

**Kurilla Boldizsár**  
[boldigold@gmail.com](mailto:boldigold@gmail.com)

## A LÉZEREK ALAPJAI, LÉZERFIZIKAI ESZKÖZÖK ÉS ALKALMAZÁSAIK ROBOTTECHNIKAI ESZKÖZÖKÖN

### *Absztrakt*

*Jelen cikk egy cikksorozat első része, amely a lézerfizikai eszközök különféle robotjárművek fedélzetén való alkalmazási lehetőségeinek kutatásáról szól. A ma használatos lézeres távolságmérők és más fedélzeti lézerberendezések többsége a pilóta nélküli légi-, személyzet nélküli földi- és vízi járműveken meglehetősen nagy tömegűek, így a legtöbb esetben nagyméretű hordozókra van szükség. A legújabb lézertechnológiák alkalmazásával egy sor műszaki feladat lényegesen nagyobb hatékonysággal és korszerűbben megoldható, mint ahogy ma használják, ugyanakkor új megoldások is születhetnek például a navigációs, kommunikációs és akár a felderítési feladatokra. A fent említettek mellett további fontos feladat a lézeres berendezések vizsgálata a fizikai méreteik és az energiafogyasztás csökkentése céljából. E cikk betekintést ad a lézerek fizikájának alapjaiba és bemutatja a szerző ezen irányú, korábban folytatott kísérleteit, kutatásait.*

*The present writing is the first part of a series of articles, what is about the research of the application opportunities of laserphysical tools on different robotic vehicles. Most of the currently used laser based distance measurement tools and other laser instruments on unmanned airborne-, terrestrial- and aquatic vehicles are too large and as a consequence larger carriers are required. With the application of the newest laser technologies a large amount of technical tasks can be solved much more efficiently and on a more modern way, as it has been used till present days. However new solutions could be born for navigation, communication and even exploration tasks. Next to the details what mentioned above, further testing is an important task for a robot equipped with other laser devices to reduce the physical size and power consumption. This article is intend to give an insight into the basics of laser physics and introduces the author's earlier research and experiments related to this direction.*

**Kulcsszavak:** lézer, emisszió, abszorpció, korreláció, nemcsomósodó fotonnyaláb  
~ laser, emission, absorption, correlation, antibunching photon

## BEVEZETÉS

A lézer a „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” (vagyis „fénykibocsátás indukált emisszióval”) kifejezésnek a rövidítéséből származik [1], mely nagyon pontosan írja le az elvet. Az első lézert az amerikai Theodore H. Maiman fejlesztette ki 1960-ban, mely egy rubin lézer volt. Itt a rubinkristály valójában króm atomokkal szennyezett  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alumínium oxid) kristály. Ennek a lézernek a hullámhossza 694,3 nm volt, mely mélyvörös színt mutat. A lézerek 1960-as megjelenésük óta igen nagy fejlődésen mentek keresztül. Fontos, hogy a lézerek működési elvének alapjait megértsük, ezért néhány alapvető fogalmat részletesebben ismertetni fogok. A lézerek működését három főbb jelenség teszi lehetővé: a spontán emisszió, az indukált emisszió és az abszorpció. Ezen jelenségeket vázolóan az első fejezetben, majd a lézerek fajtáiba adok betekintést, hogy könnyebben megértsük a kitűzött irányokat.

Két különböző úton közelítettem meg a problémát. Az egyik probléma, hogy a fegyverek területén, és a kommunikációban alkalmazott jelenlegi lézerberendezések többsége nagy tömegű, ezért csak nagyméretű pilóta nélküli robotjárműveken lehet alkalmazni őket. Ebből kifolyólag a lézerek méreteinek és energiafelhasználásának csökkentése a biztos működés megőrzése mellett igen fontos feladat. A másik probléma a kommunikáció megvalósítása. A mai robotjárművek közötti kommunikáció elsősorban rádiós úton történik, melynek óriási hátránya, hogy illetéktelen személyek feltörhetik, illetve lehallgathatják őket. A lézeres kommunikációval ez gyakorlatilag teljesen megakadályozható. A lézeres kommunikáció alapjainak megértéséhez fontos tényező a hullámhossz reflexiótól való függése. A cikkben az ehhez kapcsolódó számításomat a Sellmeier együtthatók segítségével oldottam meg táblázatos formában.

## A LÉZEREK MŰKÖDÉSÉHEZ SZÜKSÉGES FOGALMAK ÉS A LÉZEREK FAJTÁI

### *A spontán emisszió*

Spontán emisszió alatt értjük valamilyen halmazállapotú (folyékony, gáznemű vagy szilárd) anyag gerjesztett állapotba való átvitelét energia befektetéssel. Az anyagokat gerjesztett állapotba hozhatjuk fénnnyel, melegítéssel, elektromossággal vagy elektromágneses hullámokkal. Ez egyatomos gázoknál jól leírható úgy, hogy az atommag körül egy jól meghatározott távolságban keringő elektronok az energia befektetés hatására távolabb kerülnek az atommagtól, mint alapállapotban. Fontos megjegyezni, hogy itt nem stabil állapotról beszélünk, hiszen az atom, ami a legkisebb energiájú állapot, igyekszik visszakerülni az alapállapotba az energiaminimum elvének megfelelően. Ugyanakkor spontán bekövetkezhet az alapállapotba visszatérés a gerjesztést előidéző hatás folyamata alatt is. Az adott anyag atomjainak vagy molekuláinak gerjesztett állapotának stabilitása az adott anyagra jellemző tulajdonság függvénye. Amikor egy atom visszatér az alapállapotba, akkor a gerjesztett állapotú atomból egy foton távozik. Amekkora volt az energiakülönbség a gerjesztett és az alapállapotú atom között, akkora az energiája a kilépő fotonnak. Így a kilépő foton energiája megegyezik a gerjesztett pályára került elektron és alapállapotú pályán lévő elektron potenciális energiakülönbségével. Ezt a következő egyenlettel tudjuk kifejezni:

$$E_2 - E_1 = h \cdot f,$$

ahol  $E_2$  a gerjesztett atom energiája,  $E_1$  az alapállapotban lévő atom energiája,  $h$  a Planck állandó ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  J\*s) és  $f$  a távozó foton frekvenciája [2]. Az egyes anyagok gerjesztés hatására a rájuk jellemző hullámhosszokon emittálnak fotonokat.

### *Indukált emisszió*

Indukált emisszióról akkor beszélünk, ha egy  $h \cdot \nu$  energiájú foton elmegy a gerjesztett állapotban lévő atom mellett és azt leviszi a gerjesztett állapotból. Eközben pontosan olyan tulajdonságú fotont bocsát ki az alapállapotba visszaugró atom, mint amilyen tulajdonsággal az őt leverő foton rendelkezett. Ebből az következik, hogy a keletkezett foton a terjedési irányában, polarizációjában, fázisában és hullámhosszában megegyezik az őt keltő fotonnal.

