

dc_262_11

MTA doktori értekezés tézisei

**A spektroszkópai ellipszometria és az ionsugaras
analitika néhány alkalmazása az anyagtudományban**

Lohner Tivadar

**MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet
Budapest, 2011**

dc_262_11

I. A kutatások előzménye

Célszerűnek látom idézni azt a mondatot, amely a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem mérnök-fizikus hallgatóinak számos éven keresztül megtartott előadásom bevezetőjében, a második dián szerepel: Az optikai módszerek közé tartozó ellipszometriával intenzitás- és fázisváltozást mérve komplex törésmutatót és rétegvastagságot határozhatunk meg.

A spektroszkópai ellipszometria fontos optikai mérési eljárássá fejlődött az elmúlt évtizedekben, nemcsak nagy teljesítőképességű kutatási módszerré vált, hanem konkrét gyakorlati hasznosulásról is beszélhetünk. Gyulai József akadémikus, egyetemi tanár megfogalmazása szerint „ipari méretekben bebizonyosodott, hogy az ellipszometria az egyetlen réteginősítő eljárás, amelyet úgy lehetett az integrált áramkörök gyártásközi ellenőrzésébe beiktatni, hogy az az „éles” szeleteken is végezhető! Tehát nem okoz funkcionalitást rontó hibákat, sem nem szennyezi el a szeleteket, azaz valóban roncsolásmentes az eljárás.”

A fentiek alapján kézenfekvő sorra venni a mikroelektronika és a vékonyrétegtechnológia különféle rétegpítő és rétegmódosító eljárásait, maradtak-e feltáratlan részterületek. Példaként az ionimplantációs anyagmódosítás egy aspektusát említem: Egykristályos szilíciumot elegendően sok ionnal implantálva nemcsak az ionok hatótávolsága közelében alakul át a szilícium amorffá, hanem a szilícium felületét borító természetes oxidréteg alatt is egy vékony, a beimplantált ionok számával arányosan növekvő vastagságú amorf réteg keletkezik. Felhasználva az egykristályos és az amorf szilícium törésmutatója közötti különbséget, pontosan meg tudjuk mérni ennek a felületközeli amorf rétegnek a vastagságát és megkísérélhetünk kapcsolatot teremteni az ionok fékeződését jellemző mennyiség és e rétegvastagság között. A biztonság kedvéért egy alkalmasan választott független módszerrel, például a csatornahatással kombinált Rutherford-spektrometriával ellenőrző méréseket célszerű végezni.

Néhány mondat a csillebérci előzményekről. Ebben az évben ünnepeljük az első ellipszometriai eredményünkről tudósító folyóiratcikk megjelenésének harminc éves évfordulóját: T. Lohner, G. Mezey, E. Kótai, F. Pásztai, L. Királyhidi, G. Vályi, J. Gyulai: Ellipsometric and channeling studies on ion-implanted silicon, Nuclear Instruments and Methods 182/183 (1981) 591-594. Azokat az eredményeket egy egy hullámhosszon működő manuális ellipszométerrel értem el. Később külföldi laboratóriumokban találtam lehetőséget spektroellipszometriai mérések végzésére, ezeket a méréseket ionsugaras

analízissal kiegészítve több közös közleményt publikáltunk. Kandidátusi értekezésemet 1994-ben készítettem el "Félvezetők optikai és szerkezeti tulajdonságainak módosulása ionimplantáció és hőkezelés hatására: az ellipszometria alkalmassá tétele ilyen jellegű vizsgálatokra" címmel.

Ma a világ legjobb spektroszkópai ellipszométerével dolgozhatunk, ellipszometria-csoportunk honlapján most éppen tizenhatan szereplünk, beleértve természetesen a diplomamunkásokat és a tudományos diákkörösöket is (www.ellipszometria.hu), a közlemények száma több mint kétszáz. Az elmúlt harminc évben több mint tíz egyetemi doktori és PhD értekezés született, egy kandidátusi és több MTA doktora értekezésbe beépültek a csillebérci ellipszometriai eredmények.

