

tömbi veszteségi függvény félvezetők (Si, Ge stb.) és néhány fém (pl. In, Sb stb.) esetében egyetlen plazmoncsúcs. Erre rakódik a felületi plazmon csúcsa, melynek leválasztására eljárást dolgoztunk ki [10]. Itt említjük, hogy GaSe plazmon csúcsát már 1973-ban RFA-spektrométerünkkel észleltük. A legtöbb anyag esetében a veszteségi függvény bonyolult.

Köszönetnyilvánítás

Az itt ismertetett kutatásokban részt vett *Orosz Gábor Tamás* (MFA), *Tóth József*, *Varga Dezső*, *Kövér László*, *Tőkési Károly* (ATOMKI, Debrecen), *Alexander Jablonski*, *Beata Lesiak*, *Mirosław Krawczyk*, *Lubomir Zommer* (LTA Varsó), *Bernard Gruzza*, *Luc Bideux*, *Christine Robert*, *Paul Bondot* (Clermont-Ferrand), *Swen Tougaard* (Odense, Dánia), akikkel számos közös közleményünk jelent meg. Az együttműködést nagyra becsüljük.

Irodalom

1. Gergely Gy. *Fizikai Szemle* 53/9 (2003) 331.
2. Gergely Gy., Menyhárd M., Németh K.: A szilárdtestkutatás korszerű berendezései. *GTE Konferencia*. Budapest, 1973. 21.
3. G. Gergely, B. Gruzza, M. Menyhárd. *Acta Phys. Hung.* 48 (1980) 337.
4. Menyhárd M.: Kisenergiájú elektron diffrakció (LEED). In: *A szilárdtestkutatás újabb eredményei* 6. Akadémiai Kiadó (1979) 7–10.
5. Gergely Gy.: Szekundermissziós spektrometria, AES, SEES, ELS. In: *A szilárdtestkutatás újabb eredményei* 6. Akadémiai Kiadó (1979) 107–174.
6. G. Gergely. *Progr. Surf. Sci.* 71 (2002) 31–88.
7. Gergely Gy. *Fizikai Szemle* 56/11 (2006) 369.
8. A. Jablonski, B. Lesiak, G. Gergely. *Phys. Scripta* 39 (1989) 363.
9. G. Gergely, M. Menyhárd, S. Gurban, J. Toth, D. Varga, A. Jablonski. *J. Surf. Anal.* 12 (2005) 14.
10. G. Gergely, M. Menyhárd, S. Gurban, A. Sulyok, J. Toth, D. Varga, S. Tougaard. *Solid State Ionics* 141–142 (2001) 47.

MIKROMÉRETŰ MONODOMÉNES RÉSZECSKÉK MÁGNESES VISELKEDÉSE

Vértesy Gábor

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Pardaviné Horváth Márta

George Washington University, Washington DC, USA

A kisméretű mágneses részecskékből álló kétdimenziós periodikus rendszereknek nagy gyakorlati jelentősége van a jövőbeni, extrém nagy sűrűségű mágneses adattárolók, mágneses MRAM memóriák és szenzorhálózatok megvalósításában. Ezért az ilyen rendszerek létrehozása, valamint mágneses viselkedésük vizsgálata komoly gyakorlati jelentőséggel bír. Másrészt ezen mágneses rendszerek tanulmányozása nagy segítséget jelent az elméleti hiszterézismodellek fejlesztésében, valamint az egymással kölcsönható mágneses részecskék viselkedésének jobb megértésében is. Az alábbiakban bemutatunk egy ilyen rendszert, és röviden összefoglaljuk az azon elvégzett mérések és modellezések néhány eredményét.

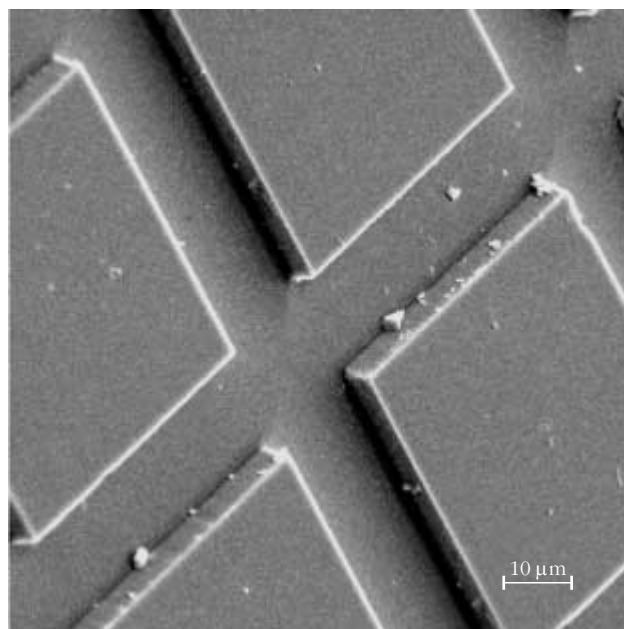
Mágneses szigetek kialakítása nem-mágneses hordozón, és tulajdonságaik mérése

