

1. Bevezetés

A fény segítségével történő információ továbbítást az ember már több ezer éve ismeri. Kezdetben a Nap vagy a tüzek fényét használták, vagy füstjelket alkalmaztak az üzenetek továbbítására. A görög történetírás, majd az ezt követő leírások egészen a XVIII. századig nagyon sok ötletes megoldását mutatják be a fényen alapuló, kezdetleges kommunikációs módszereknek.

A XIX. században rohamosan terjedő modern vasútközlekedésben a fénytechnika már nélkülözhetetlenné vált. A vasúti forgalom biztonságát szolgáló jelzőrendszerek kezdettől fogva, a mai napig is, a fénytechnikán alapulnak. A fénytechnikának a közúti, a vízi és a légi közlekedésben is meghatározó szerepe van.

Dr. Pogány Béla egyetemi tanár 1921-ben megjelent *A fény* című könyve szerint: „Ha a hullámhosszúság 0,0004 mm és 0,0008 mm között van, a sugárzást szemünkkel láthatjuk, ezt a részét az elektromágneses sugárzásnak fénynek nevezzük. A sugárzási skálának ehhez a látható részéhez csatlakozó rövidebb hullámhosszúságú sugarakat, le egészen 0,0001 mm-ig ultraibolya fénynek, a nagyobb hullámhosszúságú sugarakat, egészen 0,3 mm-ig infravörös fénynek, vagy hősugaraknak hívjuk” (1. ábra).

A fénytechnika fogalma alatt a 0,0001 mm és a 0,3 mm hullámhosszúságú elektromágneses sugárzás tartományához kapcsolódó mesterségbeli tudást, ügyességet, gyakorlatot és készséget, továbbá előállítási-gyártási módot és eljárást, valamint műszaki eszközöket-berendezéseket értjük.

2. A fény vezetése

Az 1960-as évek elején a lézer felfedezése a világ tudósainak és mérnökeinek figyelmét ismét a fény segítségével történő információ-továbbításra fordította.

A lézer, mint elnevezéséből is kitűnik (LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), sok szempontból hasonlatos a félvezetőkhöz, mert a Stimulated szó gerjesztést,



Fénykábel-telepítés

indukálást, az Amplification pedig erősítést jelent. A lézernél is szerepel az N és a P réteg, az előbbinél a villamos vezetés a negatív töltésű elektronok, az

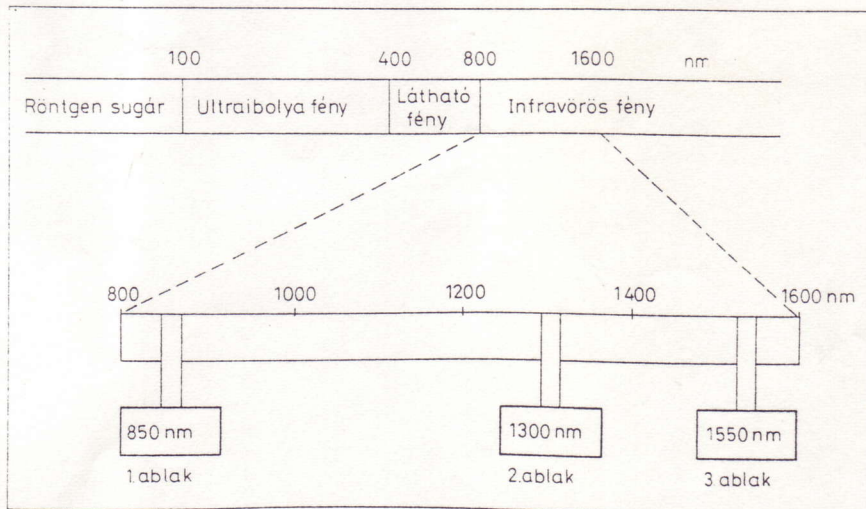
utóbbinál az elektronok hiánya, a lyukak mozgása révén jön létre. Ha egy elektron egy lyukba esik bele (az elektron és a lyuk rekombinálódik), úgy egy foton keletkezik, amelynek energiája, s ezzel együtt a kibocsátott fény hullámhossza az N és a P réteg energiakülönbségétől függ. Ez azonban még nem lézersugár.

Ahhoz, hogy lézersugár jöjjön létre, az elektron-lyuk pár energia különbséget fokozni, gerjeszteni (indukálni) kell. Ezt úgy valósítják meg, hogy a félvezető diódán villamos áramot vezetnek át, mégpedig P-N irányban. Ennek eredményeként több elektront injektálnak a P rétegbe és több lyukat az N rétegbe, amire létrejön a gerjesztés általi emisszió (az elektronok és a lyukak fokozott rekombinálódása), vagyis a fényerősítés.

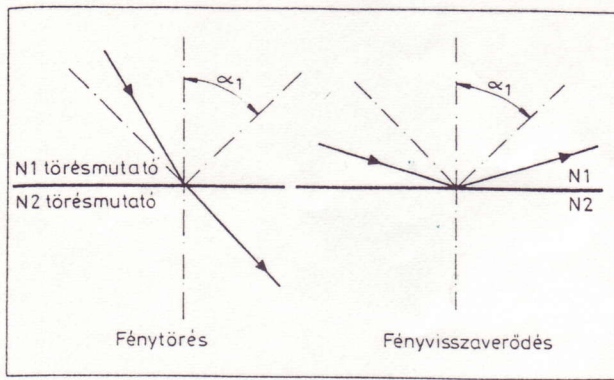
A továbbiakban ahhoz, hogy elkerüljék a fénynek az atmoszférában történő diszperzióját, vagyis csillapodását, megfelelő vezetőt, fényvezetőt kellett találni.

