[1]Az első lézer megépítésekor, 1960-ban új korszak kezdődött az optikában, a fény tudományában. A lézerek ezt követő rohamos fejlődése számos más területen is új tudományos eredményeket hozott, rendkívül sok érdekes alkalmazást tett lehetővé. Mik is a lézerek tulajdonképpen, hogyan működnek, milyen típusaik vannak, mire használhatók, milyen újabb érdekességek várhatók velük kapcsolatban a közeljövőben?

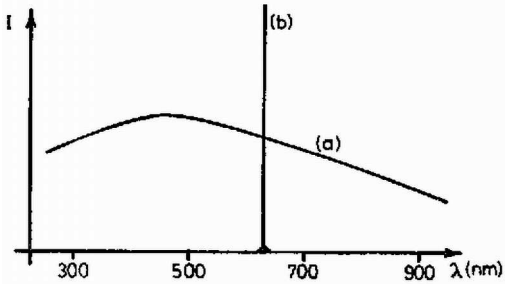
1. A lézerek alaptulajdonságai

A lézer egy olyan fénykibocsátó eszköz, amely különleges tulajdonságú fényt sugároz ki. A hagyományos fényforrások fényétől eltérő, a megkülönböztetés alapjául szolgáló sajátosságai a következők:

– egyszínűség (monokromatikusság),
– rendkívüli fényerősség (nagy fényintenzitás),
– együtt rezgő fényhullámok (koherencia),
– párhuzamos terjedés (kis divergencia).

A lézerek működésének jobb megértése céljából vizsgáljuk meg közelebbről is ezt a négy alaptulajdonságot!

A természetes fényforrások és az ember által készített korábbi lámpák általában keverék fényt sugároznak ki, ami annyit jelent, hogy fényükben a szivárvány színeinek nagy része megtalálható. Az egyes alapszíneket hullámhosszuk különbözteti meg egymástól, p1. a piros fény hullámhossza kb. 600 nanométer (nm), a zöldé kb. 500 nm. Míg a hagyományos lámpák keverék fénye többféle hullámhossznak felel meg, addig a lézerek fényében gyakorlatilag csak egyetlen hullámhossz fordul elő, azaz a lézerfény egyszínű. Összehasonlításként az 1. ábrán felrajzoltuk egy izzólámpa (a) és egy lézer (b) által kibocsátott fény erősségének hullámhosszfüggését, más néven spektrumát.



1. ábra. Izzólámpa (a) és HeNe-gázléser (b) spektruma

A fény erőssége (intenzitása) egy egységnyi felületen, egységnyi idő alatt átáramló fényenergiával jellemezhető. Ez az energia fotonszámban is kifejezhető, tehát a lézerek erős fénye nagy áramló fotonsűrűséget jelent. Hullámként elképzelve a fényt az erősség a hullámok nagyságát jelenti, azaz a lézersugárban rezgő és tovaterjedő elektromos és mágneses tér rendkívül erős lehet.

A koherencia fogalma a hullámképben válik szemléletessé: a terjedő fénytér különböző részei azonos ütemben, közös fázisban hullámzanak, így hatásaik összegződnek. Ez a tulajdonság jelentősen hozzájárul az erősség fokozásához is, a lézerfény okozta jelenségek fontossá válásához.

Az első lézerek feltűnő tulajdonsága volt, hogy fényük keskeny, csaknem tökéletesen párhuzamos nyalábban terjed. Ez a nagyon kismértékű széttartás (kis divergencia) tette lehetővé a lézerfény nagy távolságokra juttatását. Míg pl. egy szokásos fényszóró fénye néhány száz méter után több méter átmérőjű folttá szóródik szét, addig egy egyszerű hélium–neon gázlézer kezdetben 1 mm átmérőjű nyalábja még 1 km terjedés után is csak 10 cm átmérőjűvé válik. A kis divergencia a mai lézerek 99%-ára is igaz, de nem tartozik szorosan az alaptulajdonságok közé, mert nem fizikai alapelvekből, csupán a technikai megvalósítás körülményeiből következik.

