

dc_779_13

Optoelektronikai eszközök és rendszerek

MTA doktori tézislevele

Dr. Jakab László

2013

1. A kutatások előzményei, laboratóriumok és együttműködő partnerek

Az akusztó-optikai eszközök, mint aktív optikai elemek kutatása-fejlesztése a lézerek elterjedésével a 60-as évek végén vett lendületet. A kölcsönhatás jellege fényelhajlás (diffrakció) az akusztikus hullám által létrehozott periódikus törésmutató változáson, optikai rácson. Az ultrahangot rádiófrekvenciás gerjesztéssel a kölcsönhatási közegre erősített piezoelektromos lapkával keltjük.

Amennyiben az ultrahang amplitúdóját időben változtatjuk, a diffraktált nyaláb optikai intenzitás modulációja az eredmény, az ilyen célú eszközöket modulátoroknak nevezzük. Ha állóhullámú akusztikus teret hozunk létre (párhuzamos kölcsönhatási közeg felületekkel), a diffraktált optikai nyaláb szinuszos modulációját kapjuk, a meghajtó RF frekvencia kétszeresével. Ezt optikai rezonátorban periodikus veszteséggként a longitudinális rezonátor módusok szinkronizálására, rövid fényimpulzusok keltésére használhatjuk (mode-locker). A frekvencia változtatásával szögben pásztázó nyaláb (fényeltérítő), vagy fehér fény megvilágítással monokromatikus diffrakció (elektronikusan hangolható optikai szűrő) az eredmény.

Az akusztó-optikai kölcsönhatás jellemző mértéke a diffrakciós határfok, a diffraktált nyaláb intenzitása a belépőhöz viszonyítva (a reflexiós veszteségektől ilyenkor általában eltekintünk). A jelenség könnyen kimutatható pl. vízben néhány MHz-es frekvenciákon (Debye-Sears 1932, Raman-Nath, 1937). Gyakorlatban is használható konstrukciók kifejlesztéséhez, 90-95 %-os határfok eléréséhez nemcsak a megfelelő fényforrásokra (lézerekre), hanem a jelenség alkalmazása szempontjából kedvező tulajdonságú, szilárd fázisú anyagokra is szükség volt. Ilyeneket, mint pl. a PbMoO_4 (ólommolibdát, Uchida, 1971) és a TeO_2 (tellurdioxid, Miyazawa, Iwasaki 1970, Omachi, Uchida 1972) a hetvenes évek elején sikerült egykristály formában először használható méretekben előállítani. Ahogy ezeknek az anyagoknak a minősége (tisztasága, akusztikus és optikai csillapítása, reprodukálható mérete) javult, úgy váltak szinte egyeduralkodóvá a területen. A hetvenes évek elején publikálták elsősorban az Egyesült Államokban és Japánban az első kísérleteket, gyors modulátor (Maydan, 1970) és akusztó-optikai szűrő konstrukciókat (Harris, Wallace 1969) TeO_2 kölcsönhatási közeggel, nem kollineáris elrendezésben (I.C. Chang, 1974), szélessávú fényeltérítőket izotróp és anizotróp konfigurációkban (Uchida, 1974).

Ezekhez a kutatási irányokhoz csatlakozva Magyarországon az akusztó-optikai eszközök gyártás technológiájának, tervezési és mérési módszereinek kidolgozása az MTA SZTAKI, Podmaniczky András, Tőkés Szabolcs (Opt. Comm. 1975, 1976), Márkus Lenk Attila, valamint a BME Fizikai Intézet, Giber János, Behringer Tibor együttműködésében kezdődött, még a 70-es évek közepén, elsősorban lézer printer és lézer plotter alkalmazásokra. Később a teljes akusztó-optikai eszköz fejlesztést a BME átvette, a kissorozatú gyártás megvalósításában Giber János témavezetése mellett Kocsányi Lászlóval, Várkonyi Sándorral és Nádudvari Rudolffal közösen már én is részt vettem. Diplomamunkámat 1981-ben az eszközök vizsgálatából, egyetemi doktori fokozatomat 1985-ben a kissorozatú gyártás kidolgozásából (Jakab, Kocsányi, Giber 1983, 1984), kandidátusi értekezésemet pedig akusztó-optikai jelfeldolgozás témakörben 1990-1992-ben készítettem. (Jakab, Richter, Szőnyi 1989, 1990, 1991)

