

8. ábra. Rotációs periódusok az LQ Hydrae hosszú időskálájú fotometriai mérései alapján (további magyarázat a szövegben).

(függőleges szakaszok) tekintve véve, egy kivételtől eltekintve – a kapott forgási periódusok a szaggatott vonalak által határolt tartományba esnek. Ez független megerősítése a Doppler-képek alapján a differenciális rotációra kapott eredmény helyességének.

Irodalom

- KITCHATINOV, L.L., RÜDIGER, G. 1999, *A&A* 344 911
 KOLLÁTH, Z. 1990, Occasional Technical Notes of the Konkoly Observatory, No. 1
 KÖVÁRI, Zs. 2002, *Foltos változócsillagok*, Természet Világa 133/7 326–328
 KÖVÁRI, Zs., OLÁH, K. 1999, *Rekonstrukciós módszerek a csillagaktivitás kutatásában*, Fizikai Szemle 49/12 442–448
 KÖVÁRI, Zs., STRASSMEIER, K.G., WEBER, M., GRANZER, T., OLÁH, K., RICE, J.B. 2004, *A&A*, megjelenés alatt
 KURUCZ, R. 1993, ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2km/s grid, Kurucz CD-ROM No. 13., Cambridge, Mass.: Smithsonian Astrophysical Observatory, 1993.
 MAUNDER, E.W., MAUNDER, A.S.D. 1905, *MNRAS* 65 813
 NEWTON, H.W. 1934, *MNRAS* 95 60
 OLÁH, K., STRASSMEIER, K.G. 2002, *Astronomische Nachrichten* 323/3–4 361
 PISKUNOV, N.E., RICE, J.B. 1993, *PASP* 115/694 1415
 RICE, J.B., WEHLAU, W.H., KHOKHLOVA, V.L. 1989, *A&A* 208 179
 RICE, J.B., STRASSMEIER, K.G. 2000, *A&AS* 147 151
 RICE, J.B. 2002, *Astronomische Nachrichten* 323/3–4 220
 STRASSMEIER, K.G. 2002, *Astronomische Nachrichten* 323/3–4 309
 VOGT, S.S., PENROD, G.D. 1983, in: *Activity in red-dwarf stars*, Proc. of the 71th Colloquium, Catania, Italy, Aug. 10–13, 1982, Dordrecht, D. Reidel Publishing Co. 379–385.

MÁGIKUS ILLESZKEDÉS HETEROÁTMENETŰ KRISTÁLYSZERKEZETEK BEN

Pécz Béla

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézete

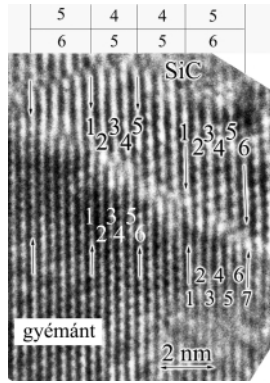
A vékonyrétegek egyik nagy felhasználási területe a félvezető technológia, melyben gyakori a heteroátmenetek növesztése. A legtöbb esetben nemcsak egy véletlenszerű orientációval leválasztott polikristályos rétegre, hanem egy irányítottan növesztett egykristály rétegre van szükségünk. Ilyen rétegek növesztését számunkra a megfelelő fizikai paraméterek (pl. hőmérséklet) megválasztása lehetővé is teszi. A heteroátmenetek széles körű felhasználásáról magyar nyelven is olvashatunk [1]. Amennyiben a hordozó és a ránövesztett réteg rácsparamétere közti különbség (azaz az illesztetlenség, vagy angol szóval *misfit*) kicsi (néhány tizedtől 1–2%-ig), akkor egy feszített szerkezetet kapunk, amelyben a kritikus vastagság meghaladása után a feszültség illesztetlen diszlokációk keletkezésével oldódik fel. A rácsillesztetlenség speciális esetével, melyben a növekvő egykristály réteg részben dőléssel kompenzálja az illesztetlenséget, *Riesz Ferenc* több cikkében is foglalkozott [2, 3]. Vannak azonban olyan esetek, amikor a rácsillesztetlenség nagy, és mégis sikerül orientáltan a két kristályt egymáshoz illesztve réteget növeszteni. Ilyenkor bizonyos vastagság felett a réteg meg is repedhet. Találkozunk azonban olyan kivételes esetekkel, amikor azt látjuk, hogy a nagy rácsparaméterkülönbség ellenére rétegünk tökéletesen orientálva nőtt a hordozóra, és illesztetlen diszlokációk szabályos hálózatát figyelhetjük meg. Ilyen esetek az úgynevezett *mágikus illeszkedéssel* jöhetnek létre, amely azt jelenti, hogy a hordozó kristály m rácssíktávolsága megegyezik a növek-

