A modern optika néhány kérdése*

Bevezetés

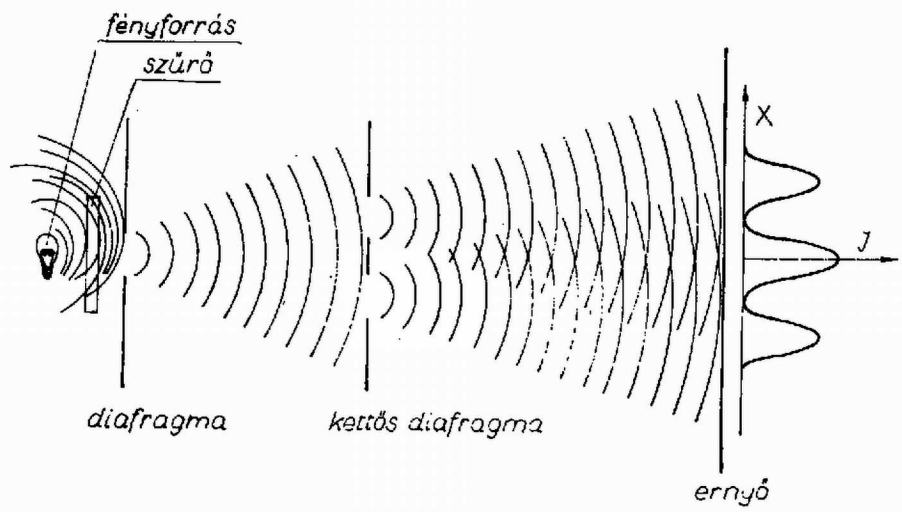
Az optika a fény tudománya. Alapvető törvényei és eszközei már a XIX. sz. végére ismertté váltak. Újabb fellendülése az utóbbi 30 évben következett be, és főként a *lézerek* felfedezésének tulajdonítható. A lézer: különleges fényforrás. A lézerfény fő sajátosságai: az *irányitottság*, az *egyszínűség* (monokromatikusság), az e két sajátságból adódó térbeli, ill. időbeli *rendezettség* (koherencia), továbbá az ezen irányított és rendezett nyalábba koncentrálható *nagy fényteljesítmény.*

A következőkben e sajátságokat vesszük közelebbről szemügyre, majd a modern optika három olyan területével foglalkozunk, melyek szorosan kapcsolódnak a lézerekhez. Ezek: az optikai méréstechnika, a holográfia és a nemlineáris optika.

A lézerfény sajátságai

A lézerek felépítésével, működésével és fajtáival, továbbá a hagyományos fény tulajdonságaival korábbi KöMaL cikkek részletesen foglalkoztak [lásd 1–2]. Mi itt röviden összefoglaljuk a lézerfény sajátosságait, összehasonlítva a hagyományos fény adta lehetőségekkel.

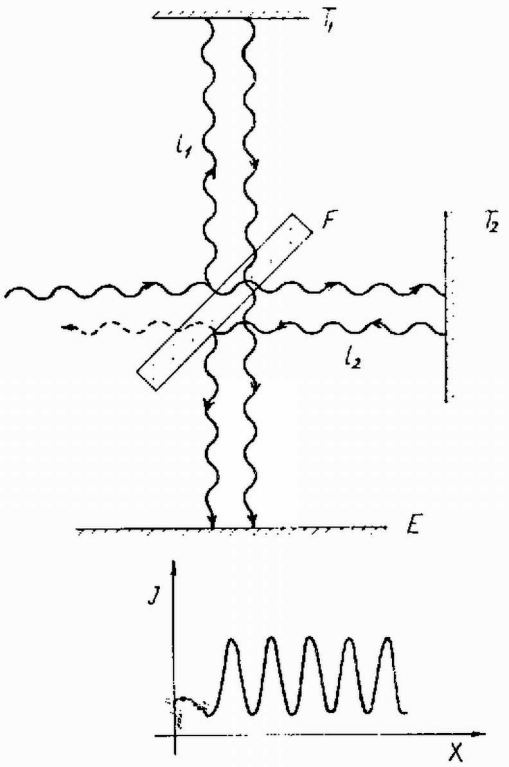
A fénykisugárzás atomi méretű elektromos töltések mozgásához kapcsolódik. Hagyományos fényforrásainkban az atomok egymástól függetlenül, a tér minden irányába sugároznak; kisugárzott fényük sok elemi hullám összegződése, melyben a rezgések fázisa térben és időben rendszertelenül változik. Röviden azt mondhatjuk, hogy a közönséges fény *inkoherens.* A fény rendezettsége javítható. Pontszerű fényforrástól nagy távolságban a hullámtér két viszonylag közeli pontjában a hullám fázisa már többé-kevésbé egyformán változik; a térbeli koherencia nő. Speciális fényforrást (pl. Hg-lámpát, vagy Na-lámpát) használva, mely ún. vonalas színképet sugároz, s ebből a színképből szűrővel egy színképvonalat kiszűrve a rezgések időbeli rendezettsége is jelentősen javítható; a monokromatikusság, az időbeli koherencia nő. Mindkét esetben azonban a hullám „tisztítása" óriási fényerősség-csökkenéssel jár együtt, úgyhogy egy kompromisszummal kell megelégedni, s annyira javítani a koherenciát, hogy még elfogadható maradjon a fényerősség.



