

ÉRZÉKELŐK

Dr. Pődör Bálint

Óbudai Egyetem KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet

18. ELŐADÁS: FÉNYVEZETŐ SZÁLAS ÉRZÉKELŐK I



2010/2011 tanév 2. félév

1

18. ELŐADÁS: FÉNYVEZETŐ SZÁLAS OPTIKAI ÉRZÉKELŐK

1. Fotonika: fénytávközlés és üvegszálás optikai hullámvezetők.
2. Fényvezető szálak tulajdonságai.
3. Fényemittáló diódák (LED) és lézerdiodák (LD).
4. Fényvezető szálak érzékelők általános tulajdonságai.
5. Intrinsic fényvezető szálak szenzorok.
6. Fényvezető szál alapú interferométeres szenzorok.
7. Extrinsic fényvezető szálak szenzorok.

2

TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

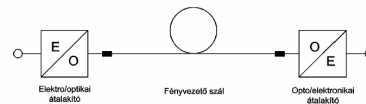
A fényvezető szálak és optikai kábelek a fénytávközlés alapvető passzív elemei. A fénynek távközlési célra való felhasználása szinte egyidős az emberiséggel. A modern "ipari" korszakban az 1880-as években Alexander Graham Bell vettette fel először alkalmazását ilyen célra.

Természetesen a fény szabad térben is terjed, de (különösen nagy távolságokra) az alapvető közeg a fényvezető (optikai) szál. Az optikai szálak felhasználása először a 60-as években került szóba, de az igazi áttörés a 70-es években következett be, amikor sikerült már 20 dB/km-nél kisebb veszteségű fényvezető szálakat előállítani, ami már jó esélyt adott a fényszálak gyakorlati (híradástechnikai, távközlési) alkalmazására.

3

BEVEZETŐ ÁTTEKINTÉS

A jelenlegi legkorszerűbb vezetékű adatátviteli módszer az üvegszálás technológia alkalmazása. Az információ fényimpulzusok formájában terjed egy fényvezető közegben (üvegszálon).



Optikai összekötetés vázlatja

4

OPTIKAI HÁLÓZAT FELÉPÍTÉSE

Az optikai átviteli rendszer három komponensből áll:

az átviteli közegből (hajszálvékony üveg vagy szilikát) amit egy szilárd fénytörő réteg véd (szintén üveg vagy műanyag),

a fényforrásból (LED vagy lézerdioda),

és az érzékelőből, mely fototranzisztor vagy fotodioda, amelynek vezetési képessége a rájuk eső fény hatására megváltozik

5

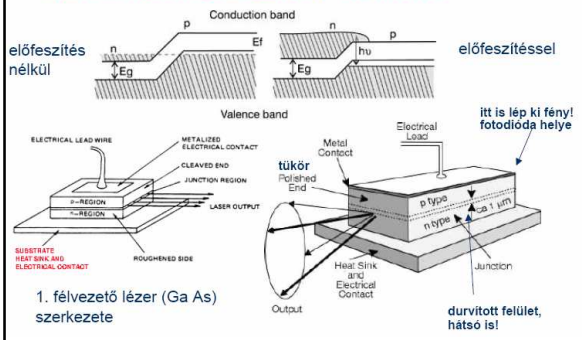
FÉLVEZETŐ LÉZERANYAGOK

Félvezető anyag	Sáv szélesség [eV]	λ [μm]
GaAs	1,428	0,868
InP	1,351	0,918
$\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$		0,65 – 0,9
$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$		0,9 – 1,7
$\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$		6,3 – 30
GaN	3,39	0,366

6

FÉLVEZETŐ LÉZER, LÉZERDIÓDA

nyitó irányban előfeszített $p-n$ átmenet



PN ÁTMENETES LÉZER

Az ilyen konstrukciójú lézereknél az volt a probléma, hogy a teljes fényteljesítményt nem lehet az aktív réteg belsejére korlátozni annak ellenére, hogy a nagy töltéshordozó-sűrűség megemeli az aktív réteg törésmutatóját és ezáltal hullámvezetőt képez a fény számára.

A lézerműködéshez az erősítési feltételek teljesülnie kell, ami a korai kialakítású eszközöknél szobahőmérsékleten csak nagy küszöbáram, illetve áramsűrűség (10^5 A/cm^2) esetén teljesült.

