

RÉTEGÉPÍTÉS ATOMI PONTOSSÁGGAL A MIKRO- ÉS NANOTECHNOLÓGIÁBAN

Baji Zsófia, MTA TTK MFA

Mikula Gergő János,* BME VBK, MTA TTK MFA

Az atomi rétegleválasztás (Atomic Layer Deposition – ALD) módszer egy kémiai rétegepítési eljárás, amely váltakozva végbemenő felületi reakciók sorozatából áll. A folyamat során a reagensek – prekursorok – felváltva, pulzusszerűen kerülnek a reaktortérbe, kemisorbeálódnak¹ a hordozó felületén, és ott reakcióba lépnek egymással. A nem kemisorbeálódott molekulák eltávolítására a reaktort a pulzusok között semleges gázzal tisztítják, ezért reagensek csak a hordozó felületén találkoznak, és atomi rétegenként építik fel a filmet.

Az ALD, vagy ahogy akkor hívták, az atomi réteg epitaxia (ALE) eljárás ötletét egy orosz kutatócsoport publikálta először az ötvenes években *Koltsov* és *Aleszkovszkij* professzorok vezetésével. A gyakorlati megvalósítás azonban 1974-ig váratott magára, amikor a finn *Tuomo Suntola* kutatócsoportjának sikerült elektrolumineszcens kijelzőkben² alkalmazható ZnS-réteget előállítani. Ezekhez nagy felületű és kiváló minőségű lumineszcens dielektrikum-filmeket kellett leválasztani, és ez abban az időben csak az ALD-módszerrel volt lehetséges. Ezután még a hetvenes években több különböző, az ipar számára is használható reaktorkonstrukcióval is előálltak. Eredetileg a módszert III-V és II-VI vegyület-félvezetők epitaxiás leválasztására tervezték, de nem terjedt el a megvalósítandó bonyolult felületi kémia miatt [1]. Ezen kívül a rétegnövekedés lassúsága is az elterjedés ellen szólt, de ahogy a félvezetőipar miniaturizálása elvezetett az atomi szinten kontrollált, 1-10 nm vastagságú vékonyréteg leválasztásának igényéhez, ez a hátrány előnyvé változott. Így az ALE újabb felhasználási lehetőségekre talált a félvezetőiparban. Mára a módszer számos különböző tulajdonságú film leválasztására vált alkalmazható: lehetőség nyílik fém-oxidok (például: Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO), fém-nitridek (például: TiN, WN), fém-szulfidok (például: ZnS) és bizonyos fémek elemi (például: Ru, Ir, Pt) vékonyrétegének kialakítására is. Ma már tucatnyi neves cég gyárt kísérleti és ipari ALD-berendezéseket.

A sokkal szabatosabb ALD elnevezés a kétezres évek elején terjedt el, ami elsősorban annak köszönhető, hogy az integrált áramkörök méretcsökkenése miatt ez a technológia meghatározó szerepet játszik

a kapuelektrodák és kapacitások szigetelő rétegének, valamint diffúziós gátak³ előállításában. A módszerrel készített vékonyrétegek többnyire nem egykristályosak, hanem amorf vagy mikrokristályos szerkezetűek.

Az ALD mechanizmusa

Az ALD-folyamat négy jól elkülönített lépésből áll, amelyek egymás utáni ciklikus ismétlődése során megy végbe a rétegepítés (*1. ábra*).

1. Az első, gáz halmazállapotú prekursor belép a vákuumtérbe és kemisorbeálódik a hordozó felületén. Az ALD-folyamat feltétele, hogy a felületen található hidroxil- vagy más felületi funkció csoporttal végbemenő kapcsolódás játszódjék le.

2. A nem kemisorbeálódott prekursormaradványokat tiszta, inert gáz (általában nitrogén) öblíti ki a reaktorból.

3. A felületen megkötött prekuzorral a következő lépésben beengedett reagens reakcióba lép.

4. Egy újabb öblítés eltávolítja az el nem reagált alapanyagokat valamint a melléktermékeket a rendszerből.

Egy ilyen ciklus eredménye elvben tehát egy atomi, illetve molekuláris réteg épülése a hordozó felületén. A módszer alapja, hogy csak a felület és az adszorbátum között tud erős kémiai kötés kialakulni, a prekursorok között a kötés gyenge. Ebből következően a réteg minden ciklusban ilyen mértékben vastagszik. A *2. ábrán* látható az ALD-vel növesztett vékonyréteg növekedési sebessége a leválasztási hőmérséklet függvényében. Látható, hogy egy adott hőmérséklet alatt nem kemisorpció, hanem kondenzáció⁴ történik, egy adott hőmérséklet felett pedig már nem kontrollálható a növekedés. Az ALD-ablak jellemzően 100–400 °C leválasztási hőmérséklet-tartományba esik.

