobb vákuumot nevezzük ultranagyvákuumnak. A vákuumtechnikában a mai napig több mértékegység van forgalomban. A legrégebben és ma is gyakran használt a torr (vagy Hgmm, 1 torr = 133 Pa), utána következik a mbar (1 mbar = 100 Pa), és lassan terjed az SI-ben hivatalos Pa.

Egy pillanatra érdemes még elidőzni a vákuumfel-tételeknél. Az egyetemes gáztörvényből és a kinetikus gázelméletből kapható az egységnyi síkfelületen áthaladó atomok  $I$  fluxusa (Hertz–Knudsen-formula):

$$I = \frac{p(T)}{\sqrt{2\pi m k_B T}},$$

ahol  $p$  a gáz vagy gőz nyomása,  $m$  az atomok tömege,  $k_B$  a Boltzmann-állandó ( $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K) és  $T$  a gáz abszolút hőmérséklete. Az egységnyi térfogatban lévő atomok  $n$  számát az egyetemes gáztörvényből kapjuk:

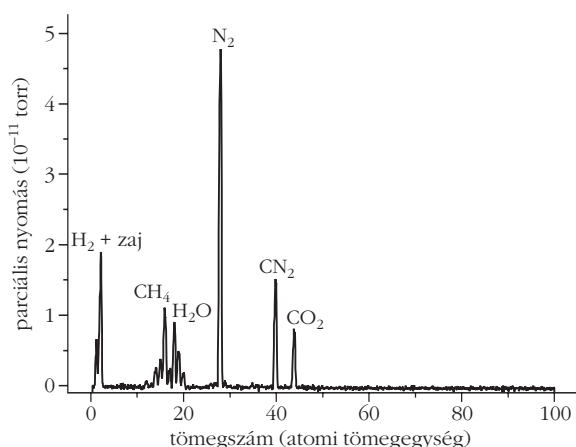
$$n = \frac{p}{k_B T}.$$

Nitrogénmolekulákra, mint a légkör fő alkotójára számolva légköri nyomáson körülbelül  $2 \cdot 10^{19}$  molekula található köbcentiméterenként, és másodpercenként  $3 \cdot 10^{23}$  érkezik belőlük egy négyzetcentiméterre.  $10^{-9}$  torr nyomáson, ami a normál nyomásnál 12 nagyságrenddel alacsonyabb, még mindig körülbelül  $2 \cdot 10^7$  molekulát találunk köbcentiméterenként, azaz még messze nem üres a térfogat. Az UHV-feltételek megteremtése mégis nagy körültekintést igényel, mert nemcsak a légkört kell kizárni, hanem az UHV-edényben lévő szilárd anyagok párologását is minimalizálni kell. Szerencsére a fejlődés a vákuumtechnológia terén is töretlen, például a KFKI RMKI növesztő rendszerének alapvákuuma  $10^{-10}$  mbar nagyságrendű (2. ábra).

Az UHV biztosításához nélkülözhetetlen, hogy csak alacsony gőznyomású és kihevíthető anyagokból építkezzünk. Kamrát rozsdamentes acélból, tömitéseket oxigénmentes rézből, elektromos szigetelőket kerámiából készítenek. Az ablakok anyaga speciális üveg. Az alacsony nyomás eléréséhez kerülni kell a levegő-zsákok, gázcsapdák beépítését is. Olaj sem kerülhet az UHV-térbe, ezért az elővákuum-szivattyúk kenését speciális (UHV-kompatibilis) zsírokkal végzik. Az UHV-környezet tisztán tartása a megfelelő anyagkiválasztáson túl magas szintű munkafegyelmet is követel. A kamrába bekerülő mintákat, alkatrészeket csak egyszer használatos gumikesztyűben szabad megfogni, hogy elkerüljük a rendszer zsírosodását.

