



Моделювання траєкторії поширення променів у багатомодових оптичних волокнах

Г.В. Безпрозванних, д.т.н., професор,
НТУ «Харківський політехнічний інститут»

При підготовці спеціалістів та магістрів на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПІ» вивчення теоретичного матеріалу з курсу «Фізичні основи оптоволоконної техніки» відбувається з використанням моделювання процесу поширення електромагнітних хвиль оптичного діапазону на основі законів геометричної оптики та електродинаміки. Це дозволяє студентам безпосередньо закладати різні матеріали в осердя та світловідбиваючу оболонку оптичних волокон (полімерні, на основі окислу кремнію без домішок, з домішками), наочно бачити та аналізувати процес поширення променів.

Поява оптичних волокон свого часу була обумовлена необхідністю підвищення швидкості (об'єму) та відстані передачі інформації [1 – 2].

Порівняльний аналіз швидкості передачі сигналів в багатомодових оптичних волокнах виконується на основі числового моделювання траєкторії поширення електромагнітних хвиль на основі законів геометричної оптики [3 – 8].

Багатомодові оптичні волокна зі ступінчастим профілем показника заломлення (рис. 1) – перші оптичні волокна, що з'явилися для передачі інформації (оптичних сигналів). Матеріал осердя в таких волокнах є однорідним з показником заломлення n_1 . На границі розділу середовищ «більш оптично щільне осердя – менш щільна світловідбиваюча оболонка» спостерігається дзеркальне відбиття променів. Траєкторія променів – прямолінійна. Промені мають однакову фазову швидкість, але поширюються кожний за своєю траєкторією, тобто витрачають різний

час. Це призводить до появи так званої багатопроменевої (міжмодової) часової дисперсії: оптичний імпульс розширюється в часі на величину Δt – різниця в часі поширення самого повільного (що рухається під кутом до оптичної осі осердя) та самого швидкого (що рухається по оптичній осі осердя) променів на одиниці довжини l оптичного волокна:

$$\Delta t / l = \frac{n_1}{c} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_2} = \frac{n_1}{c} \Delta, \text{ с/м}, \quad (1)$$

де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла в вакуумі; n_1 і n_2 – відповідно показники заломлення в осерді та світловідбиваючій оболонці; Δ – відносна різниця показників заломлення.

Так, при $n_1 = 1,5110$; $n_2 = 1,4469$, $\Delta = 4,4\%$ значення Δt зростає на 0,220 нс на 1 м довжини волокна і на 220 нс – на 1 км.

В оптичному волокні без світловідбиваючої оболонки (рис. 1, б) поширюються більше променів: багатопроменева часова дисперсія в таких волокнах значно більша.

Між багатопроменевою часовою дисперсією та шириною смуги Δf пропускання оптичного волокна існує зворотний зв'язок: чим менше $\Delta t/l$, тим вища Δf і тим вища швидкість передачі B цифрових сигналів

$$\Delta f \cdot l = B \cdot l = \frac{1}{\Delta t/l}, \text{ Гц} \cdot \text{м} = (\text{Біт/с}) \cdot \text{м}. \quad (2)$$

Так, для наведеного прикладу $\Delta f \cdot l$ становить 4,5 МГц·км. Зменшити багатопроменеву часову дисперсію, тобто збільшити швидкість передачі оптичних сигналів, можливо за рахунок зменшення різниці в показниках заломлення осердя та світловідбиваючої оболонки. Традиційно відносна різниця показників заломлення становить 1%, що забезпечує широкосмуговість оптичних волокон зі ступінчастим профілем показника заломлення до 20 МГц·км (рис. 2).

Багатомодові оптичні волокна зі ступінчастим профілем показника заломлення не можуть забезпечити високі швидкості передачі сигналів. Але такі волокна можуть і повинні використовуватися для передачі інформації в волоконно-оптичних датчиках [9]. Через властивості матеріалу волокна на основі плавленого кварцу (окислу кремнію) та полімерів вони забезпечують високу завадостійкість інформації, що передається волокном. Такі волокна легко з'єднувати: діаметр осердя $2a$ становить (100 – 200) мкм; діаметр світловідбиваючої оболонки $2b$ – (250 – 400) мкм.



