

dc_726_13

Spektroellipszometria a mikroelektronikai rétegminősítésben

MTA doktori értekezés tézisei

Petrik Péter

Magyar Tudományos Akadémia
Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet
Budapest
2014

1. Előzmények

Bár az ellipszometria elmélete már a 19. század végén ismert volt,¹ fejlesztése majd alkalmazása rendre az 1970-es illetve 1990-es években gyorsult fel. Az ellipszometriai mérés technika fejlesztésének két mérföldköve az automatikus polarizáció-modulált, majd a spektroszkópiai berendezések kifejlesztése volt. Mindkét fejlesztés úttörője D. E. Aspnes. Ezen áttörések ellenére a fejlődés fő motorja az 1990-es évek elején a személyi számítógépek elterjedése, és ezáltal a számítási kapacitás elérhető áron való beszerezhetősége volt – az ellipszometriai mérések kiértékelése ugyanis az esetek döntő többségében csak számítás-igényes numerikus módszerekkel oldható meg, valamint a forgó analizátoros ellipszométerek vezérléséhez is szükség volt mikroszámítógépekre. Ennek is köszönhető, hogy ugyanebben az időszakban kereskedelmi forgalomban is kezdtek megjelenni az első spektroszkópiai ellipszométerek. Az úttörők itt a SOPRA, a Woollam, majd a Jobin Yvon és a Sentech cégek voltak. Jelenleg számos egyéb szereplővel találkozhatunk a piacon. A SOPRA céget néhány évvel ezelőtt felvásárolta a magyar SEMILAB Zrt., amely így az ellipszometriai mérés technikában az egyik meghatározó piaci szereplő lett.

A 6. Nemzetközi Ellipszometriai Konferencia 2013-ban közel 300 résztvevővel került megrendezésre Japánban. A konferencia tematikája jól tükrözi az aktuális trendeket: THz ellipszometria, vékonyrétegek és valós idejű mérés, nanoszerkezetek és plazmonok, Müller mátrix ellipszometria és anizotropia, ipari kutatások, szerves anyagok és alkalmazásaik, nanoanyagok és nanofelületek, félvezető alkalmazások, napelem alkalmazások, metaanyagok, biológiai anyagok, anyagtudomány és dielektromos függvény. A konferencián tartott beszédben D. E. Aspnes kiemelte a forgó kompenzátoros alkalmazásokat, a hullámhossztartomány kiterjesztését, a laterális térképezést és képalkotást (ezen a területen kutatócsoportunk jelentős saját fejlesztésekkel rendelkezik divergens fényforrású térképező ellipszometria terén), a Müller mátrix ellipszometriát, a valós idejű alkalmazásokat, a fényszórás mérést, a biológiai és anizotróp minták mérését.

Az ellipszometria fejlődése a nanoszerkezet kutatásokban is töretlen az utóbbi húsz évben. Erre becslést kaphatunk a tudományos adatbázisok lekérdezésével. A "nano" és "ellipso" karaktersorozatokat egyaránt tartalmazó cikkek száma 2011 óta meghaladja az évi 250-et. A '90-es évek közepéig az ellipszometriát még többnyire mikroelektronikai vonatkozású vékonyrétegek vizsgálatára alkalmazták.² Ennek oka, hogy abban az időben megfelelő anyagi és szerkezeti minőséget még csak ebben az iparágban tudtak előállítani – illetve megfordítva: ez volt az a kutatási és ipari terület, ahol igény volt mikron alatti struktúrák geometriai és anyagi tulajdonságainak nagy érzékenységgű vizsgálatára. Azóta az ellipszometria – megtartva ezen kutatási terület fontosságát – az előző fejezetben a 6. Ellipszometria Konferencia tematikája kapcsán bemutatott számos terület irányába továbbfejlődik – folyamatosan változó és alkalmazkodó módon.

¹legfőképpen Paul Drude munkásságának köszönhetően

²A processzor és memória lapkák gyártásának több mint 200 technológiai lépése során több tíz alkalommal végeznek a szelvényeken ellipszometriai ellenőrző vizsgálatot.

2. Célkitűzések, módszerek

Általánosságban elmondható, hogy az ellipszometriai hardverek kiforrottsága messze túlmutat a modellezési módszerek fejlettségén. A Ψ és Δ ellipszometriai szöveget bármelyik gyártó ellipszométerével 0.05 foknál nagyobb pontossággal meg lehet határozni, ami nanométer alatti rétegvastagság-érzékenységet eredményez. Ezzel szemben az anyag és rétegszerkezetek modellezése visszatérő és máig egyre növekvő probléma, különösen az anyagrendszerek és struktúrák komplexitásának folyamatos növekedése miatt.

