НЕЛИНЕЙНИ ЕФЕКТИ В ОПТИЧНИТЕ ВЛАКНА И ТЯХНОТО ВЛИЯНИЕ ВЪРХУ ПАРАМЕТРИТЕ НА ПРЕДАВАНЕ

Ангел Захариев Тошков, БСУ

NONLINEAR EFFECTS IN OPTICAL FIBERS AND THEIR INFLUENCE OVER TRANSMISSION PARAMETERS

Angel Z. Toshkov, BFU

***Abstract**: This article discusses the nature of nonlinear effects and particularly the nonlinear effects in optical fibers. The article is prepared for easily understanding of these effects from students teaching disciplines like optical communications, optical networks and optical networks building. There have not necessary deep theory, but just knowledge about the matter of the tings.*

***Key words:** nonlinear effects, optical fibers, transmission parameters, Brillouin, Raman*

В статията се обсъждат проблеми свързани с нелинейните ефекти при разпространението на светлината в оптически проводяща среда и в частност в оптичните влакна. Статията е изготвена с цел да се даде обяснение на тези ефекти за по-лесното разбиране на същността на нещата от студентите изучаващи дисциплини като „Оптични комуникации„, Оптични мрежи”, „Изграждане на оптични мрежи” и др. в бакалавърските и магистърски курсове на Бургаски свободен университет. При изучаването на тези дисциплини не е необходимо запознаване с теоретичните проблеми в дълбочина, но е необходимо да се познават причините за нелинейните ефекти и да се прави разлика между тях .

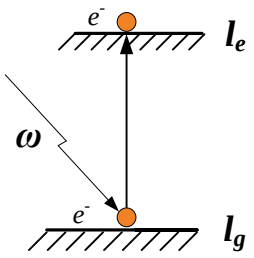
В общият случай, нелинейните ефекти в оптичните влакна водят до загуби на оптична енергия, което влошава качеството на предаване по оптичните влакна. Освен това, в някои случаи те водят и до смесване на каналите при вълново уплътняване на влакната, което от своя страна довежда до влошаване на съотношението сигнал-шум и отново до влошаване на качеството на предаване. На нелинейните ефекти се дължи и част от общата дисперсия на сигналите при цифрово предаване на информация по оптичните влакна. Като цяло, нелинейните ефекти имат силно негативен ефект върху качеството на предаваната по оптичните влакна информация. Някой от техните особености, обаче, могат да бъдат използвани за други цели. Използвайки факта, че при някои от нелинейните ефекти, при определени условия, се прехвърля енергия от една дължина на вълната на друга, то те могат да бъдат използвани за създаване на оптични усилватели. Друг ефект, това е, че в следствие на нелинейните ефекти, част от разпространяващата се в права посока светлина се разсейва и се връща в обратна посока към източника на светлината. Познаването на различните ефекти може да ни даде информация за много характеристики на влакното по неговата дължина, особено при съчетаване на прецизния спектроанализа и рефлектометрията във времевата област - OTDR.

Въпроси за причините, пораждащи нелинейните ефекти в оптичните влакна намират отговор в квантовата механика и в квантовата електродинамика. Доколкото тези теории са предмет на изучаване на физиката, то голяма част от студентите обучавани в областта на оптичните комуникации се оказват неподготвени за разбиране на същността на тези важни ефекти. Именно на тези особености се обръща внимание в тази статия или по-точно – дава се една опростена интерпретация на въпроси като - каква е причината поради която един фотон, разпространяващ се в оптически проводяща среда променя честотата или дължината на вълната си, както и други въпроси от този тип.

Вероятността, един фотон да премине от една честота на друга или да претърпи честотно отместване е свързана с количеството енергия, което той губи или получава. Обменът на енергия е в следствие на нееластичното взаимодействие с електроните намиращи се на определени орбитални нива в атомарната структура на средата в която светлината се разпространява. Намирайки се на дадена орбита, електроните притежават точно определена енергия. Едно от основните положения в квантовата механика е, че енергията на електрона е квантувана, т.е. може да има само точно определени дискретни стойности. В следствие на това, енергията на фотоните също е квантувана.

В зависимост от това, дали фотонът губи енергия или получава такава се формират и две нови спектрални ленти – съответно ***Stokes*** (с по-голяма дължина) и ***Anti-Stokes*** (с по-малка дължина).