### *Abszorpció*

Abszorpcióról akkor beszélünk, amikor az atom gerjesztett állapotba kerülhet, ha ütközik a fotonnal és eközben a foton elnyelődik. Ekkor a foton az elektronok potenciális energiájává konvertálódik.

Ezen jelenségek lehetővé teszik a lézerek működését. Ha van egy adott térfogatnyi gázunk, melyet gerjesztünk, akkor ebben kialakulhat a spontán emisszió. Az így keletkezett fotonok elnyelődnek vagy indukált emissziót idéznek elő. Fényerősítés viszont csak akkor valósulhat meg, ha a gázban a gerjesztett atomok aránya jóval nagyobb, mint az alapállapotban lévőké. Amikor több gerjesztett atom van az adott térfogatnyi gázban, mint ahány alapállapotú atom, akkor a spontán emisszióban létrejött fotonok hatására nagyobb eséllyel valósul meg indukált emisszió, és az indukált emisszióban keletkezett fotonok pedig nagyobb eséllyel idéznek elő újabb indukált emissziót. Ebből kifolyólag ez az állapot elengedhetetlen a lézerek működéséhez. Így leegyszerűsítve kimondhatjuk, hogy ha a közegünkben több gerjesztett állapotban lévő atom van, mint alapállapotban lévő atom, akkor létrejött a populáció inverzió [2]. Azt a közeget, ahol ez megvalósult, erősítő közegnek (aktív közegnek) nevezzük.

Egy lézer megépítéséhez szükséges egy optikai rezonátor. Ez gondoskodik a fotonok aktív közegbe való visszavezetéséről és a teljesítmény kicsatolásáról. Egy optikai rezonátor két teljesen párhuzamos tükörből áll, ahol az egyik közel 100%-os reflexióval bír, míg a másik alacsonyabb reflexiójú. A két tükör között helyezkedik el az aktív közeg, mely különböző hosszúsággal bírhat.

Ha egy monokromatikus fény sugara  $I_0$  intenzitással áthalad az aktív közeg  $x$  hosszán, akkor a kapott intenzitás  $I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x}$  lesz, ahol  $\alpha$  a közeg abszorpciós együtthatója [2]. Minél nagyobb utat tesz meg a foton az aktív közegben, annál jobban erősödik a fénysugár. Fontos megjegyeznünk, hogy az úthossz növelést nem az aktív közeg hosszának megnövelésével érjük el elsősorban, hanem a tükrök alkalmazásával. Itt a kisebb reflexiójú tükör a kimeneti csatoló, hiszen ott lép ki a lézersugár. A pumpáláshoz egy másik lézert vagy villanó fényforrást használunk.

A lézerberendezések osztályozása különösen fontos feladat. Így összegezve legegyszerűbben hét főbb szempont alapján tudjuk őket felvázolni [1]:

Működési mód:

- CW- „continuous wave”, melyet folyamatos lézersugárzásnak hívunk;
- IPM-impulzus lézer, ahol a fényforrás csomagokban bocsájtja ki a koherens fényt.

Hullámhossz: Napjainkban több ezer lézerrendszer ismeretes, melyek hullámhossztartománya 10 nm és 500  $\mu\text{m}$  közé esik. Így tehát hullámhosszuk alapján megkülönböztetve beszélhetünk ultraviola (UV), látható tartományú, infravörös (IR) és röntgen lézerekről.

Monokromatikus (egyszínűség), ahol a  $\Delta\nu \approx 1 \text{ MHz} - 1 \text{ GHz}$

Irányítotttság: Jó rezonátoroknak és megfelelő nyílásátmérőknek köszönhetően a lézerfény rendkívül párhuzamos nyalábban terjed tovább. A szögeltérés a következőképpen számítható ki:  $\delta\theta = \lambda/d \approx 1 \text{ mrad} - 1 \mu\text{rad}$ , ahol  $\lambda$  a lézer hullámhossza,  $d$  pedig a sugárátmérő.

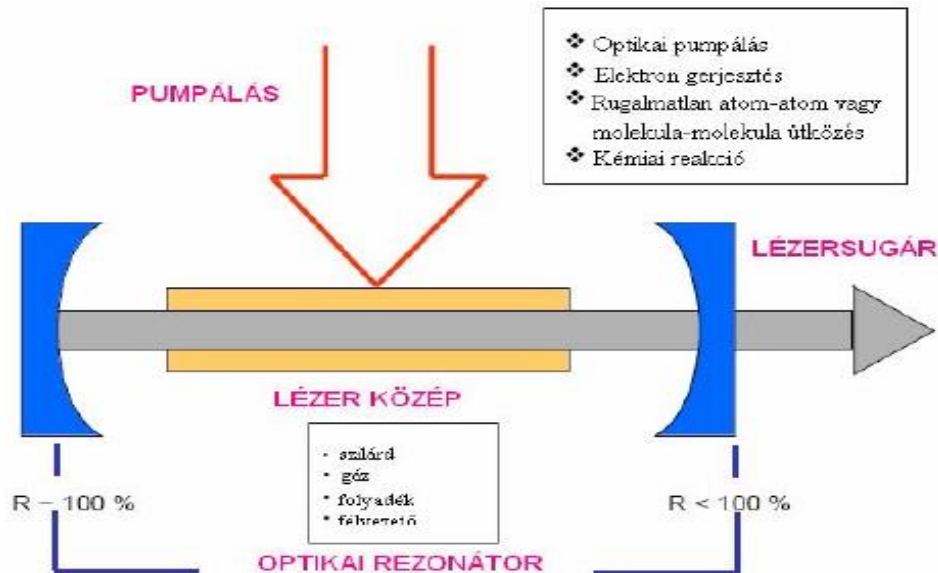
Koherenciafok: (a fázistartó képességére utal). A koherencia idő (amíg a fázis kevesebbet fordul, mint  $180^\circ$ ).

Koherencia hossz:  $\Delta Z = c \cdot \Delta\tau \approx 300 \text{ m}$  (ekkora távolságon belül hologram képes).

Spektrális fényesség ( $\beta$ ), ami nem más, mint egységnyi szteradiánban egységnyi frekvenciaintervallumban kisugárzott fénytéljesítmény. Nd:üveg lézernél,  $\beta = 108 \text{ W/cm}^2 \text{ sr Hz}$ .

A Nap esetében  $\beta = 10\text{--}12 \text{ W/cm}^2 \text{ sr Hz}$ .

