



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Lézerek és mézerek. Hogyan működnek és mire jók, melyek a fejlesztési irányok?

Készítette: Marton Antal (P6MTRV)

Tantárgy: Sugárzások kölcsönhatása az anyaggal

Tárgykód: BMEVEFAM109

2019/2020 – tavaszi félév

TARTALOM

1. Bevezetés.....	3
2. Célkitűzés.....	4
3. Tárgyalás.....	4
3.1. Lézer	4
3.1.1. A lézerek működési elve.....	4
3.1.2. A lézerátmenet	5
3.1.3. A lézerek típusai.....	6
3.1.4. Továbbfejlesztési irányok.....	7
3.2. Mézer.....	8
4. Konklúzió	10
Felhasznált irodalom.....	11

1. BEVEZETÉS

A lézerek, mézerek megértése nem lenne lehetséges a fény jellegzetességeinek ismerete nélkül. Az első fontos lépést Max Planck tette meg, amikor a fény energiájának és frekvenciájának kapcsolatát megfejtette, amely során feltételezte, hogy a fény kis csomagokban, úgynevezett kvantumokban létezik. Ezen munkája egyfajta fordulópontot jelentett a fizikában, és rengeteg fizikust inspirált, ideértve Albert Einsteint is, akihez köthető a stimulált emisszió javaslata. Einstein feltételezte, hogy az anyag és az elektromágneses hullám között nem csupán két kölcsönhatás lehetséges, az adszorpció és az emisszió, hanem a stimulált emisszió is, amely során a gerjesztett anyag fotonnal ütközve elveszíti a gerjesztési energiáját, miközben a stimuláló fotonnal megegyező energiájú, irányú és fázisú fotont emittál. Einstein ezen három folyamat sebességének kapcsolatát is levezette, amely alapján megállapítható, hogy az abszorpció és a stimulált emisszió sebességi állandója megegyezik, így az, hogy melyik folyamat játszódik le, csupán az alapállapotban és gerjesztett állapotban lévő molekulák aránya határozza meg. A kutatóknak közel 40 évre volt szüksége, hogy igazolni tudják Einstein feltételezését, és képesek legyenek olyan berendezést létrehozni, amely a stimulált emissziót kihasználva állít elő elektromágneses hullámot [1]. Az első berendezés Charles Hard Townes és munkatársaihoz köthető ammónia mézer volt, amelynek működését 1954-ben demonstrálták, majd rá hat évre Theodore Maiman megépítette az első lézert is. Azóta rengeteget fejlődött a tudomány ezen területe, rengeteg lézer- és mézertípusokat fejlesztettek ki, és ezen fejlesztések forradalmasították a technika többi ágát is, így például az optikát, az orvosi technikát, a hadi technikát, az informatikát és az anyagmegmunkálást is [2].

A mézerek alkalmazása fontos szerepet játszik különböző idő/frekvencia standardok meghatározásában, emellett alkalmasak gyenge jelek erősítésére, amely kihasználható mind a műholdak közötti kommunikációban, mind az űrkutatásban. A Vénusz hőmérsékletéről az első információt a bolygóról érkező gyenge mikrohullámú jelek erősítésével, feldolgozásával szereztek a kutatók szilárdfázisú mézerek alkalmazásával [3]. Emellett mikrohullámú spektroszkópiában is felhasználják őket.

A lézerek már a mindennapjaink részévé váltak [4]: optikai lemezek (CD, DVD), Blu-ray), nyomtatók, hőmérők, lézer mutatók, vonalkód-olvasók, stb. Jelen vannak a járművekben mint távolságmérők, az orvostudományban különböző beavatkozásoknál mint „lézer-szike”, optikai szálak használatával a kommunikáció transzferben, a bűnüldözésben például ujjlenyomat

felderítésénél, a hadiiparban a célpontok jelölésére, katonák elvakítására, az iparban anyagok vágására, hegesztésére, kontaktmentes mérésére, és a lista folytatódik.

