

Nagyfelbontású lézer-interferometrikus felületvizsgáló berendezés a nanotechnológia szolgálatában

Czitrovsky Aladár - Hámori András - Kiss Árpád - Pogány Lajos

A cikkben egy nagyfelbontású lézer-interferometrikus felületvizsgáló módszert és berendezést mutatunk be, amely a fényhullám fázisának interferometrikus detektálásával nanométer alatti transzverzális - a felületre merőleges - domborzati felbontást tesz lehetővé. Célunk - a Nanotechnológia című program keretén belül - egy olyan berendezés kifejlesztése, amely számos, csúcsparemeterekkel rendelkező új megoldást tartalmaz. A tervezett berendezés transzverzális felbontása kb. 0,1 nm, ami már az anyag mikrostrukturális paramétereivel is összemérhető (például az atomsíkok távolságával). A berendezés széleskörű alkalmazási lehetőséget nyújthat a különlegesen finom megmunkálású felületek (mikroelektronikai rétegek, memóriaegységek, optikai felületek, csőrpölt lézertükrök, optikai szálak, stb.) minősítésénél, valamint számos olyan területen, ahol precíz technológiák megvalósítása a cél.

Bevezetés

Amikor James Watt 1776-ban, a birminghami üzletember Matthew Boulton megrendelésére, Wilkinson-esztergagépén megépítette az első gőzgépet (ezt New Method for Lessening the Consumption of Steam and Fuel in Fire Engines címmel szabadalmaztatta), az alkotóelemek megmunkálási pontossága alig érte el az 1 millimétert. A gőzgép hengerének átmérője 127 cm volt, teljesítménye nem haladta meg a néhány lóerőt, ennek ellenére a század végére már több mint ötszáz ilyen gép működött az angliai bányákban. A szemléletes összehasonlítás érdekében a későbbi gépeit úgy népszerűsítette, hogy ezekkel akár húsz ló munkáját is helyettesíteni lehet, ami lényeges megtakarítást jelentett (innen származik a lóerő, a teljesítmény ma is használt mértékegysége). Ha nem is olyan gyorsan, mint a mai számítástechnika, a gépgyártás és ezzel párhuzamosan a mérés technika is fejlődött, mivel egy adott tűrésű alkatrész legyártásához legalább egy nagyságrenddel pontosabb mérésre van szükség.

A múlt század második felében az egyre pontosabb méréseket már nem csak a gépgyártás igényelte, egyre több olyan technológia fejlődött ki, ahol a geometriai méretek meghatározása és a felületek minősítése a mikronos és mikron alatti tartományba tolódott. A felületek érdességének, síkszerűségének vagy görbületének minősítésére volt szükség a jó minőségű, reprodukálható mikroelektronikai rétegek technológiájának megalapozásához, optikai szálak létrehozásához, mechatronikai alkatrészek teszteléséhez és számos olyan technológia kifejlesztéséhez, amely a tömeggyártás igényei miatt nagy tőkét mozdított meg. Ez számottevő befektetéseket tett lehetővé a kapcsolódó iparágakba - főleg a mérés technikai kutatásokba és fejlesztésekbe. Az elterjedt tömegtermékekből csak néhányat kiragadva - például a Ferrotec Co. (Szingapúr, www.ferrotec.com.sg) által gyártott winchesterek tárolólemeze fölött (annak forgása közben) a leolvasó és író fej néhány tized mikronra van a felülettől, a Philips CD RW író-olvasó egységében is hasonló pozicionálási követelmények vannak, csakúgy, mint a DVD-író berendezésekben. Ezek után el lehet képzelni, hogy a felületek minősítési követelményei bőven a nanométeres és az alatti tartományba esnek, ami a gépészet hőskorához képest egymilliószoros változást jelet.

A felületek minősítése terén erre a pontosságra jelenleg négy, egymástól eltérő technika képes:

- * Röntgensugár diffrakció (X-ray Diffraction - XRD),
- * elektronmikroszkópia TEM (Transmission Electron Microscopy), SEM (Scanning Electron Microscopy),
- * atomi erő mikroszkópia, ami szintén pásztázó (scanning) módszerrel működik
- * lézeres interferometria (Maudgal, 1998).

