動態架設塑膠光纖乙太區域網路介紹

作者／葉作球、劉冠廷、伍正平

提要

一、傳統點對點玻璃光纖網路，相關技術應用廣泛，為人所熟知。衍伸的乙太塑膠光纖網路，亦有防電磁脈衝、多工通信的特性，更重要的是有維護簡易與經濟等優點。

二、陸軍非永久性任務駐防，例如臨時營區、演習區域、救災區域，設施建設區域等，在未可預測的停留時間裏，通常基於安全考量，選擇容易架設的有線區域網路，不會選擇建設無線區域網路，也不會選擇電力線區域數據網路。塑膠光纖網路質輕可拋棄，也可使用量子密碼設備，可說是動態架設區域網路的最佳選擇。

三、利用「光乙太網路之光纖鄰接模組」的網路元件，可以建構光匯流排，實現區域網路的動態架設，也符合快速、簡單、有效、低成本、安全的作戰需求。更能隨時可延長擴展，也隨時可拆卸縮減，澈底發揮乙太網路無所不在的特性，最適合動態架設區域網路的用途。

關鍵詞：乙太網路（Ethernet）、單模光纖（Single Mode Fiber）、塑膠光纖（Plastic Optical Fiber）、光耦合器/光分歧器（Coupler/Splitter）、量子密碼（Quantum Cryptogram）、量子通道（Quantum Channel）、免碰撞偵測多重接取信號（Carrier Sense Multiple Access/Collision Detect, CSMA/CD）。

前言

多點對多點式的乙太網路運作成功，可以建立無所不在的乙太數據(Data)匯流排式網路，也帶來網路多工技術。塑膠光纖通信網路最廉價，是最好實現區域網路的方式。光纖通信技術理論相當複雜高深，幸好相關光元件的性質已被研究出來，所以應用的知識已被熟知。

本文逐步介紹光元件與光乙太網路的運作原理，使讀者了解，並可據以查詢更細更深入的理論與資料，達到真正了解與應用塑膠光纖光乙太網路。當需要做布建或維護時，可以輕易解決問題與排除障礙，使得光區域網路運作穩定可靠安全，可供國軍參考使用。

乙太網路簡介

乙太網路基於數位(Digital)傳輸(Transmission)技術所實現，包括發送器

(Transmitter)、接收器(Receiver)，這兩者簡稱收發器(Transceiver)。還有信號傳送媒介(Propagation Media)。根據不同信號傳送媒介，搭配相對應的收發器。例如：光纖(Optical Fiber)與光收發器(Optical Transceiver)、同軸電纜與50歐姆收發器、雙絞線與600歐姆等化收發器、自由空間與天線收發器等。

同軸電纜(Coax Cable)匯流排(Bus)通信方式，是最簡單的連接方式，且其互連之阻抗匹配問題也容易解決。利用信號再生器(Repeater)可延長信號傳送距離。使用橋接器(Bridge)可跨接另一匯流排。使用路由器可連接不同性質的網路。再生器、橋接器、路由器及以後出現的交換器與集中器(Hub or Concentrator)，後續介接，使得乙太網路有無限延伸的特性。

其運作機制與控制規約(Protocol)，稱為「乙太網路檔案傳送規約」。其最重大的創新，就是以封包作為非同步資料傳送格式，內建傳送目的地位址。爾後乙太網路流行後，國際網際網路組織(Internet Engineering Task Force, IETF)、美國電機電子工程學會(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)與眾多網路設備公司，根據梅考菲（Robert Metcalfe）與伯格斯(David Boggs)EFTP，發展成完備的乙太網路運作規約IEEE 802.3x及延伸應用規約TCP/IP。在硬體方面，不僅是匯流排，乙太網路也發展成星狀(Star)、網狀(Mesh)、階狀(Hierarchy)與環狀(Ring)等拓墣(Topology)形式。

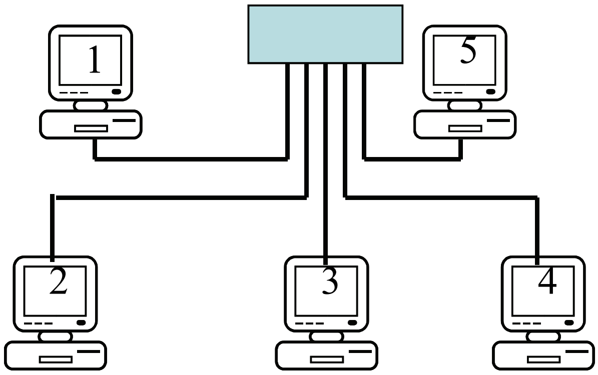
乙太網路匯流排上，眾多數據設備間，不是維持固定通信(Continuous Link)，也不是輪流詢問式通信(Round Robin or Series Polling)。而是平等式叢發通信(Burst Link)。這機制稱為免碰撞偵測多重接取信號(CSMA/CD)。其機制為：本數據設備的發送器發信前，接收器先觀察匯流排上，有無他設備發出之通信流。若無，發送器才可發出通信流，與接收器監視、比對發出的通信流是否相符。若不巧此時有他設備同時發出通信流，接收器監視與比對的結果，發現發送器發出的通信流與他設備發出的通信流，產生信號碰撞。則本設備及匯流排上偵測到碰撞的設備發送器，立刻停止發出通信流，轉而發出特定的碰撞告警信號於匯流排上。此時他設備與本設備，皆自行運作一隨機假亂數的等待時機，稱為退待[1](Bback Off)。此假亂數等待時機完畢時，匯流排上的設備才可再重新進行使用匯流排之機制。因等待時間不等長，依此機制，匯流排上眾多數據設備幾乎皆可避開信號流的衝撞，最後所有設備皆可達到通信目的。

匯流排上的設備愈多，使用匯流排上的機會愈多，免碰撞偵測多重接取信號機制運作次數愈多。因此，眾多設備用匯流排通信效率很低，但因其具有很

[1]退待(Back Off)：甲乙兩人擲骰子(例如數學亂數式電路)，甲得5，就等待5單位時間。乙得2，就等待2單位時間。理論上，甲乙兩人等待時間必不一樣。

高的經濟性，仍然流行一段很長的時間。隨後出現使用雙絞電話線多埠(Multiport)交換集中器(Switch Hub)，如圖一。

圖一　星狀交換集中器通信拓墣方式



資料來源：作者繪製

用星狀網路排除信號碰撞問題，提高通信效率與連接可靠度，改善匯流排通信低效率的缺點。然可靠度提高了，但是費用與線材使用量，卻大幅增加。

乙太網路基於無所不在的特性，隨時可延長擴展，也隨時可拆卸縮減。為了滿足這個特性，乙太網路發展出集線器、交換器與路由器。這三種乙太網路元件，可以達到管理傳送信號強度與距離、數據終端設備數量與信號傳送路由。最後發展出乙太網路訊務量與網路效益，管理的方法理論與技術。