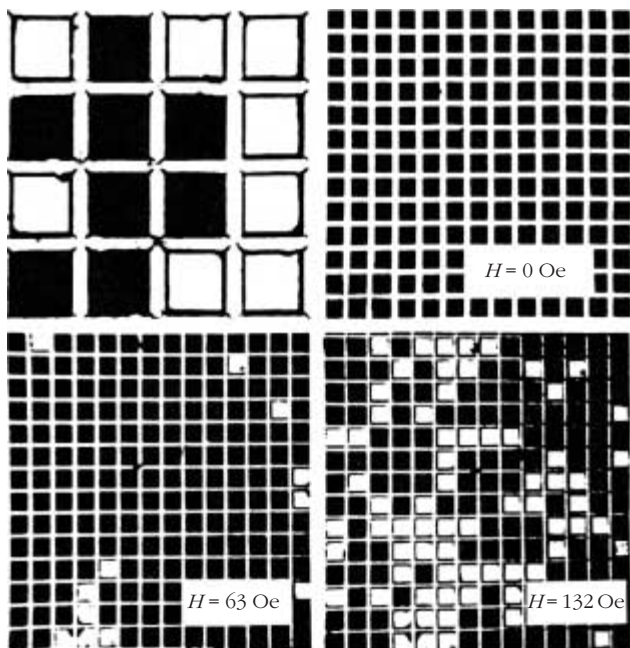
Nem-mágneses hordozóra folyadékfázisú epitaxiás módszerrel növesztett, néhány mikrométer vastagságú, egykristályos mágneses gránátrétegben, megfelelő maszkolás és az azt követő kémiai marás segítségével létrehozhatók egymástól elkülönülő, szabályos négyzet alakú szigetek (pixelek). A pixelek pásztázó elektronmikroszkópban felvett képét mutatja az *1. ábra*.

A mágneses gránátrétegekben az összetétel módosításával jelentős egytengelyű anizotropia alakítható ki, amely biztosítja, hogy a mágnesezési irány merőleges a rétegek felületére. A marás utáni struktúrában a szigetek közötti utcák elkülönítik egymástól a mágneses részecskéket, ezért köztük nincs kicserélődési kölcsönha-

tás. Az egyedüli csatolás a pixelek között a magneto-sztatikus kölcsönhatás. Az egyes pixelek, a nagy egytengelyű anizotropia, valamint a kisméretű szigetek következtében, monodoménes módon viselkednek, azaz a pixelek mágnesesen telítettek, és az egyik telített állapottól kapcsolhatók át ellentétes irányú és megfelelő nagyságú külső mágneses térrel a másik, ellenkező irányban telített stabil állapotba. A gránátrétegek a nor-

1. ábra. Gránátrétegben marással kialakított pixelek elektronmikroszkópos képe.



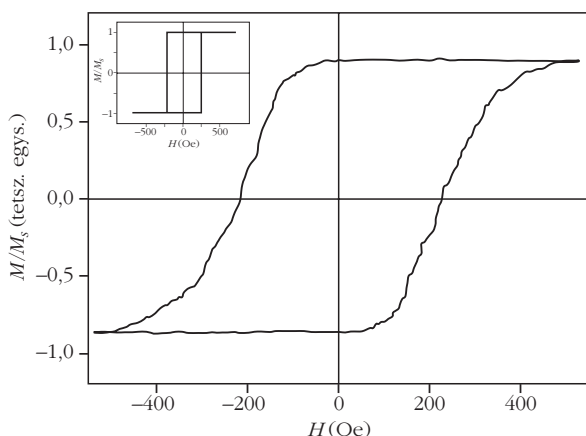


2. ábra. A pixelek csoportjának polarizációs mikroszkópban felvett képe, különböző külső mágneses térben.