II. Célkitűzések

Az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetében (MFA) dolgozva az ionimplantáció, a pórusos szilíciumrétegek elektrokémiai előállítása, a nióbiumoxid rétegnövesztés során módosult illetve létrehozott vékonyrétegek spektroellipszometriai és az ionsugaras analitikai vizsgálatát tűztem ki célul.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Fizikai Intézete Atomfizikai Tanszékének laboratóriumaiban a szilíciumkarbid nanorészecskék Si/SiO₂ határfelületen történő növesztése szénmonoxidot tartalmazó gázkeverékből és a nanokristályos gyémántrétegek mikrohullámú plazmával segített kémiai gőzfázisú leválasztása metánt, hidrogént, argont tartalmazó gázkeverékből ígérkezett olyan témának, amelyben a spektroszkópai ellipszometria és az ionsugaras analitika együttes alkalmazása új tudományos eredményekre vezethet.

Az Oszakai Egyetem közepes energiájú ionszórási laboratóriumában nemzetközi együttműködés keretében felkértek arra, hogy nehézfém-ionokkal implantált és nagyenergiájú szilíciumionokkal besugárzott szilíciumban a nehézfémek mélységeloszlását (a felülethez való vándorlását) a mintafelületnél 1 nm-es mélységfelbontást biztosító közepes energiájú ionvisszaszórással mérjem meg. Később kiegészítésképpen az amorfizált és epitaxiálisan visszanoított szilíciumréteg vastagságát spektroszkópai ellipszometriával határoztam meg.

III. Vizsgálati módszerek

Az ex-situ spektroszkópiai ellipszometriai vizsgálatoknál a mérések időigénye egy korszerű berendezésen néhány perctől körülbelül negyedóraig terjed. Az időigényes feladat a mért spektrumok kiértékelése: adekvát többréteges optikai modellek konstruálása majd az ismeretlennek definiált fizikai mennyiségek (rétegvastagságok, a komplex törésmutató hullámhosszfüggését leíró paraméterek, a keverékrétegek komponenseinek térfogatszázalékai) meghatározása hosszadalmas minimumkeresési és iterációs eljárással.

Különféle spektroszkópiai ellipszométerekkel végeztem el a méréseket, a Twente Műszaki Egyetem szilárdtestfizikai laboratóriumában egy ott épített forgó polarizátoros berendezéssel dolgoztam, az erlangeni Fraunhofer Intézetben egy SOPRA gyártmányú ES4G típusú forgó polarizátoros spektroellipszométerrel mértem. Néhány mérést a Szegedi Tudomány Egyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékén található Woollam-gyártmányú, M2000-F típusú, forgó kompenzátoros spektroszkópiai ellipszométeren végeztünk. Idehaza kezdetben az MTA KFKI RMKI Woollam gyártmányú M-88 típusú forgó analízátoros berendezésével kutattam, majd az MTA MFA SOPRA gyártmányú ES4G típusú forgó polarizátoros spektroellipszométerével mértem, legutóbb pedig az MTA MFA Woollam gyártmányú M-2000DI típusú forgó kompenzátoros berendezésén dolgoztam. Az ellipszometriai spektrumok kiértékelését kezdetben a Pennsylvania State University ellipszometria laboratóriumában kifejlesztett FORTRAN programmal végeztem, később a SOPRA és a Woollam ellipszométergyártó cégek programjaival dolgoztam.

Az ionimplantálások túlnyomó többségét az MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet (RMKI) Ionnyaláb-analitikai és ionimplantációs laboratóriumának nehézion-kaszkádnál generátorán végezték. A plazmaimmerziós ionimplantációs művelet és a pórusos szilíciumrétegek elektrokémiai előállítását az MTA MFA Mikrotechnológiai laboratóriumában zajlott.

