ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA
MINŐSÉGBIZTOSÍTÁS * ÁLLAPOTELLENŐRZÉS
Elektronikus folyóirat
2011/1-2

MAKYOH-TOPOGRÁFIA: EGY OPTIKAI MÓDSZER A FELÜLETI SIMASÁG ELLENŐRZÉSÉRE
MAKYOH TOPOGRAPHY: AN OPTICAL METHOD FOR THE TESTING OF SURFACE FLATNESS

RIESZ FERENC, MAKAI JÁNOS PÉTER, LUKÁCS ISTVÁN ENDRE

Kulcsszavak: *felületi simaság, felületi morfológia, optikai metrológia, geometriai optika*
Keywords: *surface flatness, surface morphology, optical metrology, geometrical optics*

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk egy ősi elvű optikai vizsgálati eljárást ismertet tükörjellegű felületek simaságának a vizsgálatára. A módszer elve: a mintát kollimált fénynyalábbal világítjuk meg, és a visszavert nyalábot egy távoli ernyőn jelenítjük meg. A felületi egyenetlenségek fókuszáló vagy defókuszáló hatása intenzitásváltozásokat eredményez a visszavert képben. A cikkben bemutatjuk a módszer geometriai optikai modelljét, elemezzük az érzékenységet és a megvilágítás koherenciája okozta hatásokat. Alkalmazási példákat is ismertetünk elsősorban a félvezető technológia területéről.

ABSTRACT

The paper describes an optical tool for the flatness testing of mirror-like surfaces. The principle of the method is the following: the sample is illuminated by a collimated light beam and the reflected image is intercepted by a distant screen. The focusing and defocusing effects of the surface irregularities cause intensity variations in the reflected image. The paper describes the geometrical optical model of the method, analyses its sensitivity and the effect of the illumination coherence. Application examples are shown as well, mainly from the field of semiconductor technology.

BEVEZETÉS

Tükörjellegű felületek simaságának és felületi hibáinak a vizsgálatát az ipar számos területe igényli. A legfontosabb és legnagyobb igényeket támasztó alkalmazás a félvezető technológia. A szeletek felületének síktól való eltérése meggátolhatja a további megmunkálás egyes lépéseit, vagy rontja az adott megmunkálási folyamat paramétereit, így a gyártott eszközök minőségét, amely a szelet visszafordíthatatlan károsodásában vagy a selejtes termékek mennyiségében nyilvánul meg. Hasonló követelményekkel találkozunk az optikai elemeknél, egyes precíziós mechanikai alkatrészekkel valamint az optikai és mágneses adattároló lemezekkel kapcsolatban.

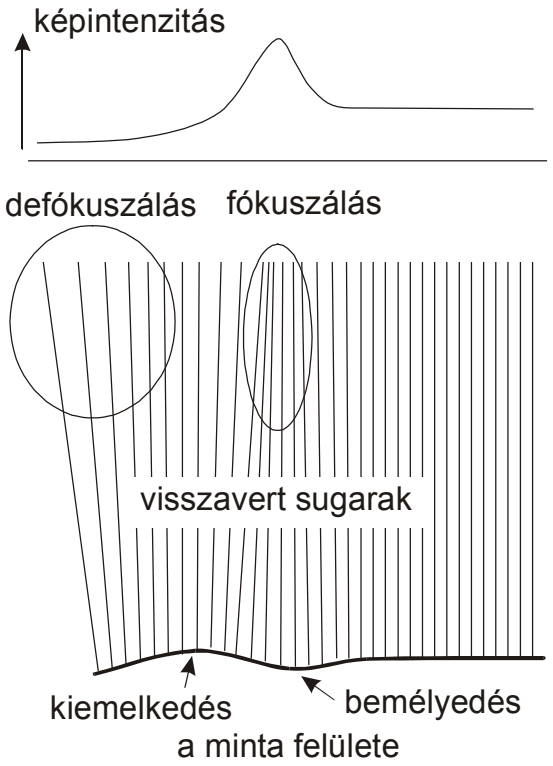
MTA, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet, 1121 Budapest, Konkoly-Thege út 29-33.
e-mail: riesz@mfa.kfki.hu

A felület síkságának az ellenőrzésére számos módszer használatos. Tapintótűs eljárással a felületi domborzat nagy pontossággal mérhető, de a módszer lassú, mechanikai mozgatást igényel és a tű a felület károsodását is okozhatja. Az érintésmentesség igényét az optikai módszerek elégítik ki, ilyenek a lézeres pásztázás, a konfokális elven alapuló pásztázó módszerek és a különféle topografikus – főként interferometrikus – módszerek.

