

Makyoh-topográfia tükörjellegű felületek vizsgálatára

PhD tézisfüzet

Lukács István Endre
Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Témavezető: Dr. Riesz Ferenc
tudományos főmunkatárs
Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Egyetemi témavezető: Dr. Jakab László
egyetemi docens
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Atomfizika Tanszék

Budapest
2006

1. A kutatások előzménye

Kutatómunkámat 2000-ben kezdtem a Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet Eszközfizikai Osztályán. Mint új munkatárs, egy meglévő kutatási témába kapcsolódtam be, amely tükröjellegű felületek topográfiájának egy új vizsgálati módszerével, a Makyoh-topográfiával foglalkozott.

Az integrált áramkörök alapanyagául hibamentes, orientált, tökéletesen sík Si egykristály szelet szolgál. A szeletek síktól való eltérése meggátolhatja a további megmunkálás egyes lépéseit (pl. polírozás), vagy rontja az adott megmunkálási folyamat paramétereit, így a legyártott integrált áramkörök minőségét, amely végeredményben a selejtes termékek mennyiségében nyilvánul meg. A miniatürizálás előrehaladtával a szeletek geometriai tulajdonságainak specifikációi egyre szigorúbbak, míg a specifikációk teljesítése egyre problematikusabb, ha figyelembe vesszük az egyre növekvő szeletátmérőket. Napjainkra szinte az összes vezető mikroelektronikai cég a 300 mm-es szeletátmérő technológiára alapozza gyártását, ugyanakkor ezeknek a szeleteknek a síktól való eltérése nem lehet nagyobb néhány mikronnál.

Ezért mind a szeletgyártók, mind a felhasználók részéről jelentős érdeklődés mutatkozik olyan érintésmentes, nagy pontosságú, tiszta és gyors módszerek iránt, amellyel a Si szeletek geometriai, topográfiai hibái minél előbb – akár már a felhasználás előtt – kimutatható, így a szelet kiemelhető a gyártási folyamatból, és újrafelhasználásra visszaküldhető. Ezzel a lépéssel a szeletfelhasználók sok jelentős és költséges technológiai lépést takarítanak meg.

A tükröjellegű felületek vizsgálatát számos egyéb iparág is megköveteli. Az optikai elemek gyártása során elengedhetetlen, hogy az adott elem felületét a gyártó minősítse, és pontosan a megrendelő által igényelt specifikációkat teljesítse, másrészt a gyártók folyamatos ellenőrzéssel a gyártási folyamat esetleges hibáit idejekorán felismerhetik, ezzel megintcsak számos hibás termék kihozatalát spórolva meg. Továbbá az információs technikában használt optikai és mágneses lemezek valamint mágneses fejek gyártása és a termék minősége és élettartama szempontjából is óriási jelentőséggel bír az alapanyagok topográfiai jellemzői, síksága.

A 1980-as évek elején egy ősi eljárás, a Makyoh adaptációjaként új topográfiai vizsgálati módszer jelent meg: a Makyoh-topográfia, amely alkalmas tükröjellegű felületek mikrodeformációinak megfigyelésére. Működési elve a következő: Ismert tulajdonságú – praktikusán kollimált – inkoherens fénynyalábbal megvilágítjuk a felületet, majd a visszaverődő fényt egy ernyőn detektáljuk, amely adott távolságban van a vizsgált felülettől. A gyakorlatban természetesen CCD kamerát, lencsét, tükröt és egyéb optikai elemeket tartalmazó elrendezések is használatosak. Az ernyőn létrejött intenzitáseloszlásból kvalitatív módszerekkel következtetni lehet a felület topográfiájára. A kvantitatív kiértékelés erősen korlátozott. A probléma megoldására jelenleg két lehetséges elképzelés létezik, amelyek munkám során megvalósításra kerültek. Ezek: a vizsgált felület topográfiájának közelítése különböző iteratív módszerekkel, illetve a mintára vetített

maszk alkalmazása.

2. Célkitűzések

Értekezésem tárgya a leképezés tulajdonságainak vizsgálata, a fent említett kvantitatív módszerek kidolgozása, megvalósítása és azok pontosságának elemzése, továbbá analitikus eredményeim ellenőrzése és demonstrálása mérésekkel és szimulációkkal. Értekezésem tárgya továbbá a mikromechanikai eszközök előállítása közben fellépő deformációk tanulmányozása, valamint különböző vékonyréteg anyagállandók mérésének Makyoh-topográfias megvalósítása, és egyéb topografikus alkalmazásoknak kifejlesztése.