2.1. A fényvezető szál tulajdonságai

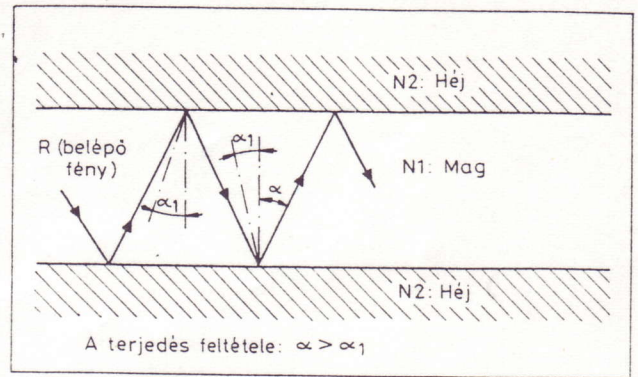
A lézer által gerjesztett fény vezetésére Dr. C. K. Kao, a harlovi (Egyesült Királyság) Standard Telecommunications Laboratories Ltd. munkatársa 1966-ban kétrétegű üvegszálát alkalmazott. A legjobb üvegszálak akkor



1. ábra. Sugárzási skála



2. ábra. A fénytörés és a fényvisszaverődés



3. ábra. A fénycsugár terjedése a fényvezető szálban

még 1000 dB/km-nél nagyobb csillapítással rendelkeztek. Az áttörés 1970-ben a Corningi (Egyesült Államok) Corning Glass Works-nél következett be, ahol 20 dB/km csillapítás-érték alatti szálakat sikerült kifejleszteni.

A fényvezető szálak működésének megértéséhez mindenképp a törésmutató, a fénytörés és a fényvisszaverődés fogalmakat kell megismerni.

TÖRÉSMUTATÓ

$$N = \frac{c_0}{v}$$

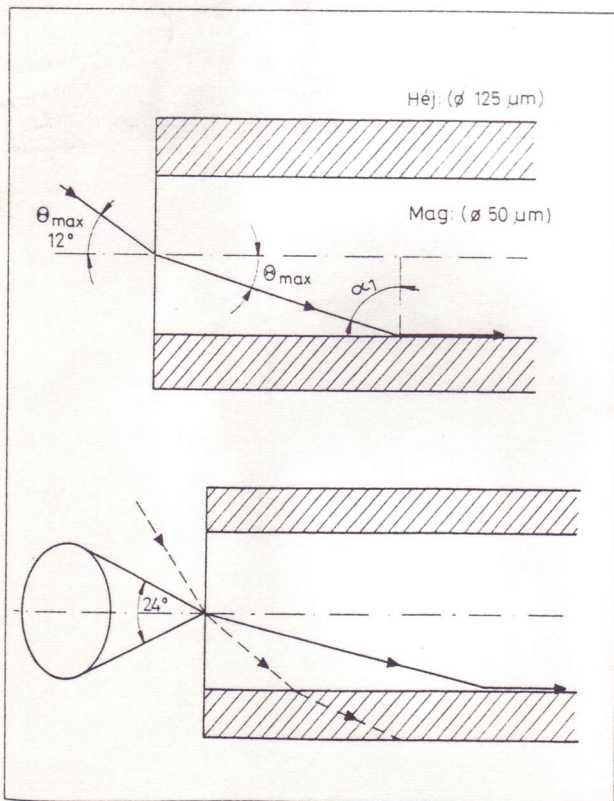
ahol c_0 : a fénysebesség vákuumban ($3 \cdot 10^8$ m/s), v : a fénysebesség az adott közegben (pl. üvegben: $2 \cdot 10^8$ m/s)

A törésmutató mindig nagyobb, mint 1, ezért a fény sebessége semmilyen közegben sem éri el a vákuumban mérhető értéket. Fénytörés jön létre, amikor az N_1 törésmutatójú közegben terjedő fénycsugár egy eltérő, N_2 törésmutatójú közegbe jutva elhajlik. Létezik egy α_1 beesési szög, amelyen túl teljes reflexió jön létre, amit fényvisszaverődésnek hívnak (2. ábra).

