

# 科技創新—— 矽光子積體電路

林銘偉

隨著國際大廠的投入，矽光子積體電路的發展日益成熟，這項默默耕耘 20 年之久的技術似乎終於泛起日出般的光芒。

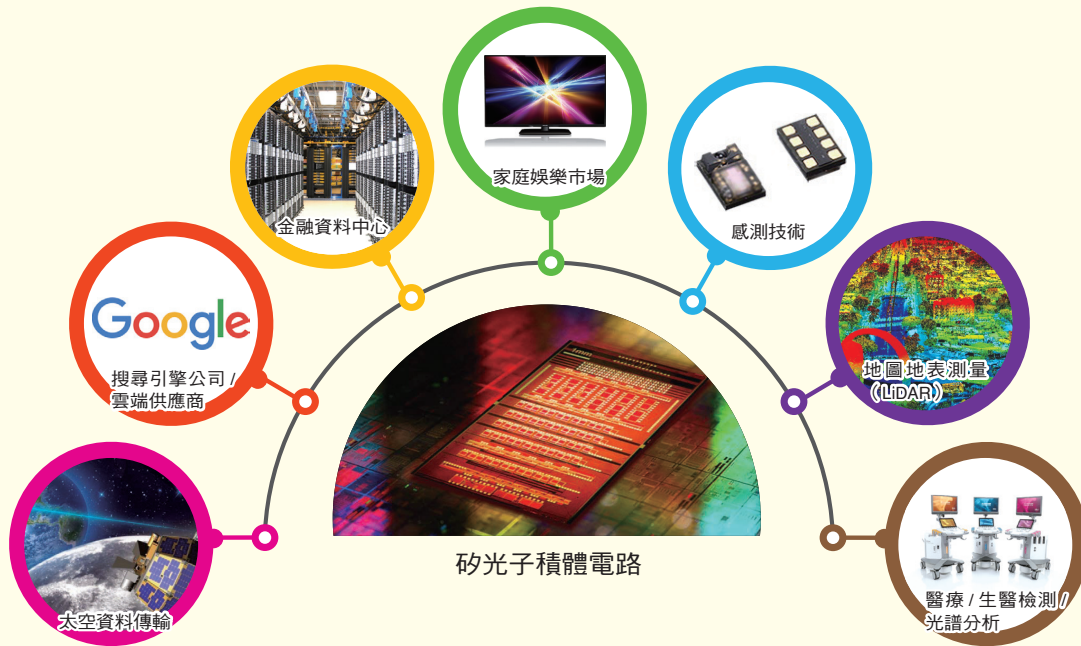
2012 年，IBM 宣布成功研製出實用化的矽光學晶片；2016 年，英特爾宣布矽光子光電傳輸器將開始大規模出貨；2017 年，矽光子公司 Luxtera 宣布與國內晶圓廠龍頭台積電共同發展下世代的矽光子技術。隨著國際大廠的投入，矽光子積體電路的發展日益成熟，這項默默耕耘 20 年之久的技術似乎終於泛起日出般的光芒。

## 什麼是矽光子積體電路

大量數據處理與 3D 高畫質影音的需求日增，電腦運算速度因而要求不斷提升，而晶片間的通訊是電腦運算速度的主要關鍵。現今的電腦元件大多利用銅線或電路板上的線路連結，銅導線使用的最大問題是在傳送資料時有訊號損耗和熱量產生的問題，因此必須控制線路長度和設計必須控制。

除此之外，半導體製程為了提升電腦運算速度，常常需要在處理器上埋入多個運算電晶體，電阻及電容規格因而要求從 40 nm、25 nm 到 16 nm 不斷降低。然而當半導體技術被迫必須往奈米極限挑戰，不斷縮小元件尺寸的同時，電路複雜化最終將走到銅金屬導線傳遞的物理極限，而奈米矽光子學就是極限處的另一塊光明頂。





矽光子積體電路可涵蓋的應用包含太空資料傳輸、搜尋引擎公司、雲端供應商、金融資料中心產業、家庭娛樂市場、感測技術、地圖地表量測和生醫光譜相關技術，應用範圍相當廣泛。（圖片來源：google）