Az 1. ábra a lézer általános működési sémáját mutatja be.



1. ábra. A lézer általános működési sémája [1]

A lézereket fajtáik és alkalmazásaik alapján is csoportosítjuk:

- *Szilárdtest lézerek:* A szilárdtest lézereknél a közös vonás az, hogy az aktív közegük valamilyen kristályos anyag. A Maiman által megépített első lézer szintén ilyen. Ezen lézerek működhetnek impulzussal, de a dióda lézerek (melyek ugyanúgy ide tartoznak) folytonosan is működhetnek. Az impulzusüzemmel rendelkező szilárdtest lézerekre jellemző a nagy intenzitás és nagy energiájú impulzus. A szilárdtest lézerek optikai gerjesztéséhez általában egy másik lézer vagy egy erős villanócsövet használnak fel. Alkalmazásaik: anyagmegmunkálás, célmegjelölés, holográfia, katonai alkalmazás területén a LIDAR.
- *Félvezető lézerek:* Gerjesztésük elektromos árammal történik. Alkalmazásaik: Gyógyászat, CD, DVD, Blu-Ray, lézermutatók.
- *Gázlézerek:* Gázlézereknél általában alacsony nyomású gázban hozunk létre populáció inverziót nagyfeszültségű generátor és vákuumforrás segítségével, ahol a gerjesztés általában rádiófrekvenciás vagy elektromos úton valósul meg. Alkalmazásaik: színeképelemzés, holográfia, gyógyászat, anyagmegmunkálás.
- *Vegyí lézerek:* Energiájukat kémiai reakcióból nyerik. Általában igen nagy teljesítményű berendezések, melyek magában foglalják a kémiai szállító rendszert, egy szuperszonikus áramoltató rendszert és természetesen egy optikai rezonátort. Ha a kémiai reakció kedvező (nagyobb belső energiát produkálva az állapotok fölött, mint amekkora a külső energia), a populáció inverzió megvalósítható. [3] Alkalmazásaik: anyagkutató, fegyverkutató.
- *Folyadéklézerek (festéklézerek):* A festéklézereknek az aktív közege folyékony halmazállapotú, ahol a populáció inverziót elsősorban optikai gerjesztéssel szokták megvalósítani. Ennek egyik módszere (hasonlóan a szilárdtest lézerek gerjesztési elvéhez), hogy a kristály helyett most egy zárt kvarc küvetát helyezünk, amibe

helyezett oldószerben oldott festéket teszünk. Ezeket UV fényel gerjesztjük. Egy másik módszer alapján a gerjesztést lézeres pumpálással oldjuk meg. Az lézeres pumpálással működő festéklézerek működhetnek impulzusos vagy folytonos üzemmódban is. A festéklézer abban is különleges, hogy a rezonátorban erősített hullámhosszt ki lehet választani, így a lézer hullámhossza hangolható. Alkalmazásaik: alapkutatók, spektroszkópia

A lézerek a gerjesztés módja alapján lehetnek fényel, elektromosan, kémiai úton és rádióhullámokkal is gerjesztettek.

A lézerek különböző feladatokat láthatnak el a hadseregben, mint például felderítés, célmegjelölés, kommunikáció és szolgálhatnak egyenesen irányított energiájú fegyverként. A LIDAR (Light Detection And Ranging) technológia és a repülőgépre szerelt lézeres célmegjelölők napjainkban használatos technológiák. A LIDAR egy optikai érzékelőből és egy lézeres adóból áll, melyek segítségével az adott célpontok távolságát meg lehet határozni 10  $\mu\text{m}$  és 250 nm közötti hullámhossz tartományban. Ez magasabb frekvencián működik, mint a radarok általában. A LIDAR aktív távérzékelési rendszerekhez tartozik, mely alapján a felvevő rendszer saját energiaforrással rendelkezik. A lézerimpulzusok kibocsátása és visszaverődése közötti időintervallum a rendszerben rögzítésre kerül, így a pontos távolság meghatározható az adó és a megjelölt objektum között. A terepi tárgyak térbeli elhelyezkedésének pontos meghatározásához azonban már a szenzor helyének, helyzetének pontos ismeretére van szükség. [4] Jelenleg használatban lévő pilóta nélküli robotjárművekre már akna-és akadály felderítő lézerberendezéseket is alkalmaznak.

A katonai alkalmazásban, haditechnikában a lézerek alkalmazása a kézfegyvereken is megjelenik. Nagyobb hatótávolságú fegyvereknél 650 nm-es hullámhosszú lézert alkalmaznak általában, mert a vörös hullámhossz tartományban halad legkönnyebben át a levegőn a fény. Kisebb hatótávolságú fegyvereken zöld lézert is alkalmaznak, mert a zöld hullámhossz tartományra a legérzékenyebb az emberi szem. (Az emberi szem csúcserzékenysége 550 nm). A lézeres távolságmérők mind polgári, mind katonai alkalmazásban léteznek igen széles körben. Működési elvük hasonló, hisz az adott objektumra vetített lézernyaláb segítségével megméri az objektum távolságát és ennek eredményét vetíti ki a berendezésnél ugyancsak jelenlévő elektronikus kijelzőre.

Ugyancsak elterjedtek a katonai területen a csapásmérő fegyvereknél alkalmazott lézeres célmegjelölők. Ez lehet a fegyveren, mely a céltárgyon tartja a sugarat a becsapódásig, vagy lehet a rakéták fején, mely önrávezető módon a célról visszavert jelre vezeti rá magát. Alapvető építőelem lehet a saját-ellenség azonosító rendszerekben is, de a nem halálos fegyverek létrehozásában is alkalmazásokra talált.[5]

## **A NEMCSOMÓSODÓ FOTONNYALÁB ÉS A LÉZERES KOMMUNIKÁCIÓ**

A lézerfizikai berendezések a kommunikációban is megoldást hozhatnak. Hatalmas előnyt jelentene a különböző robotok közötti lézeres kommunikáció bonyolult megzavarása és még inkább annál körülményesebb lehallgatása illetéktelenek által. Különösen fontos adatvédelmi probléma a robotok közötti kommunikáció felderíthetőségének csökkentése, a lehallgatásuk megakadályozása és szándékos zavarok elleni védelem megoldása. Természetesen a hátrányokat is fontos kiemelni a lézerekkel történő kommunikáció területén. Jelentős adatvesztést okozhat, ha szabad ég alatt, rossz időjárási viszonyok uralkodnak, mint például eső vagy köd. Szintén hasonló probléma jelenik meg a távolság növekedése esetén fellépő nyalábszélesedés következtében, hisz minden lézernyalábnak van divergenciája. Így ha a nyaláb átmérője túl széles lesz a vevő detektorába való érkezéskor, akkor ugyancsak adatvesztés léphet fel. Számolni kell továbbá a detektorba érkező zajokkal. Előfordulhat

ugyanis, hogy máshonnan is érkezik foton a detektorba. Ekkor háttérzajról beszélünk. Kritikus hiba lehet a lézerekkel való pontatlan célzás. Ennek könnyítésére megoldást hozhat egy olyan optika kialakítása, mely összegyűjti a lézernyaláb nem pontosan odavetített részét és lefókuszálja a detektorba. Mindezekkel együtt, nagyon sok lehetőséget rejt a robotok közötti lézeres kommunikáció, hisz számtalan előnye is van.