1. ábra. Young-interferométer vázlata. A színszűrő a fénynyaláb monokromatikusságát; az el diafragma a hullám térbeli rendezettségét javítja. Lézer esetén a nyaláb közvetlenül esik a kett diafragmára. Az ábra jobb oldalán az ernyőn észlelt interferenciacsíkok intenzitáseloszlása látha X a középponttól mért távolság; I az intenzitás.

A térbeli koherenciát *Young-féle interferométerrel* (kettős nyílással), az időbeli koherenciát *Michelson-féle interferométerrel* lehet mérni. A Young-interferométernél a hullámfrontból két kis nyílással kivágunk egy kis részletet (1. ábra). A nyílásokon elhajló fénynyalábok a közös térrészben interferálnak; az itt elhelyezett ernyőn interferenciacsíkok jelennek meg. A maximális és a minimális intenzitásból ($I_{\max}$, $I_{\min}$) határozható meg az ún. V láthatóság $\left(V = \dfrac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}\right)$, a térbeli koherencia mértéke a két nyílás helyén. Ideális térbeli koherencia esetén $V = 1$ (a minimum teljesen sötét), inkoherens esetben $V = 0$ (a csíkok eltűnnek). Hagyományos fényforrásoknál V általában kisebb 1-nél.

*Az 1989. évi Téli Ifjúsági Fizikai Ankéton elhangzott előadás.



2. ábra. Michelson interferométer vázlata. F féligáteresztő tükör; T_1 és T_2 síktükrök; E ernyő. A jobb áttekinthetőség érdekében a tükrökre beeső, ill. azokról visszaverődő hullámokat egymás mellett haladó, elkülönített hullámvonalakkal ábrázoltuk. A valóságban ezek önmagukba visszaverődő, véges keresztmetszetű nyalábok. X és I mint az 1. ábrán.

A Michelson interferométernél (2. ábra) az F féligáteresztő tükörrel létrehozott két résznyaláb a két karban különböző hosszúságú ($2l_1$, ill. $2l_2$) utakat fut be, majd ugyanezen F félig-tükrön egyesülve az E ernyőn interferálnak; úthosszkülönbségüktől függően erősítik, vagy gyengítik egymást. Ha az egyik tükör a tengelyre merőleges helyzethez képest kissé meg van döntve, akkor az ernyőn interferenciacsíkok jelennek meg. Ezek láthatósága az időbeli koherencia mértéke. A hosszabb utat befutó résznyaláb ugyanis később ér az ernyőhöz, s közben a hullám fázisa megváltozhat, s emiatt a két hullám időben változóan hol erősítheti, hol gyengítheti egymást; az interferenciakép időben változik, s kiátlagolódva a láthatóságot lerontja. Hagyományos fényforrással (Hg-lámpával, amelynek zöld vonalát szűrővel kivágtuk), közel egyenlő karhossznál még elérhető kontrasztos interferenciakép ($V \approx 1$), de kb. 1 cm úthosszkülönbségnél (ami megfelel kb. $3 \cdot 10^{-11}$s időkésésnek) már teljesen eltűnnek az interferenciacsíkok ($V = 0$).

