

Rib waveguide increase the decoupling effect of the platform

*Chih-Chieh Hsu**, *Chih-Wei Hsu*

Department of Electrical Engineering, *National University of Tainan, Tainan, 70005, Taiwan*

**E-mail : chihchieh0403@gmail.com*

Abstract

Based on the SOI structure, this paper proposes an improved polarization splitter, which uses the decoupling phenomenon of the rib waveguide to design a symmetric directional coupler. A platform with the same material as the waveguide structure is added to the structure, and the decoupling mechanism is added. , the decoupling phenomenon and the TM mode cut-off effect are separated, which can avoid the generation of high-order modes, and effectively reduce the size of the component, so that the TM mode can be uncoupled, while the TE mode is equal to the refractive index of the symmetric waveguide. If the proper coupling distance satisfies the phase matching condition, it will be coupled to another waveguide to achieve the effect of polarization separation. Firstly, the width and height of the waveguide core are fixed, and different platform heights and corresponding plate-like structure heights are designed. The plate-like structure height is 80 nm, and the platform height exceeds 160 nm, high-order modes will appear. By analyzing the cross-polarization coupling effect, it is found that the cross-polarization coupling effect can be effectively suppressed as the height of the platform and the plate-like structure decrease. The final plate-like structure height is 80 nm and the platform height is 125 nm, which are the structural parameters.

Keywords: Waveguide, Polarization Beam Splitter, Directional Coupler, Decouple

肋狀波導增加平台的去耦合效應

許智捷, 許志維

國立臺南大學電機工程學系

摘要

本論文以 SOI 結構為基礎，提出一個改良的極化分離器，利用肋狀波導去耦合現象來設計對稱型定向耦合器，在結構中新增一個材料與波導結構相同的平台，增加去耦合機制，將去耦合現象及 TM 模態截止效應分開，可避免高階模態產生，且有效的將元件尺寸縮小，使 TM 模態達到不耦合，而 TE 模態因對稱波導的折射率相等，在設計得當的耦合距離滿足相位匹配條件，將耦合至另外一根波導中，達到極化分離的效果。首先固定波導芯的寬度與高度，設計了不同的平台高度與對應板狀結構高度，板狀結構高度 80nm、平台高度超過 160nm 會出現高階模態。透過分析交叉極化耦合效應發現，隨著平台高度與板狀結構高度下降，都可有效的抑制交叉極化耦合效應，最終板狀結構高度 80 nm，平台高度 125 nm，為結構參數。

關鍵詞：波導、極化分光器、定向耦合器、去耦合波導

1. 前言

積體光學 (Integrated Optics, I.O.) 的定義是發掘於西元 1960 年代，此想法是貝爾實驗室中 Stewart E. Miller 於 1969 年提出[3]，主要理念是半導體製程應用於各式不同光學主、被動元件並縮小整併於一個晶片中，可以縮小整體元件體積、製程成本降低，當中元件包含耦合器 (Coupler)、調變器 (Modulator)、分光器 (Beam Splitter)、高密度分波多工器 (Dense Wavelength Division) 等，而使用雷射光 (以可見光或紅外光線) 作為光源訊號，利用波導連接各個元件傳遞訊號，以最小驅動電壓運作。由於想法被提出的時期，半導體技術並不成熟，因此沒有受到關注，但近幾年研究資訊大幅增加，利用摩爾定律使其達到物理極限，而且光相比於電來說有較大的頻寬可以承載及資料的傳遞速度也比較快，因而矽光積體電路 (Silicon Photonics) 需求量大增加，故引起更多的研究與應用。

2. 基本理論

2.1 定向耦合器結構

定向耦合器的原理為兩根平行波導在足夠的間距下，使兩根波導各自的消散電場部分重疊，造成能量於兩根波導之間有轉換的現象[4]，此外，若兩根平行波導經參數調整後，經過一段傳遞距離，其能量能從輸入端波導完全地傳遞至另一根波導中，根據此理論可將其中一極化模態耦合，而另一極化模態保留在輸入端波導，達到極化分離的效果，圖 1 與圖 2 為參考文獻[5]中定向耦合器型之極化分離器結構與極化分離示意圖。