mál hullámhosszú fény számára átlátszóak, ezért polarizációs mikroszkópban közvetlenül megfigyelhető a mágneses doménszerkezet. Ilyen felvételek láthatók a 2. ábrán, ahol a bal felső sarokban egy 16 pixelből álló együttes képe látható. A fekete és fehér kockák az ellentétes irányban mágnesezett pixeleket jelentik. A több pixelt tartalmazó másik három kép pedig azt mutatja, hogy az előzőleg nagy mágneses térrel létrehozott telített állapotból (csupa fekete pixel), nulla térről indulva ellentétes külső mágneses tér hatására hogyan mágneseződnek át fokozatosan az egyes pixelek (fehér kockák megjelenése).

Létrehoztunk egy olyan mérési elrendezést, amelynek segítségével közvetlenül mérhető a pixeleket tartalmazó gránátréteg mágneszettsége, továbbá az egyes részecskék viselkedése külön-külön is megfigyelhető és mérhető. A mérés magnetooptikai elven alapul (hasonlóan a polarizációs mikroszkópban ké-

3. ábra. Néhány száz elemből álló rendszer teljes mágnesezési görbéje (fő ábra) és az egyes pixelek tipikus mágnesezési görbéje (bal felső sarok).



szült felvételekhez), és azt a fizikai jelenséget használja ki, hogy a lineárisan poláros fény polarizációs síkja a mágneses anyagon való áthaladás közben a mágneszettséggel arányos módon elfordul. Ily módon a mágneszettség változása közvetlenül, a fényintenzitás mérése alapján nyomon követhető. A 3. ábra magnetooptikai módon mért mágneses hiszterézisgörbét mutat. A mérés több száz pixelt tartalmazó gránátrétegen lett elvégezve. Minden egyes pixelnek azonban, a fent leírt okokból, négyzetes hiszterézisgörbéje van, és a makroszkopikus hiszterézisgörbe a sok száz vagy ezer pixel négyzetes hiszterézisgörbéjének az eredője. Egy pixelen elvégzett mérés eredményeképpen kapott hiszterézisgörbét mutat a 3. ábra bal felső sarkában látható kisebb ábra.

A Preisach-modell

A mágneses anyagok hiszterézis tulajdonságait leíró modellek jelentős része a Preisach-modellen alapul, mivel ennek segítségével sikeresen modellezhetőek azok a mágneses anyagok, amelyeket a mindennapi gyakorlatban, például az adatrögzítésben is sűrűn alkalmaznak. A modell kidolgozása *Preisach Ferenc* nevéhez fűződik [1]. A modell az anyagot aszimmetrikus, elemi, négyszögletes hiszterézis hurkokkal bíró részecskék eloszlásával írja le, és a mágneszettséget az eloszlási függvénynek a megfelelő területre történő integrálásával számítja ki. A modellt eredetileg mágneses anyagokra alkalmazták, de az elv nagyon általános. A modell feltételezései azonban nem teljesülnek a valódi fizikai rendszerek túlnyomó többsége esetén, így igen nehéz az elméleti következtetéseket a tényleges anyagi paraméterekkel összevetni. Ez akadályokat gördít a modell további finomítása elé is. Ezért alapvető jelentősége van egy olyan modellanyagnak, és az ezen történő megfelelő méréseknek, ami lehetővé teszi a fenti probléma megoldását.

A fentiekben bemutatott modellanyag és az erre a célra kifejlesztett mérőberendezés – az irodalomban egyedülálló módon – kiválóan alkalmas a Preisach-modell kísérleti adatokkal való közvetlen egybevetésére. Hiszen itt pontosan az történik, amit a klasszikus modell feltételez, nevezetesen, hogy az anyag makroszkopikus hiszterézisgörbéje elemi négyzetes hiszterézis görbék (hiszteronok) sokaságából épül fel, a mágneszettség átfordulása csak forgással történik és nincs reverzibilis mágneszettség. Ráadásul az elemi hiszteronok viselkedése közvetlenül is mérhető, kölcsönhatásuk, kapcsolási terük, minden paraméterük egyenként is meghatározható. Meg lehet határozni a Preisach-paraméterek (kölcsönhatási tér, eloszlási függvény) változását a részecskék közötti mágneses kölcsönhatás változtatásával, amely megtehető a hőmérséklet változtatásával, vagy pedig külső mágneses tér alkalmazásával.

