

EXAMPLES FOR VISUALIZATION OF SOME EVENTS DURING PROPAGATION OF LIGHT IN OPTICAL FIBER

Angel Toshkov, Burgas free university

Abstract: This paper presents a demonstration of the practical visualization of light propagation in optical fibers. This method is applied in the training of students studying the principles of propagation of light in optical fibers. It is possible to visualize and comment some of the main effects in the distribution of light - total internal reflection, absorption losses, leakage, breach of critical angle, dispersion, reflection, refraction, backscattered signals, reflection losses upon insertion of the light in the fiber, the effect of the angle of incidence of light on the front of the fiber and others.

Keywords: Light, optical fiber, propagation, demonstration, full internal reflection, visualization, experiment, refraction, scattering, mode, critical angle

ПРИМЕРИ ЗА ОНАГЛЕДЯВАНЕ НА ПРОЦЕСИТЕ НА РАЗПРОСТРАНЕНИЕ НА СВЕТЛИНАТА В ОПТИЧНИ ВЛАКНА

Ангел Тошков, Бургаски свободен университет

Абстракт: В статията се разглеждат примери за визуализация на различни ефекти и явления свързани с разпространението на светлината в оптичните влакна. Тези примери намират приложение в областта на обучението на ученици, студенти и курсисти изучаващи приложението на оптичните влакна в комуникациите. Визуализират се и се коментират някои от основните ефекти в процеса на разпространението на светлината, като пълно вътрешно отражение, загуби от поглъщане, загуби от изтичане при нарушаване на критичния ъгъл, дисперсия, отражение, пречупване, обратно отразен сигнал, загуби от отражение при вкарване на светлината във влакното, влияние на ъгъла на падане на светлината върху челото на влакното и др.

Ключови думи: Светлина, оптично влакно, разпространение, експеримент, демонстрация, отражение, пречупване, разсейване, мода, моди, критичен ъгъл

Въведение

Използването на подходящи експерименти в процеса на обучение е основен метод за получаване на реални и устойчиви знания в процеса на обучение.

Използването на презентации, при които може да се онагледят теорията в процеса на обучение е предпоставка за повишаване на мотивацията на студентите за по-подробно запознаване и разбиране на изучаваните теории, процеси и явления.

В статията са представени и анализирани снимки, получени при демонстрации и експерименти, които се провеждат по време на лекции и упражнения в бакалавърския курс и при обучението на курсисти по комуникации и по компютърни системи и технологии в Бургаски свободен университет. Експериментите позволяват да се онагледят някои от изучаваните процеси и явления при разпространението на светлината в оптично влакно, като процесите са пренесени в макро-среда.

Цел на разработката

Целта на тези примери е да се покаже как някои ефекти могат да бъдат онагледени и коментирани в процеса на преподаване на теорията и практическото приложение на оптичните влакна.

Задачи на настоящата разработка

Разпространението на светлината в оптичните влакна за целите на комуникациите става при условия, които не позволяват директното и наблюдение с невъоръжено око. Обикновено, в процеса на преподаване за обяснение се използват различни теоретични модели, графики и схеми.

Задачата на тази статия е да бъдат показани част от явленията, които се случват при разпространението на светлината в оптично влакно, като бъдат визуализирани по начин, по който да се наблюдават ясно с невъоръжено око. Това дава възможност на студентите, учениците и курсистите да придобият много по-устойчиви и дълготрайни знания в процеса на обучение в тази област.

В [1] е показано, че такива експерименти могат да бъдат проведени при използването на поликарбонатен цилиндър с коефициент на пречупване $n = 1.58$ за ядро на вълновод и използването на въздуха като обвивка. В конкретния случай в [1] са използвани такива с размери – дължина 160mm и диаметър 8mm.

За целите на презентациите, също така, могат да бъдат използвани и различни други подходящи материали, както и заготовки за изтегляне на оптични влакна, специално създадени за целите на експериментите. Като източници на светлина са подходящи различни видове лазерни устройства, полупроводникови, твърдотелни или газови лазери. Изискванията към тези устройства са да имат достатъчна изходна мощност (например в диапазона 0,5 mW до 10 mW), да излъчват във видимата област (380-760 nm, като предпочитан диапазон е 450-680 nm) и да са по-възможност монохроматични или излъчващи много тясна спектрална лента, с широчина до няколко нанометра (например 1 до 10 nm).

Нехомогенността на материала на вълновода, наличието на големи загуби и вътрешни включвания и дефекти в определени количества могат да допринесат за подобряване на визуализацията на някои ефекти. В този смисъл е необходим прецизен подбор на диелектричния вълновод за целите на съответната демонстрация.

Посредством такава опитна постановка е възможно да се наблюдават и да бъдат обяснени голям брой явления, понятия и ефекти, които се случват по време на разпространението на светлината в оптично влакно.

