

# 平面積體光路材料概論

許志維  
工研院工業材料研究所  
微感測器實驗室 研究員

## 摘要

因為近年來光通訊技術的進展，使得降低光電元件成本的需求日益殷切。平面光路技術正提供了光電元件積體整合的絕佳平台，同時也因為這些年來的材料科學與加工技術的進步，積體光路的概念終於有了實際應用的機會。

本文將分析平面光路的元件性能與材料特性之間的關係，同時介紹平面光路的構成主體-光波導結構。限於篇幅，對製程並沒有詳述，只有針對不同的材料系統分析其優劣勢，並且提出平面光路材料未來發展趨勢。

## 關鍵詞

平面光路(Planar Lightwave Circuits; PLC)；光波導(Optical Waveguide)；積體光路(Optical Integrated Circuits; OIC)

## 平面積體光路研究概況

積體電路(IC)的發展狀況，說明了積體集成(Integration)的概念深深的影響了科技的發展，從早期的數個房間大小的第一代電腦，到目前可攜帶的筆記型電腦，積體集成使我們可以整合製造出功能複雜、體積微小的IC模組元件，同時也因為積體集成而減少原先單一元件所需的封裝成本，造就了現階段蓬勃發展的IC相關產業。

早在1960年代末期，相同的積體集

成概念亦被導入光學系統中，積體光路(Optical Integrated Circuits; OIC)正是要將原先架設在光學桌上的複雜光學系統整合成類似於IC的模組元件，以提高其穩定度與可靠度，並且能大幅降低所需成本。

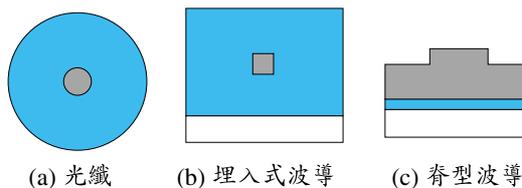
平面光路(Planar Lightwave Circuits; PLC)就是利用與傳統半導體相容的製程技術，將光學模組整合在晶圓(Wafer)上。PLC的材料非常多樣，從最早期的 $\text{LiNbO}_3$ 、 $\text{ZnO}$ ，到最近的Silica、Polymer、 $\text{SiON}$ 、 $\text{SiGe}$ 、 $\text{InP}$ 與SOI(Silicon on Insulator)等。

## 波導結構分析

PLC的構成主體就是光學波導(Optical Waveguide)，因為光有直線前進的特性，所以很難做出類似IC的層狀積體波導光路。一般而言，都是將光波導做在晶圓的表面，所以才會稱為平面光路系統。

光有往折射率高的地方傳播的特性(一般透鏡聚散光現象)，所以介質波導都需要一個高折射率的導光區域(Core)，外面包圍低折射率的阻隔層(Cladding)(如圖一)，利用全反射原理而能將光侷限在Core中向前傳播。對於波導設計而言，就是要得到光的傳播模態分佈與其傳播常數(等效模態折射率)，而這些只是和波導結構的折射率分佈有關。一般說來，當Core與Cladding的折射率差異越大時，導光結構也越強，此時光場就會幾乎侷限在Core內。但是當兩者差異越小時，就有越多能量外擴到Cladding中，這也就是為何光纖及Silica波導的Cladding厚度必須要有數十微米。

當一完全對稱的波導結構(例如光纖)，其最低傳播模態永遠存在，也就是任何在材料特性允許波長範圍的光皆可傳導，其所謂的臨界波長只是單模與多模的差異。然而對於不對稱的波導結構(例如脊型波導)，如果Core區域太小，則就不能傳導某些較長波長的光；但是若



▲圖一 波導結構示意圖(深灰色代表Core，淡灰色代表Cladding，白色代表基板)

是太大，則又會形成多模態波導，這也就是為何Core必須有一定的截面積。

## PLC元件設計與製程要求

一個好的PLC元件，它必須同時具有下列的四種特性：

1. 材料本身必須是透光的
2. 材料的折射率分佈是均勻的
3. 波導結構斷面必須是連續平滑而無粗糙表面
4. 光學波導在所選用的波長範圍內必須是單模傳輸

以上四點都直接影響PLC元件的表現，例如：光損耗、大量生產時元件的良率等。其中前三點是直接造成光傳播時的損耗(包含材料吸收與散射等)，而第四點則是間接造成光的耦合損耗與元件表現的複雜度。