Tekintsük most a lézer fényforrásokat. A lézerben az ún. kényszersugárzás (indukált emisszió) révén – egy szűk rezgéstartományban – egymáshoz csatolódik a gerjesztett atomok sugárzása. (Ehhez speciálisan „preparálni" kell a fénysugárzásra gerjesztett közeg atomjait.) A kényszersugárzásban résztvevő atomok mind *azonos irányba és azonos ütemben* sugároznak. (Az irányt a közeg geometriája és egy tükörpárból álló ún. visszacsatoló rezonátor, az ütemet a közeg atomjainak lehetséges energiaállapotai és a rezonátor együttesen határozzák meg.) Ennek következtében a lézerfény nagymértékben irányított, térbeli koherenciája teljes ($V = 1$), s időbeli koherenciája is sokszorosan felülmúlja a legjobb hagyományos fényforrásokét. Speciális lézerek használata esetén akár 100 m úthosszkülönbségnél is elérhető jó interferenciakép.

Nézzük a lézernyaláb *irányítottságának* kérdését. Az irányítottság vagy párhuzamosság annyit jelent, hogy a lézernyaláb keresztmetszete a terjedés során csak lassan növekszik. Tipikus a kb. 10^{-3} radián széttartási szög; pl. az ismert vörösszínű hélium–neon gázlézer kezdeti 1–2 mm átmérőjű nyalábja 1 km után is csak kb. 1 m átmérőjűre szélesedik. Optikai úton a lézernyaláb széttartása – az elhajlás által megszabott határig – még tovább csökkenthető. Egy kísérletnél pl. tükrös távcsővel rubin lézernyalábot vetítettek a Holdra. Ez ott kb. 200 m átmérőjű foltot világított meg, ami $5 \cdot 10^{-7}$ radián széttartási szögnek felel meg. Említésre méltó még a párhuzamos lézernyaláb egy további előnye: lencsével igen kis folttá sűríthető. A d foltátmérőre igaz, hogy $d \approx f \cdot \theta$, ahol f a fókusztávolság, θ a nyaláb széttartási szöge. (Ha pl. $f = 1$ cm és $\theta = 10^{-3}$ rad, akkor $d \approx 10$ μm.)

Foglalkozzunk még a *fényteljesítmény* kérdésével. Említettük, hogy – hagyományos fényforrásnál – a koherens fénynyaláb előállítása jelentős teljesítménycsökkenéssel jár együtt. Ugyanez érvényes irányított (párhuzamos) fénynyaláb előállítására is. A lézer fényforrásnál ugyanakkor mind a koherencia, mind a párhuzamosság magától adódik, ezért –

azonos koherenciára és széttartásra vonatkoztatva – még a legkisebb – iskolai demonstrációs célra használt – 1 mW-os He–Ne lézer teljesítménye is több, (2–4) nagyságrenddel meghaladja a hagyományos fényforrások teljesítményét. A lézerek teljesítménye még jelentősen növelhető: más folytonos üzemű lézerekkel kb. 4 nagyságrenddel, impulzus-lézerekkel – rövid időkre – újabb 3–6 nagyságrenddel. A teljesítménysűrűség pedig (teljesítmény/felület) – fókuszálással – még ezen túl is további 3–4 nagyságrenddel nagyobb lehet. (Viszonylag könnyen elérhető ily módon 10^{12} W/cm^2.)

A nagy fényteljesítmény a lézerek legfőbb előnye a modern optikában, nem csak azért mert kiterjesztette alkalmazási lehetőségeiket – a korábbi nehézkes és hosszadalmas mérések a lézerekkel gyorsabbá, könnyebben elvégezhetővé és pontosabbá váltak – hanem mert a lézerekkel olyan új lehetőségek is megnyíltak, melyekre korábban gondolni sem lehetett. A következőben néhány példát mutatunk be ezekre.

Optikai méréstechnika

A Michelson-interferométer alkalmas nagypontosságú távolságmérésre. Az egyik karban a tükröt önmagával párhuzamosan eltolva, az ernyőn észlelt csíkok elmozdulnak: $\lambda/2$-nyi eltolásra – ami az oda-vissza út miatt λ hullámhossznyi úthosszváltozásnak felel meg. Mindegyik csík épp a következő helyére tolódik. Számolva a csíkelmozdulásokat – λ pontos ismeretében – a kezdő és végpont távolsága meghatározható. Világos, hogy a mérés feltétele a jó koherencia, a pontosság mértéke pedig a λ állandósága. Hagyományos fényforrással néhány cm-es távolságot kb. $0,1$ μm pontossággal lehet mérni. Lézer fényforrással viszont ma már akár több 10 méteres távolságok is mérhetők, $0,01$ μm pontosság mellett. Említésre méltó, hogy a lézeres változatnál nem síktükröt, hanem ún. *sarokprizmát* mozgatnak a mérendő távolság két végpontja között. Ez a prizma a ráeső fénynyalábot önmagával párhuzamosan veri vissza, s így az esetleges szögingadozásból adódó hiba elesik. A lézer interferométereket a gépiparban és a tudományos kutatásban alkalmazzák.

