

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

Жейно Иванов Жейнов

Заглавие:

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАЗПРОСТРАНЕНИЕТО В МНОГОМОДОВИ
ОПТИЧНИ ВЛАКНА ЧРЕЗ КОМПЮТЪРНО МОДЕЛИРАНЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен “доктор”**

**по докторска програма „Теоретични основи на комуникационната техника”
към професионално направление „Комуникационна и компютърна техника”**

Научен ръководител: доц. д-р инж. Йордан Русев Урумов

Рецензенти:

1.
2.

Варна, 2015 г.

Дисертационният труд е обсъден на 12.05.2015 г. в катедра „Комуникационна Техника и Технологии” и насочен за защита.

Докторантът работи в катедра „Компютърни науки и технологии”.

Автор: Жейно Иванов Жейнов

Заглавие: Изследване на разпространението в многомодови оптични влакна чрез компютърно моделиране

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

Жейно Иванов Жейнов

Заглавие:

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА РАЗПРОСТРАНЕНИЕТО В МНОГОМОДОВИ
ОПТИЧНИ ВЛАКНА ЧРЕЗ КОМПЮТЪРНО МОДЕЛИРАНЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за получаване на образователна
и научна степен „ДОКТОР”**

Варна, 2015 г.

Дисертационният труд съдържа 149 страници, включително 96 фигури, 11 таблици и 3 приложения, оформени в 4 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 145 заглавия, от които 66 на кирилица и 79 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои наГ. отЧ. В на открито заседание на жури сформирано със заповед на Ректора №...../.....Г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите, и становищата) са на разположение на интересувашите се във ФД „Докторанти”, стая 318 НУК.

Характеристика на дисертационния труд

Актуалност на проблема

Нарастването на пропускателната способност и разстоянието на предаване на Влакнесто-Оптичните Системи за предаване на информация стимулира търсенето на нови типове влакна и оптически елементи и на нови методи за решаването на тази задача. Разработени са нови оптични влакна със затихване, близко до теоретичния минимум, голяма ефективна площ на сечението и малка хроматична дисперсия. За увеличаване далечината на връзката се създават ефективни компенсатори на хроматичната дисперсия. За снижаване на себестойността на оптичните мрежи за достъп се ползват все повече многомодови оптични влакна. Проектирането на оптичната линия с цел да се постигне максимален капацитет и скорост на предаване по оптично влакно заедно с поевтиняване на връзката изисква внимателен избор на оптичните влакна за връзка и правилен подбор на параметрите на влакната.

Многомодовите влакна могат да заменят едномодовите в оптичните мрежи за достъп при кратки разстояния на предаване. Те са малко по-скъпи от едномодовите, но с тях се ползват многомодови излъчватели и фотоприемници, което намалява значително себестойността на монтажа на оптичния кабел. Многомодовите влакна в оптичните мрежи за достъп имат обикновено дължина не повече от няколко км. През 70-те и 80-те години на ХХ век в градовете са положени оптични кабели с многомодови влакна. Параметрите им не са се променили особено през годините. Много от тях не са натоварени, затова могат да се ползват от новите оптични мрежи. Възражда се интереса към I прозорец на прозрачност поради по-ниската цена на трансмитерите за този оптичен диапазон. Наличието на множество неправилни участъци в градските мрежи изисква в тези случаи използването на специални влакна с намалена чувствителност към огъване и начини за пресмятане на загубите и дисперсията. Тези особености на влакната трябва да се отчитат при проектирането.

Оптичните вълноводни устройства се проектират чрез САД - софтуер, който се продава свободно, но е скъп и специализиран, или чрез такъв, написан самостоятелно. САД софтуерът за анализ на оптични вълноводи може да се ползва по-ефективно от дизайнерите, ако те познават особеностите на всеки използван в него метод за анализ. Анализът на многомодовото разпространение с аналитични методи позволява да се разберат особеностите на оптичните вълноводи и да се покажат основните правила по използването им с цел постигане на най-добри резултати.

Всеки метод за анализ има свои особености. Различните методи са ефективни за различни цели и трябва да се ползват няколко метода. Писането на формални програми, базирани на уравненията е рисковано, освен когато са известни апроксимациите, които се използват при решаването на тези уравнения, грешките, получени при тези приближения и стабилността на решенията. Изборът на метод за анализ е важен. Някои мощни методи, използвани в определени случаи могат да бъдат неподходящи, защото не са достатъчно точни, стабилността на решението е недостатъчна или изискват много машинно време. Ето защо подборът на софтуер, използващ подходящи методи за анализ изисква познаването им.

Проектирането на влакнесто-оптични датчици и други елементи изисква съответен инструментариум за визуализация на оптичните полета с отчитане на особеностите на дизайна. Тъй като оптичните вълноводи са тяхна съставна част, автоматизирането на проектирането им е актуално. Това може да бъде направено с използване на подходящи методи за анализ и създаване или подбор на съответен софтуерен инструментариум.

Разработката на новите РСФ влакна изисква намиране на инженерен, достатъчно точен и прост метод, базиран на аналитичните методи, за бърз анализ на предавателните им характеристики.

Цел на изследването

Като се използват познатите класически аналитични методи и техники с известно опростяване на анализа да се създадат подходящи математически модели за описание на разпространението на оптично лъчение по кръгло многомодово стъпално, градиентно и РСF оптично влакно. Да се определят видовете разпространяващи се моди. Да се изчисли тяхното поле. Да се анализира влиянието на деформация върху модовия състав и разпределението на полето по влакното.

На основата на получените математически модели за описание на разпространението да се създаде софтуерна среда, която да позволява решаване на други, по-сложни приложни задачи - изчисляване на излъченото поле от отворения край на оптичното влакно, анализ на влиянието на параметрите на влакното върху разпространяващите се моди и на предавателните му характеристики.

Задачи

- 1) Чрез вълнов метод да се определят вида и характеристиките на модите и полето им в произволно напречно сечение в кръгло оптично влакно със стъпален профил на показателя на пречупване.
- 2) Чрез вълнов метод да се определят вида и характеристиките на модите и полето им в произволно напречно сечение в кръгло оптично влакно с параболичен профил на показателя на пречупване.
- 3) Да се изчисли полето, излъчено от отворен край на многомодово стъпално оптично влакно. Да се създаде методика, която по зададено амплитудно разпределение на излъченото поле от отворения край на влакното определя с достатъчна точност амплитудите на модите във входната апертура на влакното.
- 4) Да се създаде модел на деформация, описващ влиянието и върху модовия състав и параметрите на модите в кръгло влакно със стъпален профил на ПП.
- 5) Да се предложи модел на разпространение на оптично лъчение във влакно на Брег и опростен метод за определяне на загубите и дисперсията на модите в зависимост от параметрите на влакното.
- 6) Да се създаде модел на деформация за влакно на Брег, описващ влиянието на макроогъване върху загубите и дисперсията.

Обект и предмет на изследването

Обект на изследването представляват оптичните влакна със стъпален профил и градиентен профил на показателя на пречупване (ПП) и РСF оптично влакно на Брег работещи в многомодов режим, модите и структурата на полето им, както и предавателните характеристики на влакното.

Предмет на изследването: Определяне на видове разпространяващи се моди и визуализиране на полето при тяхното разпространение чрез компютърно моделиране. Изчисляване на характеристики на влакната като функция на техните параметри чрез аналитични методи.

Методи на изследването

Извършени са теоретични изследвания на актуалните аналитични методи за анализ на оптични вълноводи. Посочено е тяхното място в съвременни изследвания и областта на приложимост. Направено е сравнение между аналитичните и числените методи за анализ на оптични вълноводи. Посочени са предимствата и недостатъците на двата вида методи за анализ. Показан е начинът на извеждане на диференциалните уравнения за полето в разглежданите класове оптични влакна и стъпките за решаването на характеристичните уравнения. Анализирани са получаваните решения за вълните в оптичните влакна. Разгледани се видовете разпространяващи се моди, определянето на константата на разпространението им, честотите на отсечка за модите. Показани са възможностите за

получаване на точни решения на характеристичните уравнения чрез използване на вълнов и лъчев метод за анализ, както и използваните опростявания и приближения при съставянето на модела за анализ.

Разработената симулационна среда на Pascal и MATLAB позволява определяне на полето на модите на основата на въведени параметри на изследваното влакно. Реализираните на MathCad алгоритми дават възможност за определяне на модите и вълновите характеристики на Бреговско оптично влакно.

Проверката на получаваните резултати, доколкото е възможна, бе правена чрез позоваване на експериментални резултати на фирми и комерсиален симулационен софтуер.

Научна и практическа новост

В резултат на проведените теоретични и експериментални изследвания в съответствие с целта и задачите на дисертационния труд могат да бъдат дефинирани следните основни приноси:

1) Предложен е метод за определяне и описание на модите в кръгло оптично влакно със стъпален и параболичен индекс на показателя на пречупване;

2) Създадена е програмна среда за многомодов анализ и определяне на амплитудно-фазовото разпределение на полето на разпространяващо се оптично лъчение на произволно място вътре в оптичното влакно и полето на излъчване от отворен край на влакното;

3) Реализиран е метод за синтез на амплитудно-фазово разпределение на полето в начално сечение на стъпално оптично влакно по известно поле на излъчване от отворения край на влакното с използване на Генетичен алгоритъм;

4) Предложени са два модела на деформация по пътя на разпространение в стъпално и във влакно на Брег с цел намиране на насочените моди и техните амплитуди в напречни сечения на влакното преди и след деформация;

5) Предложен е метод с инженерна точност за определяне на затихването и хроматичната дисперсия на модите във влакно на Брег с 9-21 слоя на обвивката.

Апробация на резултатите

Резултатите от теоретичните и експерименталните изследвания са представени чрез 11 публикации на 4 международни и 3 национални конференции, като са включени в сборници с доклади, както и в едно научно списание.

Съдържание на дисертационния труд

Развитие на теорията и практиката на оптичните вълноводи

Влакнестооптичният кабел е средата, по която се разпространява светлинния сигнал в една типична влакнесто-оптична линия за връзка. Кабелът се състои от оптично влакно и защитни обвивки.

През 1966 К. Као and G. Hockham (САЩ) предлагат използването на оптично влакно като диелектричен вълновод за оптична комуникация, като посочват като проблеми пред създаването на оптично влакно с ниски загуби ниската прозрачност на материала и технологичните толеранси. Те доразвиват теорията на разпространение в диелектричните вълноводи, като създават измервателни методи за отчитане на влиянието на механичните дефекти върху спектъра на загубите в материал с много ниски загуби и правят многочислени експерименти.

