

# Optička vlakna

## Osnovne karakteristike

- Mogućnost prijenosa *velikih količina informacija* u jedinici vremena: **brzo**, **pouzđano** i na **velike udaljenosti**
- Radi na spektru između UV i IR (većinom vidljiva svjetlost)
- Svjetlost se može okarakterizirati svojom valnom duljinom
- Osnovni elementi: **predajnik** (LED ili LASER), **vlakno**, **detektor** (PIN ili APD)
- Dodatni elementi: regeneratori i pojačala

## Tipovi vlakana i performanse

Tip vlakna	Valna duljina	Brzina prijenosa	Domet	Primjena
Višemodna nit	850 nm	50 Mbit/s	10 km	Kablovi u zgradama
Jednomodna nit	1300 nm	17 Gbit/s	50 km	Velike udaljenosti
Minimalno prigušenje	1550 nm	10 Gbit/s	70 km	Dalekometni prijenos
OA+WDM	-	40 Gbit/s	120 km	82 kanala istovremeno
Solitoni	-	-	-	Eksperimentalne tehnologije

## Prednosti (pros)

- **Malo prigušenje**
- **Velik frekvencijski pojas**
- **Nema elektromagnetske radijacije**
- **Otpornost na interferencije**
- **Otpornost na koroziju i temperaturu**
- **Lagana i malih dimenzija**
- **Električni izolator**
- **veprisutan izvor materijala** (pijesak)

- Teška za rukovanje
  - kupa oprema
  - Visok šum u detektorima
  - Ograničena snaga izvora
  - Vlakna ne prenose energiju
  - Krhkost vlakana
-

## Valni parametri

- Val je opisan **amplitudom**, **valnom duljinom** ( $\lambda$ ) i **smjerom**
- **Frekvencija** ( $\nu$ ) se pri lomu ne mijenja, nego samo valna duljina

## Interferencija

- Svojestvo zbrajanja dvaju ili više valova. Uvjeti za interferenciju su da valovi imaju: **konstantnu razliku faza, identičnu amplitudu, i identičnu valnu duljinu**
  - **Konstruktivna**: Razlika faza je nula
  - **Destruktivna**: Razlika faza je jednaka polovini valne duljine

## Polarizacija

- Pokazuje da je svjetlost **EM transverzalni val**, odnosno da se sastoji od električnog i magnetskog polja koji titraju okomito jedno na drugo
- Tipovi polarizacije: linearno, kružno, eliptično, i nepolarizirano

## Kvantna optika

- Kod kvantne optike, svjetlost se sastoji od **fotona** s točno definiranom energijom:

$$E = h \cdot \nu$$

gdje je  $h$  Planck-ova konstanta:  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

---

# Sastav optičkog vlakna

## Komponente

### 1 Jezgra

- Materijal: Kvarcno staklo ( $\text{SiO}_2$ ) ili plastika
- Veći indeks loma od ovojnice ( $n_1 > n_2$ ) - postiže se dopiranjem

### 2 Ovojnica

- Materijal: Kvarcno staklo ( $\text{SiO}_2$ ) ili plastika

### 3 Zaštitni omotač

- Plastika za mehaničku zaštitu

## Specifikacije

- Vlakna se označavaju promjerom jezgre i ovojnice u mikrometrima (npr **50/125** ili **8/125**)

## Višemodna vs. Jednomodna vlakna

Karakteristika	Višemodna	Jednomodna
Promjer jezgre	Veći (50–62.5 μm)	Manji (8–10 μm)
Valna duljina	850nm i 1310nm	1310nm i 1550nm
Normalizirana frekvencija (V)	$> 2.405$	$\leq 2.405$
Transmisijski kapacitet	Manji	Veći
Cijena	Manja (koriste se LED-ovi)	Veća (koriste se laseri)
Primjena	Kratke udaljenosti	Duge udaljenosti
Težina instalacije	Lakša	Teža
Disperzija	Visoka	Niska
Numerički otvor (NA)	Veći ( $\approx 0.2$ – $0.5$ )	Manji ( $\approx 0.1$ – $0.2$ )

