

Научни основи на Нобеловата награда по физика за 2009 г.

ДВЕ РЕВОЛЮЦИОННИ ОПТИЧНИ ТЕХНОЛОГИИ

компилирано от отделението за физика на Кралската шведска академия на науките

През последните години информационните технологии извършиха революция във всекидневния ни живот. До голяма степен това се дължи на развитието на електронните и оптични устройства и системи. Нобеловата награда по физика за 2009 г. удостои трима физика, които играха важна роля при формирането на модерните информационни технологии: половината на **Чарлз К. Као**, а другата половина – поделена между **Уилард С. Бойл** и **Джордж. Е. Смит**.

Чарлз К. Као постави начало на изследванията и на развитието на оптични влакна с ниски загуби, които днес се използват в системите за влакнесто-оптична връзка. Уилард С. Бойл и Джордж Е. Смит създадоха устройство със свързан заряд (CCD – charge-coupled device), използвано днес в много цифрови фотоапарати и в модерните медицински и научни апаратури.

Оптични влакна с голямо предаване

За пръв път идеята за управляване разпространението на светлина в материална среда с помощта на явлението пълно вътрешно отражение е обсъждана през 19. век. През 1841 г. Д. Коладон от университета в Женева демонстрира разпространението на светлина във водна струя, докато приблизително по същото време Ж. Бабине във Франция прави подобни наблюдения и даже обобщава идеята до разпространение на светлина в извити стъклени пръчки. Често идеята се приписва на Дж. Тиндал, който, следвайки едно предложение на М. Фарадей, през 1854 г. демонстрира пред Кралското дружество в Лондон разпространение на светлина във водна струя. Би могло да се твърди обаче, че явлението е било известно още в древността, когато малки (цветни) стъклъца са използвани като украшения в Египет или Месопотамия. Разпространението на светлина в големи водни струи е било използвано дори за развлекателни цели при осветяването на фонтаните по време на Световното изложение в Париж през 1889 г. (за исторически обзор вж. [1]).

Първите идеи за приложения на разпространението на светлина в стъклени влакна (т.е. малки стъклени пръчки) датират от края на 20-те години на 20. век. Всички те се отнасят до предаване на изображения посредством сноп от влакна. Мотивацията е медицинска (гастроскопия), отбранителна (гъвкави перископи, смущаване на образи) и даже в ранната телевизия. Оголените стъклени влакна обаче имат твърде големи загуби и не провеждат много светлина. Всеки път, когато влакната се допрат едно до друго, или когато повърхността им се надраска, светлината напуска влакното. Пробивът настъпва в



началото

Фиг. 1: Оптично влакно. Показателят на пречупване на сърцевината е малко по-голям от този на обвивката. Типичните размери са от 10 до 50 микрометра за сърцевината и 125 микрометра за влакното Освен това около влакното е нанесена предпазна пластмасова защита.

на 50-е години с идеята и демонстрацията, че ако влакното има обвивка (вж. фиг. 1), това ще улесни на разпространението на светлината, като подпомогне пълното вътрешно отражение. Приблизително по същото време Х.Х. Хопкинс и Н.С. Капани от Импириъл колидж в Лондон успешно конструират сноп от няколко хиляди влакна с дължина 75 cm и демонстрират предаване на образ с добро качество [Nature 173, 39 (1954)]. Чрез комбиниране на технологията на сноп от влакна с обвиването им, някои приложения (в частност гастроскопията) изминават целия път до индустриално производство. Теорията на разпространението на светлината във влакна бе описана от Н.С. Капани и по-късно усъвършенствана от Е. Снитцер [J. Opt. Soc. Am. 51, 491 (1961)]. Оптичната област на електромагнитния спектър, съответстваща на дължини на вълната във видимия, близкия инфрачервен или ултравиолетов спектър, отдавна се разглежда като привлекателна за комуникациите. Честотата на светлината дава възможност за честотна модулация на големи сигнали и съответно за висока скорост на пренасянето им. През 1880 г. А.Г. Бел патентова въздушен оптичен телефон, наречен “фотофон”, състоящ се от фокусирана върху плоско огледало, трептящо със звукова честота, слънчева светлина. След това светлината попада върху детектор от селен, свързан с телефонен приемник. Малко по-късно се патентоват също идеи, една от тях в Япония, предлагащи кварца като среда за разпространение. През 50-е години обаче много малко учени, специалисти по комуникациите, разглеждат оптичните комуникации като осъществима перспектива.

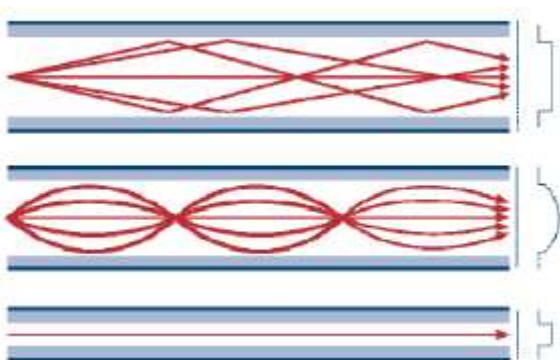
Преди 100 години Г. Маркони и К.Ф. Браун са удостоени с Нобелова награда “като признание за техните приноси в развитие на безжичната телеграфия”. 50 години по-късно електрониката и радиовръзките са в бърз възход. Първият трансатлантически кабел е инсталиран през 1956 г., а спътниците скоро ще дадат възможност за по-добро покритие. Първият комуникационен спътник е изведен в орбита през 1958 г. С цел да се достигнат по-големи скорости на предаване, изследванията в телекомуникациите се съсредоточават главно върху по-късите радиовълни, в милиметровия диапазон. Тези вълни не могат да се разпространяват във въздуха така лесно, както по-дългите и изследванията се съсредоточават върху създаването на практични вълноводи. Създаването на лазера в началото на 60-е години (Нобелова награда по физика за 1964 г. за Ч. Таунс, Н.Г. Басов и А.М. Прохоров) даде нов тласък на изследването в оптичните комуникации. Скоро след като Т.Х. Мейман демонстрира рубинов импулсен лазер, А. Джаван построява първия хелиево–неонов лазер с непрекъснато действие. Почти по същото време се появяват и полупроводниковите лазери, но в началото те не са така практични, тъй като изискват силни токове и не могат да работят при стайна температура. Няколко години по-късно с въвеждането на хетероструктурите (Нобелова награда по физика за 2000 г. на Ж.И. Алферов и Х. Кремер) те получават възможност да действат при стайна температура, което ги превръща в идеални светлинни източници за оптични комуникации.