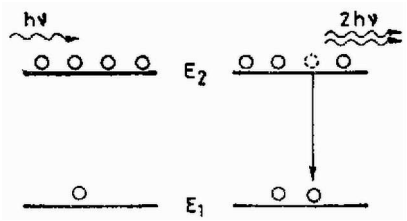
A felsorolt alaptulajdonságok mindegyike jellemzi a lézereket általában, de mint az a későbbiekben kiderül, az egyes lézertípusok esetében nem mindig teljesül mind a négy alaptulajdonság egyforma mértékben.

2. A lézerek működésének fizikai alapjai

A lézerekben is lejátszódik ugyanaz az elemi folyamat, amely minden egyes fényforrásban a fénykeletkezéshez szükséges: az anyagot alkotó elemi részecskék, atomok, molekulák, elektronok gerjesztése, vagyis magasabb energiájú állapotba juttatása; majd az energiadúsabb gerjesztett állapot visszatérése alapállapotba fénykibocsátás közben. Ezen túlmenően azonban a lézerekben egy másik jelenséget is kihasználnak: a kényszerített fotonkibocsátással (indukált emisszióval) létrehozott fényerősítést. Az eredeti angol betűszó (LASER= Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) jelentése is ezt a folyamatot nevezi meg: fényerősítés a sugárzás indukált kibocsátásával.

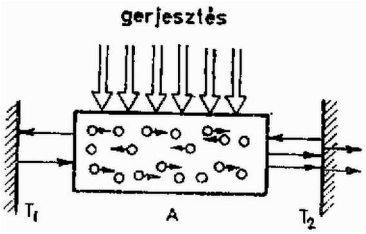
Egy gerjesztett részecske az általa őrzött energiát kétféle módon adhatja le fény formájában: teljesen véletlenszerűen, mint ahogy az a hagyományos fényforrásokban történik (ezt nevezik spontán emissziónak), vagy a már jelenlévő fénytér kibocsátásra késztető hatására (ez az indukált emisszió). Ez utóbbi esetben a keletkező sugárzás az eredetivel azonos ütemben rezgő (azonos fázisú) lesz, tehát erősíti azt (2. ábra).

[1]Az 1988. évi Téli Ifjúsági Fizikai Ankéton elhangzott előadás.



2. ábra. Az indukált emisszió folyamata. E_1, E_2: atomi energiaszintek; $h\nu$: νfrekvenciájú fényhullám fotonjainak energiája; h: Planck állandó

Az indukált és spontán emisszió minden egyes sugárzási folyamatban jelen van, de általában a spontán emisszió dominál. Ahhoz, hogy az indukált emisszió is jelentőssé váljék, sok gerjesztett atomot kell létrehozni. Egy lézer beindításához ezt a „sok gerjesztett atom – kevés alapállapotú atom" elrendeződést, vagy másképpen „populáció inverzió"-nak is nevezett állapotot kell megvalósítani. Az inverzió (megfordítás) kifejezés arra utal, hogy a környezetükkel hőmérsékleti egyensúlyban lévő atomi rendszerekben mindig jóval több az alapállapotú atom, mint a gerjesztett, s a lézerműködéshez éppen ennek a természetes eloszlásnak a megfordítására, azaz inverziójára van szükség. Az inverziós állapotba juttatott közeg alkotja a lézer fényerősítő (aktív) anyagát. Ez egyes esetekben már önmagában is elég erős koherens, kis divergenciájú, monokromatikus sugárzás, azaz lézerfény előállítására. A veszteségek miatt azonban legtöbbször szükség van visszacsatolásra is, amely optikai úton, az aktív anyag két tükör közé helyezésével valósítható meg (3. ábra).



3. ábra. Lésermőködés visszacsatolással. A: aktív anyag; T_1, T_2: 100%-os, illetve annál kisebb visszaverő-képességű tükrök

A két tükör között ide-oda haladó fény az aktív anyag fényerősítő hatására egyre erősebbé válik. Ha az egyik tükröt 100%-osnál kisebb visszaverő-képességűre készítik, akkor a felerősödött fény egy része minden fordulóban kijuthat a lézerből. Ezt a módszert nevezik optikai kicsatolásnak. Ha a kicsatolás mértéke kicsiny, folytonos működés hozható létre. Ha egyszerre veszik ki a lézerben felhalmozott fényenergiát, jóval erősebb fény nyerhető, de a folyamatos fénykibocsátás egy időre megszűnik, ami szakaszos fényfelvillanásokat eredményez. Így működnek az impulzusüzemű lézerek, amelyekből a fény periodikusan egymást követő, különálló impulzusokban jut ki. (Impulzus működést okozhat az is, ha a gerjesztett atomok túl gyorsan sugározzák ki a bennük tárolt energiát, s az inverzió újbóli megvalósulásáig egy kis várakozási időre van szükség.)