### Numerički otvor (NA)

- Numerički otvor (NA - numerical aperture) je vrijednost koja opisuje mogućnost jezgre vlakna da prikupi svjetlost. Veći NA = više prikupljene svjetlosti. Formula:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

- Kut prihvata** je maksimalni kut (u odnosu na centralnu dužinu koja prolazi jezgrom vlakna) pod kojim svjetlost smije upasti u jezgru kako bi se dogodila totalna unutarnja refleksija. Zrake koje upadaju pod kutem većeg od kuta prihvata se neće reflektirati nego će se lomiti i otići u ovojnicu. Formula:

$$\phi_{\text{amax}} = \arcsin\left(\frac{NA}{n_a}\right)$$

### Relativna razlika indeksa loma

- Formula:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

ili za male vrijednosti  $\Delta$  ( $\Delta \ll 1$ ):

$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

- Koristeći relativnu razliku indeksa loma, dobijemo alternativnu formulu za NA:

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

## Normalizirana frekvencija

- Koristi se za opis optičkog vlakna i za određivanje je li vlakno jednomodno ili višemodno. Formula:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot \text{NA}$$

- Kada je  $V \leq 2.405$ , vlakno je jednomodno

## Profili indeksa loma

1 **kokoviti profil**: Oštra razlika između  $n_1$  i  $n_2$

2 **Postepeni profil**: Jezgra ima slojeve s promjenjivim  $n$ , te se na rubu jezgre indeks loma približava indeksu loma ovojnice. Definira se sa parametrom  $g$  koji je za parabolične postepene profile jednak 2

Kod postepenih profila, formula za NA je drugačija:

$$\text{NA} = \sqrt{n^2(r) - n_2^2}$$

gdje je  $n(r)$  funkcija čija je vrijednost indeks loma jezgre ovisno o parametru  $r$  tj. udaljenosti od centra jezgre:

$$n(r) = n_1 \cdot \sqrt{1 - 2\Delta\left(\frac{r}{a}\right)^g}$$

gdje je  $g$  parametar profila indeksa loma

## Broj modova u višemodnom vlaknu

- Kod višemodnih vlakana se može izračunati približan broj modova putem formule:

$$M \approx \frac{V^2}{2}$$

- Kod višemodnih vlakana sa postepenim profilom indeksa loma, formula je drugačija:

$$M \approx \frac{g}{g+2} \cdot \frac{V^2}{2}$$

gdje je  $g$  parametar profila indeksa loma (najčešće je 2)

## Podjela vlakana

- Optička vlakna možemo podijeliti po **materijalu** (plastika - POF, staklo - GOF), **profilu indeksa loma** (skokoviti i postepeni), i **broju modova** (jednomodno i višemodno)

---

# Linearni i nelinearni efekti

## Linearni efekti

### 1 Prigušenje

- To je pojava opadanja snage signala prilikom putovanja kroz vlakno. Mjeri se u vatima (W) i pokazuje koliko će snaga signala opasti zbog nekih intrinzičnih svojstava vlakna. Linearni je efekt jer se može izmjeriti formulom:

$$P_{\text{izlazni}} = P_{\text{ulazni}} \cdot 10^{-\alpha L/10}$$

gdje je  $L$  duljina vlakna, a  $\alpha$  koeficijent prigušenja vlakna odnosno koliko dB snage se gubi po km (ne postoji vlakno gdje je  $\alpha = 0$ )

### 2 Disperzija

- Proširenje signala u vremenu

## Nelinearni efekti

- Ne-linearni, što znači da su razni i da su uzrokovani kompleksnijim procesima koji se ne mogu opisati jednostavnim formulama
- Uzrokovani visokom snagom (npr **Kerr-ov efekt**) i raspršenjem signala
- Generiraju se nove valne duljina i smanjuje se snaga ulaznih valova