2. CÉLKITŰZÉS

Jelen munka célja a lézerek működési elvének bemutatása, a különböző lézertípusok és felhasználási lehetőségeik ismertetése, valamint a lézerek felhasználásának jövőbeli lehetőségeinek bemutatása. Mivel a lézerek működése rendkívül hasonló a lézerekéhez, ezért erről csupán röviden fog szó esni, majd a lézerek fejlesztését, felhasználását kívánom bemutatni.

3. TÁRGYALÁS

3.1. Lézer

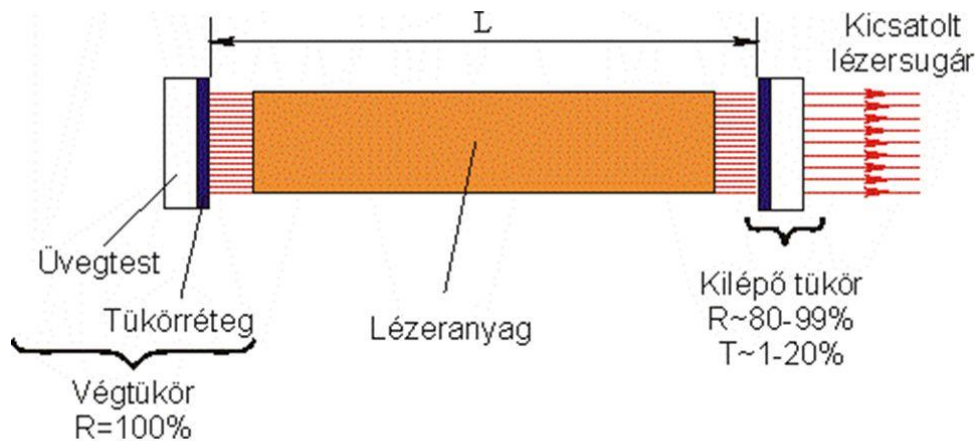
3.1.1. A lézerek működési elve

A Bohr-féle atommodell alapján az elektronok az atommagok körül keringenek, meghatározott energiájú pályákon. Két pálya közötti átmenet energiája meghatározott. Amennyiben az alacsonyabb energiájú pályán lévő elektron az átmenethez szükséges energiájú fotont elnyeli, a magasabb energiájú pályára gerjesztődik. Ezen gerjesztett állapot megszűnhet spontán és stimulált emisszióval.

A lézerek működése három elven alapul, a stimulált emisszió, az inverz populáció és az optikai rezonátor elvén. A stimulált emissziót már a bevezetésben bemutattam: az emissziót egy fotonnal való ütközés váltja ki, amely során a stimuláló fotonnal azonos energiájú, irányú és fázisú foton keletkezik. Ezen folyamat sebességi állandója megegyezik az abszorpció sebességi állandójával. A lézer működése során több foton keletkezik stimulált emisszióval, mint abszorpcióval, amely úgy lehetséges, hogy a rendszerben több gerjesztett molekula van jelen, mint alapállapotban lévő molekula. Ez azonban termikus egyensúlyban a Boltzmann-eloszlás alapján nem lehetséges, így ez a rendszer melegítésével nem elérhető. Tehát a lézerben termikus egyensúly nem állhat fent, a lézerátmenetben jelenlévő két energiaszint közül a magasabb energián kell több molekulának tartózkodnia, ezt nevezzük inverz populációnak. Az inverz populációt „pumpálással” tartjuk fent, amely során a rendszerrel energiát közlünk, és a stimulált emisszió során alapállapotba visszakérült molekulákat visszagerjesztjük a magasabb energiaszintre. Ez történhet fotokémiai gerjesztéssel, elektromos kisüléssel, kémiai

reakcióval. Ahhoz, hogy a keletkező fotonok stimulált emissziót tudjanak létrehozni, a rendszert optikai rezonátorba (l. **1. ábra**) kell helyezni.

