

# Lézersugár paraméterszabályozása többrétegű struktúrák mintázatának függvényében

GORDON PÉTER, BALOGH BÁLINT

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Elektronikai Technológia Tanszék

[gordon@ett.bme.hu](mailto:gordon@ett.bme.hu)

Reviewed

## Kulcsszavak:

Az elektronikai ipar fejlődésének záloga a méretek folyamatos csökkentése, ami már a hagyományos technológiák tökéletesítésével sok esetben lehetetlen. A lézerek alkalmasak lehetnek ezek kiváltására, de mivel nem ismerjük tökéletesen a lézertanyag kölcsönhatás során lejátszódó folyamatokat, ezért jelenleg még nem tudjuk maximálisan kiaknázni a lézerek nyújtotta lehetőségeket. A cikkben ismertetjük a kölcsönhatás jellegét, a hordozón kialakított mintázat és a megmunkálási paraméterek hatásait a megmunkálás eredményére. Célunk a lézersugár paramétereinek mintázat és anyagfüggő változtatásával a lézeres megmunkálásban rejlő lehetőségek még jobb kihasználása.

## Bevezetés

Az elektronikai ipar fejlődése töretlen, még ha nem is feltétlenül a pár évtizede megjósolt sebességgel halad. Igényünk az egyre kisebb, egyre kevesebbet fogyasztó, de egyre több szolgáltatást nyújtó áramkörök, készülőek iránt állandóan fokozódik. Ahogy a méretek csökkennek, a hagyományos gyártási technológiák lassan képességük, kapacitásuk határára érnek. A gyártók persze tovább csökkentik a csíkszélességet és növelik a beépített funkciók számát. Az IC-k mérete így akár még csökkenhet is, miközben a külvilággal egyre több kapcsolódási pontot, azaz kivezetést igényelnek. A kivezetések akár több százas nagyságrendje már napjainkban sem engedi meg, hogy hagyományos tokozási módszerekkel tegyük könnyen kezelhetővé integrált áramköreinket, hiszen ezek így többszörös helyet foglalnának el az amúgy is mindig szűkös felületen. Le kell hát mondanunk a könnyen kezelhetőségről és a lehető legkisebb méretű tokot kell választanunk az IC-knek. Így jutunk el a mai CSP (Chip Scale Package) „tokozásokhoz”:  $\mu$ BGA, flip-chip, TAB.

Az „óriási” tokok elhagyása könnyebbséget jelenthet az IC-gyártóknak, az áramköri hordozók gyártóit azonban egészen új kihívások elé állítja. Egy CSP IC kivezetései akár  $25\mu\text{m}$  vonalszélességű vezetékekhez vagy  $50\mu\text{m}$  átmérőjű forrszemekhez (pad) kapcsolódnak. A hordozók gyártói így a hajszál átmérőjének nagyságrendjére kénytelenek finomítani technológiájukat. A hagyományos módszerekkel azonban ez vagy lehetetlen vagy nem gazdaságos.

Az évtizedek óta azonos elven alapuló, de teljesítő-képességük határára ért eljárások egyik alternatívája lehet a lézertechnológia. Cikkünkben bemutatjuk, mennyire elterjedt a technológia napjainkban, milyen előnyöket és perspektívákat nyújt, és milyen kompromisszumokra kényszerít, koncentrálna a flexibilis áramköri hordozók egyik legelterjedtebb anyagára, a poliidre.

## A lézernyaláb mint szerszám

A lézer sugarának egyedi jellemzői jól ismertek: a nyaláb koherens, párhuzamos és többnyire monokromatikus. Egy ideális lézersugár rendkívül jól fókuszálható, így a megmunkálandó anyag felületén  $\text{MJ}/\text{mm}^2$ -es energiasűrűséget képes létrehozni. Ezzel a felületen akár robbanásszerű folyamatokat gerjeszthetünk, melynek következtében az anyag kis dózisosokban, a közvetlen környezet számára kímélő módon távolítható el. A fókuszált lézernyaláb mint megmunkáló szerszám (akár  $5\text{-}10\mu\text{m}$  átmérővel) relatíve tökéletes precizitással mozgatható optikailag, miközben nincs meghatározott előtolási irány és természetesen kopás sincs [2].

