

LÉZERGIROSKÓPOK MŰKÖDÉSI ELVE, EGYENLETEI ÉS ÁTVITELI KARAKTERISZTIKÁI

**Békési Bertold mérnök százados
egyetemi tanársegéd
Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem
Vezetés- és Szervezéstudományi Kar
Fedélzeti rendszerek tanszék**

A lézer egyik legbiztosabb alkalmazása a giroszkópként való felhasználása (Heer, 1961; Rosenthal, 1962; Macek és Davis, 1963; McCartney, 1966; Killpatrick, 1967). A lézergiroszkópok repülőtechnikai alkalmazása egy cikksorozat keretén belül kerül bemutatásra. Az első rész a lézergiroszkópok elméleti alapjait tárgyalja (Young, Michelson, Sagnac) kísérletein keresztül, valamint a gyűrűlézerek szerkezeti kialakítását vázolja.

BEVEZETÉS

A lézergiroszkóp egy integráló sebességi pörgettyű, nem a megszokott értelemben, mivel nem tartalmaz forgó tömeget. A lézergiroszkóp alapvető jellegzetessége (tulajdonsága), hogy a lézersugárzás egy gyűrű alakú üregezen áthaladva záródik. Az üreg biztosítja két független, ellentétes irányítású haladóhullám oszcillációját különböző frekvenciákon. A haladó hullámok oszcillációjának frekvenciái függenek az üreg tehetetlenségi térhez viszonyított forgásától. A két hullám frekvenciájának különbsége adja az üreg forgásának nagyságát. A rendszer szempontjából a lézergiroszkópot figyelembe vehetjük, mint egy fekete dobozt. Energiát közlünk vele, információt ad, amit betáplálnak a számítógépbe.

Tehát azt mondhatjuk, hogy a lézergiroszkóp nem más, mint egy gyűrűs optikai rezonátor, amelyben két, egymástól függetlenül, ellentétesen futó hullám keletkezik. Az elektromágneses hullámok paraméterei függenek a forgási szögsebesség irányától és értékétől. Tehát a lézergiroszkópokban a mérendő szögsebességről az elektromágneses hullámok hordoznak információkat.

A kezdeti kísérletek alapjait Michelson és Sagnac rakták le. A lézergiroszkópok gyakorlati megvalósításának első jelei a 60-as évek elején jelen-

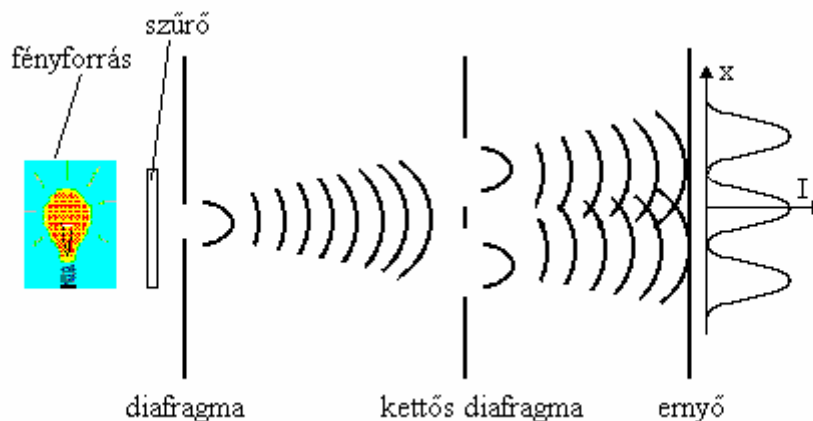
tek meg. A lézergiroszkópok vizsgálatát három részre oszthatjuk: működésének elméleti alapjai, az aktív lézer jelenség és az üreg. [5, 6]

A lézergiroszkóp anyagának és működésének kihangsúlyozása más, potenciálisan problémás területet hoz felszínre, amelyet figyelembe kell venni a giroszkóp tervezésénél és felépítésénél. A lézergiroszkóp sikeres felhasználását és végső elfogadását mint eszközt az fogja meghatározni, hogy mennyire jól és gazdaságosan lehet tervezni, valamint felépíteni.

LÉZERGIROSKÓPOK ELMÉLETI ALAPJAI

YOUNG KÍSÉRLETE

Th. Young (1773–1829) zseniálisan egyszerű kísérletet gondolt ki és valósított meg a fény hullám voltának bizonyítására. A kísérlet alapelvét mutatja az 1. ábra.