Az 1970-es évek végén új, érdekes elvű optikai vizsgálati módszer jelent meg a felületi simaság vizsgálatára: a Makyoh-topográfia [1]. A „Makyoh” japán szó, jelentése „varázstükör”, és egy ősi eredetű, szakrális felhasználású tükröt jelöl. A ránézésre közönségesnek látszó tükör, ha a felületére párhuzamos fénysugár (pl. egy résen bevilágító napfény) esik, valamilyen ábrát vetít egy néhány méter távolságban levő felületre [2]. A tükör hátoldalán domborművű ábra (pl. egy Buddha-kép) található, amely megfelel a kivetített képnek, ezzel mintegy az átlátszóság illúzióját keltve. A jelenségért a tükröző felület szabad szemmel nem látható mikrodeformációi felelősek, amelyeket a hátoldal megmunkálása okoz. A képalkotás lényege pontosabban a következő: a felületre kollimált és homogén eloszlású fénynyaláb esik. Ha a felület tökéletesen sík, a felülettől távolabb eső ernyőn egy egyenletes fényeloszlású folt jelenik meg. Ha azonban a felületen egyenetlenségek találhatók, ezek a visszaverődő fénysugár párhuzamosságát és így intenzitáseloszlását megzavarják, és az ernyőn a felületi topográfiát valamilyen módon visszatükröző kép jelenik meg (1. ábra). Az elv így alkalmas tükörjellegű felületek topográfiájának a vizsgálatára. A Makyoh-topográfia további előnyei: rendkívüli egyszerűsége, olcsósága, és az, hogy nem igényel pontos beállítást. A legnagyobb hátrány a kvantitatív értelmezés korlátozottsága. Így a Makyoh elsősorban félkvantitatív, összehasonlító vizsgálatokra a legalkalmasabb.

Az eljárás leggyakoribb alkalmazása a félvezető szeletek válogatása és a szeletek gyártási – vágási, polírozási – hibáinak elemzése [1]. Beszámoltak mechanikai megmunkálású fémfelületek vizsgálatáról is [3]. Alkalmas elrendezés

esetén a módszer érzékenysége megfelel a félvezetőipar szigorú követelményeinek: 0,5 mm távolságon 50 nm mély felületi hiba detektálását is jelentették. A gyakorlatban a fentebb vázolt alapelrendezést CCD kamerával és egyéb optikai elemekkel egészítik ki. Makyoh elvű vizsgálóberendezés kereskedelmi forgalomban is kapható.



1. ábra: A Makyoh-topográfia képalkotásának a vázlata

Fig. 1. Scheme of Makyoh-topography imaging

A KÉPALKOTÁS OPTIKAI MODELLJE ÉS FŐBB TULAJDONSÁGAI

A képalkotás geometriai optikai modellje a következőképpen vázolható fel [4, 5]. Vegyünk egy közelítőleg sík, $h(\mathbf{r})$ felületi domborzattal jellemezhető felületet és egy azzal párhuzamos síkú, attól L távolságban elhelyezkedő ernyőt. A mintafelület egy adott $\mathbf{r}$ helyvektorú pontjáról visszaverődő merőleges beesésű fénysugár essen az ernyő $\mathbf{f}(\mathbf{r})$ pontjába. Kis beesési szögek esetén $\mathbf{f}(\mathbf{r})$ a visszaverődés törvénye alapján felírható a következőképpen:

$$\mathbf{f}(\mathbf{r}) = \mathbf{r} - 2L \operatorname{grad} h(\mathbf{r}). \qquad (1)$$

Az ernyő $\mathbf{f}(\mathbf{r})$ pontjában mért képintenzitás, $I(\mathbf{f})$ a megvilágító sugáráramra normálva a következőképpen adható meg. Egy infinitezimálisan kis keresztmetszetű fénysugár adott pontjában mért sugáráram a fénysugár keresztmetszetével fordítottan arányos. Így $I(\mathbf{f}) = \rho|dA_r/dA_f|$, ahol dA_r és dA_f rendre a felületről visszaverődő fénysugár keresztmetszete a minta és az ernyő síkjában és ρ a felületi reflexiós tényező (a kis beesési szög miatt a nem merőleges beesésből eredő tényezőket elhanyagoltuk). Elemi differenciálgeometriai számításokból következik [4, 5], hogy a keresett intenzitás:

$$I(\mathbf{f}) = \frac{\rho}{\left|(1-2LC_{\min})(1-2LC_{\max})\right|}, \qquad (2)$$

ahol $C_{\max}$ és $C_{\min}$ rendre a maximális és minimális főgörbületek, amelyek $h(\mathbf{r})$-ből számíthatók. Az (1) és (2) egyenletek alapján már bármely tetszőleges felület Makyoh-képe előállítható L ismeretében.

