

Az optikai szál és kábel

Kutasi Csaba

Életünk döntően láthatatlan kiegészítői a legkülönbözőbb alkalmazású fényvezető üvegszálak rendszerek. A telekommunikáció során a korábbi rézvezetőjű, csavart érpáras kábelek helyett ezek szállítják többek között a telefon-hangot, biztosítják az internet hozzáférést, létesítenek kapcsolatot a cég központja és telephelyei között. Távoli mérőhelyekről optikai kábel segítségével jut el a vizsgálólaboratóriumba az értékes információ. Közreműködésükkel érhető el tisztább hatás a hangtechnikában, alkalmazásukkal diagnosztizálhat és műthet az orvos. A dekorációs eszközök, térfigyelő- és riasztó berendezések működtetésénél szintén jelen vannak. A meghatározó, funkcionális főszerepet betöltő mag/köpeny felépítésű üveg-ér mellett textiles anyagokat ölelnek fel többek között a szálvédelmet ellátó védőköpenyek is, ezért találjuk e különleges terméket a műszaki textíliák között.

Az első üvegszálak a 19. század végén kuriózumként már megjelentek, azonban ipari méretű előállításuk 1930 körül kezdődött. Elterjedésüket kezdetben a kiváló hőállóság (éghetetlenség), a kedvező hőszigetelő képesség ill. a rendkívüli elektromos szigetelőhatás ösztönözte. További alkalmazási területekhez járult hozzá a nagy szilárdság, a jó vegyszerállóság, a kimagasló hangszigetelő képesség is.

Az üvegszál a szervesetlen mesterséges szálak csoportjába tartozik, mint túlhűtött folyadék. Míg a természetes és a további mesterséges szálak mind láncmolekulákból felépülő polimerek, addig az üvegszálakat a folytonos térhálós vegyületű szerkezet jellemzi. A stabil felépítésű üveganyagot szilícium-dioxid alapú szervesetlen polimerként is emlegetik.

A szálgyártások során a húzott üvegszál sokszerűen hűl le, így benne belső feszültségek halmozódnak fel és hibahely mentes felület alakul ki. Ezzel magyarázható, hogy a tömbüveghez képest az üvegszálak rendkívül nagy szilárdságúak (a nagy szakítóerejű szerves polimer szálaknál kétszer erősebbek). A különböző tulajdonságú üvegszálak képzésénél a felhasználásra kerülő üveg összetételének minőségi és mennyiségi változtatásával érik el a rendeltetésnek megfelelő tulajdonságokat.

A fényjelek története

Az emberiség ősidők óta alkalmazza a fényjeleket, hiszen a nap sugarait visszaverő bronztükrökkel, a különböző fényforrású világítótornyokkal régóta történt információátvitel. Később a jeltovábbító tornyok láncolatát létrehozva, a jeladó-karos technikát alkalmazva létrejött az ún. **optikai telegráf**. A fénytelefon gondolata és gyakorlati megvalósítása 1800-as évek legvégére nyúlik vissza. A több üvegszálból sodort **fénykábel** 1940 körül jelent meg, főként az **orvoslásban** használt szondák fontos tartozékaként, ill. a repülőgép-műszereknél. Utóbbiaknál a felhasználási helyről (pl. a fedélzeten kívüli világítóberendezésekről) közvetlen érkező működési információ (nem közvetett elektromos kontrollizott szolgáltatott esetleg bizonytalan

jelzést). Újabb jelentős állomás az 1958–60 közötti időszakra esik, amikor a **lézertechnika** optikai tartományú kiterjesztésével lehetőség nyílt arra, hogy az üvegszálból megfelelő teljesítményt juttassanak.

1966-ban kezdték először alkalmazni a speciális üvegszálat digitális távközlési vonalként. A széleskörű alkalmazásnak eleinte gátat szabott az üvegben fellelhető szennyezőanyagok jelentős mértékű előfordulása. A nemkívánatos részecskék nagymértékben csillapították az értékes információ-hordozók hatékonyságát (kilométerenként több száz dB nagyságrendű volt rontó hatás). A kutatók behatárolva kezdték foglalkozni a nagy tisztaságú üvegszálak előállításával, ennek eredményeként 1970-ben a csillapítási mérték 17 dB/km-re, tíz év múlva már 0,22 dB/km-re mérséklődött. A jelentős tisztítás üvegből felépülő optikai kábelrel ekkor már elérhető volt az a lehetőség, hogy akár 100 km-es jeltovábbítási távolságnál sem volt szükség jel-felújításra. Az 1990-es évektől többek között hazánkban a **postai telefon gerincvonalakat** is optikai kábelrel építik. Napjainkban pedig számos helyen, széleskörű alkalmazással szinte mindenütt megtalálhatók környezetünkben a különböző információk gyors továbbítására alkalmas, fényvezető üvegszálból felépülő jeltovábbító műszaki textíliák.