В началото на 60-е години започва интензивно търсене на подходяща среда за предаване на светлина в оптичната област. Оптичните влакна обаче оставаха встрани от изследователския интерес поради тяхното голямо затихване. Затихването може да се изрази чрез коефициента (в dB/m):

$$\alpha = \frac{10}{L} \log_{10} \frac{P(0)}{P(L)},$$

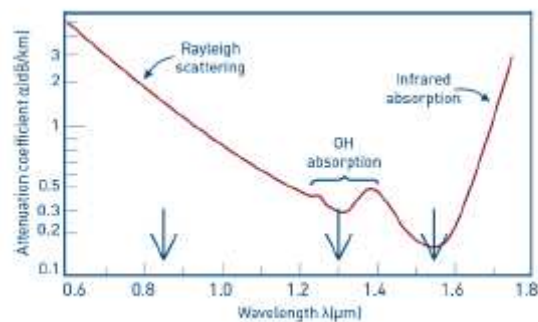
където $P(0)$ и $P(L)$ са мощностите съответно на входа и на изхода, а L е дължината на влакното. Типичната стойност на затихването в първите оптични влакна бе от порядъка на 1000 dB/km, което означава, че само 1 % от светлината преминава през влакно с дължина

20 m. Предлагани са, а понякога и изпробвани, и други възможности за направляване на светлината: например през поредица от лещи или даже чрез тръби с газ, в които се създава температурен градиент за фокусировка – все без особен успех. Изследвани бяха различни вълноводи в оптичната област. Както А.Е. Карбовяк от STL (Standard Telecommunication Laboratories) в Харлоу, Великобритания, така и Ж. С. Симон и Е. Спиц от CSF (Compagnie générale de télégraphie Sans Fil) осъзнават, че разпространението на отделни моди по вълноводи (например тънки филми) би трябвало да бъде изгодно за оптичните комуникации, тъй като намалява дисперсията и загубите при разпространението. В университета Токуку в Япония (Дж.-И. Нишизава, И. Сасаки), както и в лабораториите на компанията Бел в САЩ (С.А. Милер) бяха предложени оптични влакна с променлив показател на пречупване. Дисперсионните ефекти, които възникват поради това, че различните пространствени моди се разпространяват с различни скорости, са по-малки във влакната с постепенно променящ се показател на пречупване, отколкото в многомодови влакна, в които показателят се променя стъпаловидно (вж. фиг. 2). Тези влакна трябваше да се използват по-късно, бидейки първото поколение оптични влакна, които да се използват за светлина с дължина 870 nm. Нито едно от решенията обаче не можеше да намери задоволително отговор на проблема със затихването.



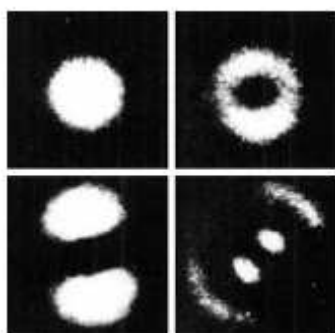
Фиг. 2: Различни видове влакна, многомодово със скокообразно изменящ се показател на пречупване и многомодово с постепенно изменящ се показател. С червен цвят е показано разпространението на няколко лъча, а в дясно – графика на показателя на пречупване.

Чарлз К. Као беше млад инженер в STL, който работи върху оптичните комуникации. Той започна под ръководството на Карбовяк, а по-късно стана ръководител на малка група, включваща в началото само един сътрудник, Г.А. Хокъм. Као е роден през 1933 г. В Шанхай, Китай, и учи в Хонг-Конг. Дипломира се като електроинженер в Университета на Лондон през 1957 г. и в същия университет получава степен PhD през 1965 г. Хокъм бе млад теоретик, чиято работа по анализ на влиянието на дефектите ще доведе до защита на дисертация през 1969 г. Те изследват в детайли фундаменталните свойства на оптичните влакна с оглед на оптичните комуникации. По-специално, те не разглеждат, подобно на повечето от колегите си по изследвания, само физиката на вълноводите, но също и свойствата на средите. Техните заключения са представени от Као в Лондон в началото на 1966 г. и публикувани през юни [2]. Най-важният резултат е, че загубите в диелектрични среди се дължат основно на абсорбция и на разсейване (вж. фиг. 3). Предсказаното затихване от няколко dB/km се оказа много по-малко от измерваното по



Фиг. 3: Коефициентът на затихване в кварца като функция от дължината на вълната. Откъм страната на късите вълни затихването се дължи на Релеевото разсейване, което е пропорционално на λ^{-4} , а в дълговълновата област – на поглъщането в молекулите. Поради ОН радикалите примесите обикновено се избягват трудно. Най подходящи за оптически комуникации са вълни с дължина от 1,3 до 1,55 μm .

онова време. Следователно, последното бе предизвикано основно от примеси, в частност от железни йони. Стъквени влакна с по-висока чистота биха могли да бъдат един добър кандидат за оптичните комуникации. Анализирани бяха затихването, предизвикано от огъването и несъвършенствата на вълновода, както и загубите при разпространението и излъчването, но се оказа, че те са малки. Като най-добра среда за предаване в оптичните комуникации бяха представени едномодовите влакна. Използването на многомодови влакна би довело да по-високи загуби и разширение на сигнала във времето, предизвикани от по-голямата дисперсия. Едномодовите влакна може да се правят чрез избор на материали с близки показатели на пречупване. Пространствените моди, които показват как се разпространяват светлинните вълни във влакното, бяха изследвани опитно (фиг. 4). Установена и предсказана като достижима при наличните тогава мощности на



Фиг. 4: Пространствени електромагнитни моди в мултимодово влакно (от [2]). Горѐ в ляво е хибридната HE_{11} мода, единствената, която може да се разпространява в едномодово влакно.