Belátható [6], hogy ha a felület minden pontjában a lokális görbületi sugár jóval nagyobb, mint L, a képintenzitás a következőképpen közelíthető (egységnyi felületi reflexiót feltételezve):

$$I(\mathbf{r}) \approx 1 + 2L\nabla^2 h(\mathbf{r}). \qquad (3)$$

A fenti egyenletekből következik, hogy kis $|L|$ mellett a mintafelület egy adott pontja és a pont képe közel lesz egymáshoz (a mintát és az ernyőt azonos síkba képzelve) és a képkontraszt fő összetevőjét a felület reflexiós tényezőjének az inhomogenitása adja. Növekvő $|L|$ megnöveli a pont és képe közti távolságot és a kép kontrasztját is. Adott felület esetén a képalkotást L határozza meg, annak helyes megválasztása tehát kulcsfontosságú. L változtatásával kényelmesen beállítható a kívánt, mintának megfelelő érzékenység.

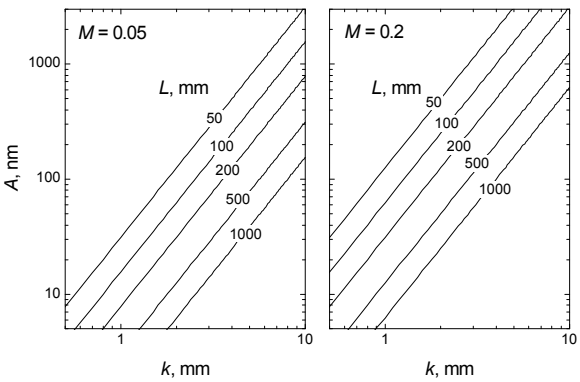
KVANTITATÍV KITERJESZTÉS

A Makyoh-topográfia leképezését leíró egyenletek nem invertálhatóak, ezért a felületi Makyoh kép alapján a felületi domborzat meghatározása általános esetben analitikusan nem lehetséges. Bár a kvantitativitás megvalósítására történtek kísérletek iterációs algoritmusok alkalmazásával, a kiértékelés rendkívül számításigényes, és nem kellően robusztus. Célravezetőbb strukturált megvilágítás alkalmazása. Ha a homogén megvilágítást valamilyen maszk segítségével strukturáljuk, ezzel mintegy „megjelöljük” a felület bizonyos pontjait. Így az (1) egyenlet alapján a felület gradiense a megjelölt pontokban meghatározható, ha ismerjük az ideális sík felülethez tartozó pozíciót. A strukturálás legcélszerűbb megvalósítása egy négyzetháló mintájú maszk. A felületi domborzat ezután valamilyen integrálközelítő összeggel számítható ki a rácspontokban. Ezzel lényegében a Hartmann- és Shack–Hartmann-féle hullámfront-érzékelési eljárásokkal rokon módszerhez jutunk. Mivel a jelen cikk témája a kvalitatív változat, a részletekkel kapcsolatban az irodalomra utalunk [7, 8].

A MÓDSZER ÉRZÉKENYSÉGE

Mivel a kép pontjainak az intenzitásértékeit a lokális görbületek határozzák meg, a módszer érzékenységének meghatározása a mérhető *felületi magasságprofil* tekintetében elvi nehézségekbe ütközik. Célszerű az érzékenységet más módon, a következőképpen tárgyalni: kiválasztunk egy valamilyen egyszerű, jellegzetes geometriájú felületelemet, ennek Makyoh-képét kiszámítjuk, ebből meghatározzuk a kép jellemző maximális kontrasztját, mely annak detektálhatóságára utal. Majd rögzítünk egy minimális, még éppen detektálható képkontraszt-értéket, s ebből a felületelem jellemzőit visszaszámoljuk. A módszert egy egyváltozós szinuszos felületre mutatjuk be [9]. Ez jól közelít bármilyen periodikus vagy kváziperiodikus jellegű felületet. A (2) egyenlet egyváltozós alakja alapján egy A csúcstól csúcsig mért amplitúdójú és k periódushosszú felület esetében a kontrasztra jellemző moduláció M [9] (definíció szerint $M = (I_{max}-I_{min})/(I_{max}+I_{min})$, ahol a I_{max} és I_{min} a kép maximális illetve minimális intenzitása):

$$M = AL(2\pi/k)^2. \qquad (4)$$



2. ábra: A minimális detektálható A felületi amplitúdó a k periódushossz és L függvényében, két különböző M modulációs értékre