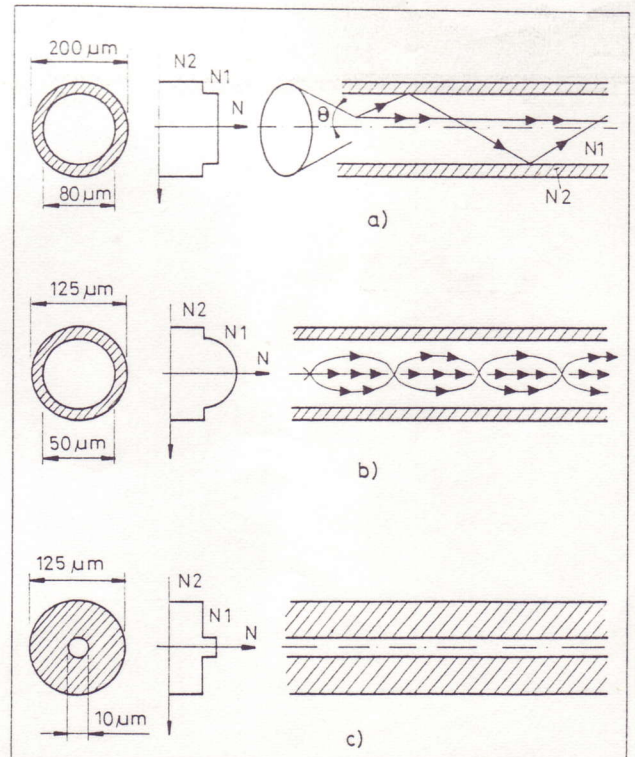
NUMERIKUS APERTURA

A fényvezető szál az N_1 törésmutatójú magból és az N_2 törésmutatójú héjből áll; a héj N_2 törésmutatója kisebb, mint a mag N_1 törésmutatója. Amennyiben a 3. ábrán látható módon az R (belépő fény) a magba úgy lép be, hogy az α beesési szög nagyobb, mint α_1 , akkor a belépett fénycsugár egymást követő visszaverődésekkel tovaterjed.

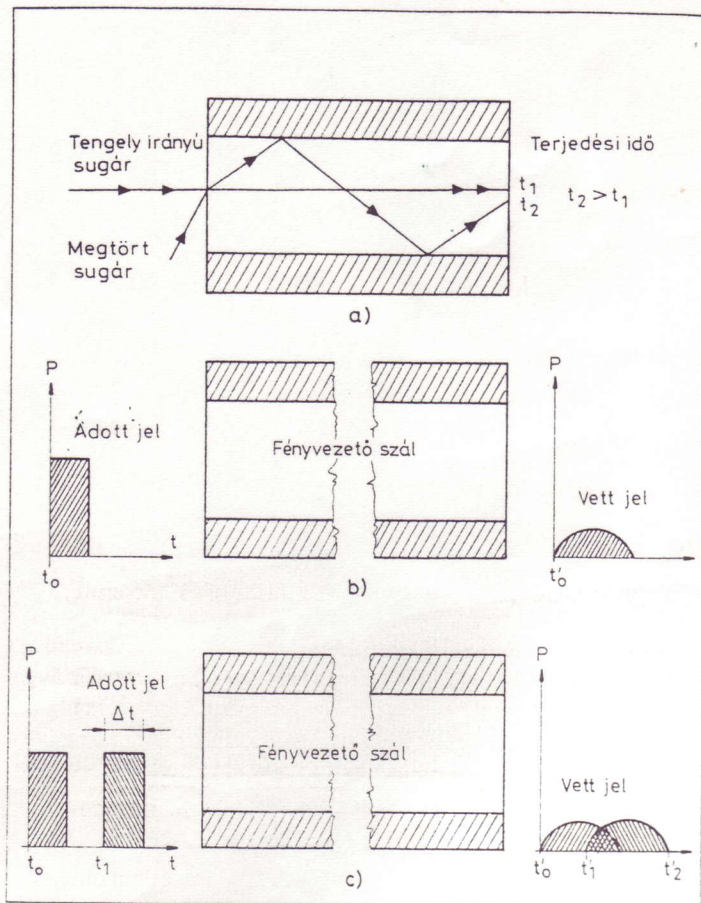
Numerikus apertura az a szög, amelyet a szál tengelye alkot az ehhez a



4. ábra. A numerikus apertura értelmezése



5. ábra. Hullámformák alakulása a fényvezető szálban. a) Multimodusú-lépcsős indexű szál. b) Multimodusú-gradiens indexű szál. c) Monomodusú-lépcsős indexű szál



6. ábra. A diszperzió értelmezése. a) Fényhullámok terjedése a magban. b) Torzítás. c) Torzítás és átlapolás

tengelyhez képest legjobban megtört sugárral úgy, hogy még alkalmas legyen a továbbjutásra. A levegőből az üvegszál magjába jutó fénysugár θ' -ről θ -ra változik a szál tengelyéhez képest. A θ'_{\max} beesési szögnél θ_{\max} lesz az a szög, amelyhez α_1 tartozik, vagyis ha ennél kisebb a beesési szög, akkor a magban már teljes visszaverődés lép fel, ezért a fény tovaterjed a fényvezető szálban (4. ábra).

A numerikus apertura számértéke a θ'_{\max} szög szinusza,

$$NA = \sin \theta'_{\max} = N_1 \sin \theta_{\max} \\ = \sqrt{N_1^2 - N_2^2}$$

Ha $\theta'_{\max} = 12^\circ$, akkor

$$NA = \sin 12^\circ = 0,2$$

A fényvezető szál tengelyével 12° -os szögben beeső fénysugarak egy kúpot képeznek. A kúpon belül beeső fénysugarak továbbjutnak, míg a kúpon kívül-

ről érkező sugarak a szál magjából át-lépnek a héjba, és így jutnak tovább.

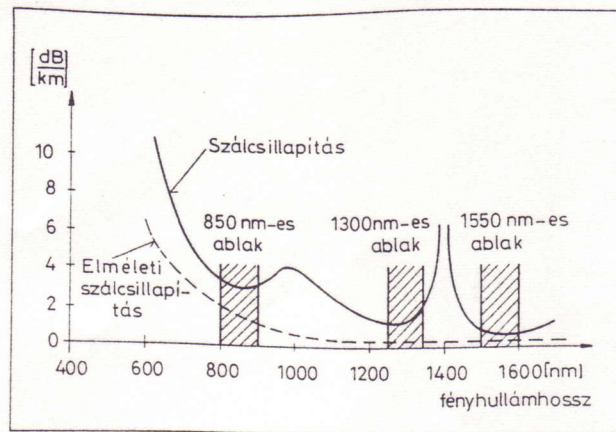
MODUS

A magban különböző hullámformák alakulnak ki a fényvezető szál geometriájától és a törésmutatók eloszlásától függően, ezek a hullámformák a modusok.