Az MBE-berendezés leszívása több lépcsőben történik. A mai modern rendszerekben rotációs szivattyúk és turbomolekuláris („turbó”) szivattyúk csökkentik a nyomást az ionszivattyúk (vagy iongetter-szivattyúk) által elfogadható ( $\sim 10^{-5}$  mbar) szintre. Az ionszivattyúk az esetleges kisegítő szublimációs szivattyúkkal már átfogják a szükséges munkatartományt. A növesztési kamrában az alapvákuumon kívül fontos, hogy mintanövesztéskor a lehető legkevesebb szenny-

2. ábra. Egy tipikus tömegspektrum az alapvákuumról



nyező legyen jelen, illetve, hogy a nem a mintára jutott növesztendő atomok se szennyezzék a következő rétegeket. Ezt egy kriopajzs segítségével érhetjük el, ami nem más, mint egy belső edény, amelyet folyékony nitrogénnel töltünk meg. A bélésnek ütköző molekulák nagy valószínűséggel adszorbeálódnak a hideg felületen, akár egy nagyságrenddel is javítva a vákuumot.

Normál üzemben a rendszert csak a mintaszilipeknél kell megnyitni (légköri nyomásra hozni), azonban időnként javítani kell, illetve új anyagokat kell tölteni a forrásokba. Ekkor fontos, hogy száraz nitrogénnel töltsük fel az UHV-tereket, mert a vízgőz nagyon makacs szennyező. A túl gyakori nyitás azért is hátrányos, mert az ion- és szublimációs szivattyúk élettartama fordítva arányos a nyomással.

## Párolgatótechnikák

Az RMKI-ba telepített berendezés fémes MBE, így főleg fémgőzők előállítására a cél. Fém párolgatót a szilárd elem melegítésével lehet. Ez történhet ellenállásfűtéssel; ilyenkor (pl. wolfram esetén) maga a növesztendő anyag is adhatja a fűtőszálát, az azonban többnyire az elpárolgató anyagot, illetve az azt tartó csónakot veszi körbe. A párolgató történhet közvetlen elektronbombázással is; ez az elektronnyalábos párolgató, vagy elektronágyú. A legtöbb MBE-ben mindkét módszert alkalmazzák. A két eljárás két teljesen különböző párolgató forrás tartozik, melyek függetlenül működnek, de több anyag egyszerre történő párolgatója esetén egyidejűleg is használhatók.

A tégelyből való párolgató egyik legrégebbi formája a Knudsen-cella, elterjedt jelöléssel K-cella. A K-cella az effúziós cellák egy speciális formája. Az eredeti effúziós cella egy, a térfogatához viszonyítva apró lyukkal ellátott edény, amelynek a belsejében található a forrás. A forrás melegítésével kialakul a cellában az adott hőmérsékletre jellemző egyensúlyi gőznyomás, amit elhanyagolható mértékben módosítanak a nyíláson át távozó atomok. A cellából kilépő atomok szögeloszlása  $\cos\varphi$ -vel arányos, ahol  $\varphi$  a nyílás normálisával bezárt szög. Az intenzitás egyenesen arányos továbbá a gőznyomással és a lyuk méretével is. A ma használt cellák alakja általában cső vagy kis nyílásszögű tölcsér. A kilépő nyaláb szögeloszlását a fűtőszálak elhelyezkedése és a forrást tartó tégely alakja határozza meg.

Az elektronágyú esetében a nagyfeszültségű katódról kilépő elektronokat mágneses térrel térítjük el a forrás felszínére. Az elektronbombázás hatására az elpárolgató anyag, ami egy réz csészében foglal helyet, megolvad. A csésze része a vízűtéssel ellátott réz tartótömbnek; az állandó hűtés hatására csak a forrás teteje párolog, a többi anyag kibéleli a csészt, ezért a csésze anyaga nem szennyezi a forrást. Az elektronágyú másik előnye a dinamikus állítható növesztési sebesség. Míg az effúziós cellák nagyon

stabilak, de növesztési sebességük lassan változtatható, addig az elektronágyú rendkívül jól szabályozható, viszont a párolgás (olvadás) instabilitásai miatt nehezebb vezérelni. Az effúziós cellának elég egyszer felvenni a cellahőmérséklet-növesztési sebesség görbét, ezzel szemben az elektronágyú állandó szabályozást igényel. Másik hátránya, hogy a párolgás szabad felületről történik, így a horizont fölötti térszében minden irányban ugyanakkora az anyagáram. A számunkra szükséges irányok kiválaszthatóak ugyan az ágyú fölé helyezett hűtött védőpajzson lévő nyílásokkal, azonban az anyag nagy része a védőpajzsa nő rá. Ez a „pazarlás” csak drága anyagoknál jelent gondot. Ugyanakkor az elektronágyú több tégelyt is tartalmazhat egyszerre, melyek válthatók. Ezáltal a vákuumszisztéma megbontása nélkül lehet cserélni a növesztendő anyagot; erre a K-cella esetén nincs mód.