A hazai kutatások a nemzetközi igényekhez illeszkedve a közeli infravörös (1 μm és hosszabb) tartományok felé elmozdulva, nemzetközi kapcsolatokon keresztül bővültek (Q-kapcsoló és módus csatoló fejlesztések H. J. Eichler, TU West-Berlin, kétdimenziós fényeltérítők kutatása J. P. Huignard, Thomson CSF-Orsay, Párizs közreműködésével). 1996-tól kezdődtek a hangolható akusztó-optikai szűrő fejlesztések a NIR 1-2 μm -es hullámhossz tartományra, amelyek a Siemens számára készült ipari kivitelű spektrofotométerekben (Kocsányi László) kerültek alkalmazásra.

Kiépült a BME-n a teljes kristályfeldolgozás (röntgen orientálás, szeletelés, optikai megmunkálás), vékonyrétegezés párologtatással (antireflexió) és RF porlasztással (ultrahang transzformátor), piezoelektromos ultrahangkeltő technológia 10MHz-2GHz tartományra. Létrehoztuk az akusztó-optikai rendszerek fejlesztéséhez szükséges teljes mérési (optikai és rádiófrekvenciás) eszközparkot. Barócsi Attila és Maák Pál PhD hallgatók munkájának köszönhetően jelentősen erősödtek az alkalmazott tervezési és szimulációs módszerek. A laboratórium eredményeihez jelentősen hozzájárult az MTA Kristályfizikai Kutató Intézete (ma MTA Wigner FKI) kiváló minőségű optikai anyagokkal (TeO_2 , LiNbO_3), valamint H. J. Eichler (TU Berlin) és J. P. Huignard (Thomson) folyamatos kutatási feladatokkal és laborjaikon keresztül speciális vizsgálatokkal, amelyekre közös uniós pályázatot is nyertünk (Copernicus Project, Brussels, "Micromachining Application of a New Two-Dimensional Acoustooptic Deflector" Project No: CIPA-CT94-0216, 1995-1997). Ezeknek az eredményeknek köszönhetően gyakorlatilag az akusztó-optikai elemek teljes palettáját le tudtuk fedni, minden szóba jöhető alkalmazásra készítettünk eszközt és építettünk köré valamilyen alkalmazást illetve rendszert. Ennek teljes bemutatása jelentősen meghaladná jelen téziszfüzet lehetőségeit, ezért továbbiakban csak a tézisekhez szorosan kapcsolódó néhány területre koncentrálok. 1981-től vettem részt ezekben a kutatásokban és a 90-es évek közepétől 2006-ig voltam a laboratórium vezetője.

A hagyományos, ma is elterjedt és széles körben használt fénycsövek higany tartalma világ szinten jelentős környezeti terhelést és környezetvédelmi problémát jelent. Higanymentes fluoreszcens lámpa fejlesztésben közreműködésünket Dr. Reich Lajos, a GE (General Electric -Tungsram) kutatás akkori vezetője kezdeményezte. A DBD (dielectric barrier discharge) elvű lámpák tervezése, modellezése, szimulációi a BME Atomfizika Tanszéken (Beleznai Szabolcs), a kísérleti minták készítése és a mérések végzése a GE laboratóriumaiban történt. Sokat köszönhetünk Sonkoly Aurél csapatának a meghajtó és vizsgáló-mérő elektronikák fejlesztéséért (Hibrid Áramkörfejlesztés), és Maros Istvánnak (GE) kísérleti lámpák elkészítéséért és a vizsgálatokban nyújtott segítségéért.

