

SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM FIZIKA ÉS KÉMIA TANSZÉK

OPTIKAI ÉS FÉLVEZETŐFIZIKAI LABORATÓRIUMI MÉRÉSEK

3. MÉRÉS

Lézer interferometria Michelson interferométerrel

Hullámok találkozásakor interferencia jelenséget figyelhetünk meg. Megfelelő körülmények között a hullámok teljesen kioltathatják és maximálisan erősíthetik is egymást. Az interferencia jelensége akkor lesz tartós és ezáltal megfigyelhető, ha a megfigyelés időtartama alatt nem változik meg az interferáló hullámok fázisa ill. fáziskülönbsége. Az állandó fáziskülönbség könnyen biztosítható egy hullámképző kísérletben, ahol a hullámkeltők folyamatosan és azonos ütemben generálják a hullámokat a berendezés bekapcsolásától annak kikapcsolásáig.

Fényhullámok interferenciáját lényegesen nehezebb kimutatni, mivel a fényhullámok nem jellemezhetőek egyetlen tartós hullámvonulattal. A fényforrások jelentős részében ugyanis a fénykibocsátás különálló atomokból vagy molekulákból, egymástól függetlenül és viszonylag rövid ideig, mintegy 10^{-8} másodpercig történik.

Bár ez az időtartam köznap értelemben rövid, a fény periódusidejéhez képest mégis igen hosszú, annak mintegy milliószorosa. Ez alatt az idő alatt a fény az adott atomból, a tér minden irányába induló egyetlen, összefüggő szinuszos hullámvonulatnak (gömbhullám) tekinthető. A hullámvonulat hossza közönséges fényforrások (pl. izzólámpa, gyertya) esetén legfeljebb 0,1 mm (koherenciahossz).

Miért nem tapasztalunk interferencia jelenséget a hétköznapi életben, mondjuk egy megvilágított szobában? Tételezzük fel, hogy a szobánkat megvilágító lámpában egy atom kibocsát egy elemi gömbhullámot. Az elemi gömbhullámnak lesz olyan része, amely közvetlenül eljut a vizsgált pontba, mondjuk az asztalon lévő papírlap egy kijelölt pontjába. Lehet azonban a hullámfrontnak olyan része is, amely valamilyen tükröző felületről, mondjuk a fali tükörről visszaverődve jut el a kijelölt pontba. A két hullámvonulat közötti fáziseltolódás mértéke határozza meg, hogy a két találkozó és interferáló hullám erősíti vagy gyengíti egymást. A fáziseltolódás csak a két hullámvonulat által megtett utak különbségétől függ. A fenti okfejtés természetesen minden egyes atom által kibocsátott elemi gömbhullám vonulatra igaz. Ebből pedig az következik, hogy a papírlapon interferencia csíkoknak kellene megjeleníteni. Miért nem tapasztalunk mégsem interferencia jelenséget? Az egyik ok a normál fényforrásokra jellemző nagyon kicsi koherenciahossz. Ha ugyanis az adott pont felé tartó két hullámvonulat által megtett út különbsége meghaladja a hullámvonulat hosszát, azaz a koherencia-hosszt, akkor a hullámvonulatok nem tudnak találkozni, egyszerűen azért, mert az első már elhalad, mire a második odaér a találkozási ponthoz.

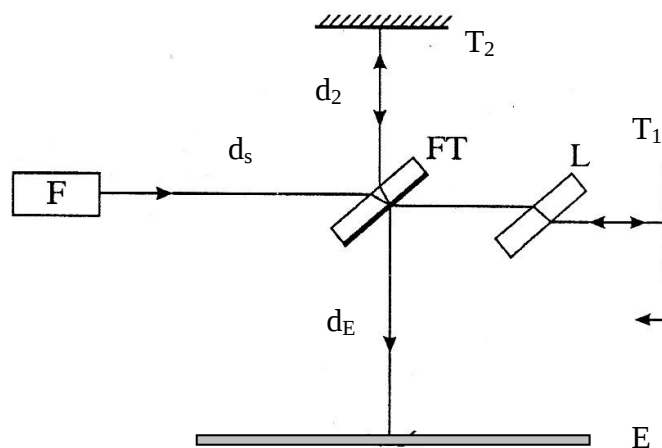
Várhatóan akkor sem tapasztalnánk interferencia jelenséget, ha több méteres koherenciahosszú fényforrással világítanánk meg a szobát. Ennek az oka, hogy a vizsgált pontba nem csak az előbb említett két útvonalon (közvetlenül ill. a falitükréről visszaverődve) érkezének a hullámvonulatok, hanem gyakorlatilag minden tükröző felületről. Ezeknek a hullámvonulatoknak a fázisviszonyai eltérőek, ezért a vizsgált pontban az erősítő és gyengítő interferenciák kiátlagolódnak, ami a papírlap egyenletes megvilágítását eredményezi.