Optikai rezonátor

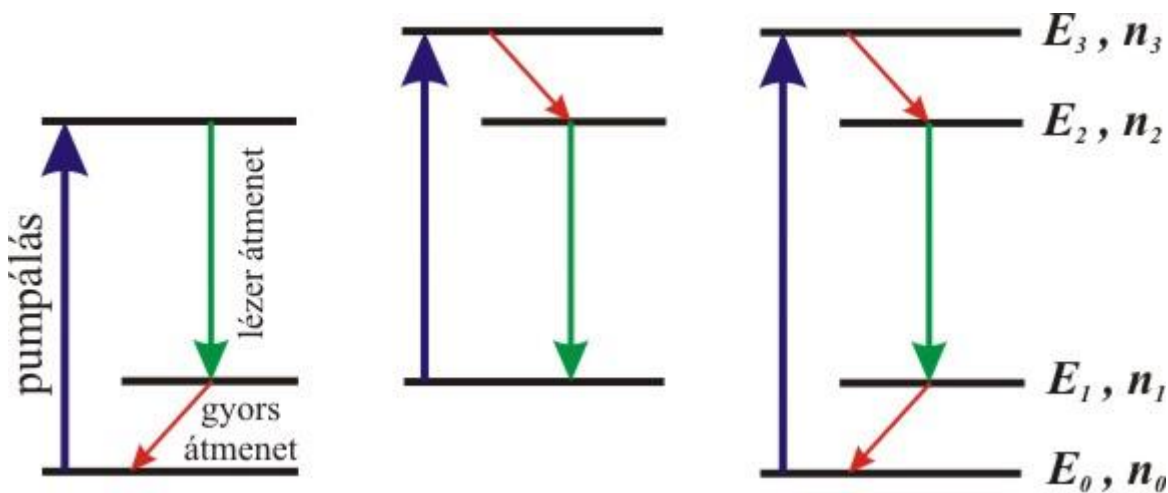


1. ábra Optikai Rezonátor (R = reflexióképesség, T = átteresztőképesség)

Az optikai rezonátor két tükörből épül fel, egy végtükörből, amely a ráeső fotonokat teljes mértékben visszaveri, valamint egy kilépő tükörből, amely a fotonok egy kis százalékát átengedi. Ezen rendszerben a fotonok átlagos úthossza nagymértékben megnő, így a stimulált emisszió valószínűsége is. Ahhoz, hogy a keletkező fotonok visszaverődése során fellépő interferencia során ne oltás ki egymást, a két tükör távolságának megfelelőnek kell lennie. Erősítő interferenciához állóhullámnak kell létrejönnie, amely úgy lehetséges, hogy a két tükör közötti távolság megegyezik a foton félhullámhosszának egész számú többszörösével.

3.1.2. A lézertmenet

A lézerek nagyrésze három- és négyzintes termséma alapján működik (l. **2. ábra**). A pumpálás a folyamatban részt vevő legalsó energiaszintről a legfelső energiaszintre történik. Az energiaszinteket úgy választják meg, hogy a lézertmenet felső energiaszintjén hosszú legyen az élettartam, azaz a spontán emisszió elhanyagolható legyen az indukált emisszióhoz képest. **A 2. ábrán** a zöld nyíllal összekötött energiaszintek között kell inverz populációnak fennállnia. Ez négyzintes esetben egyszerűbben kivitelezhető, hiszen az E_1 állapotban, amennyiben $E_1 \rightarrow E_0$ átmenet gyors, szinte alig tartózkodik molekula.



2. ábra Három- és négyszintes lézerműködési termsémák

Mivel inverz populációt elektron-, rezgési és forgási energianívók között is kialakulhat, így létezik az ultraibolya, a látható, az infravörös és a mikrohullámú tartományban működő lézer is.

3.1.3. A lézerek típusai

A szennyezett ionkristály-lézerek lézerműködése valamilyen fémionnal szennyezett ionos szigetelőlőből áll. A lézersugárzás a szennyező fémion emissziója révén jön létre, amelynek pumpálása általában optikailag történik. Az egyik legelterjedtebb képviselőjük a neodímiummal szennyezett ittrium-alumínium-gránát (Nd-YAG) közegű lézer. Számos lézerátmenete van, azonban a legelősebb a közeli infravörös tartományba esik. Relatív nagy élettartamú, és a YAG jó hővezetése miatt nagy teljesítmény érhető el vele. Felhasználják például szilárd testek vágására, bőrgyógyászati kezelésekre [6].