Az ALD-vel kapcsolatos leggyakoribb tévhit, hogy a módszer eredményeképpen valóban pontos, atomi rétegenként növekvő filmet kapunk. Annak, hogy ez mégsem valósul meg, elméleti okai vannak. Az ALD

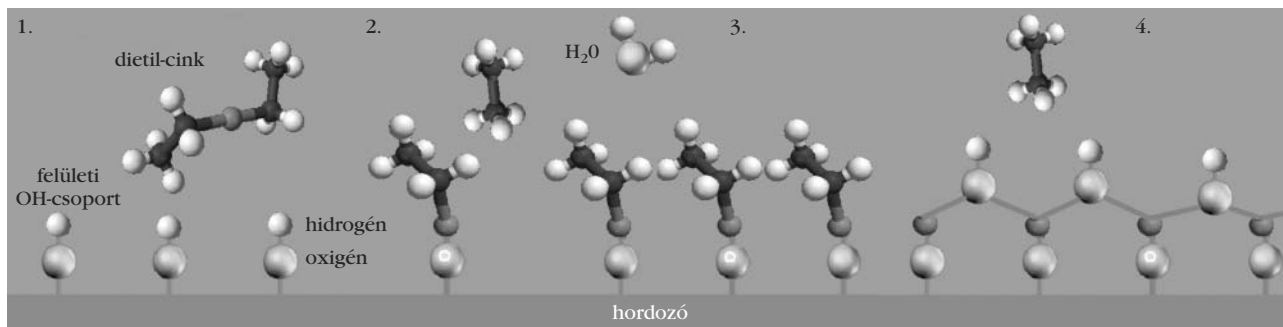
* egyetemi hallgató

¹ A *kemisorpció* az adszorpció egy fajtája, amikor a folyadékban vagy gázban található atomok, molekulák vagy ionok egy szilárd felületen kémiai reakció révén kötődnek meg.

² Az *elektrolumineszcencia* optikai-elektromos jelenség, amelynek során az anyag a rajta áthaladó áram vagy a rá ható elektromos tér hatására fényt bocsát ki. Ez a jelenség felhasználható kijelzők és fénytestek készítéséhez.

³ Valamely két anyag között kialakított *diffúziós gát* egy olyan réteg, ami meggátolja vagy hátráltatja az általa elválasztott komponensek diffúzióját.

⁴ A két jelenség közötti fontos eltérés, hogy kondenzáció esetén az azonos, kemisorpció esetén pedig az eltérő atomok, illetve molekulák kölcsönhatása jelenti a hajtóerőt. Egy felületen bármilyen, kritikus hőmérséklete alatti gáz kondenzálódhat, viszont a kemisorpcióhoz specifikus kölcsönhatások szükségesek a felület és a gáz molekulái között.



1. ábra. Az ALD mechanizmusa a ZnO növekedés példáján bemutatva.

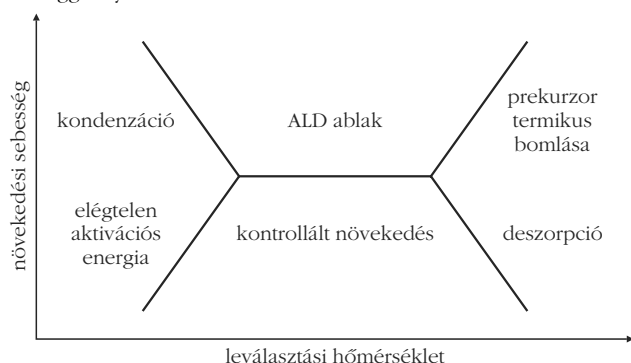
rétegleválasztás során kemiszorpció megy végbe, amelynek során az adszorbeálódott anyag mennyisége a reagens parciális nyomásától, az expozíciós időtől és a kötési helyek számától függ. Az úgynevezett „ALD-ablakon” belül a folyamat lezajlását az első két paraméter nem befolyásolja, így csak az adszorpció helyek sűrűsége a kérdéses tényező. Mivel a kemiszorpció csak adott kötési helyeken megy végbe, és ezek eloszlása nem ideális, továbbá a prekursor-molekulák nagy méretüknél fogva több kötőhelyet is lefedhetnek, ezért az ALD-módszerrel elérhető növekedési sebesség csak a legkritikább esetben egy atomi réteg ciklusonként [2]. A módszer alkalmas különböző anyagú rétegek egymásra leválasztására is, de az egyik anyag után a másik leválasztásakor az eltérő kemiszorpció tulajdonságok miatt az első néhány ciklusnál a növekedési sebesség kisebb lehet.

