

VI. Lézeres technológiák a moduláramkörü hordozók kialakításában

A mérés célja: bemutatni az iparban is használt lézeres berendezéseket és szemléltetni az eltérő tulajdonságú lézersugarak néhány alkalmazási lehetőségét.

A mérési feladat: eltérő működési üzemmódú, hullámhosszúságú és teljesítményű lézerekkel furatkészítés flexibilis áramkörü hordozókba, majd az eredmények összehasonlító kiértékelése.

A mérés elvégzésével megszerezhető képességek: az anyagmegmunkálás hatásmechanizmusának megismerése a különböző működési üzemmódok és hullámhosszúságok kapcsán. A felületi profilmérés, az optikai mikroszkópia és a keresztcsiszolati vizsgálatok alkalmazási lehetőségeinek megismerése.

A mérés során felmerülő fogalmak rövid meghatározása:

Lézer: Az angol LASER betűszó (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) az indukált emisszió általi fényerősítést fedí. A részecskék (pl. atomok, molekulák) gerjesztés után visszatérnek alacsonyabb energiaszintre, eközben egy fotont emittálhatnak. A keletkező foton energiája az érintett energiaszintek különbségéből (ΔE) adódik, hullámhossza (λ) pedig azzal fordítottan arányos:

$$\Delta E = h \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

ahol

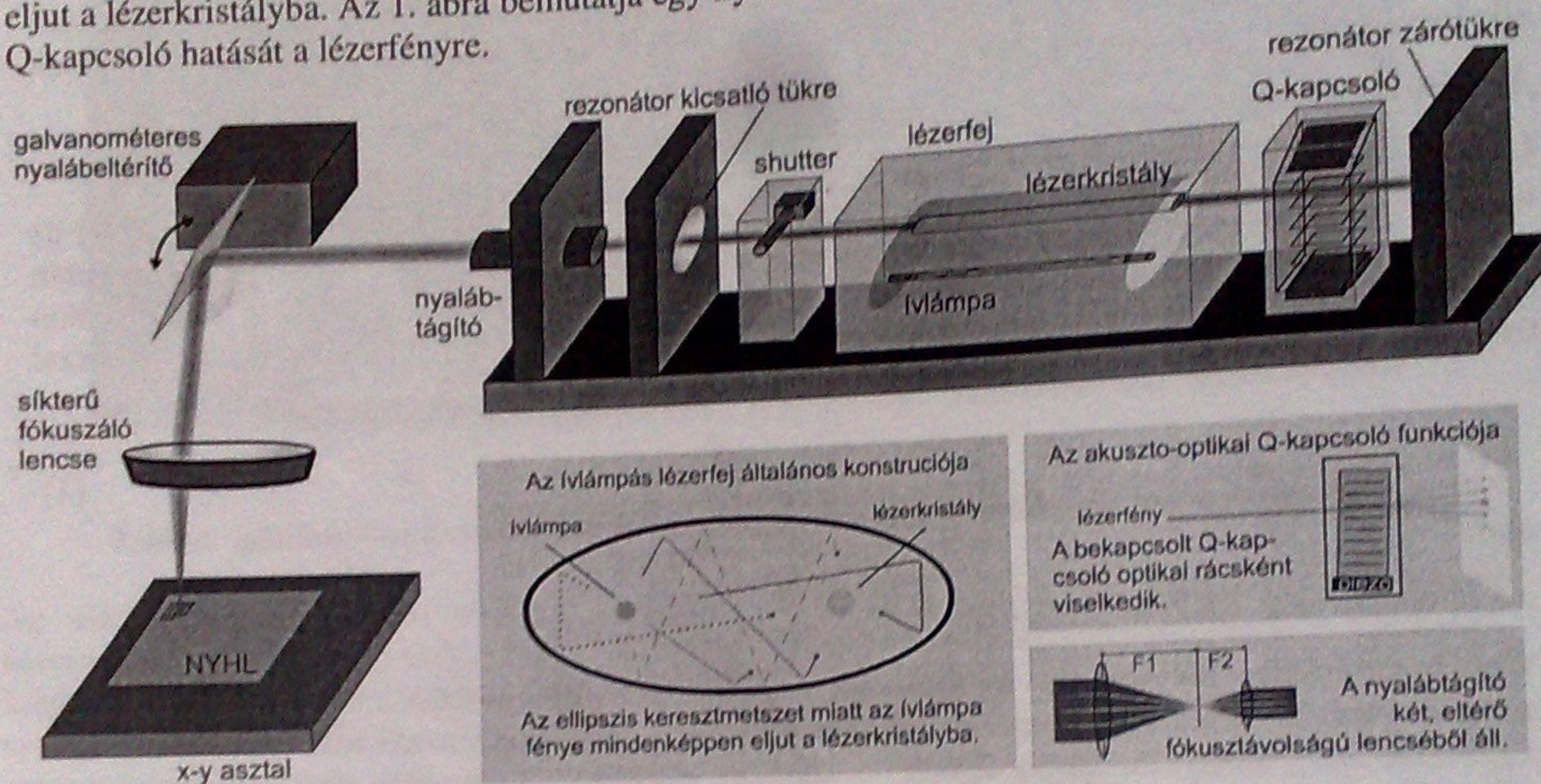
c a fénysebesség, h a Planck állandó.

