



POLIIMIDEK LÉZERES ABLÁCIÓJÁNAK TECHNOLÓGIÁJA

PHD TÉZISFÜZET

Gordon Péter

Tanszékvezető: Dr. Harsányi Gábor egyetemi tanár

Doktorandusz témavezető: Dr. Illyefalvi-Vitéz Zsolt egyetemi docens

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Elektronikai Technológia Tanszék

2008

A kutatások előzménye

Az elektronikai termékek előállításában is évről évre jelennek meg azok az új technológiák, amelyek a lézeres megmunkálás előnyeit és lehetőségeit integrálják. A lézeres direktlevilágítás és a lézeres fúrás napjainkban már a hagyományos technológiák közé tartozik, csakúgy, mint például a vonalkódok vagy a mátrixkódok gravírozása. Ha egy üzem lézeres technológiát kíván bevezetni, számos gyártó termékpalettájáról választhat készüléket.

A lézerek folyamatos előretörése mindaddig kísérte az általános készülék- és alkatrész-méretcsökkentési trendeket, amíg a kialakítandó struktúrák mérete el nem érte a lézernyaláb fókuszátmérőjének, azaz a megmunkáló „szerszám” méretének nagyságrendjét. Amellett, hogy a lézerek továbbra is utat törnek maguknak számos technológiai lépés kiváltásával vagy akár újak születésével, mégis egyes anyagok megmunkálásában, vagy bizonyos, már az 5-10 µm nagyságrendjébe eső méretű struktúrák kialakításában az ipari megmunkáló lézerek használata akadályokba ütközhet. Ennek egyik oka egyrészt, hogy a munkadarab különböző, mintázattal rendelkező anyagrétegekből épül fel, amelyek mind másfajta módon lépnek kölcsönhatásba a lézersugárral, továbbá nem hagyható figyelmen kívül az sem, hogy a lézeres megmunkálás során érintett térfogatban az anyagok viselkedése megváltozik.

A jelenleg piacon levő lézeres megmunkáló berendezések nincsenek felkészítve arra, hogy figyelembe vegyék a fent említett két szempontot és ez komoly akadálya annak, hogy a lézerekkel olyan alkalmazásokat fejleszthessünk ki, amelyek a tömeggyártásban jelenleg elképzelhetetlenek. A továbblépést akadályozza az is, hogy a több évtizedes kutatások ellenére sem ismerjük még a lézer-anyag kölcsönhatás számos mechanizmusát és az anyagok tulajdonságainak megváltozásáról sincs még teljes képünk.

Kutatómunkámban a hajlékony áramköri hordozók egyik leggyakrabban alkalmazott alapanyagát, a poliiimidet vetettem vizsgálat alá, elsősorban azzal a céllal, hogy megismerjem kölcsönhatásának jellegét az UV Nd:YAG lézerrel és ennek alapján egy fenomenologikus megközelítésű modellt hozzak létre.

A poliiimidek lézeres ablációját (azaz gyakorlatilag az anyag eltávolítását néhány négyzet-mikrométertől néhány négyzetmilliméteres felületen, néhány mikrométer mélységben) több mint 25 éve vizsgálják a téma kutatói, eredményeiket azonban elsősorban az excimer lézerekforrásból nyert impulzusokkal érték el. Az utóbbi tíz évben kerültek az alkalmazástechnikai kutatólaborokba az UV Nd:YAG lézerek, amelyek – ugyancsak az ultrabolya sugárzásuknak köszönhetően – alkalmasak poliiimidek megmunkálására. Az UV Nd:YAG lézerek és az excimer lézerek nyalábja között több jelentős különbséget találunk, és ezek befolyásolják az anyageltávolítás mechanizmusát is. Az UV Nd:YAG lézerek nyalábjának Gauss-profilú energia-eloszlása, és az akár 100.000 Hz fölötti impulzusismétlési frekvenciája több előnyt is ígér a megmunkálás szempontjából az excimer lézerek többnyire homogenizált

energia-eloszlású, néhány kilohertz-es frekvenciájához képest. Ilyen előny a nagyobb felbontás, a gyorsabb és rugalmasabb megmunkálás lehetősége bizonyos alkalmazásokban. Mindezek ellenére még ma is aránylag csekély kutatói figyelem összpontosul ezekre a lézerforrásokra.