През 1970 г са създадени полупроводникови прибори на основата на двойни хетероструктури и лазери, работещи при стайна температура в непрекъснат режим. Загубите в оптичните кабели днес са снижени до 0.2 dB/km на дължина на вълната 1550 nm (III прозорец на прозрачност). Построени са магистрални ВОС за предаване на данни. Нараства пропускателната способност на системите за предаване. Разработени са нови типове влакна със затихване, близко до теоретичния минимум, с голяма ефективна площ на сечението и малка хроматична дисперсия. Създадени са нови оптични елементи, усилватели и ефективни компенсатори на хроматична дисперсия. С тях дължината на регенераторните участъци на магистралните системи за предаване се увеличи до 1000-1500 km. Използването на технологията за спектрално уплътнение в оптичните мрежи за достъп и създаване на нови оптични елементи позволява внедряване на технологията PON (Пасивна оптична мрежа). За снижаване на стойността на оптичните мрежи за достъп отново по-широко започват да се ползват многомодови оптични влакна, които са малко по-скъпи от едномодовите, но позволяват използване на по-евтини многомодови приемопредаватели. Многомодовите влакна обикновено се ползват в оптичните мрежи за достъп в градски условия. Повишаването на пропускателната способност на съединителните линии в корпоративните мрежи за достъп с едновременно увеличаване на разстоянието се осъществява чрез повишение на електронното мултиплексиране по време и с използване на технологията за уплътняване на оптичните канали по дължина на вълната (WDM), която увеличава ефективността и гъвкавостта на управлението. За тази цел са разработени оптически елементи, позволяващи да се извършва оперативно и гъвкаво конфигуриране на оптичните мрежи. Едновременно с развитието на оптичните и квантовите елементи се усъвършенстват и цифровите методи за обработка на информация и елементната база за реализацията им.

Дизайнът на оптичните вълноводни устройства се усъвършенства, за да отговори на потребностите на практиката. Към старите аналитични методи за анализ се добавят нови, за да се избегнат ограниченията, налагани от невъзможността за намиране на точни аналитични решения за реални оптични вълноводи с различни форми и параметри. Развитието на числените методи за анализ предизвика създаване на множество софтуерни пакети за симулация на оптични устройства, които пакети се различават по използваните методи за анализ, типовите устройства и параметрите, които се моделират, по възможностите, библиотеките с анализирани примери и начина на извеждане на резултатите.

Изследват се и се анализират нови типове оптични влакна, които са подходящи за създаване на нови типове оптични елементи и оптични сензори.

Глава 1. Методи и техники за анализ на оптични вълноводи.

В първа глава се разглежда класическата вълнова теория, метода на геометричната оптика и числените методи за анализ на оптични вълноводи.

1.1 Вълнови методи.

В този раздел са дадени основните уравнения на Максвел, вълновите уравнения за електрическото и магнитното поле, вектора на Пойнтинг. Обяснени са граничните условия за хомогенна, непроводяща среда и трансформацията на уравненията на Максвел за този случай. Разглеждат се актуални методи за анализ на 1D и 2D оптични структури. Показва се извода на компонентите на електрическото и магнитното поле и на характеристичното уравнение. Описана е структурата на разпространяващите се моди в тях.

После се анализира 3D случай за кръгло оптично влакно. Векторните вълнови уравнения за електрическото \mathbf{E} и магнитното \mathbf{H} поле са съответно:

$$\begin{aligned}\nabla_{\perp}^2 \mathbf{E} + \nabla \left(\frac{\nabla_{\varepsilon_r} \cdot \mathbf{E}}{\varepsilon_r} \right) + k_0^2 (\varepsilon_r - n_{eff}^2) \mathbf{E} &= \mathbf{0} \\ \nabla_{\perp}^2 \mathbf{H} - \frac{\nabla_{\varepsilon_r}}{\varepsilon_r} \times (\nabla \times \mathbf{H}) + k_0^2 (\varepsilon_r - n_{eff}^2) \mathbf{H} &= \mathbf{0}.\end{aligned}\quad (1)$$

По-голямата част от главата заема анализа на кръгло оптично влакно със стъпален индекс на ПП. Скаларното вълново уравнение е

$$\begin{aligned}\nabla_{\perp}^2 \mathbf{E}_{\perp} + k_0^2 (\varepsilon_r - n_{eff}^2) \mathbf{E}_{\perp} &= 0, \\ \nabla_{\perp}^2 \mathbf{H}_{\perp} + k_0^2 (\varepsilon_r - n_{eff}^2) \mathbf{H}_{\perp} &= 0.\end{aligned}\quad (2)$$

Векторните вълнови уравнения се редуцират чрез апроксимация до скаларни уравнения на Хелмхолц за тангенциалните компоненти на електрическото и магнитното поле. Намира се решение във вида:

$$\begin{cases} AJ_l \left(\frac{ur}{a} \right) & \text{ако } r \leq a, \\ CK_l \left(\frac{wr}{a} \right) & \text{ако } r \geq a. \end{cases}\quad (3)$$

където $J_l \left(\frac{ur}{a} \right)$ са съответно Беселови функции от първи ред, а $K_l \left(\frac{wr}{a} \right)$ са модифицирани

Беселови функции от ред l . Въвеждат се параметрите u и w :

$$u^2 = k_0^2 a^2 (\varepsilon_{r1} - n_{eff}^2), \quad (4)$$

$$w^2 = k_0^2 a^2 (n_{eff}^2 - \varepsilon_{r2}).$$

$$u^2 + w^2 = v^2, \quad (5)$$

и нормираната честота v :

$$v = k_0 a \sqrt{\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2}} \quad (6)$$

Параметърът u е нормирана растяща константа на разпространение в сърцевината, а w е нормирана намаляваща константа в обвивката. Ефективният индекс на ПП трябва да удовлетворява неравенствата:

$$n_1 \geq n_{eff} \geq n_2 \quad (7)$$

Дава се характеристичното уравнение за линейно-поляризираните моди:

$$\frac{u J_l'(u)}{J_l(u)} = \frac{w K_l'(w)}{K_l(w)}, \quad (8)$$

откъдето може да бъде получен ефективният индекс на ПП n_{eff} .

Поведението на Беселовите функции, участващи в уравнението (8) за различни l и m , където m е номерът на нулата на Беселовата функция за сърцевината и обвивката дава условията за отсечка и съществуване на LP_{lm} модите.

$$\begin{aligned}LP_{lm} \text{ мода:} & \quad 0 \leq u \leq j_{0,l}, \\ LP_{0m} \text{ мода:} & \quad j_{l,m-1} \leq u < j_{l,m} \text{ ако } m \geq 2,\end{aligned}\quad (9)$$

LP_{lm} мода: $j_{l,m} \leq u < j_{l,m}$ ако $l \geq 1, m \geq 1$.

Минималната нула на Беселовите функции е $j_{0,1} = 2.4048$ и определя условието за едномодов режим на оптичното влакно със стъпален индекс на ПП при отсечка на модата LP₁₁:

$$v_c = j_{0,1} \quad (10)$$

При LP_{lm} модите индексът l съответства на l -ти ред на функцията на Бесел. Този индекс определя условието за отсечка на модата, както и азимуталната периодичност (броя на периодите на функцията \cos/\sin по окръжността). Представя се нагледно разпределението на полето на LP_{lm} модите и се посочва, че всяка LP мода е четирикратно изродена по поляризация, поради което на модата съответстват 4 дискретни модови разпределения. Модата LP₀₁ е двукратно изродена.

По-нататък се разглежда точния хибриден модов анализ. В цилиндрична координатна система векторите на електрическото \mathbf{E} и магнитното поле \mathbf{H} са:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(r, \theta, z) &= \mathbf{E}(r, \theta) e^{j(\alpha r - \beta z)} \\ \mathbf{H}(r, \theta, z) &= \mathbf{H}(r, \theta) e^{j(\alpha r - \beta z)} \end{aligned} \quad (11)$$

където:

Скаларните вълнови уравнения са:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \theta^2} + (\omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2) E_z &= 0 \\ \frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \theta^2} + (\omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2) H_z &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Намира се радиална вълнова функция $R_z(r)$ в сърцевината като Беселова функция от първи род $J_v(\frac{ur}{a})$ и радиалната вълнова функция в обвивката като модифицирана Беселова функция от втори род, $K_v(\frac{ur}{a})$. Дават се изразите за компонентите на полето при този метод.

Характеристичното уравнение е:

$$\left(\frac{J'_v}{uJ'_v} + \frac{K'_v}{wJ'_v} \right) \left(\frac{\varepsilon_1 J'_v}{\varepsilon_2 uJ'_v} + \frac{K'_v}{wJ'_v} \right) = v^2 \left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2} \right) \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2} \right). \quad (13)$$

То описва хибридна мода, като $E_z \neq 0$ и $H_z \neq 0$. За $v=0$ уравнението дава уравнение (14) на TE мода ($E_z = 0$) и уравнение (15) на TM мода ($H_z = 0$).

$$\left(\frac{J'_v}{uJ'_v} + \frac{K'_v}{wJ'_v} \right) = 0 \quad (14)$$

$$\left(\frac{\varepsilon_1 J'_v}{\varepsilon_2 uJ'_v} + \frac{K'_v}{wJ'_v} \right) = 0 \quad (15)$$

При неограничен параболичен профил на ПП е валидно:

$$\begin{aligned} n^2(R) &= n_1(1 - 2\Delta R^2) & R &= \frac{r}{a} & V &= kan_1\sqrt{2\Delta}. \\ f &= R^2, & w &= VR^2 \end{aligned} \quad (16)$$

Скаларното уравнение е:

$$\left[w \frac{d^2}{dw^2} + (l + 1 - w) \frac{d}{dw} + \frac{V^2}{4V} - \frac{l+1}{2} \right] G_l = 0 \quad (17)$$

Решенията на това уравнение $G_l = L_{m-1}^{(l)}$ представляват обобщени полиноми на Лагер, където l, m са индексите на модите. Изразите за компонентите на полето на модите при влакно с неограничен параболичен профил на ПП са дадени в края на главата. Индексите на съставлящите точни моди за мода LP_{lm} се определят като при стъпално влакно. Разглеждат се четни и нечетни моди, които имат различна константата за разпространение. Последната се пресмята чрез добавяне към стойността и на поляризационни поправки. В края на раздела са показани фирмени опитни постановки за експериментално наблюдение на моди в оптично влакно.

1.2 Метод на геометричната оптика (лъчев метод).

Този раздел разглежда метода на геометричната оптика, който приблизително описва разпространението на светлината чрез пълно вътрешно отражение в сърцевината, когато показателя на пречупване на средата се променя слабо на разстояния от порядъка на дължината на вълната на светлината. Това е начин за описание на разпространението на светлината в многомодовите вълноводи с помощта на лъчи, които се разпространяват в сърцевината. При това се пренебрегват всички вълнови ефекти. Лъчевият метод е приложим за многомодовите оптични вълноводи, с изключение на някои специални случаи, като вълноводи със загуби в материала на сърцевината и обвивката, при излъчване поради различни причини, или пък при вълноводи със силно нелинеен профил на показателя на пречупване на сърцевината. В тези случаи класическата теория на геометричната оптика трябва да бъде модифицирана на базата на концепцията за локалните плоски вълни.

Главата започва с анализ на планарни стъпални вълноводи и закона на Снелиус. Въвеждат се и се обясняват важни понятия и лъчеви параметри, като лъчева траектория, време за преминаване на лъча. Показва се как се променят те при наличие на дисперсия на материала. После се разглеждат планарни градиентни вълноводи. Показва се пресмятането на введените параметри за градиентен вълновод. Дават се условията за съществуване на насочени и пречупени лъчи. Разглежда се параксиалното приближение. После се дефинират степенни градиентни профили на ПП:

$$n^2(x) = n_{co}^2(1-2\Delta(\frac{x}{a})^q), \quad -\infty < x < \infty. \quad (18)$$

Разглеждат се профилите, допускащи аналитично решение.