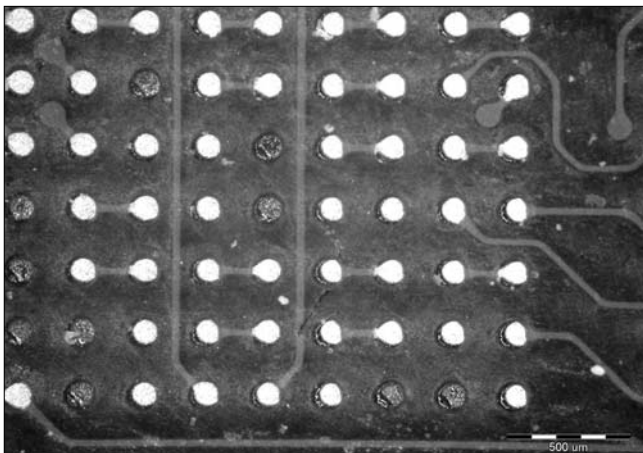
Áramköri hordozók átmenő vagy zsákfuratainak (viáinak) fúrása esetén vitathatatlanok a lézeres megmunkálás előnyei a mechanikus fúrással szemben, leszámítva a nagyobb átmérőjű furatokat. A lézeres megmunkálásnak ezen a területen évtizedes múltja van és minden, mai igényeknek megfelelő áramköri hordozógyártó sorban találunk mikrofurat készítő lézereket. A mikromegmunkáló lézerek vezérelhető, impulzusüzemű működése folytán a lézer akár többrétegű struktúrákban is képes a beállított mélységű lyuk fúrására, még úgy is, hogy a nyalábnak jelentősen eltérő fizikai tulajdonságokkal rendelkező anyagokon (réz, műgyanta) kell áthatolni. Teszi mindezt másodpercenkénti több száz furatnyi termelékenységgel [5].

Az áramköri hordozók gyártásában a megfelelő finomságú mintázat kialakításában a lézeres technológia még közel sem annyira elterjedt, mint a fúrás esetén. Míg az egy technológiai fázisnak számító fúrást a lézeres megmunkálás egy az egyben kiválthatta, a több lépésből álló mintázatkialakításban még nincs végleges válasz arra a kérdésre, hogy melyik lépést kell és érdemes rábíznia a lézerekre. A lézerek mellett szól az áramköri hordozókon elérhető rendkívüli rajzolatfinomság (akár  $1\text{ mil}$  alatti vonalszélességek), akár öt technoló-

giai lépés (fotoreziszt felvitel, megvilágítás, előhívás, maratás, reziszt eltávolítás) kiváltása egyetlen lézeres munkafázissal, a flexibilitás, a megmunkálás közbeni újraelleszthetőség [2]. Ellene szól viszont az alacsonyabb termelékenység, a hőhatásnak kitett környezet mind oldalirányban, mind a közvetlenül nem érintett alsóbb rétegekben. A mintázott többrétegű struktúrák egy termikusan is inhomogén közeggé változtathatják a mikromegmunkálás tárgyát, így – az egyébként akár egyesével is adagolható – lézerimpulzusok által képviselt, bevitt energia más és más hatást fejthet ki.

A lézersugár és az anyag kölcsönhatása rendkívül komplex folyamat. A lézeres megmunkáló berendezések alkalmazóinak nem szükséges ismerni ezeket a folyamatokat, a célra előre, durván „behangolt” gépet pár állítható paraméter segítségével a gyártósorba tudják illeszteni. Kérdés azonban, hogy ezek a dedikált funkciójú berendezések így maradéktalanul kihasználják-e a lézerek által nyújtott lehetőségeket. A megmunkálási paramétereket ugyanis nem változtatják meg a termikusan még kapcsolódó, belsőbb rétegek mintázatának függvényében. A mai lézeres berendezéseket „próbálgatással” beállító technológusok így hamar alkalmatlannak minősítik az eljárást bizonyos komplexebb feladatokra.