A visszatérés és ezzel együtt az emisszió egyrészt történhet spontán módon, azaz az adott energiaszintre jellemző idő (un. élettartam) elteltével. Történhet másrésztől indukáltan, azaz „vezérelve” is, amelynek során – még a spontán emisszió megtörténte előtt – egy fotonnal emisszióra készítjük az adott részecskét. Ennek feltétele viszont, hogy a kiváltó foton azonos hullámhosszúságú legyen azzal a fotonnal, ami az adott energiaszintek közötti átmenet során keletkezne. Az indukált emisszióval létrejött új foton minden tulajdonsága megegyezik az azt kiváltó fotonéval. A hullámhosszuk és az energiájuk azonossága természetes, de egyezik még az irányuk, a fázisuk, a polarizáltságuk is. (Ebből adódik, hogy a lézerfény monokromatikus és koherens.) Az indukált emisszió tehát azonos fotonok sokszorozását teszi lehetővé. A lézerek esetében az indukált emissziót egy optikai rezonátorban, pl. két párhuzamos tükör között bírjuk munkára, így létrejöhét a fényerősítés. (Ebből adódik a lézersugár „párhuzamossága”, azaz kis divergenciája, széttartása.) Indukált emisszió természetesen csak gerjesztett állapotú részecskék esetében lehetséges, így gondoskodni kell arról, hogy a fotont kibocsátó és ezzel alacsonyabb energiaszintre kerülő részecskék újból gerjesztve legyenek.

Egy hagyományos szilárdtest lézer egyszerűsített felépítését mutatja az 1. ábra. Ezen megfigyelhető az optikai rezonátort alkotó két tükör, közöttük pedig egy ívlámpával pumpált lézerfej és két, a rezonátor optikai lezárhatóságát biztosító kapcsoló: a shutter és a Q-kapcsoló. A shutter egy mechanikai elvű zárszerkezet, amely alapállapotában elzárja az optikai utat és csak előfeszítés hatására nyit ki, ezért ez a lézerforrás alapvető biztonsági tartozéka. A Q-kapcsoló szerepe ezzel szemben a lézer impulzusüzemű működtetése. Az ábrán vázolt akusztó-optikai elvű Q-kapcsoló oly módon viselkedik zárként, hogy az alapvetően átlátszó optikai kristályban egy piezo-aktuátorral akusztikus hullámokat tudunk gerjeszteni, amelyek pedig optikai rácsként viselkedve a lézersugarat szétszórják. Ezzel a rezonátor jóságát tényezőjét (Q , mint quality) csökkentve meggátolják a lézerműködést, így – az erősítés lehetősége híján – a lézerkristályban nagy energia halmozódik fel a folyamatos gerjesztés hatására. Ha a Q-kapcsolót ilyenkor újból kikapcsoljuk, az optikai út akadálymentessé válik és kialakul egy nagyenergiájú lézerimpulzus. Ezen az elven akár néhányszor 10 ns-os kapcsolási idő, azaz lézerimpulzus hossz is elérhető. A rövid zárás-nyitási idő alapvető szempont a Q-kapcsolóknál.

A rezonátorból kilépő sugarat egy nyalábtágítón vezetjük át (ennek szerepét lásd később), majd rávezetjük egy galvanométeres elven mozgatott tükörré, melynek segítségével bizonyos szögtartományon belül nagyon gyors sugáreltérítést, pásztázást valósíthatunk meg. A fókuszálást egy síkterű [flat-field, F-Theta] optikával (lencserendszerrel) oldjuk meg, amely a nyalábot – beesési szögtől függetlenül egy sík felületre fókuszálja.

