7. Lézeres anyagmegmunkálás

2000-ben >25000 lézeres anyagmegmunkáló berendezést adtak el a világban, ami az összes nem lézerdióda eladások 19%-a, árát tekintve 1,3 milliárd dollárnál többet költöttek ezekre, ami a piaci részesedés ~60%-a.

	Ipari megmunkáló lézerrendszerek	m$	db	1 db ára $
1	CO_2 lézer (átáramoltatásos)	453	3625	124966
2	Lámpa gerjesztésû szilárdtest lézer	354	5368	65946
3	Excimer lézer	353	1030	342718
4	CO_2 lézer (zárt rendszerû)	76	7895	9626
5	LD gerjesztésû szilárdtest lézer	60	2079	28860
6	He-Cd lézer	10	1700	5882

7.1 táblázat Ipari lézereladások 2000-ben (forrás *Laser Focus World,* 2001. január)

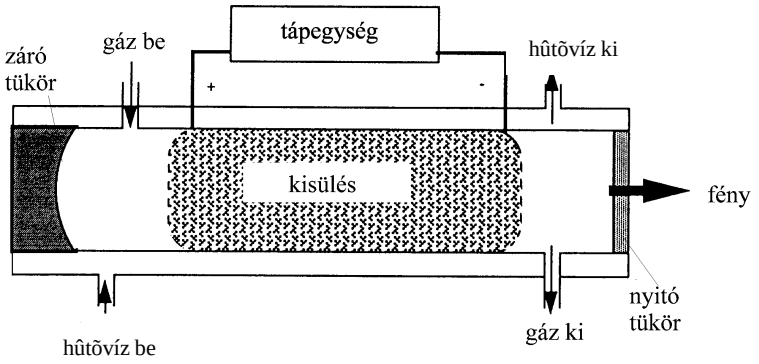
Az eladott db számot összegezve ~11500 db CO_2 lézer, ~7400 db szilárdtest lézer (hagyományos illetve LD gerjesztésû) kelt el anyagmegmunkálás céljára, de árát tekintve tekintélyes helyen áll az excimer lézer is.

7.1 Ipari megmunkálásokra használt lézerek

1.) CO_2 lézer a CO_2 molekula vibrációs szintjei között mûködik, a legnagyobb teljesítményû gázlézer (>100 kW gázdinamikus rendszerû), legnagyobb a hatásfoka is (15-20%). Vibrációs szintekre szuperponálódó rotációs átmenetek között a 9,6 és 10,6 μm körül 40-40 vonalon mûködõképes.

Felhasználástól, teljesítményigénytõl függõen különbözõ konstrukciók vannak, gáz-átáramoltatásos rendszerek (lassú v. gyors áramlású), zárt rendszerek, hullámvezetõ, transzverzális áramlású és kisülésû (atmoszférikus, gázdinamikus). Az áramoltatás szerepe a disszociációs termékek eltávolítása (pl. CO) és a hûtés.

a) lassú áramoltatású rendszer (7.1 ábra)



7.1 ábra Lassú gázáramoltatású CO_2 lézer tipikus felépítése.

Tipikus mûködési paraméterek: 20 l/perc gázáramlási sebesség (10-20 torr nyomású CO_2, He, N_2 keverék 1-2 cm-es átmérõjû üvegcsõben, a nyomás és az átmérõ szorzata állandó optimális mûködéshez), 7 l/perc a hûtõfolyadék sebessége, optimális gázhõmérséklet 20°C, elérhetõ teljesítmény 30-50 W/m. Nagy teljesítményhez hosszú rendszer kell.

Kis teljesítményigényû felhasználások: ellenállások trimmelése, kerámia-vágás, vékony (<1mm) vastag fémlemezek vágása, (lézeres sebészet).

b.) Gyors áramoltatású rendszer

A gázsebesség a kisülési zónában 50 m/s, 0,5-1 kW/m elérhetõ, táplálás: DC, AC vagy RF. Az áramoltatott gázt hõkicserélõvel hûtik és gondoskodnak a $CO \rightarrow CO_2$ visszaalakításáról. Szinte zárt rendszer, viszonylag kicsi a gázfogyasztás. 1-3 kW-os rendszereket használnak néhány mm vastag fémek vágásához.