A módszer előnyei és hátrányai

Bár a leválasztási folyamat hőmérséklete erősen függ a hordozó és a reagensek anyagi minőségétől, azonban általánosan elmondható, hogy a leválasztás akár szobahőmérsékleten is végbemehet. Ekkor egyrészt elkerülhető a prekursorok gáztérbeli termikus bomlása, másrészt hőmérsékletre érzékeny anyagokon, például polimereken vagy biológiai mintákon is lehet vékonyréteget kialakítani.

A módszer másik nagy előnye, hogy kontrollált módon növeszthető egyenletes réteg strukturált, nem

2. ábra. A növekedési sebesség ábrázolása a leválasztási hőmérséklet függvényében.



sík hordozókra (például összetett 3D szerkezeteken vagy pórusos felszíneken, árkok, üregek falán) is. Ehhez azonban az adott folyamat mechanizmusának figyelembe vétele mellett a leválasztási paraméterek körültekintő beállítása, például az egyes perkurzor és öblítő lépések (pulzusok) hosszának optimalizálása is szükséges. Az ALD-módszer rendkívül előnyös, hiszen így összetettebb nanométeres struktúrák kialakítását is lehetővé teszi.

Az egyes reagensek bevitele a reaktortérbe pulzuszerű és időben elválik egymástól, így ezzel a módszerrel adalékolt félvezetők, többretegű rendszerek, vagy akár réteg vastagsága mentén változó összetételű filmek is kialakíthatóak.

Megfelelő technológiai körülmények között ALD-technikával tetszőlegesen nagy felületen alakíthatók ki rétegek, egyszerre akár több hordozón is, így a hordozó méretének növelése az ipari alkalmazásokban nem jelent akadályt.

Az ALD megvalósítása – berendezések

A legtöbb ALD-reaktor csökkentett nyomáson működik. Több különböző ALD reaktorgeometria létezik. Az egyik típusnál a reagensek vívógáz nélkül kerülnek a kamrába, majd az adszorpciót követően azokat vákuumszivattyú távolítja el a rendszerből. Ez a módszer jól kihasználja a reaktorba juttatott prekursor mennyiséget, viszont vívó- és öblítőgáz híján nagyon sokáig tart a reagens feleslegének kiürítése.

Másik fajtája az átáramlásos reaktor, amelyben a reagenseket valamilyen vívógáz szállítja, folyamatos áramlással öblítve a reaktorteret. A nagy gőznyomású reagensek egyszerűen adagolhatók a vívógázba. Szilárd vagy folyékony forrás esetén a vívógáz átáramlik a forrás fölött vagy – alacsony gőznyomású folyadékok esetén – rajta keresztül és telítődve magával viszi a reagenseket, majd később a reakciótermékeket is. Ez a típus gyors gázimpulzusokat és öblítést, ezáltal rövid ciklusidőt tesz lehetővé. Az átáramlásos reaktorokban a jellemző nyomás 1-10 mbar közötti, ami korlátozza a rétegpülési folyamat monitorozását.