Az 1. ábra bemutatja továbbá az ívlámpás gerjesztés esetén alkalmazott szokványos konstrukciót, amely szerint az ívlámpát és a lézerkristályt egy tükröző belső felületű, ellipszis keresztmetszetű test két fókuszvonalában helyezik el. Így a lámpát elhagyó fény – akár több visszaverődés után – eljut a lézerkristályba. Az 1. ábra bemutatja egy nyalábtágító szokásos felépítését is, és a bekapcsolt Q-kapcsoló hatását a lézerfényre.



1. ábra. Egy ívlámpával pumpált lézerberendezés vázlata

Lézeres anyagmegmunkálás: A kis divergenciájú (széttartású) lézerfény a megmunkálandó anyag felületére nagyon jól, akár 10-100 μm átmérőjű foltba fókuszálható. A lézersugár így kölcsönhatásba lép az anyaggal. A kölcsönhatás módját és eredményét számos körülmény befolyásolja, de ezek közül elsősorban a hullámhossznak, a teljesítménynek és az üzemmódnak, azaz a megvilágítás időbeli függvényének van kiemelkedő jelentősége. A megmunkálás kulcsa a lézersugár elnyelődése az adott anyagban, ez pedig a hullámhossztól függ. (Pl. az üveg átengedi a látható tartományba eső sugarakat, de elnyeli az UV fényt.) Felületi struktúrák lézeres kialakításához (pl. gravírozás, ellenállás értékeállítás) általában nagyon rövid idejű (20-200 ns) és a μJ -mJ nagyságrendbe eső energiájú, ebből adódóan magas csúcsteljesítményű (10 kW-100 kW) impulzusokat használnak, míg anyagok elvágásához, hegesztéséhez folyamatos üzemmódban működő, nagy folyamatos teljesítményű (10 W-10 kW) lézereket használnak. A kis foltátmérő és a magas csúcsteljesítmény eredményeként adódó, akár MW/mm^2 nagyságrendű teljesítménysűrűség hatására anyageltávolítás következik be.

Példaszámítás: Határozzuk meg, hogy mekkora teljesítménysűrűség éri az anyagot, ha egy 300 μJ energiájú, 30 ns hosszúságú lézerimpulzust egy 15 μm sugarú foltba fókuszálunk a felületére! (Ezek a laborgyakorlat során használt lézerberendezés adatai.)

1. lépés, lézerimpulzus teljesítményének számítása: $300 \mu\text{J} / 30 \text{ ns} = 10 \text{ kW}$.
2. lépés, teljesítménysűrűség számítása: $10 \text{ kW} / (15 \mu\text{m})^2 * \pi = 14,2 \text{ MW}/\text{mm}^2$