Az elektronikai gyártásban, szereléstechnológiában a kis alkatrész méretek, nagy alkatrész szám, az elvárt megbízhatóság valamint a hibák megelőzése, korai detektálása érdekében régóta alkalmaznak automatikus optikai vizsgáló módszereket. Tipikus példaként, ha forrasztási hely nem maradhat ellenőrizetlenül, átlagos 4 másodperces forrasztási ciklusidő és szerelőlemezenként 1000 forraszhelyet feltételezve, ez 250 darab másodperces időtartamú optikai vizsgálatot jelent, különböző formájú és méretű (esetenként tizedmilliméteres) forrasz meniszkuszokon (gömbült felületeken).

A feladatot sok kamerás (8-16 db merőleges illetve ferde kamera) rendszerekben, korábban a szerelőlemezek, manapság a kamera és megvilágító rendszer mozgatásával, mérőautomatákkal oldják meg, egyszerű szoftver képfeldolgozást és binarizálást követő döntési szintek beállításával.

A Villamosmérnöki és Informatikai Kar Elektronikai Technológia Tanszékén 2006-ban a Bosch részéről Szabó András kezdeményezésére indultak automatikus optikai vizsgálatokhoz kapcsolódó kutatások. Ezeket a Bosch eszközökkel (AOI berendezés, valamint számítógépek) és PhD ösztöndíjakkal is támogatta. A kísérleti munkákban, megvilágítás demonstrációkban (LED rendszerekkel), a videofelvételek készítésében (ipari Imaging Source megapixeles CCD színes és monokróm kamerákkal) Becker Ákos, Janóczki Mihály PhD hallgatók, valamint Berényi Richárd kollégám segített, míg a képfeldolgozási és szimulációs feladatok elvégzése Matlab környezetben elsősorban Janóczki Mihály, részben pedig Sinkovics Bálint PhD hallgató érdemeit dicséri.

2. A kutatások célkitűzései

2.1 Impulzus üzemű lézerekben akusztó-optikai Q-kapcsolókat illetve módus csatolókat széles körben alkalmaznak már a 70-es évek eleje óta. Ez egy tipikus optikai rezonátoron belüli alkalmazás, ahol a jellemző anyag, elsősorban kis optikai abszorpciója miatt a kvarc. Akusztó-optikai tulajdonságai nem túl kedvezőek, akusztó-optikai jósági tényezője, diffrakciós határfoka kicsi. Mivel a diffrakciós határfok a hullámhossz négyzetével fordítottan arányos, az anyag hosszabb (infravörös) hullámhosszakon, melyek különösen orvosi alkalmazásokban fontosak, nem, vagy csak korlátozottan alkalmazható. Nagyobb diffrakciós határfokú eszközök a 3 μm hullámhossz körüli tartományra a 80-as évek végén már rendelkezésre álltak (Ti_3AsS_4 egykristályból vagy As_2S_3 üvegből), optikai csillapításuk (abszorpciójuk), illetve az akusztikus csillapítás által korlátozott optikai apertúrájuk miatt viszont kis veszteségű rezonátorokhoz nem voltak használhatóak. (Frauchiger, Lüthy 1987, Auzel, Hubert, Meichenin 1989, J. Breguet, A. F. Umyskov, W. A. R. Luthy, I. A. Shcherbakov, H. P. Weber 1991)

Célkitűzés: TeO_2 nagy akusztó-optikai jósági tényezőjű közegből, nagy modulációs mélységű, hosszabb (2-3 μm) hullámhosszakon is elfogadható határfokú, optikai rezonátorban is alkalmazható eszköz létrehozása, használhatóságának kísérleti igazolása.

2.2 Lézernyalábok kétdimenziós pásztázását általában két, különálló akusztó-optikai fényeltérítővel, vagy egyetlen kristályon megvalósított kétdimenziós ultrahang térrel oldják meg. Mindkét megoldás esetén a második eszköz, vagy ultrahang nyaláb egy változó szögű optikai nyalábbal lép kölcsönhatásba. Ez erősen korlátozza a sávzélességet, vagyis az elérhető pásztázási szög tartományt. Hosszabb hullámhosszak esetén a jelenség fokozottan jelentkezik, ezért pl. infravörös lézer radar alkalmazásokhoz még a 90-es években is mechanikus, tükrös fényeltérítőket használtak, ami pl. helikopterre vagy repülőgépre szerelt változatban számos stabilitás és megbízhatóság problémát vet fel. Nd:YAG lézeres megmunkálás esetén pedig a tükrös megoldások nem biztosítják az egyes megmunkálási pontok közvetlen elérését. (Dizier, Ayrat, Montel, Huignard 1993)