1. ábra
Young kísérletének vázlata

Monokromatikus (egyszínű) síkhullám esik két egymáshoz közel eső kis nyílásra. A nyílásokon elhajló fényhullámok két széttartó kúpban terjednek tovább, egymást részben átfedve. Az átfedési tartományban elhelyezett ernyőn interferenciacsíkok jelennek meg; fényesség vagy sötétség lesz a vizsgált pontban, attól függően, hogy a két nyílástól odaérkező részhullámok azonos vagy ellentétes fázisban vannak.

Ha a gyakorlatban is meg akarjuk valósítani Young kísérletét, és látható interferenciaképet akarunk kapni, akkor egyrészt biztosítani kell, hogy az ernyőre eső fény eléggé monokromatikus legyen — ez pl. megoldható úgy, hogy egy izzólámpa fényéből keskeny áteresztési sávú színszűrővel kiszűrünk egy szűk hullámhossz tartományt —, másrészt el kell érni, hogy a beeső hullám fázisa a két nyílásnál egymáshoz képest állandó legyen. Ez utóbbi úgy valósítható meg, hogy a lámpát egy további kis nyílás mögött, elég távol helyezzük el (pontos forrás, nagy távolságban); ekkor a hullámtér, bár továbbra is fluktuál a nyílások tartományában, de a lámpa nagy távolsága és a nyílások közelsége miatt a két nyílás helyén a hullám fázisa közelítőleg azonos módon változik, s így a fáziskülönbség többé-kevésbé állandó marad.

Mivel azonban a fáziskülönbség nem teljesen állandó, az interferenciakép kontrasztja sem lesz tökéletes: a minimum nem lesz teljesen sötét, és a maximum is kevésbé lesz fényes. Növelve a nyílások távolságát, a csíkok láthatósága rohamosan lecsökken, majd el is tűnik, mutatva, hogy egy bizonyos távolságon túl a hullámfront két pontjának fázisa között már nincs semmi kapcsolat.

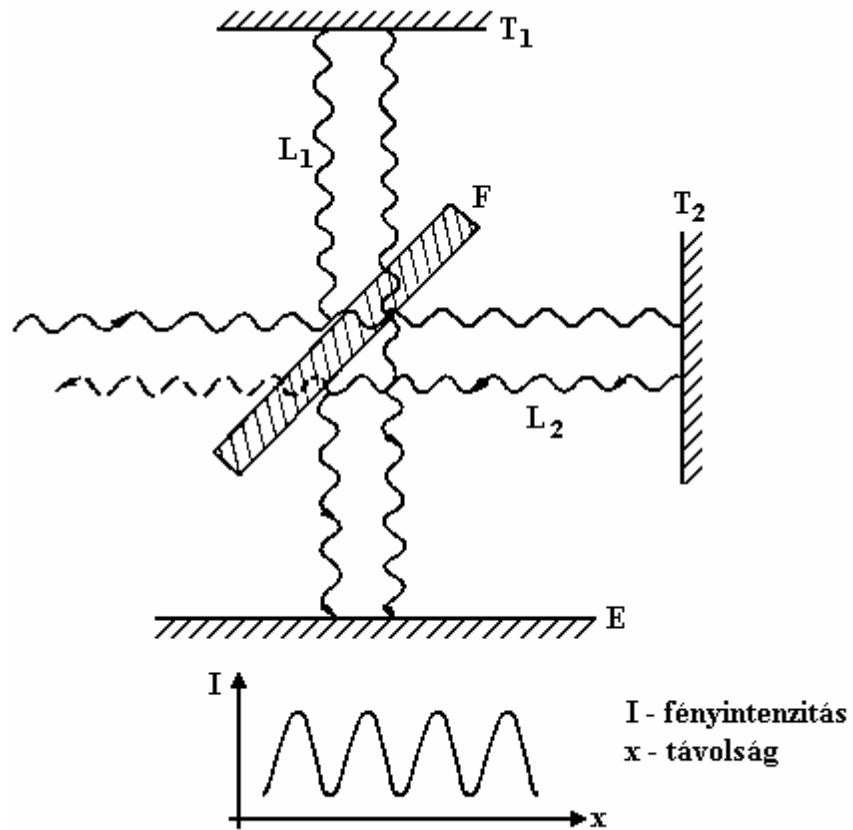
A fényhullámtér két pontja közötti fáziskötöttségnek tehát mértéke a Young-interferenciakép láthatósága. A hullámtér pontjai közötti fáziskötöttséget térbeli koherenciának (rendezettségnek) szokták nevezni. Ezzel a fogalommal eredményeinket úgy foglalhatjuk össze, hogy egy hullámtér térbeli koherenciájának mértéke a Young-interferenciakép láthatósága. A közönséges fényhullám általában térben inkohereus. A koherenciát javítani lehet színszűrők, diafragmák segítségével. Ez azonban mindig óriási intenzitásvesztéssel jár együtt.[3]