A dolgozatban bemutatott eredmények főként ilyen modellfejlesztések abból a célból, hogy az ellipszometria módszerével a mintákról szerezhető információk mennyiségét és megbízhatóságát növeljük, valamint ezek alapján a mintakészítést optimalizálhassuk. Az eredményeket olyan referencia módszerekkel ellenőrizzük, mint az elektronmikroszkópia, az ionsugaras analitika, a röntgendiffrakció vagy a pásztázószondás módszerek. A mélységprofilozás, a nanokristályos félvezetők modellezése, az ultra-vékony rétegek vizsgálata, a vegyület félvezetők ionimplantációja valamint az összetett dielektrikum rétegek vizsgálata mind olyan témák, melyek nem csak a dolgozat gerincét adó közlemények írása idején, hanem ma is számos kérdést és megoldatlan problémát vetnek fel a mikroelektronikában és más alkalmazásokban is. A bemutatott eredmények döntő többsége alkalmazott kutatási projektek keretében született olyan ipari partnerek bevonásával, mint az Intel, a kék LED-ek gyártásában kulcsfontosságú fémorganikus kémiai gőzfázisú rétegleválasztás (MOCVD) vezető berendezésgyártója, az AIXTRON, vezető európai mikroelektronikai vállalatok (ST Microelectronics, Infineon), vezető félvezetőipari mérés technikai cégek, mint a SOPRA vagy a SEMILAB.

Mivel az ellipszometria a felület közeli rétegek vastagságát nanométeres érzékenységgel képes mérni, jól felhasználható mélységprofilozásra. Ionimplantált félvezetők esetében különösen nagy érzékenység érhető el, mert a beérkező ionok roncsoló hatása következtében megváltozó kristályszerkezet nagy mértékben befolyásolja az anyag elektronszerkezetét, és ezáltal az optikai tulajdonságait is az általunk vizsgált hullámhossztartományban. Ezt a tényt már az 1990-es évek elején felismerték, amikor az ionimplantáció által keltett roncsoltságot (elsőként Lohner Tivadar kollégám [1, 2, 3]) és annak mélységfüggését (K. Vedam [4] és J. Vanhellemont [5]³) határozták meg, amit Fried Miklós csatolt fél-Gauss [6, 7], W. Fukarek pedig hibafüggvény közelítésekkel [8, 9] fejlesztettek tovább. Én ezeket az eljárásokat tökéletesítettem a profilt a meredekebb tartományokban jobban közelítő modellel [10, 11].

A kristályszerkezet változására a fenti ionimplantációs vizsgálatokban kihasznált érzékenység nanokristályos félvezetők ellipszometriai vizsgálatában is jelentkezik. A nanokristályok mérete és a szemcsehatárokon bekövetkező elektronszóródás jelentős mértékben megváltoztatják az optikai tulajdonságot, ami ugyancsak nagy érzékenységhez vezet. A nanokristályos félvezetők ellipszometriai modellezésével kapcsolatos legújabb eredményeket egy-egy frissen megjelent könyvfejezetben [12] és cikkben [13] foglaltam össze. Az ultra-vékony rétegek vizsgálata kezdetben főként a nano-érdesség [14], határfelületek [15], a felületi szennyezettség [16] illetve vékonyrétegek épülésének

³J. Vanhellemont szellemes megjegyzése szerint ezen a területen az ellipszometria mint „szegény ember RBS-e” használható.

[17] feltérképezését jelentette, majd a mikroelektronika és a leválasztási módszerek (pl. atomi réteg leválasztás [ALD]) fejlesztésével számos alkalmazás előtérbe került [18, 19, 20, 21]. A polikristályos és ion implantált szilícium vizsgálata során ugyancsak számos vezető európai ipari partnerrel (ST Microelectronics, Infineon) együttműködünk.

A szilícium mellett a vegyület félvezetők optikai tulajdonságai is nagy mértékben függnnek a kristályszerkezeti változásoktól. A kristályszerkezet szisztematikus és kontrollálható megváltoztatásának mindmáig egyik legprecízebb módja az ionimplantáció. Nem véletlen, hogy a vegyület félvezetők korai ellipszometriai vizsgálatainak jelentős része is az ionimplantációhoz kötődik [22, 23]. A dielektromos függvény modellezésére felvonultatott eszköztár itt is hasonló a szilíciuméhoz [13]. Nagy előny, hogy az elektron sáv szerkezet direktátmeneteihez tartozó abszorpciós csúcsok többnyire az ellipszometria által könnyen elérhető hullámhossztartományba esnek. A széles tiltott-sávú félvezetők esetében a hullámhossztartomány kiterjesztése vagy szinkrotron forrás használata jelentett előrelépést.