Egy általunk vizsgált példát mutat az 1. ábra. A hővezetés hatása az adott esetben közvetlenül érvényesül. Ennél összetettebb probléma, mikor a mintázott rézréteg nincs közvetlen kapcsolatban a megmunkált réteggel, de termikusan befolyásolja az eredményt.



1. ábra  
Lézerrel fúrt, 100 μm-es lyukak forrasztásgátló rétegben --  
A kivezetés nélküli forrszemek megsérültek  
azonos megmunkálási paraméterek mellett.

Ha ismernénk a lézer és a megmunkálandó anyag kölcsönhatásának folyamatát és azt, hogy erre miképpen, milyen súllyal hatnak bizonyos, a folyamatot kísérő jelenségek (termikus, optikai, akusztikai stb.), akkor rendelkezésre állna egy modell, mely alapján a tömeggyártásban alkalmazott lézereket – a flexibilitás megőrzése mellett – specifikusabb és komplexebb feladatok megoldására készíthetnénk fel. Így jelenthet a lézeres megmunkálás alternatívát a hagyományos, teljesítőképességük határára ért technológiáknak.

## A lézeres megmunkálás paraméterei

A megmunkálás közvetlen jellemzőinek száma már önmagában jelzi a folyamat összetettségét. A főbb paraméterek egy lehetséges csoportosítását mutatjuk be a következőkben:

1. Egy Q-kapcsolt lézerforrást jellemző adatok:
  - hullámhossz
  - impulzus szélessége, az energia időbeli eloszlása,
  - pulzusonkénti energia, átlagteljesítmény,
  - impulzus ismétlési frekvencia,
  - nyalábminőség  
(energia-eloszlás a nyaláb keresztmetszetében).
2. Az optikai rendszer jellemzőit leíró adatok:
  - nyaláb pásztázási sebesség,
  - a fókuszolt átmérője,
  - mélységélesség.
3. A megmunkálási geometriát meghatározó adatok:
  - mintázat,
  - raszterávolság,
  - megmunkálási fázisok száma.
4. Környezeti adatok:
  - az inhomogén, többrétegű struktúrák összetett hővezetése,
  - az atmoszféra jellemzői  
(gáz típusa, áramlási sebessége) [3].

A felsorolt paraméterek nagy részének lehetséges értékeit a megmunkálandó anyag tulajdonságai és a technikai lehetőségek – szerencsére – hamar kezelhető intervallumra szűkítik. A hullámhosszt a lézer típusa határozza meg. Mikromegmunkálásra az elektronikai technológiában egyre elterjedtebben használják a 355 nm-es hullámhosszt, melyet az Nd:YAG lézer sugarából állítanak elő frekvenciaháromszorozással. Az elterjedés oka nem véletlen: a látható és az UV tartomány határán levő nyaláb jól elnyelődik szinte minden, akár merev, akár flexibilis NYHL technológiában alkalmazott anyagban. (Így persze nem apellálhatunk a szelektív anyageltávolításban automatikusan érvényesülő folyamatokra, pont ezért fontos a megmunkálás maximális kontrollálhatósága.) A lézerimpulzus szélessége és energia-idő függvénye ugyancsak a lézer megvalósításából következik. Egyértelműen bizonyítható, hogy a megmunkálás „tisztasága” hőterhelési értelemben erősen függ a kölcsönhatás időtartamától. Minél rövidebb idő alatt közlünk adott energiát a felülettel, annál gyorsabban ablációra kényszeríthetjük a megvilágított részt, mivel a hőnek kevesebb ideje marad szétterjedni a közvetlenül érintett területről [1].

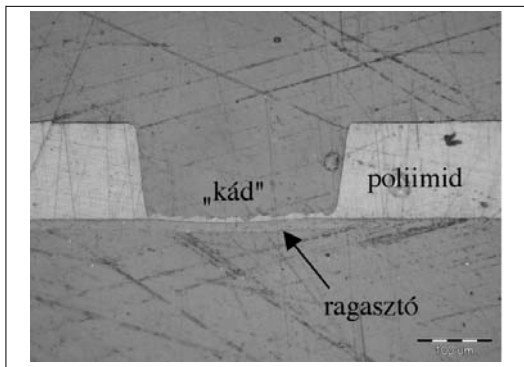
A megmunkálás sok-sok paramétere között nagyobb eséllyel találhatjuk meg azokat, amelyeket a megmunkálás sebességével összemérhető gyorsasággal tudunk változtatni a mintázat függvényében. A lézernyaláb energia- és frekvenciajellemzőit ugrásszerűen nem tudjuk módosítani a nyalábminőség megváltozása nélkül. (Bizonyos lézerek lehetőséget biztosítanak a lézerkristályban kialakuló termikus lencse kompenzálására, de ez másodperceket igényel.) A pász-

