

# *Транспортування оптичного випромінювання*

к.ф.-м.н., ст. викл.

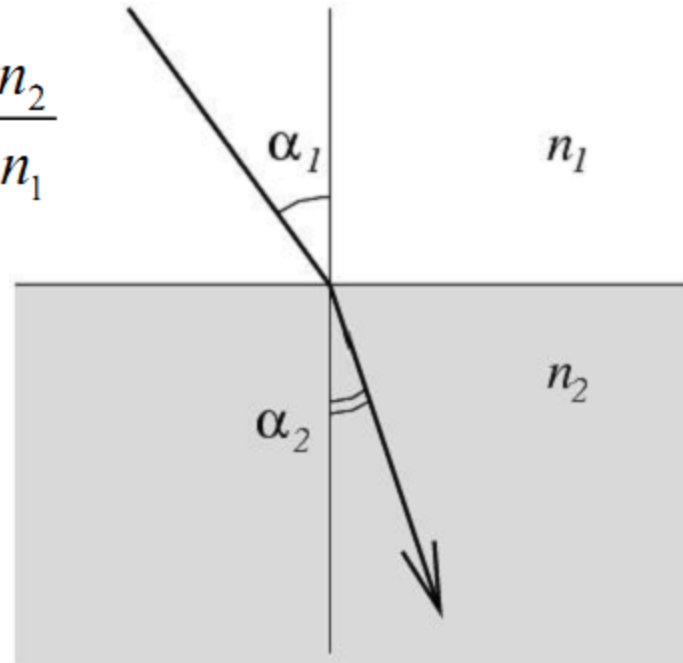
Пилипенко О.В.

## Закон заломлення світла

**Закон заломлення** – падаючий промінь, заломлений промінь і перпендикуляр, проведений до межі розділу двох середовищ в точці падіння, лежать в одній площині; відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величина стала для даних середовищ:

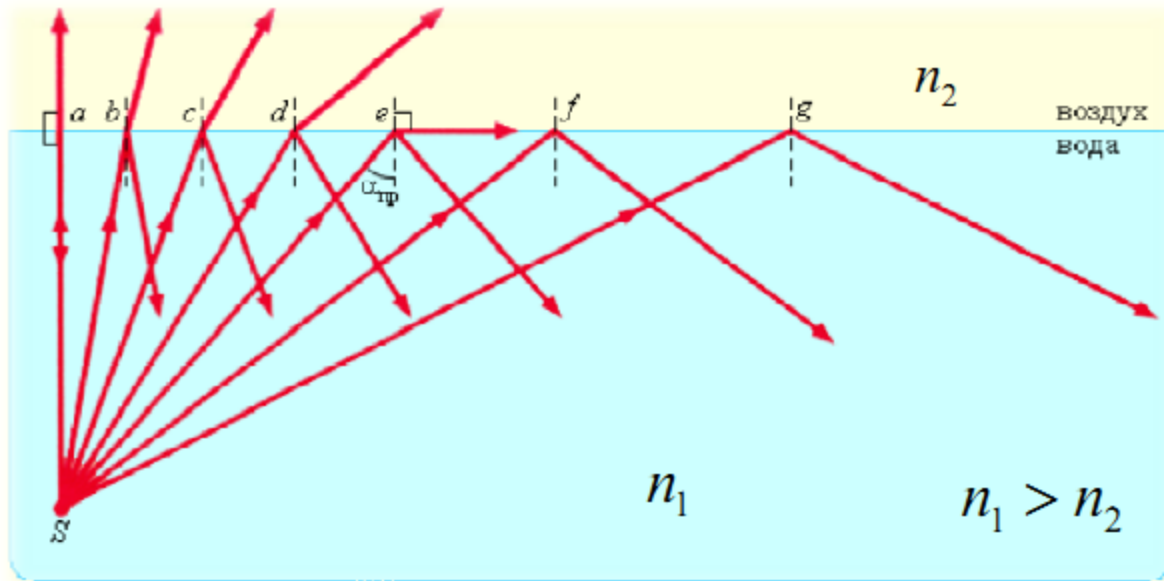
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$n_1 < n_2$$