A dielektrikum szerkezetek ellipszometriai vizsgálata ugyancsak nagy hagyományokkal rendelkezik. Az ellipszometria legfontosabb alkalmazása sokáig a termikusan növesztett SiO_2 rétegek mérése volt⁴. Bár ezen rétegek törésmutató diszperziója az optikai tartományban alacsony, vagyis a félvezetők esetében az anyagszerkezet meghatározását érzékenyvé tevő direktátmenetek abszorpciós csúcsai nem jelennek meg a vizsgált hullámhossztartományban⁵, a határfelületek minősége, a felületi nanoérdesség [13], az optikai sűrűség és az ebben a dolgozatban ismertetett számos lezármaztatott fizikai tulajdonság [25, 26] meghatározható a dielektromos függvény változásából.

3. Tézisek

Az értekezés legfontosabb eredményeit az alábbi tézispontokban foglalom össze. Az egyes bekezdések végén zárójelben a tézispontok felsorolása után számba vett vonatkozó közleményeim sorszámára hivatkozok.

1. Tézispont (Mélységprofilozás)

Az ionimplantáció által egykristályos szilíciumban keltett rácskárosodás mélységeloszlására Fried Miklós által kidolgozott optikai modelleket olyan módon fejlesztettem tovább, hogy az a korábbi modellekben alkalmazottal megegyező alrétegszám esetén is jobb illesztést ad a roncsoltsági profilra, ezáltal gyorsabban és pontosabban meghatározható a mélységben változó szerkezet. A modell legfontosabb újdonsága, hogy a mélységben gyorsan változó szakaszokon vékonyabb, míg a kevésbé változó részen vastagabb alrétegeket alkalmaz, miközben a teljes profilra az alrétegek számának összege konstans. (T1,T2,T3)

⁴A mikroelektronikában máig ez és a különböző dielektrikum rétegek vastagságmérése a legfontosabb alkalmazási terület.

⁵A nagy foton energiákon (9 eV-ig, ld. [24]) végzett szinkrotron ellipszometriai méréseink során már a SiO_2 esetében is figyelembe kellett vennünk az abszorpciós csúcsot.

Megmutattam hogy a 100 keV alatti energiájú He^+ ionok esetén nem lehet a nehezebb ionok esetében használt egyprofilos optikai modellt alkalmazni, hanem dupla, egymást átlapoló roncsoltsági és üregprofilokat is figyelembe vevő modellre van szükség. A modell segítségével két átlapoló profil (üreg és roncsoltság) is alkalmazható. A modell jóságát 40 keV energiájú, nagy fluenciával ($1 \times 10^{16} \text{ He}^+/\text{cm}^2$ - $1 \times 10^{17} \text{ He}^+/\text{cm}^2$) implantált He^+ ionok által keltett roncsoltsági és üregprofil meghatározására igazoltam. (T4)

Az előző bekezdésekben leírt modellek továbbfejlesztésével meghatároztam a hőkezelés során getterezés céljára létrehozott eltemetett üregprofil. Megmutattam, hogy az üregprofil nagy érzékenységgel meghatározható akár 400 nm-es eltemetett mélységben is, és a profil jó egyezést mutat az elektronmikroszkópiai mérések eredményével. Meghatároztam a roncsolt szilícium törésmutatóját. Megmutattam, hogy a He^+ ionokkal roncsolt, főként ponthibákat tartalmazó szerkezet dielektromos függvénye leírható az Adachi-féle modellel. (T5, T6)

2. Tézispont (Nanokristályos félvezetők parametrizálása)

A Lohner Tivadar által az elektrokémiailag mart pórusos szilícium vizsgálatára javasolt, finomszemcséjű nanokristályos szilícium referencia és üreg keveréket alkalmazó modellt elsőként alkalmaztam nem a szokványos elektrokémiai marással, hanem az úgynevezett "stain etching" eljárással készült pórusos szilícium vizsgálatára. A modell használatával mélységben jelentősen változó szerkezetet találtam. Ez alapján pontosan megmérhető volt a kimart anyag mennyisége, és annak lineáris időfüggése, melynek meredekségét befolyásolja a marószerszám és annak koncentrációja. (T7)

Különböző adalékoltóságú egykristályos szilíciumban létrehozott szisztematikusan változó szemcseméretű pórusos szilícium rétegszerkezeteken igazoltam, hogy spektroszkópiai ellipszometriával a dielektromos függvény megfelelő parametrizálásával nem csak a rétegek vastagsága, porozitása és mélységbeli inhomogenitása, hanem a szemcseszerkezet is mérhető. Korrelációt mutattam ki mind az effektív közeg módszerrel illesztett, mind az Adachi-féle dielektromos függvény modellel számolt releváns modellparaméterek és a szemcseméret között. Módszert dolgoztam ki paramétercsatolási és rácskereső technikákra a globális minimum megtalálása érdekében. (T8, T9, T10)