A szakirodalomban bemutatott kutatások nagy része az abláció alapvető mechanizmusainak és a lejátszódó fizikai és kémiai folyamatoknak a megértését célozza. Az én kutatásaimat alapvetően konkrét ipari projektek által felvetett kérdések indították el, mivel a szakirodalomban fellelhető eredmények és modellek nem bizonyultak alkalmazhatónak adott rétegszerkezetű, hajlékony áramköri hordozók UV Nd:YAG lézeres megmunkálása esetén.

Saját modell létrehozásával tudtam csak figyelembe venni olyan tényezőket, amelyek elhanyagolása túl nagy kompromisszumot jelentett volna az ablálandó térfogatok becslésénél. Az excimer lézereknél alkalmazott modellek – a besugárzottság (energia/felületegység) homogén kezelésével – nem alkalmasak egy Gauss-profilú nyaláb hatásának számítására. A szakirodalomban leírt modellek elkészítését más cél motiválta, így nincsenek felkészítve több, egymást követő impulzus hatásának figyelembe vételére sem.

Hasonló okok miatt az UV Nd:YAG lézeres szakirodalmi eredményeknek is csak egy részét építhettem be a munkámba. Ezeknél sem jellemző ugyanis a nyaláb Gauss-profiljának figyelembe vétele és a modellek itt is csak az első impulzus hatását vizsgálják.

Célkitűzés

A kutatómunkám célja, hogy eredményein keresztül egy olyan modell születését segítse elő és annak érvényességét igazolja, amely lehetővé teszi bizonyos anyagok körében a lézeres strukturálás akár impulzusról impulzusra történő megtervezését, figyelembe véve a megmunkálandó rétegszerkezetet és az abban lejátszódó folyamatokat. A modell alapján egy olyan szimulációs eszköz fejlesztésére nyílik lehetőség, amely az egyes gyártmányok gyártási dokumentációi alapján előállítja a lézeres megmunkálás terveit.

Saját modell alkotását az előzményekben felsorolt okokon kívül az is motiválta, hogy a szakirodalom tanulmányozása során nem talákoztam olyan jellegű kutatásokkal, amelyek figyelembe vették volna a hajlékony hordozók áramköri vezetőmintázatának hatását a poliimid megmunkálására.

A modell feladata annak megválaszolása, hogy adott energiájú lézerimpulzusokkal milyen mennyiségű anyagot tudunk eltávolítani a poliimidből, figyelembe véve az anyaghoz kapcsolódó, áramköri mintázattal rendelkező rézréteget és a megmunkálás folyamán az anyagban felgyülemlött hő eloszlását.

Az anyagban az egymást követő impulzusok hatására hő akkumulálódik és a nagyobb hőmérséklet megváltoztathatja a lézer-anyag kölcsönhatást. A rétegszerkezet elsősorban a hővezetésen keresztül képes befolyásolni a lézeres megmunkálást. Így a poliimidhez

kapcsolódó rézréteg – a hő terjedésének megváltoztatásával – közvetetten az impulzusonként ablált anyagmennyiség megváltozásához – esetemben csökkenéséhez – vezet. Mivel a szakirodalomban a rézréteg áramköri mintázatának figyelembe vétele nem jellemző, ezért a dolgozat egyik célja, hogy a hatás jelentőségét felmérje és bizonyítsa.