Характерното е, че при монохроматичен сноп двете нови спектрални ленти съдържат фотони с краен брой различни дължини на вълните.



Фиг. 1 Диаграма на абсорбция на енергията на фотон от електрон

Ако падащият сноп е с линейна поляризация, то поляризацията на разсеяните фотони е същата (***паралелно разсейване***) или перпендикулярна (***ортогонално разсейване***).

Интересен е фактът, че ако вече има фотони на някои от отместените честоти, то вероятността нови фотони да получат същото отместване се увеличава (***стимулирано разсейване***). Излъчването на фотон със спектрална дължина в която няма други фотони е значително по-малка и се нарича ***спонтанно разсейване.***

Колкото по голяма е вкараната във влакното оптична мощност, толкова по-голям е и броят на взаимодействащите си фотони с електрони, като над определена мощност се достига до състояние на лавинообразно нарастване на този ефект и стимулирано излъчване.

Същност на нелинейните ефекти.

За да разберем същността на тези ефекти трябва да се запознаем с онова, което се случва с фотоните, когато те пътуват в оптически проводящи среди.

- **Режим на поглъщане на фотони**

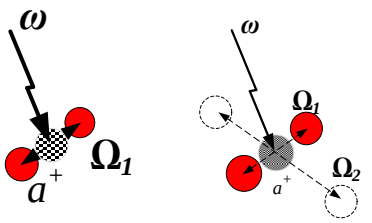
Най-простият вариант е поглъщане на единичен фотон (Фиг. 1). Електрон намиращ се в основно състояние с енергия l_g поглъща енергията на фотона с кръгова честота ω и преминава във възбудено състояние l_e. Разликата между двете състояния основно и възбудено за карц (SiO_2) е около 10eV. Това отговаря на енергията на фотон от ултравиолетовата област с дължина на вълната около 124nm. Поради тази причина

обикновените кварцови стъкла поглъщат силно светлина в ултравиолетовата област, но са прозрачни за видимата светлина.

- Друг модел на поглъщане на енергията на фотон (Фиг. 2), това е анихилация на фотона с ъглова честота *ω* и създаването на *фонон* с ъглова честота Ω_1.

При газовете, енергия може да бъде съсредоточена във атомите на газа, когато те трептят в определена посока с определена честота, отклонявайки се от едно равновесно положение. При това трептене енергията е концентрирана в електромагнитното поле (основно електрическо), създавано от трептящите електрически натоварени атоми.

Електромагнитното поле взаимодейства с материята, като може да усвоява енергия, пропорционална на честотата на трептене на атомите. *Доколкото атомът може да трепти в различни посоки, то съществуват и различни вибрационни режими*. Т.е. един атом може да трепти в различни направления с различни честоти Ω_1, Ω_2 и т.н. Фиг. 2,б.

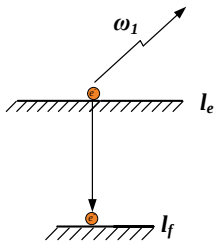


Фиг. 2 а) б)

Диаграма на анихилация на енергията на фотон и преминаване в енергия на фонон.

Количеството енергия, която може да се съхранява във вибрационните режими е квантувано. Когато става въпрос за твърди тела, вибрационните режими се наричат ***фононни режими***, а квантите енергия съсредоточени в тези трептения се наричат ***фонони***. Честотите на тези трептения могат да бъдат различни, и зависят от масите на атомите и техните връзките с други такива в атомната решетка.

Обикновено в твърдите тела не трепти единичен атом, а фононният режим обхваща група от атоми в колективно трептене. Тази група от атоми е разположена в пространството на разстояние доста по-голямо от дължината на вълната на преминаващите фотони. При някои материали, това би довело до много проблеми при опита да се обясни ефекта на Раман например, и това, защо се получават нови дължини на вълните на места, които изглеждат неестествени. При кварца обаче, като и при повечето аморфни твърди тела, атомарнта структура има относително правилна ориентация (макар и не кристална). Трептящите атомни групи имат относително постоянен размер, което облекчава анализа и го прави подобен на този при газовете.



Фиг. 3 Флуоресценция.