лазерите и чувствителност на детекторите бе една осъществима граница за затихването във влакното от 20 dB/km. Као завърши с едно фантастично явление [2]: “[...] една нишка от стъкло със слоеста структура [...] представлява възможен практичен вълновод с големи възможности като нова форма на комуникационна среда [...]. В сравнение със

съществуващите коаксиални кабели и радиосистеми, този вид вълновод има по-голям информационен капацитет и възможни предимства по отношение на цената на основния материал.” В CSF във Франция един млад инженер, А. Верст, публикува през септември 1966 г. статия с подобни заключения [L'Onde Electrique, 46, 967 (1966)]. При обсъждането на затихването той отдава признание на работата на Као.

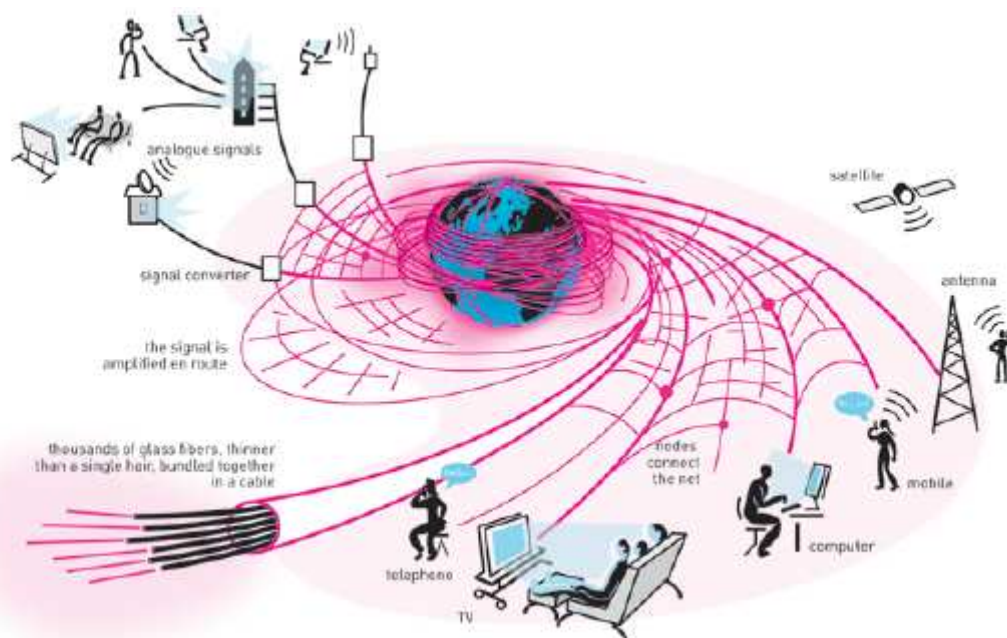
Као, заедно с нови сътрудници, Т.У. Дейвис, М.У. Джонс и К.Р. Райт, продължи работата си със серия грижливи измервания на отслабването на светлината в стъкло и други материали при различни дължини на вълните [J. Scien. Instr. 1, 1063 (1968); 2, 331 (1969); 2, 579 (1969)]. По специално, той показва, че кварцовото стъкло (SiO_2) притежава чистотата, необходимо за оптични комуникации. По света започна едно интензивно търсене с цел да се получат стъклени влакна с ниски загуби, което бе стимулирано от Као, оказал се не само вдъхновен физик, но също така и добър пропагандатор на своите виждания.

Проблемът, който трябваше да се реши, бе производството на стъклени влакна без примеси. Као бе посочил правилния материал, именно кварцовото стъкло. За нещастие, този материал има висока температура на топене. По онова време неговото производство и обработка не бяха лесни и повечето лаборатории първо пробваха да изтеглят влакна от други типове стъкло, но без особен успех. Четири години след статията на Као и Хокман, един изследователски колектив от стъklarските заводи Корнинг в САЩ, включващ Ф.П. Капрон, Д.Б. Кек, П.К. Шулц и Ф. Цимър, под ръководството на Р.Д. Маурер, успяха с помощта на един хитър химически метод, наречен CVD (Chemical Vapor Deposition – химично отлагане на пари), да направят стъклени влакна с ниски загуби, каквито бе предсказал Као. За да получат сърцевина и обвивка с много близки показатели на пречупване, те внасят примеси от титан в стопената кварцова сърцевина, и използват чисто кварцово стъкло в обвивката [Appl. Phys. Lett. 17, 423 (1970)]. Няколко години по-късно те постигнаха дори 4 dB/km на 850 nm, като за целта използваха германий вместо титан. Няколко други технологии бяха разработени в Япония, САЩ и Великобритания. Дж.Б. Мак Чесни и сътрудниците му в лабораториите на компанията Бел разработиха модифицирана CVD техника, позволяваща ефективно производство на оптични влакна. В рамките на няколко години бе постигнато затихване, по-малко от 1 dB/km – далеч под границата, указана от Као. Днес във влакната отслабването на светлина с дължина на вълната 1,55 μm е под 0,2 dB/km (вж. фиг. 3). Едно съвременно оптично влакно представлява изключително прозрачна среда, в която след като измине 1 km светлината отслабва само с 5 %.