tázási sebességet, a megmunkálás geometriáját azonban bármikor megváltoztathatjuk. Mielőtt azonban megvizsgálánánk, miképpen hatnak ezek a megmunkálás végeredményére, bemutatjuk a hővezetés hatását réz-poliimid hordozó esetén.

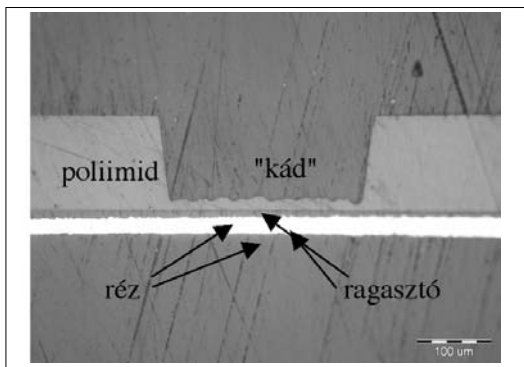
### A hővezetés hatása

Az előbbieken már utaltunk arra, hogy a megmunkálási paramétereket a mintázathoz kell igazítani a lézeres megmunkálás nyújtotta lehetőségek maradéktalan kiaknázásához. A hordozón, több rétegben létrehozott változatos mintázat hatására a felület közelében a termikus tulajdonságok rendkívül eltérőek lehetnek. Bár az UV lézerek esetében a termikus hatás jóval kisebb, mint a hosszabb hullámhosszú lézerek esetében [4], azonban a frekvencia-háromszorozott Nd:YAG lézer 355 nm-es hullámhossza mellett még komoly szerepet játszik. Ezt bizonyítja, hogy egy közvetlenül nem érintett, alsóbb rézréteg hővezetése kimutatható mértékben befolyásolja a megmunkálás eredményét.

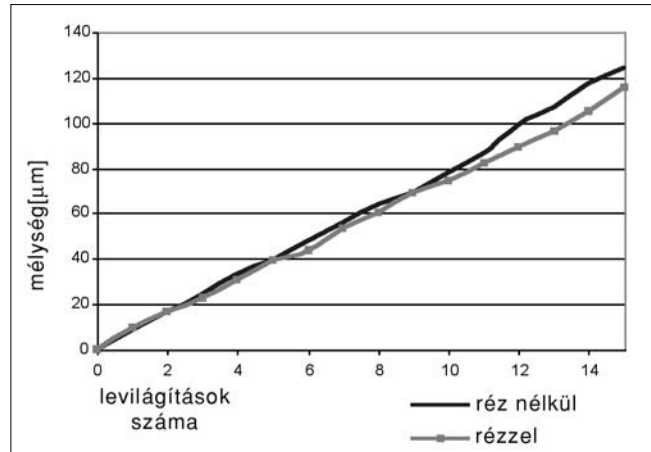
A 2/a és 2/b ábrán látható minták teljesen azonos lézerbeállításokkal (frekvencia: 100 kHz, sugáreltérítési sebesség: 300 mm/s, raszterávolság: 10 µm, impulzusenergia: 3,7 µJ), 15-szörös levilágítással készültek. Ahol nem volt réz a hordozón, ott szinte a teljes poliimid mennyiség eltávozott. A rézfólia, melynek hővezetése négy nagyságrenddel jobb, mint a poliimid hordozóé, képes volt elvezetni a keletkezett hő egy részét, így rajta 10 µm-rel vastagabb poliimid réteg maradt.