就理論而言：光沒有電荷與質量，傳輸距離可以更遠，且沒有實體線路的干擾，也沒有訊號衰減的問題。光速般的傳遞與零耗損是電無法匹敵的，因此把光學元件整合於奈米等級的積體化晶片上，用光波導的傳導取代銅等金屬線，並如同操縱電一般地操控光，發送出0101的訊號，這就是光子技術。

而矽材料的優勢在於一般光學通訊傳輸波長是 1,310 nm 和 1,550 nm，矽本身對於這兩個波長都不會吸收，因此這兩個波段可以毫無阻礙地通過。簡而言之，矽光子積體電路就是藉由矽製程把無數個光學元件整合為一，使操作電轉為光、銅線轉為光波導，用於改進傳統電訊號傳輸的速率、頻寬、熱等問題。

## 為何需要矽光子積體電路

矽光子技術的應用層面主要涵蓋整個運算、傳輸及感測產業，在下一個世代為了進行高速的通訊聯繫，資料中心或超級電腦的架設可能需要散布在建築物四周。為了營造出深具臨場感的視覺效果，家庭娛樂市場及商業視訊會議將使用整面牆一樣大尺寸的3D螢幕，這些需求都顯示下一世代的研發重點是高速和大量的資料傳輸。而為了追求更高的傳輸速率以及更好的通訊品質，傳統的銅金屬線勢必被低損耗、高頻寬的光纖所取代。

矽光元件因有頻寬大、損耗低的特性，能夠提供很高的調變速率，因此傳輸量相當大，足以應付運算產業高速傳輸的需求。

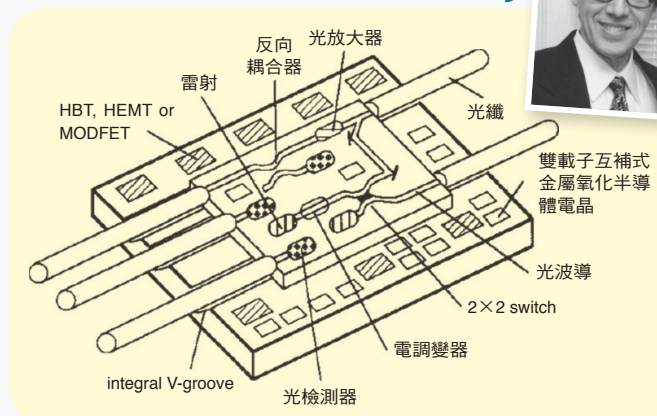
矽光子積體電路就是藉由矽製程把無數個光學元件整合為一，使操作電轉為光、銅線轉為光波導，用於改進傳統電訊號傳輸的速率、頻寬、熱等問題。

Richard A. Soref



矽光子技術的發展應用將使資料中心的使用者，如搜尋引擎公司、雲端運算供應商或金融資料中心等用戶，不僅得到充裕的傳輸效能與傳輸容量，還能降低空間與能源帶來的成本。

在其他需求上如在醫學檢測方面，矽光子傳輸技術可以用來協助遠端醫療，特別是需要即時影像檢測的遠端判讀與操控。其他應用像是整合微型雷射技術，可用於雷射醫療、雷射生物檢測、光譜分析等；在軍事應用方面，這項技術可支援衛星在太空中進行大量的資料傳輸；最後像是在機器人、地圖地表量測、感測技術及化工業，都有矽光子技術可發揮的地方。



美國 Richard A. Soref 教授在 1986 年發展的矽光子積體電路的架構圖，其結構包含雷射、方向耦合器、光放大器、光纖、雙載子互補式金屬氧化半導體電晶體、光波導、電調變器、光檢測器等。（圖片來源：R.A. Soref et al., IEEE J Quantum Electron. QE-22, 22, 873, 1986）

## 矽光子積體電路的組成

矽光子積體電路最早在 80 年代由美國 Richard A. Soref 教授提出，以細部設計而言，須把各種光學元件整合在矽晶片中，例如光耦合器、調變器等。Soref 教授在 1986 年發展的矽光子積體電路的架構圖，在單一晶片上置入多種光學元件，代表整個矽光子積體電路的發展區塊相當多元，其技術複雜因而造成矽光子積體電路的發展甚有難度。