Днешните оптични комуникации достигнаха съвременното си равнище благодарение на определен брой важни научни постижения. Съществено в това отношение се оказва създаването на диодите, излъчващи светлина (Light emitting diodes – LED) и специално на диодните лазери, основаващи се първо на GaAs (800–900 nm) и по-късно – на InGaAsP (1–1.7 μm). Интервалът на оптичните комуникации се промени първоначално от 870 nm до 1,3 μm и, накрая, до 1,55 μm , където загубите във влакното са най-малки (вж. фиг. 3). Влакната с постепенно променящ се показател бяха полезни в първите линии за оптически комуникации. С преместването към по-дълги вълни и по-дълги съобщителни линии по-изгодни станаха одномодовите влакна. Следвайки далновидността на Као, днес оптичните комуникации на големи разстояния използват одномодови влакна. Първите такива системи използваха често електронни ретранслатори, за да компенсират оставащите загуби. Повечето от тези ретранслатори сега са заменени от оптични усилватели, по-

специално от усилватели, във влакното на които има примеси от ербий. За да увеличи скоростта на предаване, оптичната връзка използва възможността за едновременно предаване на различни сигнали по едно и също влакно. Първите не експериментални влакнесто-оптични връзки бяха инсталирани във Великобритания през 1975 г. и скоро след това в САЩ и Япония. Първият трансатлантически влакнестооптичен кабел бе инсталиран през 1988 г.

Глобалните комуникации и в частност интернет и телефонията на големи разстояния днес се основават преди всичко на влакнестооптичната технология (вж. фиг. 5). Както бе



Фиг. 5: Художествена представа за глобалните комуникации.

отбелязано по-горе, главно преимущество на оптичните вълни в сравнение с радиовълните са високите честоти, които позволяват постигане на голяма скорост за предаване на данни. Днес няколко терабита в секунда може да бъдат предадени по единствено влакно, което представлява увеличение с множител от един милион на онова, което можеше да се постигне преди 50 години посредством радиосигнали. Броят на влакнестооптичните кабели, инсталирани днес по целия свят, бързо расте. Влакнестата оптика е важна също така за огромен брой други приложения, в медицината, лазерните технологии и сензорите. Един интересен пример за използване на влакнестооптичните комуникации в науката е модерната влакнестооптична мрежа, създадена на Големия адронен колайдер в ЦЕРН, Женева, която ще разпространява огромното количество информация, получено от детекторите на частици до компютърни центрове по целия свят.

Полезни четива:

1. J. Hecht, "City of light. The story of fiber optics", Oxford University Press (1999).
2. K.C. Kao and G.A. Hockham, "Dielectric-Fibre Surface Waveguides for optical frequencies" Proc. IEEE, 113, 1151 (1966).

Устройства със зарядова връзка

Историята на камерите и фотографията е много дълга и включва определен брой важни открития и усъвършенствания. Старите култури, като тези в Китай, Египет и Гърция, познавали явлението камера обскура, при което дупка в едната стена поражда появата на обърнат образ върху противоположната стена на затъмнена стая. Това се използваше в примитивните камери, снабдени и с лещи за подобряване на образа, но без среда, в която той да се запазва. Историята на запазването на образа, т.е. на фотографията, съдържа много имена, някои от които ще бъдат упоменати по-долу. Очевидно първата все още запазена снимка е направена от Ж.Н. Ниепс през 1926 г. с помощта на камера обскура при време на експозиция 8 часа. Негативният образ се получава върху слой от битум, нефтен продукт, който се втвърдява от светлината. За формиране на позитивния образ след това е използван сложен процес. Л.Ж.М. Дагер разработва процес за получаване направо на позитивен образ върху посребрена медна плоча, покрита със сребърен йодид, който образува чувствителен към светлината слой. След експонирането слойът се обработвал с живачни пари, за да се получи позитивен образ (наречен дагеротип и осъществен през 1839 г.). През 1841 У.Х.Ф. Талбот открива чувствителната към светлина хартия, покрита със сребърни соли, слагайки по този начин началото на съвременната фотография. Върху нея първоначално се получава негативен образ, който после, чрез контактно копиране върху друга светлочувствителна хартия, се превръща в позитивен образ. Той описва също така етапите, необходими за проявяване на скритите образи, формирани върху хартиите. Последват няколко усъвършенствания, засягащи основата за светлочувствителните слоеве. Идеята за използване на емулсии (сребърни соли в желатин) за получаване на негативи се заражда около 1870 г., а за заместване на стъклените плаки с целулоидни филми – около 1880 г. Ролковият филм е изобретен през 1887 г. от един свещеник, Х. Гудуин, и използван от Дж. Ийстман. През 1888 г. на пазара се появява кутията фотоапарат на Ийстман Кодак с ролков филм.

През 19. век са проучвани също различни схеми за цветна фотография. През 1908 г. Нобеловата награда по физика се присъжда на Дж. Липман за неговия процес за цветна фотография, основан на интерференчни ефекти. Един от важните ранни приноси към цветната фотография бе направен от пианиста Л.Д. дьо Харон, който през 1869 г. предлага т.нар. субтрактивен метод. Той се основава на факта, че един пигмент поглъща всички цветове, освен своя собствен, който отразява. Заедно със светлочувствителни емулсии, това може да се използва за цветна фотография. Традиционните цветни филми са съставени от три светлочувствителни емулсии с различна чувствителност: горният слой към синя, средният слой към зелена и долният слой – към червена светлина. След специална поредица от проявявания се получава субтрактивен цветен образ в жълто, магента и циан (негатив), който се подлага на по-нататъшна обработка. Този принцип стои например зад появилите се през 1935 г. филми кодахром, изобретени от двама музиканти, Л. Годовски и Л. Манес. Производството на тези филми спря едва напоследък, тъй като фотографите започнаха да използват по-нови филми и, в много по-голяма степен – цифрови технологии за получаване на образи. Фактически Кодак разработи още през 1975 г. филтърен мозаечен образец, използван като сензор за образи в устройство със свързан заряд (CCD) – само няколко години след като компанията Fairchild Semiconductors пусна CCD чип за получаване на изображения със 100 реда и 100 колони, и пет години след основополагащата за създаването на CCD статия на У.С. Бойл и Дж.Е. Смит. Друго следствие през 2008–2009 г. от развитието на цифровата технология за получаване на

образи е спирането от компанията Полароид на производството на продукти за моментални снимки.