Az impulzusonként eltávolított anyagmennyiség kiszámításában kulcsszerepe van az ablációs küszöb ismeretének, amelyet a szakirodalom a besugárzottsággal fejez ki. Az ablációs küszöbbsugárzottság hőmérsékletfüggését azonban nem értelmezik, így az akumulálódott hő hatása ilyen módon nem vehető figyelembe. Modellemben azt a célt tűztem ki, hogy az abláció küszöbértékét a hőmérséklettel tudjam kifejezni, amely ugyanúgy anyagra és a megmunkálás körülményeire jellemző paraméter, mint a küszöbbsugárzottság. Ezzel elérhető, hogy a lézeres anyagmegmunkálás fő folyamatait (elnyelés és hővé alakulás, abláció, hővezetés) egységesen, a hőenergia, illetve a hőmérséklet segítségével írjam le. A lézer impulzusenergiáját a modellemben *hőmérsékletnövekménnyé* alakítom, a *hőmérséklet* alapján döntöm el, hogy az anyagnak mely része tekinthető ablálnak, és a *hővezetéssel* veszem figyelembe a rétegszerkezetet és az áramköri vezetõmintázatot.

Ahhoz, hogy impulzusról impulzusra meg tudjam határozni a lézerimpulzus által eltávolított anyagmennyiséget, a következő feladatok megoldását tűztem ki célul:

- a lézerimpulzus energiáját az anyagban hőmérsékletnövekménnyé kell alakítani olyan módon, hogy figyelembe veszem a nyaláb Gauss-profilú energia-eloszlását, a lézerimpulzus anyagba csatolódása közben felmerülő összes veszteségét (ezt fejezi ki a bevezetett becsatolási hatásfok faktor, CEF), az elnyelés exponenciális helyfüggését leíró Lambert-Beer törvényt, továbbá az anyagba csatolódott energia hőenergiává alakulásának összes veszteségét (ezt fejezi ki a bevezetett transzformációs hatásfok faktor, TEF).
- definiálni és értelmezni kell az ablációs küszöbhőmérséklet fogalmát, és módszert kell kidolgozni ennek meghatározására adott anyag és adott megmunkálási környezet esetén.
- a modell alapján létrehozott szimulációs eszközzel be kell mutatni, hogy a modell alapfeltevései helyesek és a szimulált anyagmegmunkálás eredményeként az anyagban keletkezett struktúrák megegyeznek a valóságban elkészített struktúrákkal.

Vizsgálati módszerek

Az értekezésben leírt kutatásaimat elsősorban egy Coherent AVIA 355-4500 típusú, 355 nm hullámhosszúságú UV Nd:YAG lézerrel végeztem, amelynek sugarát egy Raylase Razorscan pásztázó-fejjel térítettem el, továbbá a minta mozgatását egy 1 µm-es pontosságú X-Y asztallal oldottam meg. A nyaláb irányítására és fókuszálására használt optikai elemek által meghatározott legkisebb fókuszfolt átmérő 30 µm. A lézer legnagyobb impulzusenergiája kb. 200 µJ.

Vizsgálataimat az elektronikai technológiában egyik leggyakrabban alkalmazott hajlékony áramköri hordozó alapanyagon, a poliimiden végeztem el, az alábbi három gyártmányra koncentrálva: Kapton® HN (Du Pont Inc.), Upilex® S (Ube Industries Inc.), Apical® NP (Kaneka Texas Corp.). Ezeknek az anyagoknak a sajátossága, hogy szilárd halmazállapotukat legalább 500°C-ig megőrzik, fölötte szublimálnak.

A 355 nm-es lézernyaláb és a poliimid kölcsönhatására jellemző, hogy az ablációs folyamat elsősorban a hőhatáson alapul, a fotokémiai (kötések bontásán alapuló) bomlás részaránya nem jelentős. A sugárzás exponenciális elnyelése miatt az impulzusonként keletkezett kráter mélysége néhány mikrométer.

A kísérletek végzése során a lézerforrás különböző beállításai mellett végeztem anyageltávolítási kísérleteket. Ezek közül kiemelem az impulzusonként eltávolított anyag mennyiségének (azaz az ablációs rátának) a meghatározási módját. Ennek a szakirodalomban publikált eljárásai (pl. egy lézerimpulzus „lenyomatának” atomerő mikroszkópos vizsgálta, mikromérleges tömegvesztéségi vizsgálat) nem voltak alkalmasak a modellem számára, mivel az így kapott érték bizonyosan nem érvényes a további, már nem érintetlen térfogatba jutó impulzusokra. Ezért munkámban az ismert vastagságú fólia teljes átlukasztásához szükséges impulzusszámból határoztam meg az átlagos ablációs rátát. Az eljárás további előnye, hogy a szükséges méréseket optikai mikroszkóppal (500-1000-szeres nagyítás mellett) el lehetett végezni.