## A növesztési sebesség mérése

A legáltalánosabban használt eszköz a kvarc oszcillátor [1]. Ez a nanoméretű használat ki, hogy a kvarckristály sajátrezgéseinek elhangolódása arányos a kvarcra növesztett tömeggel. Az RMKI-ban működő MBE-berendezés esetében a 6 MHz-cel rezgő kvarc 0,03 Hz-es frekvenciaváltozása is mérhető, ami 0,375 ng/cm<sup>2</sup> pontosságot tesz lehetővé. Ez megfelel például 1,4 pm (!) alumíniumnak, vagyis a növesztésnek gyakorlatilag nincs alsó sebességhatára. (Az atomméret alatti rétegvastagság ebben az esetben is részleges lefedettséget jelent.)

A főleg maradékgáz-analízisre (2. ábra) használt kvadrupól tömegspektrométer (residual gas analyser: RGA, vagy más néven quadrupole mass spectrometer: QMS) is használható a növekedési ráta mérésére. A tömegspektrométer elektronok segítségével ionizálja a mérőnyíláson áthaladó atomokat, molekulákat, majd tömeg/töltés szerint osztályozza őket. Mivel az egyszerű ionizáció a leggyakoribb, ezért mondhatjuk, hogy az atomok tömegét mérjük. Az egyes atomokra, molekulákra azok ionizációs hajlama szerint érzékeny. A tömegspektrométert nyomás mértékegységben kalibrálják, mivel maradékgáz-analízisnél az összetétel mellett az alkotó gázok parciális nyomása is fontos információt jelent. Az RMKI MBE-berendezésében használt HIDDEN tömegspektrométer alsó mérési határa a 10<sup>-13</sup> mbar nagyságrendbe esik. Az MBE-berendezés egyik első kalibrálása során megmutattuk, hogy például molibdén esetén már 1 pm/s növesztési ráta is kimutatható. Ennél alacsonyabb növesztési sebesség is tisztán látszik a QMS-spektrumon, ami nem meglepő, ha tudjuk, hogy az előző rátához 10<sup>-11</sup> mbar parciális nyomás tartozik.

A sebességmérés utolsó tisztázandó kérdése a mérés helye. Ideális esetben a mintán, illetve annak helyén mérjük a vastagságokat. Az előbb részletezett méréseknél vagy a minta helyén mérünk, de akkor nem tudunk növesztetni, vagy máshol mérünk, de akkor geometriai faktorokat és bizonytalansági ténye-

zőket kell figyelembe vennünk. Utóbbi esetben a mért értékeket a geometriai faktorok figyelembe vételével számoljuk át mintanövekedési sebességgé.

## A növesztési folyamat

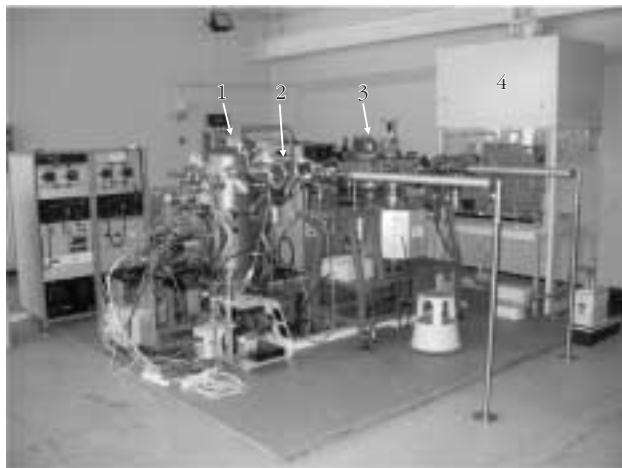
A növesztési környezet készen áll, jöhet a minta, azaz a tiszta felület. A hordozó tisztítása, vagyis a szennyezőmentes felület előállítása történhet kémiai és fizikai tisztítással. A savfürdő, az ultrahangos mosás és a hordozó UHV-ban történő kifűtése mind általánosan használt segédeszközök a tiszta, szennyező- és hibamentes atomi felület előállítása érdekében. Hasítható kristályok esetében az UHV-ban történő hasítás adja a legtisztább, ugyanakkor nem a legsimább felületet. Szintén a vákuumon belül alkalmazható az ionbombázás, amely eltávolítja a szennyezőket, de a hordozó kristályszerkezetét is roncsolhatja. A keletkezett hibák többszörös kifűtéssel helyrehozhatóak.

