

Serényi Miklós

A katódporlasztás lehetőségei az optoelektronikában

doktori értekezés tézisei



Budapest

2010

Gyártástechnológiájuk tökéletesedésével a 0,5-2 μm hullámhossztartományban működő félvezető lézerek a fotonika minden területén elterjedtek, az optoelektronika legfontosabb eszközévé váltak. Különös jelentőségük van a spektroszkópia, távközlés, valamint a digitális optikai adat-átvitel, illetve -tárolás területén történő felhasználásoknak. Alkalmazásuknak egyik szempontja az, hogy a lézerdiódák fénye elektromosan rendkívül egyszerűen modulálható, és jó hatásfokkal csatolható be egy fényvezető szálba. Az optoelektronika egyik legfontosabb kutatási területe a rövid, pikoszekundum körüli időtartamú, változtatható hullámhosszú impulzusok generálásának fizikai háttere.

A lézerdiódában az optikai erősítést a rezonátor körülfutási idejének ütemében modulálva, a létrejövő módus-szinkronizációval a kívánt rövid impulzusok sorozata állítható elő. Azonban a lézerdióda parányi méretei miatt, a néhányszor 10 GHz-es szinkrongerjesztés csak járulékos optikai elemek által kiterjesztett külső rezonátor segítségével valósítható meg. Ahhoz, hogy a lézerdióda a külső rezonátorban hatékonyan működjön, szükség van arra, hogy a dióda egyik felületét az emisszió hullámhosszán hatásos antireflexiós (AR) bevonattal lássuk el. Az alacsony maradék reflexiójú réteg egyben a lézerdióda által kibocsátott fény hullámhosszának megváltoztatását, hangolását is lehetővé teszi.

A hatásosan működő antireflexiós bevonathoz adott törésmutatójú és vastagságú dielektrikum réteg szükséges, melyet szilíciumnitrid (SiN) rádiófrekvenciás (RF) katódporlasztásával választottam le. A porlasztó berendezést alkalmassá tettem a lézer hátoldaláról kilépő fény intenzitásának mérésére, és így az antireflexiós réteg növekedésének *in situ* ellenőrzésére. A SiN porlasztása során szerzett tapasztalataimat felhasználva egy sor, integrált optikában, fotonikában és elektronikában alkalmazott amorf réteg előállítását vált lehetővé. Munkám olyan kutatási irányhoz csatlakozik, melynek célkitűzései az alábbiakban foglalhatók össze:

- Az elérendő célok között elsőként említem, a különböző hullámhosszakon működő LED-ek (*Light Emitting Diode*), félvezető lézerek és detektorok számára reflexiócsökkentő, illetve növelő bevonatok technológiájának kidolgozását és alkalmazását. A technológiával szembeni követelmény az, hogy egy egyedi eszköz is preparálható legyen, úgy, hogy az ne okozza az eszköz élettartamának csökkenését.
- Másik – nem kevésbé fontos – célkitűzésem, az olcsó, és nem utolsósorban környezet-barát katódporlasztási technológia segítségével, optikai hullámvezetők, fotonikában használatos passzív és aktív anyagok (pl. vékonyréteg-napelem abszorpciós rétege) előállítása jelentette.
- A katódporlasztási technológiában rejlő további lehetőségek, például a leválasztott rétegek növesztés közbeni adalékolásának megoldása, illetve magának a folyamatnak vizsgálata képezte kutatómunkám harmadik motiváló tényezőjét.

Az alkalmazott RF katódporlasztás előnyei a szokásos, párologtatásos, elektronsugaras vagy kémiai rétegleválasztásokkal szemben a következők:

- Az eljárás folyamán a szubsztrát hőmérséklete nem emelkedik jelentősen; ez például a lézerdióda, mint rendkívül érzékeny félvezető eszköz szempontjából előnyös.
- A réteg növekedési sebessége viszonylag lassú (1-10 nm/perc) és jól kontrollálható, tehát az optimális rétegvastagság jól beállítható.
- A plazma összetételét változtatva, a leválasztott amorf réteg egyik összetevőjéből felesleg épülhet be; a réteg anyaga nemsztöchiometrikussá tehető.