A lézeres kommunikáció alkalmazását a világűrben is kipróbálták. 2004 májusában a NASA útnak indították a Messenger űrszondáját a Merkúr felszínének feltérképezésére. Alig több mint egy évvel később (ekkor 25 millió km-re volt már a Földtől) a tudósok letesztelték az űrszonda fedélzetén lévő Mercury Laser Altimeter (MLA) berendezést, melyet a Merkúr felszínének feltérképezésére használtak. Ennek segítségével lézerezimpulzusokat küldtek vissza a NASA tulajdonában lévő Goddard Geophysical and Astronomical Observatory nevű csillagvizsgálóba [6]. Ez volt az első igazán oda-vissza működő űrbeli lézeres kommunikációs kísérlet.

A védett kommunikáció kialakítási lehetőségeinek vizsgálata során, korábbi kutatások eredményeképpen körvonalazódik a nemcsomósodó fotonnyaláb használata a lézeres kommunikáció céljaira. Ez kvantumoptikai úton valósítható meg és kvantumtitkosítási módszerekkel biztosítható az összeköttetések lehallgatás elleni védeltsége. Gyakorlatilag lehetetlen a megfejtése, illetve dekódolása illetéktelenek által. Csak azok ismerhetik a robotok közötti kommunikáció eljárásának részleteit, akik ismerik a rendszerben lévő összes optikai elem reflexiós és transzmissziós képességét, illetve az egyes késleltető egységekben a tükrök a polarizációs nyalábosztóktól való pontos távolságát. Fontos kiemelni, hogy a hullámhossztól függ a reflexió. Az ehhez kapcsolódó számításom ezt pontosan kimutatja. Azonban itt a változás olyan kicsi, hogy csak akkor vesszük figyelembe, ha nagyon precízek akarunk lenni. A kiértékeléshez, és a függvény elkészítéséhez az Origin nevű programcsomagot, a számításokhoz pedig BK7-es üveget használtam fel. Az Origin programcsomagban különböző fizikai vagy matematikai értékek bevitelével függvények, illetve folyamatok ábrázolására nyílik lehetőség 2-és 3 dimenzióban is. A programcsomagot a Microcal fejlesztette és tette közzé 1992-ben.

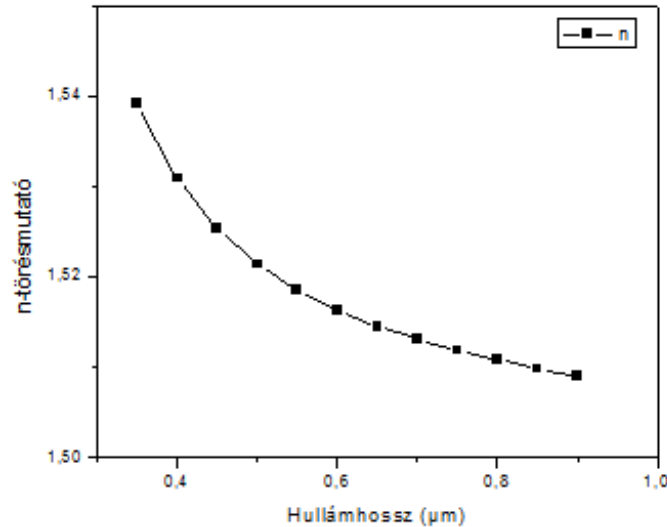
n(Y)	hullámhossz(X)	B1(Y)	B2(Y)	B3(Y)	C1(Y)	C2(Y)	C3(Y)
1,53917	0,35	1,03961	0,23179	1,01047	0,006	0,02002	103,5607
1,53085	0,4	1,03961	0,23179	1,01047	0,006	0,02002	103,5607
1,52532	0,45	1,03961	0,23179	1,01047	0,006	0,02002	103,5607
1,52141	0,5	1,03961	0,23179	1,01047	0,006	0,02002	103,5607
1,51852	0,55	1,03961	0,23179	1,01047	0,006	0,02002	103,5607
1,51629	0,6	1,03961	0,23179	1,01047	0,006	0,02002	103,5607
1,51452	0,65	1,03961	0,23179	1,01047	0,006	0,02002	103,5607
1,51306	0,7	1,03961	0,23179	1,01047	0,006	0,02002	103,5607
1,51184	0,75	1,03961	0,23179	1,01047	0,006	0,02002	103,5607
1,51078	0,8	1,03961	0,23179	1,01047	0,006	0,02002	103,5607
1,50984	0,85	1,03961	0,23179	1,01047	0,006	0,02002	103,5607
1,509	0,9	1,03961	0,23179	1,01047	0,006	0,02002	103,5607

**1. táblázat.** A törésmutató meghatározása a hullámhossz függvényében Sellmeier együtthatók segítségével

A táblázatban az n(Y) a törésmutató BK7-es üvegnél, a hullámhossz értékei pedig  $\mu\text{m}$ -ben vannak. A B1, B2, B3 és a C1, C2, C3 a Sellmeier együtthatók, melyeket fel kellett használni a méréshez. [7] A Sellmeier együtthatók a Sellmeier egyenletből származó együtthatók, melyek leírják a törésmutató és a hullámhossz közötti empirikus kapcsolatot egy adott átlátszó közegre vonatkozólag. Itt a következő egyenletet használtam:

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3},$$

Ezt az egyenletet felhasználva a 2. ábrán látható függvényt kapjuk, mely a törésmutató hullámhossztól való függését ábrázolja.