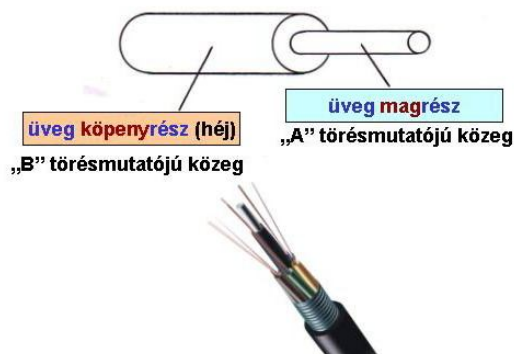
A fényvezetés elméleti vonatkozásai

Az optikai kábeleknél a jelátvitel nem elektromos úton, hanem a **fény modulálásával** (pl. monokromatikus fény, infravörös sugárzás) létrejött hullámvezetéssel történik (ezt nevezik fényvezetésnek). Ennek során az optikailag különböző közeg határán kialakuló visszaverődés, ill. az irányt változtatva történő behatolás juttatja a fő szerepet.

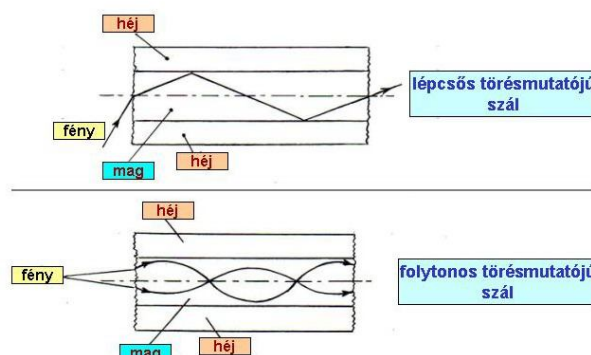
A teljes visszaverődés – mint a fényvezetésnél fontos tényező – akkor valósul meg, ha a két közeg határfelületén úgy verődik vissza a fénysugár, hogy a másik közegbe egyáltalán nem jut át. Ennek alapvető feltétele egyrészt olyan helyzet kialakulása, ahol a fény a sűrűbb átlátszó anyagból érkezik a ritkább közeg határfelületéhez, másrészt a beesési szög az ún. határszögnél nagyobb legyen. A teljes visszaverődés érdekében úgy kell alakulnia a befogadási szögnek, hogy a fény meghatározott kúpon belül érkezzék a szálba (a kúp szöge nem haladhatja meg a befogadási szöget). Az optikai kábelben a jelátvitelt nem közönséges fény szolgáltatja, hanem ún. monokromatikus (egyszínű) ill. infravörös elektromágneses sugárzás viszi a **digitális információkat**. Elterjedt a lézerdíódás sugárzás alkalmazása, pl. gallium-arzenid (GaAs), valamint gallium-arzen-indium-foszfid (GaAsInP) sugárforrások alkalmazásával. A nagyteljesítményű gáz- és szilárdtest-lézerekkel 100 km-es távolságok is áthidalhatók erősítés nélkül, egy adó-vevő párral.

Az optikai kábel lelke egy kellően kis sűrűségkülönbségű mag/köpeny felépítésű üvegszál-szerkezet. A magrészt az optikailag valamivel sűrűbb közegű (tehát a határoló köpeny-üveg ritkább optikai jellemzőkkel bír). A fényvezetést a mag-vezetékben lejátszódó folytonos visszaverődés hozza létre.