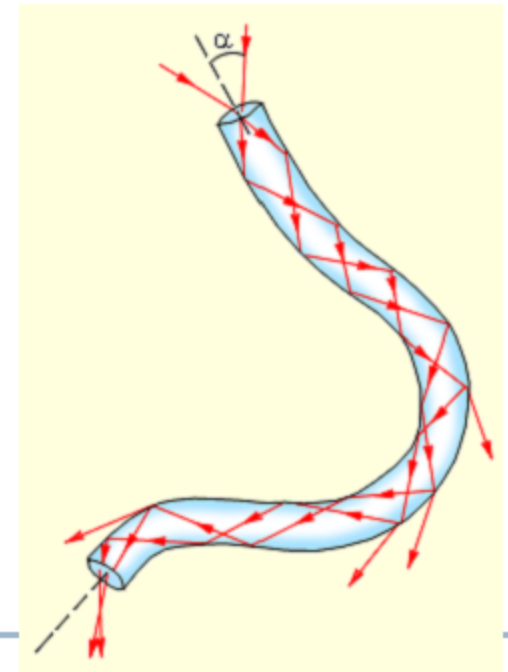


## Повне внутрішнє відбивання

Якщо світло переходить з середовища з більшим показником заломлення  $n_1$  (оптично густіше) в середовище з меншим показником заломлення  $n_2$  (оптично рідше) ( $n_1 > n_2$ ) (зі скла в повітря або з води в повітря), то згідно закону заломлення, заломлений промінь віддаляється від нормалі і кут заломлення стає більшим, ніж кут падіння.



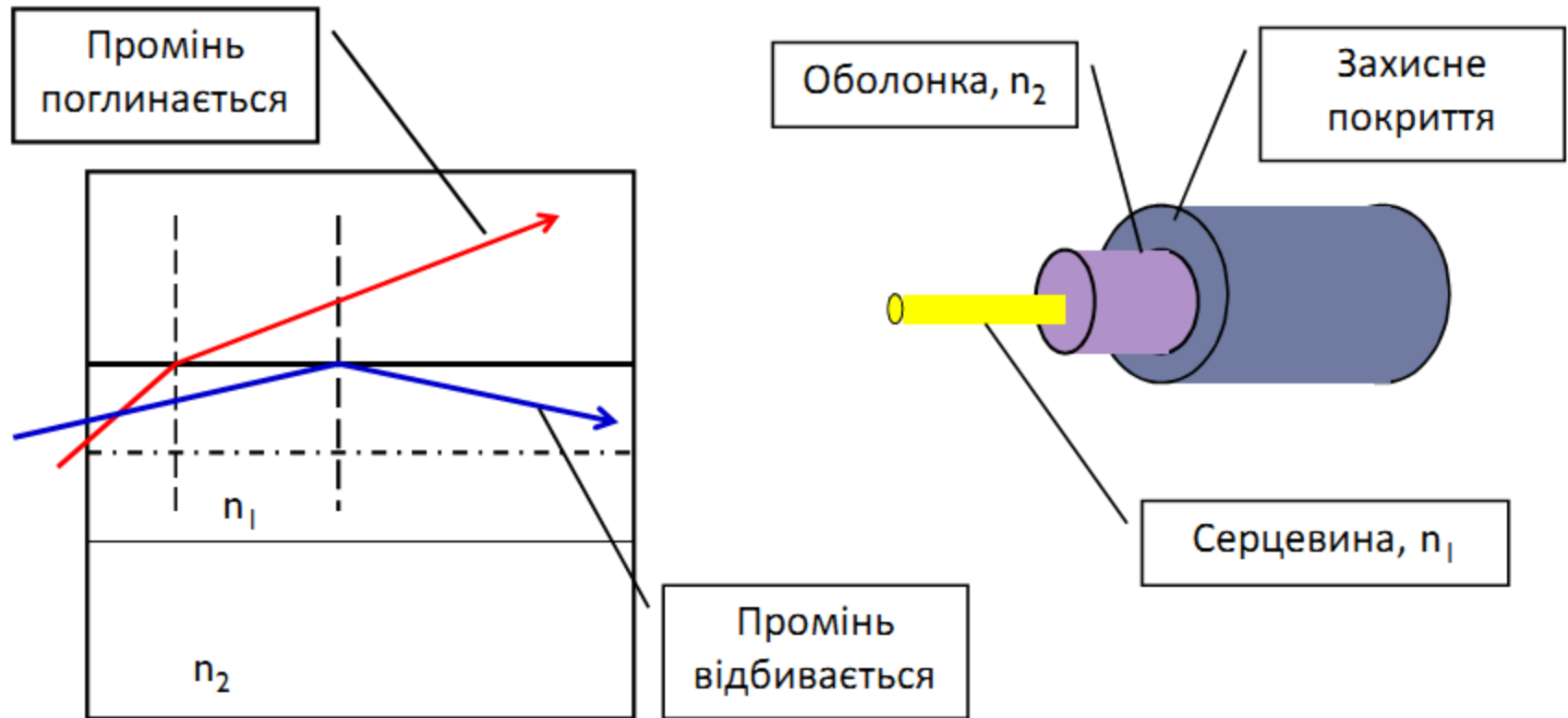
$$\sin \alpha_{\ddot{a}\ddot{o}} = \frac{1}{n_1}$$