乙太網路以應用範圍劃分為區域網路(Local Area Network, LAN)及廣域網路(Wide Area Network, WAN)，作為連絡區域網路用。不管是區域網路或廣域網路，皆可用星狀、網狀、階狀與環狀(Ring)等拓墣形式布建。現今電信公司的廣域乙太網路，偏好階狀(Hierarchy)布建。因為階與階之間可能距離遠，必須用傳輸設備連接，這樣的作法可簡化維護管理網路。私人或企業的區域網路偏好星狀布建，因為方便延長擴展與縮減，依通訊量逐批建設，減輕網路建設投資、維運費用的壓力。

由於收發器的研發進步與裝置成本考量，乙太網路傳送媒介從同軸電纜、雙絞線與光纖依次的流行。為迎合時代潮流，本文只討論光纖與光纖收發器。

基於動態架設的特性，數據通信區域網路的建設，講究快速、簡單、有效、低成本、安全。在沒有昂貴測試設備支援情況下，維護簡單，緊急時可拋棄或輕易銷毀。採用乙太網路基於無所不在的特性，就是隨時可延長擴展，也隨時可拆卸縮減。再加上利用日趨便宜的塑膠光纖(POF)與光纖收發器，這樣的選擇，可說是相當明智。

總括而論，以上乙太網路的基本運作概念，打敗了眾多網路通信技術，成

為目前最流行的網路通信技術。細究其成功的因素有三：一為網路上所有電腦或數據設備匯流排使用權平等；二為擴建縮減或移動網路容易；三為可容納運作不等速率之數據設備。

光纖與光纖收發器

現代網路建設技術，選擇使用乙太網路的考量，勿庸置疑。然而傳輸媒介光纖與光纖收發器給人第一印象，應當是高科技、昂貴與複雜的。惟隨著時代與科技的進步，使用光纖與光纖收發器，卻是最經濟的選擇。

一、 光纖的特性

同軸電纜與雙絞電話線(Twist Pair Wire)用為信號傳送媒介，到了現今10億位元流 (Giga Bits Per Second, Gb/s)區域網路時代，就力有未殆。因其高頻信號阻抗大，使得信號傳輸距離短。且銅原料的質重又貴、體積大且頻寬(Bandwidth)小。相對需要經濟性的區域網路而言，似乎應被淘汰。倘若使用塑膠光纖，可以一舉改善上述缺點。光纖通信之靈敏度高、不發射電磁雜訊、也不受電磁雜訊之干擾，可避免電磁脈衝 (Electromagnetic Pulse, EMP) 武器或炸彈[2]的攻擊，且體積小、重量輕、壽命長及價格低廉。

光纖依製作材料分為玻璃光纖(Silica Optical Fiber, SOF)與塑膠光纖。它們的結構是兩層同心圓長條型，內層叫做纖核(Core)，外層叫做纖殼(Cladding)。對光而言，纖核採用折射率高，纖殼採用折射低。

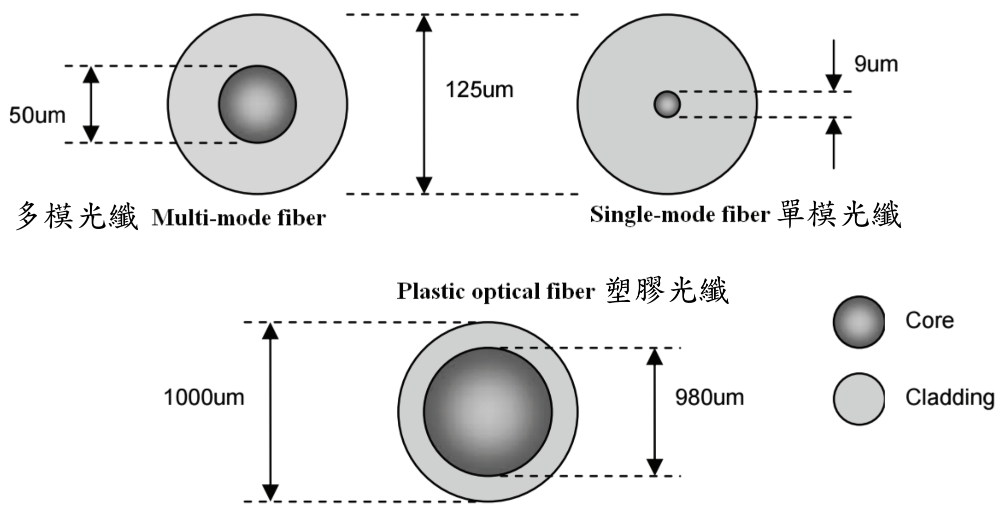
用數學與光電磁學，分析光信號在光纖中，傳播(Propagation)的行為，得到纖核的直徑(Diameter)與折射率(Reflection Index)，相對比較纖殼的直徑與折射率，產生光信號在光纖中不同傳播的行為，可分成 3 類光纖。第一類是階射型光纖(Step Index Fiber)，其纖核直徑大，可達釐米(mili-meter, mm)，入射纖核光線的角度寬達 30 度。但是太多角度的入射光，耦合(Coupling)進入光纖，基於全反射的角度不同，從光纖始端到光纖尾端，等效路徑不一樣長，時間有先後。對光而言，這些全反射在纖核不同的角度，稱為模態(Mode)，階射型光纖就是多模態(Multi-mode)光纖。射入階射型光纖的光，被調變為開或關(On or Off)形成光信號方波。若用光示波器，在光纖尾端觀察，發現方波因為模態太多的效應，方波兩邊有模糊。若光示波器有貓眼圖(Eye Diagram)功能，則眼孔清晰區域小於二分之一。所以階射型光纖清晰可被調變次數，約為數百萬次。纖核周圍外層約為 0.2mm，對纖核而言可達到光的電磁波局限效應(Confinement)。

[2]Blake, http://technews.tw/2013/12/24/emp-weapon-modern-warefare/, 2015/3/1.