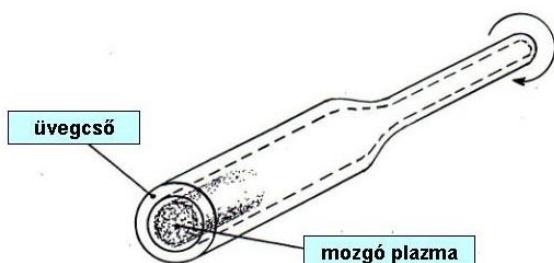
A fényvezető üvegszál felépítése



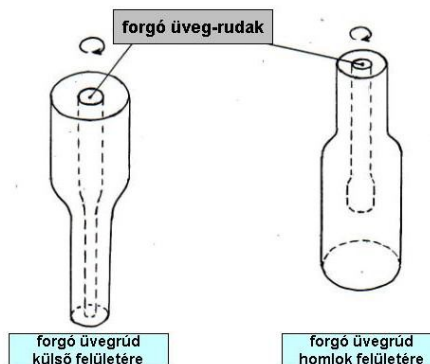
Különböző szerkezetű fényvezető üvegszálak működése



Forgó üvegcső belső felületén történő gázfázisú leválasztás elve



Gázfázisú leválasztással történő előforma készítés



Külön fogalomként megemlítendő a „módus”, amely a magátmérő és a benne futó fény hullámhosszának viszonyát fejezi ki (eszerint egy- és többmódusú fényvezető üvegszál-fajták ismertek).

Az alkalmas üvegszál-szerkezetek

Az alapanyagul szolgáló kvarcüveget nagy tisztaságban mesterségesen hozzák létre. Az amorf szerkezetű szilícium-dioxid olvadék nagy viszkozitásban fordul elő. A szilícium-dioxid gázfázisú leválasztásával állítható elő a magas tisztasági-fokú kvarcüveg. Az alapanyagul szolgáló kvarchomokból, egyes szilikát-ásványokból kiindulva redukálás, majd klórozás (a vas szennyeződések eltávolítására) után desztilláció következik. A keletkező szilícium-tetrakloridból oxidáció útján jön létre a gázfázisú hidrolízissel leválasztható értékes kvarcüveg-alapanyaga (szilícium-dioxid).

A különböző törésmutatójú üvegszálak:

- a **lépcsős törésmutatóval** rendelkező típusoknál a törésmutató a keresztmetszet mentén állandó, majd a mag-köpeny határfelületénél hirtelen megváltozik;
- a **folytonos törésmutatójú** szálakat az jellemzi, hogy a mag rész törésmutatója a tengelyvonalától a perem részhez közeledve parabolikusan változik (a hosszabb utat bejáró sugarak gyorsabban haladnak, így a megérkezés egy-idejűen történik).

A kvarcüvegszál-gyártás során először ún. előformát kell készíteni. Ez a szálhúzás alapját jelentő, egyelőre rendkívül durva vastagságviszonyokkal ren-

delkező mag-köpeny felépítésű üvegpézsdmény. A későbbi fázisokban – a végső finomságot biztosító szálhúzáskor – az előformás keresztmetszet akár háromszázszorosára csökkenhet, ennek ellenére az eredetileg kialakított mag-héj geometria mindvégig megmarad.

Az előforma készítésére több módszer is ismert, aszerint, hogy a leendő mag-köpeny szerkezetnek megfelelő felépítményt miként alakítják ki:

- Az üvegolvasztásos eljárásoknál a két önálló szerkezeti részt egyesítik:
 - a „csőben rúd” technológiánál a nagyobb törésmutatójú mag részt üvegcsőbe helyezik (tehát két szilárd előforma a kiindulási anyag), melegítés ill. húzás hatására alakul ki a köpennyel körülvett üvegszál. Ennél a módszernél jelentős a határfelületi hibák előfordulása, emiatt túl magas az így készült optikai kábel csillapítási értéke;
 - a kéttengelyes technikánál nem alkalmaznak szilárd előformákat, hanem az olvadt mag- és héjanyagot olvadékban koncentrikusan összevezetve alakul ki a továbbfeldolgozásra alkalmas, összetett szerkezetű anyag. Ennek az eljárásnak az előnye a folytonos törésmutatójú szálgyártás lehetősége; hátránya azonban a tömeggyártás nehézsége.
- A gázfázisú leválasztás elvén alapuló eljárások több fajtája ismert, közös elvként a forgó üvegrúd ill. a cső különböző felületein történő rétegzés kerül előtérbe:

- A forgó üvegrúd külső felületére történő leválasztásnál a rotációs mozgást végző (tengely körül forgatott) üvegrudat olyan égővel melegítik, amely transzlációs mozgást valósít meg (ennek megfelelően rétegelt nyers előforma jön létre); újabb lépésként szakaszos, teljes hosszú felmelegítést végeznek, így alakul ki a belsejében zárt, hólyagmentes táblás üvegrúd.
- A forgó üvegrúd homlokfelületén végbemenő leválasztás során az axiális, külső leválasztású megoldáshoz tartozó technika, amelynek során a kezdő rúd egyenletesen forog és emelkedik (eszerint gyarapszik a készülő előforma).
- A forgó üvegcső határfelületére történő leválasztásos eljárásnál a kiindulásként megjelenő kvarccső belső falára történik a leválasztás két lehetőség szerint: a) Egyfelől a cső belső falában a reagensek felbomlását követően megfelelő réteg alakul ki, az így kialakított cső 2000 °C-on összeroppanva szilárd előformát hoz létre; b) másfelől a kvarc-csőben forgó plazma ezernél több vékony rétegből álló szerkezetet alakít ki.

Az előzőekben vázlatosan leírt eljárások valamelyikével előállított előformából szálhúzással alakítják ki az optikai kábel funkcionális erét, a mag-köpeny felépítményű kvarcüveget. Ennek érdekében az előformát 2000 °C-ra felmelegítve kialakul a folyékony állapot a mintegy 300 m/perc sebességgel történő szálképzés során. Az előforma és az optikai kábel alapját képező összetett-szálképzés között többszázszoros keresztmetszet-csökkenés ellenére a kívánt geometriai felépítmény mindvégig megmarad.

Szilícium-oxid alapanyag mellett pl. fluoro-circonátot, fluoro-aluminátot is használnak, főként a hosszabb hullámhosszú, infravörös tartományban működő eszközöknél. Műanyag optikai szál (POF, azaz Plastic Optical Fiber) is ismert, 1 mm-es vagy nagyobb magátmérővel. Ezek nagyobb csillapítást okoznak (pl. 1 dB/m, vagy ennél több), ezért alkalmazhatóságuk korlátozottabb.

Üvegszál-szerkezetből optikai kábel

A különleges kialakítású üvegszál kis átmérőjű és fokozottan törékeny. A kábellel alakításkor a szálvédelemnek ki kell terjednie a mechanikai, hőmérsékleti, vegyi igénybevételekre és a légnedvességgel kapcsolatos hatásokra.

A **mechanikai** védelem során a kábelszereléssel, ill. használatával összefüggő káros igénybevételek kivédésére kell koncentrálni (tengelyirányú húzóerő, hajlító igénybevétel, sűrűlódásos kölcsönhatások stb.). A **hőmérsékleti hatások** elleni védekezés során a különböző túlzott hőigénybevételektől, ill. a drasztikus hőmérsékletváltozásoktól kell óvni az üvegszál-szerkezetet. A **vegyi körülményeknél** alapvetően a maró hatású savak, lúgok és egyéb agresszív vegyi anyagok elleni védelem fontos, ill. az olaj okozta káros behatások megakadályozására kell ügyelni (főként ilyen anyagok fokozott jelenlétével járó alkalmazás során).

A légnedvességi értékek túllépésekor a szálfelületen kialakuló parányi repedéseken keresztül hatolhat be a károsító vízpára. Természetesen aszerint kell a védelmet megvalósítani, hogy kültéri (ún. légvezeték, továbbá föld ill. pl. tenger alatti), vagy éppen beltéri alkalmazásra kerül-e sor, továbbá milyenek a különleges

helyi hatások. Az optimális védekezés hatékony köpenyezéssel, továbbá megfelelő erősítő-elemekkel valósul meg.

A főként mechanikai védelmet megvalósító köpenybevonat képzés lehet ún. szoros (a primer réteghez szorosan tapadó), ill. laza (nincs tapadás a két felület között). Az erősítő elemek az említett bevonatos szerkezet speciális védő-köpennyel történő ellátásánál játszanak fontos szerepet. A védelmi képesség szempontjából előnyös nagy rugalmassági modulusú anyagok viszont általában merevek. A hajlékonyság javítására kisebb keresztmetszeti egységeket alkalmaznak sodrott vagy kötegelt alakban. A textilipari vonatkozások előterébe kerülnek: a nagyteljesítményű harmadik generációs szálanyagok, pl. aromás poliamid (aramid), szupererős polietilén, szénszálak stb., továbbá az üzemen kívüli üvegszálak és ritkábban a hagyományos poliamid- és poliészterszálak is alkalmazásra kerülnek. Az acélhuzal páncélozás főként a hosszanti megerősítést célozza.

