

# 依多模干涉及熱光效應的概念發展 $2 \times 2$ 氮氧化矽(SiON)積體光波導開關器

莊文魁\*、廖振良

國立成功大學電機系暨微電子所、微奈米科技研究中心、尖端光電中心

[rwchuang@mail.ncku.edu.tw](mailto:rwchuang@mail.ncku.edu.tw)

Journal of The Electrochemical Society, 2010, Vol. 157(2), H149-H152

## 至

目前為止多模干涉效應(MMI)已經廣範地被運用於製作許多有趣的積體光學元件，譬如像 $N \times N$ 功率分光器/結合器、馬赫•任德爾干涉式(MZI)光開關[2]、分波多工器[3]與環狀雷射[4]。這些MMI元件會這麼熱門其主要原因莫過於是它們的元件結構相對地簡單、寬頻、低傳播損耗及低極化敏感性。對於傳統的 $2 \times 2$  MZI與MMI式光開關，它們的整體長度則是相當地長，其主要考量是在於確保輸出波導之間的距離能維持一定的間距，以降低輸出波導之間光電耦合的寄生損耗。因此，整個光開關的設計概念則是圍繞在如何有效地縮短元件長度以降低整體的元件面積，同時也能降低其傳輸與散射損耗。如前述所言，我們整個元件設計，如圖一所示，主要是倚靠四個 $1 \times 1$ 一般型(general)MMI(兩個接在輸入端，另外兩個接在輸出端)與一個在中央位置的 $2 \times 2$ 對數式(paired)MMI整合在一起；其主要目的是成就出一個具有高消散係數及低傳輸與散射損耗的多成層級式(multistage)MMI光開關。



如圖一的元件示意圖所示，元件的氮氧化矽(SiON)多模式光波傳輸層主要是掩埋於二氧化矽(SiO<sub>2</sub>)層裡面。整個 $2 \times 2$ 光開關主要建構在多層級式MMI光波導之間的相互連接整合，其組成元件單位包含四個一般型MMI(各兩個接在位於中央位置的 $2 \times 2$ 對數式MMI的輸入與輸出端， $W_{Gen} = 51 \mu\text{m}$ 、 $L_{Gen} = 11030 \mu\text{m}$ 、 $W_{Paired} = 102 \mu\text{m}$ 、 $L_{Paired} = 6960 \mu\text{m}$ )。輸入/輸出波導與連接波導的寬度分別設定為10與12  $\mu\text{m}$ ，其主要目的是預留因黃光及ICP蝕刻製程所可能消耗掉的寬度。整個MMI光開關元件的最終的尺寸設定將反應最初的研究初衷，那就是 $L_{Gen} + L_{Paired}$ 的長度總合必須仍短於傳統 $2 \times 2$ 一般型MMI光開關的總長，且輸入與輸出波導之間的距離( $T$ )必須維持在116  $\mu\text{m}$ 。這個間距 $T$ 會選擇這麼寬主要是確保在不用S型波導(不可避免的傳輸與散射損耗)的條件下，兩個輸出波導之間的串音(crosstalk)能降至最低。

在還沒有製作與分析 $2 \times 2$  MMI元件之前，我們先使用FD-BPM (finite-difference beam propagation method)數值模擬的方式去模擬整個 $2 \times 2$  MMI光開關元件的操作性能，主要是確定在熱光效應的影響之下，光訊號在bar與cross輸出端之間能作有效的轉換調變，以藉此取得元件最佳化尺寸參數。整個模擬結果如圖二所示。由模擬結果發現，在從室溫提升12°C之下，光訊號可由bar輸出端轉至cross輸出端；這是第一個交叉點。而第二個交叉點則是發生在溫度從室溫提昇33°C左右。如FD-BPM模擬結果顯示，我們所設計的光開關元件達到了先前的設計需求，關於此點，後續的實驗結果會再提供有利的證明。

如先前圖一所示，整個多層級 $2 \times 2$ 可調變式MMI光開關所包含的多模波導與輸入/輸出波導主要是建構在SiO<sub>2</sub>/SiON/SiO<sub>2</sub>對稱型波導層結構之上。藉由PECVD(plasma-enhanced chemical vapor deposition)薄膜沉積系統的輔助之下，這些介電層依序沉積在具有良好的導熱係數(~140 W/(m•K))的矽基板之上。一開始，3-  $\mu\text{m}$ 厚的SiO<sub>2</sub>與2.5-  $\mu\text{m}$ 厚的SiON薄膜層先沉積在矽基板之上，之後再透過黃光曝光顯影及ICP乾蝕刻的方式蝕刻至SiO<sub>2</sub>層以便定義製作出輸入、輸出及多模波導區域。這些藉由蝕刻所成形的波導則再用PECVD的方式沉積2-  $\mu\text{m}$ 厚的SiO<sub>2</sub>層覆蓋於這些波導之上以作為上披覆層，藉此增加波導模態侷限效應及降低光傳輸與散射損耗。最後，我們再以電子束蒸鍍機及濕蝕刻的方式鍍上一層大約150-nm厚的鋁電極於波導元件之上以作為 $2 \times 2$ 光開關元件的加熱電極。