PhD dolgozatomat a célkitűzéseimnek megfelelően a következőképpen tagoltam: Az első fejezet címe: *Makyoh rendszerek*. Ebben a részben összefoglalom a szakirodalomból felhasznált eredményeket, pontos definíciót adok a Makyoh rendszerekre, ismertetem a Makyoh-leképezés alapvető összefüggéseit és ezek korlátait, bemutatom az eddig publikált legfontosabb mérési eljárásokat, végül bemutatom az intézetünkben használt berendezéseket. A második fejezettől kezdődően ismertetem saját tudományos eredményeimet, amelynek címe: *A rendszerben lévő apertúrák hatásai a Makyoh képre*. Ebben a fejezetben elméleti eredményeim felhasználásával bemutatom a Makyoh rendszerben lévő apertúrák hatásait, melyeket kísérleti megfigyelésekkel is igazolok. A harmadik, *Kvantitatív Makyoh-topográfia* című fejezetben részletesen tárgyalom a Makyoh képek visszafejtésére kifejlesztett módszereket, ezen belül foglalkozom az iteratív eljárásokkal, a „vetített rács” módszerével, ismertetem az ezek megvalósítására kifejlesztett algoritmusokat, és bemutatom ezen módszerek előnyeit és hátrányait. Az utolsó, *Makyoh technika a gyakorlatban* című fejezetben bemutatom a Makyoh-topográfia gyakorlati felhasználásával elért egyéb tudományos eredményeket. Különböző membrán struktúrák előállításának Makyoh vizsgálatával és CMOS áramköröket tartalmazó Si szeletek rétegeinek eltávolításakor keletkező deformációk vizsgálatával bemutatom, hogy a módszer sikeresen alkalmazható Si szeletek megmunkálásának lépésközi ellenőrzésére, a folyamatok optimalizálására. A dolgozat összegzéssel és kitekintéssel valamint a téziseim tételes felsorolásával zárul. Dolgozatom tartalmaz továbbá két függelék is.

3. Vizsgálati módszerek

Kutatásom során az analitikus számításaim mellett számítógépes szimulációkkal és különböző mérési beállításokkal is tanulmányoztam a leképezés tulajdonságait. A demonstrációs és mérési céllal készített Makyoh képeket az MFA-ban található berendezéssel készítettem. A berendezésben megvilágításként egy fényvezető szálcsonkkal ellátott, $\lambda = 820$ nm hullámhosszú LED szolgál, amely kis méretű, mindössze $50 \mu m$ átmérőjű, de elég nagy intenzitású ($200 \mu W$), kellően homogén forrást nyújt. A létrejövő Makyoh

kép egy 640×480 pixel felbontású fekete-fehér CCD kamera (különböző objektívekkel és közgyűrűkkel) és egy PC alapú képfeldolgozó rendszer segítségével detektálható és értékelhető ki. A megvilágítás kollimálására egy, a mintatartó fölé néhány centiméter távolságra rögzített 80 mm átmérőjű, 500 mm fókusztávolságú gyűjtőlencse szolgál. A fényforrás és a nagyító lencse között struktúrált maszk elhelyezésére is van lehetőség. A mintáról visszaverődő fény ugyanezen a lencsén ismét áthalad, majd a kamerába jut. A rendszer függőleges orientációjú, így a minta vízszintesen kerül a számára kialakított síkban mozgatható és két tengely körül dönthető mintatartóba. Mind a kamera, mind a fényforrás, a maszk és a kollimátor/nagyító lencse egy függőleges tartóoszlopra van rögzítve, így azok tetszőleges távolságra helyezhetők egymástól és a mintától. A számítógépes szimulációs algoritmusaimat szabványos C programnyelven írtam meg, azokat egy 500 MHz-es AMD-Athlon számítógépen Linux operációs rendszert alatt futtattam.

4. Új tudományos eredmények

Egy Makyoh rendszerben egy ismeretlen felület Makyoh képéből a felület topográfiája zárt alakban nem határozható meg.

