

ВЛАКНЕСТО-ОПТИЧНИТЕ КОМУНИКАЦИОННИ СИСТЕМИ ОТ ГЛЕДНА ТОЧКА НА ФИЗИЧНИЯТ ИМ ФУНДАМЕНТ

Тодор Арабаджиев^{1*} и Иван Узунов^{1,2}

¹ Катедра Приложна Физика, ФПМИ, ТУ-София, бул. "Кл. Охридски" No8, София 1000

² Институт по механика, БАН, ул. Акад. Г. Бончев, бл. 4, София, 1113

*e-mail: tna@tu-sofia.bg

Резюме. Представени са фундаменталните концепции за светлината по пътя към влакнестите комуникации в последователността на тяхното възникване. Представен е кратък хронологичен обзор на най-важните технологични открития направили възможно съществуването на съвременните влакнесто-оптични комуникационни системи (ВОКС).

Ключови думи: влакнесто-оптични комуникационни системи, оптика

1. По пътя на светлината – от фундаменталните концепции до ВОКС

Бихме могли да използваме различни по дълбочина и обхват теории за да анализираме разпространението и преобразуването на светлината във ВОКС. На първо място ще изброим добре известните и широко употребявани концепции за светлината, подредени по обхват: геометрична теория, вълнова теория, електромагнитна теория и квантова теория. Ще имаме в предвид хронологията на тяхното възникване и ще обсъдим докъде се простират техните възможности.

Геометричната теория за светлината е най-старата концепция описваща светлината като „лъч“ с начало и край, който се разпространява по права линия и за него важат известните още от древността закони за отражение и пречупване. През 1621 г. датският астроном и математик Willebrord Snell (Снелиус) успява математически да запише известният днес закон на Снелиус. Този факт за първи път е споменат през 1690 г. в „Трактат за светлината“ на неговия известен сънародник астроном и математик Кристиан Хюйгенс. В този си труд Хюйгенс за първи път описва светлината като сферична вълна с твърдението че всяка точка от вълновия фронт става източник на вторична сферична вълна (secondary wavelet) разпространяваща се във всички посоки, като тези вторични вълни имат честотата и скоростта като оригиналната вълна (за описанието на това свойство по-късно се въвежда понятието „кохерентни вълни“) а суперпозицията на вторичните вълни формира новият вълнов фронт. Известното днес понятие и съответен физичен процес „интерференция“ се въвежда за да бъде описан математически резултата от суперпозицията на две кохерентни вълни. Този принцип става известен като принцип на Хюйгенс. През 1819 г. френският физик Augustin-Jean Fresnel (Френел) използва принципа на Хюйгенс за да опише явлениято дифракция или интерференцията на повече от две вълни, а принципа

на Хюйгенс се превръща в добре известния днес принцип на Хюйгенс-Френел. В съвременна интерпретация на вълновата теория, казваме че вълните - оптични или еластични (в материална среда) се описват с хармонична функция – скаларна функция представляваща решение на т.нар. вълново уравнение. Това се интерпретирано като периодично повтарящо се (хармонично) трептене, което се разпространява в пространството (вълна), то може да бъде характеризирано с параметри като амплитуда, период, дължина на вълната, честота, скорост. Какво се случва обаче когато светлината се разпространява в материални среди? Тогава трябва да отчетем взаимодействието между светлината и материалната среда – изградена от атоми и молекули проявяващи електрични или магнитни свойства. В този случай, светлината трябва да се разглежда като векторна хармонична функция, описваща съвместното действие на променливо електрично и магнитно поле. Как си взаимодействат тези полета? Отговорите идват чрез откритията на цяла плеяда учени най-известните от които са на британците Майкъл Фарадей (1831 г. открива електромагнитната индукция), и на Джеймс Кларк Максуел, който през 1864 г. успява да запише математически в четири уравнения механизмите на взаимодействие на електричното с магнитното полета, както и взаимодействието им с електричните и магнитните свойства на средите. Тези фундаментални уравнения стават основа на т. нар. електромагнитна оптика т.е. светлината като електромагнитна вълна, която си взаимодейства със средата в която се разпространява.