Az ionsugaras analitikai módszerek alkalmazása során néhány száz keV-től néhányszor 10 MeV-ig terjedő energiájú ionokkal bombázzuk a vizsgálandó minta felületét és a kölcsönhatások (szóródások, magreakciók) során szóródott vagy keletkezett részecskéknek nemcsak a számát határozzuk meg, hanem az energiáját is. A mintából távozó részecskék energiája attól függ, hogy milyen mélységben, milyen tömegű és rendszámú atomon történt a szóródás. Ezért általában elem- és mélységanalízis is végezhető. Az ionsugaras módszerek közül a viaszszórásos spektrometria (BS, Backscattering Spectrometry), a rugalmasan meglökött atommagok detektálása (ERDA,

Elastic Recoil Detection Analysis) és a rezonanciamódszer került alkalmazásra (a magreakció hatáskeresztmetszetében az energia függvényében mutatkozó rezonanciát, növekedést használjuk az adott izotóp mennyiségének a meghatározására). Az ionsugaras módszerek és a csatornahatás együttes alkalmazásával lehetőség nyílik arra, hogy a pontszerű vagy kiterjedt rácshibákat, idegen atomok rácslokalizációját, illetve az epitaxiális visszánövést vizsgáljuk.

Az ionsugaras analitikai mérések nagy része az MTA KFKI RMKI Ionnyaláb-analitikai és ionimplantációs laboratóriumának 5 MeV-es 2R Van de Graaff-generátorán, az ahhoz csatlakoztatott nagyvákuumú szórókamrába épített kéttengelyű goniométeren készült. Kótai Endre fejlesztette ki a világ számos ionsugaras analitikai laboratóriumában használt RBX programot, amellyel az ionsugaras analitikai méréseink spektrumai kiértékelésre kerültek. Az Oszakai Egyetem közepes energiájú ionszórási laboratóriumában egy 100 – 400 keV energiatartományban működő gyorsítóból és annak ultravákuumú targetkamrájába épített toroidális elektrosztatikus analizátorból álló berendezésen dolgoztam.

Az ellipszometriai és ionsugaras analitikai mérések mellett más anyagvizsgálati módszerek is alkalmazásra kerültek (atomerő-mikroszkópia, röntgendiffrakció).

IV. Új tudományos eredmények

1. Elsőként javasoltam, hogy az elektrokémiai anodizálással készített pórusos szilícium rétegek és az ionimplantációval részlegesen rendezetlenné alakított szilícium rétegek ellipszometriai spektrumainak kiértékelésekor az egykristályos szilícium, az amorf vagy az ionimplantációval amorfizált szilícium és a levegő mellett az úgynevezett finomszemcsés polikristályos szilíciumu [Jellison és munkatársai [Jellison, 1993] által meghatározott dielektromos függvényét is figyelembe véve, többkomponensű keveréket építsünk az optikai modellekbe [1-17]. A finomszemcsés polikristályos szilícium dielektromos függvényét is tartalmazó optikai modellel végrehajtott kiértékelések az esetek túlnyomó többségében szignifikánsan jobb illeszkedésre vezettek a mért és illesztett spektrumok között mint a nélküle végrehajtott kiértékelések nemcsak a frissen készített pórusos szilícium rétegek, hanem a stabilizáló, oxidáló hőkezelésen átesett rétegek esetében is [5, 14].

2. Az ionimplantáció hatásainak spektroellipszometriai és ionsugaras vizsgálata során megmutattam, hogy

A/ a fluenciával normált felületi amorfizált rétegvastagság és a nukleáris fékeződési energia között lineáris a kapcsolat. Ehhez meghatároztam szilícium ionokkal és különféle nemesgáz ionokkal végzett besugárzás hatására az egykristályos szilíciumban a natív oxidréteg alatt létrejött amorf szilíciumréteg vastagságát nagy mélységfelbontóképességű ionsugaras és spektroszkópai ellipszometriai mérésekkel [18-20].