3. Tézispont (Ultravékony rétegek modellezése)

A PhD munkámban megalkotott optikai modellek [27, 28] továbbfejlesztésével megmutattam, hogy az ellipszometria alkalmas diffúziós gátként használt, polyszilícium rétegek alatt létrehozott ultra-vékony (nanométernél vékonyabb) oxidrétegek vastagságának meghatározására. Megvizsgáltam hogyan változik az eltemetett oxid, és a fölötte lévő mintegy 150 nm-es polyszilícium réteg hőkezelés hatására. Meghatároztam hogyan függ az eltemetett oxidréteg vastagság-meghatározásának érzékenysége a fölötte lévő szerkezettől. (T11)

Többféle, növekvő komplexitású optikai modell használatával meghatároztam egykristályos 4H-SiC Si és C végződésű oldalain létrejövő ultra-vékony (néhány nanométertől 60 nanométerig terjedő rétegvastagságú) termikus oxid tulajdonságait. Meg-

mutattam, hogy a hullámhossztartomány megfelelő megválasztásával mindkét oldalukon polírozott minták is megmérhetők és kiértékelhetők az ellenkező oldal mattítása vagy egyéb kezelése nélkül. Szisztematikusan összehasonlítottam az oxidrétegek többféle módon parametrizált és nem parametrizált illesztésének, valamint a határréteg figyelembe vételének hatását. Megmutattam, hogy a több mintán mért spektrum-sorozatokat egyszerre való illesztésével, és a közös paraméterek csatolásával a határréteg és a felületi nanoérdeesség vastagsága egyszerre meghatározható. Az eredményeket atomerő mikroszkópiával és Rutherford visszaszórásos spektrometriával ellenőriztem. (T12)

4. Tézispont (Széles tiltott sávú félvezetők ionimplantációja)

Megmutattam, hogy SiC-ban az ion implantáció által keltett roncsoltság hőkezelés során bekövetkező visszakristályosodása nyomon követhető ellipszometriával. A rövid hullámhosszak használatával olyan optikai modellt alkottam, amellyel kevés paraméterrel is egyszerűen leírható a felület közeli szerkezet. Meghatároztam 150 keV energián 4×10^{14} Al⁺/cm²-től 2×10^{15} Al⁺/cm²-ig terjedő fluenciával implantált Al által egykristályos 4H SiC-ban keltett roncsoltságot. Kimutattam, hogy a Rutherford visszaszórásos spektrometria (RBS) és spektroszkópiai ellipszometria (SE) által meghatározott roncsoltságban szisztematikus eltérés található. Az RBS mind a hőkezelt, mind a nem hőkezelt mintákban felülbecsülte a roncsoltságot. A hőkezelt minták esetében ez az eltérés a fluencia növekedésével nőtt. Az eltérést azzal magyaráztam, hogy a nagy dózisu ionimplantáció hatására bekövetkező térfogatváltozás és mechanikai feszültség miatt a létrejövő kristályszemcsék elveszítik eredeti orientációjukat, emiatt az RBS amorfnek érzékeli őket. Az ellipszometria viszont, mivel független az orientációtól, ki tudja mutatni a roncsoltság valódi mértékét. A nagyobb ionáram-sűrűséggel implantált minták esetében a hőkezelés hatása azért volt RBS-sel kevésbé kimutatható, mert az erősebben torzult szerkezet "befagyott", és a hőkezelés nem tudta helyreállítani az eredeti kristályállapotot. (T13)

Elsőként határoztam meg a roncsolt SiC szerkezet dielektromos függvényét nagy foton energián (5-9 eV). Modelleket alkottam egykristályos 4H SiC-ban ionimplantáció által keltett hibaszerkezet kialakulásának vizsgálatára szinkrotron ellipszometriával. A modellek pontosságát igazoltam egykristályos 4H SiC-ban 100 keV energiájú, 2×10^{13} Xe⁺/cm² - 16×10^{13} Xe⁺/cm² fluenciájú Xe⁺ ionok által keltett hibaszerkezet esetére. Megmértem a roncsoltság mélységfüggését, és összehasonlítottam Rutherford visszaszórásos spektrometriai eredményekkel. A dielektromos függvény deriváltjának elemzéséből becslést adtam az ionnyom méretére, valamint a roncsolódás dinamikájának mélységbeli eloszlására. (T14)

Megmutattam, hogy 100 keV nagyságrendű energiával implantált nehézionok használatával olyan hibaszerkezet hozható létre CdTe-ban, amelynek optikai tulajdonságai megegyeznek a különböző szemcseméretű polikristályos CdTe vékonyrétegek optikai tulajdonságaival. Egykristályos CdTe-ban nagy tömegű (Xe⁺ és Bi⁺) ionokkal kontrollált módon létrehozott hibaszerkezet optikai tulajdonságait vizsgáltam modellfejlesztés céljából. Eljárásokat dolgoztam ki az ionimplantáció során bekövetkező folyamatok szimulációjára. A dielektromos függvény deriváltjának analíziséből meg-

határoztam az ionnyomok méretét, míg a deriváltra illesztett analitikus oszcillátor paramétereiből a szemcseméretet és a rétegekben keletkező feszültséget. (T15, T16)