Az ALD legegyszerűbb válfaja a termikus ALD, ahol a prekursorok fűtött hordozóra válnak ki és a folyamat létrejöttéhez szükséges energiát csak a hőközlés adja. A nagyobb energiaigényű reakciók létrejöttéhez

(például elemi fémek leválasztásához) szükséges energiát rádiófrekvenciás plazmás gerjesztéssel,⁵ vagy szabad gyökök pirolízises⁶ létrehozásával közlik a rendszerrel. Az így létrejött hidrogéngyökökkel lehetséges a fém- vagy félvezető-prekursorok redukálása [3]. Ilyen módon sikerült szén-, szilícium- és germániumrétegeket is növeszteni. A módszer hátránya viszont, hogy mély és szűk árkok falán rekombinálnak a hidrogéngyökök, így az árkok alja felé haladva csökken a gyökök fluxusa és a réteg ezeken a területeken egyáltalán nem alakul ki vagy vékonyabb lesz a felszínen találhatóhoz képest.

Prekursorok

Az ALD prekursorai lehetnek gáz, cseppfolyós vagy akár szilárd halmazállapotúak is. Természetesen minden esetben illékonyak és termikusan stabilnak kell lenniük, illetve végbe kell mennie a kemisorpciónak is, tehát erősen kell reagálniuk a felülettel vagy annak valamelyik funkciós csoportjával és egymással is.

A fenti feltételeknek eleget tevő prekursorok anyagi minőségük szerint lehetnek szervetlen és fémorganikus⁷ vegyületek. A használt szervetlen anyagok jellemzően hidrogéntartalmúak (például víz, kén-hidrogén, ammónia) és kellően illékonyak is. Az említett vegyületeken kívül használhatnak például az erősebb oxidáló hatás érdekében ózont vagy hidrogén-peroxidot is. A fémtartalmú reagensek jellemzően fémorganikusak, általában fém-alkil és -alkoxid⁸ típusú vegyületek. Számos esetben tanulmányoztak fém-halogenideket, főleg kloridokat is. Bár a legtöbb fém esetén rendelkezésre áll a feltételeknek megfelelő prekursor, de az alkáli és alkáli földfémek esetében a megfelelő prekursorok előállításuk önmagában is problémát jelent. A kutatások ezen fémek vegyületeinek rétegleválasztásához a β -diketon-komplexek⁹ használata felé irányulnak. Sikeresen választottak le ilyen típusú prekursorok használatával magnézium-oxid és indium-szulfid filmeket is.

Illékonyág és technológia szempontjából három kategóriát különböztethetünk meg: az első esetben a prekursorot fűteni kell a megfelelő gőznyomás eléréséhez; második esetben a prekursor megfelelő gőznyomású szobahőmérsékleten – ez főleg fémorganikus vegyületekre jellemző; a harmadik esetben a gőznyo-

⁵ Rádiófrekvenciás gerjesztés esetén egy nagy frekvenciával változó elektromos tér hatására jönnek létre a gyökök.

⁶ Pirolízis: molekulák bontása hőközléssel.

⁷ A fémorganikus vegyületek molekulái fématomokból és hozzájuk kapcsolódó szerves csoportból állnak.

⁸ Az alkilcsoport egy olyan kapcsolódó funkciós csoport, amit szén- és hidrogénatomok alkotnak, amelyeket csak egyszeres kötések kötnek össze. Alkoxicsoporthoz akkor beszélhetünk, ha az alkilcsoport egy oxigénatom révén kapcsolódik a központi atomhoz.

⁹ A szerves kémiában ketonoknak nevezzük az $RC(=O)R'$ képlettel leírható vegyületeket, ahol R és R' valamilyen széntartalmú szubsztituens. Egy ilyen molekulában a $C(=O)$ csoport a ketocsoport. A β -diketonok esetén a molekulában két ketocsoport található, amiket egy szénatom választ el egymástól.

más túl nagy. Ilyenkor a tömegáram, azaz az időegység alatt bejuttatott anyag mennyiségének pontos szabályozása jelenti a megoldást.

A nukleáció kérdése az ALD-nél

Az ALD-nél az új fázis kialakulásának első lépése a magképződés (nukleáció), amely meghatározó a folytonos, ultravékony rétegek növekedésében. Mivel az atomi rétegleválasztás alapja a kémiai reakció, a felületi funkciós csoportok mennyisége jelentős paraméter. Ezek jelentik ugyanis a nukleációs helyeket, amelyeken megindulhat a kívánt réteg kialakulása. Például oxidfelületeken a fém-oxidok és -nitridek folytonosan kezdenek el nőni, ugyanis a felületen található hidroxilcsoportok könnyen reakcióba lépnek a fémorganikus prekursorokkal. Amennyiben a felület túl inert, vagy a prekursorok kemisorpciója nem elég hatékony, akkor a leválasztás esetleg egyáltalán nem is lehetséges. Ha a funkciós csoportok eloszlása vagy mennyisége nem megfelelő, a prekursorok a Volmer-Weber-mechanizmusnak megfelelően szigeteket hoznak létre. Ez csökkenti a leválasztás kezdeti szakaszában a rétegnövekedés ütemét, bár több ciklust követően a szigetek összenőnek és folytonos filmet alakítanak ki.