Az alábbiakban, mintegy a módszer és a lehetőségek illusztrálására, bemutatjuk, hogyan lehet a teljes hiszterézisgörbét meghatározni az egyedi pixelek kapcsolási tulajdonságainak figyelembe vételével.

A teljes hiszterézisgörbe rekonstrukciója az egyedi pixelek kapcsolási tulajdonságai alapján

Kidolgoztunk egy numerikus modellt [2], amelynek segítségével három különböző pixelcsoportra rekonstruáltuk a teljes hiszterézisgörbét. A mérések és a szimuláció 5×5 , 7×7 , valamint 9×9 elemet tartalmazó csoport esetére vonatkoznak. A H_{app} külső mágneses tér és a mágnesezettség a minta felületére merőleges irányú (a könnyű tengely a z irány). A pixelek közötti kölcsönhatás magnetosztikus. A pixelekre ható effektív mágneses tér függ a szomszédos pixelek mágneses állapotától. Feltételezve, hogy a külső mágneses tér a $+z$ irányba mutat, mindegyik $+M$ mágnesezettséggel bíró szomszéd az effektív belső mágneses teret (H_{in}) $-M$ értékkel csökkenti. A nem elliptikus alaknak köszönhetően a belső tér nem homogén [3] még akkor sem, ha $H_{app} \geq 4\pi M_s$. Valamely (i_0, j_0) pixelre bármelyik más (i, j) pixelről ható $D(|i-i_0|, |j-j_0|)$ kölcsönhatási tenzorelemek véges differenciászámítással, a felületi integrálok kiszámításával, vagy a dipólusközelítéssel határozhatók meg. Az effektív kölcsönhatási tér az (i_0, j_0) pontban lévő pixelre az összes többi pixel hatását figyelembe véve:

$$H_i(i_0, j_0) = 4\pi M_s \sum_{i,j} \Lambda D(|i-i_0|, |j-j_0|), \quad (1)$$

ahol $\Lambda = \pm 1$, attól függően, hogy M iránya milyen. A valamely pixelre ható belső teret az alábbi kifejezés alapján lehet kiszámítani:

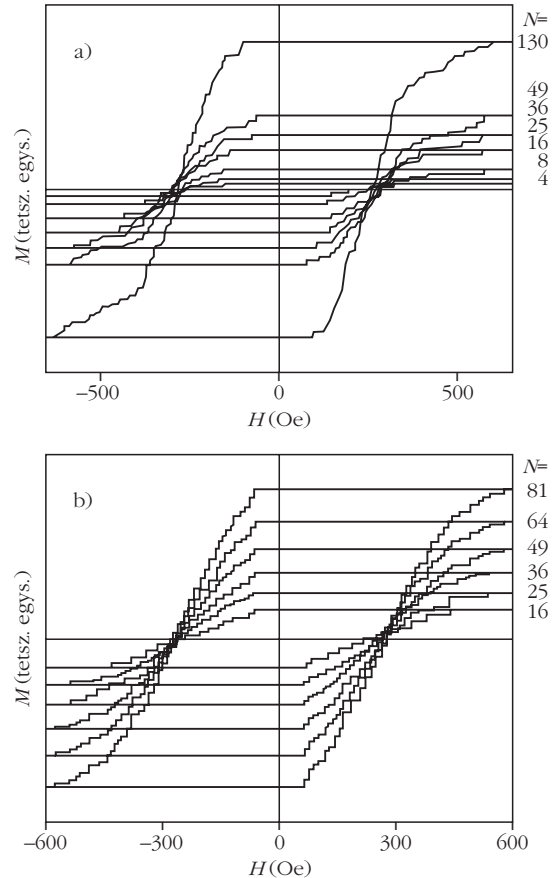
$$\begin{aligned} H_{in}(i_0, j_0) &= H_{app} - H_i(i_0, j_0) = \\ &= H_{app} - 4\pi M_s \sum_{i,j} \Lambda D(|i-i_0|, |j-j_0|). \end{aligned} \quad (2)$$

Ha már van egy olyan pixel, amelynek a mágneses állapota megváltozott, akkor a mágnesezettség és a kölcsönhatási tér eloszlása is változik. A (2) egyenletből következik, hogy ebben az esetben a belső tér eloszlása is megváltozik, és az új $H'_{in}(i_0, j_0)$ belső tér, amely mindegyik egyedi pixelre hat, az alábbi kifejezés alapján számítható ki:

$$\begin{aligned} H'_{in}(i_0, j_0) &= \\ &= H_{in}(i_0, j_0) + 8\pi M_s D(|i_0 - i_s + 1|, |j_0 - j_s + 1|), \end{aligned} \quad (3)$$

ahol (i_s, j_s) azon pixelek helyzete, amelyek éppen mágneses állapotot váltottak.