vő réteg n rácssíktávolságával, ahol m és n egész számok. Ilyenkor az egyik kristály 4 rácssíkja illeszkedik a másik kristály 3 rácssíkjához, vagy öt a négyhez, vagy 11 a 10-hez stb. Ha a két kristály közt a rácsparaméter-különbség nagy, akkor m és n kis számok, míg a nagyobb értékek relatíve kisebb illesztetlenségnél adódnak. Ekkor, ha a növesztett kristály rácsparamétere a kisebb, az illeszkedés úgy is felfogható, hogy abban szabályos periódussal egy-egy extra sík, azaz diszlokáció illeszkedett be, melyeket a meglehetősen szűk irodalom [4] geometriai diszlokációnak is hív. A gyakorlati esetekben $m = n + 1$, ugyanis egy ettől eltérő, például öt a háromhoz illeszkedéshez 40%-os illesztetlenség tartozna. Az $m = n + 1$ összefüggéstől való eltérés tehát nem lehetetlen, de csak nagyobb számoknál várható.

Az illesztetlenséget a következő képlet definiálja:

$$f_0 = \frac{a_0 - a_r}{a_0},$$

ahol a_0 a hordozó, a_r pedig a réteg síktávolsága. Fenti képlettel számolva a kőbös SiC és a gyémánt közti illesztetlenség $-0,223$, azaz $-22,3\%$. A negatív előjel abból adódik, hogy feltételeztük, hogy a nagyobb rácsparaméterű anyagot (SiC) növesztjük a kisebbre (gyémánt). Kísérleteinkben természetes gyémántot magas hőmérsékleten implantálva szilíciummal, ezzel az úgynevezett ionnyalábos szintézissel valóban sikerült előál-



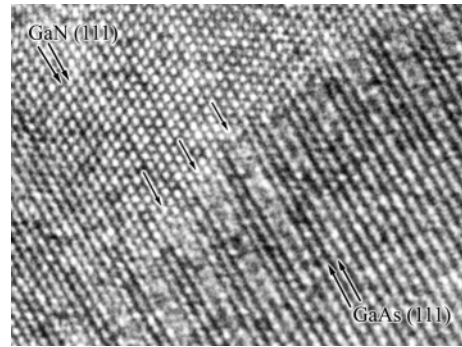
1. ábra. SiC és gyémánt határfelület rácsfelbontású elektronmikroszkópos képe.

lítanunk SiC/gyémánt tartományokat [5], melyek egymásra rétegezettek a gyémánt implantált zónájában. Határolt területű elektrondiffrakcióval igazoltuk, hogy az összes keletkezett SiC epitaxiás (kocka a kockán) helyzetben van a gyémántban.