Célkitűzés: Annak vizsgálata, hogy a TeO_2 kölcsönhatási közeg kristálytani szimmetriája felhasználásával lehetőség van-e egyetlen kristályban 1 μm vagy ennél hosszabb hullámhosszakra a mindkét irányú eltérítés megvalósítására minimum 50x50 pont optikai felbontás és 40% diffrakciós határfok mellett (lézer radar illetve mikromegmunkáló alkalmazásokra).

2.3 Gyorsan változó frekvenciájú (a véletlenszerű frekvencia váltás periódusa tipikusan 5 msec) kommunikációs rendszerekben az elektromágneses hullámok irányának és frekvenciájának meghatározása 100 %-hoz közeli találati valószínűséggel hagyományos elektronikus módszerekkel nem, vagy csak jelentős számú párhuzamos rendszerrel oldható meg. Több elemű antennasor, többcsatornás AO fényeltérítő és detektormátrix alkalmazásával radar frekvencia (1-4 GHz) tartományban a feladat megoldására elméleti javaslatokat korábban már publikáltak (Coppock, Croche 1979, Lee 1983).

Célkitűzés: Akusztó-optikai elvű rendszer kidolgozása és kísérleti vizsgálata a 100 MHz alatti RF tartományokra. Feladat a 100 KHz frekvencia és 2^0 iránypontosság elérése.

2.4 Fázisvezérelt (mechanikusan pásztázó elemeket nem tartalmazó) radar antennák esetén széles frekvencia tartományban szükség van impulzusok szabályozott (vezérelhető) időbeli késleltetésére. A probléma fáziskésleltetéssel a rövid radar impulzusok széles spektruma miatt nem megoldható, a vezérelhető elektronikus időkésleltetés megvalósítása bonyolult, párhuzamos rendszereket igényel. Ismert, hogy az impulzus spektrális felbontása, a frekvencia komponensek egyedi, kislépésekben változó késleltetése majd újraegyesítése elvileg jelentős „true-time” (időbeli) késleltetést eredményezhet (Frigyess, Seeds 1995, Tong 1998) [3.4.2].

Célkitűzés: Az elv optikai megvalósíthatóságának vizsgálata, az elérhető paraméterek meghatározása.

2.5 A jelenlegi fénycsövekben a fénypor, a fénycső falán található, a látható tartományban sugárzó fluoreszcens bevonat gerjesztésére a higany 250 nm-es UV vonalát használják. Ezért a higany minden fénycsőben, ha csak kis mennyiségben is megtalálható. Ez az egészségre ártalmas, veszélyes anyag, hosszú távon az elektronikai termékekben használata várhatóan nem tartható fenn. Ismert, hogy tisztán xenon gázkisülésben UV vonalak jó hatásfokkal gerjeszthetők dielektromosan gátolt (szigetelt) elektróda elrendezéssel. (Kogelschatz 2003, Karman, Mildren 2004)

Célkitűzés: Olyan lámpa konstrukció kidolgozása és demonstrálása, amelyben a henger szimmetrikusan végigfutó szigetelt elektródák távolsága elegendően kicsi a gyújtási feszültség mérsékelt (500-800V) tartományon belül tartása érdekében. Egyidejűleg a szerkezet a kisülés fenntartásához szükséges 10-50 nsec elektromos impulzusok fogadására legyen alkalmas, miközben a hétköznapi használathoz szükséges fénykibocsátással, kisülési térfogattal rendelkezzen, a jelenlegi fénycsövekkel versenyképes hatásfok (80-100 lm/W) megtartása, vagy meghaladása mellett.