Fig. 2. The detectable minimum amplitude A as a function of period k and L for two different M modulation values

A 2. ábra mutatja az e képlet alapján számított A amplitúdóértékeket L és a periódushossz függvényeként a moduláció két értékére. Az M = 0,05 moduláció egy ideális esetben éppen detektálható, míg az M = 0,2 érték egy biztonsággal észlelhető kontrasztértéket jelent. Látható pl., hogy 0,5 mm méretű felületi hiba esetén a tipikusnak mondható L = 500 mm mellett az érzékenység 10 nm alatt van. Fontos megjegyezni, hogy az érzékenység $M \sim 1/k^2$ jellegű, vagyis a kis méretű felületi hibákra érzékenyebb a módszer. (Természetesen a képalkotó rendszernek megfelelő laterális felbontással kell rendelkeznie.)

Sajnos, mivel a leképezés törvényei nemlineárisak, a fenti analízis nem terjeszthető ki általános esetben bonyolultabb felületi profilokra pl. Fourier-analízis útján.

HULLÁMOPTIKAI HATÁSOK

Bár a geometriai optikai modell csak közelítő, a legtöbb gyakorlati esetben mégis kielégítő leírást ad. Diffrakciós jelenségek ugyanis akkor kerülnek előtérbe, amikor a képsík egy pontjában sok sugár találkozik, vagy élek, nyílások stb. árnyéka mentén. A minta szélén vagy lokalizált felületi hibák körül létrejövő elhajlási csíkok illetve gyűrűk erős kontraszttal rendelkeznek, így azok többnyire jól azonosíthatóak; ezek a hibák felismerését meg is könnyíthetik.

A másik hullámoptikai hatás a szemcsekép (elterjedt angol elnevezéssel speckle) megjelenése a Makyoh-képben. A szemcsekép egy koherens vagy részben koherens fénynyalábnak érdes felületről való visszaverődése során, a nyaláb önmagával való interferenciája útján keletkezik [10]. A Makyoh-topográfia elrendezéséből természetszerűen következik, hogy ezzel a hatással számolnunk kell (ekkor az ún. objektív szemcseképet kapjuk). A jelenség metrológiai alkalmazásai szerteágazóak [10, 11], a Makyoh-topográfiában azonban a szemcsekép mint zavaró hatás jelenik meg. A szemcsekép alapvetően statisztikus természetű; számunkra fontos két általános jellemzője az átlagos szemcseméret s és a kontraszt C. Az átlagos szemcseméret az alábbi összefüggés segítségével közelíthető:

$$s \cong \lambda \frac{L}{d}, \qquad (5)$$

ahol λ a megvilágítás hullámhossza és d annak a felületrésznek az átmérője, amelyről az ernyő egy adott pontjába érkező sugarak interferenciát hoznak létre. Ideális esetben d a minta átmérője, azonban a gyakorlatban a fényforrás nem tökéletes koherenciája miatt ez kisebb is lehet. Különböző érdességű felületekkel végzett kísérleteink szerint empirikusan az $s \approx |L|/1000$ összefüggést kaptuk (λ = 670 nm és 50 µm foltátmérő mellett), amely a $d \approx$ 1,5 mm értékhez vezet.

A szemcsekép kontrasztja a felület statisztikai jellemzőitől és a megvilágítás koherencia tulajdonságaitól függ, általános esetben igen bonyolult módon [10]. Általánosságban annyi elmondható, hogy a kontraszt monoton növekszik a felületi érdességgel és $\lambda/4$ körüli rms érdesség körül egységnyi értéknél telítődik. Napjaink félvezető szeleteinek az érdessége a nm alatti tartomány-