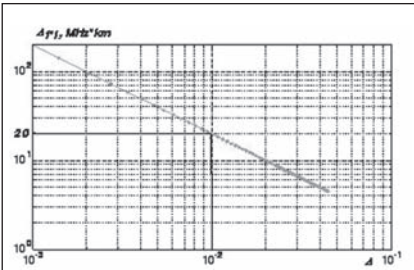


Рис. 2. Вплив значення відносного показника заломлення на широкосмуговість багатомодового оптичного волокна зі ступінчастим профілем показника заломлення

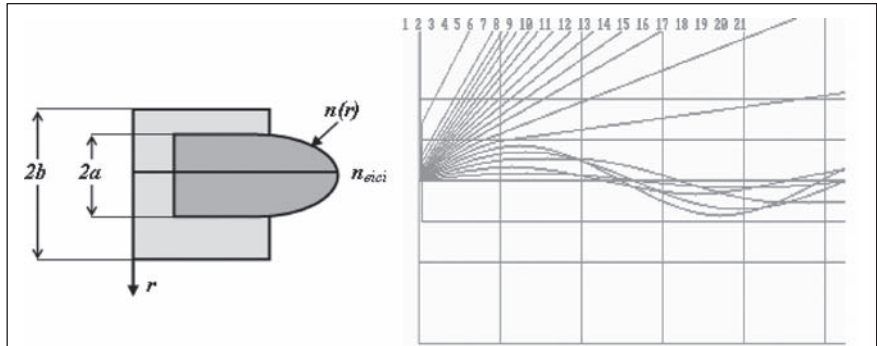


Рис. 3. Моделювання траєкторії поширення променів (мод) у багатомодовому оптичному волокні з градієнтним профілем показника заломлення на основі законів геометричної оптики ($n_{oc1} = 1,5110$; $n_2 = 1,4469$)

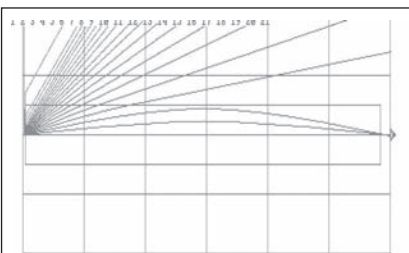


Рис. 4. Траєкторія променів (мод) у самофокуруючому багатомодовому оптичному волокні з градієнтним профілем показника заломлення ($n_{oc1} = 1,4650$, $n_2 = 1,4500$)

$$n(r) = n_{oc1} \left[1 - 2\Delta^2 \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2} \quad (\text{при } r \leq a), \quad (3)$$

де α – так званий профіль показника заломлення.

Неоднорідність осердя призводить до того, що траєкторія променів – криволінійна (рис. 3). Фазова швидкість променів – різна. Найменшу швидкість має промінь, що поширюється вздовж осі осердя, найбільшу – промінь, найбільш віддалений від осі: показник заломлення там найменший.

На рис. 4 наведено траєкторію променів (мод) у самофокуруючому багатомодовому оптичному волокні з градієнтним профілем показника заломлення.

Порівняння траєкторії поширення променів в багатомодових волокнах зі ступінчастим та градієнтним профілями показника заломлення показує (див. рис. 1 та рис. 4), що в останньому кількість променів менше. Відповідно і часова дисперсія в таких волокнах менша, а широкосмуговість – більша.

Вплив профілю показника заломлення на траєкторію навскісного променя у багатомодовому оптичному волокні з градієнтним профілем показника заломлення наведено на рис. 5.

Траєкторія меридіональних променів (променів, що перетинають оптичну вісь осердя – рис. 3, рис. 4) та «навскісних» променів (променів, що не перетинають оптичну вісь осердя – рис. 5) у волокнах з неоднорідним осердям суттєво залежить від профілю показника заломлення α (концентрації домішок, що додаються до чистого кварцу в процесі отримання високопрозорої оптичної заготовки).

Рух навскісного променя відбувається в межах двох каустик. При варіаціях профілю показника заломлення радіуси каустик змінюються (порівняйте рис. 5, а та рис. 5, б). Змінюється відповідно і напрямок поширення: при $\alpha < 2$ навскісний промінь (аналог гібридних змішаних електромагнітних мод HE_{lm}) поширюється справа – наліво; при $\alpha > 2$ – навпаки. Отже, при $\alpha = 2$ (рис. 5, в) час поширення навскісного променя та променя, що поширюється по осі, практично однаковий відповідно до принципу Ферма. А це означає, що широкосмуговість такого волокна буде найбільшою.

Некруглість осердя волокна пов'язана з особливостями використання для моделювання пакета так званої «черепашої графіки» Pascal: розділення осями абсцис та ординат – різне.