Az ablációs ráta mérését különböző hordozóhőmérsékletek mellett is elvégeztem. Ehhez speciális, melegítésre és hűtésre alkalmas tárgyasztalokra volt szükség. Ezek konstruálásának fő szempontjai között volt, hogy a mintát a tárgyasztal felületéhez lehessen szorítani, egyrészt a fókuszált nyaláb mélységélessége (<100 µm), másrészt a hőcsatolás megteremtése miatt. További szempont volt a poliimid fólia felületi hőmérsékletének mérhetősége. A létrehozott tárgyasztalokkal a fóliát 220°C-ig melegítettem fel, illetve -178°C-ra hűtöttem le a mérésekhez.

A kutatás során a lézerparaméterek olyan kombinációit alkalmaztam a kísérletek elvégzésére, amelyek ipari technológiában is előfordulnak.

Új tudományos eredmények

1. TÉZIS: Felismertem és kísérletileg igazoltam, hogy a poliimid alapú hajlékony áramköri hordozók dielektrikum rétegének 355 nm-es hullámhosszú, impulzus üzemmódú, UV Nd:YAG lézeres strukturálása során nem hanyagolható el a rézréteg áramköri mintázatának hatása, ezért a megmunkálás folyamán akumulálódott hő és annak terjedését figyelembe kell venni az ablált anyagmennyiség meghatározása során az egyes lézerimpulzusok között. (125 μm -es vastagságú Upilex® S alapú hordozó esetén az összefüggő rézréteg hatására akár 6-8 μm -rel kisebb vastagságú poliimidet távolít el a lézer a rézréteg nélküli felületekhez képest.) Mivel ezen a hullámhosszon a lézer a rézréteget is képes ablálni, ezért a réz forrasztási felületeket vagy vezetékeket – amelyek a teli rézréteghez képest nagyobb hőellenállással kapcsolódnak a környezetükhöz – a bevitt energia eldeformálhatja vagy teljesen el is távolíthatja.

A tézishoz kapcsolódó közlemények: L3, L4, R5, R6, R7, R8, R9, R10

2. TÉZIS: Kidolgoztam egy termikus ablációs modellt poliimid alapú hajlékony áramköri hordozók UV Nd:YAG lézeres megmunkálására, amely alapján lézerimpulzusonként becsülhetővé válik az eltávolított anyag mennyisége, figyelembe véve az anyagban akumulálódott hő és a hordozó rétegszerkezetét. Ennek lényege, hogy a napjainkig használatos „trial-and-error” jellegű technológia-optimalizálás helyett számíthatóvá válnak a szükséges technológiai paraméterek az áramköri mintázat alapján és így nagyobb felbontás elérésére nyílik lehetőség. Bevezettem az impulzusenergia anyagba csatolódási határfokát és a becsatolt energia hőmérsékletnövekménnyé alakulási határfokát kifejező CEF és TEF faktorokat, továbbá ezek szorzatát, a kísérleti módszerrel meghatározható ETF faktort. Ezek felhasználásával egyszerű összefüggést találtam az impulzusenergia és az anyagban létrejövő hőmérsékletemelkedés között. Ennek alapján az anyag bármely pontjában számítható a hőmérsékletemelkedés, figyelembe véve a nyaláb Gauss-eloszlását is.

A tézishoz kapcsolódó közlemények: L1, L2, R3, R4, R5

3. TÉZIS: Bevezettem és értelmeztem az ablációs hőmérsékletküszöb (T_{th}) fogalmát, amely definíció szerint az a legmagasabb hőmérséklet, amelynél az anyag még nem távozott el.