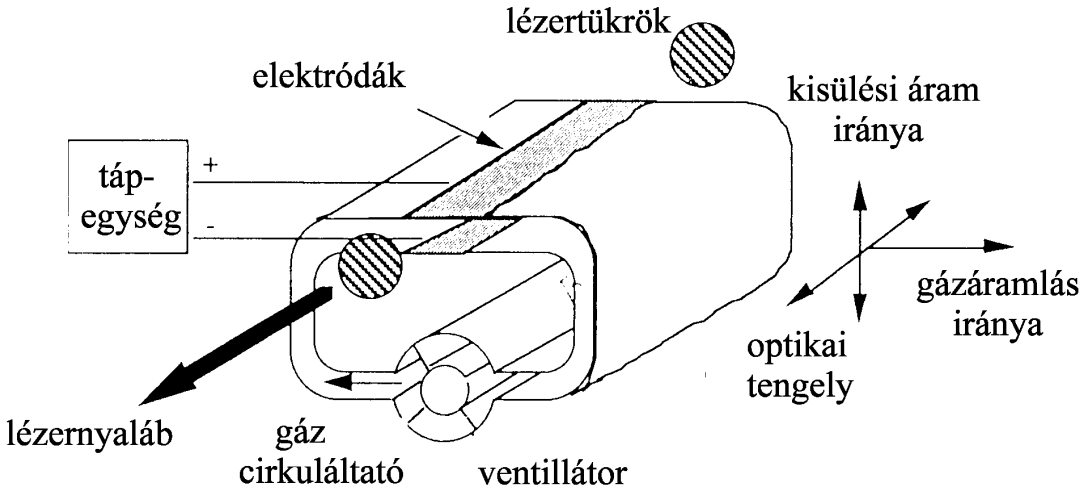
c.) Zárt rendszerek

A $CO \rightarrow CO_2$ regenerálásról gondoskodni kell, különben néhány perc alatt megszûnik a lézermûködés, ha a gáz nem áramlik. 1% H_2O hozzáadása:

$CO^* + OH \rightarrow CO_2^* + H$ vagy 300°C Ni katód mint katalizátor alkalmazásával az élettartam >10000 óra, ~ 60W/m elérhetõ.

Tipikus felhasználások: ~1 W-os teljesítményû méréstechnikai célokra, ~10 W-os mikrosebészet, mikromegmunkálás.

d.) Transzverzális áramoltatású rendszer (7.2 ábra)



7.2 ábra Transzverzális kisülésû és áramoltatású CO_2 lézer tipikus felépítése.

Jó a hûtés, nagyobb nyomáson mûködik (~100 torr), ezért is kell a keresztirányú kisülés. Elérhetõ teljesítmény 1-20 kW, mely a legkülönbözõbb fémmegmunkálásokra (hegesztés, felületi keményítés, felületi ötvözés, stb.) elegendõ.

Rosszabbak a nyaláb optikai tulajdonságai, mint a gyors áramoltatású longitudinális rendszereké, ezért vágási feladatokra inkább azokat alkalmazzák.

2.) Szilárdtest lézerek

Lámpás (η = 1-3%) vagy lézerdióda gerjesztésû (η ~ 10%), cw vagy impulzusban mûködõ lézerek. Legelterjedtebben használják a Nd:YAG lézert, melynek jellemzõ hullámhossza 1,06 µm.