Ето някои от ефектите, които са разгледани в настоящата статия:

- ✓ Отражение и пречупване на светлината при попадане на челото на оптично влакно - границата на две оптически проводящи среди с различен коефициент на пречупване;
- ✓ Принцип на пълното вътрешно отражение;
- ✓ Кумулативни загуби в оптичните влакна;
- ✓ Връзка между ъгъла на приемане и загубите на светлинна енергия;
- ✓ Изтичане на светлинна енергия от ядрото на оптичните влакна при нарушаване на критичния ъгъл при разпространение;
- ✓ Обяснение на понятието - „Пространствена магистрала”
- ✓ Връзка между разстоянието на предаване на оптичната енергия и различните моди.
- ✓ Разсейване и отражение на светлината;
- ✓ Разсейване в следствие на конструктивни дефекти и нееднородности;

- ✓ Обратен отразен светлинен поток;
- ✓ Обяснение на принципа на изграждане на OTDR.

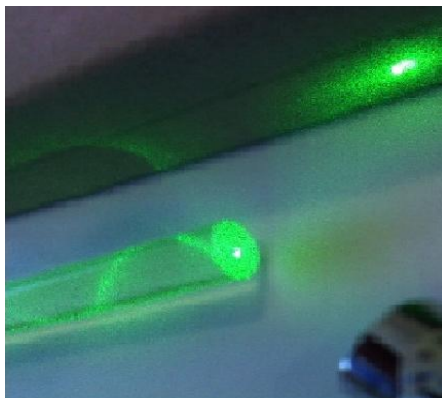
Използвано оборудване за демонстрациите

За провеждане на експериментите са използвани:

- InRb твърдотелен лазер, излъчващ на дължина на вълната 532 nm (зелена светлина) с регулируема мощност на излъчване от 0,5mW до 10 mW;
- полупроводников лазерен диод с дължина на вълната 650 nm (червена светлина) и мощност на излъчване 0,5mW;
- HeNe газов лазер, с мощност 100 mW и дължина на вълната 660nm (червен цвят). Лазерът се използва с атенюатор.
- Програмируем източник на светлинно излъчване с дължина на вълната 600-1600 nm и изходна оптична мощност 0,7 mW.
- поликарбонатен цилиндър с коефициент на пречупване $n_1 = 1.58$ за ядро на вълновод и използване на въздуха като обвивка с размери – дължина 160mm и диаметър 8mm;
- стенд за закрепване на източниците;
- измервател на оптична мощност – Anritsu OPM ML910A, сонда – MA9802A
- фотокамери.

Резултати от експериментите.

1. Демонстрация на отражение и пречупване на светлината при попадане на челото на оптично влакно - граница на две оптически проводящи среди с различен коефициент на пречупване.



Фиг. 1 Отражение и пречупване на границата на две среди.

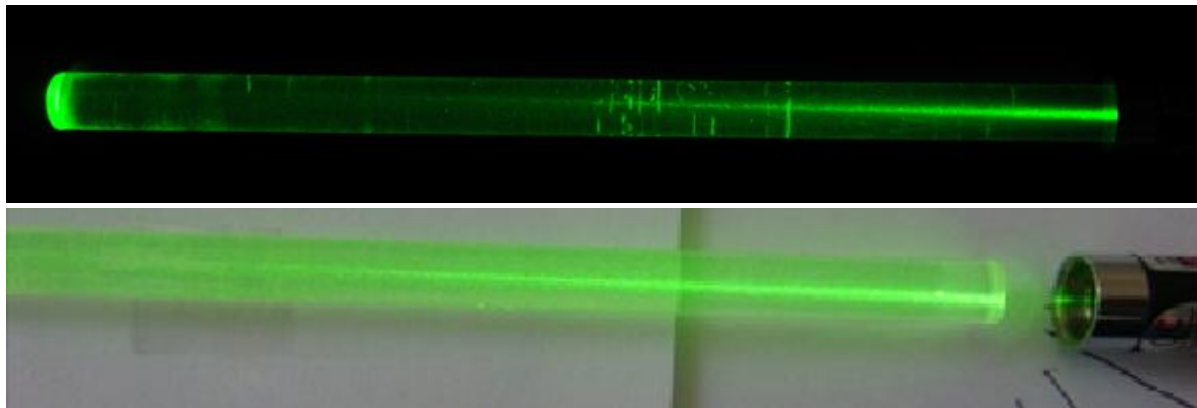
На фиг. 1 се наблюдава ефектът на отражение и пречупване на светлината на границата на две среди с различен коефициент на пречупване. В случая въздух и поликарбонат. При определени условия, пречупеният лъч навлиза и започва да се разпространява в диелектричната среда (оптичното влакно), по закона за пълно вътрешно отражение. Част от енергията, тази на отразения лъч (светещата точка върху страничната преграда) се губи, като обикновено се поглъща от околната среда.