A fentiek közül az általunk évtizedek óta művelt lézeres interferometria nagy előnye, hogy a gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából a többiekhez képest jóval egyszerűbb, a minta nem igényel előkészítést (mint például az elektronmikroszkópiában), a mérés érintésmentesen történik, az adatok viszonylag nagy felületről egyszerre jelennek meg, azonnal kiértékelhetők és abszolút méretmeghatározást tesznek lehetővé, mivel a hossz mérték maga a lézervény jól definiálható, stabilizált hullámhossza. További előnyt jelent, hogy a minta topológiája három dimenzióban közvetlenül jeleníthető meg.

A mérés elve azon alapul, hogy egy kettéosztott koherens fényhullám egyik részét a vizsgálandó felületre irányítjuk, majd az onnan visszaverődő fényt (amelynek a hullámfrontját a felület egyenetlenségei torzítják) összehasonlítjuk (összelebegtetjük, illetve interferáltatjuk) annak a másik részével (amely ideális esetben nem szenvedett változást), és a két fényhullám eredőjéből meghatározzuk az összeadott hullámfrontban a felület által okozott perturbációk mértékét. Olyan interferométert, amellyel az egyik ág geometriai elmozdulásait lehetett mérni, először Albert A. Michelson épített 1881-ben (1907-ben kapott érte Nobel-díjat), később többen építettek hasonló berendezéseket, kimondottan felületek profiljának - érdességi paramétereinek, síkszerűségének vagy görbületének - vizsgálatára. Az ilyen interferométerekben az interferencia során az összeadandó hullámfrontok eredményeként kialakuló intenzitásmaximumok és -minimumok közti távolság a fényhullámhossz felének felel meg (piros fény esetén ez kb. 300 nm), detektálni pedig ennek a töredékét is lehet, ezért a mérés a felület fényhullámmal történő "letapogatásához" hasonlítható, melynek során a mérőág hullámfront torzulásának mértéke hordozza a transzverzális felületi

egyenetlenségekre jellemző információt. A hullámfront-torzulás mértékét különböző fázisdetektálási módszerekkel közvetlenül a fél-hullámhossz ezredrészének megfelelő felbontással is le lehet mérni, amit még tovább lehet fokozni. Mint minden nagy pontosságú mérés, ez is nagyon komoly követelményeket támaszt egy olyan mérőrendszerrel szemben, amellyel a felületek nanométer alatti vizsgálatát kívánjuk megvalósítani (a mérést befolyásoló paraméterek pontos ismerete és azok stabilitása igen lényeges). A továbbiakban, az Intézetünkben a Nemzeti Kutatás Fejlesztési Program keretén belül fejlesztett mérőrendszer működési elvét, felépítését, egyes részegységeit és az elkészült laboratóriumi mintapéldányt, valamint annak lehetőségeit mutatjuk be, felvázolva a hazai és külföldi alkalmazásokat.

A felületvizsgáló lézeres interferométer működési elve és felépítése

A lézeres felületminősítő interferométereknek több fajtája létezik, ezek közül a leginkább flexibilis kétsugaras Twyman-Green interferométer (Born - Wolf, 1965; Das, 1991; Sticht - Bass, 1985; Lapp et al., 1987) módosított, fázis-siftelt változatát ismertetjük, amelyben egy különleges jelfeldolgozási módszert alkalmaztunk. A berendezés optikai részének egyszerűsített elrendezése sematikusán az 1. ábrán látható. Itt a lézerből jövő fénysugár megfelelő nyalábformálás után kettéoszlik, egyik része egy referenciaágba, a másik a mérőágba kerül. A referenciaágban a fényhullám fázisát egy piezo-mozgató (PZT) változtatja, a mérőágban pedig a minta felülete torzítja a beeső fényhullám fázisfrontját. A sugarak újraegyesülése után egy speciális CCD kamerával figyelhető meg az interferogram, amiből kiértékelhető a fázisváltozás, abból pedig a vizsgálandó felület profilja.