Maga a növesztési folyamat a forrásból elpárolgó atomok kondenzációja a hordozó felületén. A felületre érkező atomok első lépésben fiziszorbeálódnak, azaz kezdeti kinetikus energiájukat elvesztve már csak a felületen tudnak elmozdulni. Ezt követi a kemisorpció, melynek során a beérkező atom véglegesen kémiai kötésbe lép a felülettel. Az MBE-növesztés atomos (molekuláris) jellege és lassú párologtatási sebessége lehetővé teszi, hogy a felületre érkező és ott megtapadó atomok szabályos kristályszerkezetet alkossanak. Túl nagy sebesség, vagy túl alacsony hőmérséklet esetén ugyanis nincs az atomoknak idejük megkeresni az energiaminimumnak megfelelő pozíciót; ilyenkor amorf réteget kaphatunk. Megfelelően választott elemi cellájú egykristály-hordozó esetén a növekvő réteg illeszkedik a hordozó atomszerkezetéhez; az atomrácsok mintegy „folytatják egymást”. Ilyenkor beszélünk epitaxiális filmről. Az epitaxia több, egymásra párologtatott réteget tartalmazó szerkezeteknél (multirétegeknél) is megvalósítható; ezek a szuperrácsok.

## A KFKI RMKI MBE-berendezése

A 3. ábrán látható a KFKI RMKI MBE berendezése. A rendszert a francia MECA 2000 cég szállította. Specifikációja szerint maximum 2 hüvelykes minták növesztésére alkalmas. Az UHV-berendezés négy, egymástól hermetikusan elzárható egységből és egy hordozható UHV-mintatartóból áll. Az egységek: a mintazsilip, az előkészítő kamra, a növesztő kamra és az őket összekötő cső (3. ábra).

A zsilip pormentességét a köré kiépített lamináris fülke biztosítja. A hordozókat rögzítő 2 hüvelyk átmérőjű molibdéntömböt (mintatartót, „moliblokkot”) egy mágnesesen mozgatható vasút segítségével juttatjuk a mintazsilipből a kamrákat összekötő csőszakaszba. A csövön lévő manipulátorkarokkal lehet a mintatartót az előkészítő és a növesztő kamrába juttatni. Az elő-



3. ábra. A KFKI RMKI MBE-rendszere: növesztő kamra (1), összekötő cső (2), előkészítő kamra (3), lamináris fülke (4)

készítő kamrában fűthetők ki a hordozók maximum 1100 °C-on. Ide csatlakozik a hordozható mintatartó is. A hordozható tartóban egy moliblokk helyezhető UHV-környezetbe és szállítható más mérésekhez. Az akkumulátoros ionszivattyú 36 órán át biztosítja a  $2 \cdot 10^{-9}$  mbar-nál jobb vákuumot.

A vonatra visszahelyezett minták a mágnesekkel a főkamráig húzhatók, ahonnan a mintatartó a merőleges manipulátorkar segítségével a növesztőkamrába helyezhető. A hordozó hőmérséklete itt is szabályozható, éspedig szobahőmérséklettől 900 °C-ig. Legfeljebb 5 percig és mintaforgatás nélkül 1250 °C-ot is el lehet érni. A minta forgatható, ami elősegíti a homogén növesztést. A homogenitás geometriailag is biztosított, hiszen a források körülbelül 40 cm-re vannak a hordozótól. Beépítésre került egy lineárisan mozgatható retesz is, ami megengedi, hogy azonos UHV-körülmények között mintasorozatokat készítsünk egy-egy paraméter (pl. rétegvastagság, rétegsorrend) módosításával, illetve lehetővé teszi „ékes”, vagyis olyan minták előállítását, amelyekben egy-egy réteg vastagsága a minta síkjában egy adott tengely mentén helyről-helyre folyamatosan változik. A források és kvarckristályok előtt pneumatikus reteszek találhatók, a növesztett mintákban így biztosítható a különböző anyagrétegek közötti éles átmenet.