一般PLC元件設計時，大部分導光區域都是假設以上四點同時成立，只有在少數區域(例如輸出輸入端)會有漸變的情形。三維結構的波導除了圓對稱的光纖外，其傳播模態並無解析，此時就必須藉助數值方法來估算。

BPM(Beam Propagation Method)數值法是解簡化後的波動方程式，所以計算速度相對的非常快速，但也因此有一定的誤差存在(可以接受的範圍)。最好的設計必須有實際製程參數反饋，才能減少設計與製程的差異。

## PLC材料分析

如前所述，PLC的材料有非常多種，各有各的優缺點，目前常用的材料特性整理如表一。

表一 PLC材料優劣勢比較

	優勢	劣勢
Silica	<ul style="list-style-type: none"> <li>●與光纖是同一材質，具有低耦合損耗的優勢</li> <li>●光波導傳播損耗低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●導光層折射率差異小，彎曲半徑大，元件體積龐大</li> <li>●只能製作光被動元件</li> </ul>
Polymer	<ul style="list-style-type: none"> <li>●材料與製程成本低廉</li> <li>●可加入適當的功能基，製作光主動與光開關元件</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●材料性質較不穩定，因為易受水氣影響而變質，可靠度與壽命是很大的挑戰</li> <li>●性能易受溫度變化而改變，對溫度較為敏感</li> <li>●光傳播與耦合損耗大</li> </ul>
Indium Phosphide	<ul style="list-style-type: none"> <li>●可以整合主被動元件在單一晶圓上</li> <li>●波導折射率差異大，彎曲半徑小，適宜積體集成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●無法取得大面積的基板晶圓，材料與製程成本高</li> <li>●光傳播與耦合損耗大</li> </ul>
Lithium Niobate	<ul style="list-style-type: none"> <li>●具有非常優異的非線性效應，可以製作良好的高速的光開關與光調變器</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●對光源極化方向非常敏感，不利於作為光纖通訊末端元件</li> <li>●對溫度敏感</li> <li>●甚難製作光被動元件</li> <li>●無法取得大面積的基板晶圓，材料與製程成本高</li> </ul>
Silicon	<ul style="list-style-type: none"> <li>●波導折射率差異大，彎曲半徑小，適宜積體集成</li> <li>●與現有IC製程相似，可以利用現有的IC產能</li> <li>●可以取得大面積基板，具有量產優勢</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●光傳播與耦合損耗大</li> <li>●光學主動元件尚待開發</li> </ul>

### 一、氧化矽(Silica)

Silica是目前製程技術最為成熟，且有眾多廠商製作出相關PLC產品出售，其中日本已經默默發展了十多年，握有部分製程技術的專利。Silica就是一般玻璃光纖所用的材料，在光通訊波段的物理、化學等特性非常穩定，是PLC元件中插入損耗最小的材料。但也因為其性質太過穩定，所以目前只有靠熱光效應來做光學開關。

入適當的功能基，使材料具有比較良好的溫度、電光效應，可以製作快速的光學開關。目前世界上也有部分廠商推出聚合材料的PLC元件，但是因為Polymer的性質相對較不穩定，非常容易受外在環境所影響，特別是水氣與溫度效應，所以Polymer元件的可靠度與壽命問題是一大考驗，現階段仍無法成為長程通訊(Long-Haul)與都會網路(Metro)的產品，但若是單價可以降到一定程度，則在末端使用者方面還是有一定的利基。

### 二、聚合物(Polymer)

聚合物非常多元，其最大優勢是材料與製程成本非常低廉，同時可以加

### 三、磷化銦(Indium Phosphide; InP)

InP材料的主要優勢是可以藉由摻入雜質來改變其折射率與能隙，所以可以

表二 各種材料在PLC應用上的優劣比較

	Silica	Polymer	InP	LN	Silicon
光學傳播損耗	○	△	△	△	△
與光纖耦合損耗	○	△	×	×	×
材料成本	△	○	×	×	△
光主動元件	×	△	○	△	△
折射率穩定度	○	×	○	△	○
光訊號極化方向差異量	○	△	△	×	△
大面積基板與製程	△	△	×	×	○
異質材料整合 (Hybrid)	△	△	△	△	○