По-нататък анализът продължава с кръгло оптично влакно.

Разглежда се извода на лъчевите параметри и някои параметри на влакното, необходими за описанието му.

$$NA = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (19)$$

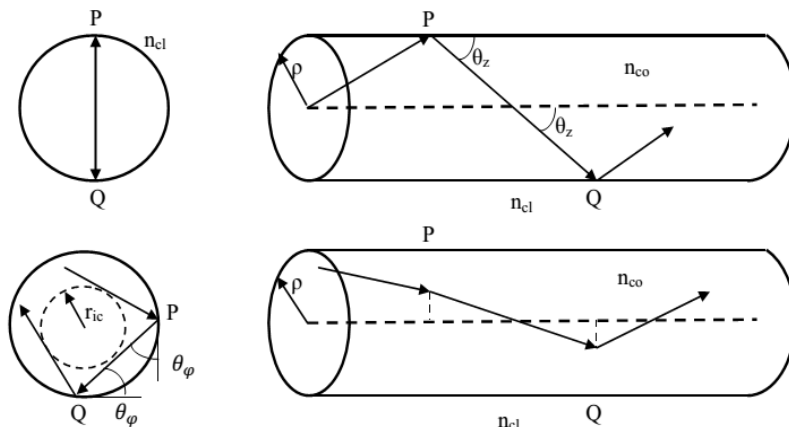
NA е числова апертура на световода, а $\sqrt{n^2(r) - n_{cl}^2}$ е локална числова апертура. Дефинира се безразмерен параметър v , наричан параметър на влакното:

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}, \quad (20)$$

където n_{co} е максималната стойност на $n(r)$, a е радиуса на сърцевината, λ е дължината на вълната на светлината във вакуум. При многомодовите оптични влакна е изпълнен:

$$v > 2.405. \quad (21)$$

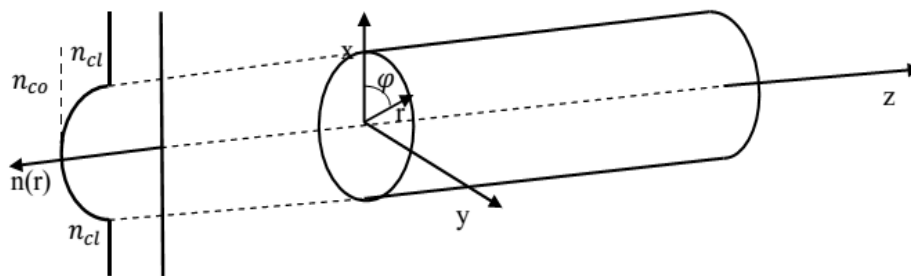
Дават се лъчевите траектории в сърцевината /фиг. 1/. Класифицират се лъчите (22).



Фиг. 1. Лъчеви траектории в сърцевината на кръгло стъпално влакно

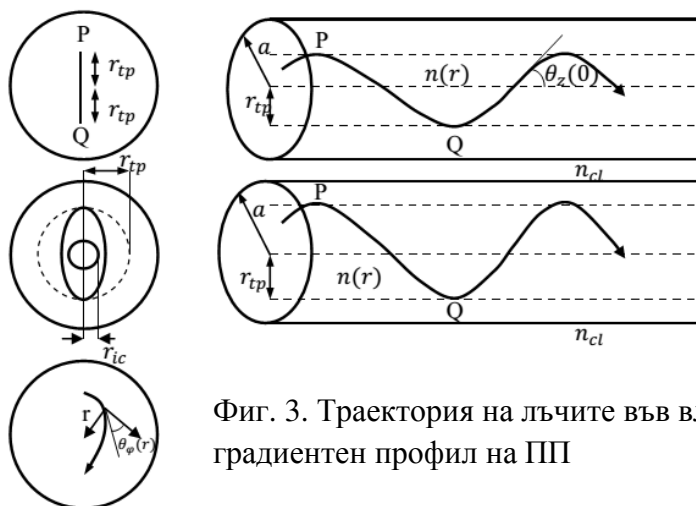
$0 \leq \theta_z < \theta_c$ $0 \leq \alpha < \alpha_c$ $\theta_c \leq \theta_z \leq \frac{\pi}{2}$ и $\alpha_c \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$	<p>– Насочени лъчи,</p> <p>– Пречупени лъчи,</p> <p>– Тунелиращи лъчи,</p>	(22)
---	--	------

После се разглежда влакно с градиентен профил на ПП /фиг. 2/.



Фиг. 2. Кръгло градиентно оптично влакно

На фиг. 3 са показани лъчевите траектории на меридионални лъчи-горе и коси лъчи – долу. Косите лъчи се разпространяват по спираловидна траектория и последователно се допират в цилиндрична повърхност ту до $r = r_{ic}$, ту до $r = r_{tp}$ (вътрешна каустика и каустика на точката на завъртане). В тези точки $\theta_\varphi(r) = 0$.



Фиг. 3. Траектория на лъчите във влакно с градиентен профил на ПП

Анализът на лъчевите траектории дава класификацията за лъчите: насочени, пречупени, тунелиращи лъчи. Дефинират се полупериод на лъча, локален критичен ъгъл на плъзгане, време за преминаване на лъча. Разглеждат се градиентните профили, за които има аналитично решение. Разглежда се влакно с параболичен профил на ПП, за което по оста му $n_{co}(0) = n_1$, а в обвивката ПП е n_2 .

1.3 Числени методи и комерсиален софтуер.

В този раздел прави кратък обзор на числените методи за анализ на оптични влакна и се сравняват с аналитичните методи. Аналитичните методи са по-стари и по-неточни от числените методи, но са по-ясни за разбиране. Само за ограничен брой идеални, прости вълноводни конфигурации модите и свързаната с тях константа на разпространението могат да бъдат намерени аналитично. За повечето реални вълноводи е необходима числова симулация. Даже вълноводите с относително прости напречни сечения и индекси на профила на ПП реално могат да получат анизотропия и нехомогенности поради фабрични толеранси и материални загуби, което се отразява на техните модови характеристики. В зависимост от профила на индекса на ПП и др. вълноводни характеристики могат да съществуват различни видове моди, включително изтичащи, загубни или излъчвателни.

Изброяват се и кратко се характеризират особеностите на основните числени методи, реализирани в комерсиален софтуер за моделиране на оптични вълноводи. С цел илюстрация

на проблемите на моделирането е включен пример и е даден алгоритъмът за получаване на стойностите на полето по метода FEM.

Изброени са и са описани възможностите и особеностите на някои популярни софтуерни пакети, използващи числови методи. По-подробно е описан симулационния пакет Optifiber, ползван за сравнение на получаваните резултати с тези от работата. В края на главата са направени следните изводи:

Вълновите методи за описание на полето на разпространяващата се електромагнитна вълна се базират на законите на Максвел. Компонентите на векторите на полето на електромагнитна вълна се описват с хармонична функция. Със законите на Максвел и граничните условия се съставя система от ДУ за компонентите на полето в анализирания оптичен вълновод. Решението му се търси като вълнова функция. Видът на системата уравнения зависи от формата, материала, структурата на вълновода. Чрез математически преобразувания системата уравнения се решава по отношение на една полева компонента.

Характеристичното уравнение задава условието за разпространение на различните видове моди във вълновода. Решението му определя константата на разпространение на отделните моди. Модите имат индекси, определящи броя на максимумите по различните координати.

В кръгло оптично влакно със стъпален индекс на ПП се разпространяват хибридни HE и EH моди. При анализа се ползва приближението на линейно-поляризираните моди. Точното определяне на константата на разпространение на модите изисква решаването на характеристичното уравнение с числени методи. Само при стъпален и неограничен параболичен профил е възможно точно решение на скаларното вълново уравнение. Полето на модите и константите на разпространение при друго влакно с градиентен профил на ПП се намират чрез приблизителни методи.

При анализа на многомодови градиентни влакна често се ползва приближението на Вентцел, Крамерс, Брилюен. Вариационните методи позволяват да се получат приблизителни изрази, в които се отчита ефекти, свързани с наличието на обвивка. Чрез метода на смущенията могат да се изведат поляризационни поправки в надлъжната константа на разпространението.

Методът на геометричната оптика използва геометрични свойства и зависимости на влакното. Той е прост и в комбинация с вълновия метод позволява да се получат приблизителни качествени зависимости за редица предавателни параметри на оптичното влакно. Влиянието на обвивката на влакното при анализа се пренебрегва и се смята, че размера и е неограничен.

Класическата геометрична оптика е приложима за повечето многомодови оптични вълноводи, използвани днес в комуникациите. Функцията на ПП на материала на оптичното влакно определя траекториите на лъчите, вида им и условията за тяхното съществуване. Лъчевите параметри имат точно аналитично представяне само за стъпално влакно и за кръгло градиентно влакно с отсечен параболичен профил на ПП.

Съвременният софтуер за моделиране на разпространението на оптично лъчение в оптични вълноводи използва числени методи за решаване на уравненията на Максвел при вълновия метод за описание на полето на светлината. Той е сложен и скъп.

Голямото количество софтуерни пакети за симулация на оптични устройства се различават по използваните методи за анализ, типите устройства и параметрите, които се моделират, по възможностите, библиотеките с анализирани примери, начин на извеждане на резултатите и др.. Анализираните точки на мрежата трябва да се разполагат на разстояние по-малко от $\lambda/10$. Симулацията даже на малки и прости устройства, с размери значително по-големи от дължината на вълната, изисква сериозни компютърни ресурси и е бавна.

Използването на мрежа внася крайна разликова грешка. Отслабване на полето, по-малко от тази грешка не може да бъде изчислено. Безмрежовите изчислители имат коректно асимптотично поведение далеч от влакното при намаляване на полето 10^{15} и повече пъти.

Модите и свързаната с тях константа на разпространението могат да бъдат намерени аналитично само за прости и идеализирани вълноводни конфигурации. Ето защо числените методи, реализирани в съвременни изчислителни пакети, трябва да бъдат предпочетени при изчисляване на реални вълноводи. В повечето случаи количествените и качествените резултати, получени с аналитични методи, трябва да бъдат сравнени и проверени чрез съществуващ комерсиален софтуер. Това не може да отмени експериментите в реални условия, но може значително да намали броя им и разходите по провеждането им.

Когато при някои вълноводни конфигурации и типови случаи съответният изчислител поради използваните числени методи и ограничения не работи правилно или изисква големи изчислителни ресурси, тогава използването на подходящи аналитични методи е добра възможна алтернатива.

Глава 2. Симулиране на оптичното поле в кръгло оптично влакно.

Втора глава решава няколко задачи чрез симулация на многомодово разпространение в кръгло оптично влакно.