5. Tézispont (Dielektrikum vékonyrétegek modellezése)

Spektroszkópai ellipszometriai, Rutherford visszaszórásos spektrometriai és röntgen-diffrakciós összehasonlító vizsgálatokkal meghatároztam különböző hőmérsékleten leválasztott $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BST) vékonyrétegek optikai tulajdonságait. Megmutattam, hogy a szerkezet leírható egyetlen réteggel, amelynek a törésmutatóját a Cauchy diszperziós formula segítségével számoltam. Meghatároztam a törésmutató spektrumát a 280-840 nm hullámhossztartományban, és összehasonlító vizsgálatokkal megmutattam, hogy a törésmutató érzékeny a Ba koncentrációra és a BST fázis jelenlétére. (T17)

Megmutattam, hogy fémorganikus kémiai gőzfázisú rétegleválasztással készült $Sr_xBi_yTa_2O_9$ (SBT) rétegek törésmutatója leírható az Adachi-féle parametrizálással [29]. A modell használatával meghatároztam különböző Bi/Sr arányú rétegek törésmutatóját, és RBS valamint XRD mérések eredményeivel való összehasonlításból korrelációt mutattam ki a törésmutató és a Bi/Sr arány valamint a törésmutató és a szemcseméret között. (T18)

Megmutattam, hogy impulzusüzemű inverz lézeres leválasztással előállított CN_x rétegek dielektromos függvénye leírható a Tauc-Lorentz parametrizálással. A felületi nanoérdességet is leíró többrétegű modellt alkalmazva meghatároztam a réteg optikai tulajdonságait és az optikai tulajdonságokból leszámaztatható paramétereit (sűrűség, felületi érdesség, rétegvastagság, törésmutató, tiltott sáv szélessége) a forrástávolság függvényében. Jó egyezést találtam a referencia mérésenként végrehajtott atomerő mikroszkópai, profilometriai és röntgen fotoelektron spektroszkópai mérések eredményeivel. (T19)

A tézispontokban feltárt módszerek alkalmazhatóságát a mikroelektronikai technológiában félvezető eszközök gyártására használt anyagok, szerkezetek és eljárások minősítésének példáin demonstráltam. A tézispontokban az alábbi kapcsolódó közleményeimre hivatkozok:

T1: **P. Petrik**, O. Polgár, M. Fried, T. Lohner, N.Q. Khánh, J. Gyulai. Ellipsometric characterization of damage profiles using an advanced model. *J. Appl. Phys.* 93 (2003) 1987.

T2: **P. Petrik**, O. Polgár, T. Lohner, M. Fried, N.Q. Khánh, J. Gyulai, E. R. Shaaban. Ellipsometric characterization of shallow damage profiles created by Xe-implantation into silicon. *IEEE Proceedings* ISBN:0-7803-7155-0, 601.

T3: **P. Petrik**. Ellipsometric models for vertically inhomogeneous composite structures. *physica status solidi A* 205 (2008) 732.

T4: **P. Petrik**, F. Cayrel, M. Fried, O. Polgár, T. Lohner, L. Vincent, D. Alquier,

J. Gyulai. Depth distribution of disorder and cavities in high dose helium implanted silicon characterized by spectroscopic ellipsometry. *Thin Solid Films* 455 (2004) 344.

T5: **P. Petrik**, F. Cayrel, M. Fried, T. Lohner, O. Polgár, J. Gyulai, D. Alquier. Optical models for cavity profiles in high-dose helium-implanted and annealed silicon measured by ellipsometry. *J. Appl. Phys* 97 (2005) 123514.

T6: **P. Petrik**, M. Fried, T. Lohner, N. Q. Khánh, P. Basa, O. Polgar, C. Major, J. Gyulai, F. Cayrel, D. Alquier. Dielectric function of disorder in high-fluence helium implanted silicon. *Nucl. Instr. and Meth. B* 253 (2006) 192.

T7: E. Vazsonyi, E. Szilagy, **P. Petrik**, Z. E. Horvath, T. Lohner, M. Fried, G. Jalsovszky. Porous silicon formation by stain etching. *Thin Solid Films* 388 (2001) 295.

T8: **P. Petrik**, E. Vázsonyi, M. Fried, J. Volk, G. T. Andrews, A. L. Tóth, C. S. Daróczy, I. Bársony, J. Gyulai. Optical models for the ellipsometric characterisation of porous silicon structures. *physica status solidi C* 2 (2005) 3319.

T9: **P. Petrik**, M. Fried, E. Vazsonyi, T. Lohner, E. Horvath, O. Polgar, P. Basa, I. Barsony, and J. Gyulai. Ellipsometric characterization of nanocrystals in porous silicon. *Appl. Surf. Sci.* 253 (2006) 200.