**2. ábra.** A törésmutató változása a hullámhossz függvényében BK7-es üvegnél

A nemcsomósodó fotonnyaláb bevezetéséhez fontos megemlítenem a foton korrelációs mérést, melynek alapjait Robert Hanbury Brown és Richard Q. Twiss brit fizikusok fektették le úttörő kísérletüknek köszönhetően. A kvantumoptika tán a legjobban alkalmazott eszköze lett a foton korrelációs mérés. Egy olyan elrendezés megvalósítását tervezték meg 1956-ban, melynek segítségével meg lehet mérni a Szíriusz csillag átmérőjét. A kísérleti elrendezés alapján egymástól 6 méterre elhelyeztek két, a Szíriusz felé irányított detektort. A kísérlet várt eredménye az lett volna, hogy a két detektorba érkező fotonok teljesen különböző időpillanatokban csapódnak be. Valójában azonban a becsapódó fotonok között interferenciát sikerült észlelni, mely egy pozitív korrelációban valósulnak meg [8].

„Belátható, hogy a sugárzás fluktuációja szoros kapcsolatban van az intenzitás  $\langle I(t+\tau)I(t) \rangle$  autokorrelációs függvényével, amely végül is a fotonszám korrelációját írja le, ugyanis a kvantumelmélet szerint az intenzitás arányos a foton-sűrűséggel. A  $\langle \rangle$  csúcsos zárójel klasszikus vagy kvantummechanikai átlagképzést jelöl. Ez a mennyiség annak a valószínűségét méri, hogy a  $t$  időpontban detektáltunk egy foton, és a  $t + \tau$  időpontban is detektálunk egy következő foton. A beérkező jeleket a két detektorról arra használjuk, hogy elindítsanak és megállítsanak egy idő-amplitúdó konvertert, ami kimutatja az időkésést a két jel között. Ennek eredményeképpen megszámlálhatóak azok a fotonok, amelyek beérkezésük közti késés pontosan  $\tau$ . Az ilyen típusú korrelációs és koincidenckiakísérletek történetében úttörő jelentőségű volt Ádám András, Jánossy Lajos és Varga Péter 1955-ben publikált koincidenckiakísérlete, amelyben először használtak fotoelektron-sokszorozót, s ezzel jelentősen megnövelték a detektálás érzékenységét.” [9]

## A NEMCSOMÓSODÓ FOTONNYALÁB ELMÉLETE ÉS KÍSÉRLETI MEGVALÓSÍTÁSÁNAK ALAPJAI

A nemcsomósodó foton magába foglalja, hogy egy olyan nyalábot akarunk előállítani, amelyben igen szigorúan meghatározott időpillanatban érkeznek a fotonok. A nemcsomósodás jelenségének megértéséhez fontos definiálnunk a csomósodás jelenségét, illetve azt, hogy mi a Poisson eloszlás. Itt diszkrét valószínűségi eloszlásról beszélünk, mely a binomiális eloszlás

határeloszlása. Kifejezi az adott idő alatt egymástól függetlenül megtörténő (teljesen véletlenszerű) események bekövetkezésének számát. A csomósodás jelenségét pedig leginkább a szuper-Poisson típusú fényforrással tudjuk párosítani, mely akkor valósul meg, hogyha annak a valószínűsége, hogy még egy fotont detektálunk abban az időintervallumban, ahol az első fotont detektáltuk nagyobb annál a valószínűségnél, hogy az első fotont egy másik időintervallumban (ebben több impulzus is lehet) detektáljuk. A nemcsomósodás jelenségét leginkább a szub-Poisson eloszlással lehet definiálni. Ez a jelenség akkor valósul meg, ha az a valószínűség, hogy még egy fotont detektálunk ugyanabban az időintervallumban, ahol az első jött, kisebb, mint az a valószínűség, hogy az első fotont más időintervallumban detektáljuk. [10] Ahhoz, hogy ez megvalósuljon, a kibocsátott fotonok mindegyikét optikailag késleltetnünk kell. Ez az egyik lehetséges változata a kísérlet megvalósításának. Mindezek háttérben természetesen egy koherens fényforrásra (lézer) van szükség. Koherens fénynél tudni kell, hogy a fotonok véletlenszerűen emittálódnak, ezért lehetőségre van a késleltetésre külön-külön. A fényforrás tehát fotonpárokat bocsát ki. Ez azt jelenti, hogy most már biztosan tudhatjuk, hogy érkeznek fotonok, csak azt nem tudjuk, hogy pontosan mely időpillanatokban.

A nemcsomósodás jelenségére több definíció is napvilágot látott. Jelen cikkben három kerül ismertetésre. A leginkább ismert definíciók a másod rendű intenzitás korrelációs függvényre épülnek.

*I. Definíció:* Foton nemcsomósodás akkor lép fel, ha az intenzitás-korrelációs függvény  $G^2(t, t+\tau)$  kezdeti értéke  $\tau=0$ -ról:

$$G^2(t, t+\tau) > G^2(t, t), \quad (1.1)$$

ahol

$$G^2(t, t+\tau) = \langle \hat{a}^\dagger(t) \hat{a}^\dagger(t+\tau) \hat{a}(t) \rangle \quad (1.2)$$

Az első egyenletet fel lehet írni másképpen is:

$$g^2(t, t+\tau) > g^2(t, t), \quad (1.3)$$

ahol

$$g^2(t, t+\tau) = G^2(t, t+\tau) / [G(t)]^2 \quad (1.4)$$

A  $g^2(t, t+\tau)$  függvényében található elsőrendű korrelációs függvény nem más, mint a fotonszám várható értéke:

$$G(t) = \langle n(t) \rangle = \langle \hat{a}^\dagger(t) \hat{a}(t) \rangle. \quad (1.5)$$

Megfigyelhetjük, hogy a normalizáció független  $\tau$ -tól. A  $G^2$ -re és  $g^2$ -re vonatkozó egyenlőtlenségek ugyanazt a hatást írják le abban az esetben, ha  $G(t) \neq 0$  [9]

*II. Definíció:* Foton nemcsomósodás akkor is felléphet, ha a normalizált intenzitáskorrelációs függvény

