

有機光波導基板－光路傳輸設計

周明杰

工研院電子工業研究所先進構裝技術中心

微模組構裝技術部 副工程師

摘要

本篇一開始介紹光電基板的形成概念及其較傳統電路板優異之處，到有機光波導基板製程與材料的簡介，其中闡述了高分子材料結合PCB壓合製程，作成多模光波導基板型式的重要性與原因；接著針對平面波導的光路做各項光功率損耗的模擬分析，而得到結構尺寸的最佳數據。

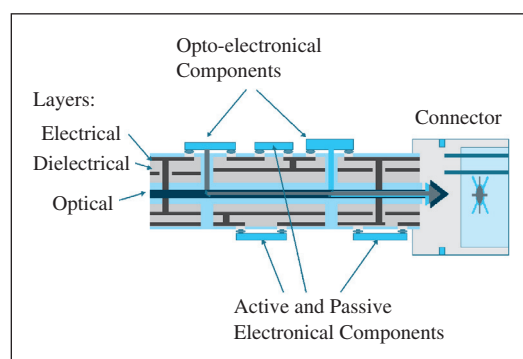
關鍵詞

光電基板(Electrical-Optical Circuit Board; EOCB)、高分子材料(Polymer)、多模波導(Multimode Waveguide)、垂直共振腔面射型雷射(VCSEL)

簡介

有鑑於目前電腦微處理器速度已高達3000MHz，但扮演元件間溝通連結角色的匯流排頻寬卻如牛步般緩慢提昇，至今仍只有800MHz，因此如何突破電路板內電子訊號傳遞的瓶頸，早已是各國研究團隊積極參與的課題。而將光波導介質導入傳統電路板的技術，就稱為光電基板(Electrical-Optical Circuit Board; EOCB)，如圖一；此種技術的優點有光波導不受無線電頻率(RFI)與電磁(EMI)等背景雜訊

干擾的先天特性，及以光通訊的高頻寬解決金屬導線頻寬長度乘積(Bandwidth-length-product)的限制，使



▲圖一 光電基板概念圖

電路板面積在減少趨勢下，仍能讓隨速度提昇而不斷增加的IC數目與接腳問題獲得解決。

有機光波導基板

一、製程與材料

在產業競爭的成本考量下，光電基板的製程必須與現有的電路板(PCB)製程相容，如壓合製程(Lamination)、表面黏著技術(SMD)、覆晶技術(Flip Chip)等製程技術，才能達成低成本、大量生產的條件。在波導結構尺寸上，由於電路板製程的對位精密度無法與半導體製程比擬，且大多使用被動對位方式(Passive Alignment)組裝，所以為了能符合製程設備的誤差容許值，波導的尺寸均在 $50\sim 250\mu\text{m}$ 之間，也就是採多模波導(Multimode Waveguide)的方式傳輸。

而光波導的材料則是使用半導體製程中常用來作為曝光顯影用的光阻材料—高分子聚合物(Polymer)，利用其製程加工的簡易性、折射率的可調變範圍大與低成本等優點來製作。

二、光源與檢光器

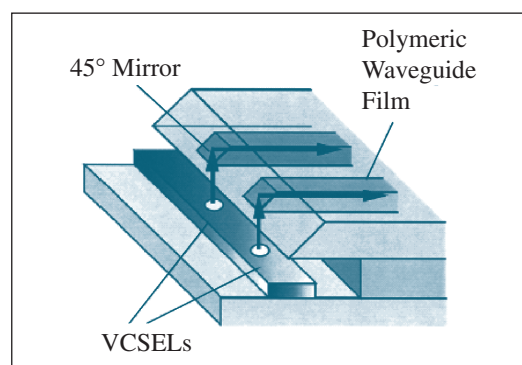
光源方面則大部分均選用面射型雷射(VCSEL)來作為發光元件，此乃因為VCSEL的光場分佈為圓形，對直接耦光的架構效率較佳，且可在切割前作測試，元件生產成本非常低廉，並

可以做成Array的發光形式，使得平行光路(Parallel Optic)的光收發模組得以實現；在傳輸能力上，市面已可獲得10Gb/s的產品，而在光源與波導的傳遞損耗關係上，高分子材料對於850nm的波長衰減剛好是最小的。綜上所述，說明了VCSEL是日後欲以低成本、大量生產為目的的光電基板技術最適當的光源。

