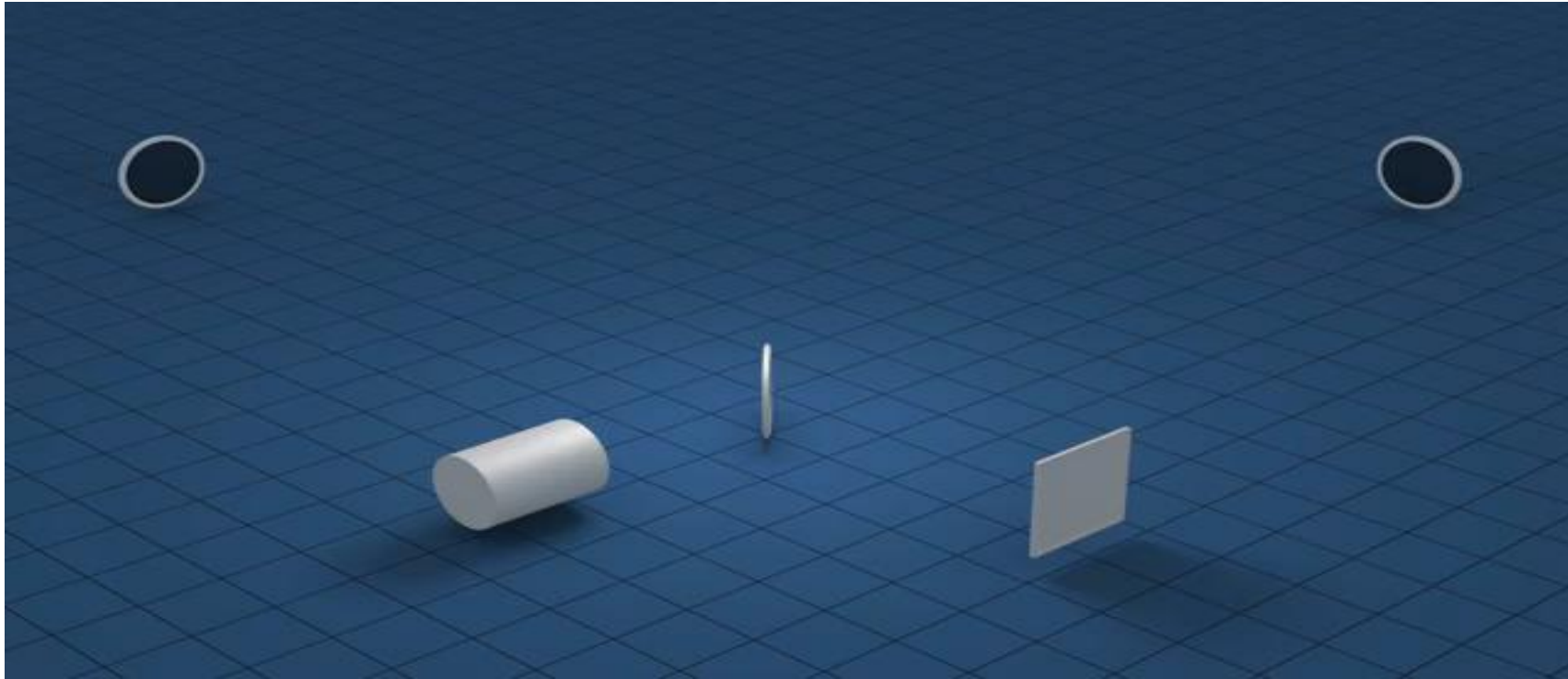


Műszaki lézerfizika

10. előadás: Lézeres áramlásmérés, lézeres anyagmegmunkálás

Ismétlés: a Michelson-interferométer működése



Lézeres áramlásmérés

1, LASER DOPPLER ANEMOMETRY (LDA)

LDA (Lézer Doppler Sebességmérő): lehetőséget biztosít a beavatkozásmentes mérés megvalósítására olyan esetekben, amikor az áramlásba helyezett érzékelők (szenzorok) alkalmazása nehéz vagy nem lehetséges. Egyik legfontosabb korlátozó tulajdonsága viszont az, hogy szükség van a mérés végrehajtásához olyan – az áramlásba bekevert – nyomjelző anyagra, amely az áramlással együtt mozog.

Az eljárás előnyös tulajdonságai:

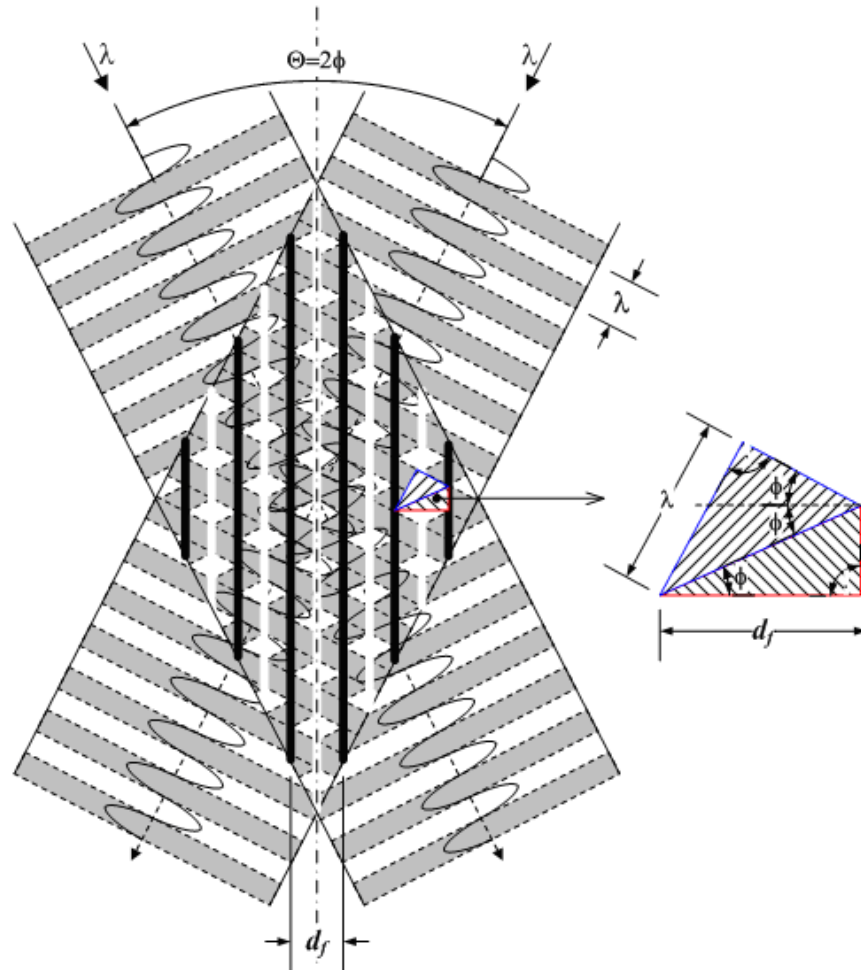
- beavatkozás mentes mérést tesz lehetővé,
- nagy térbeli és időbeli felbontás lehetséges,
- nem igényel különösebb kalibrációt,
- a sebesség mérési tartománya 0-tól szuperszonikus sebességig lehetséges,
- egy, kettő vagy három sebesség komponens egyidejű mérése lehetséges,
- mérési távolság a néhány cm-től a méter nagyságig megoldható,
- pillanatnyi és időbeni átlagolt mérési lehetőség egyaránt lehetséges.

Az eljárás korlátai:

- csak pontbeli mérést tesz lehetővé, vagyis alkalmazásával síkbeli, vagy térbeli áramlásokat csak letapogatásos módszerrel lehet meghatározni,
- időbeli változást csak adott pontban lehet vele követni,
- megfelelő nyomjelző anyag szükséges.

Az LDA mérés elve

Az LDA mérés lényege, hogy abban a pontban, ahol a sebességre kíváncsiak vagyunk, két lézersugarat metszésbe hozunk. A két sugár szimmetriasíkjára merőleges sebességkomponens mérhető. A mérési pont valójában kicsiny mérési térfogat, amely általában néhány milliméter nagyságú. A két lézersugár találkozásánál interferencia lép fel. Ezáltal párhuzamos síkokból álló nagy intenzitású EM tér keletkezik, ezek az interferenciacsíkok adják a mérési térfogatot.



Az interferenciacsíkok távolságát (d_f) a lézer λ hullámhossza és a két lézersugár által bezárt θ szög határozza meg:

$$d_f = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

A mérési térfogaton áthaladó részecske által szórt fény arányban áll a helyi fény intenzitással, azaz periodikusan változni fog az ábrán függőleges áthaladásakor.