Ha ebben a rendszerben minden mérést háromszor végzünk el, közben a referencia-ágban PZT-vel $0-p/2$, $p/2-p$, $p-3p/2$ intervallumokban léptetve a fázist, akkor a jelet integrálva egy célszerű jelfeldolgozási módszerrel megkaphatjuk a mintafelület által okozott fázistorzulást. Ebből a fázistorzulásból kiszámolható a felület transzverzális domborzata. Fontos megemlíteni, hogy ebben az esetben a fázis csak modulo $2p$ -re határozható meg. Ha nagyobb a fázisváltozás, akkor ezt a szoftverrel kell korrigálni, feltételezve, hogy a fázisváltozás pontról pontra kisebb $2p$ -nél, mivel ez a következő interferencia csík tartományába esik. A módszer előnye, hogy érzéketlen a belépő fény intenzitás-eloszlására, az interferencia láthatóságára (a maximumok és minimumok intenzitásának különbségére), valamint a minta reflexiók tulajdonságaira. Ezenkívül a szoftver levonja a minta esetleges dőlését, korrigálja a helytelen fókuszszeállítás (gömbi eltérés). A berendezésben változtatható a laterális felbontás (és a képméret) is a mérőági optika nagyításának módosításával. Ha a referencia-ágban elhelyezett tükröt nagyon kis amplitúdóval rezgetjük, akkor a speckle (a koherens sugaraknak a térbeli fluktuációk miatt fellépő lokális intenzitásváltozása) is kiküszöbölhető. Ha az interferométer karjait nem pontosan egyforma hosszúra választjuk, akkor szükség van a lézer hullámhosszához stabilizálására.

A berendezésben alkalmazott He-Ne lézerekben ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$) a hullámhosszat - $D/\lambda - 10^{-7} - 10^{-8}$ -as értékre lehet stabilizálni, a rövid idejű (egy mérés alatti) stabilitás ennél egy nagyságrenddel is jobb lehet. Ebből adódik, hogy a hossz mérték (hullámhossz) instabilitásából származó hiba kb. $0,006 \text{ nm}$. A másik hibaforrás a levegő turbulenciája által okozott törésmutató-változással kapcsolatos hullámfront-torzulás, amit nagymértékben lehet csökkenteni a légáramlás csökkentésével és több mérés eredményének átlagolásával. A mérési pontosságba beleszól még a mérőág és a referenciaág termikus változása is, amit jó hővezetésű, kis tágulási együtthatójú anyagok alkalmazásával lehet csökkenteni (Wolf, 1980; Wolf, 1994; Vikram, 1990; Thorlabs Catalog, 2003; Spindler-Hoyer Catalog, 2002). A nanométeres és az alatti skálán történő méréseknél már nem elhanyagolhatóak a mintafelfogás közben fellépő mechanikai feszültségek sem, amit speciális mintafelfogókkal lehet csökkenteni, valamint a mérés közben fellépő vibrációk, melyeket rezgésmentes feltételek biztosításával lehet kiküszöbölni. Az interferenciakép megfigyeléséhez speciális CCD kamerát alkalmazunk, amely a szürke gradációkat 14 bites felbontással tudja regisztrálni, valamint egy általunk kifejlesztett kiértékelési módszert. Mivel az interferenciacsíkok közötti távolság $316,4 \text{ nm}$ ($\lambda/2$), a fentiekből adódó maximális felbontás $0,019 \text{ nm}$. A mérési eredményt azonban egyéb mérési és kiértékelési hibák is befolyásolják - ilyen például a referencia fázistolás hibája (a PZT linearitása), a parazita interferencia, a referenciafelület pontossága, a detektorzaj, ami relatíve annál nagyobb, minél kisebb az intenzitás (ezért célszerű minél nagyobb teljesítményű lézert alkalmazni), a kvantálási hiba (főleg a kis láthatóság esetén), a fotodetektor nemlinearitása és a koherens zaj. A fentiekben kívül a mérés pontosságába beleszólnak még az optikai rendszer hibái - a térbeli felbontás nemlinearitása, amely a leképző rendszer apertúrájától függ, az interferométer aberrációi, a nem kívánt reflexiók, valamint a szórt fény koherens összeadása az interferométerben terjedő lézerefénnyel. Anélkül, hogy belemennénk az összes hibaforrás részletes elemzésébe, megjegyezzük, hogy a felsorolt tényezők a becsült maximális felbontást akár több nagyságrenddel le tudják rontani, de ezek nagy részét ki lehet küszöbölni, vagy legalábbis nagymértékben csökkenteni lehet. Ha ezt megvalósítjuk, akkor a kifejlesztett rendszerben a $0,1 \text{ nm}$ alatti felbontás is elérhető.

