

НОБЕЛОВИТЕ НАГРАДИ ПО ФИЗИКА – 2009 ГОДИНА¹

Чарлз Као – пионерът на оптичните влакна

Т. Коонен

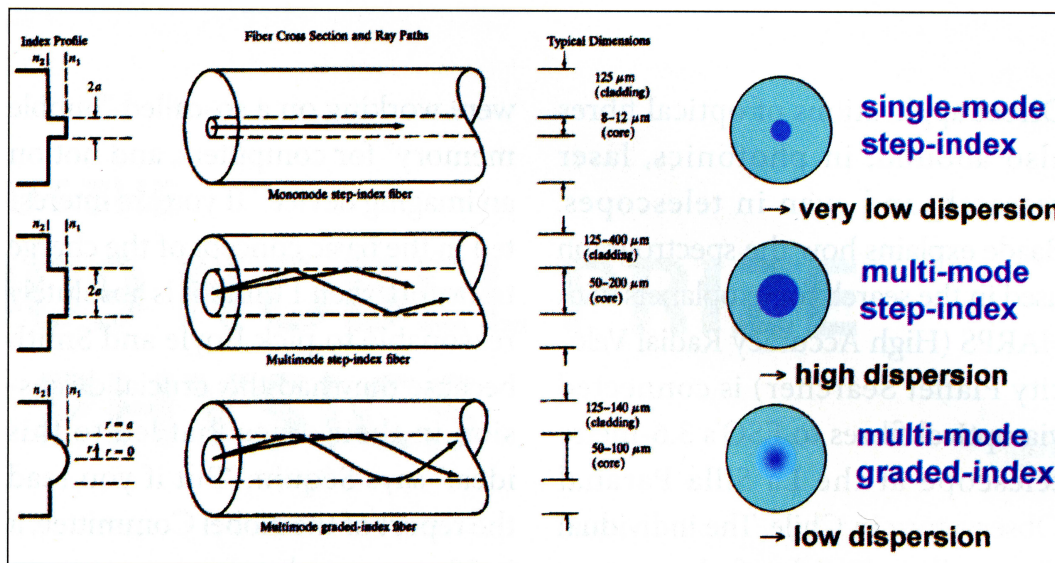
Светът виси на тънка нишка, нишка от стъкло. Оптичните влакна получиха огромно развитие по целия свят, за да бъдат днес в състояние да пренасят нашите телефонни разговори, компютърни данни, ТВ-сигнали, интернет с неговия експлодиращ диапазон от услуги и т.н. Нашите икономика, социални и културни дейности биха спрели без огромните информационни потоци, които е способно да пренесе тънкото стъклено влакно. Когато Самуел Морз изобрети телеграфа, а Александър Бел – телефона, светът се оказа зависим от медните жици. И все още голяма част от комуникационните мрежи използват мед, в частност жичните двойки на телефонните линии и коаксиалните кабели на кабелните телевизии, които свързват жилищата на потребителите. Електричните сигнали отслабват поради загубите в медните проводници и това налага монтиране на множество усилватели в цялата мрежа. Честотната лента на тези линии е твърде ограничена и предвид бързо нарастващите нужди на интернет изчерпва възможностите си. Нещо повече, поради привършване на световните запаси от мед, този род връзки стават все по-скъпи и по-скъпи. Чарлз Као осъзна тези тенденции още в средата на 60-е години на миналия век. Тогава той работеше като инженер в компанията STC в Харлоу, Великобритания, и там разви своите основополагащи идеи относно пренасянето на светлина по стъклени нишки с изключително малки загуби. За пръв път представя резултатите си през 1966 г. пред Института за електроинженерство (ИЕЕ).