第二類光纖，改良纖核直徑小於 0.065mm，等於 65 微米(Micro Meter)。作成纖核折射率漸變的斜射率光纖(Graded Fiber)，造成可入射光纖的光角度變小。且在纖核裏，可全反射的角度變少，即傳播模態數變少，因而光示波器觀察，被調變光信號在光纖尾端的方波兩邊變細，貓眼圖清析區域變大，意味著入射光可調變數，提高到十億次。

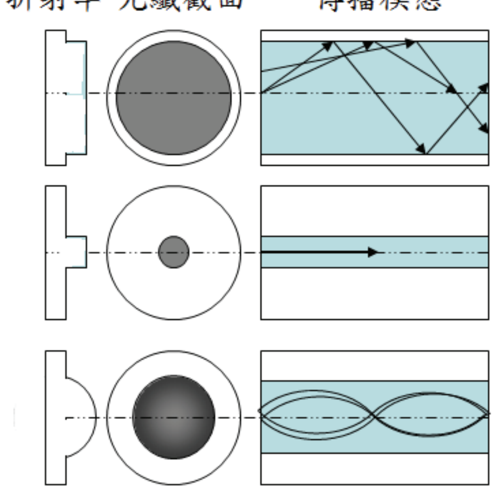
第三類光纖，更改良纖核直徑，約為 0.009mm(9 微米)。作成纖核折射率均勻的單模光纖，可入射光角度只有 5 度或更小。光信號在纖核裏可全反射的角度僅剩一個，即模態數是單個。因而光示波器觀察，被調變光信號，在光纖尾端方波兩邊及貓眼圖清析區域變大，入射光可調變次數，提高到無限次。惟調變次數提高，引出極化問題。(如圖二、三)

圖二　光纖模式種類截面圖



資料來源：作者繪製

圖一　塑膠光纖傳播模式圖



資料來源：作者繪製

尚未有人證明出單模光纖頻寬的極限，所以假定單模光纖之頻寬無限大。因此，單模光纖可作為量子(Quantum)密碼(Cryptography)設備，產生量子金鑰(Quantum Key)，所需的量子通道。放置兩地的兩個量子密碼設備終端機，一端設備叫作愛麗絲(Alice)，另一端叫作鮑伯(Bob)。就是靠單模光纖量子通道，傳送單光子(Single Photon)的量子，產生金鑰[3]。量子密碼的重要性，理論上絕對不會被破密。

由於玻璃材料單模光纖，在電信使用量大的帶動下，價錢反而比第一類與第二類的階射光纖與漸變折射率光纖便宜，一公里單模光纖的價錢少於 10 美金。玻璃光纖加工製造溫度，在攝氏千度以上。不管是理論研究或是材料改良，單模光纖已經是非常成熟。以光信號傳播損失考慮，玻璃光纖優於塑膠光纖是不爭的事實。然而塑膠光纖加工製造溫度，在攝氏 250 度以下，加工製造容易的多，相關元件如塑膠分光器，也跟著容易加工製造。而且其潛力無窮，最主要的原因是，材料價格低廉。早期塑膠光纖通信上應用不多，因為單位長度插入損失(Insertion Loss)大，不像玻璃光纖插入損失小，適合做長距離光信號傳輸。因此，早先塑膠光纖沒有受到重視，但在短距離通信相當好用，單位長度插入損失大的因素，影響不大。現因應用量小，塑膠光纖量測儀器與發展工具欠缺，連帶的專用驅動晶片與系統應用也付之闕如。基於成熟的玻璃光纖之通信技術，若軍事上，推廣使用塑膠光纖，很快的可讓塑膠光纖普及，降低大量成本，帶來更多效益與通信安全。玻璃光纖容易折斷，插入人體非常危險，生醫光電選用塑膠光纖，用後即丟，符合成本效益。

其實通信專家都知道光通信的優越，在設計電乙太網路驅動晶片與系統時，納入光乙太的特性。故現今不需特別發展光乙太網路晶片，直接可用電乙太網路功能晶片，驅動光介面收發裝置，甚至部分可用簡化版更經濟。由於電乙太網路相關設備，被使用相當多，故價格相當低廉，也帶動光乙太網路，經濟使用的優點。目前應用塑膠光纖作為區域網路，最大的障礙是接頭有很多家品牌之產品與規格，尚無統一形式，各有優缺點，影響到測試設備的發展與網路接頭規格。

雖然塑膠光纖最早是美國杜邦(DuPont)公司在 1960 年代所開發出的，但卻在 1970 年代初期，將其專利賣給日本的 Mitsubishi Rayon 公司。其材料是聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethylmethacrylate, PMMA)，簡稱 Acrylic，俗稱壓克力。在光纖通信理論，塑膠光纖中屬於階式(Step Index)多模(Multimode)，內層折射率

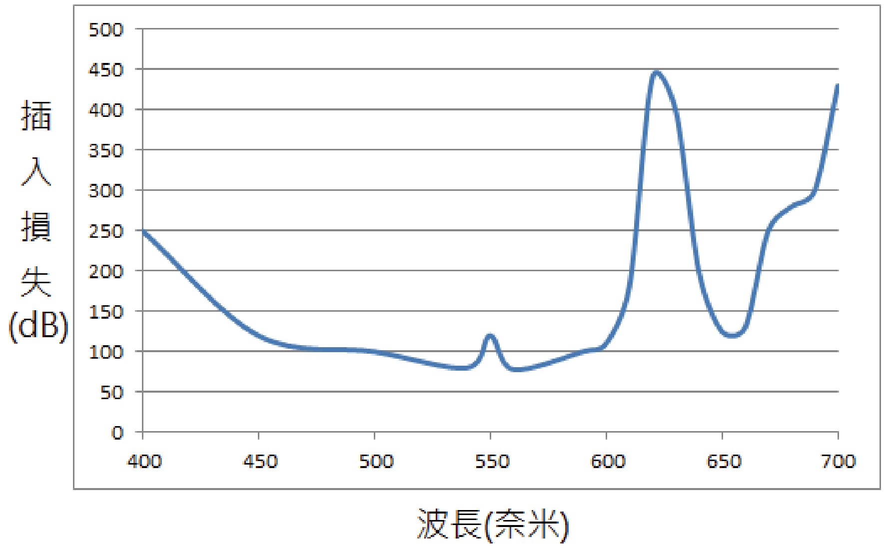
[3]葉作球等，〈量子加密服務網路構建架構〉，中華民國專利，發明 I478530 號。

大於外層。以最容易取得的紅光波長在其內傳播，插入損失(Insertion Loss)相當大，約為每公里 120 Db，圖四為塑膠光纖傳播損失光譜(Spectrum)圖。

近來有廠商加入氟的配方，使得插入損失降為每公里 50 dB。若塑膠光纖收發器有 20 dB 動態範圍，則光信號傳送距離為(1000m/50)*20=400m。實驗室有人用，PMMA-d8 的材料做成塑膠光纖，其傳輸損失約為 18 dB/km@655 nm，光信號傳送距離更遠。