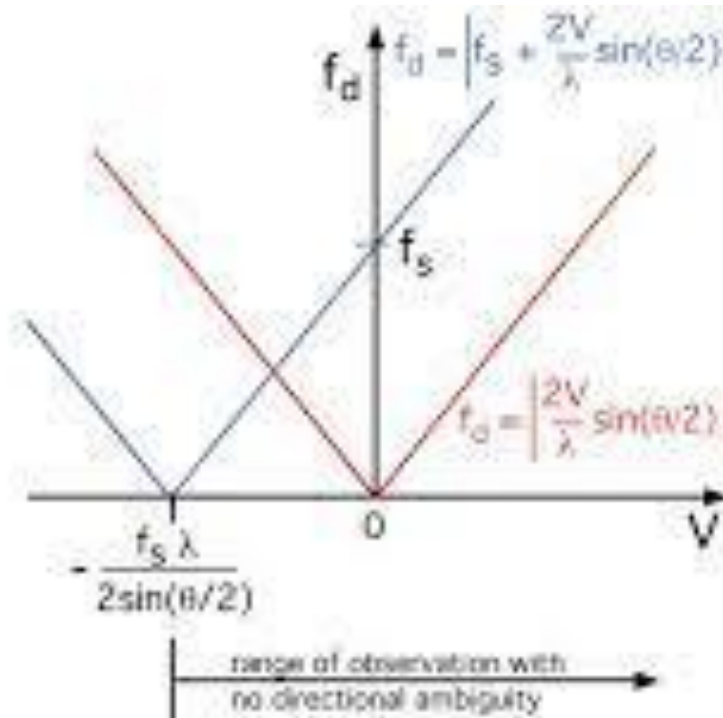
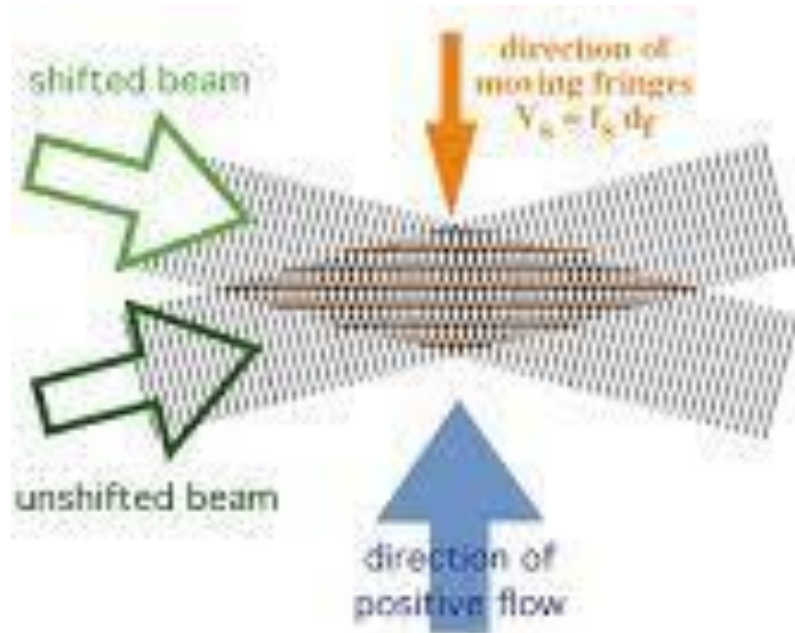
Ha a két sugár frekvenciája azonos, akkor az interferenciacsíkok állnak, tehát a villogás frekvenciája arányos lesz a részecske sebesség komponensének nagyságával (v/d_f)

Ez a mérés azonban nem fog információt szolgáltatni a sebességkomponens előjeléről és nem venné észre a mozdulatlan részecskéket sem.

Az LDA mérés elve/2

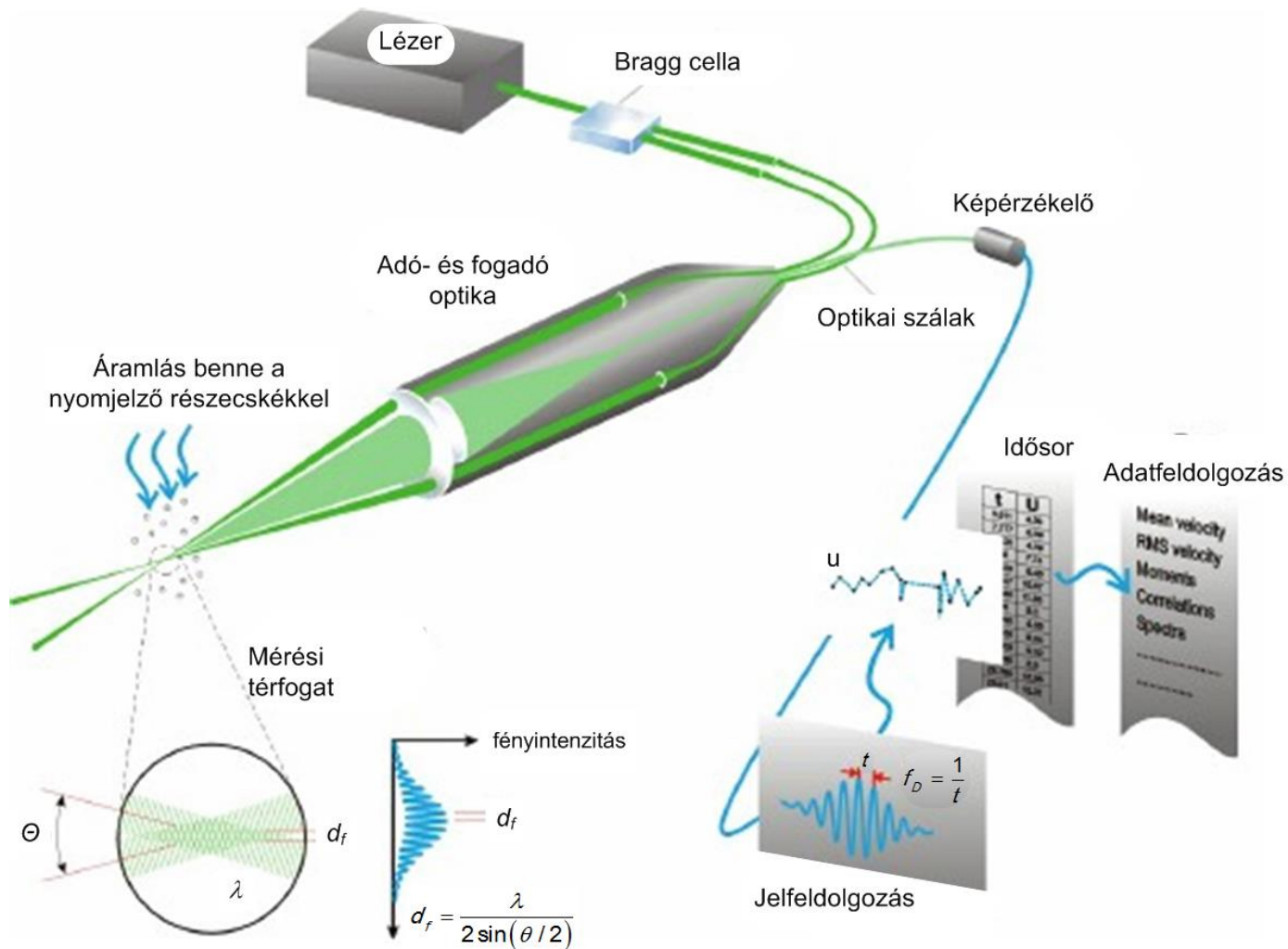
Ha azonban az egyik sugár frekvenciáját egy kissé eltoljuk ($\Delta f = f_s$) egy Bragg-cellával (akusztó-optikai modulátor), akkor az interferenciacsíkok mozogni fognak az ábrán függőleges irányban.

Ilyenkor az álló részecskéken szóródó fény intenzitása is változni fog, méghozzá f_s -sel, és minden villogási frekvencia is növekedni fog f_s -sel. Ha a csíkok sebessége ($=d_f f_s$) nagyobb, mint a részecskék adott sebességkomponensének maximuma, akkor a mérés egyértelmű sebesség értékeket fog adni.



$$d_f = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

Az LDA mérés elve/3



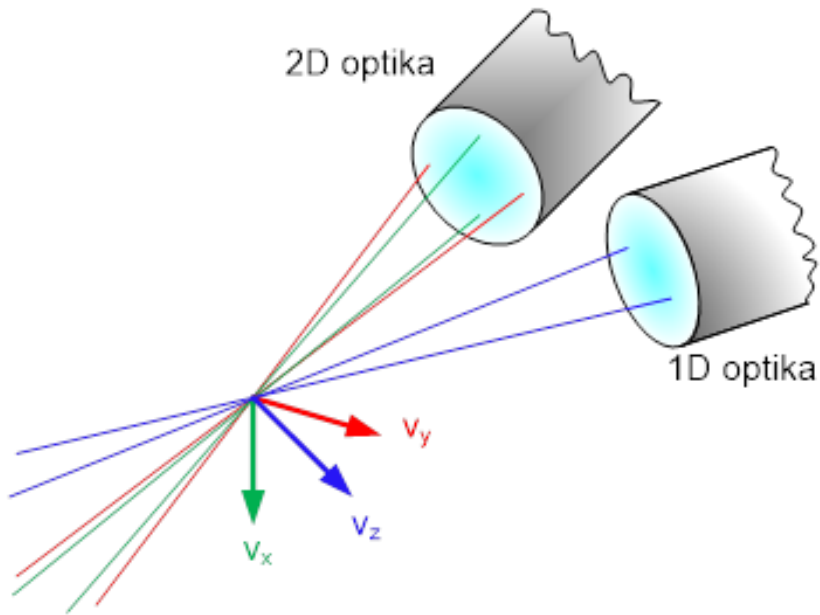
A változó fényintenzitást a fotodetektor konvertálja elektronikus jellé. A jelsorozatot a jelfeldolgozó egység szűri és erősíti, elemzi (FFT).

A méréshez alkalmazott részecskék:

Folyadékok esetén sokszor maga a folyadék tartalmaz a méréshez elegendő mennyiségű és minőségű természetes részecskéket, de gázok esetén szükséges külső részecskék beadagolása a megfelelő mérés elvégzéséhez. Ideális esetben a részecskék elég kicsik ahhoz, hogy jól kövessék az áramlást, valamint elég nagyok ahhoz, hogy megfelelő fényszórást produkáljanak.