T10: **P. Petrik**, M. Fried, E. Vazsonyi, P. Basa, T. Lohner, P. Kozma, Z. Makkai. Nanocrystal characterization by ellipsometry in porous silicon using model dielectric function. *J. Appl. Phys.* 105 (2009) 024908.

T11: **P. Petrik**, T. Lohner, M. Fried, J. Gyulai, U. Boell, R. Berger, W. Lehnert. Ellipsometric study of the polysilicon/thin oxide/single-crystalline silicon structure and its change upon annealing. *J. Appl. Phys.* 92 (2002) 2374.

T12: **P. Petrik**, E. Szilágyi, T. Lohner, G. Battistig, M. Fried, G. Dobrik, L. P. Biró. Optical models for ultrathin oxides on Si- and C-terminated faces of thermally oxidized SiC. *J. Appl. Phys.* 106 (2009) 123506.

T13: **P. Petrik**, E. R. Shaaban, T. Lohner, G. Battistig, M. Fried, J. Garcia Lopez, Y. Morilla, O. Polgár, J. Gyulai. Ion implantation-caused damage in SiC measured by spectroscopic ellipsometry. *Thin Solid Films* 455 (2004) 239.

T14: **P. Petrik**, Z. Zolnai, O. Polgár, M. Fried, Z. Betyak, E. Agocs, T. Lohner, C. Werner, M. Röppischer, C. Cobet. Characterization of damage structure in ion implanted SiC using high photon energy synchrotron ellipsometry. *Thin Solid Films* 519 (2011) 2791.

T15: **P. Petrik**, N. Q. Khánh, Jian Li, Jie Chen, R.W. Collins, M. Fried, G.Z.

Radnoczi, T. Lohner, J. Gyulai. Ion implantation induced disorder in single-crystal and sputter-deposited polycrystalline CdTe characterized by ellipsometry and backscattering spectrometry. *physica status solidi C* 5 (2008) 1358.

T16: **P. Petrik**, M. Fried, Z. Zolnai, N.Q. Khánh, Jian Li, R.W. Collins, T. Lohner. Dielectric function and defect structure of CdTe implanted by 350-keV Bi ions. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 1123 (2009) P0501.

T17: **P. Petrik**, N. Q. Khánh, Z. E. Horváth, Z. Zolnai, I. Bársony, T. Lohner, M. Fried, J. Gyulai. Characterisation of $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ films using spectroscopic ellipsometry, rutherford backscattering spectrometry and X-ray diffraction. *J. Non-Cryst. Solids* 303 (2002) 179.

T18: **P. Petrik**, N.Q. Khánh, Z. E. Horváth, Z. Zolnai, I. Bársony, T. Lohner, M. Fried, J. Gyulai, C. Schmidt, C. Schneider, H. Ryssel. Non-destructive characterization of strontium bismuth tantalate films. *Mat. Sci. in Semic. Processing* 5 (2003) 141.

T19: **P. Petrik**, T. Lohner, L. Égerházi, Zs. Geretovszky. Optical models for the ellipsometric characterization of carbon nitride layers prepared by inverse pulsed laser deposition. *Appl. Surf. Sci.* 253 (2006) 173.

4. Hasznosulás

Az értekezésben összefoglalt munka legfontosabb eredményének azt tartom, hogy a kifejlesztett modellek segítségével bővítettem az ellipszometria alkalmazási körét. Az ellipszometria olyan indirekt módszer, amelynek hasznossága messzemenően azon múlik, hogy a mért spektrumokat hogyan sikerül kiértékelni. Az általam vizsgált vékonyrétegek alkalmazási köre a legszélesebb értelemben vett integrált áramköri alkalmazásoktól a szenzorikán keresztül a napelemtechnológiáig széles spektrumot ölel fel.

Fontos kiemelni az oktatásban jelentkező hasznosulást. A tézisekhez kapcsolódó témákból számos kiváló színvonalú diplomamunka és PhD értekezés született. Laborunk munkatársai rendszeresen tartanak egyetemi előadásokat és laborgyakorlatokat, nyári iskolát és szakmai gyakorlatokat vezetnek egyetemistáknak, sőt, újabban középiskolásoknak is. Ezzel mi is hozzájárulunk a tudományterület, és szélesebb értelemben a fizika és a természettudományok népszerűsítéséhez a fiatalság körében. Nagy hangsúlyt helyezünk a magyar nyelvű publikációkra is, pl. a *Fizikai Szemlében* vagy a *Természettudományi Közlönyben*.