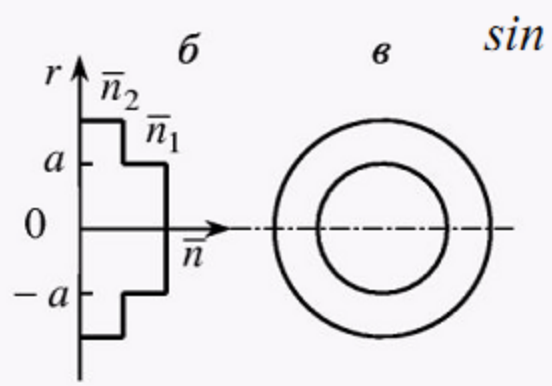
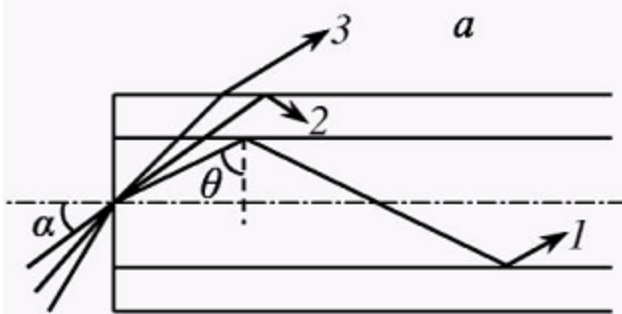
При всіх кутах падіння, більших за  $\alpha_{гр}$  промінь не заломлюється, а повністю відбивається в перше середовище, причому інтенсивності відбитого і падаючого променів однакові.

## Транспортування оптичного випромінювання

Передача випромінювання по оптичному волокну базується на ефекті *повного внутрішнього відбивання*.  
**Оптичне волокно** - циліндрична ниткою з прозорого діелектрика з показником заломлення  $n_1$  (серцевина) оточеного оболонкою з  $n_2$  ( $n_1 > n_2$ ) покрите непрозорим шаром



Східчасте волокно



$$\sin \alpha = \bar{n}_1 \cos \theta. \quad \bar{n}_1 \sin \theta_c = \bar{n}_2.$$



$$\sin \alpha = \bar{n}_1 \sqrt{1 - \left(\frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1}\right)^2}$$

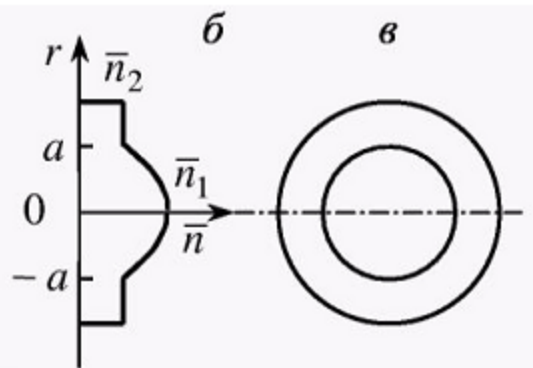
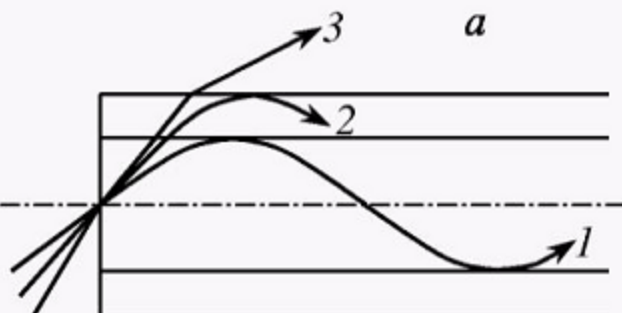
$$\sin \alpha_{\max} = \sqrt{\bar{n}_1^2 - \bar{n}_2^2}.$$

$$\bar{n} = \frac{n_1 + n_2}{2} \quad \Delta \bar{n} = n_1 - n_2$$



$$\sin \alpha_{\max} = A = \sqrt{2\bar{n} \cdot \Delta \bar{n}}$$

Градінтне волокно



**A-числова апертура волокна.**

Чим більше  $A$ , тим більша частина світла, випромінюваного точковим ізотропним джерелом, поміщеним на осі волокна поблизу його торця, може бути введена у волокно.