И как тези теории се допълват? Ако се опитаме да обясним явленията интерференция и дифракция посредством геометричната теория няма да успеем, но с помощта на вълновата няма проблем. Как двете теории геометричната и вълновата описват разпространението на светлината в оптичните влакна? Геометричната успява да го направи по изключително опростен начин базирайки се на явлението пълно вътрешно отражение. Взаимодействието на диелектричното стъклено оптично влакно със светлината би могло да доведе до процеси като дисперсията на груповите скорости, зависимост на показателя на пречупване от интензитета (фазовата самомодуляция), нелинейни явления в рамките на т.нар. нелинейна оптика. В този случай ще трябва да използваме и електромагнитната теория за светлината основана на уравненията на Максуел.

Корпускулярната теория за светлината на Нютон от 17 век, представлява светлината като поток от материални частици - корпускули дори доминирала в научната мисъл до началото на 19 век. Опитите на Томас Юнг за интерференция на светлината от 1802 г. послужили като безспорен аргумент в полза на вълновата теория, която получила един нов старт. В началото на 20-ти век в опити да се обяснят явления недостъпни за класическата физика, като топлинното излъчване, външният фотоефект, дискретните спектри на атомите, наблюдаваме появата на квантовата физика (част от които са квантовата механика и квантовата оптика). Вследствие на откритията на Макс Планк, Луи Дьо-Бройл, Алберт Айнщайн, Артър Комптън, Нилс Бор, Вернер Хайзенберг, Ервин Шрьодингер и други светлината отново се превръща в частица, но в нов

квантов контекст, като фотон, квант или порция енергия. Окончателно във физиката се налага принципа на корпускулярно-вълновия дуализъм, според който за обяснението на едни явления, светлината трябва да се разглежда като хармонична вълна, а за обяснението на други е необходимо да се разглежда като частица.

През 1916 г. в статията си „On the quantum theory of radiation” [3], Айнщайн извежда формулата на Планк за топлинното излъчване, при което допуска възможността молекулите не само да поглъщат но и да излъчват порции енергия под формата на спонтанно или стимулирано излъчване. За да определи вероятностите на този тип процеси разработва и съответната математическа методика. По-късно, развитите в тази статия идеи и методи стават фундамента за създаването и обяснението на лазерите и оптичните усилватели.

И така, квантовата физика успешно обяснява действието на лазерите, оптичните усилватели, полупроводниковите устройства, и прави възможно технологичното развитие довело до съвременните високоскоростни ВОКС.

2. Справка за някои основни открития свързани с ВОКС.

Нашата кратка историческа справка за развитието на ВОКС ще започне от 1966 г., когато инженерите от Standard Telephones and Cables (днес Nortel) в Харлоу Англия, Чарлз Као и Джордж Хокъм, изследват възможността за използване на диелектрични влакна за водене светлинното излъчване за нуждите на комуникациите. Тогава за първи път е представен факта, че фундаменталният праг на загубите в стъклените влакна, дължащ се на примеси, е значително под установената тогава стойност от 20 dB/km и че възможният информационен капацитет на оптичните диелектрични вълноводи значително надвишава възможностите на съществуващите по това време коаксиални кабелни и радио комуникации [4,5]. За пионерските си идеи и приноси в областта на влакнестата оптика Чарлз Као е удостоен с $\frac{1}{2}$ част от Нобеловата награда през 2009 г. а другата $\frac{1}{2}$ част успоредно на него получават Willard Boyle и George Smith за откритието им от 1969 г. - “for the invention of an imaging semiconductor circuit - the CCD sensor“.

Отново през 60-те години на 20 век е измината и друга важна крачка способстваща за развитието на влакнесто-оптичните комуникации, а именно разработката на подходящи оптични източници в честотните области в които могат да бъдат използвани стъклените оптични влакна. Такъв източник е полупроводниковият лазер. През 1958 г. Charles Townes и Arthur Schawlow, публикуват идеята за мазера [6], по която Townes работи от 1951. Gordon Gould патентова концепцията, като добавя понятието „Лазер“ [7]. По същото време по идеята за мазера работят Александър Прохоров и Николай Басов от Физическия институт „П. Н. Лебедев“ в Москва [8].