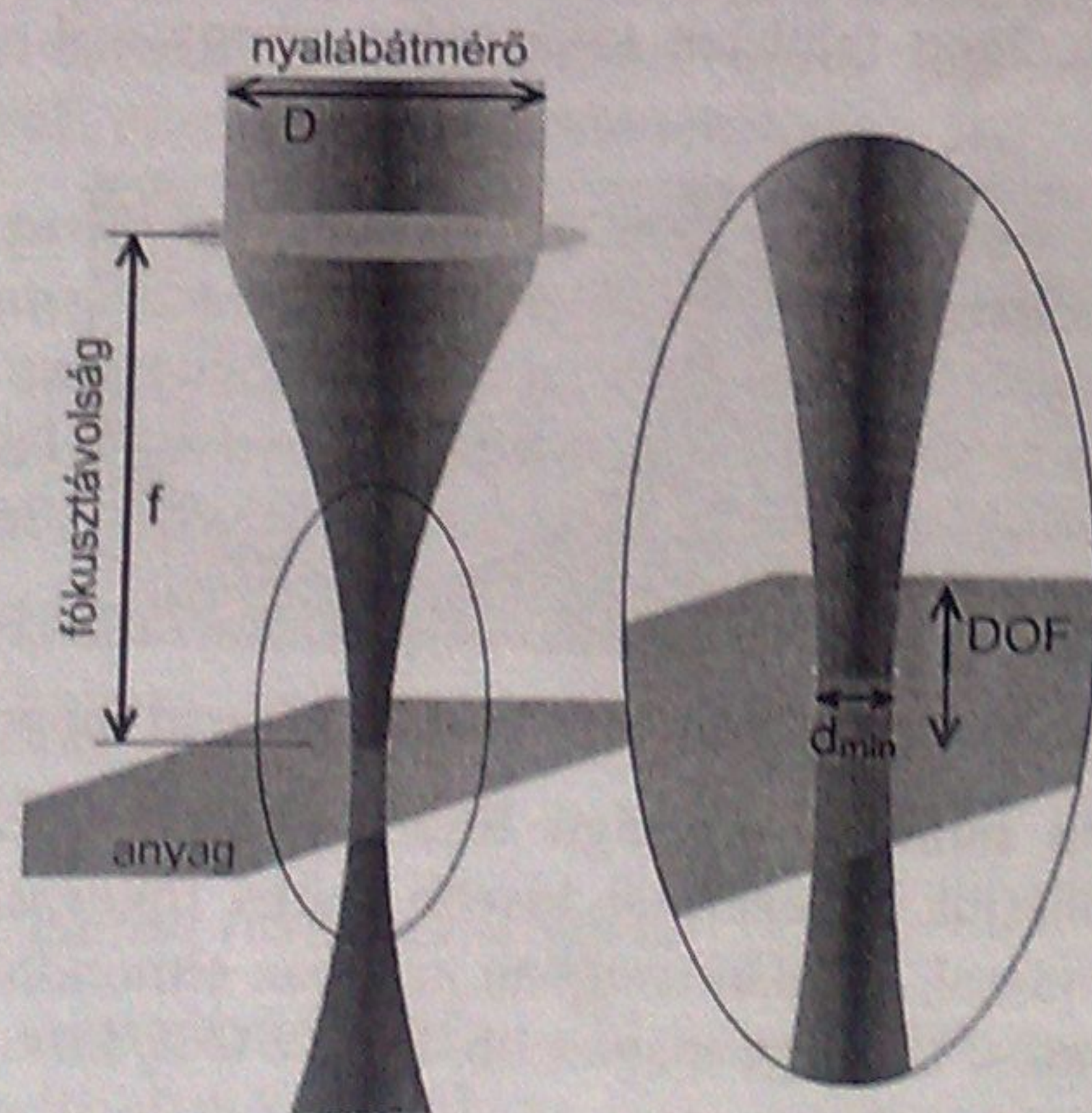
A mélységi dimenziót is figyelembe véve, a köbmilliméter ezred részének megfelelő nagyságrendű térfogatban akár több 10 MW teljesítmény fejtheti ki hatását, persze csak nagyon rövid ideig. Az érintett kis térfogatban azonban ez akár robbanásszerű változásokat okoz.

Az anyagmegmunkálásban elterjedt két fő lézertípus:

1. Nd:YAG szilárdtest lézer, hullámhossza 1064 nm, ami a közeli infravörös tartományba esik. Speciális optikai módszerekkel (frekvencia többszörözés nemlineáris kristályban) hullámhosszát 532 nm-re tudják alakítani, ami zöld színű sugárzás, továbbá 355 és 266 nm-es UV sugárzássá is konvertálható, természetesen a hatásfok csökkenése mellett. A szilárdtest lézereket többnyire impulzus üzemmódban működtetik.
2. CO₂ lézer, ami a gázlézerek közé tartozik és többnyire folyamatos üzemmódban működtetik, hullámhossza pedig 10600 nm, azaz 10,6 μm. Ez a távolabbi infravörös tartományba eső sugár elnyelődik a legtöbb, szem számára átlátszó anyagban, így azok megmunkálására akár alkalmas is lehet.

A hullámhossz három jelentős hatása lézeres anyagmegmunkálás esetén:

1. A lehető legnagyobb felületi energia- vagy teljesítménysűrűség eléréséhez a lézernyalábot általában a lehető legkisebb átmérőre fókuszáljuk össze. Az elérhető legkisebb átmérő értékét többek között a hullámhossz is befolyásolja. Minél kisebb a hullámhossz, annál kisebbre fókuszálható a nyaláb. Egy 355 nm-es Nd:YAG lézernyaláb akár pár mikrométer átmérőjűre is összefókuszálható, míg a CO₂ lézer 10,6 μm-es sugarának legkisebb elérhető fókuszátmérője 100 - 200 μm. A fókuszolt átmérőjét (d_{\min}) a hullámhossz mellett a fókuszáló lencsére beeső nyaláb átmérője (D), és a fókusz távolság (f) is befolyásolja. A fókuszolt méretét csökkenti tehát az alacsonyabb hullámhossz, a nagyobb beeső nyalábátmérő (ezért használunk nyalábtágítót) és a rövidebb fókusz távolságú lencse. A fókuszolt méret csökkentésével azonban a mélységélesség [depth of focus, DOF] is csökken (2. ábra).