2.1 Оптично влакно със стъпален индекс на ПП

По известен радиус на сърцевината a , радиус на обвивката, коефициентът на пречупване на материала в сърцевината n_1 , на обвивката n_2 и известно амплитудно-фазово разпределение на електромагнитното поле в начално напречно сечение на влакното се определят броя и вида на разпространяващите се моди и техните параметри, както и амплитудите и фазите на компонентите на полето на модите в полярна и декартова координатни системи за произволно напречно сечение на влакното по посока на разпространяващата се електромагнитна вълна. Също така се получава сумарното амплитудно-фазово разпределение за разпространяващите се вълни в произволно напречно сечение на влакното.

Математическият модел на разпространението се изгражда на основата на теорията за слабонасочените оптични влакна и линейно-поляризираните моди, която бе описана в гл. 1. От разпространяващите се моди само модите $TM_{0,M}$ и $TE_{0,M}$ имат цилиндрична симетрия, а всички останали са хибридни. Точното характеристично уравнение за модите се решава числено при условия на слаба вълноводност.

$$\left[\frac{J'_v(u)}{uJ'_v(u)} + \frac{K'_v(w)}{wK'_v(w)} \right] \left[\frac{J'_v(u)}{uJ'_v(u)} + (1 - 2\Delta) \frac{K'_v(w)}{wK'_v(w)} \right] = \left(\frac{v\beta}{kn_1} \right)^2 \left(\frac{u}{vw} \right)^4, \quad (23)$$

Дават се условията за отсечка на LP и хибридните моди. Показан е метода за определяне на точната мода в зависимост от реда на Беселовата функция и поредния номер на нулата. Дадени са изразите за полето на точните моди, които се използват за пресмятането му.

На базата на изложения математически модел е реализиран алгоритъм за пресмятане на модите и полето им и е създадена програмна среда на Turbo-Pascal и програма на MATLAB®7, която може да анализира до 120000 различни LP моди. Обобщената блок-схема на алгоритъма е показана на фиг. 4.

Ролята на използваните функции е:

Inparam – Въвежда параметрите на оптичното влакно;

Modi – Извежда разпространяващите се моди;

Choise – Въвежда начална амплитуда и фаза за анализирани моди;

Drawmo – Чертае тримерна диаграмата на реалните стойности на H, E, S;

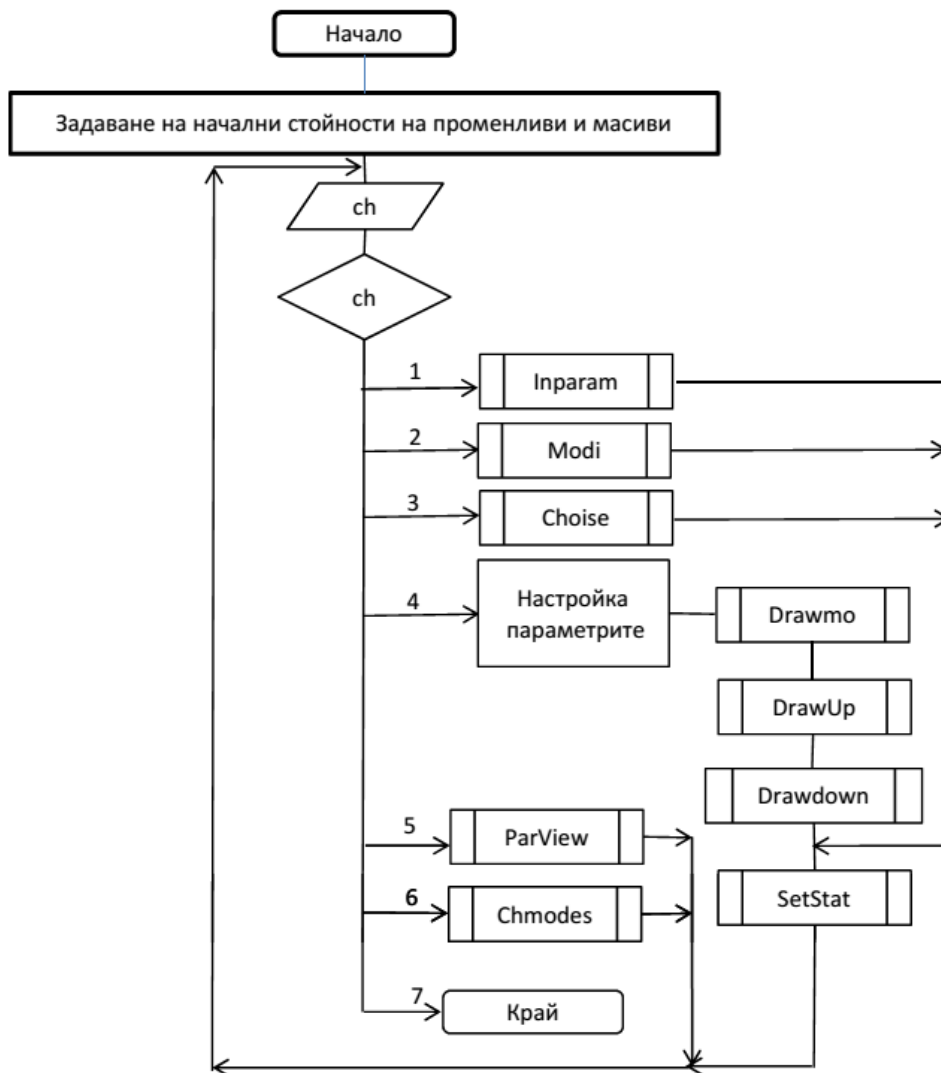
DrawUp – Чертае радиалното разпределение на полето;

Drawdown – Чертае ъгловото разпределение на полето;

Chmodes – Показва параметрите на модите за анализ;

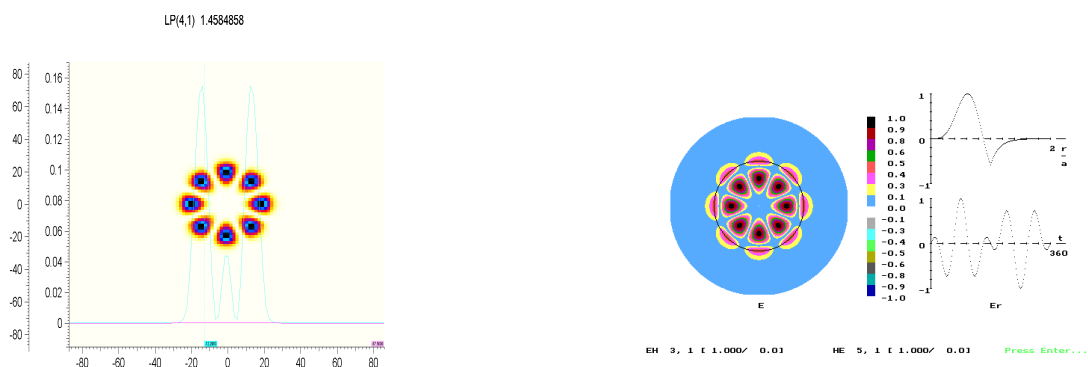
Parview – Извежда на екран параметрите на оптичното влакно и NA;

SetStat – Попълва масив за пресмятанията.



Фиг. 4. Блок-схема на алгоритъма за анализ на модите в стъпално влакно

Сравнено е симулираното поле за многомодово стъпално влакно с авторски софтуер и комерсиалната програма Optifiber на Optiwave за 8 нисши моди.



Фиг. 5. Симулация на влакно със стъпален индекс на ПП. LP 4,1.

Получена е таблицата с разпространяващите се LP моди и еквивалентните им точни моди. Определена е честотата на отсечката на модите и константата на разпространение. Сравнени са резултатите от симулацията на оптично влакно с двете програми. Получените таблици на разпространяващите се LP моди от двете програми съдържат еднакви моди.

Авторският софтуер извежда и еквивалентната комбинация от точни моди, от които съгласно теорията се получават LP модите.

2.2 Влакно с параболичен индекс на ПП

По радиус на сърцевината a , коефициентът на пречупване на материала на сърцевината по оста на влакното n_1 , на границата на сърцевината и обвивката и в обвивката n_2 се търсят броя и вида на разпространяващите се моди и техните параметри. При известно амплитудно-фазовото разпределение на електромагнитното поле в началното напречно сечение на оптичното влакно се определят амплитудите и фазите на отделните разпространяващите се моди и техните съставлящи в полярна и декартова координатни системи за произволно напречно сечение на влакното по посоката на разпространяващата се електромагнитна вълна. Търси се сумарното амплитудно-фазово разпределение за разпространяващите се вълни.

Използва се математическия модел за слабонасочено влакно с неограничен параболичен профил на ПП и теорията на разпространението за многомодово влакно с параболичен профил на ПП, изложена в гл. 2. За намиране на индексите на модата l и m при честотата на отсечката V се използва характеристичното уравнение. При влакно с неограничен параболичен профил на ПП няма честота на отсечката за нито една мода, а при реално влакно с параболичен профил на ПП броят на разпространяващите се моди е ограничен.

Представена е обобщена блок-схема на алгоритъма за пресмятане на полето на модите, която е подобна на тази от фиг. 4. Симулирано е влакно с параболичен профил на ПП. Показани са 3 симулации за нисши LP моди. В заключение чрез създадените програми са начертани диаграми на 2 висши LP моди във влакно със стъпален и във влакно с параболичен профил на ПП, за които в глава 1 са получени експериментални фирмени микрофотографии.

2.3 Симулация на деформация на оптично влакно със стъпален индекс на ПП

Разглежда се кръгло оптично влакно с малка разлика на индексите на ПП за сърцевината и обвивката (случай на слаба вълноводност), по което се разпространява електромагнитна вълна. Общото поле, създадено от модите, е векторна сума на компонентите на полетата на отделните разпространяващи се моди. Деформацията в напречно сечение $z = 0$ се разглежда като рязка смяна на диаметъра на сърцевината и обвивката на два свързани кръгли диелектрични вълновода. Напречното електрическо поле е $E_t^-(r, \varphi)$ при $z < 0$ и като $E_t^+(r, \varphi)$, когато $z > 0$. Полето в напречното сечение при $z < 0$ е векторна сума от M броя отделни вълноводни насочени моди F_i , $i=1, M$, а електрическото поле при $z > 0$ може да се представи като сума от N плоски вълни U_i , разпространяващи се по оста z , т.е.:

$$E_t^-(r, \varphi) = \sum_{i=1}^M b_i F_i, \quad E_t^+(r, \varphi) = \sum_{i=1}^N a_i U_i. \quad (24)$$

Видът и броят на модите от двете страни на деформацията се определят от физическите параметри на влакното на това място. На повърхността $z=0$ граничните условия за тангенциалните компоненти на напречното електрическо и магнитно поле отляво ($z < 0$) и отдясно на деформацията са еднакви. Електрическото поле отляво на деформацията се представя по метода на Галеркин като сума от собствени вълни по оста z :

$$E_t^-(r, \varphi) = (1 + R)F_1(r, \varphi) + \sum_{i=2}^M b_i F_i \quad (25)$$

Коефициентите a_i и b_i в (24) могат да се представят чрез тангенциалното електрическо поле в общото сечение S на двата вълновода.