Minőségi továbblépést jelentett a SiN porlasztása után a szilícium-oxinitrid (SiON) előállítása. Ez a dielektrikum különös jelentőségű anyag az optoelektronikai eszközök és az integrált optika számára, mert összetételével törésmutatója egy adott tartományban folyamatosan változtatható. Nemcsak maga a SiON réteg, hanem más anyaggal kombinálva kialakított sokrétegű szerkezetek, a multirétegek vizsgálata is perspektivikus kutatási feladat. A néhány nanométer vastagságú rétegekből álló szerkezetek, a jelen levő nagyszámú réteghatárnak és a mesterséges periodicitásnak köszönhetően, alacsony dimenziójú rendszernek tekinthetők. Ezek a rendszerek új fizikai tulajdonságokat mutatnak a homogén, tömbi anyaghoz képest és az alkalmazások szempontjából, a kívánt különleges tulajdonságoknak megfelelően, tervezhetők. A multirétegek növesztésénél felmerülő problémák vizsgálatára ideális anyagnak tűnt az amorf szilíciumból (a-Si) és SiON-ból álló rétegszerkezet.

Az optikai rétegek után elektronikus eszközök készítéséhez szükséges anyagokkal foglalkoztam. Ha egy fémet és a félvezető anyagot érintkezésbe hozunk egymással, a létrejövő kontaktus egyenirányító jellegű lesz. Ezt a fém-félvezető kontaktust nevezzük Schottky átmenetnek. A félvezető technológia fejlődésével a Schottky diódák szerepe nem szorult háttérbe, ugyanis az ezen alapuló eszközök több szempontból előnyös tulajdonságokkal rendelkeznek a többi, más technológián alapuló eszközökkel szemben (gyorsaság, hővezetés, egyszerűség). Az amorf SiGe alapú eszközöket, a töltéshordozók nagy mozgékonyasága miatt, elsősorban a mikrohullámú áramkörökben alkalmazzák széleskörűen. A napelem gyártásban az egyik leggyakrabban alkalmazott félvezetőanyag az egykristályos és a polikristályos szilícium. Mindkettő olcsó és jól kiforrott technológiája miatt terjedt el. A kristályos szilíciumban az indirekt sávszerkezetből adódóan alacsony az abszorpció, mert az effektust a hullámszám kiválasztási szabály korlátozza. Az amorf anyagban azonban, a hosszú távú rendezettség hiánya miatt, ez a kiválasztási szabály nem érvényes. Az a-SiGe napelemek számára történő felhasználása rendkívül fontos: a Ge tartalomtól függően az abszorpciós profil a hosszabb hullámhosszak felé tolható. Ezáltal a napsugárzás energiájának konvertálása a hagyományos a-Si napelemeknél jobb hatásfokkal érhető el. A rétegleválasztás során, a technológiától függően, hidrogén

építhető be az amorf rétegbe, megkötve evvel a szabad kötéseket és javítva az eszköz tulajdonságait.

Az anyagtudomány egyik, az utóbbi időben kiemelkedően kutatott területe, a néhány nanométeres vastagságú vékonyrétegek fizikai tulajdonságainak vizsgálata. A nanostrukturák egyik speciális típusa a multiréteg szerkezet, melyben néhány atomsor vastagságú, különböző anyagból készített rétegek épülnek egymásra. A nanostrukturák ideális modellanyagok az elméleti számolások kísérleti ellenőrzésére, ugyanakkor gyakorlati alkalmazásuk is igen széleskörű a speciális mágneses, elektromos vagy éppen optikai tulajdonságaik miatt. A Si/Ge rétegpárokból álló szerkezet a fotovoltaiikus alkalmazás szempontjából újszerű. Ha a multirétegben az egyes rétegek vastagsága valamely kritikus hullámhossz közelébe kerül akkor e rendszerekben számos új fizikai tulajdonság figyelhető meg, ami a nagy számban jelenlévő határfelületekre, vagy éppen az egyedi rétegek vastagságának véges méretére vezethető vissza. Valamennyi gyakorlati alkalmazás szempontjából lényeges a jó minőségű vékonyrétegek előállítása. Az eszközök hosszú távú, megbízható működése megköveteli ezen multirétegek időbeli stabilitását, melyet alapvetően az anyagban végbemenő diffúziós folyamatok határoznak meg.