$$g^2(t, t+\tau) = G^2(t, t+\tau) / G(t)G(t+\tau). \quad (1.6)$$

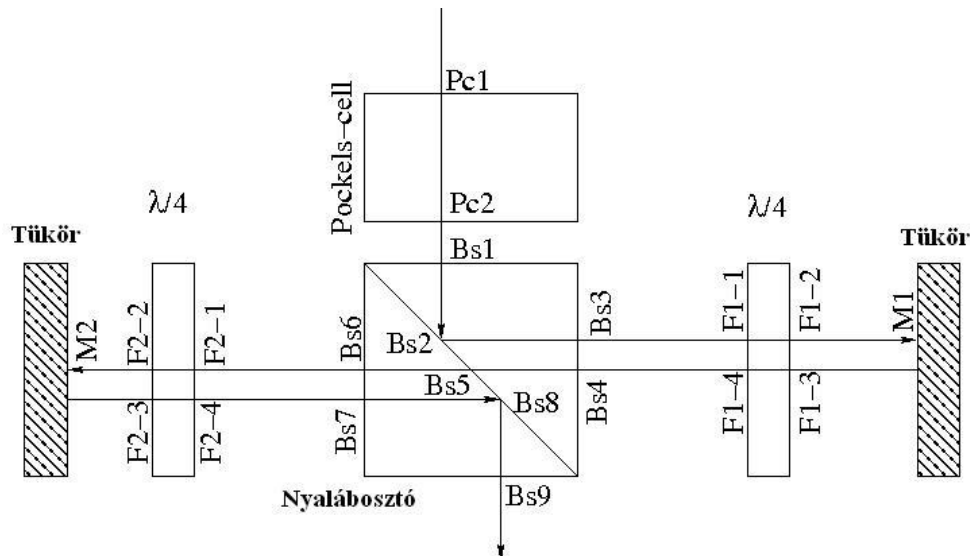
*III. Definíció:* A szub-Poisson fotonstatisztikát (ezt is nemcsomósodásnak hívják) kétféleképpen is definiálhatjuk. Vagy azt mondjuk, hogy  $Q(t) < 0$  vagy pedig azt, hogy  $g^2(t, t) < 1$ . [11],[12]

Elmondhatjuk, hogy az egyes és kettes definícióval nem egyezik a hármas definíció, mert itt az egy-időre korrelált függvény különbözik a két-időre korrelált függvényektől, amelyeket az egyes és kettes definícióban használtunk [13]. Azonban az egyes és kettes definíció megegyezik. A különbség köztük csak abban rejlik, hogy míg az egyes esetben a normalizált



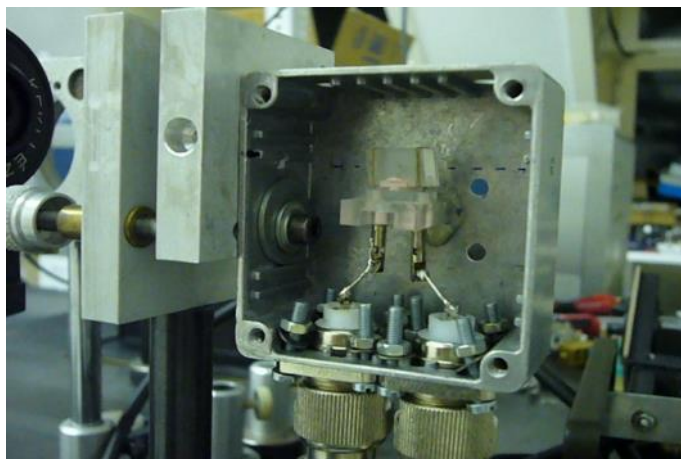
korrelációs függvényről beszélünk, addig a második esetben a normalizált korrelációs függvényt használjuk. [12]

Az eredeti elképzelés alapján a kísérletben a fotonpárok véletlenszerűen érkeznek Optikai Parametrikus Oszcillátor segítségével (OPO). Itt viszont a méretcsökkentés előtérbe helyezése miatt egy új eljárás keresése a kitűzött cél. Nagyon fontos figyelembe venni, ha a fotonokkal bármilyen kölcsönhatásba lépünk, akkor tulajdonságai megváltoznak. Ez azért fontos, mert ha útjuk során detektáljuk őket, akkor elektronokká alakulnak, és mint foton megszűnnek létezni. A detektáláshoz célszerű fotoelektron sokszorozót (vákuum fotocella) és fotodiódát használni. Maga a kísérleti elrendezés így egy optikai késleltető rendszert is magában foglal. Ez Pockels-cellák és polarizációs nyalábosztók, tükrök és  $\lambda/4$ -es hullámlemezek segítségével megvalósítható. A Pockels-cella (ami egy kristálymodulátor) nagyban meghatározza a rendszer állapotát. Ha a feszültséget rákapcsoljuk a rendszerre, akkor lehetővé válik, hogy a továbbhaladó fény, aminek már megváltozott a polarizációja eltérüljön az útjába helyezett polarizációs nyalábosztón. Ha az a célunk a kommunikációt illetően, hogy a fény késleltetés nélkül haladjon tovább, akkor nem kapcsolunk feszültséget a Pockels-cellára. A polarizációs sík elforgatásához nagyfeszültségű (5000 V) impulzusgenerátorra van szükség. A 3. ábrán az optikai késleltető rendszernek egy optikai késleltető egységét láthatjuk. Minél több ilyen egységet építünk ki egymás után, annál nagyobb késleltetés hajtható végre.

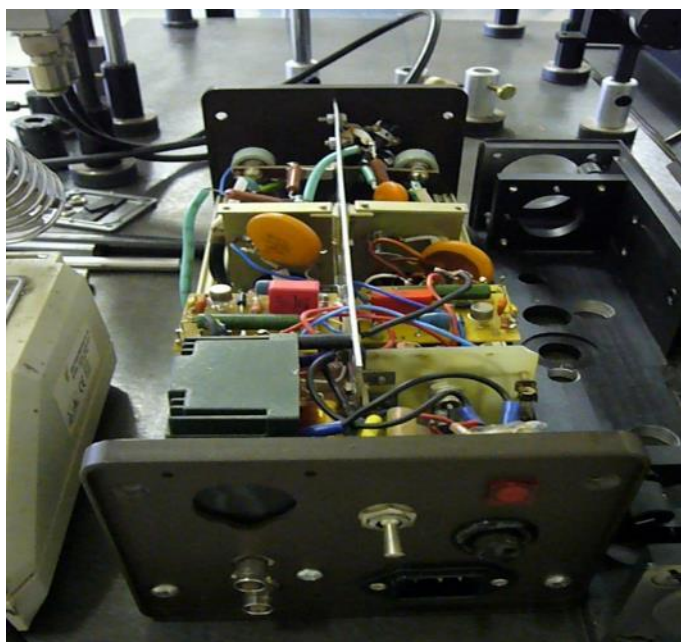


3. ábra. Egy optikai késleltető modul vázlata [9]

Ennek fejében a polarizációs sík nem változik meg, tehát a fény nem térül el. Azonban ha a fény eltérül, akkor lehetőség van arra, hogy a fény útjába a nyalábosztótól megfelelő távolságra  $\lambda/4$ -es lemezeket és tükröket helyezünk. Ezen áthaladva a hullám cirkulárisan poláros lesz. Így az optikai késleltetés megvalósul. Egy ilyen adott késleltetés után a foton visszatérve a nyalábosztóba újra eltérül és folytatja az eredeti útját a következő eltérítő egységeken keresztül. Ezen módszerrel a fotonon újabb késleltetést hajtunk végre. Ahhoz, hogy mindez sikeresen megvalósuljon fontos, hogy a legelső Pockels-cella legyen a leggyorsabb, ugyanis ez határozza meg, hogy beléphet-e egy újabb foton a rendszerbe, avagy sem. Az 4. ábra a Pockels cellát, a 5. ábra pedig a nagyfeszültségű impulzusgenerátor kísérleti elrendezését mutatja.