A megvalósuló berendezés

A Nanotechnológia című NKFP projekt keretén belül kifejlesztettük az ismertetett lézeres felületvizsgáló interferométer két verzióját, amely egy fázis-siftelt Twyman-Green interferométerre épült. A berendezéssel néhány mintán vizsgálatokat is végeztünk, bizonyítva az alkalmazhatóságát a kitűzött feladatra. Az első lépésben fényforrásként egy polarizált 3 mW -os He-Ne lézert alkalmaztunk, melynek divergenciáját nyalábtágítóval csökkentettük. Az interferometrikus egység referencia ágát, amelyben egy piezo-vezérelt

tükröt használtunk, összeépítettük egy blokkba az osztóprizmával és a fókuszáló optikával. Ebben a változatban a leképező optika, az analízátor és a CCD detektor egy másik blokkban helyezkedett el, és külön mintatartóban volt a vizsgálandó felület is. A lézernyaláb közvetlenül a polarizációs osztóprizmára esett, és onnan került a két ágba (2. ábra). A piezo-vezérelt referenciaág optikai úthosszát 10 nm-es léptékekben tudjuk változtatni, ami lehetővé tette a berendezés Z-irányú (transzverzális) felbontásának ellenőrzését és kalibrálását a fázis-síftelt interferogramok változásának a kiértékelésén keresztül. Ezt a változást pontonként egy másik, kis apertúrájú lineáris detektorral is megfigyeltük, az interferogram különböző pontjain regisztrálva az intenzitást. A CCD detektorra képezett interferogramokat számítógéppel dolgoztuk fel. A kapott adatokat többféle módon értékeltük. Az X-Y irányú felbontást ismert minta-felülettel kalibráltuk, figyelembe véve a leképezés és a képmegjelenítés paramétereit. Jó minőségű sima felületeknél a Z-irányú (transzverzális) felületi változás egy csíkon belül volt, ami lehetővé tette a fázis-képpontintenzitás összefüggés direkt felhasználását. Ezzel már ebben a rendszerben is elérhető a nanométer alatti transzverzális felbontás. Szemléltetésül a 3. ábrán az interferogramok változását mutatjuk be a mintafelület egy csíkon belüli transzverzális elmozdulása esetén, zajsűrítés nélkül (zajsűrítéssel az interferogramok minősége nagymértékben javul).

A berendezés következő változatában (4. ábra) egy frekvenciastabilizált lézert alkalmaztunk, melynek rövididejű (a mérés alatti) relatív stabilitása meghaladta a 10^{-8} értéket.

Az interferometrikus egység optikai alkatrészeit egy blokkba építettük össze, csökkentve az egymáshoz viszonyított mechanikai elmozdulások és vibrációk lehetőségét. Ez a berendezés, amely a 4. ábrán látható, egy nagyobb felbontású piezo-kerámias referenciaágot tartalmaz, jobb minőségű tükrökkel és osztóprizmával. A száoptyika is javítja a bejövő nyalábminőséget, ami jobb nyalábformálást tesz lehetővé. A zajsűrítést első lépésben a referencia ág modulálásával végezzük. Az interferogramokat a referenciaág pozíciójának egy csíkon belüli eltolásával vettük fel - így differenciális jelfeldolgozással lehetővé vált az optikai alkatrészek fázisfront-torzításának bizonyos mértékű csökkentése (Gaál et al., 1993; Czitrovsky et al., 1987; Jani et al., 1990; Jani et al., 2000). Az interferogramok különböző kiértékelésének összehasonlítása, valamint az interferencia-csírendszer dinamikájának a tanulmányozása különböző mintafelületek esetén elősegítette a kiértékelő szoftver algoritmusának kifejlesztését. Egy jellegzetes, egy csíkon belül torzult felület interferogramját az 5. ábra szemlélteti.

Jelenleg az új eszközök beszerzésével, az elektronikai és optomechanikai rendszer átépítésével párhuzamosan végezzük a berendezés következő verziójának kifejlesztését, amely sok szempontból felülmúlja az eddigieket. Ezzel együtt folytatjuk az adatfeldolgozó és kiértékelő szoftver fejlesztését, és annak adaptálását a mérési feladatokhoz.