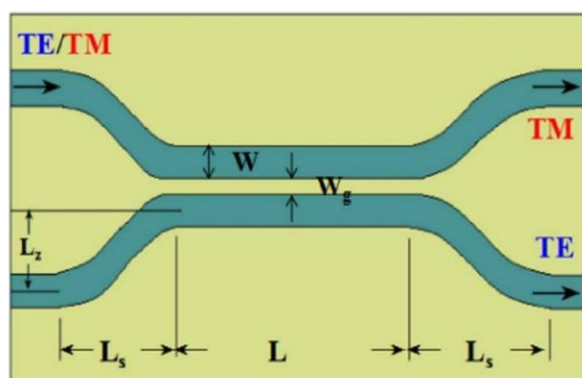


圖 1 定向耦合極化分光器示意圖

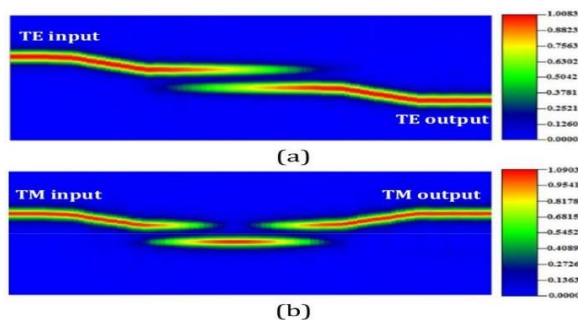


圖 2 TE 模態與 TM 模態分離示意圖

本論文中我們所提出的定向耦合器型的極化分離器，在 bar port 端與 cross port 端內兩極化模態傳輸功率間的比率，又稱消光比(extinction ratio, ER)，將其定義如下式：

$$ER_{bar} = 10\log_{10}\left(\frac{T_{TM,bar}}{T_{TE,bar}}\right) \quad (1)$$

$$ER_{cross} = 10\log_{10}\left(\frac{T_{TE,cross}}{T_{TM,cross}}\right) \quad (2)$$

其中 T 為對稱的肋狀波導定向耦合器能量穿透率， $T_{TM,bar}$ 為 TM 模態留在 bar port 的比率， $T_{TE,bar}$ 為 TE 模態留在 bar port 的比率，而 $T_{TE,cross}$ 為 TE 模態耦合至 cross port 的比率， $T_{TM,cross}$ 為 TM 模態耦合至 cross port 的比率。

2.2 去耦合理論與應用

去耦合(decouple)在同一個結構裡，作輸入端的傳遞媒介在沒有傳遞途徑下，不能將能量傳遞於另一介質中。根據過往研究中，大部分認為兩根波導的間距有限，其場量可以在橫向 x 與 y 方向無限延伸，設計良好的耦合長度或是折射率差等方式，皆可使波導之間相互傳遞能量，然而在 1991 年由 C. G. Someda 等人論述了截然不同的理念[6]，其團隊認為對於純量波而言，兩根有限間距的純量波導無法達到去耦合，而將純量波改為向量電磁波後，去耦合是可能發生的，兩者之間沒有矛盾，與弱導近似不等，並提出向量去耦合為波導間分部折射率的反共振結構，此理論 2018 年也被林伯庭引用於碩士論文中[2]，此論文針對對稱型肋狀波導結構上的主要電場與次要電場分布空間之強弱特性進行討論，兩根波導在完美的間距下，主電場與次電場的重疊積分值相加等於零，並會達成去耦合情況，若將兩根波導間距加大，則 T_{Mo} 折射率大於 T_{Me} 折射率，也有團隊經由全向量平面波展開(Plane-Wave Expansion, PWE)得到雙芯光子帶隙光纖(Photonic Bandgap Fibers, PBGF)結構中理想光子晶體內的光子帶隙(Photonic Band Gap, PBG)邊緣之色散曲線，使用全向量有限元素法計算出光子帶隙的有效折射率與場分布，證明此結構在一定波長處會有去耦合現象產生[7]，更有團隊利用週期性彎曲波導結構的去耦合現象將元件長度縮小[8]。