Фізичний зміст числової апертури – це синус максимального кута падіння променів на торець волокна, при якому ще можливе каналювання світла

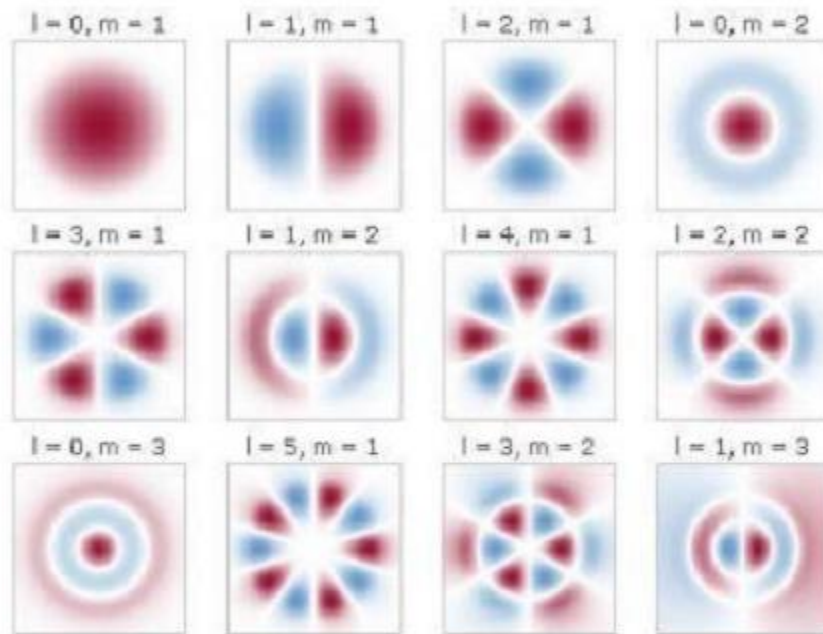
Світлові хвилі, що поширюються в серцевині волокна і зазнають повного внутрішнього відбивання на межі з оболонкою, називаються *хвилями серцевини*. Траєкторії відповідних променів мають вигляд ламаних зигзагоподібних кривих (рис. 9.1). Промені, які падають на торець волокна під кутами  $\alpha > \alpha_{\max}$ , називаються *внеапертурними променями*. При падінні на межу серцевини і оболонки вони не тільки відбиваються, але й заломлюються, при цьому частина енергії світлової хвилі виходить з серцевини в оболонку. При багаторазових відбиваннях такі промені повністю втрачаються. Внеапертурні промені поділяються на дві групи. Першу складають промені, які зазнають повного внутрішнього відбивання на зовнішній поверхні прозорої оболонки. Відповідні їм хвилі називають *хвилями оболонки*. Друга група – промені, які не зазнають повного внутрішнього відбивання на зовнішній поверхні оболонки і зовсім не спрямовуються волокном. Їм відповідають так звані *просторові хвилі*.

Поширення світла в градієнтному волокні має свої особливості. Хвилі, промені яких повертаються назад до осі волокна завдяки тільки градієнту (профілю) показника заломлення, тобто не досягають межі серцевини з оболонкою, називаються *профільними хвилями* (рис. 9.2). Вони відповідають хвилям серцевини ступінчастого волокна. Хвилі з більшими початковими кутами  $\theta$ , що досягають зовнішньої поверхні оболонки, утворюють *хвилі оболонки*. При ще більших початкових кутах отримуються *просторові хвилі*, енергія яких не спрямовується волокном, а випромінюється в навколишнє середовище або поглинається непрозорою захисною оболонкою.



Одним із найважливіших наслідків хвильової теорії є висновок про існування для всіх мод волокна, крім основної, так званих *частот відсічки*. Випромінювання з більш низькими частотами в цих модах поширюватися не може. Оптичне волокно, здатне передавати тільки одну моду, називають *одномодовим*, в іншому випадку його називають *багатомодовим*.

## Оптичні моди в хвилеводах



*Амплітуди електричного поля для всіх мод оптоволокна.  
Два кольори - різні значення величини електричного поля.*

Оптичні волокна можуть бути одномодовими і багатомодовими. Діаметр серцевини одномодових волокон становить від 7 до 10 мікрон. Завдяки малому діаметру досягається передача по волокну лише однієї моди випромінювання, за рахунок чого виключається вплив дисперсійних спотворень.  
**В даний час практично всі вироблені волокна є одномодовими.**



## Втрати і спотворення оптичного сигналу у волокні

1. Власні втрати на поглинання в кварцовому склі
2. Домішкові втрати на поглинання: Fe, Cu, Ni, Mg, Cr, OH.
3. Релеєвське розсіювання.
4. Втрати на мікро-і макровигинах.
5. Втрати в з'єднаннях волокон
6. Міжмодова дисперсія.
7. Матеріальна дисперсія (хроматична дисперсія).
8. Поляризаційна дисперсія.
9. Двопроменезаломлення
10. Вимушене розсіювання Мандельштама-Бріллюена
11. Вимушене раманівське розсіювання
12. Фазова само модуляція
13. Чотирихвильове зміщення
14. Модуляційна нестійкість
15. Накопичений шум



### Загасання сигналу

#### Закон Бугера

$W_0$  – сигнал на вході,

$\alpha$  – коефіцієнт затухання (дБ/км),

$L$  – довжина волокна.

