

NAGYFELBONTÁSÚ LÉZER-INTERFEROMETRIKUS FELÜLETVIZSGÁLÓ BERENDEZÉS A NANOTECHNOLÓGIA SZOLGÁLATÁBAN

Czitrovsky Aladár

az MTA doktora, tudományos tanácsadó
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet
Lézeralkalmazási Osztály
czitrovsky@sunserv.kfki.hu

Kiss Árpád

PhD, tudományos főmunkatárs
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet
Lézeralkalmazási Osztály

Hámori András

tudományos főmunkatárs
MTA Műszaki Fizikai
és Anyagtudományi Kutatóintézet

Pogány Lajos

PhD, tudományos főmunkatárs
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet
Fémkutatási Osztály

A cikkben egy nagyfelbontású lézer-interferometrikus felületvizsgálati 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, csúcsparaméterekkel 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, csörpölt 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 gőzgépét (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 hengereinek 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 felületről, 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 jelent.

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 lézerefény 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 görbületeinek – 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 ezredrészé- nek 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 Intéze- tünkben a Nemzeti Kutatás Fejlesztési Pro- gram keretén belül fejlesztett mérőrendszer működési elvét, felépítését, egyes részegy- ségeit és az elkészült laboratóriumi mintapél- dányt, valamint annak lehetőségeit mutatjuk be, felvázolva a hazai és külföldi alkalmazá- sokat.

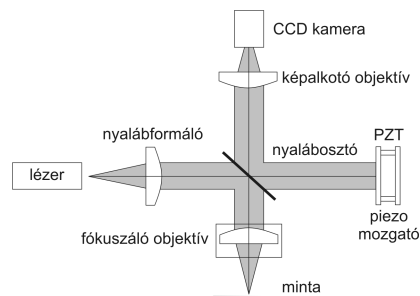
A felületvizsgáló lézeres interferométer működési elve és felépítése

A lézeres felületminősítő interferométe- reknek több fajtája létezik, ezek közül a leg- inkább flexibilis kétsugaras Twyman-Green interferométer (Born – Wolf, 1965; Das, 1991; Stitch – Bass, 1985; Lapp et al., 1987) módosított, fázis-síftelt változatát ismertetjük, amely- ben egy különleges jelfeldolgozási módszert alkalmazunk. 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 fény- hullám fázisát egy piezo-mozgató (PZT) változtatja, a mérőágban pedig a minta felülete torzítja a beeső fénycsugár fázisfrontját. A sugarak újraegyesülése után egy speciális CCD kamerával figyelhető meg az interfero- gram, 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 $0-p/2$, $p/2-p$, $p-3p/2$ inter- vallumokban léptetve a fázist, akkor a jelet

integrálva egy célszerű jelfeldolgozási mód- szerrel megkaphatjuk a mintafelület által okozott fázistorzulást. Ebből a fázistorzulásból kiszámolható a felület transzverzális dombor- zata. Fontos megemlíteni, hogy ebben az esetben a fázis csak modulo $2p$ -re határoz- ható 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 reflexiós tulajdonságaira. Ezenkívül a szoftver levonja a minta esetleges dőlését, korrigálja a helyte- len fókuszbeállítást (gömbi eltérés). A be- rendezésben változtatható a laterális felbon- tás (és a képméret) is a mérőági optika na- gyításának módosításával. Ha a referencia- ágban elhelyezett tükröt nagyon kis ampli- túdóval rezgetjük, akkor a *speckle* (a koherens sugaraknak a térbeli fluktuációk miatt fellépő lokális intenzitásváltozása) is kiktűszöbölhető. Ha az interferométer karjait nem pontosan egyforma hosszúra válásszuk, akkor szükség van a lézer hullámhosszáinak stabilizálására.

A berendezésben alkalmazott He-Ne lézerekben ($\lambda = 632,8$ nm) a hullámhosszat – $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-7} - 10^{-8}$ -as értékre lehet stabilizálni, a rövid idejű (egy mérés alatti)



1. ábra • A Twyman-Green interferométer sematikus vázlatja

stabilitás ennél egy nagyságrenddel is jobb lehet. Ebből adódik, hogy a hossz mérték (hullámhossz) instabilitásából származó hiba kb. 0, 006 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 mintafel fogás közben fellépő mechanikai feszültségek sem, amit speciális mintafel fogókkal 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 nm ($\lambda/2$), a fentiekből adódó maximális felbontás 0,019 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 detektor zaj, 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 nonlinearitása és a koherens zaj. A fentiekén 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 lézertérnyel. 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 nm alatti felbontás is elérhető.