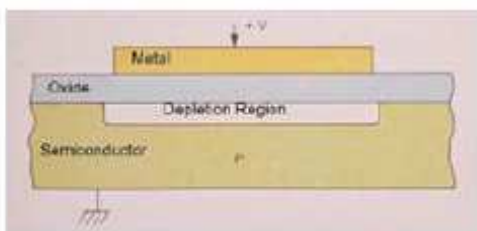
Когато замисляха CCD устройството, и **Уилард С. Бойл**, и **Джордж Е. Смит** работеха в лабораториите на Бел в Ню Джърси. Смит работеше като шеф на отдел под ръководството на Бойл, който бе директор на лабораторията за разработки на устройства. Бойл е роден през 1924 г. в канадската провинция Нова Скотия. Получава образованието си в университета Мак Гил и през 1950 г. получава докторска научна степен. В лабораториите на Бел постъпва през 1953 г. Смит е роден през 1930 г. в Уайт Плейнс, щата Ню Йорк. През 1959 г. получава докторска научна степен по физика в Университета на Чикаго. Постъпва в лабораториите на Бел през 1959 г. Бойл и Смит разделят половината от Нобеловата награда по физика за 2009 г. за създаването на устройство със свързан заряд (CCD), използвано за създаване на висококачествени изображения. Първите две статии, едната теоретична, другата – експериментална, се появяват в една и съща книжка на списанието *Bell Systems Technical Journal* [W.S. Boyle and G.E. Smith, 49 (1970) 587; G.F. Amelio, M.F. Tompsett and G.E. Smith, 49 (1970) 593.]. CCD може да регистрира картина чрез натрупване на индуцирани от светлината заряди върху повърхността на полупроводник, които заряди може да бъдат пренесени в края на светлочувствителната област и да бъдат регистрирани. Изобретението използва свойствата на новата за тогава MOS (Metal Oxide Semiconductor) технология за създаване на интегрирано и просто устройство за регистриране и четене на картини. Четенето става по начин, често наричан “bucket brigade”¹, тъй като при него става преместване на редици от информация чрез последователно странично отместване. Терминът “bucket brigade device” бе създаден през 1967 г. от Дж. Краузе и вече бе използван от У.Дж. Ханън за понятието пренасяне на заряди по верига от полупроводникови устройства. През 1967 г. Ф. Сангстер патентова, а през 1969 г. заедно с К. Тиер публикува [*IEEE J. of Solid-State Circuits*, SC-4 (1969) 131] това, което днес е известно като ВВД-устройство (bucket brigade device), в което с помощта на транзистори зарядите се прехвърлят между кондензаторите от една верига, така че с всеки такт сигналът се прехвърля върху следващия кондензатор. Критичното свойство, което ограничава дължината на веригата, е ефективността на прехвърлянето на заряда. CCD, което бе замислено през 1969 г., използва различен и по-ефективен принцип, при който създадените от светлината “зарядови мехурчета” полунепрекъснато текат по веригата. CCD бързо се наложи в разработката на твърдотелни устройства за електронно формиране на образи.

Споменаването по-горе на “зарядови мехурчета” не бе случайно. Бойл и Смит фактически бяха пришпорени да се състезават с популярната по онова време в лабораториите на Бел памет, използваща магнитни мехурчета. Един цитат от съвременен ревю на Смит [*Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 607 (2009) 1-5] гласи:

“За да се разбере важността на това устройство (паметта на магнитни мехурчета), трябва да се има предвид структурата на отдела за електроника в лабораториите на Бел, който се ръководеше от вицепрезидента Джек Мортън. Той бе разделен на два подотдела, единият за полупроводникови устройства, а другият – за всичко останало. Бил Бойл бе изпълнителен директор на полупроводниковата част, а аз оглавявах отдел в тази част. Джек Мортон бе загрижен да ускори разработката на магнитни мехурчета като основна технология за памети и планираше да прехвърли средства от полупроводниковия отдел

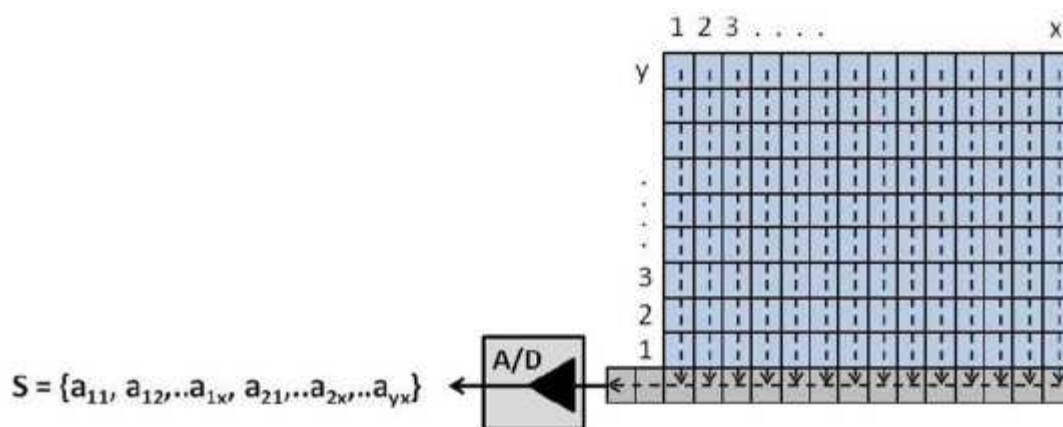
¹ Става дума за предаване на заряда последователно между отделни елементи, така както навремето при пожар хората в една редица си предавали кофи с вода от ръка в ръка. (Бел. прев.)