Разпространение на светлина с малки загуби

Криволинейно разпространение на светлина е наблюдавано много по-рано, например по осветените водни струи на фонтаните. Разпространението на светлината се осъществява посредством пълно вътрешно отражение: светлината се разпространява във вещество с по-голям показател на пречупване, като се отразява на границата със среда, чиито показател на пречупване е по-малък, при условие, че ъгълът на падане е по-голям от един граничен ъгъл. Тъй като този тип отражение е много ефективен и съпроводен с пренебрежими загуби, светлината може да бъде “пленена” и да се движи през водната струя. Разбира се, за практиката са необходими по-стабилни решения, отколкото предлагат водните струи, така че подобни експерименти бяха правени с хомогенни стъклени влакна. Ендоскопските наблюдения се правят с множество подобни стъклени влакна, обединени в кабел. В случая обаче малки драскотини и други дефекти по повърхността на стъклото нарушават процеса на пълно вътрешно отражение и предизвикват загуба на светлина. Ето защо загубите в подобни хомогенни влакна са твърде големи и неприемливи за пренос на светлина на големи разстояния. Нещо повече, примесите в самото стъкло допринасят за увеличаване на загубите. Чарлз Као откри топения кварц като перфектен материал, осигуряващ изключително малки загуби при пренос на светлина. И, че структурата на влакното не трябва да бъде хомогенна нишка, а следва да има едно вътрешно ядро с висок показател на пречупване, заобиколено със стъклена обвивка с по-малък показател на пречупване. По такъв начин границата е надеждно запазена и може да служи като сигурна и почти идеална отразяваща повърхност за разпространяващия се светлинен лъч. През 1966 г. Као докладва, че кварцова нишка с подобна структура би могла да осигури загуби, по-ниски от 20 децибела на километър, т.е. повече от 1 % от светлината, постъпила в

¹ Превод със съкращения от материалите, поместени в EPN, 40/6, 2009.

началото на подобно влакно с дължина 1 km, ще излиза от другия му край. През 1970 г. Кек и колегите му в САЩ наистина демонстрираха разпространение на светлина по подобно влакно със загуби под 20 dB/km.



Фиг. 1: Кварцови оптични влакна

Съвременните оптични влакна имат стандартизиран външен диаметър от само 125 μm, при толеранс от едва 1 μm. Такава приблизително е дебелината на човешкия косъм (фиг. 1). Що се отнася до загубите, от времето на изобретяването до сега бе направен огромен напредък, при това все още следвайки принципите на Као. Днес влакната пренасят повече от 95 % от светлината през влакно с дължина 1 km, което означава, че загубите са под 0,2 dB/km. Това стана възможно чрез довеждане чистотата на кварца до крайност, като се използват прецизно контролирани условия, извънредно сложни химични техники за отлагане на пари при формиране на структурите, изключване и на най-малките количества вода и изтегляне на стриктно контролирано влакно.

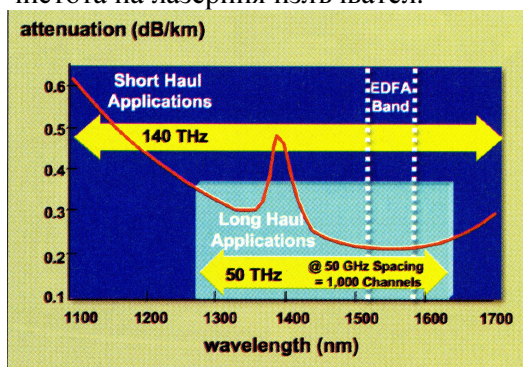
Диаметърът на ядрото на влакното има голямо влияние върху свойствата му за разпространение на светлината: когато той е от порядъка на дължината на вълната, по влакното може да се разпространява само една светлинна мода. Такова влакно се нарича едномодово оптично влакно (вж. горния ред на фиг. 1). Когато ядрото е по-дебело, по него могат да се разпространяват повече моди: мултимодово влакно (вж. средния ред на фиг. 1). Всяка мода си има различно време за разпространение, така че един светлинен импулс, който се разпространява от тези моди, ще претърпи дисперсия и, когато достигне края на влакното, ще бъде разширен. Когато импулсите се разширяват, те вече не могат да се изпращат твърде близо един до друг, без да се застъпват. Следователно тази дисперсия ограничава скоростта на изпращане на импулси, а така и честотната лента на влакното. Дисперсията на модите може да се намали чрез ускоряване на светлинните лъчи, които изминават по-дълъг път през ядрото на влакното, което се постига като показателят на пречупване постепенно намалява в посока към обвивката (вж. долния ред на фиг. 1). Подобни влакна наистина имат по-широка честотна лента, отколкото тези със стъпаловидно променящ се показател. Очевидно едно едномодово влакно не води до разширяване на импулсите и следователно притежава максимална честотна лента.