Anyagmegmunkálásra használt típusok:

fúrás 50-100 W átlagteljesítményû impulzuslézer, melynek paraméterei: E_p=5-10 J, t_p=1-10 ms, ¦ =10-100 Hz

hegesztés 2kW üvegszálba csatolva (emiatt kellemesebb a használata, mint a CO_2 lézeré)

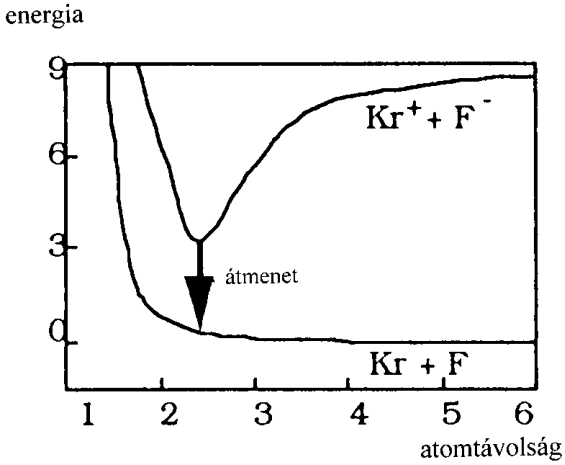
Frekvenciakétszerezett 532 nm-es ~10W-os kialakítású Nd-YAG komoly versenytársa az Ar-ion lézernek. Létezik frekvencia-háromszorozott és négyszerezett változata is, az elõbbinek 355 nm, az utóbbinak 266 nm a hullámhossza. A rövidebb hullámhosszú szilárdtest lézer komoly versenytársa az UV hullámhosszon mûködõ igen drága excimer lézereknek.

Számos Nd - YAG - hoz hasonló egyéb kristályos rendszert is használnak, fõbb fajtáik is hullámhosszuk:

Er (erbium) - YAG	2,94 µm
Ho (holmium) - YAG	2,1 µm
Nd - YAP	1,079 µm
Nd - YLF	1,047, 1,053, 1,31 - 1,32 µm

3.) Excimer lézerek

Az excimer szó az excited dimer (gerjesztett kettõs) angol szavakból származik, kétatomos gerjesztett molekula egy nemesgázatom (Kr, Ar vagy Xe) és egy halogénatom (F vagy Cl) együttese. A két atom csak gerjesztett állapotában marad együtt egy rövid idõre (5-15 ns a gerjesztett állapot tipikus élettartama), alapállapotban a molekula nem stabil, azonnal szétesik összetevõire. A 7.3 ábra a KrF molekula energiáját mutatja az atomtávolság függvényében.



7.3 ábra KrF molekula lézermûködésre alkalmas átmenete.

A keresztirányú, rövid idejû kisüléssel gerjesztett excimer lézerek atmoszférához közeli nyomáson mûködnek, rövid idejû lézerimpulzust bocsátanak ki. A kapható típusokat mutatja a 7.2 táblázat.

Lézertípus	Hullámhossz [nm]	Átlagteljesítmény [W]
ArF	193	50
KrF	248	125
XeCl	308	200
XeF	351	50

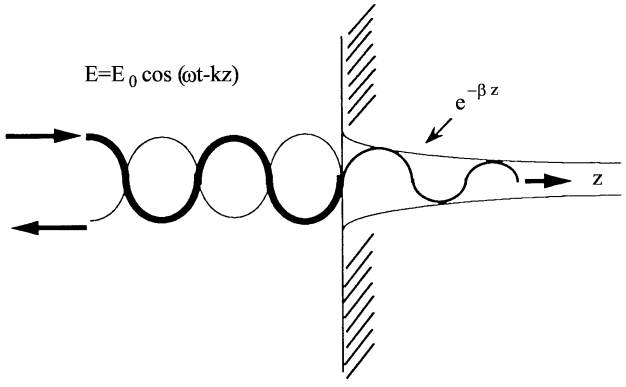
7.2 táblázat Ipari excimer lézerek hullámhossza és átlagteljesítménye.

Az atmoszférikus össznyomású gázkeverék összetétele: 4-5 mbar halogén, 30-500 mbar argon, kripton vagy xenon, a többi He vagy Ne segédgáz. A gerjesztõ áram- és a kibocsátott fényimpulzusok tipikus adatai: t_{gerj} = 50-100 ns, U_{gerj} = 35-50 kV, J = 1 kA/cm^2, E_p = 100-4000 mJ, t_p = 10-40 ns, n < 500 Hz, h = 2-4 %. Egy gáztöltettel ~10^6 impulzus generálható. Magas a mûködtetési költség is!