1. *A kvantitatív értelmezésre kidolgoztam egy iterációs algoritmust, amely egy adott, Descartes koordináta rendszerben egyetlen változóval leírható felület szimulált Makyoh képét és a rendszer ismert paramétereit felhasználva jó közelítéssel meghatározza a kiinduló felület topográfiáját [T5, T6, T7, T15].*

Mivel az optikai rendszerekben lévő apertúrák befolyásolják a létrejövő képet, a Makyoh rendszerben található apertúrák hatásainak pontos ismerete szükségszerű volt. Meghatároztam a templom elrendezésben valamint a lencse és kamera rendszerben lévő blendék korlátozó hatásait leíró matematikai összefüggéseket. Ezek alapján három határeset lehetséges, amelyek: i.) A blende a minta megfigyelhető területének méretét korlátozza; ii.) a blende a kép méretét korlátozza; iii.) a visszavert sugárnak az optikai tengellyel bezárt szöge korlátozott. Általános esetben a korlátozó hatás jellege vegyes.

2. *Analizáltam, hogy ha a kamera objektívja a minta fölé helyezett lencse fókuszpontjában van, akkor a kamera blendéje meghatároz egy maximális gradiens értéket, amelyre teljesül a következő állítás: a minta azon pontjai, amelyekben a felület gradiense a blende által meghatározott korlátnál nagyobb, nem képezhetők le, sötét foltokként jelennek meg a Makyoh képen, illetve a minta azon pontjai, amelyekben a felület gradiense ennél a korlátnál kisebb, leképezhetők. Egyéb elrendezéseknél a korlátozó hatás vegyes. Analitikus eredményemet kísérletekkel is alátámasztottam [T1, T4].*

Ipari alkalmazásoknál elsőrendű kérdés a módszer sebessége, és a kiértékelés pontossága. Új, érzékenyebb és nagyobb felbontású Makyoh berendezés építése céljából [T2,

T3, T17] tanulmányoztam a „vetített rács” módszer pontosságát analitikus úton és számítógépes szimuláció segítségével.

3. Meghatároztam a „vetített rács” módszer összes legkisebb lépésszámú útra vett numerikus integrálösszegek átlagának rekurzív alakját, amire alapozva egy új mérésiértékelő algoritmust dolgoztam ki. A módszer előnye az algoritmus nagy sebessége. Bebizonyítottam, hogy a leképezést leíró minta-ernyő távolság (L paraméter) viszonylag kis értékeinél a kiértékelés hibája elsősorban a kamera véges pixelfelbontásából adódik, amelynek jellege $1/L$ alakú, továbbá bizonyítottam, hogy a hiba nagysága ebben a tartományban független a vetített rács sűrűségétől és a vizsgált felület alakjától. Az L paraméter viszonylag nagy értékeinél azonban a kiértékelés hibája gyakorlatilag független magától az L értéktől. Ebben a tartományban a kiértékelés hibája elsősorban az integrálközelítő összegzés numerikus hibája. Eredményeimet felhasználva megállapítottam, hogy optimális beállításhoz L értékét a hibafüggvény ($\Delta h(L)$) lineáris tartományára kell állítani [T9, T10, T16].

A „vetített rács” módszer hátránya, hogy kicsi a laterális felbontása. Nyilvánvaló cél tehát a térbeli felbontás növelése.

4. Elsőként végeztem a „vetített rács” módszerrel nagy laterális felbontású Makyoh méréseket. Az új eljárás a vetített rács térbeli eltolásán, és szekvenciális képfelvételen alapul. Laterális felbontása csak az alkalmazott kamera felbontásától, és a vetített rács eltolásának lépésközétől függ. A konkrét mérés során 7-szeresére növeltem a hagyományos „vetített rácsos” Makyoh topográfia laterális felbontását. Az eredményeket összehasonlítottam az interferometrikus módszerrel mért eredményekkel és hullámhossznál jobb egyezést kaptam. Először alkalmaztam a relaxációs módszert „vetített rácsos” Makyoh képek kiértékelésére. Bebizonyítottam, hogy a Makyoh leképezést leíró $\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{f}(\mathbf{r})$ egyenletet differenciálva egy Poisson alakú egyenlethez jutunk, amelynek megoldása a relaxációs módszerrel közelíthető [T8, T15].