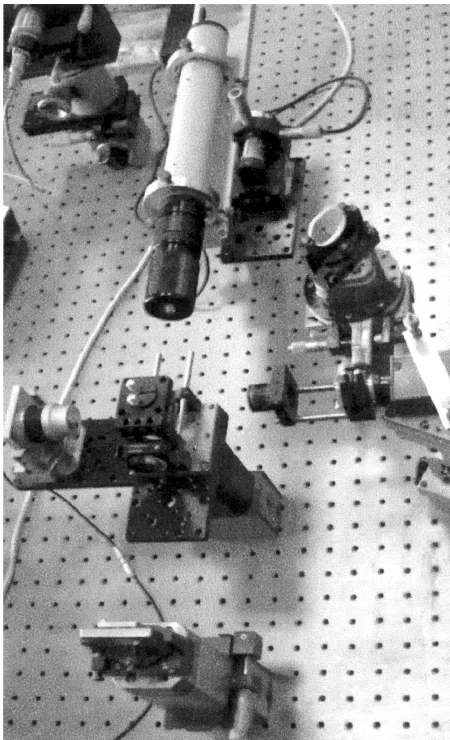
A megvalósuló berendezés

A *Nanotechnológia* című NKFP projekt keretén belül kifejlesztettük az ismertett 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 analizátor 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-siftelt interferogramok változásának a kiértékelésén keresztül.

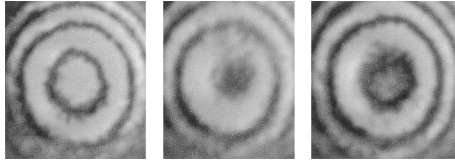
Ezt a változást pontonként egy másik, kis apertúrájú lineáris detektorral is megfigyeltük, az interferogram különböző pontjain regisztrálva az intenzitást. A CCD detektorra képezett interferogramokat számítógéppel dolgoztuk fel. A kapott adatokat

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, zajsűrűs nélkül (zajsűrűssel az interferogramok minősége nagymértékben javul).

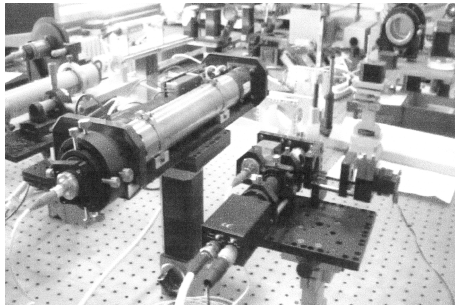
A berendezés következő változatában (4. ábra) egy frekvenciastabilizált lézert alkalmaztunk, melynek rövididejű (a mérés



2. ábra • A nagyfelbontású felületvizsgáló berendezés első változata polarizált He-Ne lézere épülő változata



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

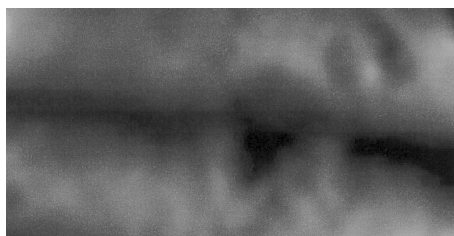


4. ábra • A lézeres interferometrikus felületvizsgáló berendezés. A stabilizált lézer sugara szál-optikán keresztül csatlakozik a mérőegységhez

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-kerámiás referenciaágot tartalmaz, jobb minőségű tükrökkel és osztóprizmával. A szál-optika is javítja a bejövő nyalábminőséget, ami jobb nyalábfomálást tesz lehetővé.

A zajsűrűrest 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 dina-



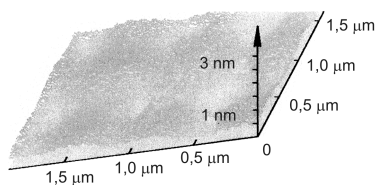
5. ábra • Egy csíkon belül torzult felület interferogramja

mikájának 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



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

esetekben (szerszámgyártás, mikroelektronika, száloptikák 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 érdekessége 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*

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.