Az értekezésben ismertetett munka folyamán a mérés technika sokat fejlődött. Elegendő csupán arra gondolni, hogy a 90-es évek elején, az adatgyűjtő eszközök, a számítógépek csak korlátozott mennyiségben és minőségben álltak rendelkezésre. Időközben egyre bonyolultabb és kifinomultabb vizsgálati módszerek váltak hozzáférhetővé és ezeket, egy adott probléma megértéséhez szükséges mértékben, igyekeztem alkalmazni. Az értekezésnek nem célja a speciális vizsgálati módszerek, mint pl. a spektrál-ellipszometria (SE), *Rutherford* visszaszórásos analízis (RBS), a keresztmetszeti elektronmikroszkópia (TEM), a *Röntgen* diffrakció (XRD), vagy pedig a porlasztott rétegek felhasználásával készült diódák feszültség-áram karakterisztikájának részletes értelmezése; ezeket a kapcsolódó publikációk tartalmazzák.

A doktori értekezésem célja az általam katódporlasztással előállított rétegrendszerekkel kapcsolatos munka ismertetése. A rétegek leválasztására használt technika ismertetése után az eredményeket technológiai aspektus szerint csoportosítottam; külön tárgyalom azokat az anyagokat, melyeket *egy targetből* egy gáz, illetve gázkeverék plazmájával lehet porlasztani (SiN, SiON, a-Si). Ezt követően az összetett, illetve *két targetből* előállítható SiGe rétegek és Si/Ge rétegrendszereket ismertettem. Az értekezés tárgyát képező munka korai szakaszának alapvető motivációja a lézerdiódák rezonátorfelületének alacsony maradék reflexiót biztosító rétegbevonási-technológia kidolgozása volt. Az itt elért eredmények időtállóan bizonyultak, sőt a hangolható félvezető lézerek antireflexiós rétegének vastagságkontrolljára az általam javasolt *in situ* módszert, mind kísérleti, mind *kommerciális* szinten általánosan használják. Ezért az értekezés végén a külső rezonátorhoz csatolt lézerdiódákkal kapcsolatos eredményeim közül az általam legjelentősebbeknek tartottakra ismételtén kitértem.

Tézisek

1.a). A GaAs alapú félvezetőlézerek anyagának törésmutatójához (n_s) illeszthető, n törésmutatójú ($n^2=n_s$) antireflexiós réteget nemsztöchiometrikus szilíciumnitridből készítettem. Megállapítottam, hogy a szinterelt szilíciumnitrid kerámiából készült targetet Ar és N_2 gázok keverékével porlasztva a leválasztott réteg törésmutatója $n = 1.58$ -től monoton növekszik, ha a plazmában az argon parciális nyomását növelem. n eléri a sztöchiometrikus szilíciumra jellemző 2,05 körüli értéket, ha a parciális nyomások aránya $P_{Ar}/P_{N_2} = 150$. Az abszorpciók együttható maximumot mutat, amikor relatív alacsony, $P_{Ar}/P_{N_2} = 40$ argon aránynál nitrogén felesleg épül be a rétegbe [1, 2].

b). Antireflexiós réteggként alkalmazható szilícium-oxinitrid (SiON) előállításánál targetként kristályos szilíciumot használtam és a porlasztást nitrogén és oxigén tartalmazó gázkeverékkel végeztem. A porlasztott réteg törésmutatója az oxigén parciális nyomásának növelésével, a 2,05-ös szilíciumnitrid törésmutató értékről, monoton csökkent. A szokásos 50 mm-es target távolságnál, 2-3 Pa nyomású plazmában, a $P_{O_2}/P_{N_2} = 0,002$ parciális nyomás arány esetén a növesztett réteg törésmutatója eléri a határesetet jelentő, szilíciumdioxidra jellemző 1,45 értéket [3]. A plazma ezrelékes O_2 tartalma utal a folyamat reaktív jellegére; ez a kis mennyiség elegendő a leválasztott anyag kémiai összetételének megváltoztatására.