基板採用絕緣層上覆矽（silicon on insulator, SOI），是矽光子積體電路發展至今常用的結構。矽光子積體電路內部可分為三類元件（包括被動、主動與電子元件），其中被動元件包括光波導、方向耦合器、馬赫—倫德爾干涉儀、環型共振腔、Optical I/O（包含光柵耦合器和邊緣耦合器）等；主動元件包括調變器、光檢測器、雷射等；電子式元件包括轉阻放大器、ASIC、驅動 IC 等。以下針對較重要元件的功能及發展概況做說明。

**光柵耦合器和邊緣耦合器** Optical I/O 幫助讀取晶片上儲存的資料，一般可以分為光柵耦合和邊緣耦合。以邊緣耦合來說，因其設計簡單，可使用的頻寬較光柵耦合寬，且光透過邊緣耦合方式進入波導元件的損耗低，因此早期較光柵耦合廣泛使用。

但邊緣耦合的缺點在於需要額外的製程，當邊緣耦合元件做好，元件必須切開，劈裂面需要拋光才會有比較好的光耦合，因此邊緣耦合元件在製作上相當複雜。對光柵耦合而言，使用頻寬雖不及邊緣耦合的使用頻寬寬，且光損耗可能較邊緣耦合大，但因耦合光的方式較簡單，光只要在特定角度入射光學元件即可，在近期相當受到注目。

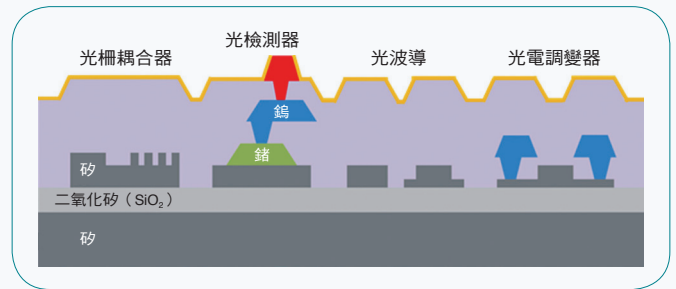
**光檢測器** 是矽光子積體電路接收端中相當重要的一個元件。在矽光子積體電路應用上，需要一個速度很快、體積又小、又省電的光檢測器。在光檢測器的發展上，

大致有兩種不同的想法，一種是把三五族材料直接貼在絕緣層上覆矽（SOI）基板上面，另一個重要的發展就是把三五族材料以鍺取代。在傳統光通訊領域裡面，重視的波長包含 850 nm、1,310 nm、1,550 nm，鍺可以涵蓋在長波長（1,310 nm、1,550 nm）的光偵測，因此它在很早期就是光檢測器發展中的一個重要選項。

**光波導** 光波導元件是幫助傳遞光訊號，是在矽光子積體電路上大量使用的元件單元，其設計結構包含通道波導、脊型波導等，大部分矽光子元件的設計都會搭配光波導元件。光波導的傳播損耗主要來自波導側壁的粗糙現象，由於微影與蝕刻製程中造成波導側壁粗糙，接近界面的光場會因散射而損耗，在小尺寸矽光子元件中的影響更為顯著。在早期波導的損耗高達每公分 15 dB，如今因為絕緣層上覆矽基板的引入和製程、設計方法的改進，損耗已經可以控制在每公分 1 dB 左右。

**調變器** 是光訊號的調變裝置，在矽光子積體電路元件中相當重要。什麼是光電調變器？當需要把光訊號導入成一個較好的狀態改變時，可以藉由外加電訊號調變光訊號，方法像是設定一個開關，在需要調變光訊號時，打開開關輸入電訊號。

在矽光子積體電路中，使用的基板是矽。由於矽晶格結構具有空間轉置對稱性，導致矽本身並不具備二階非線性效應，也就是無法利用普克爾效應（Pockels effect）來達成電光效應。因此矽結構在製作電訊號控制光訊號相位的光調變器時，主要是應用三階非線性效應，以著名的 Drude