○：優，△：可，×：劣

表三 Silica光波導不同製程參數的光學傳播特性

製程參數	光波導			
	低△	中△	高△	超高△
折射率差異比：△	0.3%	0.45%	0.75%	1.5 ~ 2
波導core面積(μm <sup>2</sup> )	8×8	7×7	6×6	4.5×4.5~3×3
波導傳播損耗(dB)	<0.01	0.02	0.04	0.07
光纖耦合損耗(dB/點)	<0.1	0.1	0.4	2.0
轉彎半徑(mm)	25	15	5	2

將光學的主被動元件整合在一起。另外因為其折射率變異量大，可以縮小波導所需的空間，但是因為目前技術不是非常成熟，無法取得大面積的InP晶圓，所以相對而言材料製程成本較高。

#### 四、鋰酸鋯(Lithium Niobate; LN)

鋰酸鋯是早期最常被使用的積體光學材料，主要是因為其性質穩定，而且具有相當不錯的非線性光學特性（聲光、電光等效應），仍是目前高頻（高於10GHz）調變器(Modulator)的最佳選擇材料。然而其主要缺點是材料本身折射率會隨入射光極化方向而改變，而且折射率對溫度變化相對較為敏感，所以不利於光通訊系統的應用。

#### 五、矽(Silicon)

Silicon是目前IC產業最常使用的原材料，技術非常成熟，然而在PLC應用上則還處於研發狀態，投入的廠商非常的少。為了能製作光波導，最常使用的是SOI(Silicon on Insulator)晶圓，藉由SOI中間薄薄的氧化層使上層的矽晶可以導光，而不致使光外滲到底層的矽基板。雖然SOI晶圓在IC產業製程發展非常成熟，但因為IC製程與光波導製程的條件要求相差甚遠，所以目前的半導體製程無法有效的應用在 PLC元件開發上面。Silicon的另外一個優勢是可以靠磊晶方式製作矽鍺化合物，藉由控制矽鍺化合物的能隙來製作光學主動元件，但因為彼此的晶格常數匹配問題，目前也還是處於研發狀態。

表二是對各種材料在PLC應用上的優劣比較。綜觀來說，Silica仍是目前最具市場競爭力的材料，但是在未來的發展仍有一些隱憂。我們可以從表三中Silica光波導的不同製程參數看出一些端倪。如前所述，當Core與Cladding的折射率差異比(Δ)增大時，波導的面積相對縮小，此時最主要的好處是可容許的轉彎半徑縮小，但是相對所需付出的代價是與光纖的耦合效率降低，波導本身的傳播損耗大增。現階段Silica光波導的最主要優勢就是當折射率差異比小的時候，光波導的傳播損耗與對接光纖的耦合損耗都是最低的，其原因是因為目前光波導的傳播損耗最大來源是粗糙表面所造成的散射損失（因為材料本身的吸收或是因為雜質分佈不均，所造成的散射損失都可以獲得比較良好的控制），當波導的面積增大時，粗糙表面的損耗效應相對較小，所以在相同的製程環境下，

Silica光波導可以有比較低的傳播損耗；同時因Silica光波導在低折射率差異比低時，與光纖的折射率分佈非常接近，所以其光場分佈與光纖幾乎相同，此時兩者間的耦合損耗可以降至最低。

雖然低折射率差異比的Silica光波導具有非常優異的光學特性，但是其所容許的彎曲半徑卻非常的大，使得元件尺寸也因此變得非常巨大，一些複雜的光通訊模組如ROADM等甚至無法在6吋晶圓上面製作。因為低折射率差異比的Silica光波導，非常不利於未來高功能性光學元件的積體整合，所以才會朝向折射率差異比高的製程方向發展。然而折射率差異比高光波導，卻確喪失了Silica原先所具有的兩大優勢，使得其它材料在高功能性的整合元件上有其發揮的空間。

## PLC材料未來發展趨勢

### 一、主動元件材料研究開發

目前PLC被動元件是處於百家爭鳴狀態，如何有效的與一般廠商區隔，主動元件的研發是關鍵所在。現在可行的主動元件材料共有三種：

1. III-V技術
2. SiGe材料
3. 矽中摻鉬

其中III-V半導體化合物是目前最成熟的技術，但是受限於基板尺寸，成本無法有效壓低。SiGe材料雖可成為大尺寸的矽晶圓基板，但是因為晶格常數匹配問題，現階段仍以光接收器為主，不易做出良好性能的發光器。摻鉬光纖放大器在光通訊市場日漸重要，然而其一

