

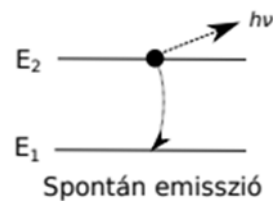
# Rövid lézerimpulzusok előállítása

## I. rész

Az elmúlt 30 évben a lézerfizika gyors fejlődésen ment keresztül, amelynek következtében az előállított lézerimpulzusok hossza több nagyságrendet csökkent, míg a csúcshintenzitásuk\* több nagyságrendet növekedett. Jelen pillanatban a legrövidebb lézerimpulzus rekordját 2017-ben érték el, amikor a Svájci Szövetségi Műszaki Intézetben (ETH Zürich) sikeresen előállítottak egy 43 attoszekundum ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ) hosszúságú lézerimpulzust [1]. Ezzel az impulzushosszal összehasonlítható a hidrogén atom körül keringő, alapállapotban lévő elektron keringési periódusa, amelynek értéke 24,18 attoszekundum. Ahhoz, hogy ezt az impulzushosszat szemléltessük kiszámolhatjuk azt, hogy 1 másodperc időintervallumba 23,25 billiárd ( $10^{15}$ ) 43-as hosszú lézerimpulzus fér bele. Rövid lézerimpulzusok esetén az általuk hordozott energia rövid időintervallumba van sűrítve, így ezen lézerimpulzusok közepén az intenzitásuk (csúcshintenzitás) nagyon nagy értékeket vehet fel. A csúcshintenzitás rekordját legutóbb 2021-ben döntötték meg, amikor a Dél Koreai Alaptudományok Kutatóintézetében (Institute for Basic Science) előállítottak egy  $1,1 \cdot 10^{23} \text{ W/m}^2$  csúcshintenzitású, 19,6 femtoszekundum ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ) hosszú lézerimpulzust [2]. Ezen csúcshintenzitás eléréséhez arra is szükség volt, hogy a lézerimpulzust egy kis területre (1,1 mikrométer átmérőjű korong) fókuszálják. Ez az intenzitás egyenértékű azzal az intenzitással, amit akkor kapnánk, ha a Napból a Földre jutó fénysugarakat egy 10 mikrométer átmérőjű korongra vetítenénk.

### Hagyományos és lézer fényforrások működése

Hagyományos források fénysugarait alkotó fotonok kibocsátásáért a fényforrást alkotó kvantumrendszerek (ezek lehetnek: atomok, molekulák, szilárd testek, plazma stb.) felelősek. Ezen rendszerek legegyszerűbb modellje az 1. ábrán látható, ahol  $E_1$  a rendszer alapállapotát (alap energianívóját), míg  $E_2$  a rendszer gerjesztett állapotát jelöli. Ezen rendszerek tulajdonsága, hogy gerjesztett állapotban csak véges ideig maradhatnak, így véges időn belül relaxálódnak, miközben a  $\Delta E = E_2 - E_1$  fölös energiájukat átadják környezetüknek.

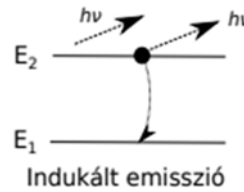


1. ábra  
Spontán emisszió  
egy kétnívós  
kvantumrendszerben

\* Intenzitás alatt az egységnyi felületen egységnyi idő alatt áthaladó fényenergiát értjük és  $\text{W/m}^2$ -ben mérjük.



A leggyakoribb esetben ez az energiaátadás egy spontán kibocsájtott foton formájában (spontán emisszió) történik, amelynek  $h\nu$  energiája megegyezik az energianívók közötti  $\Delta E$  különbséggel. A hagyományos fényforrásokat alkotó gerjesztett kvantumrendszerek egymástól függetlenül bocsájtják ki a fotonokat, így azok között nem létezik korreláció. Egy ilyen fénynyalábot inkoherensnek nevezünk. A hagyományos fényforrások fotonkibocsájtó rendszerei többféle mechanizmussal gerjeszthetők: termikus mozgás során létrejövő ütközések (pl. magas hőmérsékleten lévő gázok), kémiai reakciók során felszabaduló energia (pl. gyertya lángja, tábornűz), elektronnyalábbal való ütközés során (pl. kisülési csövek), elektronárammal (pl. izzószálas fényforrások) stb. Az 1. ábrán bemutatott modellel ellentétben a valós rendszerekben a gerjesztett energianívók száma végtelen, így a spontán emisszió során kibocsájtott fotonok energiája különbözhet, annak függvényében, hogy melyik gerjesztett nívóról történt a spontán emisszió.