事實上塑膠光纖的核心折射率，也可做成漸變多模型式，或是階式單模光纖。貓眼圖有更清晰的表現，光信號可調變次數更高。

圖四 塑膠光纖插入損失



資料來源：作者繪製

二、光纖收發器的特性

光是高頻電磁波(Electromagnetic Wave)，算是橫波(Transverse Wave) 的一類，其與波的行進方向做垂直震動，並且磁波與電波互相垂直。若遇到適當不同介質，可以轉化成純電波或純磁波或其向量組合。而其振幅與波的行進方向，可能改變的夾角，就是極化角。光以頻帶又可分可見光(紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫)，波長介於 340 奈米(nano-meter, nm)與 650nm 間。非可見光(紅外光、紫外光)。紅外光的波長大於 650nm，紫外光的波長小於 340nm。長距離光通信，偏好插入損失小的玻璃光纖與其適應的紅外光(波長 1550nm)。不熟悉光纖通信者，極易被光密度高，不可見的紅外光，也會傷害到眼睛。

基於塑膠光纖的插入損失特性，通信的收發器光源，可用 LED 或是半導體雷射(Semiconductor Laser)的光。波長要求在 650nm，也就是紅光，可以得到最好的傳輸效果。傳統側邊(Edge)發光半導體雷射，必須封裝後測試，故成本價

格較高。現今廠商開發垂直共振腔半導體雷射(Vertical Cavity Surface Emission Laser, VCSEL)，可以在晶圓上測試其是否發光，判斷晶片的好壞，減少封裝後測試失敗的成本，故價格相對側邊發光半導體雷射便宜。LED 的發光角度大，只適合將光能量，打入受光角度大的多模光纖。而垂直共振腔半導體雷射發光角度小，適合將光能量，打入受光角度小的單模光纖，當然也可打入受光角度大的多模光纖。

LED 應用於光通信上，調變速率不夠高，成為主要課題。若與通信光纖作整合，目前有可視波長 650nm，搭配塑膠光纖，玻璃多模光纖搭配 850nm 波長(Wavelength) LED。玻璃單模光纖搭配 1310 或 1510nm 波長 LED。由於先天上的特性，1310 或 1510nm 波長 LED，最大調變速率為 50 Mb/s，限制了其在數位通信上的應用；而 650nm 波長 LED，最大調變速率可達 200 Mb/s。目前最重要的課題是，將 LED 在波長的控制與發光效率上提高。用覆晶(Flip Chip, FC)法，將藍寶石(Sapphire)基版放在上面，P 型半導體與 N 型半導體放在下面，讓光在上面透明基版射出，其光輸出功率增加一倍。利用雷射生成原理結構之設計，與其他包括材料的研究改進，亦可造成 LED 的功率增加。

利用半波長整數倍的共振腔，以及上下邊布拉格式反射鏡面(Distributed Bragg Reflector, DBR)，造成共振腔發光二極體(Resonant Cavity LED, RC-LED)。其上下邊布拉格式反射鏡面反射率，低於雷射二極體所需條件，無法達到雷射共振條件。所以 RC-LED 是自發性(Spontaneous)發光，而非雷射般的激發性(Stimulated)發光。早期 RC-LED 波長半高寬約 6 nm，目前已進步到 2nm 的設計結果，意即信號可調變光，亮或滅的次數，大為提高到每秒 500 百萬次(Mb/s)或更高。詳細內容自行參考專業書籍與論文。雖然藍或綠波長的 RC-LED 已有發表，但通信業重視紅色(650nm)波長的 RC-LED，因為是最早應用在塑膠光纖通信上。總結而言，考慮 LED 的發光效率，與最大調變速率，用在 100Mb/s，是價廉物美。若要性能優良，功率要求高，可選擇 RC-LED。若需要更高 1Gb/s 調變的高速光源，就要選用 VCSEL 製作光收發器。傳統側邊發光半導體雷射，性能優良，惟價格稍貴，不適合用在塑膠光纖領域。

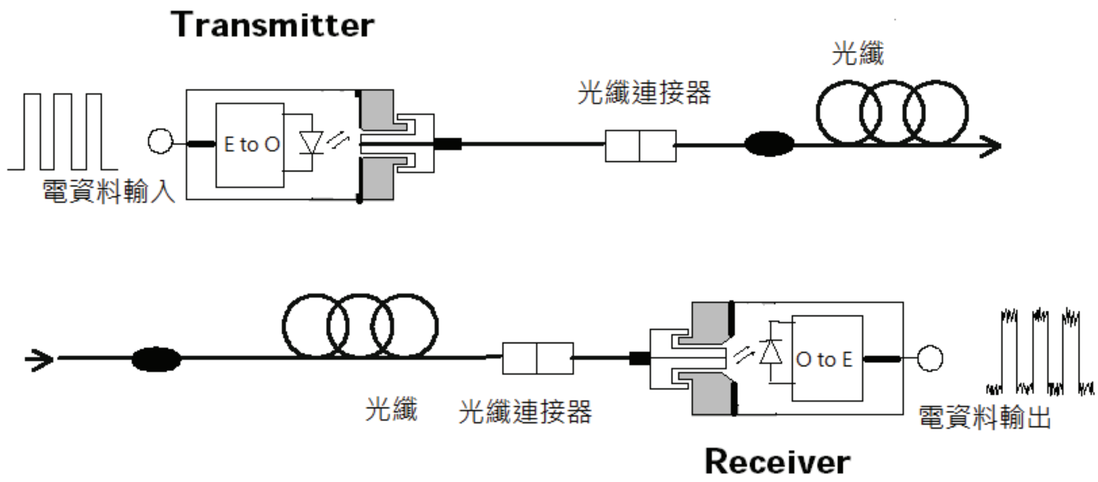
LED 有供電即發光的特性。雷射發光有最少起振電流的要求，通常用偏壓將信號調變電流墊高，以提高調變速率效能。因此，未有調變電流時，最好關掉偏壓，以防止因偏壓引起 LED 式的殘光現象。沒有關掉偏壓功能的光收發器，用在連續工作模式(Continuous Mode)下的光調變，這是市場現佔大多數的光收發器。可以隨信號打開或關掉偏壓功能的光收發器，稱為叢發(Burst Mode)或突發模式光收發器，這種光收發器用在匯流排的光纖網路上，不會干擾

CSMA/CD 機制的運作。

光信號的偵測接收有兩種選擇，檢光二極體(P-type Intrinsic N-type, PIN)與雪崩型檢光二極體(Avalanche Photodiode, APD)。PIN 的價格低廉，光電轉換效率好。APD 有更高的光電轉換效率與調變感應能力，但需要有精密的反向偏壓控制電路輔助，故價格稍貴。

光收發器的光源選擇，除了發光功率由小到大的 LED、RC-LED 或是 VCSEL，光接收可選擇 PIN 或是 APD。因此整體光收發器的收發靈敏度設計經過光纖傳輸後，可為 20dB 或 30dB。因此傳送距離可相差 50%或更大。光送、收發器之示意如圖五。