Az excimer lézerek homogén nyalábjára értelmezett ablációs besugárzottsági küszöb (F_{th}) helyett bevezettem a kísérletileg meghatározható ablációs impulzusenergia-küszöb (E_{th}) fogalmát Gauss-eloszlású nyaláb esetén. Bemutattam, hogy az impulzusenergia-küszöb (E_{th}) a besugárzottsági küszöbhez (F_{th}) hasonlóan alkalmas az abláció küszöbértékének kifejezésére és az ablációs ráta számítására.

Az ablációs impulzusenergia-küszöb (E_{th}) alapján – alapegyenletekből kiindulva – levezettem az anyagban elméletileg lehetséges maximális hőmérsékletemelkedés meghatározásának összefüggését. Felismertem, hogy a maximális hőmérsékletemelkedés és a hordozó

alaphőmérsékletének összege adja meg a bevezetett ablációs küszöbhőmérséklet (T_{th}) értékét.

Meghatároztam Upilex® S alapú hordozó esetén az ablációs impulzusenergia-küszöb értékét (E_{th}), 25°C hordozó-hőmérséklet és 50 kHz impulzusismétlési frekvencia mellett, 355 nm-es hullámhosszúságú, 30 ns impulzushosszúságú, 30 μm fókuszátmérőjű, diódapumpált, Q-kapcsolt UV Nd:YAG lézer használata esetén. Az ablációs impulzusenergia küszöb értéke (E_{th}) 1.75 μJ . Meghatároztam továbbá az anyagra és a megmunkálás körülményeire jellemző effektív abszorpció értékét, melynek értéke $1,4 \mu\text{m}^{-1}$.

A tézishoz kapcsolódó közlemények: L1, L2, R1, R3, R4, R5

4. TÉZIS: Módszert dolgoztam ki az ablációs küszöbhőmérséklet (T_{th}) kísérleti meghatározására. Ennek lényege, hogy a vizsgált poliidre jellemző, legalább három különböző hőmérsékleten (a hordozó teljes átlukasztásához szükséges impulzusszámból számított ablációs ráta értékek alapján) meghatározott ablációs impulzusenergia-küszöböknek (E_{th}) a levezetett összefüggésekbe való behelyettesítésével kiszámítható az ablációs küszöbhőmérséklet (T_{th}) és az impulzusenergia hőmérsékletnövekménnyé alakulásának határfokát kifejező ETF faktor.

A módszer alapján meghatároztam a Upilex® S poliidre jellemző ETF értéket ($20\% \pm 1\%$) és a keresett ablációs küszöbhőmérsékleti értéket ($647^\circ\text{C} \pm 26^\circ\text{C}$), amely jó egyezést mutat a szakirodalomban megtalálható, hasonló értelmű, analitikai úton meghatározott értékkel.

A tézishoz kapcsolódó közlemények: L1, L2, R1, R3, R4, R5

5. TÉZIS: Az ablációs modell és a hőterjedés egyenletei alapján létrehozott, poliid fóliákban lyukasztásos módszerrel előállított furatok kialakulásának szimulálására létrehozott programmal bemutattam, hogy a modell alkalmas az impulzusonként eltávolított térfogat, és a lyukasztáshoz szükséges impulzusszám meghatározására, ezzel a technológia optimalizálására. 50 μm vastagságú Kapton® HN poliid esetén a szimuláció eredményeként kapott furat-keresztmetszeti profilok és a kísérlettel előállított keresztmetszeti profilok mélysége között 3 μm -en belüli megfelelıhetőség igazolható a profilok mélységét vizsgálva.

Bemutattam a modell érzékenységét két fı paraméterének, az ablációs küszöbhőmérsékletnek (T_{th}) és az ETF-nek a változtatására. Ezek szerint T_{th} meghatározása 50°C -on belüli pontossággal legfeljebb 0,03 μm hibát okoz az ablációs ráta becslésében, ETF értékének meghatározása 2%-on belüli pontossággal legfeljebb 0,06 μm hibát okoz az ablációs ráta becslésében.