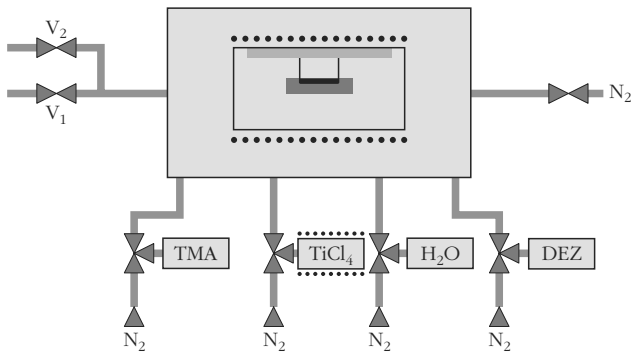
A megfelelő nukleáció hiánya jellegzetes az ultravékony dielektrikum-rétegek növesztésénél, például a nagy dielektromos állandójú kapuoxidok¹⁰ esetében. Ezeknek egyszerre kell igen vékonyak és homogénnek lenniük, hogy kellően egyenletes elektromos tér alakuljon ki a teljes oxidrétegben. A fém-oxidok ALD-növesztésénél a hidrogénpasszívált¹¹ Si(100) felületen a nukleáció nem megfelelő, emiatt a nagy dielektromos állandójú kapuoxidok növesztése az ALD egyik legnagyobb kihívása.

Fémek ALD-leválasztása oxidfelületeken szintén nehézségekbe ütközik. Ez alapvetően nem meglepő, hiszen a fémek általában nem nedvesítik az oxidfelületeket, hanem inkább egymástól különálló halmazokat, klasztereket képeznek rajtuk. Ezen kívül igen nehezen megy végbe a magképződés különböző inert anyagok, mint az igen perspektivikus szén nanocsövek és a grafén felületén is. A grafénnel kapcsolatban egyébként is általános igazság, hogy inertsége miatt a prekursorok nem képesek a kemisorpcióhoz szükséges reakcióra. Megfigyelések szerint inkább csak a lépcsők, hibahelyek mentén tudnak nanométeres csíkokban nőni a rétegek. Tiszta grafénfelületen sikeresen választottak le ALD-filmet jól fizisorbealódó¹²

¹⁰ A fém-oxid félvezető tervezérlésű tranzisztor (angolul röviden MOSFET) kapuelektrodját a *gate oxid* réteg választja el a töltésáramlás helyéül szolgáló csatornától.

¹¹ Hidrogén passzívált szilícium készítésekor a natív szilícium-oxidot hidrogén-fluorid vizes oldatával lemarják, így a tiszta felszínen a szilíciumatomokhoz hidrogénatomok kapcsolódnak.

¹² A fizisorpció (fizikai adszorpció) a kemisorpció mellett az adszorpció másik esete. Ebben az esetben nem alakul ki elsődleges kémiai kötés, a jellemző kölcsönhatás a van der Waals-erő.



3. ábra. A Picosun R-100 berendezés sematikus képe.

gáz – ózon vagy nitrogén-dioxid – segítségével is, amely nukleációs helyként szolgál a prekursorok számára [3].

A módszer alkalmazási területei

Az ALD egyik legfontosabb alkalmazási területe a mikrotechnológiában a nagy dielektrikus állandójú kapu-dielektrikumok növesztése. Az ALD-reaktor viszonylag alacsony üzemi hőmérséklete miatt előnyös, hogy csökken a rétegek közti káros diffúzió.

Az alacsony hőmérsékletű leválasztásnak köszönhetően olyan anyagokat is bevonhatunk, amiket korábban a termikus bomlás miatt nem sikerülhetett, ilyenek például a polimer- vagy a biológiai eredetű minták. Így lehetővé válik szerves-szerveetlen polimerkompozitok¹³ készítése és igen fontos ez az eljárás a flexibilis hordozójú elektronika vagy az organikus napelemek készítésénél is.