矽光子積體電路發展至今常用的結構示意圖，常用的主動、被動元件包含光柵耦合器、光檢測器、光波導和光電調變器，使用的是絕緣層上覆矽基板。

Model 為基礎。其中所表示重要的物理涵義就是利用自由電子濃度與自由電洞濃度的改變，造成材料吸收係數與折射率的變化，進而達成光訊號調變。

伴隨著半導體製程技術的演進，把半導體 PIN、PN 或者 MOS capacitor 相位調變單元，配合矽光波導構成馬赫—倫德爾調變器（Mach-Zehnder modulator），或與環型共振腔整合形成環型共振腔調變器，都是現階段光電調變器研究的重點。

整體來說，矽光子積體電路的內部元件主要藉由光波導傳輸連結光訊號與電訊號，串聯主動、被動元件和電子式元件，而大部分元件都需整合在同一個矽基晶片上。針對光源的部分，由於矽本身屬於間接能隙材料，無法發光，因此光源目前以半導體雷射為主，常用的方式是使用晶片接合與磊晶並行，在矽晶圓上生成磊晶製作化合物發光結構後，與具有波導耦合和光積體電路的圖形化 SOI 晶圓接合。

矽光子技術的難度是需整合半導體技術和光學技術，對通訊行業會有顛覆性的影響。

光取代電是下一個世代的主流發展，  
台灣若希望能在短時間內切入矽光子積體電路領域，  
除了倚賴強大的光電技術與 IC 製程能力外，還必須著重於產學人才的培育。

整體而言，主、被動和電子元件或雷射的效能都會受到製程的厚度、堆疊的方式影響，而整合後元件各自與彼此都有關聯，因此串接方式必須謹慎考慮。此外，元件的設計尺寸大多是奈米等級，如何在製程上實現這些整合是一大挑戰。

## 矽光子技術的競爭格局

矽光子技術主要涉及層面包含「設計—製造—封裝」等環節，產業鏈包括原材料供應商（SOI 晶圓廠等）、設計公司、晶圓製造廠、封裝廠、系統應用廠等。但當前商用產品仍不多，主要因矽光子技術涵蓋領域過廣，因此現階段在整個產業還沒有形成穩定的競爭格局。

矽光子技術的難度是需整合半導體技術和光學技術，對通訊行業會有顛覆性的影響。在矽光子技術領域，深耕較久的研究單位包括 Leti、Imec、Ime，投入研發的公司包括 Mellanox、Luxtera、Acacia、Finisar、Avago 等光通訊公司。

矽光子技術雖是光學技術和半導體技術的結合，但隨著矽基雷射器等光學分立元件取得突破性的進展，矽光子技術的半導體屬性越來越強，因此在整個矽光子產業鏈中，電子公司的地位勢必越來越重要，話語權也會越來越重。基於此，越來越多的電子公司看到矽光子技術的未來前景並投入研發，如此現象代表著電子大廠所擁有的資本優勢、客戶優勢、資源優勢，絕對是矽光子領域發展的一大關鍵與助力。

光通訊領域在這一波矽光子積體發展中，主要由歐美幾家國際性的資料或電信設備品牌商所推動。英特爾是最早把矽光子大量商業應用化的廠商，在 2012 年就設立專屬事業部，準備投入矽光子商品生產。IBM 於 2012 年底就已經開發出 90 nm 的奈米矽光子積體電路晶片，把光路與電路同時整合在單一晶片上。此外像是雲端供應商 Google 及 Facebook，都已投入大量的研發能量在矽光子領域。

審視台灣目前的狀況，在這領域的能量仍只有在學術研究方面。光取代電是下一個世代的主流發展，台灣若希望能在短時間內切入矽光子積體電路領域，除了倚賴台灣產業界強大的光電技術與 IC 製程能力外，還必須著重於產學人才的培育，配合政府單位的經費支援，並把握目前矽光電技術正值起飛，國際標準未定之際，結合台灣產學資源打造矽光子積體電路共同平台。如此就可複製先前 IC 產業成功的經驗，追上國際腳步，台灣便很有機會在未來光取代電的世代中占有一席之地。

---

林銘偉

國家實驗研究院國家晶片系統設計中心

---