A speciális polimerszálak közül az optikai kábel védelme kapcsán alapvetően az **aromás poliamidok**, a **szupererős polietilén** szálak játszanak fontos szerepet.

Az aromás poliamidok régóta ismert szintetikus szálak, amelyek gyártását hosszú ideig nehezítette a magas olvadáspont előtti bomlás (így nem ömleszthető a nagymolekulás anyag a szálképzéshez), ill. az alkalmas oldószerének átmeneti hiánya. Kellő megoldást a határfelületi ill. a kishőmérsékletű oldószeres polikondenzáció bevezetése jelentette (utóbbinál a polimeroldat közvetlen felhasználható szálképzésre). Az aramidok láng hatására nem olvadnak, önkilótok, nincs utóézés, továbbá vegyszerállóságuk jó (kizárólag forró és tömény savak, ill. lúgok károsítják, szerves oldószereknek ellenállnak). A meta-aramidot többek között szigetelőként is használják, a para-aramidot szálerősítésű anyagoknál (kompozit-szerkezetek) alkalmazzák. A speciális aromás poliamidoknál kiemelendő az ún. folyadékkristályos polimer szerkezet (átmenet a folyékony és a kristályos állapot között), amellyel a pálcika alakú, merev láncok térbeli elfordulása megátolható (így garantálható a nagy-szilárdságú belső szerkezet).

A szuper erős polietilén szálakat nagy molekulatömegű, hosszú láncmolekulákból alakítják ki, ún. gél-szálképzéssel. A nagymértékű nyújtással fokozottan orientált szálanyagot hoznak létre, a nagy húzószilárdság következtében a speciális polietilén a világ leg-erősebb szála.

A **szénszálak** nagy szilárdságú és nagy modulusú, döntően szénatomokból felépülő, kétdimenziós, ún. rétegstruktúrájú anyagok. A szénszálak kiinduló anyaga számos szerves vegyület (főleg poliakrilnitril, ritkábban viszkóz, kőszénkátrány, kőolaj-maradék stb.), amelyekből pirolitikus úton történik az előállítás. A hőkezelés karbonizálás hőmérsékletétől függően részlegesen karbonizált (oxidált) ill. grafitizált (szén-) szálakat lehet előállítani. A szénszálakat nagy húzószilárdság (2000–5000 MPa), nagy rugalmassági modulus (200–450 GPa) és rendkívül alacsony (0,7–2 %) szakadási nyúlás jellemzi. Hátrányuk a merevség, a kis szívósság. A szénszál-filamenteket szerkezetereősítésnél általában sodratlanul, műszaki és egyéb textilipari rendeltetésnél általában kis sodrattal alkalmazzák.

Az **üzemen kívüli üvegszálak** csoportjába azon szervesen mesterséges szálanyagokat sorolják, amelyek üveg eredetük ellenére nem a fényvezetésben, hanem erősítőelemként működnek. Megemlítendők az új-típusú üvegszálak, ezek, mint azbeszthelyettesítők akár 900 °C-ig hőállóak, mikroszálak változatuk a felhasználási skálát tovább szélesíti. A poliszilikátok viszkozus oldatából nyert szilícium-dioxid szálak a legkönnyebb szervesen szálat képviselik, a közel 2 g/cm³-es sűrűségű anyag a tömegtakarékos felhasználási területeken kerül előtérbe. Az ilyen szálanyagok hőkezelésével a kvarcüveg hőtágulási együtthatóját megközelítő műszaki-textil alapanyag nyerhető.

A hagyományos szintetikus szálak közül különösen a különleges **poliészterek** műszaki-textil célú alkalmazása jelentős. A lángállóságot a szálgyártás előtt adagolt foszforvegyület adalékokkal érik el, az aromás kopoliészter extra szilárdsággal rendelkezik (a folyadék-kristályos belső szerkezet merev láncmolekulái biztosítják a nagy húzóellenállást).

Az acélhuzal páncélozás kapcsán fontos szerepet játszanak az **újszerű fémszálak**, amelyeket alkalmas fémötvözetek olvadékából képeznek. A szálképző fejből távozó szálanyag rendkívül gyors lehűtésével atomos szerkezetű és szabálytalan szerkezetet is mutató különleges szálanyagot nyernek, amely többek között az optikai kábel hosszanti megerősítésére is alkalmas.