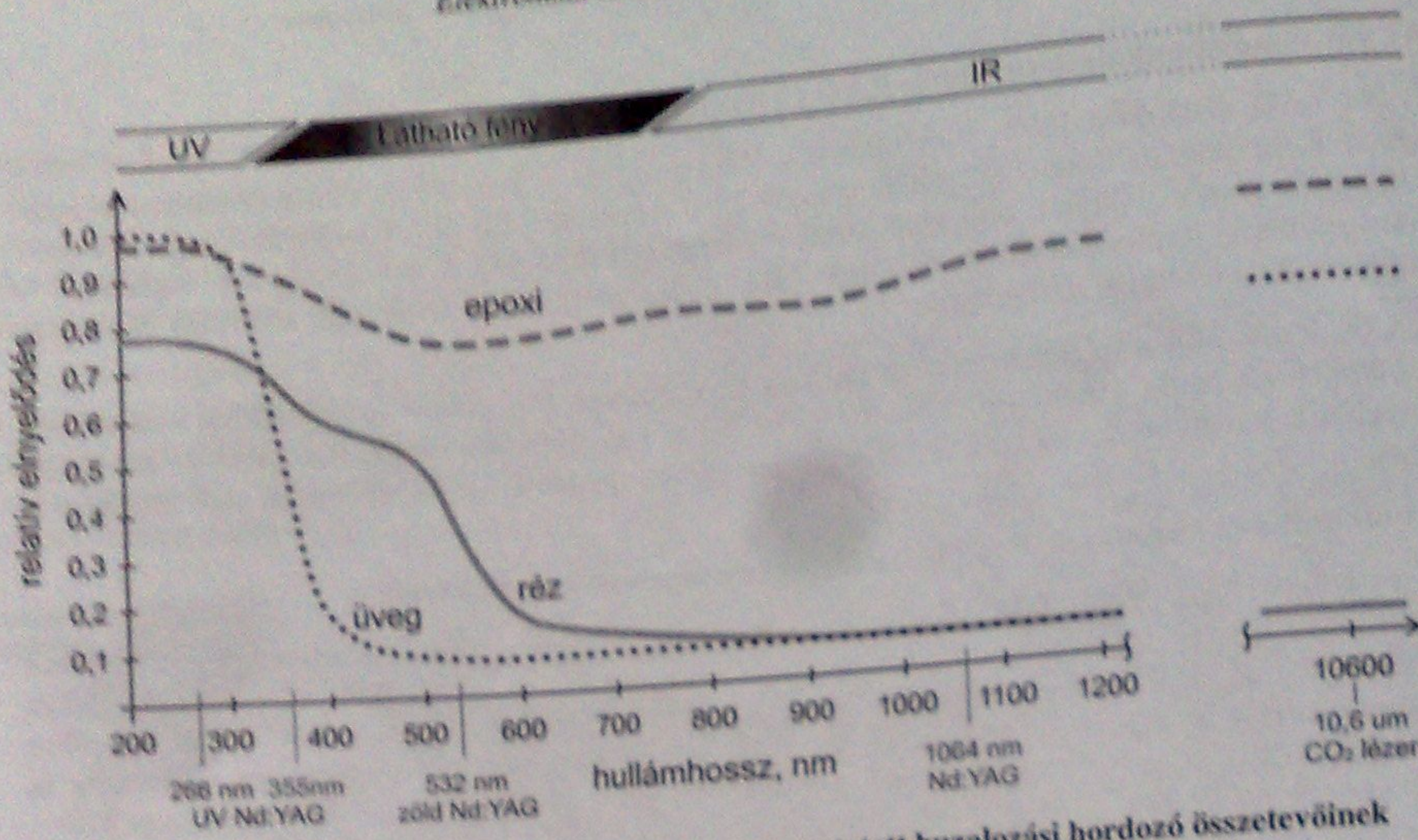


$$d_{\min} = \frac{4\lambda}{\pi} \left(\frac{f}{D} \right) \quad (2)$$

$$DOF = \frac{8\lambda}{\pi} \left(\frac{f}{D} \right)^2 \quad (3)$$

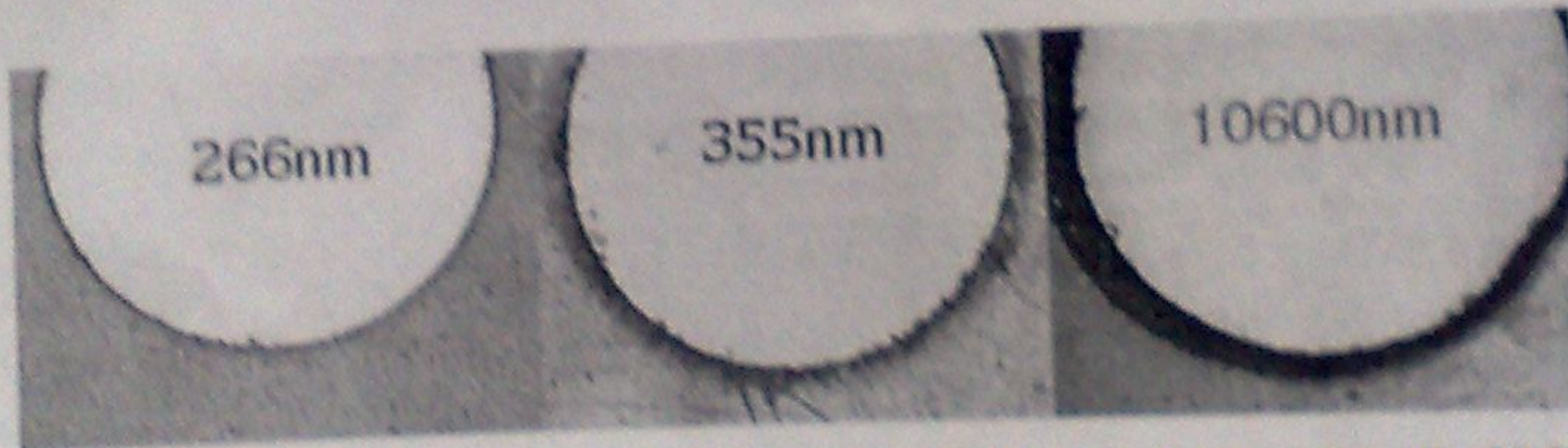
2. ábra. A fókuszált lézernyaláb vázlata, szemléltetve a fókuszolt elérhető legkisebb átmérőjét (d_{\min}) és a mélységélességet (DOF)

2. Az anyagok eltérő mértékben nyelik el a különböző hullámhosszúságú nyalábokat. Az elektronikai technológiában is használatos anyagok elnyelése alacsonyabb hullámhosszon többnyire nagyobb. Több anyag (pl. üveg, réz) az UV tartományban nyeli el a nyaláb számottevő részét, míg a látható, vagy közeli infravörös tartományba eső sugarakat nagymértékben reflektálják vagy átteresztik (3. ábra).



3. ábra. Az FR4-es (üvegszál erősítésű epoxigyanta) nyomtatott huzalozási hordozó összetevőinek relatív elnyelése (elnyelt/beeső energia) a hullámhossz függvényében

3. A hullámhossz csökkenésével arányosan nő a fotonok energiája. Az UV fotonok nagy energiája akár kémiai kötések bontására is elegendő lehet. Magasabb hullámhosszon elsősorban a hőhatáson alapul az anyag megmunkálása, míg UV fotonok esetén az anyag összetevőire bontása lesz az anyageltávolítása kulcsa. Ez utóbbi „tisztább” megmunkálásra ad lehetőséget, hiszen csökken a hő által terhelt zónák [Heat Affected Zone, HAZ], égett felületek kiterjedése, ahogy a 4. ábrán is látható.