2/a. ábra Ablaknyitás poliimid fóliában 15 levilágítás utáni állapot



2/b. ábra Rézréteg jelenlétében kb. 10 µm-rel kevesebb anyag távozott el



3. ábra

Behatolási mélység a levilágítások számának függvényében

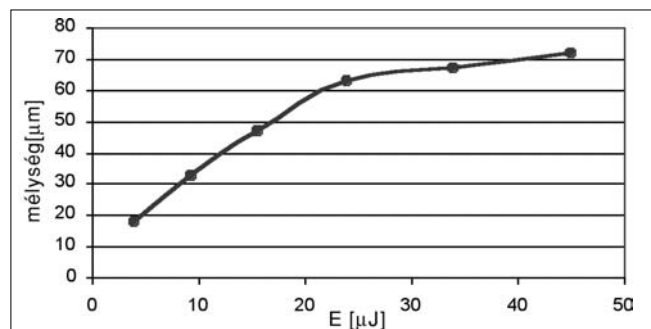
Az 3. ábráról leolvasható, hogy minden egyes levilágítási lépés kb. 8 µm vastagságú poliimid réteget távolított el. Adott beállítás mellett a tizenegyedik levilágításig a hordozóra ragasztott rézfólia nem okozott jelentős eltérést. Ettől kezdve a polimer réteg vastagsága, tehát a hőszigetelő képessége is lecsökkent, tehát a réz a keletkezett hő bizonyos részét képes volt elvezetni. Az alacsonyabb hőmérsékletű anyag ablációjához természetesen több energia szükséges, azaz belőle ugyanannyi energiával kevesebbet lehet eltávolítani.

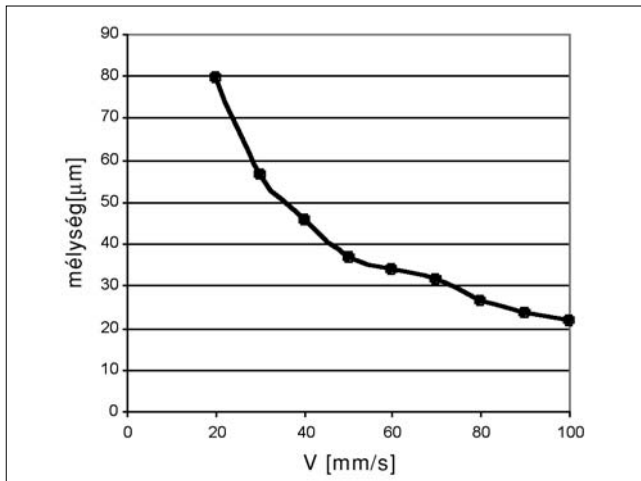
Kijelenthetjük tehát, hogy a hordozó alsóbb rétegének mintázatából következő hővezető-képesség különbségek megfigyelhetően befolyásolják az eltávolított anyag mennyiségét. A lézerparaméterek megmunkálás közbeni módosításával ez a hatás azonban kompenzálható. Kísérleteinkben megvizsgáltuk, hogy a poliimid hordozó miképpen reagál bizonyos paraméterek változtatására. Ezeket mutatjuk be a következőkben.

### Az impulzusenergia hatása

A 4. ábrán látható, hogy az impulzusenergia változtatása, ceteris paribus, miként befolyásolja a keletkezett „kád” mélységét. Az eltávolított poliimid mennyisége és az energia közti összefüggés egy szűk tartományban lineáris, itt energiaváltoztatással könnyen szabályozható a vágatok mélysége. Egy bizonyos szint (esetünkben 25 µJ) felett azonban az impulzusenergia növelése már alig befolyásolja az eltávolított anyag mennyiségét.

4. ábra Mélység az impulzusenergia függvényében





5. ábra Mélység a sugáreltérítési sebesség függvényében

Az impulzusenergia változtatása a legtöbb berendezés esetében több másodpercet is igénybe vehet, így ezt csak a megmunkálási fázisok közt célszerű módosítani. A mintázat inhomogenitását másik, gyorsabban állítható paraméterrel fogjuk kompenzálni.