A koercitivitás $H_c(i_0, j_0)$ eloszlásának meghatározása kétféleképpen lehetséges. Az egyedi pixelek kapcsolási terének mérésére alapozva megállapítható, hogy a rendszer koercitivitása Gauss-eloszlást követ, amelynek a középértéke és félértékszélessége adott. A koercitivitásértékek generálhatók ebből a két adatból, amelyeket a véletlenszerű eloszlással rendelkező egyedi pixelek határoznak meg. Vagy, a H_{app} külső teret numerikusan változtatva a negatív és pozitív telítési értékek között a mágnesezési görbe, vagyis $M(H_{app})$ rekonstruálható az egyedi mágneses



4. ábra. Különböző méretű pixelcsoportok hiszterézisgörbéje. a) mért, b) számolt görbék.

átfordulások sorozata alapján. A mért teljes hiszterézisgörbe látható a 4.a ábrán, ahol különböző méretű pixel csoportok (4, 9, 16, 25, 36, 49, 130) esetén vannak ábrázolva a telítéstől-telítésig mért hiszterézisgörbék.

A számolás eredménye pedig, ahol a mért elrendezésnek megfelelő csoportokra számoltunk, a 4.b ábrán szerepel. Igen jó egyezést tapasztaltunk a mért és számított görbék között. A számolás alapjául az egyedi pixeleken mért kapcsolásitér-értékek szolgáltak. Minden pixelre a mért H_c tere jellemez.

A vizsgált pixelcsoportok részét képezik a tényleges mintában lévő több ezer pixelnek. Vagyis nem tekinthetők elszigeteltnek, a kapcsolási terük függ az őket körülvevő többi pixel aktuális állapotától. Annak érdekében, hogy megvizsgáljuk a különbséget az elszigetelten álló pixelcsoport, illetve az ugyanolyan méretű, de a többi pixel tengerébe beágyazott pixelcsoport viselkedése között, egy 5×5 -ös pixelcsoportot választottunk ki, amelyet vagy elszigeteltnek, vagy pedig egy 9×9 -es csoport közepén állónak tekintünk. Méréseket és számolásokat végeztünk ezen a csoporton mindkét esetben. A 9×9 -es csoportban az összes pixel kölcsönhatását figyelembe vettük, amikor kiszámítottuk az 5×5 -ös csoport viselkedését. Az elszigetelt csoportra jellemző görbe kicsit meredekebb a többi pixel közé beágyazott eseténél, ami jól mutatja a határfeltételeket. Azonban, a [3]-as hivatko-

zásnak megfelelően, a 9×9-es csoportból származó kölcsönhatási tér csak 3%-kal módosítja a belső pixelek által érzékelt mágneses teret.

A kidolgozott modell és a szimuláció hatékony és megbízható módon használható a teljes hiszterézisgörbe rekonstrukciójára. Ezt bizonyítják a kapott értékek is: az 5×5 pixelt tartalmazó csoport esetén a mért, átlagos koercitív tér $H_{avg} = 234$ Oe, ami nagyon jól egyezik a szimulációval, az elszigetelt 5×5 esetre kapott $H_{isol} = 233$ Oe értékkel. Ugyanakkor a beágyazott esetben a görbeszimuláció $H_{emb} = 217$ Oe értéket eredményez, ami nagyon közel van a teljes görbén mérhető $H_c = 213$ Oe értékhez.

Megjegyzendő még, hogy a vizsgált mágneses rétegek nagyon nagy jósági tényezője, vagyis a lemágnesező térhez képesti igen nagy egytengelyű anizotropia a rendszert rendkívüli módon stabillá teszi a termikus fluktuációkkal szemben. Emiatt a termikus fluktuáció hatását, ami a pixelek kapcsolási terének fluktuációját okozná, nem vettük figyelembe a fentiekben tárgyalt eljárás során. Ez az oka, hogy a számított kapcsolási terek mindig ugyanazok ugyanarra a pixelcsoportra. Ugyanakkor a mérések azt mutatják, hogy az egyes pixelek kapcsolási terének magának is van szórása, továbbá a különböző pixelek kapcsolási terei meglehetősen tág tartományban változnak. Ez a jelenség a részecskék mikrostruktúrájában fennálló különbségekkel, valamint a bennük előforduló hibákkal magyarázható, amit szimulációval nem tudunk figyelembe venni. Viszont a teljes hiszterézisgörbén végzett mérések jól reprodukálják magukat, ami arra utal, hogy a teljes hiszterézisgörbe alakját az egyedi pixelek kapcsolási tereinek eloszlása határozza meg.