– Multimodusú - lépcsős profilú (lépcsős indexű) szál (5.a. ábra). A törésmutató ugrásszerűen változik a mag és a héj határán. A fény több útvonalon (multimoduson) terjed.

– Multimodusú - változó profilú (gradiens indexű) szál (5.b. ábra). A mag törésmutatója fokozatosan közelít a héj törésmutatójához, így a különböző útvonalak hossz-különbsége kisebb lesz, mint a lépcsős profilú szálnál. A terjedési idők különbségének csökkenése következtében megnő az átviteli sáv szélessége.

– Monomodusú - lépcsős profilú szál (5.c. ábra). E szál magjának igen



7. ábra. A fényvezető szál csillapítás jelleggörbéje

1. táblázat. Fényvezető szálak tipikus csillapítás értékei

Fényvezető szál	850 nm	1300 nm	1550 nm
Multimodusú, lépcsős profil	3 dB/km	1 dB/km	—
Multimodusú, változó profil	3 dB/km	1 dB/km	—
Monomodusú, lépcsős profil	—	0,5 dB/km	0,1 dB/km

kis mérete miatt ($10 \mu\text{m}$) a fénysugaraknak csak egy – a tengellyel párhuzamos – terjedési lehetőségük van. Nem jelentkezik a terjedési idő, illetve út különbség, vagyis a diszperzió, aminek következtében az átviteli sáv igen jelentősen megnövekszik.

DISZPERZIÓ

A fénysugarak sebessége egy adott törésmutatójú közegben állandó. Ebből következik, hogy a szál magjában a különböző utat megtevő sugarak terjedési ideje nem lesz azonos, hanem a megtett úttal lesz arányos. Például a tengelyirányú sugár rövidebb idő alatt jut el a fényvezető szál egy meghatározott helyére, mint az a sugár, amelyik visszaverődés útján terjed tovább (6.a. ábra).

Mivel az energia megoszlik az összes vezetett sugár között, a bemenetre adott fényimpulzus deformálódva érkezik a szál végére, ami torzításként jelentkezik. Például a kimeneten

észlelt impulzus szélesebb, mint a beadott (6.b. ábra). A fényvezető szál bemenetére adott két rövid, időben jól szétválasztott impulzus a diszperzió következtében a szál végére torzítva és átlapolva érkezik (6.c. ábra).

E jelenség elkerülése érdekében szükséges, hogy a két impulzust elválasztó idő elegendően hosszú legyen, illetve korlátozni kell az impulzusok szaporaságát. Ez a megkötés lényegében az átviteli sáv korlátozását jelenti.

CSILLAPÍTÁS

A fényvezető szál magjában terjedő fényhullámok csillapítást szenvednek. A csillapítást döntően két ok váltja ki:

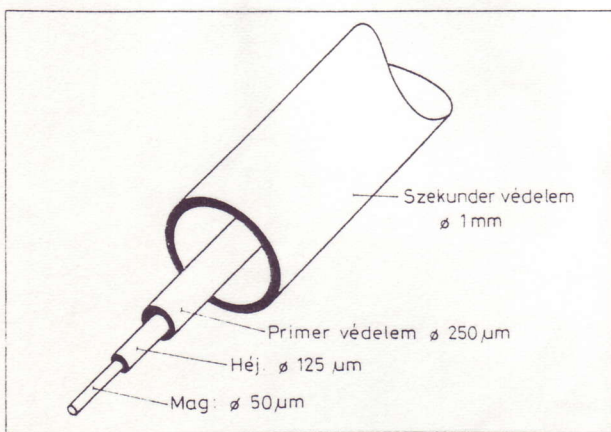
– abszorpció (elnyelés), ami a magban lévő tisztátalanság, szennyezés következménye;

– scattering (szóródás), ami a szálgeometriában előforduló tökéletlenségek következménye.

A fényvezető szál csillapítása függ a fény hullámhosszától, amint az a 7. ábrán látható. Az ábrán látható csillapítás-görbe három helyen minimum értékkel rendelkezik. A minimumhelyet ablak-nak nevezik, és ezen ablakok szerinti hullámhosszokon történik a fényvezető átvitel (1. ábra). A különböző típusú fényvezető szálaknak az egyes ablakokban mérhető tipikus csillapítás értékét mutatja az 1. táblázat.

2.2. A fényvezető szál felépítése és gyártása

A különböző fényvezető szálak geometriai méretei az 5. ábrán láthatók. A 8. ábra egy, a legelterjedtebb száltípus felépítését mutatja be. A mag és a héj együttesen egy 125 μm átmérőjű üvegszál, amelynek csak a törésmutatóban ($N_1 > N_2$) van különbség.



8. ábra. A fényvezető szál felépítése (laza köpenyezés)

A fényvezető szálát megszületésének pillanatától óvni kell

– a nem megengedhető húzóerő felépésétől, amely a szál szakadását okozhatja,

– a hidrogén (vízgőz) behatolásától, amelynek hatására megnő a szál csillapítása.

A fényvezető szálakat ezért kettős védelemmel látják el.

A primer védelem közvetlenül a szálhúzást követően kerül az üvegszálra úgy, hogy amikor az üvegszál hőmérséklete 500 °C-ra lehült, átvezetik egy tégelyen, amelyben a primer védelem alapanyaga van. E műanyag fürdőn áthúzott szálát hőkezelésnek vetik alá, hogy jól tapadó, erős primer védelmet kapjon.