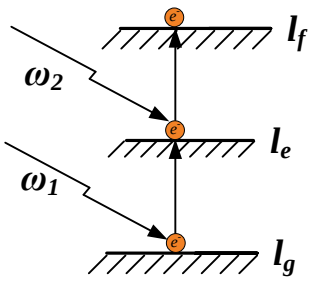
Честотите на трептене на вибрационните режими при фононните режими при твърдите тела обикновено са по-малки от честотата на погълнатите оптични фотони. При газовете например, периодът на трептене при вибрационните режими е около 1fs, докато при твърдите тела за фононните режими е от порядъка на 100fs. (3,33 фемтосекунди отговарят на периода на трептене на фотон с дължина на вълната 1 μм).

- Излъчване на единичен фотон - Флуоресценция.

Електрон намиращ се във възбудено състояние с енергя l_e преминава основно състояние с енергия l_g като излъчва фотон кръгова честота ω_1 - Фиг. 3.

Трябва да отбележим, че поглъщането и изпъчването на фотон са независими събития. Електрон, който е погълнал енергията на фотон може да премине в друго енергийно състояние, като излъчи фотон с друга ъглова честота ω_2. Времето за съществуване на електрон във възбудено състояние е ограничено, поради което преходите на електроните от едно енергийно ниво на друго могат да бъдат многократни и един електрон може многократно да поглъща и излъчва фотони. Когато излъченият фотон е с честота или дължина на вълната, които отсъстват от спектралната лента – тогава имаме спонтанно излъчване. Т е – появява се нова мода. Много по-голяма е обаче вероятността да се излъчи фотон, който има ъглова честота равна на съществуващи вече моди – стимулирано излъчване. Т.е. вероятността да бъде излъчен фотон с определена честота е право-пропорционална на количеството фотони с тази честота, преминаващи през мястото на излъчване.

По принцип, излъчването на фотони наричаме флуоресценция - Фиг. 3. В случая, преминавайки от възбудено състояние към състояние с по-ниско енергийно ниво, електронът може да излъчи фотон с енергия (респективно честота) по-голяма или по-малка от тази на погълнатия фотон. В случаите, когато имаме излъчване на фотон с по-малка енергия от погълнатия имаме така наречената Stokes флуоресценция. В обратния случай - с по-голяма енергия – Anti-Stokes флуоресценция. Във видимите дължини на вълните флуоресценцията, дължаща се на ефекта на Раман е изключително слаба. Тя е характерна за по-големите дължини на вълните, в инфрачервения обхват.



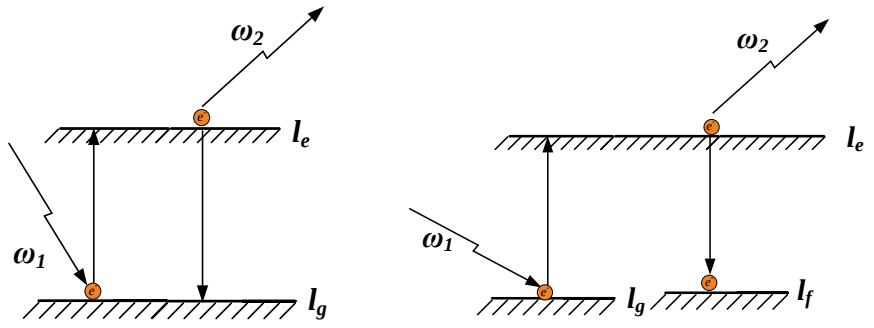
Фиг. 3 Диаграма на поглъщане на енергията два фотона

- Поглъщане на два фотона (двуфотонни процеси).

Това е ситуация, подобна на поглъщането на единичен фотон, само че тук погълнатата енергия се доставя от два фотона с различни ъглови честоти ω_1 и ω_2. Двуфотонни процеси можем да имаме и при енергийни нива, които могат да бъдат реализирани от еднофотонен процес напр. при оптично влакно легирано с Германий, за преминаване от основно във възбудено състояние са необходими около 5eV. Тази енергия може да бъде получена както от единичен фотон с дължина на вълната в ултравиолетовата област - Williams [1], така и от два фотона с по-голяма дължина на вълната - Mizunami [2].

- Поглъщане и излъчване на фотон. Линеен индекс на пречупване и дисперсия.