A tézishoz kapcsolódó közlemények: L1, L2, R2, R3, R4

Az eredmények hasznosítása – további kutatási feladatok

A kutatás eredménye egy modell, amely a lézer impulzusenergiájából kiindulva leírja az anyagban keletkező hőmérsékletnövekményt, kijelöli az ablált térfogatot és a hővezetés bevonásával kezeli a hőakkumulációt és a rétegszerkezetet. A kutatás során ugyancsak meghatároztam azokat az anyagi paramétereket, amelyek a modell bemeneteként a kiválasztott anyagot jellemzik.

Az ismertett eredmények felhasználási célja az iparban alkalmazott lézeres gyártóberendezésekbe való integrálás. A struktúrák lézeres kialakításához impulzusról impulzusra tervezhető gyártóprogramot kell előállítani, figyelembe véve a munkadarab ismert rétegszerkezetét és a vezetőréteg mintázatát.

Az ismertett modell és paramétereinek hasznosulásához tehát egy olyan szimulációs programra van szükség, amely a modell egyenletei alapján kezeli az energia anyagba csatolását, az impulzusonként ablált térfogatok eltávolítását és a hőterjedés általános mechanizmusait. A feladat nehézsége, hogy mindezt három dimenzióban és legalább az energia becsatolásának környezetében minimum 50 nm-es rácsozottsággal kell szimulálni, akár néhány milliméterszer néhány milliméteres felületű és 25-150 μm vastagságú anyagot vizsgálva.

A feladat megoldása a BME-ETT-n folyamatban van, olyan szimuláció-technikai megoldásokkal, amelyek a fent említett méretű térfogat vizsgálatát kezelhetővé teszik. Ezek között említhető például az adaptív módon változó felbontású rács.

A kutatás során nyert eredmények alkalmazhatóságát más, az elektronikai technológiában alkalmazott lézerek és polimerek esetén is meg kell vizsgálni. Ilyen lehet például a merev vagy hajlékony nyomtatott huzalozású lemezek forrasztásgátló rétegének lézeres megmunkálása, ezt ugyanis ma elterjedten alkalmazzák adatmátrix kódok gravírozására. Ennek technológiája azonban folyamatos feladatot ad a mérnököknek a megbízhatósági problémák miatt, aminek oka, hogy a rendelkezésre álló hely csökkenésével a mátrixkód cellamérete ugyancsak a megmunkálás felbontásának határára kerül, és ezt tetézi a megmunkálendő rétegek akár tételenként változó minősége, vastagsága is.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

Lektorált publikációk:

- L1. **Gordon P.**, Sinkovics B., Illyefalvi-Vitéz Zs.: Analysis of 355 nm Nd:YAG Laser Interaction with Patterned Flexible Circuit Substrates, Periodica Polytechnica-Electrical Engineering, In Press, 2008
- L2. **Gordon P.**, Balogh B., Sinkovics B.: Thermal simulation of UV laser ablation of polyimide, Microelectronics Reliability (47), 2006. május, pp. 347-353
- L3. **Gordon P.**, Balogh B.: Parameter control of laser beams in function of the pattern of multilayer structures, Híradástechnika, 2004. június, pp. 32-36 (*a 2004. januárjában megjelent, magyar nyelvű cikk angol nyelvű változata, meghívás alapján*)
- L4. Balogh B., **Gordon P.**: Lézersugár paraméterszabályozása többrétegű struktúrák mintázatának függvényében, Híradástechnika, 2004. január, pp. 43-46

Referált publikációk:

- R1. Balogh B., **Gordon P.**, Sinkovics B.: Description of 355 nm Laser Ablation of Polyimide as a Thermal Process, ESTC-2006, 1st Electronics Systemintegration Technology Conference, Drezda, 2006. szeptember, pp. 360-364
- R2. **Gordon P.**, Balogh B., Sinkovics B.: Investigation and Simulation Methods of Polymer Ablation by UV Nd:YAG laser, 4th European Microelectronics and Packaging Symposium, Terme Catez, Slovenia, 2006. május, pp. 375-380
- R3. **Gordon P.**, Balogh B., Sinkovics B.: Thermal Simulation of UV Laser Ablation of Polyimide, 5th International IEEE Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics, Wroclaw, Poland, 2005. október, pp. 128-132
- R4. Balogh B., **Gordon P.**, Sinkovics B.: Simulation and Indirect Measurement of Temperature Change in Polyimide Induced by Laser Ablation at 355 nm, 28th International Spring Seminar on Electronics Technology, Wiener Neustadt, Austria, 2005. május, pp. 412-416
- R5. Balogh B., **Gordon P.**, Berényi R., Illyefalvi-Vitéz Zs.: Effect of Patterned Copper Layer on Selective Polymer Removal by 355 nm Laser, 4th International IEEE Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics, Portland, Oregon, USA, 2004. szeptember
- R6. Gielen A., Vereeken M., De Baets J., Morrell M., Beadel M., Vaudolon J., Allard P., Blansaer E., Colson P., Illyefalvi-Vitéz Zs., **Gordon P.**: LIDCAT: Graded Build-up Technology for Printed Circuit Boards, 3rd European Microelectronics and Packaging Symposium, Prague, Czech Republic, 2004. június, pp. 111-116
- R7. Illyefalvi-Vitéz Zs., Berényi R., **Gordon P.**, Pinkola J., Ruzinkó M.: Laser Processing of Polymer Layers of Laminated and Flexible Substrates, 53rd IEEE Electronic Components and Technology Conference, New Orleans, Louisiana, USA, 2003. május, pp. 142-147
- R8. **Gordon P.**, Berényi R., Balogh B.: Controlled Laser Ablation of Polyimide Substrates, 36th International Symposium of The International Microelectronics And Packaging Society, Boston, Massachusetts, USA, 2003. november, pp. 725-730
- R9. Berényi R., **Gordon P.**: Laser Processing of Flexible Substrates, 35th International Symposium of The International Microelectronics And Packaging Society, Denver, USA, 2002. szeptember, pp.494-499
- R10. Berényi R., **Gordon P.**: Laser Processing of Flexible Substrates, 25th International Spring Seminar on Electronics Technology, Prague, Czech Republic, 2002. június, pp. 246-249., *"Best Paper for Young Scientist" díj*

További tudományos közlemények

Lektorált publikációk:

- L5. Harsányi G., Ballun G., Bojta P., **Gordon P.**, Sántha H.: Multimedia for MEMS Technologies and Packaging Education, MSTnews, vol. 5/03, 2003. november, pp. 10-12
- L6. Harsányi G., Lepsényi I., **Gordon P.**, Bojta P., Ballun G., Illyefalvi-Vitéz Zs.: SensEdu - an Internet Course for Teaching Sensorics, IEEE Sensors Journal, 2002. február, Vol. 2, No. 1, pp. 34-40

Referált publikációk:

- R11. Harsányi G., Ballun G., Bojta P., **Gordon P.**, Sántha H.: Multimedia for MEMS Technologies and Packaging Education, 53rd IEEE Electronic Components and Technology Conference, New Orleans, Louisiana, USA, 2003. május, pp. 753-759
- R12. Harsányi G., Ballun G., Bojta P., Lepsényi I., **Gordon P.**: MEMSEdu: A Project for Developing an Internet Course for Teaching Basic MEMS Technologies and Applications, 52nd IEEE Electronic Components and Technology Conference, San Diego, California, USA, 2002. május, pp. 753-759
- R13. Harsányi G., Lepsényi I., **Gordon P.**, Bojta P., Ballun G., Illyefalvi-Vitéz Zs.: SensEdu - an Internet Course for Teaching Sensorics, 51st IEEE Electronic Components and Technology Conference, Lake Buena Vista, Florida, USA, 2001. május, pp. 1255-1260
- R14. Illyefalvi-Vitéz Zs., **Gordon P.**: Modeling and 3D Visualization of Laser Material Processing, 51st IEEE Electronic Components and Technology Conference, Lake Buena Vista, Florida, USA, 2001. május, pp. 410-415
- R15. Illyefalvi-Vitéz Zs., Berényi R., **Gordon P.**, Pinkola J., Ruzinkó M.: Laser Via Generation into Flexible Substrates, First International IEEE Conference On Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics, Potsdam, Germany, 2001. október, pp.230-235
- R16. **Gordon P.**: Visual Modeling of Physical Processes, 24th International Spring Seminar on Electronics Technology, Calimanesti-Caciulata, Romania, 2001. május, pp. 78-82
- R17. **Gordon P.**, Bojta P., Hertel L., Kállai I., Lepsényi I., Várnai L., Illyefalvi-Vitéz Zs.: Progress in Electronics Packaging Virtual Laboratory Development, 50th IEEE Electronic Components and Technology Conference, Las Vegas, Nevada, USA, 2000. május, pp. 1293-1299
- R18. **Gordon P.**, Bojta P., Hertel L., Kállai I., Lepsényi I., Várnai L., Illyefalvi-Vitéz Zs., Pinkola J., Ripka G.: Development of Electronics Packaging Virtual Laboratory, 23rd International Spring Seminar on Electronics Technology, Balatonfüred, Hungary, 2000. május, pp. 11-16, "Best Paper Award" díj