A megmunkáló rendszerek egységnyi átlagteljesítményre esõ beszerzési ill. üzemeltetési költségét tekintve a legdrágább az excimer lézer, utána következik a Nd-YAG, és a legolcsóbb a CO_2 lézer.

7.2 Fény-anyag kölcsönhatása megmunkáláskor

A megmunkálandó felületre érkezõ fény egy része reflektálódik, egy része elnyelõdik, egy része behatol az anyagba (7.4. ábra). A folyamatok egymáshoz képesti aránya függ az anyagfajtától, a hullámhossztól és a fény intenzitásától.



7.4 ábra Felülethez érkezõ elektromágneses hullám.

A fény hatására az elektronok rezgésbe jönnek, a fékezési sugárzás ellentéte fordul elõ, az energiatöbbletet kisugározza az elektron ill. a kristályrács rezgési állapota növekszik, ami nem más, mint a hõmérséklet növekedése.

Ha az elnyelt energia megfelelõen nagy, a rezgés "széttépi" a szerkezetet → megolvad az anyag, ha még nagyobb, elgõzölög, ekkor még mindig képes energiaelnyelésre, de csak kevéssé, mert kötött állapotú elektronok korlátozottan

képesek az energia felvételére. Megváltozik a helyzet, ha kialakul a plazma állapot, amikor nagysûrûségû szabad töltéshordozók vannak jelen.

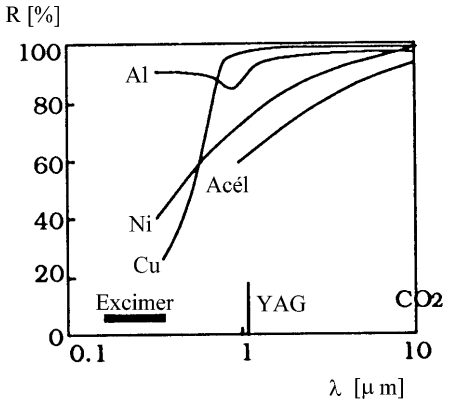
Az elnyelés mértéke és a reflexió összefüggenek. Fémekben a kvázi szabad elektronok széles energiatartományban képesek elnyelni és egyúttal rezgésbe jönni, fényt kibocsátani. Ezért a behatolás csak 1-2 atomátmérõ nagyságrendû.

Merõleges beesésnél a reflexió a komplex törésmutató függvénye:

$$R_{\perp} = \frac{(1-n')^2 + n''^2}{(1+n')^2 + n''^2}$$

$$\tilde{n} = n' + jn''$$

az így számolt reflexió tökéletesen sík tiszta anyagra igaz merõleges beesésre! A 7.5 ábra néhány fém így számolt reflexiójának hullámhosszfüggését mutatja. A 7.3 táblázatban pedig megadjuk néhány anyag komplex törésmutatóját és a számított reflexiót 1,06 µm hullámhosszra.



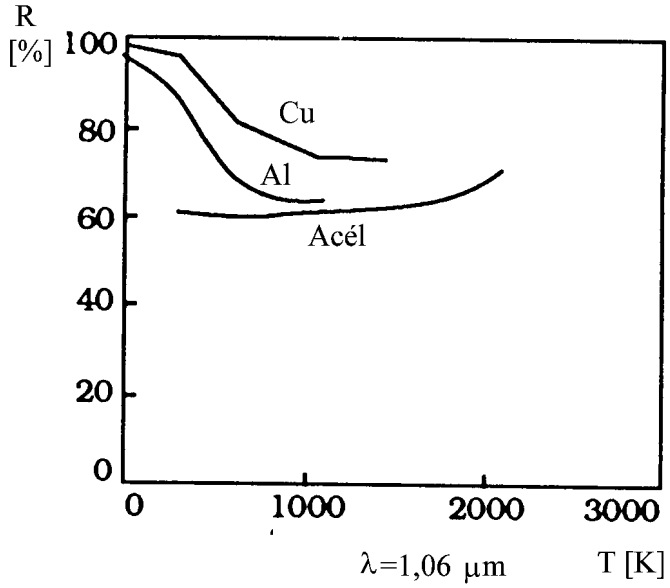
7.5 ábra Néhány fém hullámhosszfüggõ reflexiója merõleges beesésre