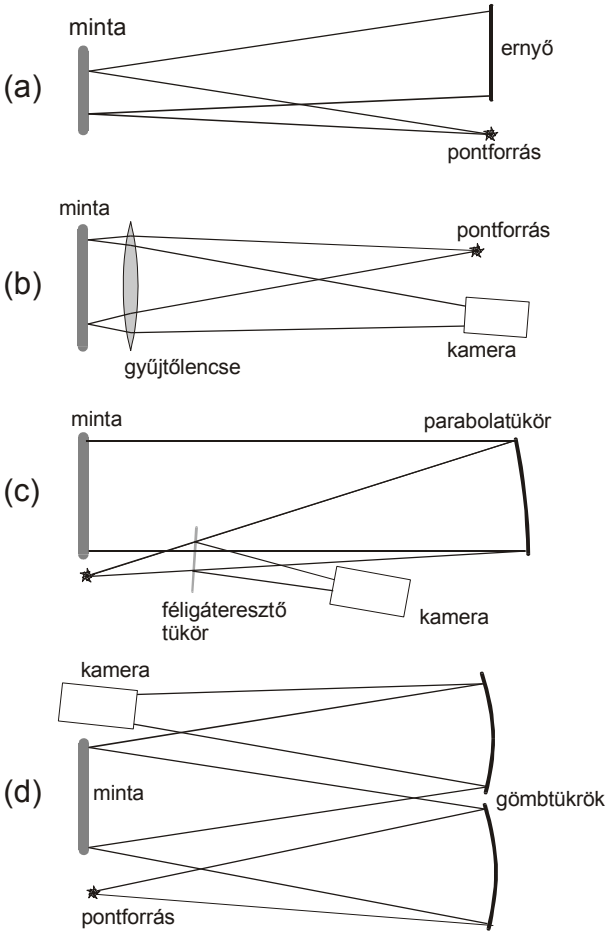
ban van, ez a gyakorlatban észrevehetetlen (maximálisan néhány százaléknyi) kontrasztot okoz. Leválasztott fémrétegek, kémiailag mart vagy nem tökéletesen megmunkált félvezető felületek tipikusan néhányszor 10 nm érdessége azonban már nagyobb, jól észlelhető, a 10% nagyságrendjébe eső kontrasztot eredményez. Mechanikailag megmunkált fémfelületek érdessége a mikrométeres tartományban is lehet.

A szemcsekép megjelenésében hasonló egy kváziperiodikus textúrájú felület Makyoh-képéhez, így azzal könnyen összetéveszthető. A két jelenség megkülönböztetésére azonban módot ad az *L* függvényében mutatott eltérő viselkedés: (1) a szemcsekép kontrasztja csak az érdességtől függ, *L*-től nem, míg a Makyoh-kép kontrasztja *L*-lel nő: (2) a szemcse jellemző mérete *L*-lel arányos, míg a Makyoh-kép jellemző méretei nem függenek *L*-től (globálisan sík felületet feltételezve). Az érdességről esetlegesen rendelkezésre álló független információk alapján is eldönthető, számíthatunk-e szemcseképre. A szemcseképre a kísérleti eredményeket ismertető részben mutatunk példát.

A MAKYOH-TOPOGRÁFIA MEGVALÓSÍTÁSA A GYAKORLATBAN

A legegyszerűbb mérési elrendezés az ősi felhasználást utánozza („templom-modell"). A kollimált megvilágítást nyalábtágítóval ellátott gázlézer vagy távol elhelyezett pontszerű fényforrás (LED vagy izzószálas lámpa) biztosítja, a kép megjelenítésére ernyő szolgál. A fényutak hossza az érzékenységi igényektől függően akár több méter is lehet. Természetes elvárás az elrendezés méretének a csökkentése és CCD kamera használata. Ez a következő elrendezéssel valósítható meg [1, 12]: a mintához közel nagy átmérőjű gyűjtőlencse helyezkedik el; ez kollimátorként szolgál a pontszerű fényforrás és nagyítólencseként a kamera számára. Ezen összeállítás legnagyobb hátránya, hogy nagy átmérőjű minták vizsgálatára nem, vagy csak jelentős korlátozásokkal alkalmas, mivel a minta maximális mérhető területét a lencse átmérője korlátozza. Ugyanis a kollimátor/nagyító lencse nem készíthető tetszőlegesen nagy méretben lencsehibák nélkül. Ennek a problémának a megoldására tükör alapú rendszert terveztünk és építettünk meg intézetünkben [8, 13]. Az „off-axis" elrendezésben használt parabolatükör miatt nincs szférikus aberráció, a nyalábosztó alkalmazása miatt a leképezés parallaxismentes. Mint említettük, az elrendezés legnagyobb előnye a méretbeli skálázhatóság: 450 mm átmérőjű, λ/20 felületi minőségű off-axis parabolatükrök kereskedelmi forgalomban kaphatók, lehetővé téve a korszerű nagy (300 és 450 mm) átmérőjű Si szeletek vizsgálatát. Alternatív elrendezésként a megvilágító és a detektáló fényútban külön-külön gömbtükröket tartalmazó összeállítást is építettünk és demonstráltuk működését [14]. Ezen összeállítás előnye a parabolatükrös rendszerhez képest a jóval kisebb költség. A kamerát alkalmazó összeállítások esetében az ekvivalens *L* a kamera objektív távolságbeállításával kényelmesen, tág határok közt szabályozható (*L* lehet negatív is).