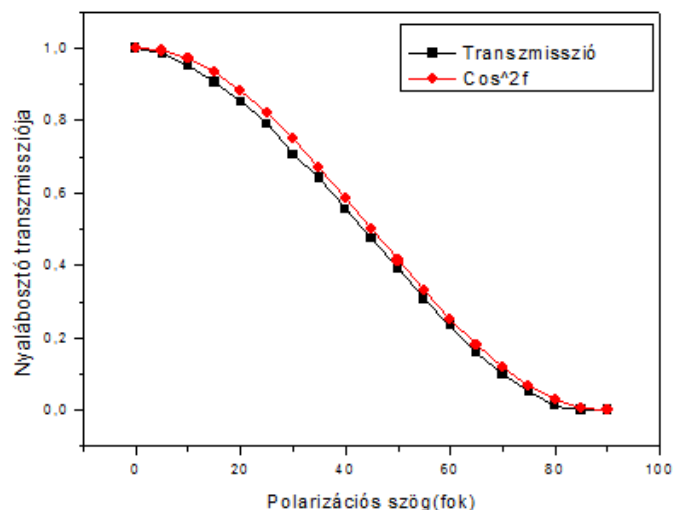
**4. ábra.** A Pockels cella [10]



**5. ábra.** A Pockels-cella vezérlő egységének (nagyfeszültségű impulzusgenerátor) kísérleti elrendezése [10]

A most következő mérés egy adott polarizációs nyalábosztó transzmissziójának változását határozza meg a polarizációs szög függvényében. Ezekre leginkább azért volt szükség, hogy minél pontosabb képet kapjunk az esetleges hibaforrásokról a kísérleti elrendezés megvalósítása során. A 6. ábrán a felhasznált nyalábosztó transzmissziójának változását láthatjuk a polarizációs szög függvényében.

A mérések végrehajtásához egy megközelítőleg 100 mW teljesítményű, 780 nm hullámhosszú lézermódul került felhasználásra fel. Szükség volt továbbá egy polarizációs nyalábosztóra és egy teljesítménymérőre.



**6. ábra.** Nyalábosztó transzmissziója a polarizációs szög függvényében [10]

Elméletileg jóslott eredmény: a kapott függvénynek a  $\cos^2 f$ -nek kéne megfelelnie. Az  $f$  az olvasott szögek  $180^\circ$ -hoz viszonyított különbségeinek eredménye radiánban. Így tudjuk ellenőrizni, hogy pontosan úgy viselkedik-e, mint egy klasszikus (kalcit alapú) polarizátor. Ha eltér, akkor van érdemi tartalma. Ha ráillik, akkor pontosan úgy viselkedik. Fontos megemlíteni, hogy itt nem kalcit alapú prizmának, hanem egy vékony-réteg szerkezetű polarizációs nyalábosztónak az alkalmazására került sor. Ennek technikájától függ, hogy mennyire tökéletesen polarizál nem pont  $45^\circ$ -os beesésnél. A harmadik képen a méréshez használt lézermódul, a teljesítménymérő és a nyalábosztó látható.



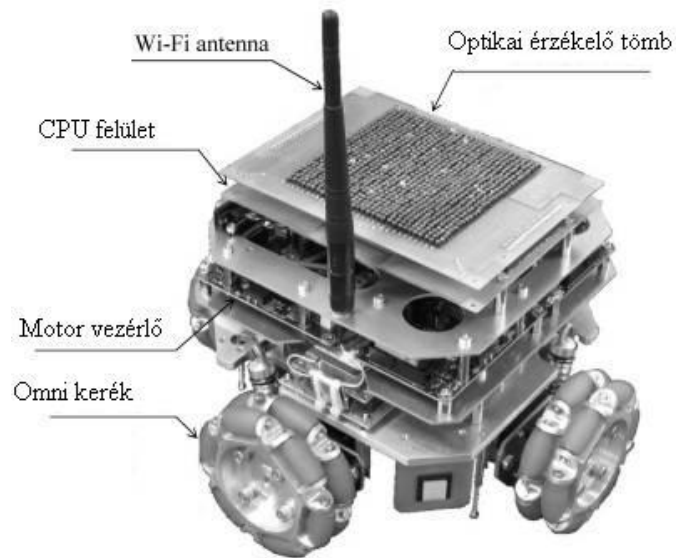
**7. ábra.** A méréshez használt teljesítménymérő, polarizációs nyalábosztó és a 780 nm-es lézermódul kísérleti elrendezése [10]

A szárazföldi robottechnikai eszközöknél további lehetőségek rejlenek a fedélzeti lézerek használatában, ha például a különböző akadályok felderítésében gondolkodunk. Ilyenek lehetnek a magas aljnövényzetek, sziklák, kövek vagy akár a kisebb-nagyobb domborzatok.

Az automatikusan vezérelt szárazföldi robotoknál különösen fontos feladat, hogy minél gyorsabban érzékelje a maga körül lévő akadályokat. Erre már 3D-s lézer szkennerek berendezéseket alkalmaznak. A lézerrel való navigálás és tájékozódás már a 90-es évek elejére is visszanyúlik, ahol forgótükrökkel reflektálták a lézert. Ezáltal  $360^\circ$ -ba lehetett a készülékkel tájékozódni [14]. Sanjiv Singh és Jay West kutatók a Carnegie Mellon egyetemen, Pennsylvaniában egy lézer szkennert szereltek fel az általuk készített robotra és ennek

köszönhetően a készülék az útjába eső akadályokat képes volt felderíteni, illetve meg tudták határozni annak helyzetét az adott térképen. Az optikai távolságmérő 3-50 m távolságig tudott mérni +/- 15 cm-es pontossággal. A lézer maga 900 nm-es hullámhosszon üzemelt 7200 Hz-es ismétlési rátával.

Megvalósítható navigációs eljárás a szárazföldi robotoknál a roboton kívül helyezett lézeres navigációs rendszer is. [15] A 8. ábrán egy ilyen robotot láthatunk. Ez esetben bizonyított a megvalósíthatósága annak, hogy a robot kövesse a szkennelő lézerpontot a robotra szerelt optikai érzékelő tömb segítségével.



**8. ábra.** Optikai érzékelő tömbbel felszerelt robot [15]

A rendszer kétdimenziós mozgást vezérel a lézerforrás segítségével.