2). 5-30 nm vastag a-Si és SiON rétegeket növesztettem adalékolatlan, kristályos Si targetből úgy, hogy a recipiensbe felváltva nagy tisztaságú argon, illetve nitrogén gázt vezettem. Keresztmetszeti transzmissziós elektron-mikroszkópia (TEM) segítségével megmutattam, hogy az első a-Si rétegre porlasztott SiON réteg felülete kissé hullámos és feldurvult, annak ellenére, hogy az a-Si réteg felülete sima. A második SiON réteg határán az a-Si/SiON réteg-pár vastagságával összemérhető periódushosszú hullámosodás megismétlődik, és amplitúdója növekszik. Ugyanezt a rendszert N-típusú, foszforral (P) erősen adalékolt targetből porlasztva, hullámzástól mentes határfelületeket kaptam és a SiON réteg feldurvulása jelentősen csökkent. Megállapítottam, hogy a foszforral adalékolt a-Si réteg hatásosan függetleníti a porlasztott réteghatárokat a kiindulási felület, valamint a SiON réteg egyenetlenségeitől [4]. Ezt a jelenséget azzal magyaráztam, hogy a korlátozott diffúziójú P beépülése a Si helyére a Si intersticiós atomok számának növekedését jelenti. A réteghatárokon az intersticiós atomok diffúziójukkal segíthetik a befogódó atomok optimális elhelyezkedését. Rámutattam, hogy az adalékolt targetből porlasztott, néhány nm vastagságú rétegek esetén az ellipszometria közvetett módon veszi figyelembe a P adalék hatását a felület minőségére [5].

3.a). Schottky dióda alapjául szolgáló amorf réteget kristályos SiGe targetből növesztettem úgy, hogy a hidrogén beépítésére – tudomásom szerint először – az RF katódporlasztást végző plazma gázkeverék egyik komponenseként 0,4%

parciális nyomású hidrogén gázt használtam. A p típusú szilíciumra porlasztott, 3,5% germániumot tartalmazó, amorf rétegen készült alumínium Schottky átmenet áram-feszültség karakterisztikáját vizsgálva azt találtuk, hogy a nagyáramú szakasz - 1,5 V nyitófeszültség fölött - az előfeszültség négyzetének lineáris függvénye. Megállapítottuk, hogy az áramot ebben a szakaszban a többségi töltéshordozóknak a tértöltési tartomány által korlátozott diffúziója határozza meg. Ennek alapján felvázoltuk egy négyzetes áram-feszültség karakterisztikájú Schottky dióda, hidrogént tartalmazó a-SiGe rétegen alapuló konstrukcióját [6, 7].

b). Megfelelő nagyságú Ge kristály-lapkát p típusú, bórral (B) adalékolt szilícium szeletre rögzítve készítettem a napsugárzás konverziója számára optimálisnak tartott, 20 - 25%-os Ge tartalmú a-SiGe réteg porlasztásához szükséges speciális targetet. Az amorf rétegek RF porlasztása során az argon gázhoz különböző mennyiségű - 0,4; 0,8; 1,2 térfogatszázalék - hidrogént kevertem. Megállapítottuk, hogy a rétegbe beépülő hidrogén atomok számának növekedésével nő a réteg fajlagos ellenállása. A töltéshordozó koncentráció csökkenését a vezetési és vegyértéksáv határán a donor, illetve akceptornívók számának - a beépülő hidrogén passziváló hatására történő - csökkenésével magyaráztuk [8-10].

4). 100, egyenként 3 nm vastag rétegből álló a-Si/Ge:H multirétegeket növesztettem úgy, hogy váltakozva Si, illetve Ge targetet porlasztottam argon és különböző mennyiségű hidrogént tartalmazó gázkeverékekkel. A hőkezeletlen mintákon felvett alacsonyszögű röntgendiffrakció (SAXRD) ötödrendű Bragg-csúsig mérhető spektruma arra utalt, hogy a szerkezetet éles és sima határátmenetekkel rendelkező rétegek alkotják. A minták termikus stabilitását a különböző hőmérsékleteken végzett hőkezelések ideje alatt (*in situ*) felvett elsőrendű Bragg-csúcs I intenzitásváltozásának, a $\ln(I/I_0)$ görbe időbeli lefutását ábrázolva vizsgáltuk. A hőkezelések hatását vizsgálva megállapítottuk, hogy a magas hidrogén tartalom miatt, vagy a magas hőkezelési hőmérséklet hatására a multiréteg hidrogéntartalma felszabadul; a felület felhólyagosodik, buborékok alakulnak ki, melyek a további, intenzív növekedésük során „felrobbannak”, helyükön piciny kráterek keletkeznek. A hőkezelés közben végzett *in situ* SAXRD mérések arra utalnak, hogy a minta - a felület degradációjának ellenére - megőrzi réteges szerkezetét, amit a minták keresztmetszeti transzmissziós elektron-mikroszkóp (TEM) vizsgálata is alátámasztott. Az alacsony hidrogéntartalmú (0,8 és 1,5% H tartalmú plazmával növesztett) minták 400 °C-on végzett hőkezelése során felvett $\ln(I/I_0)$ görbéit tekintve megállapítottuk, hogy a hidrogén jelenléte, a Si/Ge multirétegekben a felszakadt kötések számának csökkentése révén, lassítja a két anyag diffúziós keveredését. Ugyanakkor a 450 °C-on végzett hőkezelés esetén mért diffrakciós görbék lefutásából látható, hogy a rétegszerkezet degradálódása valamennyi hidrogéntartalmú mintánál felgyorsul [11, 12].