Egy érdekes alkalmazásként megemlíthető a g nehézségi gyorsulás mérése Michelson interferométerrel. Itt az egyik kar függőlegesre állított és légritkított csőben van, s a sarokprizmát ebben szabadon leejtik. Egyidejűleg pontosan mérik a leeső prizma s hely- és t időkoordinátáit, amiből az $s = \frac{1}{2}g \cdot t^2$ képlet alapján a g helyi értéke igen pontosan (kb. 7 jegy pontossággal) meghatározható.

Az irányított és nagy teljesítményű lézerfénynek talán leglátványosabb alkalmazása volt a Föld–Hold távolság megmérése. 1969-ben az Apollo 11 űrhajó utasai sarokprizmarendszert helyeztek el a Hold felszínén. A Földről távcsővel párhuzamosított nyalábú rubinlézer fényimpulzusait „lőtték” a Hold felületének ezen részére, s pontosan megmérték a fényimpulzusok indulása és visszaérkezése között eltelt időt. Az időadatokból – a fénysebesség ismeretében – a Föld és a Hold adott két pontjának távolsága kb. 20 cm-es pontossággal meghatározható volt.

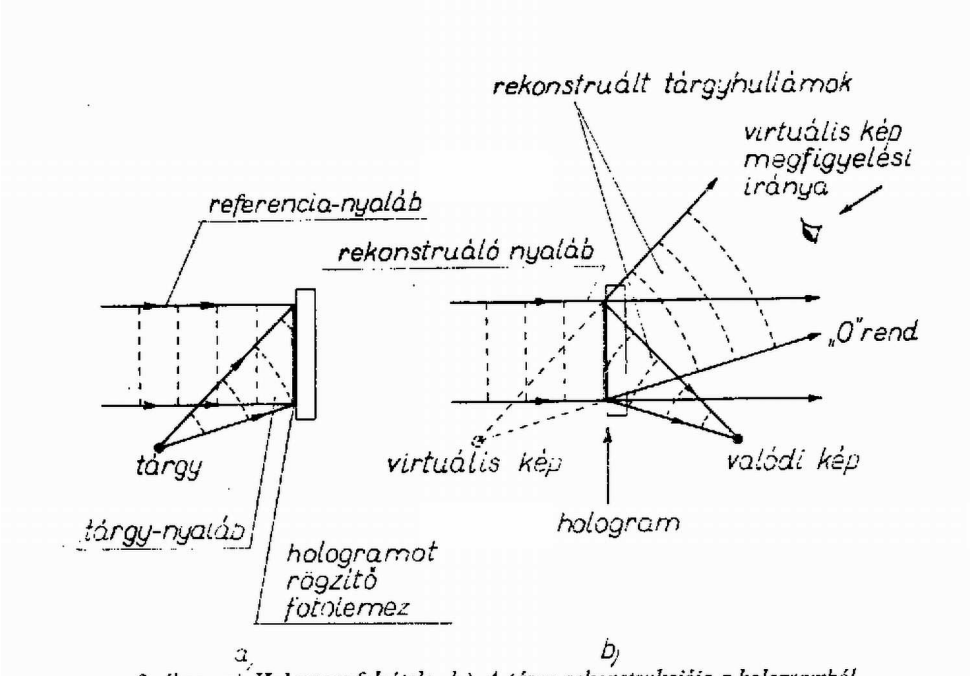
A c fénysebesség értékének pontos ismerete nemcsak az előbbi kísérletnél, hanem a fizika alapjai szempontjából is döntő jelentőségű. Az igen állandó hullámhosszú (és egyben állandó frekvenciájú) lézerek révén lehetővé vált a c újabb igen pontos meghatározása is. 1973-ban több laboratóriumban egyidejűleg megmérték különlegesen stabil hélium–neon lézerek λ_0 (vákuumbeli) hullámhosszát és ν rezgésszámát (az előbbit interferometrikus, az utóbbit elektronikus módszerekkel), majd ezen adatokból – a $c = \lambda_0 \cdot \nu$ összefüggés alapján – meghatározták c értékét:

$$c = 299\ 792\ 458 \text{ m/s}.$$

Ezen adat hibája csak $\pm 1{,}2$ m/s, ami a korábbi hibánál kb. százszor kisebb.