За сега едномодовите влакна са най-разпространеният вид. Многомодовите влакна се използват за връзки на по-близки разстояния, като например във вътрешната

мрежа в едно здание. Благодарение на по-дебелото си ядро, такива влакна се свързват по-лесно едно с друго, отколкото едномодалите.

Дисперсия и загуби

Честотната лента на едномодалото влакно е ограничена главно от дисперсията на материала (тъй като показателят на пречупване на кварца зависи слабо от дължината на вълната), и от вълноводната дисперсия (доколкото електричното поле излиза от ядрото и навлиза в обвивката, а това навлизане расте с увеличаване дължината на вълната). Дисперсията на материала и вълноводната дисперсия са с противоположни знаци и могат да се компенсират. За кварцовото стъкло това става при дължина на вълната от около $1,31 \mu\text{m}$, така наречената “дължина на вълната с нулева дисперсия”. При тази дължина влакното достига максимално широка честотна лента и тогава ширината на лентата на връзката на влакното е ограничена само от спектралната чистота на лазерния излъчвател.



Фиг. 2: Затихването в едномодала кварцова нишка

Загубите на влакното зависят от дължината на светлинната вълна и достигат най-ниската си стойност при около $1,55 \mu\text{m}$, което е в близката инфрачервена област. Както показва фиг. 2, областта от дължини на вълните с ниски загуби съдържа огромен брой оптични честоти и следователно има изключително голям капацитет за пренасяне на телекомуникационни сигнали. Един лазерен диод, другият критичен елемент в телекомуникационната влакнеста връзка, може да изпраща светлинни импулси с много голяма честота на повторение, от порядъка на десетки гигахерци, като същевременно запълва само малка част от този честотен оптичен диапазон. Множество подобни лазерни диоди, работещи на леко различаващи се оптични честоти, може да се свържат паралелно и по такъв начин да се пренася огромно количество данни. В лабораторни условия по този начин е постигната скорост на пренос, превишаваща 21 терабит в секунда. Подобен капацитет би позволил едната половина от човечеството да разговаря по телефон с другата половина по една единствена кварцова нишка с дебелината на човешки косъм.

Днес оптични нишки се инсталират по целия свят. Общата им дължина възлиза на около един милиард километра, 25 000 пъти превишавайки обиколката на Земята! Множество влакнестооптични връзки свързват континентите: трансатлантическата връзка между Европа и Северна Америка е около 6000 km, а между западното крайбрежие на САЩ и Япония – около 9000 km с междинна връзка в Хаваите. Въпреки извънредно малките загуби в оптичните влакна, подобни разстояния не могат да бъдат покрити без усилване. Появата на усилвател за оптични влакна, в частност на легиран с ербий влакнест усилвател (EDFA – erbium – doped fibre amplifier) представлява другия решителен момент в историята на оптичните комуникационни системи. Когато е легирано с редкоземния елемент ербий, който преминава във възбудено състояние чрез оптическо напompване от лазер, оптичното влакно може да усилва оптичните сигнали

пряко, без да е необходимо предварително да се преобразуват в електрични сигнали. Множество честотни канали могат да бъдат усилвани изцяло по оптичен път и едновременно, което прави един такъв оптичен усилвател съществена част от всяка система за пренос на сигнали на големи разстояния.