3. 設計與結構

本論文用定向耦合器結構設計極化分離器，並利用 SOI 的技術來製作波導芯。近年常用非對稱或彎曲定向耦合器結構設計性能較高的極化分離器[9-12]，彎曲結構製作困難處較多，而非對稱結構大部分需要使用次黃光顯影製程，進而成本上升，因此我們將文獻[1,2]所提出的肋狀波導定向耦合器新增一個與波導芯相同材質的平台，進一步達到去耦合機制，也可以將去耦合情形及 TM 模態截止效應分離，然而可避免高階模態的產生，有效的將元件尺寸縮小，設計出對稱結構的極化分離器，如下圖 3 所示。其中 W_1 、 W_2 、 H_1 、 H_2 、 h 、 s 與 L 分別為波導芯寬度、平台寬度、波導芯高度、平台高度、板狀結構高度、波導芯間距與元件長度。按照 SOI 製程的條件，我們設計極化分離器的操作波長 1550 nm， n_{cl} 、 n_c 與 n_s 折射率分別為 1.0、3.45 與 1.46。

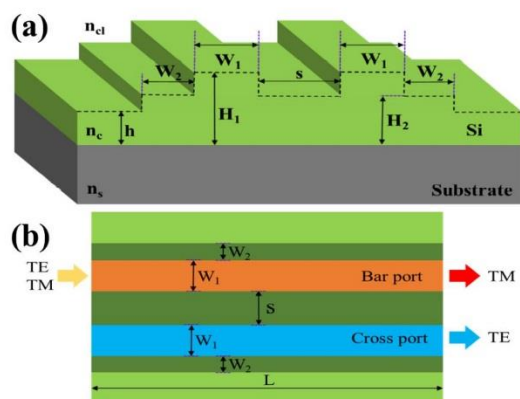


圖 3 極化分離器結構(a)3D 圖 (b)上視圖

4. 數據結果與分析

板狀高度 h 是 TM 模態去耦合現象產生的主要參數[2]，因此我們固定波導芯寬度 W_1 為 350nm、高度 H_1 為 300nm、板狀高度 h 為 80nm、90nm、98nm 及 110nm，為了降低製程複雜性，間距 s 設定在兩倍的平台寬度 W_2 ，估算平台高度 H_2 的變化，對應的去耦合條件及 TE 模態的耦合長度 $L_{\pi,TE}$ 。其中 s 讓 TM 達到去耦合的最佳間距，且耦合長度 L_{π} 計算公式(3)如下：

$$L_{\pi,j} = \frac{\lambda}{2} \frac{1}{n_{e,j} - n_{o,j}} \quad , \quad j = TE, TM \quad (3)$$

n_e 與 n_o 分別是偶模態與奇模態等效折射率，當平台高度與板狀結構高度相同時，為尚未添加平台的肋狀波導，可以發現添加平台能夠有效縮短去耦合的間距，使 $L_{\pi,TE}$ 縮短到 $10\mu\text{m}$ 以下。若平台高度 H_2 上升時，TM 去耦合間距 s 能再縮小，促使耦合長度 $L_{\pi,TE}$ 也更進一步下降。但是 h 為 80nm， H_2 在 170nm 開始高階模態出現； h 為 110nm， H_2 在 125nm 時 TM 會消失。為了確定去耦合情形，我們估算各參數 TE 與 TM 電場分布圖，如圖 4 所示。根據 COMSOL 軟體之有限元素數值分析模擬，能觀察當兩側波導主電場正負號相同，視為偶模態；當正負號相反時，則為奇模態。由於 TE 沒有去耦合機制，對應的奇偶模態在任何地方都以水平電場為主，而 TM 在去耦合的條件之下，根據伯庭碩論[1]的理論知道，在波導芯外側需很強的次要電場才能達到去耦合現象，所以波導芯內側的電場漸漸遠離波導芯，會由垂直電場演化成水平電場。又因是對稱波導結構，兩根波導的 TE 折射率會相等，所以在設計良好的耦合長度，TE 將滿足相位匹配，完全耦合至另一根波導中，而 TM 則留在輸入端波導中，達成極化分離效果。