За тези си идеи Townes, Прохоров и Басов получават Нобелова награда през 1964. На основата на идеите за мазера и лазера през 1960 г, Theodore H. Maiman

от Hughes Research Laboratories в Малибу, на основата на рубидий конструира първият работещ твърдотелен лазер [9]. През 1962 г. Робърт Холл изобретява полупроводников лазер с р-п преход излъчващ в инфрачервената област [10]. Когато Чарлс Као публикува пионерската си работа за оптичните влакна [4] през 1966, той разглежда току що разработеният полупроводников лазер на основата GaAs, като оптичен източник в близката инфрачервена област. През 1963 г. Rudolf Kazarinov and Zhores Alferov [11] от института „Йофе“ в Ленинград и успоредно на тях Herbert Kroemer [12] от Калифорнийският университет в Санта Барбара, предлагат идеята за полупроводников лазер с хетеро-структурен дизайн. За тази си идея те получават Нобелова награда през 2000 г.

Алтернатива на лазерните диоди като оптични източници в комуникациите са полупроводниковите инжекционни светодиоди (LED) работещи на основата на явлението електро-луминесценция т.е. в LED възникването на светлинно излъчване е в резултат на рекомбинация на електрони и дупки в р-п прехода под действие на електричното поле. Електро-луминесценцията е наблюдавана за първи път в парче силициев карбид през 1907 г. от английският учен Хенри Д. Раунд. През 1920 г. руският учен Олег В. Лосев забелязва същото явление и го описва в научна публикация, която обаче остава незабелязана в следващите десетилетия. През 1961 г. Biard и Pittman случайно откриват инфрачервено излъчване от право свързан GaAs тунелен диод конструиран с друга цел. На основата на тяхното откритие, на 26 Октомври 1962 г., Texas Instruments представят първият комерсиален инфрачервен LED. През 1962 г. Ник Холоняк колега на Р. Холл в лабораторията по електроника на General Electric в Сиракуза Ню-Йорк, на основата на GaAsP разработва първия червен LED във видимата област, по късно се появяват и светодиоди с други цветове - зелен през 70-те и син цвят през 90-те за който японците Исаму Акасаки, Хироши Амано и Шуджи Накамура получават Нобелова награда през 2014. Светодиода със син цвят в схемата червено-зелено-синьо, проправя пътя за получаването широкоспектърни източници на бяла светлина.

Друго основно устройство използвано широко за детекцията на оптично излъчване в комуникациите е полупроводниковият фотодиод. Той работи на основата на добре известният фотоелектричен ефект т.е. възникването на свободни токоносители и съответно на фототок в подходящо свързания р-п преход е в резултат основно на светлината падаща върху р-п прехода. Базовата технология на р-п фотодиодите започва развитието си през 40-те години на 20-век а края на 50-те се появяват и по-съвършените PIN фотодиоди.

60-те години на 20-век стават фундаментални по отношение на развитието на базовите компоненти на ВОКС - появяват се оптичните влакна и полупроводниковите лазери. Последващите развития в компонентна база следват следния път: разработват на подходящи за различните спектрални прозорци източници и приемници на светлина, снижават се загубите във влакната до 0.2 dB/km, появяват се влакна с отместена нула на дисперсията, появяват се т.нар. „сухи“ влакна (с премахнат пик на загубите дължащ се на

съдържанието на вода), появяват се оптичните усилватели (полупроводникови, влакнести и раманови). С появата си оптичните усилватели премахват бариерата в бързодействието установена от старите електронни регенератори и правят възможно дължината на предавателните линии да достигне междуконтинентални разстояния.

Революционният пробив свързан с увеличаване на капацитета за предаване на информация идва с разработването подходящ за прозореца с най-малки загуби във влакната (1550 nm) влакнест усилвател с широка лента на усилване. Такива усилватели се създават чрез легиране в оптичното влакно на йони на редкоземни елементи като erbium (Er^{3+}) или thulium (Tm^{3+}). Поради голямото усилване - до 50dB, ниския шум ~5dB, широката спектрална лента на усилване 1525-1570 nm във ВОКС се е наложил Легирания с Ербий (Er^{3+}) Влакнест Усилвател (Erbium Doped Fiber Amplifier-EDFA). За усилване на сигналното излъчване в легираното с ербиеви йони влакно е необходимо, чрез процес на оптично напompване, да възбудим ербиевите йони така че да получим инверсна населеност между дългоживущото (~10ms) метастабилно ниво и основното енергетично ниво. Наличието на инверсна населеност означава, че всеки пристигнал сигнален фотон предизвиква стимулиран преход съпроводен с излъчването на втори фотон идентичен с оригиналния т.е. налице е оптично усилване на сигналната честота. Оптичното напompване се извършва от напompващ лазер с работна дължина на вълната 980 или 1480 nm и мощност ~30-150 mW. Налице са и спонтанни преходи, отговорни за шума от спонтанната емисия.