Az elnyelés ill. behatolás mértéke $E = E_0 e^{-2pn''d/l} = E_0 e^{-bd/2}$ alapján függ n'' – tõl illetve a b tényezõtõl.

anyag	n''	n'	R
Al	8,5	1,75	0,91
Cu	6,93	0,15	0,99
Fe	4,44	3,81	0,64
Mo	3,55	3,83	0,57
Ni	5,26	2,62	0,74
Pb	5,40	1,41	0,84
Sn	1,60	4,70	0,46
Ti	4,0	3,8	0,63
W	3,52	3,04	0,58
Zn	3,48	2,88	0,58
üveg	0	1,5	0,04

7.3 táblázat Néhány anyag komplex törésmutatója és reflexiója 1,06 µm-en.

Csökkenõ hullámhosszal nõ az elnyelés mértéke és jelentõsen csökken a reflexió. Azonban a hullámhosszfüggésen kívül figyelembe kell venni az anyag hõmérsékletváltozását is, u.i. magasabb hõmérsékleten felerõsödik a kristályrezgés és az elektron kevésbé tudja energiáját fénykibocsátással leadni, azaz csökken az anyagok reflexiója. Ezt mutatja a 7.6 ábra.



7.6. ábra Néhány fém reflexiója a fém hõmérséklete függvényében

7.3 A lézeres megmunkálás elõnyei

VÁGÁS: nincs mechanikus igénybevétel, nagy a pozicionálási pontosság, nagy a megmunkálási sebesség, csekély a termikus zóna, a geometria bonyolultságával nõ a termelékenység, jó a felületi minõség.

HEGESZTÉS: kitûnõ minõségû, keskeny varratok, csekély a megolvasztott zóna, nagy hegesztési sebesség, minimális maradó feszültségek, óriási energiasûrûség, változó geometria esetén, változtatható behatolási mélység.

HÕKEZELÉS: átlagosan ötszörös kopásállóság, élettartam növelés érhetõ el, dinamikus hõterhelések valósíthatók meg, nagy korrózióállóság érhetõ el kérgesítéssel, felületkeményítéssel, kompozit rétegek állíthatók elõ, kitûnõ felületi érdesség.

MARKÍROZÁS: nincs mechanikus igénybevétel, szabályozható mélység, tetszõleges ábrák, számok, feliratok, az áruk kész állapotban feliratozhatók, tartós, pontos, esztétikus.

GAZDASÁGOSSÁGI- SZEMPONTOK: magasabb minõségi munkák érhetõk el, jelentõsen nõ a termelékenység, csökken az anyag- és feldolgozási költség, minimális hulladék keletkezik, utólagos megmunkálás nem szükséges, automatizált gyártásba integrálható, megbízható on-line, minõség-ellenõrzés, rugalmasan kihasználható perifériák.

7.4 Lézeres vágás

A leggyakoribb lézeres alkalmazás. Japánban az ipari lézerek 80%-át vágásra használják. Legtöbb esetben gyorsabban és jobb minõségben lehet vágni lézerrel.