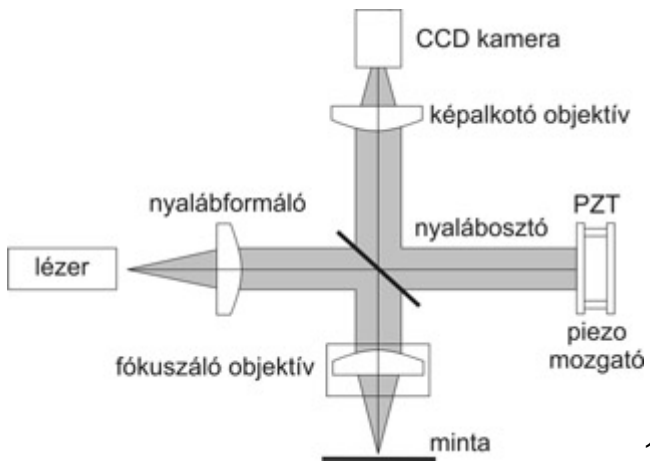
Alkalmazási lehetőségek

A kifejlesztett berendezés mindenfajta szilárd felület vagy réteg háromdimenziós topológiájának vagy profiljának nagyfelbontású vizsgálatára alkalmas, ahol nanométeres vagy az alatti felbontásra van szükség. Ilyen feladat igen sok van, nemcsak a már említett esetekben (szerszámgépgyártás, mikroelektronika, száoptyikák gyártástechnológiája, mechatronika, stb.), de az optikai technológia, a tribológia vagy más kutatási területen is. Hozzánk például a jó minőségű lézertükrök vagy más optikai vékonyrétegek minősítése, illetve a precíziós optikai elemek tesztelése áll közel. A felületek topológiájának és textúrájának jellemzése több paraméterrel történik, ezek közül az elterjedtebbek az R_a és R_z - amelyek az átlagos és a maximális felületi egyenetlenségeket jellemzik (a felületre merőlegesen), valamint a felületi síkszerűséget, hullámosságot és különböző görbületeket jellemző paraméterek. A feldolgozás módjától függően a kapott adathalmazból ezek mind kiszámolhatók, mi azonban egyelőre az R_a és R_z paraméterekkel foglalkozunk. Ezek kiértékelésére egy speciális szoftvert dolgoztunk ki, amely különböző módon jelenítheti meg az eredményt. Példaképpen a 6. ábrán az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet Lézeralkalmazási Osztályának vékonyréteg laboratóriumában szuperpolírozott kvarchordozóra készült jó minőségű lézertükör felületének háromdimenziós topológiáját mutatjuk be. Ez a lézertükör egy BALZARS berendezésben elektronsugaras párologtatással készült. Mint látható, a felületnek 1 nm-en belüli R_a átlagos érdessége van.

Köszönetnyilvánítás

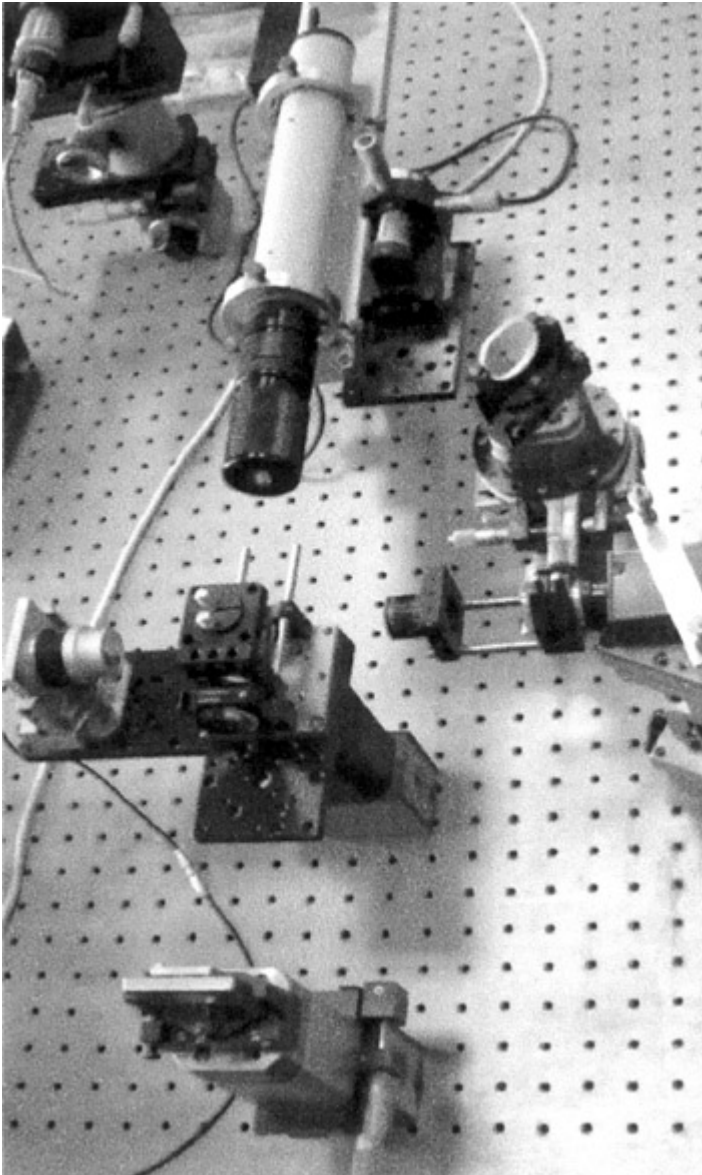
A berendezés fejlesztői köszönetet mondanak az NKFP 3/064/2001 számú Nanotechnológia című projekt támogatásáért, ami lehetővé tette az ismertetett berendezés létrehozását.