B/ a plazmaimerziós ionimplantációval (PIII) módosított szilícium felületén 1000 V gyorsítófeszültség és foszfin-hidrogén gázkeverék esetén 7,5 másodpercig tartó PIII esetén az ellipszometriai spektrumok értelmezéséhez olyan kétrétegű optikai modellt dolgoztam ki, amelyben a felső réteg törésmutatóját a szilíciumdioxid, az alsó réteg törésmutatóját vagy ionimplantálással amorfizált szilícium vagy finomszemcsés polikristályos szilícium törésmutatójával írjuk le. Az oxidvastagságra vonatkozó ellipszometriai és ionsugaras eredmények ésszerű egyezést mutattak. Öt percig tartó PIII után az ellipszometriai spektrumok egy olyan kétrétegű optikai modellel voltak értelmezhetők, amelyben a felső réteg amorf szilícium és levegő keverékét tartalmazó réteg (azaz egy érdesség-réteg), az alsó réteg törésmutatóját pedig vagy amorf szilícium vagy finomszemcsés polikristályos szilícium törésmutatója írja le [11]. Az öt percig tartó PIII hatására a felületi érdesség-réteg vastagságának jelentős növekedését mutattam ki az ellipszometriai kiértékelés alapján, ezt atomerő-mikroszkópai méréssel sikerült alátámasztani [11].

C/ a különböző ionimplantációs kísérletekben amorfizált SiC minták esetén szignifikánsan különböző dielektromos függvények adódtak, ezt a mások által megfigyelt, az ionimplantáció során bekövetkező 10-30% közötti sűrűségcsökkenéssel magyaráztam. Ehhez 200 keV energiájú alumíniumionokkal, 860 keV energiájú nikkellionokkal és multienergiájú (40, 100, 135 keV) argon ionokkal amorfizált SiC komplex dielektromos függvényét határoztam meg spektroellipszometriai mérések kiértékeléséből [21, 22].

3. Optikai modellt dolgoztam ki a korábbi publikációkból ismert, szénmonoxidot tartalmazó gázkeverékben hőkezelt szilíciumdioxid-szilícium rendszer köztes felületén nőtt szilíciumkarbid nanokristályok vizsgálatához. Az ellipszometriai spektrumokat kétréteges optikai modellel illesztve, a szilíciumkarbid nanokristályokat és szilíciumot tartalmazó

rétegre az effektív közeg közelítést alkalmazva határoztam meg a rétegek vastagságait és a szilíciumkarbid kristallitok térfogatszázalékát amit sem az ionsugaras analitikai módszer, sem a keresztmetszeti transzmissziós elektronmikroszkópia egymaga nem tudott szolgáltatni. A szilíciumkarbid-térfogatszázalékból meghatározott szénmennyiség jól egyezik a csatornahatással kombinált viaszszórás mérések eredményével [23].

4. Argon-oxigén gázkeverékben rádiófrekvenciás katódporlasztással leválasztott nióbbiumoxid vékonyrétegek esetén háromréteges optikai modell alkalmazásával spektroszkópiai ellipszometriai mérésekből határoztam meg a dielektromos függvényt és az optikai tiltott sáv értékét [24].

5. Kimutattam, hogy a metánt, hidrogént és argont tartalmazó gázkeverékből mikrohullámú plazmával segített kémiai gőzfázisú leválasztással készített nanokristályos gyémántrétegek esetén a szilícium szubsztrátra elsőként épülő 23 – 41 nm vastagságú réteg szignifikánsan több sp^2 (üvegszerű) szén tartalmaz, mint a fölötte nőtt réteg. Kimutattam, hogy a látható és a közeli infravörös hullámhossztartományban a lényegi (legvastagabb) alréteg törésmutatója csökken a gázkeverék argonkoncentrációjának növekedésével. Ezen spektroszkópiai ellipszometriai vizsgálatokhoz kifejlesztettem egy háromréteges, Tauc-Lorentz oszcillátort [Jellison, 1996], üvegszerű szén és üregeket tartalmazó optikai modellt [25].