檢光器的選擇則多使用PIN-PD，但考量光通道動輒 $50\sim 250\mu\text{m}$ 的尺寸，而檢光範圍卻會隨速度提高而減小的特性下(約 $40\sim 90\mu\text{m}$ 的直徑收光區)，導致收光效率降低，所以也有使用MSM Diode來維持高速下大範圍檢光區的例子。

三、光路架構

圖二至圖四為較常見之三種光電基板的光訊號傳輸架構，其結構與製程雖然不同，但最終的目的都是希望以最小的傳輸損耗，及最簡單的步驟



▲圖二 以空氣為全反射介面

來降低製程複雜度，以減低生產成本。

圖二的製程是藉由高分子材料具感光性的特質，以微影蝕刻法(Photo-lithography)的方式將光波導製作在基板上，再利用90度的鑽石切割刀切割出45度的裸露面，因此當其下方的VCSEL Array耦光至波導時，由於波導與空氣間的折射率差異相當大，超過斯奈爾定律(Snell's Law)的臨界角，使得大部分的光束可以全反射至波導，以完成平面光訊號的傳遞，而此種架構的插入損失(Insertion Loss)約為0.6dB。

圖三則是以160°C，時間為1小時的壓合製程，將光波導作入電路板間的架構，並在波導層間置入一個鍍上銀的45度微結構反射鏡，此結構的傳遞損失(Propagation Loss)頗大，約為0.5dB/cm，而利用裁剪法(Cut-Back Method)算出的個別反射鏡損耗則為0.1dB。

圖四為在適當的溫度與壓力條件

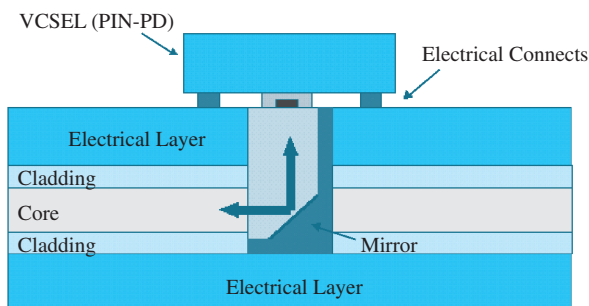
下，利用熱壓法(Hot Embossing)做出波導結構與直立的插入孔，之後再將VCSEL與致冷器(TE Cooler)等元件直立置入，以直接耦光(Butt Coupling)的方式將光打入波導內；此法的傳遞損失不超過0.3dB/cm，視製程的狀況而定。

有機光波導基板光路分析

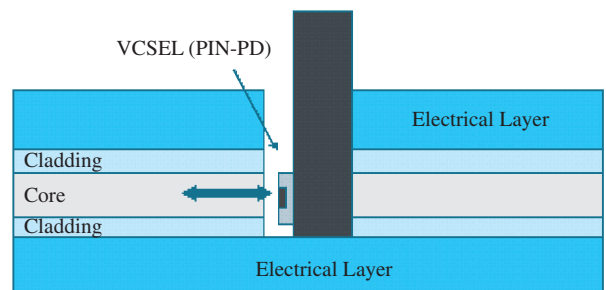
一、光學模型軟體簡介

在進行光波導的光路傳輸設計時，將分別用到兩種不同演算法的光學模型軟體，分別為導波光學領域常用的Beam_PROP軟體，以及幾何光學領域常用的ASAP軟體。

Beam-PROP軟體強調光的波動性質，利用光束傳播法(Beam Propagation Method; BPM)來演算，光束傳播法乃是簡化的波動方程式，因此它可以快速的模擬出波導元件在二維與三維空間的光束傳播狀態，包括光信號的傳播、波導模態、模態耦合、損失及增



▲圖三 以45度微結構反射鏡反射光束



▲圖四 直接耦光結構

益；以便於在製造前找出幾何外形、波長、初始光場分佈、材質及電光操作等參數的最佳值。

但當遇到垂直結構的光路分析時，Beam-PROP軟體卻有其光波轉彎角度的先天限制，以致無法描述光波在90度反射後的傳播情形；而ASAP軟體以光粒子線性運動的特性，用非序列光線追跡(Nonsequential Ray Tracing)方式將光描繪成無限條的光線軌跡，來計算每條光線的折射、反射、繞射等光學特性，可彌補Beam-PROP的不足。