Az MBE-berendezést kezdettől fogva igyekeztünk a legszélesebb körű felhasználásra alkalmassá tenni. Ennek megfelelően két, egyenként négy csészét tartalmazó elektronágyú került beépítésre. A négy effúziós cellával így összesen tizenkét különböző anyag lehet a rendszerben, amiből öt együttesen is növeszthető. Az egyik effúziós cella speciális, kettősfalú, hidegajkú, Al növesztésére, a másik hárommal jelenleg Au, Ag és  $^{57}\text{Fe}$  párologtatható. Az UHV-edényben még egy effúziós forrás és egy gázforrás (pl. oxigénforrás) számára van hely. Jelenleg az egyik elektronágyúban Gd, Si, Cr és Pd, a másikban Mo, Cu, Co és Fe foglal helyet. A rendszeren kívül pillanatnyilag Ti, W, Ni, Nb, Pt, Ge és V áll rendelkezésünkre, de a legtöbb fém elektronágyús növesztése nem okoz problémát. A mintanövesztés specifikált sebességartománya 10–

100 pm/s, kivéve a kis térfogatú Au és  $^{57}\text{Fe}$  cellákat, ahol a források ára miatt kisebb (max. 15 pm/s) rátát írtunk elő.

A növesztési sebességet kvarc oszcillátor és kvadrupól tömegspektrométer méri. Az effúziós cellák sebességét egy, a minták helyére betolható kvarckristály méri, míg az elektronágyúkat két, az ágyúk közelében lévő kvarckristály szabályozza, és a szintén mozgatható kvadrupól tömegspektrométer monitorozza. A tömegspektrométer a két ágyúra merőleges vonalon mozog, és mérőnyílásai úgy vannak beállítva, hogy mindkét ágyút egyszerre lássa.

Megfelelő *in situ* felületi minőségellenőrzés nélkül az MBE-berendezés „vak”. A nagyenergiájú, kisszögű elektrondiffrakciót (Reflection High-Energy Electron Diffraction, RHEED) használjuk a mintanövesztés ellenőrzésére. A 10–50 keV-es elektronok a kis beesési szög miatt csak a minta felső néhány atomi rétegébe jutnak be, és onnan szóródva főleg a legfelső atomrétegről, a felületről adnak információt. Megmutatják a síkbeli kristályszimmetriát, az elemi cella élhosszait és a növesztett réteg minőségét. Segítségükkel különbséget lehet tenni amorf és egykristályszerkezet között, és általuk a felület érdekessége is vizsgálható. Megfelelő vékonyrétegrendszerek esetében a RHEED-intenzitás oszcillációjából meghatározható egy-egy atomsík elkészülte. A RHEED-képet az elektronok foszforeszkáló anyaggal bevont ernyőre vetítik. Az RMKI MBE-berendezésében 12 keV-es STAIB gyártmányú RHEED-ágyú üzemel.

## Az elkészült minták minősítése

Az elkészült minták vizsgálata történhet UHV-ben, illetve *ex situ*, légköri nyomáson. Jelenleg az RMKI MBE-berendezéséből a minták a különféle mérőhelyekre hordozható UHV-kamrában juttathatók el. A hosszútávú tervekben szerepel az MBE-rendszer bővítése is, például CEMS (konverziós elektron Mössbauer-spektroszkópiái) és alagútmikroszkópiái mérőkamrák UHV-illesztésével. Nem minden rendszer és vizsgálat követeli meg a nagyvákuum-feltételeket. Jó minőségű, ámbár nem atomi felbontású atomerőmikroszkóp-felvételek készülhetnek például légköri nyomáson, mágneses vizsgálatok során pedig legtöbbször nem az atomi felület vizsgálata a cél. Az MBE-berendezésben gyártott vékonyrétegek minősítésére rendkívül hasznosak az ionnyaláb-analitika különféle módszerei, például a Rutherford-visszaszórás (Rutherford Backscattering, RBS). RBS-sel megmérhető az elemeloszlás mélységprofilja, így lényegében az egyes rétegfajták, vagy – kedvező esetben – külön-külön az egyes rétegek tényleges vastagsága. A csatornahatással kombinált RBS a minta epitaxiális jellegéről ad felvilágosítást. További fontos minősítési eljárás a röntgenszórás. Nagyszögű röntgendiffrakcióval a minta kristályszerkezetéről nyerhetünk információt. A surólóbeeséses röntgenszórás a felső atomi rétegekre érzékeny, kiválóan alkalmas a multirétegek, mint fil-

mek tulajdonságainak meghatározására. A röntgenreflektometria – az RBS-hez hasonlóan – az elemeloszlás mélységprofiljáról ad (az RBS-től eltérő jellegű) információt; a két módszer igen jól kiegészíti egymást.