2.6.1 A jelenleg használt NYHL méretek és a vizsgálathoz szükséges felbontás mellett az SMT folyamatok eredményének automatikus optikai vizsgálata csak sokkamerás (8-16) rendszerekben, a kamerarendszer vagy a szerelt lemez nagypontosságú, vezérelt mozgatásával oldható meg. A modern gyártósorok kapacitása az 10-20 panel/perc sebesség mellett több száz beültetett alkatrész és több ezer forrasztási és egyéb (jelenlét, pozíció pontosság, polaritás stb.) vizsgálatot igényel. A nagy mozgási távolságok (100-500 mm) és tömegek (1-50 kg) miatt a teljes vizsgálat ideje sokszor jelentősen meghaladja a gyártósor ciklusidejét, a berendezések teljes tömege pedig akár az 500 kg-ot. A sebesség problémát jelenleg a vizsgálóberendezések párhuzamosításával (egyidejűleg 2-4 berendezés végez azonos feladatokat) oldják meg. (Verhelst, Ocket 2002, Chou, Hilty 2005)

Célkitűzés: A panelek szállítására során a mozgó panelről készült megfelelő felbontású videofelvétel a sokkamerás rendszerekkel készített felvételekkel azonos információ tartalommal rendelkezik.

Célkitűzés eljárás kidolgozása és kísérleti igazolása, hogy mozgó elemek nélküli rendszerrel, a videofelvételről leválogatott képek segítségével ilyen vizsgálati feladatok megoldhatóak. Ez hosszú távon a berendezések egyszerűsödéséhez, a vizsgálathoz szükséges idő csökkenéséhez vezethet.

2.6.2 Az optikai vizsgálat elektronikai iparban jelenleg elvárt megbízhatóságát jól jellemzi, hogy a megengedett pszeudo (ál) hibák a 100 ppm, az átcsúszások (fel nem ismert hibák) a 10 ppm nagyságrendjébe kell eszenek. A mérés megbízhatóságát alapvetően meghatározó megvilágítás beállítás viszont szemrevételezéssel és próbálkozással (persze jelentős hardver és szoftver támogatással), de egyedileg történik. (Chiu, Perng 2007, Lu, Zhang, Kuang 2007)

Célkitűzés: A vizsgálandó szerelt panelek és a vizsgálathoz tartozó megvilágítások virtuális modelljének létrehozásával automatikus eljárás kidolgozása és annak kísérleti igazolása, hogy a legnagyobb megbízhatóságot adó beállítások így módon meghatározhatóak.

3. Új tudományos eredmények - Tézisek

3.1 Akusztó-optikai módus csatoló

Bizonyítottam, hogy a TeO_2 kölcsönhatási közegű, nagyhatásfokú akusztó-optikai Q kapcsolók a 2-3 μm infravörös hullámhossz tartományban működő lézerrezonátorokban alkalmazhatóak. Ebben a hullámhossz sávban a sugárzást már a víz elnyeli, ezért ezek a lézerek bőrgyógyászati beavatkozásokra előnyösek.

Az akusztó-optikai eszközök diffrakciós hatásfoka az optikai hullámhossz négyzetével fordítottan arányos, vagyis a növekvő hullámhosszak felé erősen csökken. Hosszabb hullámhosszokon a TeO_2 kölcsönhatási közeg a rezonátor Q kapcsolásához elegendő diffrakciós hatásfokot teljesít, ezért hiányt pótol a 2-3 μm hullámhossz tartományban működő lézer alkalmazásokhoz. [3.1.1], [3.1.2]

3.2 Monoblokk 2D akusztó-optikai fényteltérítő

Megmutattam, hogy a két-dimenziós, egycellás diffrakció szögfeltétele anizotróp kristályban a közeli infravörös tartományban is teljesíthető. Igazoltam, hogy az elérhető pásztázási szögtartomány szempontjából a működési frekvencia tartomány pontos megválasztása a meghatározó. Megvalósítottam TeO_2 kölcsönhatási közegű monoblokk 2D fényteltérítőt 1 μm hullámhosszra. Nd:YAG rendszerben teszteltem. Bizonyítottam, hogy $\geq 50 \times 50$ pont felbontás és $\geq 40\%$ maximális hatásfok elérhető [3.2.1].