A 3D-s lézeres felderítésnek már sokkal több előnye van és egyben sokkal nagyobb figyelem is irányul ma rá. Újabb kutatások azt mutatják, hogy ilyen lézerrendszer sokkal gyorsabban vissza tudja juttatni az információt a különböző akadályokról, illetve részletes 3D-s feltérképezést tud nyújtani a környezetről. [16] Az 9. ábra két részből áll. A felső része egy rendes fénykép egy adott teremről, az alsó pedig annak egy 3D-s lézeresen feltérképezett változata.



**9. ábra.** Egy terem és annak 3D-s lézer szkennelvel letérképezett változata [16]

## ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK

A cikkben betekintést kínáltam a lézerek alapjaiba, fajtaiba és kiemelten foglalkoztam a lézeres felderítés, illetve a lézeres kommunikáció megvalósítási lehetőségeiről és az eddig megjelent eredményekről. A legnagyobb hangsúlyt a nemcsomósodó fotonnyaláb elméleti és technikai részleteire fordítottam. Ennek előállítása ígéretes lehetőség a lézerekkel történő titkos kommunikáció megvalósításához, ez azonban nagyon pontos ismereteket követel a rendelkezésre álló optikai eszközök tulajdonságairól.

Az egyik legfontosabb és leginkább várható eredmény a kijelölt kutatási területen a különböző robotok fedélzeti lézerfizikai eszközeinek méretcsökkenésre történő javaslatok kidolgozása a teherviselés megkönnyítése érdekében. A méretcsökkenés szempontjából kifolyólag itt lényeges lépés az adott berendezések energiafelhasználásának minimalizálása a nagy hatékonyság és a megbízható működés megőrzésével párhuzamosan. A másik legfontosabb várható eredmény pedig a különböző robottechnikai eszközök közötti védett lézeres kommunikáció eljárásainak kidolgozása, és a robotok biztonságos közlekedésének megvalósítása lézerfizikai eszközök segítségével.

### Felhasznált irodalom

- [1] Nánai László: A lézerek és katonai alkalmazásai  
[http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2005\\_cikkek/nanai\\_laszlo.pdf](http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2005_cikkek/nanai_laszlo.pdf),  
letöltés ideje: 2013. október 9.
- [2] Subhash Chandra Singh, Haibo Zeng, Chunlei Guo, and Weiping Cai: Lasers: Fundamentals, Types, and Operations pp.1-3, 2012  
[http://www.wiley-vch.de/books/sample/3527327150\\_c01.pdf](http://www.wiley-vch.de/books/sample/3527327150_c01.pdf),  
letöltés ideje: 2013. október 12.
- [3] Glen P. Perram: Chemical lasers pp.1-7  
<http://www.afit.edu/en/docs/CDE/Chemical%20LasersWeb.pdf>,  
letöltés ideje: 2013. október 13.
- [4] Verőné Wojtaszek Margorzata: A lézer alapú távérzékelés. In: Fotointerpretáció és távérzékelés 3. Nyugat-magyarországi Egyetem, 2010  
[http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0027\\_FOI3/ch01s03.html](http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0027_FOI3/ch01s03.html),  
letöltés ideje: 2013. október 11.
- [5] Ványa László: Az elektronikai hadviselés eszközeinek, rendszereinek és vezetésének korszerűsítése az új kihívások tükrében, különös tekintettel az elektronikai ellentevékenységre. PhD értekezés, ZMNE 2003. p. 200.
- [6] Kher Than: Record Set for Space Laser Communication, 2006.január 5  
<http://www.space.com/1900-record-set-space-laser-communication.html>,  
letöltés ideje: 2013. október 12.
- [7] Schott glass made of ideas ,3 és 13.o  
[http://www.schott.com/advanced\\_optics/us/abbe\\_datasheets/schott\\_datasheet\\_all\\_us.pdf](http://www.schott.com/advanced_optics/us/abbe_datasheets/schott_datasheet_all_us.pdf)  
letöltés ideje: 2013. október 12.
- [8] Varga Péter: A Jánossy- kísérletek a fizikai optikában, Fizikai Szemle 1998/7. 225.o,  
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet, Budapest

- [9] Varró Sándor, Dombi Péter: A fény klasszikus fizikai és kvantumelméleti jellemzése, Természet világa, 137. évfolyam, 4. szám, <http://www.termeszettvilaga.hu/szamok/tv2006/tv0604/varro.html>, letöltés ideje: 2013.október 13.
- [10] Kurilla Boldizsár, Diplomamunka: A nemcsomósodó fotonnyaláb előállítás, Pécsi Tudományegyetem, 2009. június
- [11] A. Miranowicz †, J. Bajer ‡, H. Matsueda †, M. R. B. Wahiddin § and R. Tanas : k Comparativenstudy of photon antibunching of non-stationary fields. J. Opt. B: Quantum Semiclass. In: Department of Information Science, Kochi University, 2-5-1 Akebonocho, Kochi 780-8520, Japan; Laboratory of Quantum Optics, Palacký University, 772 07 Olomouc, Czech Republic; Institute of Mathematical Sciences, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia; k Nonlinear Optics Division, Institute of Physics, Adam Mickiewicz University, 61–614; Poznań, Poland Opt. 1999
- [12] A. Miranowicz (1), J. Bajer (2), W. Leonski and R. Tanas (3): Various approaches to photon antibunching in second-harmonic generation (1997) In: Clarendon Laboratory, Department of Physics, University of Oxford; OX1 3PU Oxford, U.K.; Laboratory of Quantum Optics, Palacký University, 772 07 Olomouc, Czech Republic; Nonlinear Optics Division, Institute of Physics, Adam Mickiewicz University, 61-614 Poznań, Poland
- [13] X. T. Zou and L. Mandel: Photon-antibunching and sub-Poissonian photon statistics, Journals, Phys. Rev. A 41, 475–476 Department of Physics and Astronomy, University of Rochester, Rochester, New York 14627, 1990
- [14] Sanjiv Singh and Jay West: Cyclone: A Laser Scanner For Mobile Robot Navigation. In: The Robotics Institute Carnegie Mellon University Pittsburgh, Pennsylvania 15213 (September 1991)
- [15] Keigo Hara, Shoichi Maeyama, and Akio Gofuku: Navigation Using a Laser for a Mobile Robot with a Optical Sensor Array. In: Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University 3-1-1 Tsushima-Naka, Okayama 700-8530, Japan, 2008
- [16] Julian Ryde and Huosheng Hu: 3D Laser Range Scanner with Hemispherical Field of View for Robot Navigation. In: Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics July 2 - 5, 2008, Xi'an, China