Kulcsszavak: interferometria, fázisdetektálás, felületi topológia nanoméreteken, képfeldolgozás, interferogram

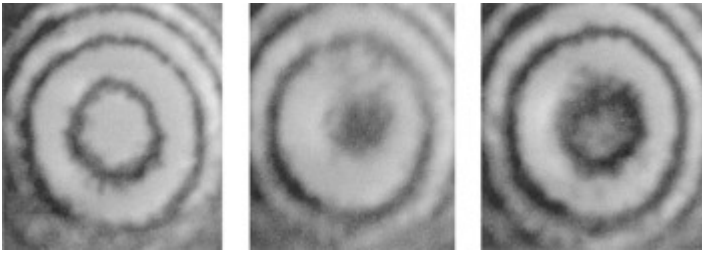


1. ábra * A Twyman-Green interferométer sematikus

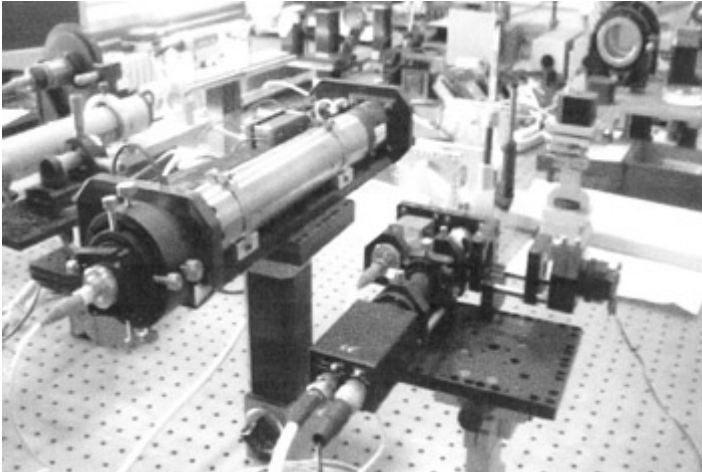
vázlata



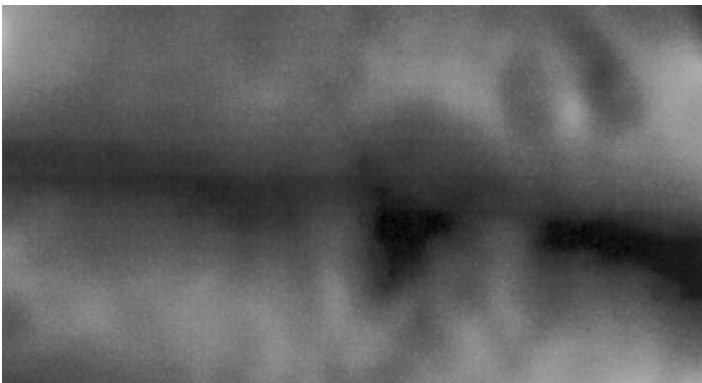
2. ábra * A nagyfelbontású felületvizsgáló berendezés első változata polarizált He-Ne lézerre épülő változata