Широката спектралната лента на уеднаквено (плоско) усилване на EDFA дава уникалната възможност за едновременно усилване на множество информационни канали които са равно-отместени един от друг по честота и уплътнени в една предавателна линия (Dense Wavelength Division Multiplexing - DWDM) [13].

Хронологично EDFA се ражда през 1987 г., когато за него публикуват резултатите си две групи изследователи - първата от университета в Саутхямптън, Великобритания, състояща се от David N. Payne, R. Mears, I. M Jauncey and L. Reekie [14], и втората от AT&T Bell Laboratories и включва E. Desurvire, P. Becker и J. Simpson [15].

Неотдавна е докладван резултат с рекорден капацитет на предаване на информация от над 319 Tb/s по оптично влакно с 4 сърцевини на разстояние 3001 км [16]. Всичко това би било немислимо без фундаменталните открития във физиката създали почвата за технологичният пробив довел до съвременните високоскоростни влакнести комуникации.

3. Заключение

В хронологичен ред е описано възникването и приложението на фундаменталните концепции за описание на светлинните явления. Отново в

хронологичен ред са описани най-важните технологични открития довели до възникването на съвременните ВОКС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Енциклопедия Британика: www.britannica.com
- [2] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, Fundamentals of Photonics, Wiley-Interscience, 2nd edition (March 9, 2007)
- [3] Einstein, A. On the Quantum Theory of Radiation, СРАЕ, The collected papers of Albert Einstein, Edited by J. Stachel et al., Vols. 1-12, Princeton University Press, 1987–2010; Vol. 6, Doc. 38: <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol6-trans/>
- [4] К.С. Као and G.A. Hockham, Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies, Paper was originally published in the Proceedings IEE, July 1966, IEE Proceedings, Vol. 133, Pt. J, No. 3, June 1986.
- [5] Chinlon Lin, In memory of Charles Kao, Nature Photonics, vol 12, December 2018, 715–717.
- [6] Schawlow, Arthur; Townes, Charles (1958). "Infrared and Optical Masers". Physical Review. 112 (6): 1940–1949. doi:10.1103/PhysRev.112.1940.
- [7] Gould, R. Gordon (1959). "The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". In Franken, P.A.; Sands R.H. (eds.). The Ann Arbor Conference on Optical Pumping, the University of Michigan, 15 June through 18 June 1959. p. 128. OCLC 02460155
- [8] N. G. Basov and A. M Prokhorov, Theory of the Molecular Generator and Molecular Power Amplifier, JETP, Vol 3, Number 3, October 1956, P. N. Lebedev Physical Institute, Academy of Sciences, USSR
- [9] Maiman, T. H. (1960). "Stimulated optical radiation in ruby". Nature. 187 (4736): 493–494.
- [10] Hall, Robert N.; G. E. Fenner; J. D. Kingsley; T. J. Soltys; R. O. Carlson (November 1962). "Coherent Light Emission from GaAs Junctions". Physical Review Letters. 9 (9): 366–369
- [11] Zh. I. Alferov, R.E. Kazarinov, "Semiconductor laser with electric pumping", Soviet Union Patent, Author's Certificate N181737, Application N950840 with priority from 30 March 1963.
- [12]. H. Kroemer, "A proposed class of heterojunction injection lasers," Proc. IEEE 51 (12), 1782–1783, (1963).
- [13] United States Patent Office #5696615; "Wavelength division multiplexed optical communication systems employing uniform gain optical amplifiers.", 2002
- [14] R.J. Mears, L. Reekie, I.M. Jauncey and D. N. Payne: "Low-noise Erbium-doped fiber amplifier at 1.54 μm ", Electron. Lett., 1987, 23, pp.1026–1028
- [15] E. Desurvire, J. Simpson, and P.C. Becker, High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier," Optics Letters, vol. 12, No. 11, 1987, pp. 888–890
- [16] <https://www.nict.go.jp/en/press/2021/07/12-1.html>