A szekunder védelem kialakításánál – amely elsősorban a szál mechanikai védelmét szolgálja – kétféle megoldás használatos:

– szoros köpenyezés, amikor a mintegy 1 mm átmérőjű védelem a primer bevonathoz tapadóan kerül elhelyezésre;

– laza köpenyezés, amikor a szekunder védelem köpenye és a primer bevonatú fényvezető szál között nincs tapadás, vagyis a szál a köpeny belsejében könnyen elmozdulhat.

A fényvezető szálaknak szekunder védelemmel való ellátása általában már a kábelgyártás fázisában történik.

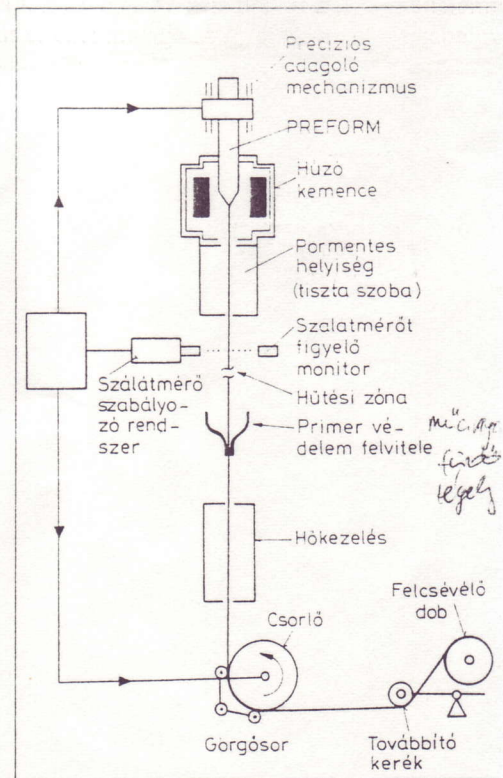
A FÉNYVEZETŐ SZÁL GYÁRTÁSA

A szálgyártás az előforma (preform) gyártásából és a szálhúzásból áll.

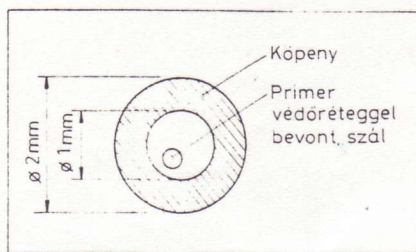
Az előforma gyártásnak változatos megoldásai lehetnek. Igen elterjedt az MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) eljárás, vagyis a gőzállapotú kémiai ülepítés, amikor kiindulnak egy 1 m hosszú, 20-25 mm külső,

16-19 mm belső átmérőjű szilícium-dioxid csőből. A cső képezi a leendő szál héj anyagát, amelynek belsejében szennyező anyagok (germánium és foszforoxidok) hozzáadásával létrehozzák az anyag megkívánt törésmutatóját úgy, hogy a cső belső falára ülepítik azt, egymást követő rétegekben. Az ülepítés befejeztével megemelik a hőmérsékletet, aminek hatására a szilícium-dioxid cső összeroppan és ez a tömör rúd képezi az előformát.

A szálhúzás abból áll, hogy egy tömör rúdból (preform) igen nagy hosszúságú szálát húznak, ahol a szál átmérője szélsőségesen kicsi a hosszúságához képest (a szál átmérője 125 μm , a szálhossz 25 km). Az MCVD eljárás szerint, amelyet a 9. ábra mutat be, az előformát egy szálhúzó toronyba helyezik, ahol egy kemence megfelelően magas hőmérsékleten megolvasztja azt. A megolvadt anyag elkezd folyni, s egy szálát produkál, amelyet egy forgódobra csévélnék fel. A kemence és a dob között egy, a szálátméretet figyelő monitor az előforma precíziós adagoló mechanizmusát, valamint a felcsévellő csörlő sebességét szabályozva, a szálátméretet állandó értéken tartja. A szálhúzás sebessége 40 m/perc nagyságrendbe esik az 50-150 μm -es szálak esetében.



9. ábra. A szálhúzó torony felépítése



10. ábra. Laza köpenyezésű szál

2.3. Fényvezető kábelek

A szorosan, illetve lazán köpenyezett szálakból különböző szerkezeti elemeket lehet összeállítani.

– Egyetlen, laza köpenyezésű szál (10. ábra)

Ez a legegyszerűbb megoldás, a primer bevonattal ellátott szálra extrudálják a külső csövet. A szál elhelyezkedhet a csőben teljesen szabadon, vagy valamilyen töltő anyagba ágyazva.

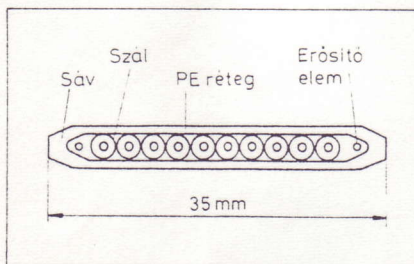
– Kötegelte szálak (11. ábra)

Az egyszálú konstrukcióból kiindulva egyetlen csőben több fényvezető szál is elhelyezhető, kötegbe foglalva. Egy kötegben legfeljebb 10 szál helyeznek el. A köpenyen belüli erek megkülönböztetésére általában színjelölést használnak. A cső töltő anyagot is tartalmazhat.