3. Lézertípusok

A lézerek osztályozásának egyik legkézenfekvőbb elve – a működés folytonos vagy impulzusos voltán túl – az aktív anyag halmazállapota szerinti megkülönböztetés. Így beszélhetünk szilárdtest-, folyadék-, gáz- és plazmalézerekről. A halmazállapot mellett léteznek más osztályozási szempontok is, így kerültek a szilárdtestlézerektől elkülönített csoportba eltérő elektromos vezetési tulajdonságaik miatt a félvezetőlézerek, s a gerjesztés különlegessége választotta ki a kémiai lézereket a gázlézerek osztályából.

Az első lézer *szilárdtestlézer* volt. A lézer aktív anyaga egy villanólámpákkal gerjesztett rubin-kristály (króm szennyező ionokat tartalmazó alumíniumoxid kristály) volt. A rubin-lézer megépítését hamarosan nagyon sok más szilárd anyag lézerként való kipróbálása követte. Több száz olyan szilárd anyagot találtak, amely lézerfény kibocsátására képes, a gyakorlatban azonban mégis csak három típus terjedt el (I. táblázat): a rubin, a neodímium:YAG (neodímium ionokkal szennyezett ittrium–alumínium–gránát) és a neodímium: üveg (szilikát-, vagy foszfátüvegbe ágyazott neodímium ionok). A szilárdtestlézerek legfontosabb sajátsága, hogy velük állíthatók elő a legnagyobb energiájú és teljesítményű fényimpulzusok.

A lézerek legelterjedtebb és legtöbbet tanulmányozott típusa, a helium–neon *gázlézer* felfedezését (1961) csupán 8 hónap választja el a szilárdtestlézerek felfedezésétől. A gázlézerek esetében a populáció inverziót általában egy elektromos kisülési csőben az elektronok, atomok és ionok között lezajló ütközések, energiakicserélődési folyamatok segítségével valósítják meg. A I. táblázatban felsorolt típusaik közül külön érdemes szólni a kriptonfluorid-lézerről,

amely csak egyike a nemesgáz és halogén atomok vegyülésével keletkező „excimer” molekulákra alapuló excimer lézereknek (xenonklorid, xenonfluorid, argonfluorid). Ezek a legutóbbi évtizedben kifejlesztett lézerek azok, amelyek a gázlézerek között is lehetővé teszik rendkívül nagy fényintenzitások elérését. Mivel hullámhosszuk jóval rövidebb a korábbi gázlézer hullámhosszaknál, jobb energiakoncentrálás valósítható meg.

A *félvezetőlézerek* jó hatásfokukkal, kis méreteikkel foglalnak el különleges helyet a lézerek között. 1962-ben történt felfedezésük után sokáig csak laboratóriumi érdekességnek számítottak. Rövid élettartamuk (néhány másodperc, vagy perc működés után tönkre mentek), viszonylag rossz koherenciájuk és nagy divergenciájuk szabott határt elterjedésüknek. Gerjesztésük elektromos árammal, a félvezető p-n átmenetére adott elektromos térrel oldható meg. Tükörként a félvezető kristály simára csiszolt véglapjai szolgálhatnak. Napjainkban a félvezetőtechnika fejlődése tette lehetővé elterjedésüket. Legjellemzőbb típusuk a galliumarzenid, amelyet gyakran gallium–alumíniumarzenid/galliumarzenid egymásra rétegezett szerkezetben állítanak elő.