3.3 Akusztó-optikai rádiófrekvenciás iránymérő berendezés

Kidolgoztam és megvalósítottam a 30-90 MHz tartományban működő új, akusztó-optikai elvű RF irány és frekvenciamérő berendezést. Terepmérésekkel végzett kalibrációval igazoltam, hogy merőleges antennasorok felhasználásával a rendszer 360 fok tartományban 2-3 fok pontossággal alkalmas RF hullámok irányának egyértelmű meghatározására. [3.3.1], [3.3.2].

3.4 „True-time” akusztó-optikai késleltető vonal

Új optikai elrendezést dolgoztam ki RF impulzusok frekvencia független („true-time”), az úthossz-diszperzió elvén alapuló késleltetésére akusztó-optikai Bragg cella alkalmazásával. A rendszer

alkalmasságát mérésekkel bizonyítottam. Néhányszor 100 nm fényútkülönbséggel akár 1 μ s időbeli késleltetés érhető el impulzus kiszélesedés nélkül. [3.4.1]

3.5 DBD fluoreszcens fényforrás

Kidolgoztam új, xenon gázkisülést tartalmazó, higanymentes, belső elektródás DBD (dielectric barrier discharge) elvű fluoreszcens fényforrás konstrukciót [3.5.1] és közreműködtem annak működést igazoló megvalósításában. A fényforrással 60 lm/W hatásosság érhető el, bemelegedési jelenségek nélkül [3.5.2].

3.6 Automatikus optikai vizsgáló berendezés

3.6.1 Felismertem, hogy NYHL-nek (nyomtatott huzalozású lemez) az SMT (felületszerelési) folyamatok közötti mozgatása során készített videofelvételeiből az optikai vizsgálathoz szükséges képek leválogathatóak és analízálhatóak, vagyis speciális (kamera vagy NYHL) mozgató rendszert nem tartalmazó vizsgáló automata is készíthető. Közreműködtem ilyen elven működő rendszer megvalósításában, működőképességének igazoltásban PIN (csatlakozó tűske) és BGA (ball grid array) forraszpasztta gyors és automatikus vizsgálatára. [3.6.1.1]

3.6.2 Felismertem, hogy automatikus optikai vizsgáló rendszerekben az elektronikai alkatrészek virtuális modelljének létrehozásával az adott vizsgáló algoritmus megbízhatósága a megvilágítás paraméterek automatikus meghatározása útján jelentősen javítható. A módszerrel az általánosan használt vizsgáló algoritmusok átcsúszásarányát sikerült csökkenteni. [3.6.2.1]

4. Az eredmények hasznosulása

3.1 Tézis - A TeO₂ akusztó-optikai Q-kapcsolók az infravörös tartományban működő impulzus-üzemű lézerekben előnyösek. Ezeknek elsősorban orvosi, bőrgyógyászati alkalmazásaik ismertek.

3.2 Tézis - A kutatómunka folytatásként az eszköz Nd:YAG lézeres alkalmazásának vizsgálata [3.2.2], valamint a kétdimenziós akusztó-optikai diffrakciós jelenség teljes körű leírása [3.2.3] terén születtek további eredmények.

3.3 Tézis - A kifejlesztett rendszer a 100 MHz alatti tartományban egyidejű irány és frekvencia meghatározó képességével teljesen egyedül álló. Ez, akárcsak egy korábbi, spektrumanalizátor változata alkalmas informatikai szempontból biztonságos, ugráló frekvenciájú (ezért nehezen bemérhető és nem lehallgatható) kommunikációs rendszerek elemeinek tesztelésére.

3.4 Tézis - A kutatás folytatásként, az optikai rendszer részletes elméleti és kísérleti analízise [3.4.3], továbbfejlesztése elektronikusan vezérelhető úthosszkülönbség, vagyis LCD térbeli fénymodulátor [3.4.4], valamint elektrooptikai fázismodulátor alkalmazásával [3.4.5] területeken születtek további eredmények.