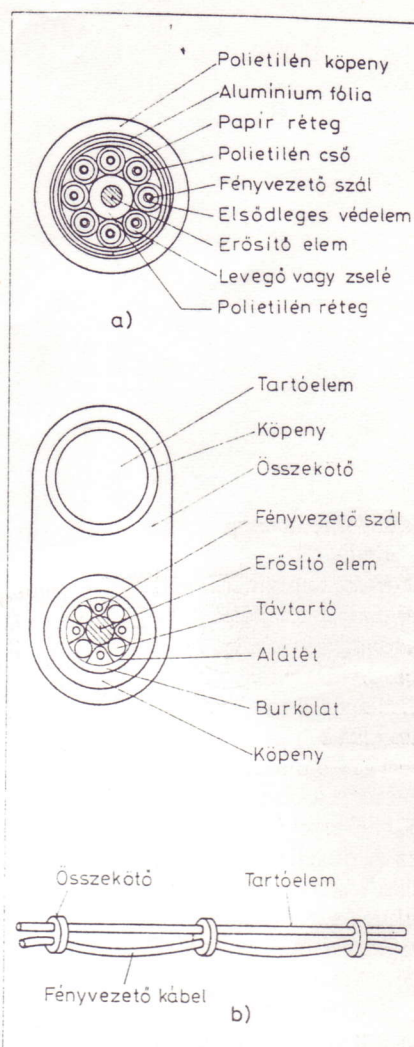
– Szalag-szálak (12. ábra)

A „szalag” szerkezetek általában 10 sávot tartalmaznak, sávonként 10-10 pályával, amelyekbe egy-egy fényvezető szál helyezhető el. Az automatikus szálkötési technológia kifejlesztésében ez a szerkezet jelentős szerepet játszott.

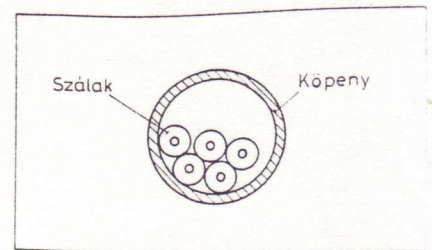
Az előzőekben ismertetett szerkezeti elemekből készítik a kábelgyárak különböző célra szolgáló kábeleket. A kábelek konstrukcióját a fényvezető szálakat tartalmazó szerkezeti elemeken kívül alapvetően meghatározzák az elhelyezés, illetve felhasználás körülményei:



12. ábra. Szalag szálak



13. ábra. Fényvezető kábel szerkezetek. a) Földkábel, nyolc laza köpenyezésű szállal. b) Önhordó légekábel, külön erősítőelemmel



11. ábra. Kötegelte szálak

– Földkábel, közvetlenül a földbe fektethető kivételben, páncélozással vagy páncélozás nélkül készül (13.a ábra).

– Behúzó kábel, amely beton vagy PVC csöves alépítménybe húzható be.

– Önhordó légekábel, amely különböző távolságokban lévő oszlopokra szerelhető fel, egy- vagy kételemes (13.b ábra) kivételben készülhet.

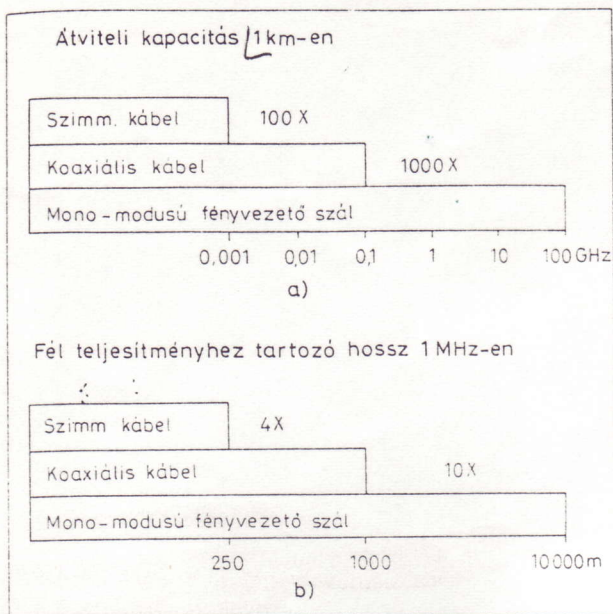
A kábel szerkezet legfontosabb eleme a külső köpeny, ez általában polietilén, amely óvja a fényvezető szerkezeti elemeket a környezeti hatásoktól, megfelelő mechanikai szilárdságot és vízbehatolással szembeni védelmet biztosítva.

Igen fontos szerepet tölt be a kábel szerkezetében az erősítő elem, amely a fényvezető szerkezeti elemek húzásmentesítését végzi, vagyis a kábel építése, üzeme (pl. önhordó légekábel) közben fellépő húzóerő hatását felveszi. Erősítő elemként vagy az igen nagy szilárdságú és kis fajsúlyú KEVLAR-t, vagy az üvegszállal erősített poliésztert (FRP: Fiber Reinforced Plastic) használnak.