Влакно-до-вкъщи и влакно-вкъщи

Докато кварцовите нишки завоюваха телекомуникационните мрежи за големите разстояния, покриващи океани, континенти, а също така държави и градове, на повечето места крайното стъпало до къщата на потребителя все още се осъществява посредством чифт медни жици и/или коаксиален меден кабел. Това крайно стъпало става все повече и повече тясното място, което пречатства достъпа на потребителя до големите възможности на мрежата. Ето защо понастоящем все по-често оптичните влакна достигат и до зданията, измествайки медните жици, като заради огромния си капацитет дават едновременен достъп до всички жично осигурявани услуги (тройно: видео, аудио и данни), както и на всяка нова услуга, която ще се появи в бъдеще. В Япония връзките влакно-до-вкъщи вече преобладават по брой над тези, осигурявани с медни проводници (линия за цифрови абонати – DSL – digital subscriber line). Както САЩ, така и европейските държави напредват в тази посока. Типичните скорости на връзките както от, така и към къщи, са от порядъка на 100 Mbit/s, а в Япония се въвежда дори 1 Gbit/s. Но влакно-до-вкъщи не е последната дума в борбата за осигуряване на максимални комуникационни магистрали до потребителите. След като достигна до прага на къщите, магистралата трябва да се продължи и вътре в тях, чак до устройствата, които използват потребителят. Ето защо изследванията сега са насочени към системи за оптични връзки вътре вкъщи, където от критична важност стават проблемите за здравината и за лесното монтиране, предимно по метода “направи си сам”. Кварцовото влакно е крехко и трябва да се монтира с прецизни инструменти и от квалифицирани хора. Като алтернатива на него се появяват пластични оптични влакна (POF – plastic optical fibre), които може да се направят много по-дебели и са гъвкави. Това ги прави много по-удобни за работа и инсталиране даже от хора без специална подготовка. Загубите в тях съвсем не са така малки, както в кварцовите влакна, но тъй като домашните връзки са къси, това не е пречка за тях. Както предложените от Као кварцови влакна, така и POF имат структура от ядро и обвивка. Големият им диаметър предизвиква голяма модална дисперсия и по такъв начин силно ограничава честотната им лента при по-големи дължини. Но, отново, вкъщи разстоянията са къси и това не е “смъртоносно”. Развиват се специални техники за пренасяне на потоци от данни със скорост от Gbit/s по мрежи от POF. Изследват се също методи за пренасяне на микровълнови радиосигнали по влакната, с цел да се задоволят нуждите от широколентови безжични връзки, без да се налага разполагането навсякъде на съответната микровълнова радио екипировка.

У. Бойл и Дж. Смит за CCD

А. Тойвисен

Появата на CCD предизвика революция в науката и технологиите, както и в обществото като цяло. Аз се чудя дали У. Бойл и Дж. Смит въобще са осъзнавали, че тяхното изобретение ще произведе такова огромно въздействие:

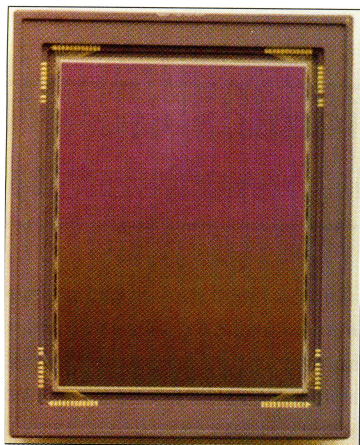
- върху обществото: днес всеки разполага с безшумен цифров фотоапарат, мнозина имат камери, и всички те са снабдени със CCD, а някои дори и с три CCD-та. Всички телевизионни образи, които гледаме днес, се запечатват с помощта на CCD-камери; много медицински диагнози се правят на основата на изображения, получени

със CCD. Други области на приложение са сигурността, астрономията и камерите, използвани за научни цели. Днес в много приложения CCD-тата се конкурират от CMOS-сензори за образи (CMOS – Complementary Metal Oxide Semiconductors), но е лесно да се разбере, че именно CCD-тата проправиха пътя за твърдетелно получаване на образи, в това число и CMOS;

- върху полупроводниковата промишленост: много компании направиха успешен бизнес на основата на CCD. Примери са Сони, Шарп, Тошиба, НЕК, Фуджифилм, Кодак, Филипс, E2V, Феърчайлд, DALSA, LG, Томсън, Сарноф, SITe, Форд Аероспейс;
- върху образната технология: след въвеждането на CCD класическата вакуумна тръба за получаване на образи бързо напусна сцената. CCD са по-компактни, по-леки, консумират по-малка мощност, работят при по-ниско напрежение, при тях няма ефект на прогаряне, няма закъсняване на образа, няма поддръжка, не се поддават на влиянието на електромагнитни полета. CCD имат не само преимущества, те са ... даже по-евтини. CCD-тата разкриха огромна нова област от приложения на образите, които преди бяха невъзможни без твърдетелните сензори;
- върху научната и техническа общност: Основното изобретение на Бойл и Смит вдъхнови мнозина други големи инженери, чиито изобретения доведоха до истинския бум на CCD.