Laborunk fejlesztései és kutatási eredményei a magyar és nemzetközi partnerekkel végzett együttműködésekben is hasznosulnak. Az ebben az értekezésben bemutatott vizsgálatok számos esetben ipari indíttatásúak voltak (pl. eltemetett ultravékony oxid, magas dielektromos állandójú oxidok, getterező hélium implantáció). Olyan nemzetközileg is meghatározó félvezetőipari és mérés-technikai cégekkel dolgoztunk

együtt, mint az Intel, Infineon⁶, ST Microelectronics⁷, AIXTRON⁸, Fraunhofer Intézet⁹, SOPRA¹⁰, SEMILAB Zrt.¹¹, Osram¹², First Solar¹³. A korábban említett akkreditációs tevékenység mellett magyar példaként kiemelendők a SOPRA, majd az azt felvásárló magyar SEMILAB Zrt.-vel folytatott közös projektek és együttműködések, illetve azon egykori munkatársaink, akik laborunkban tanulták az ellipszometriát, majd tudásukat a SEMILAB Zrt. munkatársaként hasznosíthatták. A SEMILAB mára nem csak számos félvezetőipari mérőberendezés nemzetközileg kiemelkedő gyártója, hanem az egyik legjelentősebb ellipszométergyártó is.

Hivatkozások

- [1] T. Lohner, G. Mezey, E. Kótai, F. Pásztai, L. Királyhidi, G. Vályi, J. Gyulai, Ellipsometric and channelling studies on ion-implanted silicon, Nucl. Instr. and Meth. 182-183 (1981) 591.
- [2] T. Lohner, G. Mezey, E. Kótai, A. Manuaba, F. Pásztai, A. Dévényi, J. Gyulai, An investigation of ion-bombarded silicon by ellipsometry and channeling effect, Nucl. Instr. and Meth. 199 (1982) 405.
- [3] T. Lohner, G. Mezey, E. Kótai, F. Pásztai, A. Manuaba, J. Gyulai, An investigation of ion-bombarded silicon by ellipsometry and channeling effect, Nucl. Instr. and Meth. 209 (1983) 615.
- [4] K. Vedam, P. J. McMarr, J. Narayan, Nondestructive depth profiling by spectroscopic ellipsometry, Appl. Phys. Lett. 47 (1985) 339.
- [5] J. Vanhellefont, P. Roussel, Characterization by spectroscopic ellipsometry of buried layer structures in silicon formed by ion beam synthesis, Mat. Sci. Eng. B12 (1992) 165.
- [6] M. Fried, T. Lohner, W. A. M. Aarnink, L. J. Hanekamp, A. van Silfhout, Nondestructive determination of damage depth profiles in ion-implanted semiconductors by spectroscopic ellipsometry using different optical Models, J. Appl. Phys. 71 (1992) 2835.
- [7] M. Fried, T. Lohner, E. Jároli, N. Q. Khanh, C. Hajdu, J. Gyulai, Nondestructive determination of damage depth profiles in ion-implanted semiconductors by

⁶Az együttműködés idején az egyik vezető európai mikroelektronikai vállalat volt.

⁷Napjainkig az egyik legmeghatározóbb európai mikroelektronikai vállalat. Többek között az Apple cégnek is egyik beszállítója.

⁸A világ élvonalába tartozó fémorganikus gőzfázisú leválasztó kemence gyártó.

⁹Németország legnagyobb alkalmazott kutatási intézethálózata.

¹⁰Sokáig a világ négy meghatározó ellipszométer gyártója közé tartozott. Ez máig érvényes rá, de a felvásárlás után már SEMILAB néven.

¹¹Világviszonylatban is meghatározó félvezetőipari méréstechnikai berendezéseket gyártó magyar vállalat. Kisebbségi töltéshordozó élettartam mérő és térképező berendezéseivel vált híressé.

¹²Fényforrásokat gyártó vállalat.

¹³A világ legértékesebb napelem gyártó cége.