Одномодовое кварцеве волокно:  $\alpha \sim 0.2$  дБ/км,

пластиковое:  $\alpha \sim 300$  дБ/км.

$$W(L) = W_0 e^{-\alpha L}$$

Величина затухання, виражена в децибелах, дорівнює десятковому логарифму відношення  $W_0$  до  $W$ , помноженому на десять

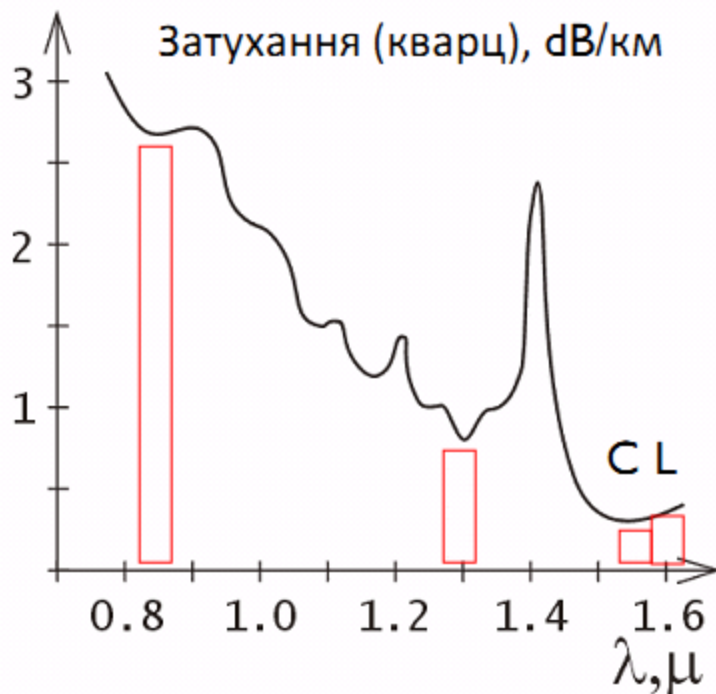
*Зміна на 1 дБ, відповідає зміні сигналу в 1,26 рази.*

*Зміна на 3 дБ відповідає зміні сигналу в 2 рази.*



**Вікна прозорості** (всі в інфрачервоному діапазоні): 0.85мкм, 1.3мкм, 1,55 мкм. У відповідність цим вікнам випускаються і випромінювачі. На даний момент всі швидкісні системи оптичної передачі працюють в одному з трьох діапазонів:

- C-смуга(1530-1565нм)
- Lсмуга (1565-1620нм)
- вікно прозорості в околі 1.3мкм



Розсіювання енергії відбувається через мікроскопічних неоднорідності в волокні.  
**Поглинання** - перетворення енергії світла в теплову. Технології дозволяють створити такі матеріали, в яких поглинання на 6 метрах довжини виявляється менше, ніж у віконному склі товщиною 3 мм.  
**Втрати на стиках** - центрування, паралельність сколів, їх якість.  
**Втрати на вигинах** - вихід випромінювання за межі сердцевини і поглинання в оболонці.  
Для оптичних кабелів, на основі одномодових волокон, що працюють на довжинах хвиль 1,3 і 1.5мкм вигин не критичний, оскільки волокна в кабелі вже попередньо закручені навколо осі.

## Втрати на поглинання

### Поглинання

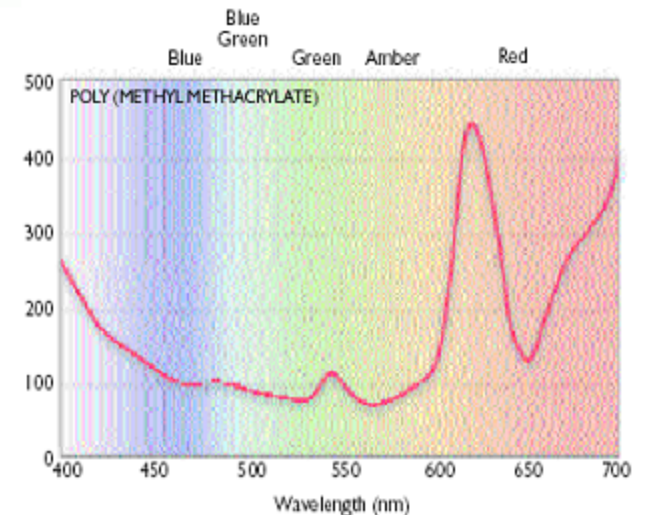
власне поглинання в матеріалі світловода

Причини: в УФ-області - переходи між енергетичними рівнями атомів, в ІЧ-області - багатофотонні і коливальні збудження молекул;