## dB

- Ukupni gubitak snage signala se najčešće izražava u logaritamskoj jedinici dB Može se izvesti iz formule za prigušenje:

$$A_{ukupno} = -10 \log_{10} \left( \frac{P_{primljeno}}{P_{poslano}} \right)$$

- Za specifičniju informaciju o onome gdje se točno gubi signal, mogu se izmjeriti gubici na svim konektorima i spojevima, kao i vlaknu, te sve zbrojiti, dobivajući okoprilike istu vrijednost:

$$A_{ukupno} = N_{konektora} \cdot A_{konektor} + N_{spojeva} \cdot A_{spoj} + A_{vlakno}$$

## dBm

- **dBm** je specifična jedinica snage u dB u odnosu na referentnu snagu od 1 mW Formula:

$$P[\text{dBm}] = 10 \log_{10} \left( \frac{P[\text{mW}]}{1 \text{ mW}} \right)$$

- **Uvijek koristiti dBm gdje god je to moguće** dBm je koristan pri računanju gubitka snage kroz vlakno Na primjer: ako nam je zadana poslana i primljena snaga u dBm, onda će ukupni gubitak biti:

$$P_{ukupno}[\text{dBm}] = P_{poslano}[\text{dBm}] - P_{primljeno}[\text{dBm}]$$

## Prigušenje

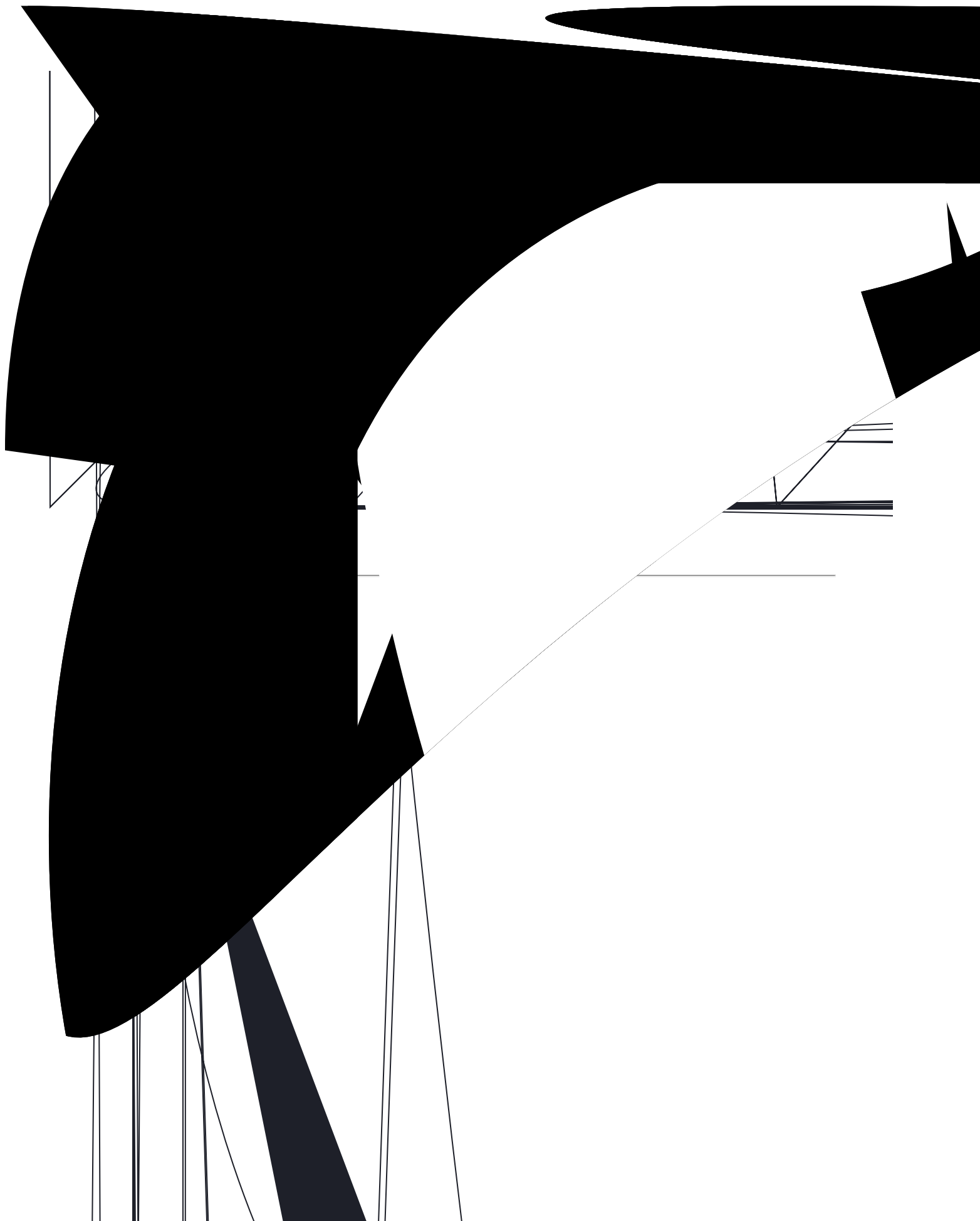
- Prigušenje je zapravo makro efekt, tj. uzrokuju ga više manjih efekata:
  - **Apsorpcija** - određeni dio svjetlosti se upije u nečistoće u vlaknu Postoje 2 tipa apsorpcije:
    - 1 *Unutarnja* - neizbježna apsorpcija radi materijala od koje je vlakno napravljeno
    - 2 *Vanjska* - posljedica nečistoća i nesavršenosti vlakna koje su dosle prilikom izradnje
  - **Raspršenje** - određeni dio svjetlosti se odbije od nečistoće ili geometrijske nepravilnosti u vlaknu (općenito "optičke prepreke"), te se ili vrte nazad odakle su došle (refleksija) ili se lome u ovojnicu