4. ábra Különböző hullámhosszúságú lézerekkel készített furatok poliimid fólián

A fenti három szempont mind az alacsonyabb hullámhosszúságú lézerek előnyét emeli ki: a megmunkálás pontosságát és felbontását növelhetjük az energiát kisebb foltba fókuszálva, jobb elnyeléssel, kisebb hőhatással járó anyageltávolítással. Általánosságban azonban elmondható, hogy a rövidebb hullámhosszú lézerek ára és üzemeltetési költsége magasabb, mint a CO₂ lézereké vagy az 1064 nm-es Nd:YAG lézereké.

Számítógépezérelt (CNC) megmunkáló-berendezések: A tömeggyártás vagy akár a nagy precizitású megmunkálás elképzelhetetlen lenne számítógépes vezérlés nélkül. A vezérlés alapja valamilyen – többnyire szabványos – vektoros leíró nyelv, amely többek között tartalmazza a megmunkálandó anyag és a megmunkáló szerszám (akár egy lézersugár) egymáshoz viszonyított mozgásának pályáját, továbbá a szerszámra és a megmunkálás paramétereire vonatkozó információkat. Rendszertől függően a vektoros nyelv lehet abszolút koordináta, vagy relatív elmozdulás alapú. Bitmap formátumban rendelkezésre álló képek, alakzatok leképzéséhez azt először vagy vektorizálni kell a kép kontúrjainak kiemelésével, vagy pásztázó [scanning] eltérítési módot alkalmazva pixelről pixelre haladva áll elő az eredmény.