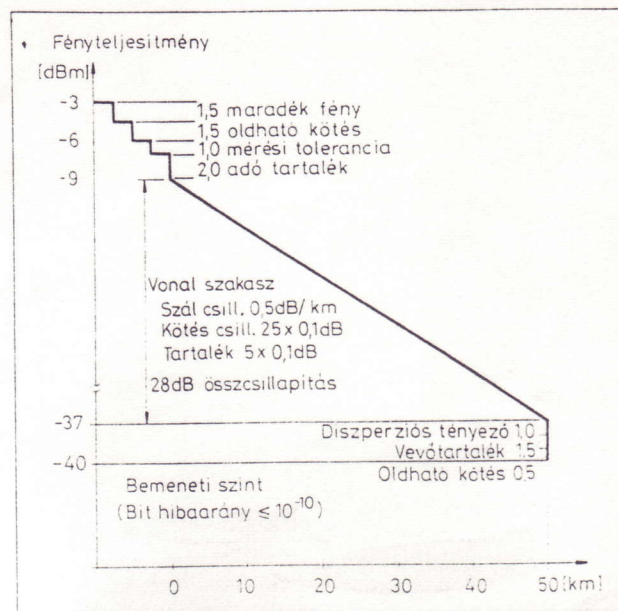
A kábel belső szerkezetében található még különböző töltő anyag,

2. táblázat. Digitális fénytávközlő rendszerek jellemzői

Sebesség [Mbit/s]	Csatorna szám	Min. sáv [MHz]	Távolság [km]	Átv. kap. [GHz×km]
2	30	10	55	0,55
8	120	20	50	1,00
34	480	50	45	2,25
140	1920	100	40	4,00
565	7680	400	30	12,00



14. ábra. Réz és fényvezető kábelcsek jellemzőinek összehasonlítása. a) Átviteli kapacitás. b) Csillapítás



15. ábra. Átviteli távolság meghatározása „worst case” módszerrel

melynek feladata a kábelbe jutó nedvesség továbbjutásának megakadályozása, illetve felszívása.

3. Fénytvávközlés

A távbeszélő hálózat kialakítását már több, mint száz évvel ezelőtt az a törekvés határozta meg, hogy beszédösszeköttetést létesítsenek az adott kor elektromos alkatrészei és a rézhuzal által teremtett korlátok között. A távbeszélő hálózat mai képét ezek a több, mint száz évvel ezelőtti technikában rejlő gátak alakították ki.

Pár évvel ezelőttig az átviteli közegben a sávzélesség igen értékes árucikk volt. Ez különösen érvényes volt a rézkábeles átviteli rendszerekre, ahol a „skinhatás” miatt a veszteségek a frek-

vencia növelésével rohamosan nőnek, továbbá a frekvenciával arányosan növekvő áthallás csökkenti az erősítőket, illetve jelismétlők közötti szakasz-hosszakat.

A fénytvávközlés megjelenésével ezek a korlátozó tényezők eltűnnek. A fényvezető szálnál, különösen pedig a monomodusú szálaknál az átviteli eszköz költsége nem arányos a sávzélességgel és az áthidalható távolsággal. A sávzélesség és a távolság növelése már csak minimális költségdöbblettel jár. A szimmetrikus kábel, a koaxiális kábel és a monomodusú fényvezető szál átviteli kapacitását és a csillapítását összehasonlítva a 14. ábrán látható arányokat kapjuk. A 2. táblázat bemutatja, hogy a digitális jelátvitel különböző sebességein mennyi távbeszélő-csatorna átvitele lehetséges, mekkora az erősítés nélkül áthidalható távolság és a szükséges átviteli kapacitás. (A monomodusú fényvezető szál átviteli kapacitása 100 GHz km.)

3.1. Fénytvávközlő rendszer elemei és felépítése

A fényvezető szálak legfontosabb jellemzőit a 3. táblázat mutatja be. Napjainkban a távközlési célra felhasznált fényvezető szálak 90%-a már monomodusú, zömében az 1300 nm-es ablakban használják.

3. táblázat. Fényvezető szálak átviteli kapacitása

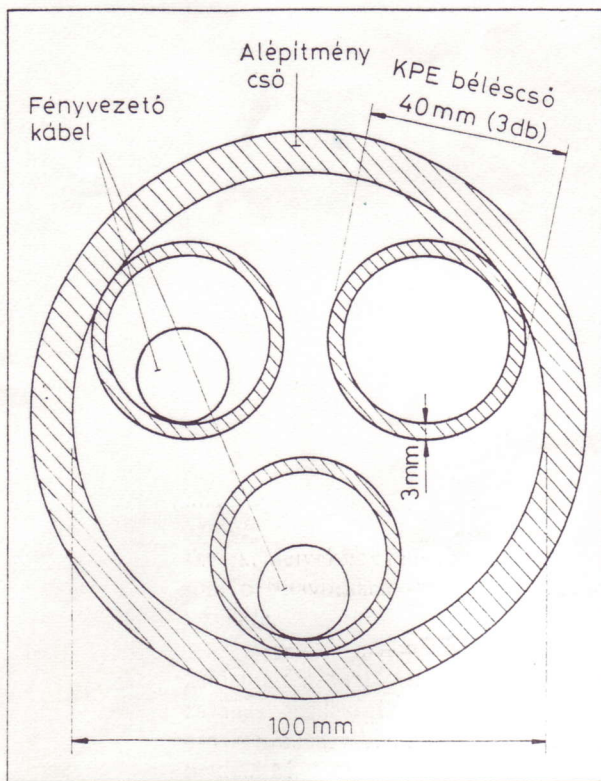
Szál típus	Hullámhossz [nm]	Min. átv. kap. [MHz×km]
multi-modus	850	350
	1300	1000
mono-m.	1300	100 000

Fényadóként vagy fényemittáló dióda (LED) -18 dBm adóteljesítménnyel vagy lézerdíóda (LD) -3 dB adóteljesítménnyel vehető figyelembe. Fényvevőként vagy PIN fotodióda -40 dBm min. vétel teljesítménnyel vagy APD lavina dióda -46 dBm min. vétel teljesítménnyel használatos.