- **Rayleigh-ovo raspršenje** - javlja se kad god postoje nečistoće u nekoj sredini kojom putuje svjetlost čija je valna duljina puno veća od tih nečistoća Kao makro efekt izgleda kao mnogo sitnih lokaliziranih promjena indeksa loma jezgre Formula:

$$\alpha_{\text{rayleigh}} = \frac{A_{\text{rayleigh}}}{\lambda^4}$$

gdje je  $A_{\text{rayleigh}}$  Rayleigh-ov koeficijent raspršenja koji je konstantan za dati materijal

- Važno je što snaga Rayleigh-ovog raspršenja opada porastom valne duljine, pa na većim valnim daljinama je slabije Ipak, Rayleigh-ovo raspršenje predstavlja dominantni gubitak na gotovo svakoj valnoj duljini
  - **savijanje** - Mijenjaju se uvjeti propagacije jer se mijenja potrebni upadni kut za neku zraku svjetlosti da bi se mogla dogoditi unutarnja refleksija Kod savijanja se jedan dio nepravilno odbija i eventualni priguši, a drugi lomi i ulazi u ovojnicu Savijanje se dijeli se na 2 vrste:
    - 1 **Mikrosavijanja** - proizvodne greške, no ovaj problem se polako rješava u modernim kabelima
    - 2 **Makrosavijanja** - greške u instalaciji Uvijek se treba paziti da polumjer savijenog kabla nije premal, i korisno je držati se pravila da je minimalni polumjer savijanja



- 5 Rastaljivanje staklenih vlakana putem električnog luka
- 6 Zavarivanje tako što se pomjera jedno vlakno prema drugom dok električni luk radi, tako ih spajajući
- 7 Ispitivanje spoja

Postoje uređaji koji ovo automatski rade i stvaraju spojeve sa vrlo malim gubitcima