Flexibilis áramköri hordozóanyagok: A merev nyomtatott huzalozású lemezek mellett egyre elterjedtebben használnak flexibilis hordozókat összeköttetések vagy akár teljes áramkörök megvalósítására. A két legelterjedtebben alkalmazott flexibilis hordozóanyag a poliészter és a poliimid. A poliésztert alacsony ára miatt egy-, illetve kétoldalas formában, számológépekben,

billentyűzetekben, gépjármű műszerfalakban elterjedten alkalmazzák. A furatok kialakításához egyszerűbb esetben mechanikus lyukasztást, kisebb furatoknál azonban a CO₂ lézeres fúrást alkalmazzák.

Flexibilis áramköröket hordozható készülékekben (digitális fényképező, kamera, discman) is alkalmaznak a jobb helykihasználás érdekében. A miniatürizálás jelenlegi mértéke 100 µm alatti mikroviák készítését is szükségessé teszi, amik csak speciálisan lézeres megmunkáláshoz tervezett poliimidek (Upilex, Kapton) és frekvenciaháromszorozott Nd:YAG lézer alkalmazásával valósíthatók meg.

Keresztmetszeti csiszolat: a felületen vagy az anyagban levő vagy létrehozott struktúrák vizsgálatára számos roncsolásmentes [non-destructive] lehetőség kínálkozik. Például optikai mikroszkóppal felülnézetből tanulmányozhatunk egy lézerrel készített furatot, de ez már a szükséges nagy nagyításból adódó pár mikrométeres mélységélesség miatt sem alkalmas arra, hogy a furat falprofiljáról kvalitatív (minőségi) képet alkossunk. Ahhoz, hogy egy ilyen furatot „oldalnézetből” is megvizsgálhassunk, szükségünk van a keresztmetszeti képére, amin akár kvantitatív (számszerű) vizsgálatokat is végezhetünk. Ehhez keresztmetszeti csiszolatot [cross-section, micro-section, X-section] kell készítenünk. A vizsgálandó anyagot először műgyantába öntjük. A műgyanták jellemzői (szilárdulási idő, keménység stb.) széles skálán mozognak. A műgyantába ágyazott vizsgálandó mintát ezután a megfelelő mélységig becsiszoljuk, egyre finomabb csiszolópapírokkal. (Ezeket a felületegységre eső szemcsék száma jellemezi.) Az egyre finomodó csiszolópapírokkal a csiszolási sebesség csökken, viszont az előző papír karcait eltünteti és annál kevésbé mély karcokat vág a csiszolat felületébe. Az elkészített csiszolatot ezek után optikai mikroszkóppal elemezzük. A keresztcsiszolatok készítése során – főleg a napjainkban vizsgált struktúrák mérete mellett – számos probléma merülhet fel: pl. a kiöntőanyag megkötése közbeni zsugorodása miatt a gyanta és a minta között pár mikronos rés alakulhat ki, vagy akár többrétegű struktúrák vizsgálatánál egyes puhább rétegek csiszolás közben a másik rétegre kenődhetnek, ezzel nehezítve a kiértékelést.

Felületi profilvizsgálat: a felületen kialakított struktúrák pontos, kvantitatív vizsgálatának roncsolásmentes lehetősége a különböző elven működő profilvizsgáló készülékek alkalmazása. A méréshez ezek használhatnak akár egy nagyon finom tűt (kontakt módszert), vagy optikailag, fény segítségével (non-kontakt módon) tapogathatják le a felszínt. Ezek a berendezések z irányban akár pár nanométeres mérési pontosságra is képesek lehetnek.

Mérési feladat:

A mérés során flexibilis áramköri hordozóanyagba lézerrel furatokat készítenek, ennek eredményét megvizsgáljuk és kiértékeljük.

A mérési feladat részletes leírása:

1. Lézeres furatkészítés 125 µm/35 µm-es poliészter/réz hordozóba CO₂ lézerrel: a furatokat egy 10x10-es mátrixban készítjük, az egyik tengely mentén a teljesítményt növeljük 1 W-tól 11 W-ig, a másik tengely mentén pedig a megvilágítási időt változtatjuk 1 ms és 11 ms között. A furatmátrixból 3 példányt készítenek a további vizsgálatok érdekében.