Възможни са и различни варианти на случаи, когато енергия на един фотон се поглъща от електрон, електронът преминава от едно състояние в друго, и веднага в трето, с по ниска енергия, излъчвайки фотон със същата ω_1 или друга ъглова честота ω_2.



а) б)

Фиг. 4 Диаграми на поглъщане и излъчване на фотон в двуфотонен процес

а)- Реемисия на фотон в същият режим – имаме ситуация на линеен коефициент на пречупване и

b) Реемисия на фотон в друг режим – но с близка енергия до тази на погълнатия – Релеево разсейване.

На фиг. 4. а) имаме ситуация, при която електрон намиращ се в основно състояние с енергия l_g преминава във възбудено l_e , поглъщайки фотон и след това се връща обратно в същото основно състояние l_g излъчвайки фотон.

В зависимост от това, дали фотонът е погълнат и след това реемитиран в същия режим или е излъчен но в друг режим, процесът се свързва в първия случай с коефициента на пречупване на средата, а във втория с Релеевото разсейване.

Необходимо е да отбележим, че в първия случай новоизлъченият фотон ще има фазова скорост различна от тази на погълнатия. Това е така, поради взаимодействието на светлината с материалнта частица. Това не означава промяна на дължината на вълната на фотона и неговата ъглова честота, но означава, че има връзка между дължината на вълната и скоростта и на разпространение в материална оптически проводяща среда. Това лесно се вижда и от връзките:

(1) $E = \hbar\omega = h.f;$

където :

E – енергия на фотона;

ω – ъглова честота на фотона;

$\hbar$ – константа на Дирак (редуцирана константа на Планк $\hbar = h/2\pi)$;

h – Константа на Планк;

(2) $\lambda.f = c;$

(3) $c = n.v;$

(4) $\lambda.f = n.v;$

където :

n – коефициент на пречупване на материала.

c – скорост на светлината във вакуум;

v – скорост на светлината в оптически проводяща среда;

f – честота на фотона във вакуум;

λ – е дължината на вълната.

$f^1 = \frac{f}{n}$ - редуцирана честота на фотона в материална, оптически проводяща среда с коефициент на пречупване n;

Условно, за да се запази дължината на вълната на фотона λ, би трябвало да се промени неговата честота f.

(5) $\lambda \frac{f}{n} = v$ *или* $f^1 = \frac{f}{n}$

(6) $v = \lambda . f^1$

Ако изразим скоростта на разпространение на фотоните от 1) и 4)

(7) $v = \lambda . \frac{f}{n} = \frac{\lambda}{h} . \frac{E}{n}$

Би трябвало да очакваме, че

(8) $v = \frac{c}{h} . \frac{E}{f^1 . n}$

Т.е имаме промяна на честотата на фотона. От друга страна е вярно, че:

(9) $v = \frac{\lambda}{h} . \frac{E}{n}$ <-> $c = \frac{\lambda}{h} . E$

Т.е скоростта на движение на фотона в оптически проводяща материална среда е намалена за сметка на намаляване на неговата енергия E.

Обяснението на феномена е следното: в следствие на факта, че електроните се намират във възбудено състояние за определено време, поглъщайки енергията на фотони, то общата енергия на съществуващите в системата фотони намалява, за сметка на енергията на електроните. Колкото по-високо енергийни са фотоните, толкова по-голяма е загубата на фотонна енергия (цялата усвоена от електроните за преминаване във възбудено състояние или от фононите). Т.е времето за преминаване на един фотон на единица дължина във влакното, ще бъде увеличено с времето за преминаване на един електрон във възбудено състояние и обратно до основно състояние. Времето е умножено по средният брой взаимодействия на този фотон с електрони за единица дължина, измината в материалната среда. Това време е различно при взаимодействие на един електрон с фотони с различна дължина на вълната.