A dióda védelmének érdekében alacsony működési hőmérsékletet kellett biztosítani, illetve szobahőmérsékleten csak impulzus üzemben volt képes működni a lézer.

8

(KETTŐS) HETEROÁTMENETES LÉZER

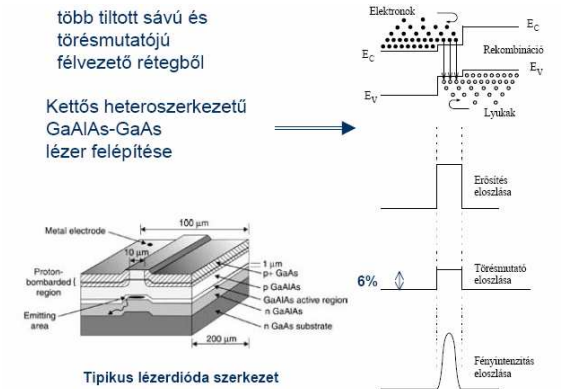
A szobahőmérsékleti folyamatos működtetéshez csökkenteni kellett a fényvesztéséget az eszközben, illetve meg kellett akadályozni a diffúziós töltéshordozó elvándorlást az aktív rétegből. Ehhez bonyolultabb szerkezetű, heteroátmenetes lézert kellett építeni. A heteroátmenet akkor jön létre, ha olyan félvezető anyagokat érintkeztetünk atomi közelségben, amelyknél a tiltott sáv nagysága különbözik. A heteroátmenetes lézerek nagyobb hatásfokkal és egy nagyságrenddel kisebb áramsűrűséggel működnek.

9

KETTŐS HETEROÁTMENETES LÉZER

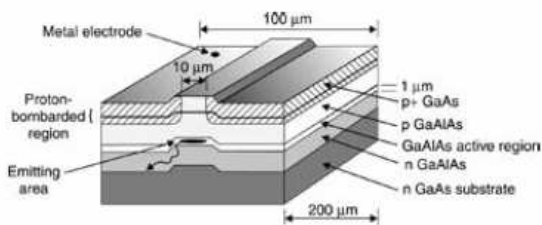
több tiltott sávú és törésmutatójú félvezető rétegből

Kettős heteroszerkezetű GaAlAs-GaAs lézer felépítése



Tipikus lézerdióda szerkezet

KETTŐS HETEROÁTMENETES LÉZER



Kettős heteroátmenetes GaAlAs/GaAs lézer felépítése

11

KETTŐS HETEROÁTMENETS LÉZER

A fenti struktúrában két nagy tiltott sáv szélességű anyag (GaAlAs) között található egy kis tiltott sáv szélességű rész (GaAs). Ebből a felépítésből következik, hogy a közbülső részben nagy töltéshordozó koncentráció jön létre.

Másrészt, mivel a kisebb tiltott sáv szélesség nagyobb optikai törésmutatót jelent, a szerkezet önmagában egyben optikai hullámvezetőként is viselkedik. Így egyszerre megoldott a szűk helyre való nagymértékű töltéshordozó-és fotonkoncentráció.

12

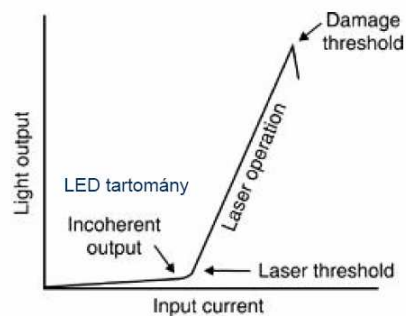
KETTŐS HETEROÁTMENETS LÉZER

A létrejövő aktív réteg tehát szinte teljes mértékben csak a GaAs rétegre korlátozódik, amelynek szélessége a gyártás során rendkívül kis méretűre tervezhető. Egy további előnye annak, hogy az aktív réteget nagyobb sávszélességű anyagok határolják, hogy a fénytjesítménynek az a része, amely az aktív rétegen kívül terjed, sokkal kisebb elnyelésnek van kitéve ebben az esetben, így a terjedési együttható is kisebb lesz ekkor, mint homoátmenet esetén.