A részecskék tipikus mérete az $1 \div 10 \mu\text{m}$ közötti tartományba esik. A részecske anyaga szilárd test (por) vagy folyadék (cseppek). Levegőben gyakran alkalmazott az olajköd. Folyadékokban az üveggömbök használatosak.

Az LDA mérés elve/4

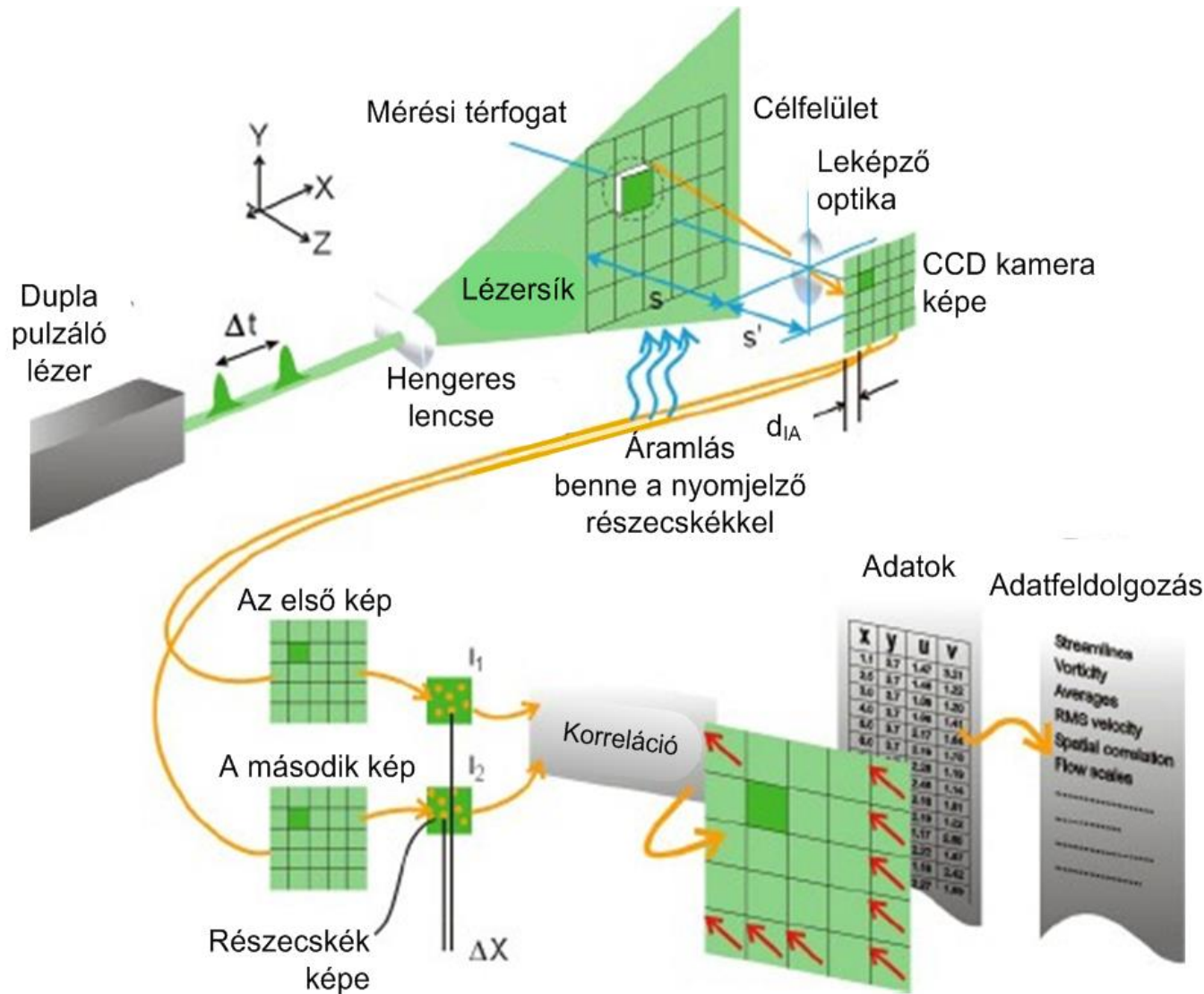


- A sebesség további egy komponensének méréséhez szükséges még két extra sugár.
- Mindhárom sebesség komponens meghatározásához tehát szükséges az előbbi két komponens méréséhez alkalmas optika, valamint plusz egy komponens méréséhez alkalmas optika.
- A megkülönböztethetőség eléréséhez különböző hullámhosszú sugarakat alkalmaznak a különböző sebesség komponensek meghatározásához.
- A három sebesség komponens meghatározásához három fotódetektorra (három különböző hullámhosszra) van szükség, mindegyikhez tartozik egy-egy egyedi interferenciaszűrő, hogy a megfelelő hullámhosszú szórt sugarakat detektálja.
- Három különböző frekvenciájú fényt kibocsájtó lézerről már tanultunk, ez az argonion lézer.

Egyébként miért van a módszer nevében Doppler, hisz itt nem a Doppler eltolódást mérjük?

- Talán azért, mert hasonlít az LDV-re, ahol a sebességet a Doppler-eltolódásból határozzuk meg
- A képletek is hasonlítanak...
- A Bragg-cellában van Doppler-eltolódás

Particle Image Velocimetry (részecske képen alapuló sebesség meghatározás)

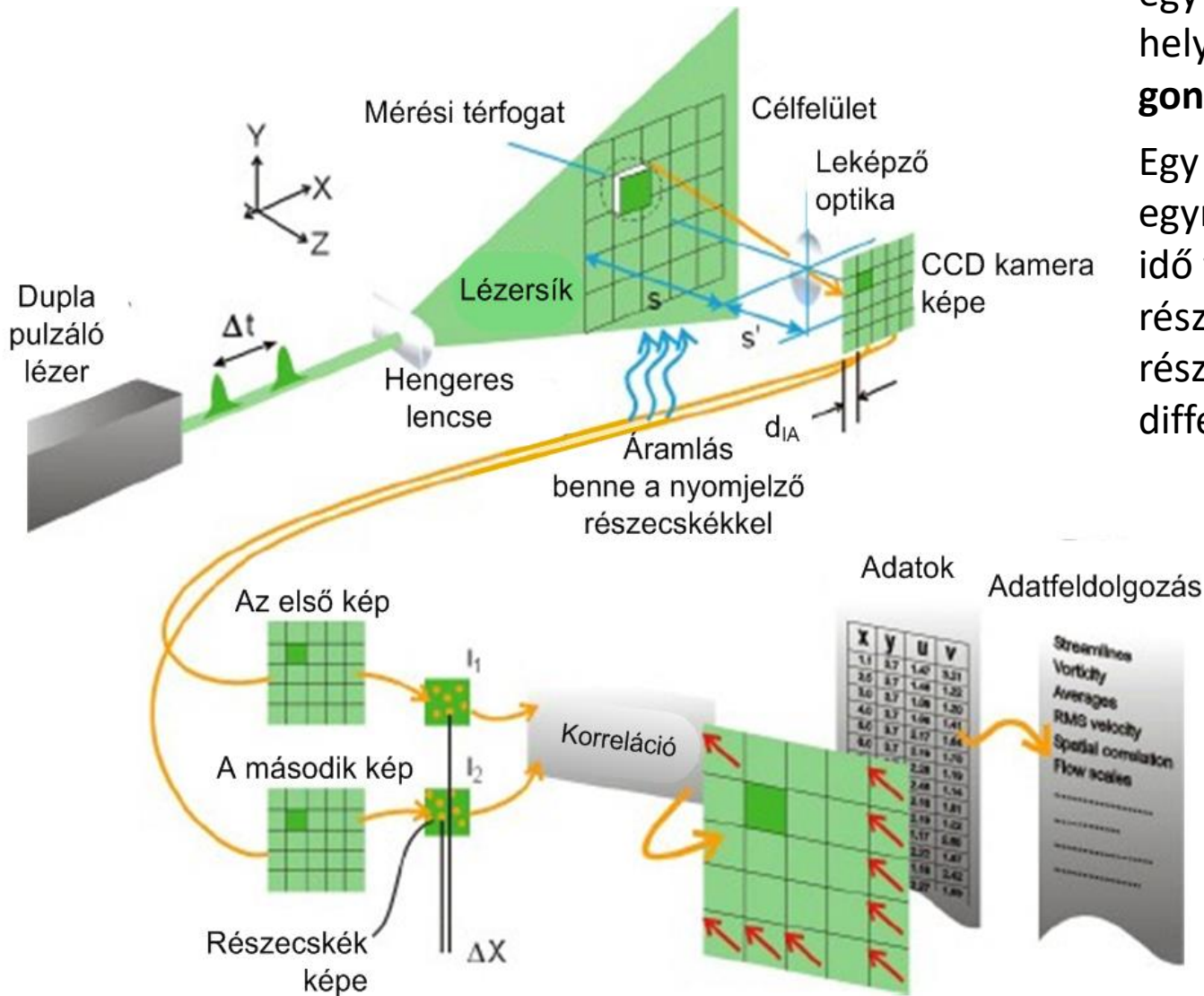


Amíg az LDA rendszer egyszerre csak egy mérési pontban alkalmas a sebesség meghatározására, addig a Particle Image Velocimetry (PIV) alkalmazásával a teljes sebességtér egy adott síkjában kialakult időben változó sebességmező pillanatképe meghatározható.

Az egyszerű PIV rendszerrel képesek vagyunk a kívánt mérési keresztmetszetben a sebességek az adott síkba eső két komponensét is meghatározni.

A sebesség mező valós időben (real-time) meghatározásához szükséges egy lézersíkot erőállító berendezés, egy modern digitális kamera, továbbá egy megfelelő számítógépes rendszer.