5). A 300 nm vastag, hőkezelt a-Si/Ge:H multiréteg AFM és TEM felvételeit vizsgálva megállapítottam, hogy a hőkezelés hatására keletkezett kráterek mindegyike a rétegszerkezet teljes, 300 nm-es mélységére kiterjed; a felületen

sekély krátereket, azaz pórusokat nem találtam. Ez alapján valószínű, hogy a hidrogén jelentős része a multiréteg mindkét határa (szubsztrát és felszín) felé távozik, a rétegszerkezeten belül üregek nem alakulnak ki. A magas hidrogéntartalmú (6% H tartalmú plazmával növesztett) minta 350 °C-on végzett hőkezelése után készített mikroszondás analízise alapján azt találtam, hogy a rétegszerkezetben léteznek olyan tartományok, ahol a Si és Ge rétegek jól elkülönülnek egymástól, ugyanakkor az energia szelektív detektor Ge jele határozottabb amplitúdójú periodicitást mutat [13]. Ez megfelel a hidrogén nélküli multirétegekben aszimmetrikus diffúziót feltételező modellnek: a Ge atomok gyakorlatilag nem képesek behatolni a Si mátrixba, míg a határfelület közelében levő Si atomok könnyebben bediffundálnak Ge-ba, ahol eloszlának. Az azonos hőfokon kezelt, hidrogén nélkül porlasztott mintáknál, előrehaladottabb diffúziós keveredést találtam. A TEM felvételek alapján megállapítottam, hogy a degradált felületű multirétegben a diffúziós folyamat inhomogén. Kialakulnak a multirétegben olyan tartományok, ahol a megkötött H jelenléte lassítja a két anyag diffúziós keveredését. Azokban a tartományokban, ahol a H a hőkezelés hatására távozik, porlasztott réteghatárok jobban elmosódnak, de a szerkezet összetétel-modulált jellege megmarad [14].

6). Félvezető lézerek antireflexiós (AR) bevonata pontos vastagságának közvetlen kontrolljára *in situ* mérési eljárást dolgoztam ki. Ennek lényege az, hogy a porlasztási folyamat alatt a diódát lézerkészítőbe felett működtetem és a hátsó, nem bevont rezonátorfelületről kilépő fényt eljuttatom a mérőre. Az optimális vastagság elérésénél a fényt eljuttató minimum értéket ér el, hiszen a hatékonyan működő AR réteg miatt az optikai visszacsatolás is minimális. Becslésem szerint a rétegvastagság $\pm 1\text{nm}$ -nél kisebb hibával beállítható, méréseim szerint pedig a legtöbb esetben a maradék reflexió kisebb, mint 0.01 % [1-3]. Az *in situ* eljárás alkalmazható a $\lambda/4$ rétegvastagság egész számú többszöröseinek ellenőrzésére: páros számú $\lambda/4$ -es réteg „hatástalan”, azaz a lézerdióda küszöbárama az eredeti értéket veszi fel; páratlan számú $\lambda/4$ -es réteg ismételt reflexiócsökkentő hatású. A kereskedelmi forgalomba kerülő, külső rezonátorral változtatható hullámhosszú fényt kibocsátó félvezető lézerek antireflexiós rétegének vastagság-kontrolljára az általam javasolt *in situ* módszert általánosan használják.

7). Megállapítottam, hogy a külső rezonátorba helyezett, az AR bevonatuk miatt széles tartományban hangolható lézerdiódák által aktív módus-szinkronizációval előállított impulzusok időtartama - hangolva a lézert a rövidebb hullámhosszak felé - monoton csökkenthető. Az impulzusok időtartamának hullámhossz szerinti változására kvalitatív magyarázatot adtam. Ráműtöttem, hogy az impulzushossz a fényerősítés - az aktív rétegbe injektált töltéshordozók kvázi-Fermi nívói által meghatározott - dinamikájától függ. A differenciális erősítés nagyobb, így az erősítési tranziens gyorsabb, a magasabb energiájú oldalon. Egy fényimpulzus kibocsátása az elektron-lyuk koncentrációnak, így a kvázi-Fermi szintek csökkenésével jár együtt; ezért rövidebb hullámhosszú impulzusok

kibocsátása esetén az erősítés abszorpcióvá változhat. Ez a mechanizmus játszik szerepet az impulzus lefutó élének formálásában [15].