Колкото по-високо енергийни са фотоните, толкова по-голяма е загубата на фотонна енергия (усвоена от електроните за преминаване във възбудено състояние), съответно редукцията на енергията, от там и на скоростта на по-високо енергийните фотони е по-голяма от тази на по-ниско енергийните. (Обяснено с терминологията на геометричната оптика – колкото по-висока е енергията на фотоните – толкова по-голям е за тях коефициентът на пречупване на средата n – който на практика се оказва във функция на дължината на вълната λ)

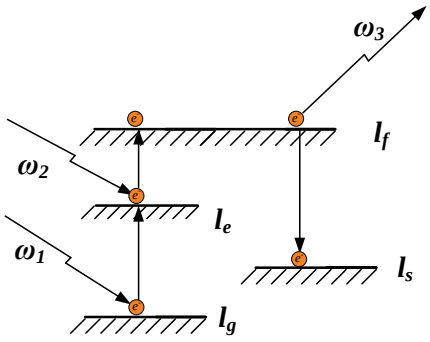
От направеното по-горе обяснение можем да заключим, че една и съща среда има различен коефициент на пречупване n за светлинни лъчи с различни дължини на вълните. Което се доказва лесно, например при наблюдаването на дисперсията на бялата светлина преминаваща през стъклена призма.

Математически е лесно да се приеме, че става въпрос за редуциране на честотата на фотона от f -> f^1 формули (5),(6). Това помага да се запази константен

коефициент на пречупване на средата при изчисленията, но не отговаря на истината. За по-подробно обяснение за решаването на вълновото уравнение на Шрьодингер виж [3].

Освен едно- и двуфотонните процеси съществуват и три и четири фотонни процеси.

На практика те представляват комбинация от първите два вида. При тях, съществуват варианти на поглъщане и излъчване на различен брой фотони, като енергията на излъчените се формира от енергията на електрон, преминаващ от едно в друго състояние и енергията на фонон.



Фиг. 5 – Трифотонен процес

На фиг. 5 е представен схематично трифотонен процес, а на Фиг. 6 са показани различни варианти на четирифотонни процеси.

При участието само на елекрони в процеса – имаме електронен нелинеен процес или електронна нелинейност. Фиг. 6.а,б

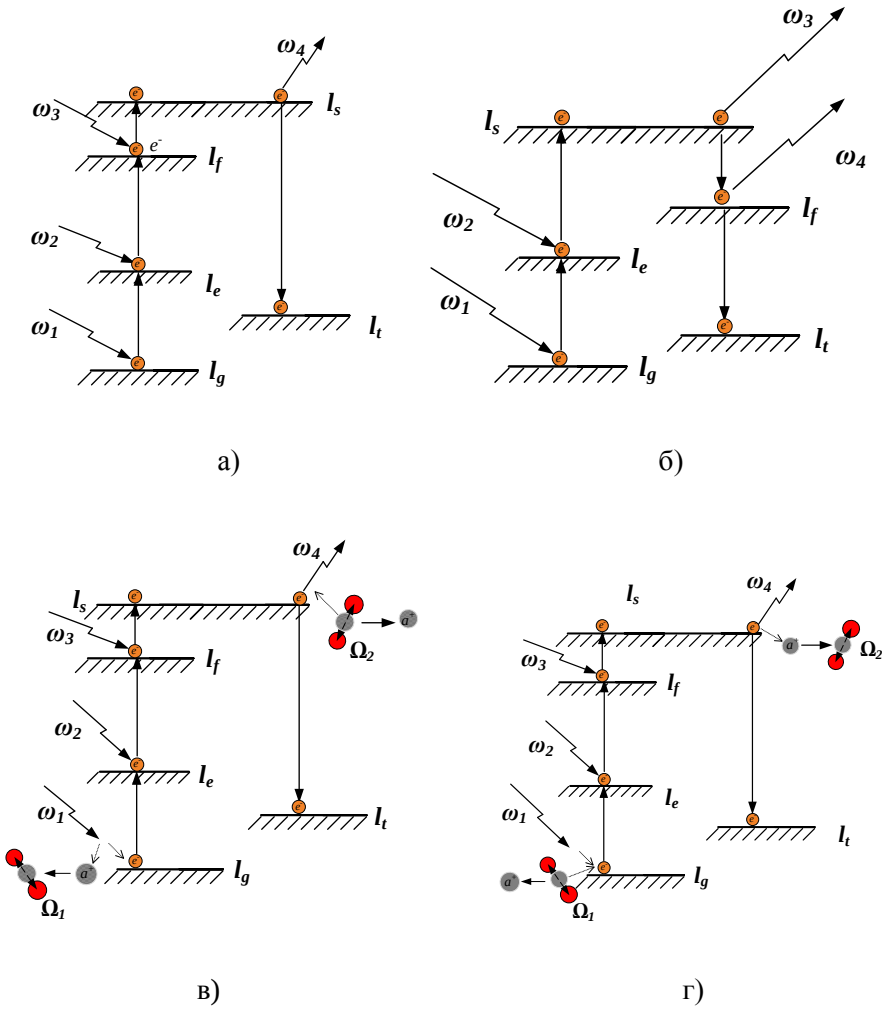
При участието и на фонони имаме – ядрен нелинеен процес или ядрена нелинейност. Фиг. 6.в,г