- **Mehanički spojevi:** Jednostavnije i jeftinije od fusion splicing-a, no problem je mehaničko poravnanje vlakana, i postoje značajne refleksije. Najčešće se vlakna stavljaju u okruglu cijev, te se prostor između njih ispuni tekućinom koja ima isti indeks loma kao jezgra. Također postoji i kvadratna cijev koja je prvo ispunjena tekućinom sa istim indeksom loma kao jezgra, pa su vlakna tek onda ubačena, a kvadratni presjek pomaže pri poravnanju, i na kraju postoji žlijeb u obliku slova V
- 2 **Rastavljivi (konektorski):** jednostavno korištenje, no mora se uvijek provjeriti za nečistoće
  - Ukupni gubici kod ovakvih spojeva su uvijek slučajni jer je teško osigurati preciznost. Zahtjevi za dobar optički konektor su:
    - 1 Mali gubici
    - 2 Mogućnost višestrukog spajanja/razdvajanja bez degradiranja komponenti ili efikasnosti
    - 3 Jednostavno spajanje
    - 4 Niska osjetljivost na uvjete okoline
    - 5 Niska cijena
  - **Vrste konektora:**
    - Konektori s cilindričnom ferulom - *ferula* je unutrašnji keramički dio konektora unutar kojega je smješteno vlakno, i služi za pozicioniranje vlakna na svoje mjesto unutar konektora. Ferula je vrlo preciznog promjera (najčešće +1 mikrometar veće od promjera vlakna)
    - Trakasti optički konektori - npr. MT konektor (koristi pinove koji služe za pozicioniranje)
    - V-blok (niz V-žlijebova)

## Vrste gubitaka na spoju

- Vrste gubitaka na spoju dijelimo na:
  - **Uneseni gubitak** - određeni dio snage se uvijek gubi na svakom spoju
  - **Povratni gubitak** - dio ulazne snage se odbija nazad od mjesta spoja

## Gubici na spoju

Dijele se na sljedeće kategorije:

### Različitosti konfiguracije

- 1 **Razlika u promjerima jezgri vlakana** - ako je jezgra prvog vlakna veća od drugog, onda će se dio svjetlosti izgubiti, što uzrokuje smanjenu snagu
- 2 **Razlika u numeričkim otvorima NA** - najveći gubici su pri spajanju jednomodnog i višemodnog vlakna
- 3 **Razlika u profilima indeksa loma** - npr. skokoviti i postepeni: dio svjetlosti će otići pogrešnim smjerom
- 4 **Ne-kružnost jezgre i ovojnice** - npr. ako su jezgre na oba vlakna eliptičnog oblika, onda se vjerovatno neće savršeno poklapati i doći će do gubitka svjetlosti
- 5 **Ne-koncentričnost jezgre** - ako jezgre unutar vlakana nisu centrirane, onda će se dogoditi gubitak svjetlosti



## Gubitci zbog instalacije

- 1 **Bočno odstupanje** - vlakna se dodiruju no nisu poravnata po X i/ili Y osi
- 2 **Uzdužna odvojenost** - vlakna imaju razmak između sebe
- 3 **Kutno odstupanje** - vlakna nisu savršeno poravnata u istu dužinu

## Fresnel-ovi gubitci

- 1 **Direktni spoj između dvaju sredstava** - pošto je skoro nemoguće napraviti spoj koji ima potpuno identičan indeks loma kao jezgra, dogodit će se gubitci (zbog prigušenja i refleksije) na mjestu spoja Formule:

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

$$A_{fresnel}[\text{dB}] = -10 \log_{10}(1 - R)$$

- 2 **Zračni razmak** - dogodi se ako spoj vlakana nije savršen i nalazi se zrak između vlakana tj ne dodiruju se  
To je zapravo kombinacija dvaju razlika indeksa loma (za razliku od prve vrste Fresnel-ovog gubitka gdje se radi o samo jednoj razlici indeksa loma): prva razlika je između jezgre i zraka, a druga razlika je između zraka i jezgre Na oba mjesta se događaju Fresnel-ovi gubitci, a formula za R je ista (prvo jezgra-zrak, pa zrak-jezgra), a ukupni gubitak snage  $A_{fresnel}[\text{dB}]$  je zbroj gubitaka snaga na prvoj razlici pa na drugoj  
Ovaj gubitak se rješava korištenjem sredstva npr tekućine da se ispuni rupa zraka sa materijalom koji ima isti indeks loma kao jezgra