3.5 Tézis - A kutatás jelenleg elsősorban UV fényforrás fejlesztés irányában folyik. A meghajtó elektromos jel alakjának megfelelő megválasztásával jelentős fényforráshatásfok-növekedést sikerült elérni. [3.5.3]

3.6 Tézisek - A kutatás eredményei elektronikai gyártó partnerek AOI rendszereiben hasznosultak. A gyors képkiértékelés támogatására új forraszpaszta kráteresedés felismerő algoritmus is kidolgozásra került [3.6.1.2]

5. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

A 3.1 tézishez kapcsolódó publikációk:

[3.1.1] H. J. Eichler, J. Albertz, F. Below, A. Kummrow, T. Leittert, A. A. Kaminski , **L. Jakab**, " Acousto-optic mode locking of 3- μ m Er lasers", Applied Optics, Vol. 31, No. 24, 20 August (1992) pp.4909-4911, **IF: 1,064, Független idéző: 6**

[3.1.2] P. Maak, **L. Jakab**, P. Richter, H.J. Eichler, B. Liu: "Efficient Acousto-Optic Q-Switching of Er:YSGG Lasers at 2.79 μ m Wavelength", Applied Optics 39 (18) pp. 3053-3059 (2000), **IF: 1,359 Független idéző: 16**

A 3.2 tézisponthoz kapcsolódó publikáció

[3.2.1] A. Barocsi, **L. Jakab**, I. Verhas, P. Richter, " Two-dimensional acoustooptic light diffraction and its applications ", Journal Integrated Computer Aided Engineering, 3 (2) 108-116, John Wiley & Sons, Inc (1996) **Független idéző: 4**

A 3.3 tézisponthoz kapcsolódó publikációk

[3.3.1] **L. Jakab**, P. Richter, I. Szonyi, "Five channel AO DOA processor for RF applications" Proc. SPIE, Vol. 1704. (1992) pp.153-157, **Független idéző: 2**

[3.3.2] **L. Jakab**, A. Barocsi, P. Richter, I. Szonyi, T. Rath, "Test measurement and calibration problems of a direction finding system based on a five channel DOA processor", Proc. SPIE Vol. 2240, (1994) pp. 43-49, **Független idéző: 1**

A 3.4 tézisponthoz kapcsolódó publikáció

[3.4.1] Maak P, Remenyi J, **Jakab L**, Richter P, Frigyes I, Habermayer S, True time delay line for short pulses based on optical path-length dispersion: experimental proof of functioning, In: 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology. Dana Point, Amerikai Egyesült Államok, 2000.05.21-2000.05.25. IEEE, pp. 449-452.(ISBN: 0-7803-6345-0), **Független idéző: 2**

A 3.5 tézisponthoz kapcsolódó publikációk

[3.5.1] Reich L, Belezna Sz, Richter P, Agod A, **Jakab L**, Dielectric Barrier Discharge Lamp, Benyújtás helye: Egyesült Államok, Megadva: 2008, Lajstromszám: US 7,446,447 B2 , Benyújtás helye: Egyesült Királyság, Megadva: 2009, Lajstromszám: EP 1615258 B1

[3.5.2] Belezna S, Mihajlik G, Agod A, Maros I, Juhasz, Nemeth Z, **Jakab L**, Richter P, High-efficiency dielectric barrier Xe discharge lamp: theoretical and experimental investigations, JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS Volume: 39 Issue: 17 Pages: 3777-3787, 2006, **IF: 2,077 Független idéző: 30**

A 3.6.1 tézisponthoz kapcsolódó publikáció

[3.6.1.1] Becker A, **Jakab L**, Optical Examination of Pin Insertion Process, PERIODICA POLYTECHNICA-ELECTRICAL ENGINEERING 53:(1-2) pp. 85-89. (2009)

A 3.6.2 tézisponthoz kapcsolódó publikáció

[3.6.2.1] M Janóczki, A Borbíró, S Nagy, **L Jakab**, Illumination Optimization for Quasi-Tombstone Detection, MICRO AND NANOSYSTEMS 2:(3) pp. 149-162. Paper 1876-4029/10. (2010),

6. Köszönetnyilvánítás

Egy rövid felsorolás azokról, akik nélkül az itt ismertetett eredmények nem jöhettek volna létre:

Szeretném megköszönni támogatását és segítségét korábbi tudományos témavezetőimnek Dr. Giber Jánosnak és Dr. Richter Péternek. PhD hallgatóimnak Dr. Barócsi Attilának, Dr. Maák Pálnak, Dr. Janóczki Mihálynak és Becker Ákosnak. Köszönöm nemzetközi és hazai tudományos és ipari együttműködő partnereink vezetőinek, Szőnyi Istvánnak, Dr. Ráth Tamásnak (MK KFH), Dr. Reich Lajosnak (GE), Szabó Andrásnak (Bosch), Dr. Hans-Joachim Eichlernek (TU-Berlin) és Dr. Jean-Pierre Huignardnak (Thomson) kitartó biztatását és támogatását. Egyetemi és kutató intézeti oldalról jelentős szakmai támogatást kaptam Dr. Földvári István és Dr. Péter Ágnes (SZFKI), Dr. Frigyes István (BME VIK, SZHVT), Dr. Reményi Judit (BME TTK AFT) és Dr. Beleznai Szabolcs (BME TTK AFT) részéről.

Köszönettel tartozom a BME TTK Atomfizika Tanszék, valamint a BME VIK Elektronikai Technológia Tanszék valamennyi munkatársának, és nem utolsósorban Dr. Harsányi Gábornak, jelenlegi munkahelyem, az Elektronikai Technológia Tanszék vezetőjének.

7. A munkához kapcsolódó egyéb publikációk

[3.2.2] Maák, P., **Jakab, L.**, Richter, P. I., Brignon, A., Huignard, J-P. "Combination of a 2-D Acousto-Optic deflector With Laser Amplifier for Efficient Scanning of a Q-Switched Nd:YAG Laser", Optics Communications, Vol. 176. pp. 163-169 (2000), **IF: 1,185, Független idéző: 2**

[3.2.3] Pál Maák, **László Jakab**, Attila Barócsi, Péter Richter: "Improved Design Method for Acousto-Optic Light Deflectors" Optics Communications Vol. 172, pp. 297-324 (1999) **IF 1.352, Független idéző: 13**

[3.4.2.] I. Frigyes, A. J. Seeds: "Optically generated true-time delay in phased-array antennas" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 43, (1995) 2378–2386

[3.4.3] Pál Maák, István Frigyes, **László Jakab**, István Habermayer, Mihály Gyukics, Péter Richter: "Realization of true-time delay lines based on acoustooptics", IEEE J. of Lightwave Technol. Vol. 20. No. 4. pp. 730-739 (2002), **IF: 1,791 Független idéző: 12**

[3.4.4] Judit Reményi, Pál Maák, István Frigyes, **László Jakab**, Péter Richter, "Demonstration of continuously variable true-time delay in frequency dependent phase compensating system with acousto-optics and liquid crystal modulator", Optics Communications 226. pp. 211-220 (2003), **IF: 1,482 Független idéző: 4**

[3.4.5] Maak P, Gorocs Z, Frigyes I, **Jakab L**, Richter P, Continuously variable pulse true-time delay system incorporating an acousto-optic, Bragg cell and an electro-optic modulator, OPTICAL ENGINEERING 43:(5) pp. 1238-1243. (2004), **IF: 0,952**

[3.5.3] Beleznai S, Mihajlik G, Maros I, Balazs L, Richter P, Improving the efficiency of a fluorescent Xe dielectric barrier light source using short pulse excitation, JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS 41:(11) Paper 115202. (2008) **IF: 2,104 Független idéző: 16**

[3.6.1.2] Benedek Cs, Krammer O, Janóczki M, **Jakab L**, Solder Paste Scooping Detection by Multi-Level Visual Inspection of Printed Circuit Boards, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS PP:(99) pp. 1-14. (2012), **IF: 5,160**

[3.6.2.2] M. Janóczki, Á. Becker, R. Gróf, T. Takács, **L. Jakab**, Automatic Optical Inspection of Soldering, In: Dr. Yitzhak Mastai (szerk.), Materials Science, InTech Open Access Publisher, 2013. ISBN 980-953-307-918-4

[3.6.2.3] Janóczky Mihály, Új röntgenes és optikai hibadetektáló elektronikai gyártástámogatási technológiák, PhD dolgozat (2012)