Természetesen sejthetjük, hogy az illeszkedésben a fenti mágius illeszkedés segít, de nem tudhatjuk, hogy a határfelületünk egyfajta vagy különböző illeszkedésű doménekből, tartományokból áll-e. Mivel és hogyan figyelhető meg a rétegeink közti rácshibák és a két kristályrác illeszkedése? A transzmissziós elektronmikroszkópia (TEM) mindig is hatékony eszköz volt a mikroszerkezetek feltárásában. Ennek atomi felbontású változata olyan eszközt adott kezünkbe, melynek segítségével egy határfelületnél illeszkedő rácssíkok megszámlálhatóak és a vonaldiszlokációk azonosíthatóak. Az ebben a cikkben közzétett képek az MTA MFA 300 kV-os JEOL 3010 típusú atomi felbontású elektronmikroszkópján készültek, melynek pontfelbontása 0,17 nm. Az 1. ábra a SiC/gyémánt határfelületet mutatja. Az ábrán ez a határfelület átlósan megdőntött, hogy az illeszkedő (111) típusú rácssíkokat függőleges helyzetben tudjuk mutatni. Az illeszkedés természetesen a határfelületre merőlegesen futó (200), illetve (400) síkokban is ugyanígy megvalósul, de az (111) síkokhoz „csak” 2 Å-öt kell feloldanunk. Az 1. ábra középső részén azt látjuk, hogy a SiC 5 rácscikája illeszkedik a gyémánt 6 rácscikájához, azaz a SiC négy rácscikájának kell egyeznie öttel a gyémántban, és ezen domén szélein a rácscikók egybeesnek a két kristályban. Az ilyen esetekben a megmaradt illesztetlenséget, vagy eltérési paramétert a következő képlet definiálja:

$$F_0 = \frac{m a_0 - n a_r}{m a_0}.$$

Ez az eltérés természetesen deformációt épít be minden egyes, egymáshoz illeszkedő cellába, de F_0 értéke f_0 -nál sokkal kisebb, és az epitaxia energetikailag előnyös, ha F_0 értéke nem esik messze a tökéletes illeszkedéstől. Fenti esetre számolva $F_0 = -0,022$ adódik, ami már csak 2,2%-os illesztetlenségnek felel meg. Visszatérve azonban az 1. ábrához, azon azt láthatjuk, hogy ettől a céljától jobbra egy ugyanilyen másik cella található, de mellette egy olyan következik, amelyben öt SiC rácscikátávolság illeszkedik hat gyémánthoz. Erre az esetre ki-



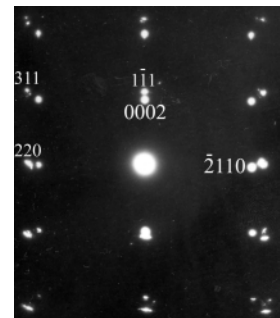
2. ábra. Kőbös GaN szemcse és GaAs határfelülete rácsfelbontásban.

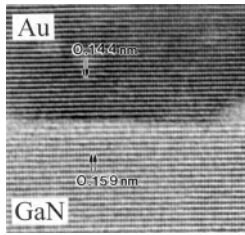
számolva $F_0 = 0,019$, azaz 1,9% az illesztetlenség, ellenkező előjellel. Ez azt jelenti, hogy képünkön az 1. ábra tetején levő táblázat szerinti illeszkedés látható.

A két cella illesztetlenségének ellenkező előjele arra utal, hogy a feszítettség vagy annak egy része kioltódik. Mivel a két rács két különböző cella váltakozásával illeszkedik, érdemes kiszámolnunk az illesztetlenséget arra az estre, amikor 9 SiC síktávolság illeszkedik 11 gyémánthoz. Ekkor ennek a két illesztetlen diszlokációt is tartalmazó szakasznak a végén $F_0 = 0,00088$ értéket kapunk, ami még kerekítve is azt jelenti, hogy az illesztetlenség határozottan kisebb, mint 0,1%. Ez mindenképpen magyarázat az epitaxiás növekedésre.