為了能滿足先前藉由數值模擬所得到的設計條件，在使用PECVD系統沉積薄膜的方式以控制SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>薄膜中氧與氮之間的比例，在比例選擇方面我們選擇了SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub>傳輸層與SiO<sub>2</sub>披覆層之間的折射率對比 $\Delta n$ 為 $\sim 0.0372$  ( $n_{\text{SiON}} \approx 1.5082$ ,  $n_{\text{SiO}_2} \approx 1.471$ )。為了能調控bar與cross輸出端之間光訊號的轉換，我們施加功率於位於在多模波導下方區域內的鋁電極，透過SiON的熱光效應( $\sim 2.35 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ )與利用 $\sim 1.4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 薄膜熱導效率的方式進行。在這個操作條件下，波導層的折射率，在離開電極加熱區域及多模波導邊緣並往x與y的方向中可作漸進式的改變。因此，最大的折射率改變會發生在電極下及其臨近區域，而此折射率改變量則會沿著離開電極的方向逐漸消失。

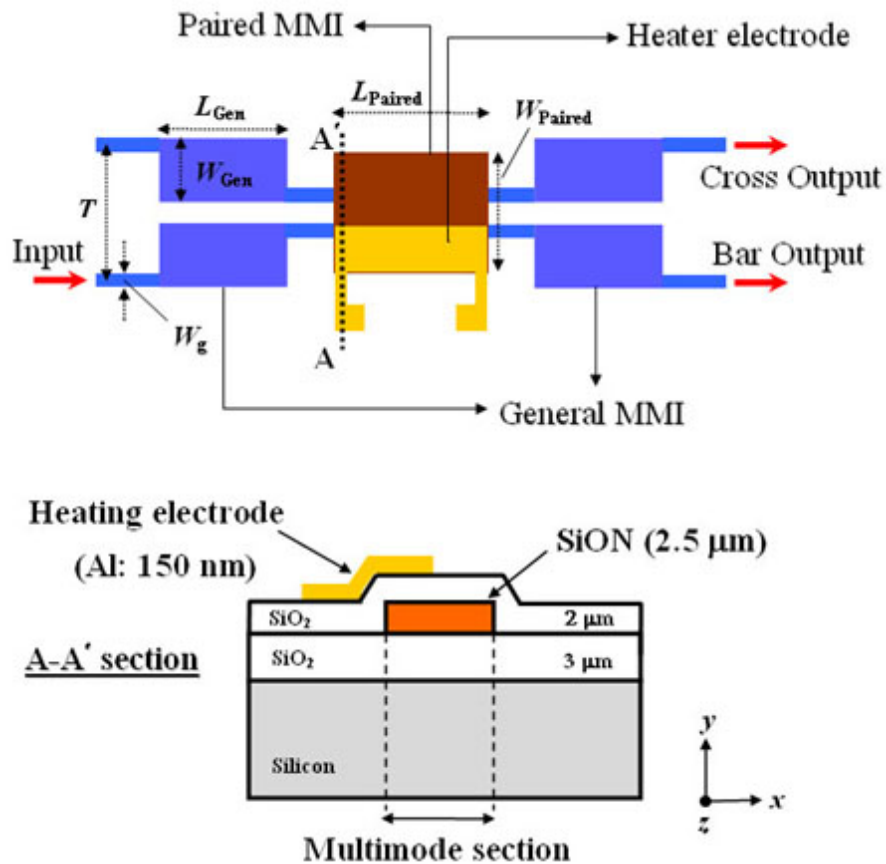
在量測分析元件部份，我們使用 $1.55 \mu\text{m}$ 連續波(continuous-wave或cw) InGaAsP雷射二極體為光源、鍺(Ge)光二極體為輸出功率檢測器，與CCD(charge-coupled device)照相機量測近場輸出光點。用於量測近場輸出光點的CCD照相機(Spiricon SP-1550M)主要是倚靠InGaAs為紅外光吸收材料，可偵測的波長範圍大約在1460與1625 nm範圍之間。為了能提昇輸入與輸出耦合效率，元件兩端則會透過研磨機研磨拋光。在光耦合部份，尖錐型透鏡光纖用於耦合光於元件輸入端內，而光輸出則透過 $\times 20$ 顯微物鏡接收。元件的調變特性會透過施加週期性電壓於加熱電極進行，而相關量測結果則是透過界面軟體紀錄。如圖三所示，藉由元件的量測我們得到了元件調變特性呈週期性的改變，相關結果也與先前的FD-BPM模擬數據呈現相當程度的吻合。如果將模擬與實驗結果作一個比較，相關的誤差可追溯於SiON薄膜在實際元件的操作之下會促使其熱光係數作漸進式的改變，而在數值模擬方面我們則只考慮熱光係數為常數的情況下進行。此外，實驗結果也顯示在訊號轉換調變方面，最高的消光係數(extinction coefficient)則可達到13 dB之多。