Felfedezése óta megbízhatóság és élettartam szempontjából hatalmas fejlődésen ment keresztül a lézerdíóda. A mai lézerdíódák akár 10^7 óra üzemidőt is képesek teljesíteni.

13

LÉZER KARAKTERISZTIKÁK



Fényteljesítmény-áram karakterisztika

14

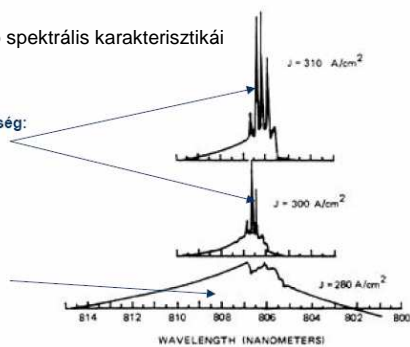
LÉZER KARAKTERISZTIKÁK

Lézernyaláb spektrális karakterisztikái

Lézermódusok

Tipikus sávszélesség:
2-3 nm

Spontán
fénykibocsátás
sávszélessége
(LED): 10-15 nm



16

FÉNYVEZETŐ SZÁLAS ÉRZÉKELŐK ÁLTALÁNOS TULAJDONSÁGAI

A fényvezető szál (illetve a szálvég) maga az érzékelő. Mérhetnek többek között hőmérsékletet, nyomást, mechanikai feszültséget és rezgést, kémiai koncentrációt, stb.

Érzékelési mechanizmusok: a szálban terjedő fény intenzitása, fázisa, polarizációja, hullámhossza, időzítése és spektrális eloszlása (módustartalma) megváltozása a külső körülmények hatására.

16

FÉNYVEZETŐ SZÁLAS ÉRZÉKELŐK ÁLTALÁNOS TULAJDONSÁGAI

Előnyök:

1. Az optikai érzékelők működését sem a rádió-hullámok, sem a villámlás, sem más természetes elektromágneses zavarforrás nem befolyásolja (EMC - electromagnetic compatibility). Nem kell árnyékolás, zavarűrés, stb.
2. Az érzékelő egyben a jelátviteli csatorna szerves része. Több érzékelő összekapcsolható, a jelek közösen továbbíthatók.

17

FÉNYVEZETŐ SZÁLAS ÉRZÉKELŐK ÁLTALÁNOS TULAJDONSÁGAI

3. A fényvezető szál már a gyártás során beépíthető a vizsgálandó szerkezetbe. A kvarc optikai szál ellenáll szélsőséges viszonyoknak is, kb. $1000\text{ }^\circ\text{C}$ -ig sem térfogatát sem súlyát nem változtatja meg. Az érzékelést végző optikai szál beönthető pl. betonba, a fémek egy részébe is.

Hátrányok: Általában drágábbak mint az elektromos vagy elektromechanikus érzékelők. Költségnövelő tényező, hogy a fényszál típusú érzékelőket még nem gyártják nagy sorozatban.

18

OPTIKAI HULLÁMVEZETŐKÖN ALAPULÓ ÉRZÉKELŐK

Érzékelési elv: a mérendő mennyiség megváltoztatja az átvezetett vagy visszavert fénycsugár jellemzőit (intenzitás, polarizáció, frekvencia, fázis).
Generátor típusú működés is lehetséges: maga a mérendő közeg egyben a fényforrás is (pl. kemolumineszcencia).

Intenzitásmérés: az áthaladó vagy visszavert fény intenzitását mérik.

Spektrumanalízis: az áthaladó vagy visszavert fény spektrumának megváltozását mérik. Gyakorlatban adott hullámhosszon mért intenzitásváltozás mérésével helyettesítik.

19

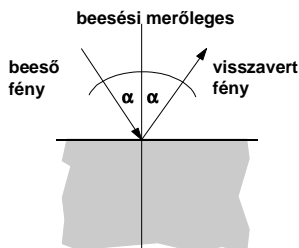
OPTIKAI HULLÁMVEZETŐKÖN ALAPULÓ ÉRZÉKELŐK

Fázisváltozás mérése: Terjedő vagy áthaladó fény fázisának eltolódását mérik. Ekkor a gerjesztés monokromatikus és koherens kell, hogy legyen. A fáziskülönbséget interferométerben intenzitásmérésre vezetnek vissza.