A gázlézerek csoportjába rengeteg, eltérő elven működő lézer tartozik. A lézerműködés lehet tiszta gáz, vagy gázelegy, a lézerátmenet pedig rendkívül sokféle állapot között jöhet létre, így ebben a csoportban vannak ultraibolya, látható, és infravörös lézerek is. A gerjesztés általában gázkisüléssel történik. Ide tartozik például a Hélium-Neon (He-Ne) lézer, amely látható tartományban, vörös fényt bocsát ki, és ezeket használják például vonalkódolvasókban. Fontos még a szén-dioxid (CO_2) lézer, amely távoli infravörös tartományban sugároz, amelyet az élő szövetek képesek elnyelni, így például műtéteknél használják, mint „lézer-szike”.

A félvezetőlézerek vagy diódalézerek könnyen alkalmazható, kis méretű, alacsony előállítási költségű lézerek, amely tulajdonságok miatt széles körben elterjedtek (pl.: lézermutató). A lézerátmenet akkor jön létre, amikor a kristály p-n átmenetére nyitófeszültséget kapcsolunk,

tehát a pumpálás elektromos energiával történik. Az általuk kisugárzott hullámhossz jól hangolható, így az analitikában jól használhatóak.

A festéklézerek lézereközege valamilyen erősen fluoreszkáló szerves vegyületek oldata. Pumpálásuk optikailag történik, általában valamilyen másik lézerrel. Nagy előnyük, hogy rengeteg fluoreszkáló festéket kifejlesztettek már, így a teljes látható, közeli infravörös tartomány lefedhető velük, valamint a lézereközegük könnyen cserélhető. Nagyon rövid fényimpulzusok állíthatóak elő ezen lézerekkel, így például rendkívül gyors folyamatok (piko-femto-szekundum tartomány) vizsgálatára használhatóak.

3.1.4. Továbbfejlesztési irányok

A lézerek továbbfejlesztési iránya elég sokrétű, attól függ, hogy éppen melyik tudományterületről beszélünk. Orvosi alkalmazásainál a cél az, hogy minél több eljárásban képesek legyenek használni, esetlegesen új eljárásokat megvalósítani a lézerek segítségével. Így például kísérleteztek a Raman-spektroszkópia orvosi alkalmazásával, mivel segítségével a rendellenes szövetek megkülönböztethetőek az egészséges szövetektől. Előnye, hogy a módszer non-invazív, és képalkotásra is alkalmas [7]. Elméletben a lézereket lokalizált fertőzéseknel is lehet használni, a baktériumokkal és a vírusokkal fertőzött sejtek megsemmisítésével. Kutatások azt mutatták, hogy a szövetek regenerálódását (bőr, csont, porc) is gyorsíthatja a megfelelő energiájú és hullámhosszú lézerfény.

Az iparban különböző anyagok megmunkálásánál már jelentős eredményeket értek el, azonban még mindig rengeteg potenciál rejlik ebben a területben. Mikro- és nanostruktúrák előállításában már sikerrel alkalmaztak femto szekundumos lézerimpulzusokat, amely struktúrák előállítása más módszerekkel nehézkes lett volna [8]. Jövőbeli cél, hogy lézer által kialakított morfológiákat még jobban tudják befolyásolni, kontrollálni.

Jelenleg az űrbe küldött űrhajókkal nagyrészt rádióhullámokkal kommunikálnak a tudósok, amely hullámok információtartalmát a lézerek által szolgáltatott sugárzás messze meghaladja. Ezért tesztelés alatt van a lézerekkel megvalósított „űrkommunikáció”. A projekt nehézségei, hogy egy sokkal precízebb irányzásra van szükség, valamint, hogy a lézersugarakat a felhők zavarhatják, így a jelet befolyásolhatják. Emellett egy szárazföldi támaszpontú infrastruktúrát is igényel.