Az optikai kábel **védőköpenyei** alkotják a külső burkolóanyagot, amelyek a használat helyszínétől függően változnak:

- A kültéri kábeleknél főként a különleges polietilén alkalmazása terjedt el, esetenként alumínium záróréteggel, vagy anélkül. Hasonlóan ilyen funkciót látnak el a kis- és közepes sűrűségű polietilének.
- A beltéri alkalmazásoknál a helyi igénybevételek határozzák meg a védőköpeny anyagát. Lángálló hatású PVC-burkolat, a fluoralapú műanyag köpeny 100 °C feletti hőhatásnak is ellenáll, igény szerint a lángállóság halogén-mentességgel is párosulhat.
- Az optikai kábelek fényvezető üvegszála felépítésük szerint, pontosabban a mag és a teljes szál átmérőjének viszonyaival és az ún. módussal (a magátmérő és a benne áramló fény hullámhosszána viszonya) jellemezhetők. Az egyes típusok besorolása pl.
 - 9/125 µm SM (a betűjel az egy-módusos fényvezetőre utal), nagy távolságú telekommunikációra használják,
 - 62,5/125 µm MM (a betűjel a többmódusos jellegre vonatkozik), a legszélesebb körben használt típus,
 - 200/230 µm-es optikai kábelt az orvosi gyakorlatban használnak.

A fényvezető-üvegszálak felhasználása

Az optikai kábelt rendkívül széles körben alkalmazzák napjainkban (és a közeljövőben bizonyára to-

vábbi felhasználási területekre is kiterjesztik ezt a műszaki-textilnek számító összetett terméket).

• **Rövid- és nagy távolságú telekommunikáció:** a korábban alkalmazott, hagyományos rézvezetőjű, csavart érpályás kábeleknél kb. két kilométerenként szükségessé vált a jel erősítése, ún. jelgenerátor közbeiktatásával. Az optikai kábelnél akár 100 km-es távolságokat is át lehet hidalni jelfrissítés nélkül. Az ilyen hálózatok átviteli képességét jellemzi a sáv szélesség és a távolság figyelembe vételével képzett mutató, pl. rézvezetőnél a 100 MHz/km, az optikai kábelnél a 100 GHz/km a jellemző érték (ezerszeres a növekedés a fényvezető-üvegszálból készült kábel javára). Külön előnyként kiemelendő, hogy pl. telefonkábelek esetén a lehallgatási veszély minimális, miután az illegális beavatkozásra a detektorra érkező fényenergia-csökkenés markáns árulkodó információt produkál, tehát az optikai kábel biztonságosabb is. Egyúttal az egységnyi sáv szélességre eső fajlagos költségek is alacsonyabbak.

• Egy cég telephelyei közötti információs hálózatokat szintén optikai kábelekkel építik ki.

• A mérési pont térben eltolható, távoli mérőhelyekről juttatható el a fényvezető technikával információ (pl. erő, hőmérséklet, nyomás stb.).

• Az orvostudomány a diagnosztikában és hagyományos műteti eljárásokat mellőző beavatkozásoknál alkalmazza az endoszkópiát. Az ilyen szerkezeteknél a fényvezető üvegszálak több funkciót látnak el, így egy részük a megvilágító fény bevezetéséről gondoskodik, önálló optikai kábel-ér a képzetes feladatát látja el. A másik különálló üvegszál a beavatkozásokat biztosító lézersugár bevezetését biztosítja. (Közismert, hogy a lézersugár hőhatására a hajszálerek végei azonnal beforrnak, elmarad a műtétet technikailag és egyébként is zavaró vérzés.) Külön kiemelendők az üvegszálak orvostechikai eszközök közül azok az infravörös sugárzással működő műszerek, amelyekkel pl. szem-műtéteket végeznek.

• A dekorációs hasznosítások széles körben ismertek, az üvegszálak lámpa hétköznapi kellékként is felhasználható, az optikai szál mennyezeten és padlón egyaránt megjelenik a különleges effektusokat igénylő terekben.

• A hangtechnikában is egyre jobban előtérbe kerül az optikai kábel alkalmazása, hiszen az optikai csatlakozókkal nagyobb jeltisztaság és tisztább hangzás érhető el.

• Az egyéb felhasználási területeket tekintve tovább szélesedik az alkalmazási skála, többek között riasztó hálózatoknál, térfigyelő rendszereknél, katonai rendeltetéseknek, speciális mérés technikáknál (pl. részecske-meghatározás) egyaránt hódít az optikai kábel. Optikai-szálat használnak a víz alatti mikrofonoknál, a szonár (visszhangszonda) rendszereknél is.