A 3. ábra illusztrálja a fent vázolt összeállításokat.

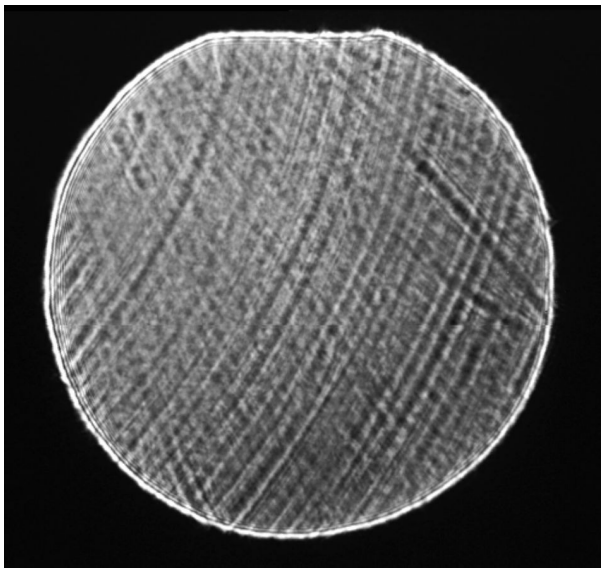


3. ábra: A gyakorlatban használt Makyoh-topográfiás elrendezések: (a) „templom-modell", (b) lencse alapú, (c) parabolatükör alapú és (d) gömbtükör alapú rendszer

Fig. 3. Practical Makyoh-topography set-ups: (a) temple model, (b) lens based, (c) paraboloid mirror based and (d) spherical mirror based set-ups

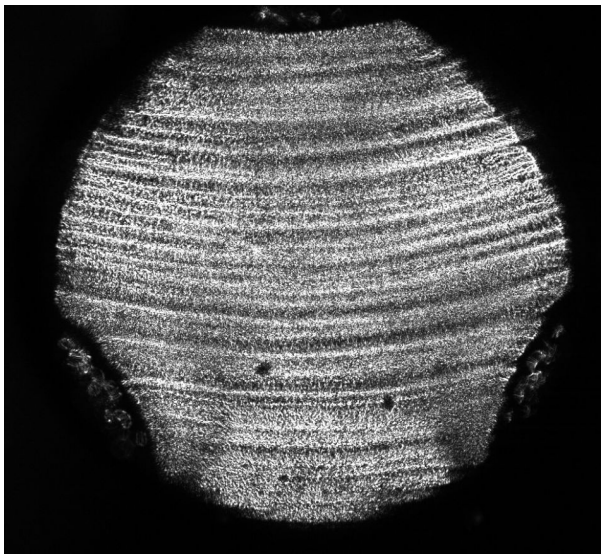
ALKALMAZÁSI PÉLDÁK

Az itt bemutatott Makyoh-képek az intézetünkben épített lencse alapú berendezéssel [12] készültek. A 4. ábra egy félvezető szeletről készült; jól láthatóak a (feltehetően a szelet fűrészelése okozta) íves nyomok (*L* = –480 mm mellett).



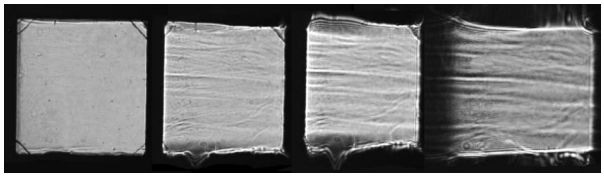
4. ábra: Félvezető szelet Makyoh-képe, feltehetően fűrészelés okozta íves nyomokkal
Fig. 4. Makyoh image of a semiconductor wafer showing arc traces probably due to sawing

Az 5. ábrán egy félvezető szelet szabad szemmel is megfigyelhető, ismeretlen eredetű íves morfológiája látható, valamint egy „X" alakú nagyléptékű felületi alakzat is feltűnik (itt $L \approx 10$ mm). A képen erős kontrasztú szemcsekép mintázata is megfigyelhető.