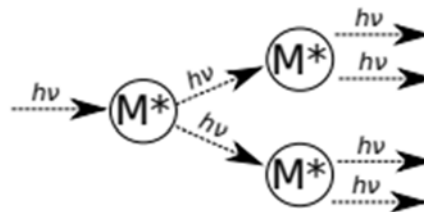


2. ábra

*Indukált emisszió egy két-nívós kvantumrendszerben*

Albert Einstein volt az első, aki a fény-anyag kölcsönhatásról szóló, 1917-ben megjelent cikkében feltételezte az indukált fotonkibocsájtás (indukált emisszió) létét. Indukált emisszió akkor jelentkezik, amikor a gerjesztett kvantumrendszer környezetében megjelenik egy megfelelő energiájú foton ( $h\nu = \Delta E$ ), amelynek hatására a rendszer relaxálódik, miközben a fölös energiáját foton formájában bocsájtja ki. A kibocsájtott foton tulajdonságai (energiája, fázisa, polarizációs állapota) megegyezik a kvantumrendszer relaxációját indukáló foton tulajdonságaival (2. ábra).

Ugyancsak Einstein számolta ki azt, hogy az indukált emisszió valószínűsége nagyobb, mint a spontán emisszióé. Így, ha egy közegbe, amelyben nagyon sok gerjesztett állapotban lévő kvantumrendszer ( $M^*$ -gal jelöltük a 3. ábrán) található, egy megfelelő energiájú foton téved, akkor ez a gerjesztett kvantumrendszerek lavinaszerű relaxációját indítja el. Ezt a folyamatot a 3. ábrán szemléltetjük, ahol a beérkező foton találkozik egy gerjesztett rendszerrel, amelyben indukált emisszió révén generál egy új foton.



3. ábra

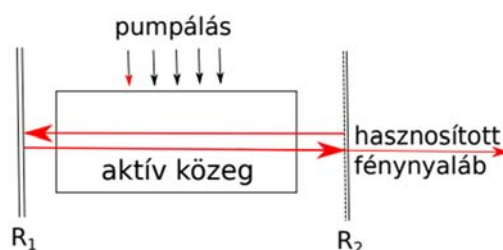
*Az indukált emisszió által fenntartott fotonlavina*



folymatodik, amíg a fotonnyaláb a gerjesztett kvantumrendszereket tartalmazó közegen belül terjed, és minden rekurzív lépés során a fotonnyalábban található fotonok száma megkétszereződik. Mivel a fénnyaláb összes fotonja a lavinát elindító foton mása, ezért a nyalábot alkotó fotonok közötti korreláció mértéke magas. E folyamat eredményeként a közegen létrejövő fénnyalábot koherensnek nevezzük, amelynek intenzitása exponenciálisan növekszik miközben áthalad a közegen.

A fent röviden bemutatott folyamatot angolul „**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation”-ként ismerjük, amelynek magyar tükörfordítása: fény erősítése indukált emisszió segítségével. Ennek kezdőbetűiből alkotható meg a LASER rövidítés, amelyet magyarítva LÉZER-ként minden olyan fényforrás jellemzésére használunk, amely az indukált emisszió elvén alapul.

Annak, hogy a gerjesztett kvantumrendszereket tartalmazó közegen áthaladó fénnyaláb intenzitása növekedjen, elengedhetetlen feltétele az, hogy a közegen található gerjesztett kvantumrendszerek száma nagyobb legyen, mint a relaxált (alapállapotban lévő) kvantumrendszerek száma. Ezt az állapotot populációinverzió-



4. ábra  
*Lézerek alkotóelemei*

nak nevezzük a fizikában. Ha a populációinverzió nem valósul meg, akkor a közegen áthaladó fotonok nagyobb valószínűséggel találkoznak egy alapállapotban lévő kvantumrendszerrel, amelyek elnyelik őket, ezáltal csökkentve a fénnyaláb intenzitását. Mivel a populációinverzió gyakorlati megvalósítása nem triviális, az indukált emisszió felfedezése után egész 1960-ig kellett várni a gyakorlati megvalósításra, amikor Theodore Maiman megépítette az első látható tartományban működő lézert. A Maiman által épített lézerben az aktív közeg – az a közeg, amelyben a populációinverziót létrehozuk – egy szintetikus rubin kristály, amelyben az aktív kvantumrendszereket a kristályban szennyeződésként jelenlévő króm atomok képezik.