PIV/2



Egy impulzus lézer fényét úgy tágítjuk ki egy irányban, hogy egy (itt függőleges) síkot világítunk meg vele. Az áramlásba helyezett **részecskék megvilágításáról tehát e lézerek gondoskodik**, amelyet egy **dupla pulzáló lézer** hoz létre.

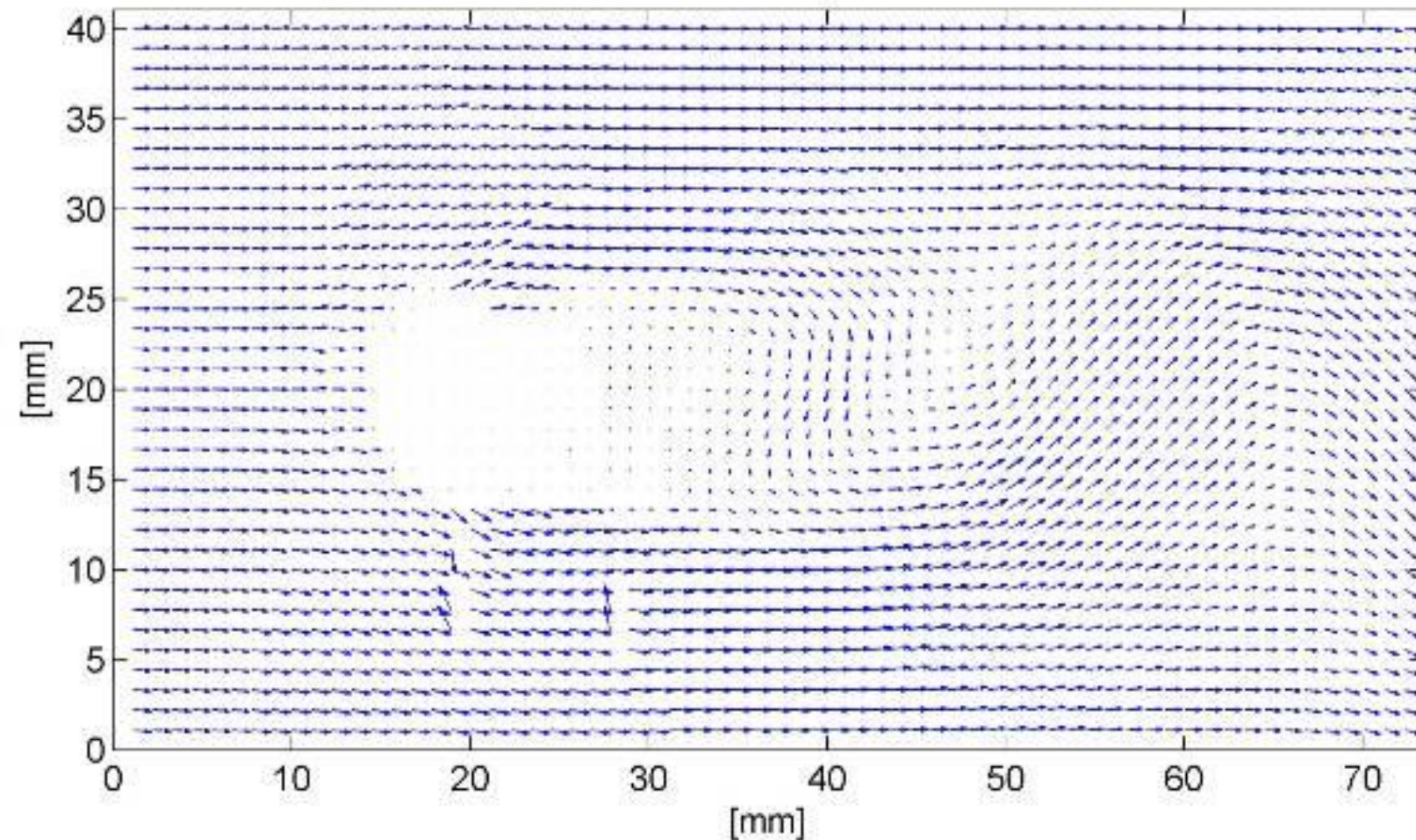
Egy gyors kamera e megvilágított síkról két felvételt készít két egymást követő fényimpulzussal egyidőben, miközben Δt idő telik el. Az áramlásba helyezett, azzal együtt mozgó egy részecske eközben $\Delta \vec{x}$ elmozdulást végez. A vizsgált részecske elmozdulását mérve két fényimpulzus között, differenciálással megkapjuk a vonatkozó sebességvektort:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t}$$

A mérési sorozat egy tagja a két fényimpulzus által megvilágított két képet tartalmazza, amelyen az áramlásba helyezett részecskék sokasága látszik. A képek digitális kamerával készülnek, amely a mérési területet pl. $X_p \times Y_p = 1600 \times 1200$ db pixelre osztja. A kamera által készített képeket a hozzá kapcsolt számítógépre telepített szoftver kis elemzési ablakokra, úgynevezett iterációs területekre osztja.

PIV/3

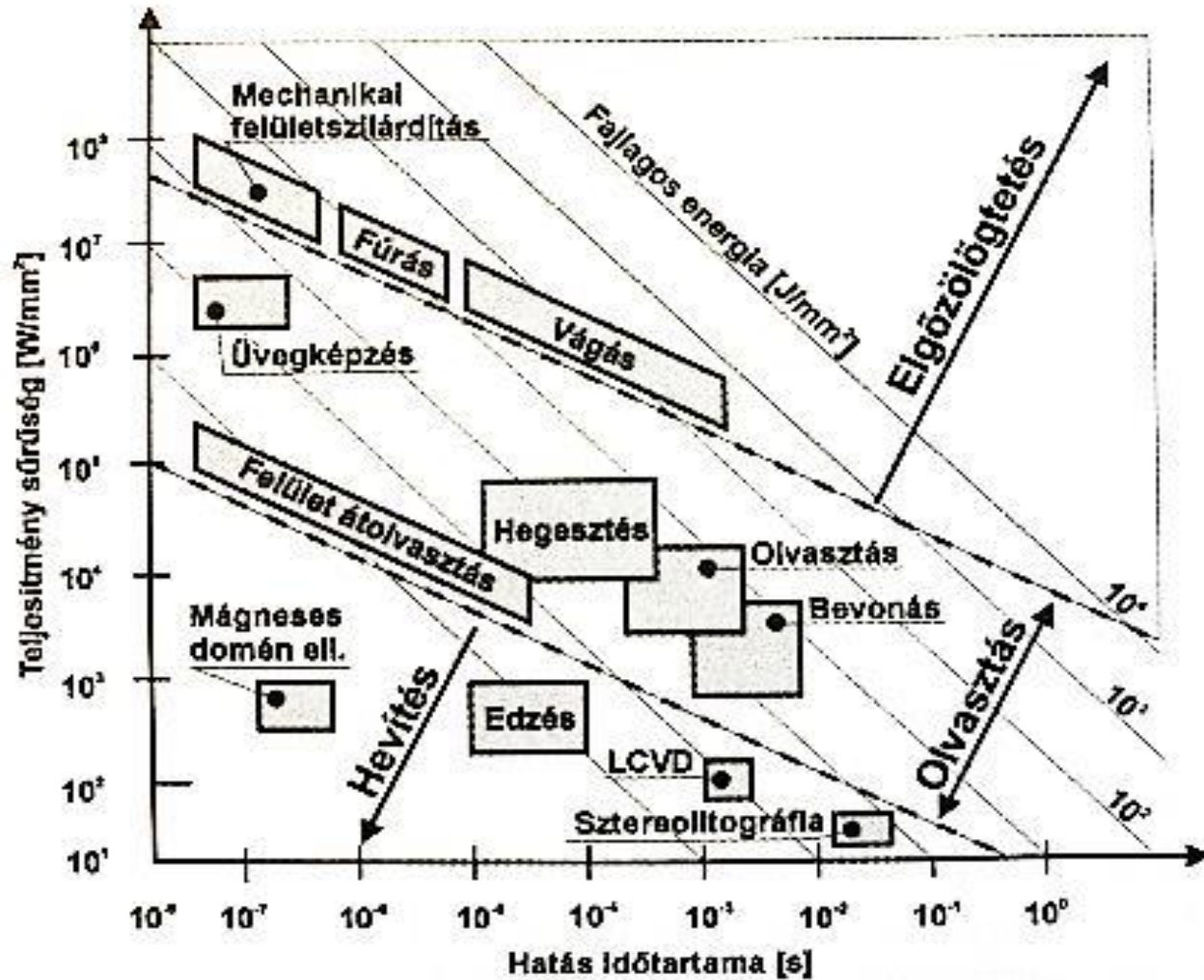
Flow around a heated cylinder at 0,3 m/s



Bonyolult matematikai műveletekkel (kereszt korreláció, iteráció) kapcsolják össze a két képen látszó részecskéket. Ennek a statisztikai összehasonlításnak (párosításnak) az eredményeképpen adódik az elmozdulás legvalószínűbb iránya és nagysága. Az iterációs területeken kapott értékek alapján kapunk az iterációs terület középpontjához rendelt egy-egy sebességvektort. Ezt követően interpolációval a rácspontokban kiszámítható a sebességvektor. Ilyen két képet mutat henger körüli áramlásról.