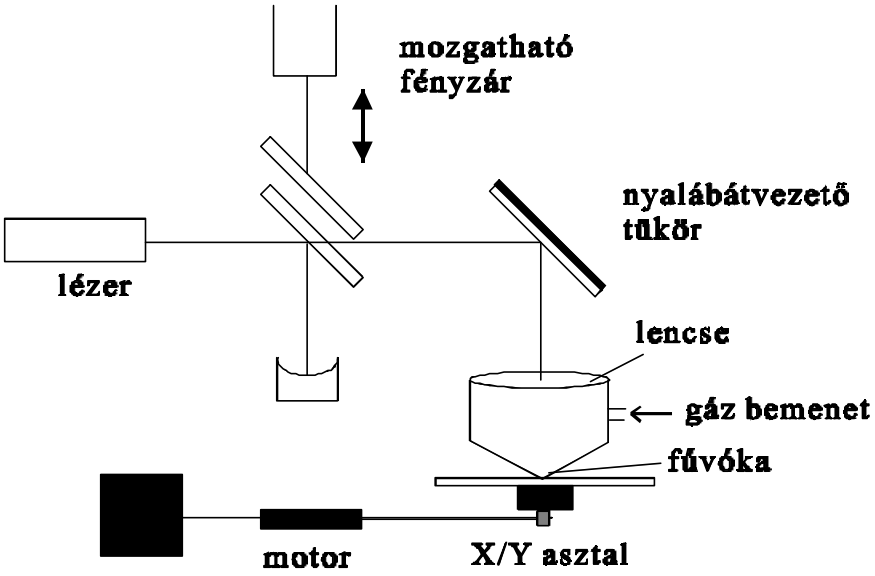
A vágat minõségi jellemzõi:

- keskeny vágási rés (kicsi az anyagveszteség)
- szögletes vágási él (nem lekerekített, mint a legtöbb hõhatásos folyamatban)
- a vágási él sima és tiszta
- nincs sorja
- kicsi a hõhatás zóna
- vastagsági korlát van a teljesítménytõl függõen, jelenleg 10-20 mm vastagság vágható

A folyamat jellemzõi

- gyors
- nem szükséges rögzíteni a munkadarabot (kivéve, ha gyorsan akarjuk mozgatni)
- nincs szerszámkopás, érintkezésmentes technika
- bármely irányban lehet vágni (polarizáció gond?)
- kicsi a zajszint
- könnyen automatizálható, rugalmasan alakítható (software)
- legtöbb anyag vágható (gond csak a nagy reflexiójú fémekkel - Al, Cu - van, de ezek is vághatók)

Egy tipikus elrendezés látható a 7.7 ábrán.



7.7 ábra Tipikus lézeres vágóberendezés.

A fókuszáló optika kialakítása függ a lézer hullámhosszától. A CO_2 lézeres alacsonyabb teljesítményû rendszereknél lehet transzmissziós optikát (lencsét) használni, ami ZnSe, GaAs, CdTe anyagokból készülhet. Nagyobb teljesítményû lézereknél reflexiós kialakítású (pl. gömbtükrös) optika alkalmazható. Nd:YAG vagy excimer lézeres rendszerekhez kvarcból készíthetõ megfelelõ transzmissziós optika.

A vágáshoz segédgázt is alkalmaznak, melynek szerepe: az optika védelme, a megolvadt anyag eltávolítása, a vágás hatékonyságának növelése.

Vágási módszerek

Elgõzölés - a fókuszált nyaláb a forráspont fölé melegíti az anyagot, kezdõ lyuk létesítése, ezután az elnyelés megnõ (a többszörös reflexió miatt)

Olvasztás és kifújás - kezdõ lyukból erõs gázárammal eltávolítható az olvadt anyag; tized akkora teljesítmény kell, mint az elpárologtatáshoz! (néhány ezer fok hõmérséklet különbség van, lásd a 7.4 táblázatban)

Anyagfajta	Olvadáspont [^oC]	Forráspont [^oC]
Al	660	2450
Al_2O_3	2045	2980
acél	1500	2500
vörösréz	1083	2595
wolfram	3410	5930

7.4 táblázat Néhány anyag olvadás- és forráspontja.

Termikus feszültségkeltés, törés rideg anyagok vágására

Tized mm átmérõjû néhány W-os lézernyalábbal helyi melegítéssel keltett mechanikai feszültség hatására széttörhetõk a rossz hõvezetésû anyagok

Karcolás

Ahol törni akarunk, ott az anyag elvékonyításával mechanikailag törhetõvé tehetjük. Pl. Si chip, Al hordozó - kicsi a sérült, hõterhelésû terület!