Kísérleteznek lézerek által küldhető „suttogásokkal” is. A kísérlet során vízmolekulákat gerjesztettek, amely által szolgáltatott hangot egy közeli mikrofon képes volt érzékelni. A keletkezett hang körülbelül olyan hangos volt, mint egy mindennapos beszélgetés, így ennek segítségével távoli titkos üzeneteket lehet küldeni, amelyet felhasználhatnak akár a katonaságban, akár hirdetésekénél is.

3.2. Mézer

A mézerek hasonló elven működnek mint a lézerek, a különbség abban rejlik, hogy míg a lézerek nagy energiájú fotonokat emittálnak (ultraibolya, látható, közeli infravörös), addig a mézerek jóval alacsonyabb energiájú, elsősorban mikrohullámú sugárzást bocsátanak ki. A mézerekben is populáció inverziót hoznak létre pumpálással, majd a keletkező fotonokat valamilyen módon a rendszerben tartják, így a szabad úthosszuk megnő, és stimulált emisszió jön létre. Ez történhet tükrökkel, ahogyan már a lézereknél bemutattam, vagy valamilyen zárt fém struktúrában, amelyet „üreg”-nek (cavity) hívnak.

Az elektron saját impulzusmomentummal rendelkezik, amelyet spinnek neveznek. A spinhez tartozó energiaszintek közötti átmenet a mikrohullámú tartományba esik, így a mézerek pumpálása során az ehhez tartozó energiaszinteket gerjesztjük. Ezek a gerjesztett állapotok rendkívül érzékenyek az ütközésekre, vibrációkra, rotációkra, éppen ezért a gáz mézerekben nagyvákuumot alkalmaznak, valamint „híg” közeget. Ilyen közeg lehet például ammónia molekula, amelyet az első mézerben alkalmaztak, hidrogén atomok, szabad elektronok vagy rubídium gáz.

Az ammónia mézerben az ammónia molekulák alapállapota és gerjesztett állapota közötti energia frekvenciában kifejezve 23 870 MHz. Az alapállapotú és gerjesztett állapotú molekulák elválaszthatóak elektromos térben, mivel ellenkező módon reagálnak rá, az egyiket vonzza, a másikat taszítja. Az elektromos tér segítségével a gerjesztett molekulákat egy keskeny lyukon keresztül a rezonátorba tudjuk irányítani, ahol a molekulák visszakerülhetnek alapállapotba, miközben a megfelelő energiájú fotont emittálnak. A hidrogén mézerben az alapállapotú és a gerjesztett molekulák közötti energiakülönbség frekvenciában kifejezve 1 420 MHz [9]. Ebben az esetben a gerjesztett és az alapállapotú részecskék mágneses tér segítségével választhatóak szét, amely segítségével a gerjesztett állapotú részecskék a rezonátorba irányíthatóak, ahol az emisszió lejátszódhat.

Készítettek szilárd közegű mézereket is, például rubídiumból, vagy vas-dópolt zafírból, azonban ezeket a rendszereket nagyon alacsony hőmérsékletre kell hűteni azért, hogy az atomi rezgések ne zavarják az gerjesztett energiaszinteket [10]. Praktikai szempontból nagyon előnyös egy olyan szilárd közegű mézer, amely szobahőmérsékleten is képes üzemelni, ezért nagy áttörésnek számított, amikor először beszámoltak egy ilyen berendezésről 2012-ben. Ezt úgy érték el, hogy a mézerközeg para-terfenil kristályát pentacén molekulával dópolták. A kristály pumpálása optikailag történik, amely során a pentacén molekula gerjesztődik. Ezen szerves molekula (mint általában a szerves molekulák) azonban nem képes hosszú ideig ellenállni az intenzív lézerfénynek, amely a pumpálás során éri, így a mézer csupán impulzusok létrehozására alkalmas, folyamatos emisszióra nem képes.