Az indukált emisszió által megvalósított fényerősítés annál nagyobb, minél hosszabb utat tesz meg a fénnyaláb az aktív közegen. Gyakorlati megvalósítás szempontjából viszont nem túl praktikus egy hosszú aktív közeg használata, így az aktív közegen megtett fényút hossza úgy növelhető, hogy a fénnyalábot többször átvezetjük az aktív közegen. Ez úgy valósítható meg, hogy az aktív közeget két tükör közé ( $R_1$  és  $R_2$  a 4. ábrán) helyezzük. A két tükör közül az



egyik ( $R_1$ ) közel tökéletes fényvisszaverő, míg a másik ( $R_2$ ) csak részleges fényvisszaverő, így a rá eső fényenergia kis részét (pár százalék) átengedi. A részleges áteresztő tükrön keresztül kilépő fénynyalábot hasznosítjuk az alkalmazásokban. A két tükör által alkotott rendszert a lézer rezonátorának nevezzük, amely a fent említett szerepe mellett azt is meghatározza, hogy milyen hullámhosszú fénysugarak stabilak a lézer belsejében. Hosszútávon a rezonátor belsejében csak azok a fénysugarak terjedhetnek, amelyek a két tükör közötti térészben állóhullámokat alkotnak. Ezen fénysugarak hullámhosszára a következő feltétel érvényes:  $\lambda_k = 2L/k$ , ahol  $L$  a rezonátor hossza (a két tükör közötti távolság), míg  $k$  egy természetes szám. Ezen megengedett hullámhosszakot a rezonátor longitudinális módusainak nevezzük.

Ahhoz, hogy az aktív közegben a populációinverzió fenntartható legyen, az aktív közeg kvantumrendszerait folyamatosan gerjeszteni kell külső energiabefektetéssel. Ezt a folyamatot az aktív közeg pumpálásának nevezzük, amelyet a leggyakrabban hagyományos fényforrásokkal, vagy elektronnyalábbal végzünk.

A rubinlézer megépítése gyors fejlődést indított el, amelynek következtében a kifejlesztett lézertípusok száma ugrásszerűen megnőtt, ezért minden egyes lézertípus bemutatása lehetetlen, így itt csak a fő lézertípusokat említjük meg. A lézereket leggyakrabban az aktív közegük alapján csoportosítjuk:

*Szilárdtestlézerek.* Az aktív közeg egy átlátszó kristály és a benne található szennyezőatomok (pl. neodímium, króm, erbium, titán stb.) alkotják. A legtöbb esetben a pumpálás inkoherens fényforrásokkal történik.

*Gázlézerek.* Az aktív közeg egy gáz vagy gázkeverék (He-Ne, Ar<sup>+</sup>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> stb.), amely hermetikusan zárt tartályban található. A pumpálás az esetek többségében elektronnyalábbal történik.

*Festéklézerek.* Az aktív közeget fluoreszkáló festékmolekulák alkotják, amelyek valamilyen oldószerben vannak feloldva. A pumpálást inkoherens fényforrások biztosítják.

*Szálllézerek.* Az aktív közeg egy optikai szál, a benne található szennyezőatomokkal együtt. A pumpálást inkoherens fényforrások biztosítják.

*Félvezető lézerek.* Az aktív közeg egy félvezető dióda p-n átmenete. A pumpálás elektromos áram segítségével történik.

## Könyvészet

[1] Thomas Gaumnitz et. al, *Optics Express* **25** (2017) 27506.

[2] Jin Woo Yoon et. al, *Optica* **8** (2021) 630.

[3] Donna Strickland, Gerard Mourou, *Optics Communications* **56** (1985) 219.

**Borbély Sándor**



2022-2023/1



15