A fenti elemekkel a vonalon megengedhető fénycsillapítás elméleti értékeit a 4. táblázat mutatja. A valóságban megengedett fénycsillapítási értékeket az úgynevezett „worst case” számítással, (vagyis a legrosszabb esetre) határozzuk meg. A 15. ábrán látható egy módszer, amely monomodusú szál esetén, az 1300 nm-es sávban mutatja be az áthidalható távolság meghatározását. A vonalcsillapítás fajlagos értékének meghatározásához feltételeztük,

4. táblázat. A fénycsillapítás elméleti értékei

	Adás	LED	LD
Vétel		-18 dBm	-3 dBm
PIN dióda -40 dBm		22	37
APD dióda -46 dBm		28	43



16. ábra. Alépitmény béléscsovezése

hogy a kábel 2 km gyártási hosszakban kerül leszállításra, továbbá, hogy a kötésállapítás átlagos értéke nem nagyobb, mint 0,1 dB. Javítási tartalékként 10 km-enként egy kötéssel számoltunk.

3.2. Fénytvázközlő rendszer létesítése

Fényvezető kábeleket ma már a távközlő hálózatok valamennyi síkján, illetve részén használnak.

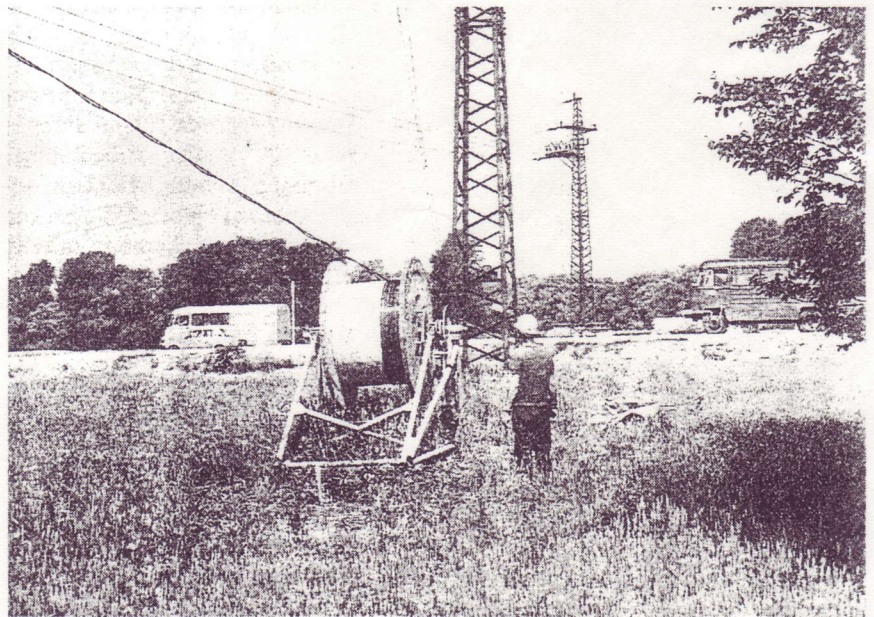
– Nagyvárosi hálózat távbeszélő központjai közötti összekötő áramkörök létesítésére a legkézenfekvőbb a fényvezető kábelek alkalmazása. Ez történik pl. a budapesti ún. „átkérő” hálózatban is. Mint ismeretes, a távközlő hálózatok legköltségesebb része az alépitmény hálózat, amely sok esetben már nem is bővíthető, illetőleg a bővítések a nagyvárosokban megoldhatatlan közlekedési problémákat okoznak. Ennek elkerülésére alkalmazzák azt a megoldást, hogy az alépitményben felszabadítanak egy-két csövet úgy, hogy abból a régi rézkábelt kihúzzák, majd a helyébe KPE (keménypolietilén) béléscsövet húznak, amint ez a 16. ábrán látható. Az egyes KPE csövekbe húzott fényvezető ká-

belre pedig nagy csatornaszámú digitális átviteli rendszereket telepítenek. Így például egy $200 \times 4/0,8$ Qv kábel helyére behúzható három 20 szálas mono-

modusú kábel, amelyen 34 Mbit/s esetén összesen $30 \times 480 = 14\,400$, illetve 140 Mbit/s esetén összesen $30 \times 1920 = 57\,600$ digitális átviteli csatorna, vagyis az eredetinek 72-, illetve 288-szorosra létesíthető.

– Nagytávolságú gerinchálózatok terén egyre nagyobb tért hódít az úgynevezett fényvezető lefedő (overlay) hálózatok építése, amelyek igen nagy csatornaszámú nyálábok létesítésével a jelenleginél lényegesen olcsóbbá teszik a nagytávolságú összeköttetéseket, továbbá megteremtik a digitális világhálózat létrejöttének lehetőségét is. A nagytávolságú hálózatok számára már kereskedelmi forgalomba kerültek az 565 Mbit/s sebességű átviteli rendszerek, melyek egy fényvezető szál-páron 7680 távbeszélő csatorna átvitelét teszik lehetővé.

– A körzet, más néven rurál hálózatban a fényvezető kábelek alkalmazásának gazdasági előnyei még nem egyértelműek. Abban az esetben, mint például Magyarországon, amikor nem a szokásos (földbe fektetett) kábelépítést alkalmazzák, hanem meglévő oszlopsorra szerelik fel a fényvezető kábeleket, akkor már gazdaságosabb lehet a rézkábeles megoldásoknál.



Az önhordó fény-légkábel dobja