MICHELSON KÍSÉRLETE

Michelson (1852–1931) kísérlete később a relativitáselmélet sarkköveként vált világhírűvé. Itt most azért idézzük fel vázlatosan, mert a fényhullámok időbeli koherenciájának vizsgálatára ad lehetőséget. A kísérlet elvét a 2. ábra szemlélteti.

A beeső monokromatikus síkhullám az F félig áteresztő tükrön két résznyalábra oszlik, majd ezek a T_1 illetve a T_2 tükrökről visszaverődve az F félig áteresztő tükrön ismét egyesülnek és együtt haladnak tovább az E ernyőhöz. A befutott külön fényutak miatt a két hullám fáziskülönbségét a $2(l_1-l_2)$ úthossz-különbség szabja meg. Ha ez a hullámhossz egész számú többszöröse, akkor a két hullám azonos fázisú és erősíti egymást, ha az úthossz-különbség a fényhullámhossz páratlan számú többszöröse, akkor ellentétes fázisúak és — egyenlő intenzitások esetén — kioltják egymást. A gyakorlatban legtöbbször a tükrök nem pontosan merőlegesek a fényhullám terjedési irányára, s ezért a két részhullám kis szög

alatt találkozik, a fáziskülönbség az ernyőn pontról pontra változik, interferenciacsíkok keletkeznek.



2. ábra
A kísérlet elve

A ténylegesen megvalósított kísérletnél akkor kaphatunk jól látható interferenciaképet, ha a fényforrás pontszerű, távol van és közel monokromatikus. De ezen felül van még egy további feltétel: az l_1 és l_2 karhosszaknak közel azonosaknak kell lenniük. Már Michelson észrevette ugyanis, hogyha az egyenlő karú ($l_1=l_2$) kezdőállapotból kiindulva pl. a T_2 tükröt önmagával párhuzamosan óvatosan elmozgatta, az interferencia csíkok láthatósága rohamosan lecsökkent, s végül teljesen eltűnt. A monokromatikusság mértékétől függően ez a távolság néhány μm -tól néhány mm-ig terjedt. Hagyományos fényforrással és szűrési technikával

később sem sikerült interferenciaképet kapni néhány dm-es úthossz különbség felett.

Matematikai módszerrel ki lehet mutatni, hogy a sáv szélesség és egy hullám szabályossága között egyértelmű kapcsolat van: minél monokromatikusabb a hullám, annál hosszabb ideig marad kötött a fázisa és fordítva. Vagyis, ha egy hullámtér fázisa időben szabályosan változik, akkor azt mondjuk, hogy a hullám időben koherens. A Michelson interferométerrel tehát egy hullámról meg lehet állapítani, hogy milyen az időbeli koherenciája (rendezettsége), illetve mennyire monokromatikus. Minél monokromatikusabb, annál nagyobb a koherencia. Azt az időt, amelyen belül a hullám még koherens, koherencia időnek (τ), a hozzá tartozó hosszát koherencia hosszának (Λ) nevezik.

A két mennyiség között nyilván fennáll a

$$\Lambda = c \tau \quad (1)$$

összefüggés (c - a fénysebesség).