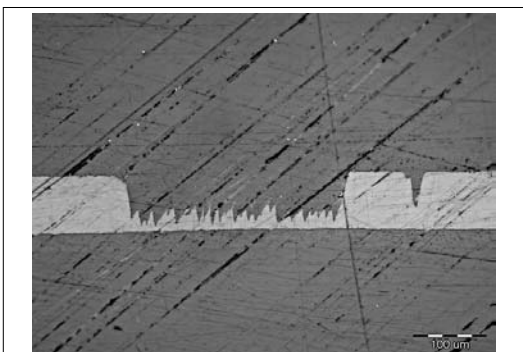
### Pásztázási sebesség

A széleskörűen használt galvanométeres sugáreltérítő rendszerekkel a pásztázási sebesség gyakorlatilag ug-rásszerűen változtatható. Az eltávolított anyag mennyisége a sebesség növelésével logaritmikusan csökken, tehát viszonylag kis sebességváltoztatással a rajzolat által okozott nagy hővezető képesség különbséget is kompenzálni lehet. Adott impulzusismétlési frekvencia mellett azonban a sugáreltérítési sebesség nem növelhető minden határon túl, ekkor ugyanis az egymást követő lövések „lenyomatainak” átfedése annyira lecsökkenne, hogy ez a keletkező barázdák szélének tús-késedéséhez vezetne.

### Rasztartávolság

Adott felület megmunkálásánál a rasztartávolság határozza meg az egymás mellé kerülő barázdák számát. A raszter csökkentésével a vonalak száma, és így a megmunkálási idő is arányosan nő.

6. ábra Túlságosan nagy raszter miatti egyenetlen felület



A barázdák távolsága a pásztázási sebesség mellett a másik legfontosabb paraméternek bizonyult, hiszen ez bármikor változtatható és determinálja a felületegységre bevitt energiát. Az energia mennyisége és közvetítésének ideje pedig közvetlenül meghatározza az ablált anyag mennyiségét, azaz az általunk vizsgált jelenségek legfontosabb tényezőjét.

Tömeggyártás esetén célszerű lenne nagy rasztert választani, ezzel időt takaríthatnánk meg. A barázdák távolságát mégis kellően kicsire kell választani, különben a megmunkált anyag felszíne túlságosan egyenetlen lesz. A 6. ábrán egy túl nagy rasztertávolsággal készült ablak keresztmetszete látható. (A jobb oldalon megfigyelhető V alak egy lézerrel készített barázda keresztmetszete.)

### Konklúzió

A nagy kivezető számú, CSP tokozások térnyerése a hordozógyártásban is a lézeres technológiák bevezetését vonja maga után. Ezek azonban még nincsenek maradéktalanul felkészítve arra, hogy akár 10 mikronos dimenziókban is tiszta és reprodukálható eredményt produkáljanak. Megmutattuk, hogy ilyen finom megmunkálások esetén az anyagon az érintett térfogat környezete is visszahat a folyamatra.

Kísérleteinket két Európai Uniósi projekt keretében végeztük, melyekben négyféle merev, illetve flexibilis hordozóhoz kiválasztottuk és optimalizáltuk a megfelelő lézeres technológiákat.

Munkánkkal továbbá egy olyan modell megalkotását készítjük elő, amely alkalmas lehet a lézersugár paramétereinek anyag és mintázatfüggő szabályozására. Ehhez meg kell határoznunk és szimulálnunk kell a domináns folyamatokat. Ezután lesz beépíthető egy ipari lézeres megmunkáló-állomás vezérlőprogramjába.

### Irodalom

- [1] Illyefalvi-Vitéz Zsolt:  
Laser processing for microelectronics packaging applications, Microelectronics Reliability 41 (2001) 563-570. oldal
- [2] Laser Machining Processes,  
www.columbia.edu/cu/mechanical/mrl/ntm (03.05.12.)
- [3] Gordon P., Berényi R., Balogh B.:  
Controlled Laser Ablation of Polyimide Substrates, 36th International Symposium on Microelectronics, IMAPS 2003, Boston, Massachusetts, November 18-20, 2003, pp.725-730.
- [4] Y.H. Chen, H.Y. Zheng, K.S. Wong, S.C. Tam:  
Excimer laser drilling of polymers – Microelectronics Packaging and Laser Processing, SPIE, Singapore, Június 23-26, 1997, pp.202-210.
- [5] William M. Steen:  
Laser Material Processing, Springer Verlag 1998.