Holográfia

A holográfia elvét *Gábor Dénes* magyar fizikus dolgozta ki 1948-ban. A hagyományos fényforrások koherenciaintenzitás-korlátai miatt azonban igazi lehetőségei csak a lézerek felfedezése után mutatkoztak meg. Az első lézeres hologramot *Leith* és *Upatnieks* amerikai, valamint *Gyeniszjuk* szovjet fizikus készítették a 60-as évek elején. (Gábor Dénes Nobel-díjat kapott 1971-ben.)



3. ábra. a) Hologram felvétele. b) A tárgy rekonstrukciója a hologramból.

A „holográfia" elnevezés a *holosz* (teljes) és a *grafein* (rajzolni) görög szavakból származik, s talán úgy lehetne lefordítani, hogy a *teljes kép tudománya*. Szokták háromdimenziós fényképezésnek is nevezni. Mindkét elnevezés arra utal, hogy a holográfiával a tárgyról gazdagabb, teljesebb képet lehet kapni, mint a hagyományos technikával. A fényképezőgép ugyanis a filmen csak a tárgyról érkező hullám intenzitás-eloszlását rögzíti, a hullám fázisáról nem ad információt. A hologram viszont magát a tárgyhullámot rögzíti, tehát megőrzi mind az intenzitás-, mind a fázis-információt.

Gábor Dénes zseniális gondolata szerint a fázist interferencia révén lehet rögzíteni. Ilyen értelemben hologramként fogható fel a Michelson-interferométer ernyőjén keletkező csíkozat. Az egyik résznyaláb fázisa a másik résznyaláb fázisához képest a csíkok távolságában, ill. alakjában, intenzitása a csíkok feketedésének mértékében tükröződik vissza.

Hogyan történik a *hologram rögzítése*? Egyszerűség kedvéért válasszunk egy pont-tárgyat. Ezt világítsuk meg koherens fénnyel (lézerrel). A tárgyról szóródó hullám egy gömbhullám lesz (3a. ábra). Essen ez a „*tárgyhullám*" egy másik, ugyancsak koherens síkhullámmal, az ún. *referencia-hullámmal* együtt egy finomszemcsés fotolemezre. A két hullám interferenciája a lemezen – előhívás után – sűrű csíkozat formájában jelentkezik. Ez a hologram – a tárgyhullám „képe".

A hologramból előállítható az eredetivel egyenértékű tárgyhullám. Ezt hívják *rekonstrukciónak*, s elvét ugyancsak Gábor Dénes dolgozta ki. A hologramot állítsuk ismét a referencia-nyaláb útjába. (3b. ábra.) A sűrű csíkozaton – mint optikai rácson – elhajlik a fény, s az eredeti hullám mellett („0. rend") jobbról és balról megjelenik egy-egy elhajlított hullám („±1. rend"). Az egyik egy széttartó gömbhullám lesz; mintha a tárgypontból indult volna ki. A másik pedig egy összetartó gömbhullám lesz, ami a tárgynak a fotolemezre vett tükörképét adja. A számítások megmutatták, hogy ez bonyolult tárgyak esetén is így van. Ilyenkor persze a hologram sokkal bonyolultabb csíkozat, de a rekonstrukció során mégis létrejön a két új hullám; az egyik a tárgy virtuális, a másik valódi képének felel meg.

A rekonstruált hullámban tehát a tárgyhullám mintegy „életre kel"; a rekonstruált hullám amplitúdó- és fáziseloszlása ugyanolyan, mint az eredeti tárgyhullámé volt. Ennek sok érdekes következménye van: pl. amikor a hologramból rekonstruált tárgyat szemléljük, két szemünkbe a rekonstruált tárgyhullám különböző részei jutnak, s így a rekonstruált tárgyat ugyanúgy térbelinek érzékeljük, mintha a valódit látnánk. Így vagyunk a látás mélység-élességével is: a szemet, vagy a fényképezőgépet a mélységben kiterjedt rekonstruált tárgy különböző pontjaira lehet élesre állítani. További érdekesség, hogy az információ el van kenve az egész fotolemezen, tehát a hologram egy kis részéből is az egész tárgy rekonstruálódik, csupán a részletek lesznek durvábbak. Említésre méltó végül, hogy egy lemezre több hologram is rögzíthető, s így belőle több tárgy is rekonstruálható.