6. Az in-situ spektroszkópiai mérések valószerű kiértékelését célul kitűző RESPECT Inco-Copernicus szerződés egyik kísérleti demonstrációjának teljesítéséhez egy speciális modellstruktúrát javasoltam: kis fajlagos ellenállású szilíciumon létrehozott pórusos szilícium réteget, a kis fajlagos ellenállású szilícium szubsztrát ohmos fűtésével javasoltam levegőn oxidálni a pórusos szilícium réteget és e percek alatt lezajló folyamat in-situ spektroellipszometriai mérését és valószerű kiértékelését javasoltam kísérleti demonstrációnak. A javasolt demonstráció jól sikerült [26].

7. Nemzetközi együttműködésben cinkkel, ólommal és bizmutteral implantált és nagyenergiájú szilíciumionokkal hőkezelt szilíciumban a nehézfémek mélységeloszlását (a felülethez való vándorlását) a mintafelületnél 1 nm-es mélységfelbontást biztosító közepes energiájú ionviaszszórással, az amorfizált és epitaxiálisan visszantett szilíciumréteg vastagságát spektroszkópiai ellipszometriával határoztam meg [27-29].

V. Irodalmi hivatkozások listája

[Jellison, 1993] G.E. Jellison Jr, M.F. Chisholm, S.M. Gorbatkin: Optical functions of chemical vapor deposited thin-film silicon determined by spectroscopic ellipsometry. Applied Physics Letters 62 (1993) 3348-3350.

[Jellison, 1996] G.E. Jellison Jr., F.A. Modine: Parameterization of the optical functions of amorphous materials in the interband region. Applied Physics Letters 69 (1996) 371-373.

VI. Az eredmények hasznosítása

Sokféle szemszögből lehet szemlélni az új tudományos eredmények gyakorlati hasznosítását, hasznosulását. A fentiekben ismertetett eredményeim a mikroelektronikai és szenzortechnológiai műveletek optimalizálásában hasznosíthatók.

Lényegesnek tartom megemlíteni, hogy az MFA jogelődje, az Anyagtudományi Kutatóintézet nagyjából tizenöt évvel ezelőtt szerződést kötött a SOPRA francia ellipszométergyártó céggel az ellipszometriai spektrumok kiértékelési módszereinek továbbfejlesztése érdekében. A Semilab Rt. 2008. szeptemberében megvásárolta a SOPRA francia ellipszométergyártó céget (www.semilab.com). (A 100%-ban magyar tulajdonú Semilab Rt. hazai know-how alapján fejleszt világszínvonalú félvezető-méréstechnikai eszközöket és eljárásokat. A céget szakterületén a világ 5 legjobb gyártója között jegyzik, éves árbevétele 10 Mrd Ft körül mozog.) Napjainkban többféle kiváló spektroszkópiai ellipszométert gyártanak és forgalmaznak a Semilab Rt-nél. Várható, hogy a hardver- és szoftverfejlesztésben is növekvő mértékben vesznek majd részt magyar szakemberek. A közelmúltban egy olyan fiatal került a Semilab Rt. alkalmazásába sikeres PhD védése után, aki az intézetünkben végzett kutatómunkája során a spektroszkópiai ellipszometriát is alkalmazta. Készen állok arra, hogy megkeresés esetén a fenti eredményeimmel kapcsolatos diszkussziókban részt vegyek.

Az MFA ellipszometria laboratóriuma tagja lett egy európai kutatási konzorciumnak, amely nagyjából harmincféle akkreditált anyagvizsgálati módszert kínál föl egyetemeknek, kutatóintézeteknek és az iparnak (www.anna-i3.org), beválasztásunkhoz

minden bizonnyal hozzájárult a több évtizedes ellipszometriai tevékenységem. A projekt keretében meghatározó szerepem volt az MFA Ellipszometria Laboratóriumának akkreditációra való felkészítésében, és abban, hogy a laboratórium immár csaknem két éve a Nemzeti Akkreditáló Testület által akkreditált laboratóriumként működik (<http://nat.hu/adatbazis/reszletes-oldal.php?azon=2695>). Az ellipszometriai vékonyréteg-vizsgálat – roncsolásmentessége miatt – az MFA K+F projektjeiben általánossá vált.