Összefoglalás

Mágneses gránátrétegben kialakított monodoménus rendszer esetén vizsgáltuk a részecskék kapcsolási tulajdonságait. Kidolgoztunk egy numerikus modellt, amelynek segítségével a teljes hiszterézisgörbe rekonstruálható az egyedi részecskéken végzett mérések adataiból, és kimutattuk, hogy ez a szimuláció jól egyezik a kísérleti eredményekkel. Ez az eredmény jól tükrözi a numerikus modellezés megbízhatóságát és hatékonyságát. Az egyik fő cél annak a minimális részecskeszámnak a meghatározása volt, amelyre az integrálást kiterjesztve az elméleti számítások a gyakorlati esetet már elfogadhatóan írják le. Ezáltal közvetlenül megmondható az, hogy az elméleti számításoknál milyen közelítést kell alkalmazni. A növekvő elemszámú pixeleken végzett szisztematikus mérések segítségével kimutattuk, hogy a makroszkopikus hiszterézisgörbe körülbelül 100 elemből álló rendszer esetén már nagyon jól közelíti a végtelen sok elemből álló rendszer hiszterézisét. Ugyanakkor a koercitív erő már sokkal kisebb elemszám esetén is beáll a végtelen sok elemmel jellemezhető értékre. Az egyedi részecskék kapcsolási terének eloszlása Gauss-görbével írható le, amelynek félértékszélessége megegyezik a teljes hiszterézisgörbe koercitív terével. A részecskék közötti kölcsönhatási tér a Lorentz-eloszlásnak felel meg, és a szórás erősen függ a mágnesezettségtől.

Irodalom

1. F. Preisach. *Zeitschrift für Physik* 94 (1935) 277.
2. G. Zheng, M. Pardavi-Horvath, G. Vértesy. *Journal of Applied Physics* 81 (1997) 5791.
3. Y.D. Yan, J. Della Torre. *Journal of Applied Physics* 67 (1990) 5370.

A CSATORNAHATÁS SZEREPE IONSUGARAS ANALITIKAI ÉS IONIMPLANTÁCIÓS KÍSÉRLETEKBEN

Zolnai Zsolt, N.Q. Khánh, Battistig Gábor
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

A *Fizikai Szemle* korábbi számaiban már esett szó a több évtizedre visszanyúló gyorsítóépítési hagyományokról a KFKI csillebérci telephelyén, és a nemzetközi mércével mérve is számottevő ionimplantációs és ionsugaras anyagvizsgálati eredményekről. A „hőskort” a Rutherford-visszaszórásos technika (Rutherford Backscattering Spectrometry, RBS) kvantitatív anyagvizsgálatra történő alkalmassá tétele [1] és az első RBS-spektrumszimulációs programok megszületése fémjelzi. Azóta a módszerrel és a rokon jelenségekkel kapcsolatos ismeretek, tudományos és technológiai kérdések köre jelentősen kiszélesedett, ma is inspiráló kihívásokat tartogatva a témához csatlakozó fiatalabb korosztály számára. Szó esett az ionimplan-

tációnak és az RBS-technikának az úttörő szerepéről a szilíciumtechnológiában elterjedt úgynevezett elő-amorfizálási eljárás [2] bevezetésében. A hazai ionsugaras analitikai kutatásokkal kapcsolatban tudomást szerezhettünk az RBS és az ellipszometria egymást hatékonyan kiegészítő alkalmazásairól [2], és az RBS-módszernek a porózus anyagok szerkezetének jellemzésében való sikerességéről [3]. Mindemellert a *Fizikai Szemle*ben kevésbé részletes tárgyalást kapott maga az RBS-technika, illetve ennek csatornahatással kombinált válfaja (RBS in combination with channeling, RBS/C), amelyet kristályos szilárdtestek vizsgálatkor standard eljárásként alkalmazunk. Jelen cikk célja a csatornahatás jelenségének rövid bemutatása,