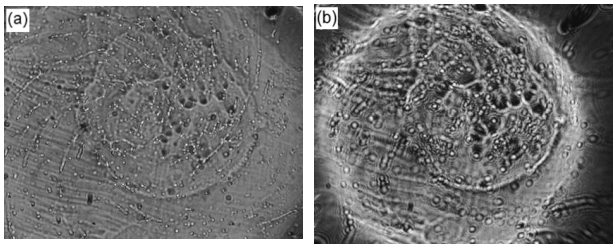


5. ábra: Egy félvezető szelet Makyoh-képe, íves nyomokkal, egy „X" alakú alakzattal és erős kontrasztú szemcseképpel
Fig. 5. Makyoh image of a semiconductor wafer showing arc traces, an X shaped feature and strong speckle contrast

A 6. ábra egy kémiai marásnak kitett AlGaAs/GaAs félvezető heteroszerkezet Makyoh-képeit mutatja különböző L beállítások mellett (0, –65 mm, –155 mm és –340 mm; a minta élhossza 16 mm). Látható, hogy a marás okozta sávos jellegű morfológia okozta kontraszt L növelésével hogyan lesz egyre erősebb, ugyanakkor hogyan torzul a négyzet alakú szelet képe. A szelet szélének képén elhajlási csíkrendszer is megfigyelhető. A 7. ábra egy Si szeletből kémiai marással történő vékonyítással előállított membrán mart felületét mutatja L = –80 mm és –19 mm mellett. A képeken megfigyelhető a jellegzetes felületi morfológia valamint pontszerű hibák sokasága. A sötét foltok bemélyedésre, míg a világosak kiemelkedésre utalnak (mivel L negatív; vö. 1. ábra). A hibák jellegzetes spirálszerű elrendeződése a marószer áramlását jelezhetik. A nagyobb L mellett készült képen a pontszerű hibák körül elhajlási kép látható.

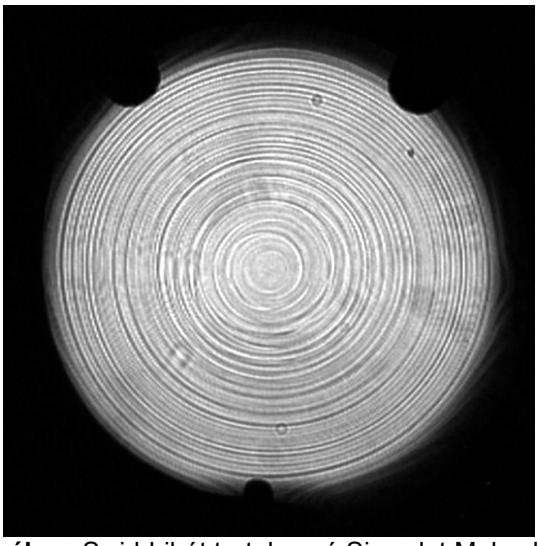


6. ábra: Kémiai marásnak kitett AlGaAs/GaAs heteroszerkezet Makyoh-képei különböző L beállítások mellett (balról jobbra: 0, –65 mm, –155 mm és –340 mm)
Fig. 6. Makyoh image of a chemically etched AlGaAs/GaAs heterostructure at different L settings (from left to right: 0, –65 mm, –155 mm

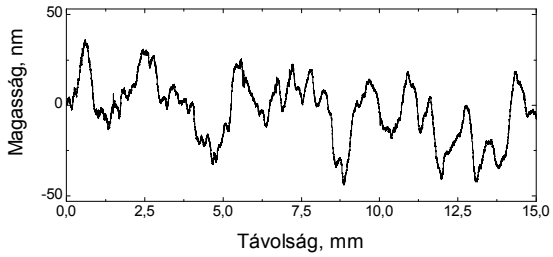


és –340 mm)
7. ábra: Kémiai marással vékonyított Si membrán mart felületének Makyoh-képei (a) L = –19 mm és (b) –80 mm mellett.
Fig. 7. Makyoh images of the etched surface of a chemically thinned Si membrane at (a) L = –19 mm and (b) –80 mm

Az érzékenységre fent bemutatott modell érvényességét egy úgynevezett „swirl" felületi hibával rendelkező Si szeleten is kipróbáltuk [15]. A swirl hiba erős p adalékolású szeleteknél fordul elő, az egykristályöntecs növesztése közben keletkezik és a felületen egy koncentrikus körökből álló, kváziperiodikus jellegű keresztmetszeti profillal rendelkező morfológiai hibaként jelentkezik. A 8. ábra egy jellegzetes Makyoh-képet mutat (ez a parabolatükrös összeállítással készült, L = 390 mm; a szelet átmérője 75 mm). A tapintótűs profil (9. ábra) átlagosan 50 nm amplitúdót mutatott.