Точно този ефект се получава на мястото на свързване на оптични влакна с оптични съединители, когато между влакната има въздушна междина, или при вкарването на светлина от източник в оптично влакно (както в случая).

2. Кумулативни загуби в оптичните влакна.

На фиг. 2 светлинният лъч е въведен под ъгъл близък до 90^0 спрямо нормалата към челото на вълновода. Вътре в него, тя се разпространява успоредно на надлъжната му ос. В началото, лъчът е фокусиран, като на някакво разстояние от началото той се разфокусира. (Практически, в конкретния пример, лъчът не се разфокусира напълно, но плътността на енергията му намалява дотолкова, че отразената и разсеяна светлина не

са достатъчни за да се види пътя му). Светлината се отразява, разсейва и поглъща вътре във вътрешността на вълновода. Това се получава поради факта, че тя взаимодейства с материалната среда в която се разпространява. Там, където светлинната енергия е с най-висока плътност, там тези ефектите на отражение и разсейване са най-изразени, благодарение на което разпространението на лъча става видимо.

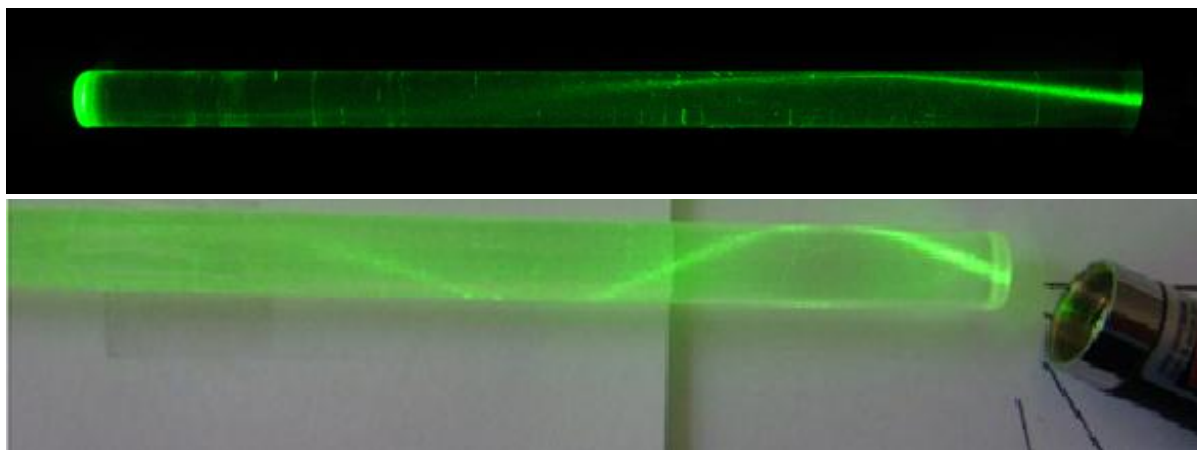


Фиг. 2 Светлинен лъч разпространяващ се успоредно на оста на влакното.

3. Принцип на пълното вътрешно отражение.

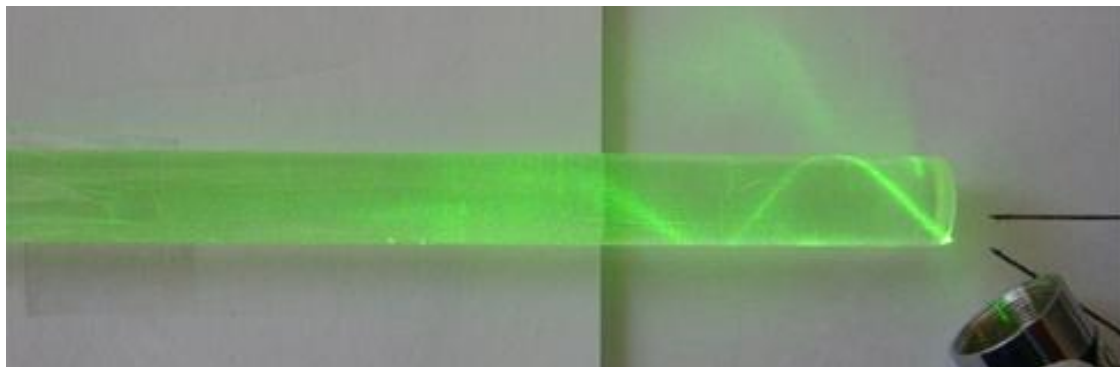
Светлината, разпространяваща се в оптично влакно се подчинява на закона за пълно вътрешно отражение [1],[2],[3],[4],[5].

На фиг. 3 се наблюдава промяната на траекторията на светлинния лъч при промяна на ъгъла на вкарване на светлината спрямо челото на вълновода. Светлинният лъч започва да се разпространява по закона на пълното вътрешно отражение.