към другия, където се извършваше работата по мехурчетата. За да не се случи това, Мортон искаше отделът на Бил да направи полупроводниково устройство, способно да конкурира мехурчетата. За да се заловим с това изискване, на 17. октомври Бил и аз заедно отидохме в неговия кабинет. В едно продължило не повече от час обсъждане на черната дъска бе скицирана основната структура на CCD, формулирани принципите на действие и развити някои предварителни идеи относно приложенията. Ходът на мислите се разви както следва. Първо, необходим е полупроводников аналог на магнитното мехурче. Електричният двойник е пакет от заряди. Следващият проблем е как да се натрупа този заряд в ограничена област. Структурата, която идва наум е обикновен MOS-кондензатор с обеднена област (фиг. 1). MOS-кондензаторът е основен елемент в другата най-предпочитана технология, а именно на MOS-интегралните схеми.”



Фиг. 1: Основна MOS-структура.

CCD представлява устройство от типа метал–оксид–полупроводник (MOS), което може да се използва като детектор за записване на образи в електронна форма и по този начин представлява съвременна алтернатива на фотографския филм. Повърхностната структура на CCD представлява матрица от голям брой малки, светлочувствителни елементи, или пиксели, подредени хоризонтално в редици и вертикално в колони (фиг. 2).

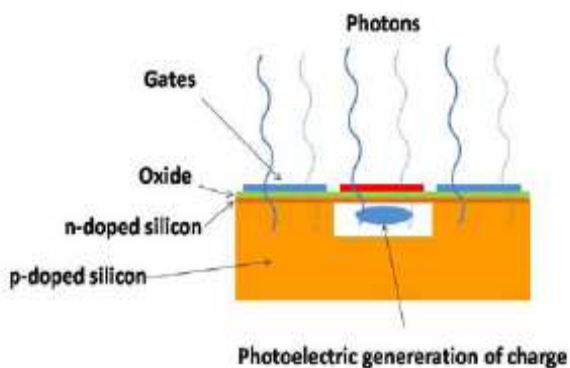


Фиг. 2: Принцип на четенето на един CCD-чип. В даден момент всяка редица се премества с един ред надолу и чрез аналогово-цифров (A/D) преобразувател, при което на изхода се получава цифров сигнал.

Пикселите се състоят от MOS-кондензатори (които съответстват на зърната във фотографския филм). Когато един фотон въздейства на площта, съответстваща на един от

пикселите, чрез фотоелектричния ефект² той се преобразува в един (или няколко) електрона, които зареждат кондензатора. Броят на електроните, натрупани върху различните пиксели е право пропорционален на интензитета на светлината, паднала върху даден пиксел. По този начин разпределението на зарядите върху пикселите съответства на образа. С прочитане на съдържанието на различните пиксели чрез последователно отместване на зарядите може да се реконструира образът (фиг. 2).

CCD се правят върху силициева пластинка чрез широкомащабно сглобяване, включващ поредица от сложни фотолитографски стъпки. В силициевата основа се вкарват примеси, обикновено от бор, за да се формира силиций с *p*-тип проводимост – материал, в който основни токови носители са положително заредените електронни дупки. Обикновено фотоактивният слой представлява епитаксиално нанесен слой върху силиция със силно легиран *p*-тип силиций. Върху предната страна на прибора са разположени гейт-електродите и повърхностните канални (оксидни) слоеве, докато задната страна е обемен силиций, обикновено с тънък метален слой³. Анатомията на CCD е такава, че тя съчетава възможността за записване на образа с прост и ефективен начин за снемане на информацията (четенето). Процесът на четене може да се опише в термините на един аналогов брояч на преместванията, който пренася аналогови сигнали по полунепрекъснат път, контролиран от тактовата честота. Повърхностната структура на CCD не се формира от самия силиций, върху който са подредени отделните пиксели, а пикселите са определени от положенията на електродите върху повърхността на CCD. Когато на един електрод се приложи положително напрежение, всички отрицателно заредени електрони се привличат в областта под електрода (фиг. 3). Същевременно положително заредените дупки се



Фиг. 3: MOS кондензатор, използван като светлочувствителен приемник.

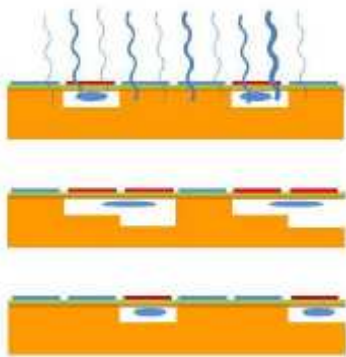
² Чрез фотоелектричния ефект фотоните могат да освободят свързани електрони. Широчината на забранената зона за силиция е 1,14 eV и фотони, чиято енергия е по-голяма от тази стойност, могат да освобождават електрони. През 1921 г. А. Айнщайн получава Нобелова награда по физика за обясняване на фотоефекта.

³ В едно специално, осветявано отзад устройство дебелината се намалява отзад с цел да се намали абсорбцията в гейт-структурите и това увеличава чувствителността. Това е важно в частност за дължини на вълните, при които поглъщането е голямо, както при вакуумното ултравиолетово лъчение.

отблъскват от областта на електрода, образувайки “потенциална яма” (разположена дълбоко в силиция в една област, известна като *обеднен слой*, вж. фиг. 1), в която ще се натрупат всички електрони, получени от падащите фотони. С увеличаване на експонацията на светлина потенциалната яма под електрода привлича все повече електрони, докато потенциалната яма се запълни (често наричано *пълнен капацитет на ямата*). За да се избегне преекспониране, светлината трябва да се блокира преди това да настъпи. Това може да се постигне или с помощта на затвор, както е във фотоапаратите, или чрез изготвянето на CCD по такъв начин, че в очакване на четенето съдържанието на пикселите да се прехвърли бързо в неактивните области, докато активната част от CCD може да продължи да регистрира светлина. Използваните методи са *цял кадър*, когато съдържащата заряд област е напълно интегрирана със светлочувствителната област и светлината се регистрира едновременно върху цялото устройство. Това позволява почти цялата повърхност да регистрира светлина (близо до 100 % коефициент на запълване. Но тогава, за да се пренесе и запази образът, е необходим физичен затвор. Друг метод е пренос на кадъра, при който светлината се регистрира върху цялото устройство и бързо се пренася върху една област за задържане на заряда, която има същите размери. От тази защитена от светлина област образът може да се прочете, докато се записва следващият образ. Третият метод представлява *пренос между линиите*. При него CCD колоните са засенчени през една – зарядите се прехвърлят бързо от активните колони към засенчените, за да се прочете изображението. Това означава по-малък коефициент на запълване), но с помощта на малки лещи това може да бъде компенсирено.