A hordozót a megfelelő méretre vágjuk és rögzítjük az X-Y asztalon, amelynek segítségével a hordozót pozícionáljuk. A fent leírt tesztábra elkészítésére felprogramozzuk a vezérlő számítógépet, majd meggyőződünk róla, hogy a lézerforrás bekapcsolása semmilyen biztonsági kockázatot nem vet fel. Felvesszük a védőszemüveget. Kinyitjuk az optikai elemeket védő levegőáramoltatást, majd elindítjuk a programot. A megmunkáló-állomás az ábrát egyéb beavatkozás nélkül előállítja.

2. Keresztmetszeti csiszolat előkészítése: a kivágott furatmátrixot előkészítjük műgyantába ágyazásra, majd elvégezzük a kiöntést. A szilárdulási idő kb. 15 perc.

A darabot úgy vágjuk ki, hogy a vizsgálandó keresztmetszet a közeli párhuzamos élnél ne legyen 1-2 mm-nél távolabb, ellenkező esetben csak a felesleges csiszolási időt növelnénk.

Elektronikai technológia laboratórium

A mintát egy tégelybe helyezzük, majd ráöntjük a por és folyadék komponensből kikevert kiöntő anyagot. Ezt 2 bar nyomáson, 15 percig hagyjuk állni, így a műgyanta buborék-, és résmentesen [gap-free] fog megszilárdulni.

3. Lézeres furatkészítés 355 nm-es Nd:YAG lézerrel: a furatokat egy 10x10-es mátrixban készítjük, egyik tengely mentén az impulzusszámot növeljük 10-től 110-ig, a másik tengely mentén az impulzusenergiát 10 μJ -tól 110 μJ -ig.

A hordozót rögzítjük az Nd:YAG lézeres megmunkáló-állomás X-Y asztalán, majd a védőszemüvegek felvétele után, a célzófény segítségével pozicionáljuk. A tesztábrát megrajzoljuk a grafikus kezelőfelület segítségével, majd ellenőrizzük, hogy a lézer biztonságos működtetési körülményei teljesülnek-e. Az elszívó rendszer bekapcsolása után elindíthatjuk a furatok elkészítését.

4. Optikai mikroszkópos vizsgálat elvégzése a két, különböző lézerrel készített furatokon: a furatmátrixokat különböző fényforrásokkal megvilágítva összehasonlítjuk a keletkezett furatok jellegét.

A furatok vizsgálatát kétféle mikroszkóppal végezzük. Egyrészt egy kisebb nagyítást (10-100x) adó, így nagyobb felületet is leképező, és nagyobb mélységélességű sztereómikroszkóppal, majd egy akár 1000-szeres nagyítást is nyújtó un. fémmikroszkóppal is elemezzük az elkészült furatokat, amelynek mélységélessége azonban maximális nagyítás mellett pár mikrométert sem ér el. Mindkét mikroszkóp esetén megismerkedünk a különböző megvilágítási módszerek által nyerhető képi információ sokszínűségével.

5. Felületi profilvizsgálat elvégzése egyes furatokon: az Alpha-Step profilvizsgáló berendezéssel is összehasonlítjuk a kétféle módon készült furatmátrix egyes furatait, azokon pontos méréseket végzünk.

A mintát a profilvizsgáló berendezésbe helyezzük és a mérés helyére pozicionáljuk. A minta tulajdonságai alapján beállítjuk a mérést meghatározó paramétereket, majd a mérés elvégzése után kiértékeljük az eredményeket.

6. Keresztmetszeti csiszolatok elkészítése: a CO₂ lézerrel készített furatmátrix egy kiválasztott sorának keresztmetszetét kívánjuk elkészíteni.

Ehhez 240-es, 500-as, 1200-as és legvégül 4000-es finomságú csiszolópapírokat használunk. Az elkészített csiszolatot mikroszkóppal megvizsgáljuk és összehasonlítjuk az UV Nd:YAG lézer által készített furatok előre elkészített keresztcsiszolatával.

6. Tanulságok levonása a lézer működési üzemmódjának és hullámhosszának hatásáról lézeres furatkészítés esetén.

Ellenőrző kérdések

1. Milyen különleges tulajdonságai vannak a lézerfénynek?
2. Vázzon fel egy ívlámpával pumpált lézerberendezést!
3. Mit befolyásol a lézer hullámhossza a megmunkálás során?
4. Milyen lézertípusokat alkalmaznak anyagmegmunkálásra az elektronikai technológiában?
5. Ismertesse a két legelterjedtebben alkalmazott flexibilis hordozót és azok alkalmazásait!
6. Milyen roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálati módszereket ismer?