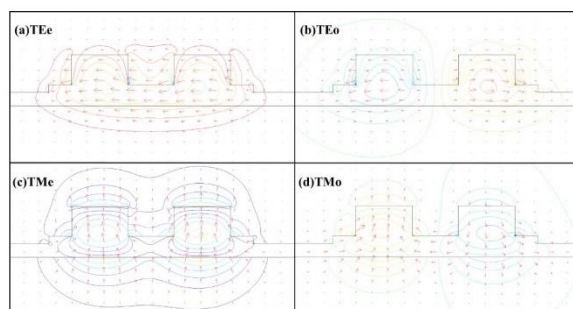


圖 4 TE(a)偶模態(b)奇模態與 TM(c)偶模態(d)奇模態

在 100nm 的頻寬下，bar port 與 cross port 的 ER 值皆較佳的呈現。但因 TM 去耦合情形，波導芯外側會因平台讓 TM 外側電場從垂直電場轉變成水平電場，如圖 4 電場分佈，引發交叉極化效應產生。訊號光從 bar port 打入波導，會分別激發定向耦合器中的四個模態，其耦合係數 Q 利用模態重疊積分公式(4)計算，如下式：

$$Q_{i,j,k} = \frac{\int E_{x,a,k} E_{x,b,i,j}^* + E_{y,a,k} E_{y,b,i,j}^* dA}{\sqrt{\int (E_{x,a,k} E_{x,a,k}^* + E_{y,a,k} E_{y,a,k}^*) dA} \sqrt{\int (E_{x,b,i,j} E_{x,b,i,j}^* + E_{y,b,i,j} E_{y,b,i,j}^*) dA}}, \quad i=e,o, j,k=TE, TM \quad (4)$$

上式中的 a、k 輸入端波導(bar port)、輸入光場的極化特性，b、i、j 是定向耦合器與其奇偶特性及 TE、TM 模態，從 bar port 打入 TE，激發對應 TE 的奇、偶模態，同時也可能觸發 TM 的奇、偶模態，而輸入 TM 模態也是，所以利用(5)式求得定向耦合器極化模態激發率 T (5)，如下式：

$$T_{j,k} = |(Q_{e,j,k})|^2 + |(Q_{o,j,k})|^2, \quad j,k = TE, TM \quad (5)$$

若 j 與 k 不同，表示交叉極化激發率，打入 TE，可能激發定向耦合器中 TM 的奇、偶模態($Q_{e,TE,TE}$ 與 $Q_{o,TE,TE}$ 不為 0)，並取絕對值平方相加為 T_{TM-TE} ；打入 TM，可能激發定向耦合器中 TE 的奇、偶模態($Q_{e,TE,TE}$ 與 $Q_{o,TE,TE}$ 不為 0)，並取絕對值平方相加為 T_{TE-TM} 。如圖 5 所示，幾組參數下，發現到輸入 TE 模態，交叉極化效應極低， T_{TM-TE} 均維持 1% 以下，然而 TM 需要去耦合，所以當打入 TM 時，交叉極化效應會特別明顯， T_{TE-TM} 的值隨平台高度增加，效應也增強，交叉耦合的現象會產生輸出光的極化旋轉效果，降低元件的性能。