Аналогични изрази са изведени и за вектора на магнитното поле. След заместване се получава интегрално уравнение за електрическото поле в $z=0$. Изчисляват се моментите на полученото уравнение с функциите F_i и U_i . Поради ортогоналността на собствените вълни във влакното се получава:

$$2y_1 \cdot F_1 = \sum_{i=1}^M b_i y_i F_i \iint_S F_i \cdot F_i ds + \sum_{i=1}^N a_i Y_i U_i \iint_S U_i \cdot U_i ds , \quad (26)$$

където y_i , Y_i означават проводимости за съответните типове вълни (моди) и е изпусната зависимостта на функциите от координатите.

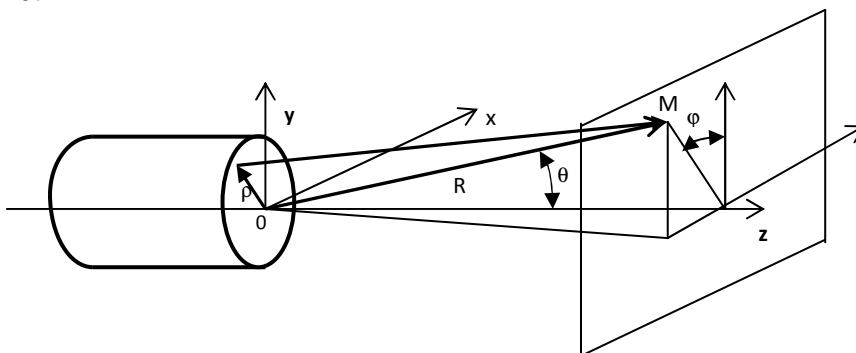
Записвайки за $M+N$ избрани точки уравнение (26), се получава система от $M+N$ линейни уравнения с $M+N$ неизвестни за коефициентите a_i и b_i . След решаване на системата се определят полетата (24).

Показана е симулация на деформация в малкомодово влакно. При симулацията смяната на диаметъра на влакното променя броя на разпространяващите се моди. Полето на насочените моди се пресмята от програмната среда за симулация на стъпално влакно.

2.4 Моделиране на излъчването от отворения край на оптично влакно

Слабонасочено многомодово кръгло оптично влакно със стъпален профил на ПП и известни параметри е възбудено в единия край, като е известен модовия състав и параметрите на модите (тип, амплитуда, фаза) в началното сечение на влакното. В другия край влакното е отворено. Разпространяващата се електромагнитна вълна се излъчва от отворения край на влакното и създава оптично поле върху плосък екран, разположен перпендикулярно по оста на влакното на голямо разстояние (в далечната зона). Трябва да се пресметне това поле.

Полето в апертурата представлява векторна сума от полетата на отделните разпространяващи се моди. На фиг. 6 е показана апертурата на отворено в единия край оптично влакно.



Фиг. 6. Анализираният модел на излъчване от отворен край на влакното.

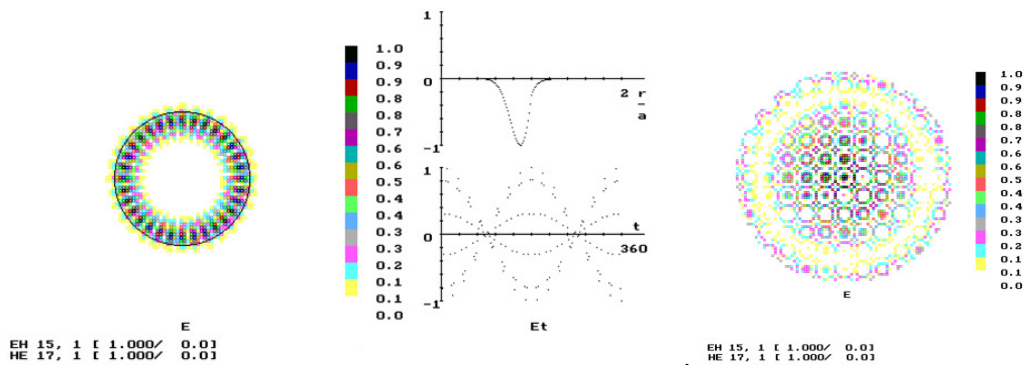
Полето на излъчване $q(R, \theta, \varphi)$ в точка M от далечната зона се представя в апертурата на влакното като функция на координатите (x, y) по следния начин:

$$q(R, \theta, \varphi) = \frac{ik}{4\pi} (1 + \cos \theta) \frac{e^{-ikR}}{R} \iint_S u(x, y) \cdot e^{ik \cdot \sin \theta \cdot (x \cdot \cos \varphi + y \cdot \sin \varphi)} dx dy \quad (27)$$

R е разстоянието от края на влакното до точката на екрана, в която се пресмята функцията. Интегрирането се извършва по излъчващата повърхност S на влакното. С φ е означен полярния ъгъл, а с θ азимуталния ъгъл. Функцията $u(x, y)$ описва амплитудното разпределение на електрическото поле в излъчващия отвор.

На фиг. 7 е показано симулираното електрическото поле на екрана в кръг с диаметър 6 см. Вляво полето е създадено от модата $LP_{16,1}$, излъчена от отворения край на стъпалното влакно. Използвано е многомодово стъпално оптично влакно. Въведени са 2 моди. На екрана /фиг. 7, вдясно/ има спекъл-структура и 2 асиметрични петна – светло и тъмно.

Получените данни от симулацията са сравнени качествено с такива от работата на еднорамнен многомодов интерферометър от литературата.



Фиг. 7. Електрическо поле на екрана, създадено от модата LP_{16,1}.

2.5 Приложение на генетичен алгоритъм за изчисляване на полето в оптично кръгло оптично влакно.

Дадено е многомодово кръгло стъпално оптично влакно с известни параметри, което е отворено в единия край. Разпространяващата се електромагнитна вълна създава върху плосък екран, разположен на определено разстояние от него, поле от излъчването. Във файл са записани предварително нормираните стойности на полето върху екрана в няколко точки с определени координати. Необходимо е да се пресметнат амплитудите и фазите на разпространяващите се моди в началното сечение на влакното, така че стойностите на полученото електрическо поле на екрана, създадено от излъчващия край на влакното и стойностите му, описани във файла за дадените точки да се различават минимално.

Синтезът на амплитудно-фазовото разпределение в апертурния отвор на разпространяващо се електромагнитно поле изисква решаване на интегрално уравнение на Фредхолм от I ред. Теорията позволява решения само за някои разпределения на полето. Търсенето на глобална оптимизация в дадения случай е направено с Генетичен алгоритъм.

Стойностите на функцията q върху някои точки на екран в далечната зона са пресметнати съгласно описаната по-горе методика. Търси се амплитудното разпределение $u(x,y)$ в апертурата на влакното, което осигурява минимум на разликата между зададената и изчислената функция q в точки със зададени координати. Стойностите на полето в произволна точка от апертурата и екрана се пресмятат приближено с помощта на числени методи. Изборът на множеството задавани параметри в програмата, която го реализира, беше направен съгласно препоръчаните стойности в литературата.

ГА се прилага върху популация от индивиди. Всеки индивид е представен със своя хромозома. Индивидът представя полето в отворения край на влакното като съвкупност от моди, всяка със своя начална амплитуда и фаза. Хромозомата кодира всички параметри на индивида. При програмната реализация на ГА хромозомите представляват едномерен масив от N гена – колкото е броя на анализиранияте моди. Ако разпространяващите се моди са с еднаква (нулева) начална фаза, началната амплитуда на една мода се кодира в 16 битов ген:

$$A_i = \frac{2}{2^n - 1} \sum_{j=0}^{15} 2^j \cdot b_j - 1. \quad (28)$$

Тук A_i е начална амплитуда на участващата в анализа i -та мода, а битовете в гена G_i са означени с b_j , $j=0,1...15$.

ГА извършва върху популацията селекция (Selection), кръстосване (Crossover) и мутация (Mutation), които се повтарят в цикъл (Reproduction cycle). Хромозомите в началната популация се създават чрез генерация на случайни 16-битови гени. Броят на индивидите в популацията бе избран 30 - в долната граница на препоръчвания в размер.

Над хромозомите се извършват стандартните генетични операции, и началната популация еволюира към оптимално решение. Критерий за пригодност (оптималност) е

целевата функция. Тя се пресмята за всяка хромозома. Целевата функция Fitness е избрана като квадратен корен от сумата на квадратите на разликите между пресметнатата сумарна нормирана амплитуда F_{calc_i} и зададената амплитуда F_{giv_i} на полето за точките с номер i върху екрана (29). Общият брой M на задаваните точки може да варира.

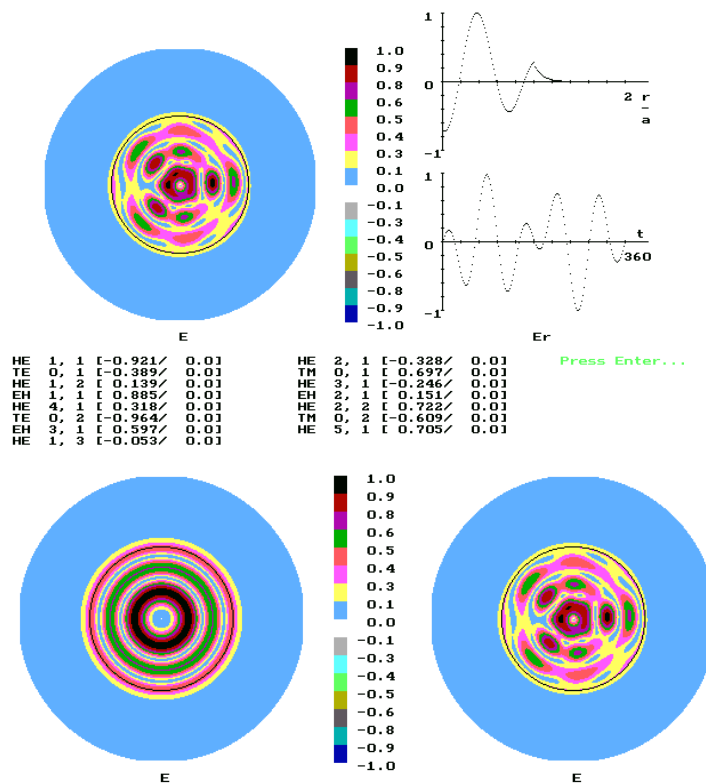
$$Fitness = \sqrt{\sum_{i=1}^M (F_{calc_i} - F_{giv_i})^2} \quad (29)$$

По-добрата хромозома има по-малка целева функция.

Симулирано е малкомодово стъпално влакно с 16 разпространяващи се моди. Пресмяташе се създаденото електрическо поле от модата ЕН 2,1 върху кръгъл екран с диаметър 3 cm, разположен на 30 cm от края на влакното. Изчислените нормирани амплитуди на електрическото поле върху екрана в 32 точки бяха въведени в програмата за синтез чрез ГА. Анализираха се първите 15 точни моди.

След 1000 репродукционни цикъла бяха получени начални стойности на амплитудите на модите в излъчващата апертура на влакното. Възбуденото поле на екрана в 30 от всички 32 точки се отличавахе с не повече от 4%.