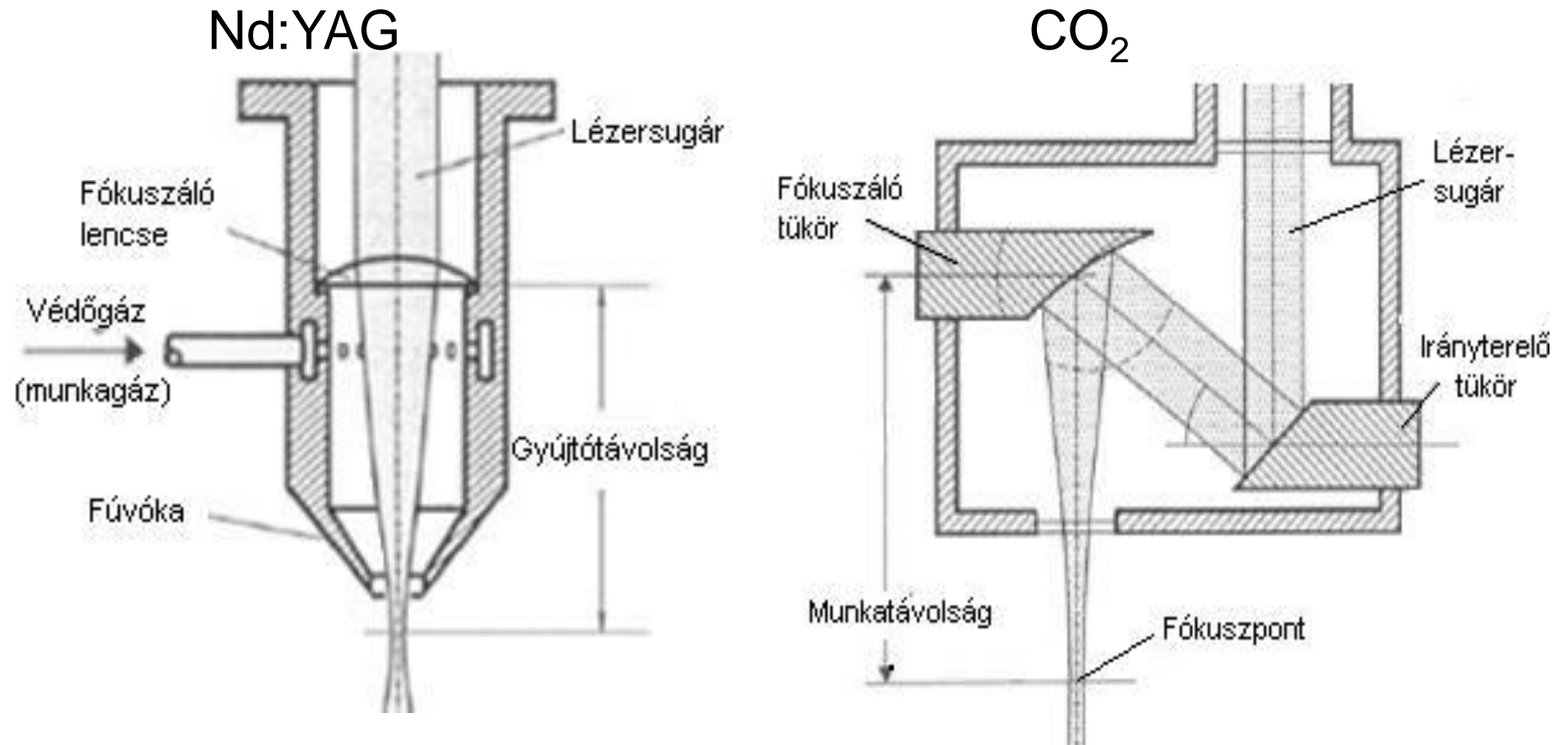
A lézeres anyagmegmunkálás alapjai: lézeres vágás, hegesztés, hőkezelés (kitekintés)

(A kitekintés azt jelenti, hogy a téma túlmutat a jelen tantárgyon. Meg azt is, hogy ennek én nem vagyok szakértője.)



A lézeres anyagmegmunkálás alapjai: lézeres vágás, hegesztés, hőkezelés

Eszközei a legnagyobb teljesítményű IR lézerek



Közeli infravörösben lencsékkel, távoli infravörösben inkább tükrökkel lehet a lézernyalábot a felületre fókuszálni.

Lézeres vágás

Mikor használjuk?

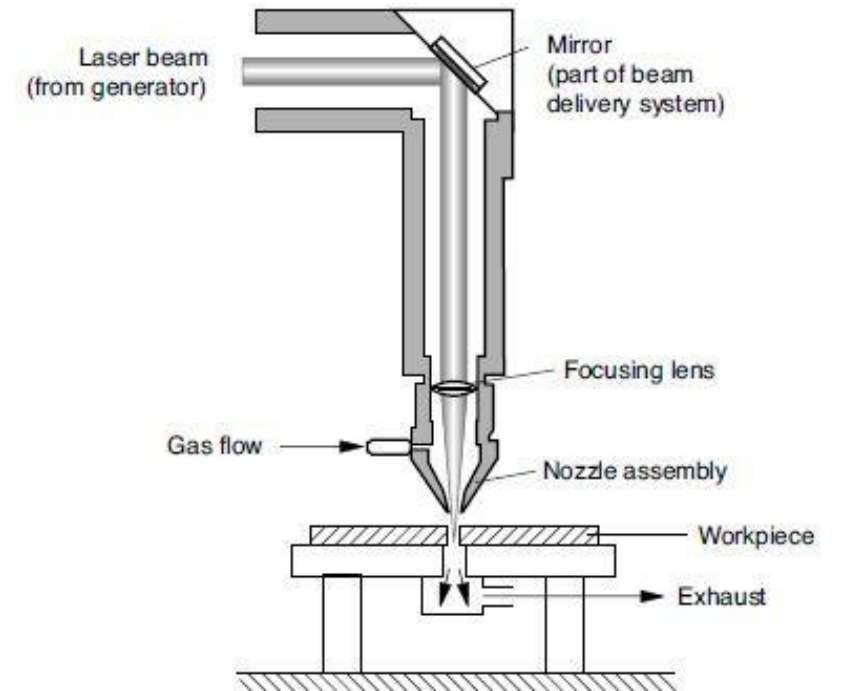
- kis darabszámok esetén
- bonyolult felületeken bonyolult alakzatok vágásánál

Jellemzői:

- nagyfokú automatizálhatóság
- nagy pontosság
- vékony vágási vonal => igen kicsi elvesztett anyagmennyiség
- nincs kontaktus a munkaeszköz és a vágandó anyag között
- nemfémes anyagok előnyben

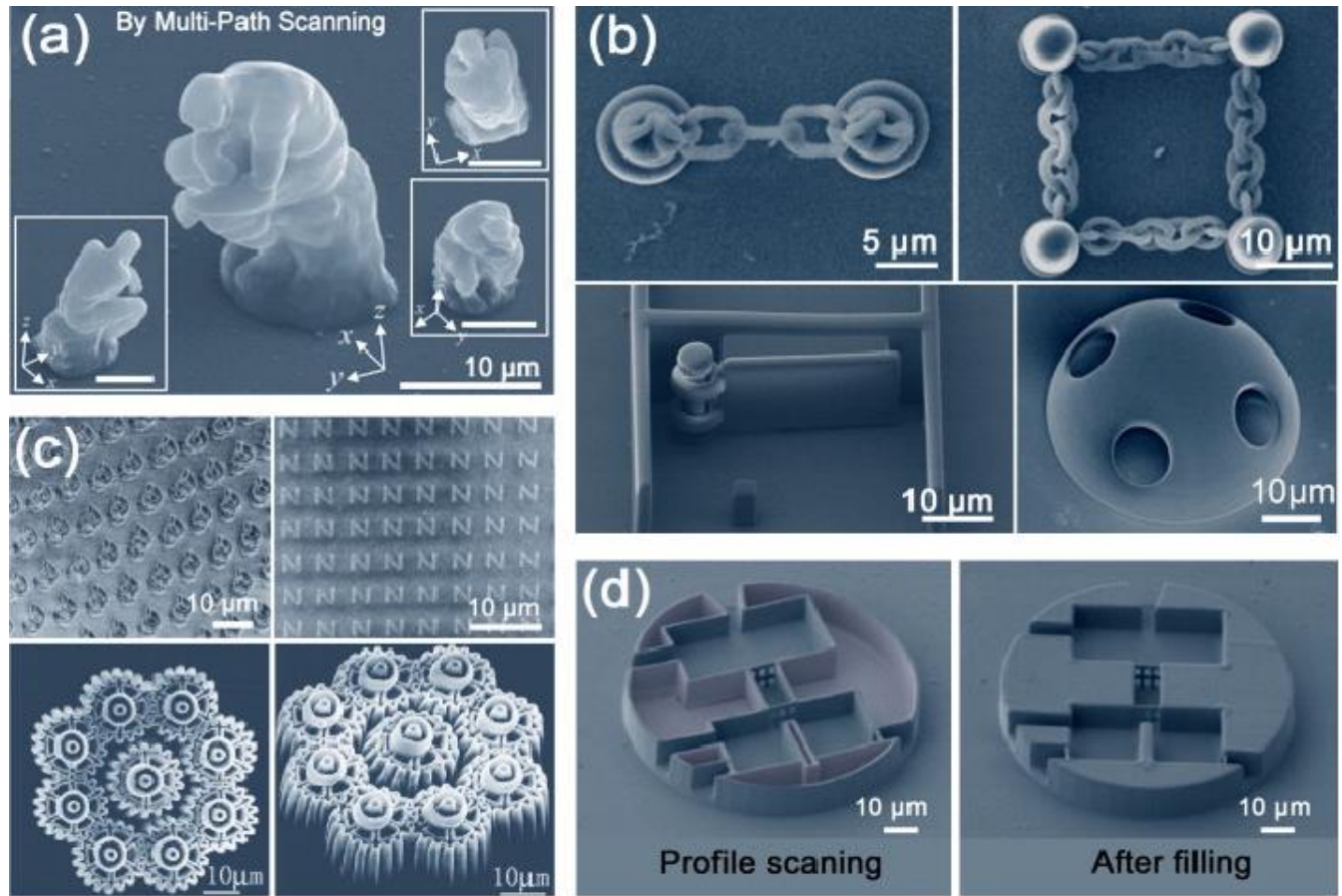
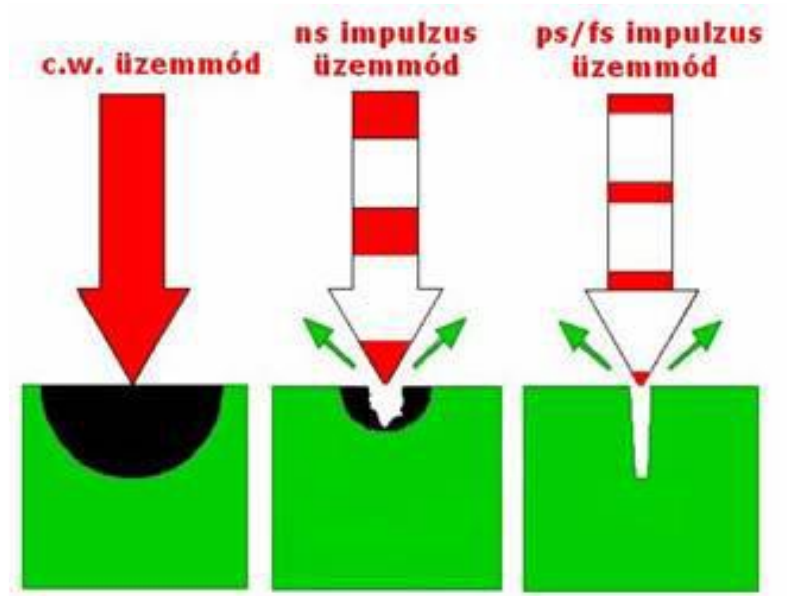
A megolvadt anyag eltávolításának 3 módszere:

- szublimációs vágás: (itt nincs megolvadt anyag => elgőzölög)
papír, fa, kerámia, egyes műanyagok, textil vágásánál használjuk.
N₂ vagy Ar fújja ki az elgőzöltetett anyagot.
- nagynyomású inert gázos vágás: ~20 bar nyomású nagy tisztaságú N₂ vagy Ar fújja ki a megolvadt anyagot.
- oxigén vágás: ekkor elég (oxidálódik) az anyag (általában acéloknál használják).



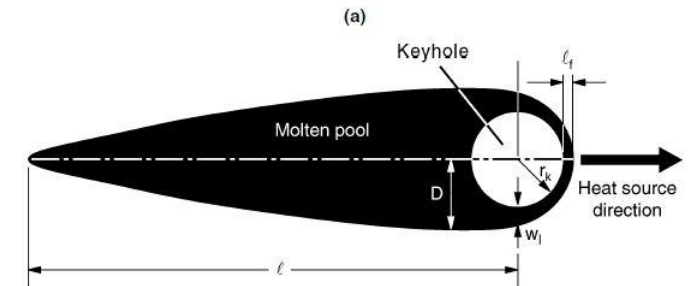
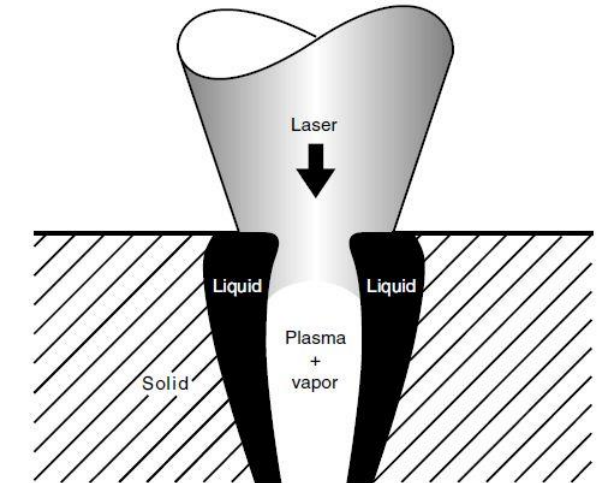
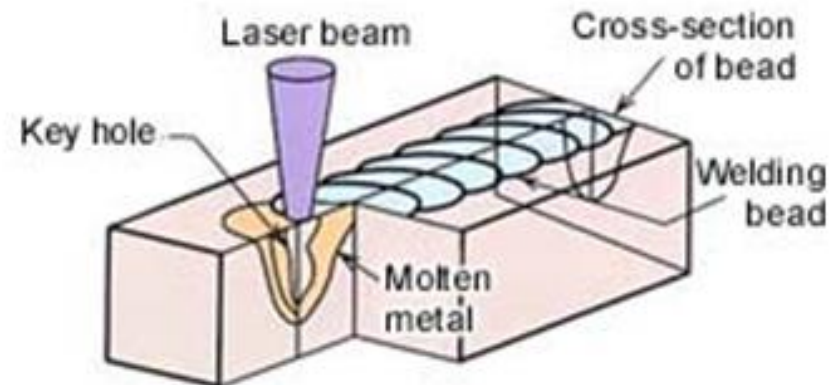
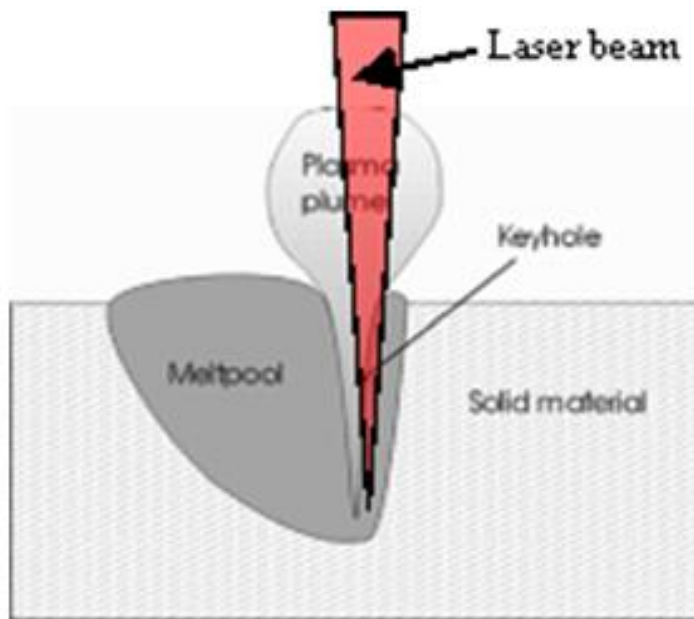
| | Hőérintett zóna | 3..4 mm | 0,2..0,35 mm | 0,02..0,06 mm | 0 mm |
|------------------|-----------------|-------------|--------------|---------------|------|
| | Autogén | Plazma | Lézer | Vízszugár | |
| Vágási szélesség | 1..1,8 mm | 1,5..2,5 mm | 0,1..0,5 mm | 0,2..1 mm | |

Rövid fényimpulzusokkal nagyon határozott, jól definiált alakzatokat lehet kialakítani. Tehát a folyamatosnak látszó lézerfény valójában impulzusok sorozatából áll (ps-os impulzusok, sok MHz frekvenciával).