圖五 光收發器與送、收調變信號

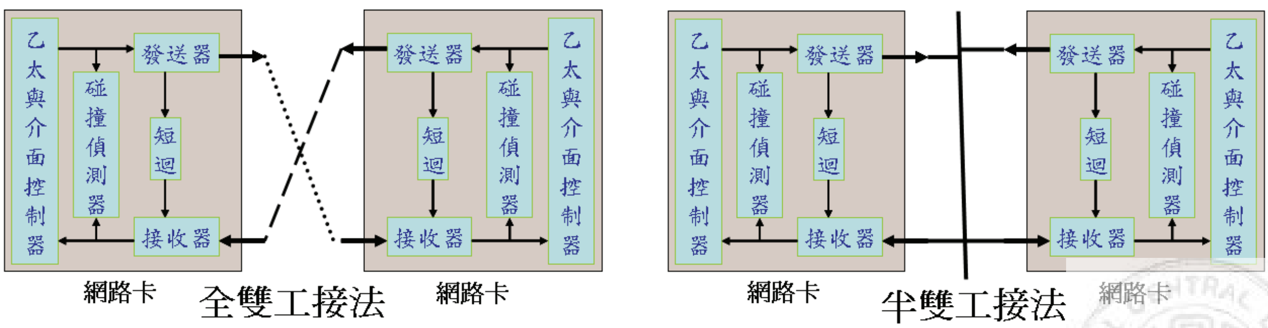


資料來源：作者繪製

光網路的基本型態

通信術語中用單迴路，信號兩端送收，一來一往的通信方式叫作半雙工。(如圖六)

圖六 網路卡全雙工/半雙工的運作



資料來源：作者繪製

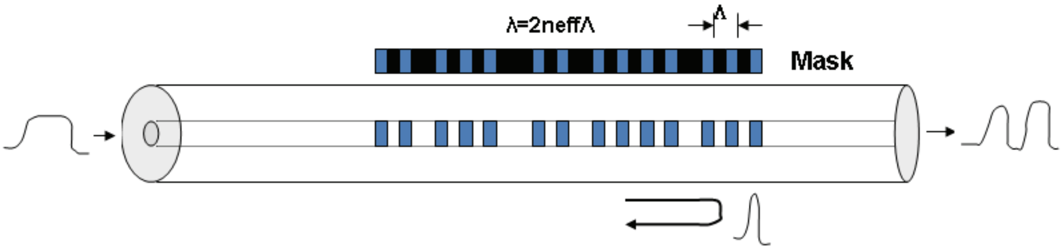
送端與收端用雙迴路，雙方信號同時做送收的通信方式，稱為全雙工。如果單一傳輸媒介，多個通信設備使用，稱為多工。傳輸媒介送收用不同路徑，形成全雙工多工。在雙光纖(Two Fiber Solution)的情況也是如此。

事實上，在電的單一匯流排方式可用劃頻多工(Frequency Division Multiple-Access, FDM)，送收用不同頻域，也可形成全雙工多工。例如甲送端用900MHz，乙送端用1800MHz，然而在收發器需要有送收信號分離器的設計。

將頻帶（例如900MHz~950MHz）細分為數十個小頻帶(Chip)，將其用作編碼(Code)，最常用華許碼(Walsh Codes)，不同編碼間有正交(Orthogonal)關係。一個發送器用其中一個碼，將碼與資料做信號調變。設計解碼器，利用這一特定碼，解調解碼調變波帶，資料分析出來。眾多發送器同時分別用不同碼與各自資料做信號調變，發送到匯流排，接收設備用特定碼，接收資料。這種方式稱為分碼多工(Code Division Multiple Access, CDMA)。因此眾多調變信號混在一起，經過解碼器後，仍然可還原個別信號。

匯流排全雙工，在單一光纖(One Fiber Solution) 同時送收的方式，稱為分波多工(Wavelength Division Multiple-access, WDM)。甲送端用1550nm的紅外光，乙送端用1310nm的紅外光，同樣在收發器需要有分波多工耦合器(WDM Coupler or Splitter)，分離出來去向的光信號。然而其機制比電的信號分離器簡單的多，主要是利用光學原理製作 WDM 光波長分離元件。另可特別訂做感光光纖，製作成光纖光柵，可做波長分離，如圖七。

圖七　纖核內之部分區域做折射率之變化

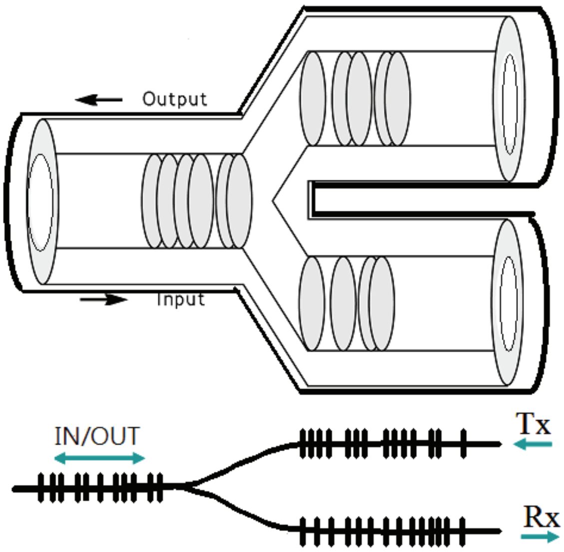


資料來源：作者繪製

利用強力短波長紫外線光，透過條紋光罩(Mask)，讓纖核內之部分區域，產生折射率變化。這光纖光柵之折射率變化的區域總長短，區域內交互條紋折射率之變化率(Footprint Pitch)，讓光信號經過光纖光柵的纖核，有很多種功能效果。例如：入射光特定波長反射(Reflection)、透射(Transmitted)，啁啾(Chirp)，散射(Scattering)入纖殼等。另外搭配多層纖殼，可以消失(Evanescent)通過的光信號。寬的光頻帶，細分數十個小的波長，也可應用於分碼多工。經過特別設

計分析，光纖光柵可以結合光耦合器，做成光分碼多工 (Optical Code Division Multiplexer, OCDMA) 編解碼收發器，如圖八。

圖八　光纖光柵光分碼多工收發器構造示意與光路符號



資料來源：作者繪製

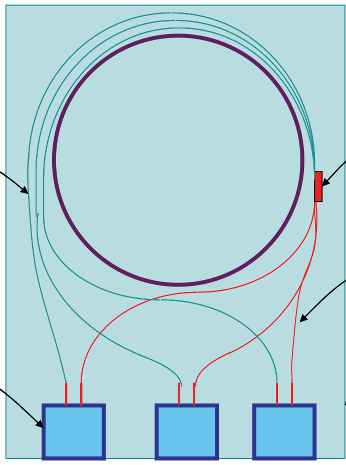
區域光網路的應用變化

光通信設備之間經常用送收兩條光纖達成，且有可能夠再容納一通信設備。但有兩條件，光通信設備須有點對多點規約，另需硬體連接元件，如光乙太光纖鄰接模組，之後將詳細說明。