Michelson interferométer

A fényinterferencia bemutatására szolgáló módszereknek közös jellemzője, hogy a két interferáló nyaláb mindig ugyanabból a fényforrásból származik. Annál könnyebb a jelenséget bemutatni, minél nagyobb az alkalmazott fény koherenciahossza. Mivel a lézerek esetén a koherenciahossz meghaladhatja akár a 10 m-t is, segítségükkel minden nehézség nélkül létrehozhatunk interferencia jelenséget.

Az interferencia berendezések egyik fajtája a hullámfront megosztásán alapszik. Ennél a módszernél egy adott hullámfrontot tükörrel vagy egyéb módon szegmensekre osztjuk, majd ezeket a szegmenseket különböző optikai úthossz megtétele után interferáltatjuk. Gondoljunk csak a Young kísérletre, a Fresnel-féle kettősprizmára vagy a Lloyd-tükörre.

Fel lehet osztani a hullámot más módon, például részleges tükrözéssel is. Ekkor a két eredő hullámfront megtartja eredeti méretét, de csökken az amplitúdója, illetve intenzitása.



A Michelson interferométer a fényhullám amplitúdójának megosztásán alapszik. Az F fényforrásból érkező párhuzamos nyalábot az FT nyalábosztóval kettéosztjuk. A nyalábosztó egy átlátszó, egyik oldalán reflexiós réteggel ellátott üveglemez, amely 50-50%-os nyalábosztást valósít meg. A két nyaláb a T_1 és a T_2 tükörökről visszaverődik, majd a nyalábosztón ismét

áthaladva, illetve visszaverődve szuperponálódnak. Az ernyőn a szuperpozíciójuk eredményét láthatjuk. Közöséges fényforrások esetén, azok kicsi koherenciahossza miatt az útkülönbségek kiegyenlítésére az egyik nyaláb útjába a nyalábosztóval egyenlő vastagságú lemezt (L) kell helyezni. Nagy koherenciahossz (pl. lézerfény) esetén az optikai úthossz kiegyenlítésére nincs feltétlenül szükség.

A Michelson-interferométer összeállítása

A Michelson-interferométer összeszerelését a következő lépésekben célszerű végezni: Állítsunk nyalábosztót (vékony plánpáralel lemez) a tágitatlan nyaláb útjába, 45° -os szögben! Helyezzük az egyik (T_1) tükröt a nyalábosztótól 10-15 cm-re úgy, hogy a róla visszaverődő fény-sugár - a nyalábosztó lemezen át - a lézerbe jusson vissza! Fogjuk fel a nyalábosztóról visszavert fényt az E ernyőn! Helyezzük most a másik (T_2) tükröt a nyalábosztóról közvetlenül visszavert (az átmenőre merőleges) sugár útjába! A két tükrő nyalábosztótól mért távolsága kb. egyenlő legyen. Forgassuk a második tükröt mindaddig, amíg a róla visszaverődő nyaláb foltja az ernyőn a másik nyaláb foltjával egybe nem esik! Végül állítsunk egy $f = 20-30$ mm fókusztávolságú lencsét - nyalábtágítónak - a lézer és a nyalábosztó lemez közé: az ernyőn koncentrikus körökből álló interferogram jelenik meg! (Ha a kép ettől erősen eltérő lenne, akkor a jusztirozást finomítani kell.)

Megmutatható, hogy a gyűrűk sugarai arányosak az egész számok négyzetgyökével:

$$r_p = R_0 \sqrt{\frac{p\lambda}{\Delta d}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{ahol} \quad R_0 &= d_E + d_s + 2d_2 \\ \Delta d &= d_1 - d_2 \\ p &= 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned}$$

Az interferáló nyalábok útjába tett lencsével az interferenciakép kinagyítható.

Ha az egyik tükröt önmagával párhuzamosan eltoljuk, a csíkrendszer átrendeződik. Ha a $\Delta d = d_1 - d_2$ értékét, tehát a két tükrő nyalábosztótól mért távolságának különbségét növeljük, az interferenciagyűrűk sugara csökken. A gyűrűk összemennek, és minden alkalommal eltűnik egy gyűrű, amikor a Δd értéke $\lambda/2$ -vel megváltozik.

A Δd mérésével és az ezzel járó sávváltozások megszámlálásával a fény hullámhossza kiszámolható. A hullámhosszmérést azonban csak merev, rezgésmentes elrendezésben, csavarmikrométerrel mozgatott tükrökkel lehet elvégezni. A hullámhossz ismeretében viszont nagyon pontosan ($\lambda/4$ pontossággal) tudunk mérni elmozdulásokat.