"Hideg vágás új technika, excimer (UV) lézerek alkalmazásával

UV foton 4 – 5 eV-os energiája szerves anyagokban a (C-C, C-H) kötési energia nagyságrendje. Megfelelõ intenzitás esetén a leválasztott anyagrész eltávozik, anélkül hogy melegítési folyamat indulna be! Fontos felhasználási területek: elektronikai ipar, orvosi felhasználások.

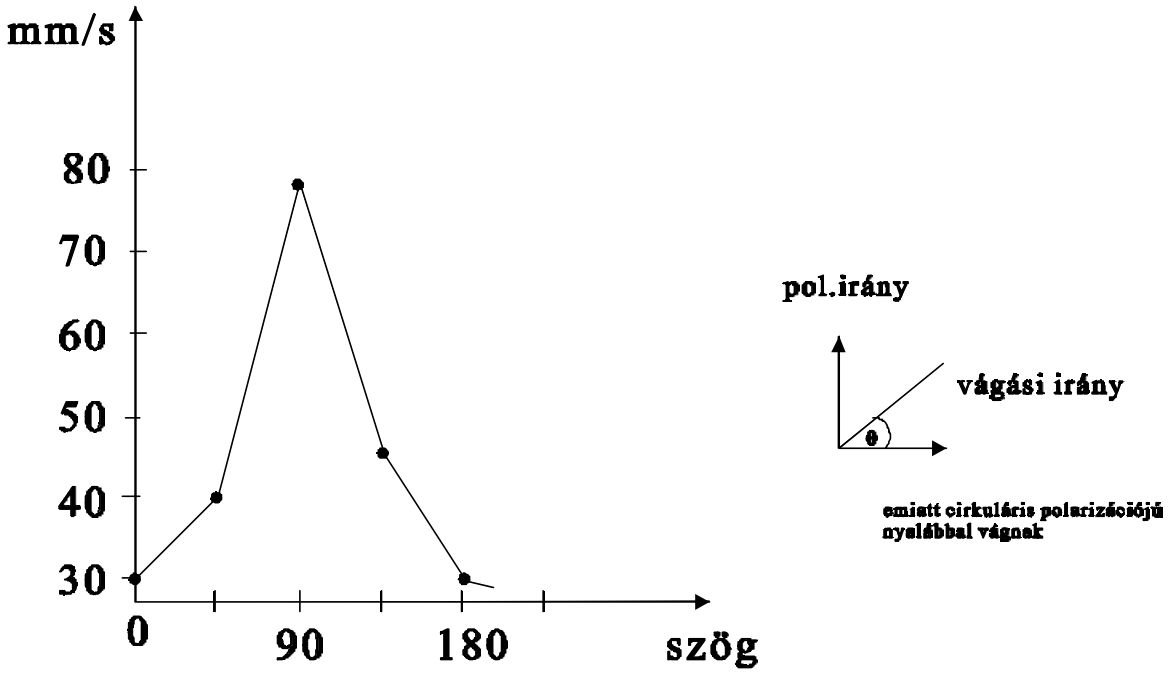
A vágás sok paraméteres probléma

Csak néhány részletkérdés:

1.) Stabil teljesítmény kell, TEM_{oo} móduskép (a fókuszálhatóság miatt).

2.) A teljesítmény növekedésével csökken a vágási idõ, nagyobb anyagvastagság vágható, csökken a hõterhelt zóna mérete (az irodalomban a HAZ rövidítést használják – heat affected zone).

3.) Fontos paraméter a nyaláb polarizációja (7.8 ábra), ezért általában cirkuláris polarizációjú nyalábbal vágnak.



7.8 ábra Lézeres vágás sebességének függése a vágás irányától lineárisan polarizált lézerfény használatakor.

Javasolt irodalom:

W.M.Steen: Laser material processing, Springer (1998)