Az ALD legérdekesebb tulajdonsága viszont az a pontosság, amivel leképezi a hordozó felületét. Így egészen mély árkokat, polimergolyókat, bonyolultabb struktúrákat is kontrollált módon lehet bevonni. Különösen látványos eredmény a 3D fotonikus kristályok, inverz opálok¹⁴ készítése, amelynek során polisztirolgolyókat vontak be ALD-vel, majd a golyók kémiai eltávolítása után szabadon álló, belül üreges félgömbök maradtak a felületen [4].

Az MTA TTK MFA-ban folyó kísérletek

Az MTA TTK MFA Mikrotechnológiai Laboratóriumában egy finn Picosun SUNALE™ R-100 típusú atomi rétegleválasztó berendezés üzemel. A berendezés egy átáramlásos termikus ALD-reaktor, amiben egy 100 mm átmérőjű mintatartó helyezkedik el (3. ábra).

Négy prekursorforrásnak alakítottak ki helyet, jelenleg a berendezésben dietil-cink $[Zn(C_2H_5)_2]$, trimetil-alumínium $[Al(CH_3)_3]$, titán-izopropoxid $[Ti(OC_3H_7)_4]$ és

¹³ Kompozit: két vagy több komponens valamilyen társítása, aminek során azok előnyös tulajdonságai érvényesülnek.

¹⁴ Az inverz opálok szabályosan elrendeződő gömb formájú üregeket elválasztó anyagból állnak. Ez a struktúra szerkezeti optikai viselkedést mutat.

$Ga_2(NMe_2)_6$ prekursorok vannak, oxidánsként vízgőzt használunk, így cink-oxid, alumínium-oxid, titán-dioxid és gallium-oxid rétegek növesztésére van lehetőség. Öblítő- és vivőgázként 99,999%-os tisztaságú nitrogént használunk.

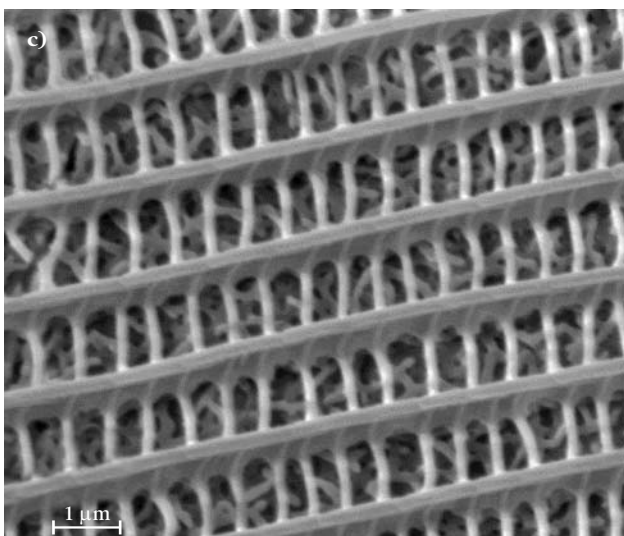
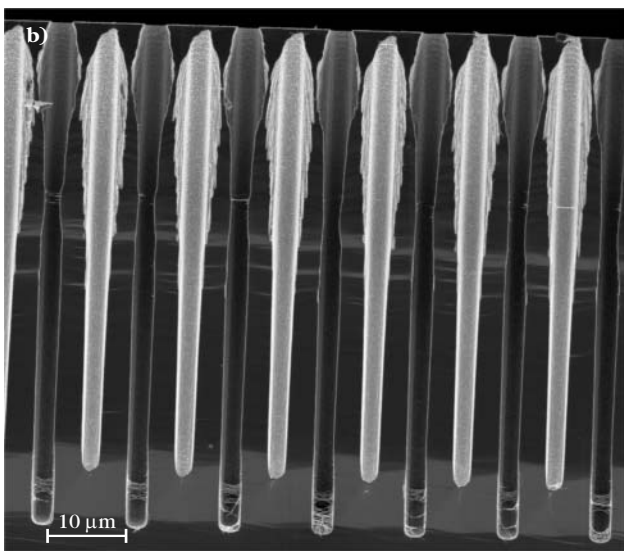
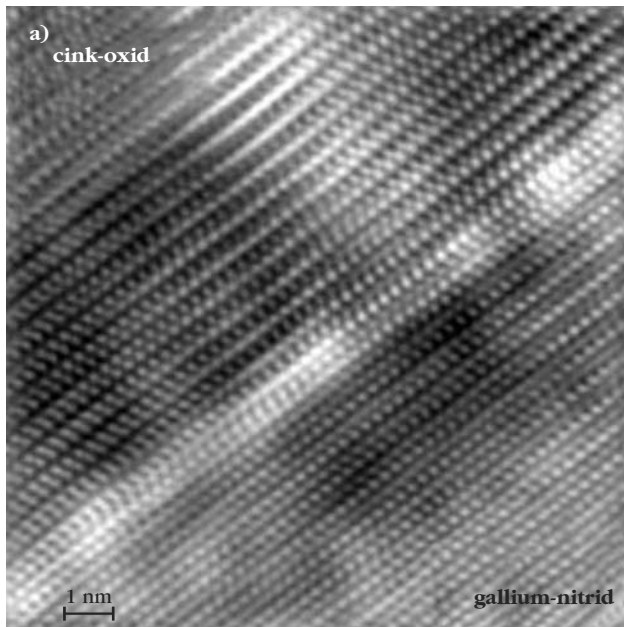
Az MFA-ban folyó kutatások elsősorban ZnO-ra fókuszálnak. Ez a széles tiltott sávú n-típusú félvezető különösen fontos napelemkutatásokhoz, mint átlátszó vezető elektróda. Az atomi rétegleválasztással készült ZnO vezetési és optikai tulajdonságai, valamint morfológiája is pontosan beállítható alumíniumadalékolással és a leválasztási hőmérséklet helyes megválasztásával. A rétegek fajlagos ellenállása $10^{-4} \Omega cm$ és $10^3 \Omega cm$ között tetszés szerint változtatható.