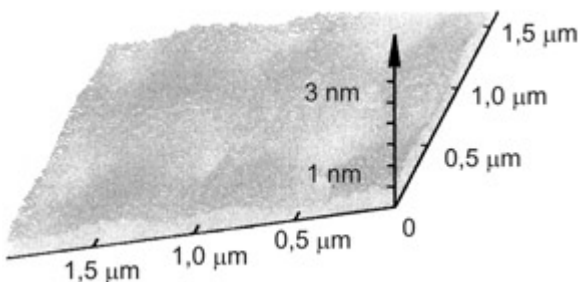
3. ábra * Az interferogramok változása a referencia ág piezo-mozgatóval történő egy csíkon belüli elmozdítása esetén, speckle-szűrés nélkül



4. ábra * A lézeres interferometrikus felületvizsgáló berendezés. A stabilizált lézer sugara szál-optikán keresztül csatlakozik a mérőegységhez



5. ábra * Egy csíkon belül torzult felület interferogramja



6. ábra * Egy általunk gyártott lézertükör felületének 3D-s topológiája. A fenti berendezéssel több más, hasonló jellegű felületi érdekességű optikai réteget is vizsgáltunk.

Irodalom

- Born, Max - Wolf, Emil (1965): Principles of Optics. Pergamon Press, Oxford
Czitrovsky Aladár - Jani P. - Juhász P. - Vértés Á. (1987): Measurement Facilities on a Laser Ionization Mass Spectrometer. SPIE. 881, 103-107.
Das, Pankaj K. (1991): Lasers and Optical Engineering. Springer Verlag, New York
Dixon, Timothy H. (ed.) (1995): Interferometry and Surface Change Detection. Report of a Workshop Held in Boulder, Colorado: February 3-4, 1994.

Eom, TaeBong - Choi, T. - Lee, K. - Choi, H. - Lee, S. (2002): A Simple Method for the Compensation of the Nonlinearity in the Heterodyne Interferometers. *Measurement Science and Technology*. 13, 2, 222-225.

Gaál Péter - Jani Péter - Czitrovsky Aladár (1993): Proposed Data Acquisition Technique for Heterodyne Interferometers. *Optical Engineering*. 32, 10, 2574-2577.

Jani Péter - Czitrovsky Aladár - Szótér L. (1990): Measurement Facilities and Accuracy Limits of Sampling Digital Interferometers, Proc. of IMECO Symp. on Measurement and Inspection in Industry. Preprint KFKI-1990-38/E. 33-40.

Jani Péter - Nagy A. - Lipp Z. - Czitrovsky A. (2000): Velosizer - A Photoncorrelation System. *Journal of Aerosol Science*. 31, 390-391.

Jani Péter (1986): Interferometry Applied to Ceramics. *Material Chemistry and Physics*. 15, 333-346.

Lapp, Marshall - Stwalley, William C. - Kenney-Wallace, Geraldine A. (ed.) (1987): *Advances in Laser Science-II*. American Institute of Physics. Conference proceedings No. 160, New York

Lapp, Marshall - Stwalley, William C. - Kenney-Wallace, Geraldine A. (eds.) (1996): *Advances in Laser Science*, vol. II, part VII, Laser Diagnostics. American Institute of Physics, Conference Proceedings No 160, Seattle, WA.

Lawall John - Kassler Ernest (2000): Michelson Interferometry with 10 pm Accuracy. *Review of Scientific Instruments*. 71, 2669-2676.

Maudgal, Shubha - Sims, G. D. - Johnstone, J. E - Jennett, N.M. (1998): Characterisation of Surface Roughness. National Physical Laboratory, The UK's National Measurement Laboratory - Measurement note, May, 1998.

Spindler-Hoyer Catalog. 2002

Stitch, M. L. - Bass, M. (ed.) (1985): *Laser Handbook*. North Holland, Amsterdam

Sutton Christopher M. (1987): Nonlinearity in the Length Measurement Using Heterodyne Laser Michelson Interferometry. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 20, 1290-1292.

Thorlabs Catalog on Optics, Electronics, Lasers and Fiber Optics. 2003.

Vikram, Chandra S. (ed.) (1990): *Holographic Particle Diagnostic*. SPIE Milestone Series. Vol. MS 21.

Wolf, Emil (ed.) (1980): *Progress in Optics*. vol. XVIII. North Holland, Amsterdam

Wolf, Emil (ed.) (1994): *Progress in Optics*. vol. XXXIII. Elsevier

Wu, Chien-ming - Lawall, John - Deslattes, Richard D. (1999): Heterodyne Interferometer with Subharmonic Periodic Nonlinearity. *Applied Optics*. 38, 4089-4094.