光信號在光纖歧接架構中，若要做點對多點通信，送收路徑用不同條光纖，可形成點對多點全雙工。然而我們利用 3x3 耦合器做適當配接，以及乙太網路內建的信號防衝撞機制，將雙光纖的點對多點全雙工，形成驚人的可歧接雙光纖的點對多點半雙工。高效率接法要轉換成低效率接法的理由，是因為此迴路可多接設備。如暫時將數十個通信設備用交換集線器，便需要數十個埠(Ports)，線路是否來得及架設與符合經濟效益？且不是每一個通信設備需要高速高效率的專用迴路與接收埠。所以這種低效率的接法只有光纖才能做到。

圖九中左邊第一個方塊光收發連接器 104，紅色發送光纖 101，所發送的光信號，到達分光器 102，分成 3 條綠色路徑接收光纖 103，到達右邊與中間及左邊自己 3 個光收發連接器。同理，右邊與中間光收發連接器，紅色發送光纖的光信號，也會到達 3 個光收發連接器。這個光乙太網路之光纖鄰接模組的作用與匯流排的作用一樣。光乙太網路設備接在這個光乙太網路之光纖鄰接模組，信號可自送自收，也可送到另兩個光收發連接器連接的光乙太網路設備。

圖九　光乙太網路之光纖鄉接模組

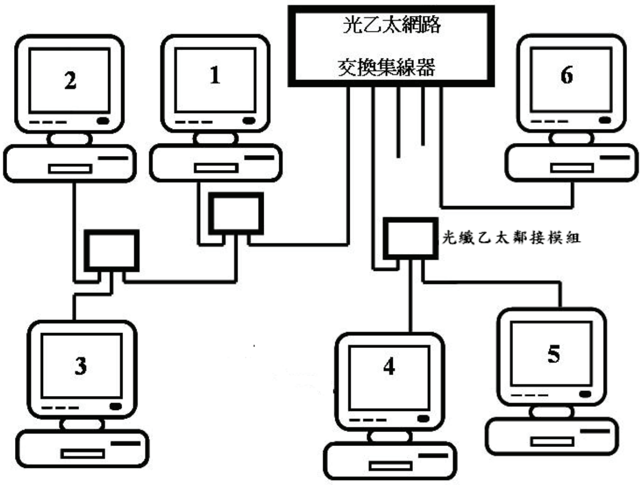


資料來源：作者繪製

一、光乙太網路之光纖鄉接模組應用運作說明

光纖傳播光信號，它兼具同軸電纜匯流排，施工接續方便、雙絞電話線多埠集中器及高可靠度的優點。更不可思議的是，因它無阻抗問題，使得光纖有歧接再歧接的能力與特性。善用光纖這個特性，網路的接法可為匯流排式或多埠集中式，以及匯流排與多埠集中混合式，其架構如圖十。

圖二　光乙太網路之光纖鄉接模組的匯流排與多埠集中混合式拓樸應用
(單線連接示意)



資料來源：作者繪製

圖十為光乙太網路之光纖鄉接模組應用單線連接示意圖，此架構可使用於光乙太網路交換集線器與光介面數據設備(1, 2, 3, 4, 5, 6)之間，使光乙太網路交換集線器之每一埠運作於全雙工點對點的運作模式，或半雙工點對多點的運作模式。其中光乙太網路交換集線器有 5 埠，依其連接光介面數據設備的數量，可分別規劃為全雙工點對點的運作模式，或半雙工點對多點的運作模式。當每

一埠延伸出去連接的光介面數據設備，若僅有一部，則可工作在全雙工點對點的模式。若一埠延伸出去連接的光介面數據設備超過兩部以上，則這一埠的 CSMA/CD 將自動起作用。讓超過兩部以上光介面數據設備，輪流與這光交換集中器一埠通信，因為此時每一部光介面數據設備的光收發器模組的實體層驅動晶片，也跟著啟動 CSMA/CD 的作用。有連接網路設備之其中一埠，再延伸又可連接另一網路設備的功能。此功能是根據光信號在分歧再分歧的光纖傳輸時，可以有分光的特性，達成光信號分送的目的。在不要求全時全速率傳送數據的光網路設備操作情況，提供點對多點，多一個光網路設備，再彈性加入網路，而不需額外施工拉光纖至光交換集線器的經濟網路運用模式。

左邊算起第一埠，連接 3 台光介面數據設備，利用光乙太網路之光纖鄰接模組之半雙工點對多點的運作模式，完成歧接再歧接的接法。就是從光乙太網路交換集線器第一埠，接到光乙太網路之光纖鄰接模組 1 之第一光纖連接器；第三光纖連接器接到光介面數據設備 1；第二光纖連接器接到下一個光乙太網路之光纖鄰接模組 2 的第一光纖連接器。光乙太網路之光纖鄰接模組 2 的第三光纖連接器接到光介面數據設備 3，第二光纖連接器接到光介面數據設備 2，如此完成光路的連接。光乙太網路之光纖鄰接模組的第一、第二與第三光纖連接器其作用是完全一樣，使用時可視情況隨意選用，這讓超過兩部以上光介面數據設備，輪流與交換集中器的這一埠做通信。

第二埠接法只用到一個光乙太網路之光纖鄰接模組。這第一埠與第二埠接法是點對多點半雙工運作模式。

第五埠接法只接到光介面數據設備 6，是點對點的全雙工運作模式。

若第二埠接法中，光介面數據設備 5 從光乙太網路之光纖鄰接模組移除，直接連接到光乙太網路交換集線器第三埠，則第三埠接法就可為點對點的全雙工運作模式。由此說明可知，點對多點半雙工運作模式，很容易與點對點的全雙工運作模式互換，全是因為有光乙太網路之光纖鄰接模組的緣故。

二、運作限制與玻璃光纖及塑膠光纖混合網路

光的介質效應與光纖形成全反射，光在光纖中的信號傳播速度，較自由空間慢約 50%，有延遲。電機電子工程學會的 IEEE 802.3 的規範，免碰撞偵測多重接取信號機制運作有其限制，退待前的觀察時間，最多 512 位元時間(Bit Time)。如以 100Mb/s 的乙太網路系統而言，512*(1/100*10E6)=5.12 微秒。而塑膠光纖折射率 n=1.5，若以單模塑膠光纖為例，C 是光速，光信號在光纖的波速 Cr =C/n=(3*10E5 公里/秒)/1.5=2*10E5 公里/秒，塑膠光纖的傳播延遲每公里是 1/Cr=5 微秒/公里。所以免碰撞偵測多重接取信號機制運作長度=5.12 微秒/5 微