домішкове

концентрація домішки  $10^{-6}$  ваг.ч.:

Домішковий іон	втрати, дБ/км	$\lambda$ піка поглинання, мкм
$\text{Fe}^{2+}$	0.68	1.1
$\text{Fe}^{2+}$	0.15	0.4
$\text{Cu}^{2+}$	1.1	0.85
$\text{Cr}^{3+}$	1.6	0.625
$\text{V}^{4+}$	2.7	0.725
$\text{OH}^-$	1.0	0.95
$\text{OH}^-$	2.0	1.24
$\text{OH}^-$	4.0	1.38



**Дисперсія волокна** - розпливання світлового імпульсу у міру його руху по оптоволокну.

Типи дисперсії

модова

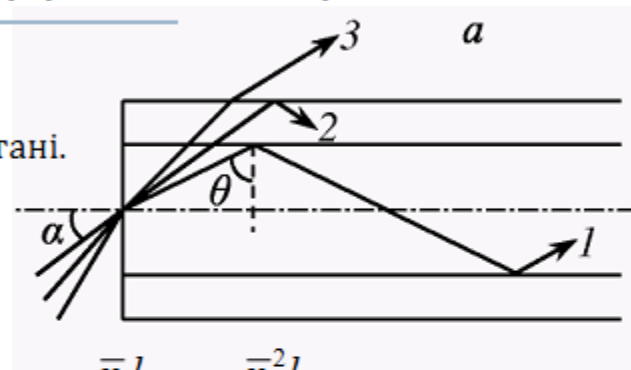
Причина: промені з різними кутами падіння проходять різні відстані.

Наявна тільки в багатомодових системах.

Для часу розповсюдження по волокну осевого променя:  $t_1 = \frac{\bar{n}_1 l}{c}$

$$\bar{n}_1 \sin \theta_c = \bar{n}_2$$

Для променя з мінімальним кутом  $\theta$  час розповсюдження рівний  $t_2 = \frac{\bar{n}_1 l}{c \cdot \sin \theta_c} = \frac{\bar{n}_1^2 l}{\bar{n}_2 c}$



$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_2} \cdot \frac{\Delta \bar{n} l}{c} \approx \frac{\Delta \bar{n} l}{c}$$

$\Delta \bar{n} = 0,01$  і  $l = 1$  км - уширення імпульсу  $\Delta t$  становить приблизно 33 нс.

*міжмодова дисперсія в градієнтному волокні менша, ніж в східчастому. Це пояснюється тим, що швидкість розповсюдження зовнішньоосевих променів в градієнтному волокні вища, ніж в східчастому через менший показник заломлення в периферійних шарах серцевини, де проходять траєкторії зовнішньоосевих променів*