## Alkalmazási területek

Az MBE-vel kapcsolatban nemcsak az atomi felületekről beszélhetünk, hanem legalább ugyanilyen súllyal kell szólnunk a vékonyréteg-kutatásról is [2]. A vékonyrétegeknél a tömbi hordozóra párologtatott filmek, szerkezetek legalább olyan érdekesek, mint maguk a felületek. Tömbi formában nem stabil kristályszerkezetek, nemegyensúlyi fázisok, tetszőleges sorrendben növesztett, atomi rétegek tárnak fel újabb és újabb felfedezendő világokat. A háromdimenziós világból legalább az egyik dimenzió tekintetében átlépünk a nanovilágba. Az MBE-módszerrel készült filmek tovább strukturálhatók; például elektronmaratással eljuthatunk a nanohuzalokig, nanopöttyökig, amivel lehetővé válik a kvantummechanika kísérleti tanulmányozása. Az MBE-berendezésben növesztett rétegeknél a fizikai törvények határain belül csak képzeletünk szab határt a növesztett rendszer paramétereinek megválasztásában. Egyesíthetők például előnyös optikai, szerkezeti és mágneses tulajdonságok. Lehetetlen felsorolni az összes MBE adta lehetőséget, azt azonban kijelenthetjük, hogy a nanotechnológia az alapkutatástól a gyártósorokig egyre fontosabb szerepet tölt be az élet minden területén. Kiragadott példaként egy jelenséget és az ahhoz kapcsolódó kutatásainkat említjük.

Az atomi mágnesség jelenségköre régóta foglalkoztatja a kutatókat. A nanotechnológia ebben is tudott újat mutatni. Sikerült például az atomi antiferromágneses rend mintájára mágneses vékonyfilmek rétegeit is egymással antiferromágnesesen csatolni. Az antiferromágneses beállítás külső mágneses térrel megszüntethető, és – mint kiderült – a mágneses állapot megváltozásával együtt jár a minta nagymértékű ellenállás-változása. A jelenséget óriás mágneses ellenállásnak (Giant Magnetoresistance, GMR) keresztelték, megkülönböztetésül a mágnesesen indukált ellenállás-változás korábban ismert fajtáitól. A GMR jelenséget 1989-ben fedezték fel, és azóta eljutott a legkülönbözőbb alkalmazásokig.

Az antiferromágneses beállást Fe/Cr vékonyrétegeknél mutatták ki először, és napjainkban nagyon sok különböző mágnesesen csatolt rendszer és különféle mágneses rendek kutatása zajlik. Viszonylag kevesen foglalkoznak ugyanakkor az antiferromágnesesen erősen csatolt multirétegek doménszerkezetével. Az ok egyszerű: az egymás fölött elhelyezkedő ferromágneses filmek adott helyen lévő mágneses doménjeinek eredő mágnesezettsége az antiferromágneses csatolás következtében zérus. Ahhoz, hogy a doménszerkezetet megismerjük, speciális mérés technikai eljárásokra van szükség. Az antiferromágneses domének fázisátmeneteit sikerült megfigyelniünk szinkro-

ron Mössbauer-reflektometriával [3], MBE-módszerrel növesztett,  $^{57}\text{Fe}$  izotópot tartalmazó Fe/Cr mintával. Kihasználtuk a minta epitaxiális voltát és a kristályszerkezetből adódó mágneses anizotrópiákat.