如圖四所示，在施加大約 $\sim 0.82 \text{ W}$ 加熱功率的情況下，我們所得到的元件上升(rise time, 10-90%)與下降(fall time, 90-10%)時間大約分別為360與395  $\mu\text{s}$ 。我們認為此熱光波導開關的反應時間在微秒範圍內是合理的，特別是與過去所發表過的類似非極化敏感性的元件，其使用的波導與披覆層的材料也是介電材料的情況下相比較，所得到的結果也是大致吻合的。當然此元件也有相當程度的改善空間，譬如像縮小整體元件結構尺寸及改變電極分佈位置的方式，或者是使用具有良好導熱與熱光係數的光波導材料(例如像silicon-on-silicon或SOI基板)，都可用於提昇元件操作性能並達到最佳化的幾種途徑選擇。

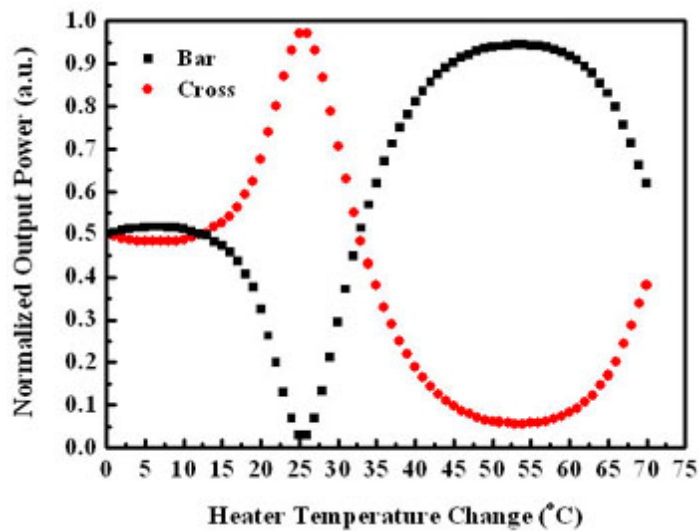
我們成功地以多模干涉及熱光效應的方式製作出多層級 $2 \times 2$  SiO<sub>2</sub>/SiON/SiO<sub>2</sub>光波導開關元件。而在FD-BPM數值模擬與實驗方面，兩者之間也成功地取得良好的吻合。在兩者之間的誤差方面，其原因則可追溯於元件操作的影響而使得SiON薄膜的熱光係數產生漸進式的改變，關於此點先前的數值模擬並未把此項條件考慮進去。在實驗結果方面， $2 \times 2$ 光開關元件則需要至少 $\sim 0.82 \text{ W}$ 的功率達成光訊號轉換，而所伴隨的消光係數則可達到13 dB之多。在元件的時間反應量測部份，所取得的元件上升與下降時間分別為360和395  $\mu\text{s}$ 左右。相關元件所需的光訊號轉換調變功率與反應速度仍然有相當程度的空間，譬如像縮小整體元件結構尺寸及改變電極分佈位置的方式，或者是使用具有良好導熱與熱光係數的光波導材料(例如像SOI基板)，都可用來促使元件操作性能達到最佳化方式的幾種選擇。