Losey és munkatársai többfázisú katalitikus reakciók megvalósítására alkalmas mikrofluidikai eszközöket terveztek és valósítottak meg az Egyesült Államokban Cambridgeben, a Massachusetts Institute of Technology vegyészmérnöki laboratóriumában, katalízishordozóként oxidált pórusos szilíciumot használtak. A pórusos szilícium oxidálásakor kétféle eljárást használtak, az egyiket a [14]-ben közzétett kísérleteink alapján hajtották végre (M.W. Losey, R.J. Jackman, S.L. Firebaugh, M.A. Schmidt: Design and fabrication of Microfluidic devices for multiphase mixing and reaction, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 11 (2002) 709-717.). Losey és munkatársainak fent idézett cikkére eddig körülbelül 110 hivatkozás érkezett.

Muckenhirm, az Amerikai Egyesült Államokban bejegyzett US 6,986,280 B2 számú szabadalom benyújtója hivatkozik a T. Lohner, N.Q. Khanh, P. Petrik, L. P. Biró, M. Fried, I. Pintér, W. Lehnert, L. Frey, H. Ryssel, D.J. Wentink, J. Gyulai: Surface disorder production during plasma immersion implantation, *Thin Solid Films* 313-314 (1998) 254-258 cikkünkre. Muckenhirm egy olyan integrált mérőberendezést szabadalmaztatott, amelyben a vizsgálandó mintát először egy optikai elven működő módszerrel térképeznek föl laterálisan, majd az optikai eredmények alapján továbbvizsgálandónak minősített kisebb területeket egy jóval időigényesebb pásztázószondás módszerrel vizsgálnának meg sokkal nagyobb laterális felbontással.

Tágabb értelemben hasznosulásnak tekintem azt is, hogy eddig két, ellipszometriai témájú könyvfejezet írására kért föl bennünket az Academic Press:

- M. Fried, T. Lohner, J. Gyulai; Chapter 1 "*Ellipsometric Analysis*" in vol. 46 of *Semiconductors and Semimetals: "Effect of Disorder and Defects in Ion-Implanted Semiconductors: Optical and Photothermal Characterization"*, eds. C. Christofides & G. Ghibaudo, 1997, Academic Press, San Diego.
- M. Fried, T. Lohner, P. Petrik; Chapter 6 "*Ellipsometric Characterization of Thin Films*" in vol. 4 of *Handbook of Surfaces and Interfaces of Materials: "Solid Thin Films and Layers"*, ed. H. S. Nalwa, 2001, Academic Press, San Diego