Optoelektronikai (fényt kibocsátó eszközök) alkalmazásokhoz nagy szükség van jó minőségű epitaxiális ZnO vékonyrétegekre, amelyek elektromos tulajdonságai is meghatározhatók. Atom rétegleválasztással készíthetők epitaxiális rétegek GaN (4.a ábra) és ScAlMgO hordozókra, de zaffron és szilíciumon is igen jó minőségű orientált polikristályos rétegeket sikerült létrehozni. Ezen kívül a GaN hordozókon a rétegek vezetőképessége is igen nagy, ami egyrészt a kiváló kristályszerkezetből fakadó igen nagy töltéshordozó-mozgékony-ságnak köszönhető, másrészt a leválasztás során a rétegbe diffundáló Ga-atomok miatt a töltéshordozó-koncentráció is nagyon magas.

A nagy fajlagos felületű struktúrák bevonása intézetünk több kutatási témájánál is előkerült. Különböző érzékelők előállítására vonatkozó kísérleteinkben 50 nm cink-oxiddal vontunk be szilíciumba mart 50 μm mély és 2 μm széles árkokat (4.b ábra), amelyekre utólag nedves kémiai eljárással cink-oxid nanorudakat növesztettünk. A kísérletekből látszik, hogy a berendezés az ALD-től várható kiváló hatásokkal, teljes mélységében bevonta az árkok belső felületét. A ZnO nanorudak szerkezetét nagyban befolyásolta a cink-oxid alapréteg, például a rudak növekedésének irányát meghatározza a réteg kristálytani iránya.

Egy másik nehezen kezelhető, nagy fajlagos felületű struktúra a pórusos szilícium (olyan szilíciumból álló struktúra, ami különféle méretű pórusokat tartalmaz és igen nagy fajlagos belső felülettel bír), amely belső felületeinek egyenletes bevonására más módszer nem alkalmas. Kísérleteink során mezopórusos (~50 nm pórusméret) szilíciumot „béléltünk ki” 5 nm vezető ZnO-dal úgy, hogy a pórusok belsejében még maradjon hely a további összetevőknek.