A következő példánk kőbös GaN kristály GaAs hordozón. Itt is nagy a klasszikus értelemben vett illesztetlenség, hiszen a GaAs (111) rácscikátávolsága 0,3263 nm, míg ugyanez a kőbös GaN-re 0,259 nm. Fenti értékekkel $f_0 = -0,2598$, azaz gyakorlatilag 26%. Márpedig ez a két kristály is epitaxiásan nő egymásra a diffrakciós felvételek szerint még akkor is, ha a GaN-et ionsugaras szintézissel hozzuk létre a GaAs belsejében, magas hőmérsékleten nitrogént implantálva a szeletbe. A GaN ugyan szemcsékben keletkezik a GaAs-ben, de minden szemcse ugyanolyan orientációjú. A 2. ábrán egy nagy (kb. 10 nm széles és 50 nm hosszú) GaN szemcse részletét láthatjuk. Az ábra közepén három nyíllal egy-egy diszlokációt jelöltünk a GaN-ben. Könnyen leolvasható, hogy a GaN öt rácscikátávolsága illeszkedik a GaAs-ben négyhez. Ezzel kiszámolva $F_0 = -0,0079$ adódik, ami azt jelenti, hogy ebben a rendszerben a fenti cellák illeszkedésével a maradék illesztetlenség kisebb, mint 0,8%, amelyet a rács rugalmas deformációval tud kompenzálni. Ebben az esetben nem csoda, ha nincs szükség más illeszkedésű cellák beszűrására.

3. ábra. Határolt területű diffrakció a GaN 0110, illetve az arany 112 zónájából.

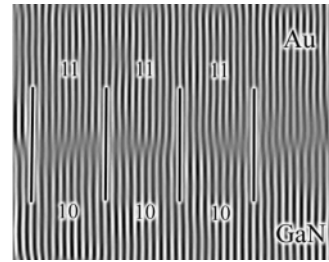




4. ábra. Az arany/GaN határfelület rácsfelbontású képe.

Az utolsó példánk egy elfordult ráccsal való illeszkedést mutat be GaN-re párologtatott aranyréteg és a hordozó kristály közt. Ennek megértéséhez a határolt területű diffrakciós képre is szükségünk van, mely a 3. ábrán látható. Négyes indexek jelzik a hexagonális GaN reflexióit, míg hármas indexek jelölik a köbös arany reflexióit. Láthatjuk, hogy például a GaN 0002 reflexiói és az arany 111 típusú reflexiói a központi nyalábtól húzott egyenesre esnek, azaz a 0002 GaN síkokra az arany 111 típusú síkjai nőttek. Az illeszkedést a merőleges irányban a GaN (-2110) és az arany (220) síkjai közt kell keresnünk. A két sík közt a klasszikus értelemben vett illesztetlenség $f_0 = -0,103$, azaz az illesztetlenség több mint 10% lenne. Megfelelő m és n értékeket keresve viszont $m = 11$ és $n = 10$ értékekre $F_0 = -0,0031$, ami körülbelül 0,3%-os illesztetlenséget jelent. Érdeemes azonban az atomi felbontású képet kicsit tovább elemeznünk. Elkészítve annak (egy kis részének) a Fourier-transzformáltját (FT) a 3. ábrán látott diffrakcióhoz hasonló diffrakciós képet kapunk, melyben persze a távoli diffrakciós foltok nem jelennek meg, csak azok, amelyekhez tartozó kristálysíkokat a 4. ábra rácsfelbontású képén sikerült feloldanunk. A FT-képből az illeszkedést biztosító síkseregekhez tartozó reflexiókat megtartva és a többit kivágva, majd inverz Fourier-transzformációt alkalmazva kapjuk az 5. ábrán látható képet. Ezen a diszlokációkat sikerült jól láthatóvá tennünk.

Berajzolva a számolásunk szerint ideális illeszkedést biztosító 11:10-hez tartozó doméneket azt látjuk, hogy az illeszkedés a gyakorlatban nem olyan szabályos, mint azt vártuk. Hosszabb tartományokon átlagosan ugyan valószínűleg kiadja a számolt értéket, hiszen kiszámítható, hogy itt az egyfel több (12:11), vagy kevesebb (10:9) rácsot tartalmazó domének periodikus beszűrása csak ron-



5. ábra. A 4. ábrán látható határfelület szűrt Fourier-képe.

tana az illeszkedésen, de megjelennek a fenti periodicitástól eltérő helyzetű diszlokációk is (pl. az 5. ábra bal oldalán látható egy ilyen diszlokáció a berajzolt egybeeső síktól rögtön balra).