2018-ban gyémánt közegű mézert készítettek, amely szobahőmérsékleten is képes folyamatos hullám előállítására. A gyémántot réz „üregbe” helyezték, és hibát hoztak létre benne, amelyeket „nitrogén-lyuk központnak” (nitrogen-vacancy centre) hívnak. Ezeknek a lyukaknak köszönhetően szabad elektronpárok jönnek létre a rendszerben, amelyek felelősek a mézer átmenetért. A gyémántot erős, homogén mágneses térbe helyezve a nemkötő elektronpárok degenerált energiaszintjei felhasadnak, és nitrogén lézerrel pumpálhatóak, populáció inverziót létrehozva. A relaxáció során a hibahelyek mikrohullámú sugárzást emittálnak. A gyémánt előnye, hogy jó hővezetése miatt lassan melegszik, így folyamatos üzemmódban is használható.

Mivel a mézerek által szolgáltatott mikrohullámú sugárzás frekvenciája rendkívül stabil, ezért fontos szerepet játszanak különböző frekvencia standardok meghatározásában. Ilyen alkalmazásra felhasználnak ammónia, hidrogén és cézium mézereket is. Standardként a hidrogén mézer rövidtávú stabilitása miatt rendkívül jó, azonban hosszútávon elmarad a cézium teljesítményétől. A nagy frekvencia stabilitás miatt felhasználgják őket „nagy-precíziós spektroszkópiában” (high-precision spectroscopy) is, valamint mikrohullámú jelek erősítésében is, amelyet például az űrből érkező mikrohullámú jelek feldolgozásánál használnak.

4. KONKLÚZIÓ

Összefoglalva, felfedezésük óta hatalmas fejlődésen ment keresztül mind a lézer, mind a mézer. Bár a munkám során csupán néhány alkalmazásra tértem ki, látható, hogy rendkívül elterjedtek, és sok alkalmazás esetén már nélkülözhetetlenek. Forradalmasították a technika különböző ágait, új megoldásokat, lehetőségeket létrehozva.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] M. Rose, H. Hogan: *A history of the Laser: 1960 – 2019*, **2019**, [Online], Elérhető: https://www.photonics.com/Articles/A_History_of_the_Laser_1960_-_2019/a42279
[Hozzáférve: 2020. 03. 27.]
- [2] Kubinyi Miklós: *Lézerek, lézerspektroszkópia*, [Online], Elérhető: <http://oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/fizkem/kasz/jegyzet02/>
[Hozzáférve: 2020. 03. 27.]
- [3] A. L. Schawlow: *Maser* (Verzió: 2020. január 31), [Online], Elérhető: <https://www.britannica.com/technology/maser>
[Hozzáférve: 2020. 03. 27.]
- [4] *Laser* [Online], Elérhető: <https://en.wikipedia.org/wiki/Laser>
[Hozzáférve: 2020. 03. 27.]
- [5] B. Hopp, L. Kemény, T. K. Smausz, M. Márta, K. Ónódi, D. Degovics: *Lézerek az Orvostudományban*, [Online], Elérhető: http://titan.physx.u-szeged.hu/tamop411c/public_html/L%C3%A9zerek%20az%20orvostudom%C3%A1nyban/index.html
[Hozzáférve: 2020.03.28]
- [6] W. T. Silfvast: *Lasers*, **2003**, Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition), **267-281**, Elérhető: <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00363-X>
- [7] DJ. Jordan, P. Mafi, R. Mafi, M. Malahias, A. El. Gawad: *The Use of LASER and its Further Development in Varying Aspects of Surgery*, **2016**, Open Medical Journal, *3*, **288-299**, Elérhető: <https://doi.org/10.2174/1874220301603010288>
- [8] L. Yang, J. Wei, Z. Ma, P. Song, J. Ma, Y. Zhao, Z. Huang, M. Zhang, F. Yang, X. Wang: *The Fabrication of Micro/Nano Structures by Laser Machining*, **2019**, Nanomaterials, *9*, **1789**, Elérhető: <https://doi.org/10.3390/nano9121789>
- [9] F. Matos: *1 - Radio Frequency Spectrum Management and Time and Frequency Standards*, **2002**, Reference Data for Engineers (Ninth Edition), **1-1-1-163**, Elérhető: <https://doi.org/10.1016/B978-075067291-7/50003-0>
- [10] RB. Liu: *A diamond age of masers*, **2018**, Nature, *555*, **447-449**, Elérhető: <https://doi.org/10.1038/d41586-018-03215-3>