秒/公里，約 1 公里。塑膠光纖匯流排最長不得超過 1 公里，若是多模光纖將會略短，肇因全反射路徑比單模光纖長，光傳播延遲也略長。

經過 3 分路光分光器，光能量衰減約 5dB。若光收發器運作預算是 20dB，而優質塑膠光纖每公里衰減 50dB，所以點對點運作長度是=20/50=0.4 公里。若是匯流排延伸加入兩電腦，就是需要光乙太網路之光纖鄰接模組兩個，光能量計算 20-5-5=10，最長匯流排光纖長度 10/50=0.2，即 200M。

匯流排內的通信收發器光源是 LED，發送資料調變信號終止，則 LED 停止發光，不會影響匯流排內其他設備的通信。若發送器的光源是雷射，因雷射有偏壓，當發送資料調變信號終止，仍然有偏壓引起的 LED 式殘光。因此，需用叢發或突發(Burst)光收發器，發送資料調變信號終止時，雷射光源全部被關掉。

現在光收發器的廠商收發模組(Tosa, Rosa)與調變與控制電路分開，做成插拔式。光收發器插入玻璃光纖單模收發模組，也可立即更換塑膠光纖多模收發模組。所以光乙太交換集線器的每一埠，可以個別獨立規劃為玻璃光纖匯流排，達到較多設備共用匯流排。也可規劃為塑膠光纖匯流排，達到少數設備但經濟共用匯流排，甚至可規劃長距離，玻璃光纖點對點通信埠。也可為短距離塑膠光纖點對點通信埠。參考圖十一，光乙太網路之玻璃光纖與塑膠光纖應用單線連接示意圖，這樣混合模式的應用，例如：兩個連各別的光乙太交換集線器，用玻璃光纖點對點通信。營內各單位可單用或共用塑膠光纖匯流排，容納例如 30 部電腦(需用 30 埠的巨型交換集線器嗎?其實只需用小型 10 埠就夠了)。營與各連隊間的通信，用點對點塑膠光纖通信就非常夠用了，這在區域網路的動態架設簡單快速，驗證測試幾乎不需要儀器協助。當部隊轉進時，塑膠光纖因為太廉價，甚至不想浪費兵力去做回收的動作。

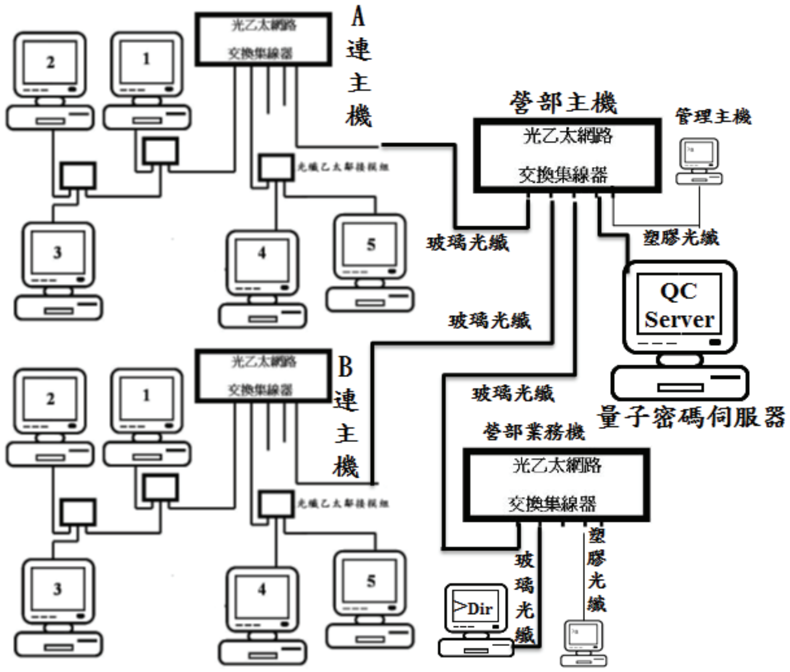
塑膠光纖的展望

時代的進步，已由廠商製作出玻璃光柵型的光纖與光子晶體光纖，其材質亦可由塑膠來製作。光柵型光纖就是多層纖殼，由更薄的數層組成，纖核可為中空或小於纖殼折射率的材質。多層纖殼微結構光纖(Micro Structure)，為布拉格(Bagg)反射原理，設計非常複雜（如圖十二）。

這種光纖可將大能量的光束，隨著光纖彎彎曲曲導到想要的地方去，就像是直流電上面載著交流信號。透過光元件處理，設備可抽出光直流能量，驅動光信號處理裝置，處理光交流信號。讓被動式的光信號處理器不必自備光源，或讓很多埠的光集中器只要一個大能量的光源即可，使得整個設備價格降低。

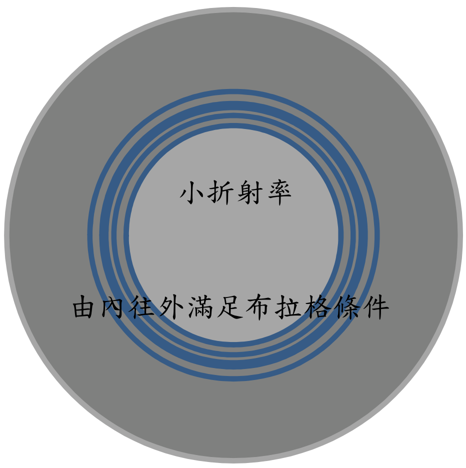
用上一級光信號調變下一級的光能量吸收器，達到光信號處理或波長轉換的目的。簡言之，電信公司光纖到家 1,550nm 波長信號，經單一光源交換集線器，就可轉換到家庭用 650nm 光波長與光信號。

圖三一　光乙太網路之玻璃光纖與塑膠光纖應用單線連接示意圖



資料來源：作者繪製

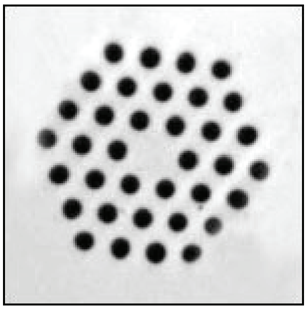
圖四　光柵型多核心微結構塑膠光纖截面圖



資料來源：作者繪製

光子晶體光纖就是單一纖殼，但由週期性幾何排列的數個微小纖核組成，纖核或可為中空。其光信號傳播原理，已非幾何光學的全反射，而是波干涉波長，頻段間隙的波傳播。光子晶體光纖有一特性，就是彎曲度可接近 90 度，有利於家庭布線與不破壞家庭裝潢之美觀，但目前價格似乎不便宜，有待其製程改進量產。光子晶體光纖設計非常複雜，幾乎是靠計算（如圖十三）。