大缺點是必須用980 nm光源激發。目前有少數研究群研究以矽中摻鉬材料來做電激發雷射光源，是屬於較為前瞻的研究。

### 二、光子晶體的研發

光子晶體在PLC的主要優點是可以有效的壓縮元件所佔的體積，透過適當的結構設計，可以將主被動元件整合，是未來降低生產成本的秘密武器。但在技術複雜度與成本考量下，現有的材料加工技術的精度仍無法完全達到1.55微米波段的光子晶體製程要求，所以目前仍屬於實驗室內的研發題目，並沒有廠商有導入量產計畫。

### 三、主被動元件、積體光電路 (Opto-electronic Integrated Circuits; OEIC)製程整合

光纖到家(Fiber to The Home; FTTH)是光通訊系統的最終也是最大的市場，考量末端消費者的接受度，將收發模組整合成單一系統，是降低成本的唯一解決方案。其中主被動元件製程不盡相同，而且光路製程與電子IC的考量也各異，整合在單一晶片製程有相當的困難度，其中很多牽涉到材料特性與製程相容性問題，仍待研發單位進一步克服。

### 結論

材料與製程仍是決定PLC元件效能的基礎，但是仍然需要結合本文的光波導製程與光開關技術，才能製作出功能性的整合元件。現階段的PLC原材料各自具有本身的優勢，沒有一種材料是完美

無缺點的，在能滿足系統端對元件的需求後，成本就是不同材料的勝選考量。

光纖通訊市場近兩年因為過去過份樂觀，造成從上游到下游廠商獲利都大量萎縮，市場非常低迷。間接的造成國內廠商對PLC等先進技術的投資却步，相較於歐美、日本，甚至是與台灣競爭的韓國，臺灣在PLC技術上有明顯的落差。然而也因為這波的不景氣，使得國內的研發單位如工研院等可以有投入研發的時機，目前已有不錯的產出。積體集成仍是降低成本的不二法門，PLC技術正提供了光電元件積體整合的絕佳平台，是未來光電元件廠商獲取利潤的基石。

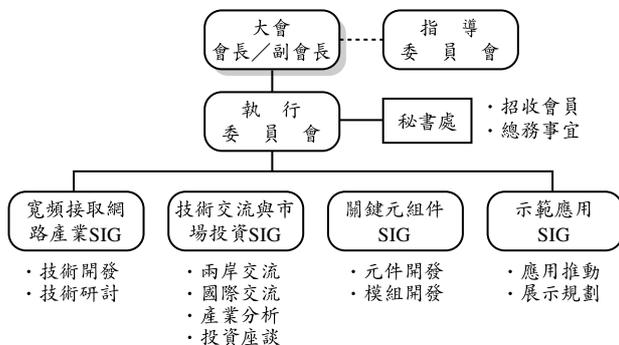
### 參考文獻

1. R.G. Hunsperger, "Integrated Optics: Theory and Technology", Springer-Verlag, Berlin, 1991.
2. Brain J. Thompson, "Integrated Optical Circuits and Components", Marcel Dekker, New York, 1999.
3. B. Jalali, P. D. Trinh, S. Yegnanarayana, and F. Copperinger, "Guided-wave optics in silicon-on-insulator technology", IEE Proc.-Optoelectron., vol. 143, pp.307-311, 1996.
4. S. Coffa, S. Libertino, G. Coppola, and A. Cutolo, "Feasibility Analysis of Laser Action in Erbium-Doped Silicon Waveguides", IEEE J. quantum Electron., Vol. 36, pp. 1206-1213, 2000.

### 寬頻通訊產業聯盟

透過互信互利的聯盟運作，提供國內有線、無線、光纖通訊產業與電信服務業之間的有效互動合作；並與政府單位、研究機構相關資源作緊密結合，藉以加速構建台灣成為寬頻通訊高科技服務島，發展台灣成為全球寬頻接取通訊設備主要供應國，至2007年通訊設備產值達新台幣五千億元，進而推動台灣成為全球寬頻通訊服務與系統技術發展優異實驗環境領先平台。

會費：1.入會費用：會員入會費新台幣兩萬元整（未含稅），中途退出聯盟者，其入會費不予退還。2.常年會費：凡屬本聯盟會員者應繳納常年會費壹萬伍仟元整（未含稅）。



歡迎業界先進，踴躍參加，共推國內寬頻通訊產業。

聯絡人：電電公會董元雄專員

E-mail: yhtung@teema.org.tw

電話：02-87926666 轉 236

傳真：02-87926088

02-87926138