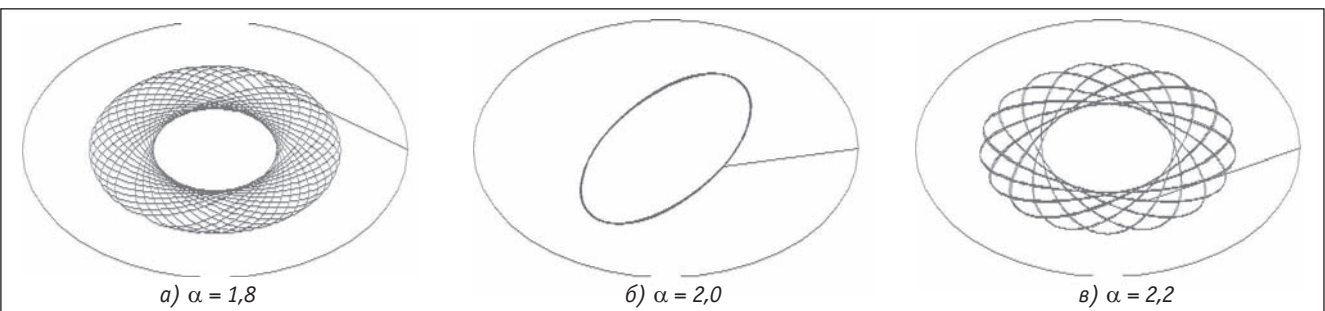


Рис. 5. Вплив профілю показника заломлення на траєкторію навскісного променя у багатомодовому оптичному волокні з градієнтним профілем показника заломлення ($n_{oc1} = 1,4650$; $n_2 = 1,4500$)



Таким чином, широкосмуговість оптичних волокон з градієнтним профілем показника заломлення досягає 1000 МГц·км на довжині хвилі $\lambda = 1300$ нм при застосуванні надпровідникового лазера як джерела випромінювання. В цьому разі матеріальна складова хроматичної часової дисперсії в оптичних волокнах на основі кварцу не впливає на загальну часову дисперсію. Такі волокна можна застосовувати:

- в оптичних кабелях для передачі інформації в структурованих кабельних мережах зі швидкістю передачі 1 Гбіт/с на відстань до 1 км;
- у широкосмугових абонентських телефонних мережах;
- у силових кабелях високої та надвисокої напруги з ізоляцією із зшитого поліетилену як розподільного волоконно-оптичного датчика для моніторингу температури [10] (у цьому разі за рахунок нелінійного ефекта Рамановського – розсіяння оптичного випромінювання [9] в режимі реального часу визначаються місця локальних перегрівів кабелю).

Література:

1. И.И. Гроднев, Ю.Т. Ларин, И.И. Теумин. *Оптические кабели: Конструкция, характеристики, производство и применение.* – М.: Энергоатомиздат, 1991.

2. Д.В. Иоргачев, О.В. Бондаренко, А.Ф. Дащенко, А.В. Усов. *Волоконно-оптические кабели. Теоретические основы, конструирование и расчет, технология производства и эксплуатации.* – Одесса: «Астропринт», 2000.

3. А.В. Беспрозванных. *Расчет временной дисперсии в оптических кабелях с нерегулярной структурой // Тезисы доповіді Міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютер: наука, техніка, технологія, здоров'я», Харків, 1993.*

4. А.В. Беспрозванных, Б.Г. Набока. *Методические указания к лабораторным и практическим работам по курсу «Физические основы оптоволоконной техники». Часть 1. «Моделирование физических процессов элементов оптоволоконной техники»* – Харків, ХПІ, ХМВП, 1993.

5. А.В. Беспрозванных, Б.Г. Набока, А.Г. Гурин. *Учебная лаборатория оптоволоконной техники кафедры «Электроизоляция и кабельная техника» // Тезисы доповіді IV Міжнародної науково-технічної конференції «Волоконно-оптичні лінії зв'язку та системи передачі інформації», Запоріжжя, 1993.*

6. А.В. Беспрозванных, Б.Г. Набока. *Иерархия элементов оптоволоконной техники в объектно-*

ориентированном программировании // Тезисы доповіді IV Міжнародної науково-технічної конференції «Волоконно-оптичні лінії зв'язку та системи передачі інформації». – Запоріжжя, 1993.

7. А.В. Беспрозванных. *Моделирование физических процессов в элементах волоконно-оптической техники // Тезисы доповіді I Міжнародної науково-технічної конференції @Математичне моделювання в електротехніці та енергетиці.* – Львів, 1995.

8. А.В. Беспрозванных. *Широкополосные межстанционные оптические кабели связи ГТС // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Сб. научн. трудов ХГПУ, вып. 6, часть третья.* – Харьков, ХГПУ, 1998.

9. А.В. Беспрозванных. *Проявление нелинейных эффектов в оптических волокнах // Электротехника и электромеханика, 2005, № 1.*

10. Г.В. Беспрозванных, І.О. Морозов, О.В. Морозова. *Мониторинг температуры в силовых кабелях высокой напряженности за помощью оптического волокна в режиме реального времени // Тезисы доповіді на Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, технологія, освіта, здоров'я».* – Харків, 2010.

• DRIVE

ОДЕСКАБЕЛЬ

ПАО «Одескабель»

Украина, 65013, г. Одесса,
Николаевская дорога, 144

Тел./факс:

+38 (048) 716-11-23,

+38 (048) 716-14-04,

+38 (048) 716-14-01

e-mail:

market@odeskabel.com

www.odeskabel.com