Фиг. 3 С увеличаване на ъгъла на вкарване на светлината, светлинният сноп започва да се разпространява по закона за пълно вътрешно отражение.

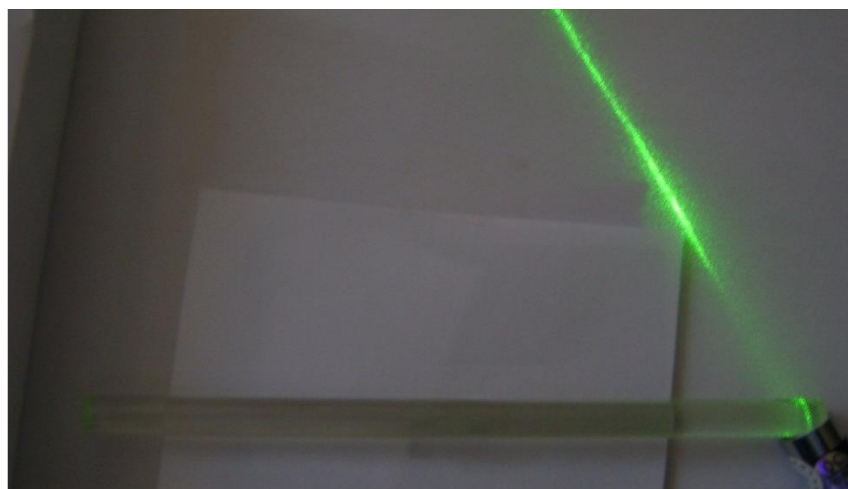
При разпространението си в сърцевината лъчът започва да намалява интензитета си и се разфокусира. С увеличаването на ъгъла на вкарване на светлината във вълновода част от светлината се преобразува в отразена и разсеяна светлина на по-късо разстояние от началото на диелектричния вълновод спрямо лъча, който се разпространява успоредно на надлъжната ос на вълновода. Колкото по-голямо разстояние изминава светлината в диелектричния вълновод, толкова по-големи са и загубите, които се получават. Същото се случва и в оптичното влакно. Това се вижда добре при сравняване на фиг. 2,3 и 4.



Фиг. 4. Разстоянието при което се губи фокусировка е пропорционално на дължината на пътя, който светлината изминава в оптичното влакно. В случая пълното разфокусиране става когато светлината измине повече от 12 см в диелектрика измерено по траекторията на лъча.

4. Изтичане на светлинна енергия от ядрото на оптичните влакна при нарушаване на критичния ъгъл при разпространение.

В случаите, в които ъгълът на падане на светлината върху челото на влакното излезе от конуса на приемане, на границата на ядро-обвивка в оптичните влакна се нарушава условието за пълно вътрешно отражение. В следствие на това по-голямата част от енергията се пречупва и навлиза в обвивката, а друга, по-малка част се отразява и остава в ядрото. Практически тази пречупена и навлязла в обвивката (в конкретния пример във въздуха) светлинна енергия се поглъща или изтича и се губи. Този ефект може да се види на фиг. 5.



Фиг. 5. При много голям ъгъл на вкарване голяма част от светлината се пречупва и изтича в обвивката, откъдето в последствие се губи. Малка част остава в ядрото, но поради нарушаване на условието за пълно вътрешно отражение изтича много бързо от ядрото. Ясно се вижда, че светлината в края на вълновода е много по-слаба и там той изглежда тъмен.

5. Връзка между разстоянието на предаване на оптичната енергия и различните моди.

Количеството енергия, което достига до края на оптичното влакно освен от качествата на материала, дължината на вълната, ширината на спектралната лента, конструкцията на вълновода и други параметри зависи и от това под какъв ъгъл спрямо оста на влакното се разпространява светлината в сърцевината му. Явно е, че колкото

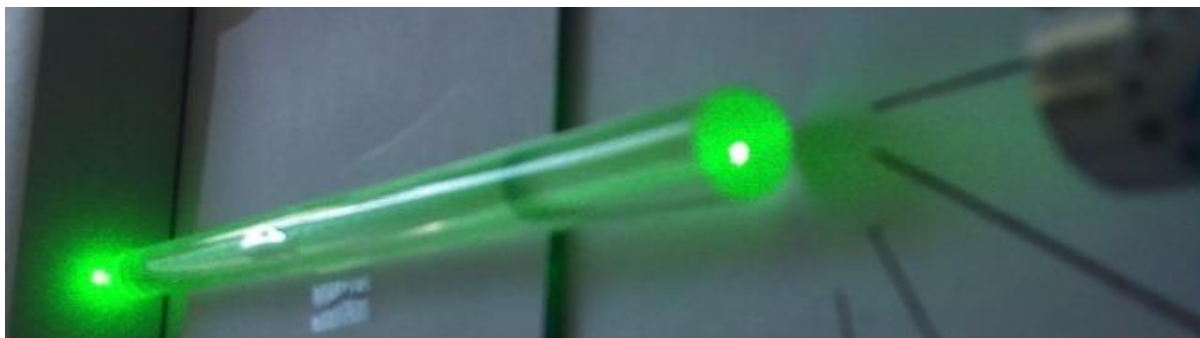
този ъгъл е по-голям (ъгълът спрямо надлъжната ос на вълновода) толкова по-дълъг път ще измине светлината, съответно толкова по-големи загуби ще претърпи. Този ефект може да се види на фиг. 6 до фиг. 10. Интензитетът на изходната светлина в края на вълновода се наблюдава с невъоръжено око върху екрана, поставен на изхода на световода.