8. ábra: Swirl-hibát tartalmazó Si szelet Makyoh-képe
Fig. 8. Makyoh image of a Si wafer with swirl defect

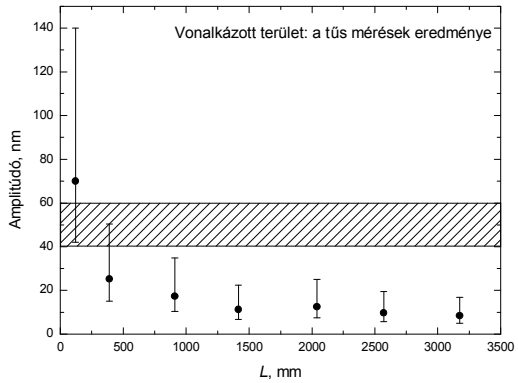


9. ábra: A fenti szelet egy sugárirányú metszetének a tapintótűs méréssel mért magasságprofilja
Fig. 9. Surface stylus scan of the wafer shown above along its radius

A 10. ábra mutatja a Makyoh-képek intenzitás-értékeiből a (4) egyenletből a különböző *L* értékek esetén számított elméleti amplitúdó értékeket. Látható, hogy a modell egyszerűsége és erősen közelítő jellege ellenére a tapintótűs mérésekkel az egyezés kielégítő. A számított értékekben mutatkozó egyértelmű tendencia valamilyen valós fizikai hatásra utal: a valószínű ok az, hogy a növekvő *L* mellett egyre inkább „elkenődik" az ideális profil, ezáltal csökken a moduláció és így a számított amplitúdó is. Ez a mérés egyben egy kísérletileg igazolt érzékenységet is meghatároz: ez a kb. 1.5 mm periódushosszon jobb, mint 50 nm. Megjegyezzük, hogy *L* = 120 mm mellett a mintázat már biztonsággal észlelhető volt.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők ezúton is köszönik a következő munkatársaik segítségét: Bársony István, Réti István, Eördögh Imre, Csákó Tamás és Szörényi Tamás. A kutatómunkát az Országos Tudományos Kutatási Alap (K 68534 sz. szerződés) támogatta.



10. ábra: A fenti szelet Makyoh-intenzitásértékekből számított felületiprofil-amplitúdói *L* függvényében
Fig. 10. Surface profil amplitudes inferred from the Makyoh intensities as a function of L for the wafer studied above

IRODALOM

[1] P. Blaustein, S. Hahn, Solid State Technol. **32** (1989) 27.
[2] Riesz F., Élet és Tudomány **55** (2000) 41.
[3] T. Shiomi, T. Hirogaki, E. Aoyama, K. Ogawa, Proc. AMPT 2006, Jul. 30 – Aug. 3, 2006, Las Vegas, USA, pp. 1-4.
[4] F. Riesz, J. Phys. D: Appl. Phys. **33** (2000) 3033.
[5] Riesz F., Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat **133** (2000) 315.
[6] M. V. Berry, Eur. J. Phys. **27** (2006) 109.
[7] Riesz F., Lukács I. E., Bányászati és Kohászati Lapok – Kohászat **138** (2005) 45.
[8] F. Riesz, I. E. Lukács, J. P. Makai, Proc. SPIE **6616** (2007) 66160L.
[9] F. Riesz, Phys. Stat. Sol. C **6** (2009) 1948.
[10] J. W. Goodman, Statistical properties of laser speckle patterns, in: J.C. Dainty (Ed.), Laser speckle and related phenomena, Springer, New York, 1984, pp. 9-75.
[11] Horváth B., Anyagvizsgálók Lapja **18** (2008) 46.
[12] Szabó J., Makai J., Elektronikai technológia, mikrotechnika **32** (1993) 15.
[13] I. E. Lukács, J. P. Makai, L. Pfitzner, F. Riesz, B. Szentpáli, European Patent EP 1 434 981 B1, July 5, 2006; US Patent 7,133,140 B2, November 7, 2006.
[14] J. P. Makai, F. Riesz, I. E. Lukács, Proc. Third International Conference on Metrology, Tel Aviv, November 14-16, 2006.
[15] F. Riesz, A. E. Pap, M. Ádám, I. E. Lukács, Thin Solid Films **516** (2008) 8087.