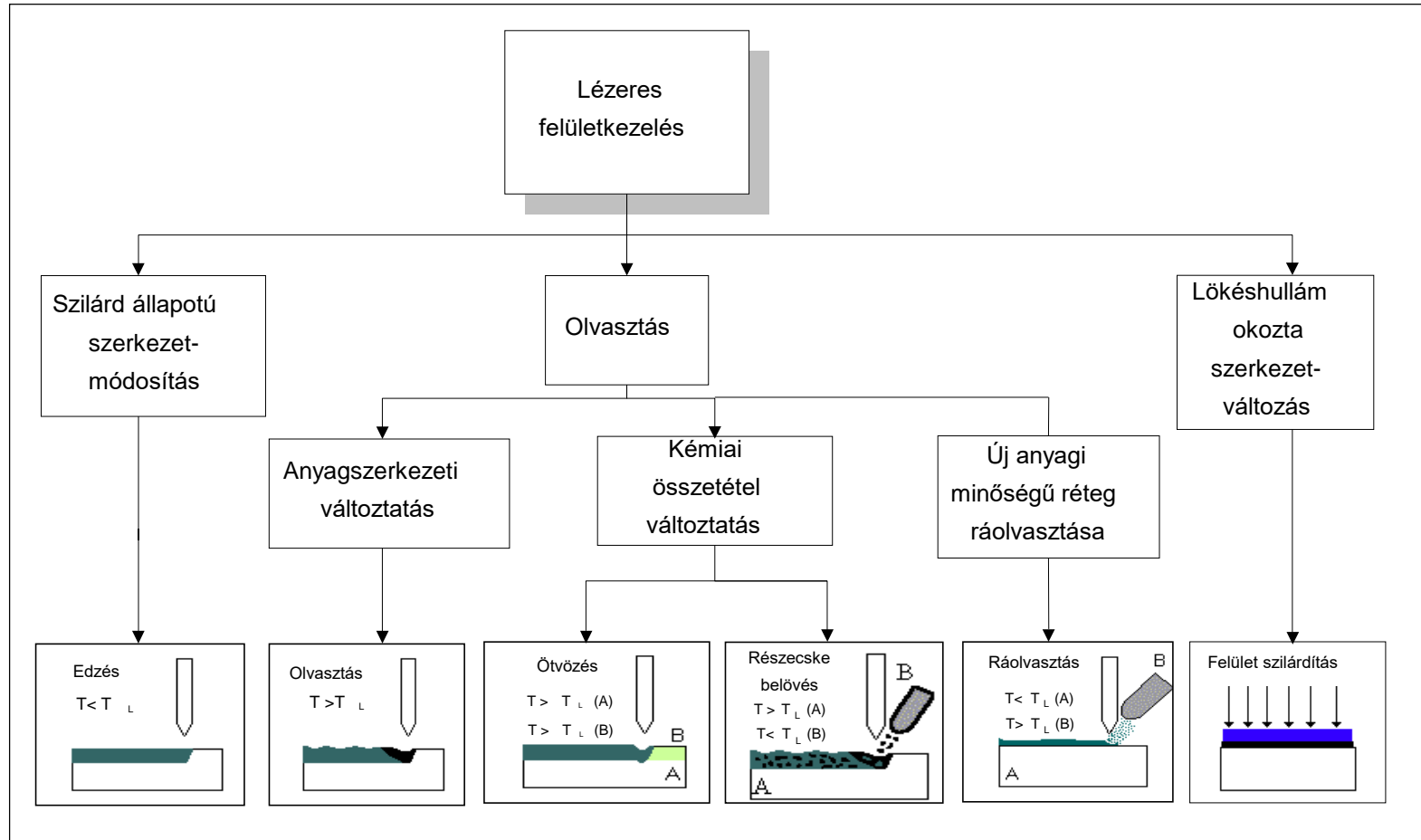


Lézeres hegesztés

- Kulcslyuk típusú hegesztés: nagyon szorosan összeillesztjük a két anyagot és a lézer pontosan követi az összeillesztést (0,1-0,2 mm).
 - nem szükséges kitöltő-anyag
 - igen nagy pontosság
 - különleges profilokban is
 - anyagvesztés nagyon kicsi
 - időosztásban is működik.
- atmoszférikus nyomáson történik
 - hőhatás-zónák nagyon kicsik
 - nincs szennyezés
 - könnyen automatizálható



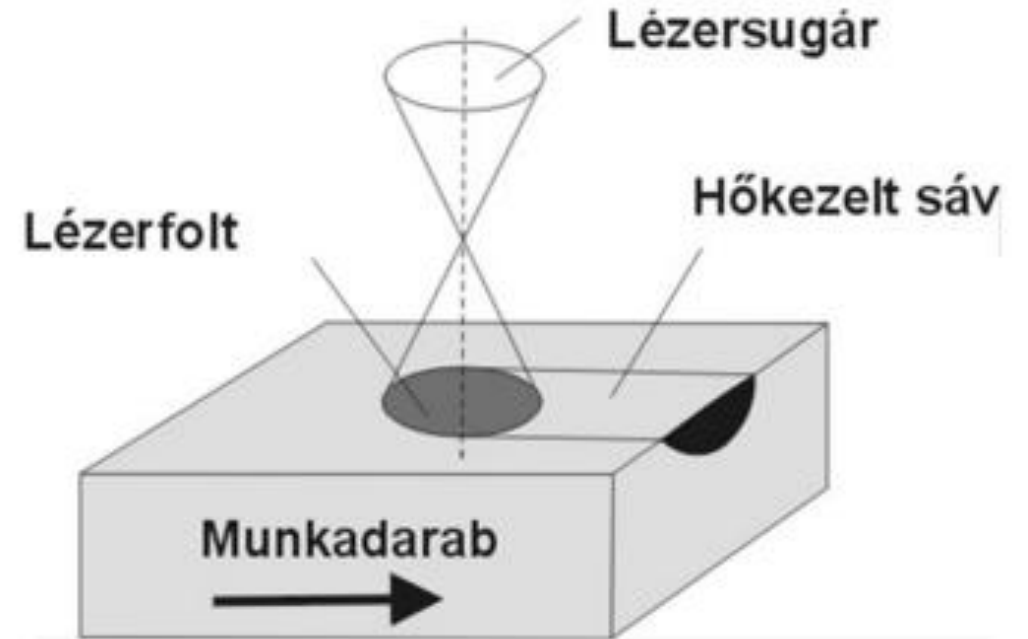
Lézeres hőkezelés



Ez a leginkább szerteágazó terület a témán belül. Általában kicsi lézerfolttal szkenneljük végig a felületet. A felület adott pontja igen gyorsan kihűl. Az anyag tömbje nem is érzékeli a felület kezelését.

Lézeres hőkezelés/2

- csak nagyon kicsi felület van felmelegítve ezért hamar vissza tud hűlni -hűlési sebesség $\sim 1000^{\circ}\text{C}/\text{min}$
- itt kell a legkisebb intenzitást alkalmazni
- védőgázt kell alkalmazni
- védőgáz kisebb nyomású, mint a vágásnál, hegesztésnél
- a felületi keménységet, szilárságot, kopásállóságot
~2-3 szorosára lehet növelni
- egyedi geometriájú kopásálló felületek kialakítása
- súrlódás csökkentése
- nagy tisztaság
- nagy a reflexió veszély
- nagyfokú automatizálhatóság
- kezelhető anyagok: Ti, Al ötvözetek, acél
- a legvékonyabb edzett felületek létrehozására alkalmas
- ennél a módszernél marad a legkisebb belső feszültség



Reflexió kiküszöbölése:

- nagy intenzitású lézerfény nem reflektálódik, mert behatol az anyagba (megváltozik az anyag törésmutatója)
- impulzus üzemben használják a lézert
- fekete festékekkel befestik az anyagot
- diszperziós festés
- smirglivel megdörzsölik (érdesítés)
- grafit bevonat
- oxidálás
- fémlakk
- molibdén-szulfid bevonat
- homok fúvás

| Felületkezelések | Lézer- teljesítmény (Wmm^{-2}) | Lézerkezelés időtartama (sec) | Elért hatás | Megjegyzés |
|-----------------------------|--|-------------------------------------|--|---|
| Felületszilárdítás | 10 | $(20-40) \times 10^{-9}$ | felülettömörödés, alakítási keményedés | a hatást lökeshullám hozza létre |
| Felületi átolvasztás | 10^2-10^5 | $10^{-7}-10^{-2}$ | fémvegyületek, zárványok oldása, szemcsefinomítás, esetleg amorf felület | a hűlési sebesség nagy |
| Felületi ráolvasztás | 10^5-10^6 | $(2-15) \times 10^{-7}$ | felszört réteg átolvasztása, tömörítése | |
| Felületötvözés | 10^6 | $(2-15) \times 10^{-6}$ | a munkadarab felületére felvitt ötvözőanyagoknak alapanyaggal való összeolvasztása | |
| Felületedzés | $10-10^3$ | $0,001^{-1}$ | a felület szövet-szerkezetének átalakítása (edzés) | a felület hűlési sebessége: $10^5 Ks^{-1}$ |

Lézerbiztonság

Kockázatok:

1. a szem károsodása (ez a legnagyobb veszély)
2. a bőr sérülése (csak IV. veszélyességi osztályban)
3. ártalmas gázok (egyres lézerekben a normál működés közben is keletkezhetnek ártalmas gázok, ezeket el lehet vezetni. Ennél nehezebb problémát jelenthetnek a lézerfény és anyag kölcsönhatásakor létrejövő ártalmas gázok.)
4. áramütés (hasonlóan más elektromos berendezésekhez)



A szem károsodása

A fő probléma a párhuzamos lézernyalábot a szem egy pontban gyűjti össze, ez a pont az ideghártyán (retinán) van. Ezen a ponton sérülhet az ideghártya. Ha sok ponton sérül az látásromlást eredményez.

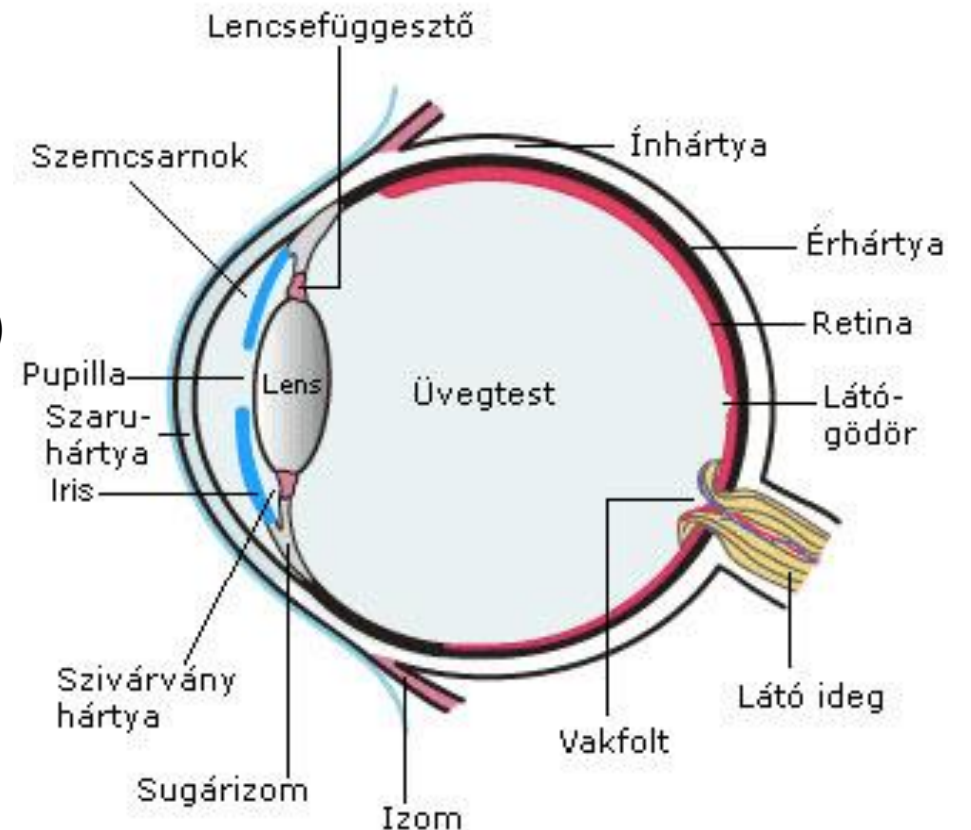
A retinán a lézer teljesítménysűrűség 10^5 -szeres is lehet. Pl.: 1mW He - Ne lézer; 3mm átmérőjű nyaláb esetén a teljesítménysűrűség $0,014 \text{ W/cm}^2$, a retinán ez 1400 W/cm^2 lesz.