Polarizáció változásának detektálása: poláros gerjesztésű fény polárszögének megváltozását mérik. Polárszűrőkkel szintén intenzitásmérésre vezetnek vissza.

20

FÉNYVISSZAVÉRŐDÉS



Természetes, nempolarizált fény esetén a reflexiós tényező a beesési szögtől függően változik. Merőleges beesés esetén

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2}$$

21

FIZIKAI MŰKÖDÉS

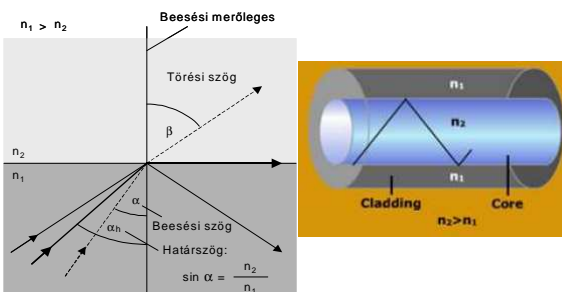
A fényvezető szálak működésének fizikai alapja a teljes visszaverődés jelensége.

Egy határszög felett a nagyobb törésmutatójú közegből a kisebb törésmutatójúba a fény nem tud kilépni, így teljes visszaverődést szenved. A fényvezető szálban a belső mag törésmutatója nagyobb, mint a külső héj anyagának törésmutatója, ez biztosítja a szál tengelyével közel párhuzamosan haladó fénysugarak vezetését.

A határszög a Snellius-Descartes törési törvényből határozható meg.

22

FÉNYTÖRÉS ÉS FÉNYVISSZAVÉRŐDÉS



A fény törése és visszaverődése két közeg határfelületén, és a teljes visszaverődés.

23

A TELJES VISSZAVÉRŐDÉS

Ha n_1 az optikailag sűrűbb, n_2 pedig az optikailag ritkább közeg törésmutatója ($n_2 < n_1$), és a két közeget elválasztó határfelületre merőleges irányhoz képest a fénysugár beesési szöge Θ_1 és Θ_2 , akkor

$$\sin \Theta_1 / \sin \Theta_2 = n_2 / n_1$$

a teljes visszaverődés határán:

$$\sin \Theta_2 = \sin 90^\circ = 1 = n_1 \sin \Theta_{1h} / n_2$$

a határszög

$$\Theta_{1h} = \arcsin(n_2 / n_1)$$

24

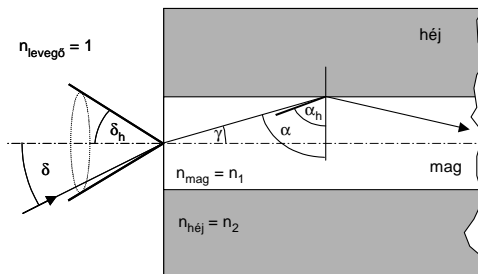
FÉNYVEZETÉS ÉS TÖRÉSMUTATÓ

A ún. gyengén vezető szálaknál a mag/héj határfelületen a törésmutató relatív változása $(n_1 - n_2)/n_1 = \Delta \ll 1$. Távközlési célra használt kábelekben általában $\Delta < 0,01$.

Pl. ha $n_1 = 1,5$, $n_2 = 1,485$, akkor $n_2/n_1 = 0,99$. Ekkor a mag/héj határfelületen a teljes visszaverődés szöge $\arcsin 0,99 = 81,9^\circ$, azaz a szál tengelyével $90^\circ - 81,9^\circ = 8,1^\circ$ illetve ennél kisebb szöget bezáró fénysugarat vezet a szál.

25

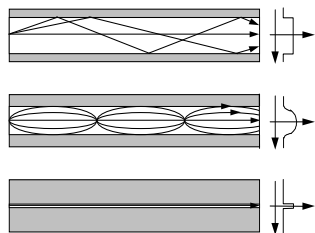
AKCEPTANCIASZÖG



Akceptanciaszög (δ), az ezen belül a szál végére beeső fénysugarat a szál "befogja".