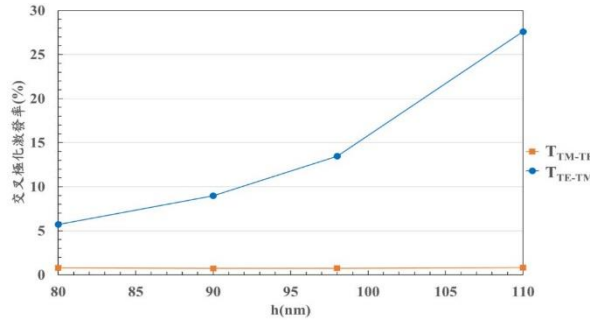


圖 5 在 $H_2=150\text{nm}$ ，不同板狀高度交叉即化耦合效應圖

有效抑制交叉極化，需讓 ER 值保持 20dB 以上，並適當調整，或許在波導間加入一個溝槽，有可能交叉極化耦合的效應極低且維持 20dB，此論點非本文探討範疇，依本文的設計結構，選擇較好的性能極化分離器，只能選擇交叉極化耦合效應相對低，且元件長度在 $10\mu\text{m}$ 以下，並將選擇的結構參數根據特徵模態展開法(Eigenmode Expansion Method)計算波導內傳播的情形，如圖 6、7 所示，入射波長 1550nm，結構為 $H_1=300\text{nm}$ ， $W_1=350\text{nm}$ ， $W_2=141.5\text{nm}$ ， $H_2=125\text{nm}$ ， $h=80\text{nm}$ ，去耦合間距= 283nm 及元件長度= $9.67\mu\text{m}$ 的去耦合參數，取樣高度 $H_1=100\text{nm}$ ，圖中粗虛線為波導芯，細線為平台。依據公式(4)Q 的正負號及奇偶模態電場分佈特性，來評斷能量是留在原波導又或者耦合到對側波導。在圖 6 能發現到 TE 的主電場被次要電場影響較為薄弱，無法發現明顯 TM 變化，兩者都從 bar port 耦合到 cross port 而輸出。圖 7 TM 在傳遞距離 $z=0$ ，cross port 有被觸發出些微 TM 量能，有此現象是強耦合效應[13,14]的產生，因 TM 去耦合，所以 bar port 與 cross port TM 能量一路往前不會有耦合情形；次要電場 $z=0$ 相同會激發些許 cross port 的 TE 能量，經過一個 $L_{\pi,TE}$ 後耦合回到 bar port，會導致 ER_{bar} 值受到波及。

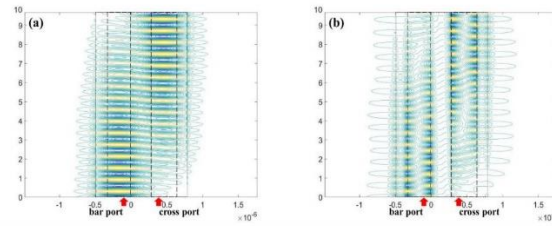


圖 6 TE 模態(a)主要電場、(b)次要電場傳播 $L_{\pi, TE}$

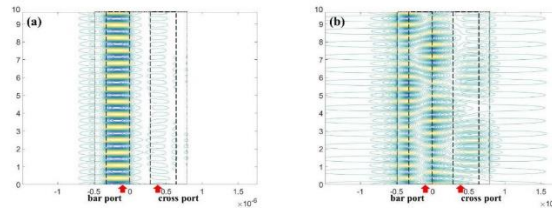


圖 7 TM 模態(a)主要電場、(b)次要電場傳播 $L_{\pi, TE}$

5. 結論

根據數據分析，在 $n_c=3.45$ ， $n_s=1.46$ ， $n_{cl}=1$ ， $H_1=300\text{nm}$ ， $H_2=125\text{nm}$ ， $h=80\text{nm}$ ， $W_1=350\text{nm}$ ， $W_2=141.5\text{nm}$ ， $s=283\text{nm}$ 和 $\lambda=1550\text{nm}$ 參數在 bar port 波導與 cross port 波導皆大於 55 dB，元件長度 $=9.67\mu\text{m}$ ，入射 TM 時激發的交叉極化耦合為 4%。後續研究中，亦可改變不同模擬參數，進一步讓元件長度再次縮小情形並能將元件性能更加提升，例如可加入溝槽結構，進一步分析降低交叉極化耦合效應，提升元件的性能。