Ami nagyon fontos

Az a nagyon veszélyes, ha a párhuzamos lézernyaláb belép a szembe és a retinára fókuszálódik.

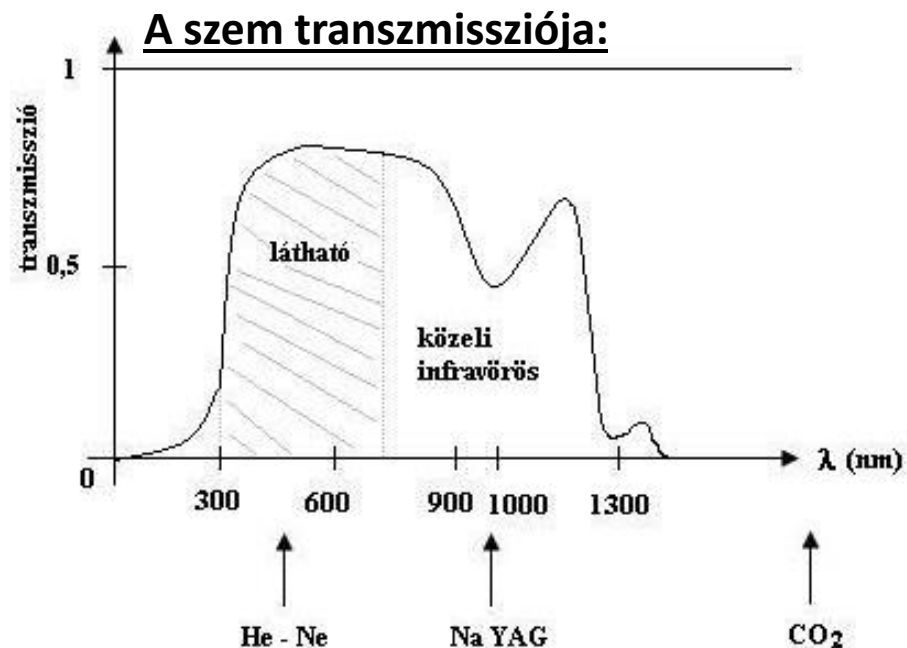
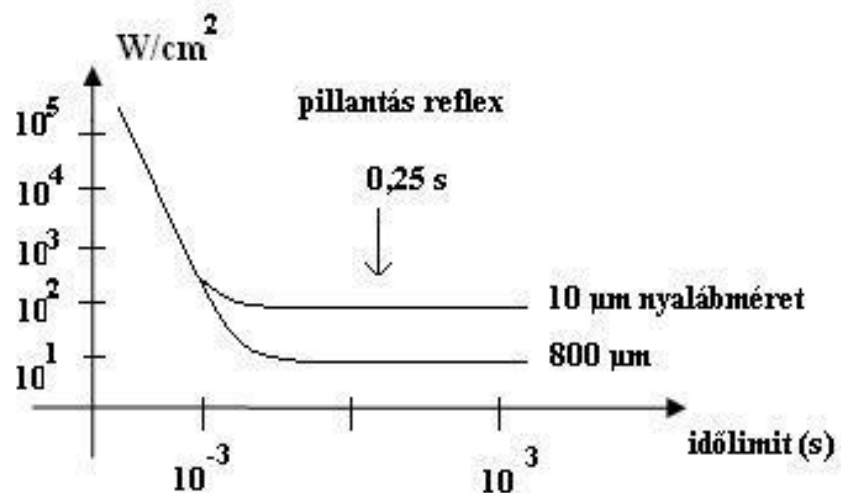
Ha a falra eső lézernyaláb foltja leképeződik a retinára, akkor ez sokkal kisebb teljesítménysűrűséget (akár milliószor kisebbet) jelent a retinán.

Szerencsére működik a pillantás reflex: a szembe jutó lézerfény hatására néhány tized másodpercen belül beszűkül a pupilla. Ezután már nem jut be a lézerfény a szembe. Ez a reflex csak a látható tartományban működik.



A szem károsodása/2

Megengedett teljesítménysűrűség a retinán:



A retinát csak a 300nm – 1300nm tartományba eső lézertény érheti el, tehát csak ezek károsíthatják. Az ezen kívül eső lézerek (rtg. lézer, egyes excimer lézerek, molekula lézerek (CO2 lézer), stb.) a szemre nem jelentenek különleges veszélyt, csak annyit, amennyit más testrészekre. Külön kiemelendő, hogy a közeli infravörös sem nyelődik el a szem fénytörő közegeiben, eléri a retinát. Tehát a közeli IR-ben működő lézerek, bár a „fényük” nem látható, veszélyesek a retinára. Mivel láthatatlanok talán még veszélyesebbek is, mint a látható fényűek.

Veszélyességi osztályok:

I. Lézerosztály (biztonságos):

Ide olyan alacsony teljesítményű lézerek tartoznak, amelyek normál működési körülmények között nem bocsátanak ki veszélyes sugárzást, mert teljesen zártak. (Vagy zárt dobozban működnek.) Ilyen lézereket alkalmaznak a lézer nyomtatókban, a CD lejátszóknak, stb.

II. Lézerosztály (a szem védelmét pillantás reflexszel meg lehet valósítani):

Az ide tartozó lézerek fénye már kilép a dobozból, de a kisugárzott teljesítmény még nem éri el az 1mW-ot. Ennek ellenére, hogyha a lézerfény huzamosabb ideig éri a retinát, akkor akár látáskárosodást is okozhat. A szem automatikus pupillareflexe (aminek 0,25s a reakcióideje), azonban megvédi a retinát a sérüléstől. II. Lézerosztályba tartozó lézerek pl. a kisebb lézer pointerok, vonalkód olvasók és a kisebb (pl. iskolai) He-Ne lézerek.

III.a Lézerosztály (Pillantás reflex + nyalábméret véd):

Ide a 1-5 mW közötti teljesítményű lézerek tartoznak. Ha a nyaláb csak kis ideig (másodperc törtrészig) éri a szemet, akkor nem okoznak maradandó károsodást. Hosszabb behatás esetén vagy gyűjtőlencsén át nézve viszont nagy eséllyel károsítják a szemet. Ilyen lézer dobozán (vagy a szobában, ahol a lézert működtetjük) figyelmeztető táblát kell elhelyezni. Ezen a táblán fel kell hívni a használó figyelmét arra, hogy a lézerfényt mások szemébe irányítani nem szabad. Ilyen lézerek a nagyobb He-Ne lézerek, vagy a nagyobb teljesítményű lézer pointerok.

Veszélyességi osztályok/2:

-
-
-

III.b Lézerosztály (a diffúz reflexió még nem károsít):

Olyan folytonos üzemű lézerek, amelyek teljesítménye 5mW és 500 mW között van. 0.25 s-os impulzusos lézerek közül azok tartoznak ide, amelyek kevesebb, mint $10\text{J}/\text{cm}^2$ energiasűrűségű nyalábot bocsátanak ki. Fényük közvetlenül a szembe jutva biztos látáskárosodást okoz. Még a szórt/falról visszavert fényük is veszélyes lehet. Ezeket a lézereket előzetes instrukciók megadása után lézerekre vonatkozó biztonsági szabályok ismeretével nem rendelkező személy is működtetheti, persze csak védőszemüvegben!

IV. Lézerosztály (veszélyes):

Az ide tartozó lézerek folytonos üzemben 500 mW-nál nagyobb teljesítményűek vagy 0.25 s-os impulzusüzemben $10\text{J}/\text{cm}^2$ -nél nagyobb energiasűrűséggel rendelkeznek. Az ezekből kilépő lézersugár veszélyes a szemre, a bőrre és tüzet is okozhat. (Ez még a visszavert/szórt fényükre is igaz.) Ilyen lézer pl. a CO_2 (széndioxid) lézer.



Ellenőrző kérdések

Válasszuk ki azt a lézertípust, amelyik adott teljesítmény mellett (pl. $P=100\text{ mW}$) a legnagyobb veszélyt jelenti a látásunkra (mert retinasérülést okozhat)!

- a) CO_2 lézer (távoli IR)
- b) Argonion lézer (látható)
- c) Nd: YAG lézer (közele IR)
- d) Excimer lézer (UV)

Párosítsuk össze a lézereket és egy tipikus felhasználásukat!

- | | |
|------------------------|-----------------------------------|
| 1) félvezető lézer | a) CD-DVD írás-olvasás |
| 2) CO_2 lézer | b) gravitációs hullám detektálás |
| 3) argon-ionlézer | c) lézeres vágás |
| 4) Nd:YAG lézer | d) LDV (lézer Doppler vibrométer) |
| 5) He-Ne lézer | e) LDA, LIDAR |

Megoldás: 1a, 2c, 3e, 4b, 5d