Az eredmények hasznosítása

Az utóbbi évtizedben megnőtt a kereslet az AR rétegekkel bevont félvezető lézerek, hangolható lézerrendszerek iránt. Ezeket, egyszerű kezelhetőségük miatt, egyre szélesebb körben alkalmazzák fényforrásként a spektroszkópiai, metrológiai műszerekben. A kereskedelmi forgalomban számos gyártó kínál különböző teljesítményű és hullámhosszú, kompakt készülékeket. Tömeggyártásuk esetén az AR bevonat készítésének technológiája nem ismert, az egyedi eszközöket gyártók általában az értekezésben bemutatott technikát alkalmazzák.

Az elért eredmények egy része meghatározott kutatási projekthez kapcsolódott, így beépült az adott projekt eredményeibe. Az MFKI-ban megvalósított, 1.13 μm hullámhosszon működő külső rezonátoros rendszert a Szeged Tudományegyetem kutatói által készített fotoakusztikus cellával egészítettük ki úgy, hogy az akusztikus cellát a lézer külső rezonátorába helyeztük el. A mérés célja a cellába szívott vízgőz detektálása volt. Azóta a szegedi kutatócsoport számos olyan berendezést fejlesztett ki, melyek alkalmasak ipari, illetve terepi körülmények között megbízható mérések végzésére.

Az MTA RMKI-ban működő Plazmafizikai Osztály semleges atomok lézeres hűtésével és csapdázásával foglalkozik. Az ehhez szükséges, 780 nm környékén hangolható lézert tartalmazó fényforrás megépítése közös munka eredménye. A rubídium atom lézeres hűtésénél használt 60 ns időtartamú, frekvencia-modulált impulzusok előállítása kizárólag félvezető lézerrel volt lehetséges.

Munkám során hazai és külföldi intézetek, egyetemek munkatársai számára különböző típusú, kereskedelmi forgalomban kapható, vagy éppenséggel saját fejlesztésű félvezető lézereket AR bevonattal láttam el. Az értekezéssel kapcsolatos munka területén szerzett tapasztalataimat az intézetbe kihelyezett laboratóriumi gyakorlatokon hazai, nyári gyakorlatokon pedig külföldi egyetemi hallgatóknak oktatom.

Az értekezésben kifejtett, új tudományos eredményeimet tartalmazó publikációk jegyzéke

- [1] M.Serenyi, H.U.Habermeier „*Directly controlled deposition of antireflection coatings for semiconductor-lasers*” Applied Optics **26**:(5) pp. 845-849. (1987)
- [2] M.Serenyi, W.Lauer, H.U.Habermeier „*Sputtering and in situ characterization of the optical-properties of silicon-nitride*” Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms **18**:(4-6) pp. 659-661. (1987)