Lézerek főbb típusai

Aktív lézeranyag	Működési hullámhossz	Működési mód	Átlag-teljesítmény	Impulzus időtartam	Impulzus energia	Impulzus csúcs-teljesítmény
a) *szilárdtest*						
rubin	694,3 nm	impulzus	—	10–30 ns	0,1–5 J	100 MW
neodimium:YAG	1064 mm	impulzus		5–20 ns	0,1–1 J	100 MW
		folytonos	200 W	—	—	—
neodimium:üveg	1056 nm	impulzus	—	2–5 ps	2–20 MJ	GW
		impulzus	—	3 ns	1 kJ	TW
b) *gáz*						
helium-neon	632,8 nm	folytonos	1–50 mW	—	—	—
argon-ion	514,5 nm	folytonos	1–10 W	—	—	—
		impulzus	—	100 ns	100 mJ	MW
réz-fémgőz	510 nm	impulzus	4–40 kW	5–40 ns	1–10 mJ	MW
szén-dioxid	10,6 μm	folytonos	1–10 kW	—	—	
		impulzus	—	ps–10 ns	0,1–1 kJ	MW–GW
alkoholgőz	119 μm	folytonos	50–200 mW	—	—	—
nitrogén	337 nm	impulzus	—	0,2–20 ns	5–20 mJ	MW
excimer	248 nm	impulzus	—	20–50 ns	200 mJ	10 MW
c) *festék*						
Rhodamin 6G	0,26–1,2 μm	folytonos	10–100 mW	—	—	—
	570–620 nm	impulzus	—	6 fs–20 ns	μJ–J	2–10 MW
d) *félvezető*						
galliumarzenid	0,5–30 μm	folytonos	10–100 mW	—	—	—
	850–900 nm	impulzus	—	0,1–1 μs	5–20 μJ	10–50 W
indiumfoszfid	1,2–1,6 μm	folytonos	200 mW	—	—	—
e) *kémiai*						
hidrogénfluorid	2,7–3 μm	impulzus	—	—	500 kJ	—
f) *röntgen*						
szelén-plazma	20 nm	impulzus	—	(500 ps)	(0,2 μJ)	(400 W)

A folyadék halmazállapotú *festéklézerek*ben általában valamilyen szerves oldószerben oldott festékmolekulákat használnak a lézersugár előállítására. Gerjesztésük egy másik lézer (nitrogén, argon, neodímium:YAG, excimer) fényével történik, s legvonzóbb tulajdonságuk a hangolhatóság. Ez a lézerfény színének, hullámhosszának folyamatos változtatási lehetőségét jelenti, a molekulák fizikai sajátságai által megszabott korlátok között. Pl. a Rhodamin 6 G nevű festék alkalmazásával 570–620 nanométer között bármilyen hullámhosszú lézersugárzás előállítható, de a festék cseréjével akár az egész látható színskála átfogható. Napjainkban a festéklézerek a velük előállítható legrövidebb időtartamú fényimpulzusokról, a mindössze 6 femtoszekundum hosszúságú, ultra gyors, alig 3 optikai rezgési ciklust tartalmazó fényfelvillanásokról híresek. (Ennyi idő alatt a 300 000 km/s sebességű fény is csupán 2 mikrométer utat tesz meg!)

A *kémiai lézerek*ben vegyi reakciók energiáját használják fel az aktív anyag gerjesztésére. Mivel az alkalmazott molekulák energiaszint-különbségeinek infravörös sugárzás felel meg, a kémiai lézerek fényének hullámhossza a 3–10 mikrométer tartományba esik. Tipikus példájuk a haditechnikában alkalmazott gázdinamikus hidrogénfluorid-lézer, amely 1–2 megawatt átlagteljesítmény kisugárzására képes, $15 - 20\%$ kémiai hatásfokkal.

Az anyag atomjait ionizálva elektronok, ionok és semleges atomok keveréke, plazma képződik. Nagyon gyorsan (néhány nanoszekundum alatt) pl. összefokuszált lézerfénnyel létrehozott, magas hőmérsékletű ($10^5 - 10^7$ K) plazmákban a többszörösen ionizált atomok energiaátmeneteinek felhasználásával röntgen tartományba eső lézersugárzást lehet előállítani. A *röntgenlézerek* jelentősége hullámhosszuk rövidségében (néhány tized nanométer–50 nanométer) rejlik. Még rövidebb hullámhosszú koherens sugárzás állítható elő az atommagokon belüli folyamatok kihasználásával, ezek a fényforrások a *gammalézerek*. Ez utóbbi két típus megvalósítása ma még számos technikai akadályba ütközik (pl. a gerjesztett állapotok rendkívül rövid spontán élettartama, az adott hullámhossztartományban is jól

működő optikai elemek hiánya). Váltakozó mágneses térben haladó elektronok koherens fényt sugározhatnak: ez a *szabadelektronlézer* működésének alapelve, amelyek megvalósításához nagy energiájú elektronokra, elektrongyorsítókra van szükség.