二、光源與初始參數的設定

在進入模擬步驟前，首先要正確的設定光源，而光源的設定是依據其發散角(Divergence Angle)或光點大小(Spot Size)而定，此兩參數的定義均為高斯光束(Gaussian Beam)分佈強度降至峰值的 $1/e^2=0.135$ 倍時的距離；此兩者有一轉換公式如下：

$$\theta = \frac{2\lambda}{\pi w} \text{ (rad)}$$

由於我們使用的光源為傳輸速度2.5~10Gb/s的VCSEL光源，所以在參考市面上現有產品規格後，得知其發散角在18~30度間，而取其操作值為25度，由此可以確立光源的參數。

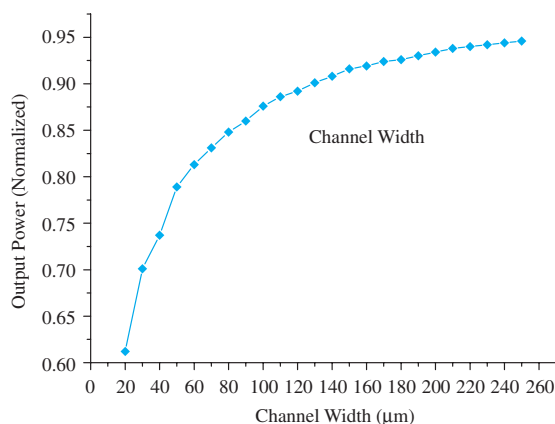
在核心層與被覆層的折射率方面，由製程部門所給定的兩種polymer感光材料，分別為NOA 61($n_{\text{core}} =$

1.5486)，及NOA 65($n_{\text{cladding}} = 1.5089$)，其折射率差異 Δn (Index Difference)為2.63%；而此值差異越大，耦光角度越大，導光(Guiding)效果也越好，但差異太大則會導致過多高階模態的出現，也就是角度較大的光路徑會導致收光處耦光的困難，所以一般都建議在2~3%的範圍內為最佳值。

三、光波導結構尺寸模擬

為考量光波導與電路板製程結合時的精密度與成本問題，波導的結構勢必為多模波導的尺寸，而由文獻得知光電基板的結構尺寸可涵蓋50~250 μm 的範圍，所以我們模擬長度為12cm的矩形多模波導，並加入非理想因素，假設邊壁粗糙度為波長的1/20，即42.5nm，來觀察波導寬度與光功率損耗間的關係。

圖五顯示波導寬度越寬，輸出光功率越大，這是因為寬度的增加，降

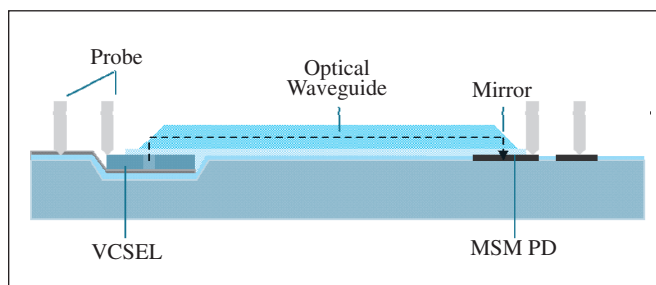


▲圖五 波導寬度與光功率的關係

低了邊壁粗糙度的影響，但這不代表寬度越大的波導越好；結構尺寸越大的波導，雖然可以增加製程的容忍度，但絕對不利於高速的傳輸，所以我們建議較適當的寬度約在 $50 \sim 100\mu\text{m}$ 。