VII. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [1] I. Bársony, J.G.E. Klappe, E. Vázsonyi, **T. Lohner**, M. Fried: Rapid thermal oxidation for passivation of porous silicon, MRS Symp. Proc. Vol. 342 (1994) 91-96.
- [2] **T. Lohner**, M. Fried, O. Polgár, É. Vázsonyi, I. Bársony, J.P. Piel, J.L. Stehle: Characterization of different porous silicon structures by spectroscopic ellipsometry, Szóbeli előadás, WISE'95, International Workshop on Spectroscopic Ellipsometry, 1995. február 9-11, Erlangen, O8
- [3] É. Vázsonyi, I. Bársony, **T. Lohner**, M. Fried, M. Rácz, J. Erostyák, F. Pászti: Light emission versus excitation from porous structures in ion implanted silicon. MRS Fall Meeting, 1994, Boston, MRS Symposia Proceedings Vol. 358 (1995) 653-658.
- [4] É. Vázsonyi, M. Fried M, **T. Lohner T**, M. Ádám, T. Mohácsy, I. Bársony, A. Szlufcik, J. Nijs: High efficiency silicon PV cells with surface treatment by anodic etching, 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition in Nice, France, 23-27 October, 1995. In: Freiesleben W (szerk.) Bedford: HS Stephens, (ISBN:0-9521452-7-8) 1995, pp. 37-40.
- [5] M. Fried, **T. Lohner**, O. Polgár, P. Petrik, E. Vázsonyi, I. Bársony, J.P. Piel, J. L. Stehle: Characterization of different porous silicon structures by spectroscopic ellipsometry, Thin Solid Films, 276 (1996) 223-227.
- [6] I. Bársony, K. Molnár, T. Mohácsy, E. Vázsonyi, P. Varga, M. Ádám, **T. Lohner**: Porous silicon - promises and prospects, Proc. of the Ninth Hungarian - Korean Seminar on Integrated Circuits and Devices, edited by E. Czoboly (1997) Budapest, Hungary pp. 229-238.
- [7] **T. Lohner**, N. Q. Khánh, P. Petrik, M. Fried, E. Kótai, J. Gyulai: Ion implantation induced damage accumulation studied by Rutherford Backscattering Spectrometry and spectroscopic ellipsometry, Proc. Int. Symposium on Materials Science Applications of Ion Beam Techniques (Sept. 9-12, 1996 Seeheim, Germany) Materials Science Forum (Trans Tech Publications, Switzerland) Vols 248-249 (1997) pp 229-232.
- [8] M. Fried, H. Wormeester, E. Zoethout, **T. Lohner**, O. Polgár, I. Bársony: In situ spectroscopic ellipsometric investigation of vacuum annealed and oxidized porous silicon layers, Thin Solid Films 313-314 (1998) 459-463.
- [9] **T. Lohner**, N.Q. Khánh, Zs. Zolnai: Spectroellipsometric characterization of ion implanted semiconductors and porous silicon, acta physica slovac 48 (1998) 441-450.
- [10] **T. Lohner**, P. Petrik, O. Polgár, N.Q. Khánh, M. Fried, J. Gyulai: Ion implantation induced buried disorder studied by Rutherford Backscattering Spectrometry and spectroscopic ellipsometry, Vacuum 50 (1998) 487-490.

- [11] **T. Lohner**, N.Q. Khánh, P. Petrik, L. P. Biró, M. Fried, I. Pintér, W. Lehnert, L. Frey, H. Ryssel, D.J. Wentink, J. Gyulai: Surface disorder production during plasma immersion implantation, *Thin Solid Films* 313-314 (1998) 254-258.
- [12] P. Petrik, O. Polgár, **T. Lohner**, M. Fried, N.Q. Khánh, J. Gyulai: Ion implantation caused damage depth profiles in single-crystalline silicon studied by spectroscopic ellipsometry and Rutherford Backscattering Spectrometry, *Vacuum* 50 (1998) 293-297.
- [13] C. Robert, L. Bideux, B. Gruzza, M. Cadoret, **T. Lohner**, M. Fried, E. Vázsonyi, G. Gergely: Spectroellipsometry and electron spectroscopy of porous Si thin films on p+ substrates, *Thin Solid Films* 317 (1998) 210-213.
- [14] **T. Lohner**, M. Fried, P. Petrik, O. Polgár, J. Gyulai W. Lehnert: Ellipsometric characterization of oxidized porous silicon layer structures, *Materials Science and Engineering B69-70* (2000) 182-187.
- [15] O. Polgár, M. Fried, **T. Lohner**, I. Bársony: Comparison of algorithms used for evaluation of ellipsometric measurements: Random search, genetic algorithms, simulated annealing and hill climbing graph-searches, *Surface Science* 457 (2000) 157-177.
- [16] O. Polgár, M. Fried, **T. Lohner**, I. Bársony: A combined topographical search strategy with ellipsometric application, *Journal of Global Optimization* 19 (2001) 383-401.
- [17] M. Fried, **T. Lohner**, P. Petrik: Ellipsometric Characterization of Thin Films. In: *Handbook of Surfaces and Interfaces of Materials, Solid Thin Films and Layers, Volume 4* (Editor H.S. Nalwa), Academic Press, San Diego, (2001) pp. 335-367.
- [18] M.A. El-Sherbiny, N. Q. Khánh, H. Wormeester, M. Fried, **T. Lohner**, I. Pintér, J. Gyulai: Surface disorder production during plasma immersion implantation and high energy ion implantation, *Nuclear Instruments and Methods B* 118 (1996) 728-732.
- [19] **T. Lohner**, M.A. El-Sherbiny, N.Q. Khánh, M. Fried, H. Wormeester, J. Gyulai: Anomalous surface damage production during high energy implantation analyzed by ellipsometry and RBS. *Ion Beam Modification of Materials, Proceedings of the Ninth International Conference on Ion Beam Modification of Materials, (Canberra, Australia, 5-10 February, 1995)* J.S. Williams, R.G. Elliman, M.C. Ridgway, editors, Elsevier Science B.V. Amsterdam, (1996) 797-801.
- [20] **T. Lohner**, M. Fried, N.Q. Khánh, P. Petrik, H. Wormeester, and M.A. El-Sherbiny: Comparative study of ion implantation caused anomalous surface damage in silicon studied by spectroscopic ellipsometry and Rutherford backscattering spectrometry, *Nuclear Instruments and Methods B* 147 (1999) 90-95.
- [21] E.R. Shaaban, **T. Lohner**, P. Petrik, N. Q. Khánh, M. Fried, O. Polgár, J. Gyulai: Determination of Complex Dielectric Function of Ion Implanted Amorphous SiC by Spectroscopic Ellipsometry. *phys. stat. sol. (a)* 195 (2003) 277-281.
- [22] **T. Lohner**, Z. Zolnai, P. Petrik, G. Battistig, J.G. Lopez, Y. Morilla, A. Koós, Z. Osváth, M. Fried: Complex dielectric function of ion implantation amorphized SiC determined by spectroscopic ellipsometry, *physica status solidi (c)* 5 (2008) 1374-1377.