A szilícium szeletek újrahasznosítása a szilícium ipar napjaink dinamikusan fejlődő ága. A technológia fejlesztésénél szükségyszerű a művelet során keletkező deformációváltozások ismerete, ellenőrzése. A Makyoh módszert először alkalmaztam kész CMOS és n-MOS áramkörök felületének deformációinak vizsgálatára az újrahasznosítás egyes lépései után. Módszerünkkel a fémzés által keltett húzó, az oxidréteg által az előbbinél jóval nagyobb nyomófeszültség és az újrahasznosítás egyes lépései során keletkező geometriai illetve feszültségbeli változások kimutathatóak, megállapításaim a következők:

5. A Makyoh eljárás gyakorlati alkalmazása során megállapítottam, hogy az eredetileg áramköröket tartalmazó, viszonylag sík vagy egyenletesen görbült Si szeletek a rétegeinek eltávolítását követő csiszolás és polírozás során viszonylag síkak illetve egyenletesen görbültek maradtak. A megmunkálás előtt erősen deformált minták esetén a

felület egészén vagy egy részén olyan új deformációk jelentek meg, amelyek nincsenek korrelációban a polírozás előtti alakkal. A marási lépések által okozott deformáció változások nem függtek a szeletek kezdeti deformáltságától. Nagyobb szemcséjű polírgyanta alkalmazása során az integrált áramköri mintázat látható maradt, amelynek oka analóg az eredeti Makyoh tükrök mikrodeformációinak eredetével. Továbbá a felületen sekély, kis átmérőjű mélyedések alakultak ki, amelyeket a polírozás hibáival hoztam összefüggésbe [T11, T15].

A MEMS szerkezetek működését jelentősen befolyásolja a szerkezet geometriai tulajdonsága, a szerkezetet alkotó anyagok különböző anyagállandói és a szerkezet előállításának paraméterei. A Makyoh módszer először alkalmaztam membránszerkezetek előállítási folyamatainak figyelésére és a membránokat alkotó anyagok anyagállandóinak mérésére.

6. *Elsőként alkalmaztam a „vetített rácós” Makyoh módszert nemsztöchiometrikus szilíciumnitrid vékonyréteg hőtágulási együtthatójának meghatározására úgy, hogy a vékonyrétegből Si hordozón létrehozott membránok alakját mértem. A membránok mért alakja jó egyezést mutatott a szimulált alakkal, a kapott $2,62 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ hőtágulási együttható az irodalmi adatok tartományán belül van.*

Elsőként tanulmányoztam a „vetített rácós” Makyoh módszerrel Si-SiN_x membránok előállításakor alkalmazott elektrokémiai marásmegállítás és az egyes lépések (SiN_x eltávolítása, kifűtés, oxid réteg lemarása) hatásait a membrán alakjára. Megállapítottam, hogy módszerünkkel kimutatható az elektrokémiailag megállított marás során fellépő feszültség, amely a kifűtés során drasztikusan tovább nő. Az oxidmarás során némiképp csökken a szerkezetben a mechanikai feszültség [T4, T12, T13, T14, T15].

5. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

T1 István E. Lukács, Ferenc Riesz: *Imaging-limiting effects of apertures in Makyoh-topography instruments*, Measurement Science and Technology **12**(8) pp. 29-33 (2001), IF: 0,859

T2 Lukács István Endre (23%), Dr. Makai János (24%), Dr. Pfitzner, Lothar (5%), Dr. Riesz Ferenc (34%), Dr. Szentpáli Béla (14%), Patent Application: *Apparatus and measurement procedure for the fast, quantitative, non-contact topographic investigation of semiconductor wafers and other mirror like surfaces*, applicant for all designated States except US, Internation Application No.: PCT/EP 02/11011, International Filing Date: 01.10.2002