26

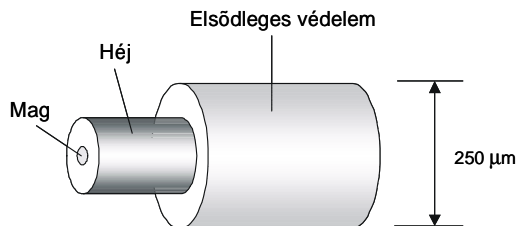
FÉNYVEZETŐ SZÁLTÍPUSOK



A fényvezető szálak működésének fizikai alapja a teljes visszaverődés. A szálban a mag törésmutatója nagyobb mint a héj törésmutatója. Többmódusú lépcsős indexű, többmódusú gradiens indexű, és egymódusú lépcsős indexű száltípusok.

27

OPTIKAI KÁBEL

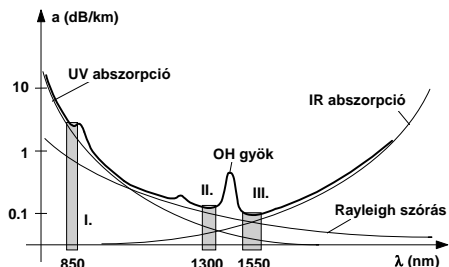


Mag (core): 6-60 μm
Héj (cladding): 125 μm
Primer bevonat: 250 μm
Szekunder bevonat: 1000 μm
Védőcső: 1-2 mm

Az optikai szál kialakítása

28

A CSILLAPÍTÁS HULLÁMHOSSZFÜGGÉSE



Fényvezető szál (olvasztott kvarc, SiO_2) csillapítási karakterisztikája. Átviteli "ablakok": I. – 850 nm, GaAs lézer, II. – 1200-1300 nm, minimális diszperzió, III. 1540-1450 nm, minimális csillapítás, InGaAsP/InP lézer.

29

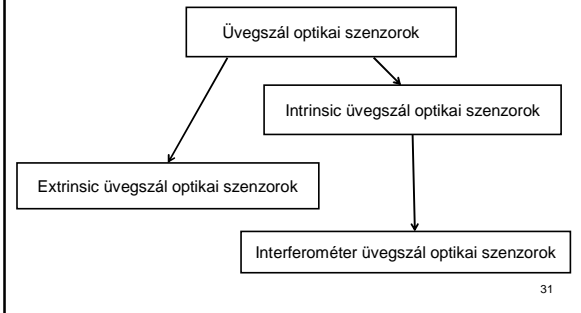
FÉNYVEZETŐ SZÁLAS ÉRZÉKLŐK CSOPORTOSÍTÁSA

Intrinsic:
az optikai szál maga az érzékelő, és benne változik az átvitt fény valamelyik paramétere.

Extrinsic:
a szál csak hullámvezetőként szolgál, hogy elvigye a fényt az érzékelőkhöz, és utána visszavigye a detektorhoz. A fény valamelyik jellemzője akkor a szálon kívül változik.

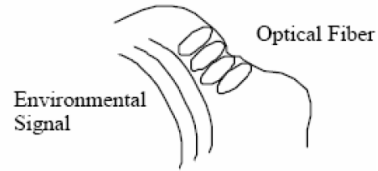
30

FÉNYVEZETŐ SZÁLAS ÉRZÉKLŐK CSOPORTOSÍTÁSA



31

INTRINSIC FÉNYSZÁL OPTIKAI SENZOR



Intrinsic üvegszál szenzorok néhány fontosabb típusa:

- Mikrodeformáció alapuló szenzor
- Fekete test szenzorok
- Elosztott paraméterű szenzorok
- Polarizációs szenzorok

32

INTRINSIC FÉNYSZÁL OPTIKAI SENZOR

Mikrodeformáció alapuló szenzorok:
A szál meghajlítása vagy más deformációja a benne terjedő fényt csillapítja.
Alacsony ár, viszonylagos egyszerűség.
Kis linearitás, rossz dinamikus tulajdonságok.

Fekete test szenzorok:
A hőmérséklet emelkedésekor az objektum által kisugárzott fény spektruma eltolódik, illetve egy adott hullámhosszon megváltozik a fény intenzitása. A színképeltolásból a hőmérséklet meghatározható. A szenzor a reflektált, vagy az emittált fényt méri.