Talán érdemes még azt is megjegyezni, hogy a hullám sáv szélessége ($\Delta \nu$) és a koherenciaidő között fennáll a

$$\tau = \frac{1}{\Delta \nu} \quad (2)$$

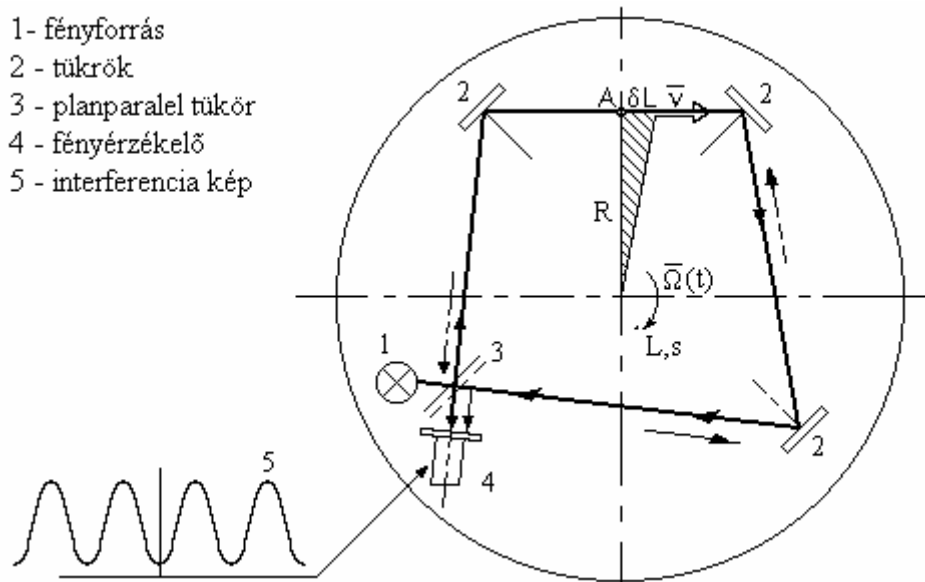
összefüggés.

Végeredményben azt mondhatjuk, hogy minél monokromatikusabb a hullám — minél kisebb a sáv szélessége —, annál nagyobb útkülönbségig megmarad az interferenciakép a Michelson féle interferométerben. A Michelson-féle tapasztalat pedig arra utal, hogy a hagyományos fény többnyire nem túl monokromatikus, s monokromatikuságát bizonyos határon túl nem is lehet javítani.[3, 7]

SAGNAC INTERFERENCIA KÍSÉRLETE

Már 1911-ben Sagnac, majd 1925-ben Michelson és Gale interferencia kísérlettel bebizonyította, hogy egy rendszer forgását valamely, úgynevezett inercia rendszerhez (nyugvó vagy állandó sebességű, egyenes vonalú mozgást végző rendszer) képest észlelni lehet magában a forgó rendszerben is. Lényegében az ő mérési elvükön alapszik a lézergiroszkóp működése, mellyel tehát nagy pontossággal mérni lehet egy rendszer forgását, vagy általánosabban megfogalmazva: egy rendszernek az egyenes vonalú mozgástól való eltérését.

Sagnac a newtoni „fényhordozó éter” — elmélet ellenőrzése során végezte interferencia kísérletét. Forgó alagra négy tükröt és fényforrást helyezett (3.ábra), és az optikai fényérzékelőkkel rendelkező gyűrűs interferométerben a fény terjedését vizsgálta.



- 1 - fényforrás
- 2 - tükrök
- 3 - planparalel tükör
- 4 - fényérzékelő
- 5 - interferencia kép

3. ábra

Sagnac interferencia kísérlete

Az egyik hullám — például az alap forgási irányába tartó — sebességét Sagnac $c+v$ alakban adta meg, ahol v — az alap pillanatnyi kerületi sebessége. Az alap forgási iránya ellenébe haladó hullám sebessége pedig $c-v$, ahol c — a fény terjedési sebessége. Mindezek értelmében a két hullám által befutott úthossz különbsége (lásd a 3.ábrát)

$$\delta L = c\Delta t = c\left(\frac{L}{c-v} - \frac{L}{c+v}\right) \text{ vagy } \delta L \cong \frac{2L}{c}v = \frac{2LR}{c}\Omega(t) \quad (3)$$

ahol:

$$\Delta t = \frac{2vL}{c^2} - c \gg v$$

esetén az egymással szembefutó fénycsoportok δL úthossz különbségéhez tartozó idő.