Makyoh-topográfia tükröjellegű felületek vizsgálatára

- T3 Lukács István Endre (25%), Dr. Makai János (25%), Dr. Riesz Ferenc (35%), Dr. Szentpáli Béla (15%), Nemzetközi szabadalmi bejelentés: *Mérési elrendezés és eljárás félvezető szeletek és más tükröjellegű felületek érintésmentes, gyors kvantitativ topográfiai vizsgálatára*, szabadalmi oltalom kívánt területe: Magyarország, ügyszám: P0104057, bejelentés napja: 2001 október 2.
- T4 F. Riesz, I. E. Lukács, Cs. Dücső, K. Hjort: *Makyoh topography: Instrumental Aspects and Quantitative Study of Deformation of Semiconductor-based Dielectric Membrane Structures*, 2nd Workshop "Micromechaniced Circuits for Microwave and Milimetersize Wave Applications", 27 October 2000 Budapest, Extended Abstracts pp. 18-19
- T5 I. E. Lukács, F. Riesz: *A Simple Algorithm for the Reconstruction of Surface Topography from Makyoh-topography Images*, VIth Polish Conf. on Crystal Growth, 20-23 May 2001, Poznan, Poland; Crystal Research Technology **34**(8-10) pp. 1059-1064 (2001), IF: 0,536
- T6 F. Riesz, I. E. Lukács: *Possibilities of Quantitative Makyoh Topography*, Proceedings of 3rd International EuroConference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems 16-18 October 2000 Smolenice Slovakia, pp. 215-218
- T7 I. E. Lukács, F. Riesz: *Surface Topography Measurement of Semiconductor Wafers by the Makyoh Method: A Simple Algorithm for the Reconstruction of Surface Profile*, XXXth International School on Physics of Semiconducting Compounds, 1-8 June 2001, Jaszowiec, Poland, p. 98
- T8 I. E. Lukács, F. Riesz, Z. J. Laczik: *High Spatial Resolution Makyoh Topography Using Shifted Grid Illumination*, 6th Intl. Workshop on Expert Evaluation and Control of Compound Semiconductor Materials and Technologies, 26-29 May 2002 Budapest; Phys. Stat. Sol. (a) **195**(1) pp. 271-276 (2003), IF: 0,95
- T9 I. E. Lukács, F. Riesz: *Analysis of Errors of Makyoh-topography Surface Height Profile Measurements*, XXXIInd International School on the Physics of Semiconducting Compounds, 30 May-6 June 2003, Jaszowiec, Poland, p. 153
- T10 I. E. Lukács, F. Riesz: *Error analysis of Makyoh-topography surface height profile measurements*, 10th International Conference on Defects - Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP-X), 29 Sept. - 2 Oct. 2003, Batz-sur-Mer, France; Eur. Phys. J. - Appl. Phys. **27** (1-3) pp. 385-388 (2004), IF: 0,745
- T11 I. E. Lukács, F. Riesz: *Makyoh-topography Assessment of Etch and Polish Removal of Processed Circuits for Substrate Re-use*, Microelectric Engineering, **65**(4) pp. 380-386 (2003), IF:0,9

Makyoh-topográfia tükörjellegű felületek vizsgálatára

- T12 I. E. Lukács, P. Fürjes, Cs. Dücső, F. Riesz, I. Bársony: *Process Monitoring of MEMS Technology by Makyoh Topography*, Micromechanics Europe, 6-8 October 2002, Sinaia, Romania, pp. 283-286
- T13 I. E. Lukács, Zs. Vízváry, P. Fürjes, F. Riesz, Cs. Dücső, I. Bársony: *Determination of Deformation Induced by Thin Film Residual Stress in Structures of Millimeter Size*, Spring Meeting of the MRS, 5-8 June 2002 Strasbourg, France; *Advanced Engineering Materials* 4(8) pp. 625-627 (2002), IF: 0,901
- T14 F. Riesz, I. E. Lukács, Cs. Dücső, B. Szentpáli, K. Hjort: *Makyoh Topography Studies of the Deformation of Micromachined Membrane Structures*, *Micromachined Microwave Devices and Circuits*, pp. 93-101 (2002), IF: 1,299
- T15 Riesz Ferenc - Lukács István Endre: *Kvantitatív Makyoh-topográfia tükörjellegű felületek simaságának vizsgálata*, *Bányászati és kohászati lapok. Kohászat.* 2.sz pp. 45-50 (2005)
- T16 F. Riesz I. E. Lukács: *Sensitivity and Measurement Errors of Makyoh Topography*, 7th Expert Evaluation & Control of Compound Semiconductor Materials & Technologies, 1-4 June 2004 Montpellier, *Phys. Stat. Sol. A*, **202**(4) pp. 584-589 (2005), IF: 0,86
- T17 I. E. Lukács, J. P. Makai, F. Riesz, I. Eördögh, B. Szentpáli, I. Bársony, I. Réti, A. Nutsch: *Wafer flatness measurement by Makyoh (magic-mirror) topography for in-line process control*, Proc. 5th European Advanced Equipment Control / Advanced Process Control, 14-16 April 2004, Dresden, Germany, p. 514.