33

INTRINSIC FÉNYSZÁL OPTIKAI SENZOR

Elosztott paraméterű szenzor:
Egy fizikai paraméternek az üvegszál mentén történő folytonos (elosztott), vagy véges számú mérőpontban (kvázi-elosztott) történő érzékelése szükséges. A szenzorok a Rayleigh-, vagy a Raman szórás, illetve módus csatolás (külső hatás az egymódusú fényvezetést többmódusúvá alakítja) elvén működnek.

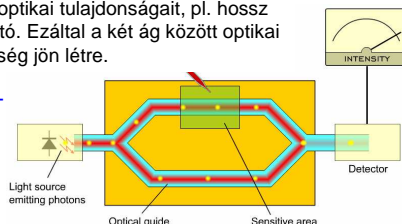
Polarizációs szenzor:
Az üvegszál polarizációs hatásán (pl. ketős törés) alapul. A környezeti hatások megváltoztatják a szálban terjedő fény polarizációs jellemzőit.

34

FÉNYSZÁL ALAPÚ INTERFEROMÉTER ÉRZÉKLŐK

Interferométer működési elve: a két optikai ág különböző hatásnak van kitéve. Az egyik ág (referencia) a külső hatások ellen védve van, a másik ág (szenzor) a külső hatásokra megváltoztatja optikai tulajdonságait, pl. hossz vagy törésmutató. Ezáltal a két ág között optikai úthossz különbség jön létre.

Mach-Zehnder-interferometer



FÁZISMODULÁCIÓ

Az átvitt fény fázisa az optikai úthossz változása miatt megváltozik. Oka: geometria úthossz és/vagy a törésmutató megváltozása, melyet az érzékelendő folyamat (pl. hőmérsékletváltozás, nyomásváltozás, kémiai hatás, stb.) hoz létre.

Optikai intenzitás az interferométerben (φ a fázisváltozás)

$$I = I_0 \cos^2(\varphi/2)$$

Egymódusú fényvezeték esetén az intenzitás maximális, ha $\varphi = 2\pi n$, illetve minimális ha $\varphi = (2n + 1)\pi$ (n egész szám).

36

FÉNYSZÁL ALAPÚ INTERFEROMÉTER ÉRZÉKELŐK

Interferométer alapú szenzorok érzékenysége nagy, de mérési tartományuk korlátozott (ekvivalens hossz maga a hullámhossz). Drágák is.

Interferométer elrendezések:

- Sagnac-interferométer
- Mach-Zehnder-interferométer
- Michelson-interferométer
- Fabry-Perot-Interferométer

37

SAGNAC-INTERFEROMÉTER

Az interferométer két ága ugyanabban a hurokban van, a fény a két ágban ellenkező irányban terjed.

Így a fáziseltolódás révén pl. a hurok forgása érzékelhető.

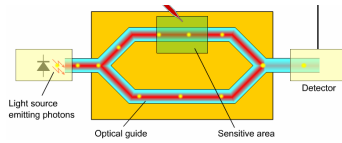
- Alkalmazás:
- forgás, gyorsulás, erő
 - akusztikai hullámhossz mérése
 - mágneses tér, áram

38

MACH-ZEHNDER INTERFEROMÉTER

Optikai úthossz

$$\Delta L = L_1 - L_2$$



Két egymódusú üvegszálból áll, az egyik ága a referencia a másik az érzékelő. A külső hatás megváltoztatja a fény fázisát, és a fáziskülönbség a kimenő jel. Ez az egyik legpontosabb optikai szenzor.

- Alkalmazás:
- mágneses tér, elektromos tér
 - gyorsulás, erő, távolság, nyomás
 - hőmérséklet
 - áram

39

MICHELSON-INTERFEROMÉTER

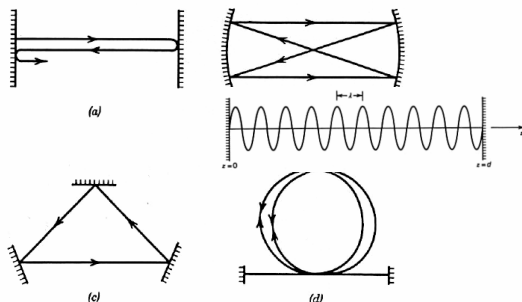
Működése hasonló, csak a felépítése különbözik a Mach-Zehnder interferométertől. A két ág végén egy-egy tükör van, így a fény oda-vissza befutja az ágakat.