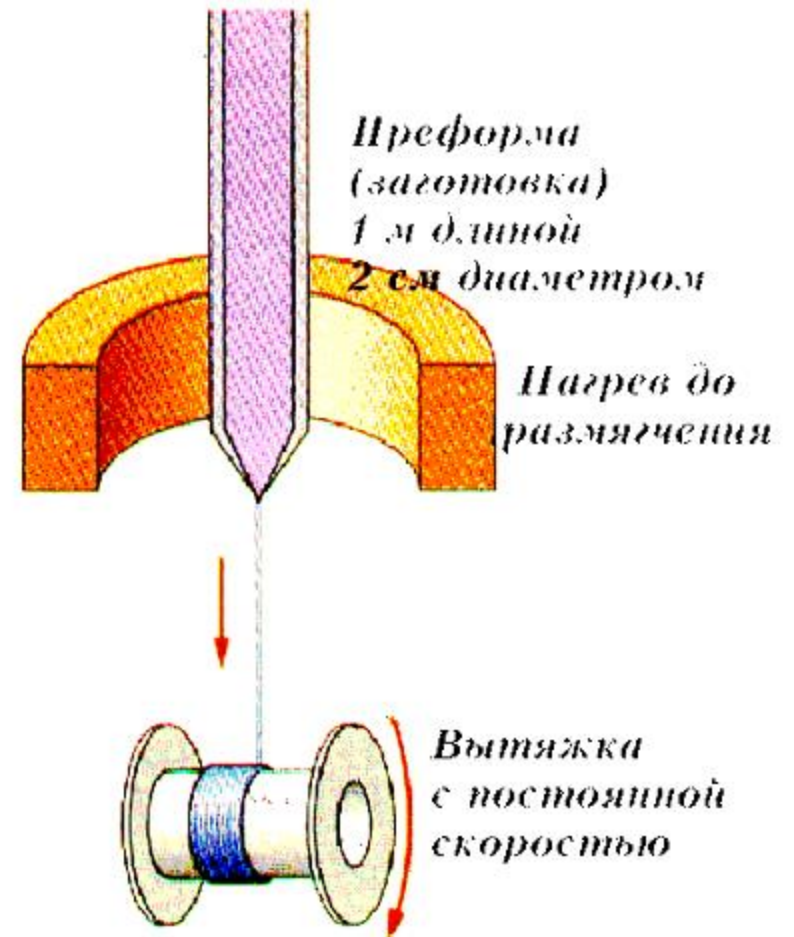
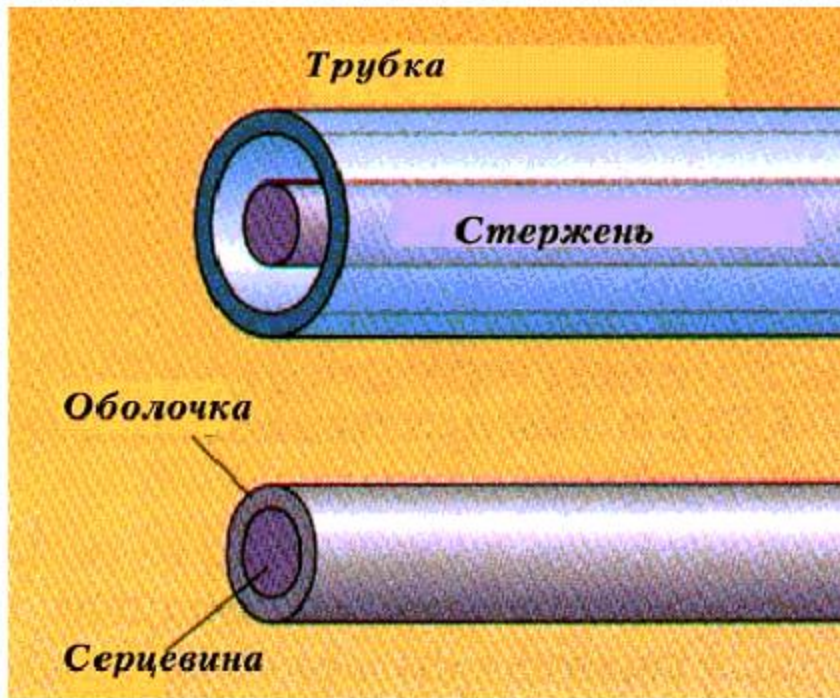
**Хвилеводна дисперсія**

Причина: 20% світла поширюється по оболонці. Залежить від геометричних властивостей хвилеводу.

*Матеріальна дисперсія. Оскільки передаване по волокну випромінювання має кінцеву ширину спектра  $\Delta \lambda$ , проявляється так звана матеріальна дисперсія, зумовлена залежністю показника заломлення волокна від довжини хвилі випромінювання.*

*Матеріальна дисперсія. Оскільки передаване по волокну випромінювання має кінцеву ширину спектра  $\Delta \lambda$ , проявляється так звана матеріальна дисперсія, зумовлена залежністю показника заломлення волокна від довжини хвилі випромінювання*