- [3] M.Serenyi, M.Racz, T.Lohner „*Refractive index of sputtered silicon oxynitride layers for antireflection coating*” Vacuum **61**:(2-4) pp. 245-249. (2001)
- [4] M.Serenyi, C.Frigeri „*Investigation of silicon oxynitride and amorphous silicon multilayer*” European Physical Journal-Applied Physics **27**:(1-3) pp. 329-332. (2004)
- [5] M.Serenyi, T.Lohner, P.Petrik, C.Frigeri „*Comparative analysis of amorphous silicon and silicon nitride multilayer by spectroscopic ellipsometry and transmission electron microscopy*” Thin Solid Films **515**: (7-8) pp. 3559-3562. (2007)
- [6] Zs.J.Horváth, K.Jarrendahl, L.K.Orlov, M.Serényi, M.Ádám, I.Szabó, B.Cvikl, D.Korošak, E.Pashaev, S.Yakunin, Vo Van Tuyen, Zs.Czigány „*Vertical electrical properties of Al/SiGe/Si structure*” Proc. 37th Int. Conf. of Microelectronics, Devices and Materials, Bohinj, Slovenia, (Eds.F.Smole, M.Topic, I.Sorli, MIDEM): pp.143-148. (2001)
- [7] Zs.J.Horváth, M.Serényi, M.Ádám, I.Szabó, E.Badaljan, V.Rakovics „*Al/a-SiGe:H/c-Si m-i-p diodes - a new type of heterodevice*” Physica Status Solidi C-Conferences and Critical Reviews **0**: pp. 1066-1069. (2003)
- [8] M.Serényi, J.Betko, A.Nemcsics, N.Q.Khanh, M.Morvic „*Fabrication of a-SiGe Structure by RF Sputtering for Solar Cell Purposes*” Physica Status Solidi C-Conferences and Critical Reviews **0**: pp. 857-861. (2003)
- [9] M.Serenyi, J.Betko, A.Nemesics, N.Q.Khanh, D.K.Basa, M.Morvic „*Study on the RF Sputtered hydrogenated amorphous silicon-germanium thin films*” Microelectronics Reliability **45**:(7-8) pp. 1252-1256. (2005)
- [10] M.Serenyi, T.Lohner, Z.Zolnai, P.Petrik, A.Nemcsics, N.Q.Khanh, P.Turmezei „*Studies on the RF sputtered amorphous SiGe thin films*” Inorganic Materials **42**:(1) pp. 3-6. (2006)
- [11] C.Frigeri, M.Serényi, A.Csik, Z.Erdélyi, D.L.Beke, L.Nasi „*Structural modifications induced in hydrogenated amorphous Si/Ge multilayers by heat treatments*” Journal of Materials Science-Materials in Electronics **19**: pp. S289-S293. (2008)
- [12] A.Csik, M.Serenyi, Z.Erdelyi, A.Nemcsics, C.Cserhati, G.A.Langer, D.L.Beke, C.Frigeri, A.Simon „*Investigation of thermal stability of hydrogenated amorphous Si/Ge multilayer*” Vacuum **84**: (1) pp. 137-140. (2009)
- [13] C.Frigeri, L.Nasi, M.Serényi, A.Csik, Z.Erdélyi, D.L.Beke „*Influence of Hydrogen on the Structural Stability of Annealed Ultrathin Si/Ge Amorphous Layer*” Solid State Phenom. **156-158**: pp 325-330. (2010)

- [14] C.Frigeri, L.Nasi, M.Serényi, A.Csik, Z.Erdélyi, D.L.Beke, „*AFM and TEM study of hydrogenated sputtered Si/Ge multilayers*” Superlattices and Microstructures **45**: (4-5) pp. 475-481. (2009)
- [15] M.Serenyi , J.Kuhl , E.O.Gobel „*Pulse Shortening of Actively Mode-Locked Diode-Lasers by Wavelength Tuning*” Appl. Phys. Lett. **50**: (18) pp. 1213-1215. (1987)

Az értekezés tárgykörében készített egyéb közlemények és előadások

- [16] T.Pfeiffer, J.Kuhl, M.Serényi, H.U.Habermeier, E.O.Göbel, L.Palmetshofer, A.Axman „*Picosecond Optoelectronic Switches*” Physica Scripta **T13**: p.100. (1986)
- [17] J.Kuhl, M.Serényi and E.O.Göbel „*Bandwidth-limited picosecond pulse generation in an actively mode-locked GaAs laser with intracavity chirp compensation*” Opt.Lett. **12**: (5) pp. 334-336. (1987)
- [18] M.Serényi, E.O.Göbel and J.Kuhl „*Inhomogeneous gain saturation in mode-locked laser diodes*” Appl. Phys. Lett. **53**: (3) pp. 169-171 (1988)
- [19] D.Baums, M.Serényi, W.Elsässer, E.O.Göbel „*Instabilities in the power spectrum of mode-locked semiconductor lasers*” J.de Physique **49**: p. C2-405 (1988)
- [20] M.Serényi, J.Kuhl, E.O.Göbel „*Synchrones Pumpen von Halbleiterlasern mit elektrischen Pikosekundenimpulsen von einem optoelectronischen Schalter*” Verhandl. DPG (VI) **21**: Q-30 (1986)
- [21] M.Serényi, J.Kuhl, E.O.Göbel „*Erzeugung bandbreitebegrenzter 5 ps-Pulse durch aktives Mode-Locken von Halbleiter lasern*” Verhandl. DPG (VI) **22**: Q-7.6 (1987)
- [22] G.Zimmermann, M.Serényi, D.Baums, W.Elsässer „*Aktives Mode-Locking von 1,3 μm InGaAsP-DCPBH Lasern*” Verhandl.DPG (VI) **24**: HL-30.7 (1989)
- [23] Z.Bozóki, J.Sneider, G.Szabó, A.Miklós, M.Serényi, G.Nagy, M.Fehér „*Intracavity photoacoustic gas detection with an external cavity diode laser*” Applied Physics B-Lasers and Optics **63**: (4) pp. 399-401. (1996)
- [24] M. Serényi „*CW laser diodes/LEDs*” Photonics Spectra **31**:(3) p. 78. (1997)
- [25] Serényi Miklós „*Semiconductor laser development and their application*” In: A.Czitrovsky, I.Kertész (szerk.) Trends in laser development, application and technologies. Budapest : pp. 58-75. (1997)
- [26] Serényi Miklós „*Rövid impulzusok előállítása külső rezonátorba helyezett félvezető lézer segítségével*” Híradástechnika LV **1-5**: pp. 20-32. (2000)