Összegezve a fenti eredményeket egyrészt megállapíthatjuk, hogy ha egy egykristályhordozóra az igen nagy illesztetlenség ellenére is epitaxiás réteget sikerült növesztenünk, akkor érdemes emögött a *mágikus illeszkedést* keresnünk. Ez azt jelenti, hogy a két rács olyan tartományokkal illeszkedik, amelyek határán egy-egy atomsíkjuk egybeesik, belül pedig az egyikben egyfel több rács van. Ilyenkor a konvencionális mikroszkópia által nyújtott határolt területű diffrakciós képből kiolvashatjuk, hogy a két rácsban mely síkok illeszkednek a határfelületen. Kiszámolhatjuk, hogy mely m és n értékekre a legjobb a két rács illeszkedése. Igen hasznos azonban egy atomi felbontású elektronmikroszkópos kép is a mintánkról, hiszen ez i) igazolhatja a számolt doménnel való illeszkedést, ii) megmutathatja, hogy több domén szabályos sorozata biztosítja az illeszkedést, vagy iii) rámutat a számolt illeszkedéstől való lokális eltérésekre.



A szerző köszöni az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatását.

Irodalom

1. MOJZES I., PÖDÖR B.: *Új anyagok és új szerkezetek a mikrobullámú félvezető eszközökben* – Akadémiai Kiadó, 1993
2. F. RIESZ – Vacuum 46 (1995) 1021
3. F. RIESZ – J. Vac. Sci. Technol. A 14/2 (1996) 425
4. A. TRAMPERT, K.H. PLOOG – Cryst. Res. Tech. 35 (2000) 793
5. V. HEERA, F. FONTAINE, W. SKORUPA, B. PÉCZ, Á. BARNA – Appl. Phys. Lett. 77 (2000) 226

MAGYAR DIÁK SIKERE NEMZETKÖZI VERSENYEN

2004. május 9–14. között került megrendezésre a fiatal tudósok olimpiája, az *INTEL Nemzetközi Tudományos és Műszaki Verseny*, Portlandben (Oregon, USA). Ez a világ legnagyobb ifjúsági tudományos és műszaki seregszemléje a 15–21 év közötti korosztály számára, ahol ez évben 1400, különböző versenyeken győztes tudományos és mérnöki projekt szerepelt.

A Magyar Innovációs Szövetség szervezésében és támogatásával *Németh Gábor* a szolnoki Pálffy János Műszaki és Vegyipari Szakközépiskola tanulója, az Országos Ifjúsági Tudományos és Innovációs Verseny győztese és az EU Fiatal Tudósok Versenyének elsődíjasa vett részt a versenyen, aki új műszaki megközelítéssel, az eddig ismertnél nagyobb sávzélességű és hatékony plazma-

hangszórót tervezett és épített. Az újszerű műszaki megoldásra a szakzsűri is felfigyelt, és a munkát az értékes 4. díjjal jutalmazta. Ez nagy siker Németh Gábornak és Magyarországnak.

A Magyar Innovációs Szövetség fontos feladatának tartja, hogy folyamatosan biztosítsa a magyar fiatalok részvételét ezen a nagy-szabású seregszemlén. Az idej elismerés és díj kiváló eszköz a tudományos és műszaki érdeklődés felébresztésére a fiatalok körében, amire nagy szükség van, hisz a hazai felsőoktatásban az európai átlagnál alacsonyabb – és sajnos csökkenő – ezen terület részaránya, ami veszélyezteti az ország gazdasági felemelkedését.

Pakucs János,
a Magyar Innovációs Szövetség elnöke