Figyelembe véve, hogy

*LÉZERGIROSKÓPOK MŰKÖDÉSI ELVE, EGYENLETEI ÉS ÁTVITELI
KARAKTERISZTIKÁI*

$$v = R\Omega(t) \quad (4)$$

$$S = RL \quad (5)$$

$c \gg v$ esetén az úthossz különbség:

$$\delta L \cong \frac{2LR}{c}\Omega(t) = \frac{2S}{c}\Omega(t) \quad (6)$$

Az (1) (6) képletekben:

L — egy-egy hullám által megtett út (rezonátorhossz)

R — a δL elemi út forgási sugara

$\Omega(t)$ — a gyűrűs interferométer alapjának forgási szögsebessége

Mivel az egyes fényhullámok a rezonátorban más és más úthosszat ($L + \delta L$, $L - \delta L$) tesznek meg, ezért frekvenciáik is eltérnek az $f_0 = qc/L$ alaphfrekvenciától:

$$f_1 = q \frac{c}{L + \delta L}; f_2 = q \frac{c}{L - \delta L} \quad (7)$$

A két szemben haladó hullám frekvenciakülönbsége a detektoron (a 3. ábrán a fényérzékelő) mint a fényintenzitás "lebegése" észlelhető (az interferenciaképen). Ez kb. 100Hz-es alsó határnál hirtelen eltűnik (ez néhány tizedfordulat/óra szögsebességet jelent). Az eltűnés fizikai oka, hogy a szembefutó, eltérő frekvenciájú hullámok a fényerősítő közegben egymással is kölcsönhatásba lépnek, és ha a frekvenciakülönbség kicsi, akkor az egyik a másik frekvenciáját magához húzza. A nehézség kiküszöbölhető úgy, hogy a két frekvenciát eleve távolabb visszük egymástól. A szemben haladó fényhullámok frekvenciakülönbsége tehát $L^2 \gg (\delta L)^2$ esetén:

$$\Delta f = f_1 - f_2 = qc \frac{2\delta L}{L^2 - (\delta L)^2} \cong f_0 \frac{2\delta L}{L} = \frac{4S}{\lambda_0 L} \Omega(t) \quad (8)$$

vagy

$$\Delta f = A\Omega(t) \quad (9)$$

ahol: $A = \frac{4S}{\lambda_0 L}$ - a gyűrűs interferométer együtthatója

Tehát a frekvenciakülönbség egyenesen arányos a forgó alap szögsebességével [3, 5, 6, 7].

A fenti jelenséget először Sagnac francia fizikus figyelte meg, és örvény jelenségnek nevezte el. Sagnac kísérletei után a következő fontos megállapításokat tette:

- Egy forgó alapon elhelyezett fényforrás egymással szemben haladó fény-sugarainak találkozásakor kialakuló interferenciakép-változás egyenesen arányos az alap szögsebességével;
- A gyűrűs interferométer alkalmas kis szögsebességek pontos érzékelésére.

GYŰRŰLÉZEREK SZERKEZETI KIALAKÍTÁSAI

A gyűrűlézer tulajdonképpen egy gyűrűs, aktív rezonátorral rendelkező kvantumműszer, amelyben a lézersugarak egymással szemben haladnak és fotodetektorra vannak vezetve, ahol a hullámok frekvencia különbségével egyértelműen azonosítható interferenciakép jelenik meg.

Kezdetben a kedvezőtlen tömeg- és méretviszonyok miatt a gyűrűlézereket nem használták forgó objektumok szögsebességének érzékelésére. Az első kísérleti gyűrűlézert 1962-ben építették. A berendezés négy He-Ne lézerből állt, melyeket egy képzeletbeli négyzet oldalain helyeztek el, a négyzet csúcsaira pedig tükröket építettek 45°-os szögben a lézerek optikai tengelyéhez képest. Ez az elrendezés biztosította, hogy az egyes lézerek sugarai a tükrörről visszaverődve a másik lézerre kerüljenek.

A gázlézerek ebben az elrendezésben a gáztöltésű csövek mindkét végén lézersugarakat bocsátottak ki, ezért a rendszerben két, egymással szemben haladó fénysugár alakult ki. A lézersugarak energiájának egy részét félig áteresztő tükrök segítségével fényernyőre továbbították.[7]

A gyűrűlézerek fő típusait a 4. ábrán láthatjuk, ahol az alkalmazott jelölések jelentései a következők:

- a. – differenciál kapcsolású gyűrűlézer
 - 1 – tükrök (prizma)
 - 2 – lézer

*LÉZERGIROSKÓPOK MŰKÖDÉSI ELVE, EGYENLETEI ÉS ÁTVITELI
KARAKTERISZTIKÁI*

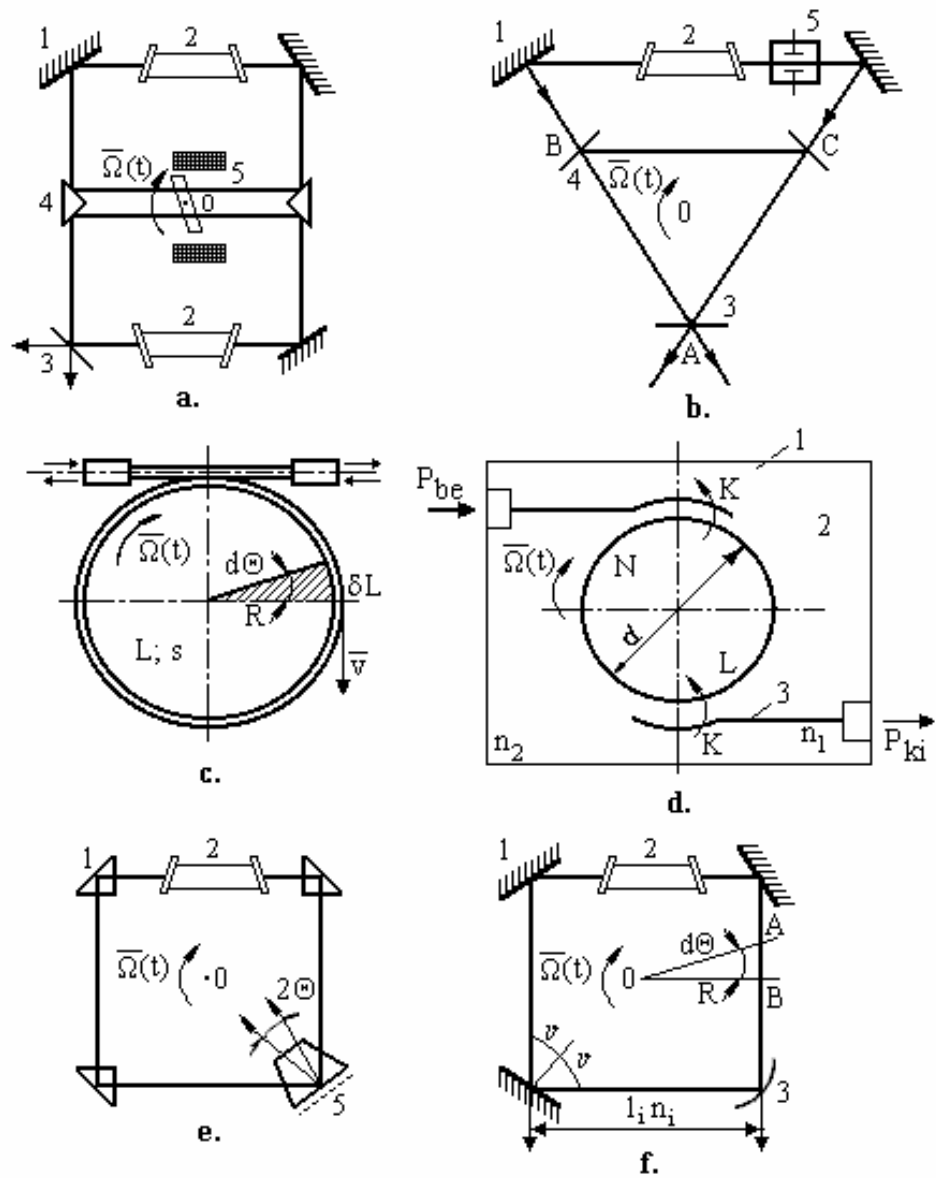
- 3 – félig áteresztő tükör
- 4 – kapcsoló elem
- 5 – tekeres
- b. – háromszög elrendezésű gyűrűlézer
- c. – passzív, üvegszál-optikai gyűrűlézer
- d. – passzív, integrál optikai gyűrűlézer
 - 1 – alap
 - 2 – lézer
 - 3 – irányított leágazó
 - n_2 – az alap törésmutatója
 - n_1 – a fényvezető törésmutatója
 - d – átmérő
 - K – a fényvezetési együttható
 - P_{be} , P_{ki} – a bemeneti és kimeneti optikai jelek teljesítménye
- e. – négyprizmás gyűrűlézer
- f. – négytükrös, aktív közegű gyűrűlézer
 - Θ – a hullámfront beesési szöge
 - l_i – optikai úthossz