На фиг. 8 е показано амплитудното разпределение на зададеното и пресметнатото поле на екрана с използване на ГА.



Фиг. 8. Зададено/пресметнато поле в излъчващата апертура на влакното.

В края на главата са дадени 4 експериментално получени изображения на полето от отворен край на SMF влакно, възбудено от червен лазер. Бяха направени следните изводи:

При известни точни аналитични решения за компонентите на полето по вълновия метод в кръгло оптично влакно със стъпален и с неограничен параболичен профил на ПП бе предложен метод за анализ на разпространението, базиран на аналитични вълнови методи. Създадена бе програмна среда, която определя модите и техните параметри, а също така и полето, създадено от тяхна комбинация. По въведени параметри на влакното се изчисляват числовата апертура, честотите на отсечките на модите и видовете разпространяващи се моди в оптичния вълновод. Изчисляват се и се изобразяват компонентите на оптичното поле в напречното сечение на вълновода и константите на

разпространение на модите. Получените графики от програмите потвърждават структурата на разпространяващите се LP моди, описана в гл. 1.

Извършеното сравнение на получаваните резултати с резултати от симулацията на влакна със същите параметри чрез комерсиален софтуер и експериментални данни доказва работоспособността на създадения софтуер. При многомодово влакно намаляването на напречното му сечение води до намаляване на броя на разпространяващите се моди, което действува като естествен модов филтър. Причината за това е, че по-тънкото влакно има по-малка нормирана честота ν , която определя намаления брой на модите

Предложен бе модел на деформация като рязка промяна на диаметрите на влакното в определено напречно сечение. Чрез създадената програмна среда и допълнителни програмни модули бе симулирано влиянието на деформация върху модовия състав и полето на разпространяващите се моди в дадено напречно сечение на влакното, което позволи да се определи полето в зададено напречно сечение в зависимост от параметрите на деформацията.

Чрез опростен метод, базиран на метода на Галеркин, бе предложен подход за изчисляване на амплитудното разпределение на излъченото поле от отворения край на стъпално оптично влакно. С допълнителни програмни модули и създадената програмна среда бе симулирано амплитудно разпределение на оптичното поле върху екран, разположен на разстояние няколко десетки дължини на вълната по оста на влакното.

Чрез генетичен алгоритъм бе намерено амплитудно-фазовото разпределение в началното сечение на влакното, което създава в определени точки на екран срещу отворения край на оптично влакно поле с определена амплитуда и фаза. ГА е подходящ метод за търсене на екстремум в този случай. Времето за изчисления бе пропорционално на броя на анализиранияте моди, като около 95% от него заема изчисляването на целевата функция. Важно значение за постигане на по-бърза сходимост имаше метода на селекция. Слабо влияеха на крайния резултат стойностите на коефициентите на мутация, кръстосване.

Добри резултати при решаването на поставената задача с метода на ГА могат да се постигнат когато се извършат голям брой (над 1000) репродукционни цикли, което изисква значително машинно време и мощен компютър.

Глава 3. Симулиране на предавателните характеристики на оптични влакна.

В тази глава са разгледани най-важните предавателни характеристики на оптичните влакна - затихването/загубите/ и ширината на лентата на пропускане и са дадени начини за изчисляването им. Показани са примери за изчисляване на дисперсията в стъпално и параболично многомодово влакно.

Затихването се измерва с отношението на изходната към входната оптична мощност за влакното. Ако се означи входната оптична мощност с P_i , мощността в изхода на влакното с P_o , тогава загубите са :

$$Loss[dB] = -10 \log_{10} \frac{P_o}{P_i} \quad (P_o < P_i). \quad (30)$$

Материалната абсорбция предизвиква загуби поради материалната структура на влакното. Най-малкото затихване при типичните силициевеи влакна е възможно за дължина на вълната 1.55 μm . и е около 0.2 $\left[\frac{dB}{km}\right]$. Показани са областите от спектъра на вълните, при които има минимума в затихването на светлината.

Загубите от разпръскване се причиняват от случайни локални нехомогенности на материала-Релеевско разпръскване. В съвременните оптични влакна то доминира.

Обяснени са обуславящите причини и характера на загубите от микро- и макроогъване. Изяснени са механизмите на дисперсията: модовата/междумодовата дисперсия, хроматичната дисперсия, поляризационната модова дисперсия и как се изчисляват те.

Хроматичната дисперсия има две компоненти – структурна (вълноводна) и материална. При едномодово разпространение междумодовата дисперсия липсва. Общата дисперсия е алгебричната сума на компонентите на хроматичната дисперсия.

При големи дължини $L > L_1$ на световодната линия, където $L_1 = 1 \div 3 \text{ km}$, случайните нееднородности по протежението на влакното предизвикват енергиен обмен между модите. Модовото дисперсионно разширение при радиално стъпалните влакна то се описва с израза:

$$t_m = 0.68 \frac{\sqrt{LL_1}}{c} n_1(\lambda_0) \Delta(\lambda_0) , \quad (31)$$

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

При параболичните влакна модовото дисперсионно разширение може да се опише с израза:

$$t_m = 0.34 \frac{\sqrt{LL_1}}{c} n_1(\lambda_0) \Delta^2(\lambda_0) . \quad (32)$$

Многомодовата дисперсия не зависи от спектралната ширина на светлинния източник, който възбужда влакното. Дори единична дължина на вълната може едновременно да се пренася чрез множество вълноводни моди. Многомодовата дисперсия липсва в едномодовите вълноводи. Разширението на импулса обаче не изчезва и при едномодовите влакна, тъй като груповата скорост, асоциирана с фундаменталната мода, е честотно зависима в спектралната ширина на сигнала заради хроматичната дисперсия.

Хроматичната дисперсия съществува във всички видове оптични влакна. Деформирането на оптичния импулс става поради крайната спектрална ширина $\Delta\lambda$ на оптичния източник и на модулираната централна дължина на вълната λ_0 .

Ако $\Delta\lambda$ е спектралната ширина на оптичния импулс, разширението на импулса ΔT за материала с дължина L се дава с израза:

$$\Delta T = LD\Delta\lambda \quad (33)$$

където $D \left[\frac{ps}{km \cdot nm} \right]$ е дисперсионен параметър.

$$D = \frac{1}{c} \frac{dn_g}{d\lambda} = - \frac{\lambda}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2} \quad (34)$$

Хроматичната дисперсия има два механизма. Първият е зависимостта на индекса на пречупване на материала от дължината на вълната на светлината, т.е. $n = n(\lambda)$. Зависимостта $n(\lambda)$ на материала на сърцевината и обвивката е сложна. Обикновено тя се задава с уравнението на Селмайер :

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2} , \quad (35)$$

където параметрите A_i и λ_i ($i=1,2,3$) се определят на основата на експериментални данни по метода на най-малките квадрати. В главата е поместена таблица с коефициентите от уравнение (35) за 23 вида стъкла, ползвани при производство на оптични влакна.

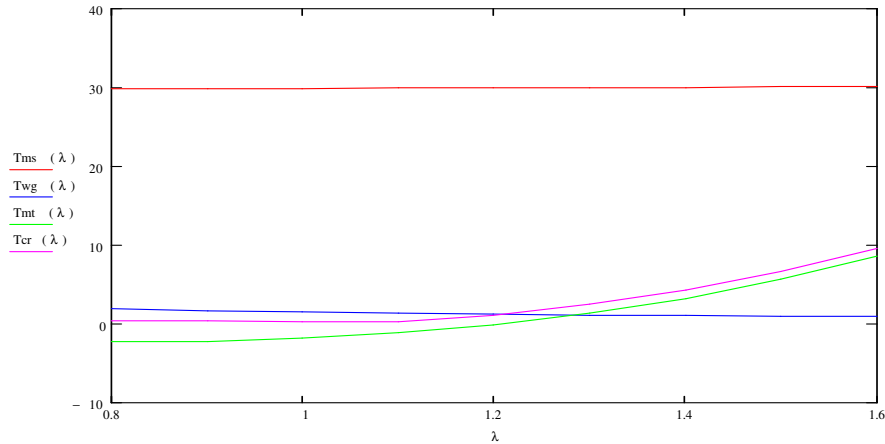
Вторият механизъм на хроматичната дисперсия е зависимостта на разпределението на енергията между сърцевината и обвивката на влакното от дължината на вълната, познат като вълноводна дисперсия. Вълноводната дисперсия отсъства при радиално-градиентни влакна. При многомодово радиално-стъпално влакно забавянето на импулса от вълноводната дисперсия е:

$$\tau_{wg} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\Delta\lambda L}{\lambda_0 c} n_1(\lambda_0) \Delta(\lambda_0) . \quad (36)$$

Константата на разпространението β е нелинейна функция на нормираната честота V . Разширяването на импулса, свързано със спектралната ширина на източника $\Delta\lambda$ се отнася до закъснението на импулса $\tau = \frac{L}{v_{g,eff}} = L |D_{wg}| \Delta\lambda$. Параметърът вълноводна дисперсия D_{wg} се дава с израза:

$$D_{wg} = -\frac{1}{2\pi c} V^2 \frac{d^2 \beta}{dV^2} \quad (37)$$

Зависимостта на D_{wg} от λ може да се управлява чрез промяна на радиуса на сърцевината, числовата апертура и V параметъра. На фиг. 9 са начертани компонентите на хроматичната дисперсия за стандартно едномодово оптично влакно, оптимизирано за работа на 1300 nm .



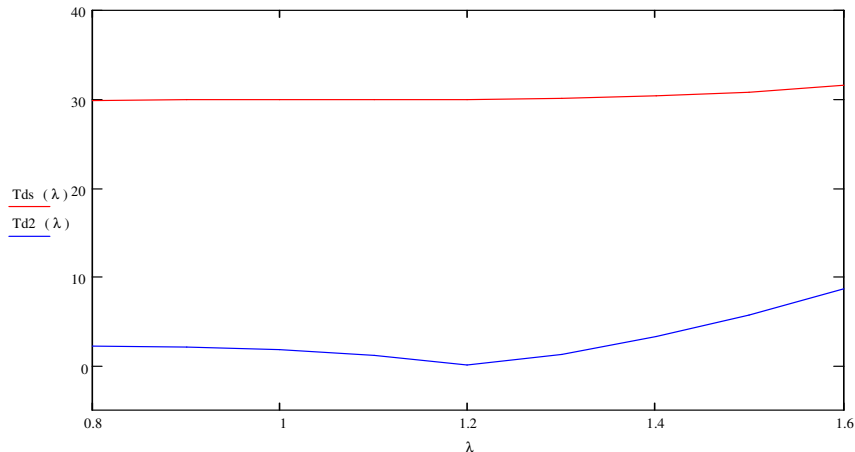
Фиг. 9. Компоненти на хроматичната дисперсия на едномодово влакно.