四、垂直轉彎波導反射損耗

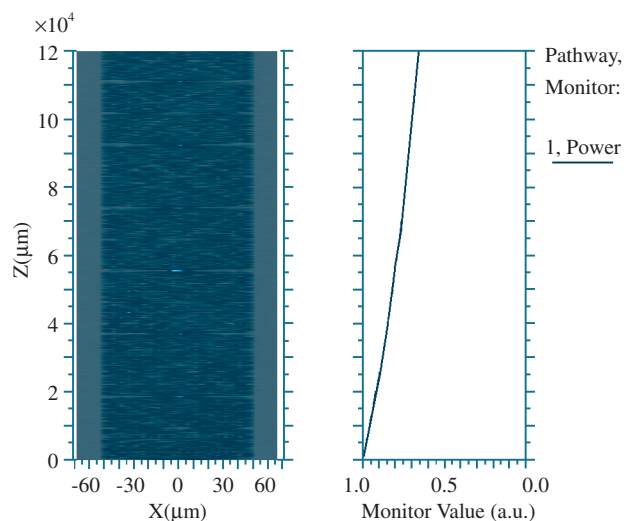
圖六所示為製程部門所構思的光電基板驗證載具架構圖，若依此結構，光束勢必會經過兩次90度的反射，所以我們改用ASAP軟體來模擬光功率的反射損耗；圖七為ASAP軟體光線追跡的結果，求得兩次反射後所剩的光功率約為90%，即Loss約為0.46dB。此結果不包含如邊壁粗糙度等非理想因素，所以可與平面波導的模擬結果相加乘後得到更準確的參考值。



▲圖六 光電基板驗證載具架構圖



▲圖七 光線追跡示意圖



▲圖八 波導長度與光功率的關係

五、側壁粗糙度的影響

當光束在波導內傳遞時，必定會有某個程度的損耗，這就是所謂的傳遞損耗(Propagation Loss)，而構成直線光波導傳遞損耗的因素大致可分為兩類：一種是吸收損耗，如Impurity Absorption、Material Absorption，另一類是反射損耗，如Rayleigh-Scattering、Impurities/Bubbles、Interface Roughness等，因此我們加入側壁粗糙度這個非理想的製程因素，觀察其與輸出功率的關係。

圖八為長度12cm、寬度 $100\mu\text{m}$ 的直線波導，設定其Roughness為波長的1/10(85nm)，由圖可觀察隨光波傳遞長度的增加，波導的損耗亦線性增加。

圖九則是維持相同結構尺寸，變動Roughness範圍，由波長的1/100

(8.5nm)~1/10(85nm)的結果。

根據目前已發表的光電基板波導資料，可知其Roughness範圍約在10~100nm之間，而估計製程部門已實作出的波導，其製程的Roughness最差應不超過為波長的1/20(42.5nm)，此值的功率值為87.6%，即 0.57dB。

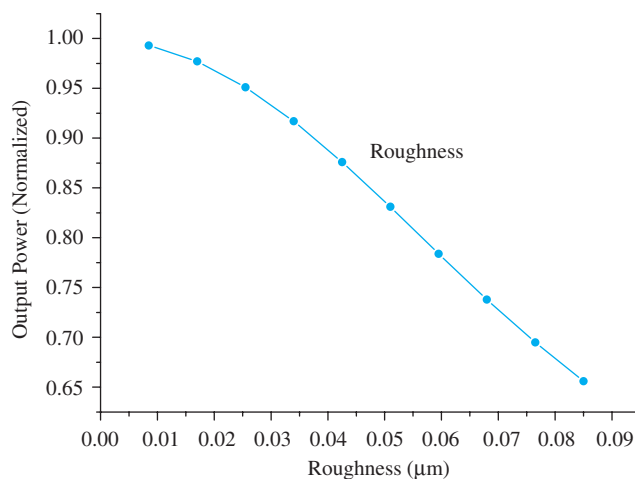
六、光源偏離中心時的影響

以多模波導的尺寸來設計光電基板的最大優點，就是光源對位的誤差容忍度，圖十顯示若光源橫向（垂直光軸方向）偏離了結構中心點時，以寬度為100 μ m的波導而言，在中心偏離 $\pm 45\mu$ m的範圍內，光功率的變動量並不顯著，變動量約為1.2%，表示其在橫軸的偏移容忍值是很好。

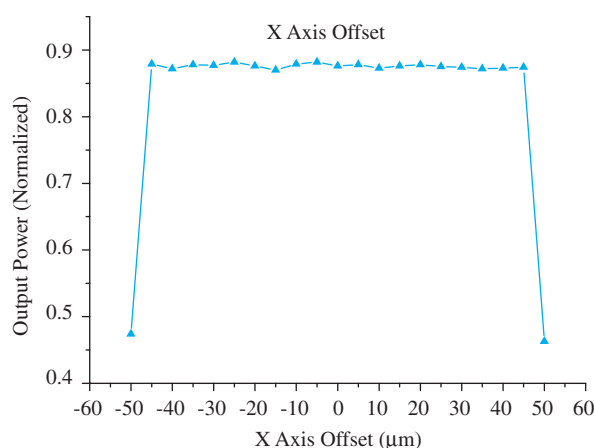
圖十一表示光源縱向（光軸方向）偏離中心時的影響，縱向的偏差模擬範圍為0~500 μ m，由圖可觀察在0~250 μ m的縱向偏離誤差內，光功率的數值變動不大，約為0.3%，實際對位組裝時當然不會有這麼大的偏差，但此圖的數據可作為遠場(Far Field)量測時的參考。