Ha a gyűrűlézert valamilyen $\Omega(t)$ szögsebességgel megforgatjuk, akkor az egymással szemben haladó fénysugarak szögsebességeit a következő képletek alapján számíthatjuk:

$$\begin{aligned}\omega_0 &= 2\pi f_0 = \frac{2\pi c}{\lambda_0} \\ \omega_1 &= \omega_0 + \Omega(t) \\ \omega_2 &= \omega_0 - \Omega(t)\end{aligned}\tag{10}$$

ahol: $\omega_0 \gg \Omega(t)$

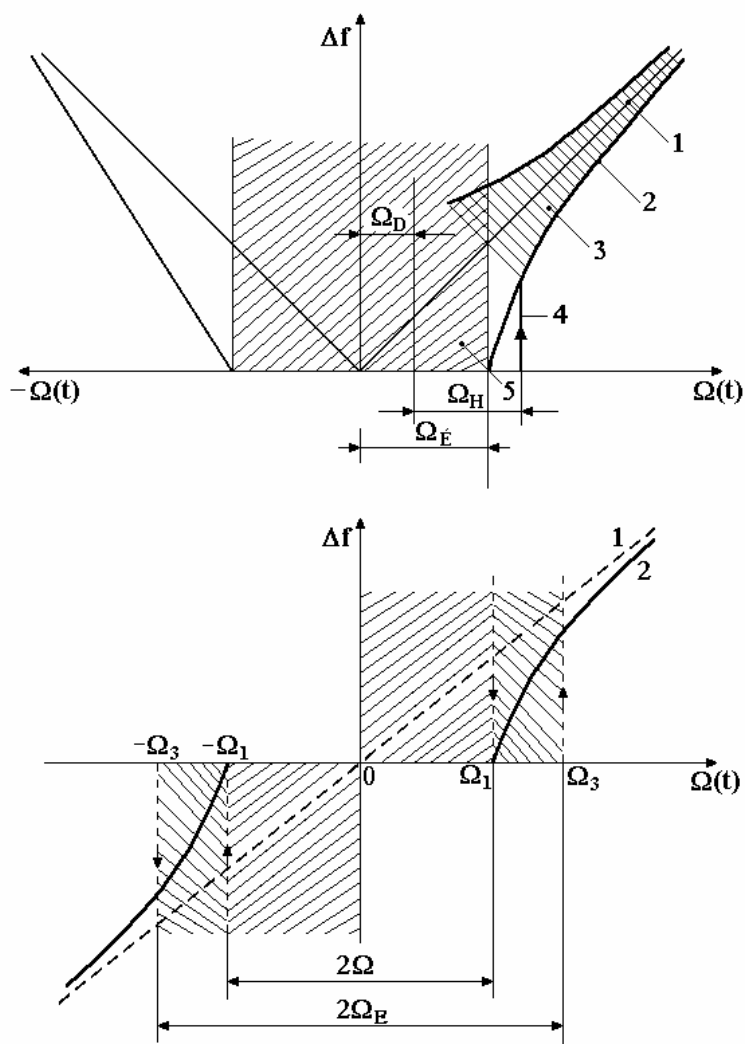
Az egymással szemben haladó lézersugarak energiájának egy részét detektorra továbbítva a regisztrálón interferencia képet (impulzus sorozatot) kapunk, amely információt hordoz a lézersugarak különbségi frekvenciájáról, tehát az $\Omega(t)$ szögsebesség — fénysugarak terjedési síkjára merőleges $\Omega(t) \cos\beta$ összetevőjének — nagyságáról.



4. ábra
A gyűrűlézerek fő típusai

A továbbiakban röviden vizsgáljuk meg a gyűrűlézer átviteli karakterisztikáját. Az 5. ábrán az ideális kimeneti jelleggörbét a $\Delta f = (4S/\lambda_0)\Omega(t)$ összefüggés határozza meg.

LÉZERGIROSKÓPOK MŰKÖDÉSI ELVE, EGYENLETEI ÉS ÁTVITELI
KARAKTERISZTIKÁI



5.ábra
A gyűrűlézer átviteli karakterisztikája

- 1 – ideális kimeneti jelleggörbe
- 2 – számított jelleggörbe
- 3 – a valóságos kimeneti jelleggörbe a vonalkázott területen
- 4 – hiszterézis görbe
- 5 – érzéketlenségi sáv

Amint az látható az 5.ábrán, a gyűrűlézer lényeges érzéketlenségi sávval $\Omega_{\dot{E}}(t)$ rendelkezik, ezen kívül az $\Omega(t)$ szögsebesség kezdeti driftjét $\Omega_D(t)$ is megfigyelhetjük.