Ако в едно оптично влакно с достатъчно голяма сърцевина се вкара успореден сноп от полихроматична светлинна енергия, то различните дължини на вълните ще се отразят от обвивката под различен ъгъл и ще започнат да се разпространяват по различни траектории в сърцевината. Тези траектории се наричат „Пространствени магистрали”. Ефектът е подобен на вкарване на светлината под различен ъгъл в оптичното влакно. На снимките на фиг.2 до фиг.4 на практика наблюдаваме няколко различни пространствени магистрали.

Поради факта, че светлинните лъчи с различни дължини на вълните се движат с различни скорости или поради това, че изминават различно разстояние в ядрото на оптичното влакно при наличие на повече от една моди се наблюдава така наречената междумодова дисперсия.

6. Връзка между ъгъла на приемане и загубите на светлинна енергия.

На фиг. 6 светлината се разпространява успоредно на оста на влакното. На следващите снимки са представени за визуална оценка изходните мощности достигащи края на влакното. Светлинното петно, което попада върху екрана в края на вълновода видимо намалява интензитета си при увеличаване на ъгъла на вкарване на светлината във влакното. Измерване на интензитета, както и прецизни измервания в случая не са необходими, поради факта, че експериментите имат демонстрационен характер и е наблегнато на чисто визуалните ефекти. Основната идея е ефектите да се визуализират и да са наблюдаеми ясно и отчетливо с невъоръжено око.



Фиг. 6 Светлинното петно върху екрана поставен след края на вълновода е с изразена концентрация на енергия в центъра на петното. Лъчът преминава през диелектрика без да се отразява, а дължината на вълновода е малка за да се получи пълно разфокусиране на снопа

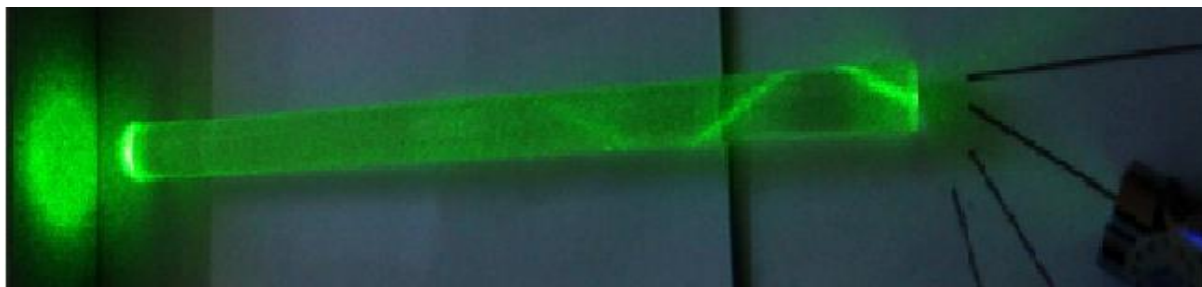
За информация може да бъде дадена количествена оценка на изходните мощности при различни ъгли θ на вкарване на светлината спрямо нормалата към челото на влакното.

За прецизни изчисления е необходимо да се отчете фактът, че при увеличаване на ъгъл θ количеството на отразената от челото на вълновода енергия се увеличава. Това води до намаляване на общата енергия постъпила във влакното. В случая тази допълнителната загуба усилва чисто визуалният ефект на намаляване на изходната енергия в края на вълновода.