Поляризационно-модова дисперсия е разширяване на изходния импулс, когато двете моди с ортогонални поляризации се разпространяват с различна групова скорост $v_{gx} \neq v_{gy}$. Разширението на импулса поради PMD се дава с израза:

$$\Delta T_{PMD} = D_{PMD} \sqrt{L}, \quad (38)$$

където L е дължината на влакното, а D_{PMD} е PMD параметър, измерван в $[\frac{ps}{\sqrt{km}}]$. Тя задължително се отчита при високоскоростни комуникации.

Чрез дадените изрази е решен пример за определянето на общите дисперсионните разширения на импулсите в стъпален Tds и параболичен световод Td2 и са сравнени в изследвания вълнов диапазон /фиг. 10/.



Фиг. 10. Общи дисперсионни разширения за стъпален и параболичен световод.

В края на главата са направени следните изводи:

Качествените показатели на световодните линии се определят от затихването и дисперсионните свойства на влакната. Ако е известна зависимостта $n(\lambda)$ за материала, от който е изработено влакното, могат да бъдат пресметнати аналитично компонентите на хроматичната дисперсия. Чрез промяната им и чрез добавяне на допълнителни участъци от оптични влакна с хроматична дисперсия с обратен знак на внасяната от основното влакно, общата дисперсия може да се намали в определен вълнов диапазон и нулира за определена дължина на вълната.

При радиално-стъпалните световоди модовата дисперсия доминира над хроматичната.

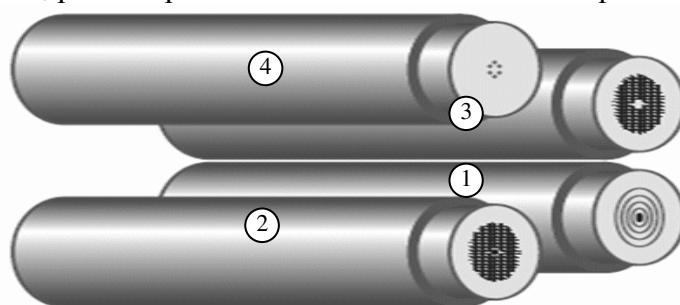
При параболичните радиално-градиентни световоди хроматичната дисперсия е много по-голяма от модовата.

Вълноводната дисперсия е по-малка по абсолютна стойност от материалната и съществено влияе на дължината на вълната, за която се нулира хроматичната дисперсия.

Общата дисперсия в градиентните влакна при многомодово разпространение е по-малка от тази в стъпалните влакна.

Глава 4. Анализ на предавателните параметри на оптично влакно на Брег.

В шеста глава е предложен модел на разпространението във влакно на Брег, базиран на метода на геометричната оптика. Изведен е математически модел за описание на предавателните характеристики на влакното. Влакното на Брег /фиг. 11/ е фотонно-кристално влакно (PCF) влакно тип 1. То е едномерно и обвивката му представлява диелектрично огледало, реализирано като многослойно диелектрично покритие.



Фиг. 11. Видове микроструктурирани влакна

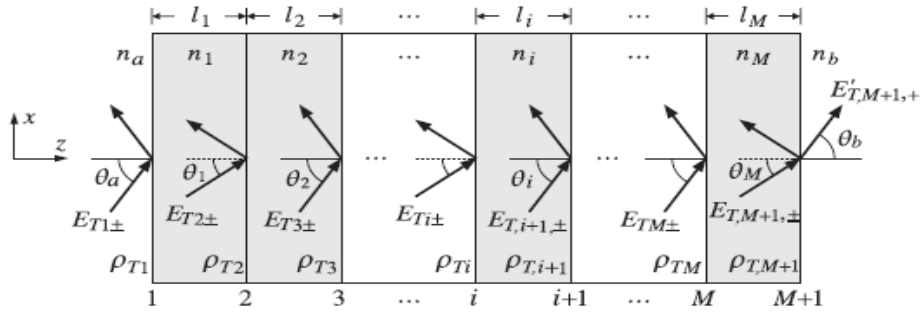
Коефициентът на затихване на светлината в PCF влакно се представя като сума от коефициенти на затихване: поради тунелиране α_T , поглъщане α_A и разсейване α_S :

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_A + \alpha_S + \alpha_T. \quad (39)$$

С усъвършенстване технологията на производство загубите от абсорбция не са определящи. Релеевското разсейване на енергията на насочените моди е най-голямо за дължина на вълната 1550 nm. Загубите от тунелиране на светлината са най-съществени и определят диапазона на работа на влакното. Тези загуби намаляват при увеличаване броя на слоевете и стават незначителни за брой на слоевете над 17. Те са минимални в центъра на забранената зона и се увеличават към краищата.

Проблем: В момента няма универсален и достатъчно точен метод за оценка на загубите на разпространение, който да позволява оптимизация на влакното в честотен диапазон и по конструктивни характеристики.

В главата се предлага опростен метод на базата на геометричната оптика за анализ на загубите на разпространение на светлината в многослойно микроструктурирано влакно с въздушна сърцевина. Анализира се PCF влакно от тип 1, със сърцевина с коефициент на пречупване n и M цилиндрични слоя. Поради централната симетрия на влакното на фиг. 12 е показан само половината от осев разрез на влакното.



Фиг. 12. Коси лъчи върху многослойна диелектрична структура

Предлага се математически модел за описание. Влакното се разглежда като плоска многослойна диелектрична структура. Пресмята се дефазирането на падащите лъчи при преминаване през i -тия слой е $\delta_i = k_0 n_i \cos \theta_i$. Описват се коефициентите за ТМ и ТЕ поляризация. Матрицата на разпространението дава рекурсивна връзка за електрическото поле на падащия и отразения лъч на границите между два съседни слоя. Общата мощност на падащия лъч P_{in} в направлението на вълновия вектор, компонентата z и мощността, въведена в първия слой P_1 , за ТЕ и ТМ поляризации се изразяват така:

$$P_{in} = \frac{1}{2\eta_a} |E_{in}|^2 \quad P_{in,z} = P_{in} \cos \theta_a, \quad \eta_a = \eta_0 / n_a, \quad P_1 = P_{in,z} (1 - |\Gamma_1|^2). \quad (40)$$

Загубите от отражение са:

$$\frac{P_1(\lambda)}{P_{in,z}(\lambda)} = 1 - |\Gamma(\lambda)|^2, \quad (41)$$

а нормираното затихване $V(\lambda)$:

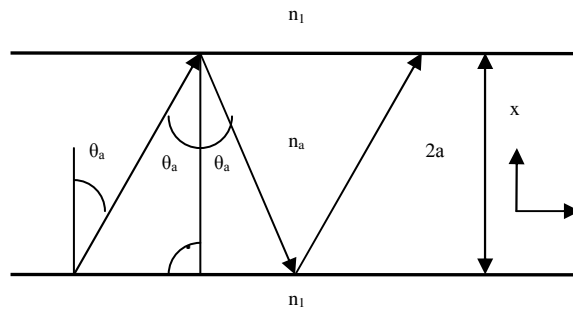
$$V(\lambda) = \frac{P_{in,z}(\lambda) - P_1(\lambda)}{P_{in,z}(\lambda)} = |\Gamma(\lambda)|^2. \quad (42)$$

Траекторията на лъчите във влакно с радиус a , показател на пречупване на сърцевината n_a и на обвивката n_1 , е показана на фиг. 13.

Разпространяващите се моди с индекс m се характеризират с дискретни стойности на ъгъла θ_a . Условието за напречен фазов резонанс дава промяна на фазата за един зигзаг на лъча, кратна на 2π . Характеристичното уравнение е:

$$4ak_0 n_a \cos \theta_a + \varphi = 2m\pi, \quad (43)$$

където φ отчита промяната на фазата при отразяване от границите на сърцевината и обвиващия слой. Във влакно с дължина L имаме N броя отражения в сърцевината. Загубите във влакното за ТЕ и ТМ поляризация са пропорционални на N :



Фиг. 13. Лъчи в сърцевината

$$V(\lambda) = N |\Gamma(\lambda)|^2 = \frac{L |\Gamma(\lambda)|^2}{Lz}. \quad (44)$$

На основата на горния математически модел е симулирано 9-слойно влакно на Брег с въздушна сърцевина. Получена е зависимостта от λ на коефициента на отражение за ТЕ и ТМ поляризация. Същите пресмятания са направени за влакна с радиуси на сърцевината

$a=20-200 \mu\text{m}$, а също и за $m>1$ (висши моди). Резултатите са показани на графики и в таблици.

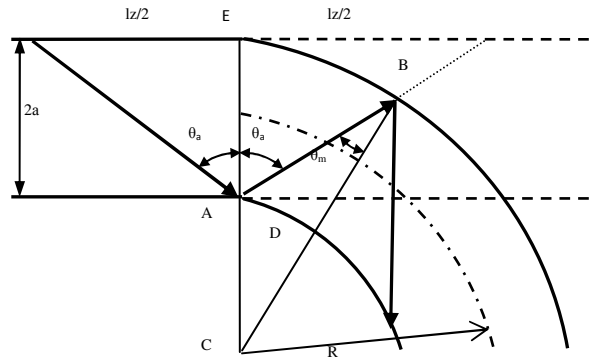
Влияние на макроогъванията

По-нататък се предлага модел на макроогъване под радиус R . Получена е връзка между ъглите на падане в правия и кръглия участък на влакното /фиг.15/:

$$\theta_m = \arcsin \frac{(R-a) \sin \theta_a}{R+a} . \quad (45)$$

Закъсненията на лъчите с ТЕ и ТМ поляризация са съответно τ_e и τ_m , и се пресмятат чрез израза :

$$\tau(\lambda) = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot c} \frac{d(\arg(\Gamma(\lambda)))}{d\lambda} , \quad (46)$$



Фиг. 14. Влакно огънато под радиус R

Хроматичната дисперсия на влакното се дава с израза:

$$d_1(\lambda) = \frac{d\tau_e(\lambda)}{d\lambda} - \text{ТЕ поляризация}, \quad d_{13}(\lambda) = \frac{d\tau_m(\lambda)}{d\lambda} - \text{ТМ поляризация}. \quad (47)$$

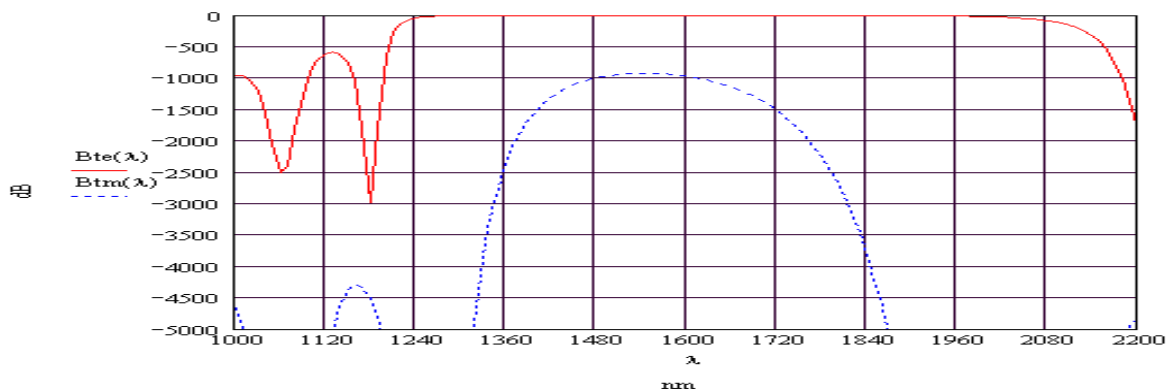
Затихването за цялата дължина на влакното $B_N(\lambda)$ за меридионалните лъчи се сумира от затихванията $B_i(\lambda)$ в отделните участъци на отражения на лъчите с номера $1,2,3...N$:

$$B_N(\lambda) = B_1(\lambda) \cdot B_2(\lambda) \cdot B_3(\lambda) \dots B_N(\lambda) = (\Gamma^2(\lambda))^N . \quad (48)$$

При влакно с огъване затихването за цялата дължина на влакното $B_N(\lambda)$ се сумира от затихванията $B_i(\lambda)$ в отделните участъци на отражения на лъчите.