## Összefoglalás

Az RMKI MBE-berendezésének segítségével Magyarországon is készülhetnek a vékonyréteg-kutatáshoz nélkülözhetetlen, megfelelő minőségű minták. A berendezés fémes rétegek tetszőleges kivitelben való készítésére alkalmas, legfeljebb 2 hüvelykes ( $d = 5,08$  cm) mintaméretig és ésszerű mintavastagságig (legfeljebb  $1\ \mu\text{m}$

ig). Csoportunk alkalmazott magfizikai irányultságának megfelelően a készülék egy  $^{57}\text{Fe}$  forrást is tartalmaz, amely lehetővé teszi Mössbauer-érzékeny filmek készítését. A minták UHV-transzportjára hordozható kamra áll rendelkezésre, illetve a védőréteggel ellátott vékonyrétegek levegőn is vizsgálhatóak. Az MBE berendezés a [tancziko@rmki.kfki.hu](mailto:tancziko@rmki.kfki.hu) e-mail címen, vagy a 06-1-392-2222/1280-as telefonszámon történt előzetes időpont-egyeztetés után megtekinthető.

## Irodalom

1. Inzelt György, *Természet Világa* 134/9 (2003) 404
2. Csik Attila, *Fizikai Szemle* 53/6 (2003) 207
3. Nagy Dénes Lajos, *Fizikai Szemle* 47/5-6 (1997) 150

# ÉPÍTŐANYAGOK RADIOAKTÍV SUGÁRZÁSA

Sós Katalin

SZTE Juhász Gyula Pedagógusképző Kar,  
Fizika Tanszék

Napjainkban egyre többet foglalkoznak a környezetvédelem problémáival, ezen belül lakókörnyezetünk állapotával. Így egyre inkább előtérbe kerül a lakóépületekben, illetve a munkahelyeken mérhető radioaktív sugárzás vizsgálata is. Ezt az is indokolja, hogy az embereket érő radioaktív háttérsugárzás igen nagy százalékanak forrása az épített környezet. A mérések szerint világátlagban a háttérsugárzás effektív dózisének 60%-a, magyarországi átlagban pedig 75%-a az épületektől származik. Szintén az épített környezetnek tulajdonítható az a tény is, hogy hazánkban – és a többi mérsékelt égövi országban egyaránt – nagyobb a háttérsugárzás mértéke, mint a lakossággal súlyozott világátlag. Az éghajlat és az életmód miatt ugyanis ezeken a területeken éves átlagban a lakosság idejének 80%-át épületekben tölti. Ennek megfelelően a hidegebb területek országaiiban az effektív dózis értéke még nagyobb, és az épületek szerepe is jelentősebb.

## Az építőanyagok radioaktivitása

Az épített környezettől származó dózis megadásához ismerni kell a különböző építőanyagok radioaktivitását, amit elsősorban az összetételük, pontosabban az urán-, a tórium- és a káliumtartalmuk határoz meg. (A kálium az elem 0,01%-át alkotó  $^{40}\text{K}$  izotóp miatt jelentős.) Emellett figyelembe kell venni az építőanyag porozitását is, mert főképpen ettől függ, hogy az  $^{238}\text{U}$  bomlásából származó  $^{222}\text{Rn}$  (radon), illetve a tórium bomlásából származó  $^{220}\text{Rn}$  (toron) milyen mértékben képes kidiffundálni az anyagból. Nagy porozitás esetén a radonizotópok könnyen kilépnek az anyagból, radioaktív bomlásuk már a külső közegben játszódik le, így az építőanyag radioaktivitása kisebb, mint amekkora az összetétele alapján várható lenne.

Az építőanyagok radioaktivitására vonatkozó első átfogó vizsgálatot Lengyelországban végezték az 1960-as években, amelynek során építőanyagok összgamma-radioaktivitását határozták meg.

Az adatok szerint legnagyobb fajlagos gammaaktivitással a kazánsalak, a pernye és a kohósalak rendelkezik, ezt követik a különböző téglák, majd a cement, a beton, a gipsz és végül a mész és a mész (1. ábra) [1].

A salak és a pernye magas aktivitása megfelel a várokozásnak, mivel a kőszénben található radioaktív elemek ezekben halmozódnak fel. A téglák viszonylag nagy radioaktivitása összetételükkel magyarázható. A téglagyag 30–60%-ban tartalmaz agyagásványokat, emellett homokot, kalcium-karbonátot és különféle oxidokat. A homok radioaktivitása általában kicsi – kivéve, ha magas cirkon-, monacit- vagy xenotimtartalmú –, a kalcium-karbonát aktivitása szintén alacsony.

1. ábra. Különböző lengyelországi építőanyagok fajlagos gammaaktivitása [1]