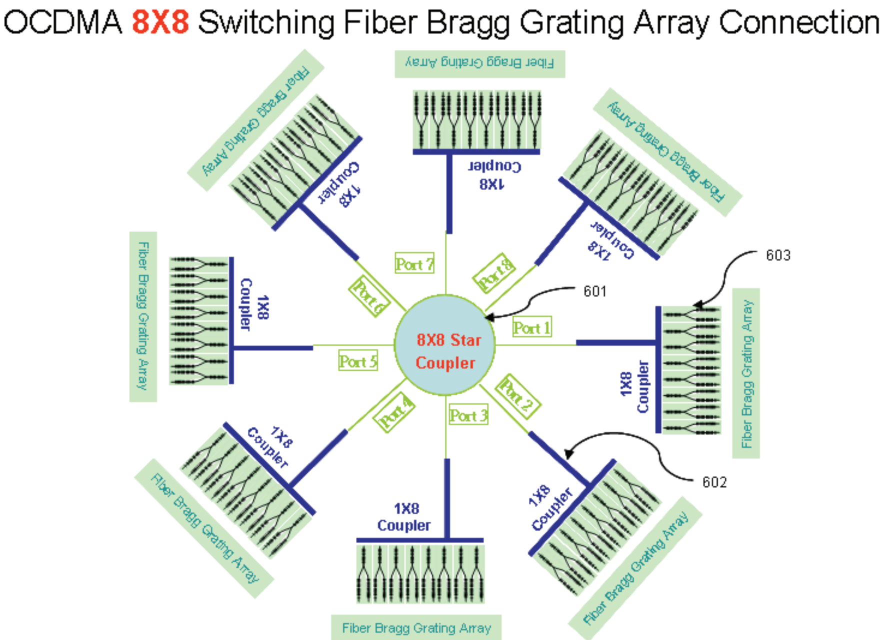
圖五三 光子晶體光纖截面



資料來源：作者繪製

一般光纖光柵是利用其反射單一波長，透射大部分其餘波長作應用。利用透設與消逝的光纖光柵特性，可做成光分碼多工編碼器。因光的對稱性，其也成為光分碼多工解碼器。因為華許碼的因素，編碼器與解碼器之間的距離，最好不要超過一位元傳送時間的等效距離。商品化成熟可用的光分碼多工編碼器，尚待進一步改進，可用為 8 進 8 出純光交換器（如圖十四），做為全光網路重要的網路元件。

圖六四 光分碼多工光纖光柵交換模組



資料來源：作者繪製

光分碼多工光纖光柵交換模組可以延伸製作成交換集中器，也可以製作成路由器。玻璃光纖與塑膠光纖，就其特性適當應用，達到性能與經濟平衡，逐步讓光網路互通。當光信號也由光元件處理，就可邁向廣域網路與區域網路的全光網路的時代。

結論

以上所述之區域光網路的彈性應用變化，對區域網路的動態架設、擴展縮減、銷毀非常容易，再加上塑膠光纖與其收發器等應用元件，相當便宜，因此值得考慮普及使用。紅光使用於塑膠光纖上，塑膠光纖斷線的位置不用儀器偵測，用肉眼即可找到。這個功能在動態架設維護網路時，特別好用。光纖本身就有防電磁脈衝的功能，不會感應電磁脈衝而引到終端設備，是現代戰爭通信設備必備的功能。而且必要時，可以連接裝置量子密碼設備，更增加資訊安全。

使用塑膠光纖光網路，能滿足頻寬與價格低廉的需求，且讓 650nm 紅光波長，保護使用成員的安全。更讓安裝與維護人員，順利布放與障礙排除。抗雜訊的能力，可以享受高品質網路通信。歧接再歧接半雙工的通信方式，讓光纖迴路減少，降低投資費用，使各個單位都能接受數位時代的來臨，增進通信的便利，並做彈性的應用變化。

多核心微結構塑膠光纖除了可作光通信之用外，也可作武器，作高能量的破壞工具。光子晶體光纖由於價格昂貴，少有人討論它的應用。然而它的優良性質是未來光纖，例如：做光信號的極化維持。現在高速乙太封包交換機的結構是電光電的架構。光分碼多工光纖光柵交換模組，是未來全光高速乙太封包交換機的實現選項。這些前瞻性的光通信元件，起初用玻璃光纖開發出來，相當昂貴，國軍若要使用，尚有一段很長時間。但是深入研究後皆可由廉價的塑膠光纖製作，惟仍須將製程設計出來，相當值得注意後續的發展與應用。

參考文獻

一、葉作球等,〈光乙太網路之光纖鄰接模組〉,中華民國專利,新型第 M 328576 號。

二、葉作球等,〈光分碼多工光纖光柵交換模組〉,中華民國專利,發明 TWI320489 號。

三、林多長、葉作球等,〈全光乙太網路點對多點協議系統〉,中華民國專利,發明 TWI239733 號。

四、IEEE Std 802.3 2000.

五、IEEE Std 802.3ae 2002.

六、ITU-T G.1010 End User Multimedia QoS Categories.

七、Internet Protocol, September 1981, IETF RFC: 791

八、Transmission Control Protocol, September 1981, IETF RFC: 793.

九、Field and Wave Electromagnetics David K. Cheng Addison-Wesley, Inc.
十、"Photonic-crystal fiber," http://en.wikipedia.org/wiki/Photonic-crystal_fiber.
十一、Microstructured optical fiber, http://en.wikipedia.org/wiki/Microstructured_optical_fiber.
十二、Principles and Applications of Optical Communications Max Ming-Kang Liu IRWIN ISBN 0-256-16415-0.
十三、Fiber Bragg Gratings, Raman Kashyap, Academic Press.
十四、BCM5411 10/100/1000BASE-T Transceiver Product Brief, Broadcom Corporation, http://www.broadcom.com.
十五、An Object-Oriented Event-Driven Simulation System for Multiple Access Control Protocols used in Satellite Communications, Nikos Drakos, Computer Based Learning Unit, University of Leeds.
十六、Channel Allocation Problem, Xiannong Meng's Home Page, http://www.cs.panam.edu/~meng/ The University of Texas - Pan American.
十七、Multiple Access Communication Network With Combined Contention and Reservation Mode Access, United States Patent: US 6,240,083 B1. May 29, 2001.
十八、Multipoint Data Communication System With Collision Detection, Robert M. Metcalfe, David R. Boggs, United States Patent: 4,063,220. Dec. 13, 1977.