- [27] M.Serényi, A.Nemcsics, J.Betko, Zs.Zolnai, N.Q.Khanh, Zs.J.Horváth „*Sputtered a-SiGe:H layers for solar cell purposes*” Workshop on Solid State Surfaces and Interfaces II, SSSI-II, Bratislava, Slovakia : p. 65. (2000)
- [28] Zs.J.Horvath, M.Adam, I.Szabo, M.Serenyi, V.Van Tuyen „*Modification of Al/Si interface and Schottky barrier height with chemical treatment*” Applied Surface Science **190**:(1-4) pp. 441-444. (2002)
- [29] Z.Vörös, M.Serenyi „*CW-measurements of common cavity semiconductor lasers*” Japanese Journal of Applied Physics **42**:(8) pp. 5056-5058. (2003)
- [30] Zs.J.Horvath, M.Serenyi, M.Ádam, I.Szabo, V.Rakovics, P.Turmezei, Z.Zolnai, N.Q.Khan „*Electrical behaviour of sputtered Al/SiGe/Si structures*” Acta Physica Slovaca **55**:(3) pp. 241-245. (2005)
- [31] C.Frigeri, A.Gasparotto, M.Serenyi „*Chemical and Structural Properties of a-Si/SiON Multilayer Stacks on c-Si*” 11th International Conference on Defects, DRIP XI, Beijing, Kína : p. 106. (2005)
- [32] J.S.Bakos, G.P.Djotyan, P.N.Ignacz, M.A.Kedves, M.Serenyi, Zs.Sörlei, J.Szigeti, Z.Toth „*Interaction of frequency modulated light pulses with rubidium atoms in a magneto-optical trap*” European Physical Journal D **39**: (1) pp. 59-66. (2006)
- [33] Serényi Miklós „*Rövid impulzusok előállítása külső rezonátorba helyezett félvezető lézer segítségével*” Heiner Zs., Osvay K. (szerk.) A kvantumoptika és -elektronika legújabb eredményei, Szeged:pp. 82-91. (2006)
- [34] J.S.Bakos, G.P.Djotyan, P.N.Ignacz, M.A.Kedves, M.Serenyi, Zs.Sörlei, J.Szigeti, Z.Toth „*Acceleration of cold Rb atoms by frequency modulated light pulses*” European Physical Journal D **44**: (1) pp. 141-149. (2007)
- [35] T.Lohner, M.Serenyi, D.K.Basa, N.Q.Khanh, A.Nemcsics, P.Petrik, P.Turmezei „*Composition and Thickness of RE Sputtered Amorphous Silicon Alloy Films*” Acta Polytechnica Hungarica **5**:(2) pp. 23-30. (2008)
- [36] M.Serenyi, T.Lohner, P.Petrik, Z.Zolnai, Z.E.Horvath, N.Q.Khanh „*Characterization of sputtered and annealed niobium oxide films using spectroscopic ellipsometry, Rutherford backscattering spectrometry and X-ray diffraction*” Thin Solid Films **516**:(22) pp. 8096-8100. (2008)
- [37] A.Hámori, M.Serényi, A.Dér, K.Ferencz, S.Kökényesi „*All-optical switching possibilities for optical packet switching*” Proceedings of the European Microwave Association. Budapest : pp. 221-225. (2008)