## Виготовлення волокна





## Виготовлення заготовки методом хімічного осадження з газової фази

а) Подготовка кварцевой трубки



б) Осаждение из газовой фазы



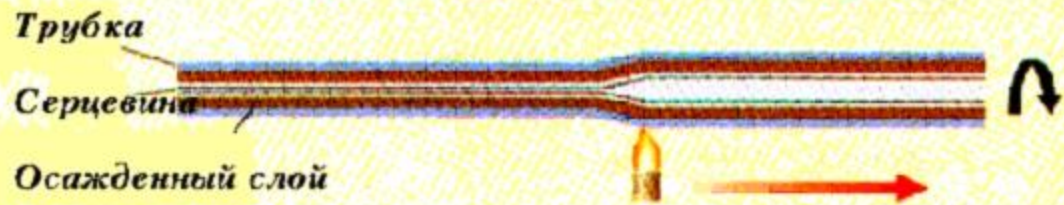
в) Допирование для специальных волокон



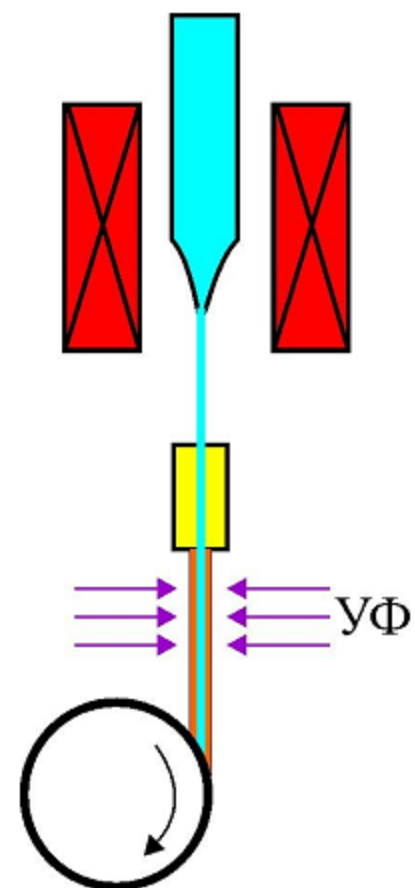
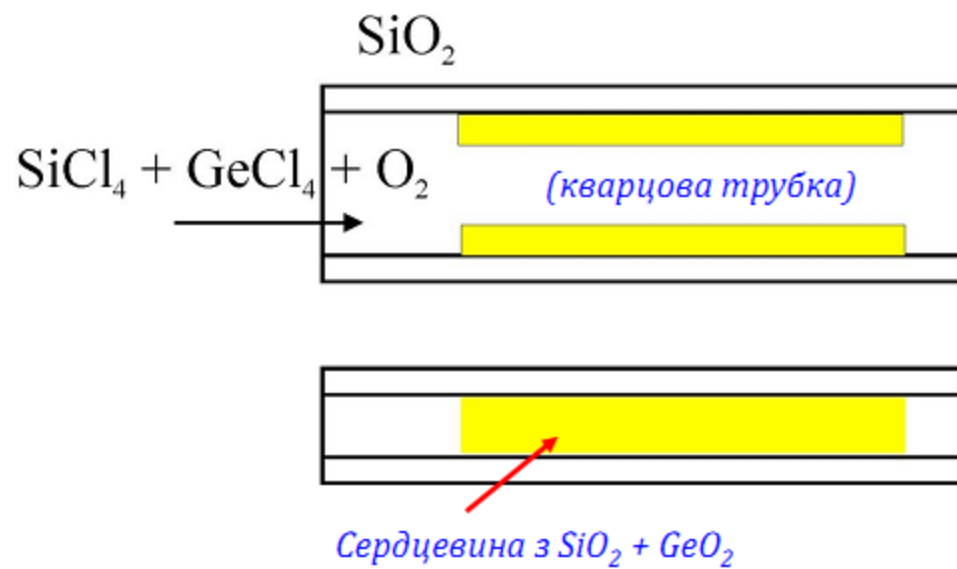
г) Сушка



д) Схлопывание



## Виготовлення заготовки





## Фотоннокристаллические волокна

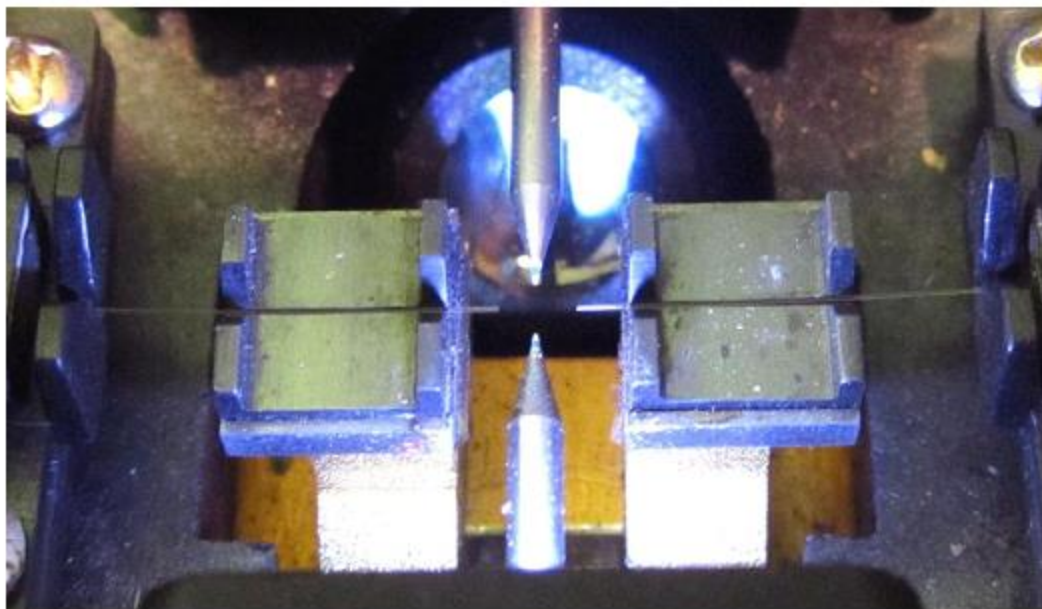


Втрати  
0.001...0.0001 дБ/км

Поперечний розмір:  
50...100 мкм



## Зварка оптоволокна



Зварка волокон