Принцип на CCD

CCD е съкращение от Charge-Coupled Device². По същество CCD представлява двумерна мрежа от миниатюрни пиксели, в които светлината предизвиква натрупване на електричен заряд (вж. фиг. 1). Всеки пиксел може да се разглежда като малка група от заредени кондензатори. Принципът на работа на CCD се основава на пренасянето на пакети от заряди от един кондензатор върху следващия. По такъв начин зарядът се пренася по мрежата и се чете в единия от нейните ъгли. Пикселите, разположени близо до изходния усилвател, претърпяват само няколко транспортни цикъла, докато зарядите от пикселите, разположени далеч от изхода, трябва да изминат много по-голямо разстояние. Образът, запечатан върху CCD, може да се възстанови лесно, като се използва факта, че на изхода пикселите пристигат в последователен ред и в същия ред се възпроизвеждат върху монитора.



Фиг. 1: 48 мегапикселова CCD-матрица с размери 48 mm x 36 mm

Пренасянето се осъществява в силиций и се управлява от цифрови импулси. В най-простия случай CCD-пикселът се състои от четири кондензатора. Пакетите от заряди трябва да бъдат премествани от един пиксел към следващия без да се смесват. Всеки кондензатор е изключително малък; за класическите потребителски уреди за

² Прибор със свързан заряд. (Бел. прев.)

получаване на образи размерите на пикселите достигат 2,0 μm и даже по-малко. Това означава, че размерите на отделния кондензатор са по-малки от 0,5 μm . Забележете, че това е точно от порядъка на дължината на вълната за видимата светлина!

Производство и действие

Проектирането и производството на тези кондензатори трябва да се осъществи така, че да позволява плавно прехвърляне на зарядите. Това прехвърляне не е идеално. Неговата ефективност не е 100 %, някои електрони от пакетите заряди се губят. В началните години на CCD-тата ефективността бе около 99 %, но в съвременните CCD-та тя може да стигне 99,99999 %.

От една страна индустрията се стреми да прави пикселите колкото може по-малки, но от друга страна това увеличава броя на пикселите върху един CCD-чип. В потребителските устройства броят на пикселите достига 14 мегапиксела, но за професионални цели (напр. в астрономията) той може да надмине 150 мегапиксела. Като се вземе предвид, че един пиксел включва 4 кондензатора, това прави 600 000 000 отделни кондензатора върху един единствен чип!

По отношение на действието, в много отношения CCD са подобни на човешкото око (напр. чувствителност, минимално равнище на осветеността, скорост). В някои отношения CCD даже превъзхождат окото (действие в условия на шум, контраст), но в други все още трябва да се учат от него (разсеяна мощност, успоредна обработка на информация).

Бъдещи перспективи

Производството на CCD изисква сложни процеси, които, за съжаление, не се срещат на всеки уличен ъгъл. Това прави CCD значително по-скъпи в сравнение с конкурентните технологии, каквато е CMOS технологията за образни сензори. По-специално, за потребителските устройства (напр. за мобифоните) забележителните качества на CCD не могат да компенсират разликата в цените между CCD и CMOS сензорите за образи. От друга страна обаче, за някои специфични пазарни сектори, каквито са например професионалните приложения, CCD превъзхождат CMOS сензорите (напр. за телевизията, астрономията, медицинските уреди). Качеството на техните образи е по-добро и ценовото преимущество на CMOS-технологията е много по-малко и даже изчезва. Въпреки, че CCD празнуват своята 40-годишнина, те все още заслужават своето място в бизнеса за получаване на цифрови образи.