$$\Delta L = 2(L_1 - L_2)$$

- Alkalmazások:
- Mint a Mach-Zehnder interferométer

40

FABRY-PEROT REZONÁTOR/INTERFEROMÉTER



F-P rezonátorok: (a) síktükör rezonátor, (b) gömbtükör rezonátor, (c) gyűrű rezonátor, (d) optikai szál rezonátor

FABRY-PEROT INTERFEROMÉTER SZENZOR

Az optikai közeg két végén tükör helyezkedik el (pl. a fényszál végén megfelelő reflexiós tényezőjű bevonat). A külső hatás "elhangolja" a rezonátort.

42

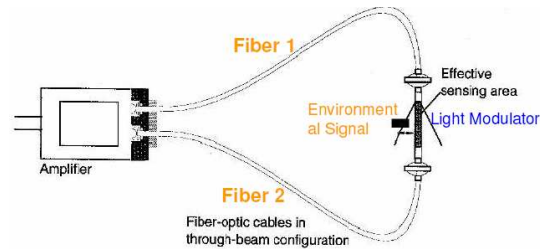
EXTRINSIC FÉNYSZÁL OPTIKAI SZENZOR

Extrinsic fényszál szenzor:
Az üvegszál mint hullámvezető a fénysugarat egy "fekete dobozba" vezeti, ahol a környezeti hatásokra a fény valamely paramétere megváltozik. A fekete doboz tartalmazhat optikai elemeket (p. tükör, lencse, stb.) gáz- és folyadék cellákat, és egyéb szerkezeteket, ami optikai fénynyalábot hoz létre, modulálás, vagy átalakít. Ezt a jelet a szál elvezeti további

Tehát a fény valamelyik jellemzője a szálon kívül változik meg.

43

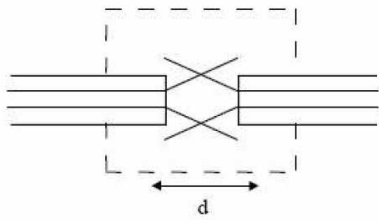
EXTRINSIC SZÁLOPTIKAI ÉRZÉKELŐ



Extrinsic száloptikai szenzor funkcionális felépítése.

44

EXTRINSIC SZÁLOPTIKAI ÉRZÉKELŐ

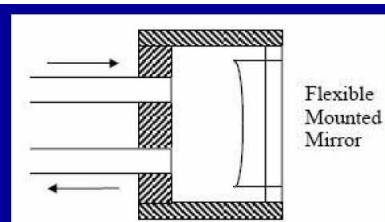


Closure and vibration fiber optic sensors based on numerical aperture can be used to support door closure indicators and measure levels of vibration in machinery.

Alkalmazás pl. ajtó záródás indikátor, vagy gépek rezgéseinek érzékelése

45

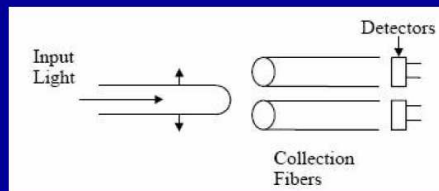
EXTRINSIC SZÁLOPTIKAI ÉRZÉKELŐ



Numerical aperture fiber sensor based on a flexible mirror can be used to measure small vibrations and displacements.

46

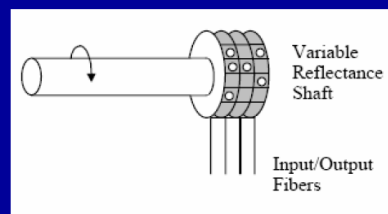
EXTRINSIC SZÁLOPTIKAI ÉRZÉKELŐ



Fiber optic translation sensor based on numerical aperture uses the ratio of the output on the detectors to determine the position of the input fiber.

47

EXTRINSIC SZÁLOPTIKAI ÉRZÉKELŐ



Fiber optic rotary position sensor based on reflectance used to measure rotational position of the shaft via the amount of light reflected from dark and light patches.

48