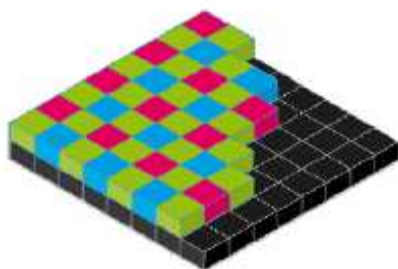
В първите CCD-та зарядите текат по границата между Si и Si-оксид, така наречените *CCD с повърхностен канал*. Това ограничава ефективността на преноса на заряд поради захващането на заряди върху повърхностните състояния. В повечето модерни CCD устройства определени области от повърхността на силиция са легирани чрез имплантация на фосфорни йони и имат *n*-проводимост. Така се избягва захващането на заряди върху повърхностните състояния и се определят каналите, по които в процеса на четене порциите заряди преминават под граничната повърхност (т.нар. *устройства с покрит канал*). Гейт-електродите са направени от поликристален силиций, който по отношение на проводимостта и прозрачността има подходящи свойства. Гейтовете са върху силициевия оксид, който от своя страна е израснат върху силициевата основа. За предотвратяване разпространението на заряди между съседни колони от пиксели се използват *канали-препятствия*, които представляват силно легирани *p*-области.

Четенето на информацията от CCD се осъществява чрез прилагане към электродите на поредица от импулси. Всеки пиксел е покрит от няколко електрода, обикновено три, както се вижда от фигурата, макар че за създаване на потенциалната яма, в която се натрупва зарядът, се изисква само един електрод. Другите два електрода се използват за процеса на пренасяне на заряда чрез прилагане на източник на трифазно напрежение. Фиг. 4 илюстрира поредицата за придвижване на заряда на една стъпка по колоните на CCD.



Фиг. 4: Последователността от натрупване и преместване на заряда по една колона на CCD детектора. Създаденият от фотоните заряд е принуден да се премества стъпковидно под действието на импулсно напрежение, приложено между електродите.

Чрез повтаряне на този цикъл зарядът се премества надолу по колоните до евентуалното достигане на крайната редица, която се прочита последователно и перпендикулярно на колоните. Последователното прочитане на всяка редица по края на CCD се прави така, че всеки зарядов пакет се усилва и преобразува в цифрова форма. По такъв начин цялото съдържание на CCD се преобразува във верига от числа, представляващи общия интензитет на всеки пиксел. Тази верига от числа може удобно да се използва за реконструиране на образа, записан върху CCD. За запис на цветни образи се използват филтърни техники. Един широко разпространен тип се нарича филтър на Байер и представлява мозайка от RGB цветни филтри, подредени над правилна решетка от фотоприемници. В съответствие с чувствителността на човешкото око, филтърът е 50 % зелен, 25 % червен и 25 % син (фиг. 5). Техниката изисква ефективно четири пиксела за всеки елемент, определящ разделителната способност, която следователно е толкова пъти по малка, отколкото при черно-бял детектор. Съществуват усъвършенствани цветни схеми, например използващи дихроичен⁴ делител на снопа и в някои CCD-та се постига по-висока чувствителност. С цел да се запише спектроскопична информация при научни изследвания на образи се използват голям брой филтри. Чувствителността на CCD зависи от дължината на вълната и от типа на устройството. *Квантовата ефективност* представлява вероятност един падащ фотон да предизвика чрез фотоефект появата на един електрон. CCD-тата имат висока квантова ефективност, чиито стойности достигат 90 %.



Фиг. 5.

⁴ Дихроичен означава, че различните цветове се пречупват различно и могат да бъдат физически разделени.

Едно важно свойство на детекторите на образи е техният *динамичен обхват*, т.е. способността им да регистрират едновременно и много ярки, и много слаби източници на светлина. Динамичният обхват се определя от отношението на *капацитета на запълване на ямата* към нивото на шума. Обикновено капацитетът на запълване на ямата е над 10^5 електрона, а нивото на шума при четене е няколко електрона, така че динамичният обхват може да бъде от порядъка на 50 000.

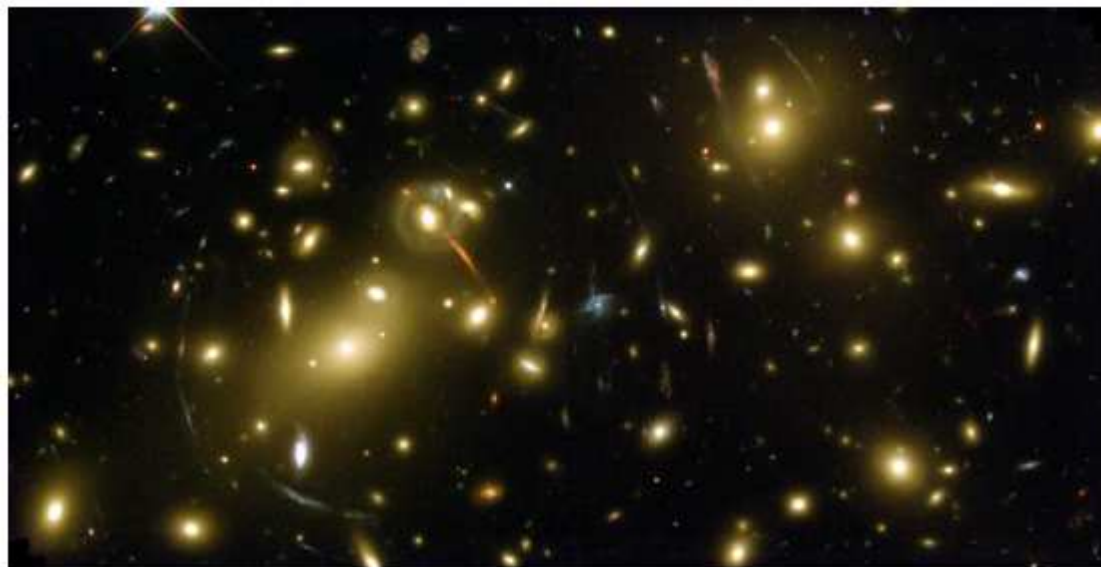
Разделителната способност на CCD се определя от размерите на пикселите. Типичните стойности за тези размери са от порядъка на 10 μm , но е възможно производството на пиксели с размер 1–2 μm . По отношение на размерите днес са стандартни CCD с 2048x2048 пиксела.