結論

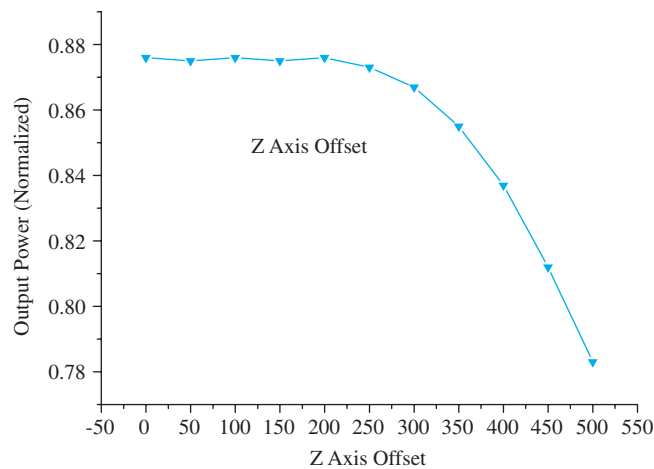
本篇文章從一開始介紹光電基板的形成概念，及其較傳統電路板優異之處，到有機光波導基板製程與材料的簡介，其中闡述了高分子材料結合PCB壓合製程，作成多模波導型態的重要性與原因；接著針對平面波導的光路做各項光功率損耗的模擬分析，



▲圖九 Roughness與輸出功率的關係



▲圖十 光源橫向偏離中心時的誤差容忍度



▲圖十一 光源縱向偏離中心時的誤差容忍度

得到了結構尺寸的建議數據。

根據製程部門實作出Polymer多模波導後，量測其總光功率損耗(Total Loss)，得到2.1dB/ 12cm的結果，如以此值對照光波導軟體模擬的結果0.57dB/12cm（假設Roughness=42.5nm），可發現其間差距頗大，此乃由於實際量測值所涵蓋的Loss包括耦合損耗(Coupling Loss)與傳遞損耗，必須以裁剪法除去耦合損耗的因素，才是真正的波導損耗。

另外需要注意的是，光路方面的模擬分析只能觀察其輸出功率，但是在10Gb/s以上的高速傳輸時，由於多模波導的核心層幾何尺寸非常大，約50~250 μm ，此值遠超過一般單模波導6~8 μm 的尺寸，因此多模失真現象將會非常嚴重，此乃因為高階模態（也就是大角度射線）的產生正比於結構

尺寸，當橫切面方向的結構越大，就容許越多的模態在內傳遞，由於每個模態（或射線）所走的路徑長度不同，所以到達接收端的時間也不同，這種時間的延遲(Time Delay)就會讓信號失真，而無法達到高速傳輸。

所幸光電基板設定的傳輸距離不像光纖通訊是以公里(Single Mode)或公尺(Multimode)為應用範圍，而是以5~10公分的板間傳輸為主，所以真正的傳輸能力還

需實作測試後才能驗證；而在製程參數的最佳化則是另一個重點，如表面粗糙度(Roughness)、微影解析度(Photolithography Resolution)、Polymer材料均勻度等因素，都會影響最終訊號的品質。

參考資料

1. D.Krabe, W.Scheel "Optical Interconnects by Hot Embossing for Module and PCB Technology" 1999 IEEE.
2. Makoto Hikita, Member, IEEE "Polymeric Optical Waveguide Films for Short-Distance Optical Interconnects" 1999 IEEE.
3. Elmar Griesse, "A High-Performance Hybrid Electrical-Optical Interconnection Technology for High-Speed Electronic Systems" 2001 IEEE.
4. Sean M. Garner, "Three-Dimension Integrated Optics Using Polymers" 1999 IEEE.