Intézetünk Nanoszerkezetek Osztálya megkeresésére biológiai eredetű hordozóra, nevezetesen a *Polyommatus icarus* és a *Morpho aega* lepkefajok szárnyára választottunk le sikeresen alumínium-oxid vékonyréteget. E fajok szárnyait alkotó pikkelyek struktúrája természetes fotonikus kristály, ez a szerkezet határozza meg intenzív kék színüket. A szárnyat fedő pikkelyeket alkotó kitin igen összetett, bonyolult pórusrendszert alkot, amelynek bevonása egyenletes réteggel atomi rétegleválasztással vált megvalósíthatóvá. Emellett viszonylag alacsony hőmérsékleten, 100 °C-on végeztük el a műveletet, hogy a biológiai eredetű hordozó ne roncsolódjék (4.c ábra).



4. ábra. a) epitaxiás ZnO réteg GaN hordozón, b) DRIE mart árkok ZnO vékonyréteggel bevonva, c) ALD Al_2O_3 -mal bevont *Polyimide* *icarus* lepkefaj pikkelye.

Mint fentebb említettük, néhány nm vastag vékonyrétegeknél igen fontos a kezdeti nukleáció kérdése. Ez a probléma áll fenn Si- és üveghordozók felületén növesztett cink-oxid filmek esetében is. A szakirodalom alapján a dietil-cinkkel és vízzel végrehajtott leválasztás esetén az első ciklusokban a kölcsönhatási helyeket a szilíciumatomokhoz kötődő hidroxilcsoportok, a szilanolok jelentik [5]. Kísérleteink központjában a hordozó felületmódosítása áll. Ehhez elsősorban levegő, illetve oxigénplazmát, UV-besugárzást és különböző kémiai módszereket alkalmazunk. A leválasztás 150-250°C-on megy végbe viszonylag kis ciklusszám mellett (5-10 ciklus). Az így elkészített minták morfológiáját atomerő-mikroszkóppal (atomic force microscope – AFM) vizsgáljuk, a felületi összetételt pedig elektronsugaras mikroanalízissel.

Összefoglalás

Az atomi rétegleválasztás, mint kémiai vékonyréteg-előállítási módszer viszonylag új keletű technológia, amit már napjainkban is alkalmaznak a korszerű mikrotechnológiában a nagy integráltságú mikroáramkörök gyártásában. Fejlődésével, térnyerésével választ ad a mikroelektronikai iparra jellemző miniatürizálás iránti igényre. A módszer alkalmas a ma megszokott nagy szeletméretek (például 300 mm átmérőjű szilícium!) kezelésére is, mert méretnövelés szempontjából meglehetősen jól viselkedő rendszerről van szó. Így – megfelelő paraméterek mellett – ipari méretű reaktorok is építhetők. Természetesen az ezúton kialakított filmeket nemcsak az elektronikai ipar alkalmazhatja, felhasználhatók atomi vékonyságú fotokatalitikus¹⁵ és más, felületi tulajdonságokat módosító bevonatok előállítására is.

Bár a módszer a többi kémiai rétegleválasztáshoz hasonló, a fő különbség az atomi rétegenként való építkezés, és ez teszi mind kutatási, mind technológiai szempontból érdekessé az atomi rétegleválasztás módszerét.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket nyilvánítják ki az elektronmikroszkópos képekért *Pécz Bélának*, *Tóth Attila Lajosnak* és *Vértesy Zofijának*.

Irodalom

1. T. Suntola: Atomic Layer Epitaxy. *Materials Science Reports* 4 (1989) 261–312.
2. T. Suntola: Surface Chemistry of Materials Deposition at Atomic Layer Level. *Applied Surface Science* 100/101 (1996) 391–398.
3. S. M. George: Atomic Layer Deposition: an Overview. *Chemical Reviews* 110 (2010) 111–131.
4. M. Knez, K. Nielsch, L. Niinistö: Synthesis and Surface Engineering of Complex Nanostructures by Atomic Layer Deposition. *Advanced Materials* 19 (2007) 3425–3438.
5. J. Ren: Initial Growth Mechanism of Atomic Layer Deposition of ZnO on the Hydroxylated Si(1 0 0)-2×1: A Density Functional Theory Study. *Applied Surface Science* 255 (2009) 5742–5745.

¹⁵ *Fotokatalitikus hatású* egy anyag vagy felület, ha az egy fény hatására végbemenő kémia reakció (fotoreakciót) lefolyását felgyorsítja.