Изходната оптична мощност на InRb лазера за конкретния експеримент е 8,5 mW, мощностите на изхода на вълновода са следните:

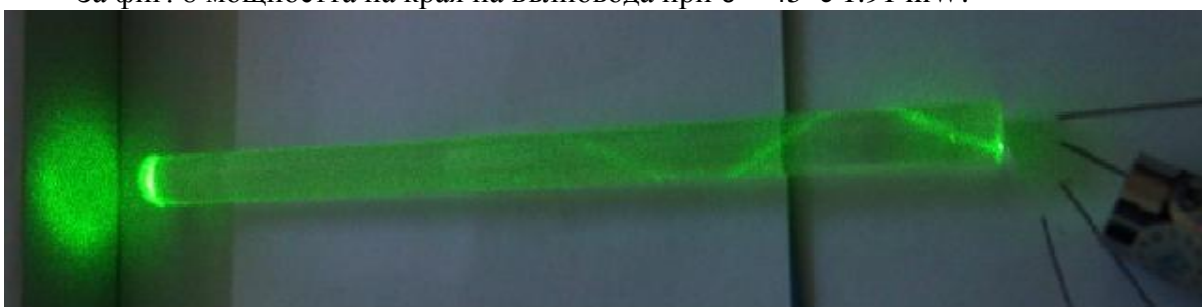
За Фиг. 6 мощността на изхода на влакното при $\theta = 0^0$ е 2.21 mW.

За фиг. 7 мощността на изхода на влакното при $\theta = 30^0$ е 2.02 mW.



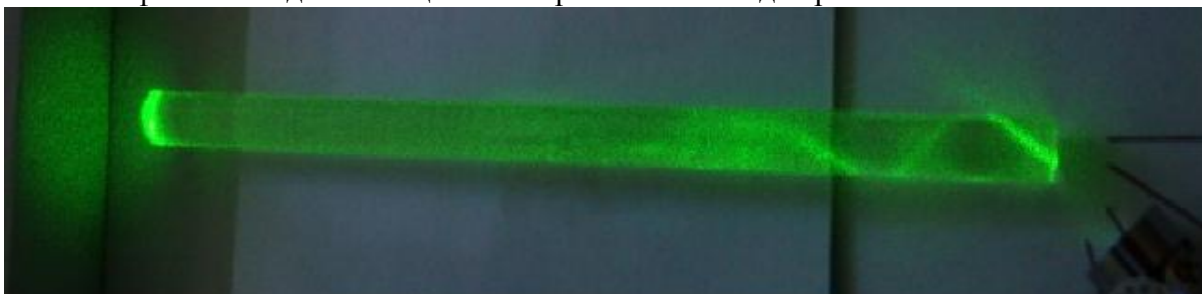
Фиг. 7 При вкарване на светлината под ъгъл светлинното петно на екрана след изхода е с намален интензитет. Лъчът се разфокусира във вълновода. Загубите са увеличени, а осветяването на екрана става равномерно

За фиг. 8 мощността на края на вълновода при $\theta = 45^0$ е 1.91 mW.



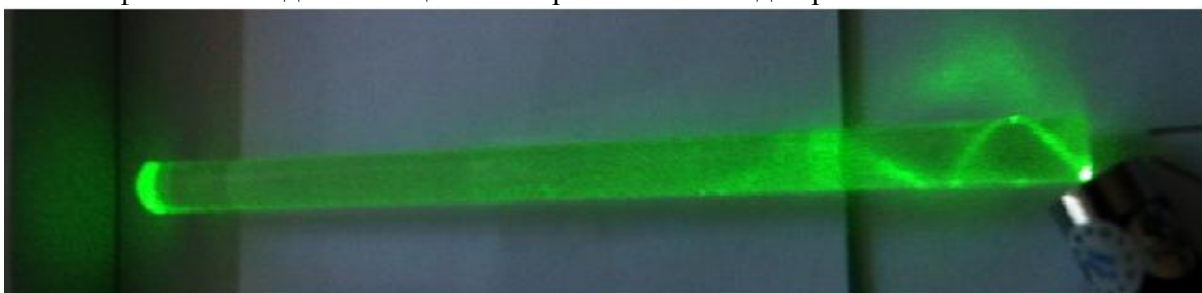
Фиг. 8 При увеличаване на ъгъла на падане върху челото интензитета на изхода на влакното намалява поради това, че светлината изминава по-дълъг път и търпи повече загуби.

За фиг. 9 изходната мощност на края на вълновода при $\theta = 60^0$ е 1.73 mW.



Фиг. 9 В началото на вълновода се появява светлинно петно в следствие на това, че част от енергията изтича от ядрото. Това става поради нарушаване на условието за пълно вътрешно отражение.

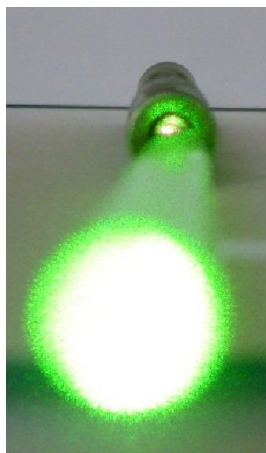
За фиг. 10 изходната мощност на края на вълновода при $\theta = 75^0$ е 1.5 mW.