Az elrendezés - elegendően nagy, rezgésmentes asztalon - a lézerfény koherenciahosszáinak mérésére is használható. A tükrök egyikét -önmagával párhuzamosan - addig távolítjuk a nya-

lábosztó lemeztől, amíg az interferenciajelenség meg nem szűnik. A két nyaláb optikai úthosszának különbsége most a lézervény koherenciahosszával egyenlő.

Michelson-interferométer összeállításával ellenőrizhető az asztal stabilitása, "rezgésmentesítés" is. Ha az asztalfelület holografálásra igénybe vett területén felállított interferométer csíkrendszere nyugodt, nem vibrál, akkor az asztal megfelel a célnak. Ellenkező esetben az asztalt különféle trükkökkel (gumialátét, szivacspárna stb.) kell környezetétől elszigetelni, esetleg máshová áthelyezni.

Gázok törésmutatójának mérése Michelson-interferométerrel

A gázok törésmutatójának értéke 1-hez igen közeli, ezért mérésük a teljes visszaverődés határszögének mérésével vagy más, folyadékok vagy szilárd anyagok esetében könnyen alkalmazható módszerekkel meglehetősen bonyolult. Az interferencia módszerrel történő törésmutató mérés alapja az, hogy közönséges nyomásokon a gázok törésmutatójának a vákuum törésmutatójától való eltérése $(n-1)$ arányos a gáz p nyomásával.

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = (n - 1) \frac{n + 1}{n^2 + 2} = p \cdot \text{konst}$$

Ha $n \cong 1$, akkor az $(n+1)/(n^2+2)$ tényező közel állandó.

A mérés során az interferométer egyik karjába elhelyezünk egy, a gázt tartalmazó tartályt. A gáz nyomását változtatva az optikai úthossz $l(\Delta n)$ -nel változik, ahol l a gázt tartalmazó tartály hossza Δn a törésmutató változása a tartályban. Ha a tartályból a gázt teljesen kiszivattyúzzuk, akkor $\Delta n = (n-1)$, ahol n a gáz kiszivattyúzás előtti törésmutatója, 1 pedig a vákuum törésmutatója. Az optikai úthossz változása a csíkrendszer eltolódását eredményezi. Az eltolódás a hullámhossz valahányszorososa (k):

$$l \cdot \Delta n = k\lambda$$

Ezután n kiszámítható.

Szilárd anyagok törésmutatójának mérése Michelson-interferométerrel

Az interferométer egyik karjába az ismeretlen törésmutatójú lemezt helyezve a csíkrendszer ugrásszerűen mozdul el, így a csíkszám változás megszámlálása nem lehetséges. A mérést a következőképpen végezhetjük el. Állítsuk az interferométer egyik karjába az ismeretlen törésmutatójú lemezt a fénysugarakra merőlegesen. Ebből az alaphelyzetből forgassuk el a lemezt ismert szöggel. A forgatást olyan lassan kell végezni, hogy közben csíkszámolást lehes-

sen végezni. Az elforgatási szög, a lemez vastagsága és a csíkszám ismeretében a törésmutató meghatározható.

$$\Delta l \cdot n = k\lambda$$

Feladatok

1. Állítsa össze a Michelson-interferométert!
2. Méréssel igazolja, hogy az interferenciagyűrűk sugarai arányosak az egész számok négyzetgyökével! Legkisebb négyzetek módszerével határozza meg az arányossági tényező értékét!
3. Növelje meg néhány centiméterrel az egyik tükör távolságát a nyalábosztótól. Hogyan változott meg az interferenciakép? Az (1) összefüggés segítségével értelmezze a látottakat!
4. Mérje meg a lézerfény koherenciahosszát! Írja le a tapasztalatokat!
5. Ellenőrizze a Michelson-interferométer alátámasztásának stabilitását, rezgésmentességét! Írja le a tapasztalatokat!
6. Helyezze el az interferométer egyik karjába a gáztartályt. Hozzon létre ismét interferenciaképet! A gáztartályra szerelt pumpával változtassa meg a tartályban lévő levegő nyomását! Hogyan változik meg az interferenciakép, merre mozdulnak el az interferenciacsíkok? Értelmezze a jelenséget! Fel lehetne-e használni a jelenséget nyomásmérésre?
7. Mérje meg a Michelson-interferométer segítségével egy planparalel lemez törésmutatóját! Írja le a tapasztalatait! Hogyan tudná a mérés pontosságát növelni?

Felhasznált irodalom:

1. Optika. Szerkesztette: Dr. Ábrahám György, Panem-McGraw-Hill, 1998.
2. Erostyák János – Kürti Jenő – Raics Péter – Sükösd Csaba: Fizika III. Fénytan, Relativitáselmélet, Atomhéjfizika, Atommagfizika, Részecskefizika. Szerkesztette: Erostyák János és Litz József. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2006.
3. Berta Miklós, Farzan Ruszlán, Giczi Ferenc, Horváth András: Mérnöki Fizika, Universitas Kht., Győr.