4. A lézerek szerepe a tudományban, továbbfejlesztésük fő irányai

A lézerek megszámlálhatatlan felhasználási lehetősége, technikai alkalmazása mellett – amelyekről az érdeklődők részletesen tájékozódhatnak a javasolt irodalom köteteiből – nem feledkezhetünk meg a lézerek tudományban betöltött lényeges szerepéről sem. A velük előállítható nagy fényintenzitások olyan új jelenségeket hoztak felszínre, amelyek korábban kísérletileg megfigyelhetetlenek voltak. Egy új tudományág született, a nemlineáris optika, amely az erős lézerterek és az anyag kölcsönhatásait vizsgálja. Ezek egyik érdekes példája az optikai felharmonikus-keltés, amellyel egy adott frekvenciájú lézersugárzásból egy nemlineáris kristályban kétszeres frekvenciájú sugárzást lehet előállítani, pl. piros fényből zöldet (ez korábban csak fordítva volt lehetséges). Az új sugárzás szintén koherens, lézerfényszerű tulajdonságokat mutató fény lesz, tehát ez a módszer is lehetőséget ad a meglévő lézerek hullámhosszainak, színének kiterjesztésére.

A lézerek fejlesztésének három fő iránya figyelhető meg napjainkban:

– a működési hullámhossztartomány további kiterjesztése, hangolható lézerek építése. (A lézerfénnyel keltett plazmákban remélik elérni a rövidebb, a távoli ultraibolya és a röntgen tartományba eső hullámhosszakat; a hangolhatóság ma már egyes szilárdtestlézerek esetében is megvalósítható, az alexandrit-lézer a $700 - 800$ nanométer, a káliumklorid színcentrum-lézer pedig az 1,5–1,7 mikrométer tartományban hangolható.)

– nagyobb fényenergiák és fényteljesítmények elérése. (Erre a célra a kutatókat nemcsak a világ energiagondjait esetleg megoldó lézeres termonukleáris fúzió megvalósításának gondolata és az elvileg új, érdekes kölcsönhatások megismerése serkentik, hanem a haditechnika igényei is kényszerítik.)

– miniatürizálás, hatásfoknövelés. (A lézerek méretének csökkentése, a hordozható kivitel megvalósítása minden egyes lézertípus esetében fontos cél. A hatásfoknövelés egyik szép példája a szilárdtestlézerek esetében: a korábbi nagy veszteségű villanólámpák helyett keskeny sávban sugárzó félvezető lézerdiódákat alkalmaznak a Nd:YAG-lézer optikai gerjesztésére, így a hatásfok 0,1 %-ról 10 %-ra növelhető, ami a méretek lényeges csökkenését is eredményezi.)

A lézerkutató laboratóriumokban ezeken a fő területeken túl jelentős erőfeszítéseket tesznek új típusú gerjesztő eljárások (elektronnyalábok, fotokémiai reakciók) megvalósítására és új lézeranyagok (4 összetevőjű félvezetők, különféle szennyezésű üvegek és kristályok) előállítására is. A mindennapi életben is egyre inkább terjedni fognak a lézerekkel szoros kapcsolatban lévő eszközök mint pl. a lézeres vonalkód leolvasók, lézeres nyomtatók, lézeres digitális lemezjátszók.

Javasolt irodalom:

K. Tradowsky: A laser ABC-je, Műszaki Könyvkiadó, 1971.
Csillag L.; Kroó N.: A lézerek titkai, Kozmosz Könyvek, 1987.
J. E. Harry: Ipari lézerek és alkalmazásuk, Műszaki Könyvkiadó, 1979.
A. Nussbaum, R. A. Phillips: Modern optika, Műszaki Könyvkiadó, 1982.