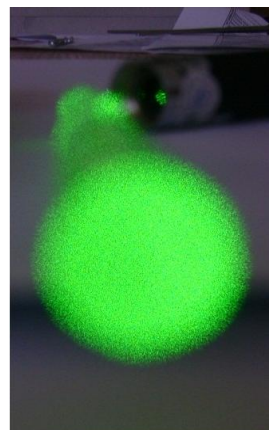
Фиг. 10 Светлината попада на границата диелектрик-въздух под ъгъл по-малък от критичния. В следствие на това светлинната енергия се губи в околното пространство.

В следствие на различните видове загуби и основно на отражението и разсейването, от едно разстояние нататък, светлината се разпределя равномерно в

сърцевината, независимо от това под какъв ъгъл е вкарана първоначално Фиг. 11 и Фиг. 12.



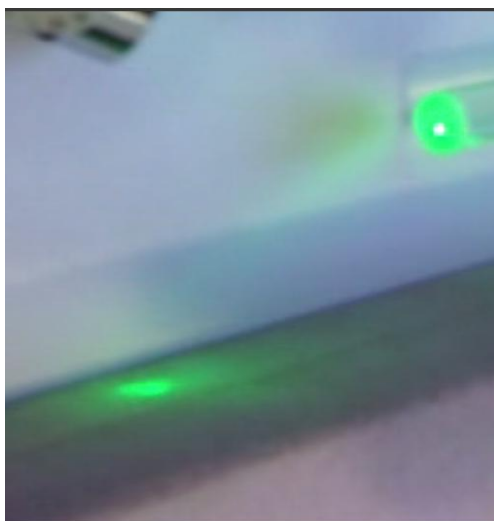
Фиг. 11 Плътност на оптичната мощност на изхода на вълновода при $\theta = 0^\circ$



Фиг. 12 Плътност на оптичната мощност при $\theta = 60^\circ$

7. Обратен отразен светлинен поток и демонстрация на принципа на изграждане на OTDR.

На фиг. 13 могат да се проследят траекториите на падащия и отразения лъч. Отразеният лъч попада върху страничната стена и се вижда като светеща точка върху нея. Поради това, че челото на диелектричният вълновод не е идеално гладко,



Фиг. 13. Обратен разсеян сигнал в следствие на ефекта на Релей

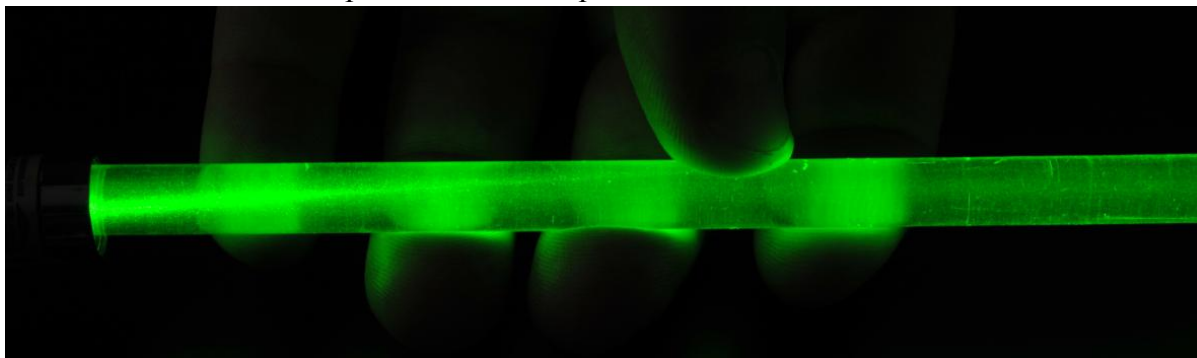
наблюдаваме дифузно отражение, което се проявява като светеща точка на челото на вълновода. Тя се появява там, където лазерният лъч попада на челото и плътността на светлинната енергия е най- висока. Освен нея, обаче, на фиг. 13 се наблюдава и по-слабо равномерно осветяване на цялото ядро (в зелен цвят). Това равномерно светене се дължи на Релеевото разсейване. В следствие на този ефект, част от светлината се връща и в посока обратна на посоката на разпространение на основния поток със същата дължина на вълната. Освен тази светлина, в обратна посока се връща и светлина дължаща се на ефекта на Раман и на ефекта на Брилюен. Светлината от тези ефекти не може да бъде наблюдавана поради много ниският и интензитет. Ако можеше да се наблюдава, част от обратен разсеяната светлина в следствие на ефекта на Раман щеше да се вижда като синя. Тази обратно отразена светлинна енергия се

използва за създаването на измервателни уреди измерващи затихването във влакното – OTDR, температура – DTS и други физични и акустични величини.

8. Разсейване и отражение на светлината във вълновода.