6. 參考文獻

- [1] 余典函，「利用肋狀波導去耦合現象設計極化分離器」，國立台南大學電機工程學系 碩士論文，2019。
- [2] 林伯庭，「肋狀波導定向耦合器之去耦合現象」，國立台南大學電機工程學系碩士 論文，2018。余典函，「利用肋狀波導去耦合現象設計極化分離器」，國立台南大學電機工程學系 碩士論文，2019。
- [3] S.E. Miller, "Integrated Optics: An Introduction," Bell. Syst. Tech. J., vol. 48, no. 7, pp. 2059-2069, 1969.
- [4] E.A.J. Marcatili, "Dielectric Rectangular Waveguide and Directional Coupler for Integrated Optics," Bell. Syst. Tech. J., vol. 48, no. 7, pp. 2071-2102, 1969.
- [5] Z. Gong et al., "Optimal Design of DC-Based Polarization Beam Splitter in Lithium Niobate on Insulator," Opt. Commun., vol. 396, pp. 23-27, 2017.
- [6] C. G. Someda, "Antiresonant Decoupling of Parallel Dielectric Waveguides," Opt. Lett., vol. 16, no. 16, pp. 1240-1242, 1991.
- [7] Z. Wang, G. Y. Kai, Y. G. Liu, J. F. Liu, C. S. Zhang, T. T. Sun, C. Wang, W. G. Zhang, S.Z. Yuan, and X. Y. Dong, "Coupling and Decoupling of Dual-Core Photonic Bandgap Fibers," Opt. Lett., vol. 30, no. 19, pp. 2542-2544, 2005.
- [8] N. Grossard, J. Hauden and H. Porte, "Periodic Anticoupling Structures for Parallel Optical Waveguides on LiNbO₃," J. Light. Technol., vol. 29, no. 16, pp. 2489-2495, 2011.
- [9] Y. Tian, J. Qiu, C. Liu, S. Tian, Z. Huang and J. Wu, "Compact polarization beam splitter with a high extinction ratio over S+C+L band," Opt. Express, vol. 27, no. 2, pp. 999-1009, 2019.
- [10] Y. Xiong, D.-X. Xu, J. H. Schmid, P. Cheben, S. Janz and W. N. Ye, "Fabrication tolerant and broadband

- polarization splitter and rotator based on a taper-etched directional coupler," *Opt. Express*, vol. 22, no. 14, pp. 17458-17465, 2014.
- [11] H. Zafar, R. Flores, R. Janeiro, A. Khilo, M. S. Dahlem, and J. Viegas, "High-extinction ratio polarization splitter based on an asymmetric directional coupler and on-chip polarizers on a silicon photonics platform," *Opt. Express*, vol. 28, no. 15, pp. 22899-22907, 2020.
- [12] H. Zafar, P. Moreira, Ayat M. Taha, B. Paredes, M. S. Dahlem, and A. Khilo, "Compact silicon TE-pass polarizer using adiabatically-bent fully-etched waveguides," *Opt. Express*, Vol. 26, no. 24, pp. 31850-31860, 2018.
- [13] Y. Suematsu and K. Kishino, "Coupling coefficient in strongly coupled dielectric waveguides," *Radio Sci.*, vol. 12, no. 4, pp. 587-592, 1977.
- [14] A. Hardy, W. Streifer, "Coupled mode theory of parallel waveguides," *J. Light. Technol.*, vol. 3, no. 5, pp. 1135-1146, 1985.