- [23] **T. Lohner**, A. Pongrácz, N.Q. Khánh, O.H. Krafcsik, K. Josepovits, P. Deák: Comparative investigation of the Si/SiO₂ interface layer containing SiC crystallites using spectroscopic ellipsometry, ion beam analysis and XPS, *physica status solidi (c)* 5 (2008) 1337-1340.
- [24] M. Serényi, **T. Lohner**, P. Petrik, Z. Zolnai, Z.E. Horváth, N.Q. Khánh: Characterization of sputtered and annealed niobium oxide films using spectroscopic ellipsometry, Rutherford backscattering spectrometry and X-ray diffraction, *Thin Solid Films* 516 (2008) 8096-8100.
- [25] **T. Lohner**, P. Csíkvári, N.Q. Khánh, S. Dávid, Z.E. Horváth, P. Petrik, G. Hárs: Spectroellipsometric and ion beam analytical investigation of nanocrystalline diamond layers, *Thin Solid Films* 519 (2011) 2806-2810.
- [26] L. Rédei, M. Fried, **T. Lohner**, O. Polgár, I. Bársony, Sz. Fórizs, Z.G. Horváth, J. Humlicek, H. Wallinga: Concept of a neural system for real-time evaluation of spectroscopic measurements. *SPIE Proceedings Vol. 3573* (1998) pp. 155-159.
- [27] C. Angelov, **T. Lohner**, M. Takai, A. Kinomura, S. Georgiev: Structural study of Si samples, beam crystallized using medium energy ion scattering, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 7 (2005) 457-460.
- [28] C. Angelov, S. Georgiev, B. Amov, V. Mikli, **T. Lohner**: Solid phase and ion beam epitaxial crystallization of Si implanted with Zn and Pb ions, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 9 (2007) 311-314.
- [29] **T. Lohner**, C. Angelov, V. Mikli: Comparative ellipsometric and ion beam analytical studies on ion beam crystallized silicon implanted with Zn and Pb ions, *Thin Solid Films* 516 (2008) 8009-8012.