От гледна точка на класическата теория, ако светлината се разпространява в среда в която атомите трептят с честота Ω, то разпространяващата се светлина ще бъде модулирана с тази честота, при което ще се получат и две нови честоти ω ± Ω отговарящи на Stokes и Anti Stokes Раманово разсейване.

Четиривълново смесване.

Това е вторичен ефект, при който съществуващи светлинни лъчения на честоти намиращи се на еднакво разстояние една от друга си взаимодействат, при което например при три сигнала f_1, f_2 и f_3 - се получават резултантни сигнали в следствие на стимулиран ефект на флуоресценция.

Вариантът на взаимодействие е $f_{ijk} = f_i + f_j - j_k$, където $i \neq j \neq \kappa$ при което в следствие на интерференция се получават 12 сигнала, 3 от които лежат върху оригиналните честоти. Това води до влошаване качеството на предаване, основно при DWDM системите.



Фиг. 6. Четирифотонен процес

Заключение

В статията е дадено е обяснение на някои от основните механизми за възникване на нелинейни ефекти в оптичните влакна. Изучаването на тези ефекти за целите на курсовете по „Оптични комуникации”, „Оптични мрежи”, „Телекомуникационни мрежи и системи” и др. изучавани в БСУ не е необходимо да се прави в дълбочина. Тези ефекти, обаче лежат в основата на много важни изследвания и експерименти в областта на разпределените измервания на различни физични величини, които могат да бъдат реализирани с помощта на оптични влакна. Именно познаването на същността на нелинейните ефекти е в основата на правилното провеждане на тези експерименти [5,6,7,8] .

Литература:

1. D. L. Williams, S. T. Davey, R. Kashyap, J. R. Armitage and B. J. Ainslie, `Ultraviolet absorption studies on photosensitive germanosili-cate preforms and ¯bres,' Appl. Phys. Lett. 59, 762-764 (1991).
2. T. Mizunami, M. Hashimoto, S. Gupta, Y. Uchida and T. Shimomura,`Wavelength dependence of two-photon absorption in germanosilicate
3. R. Loudon, The quantum theory of light, 2nd Edn (Oxford University, Press, Oxford, 1983
4. L. E. Ballentine, Quantum mechanics (Prentice Hall, Englewood Cli®s,N.J, 1990).
5. B. H. Bransden and C. J. Joachain, Introduction to Quantum mechanics, (Longman, Essex, 1989).
6. Г.Д. Петков, М. И. Илиев, Д.Я. Дочев, Т.Б. Илиев. Симулационна оценка на устойчивостта на смущения на канали за предаване на дискретни съобщения в условията на междусигнална интерференция. Сборник доклади на Юбилейна научна сесия2004,Национален военен университет „Васил Левски" факултет Авиационен,. Долна Митрополия, том 2, 2004 г, 61-67
7. Петков П. Илиев М. П., Дочев Д.. Устойчивост на смущения при приемането на оптически сигнали в условията на въздействие на съвкупност от квантови и други шумове, Научни трудове на Русенски университет "Ангел Кънчев" -2003 г. том 40. серия 1.2, 98 -102.
8. Anton Sl. Georgiev and Neli G. Georgieva. Prior Reliability Extraction of the Electronic Apparatus by means of Bayesian Techniques Prediction. International conference “Tehnonav’06” - Section 3, 19-21, May, 2006. Ovidius University of Constanta – Faculty of Mechanical, Industrial and maritime Engineering. Proceedings of 5-th International conference “Tehnonav’06”, pp. 451-454, ISBN-973-614-307-4 978—973-614-307-6 Ovidius University Press, 2006. Constanta, Romania.