В следствие на отражението и на разсейването, част от светлината във вълновода се отклонява от първоначалният си път в други посоки. Част от енергията на тези разсеяни или отразени от локални нееднородности и дефекти светлинни лъчи може да бъде загубена. Тази загуба се дължи на това, че попадайки на границата на диелектрич-въздух, ъгълът на падане може да не отговаря на изискването за реализация на пълно вътрешно отражение. В следствие на това, част от енергията изтича от вълновода в околното пространство (или в обвивката при оптичните влакна) и се губи.

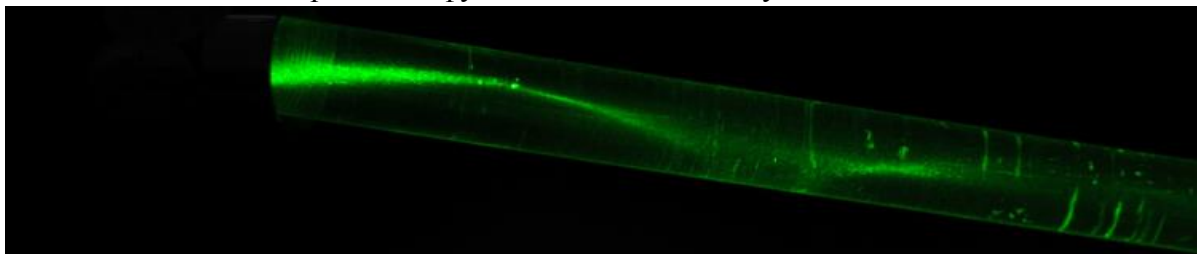
На фиг. 14 това се вижда много добре. Изтичащата от ядрото енергия става видима в следствие на отражението и от пръстите.



Фиг. 14. Пример за визуализация на загубите на светлинна енергия напускаща ядрото на оптичното влакно.

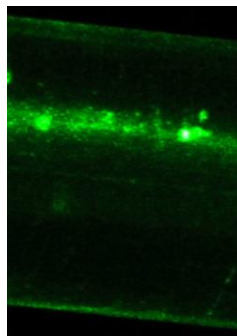
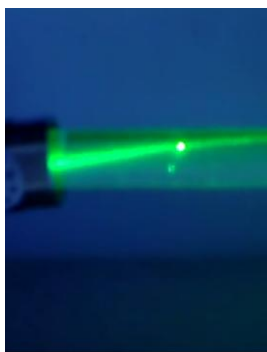
9. Разсейване и отражение в следствие на конструктивни дефекти и нееднородности.

На фиг. 15 се вижда отразената от конструктивни дефекти светлина. Светлите напречни петна се дължат на надрасквания по повърхността на вълновода. От тези места светлината се отразява дифузно и част от нея напуска вълновода.



Фиг. 15 Пример за визуализация на загубите на светлинна енергия в следствие на конструктивни дефекти на ядрото.

Наличието на дефекти вътре в структурата на оптичния вълновод води до загуби



Фиг. 16 Отражение от вътрешни дефекти

на светлинна енергия в следствие на отражение, разсейване и поглъщане. Светещите точки на снимките от фиг. 16 се появяват в следствие на наличие на въздушни мехурчета в диелектричния вълновод. При попадане на светлината върху някое от тях част от нея се отразява в различни посоки. При достатъчно висока мощност на лазерния източник тази светлина може да се наблюдава като светеща точка.

Изводи:

Представените експерименти позволяват да се визуализира пътя, който светлината изминава в процеса на разпространението си в оптичните влакна.

Посредством подходящи опитни постановки е възможно да се наблюдават и да бъдат обяснени голям брой явления, понятия и ефекти, които се случват по време на това разпространение.

При правилна интерпретация на получените визуални резултати и използването на подходящи аналогии, разбирането на принципите на разпространение на светлината в оптичните влакна става много по-достъпно и лесно за усвояване от учениците, студентите и курсистите в областта на комуникациите. Познаването на тези принципи води до появата на допълнителна мотивация и увереност при изучаването на иначе тежката теория на разпространението на светлината в оптичните влакна. Това от своя страна е предпоставка за подготвянето на специалисти с висока квалификация в областта на комуникациите.

References:

[1] TOSHKOV A., Макро визуализация на разпространението на светлината в оптично влакно, Международна научна конференция „Знанието – традиции, иновации, перспективи“, 14-15 юни 2013 г., БСУ, Бургас.

[2] ТОШКОВ А., „Оптични комуникации”, БСУ, 2005.

[3] ТОШКОВ А., „Анализ на връзките между конструктивните и експлоатационните параметри на оптичните влакна”, Монография, Бургас, 2011, Изд. „Онгъл”, Варна.

[4] VANDERGRIFF Linda J., Nature and Properties of Light, Fundamentals of photonics, Module 1.1, Science Applications International Corporation, McLean, Virginia

[5] PEDROTT Leno S., Basic Geometrical Optics, Fundamentals of photonics, Module 1.3, CORD, Waco, Texas.