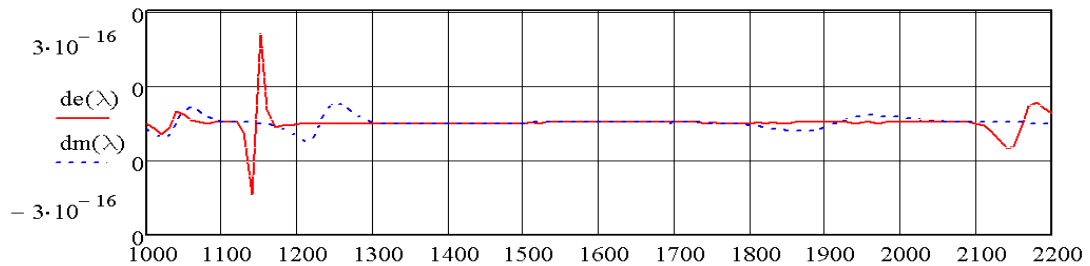
Този математически модел отчита затихването и дисперсията само на меридионалните лъчи. После се предлага усъвършенстване на модела за отчитане затихването и дисперсията на немеридионалните лъчи. Моделът не отчита диелектричните загуби в обвивката на влакното.

Моделът е въведен в програма на MathCad и са изчислени затихванията за ТЕ и ТМ нисши моди в 9 и 21-слойни влакна на Брег /фиг.15/.



Фиг. 15. Загуби при ТЕ и ТМ моди за 9-слойно влакно на Брег

Пресметната е зависимостта на хроматичната дисперсия от дължината на вълната /фиг.16/. Начертани са графики на затихването от радиуса на огъване на влакното на ТЕ вълна при няколко различни дължини на влакното.



Фиг. 16. Дисперсия на недеформирано влакно, $M=9$ слоя

В края главата са направени следните изводи за симулираните влакна:

Направените симулации при влакна на Брег с различни параметри показват, че вълните с ТМ поляризация се разпространяват със значително по-големи загуби от вълните с ТЕ поляризация. Поради това тези световоди представляват естествен филтър за ТМ вълните и за висшите моди. Влиянието на ТМ вълните е забележимо при големи стойности на радиуса на сърцевината. Общите загуби на влакното намаляват с увеличаване на радиуса на сърцевината и с броя на слоевете на обвивката. При големи радиуси на сърцевината те са съпоставими със загубите на разпространение в класическите едномодови световоди.

Загубите при разпространение в Бреговско влакно от макроогъвания растат с намаляване на радиуса на огъване и в краищата на честотния диапазон. Голямата разлика в затихването на различните видове моди показва автоматичната модова филтрация в РСФ.

Хроматичната дисперсия за изследваното в примера влакно с параметри на диелектричните слоеве, които са избрани съгласно посочената по-горе методика, остава по-ниска от 50 ps/km в широк честотен диапазон.

Основни изводи и предложения за практиката

Поставените цели в дисертационната работа са изпълнени.

Определено е полето на модите в многомодови влакна със стъпален и параболичен индекс на ПП и са създадени методики за изчислението му. Те са реализирани в разработена програмна среда.

Определено е влиянието на деформация върху полето на модите в стъпално влакно.

Изчислено е полето на модите, излъчено от отворения край на стъпално влакно.

Приложен е генетичен алгоритъм за синтез на полето на възбуждане за получаване на определено поле на излъчване от отворено стъпално влакно. Разработена е програмна среда за изчисляването му.

Направени са симулации и са изведени зависимости за дисперсията при стъпални и параболични влакна. Те потвърждават по-малкия информационен капацитет на ММФ пред SMF, ограничен от модовата дисперсия. Заради по-голямата си числова апертура ММФ облекчават свързването и позволяват използване на по-евтини лазери и даже светодиоди при комуникацията.

Създаден е математически модел за опростено описание на разпространението в РСФ влакно на Брег чрез метода на геометричната оптика и са определени константите на разпространение, затихването и дисперсията на модите.

Приноси по дисертационния труд

I. Научно приложни приноси

1) Създадена е методика за намиране на полето на разпространяващите се моди и техните компоненти в оптично влакно със стъпален индекс на ПП чрез вълнов метод.

2) Създадена е методика за намиране на полето на разпространяващите се моди и техните компоненти в оптично влакно с параболичен профил на индекса на ПП чрез вълнов метод.

3) Описано е на влиянието на деформация върху полето на модите в многомодово стъпално оптично влакно. Създадена е методика за определяне на полето в стъпално влакно с деформация.

4) На основата на вълнов метод е създадена методика за изчисляване на оптичното поле в далечната зона, излъчено от отворен край на многомодово стъпално оптично влакно.

5) Приложен е генетичен алгоритъм за определяне на амплитудно-фазовото разпределение на модите в отворен край на стъпално влакно, създаващо излъчено оптично поле с дадено разпределение.

6) Предложен е математически модел за опростено описание на разпространение в оптично влакно на Брег чрез метода на геометричната оптика. На основата му са изчислени загубите и дисперсията.

7) Предложен е математически модел за описание на влиянието на деформация в оптично влакно на Брег върху загубите и дисперсията в зависимост от параметрите на влакното.

II. Приложни приноси

1) Разработена е програмна среда за анализ на модите в стъпално влакно и за изчисляване на оптичното им поле.

2) Разработена е програмна среда за анализ на модите в градиентно влакно с параболичен профил на ПП и за изчисляване на оптичното им поле.

3) Разработен е софтуер за определяне на оптично поле в стъпално многомодово влакно при наличие на деформация.

4) Разработена е програмна среда за изчисляване на излъченото поле от отворен край на стъпално влакно и за изчисляване на амплитудно-фазовото разпределение на модите на входа на влакното за получаване на зададено поле на излъчване.

5) На основата на модела на разпространение във влакно на Брег е написан софтуер за изчисляване на константите на разпространение, затихването и дисперсията на модите в право и в огънато влакно на Брег със задавани параметри.

Публикации по темата на дисертацията

- [1] Вл. Диманов, Ж. Жейнов, Й. Урумов. Модел на модов филтър. Юбилейна научна сесия на ТУ-Варна 1997, стр. 83-86.
- [2] Ж. Жейнов. Моделиране на влиянието на деформация върху разпространението на оптично лъчение по многомодово оптично влакно. Национална конференция с международно участие "Телеком '98", Варна, 1998, стр.535-538.
- [3] Zh. Zhejnov, J. Urumov. Modelling the effect of deformation on the propagation of optical radiation down a multimode fiber. VIII –th International Czech-Slovak Scientific Conference "Radioelektronika 98", Brno, Czech Republic, 1998 p.458-463.
- [4] Zh. Zhejnov, J. Urumov. Experimental method for analyse of heterogeneity in multimode optical fiber. IX-th International Czech-Slovak Scientific Conference "Radioelektronika 99", Brno, Czech Republic, 1999, p. 289-292.
- [5] Urumov J, Zhejnov Zh.. Application of The Genetic Algorithm for a Multimode Fiber Field Analysis. CompSysTech'2001, Sofia, 2001, p.iii18-1 – iii18-5.
- [6] Ж. Жейнов. MATLAB приложение за анализ на разпространението на оптично лъчение по кръгло оптично влакно. РУ-Научни трудове т.40, серия 1.2. Русе 2003, стр. 18-22.
- [7] Ж. Жейнов. Симулация на дисперсията при многомодови световодни линии. Сп. „Компютърни науки и технологии” бр.2/2004 г., стр. 58-62.
- [8] Ж. Жейнов. Съвременни методи за анализ на оптични вълноводи и някои проблеми в тяхното използване. НВУ „В. Левски”, Шумен 2007, стр. 121-126.
- [9] Й. Урумов, Ж. Жейнов. Загуби при фотонно-кристални влакна и възможности за тяхното намаляване. Сп. „Компютърни науки и технологии” бр.1/2007 г., стр. 42-47.
- [10] Jordan Urumov, Zhejno Zhejnov. Investigation of the Influence of Deformation on the Bragg Fiber Losses. International Scientific and Applied Conference “Opto-nano electronics and renewable energy sources 2010”. Varna, 2010, p.92-96.
- [11] Ж. Жейнов, Йордан Р. Урумов. Моделиране на характеристиките на оптично влакно на Брег. Сп. „Компютърни науки и технологии” 2011 г. (под печат), 7 стр..

Abstract

The Dissertation thesis presents an accurate enough spreading of the optical radiation in a circular multimode step index, graded index and PCF fiber, by using well known classical analytical methods and techniques, a simplified analysis based on appropriate mathematical models. It finds the types of spreaded modes and displays their optical field. Based on the proposed mathematical model of the spreading, a software environment is created. It allows solving other more sophisticated application tasks - analysis of the influence of the fiber deformation on the mode structure change, a simulation of the modes distribution of the fiber radiated field from the open end of the optical fiber, as well as an analysis of the influence of the fiber parameters on the spreading modes and on the transmission characteristic.

Резюме на русском языке

Диссертация представляет достаточно точное распространение оптического излучения в круглом многомодовом волокне, имеющее ступенчатым индексом преломления, в градиентном и PCF волокне, с использованием известных классических аналитических методов и приемов, упрощенный анализ, основанный на соответствующих математических моделей. Он находит типы распространяющихся мод и отображает их оптического поля. На основе предложенной математической модели распространения создана программная среда. Это позволяет ей решать другие, более сложные прикладные задачи - анализ влияния деформации волокна на изменение структуры мод, моделирование распределения мод поля излучения из открытого конца оптического волокна, а также анализ влияния параметры волокна на распространения мод и на характеристику передач.

Съдържание

Характеристика на дисертационния труд	5
Актуалност на проблема.....	5
Цел на изследването.....	6
Задачи.....	6
Обект и предмет на изследването.....	6
Методи на изследването.....	6
Научна и практическа новост.....	7
Апробация на резултатите.....	7
Съдържание на дисертационния труд	8
Развитие на теорията и практиката на оптичните вълноводи	8
Глава 1.....	9
Глава 2.....	14
Глава 3.....	20
Глава 4.....	23
Основни изводи и предложения за практиката.....	26
Приноси по дисертационния труд.....	27
Публикации по темата на дисертацията.....	28
Abstract (резюме на английски език).....	29
Резюме на русском языке(резюме на руски език).....	29