A holográfia ma már az optika önálló területe. További részletekről az olvasó a megadott szakirodalomból tájékozódhat [3–5]. Csupán még egy megjegyzés. Nyilvánvaló, hogy a holografáláshoz nélkülözhetetlen a lézer, hiszen csak így lehet megfelelően kontrasztos csíkrendszert előállítani és elfogadható expozíciós idők alatt a fotolemezen rögzíteni. A rekonstrukcióhoz már nem kell feltétlenül lézer; bizonyos esetekben természetes fény is elegendő.

Nemlineáris optika

A hagyományos optika lineáris. Ez annyit jelent, hogy a fény terjedése, visszaverődése, elnyelődése során az e folyamatokban résztvevő anyagi közeg állapota változatlan marad; a törésmutató, a reflexiós, ill. elnyelési együttható nem függ a beeső fény erősségétől. A linearitás következménye, hogy az ilyen közegben két hullám egymástól függetlenül

terjed; vagyis az egyik jelenléte nem befolyásolja a másik terjedését. A linearitás kapcsolatba hozható az anyagban lévő elektromos töltések mozgásával. A fénnyel való kölcsönhatás során e töltések rezgéseket végeznek. A linearitás azt jelenti, hogy ez a rezgés harmonikus. A „nemlinearitás" az ettől való eltérést jelzi.

Már korábban is sejtették, hogy kellően nagy fényintenzitásoknál a linearitás megszűnik. *Neugebauer Tibor* magyar elméleti fizikus már 1958-ban megjósolta, hogy nagy intenzitásoknál az atomok rezgése anharmonikussá válik, s az eredeti rezgési frekvencia mellett megjelenik a kétszeres frekvenciájú felharmonikus is. (A kétszeres frekvencia fél hullámhossznak felel meg.) A nemlineáris optikai jelenségek jelentősége csak a lézerek felfedezésével nőtt meg. A felharmonikus keletkezését először *Franken* amerikai fizikus mutatta ki 1961-ben rubinlézerrel, kvarckristályban.

Fizikailag a nagy fényteljesítmény azt jelenti, hogy a fényhullámban terjedő elektromágneses tér erőssége igen nagy. Ha ez összemérhető az atomok belsejében uralkodó tér erősségével, akkor érthető, hogy az atomi rezgések már nem maradnak harmonikusak. Ez azt eredményezi, hogy a törésmutató, a reflexiós, ill. elnyelési együttható stb. nagy fényintenzitásoknál már függni fog az intenzitástól. A tapasztalat szerint ez a nemlinearitás 10^6 W/cm^2 – 10^8 W/cm^2 teljesítmény-sűrűségeknél kezd jelentőssé válni. A sok érdekes nemlineáris jelenség közül most csak a már említett felharmonikus-keltéssel foglalkozunk.

Bizonyos kristályok különösen erős optikai nemlinearitást mutatnak; ilyen pl. a KDP kristály (kálium-dihidrogén foszfát). Ha erre a kristályra pl. nagy teljesítményű Nd-impulzuslézer $\lambda = 1{,}06$ μm-es (infravörös) nyalábja esik (csúcsteljesítmény 1 MW, impulzusidő 15 ns, nyalábkeresztmetszet 1 mm^2; teljesítménysűrűség 10^8 W/cm^2), akkor a kristályon áthaladó fény egy része (kb. 10%-a) zöld színű, $\lambda/2 = 0{,}53$ μm-es lézernyalábbá alakul át. Az átalakítási hatásfok sok tényezőtől függ. Fontos feltétel, hogy az eredeti és a felharmonikus hullám a kristályban azonos sebességgel terjedjen, vagyis a kristályban való haladás közben fáziskapcsolatuk állandó maradjon. Ez a feltétel a kristálytengelyek megfelelő irányításával – a két hullám egymásra merőleges síkbeli polarizációja mellett – teljesíthető. Optimális esetben az átalakítási hatásfok elérheti a 40%-ot is.

IRODALOM

[1] *Jánossy M.:* A fény kettős természete, KöMaL 39 (4), 117 – 182 (1989. ápr).
[2] *Tóth Cs.:* Mitől lézer a lézer, KöMaL 39 (5), 225 – 230 (1989. máj.).
[3] *Csillag L.- Kroó N.:* A lézerek titkai, Kozmosz könyvek, 1987.
[4] *L. Myring; M. Kimmitt:* Lézer – első könyvem a lézerekről, Műszaki K., 1988.
[5] *A. Nussbaum; R. A. Phillips:* Modern optika, Műszaki K., 1982.

Dr. Csillag László
Központi Fizikai Kutató Intézet