## References

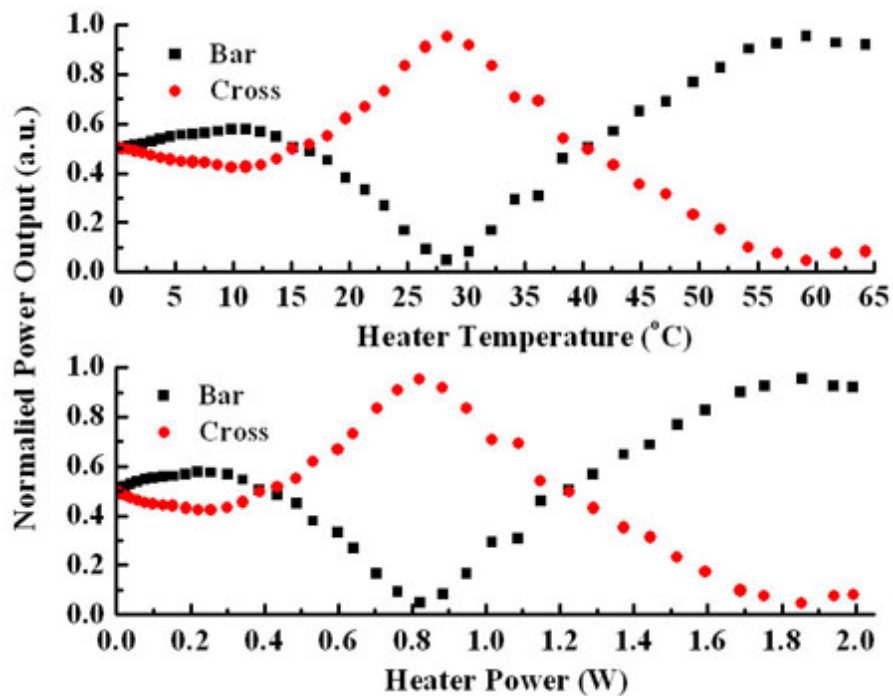
- [1] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, *J. Lightwave Technol.* **13**, 615 (1995).
- [2] Q. Lai, W. Hunziker, and H. Melchior, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10**, 681 (1998).
- [3] Y. Kawaguchi and K. Tsutsumi, *Electron. Lett.* **38**, 1701 (2002).
- [4] R. van Roijen, E. C. M. Pennings, M. J. N. Van Stalen, T. van Dongen, B. H. Verbeek, and J. M. M. van der Heijden, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 1753 (1994).



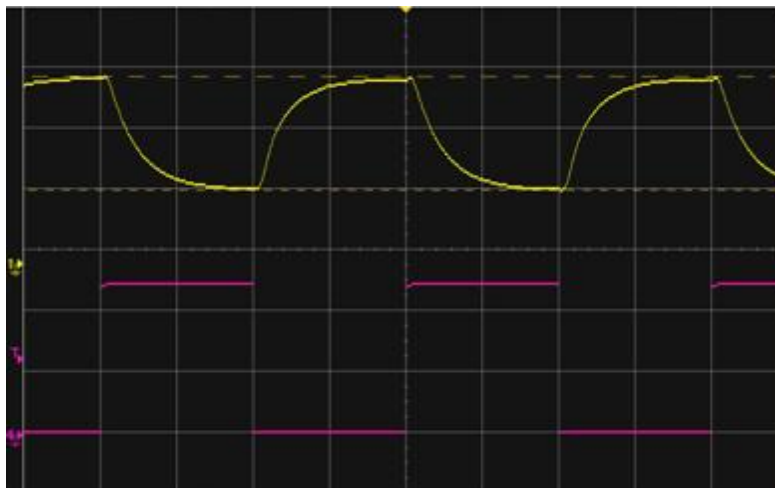
圖一 多層級2x2 MMI光開關器之示意圖。虛線A-A'所顯示的區域為其x-y面剖面圖，由圖可見SiON核心波導掩埋於SiO<sub>2</sub>披覆層。



圖二 利用FD-BPM所模擬出的2x2 MMI光開關器之訊號調變轉換特性。x軸為加熱溫度改變量，因此整個量測從室溫開始。



圖三 2x2 MMI光開關器之訊號調變轉換特性的實際量測結果。光訊號輸出值經規格化的結果，其最高與最低值的範圍在0和1之間。此外，所量測到的調變數據則分別針對x-軸加熱溫度及加熱功率作曲線顯示。



圖四 在施加0.82 W加熱功率的情況下所量測到的2 x 2 MMI光開關器時間反應量測結果。黃色上波形所代表的為光輸出訊號，其y-軸顯示比例為10 mV/div。粉紅色下波形所代表的為電輸入訊號，其y-軸顯示比例為5V/div。兩個波形的x-軸顯示比例為500  $\mu$ s/div。此元件所量測到的上升與下降時間分別為360和395  $\mu$ s。