- multiple-angle-of-incidence single-wavelength ellipsometry using different optical models, *J. Appl. Phys.* 72 (1992) 2197.
- [8] W. Fukarek, W. Möller, N. Hatzopoulos, D. G. Armour, J. A. van den Berg, Ellipsometric investigation of damage distribution in low energy boron implantation of silicon, *Nucl. Instr. and Meth.* 127-128 (1997) 879.
- [9] W. Fukarek, J. R. Kaschny, Cavities in helium implanted and annealed silicon characterized by spectroscopic ellipsometry, *J. Appl. Phys.* 86 (1999) 4160.
- [10] P. Petrik, O. Polgár, M. Fried, T. Lohner, N. Khánh, J. Gyulai, Ellipsometric characterization of damage profiles using an advanced model, *J. Appl. Phys.* 93 (2003) 1987.
- [11] P. Petrik, O. Polgár, T. Lohner, M. Fried, N. Khánh, J. Gyulai, E. R. Shaa-ban, Ellipsometric characterization of shallow damage profiles created by Xe-implantation into silicon, *IEEE Proceedings ISBN:0-7803-7155-0* (2003) 601.
- [12] P. Petrik, Characterization of nanocrystals using spectroscopic ellipsometry, in: S. Neralla (Ed.), *Nanocrystals - Synthesis, Characterization and Applications*, InTech, 2012, doi: 10.5772/48732, ISBN: 978-953-51-0714-9, <http://www.intechopen.com/books/nanocrystals-synthesis-characterization-and-applications/characterization-of-nanocrystals-using-spectroscopic-ellipsometry>.
- [13] P. Petrik, Parameterization of the dielectric function of semiconductor nanocrystals, *Physica B* 453 (2014) 2.
- [14] D. E. Aspnes, J. B. Theeten, F. Hottier, Investigation of effective-medium models of microscopic surface roughness by spectroscopic ellipsometry, *Phys. Rev. B* 20 (1979) 3292.
- [15] D. E. Aspnes, J. B. Theeten, Optical properties of the interface between Si and its thermally grown oxide, *Phys. Rev. Lett.* 43 (1979) 1046.
- [16] E. Strein, D. Allred, Eliminating carbon contamination on oxidized Si surfaces using a VUV excimer lamp, *Thin Solid Films* 517 (2008) 1011.
- [17] R. W. Collins, B. Y. Yang, In situ ellipsometry of thin-film deposition: Implications for amorphous and microcrystalline si growth, *J. Vac. Sci. Technol. B7* (1989) 1155.
- [18] S. Kurunczi, A. Nemeth, T. Hulber, P. Kozma, P. Petrik, H. Jankovics, A. Sebestyen, F. Vonderviszt, M. Fried, I. Barsony, In situ ellipsometric study of surface immobilization of flagellar filaments, *Appl. Surf. Sci.* 257 (2010) 319.
- [19] L. Korosi, S. Papp, S. Beke, B. Pecz, R. Horvath, P. Petrik, E. Agocs, I. Dekany, Highly transparent ITO thin films on photosensitive glass: sol-gel synthesis, structure, morphology and optical properties, *Appl. Phys. A* 107 (2012) 385.

- [20] P. Petrik, B. Pollakowski, S. Zakel, T. Gumprecht, B. Beckhoff, M. Lemberger, Z. Labadi, Z. Baji, M. Jank, A. Nutsch, Characterization of ZnO structures by optical and X-ray methods, *Appl. Surf. Sci.* 281 (2013) 123.
- [21] P. Petrik, T. Gumprecht, A. Nutsch, G. Roeder, M. Lemberger, G. Juhasz, O. Polgar, C. Major, P. Kozma, M. Janosov, B. Fodor, E. Agocs, M. Fried, Comparative measurements on atomic layer deposited Al₂O₃ thin films using ex situ table top and mapping ellipsometry, as well as X-ray and VUV reflectometry, *Thin Solid Films* 541 (2013) 131.
- [22] D. E. Aspnes, S. Kelso, C. Olson, D. Lynch, Direct determination of sizes of excitations from optical measurements on ion-implanted GaAs, *Phys. Rev. Lett.* 48 (1982) 1863.
- [23] G. F. Feng, R. Zallen, Optical properties of ion-implanted GaAs: The observation of finite-size effects in GaAs microcrystals, *Physical Review B* 40 (1989) 1064.
- [24] P. Petrik, Z. Zolnai, O. Polgár, M. Fried, Z. Betyak, E. Agocs, T. Lohner, C. Werner, M. Röppischer, C. Cobet, Characterization of damage structure in ion implanted SiC using high photon energy synchrotron ellipsometry, *Thin Solid Films* 519 (2011) 2791.
- [25] P. Petrik, N. Q. Khánh, Z. E. Horvath, Z. Zolnai, I. Barsony, T. Lohner, M. Fried, J. Gyulai, Characterisation of Ba_xSr_{1-x}TiO₃ films using spectroscopic ellipsometry, Rutherford backscattering spectrometry and X-ray diffraction, *J. Non-cryst. Solids* 303 (2002) 179.
- [26] P. Petrik, T. Lohner, L. Égerházi, Z. Geretovszky, Optical models for the ellipsometric characterization of carbon nitride layers prepared by inverse pulsed laser deposition, *Appl. Surf. Sci.* 253 (2006) 173.
- [27] P. Petrik, M. Fried, T. Lohner, R. Berger, L. P. Biró, C. Schneider, J. Gyulai, H. Ryssel, Comparative study of polysilicon-on-oxide using spectroscopic ellipsometry, atomic force microscopy, and transmission electron microscopy, *Thin Solid Films* 313-314 (1998) 259.
- [28] P. Petrik, T. Lohner, M. Fried, L. P. Biró, N. Q. Khánh, J. Gyulai, W. Lehner, C. Schneider, H. Ryssel, Ellipsometric study of polycrystalline silicon films prepared by low pressure chemical vapor deposition, *J. Appl. Phys.* 87 (2000) 1734.
- [29] S. Adachi, Model dielectric constants of GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb, *Phys. Rev. B* 35 (1987) 7454.