A kimeneti görbe nemlinearitását a léptéktényező h_0 változása alapján lehet megítélni. Az $\Omega(t)$ szögsebesség változása során a léptéktényezőt az alábbi definíciós képlettel lehet számítani:

$$h_0 = \frac{\Delta A}{A} ; A = \frac{4S}{\lambda_0 L} \quad (11)$$

Néhány tipikus gyűrűlézer adata:

0,05 rad/sec. $< \Omega(t) < 5000$ rad/sec. esetén: $h_0 < 0,0001$

Modern gyűrűlézerek érzéketlenségi sávja:

$L = 100\text{cm}$; $\lambda_0 = 0,63\ \mu\text{m}$ esetén: $2\Omega_{\dot{E}}(t) \cong 0,0015\text{rad / sec.}$

Az átviteli karakterisztikán hiszterézis görbe látható, melyet az idéz elő, hogy a törésmutatók különbsége, valamint a szemben haladó lézersugarak szórási tényezője függ a gyűrűlézer plazmájának állapotától. A hiszterézis abban nyilvánul meg, hogy az érzéketlenségi sávból való kilépés nagyobb mérendő szögsebességnek $\Omega(t)$ szeresén jön létre, mint a belépés:

$$\Omega_H(t) > \Omega_{\dot{E}}(t) \quad (12)$$

A gyűrűlézer igen széles határok között képes érzékelni a szögsebességet. A szögsebesség érzékelése az $\Omega_{\text{MIN}} \leq \Omega \leq \Omega_{\text{MAX}}$ tartományban történik, ahol: $\Omega_{\text{MIN}} = \Omega_{\dot{E}}$ — érzékenységi küszöb.[5,6,7]

Mivel ezeknek a lézereknek a kimenetén a szemben haladó lézersugarak terjedési ideje, fázisa, intenzitása és frekvenciája mind függnek a mérendő szögsebességtől $\Omega(t)$, ezért a gyűrűlézereket osztályozhatjuk a kimeneti elektromágneses mező paramétere és a vizsgált paraméter érzékelő szerve szerint. Mindezek értelmében tehát négy nagy csoportba sorolhatjuk a gyűrűlézereket: idő-, fázis-, amplitúdó- és gyűrűlézerekre. A legnagyobb gyakorlati jelentőséggel a frekvencia és fázis szögsebesség érzékelők rendelkeznek.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az elvégzett munkát mindenképpen hasznosnak tartom, mivel megvizsgáltam egy rövid történeti áttekintésen keresztül a lézergiroszkópok elméleti alapjait, külön kihangsúlyozva Young, Michelson, Sagnac kísérleteit és eredményeiket. Valamint vázoltam a gyűrűlézerek főbb szerkezeti kialakítását. A további vizsgálódásokhoz jó alapot nyújt ez a cikk, amelyet ezen Közlemények következő számában kívánok megtenni.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] BAJBOROGYIN J. V.: Osznovi lazernoj tehniki. Visa Skola, Kijev, 1988.
- [2] DR. BENOLÁK Kálmán: A fény. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.
- [3] DR. CSILLAG László — DR. KROÓ Róbert: A lézer titkai. Kozmosz Könyvek, 1987.
- [4] FOWLER R. G. — MEYER D. I.: Fizika mérnököknek. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1963.
- [5] ED BY MONTE ROSS: Laser Applications. Academic Press, New York and London, 1971.
- [6] PELPOR D. SZ, OSZOKIN Ju. A., RAHTYEENKO E. R.: Giroszkopiczeszkije pribori szisztem orientacii i sztabilizacii. Masinosztroenyije, Moszkva, 1977.
- [7] SZABOLCSI Róbert: Navigációs rendszerek. Szolnoki Repülőtiszt Főiskola, Főiskolai jegyzet, Szolnok, 1994.

One of the more promising applications of the laser is as a gyroscope (Heer, 1961; Rosenthal, 1962; Macek és Davis, 1963; McCartney, 1966; Killpatrick, 1967). The aim of my work is to show application of the laser gyro through series of articles. The first article is to show the principle of operation of the laser gyros (Young, Michelson, Sagnac).