Egyéb publikációk:

- E1. **Gordon P.**, Balogh B., Sinkovics B.: Investigation and Simulation Methods of Polymer Ablation by UV Nd:YAG laser, 4th European Microelectronics and Packaging Symposium, Terme Catez, Slovenia, 2006. május, pp. 375-380
- E2. Balogh B., Berényi R., **Gordon P.**, Illyefalvi-Vitéz Zs.: Investigation of a laser assisted 3D bending technology for high density flexible circuits, 5th European Microelectronics and Packaging Conference and Exhibition, Brugge, Belgium, 2005. június, pp. 278-282
- E3. Illyefalvi-Vitéz Zs., **Gordon P.**, Pinkola J., Berényi R., Balogh B.: Application of Laser Processing for Fabrication of High Density Interconnections, 10th International Symposium for Design and Technology of Electronic Modules, Bucarest, Romania, 2004. szeptember, pp. 9-13
- E4. Harsányi G., Ballun G., Bojta P., Lepsényi I., **Gordon P.**: Teaching Basic MEMS Technologies and Applications, 5th International Academic Conference on Electronic Packaging Education and Training, Dresden, Germany, 2002. március, pp. 47-53

- E5. Berényi R., Illyefalvi-Vitéz Zs., **Gordon P.**: Laser Via Generation Techniques for Printed Wiring Boards, 7th International Symposium for Design and Technology of Electronic Modules, Bucharest, Romania, 2001. szeptember, pp.1-6
- E6. **Gordon P.**, Hertel L.: Modeling Laser Material Processing in a Virtual Laboratory Environment, 13th European Microelectronics and Packaging Conference and Exhibition, Strasbourg, France, 2001. május, "2nd Student Award" díj
- E7. **Gordon P.**: Virtual Laboratory Support for Electronics Packaging Education, 4th International Academic Conference on Electronic Packaging Research, Hong Kong, 2001. március
- E8. Hertel L., **Gordon P.**, Bojta P., Kállai I., Lepsényi I., Várnai L., Illyefalvi-Vitéz Zs., Pinkola J., Ripka G.: Development of Virtual Laboratory for Electronics Packaging Technology, 6th International Symposium for Design and Technology for Electronic Modules, Bucharest, Romania, 2000. szeptember, pp. 88-92
- E9. **Gordon P.**, Bojta P., Hertel L., Kállai I., Lepsényi I., Várnai L.: Development of Virtual Laboratory for Education of Electronics Packaging Technology, 5th International Symposium on Electronics and Automation, Budapest, 2000. április, pp. 39-44
- E10. **Gordon P.**: Low Power CO₂ Laser Processing of Flexible Substrates, 5th International Symposium for Design and Technology of Electronic Modules, Bucharest, Romania, 1999. szeptember, pp. 115-119
- E11. **Gordon P.**: Development of a CO₂ laser processing system and applicability researches, 22nd International Spring Seminar on Electronics Technology, Freital-Dresden, Germany, 1999. május, pp. 307-310