Продължилото час обсъждане между Бойл и Смит през 1969 г., за което стана дума по-горе, доведе до огромно развитие на практически и научни инструменти, основани на CCD-та: цифрови фотоапарати, медицински инструменти и научни прибори с високи характеристики, не на последно място за астрономията и астрофизиката. Тях ще обсъдим по-долу, след частта, отнасяща се до друга твърдотелна технология за сензори за получаване на образи, CMOS сензорите за образи. CMOS означава допълнителна MOS (транзисторна) технология (complementary MOS – CMOS), при която едно *n*- и едно *p*-канално устройство се използват едновременно за осигуряване на логическа верига с много ниска консумация, тъй като енергията е необходима само в процеса на превключване, напр. от “нула” към “единица”. CMOS – технологията представлява ключ към използваните днес много големи интегрални схеми. (Нобеловата награда по физика за 2000 г. бе присъдена на Джек Килби за неговия принос при създаването на интегрални схеми.) CMOS бяха създадени през 60-е години на 20. век, а в края на същото десетилетие се появили CMOS сензорите, в които създаденият заряд от фоточувствителния сензор с приложено обратно напрежение върху *p-n*-прехода ске чете от CMOS-верига. В CMOS сензорите за образи всеки пиксел се чете индивидуално и се адресира както в обикновена интегрална схема. Тъй като всеки пиксел трябва да съдържа няколко транзистора (два и повече), а не само светлочувствителна област, CMOS пикселите са по-големи, отколкото CCD пикселите. Това, както и някои други фактори като по-ниското ниво на шума и по-високата чувствителност правят CCD естествения избор за висококачествени цифрови фотоапарати и за повечето медицински и научни приложения.



Фиг. 6: Чип на една много мегапикселова CCD камера.

CCD сензорите за образи намериха важни приложения в много области на обществото и науката. Тях откриваме например в цифровите фотоапарати, скенерите, в медицински уреди, за наблюдение от спътници и в инструментариума на астрономията и астрофизиката. Съществуват десетки хиляди научни публикации и много милиони цифрови фотоапарати, които използват CCD сензори. Астрономията с астрофизиката се превърнаха в област за значителни приложения на CCD-та. Едно от най-големите CCD устройства за получаване на изображения, построено за научни приложения (за PAN-STARRS, the Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System в Хавай) включва няколко камери, състоящи се от мозайки от CCD чипове общо с над 5 гигапиксела. Както



Фиг. 7: Галактичният куп Abell 2218. *Image: WFPC2, Hubble Space Telescope, NASA.*

вече бе отбелязано, приложенията в астрономията имат много голяма научна стойност. Космическият телескоп Хъбл е снабден с няколко CCD камери за различни цели, например WFPC (Wide Field Planetary Camera), която наскоро бе усъвършенствана в трета версия. Снимката показва едно импозантно изображение на галактичен куп (Abell 2218), получено през 2000 г. с WFPC2. Слабите пръстеновидни обекти, които се виждат на снимката, представляват получени чрез гравитационни лещи изображения на по-далечни галактики. Те са използвани например за оценка на общата маса на купа, с което се получават данни за съществуването на големи количества от тъмна материя.

Съществуват и няколко важни медицински приложения на CCD камерите (напр. за изследване на тъканите и на клетките), които служат като устройства за получаване на изображения в микроскопите или за записване функционирането на клетки и тъкани *in situ*, където обработката на образа позволява на лекаря да открие минимални отклонения от нормите. CCD се използват не само за пряко получаване на образи, но също за регистриране на флуоресцентни образи от оцветени тъкани и клетки. Цифровата фотография направи революция в почти всички диагностични прибори, основани на получаване на образи. Голямо приложение намира в ендоскопията за наблюдения вътре в тялото и за насочване на инструментите в микрохирургията. Съществува голям брой ендоскопи, напр. използващи единично оптично влакно, оптични кабели или във форма на капсули, които може да се глътнат с вграден в тях светлинен източник, CCD сензори и

устройство за безжично предаване на сигнала. Ендоскопите имат също така много индустриални приложения. Напоследък са разработени безлецови измервателни системи за целите на биодатчиците, където се прави пряк запис на клетка като се анализира потока през един микро флуиден чип. Това може да се окаже една от новите ниши за цифровите изображения с висока разделителна способност.

Твърдателните образни сензори и цифровите камери измениха ролята на изображенията в нашето общество, тъй като те дават електронни сигнали, които могат лесно да се пренасят и обработват. В науката възможността за предаване и цифрова обработка на образи предизвика истинска революция. Цифровата обработка на изображенията днес е глобална стока за широко потребление, която дава възможност, например, най-добрите международни експерти да се включат както при установяване на критични диагнози, така даже посредством цифрови камери за провеждане на контрол от разстояние и обратна връзка – при провеждане на хирургични операции. Освен това оценката за огромно количество данни (напр. за създаване карта на Вселената) може да бъде разпределена между много групи и дори сред доброволци измежду неспециалистите.

Полезни четива:

1. W.S. Boyle and G.E. Smith, *Bell Systems Technical Journal* 49 (1970) 587; G.F. Amelio, M.F. Tompsett and G.E. Smith, *ibid.* 49 (1970) 593.
2. J.R. Janesick: *Scientific Charge-Coupled Devices* (SPIE Press, 2001).