

## 微/奈米創新型 1x4 機械式光開關

范光照<sup>1</sup>、林武郎<sup>2</sup>、姜禮宏<sup>3</sup>、郭文正<sup>4</sup>

<sup>1</sup>國立台灣大學機械學系教授

<sup>2,3,4</sup>國立台灣大學機械學系研究生

國科會計畫編號：NSC-93-2212-E-002-021

### 摘要

本文係利用精密加工技術與微機電元件製造技術相結合，採用 1x4 光纖直接對位(fiber-to-fiber)之光路傳輸方式，研製出小尺寸、低成本與高可靠度之 1x4 機械式光開關。首先，利用微機電技術製作光纖夾持定位元件“fiber holder”以精密夾持與固定四根output fiber，再設計兩組撥切機構交互切換以達到切換 4channel光路之目的，運用了兩階段幾何縮小誤差原理將光纖切換定位誤差縮小至  $0.1 \mu\text{m}$  以下，達到微/奈米定位精度等級。經實驗證明：在光纖端面未切角度與未鍍抗反射膜條件下：最低插入損耗為：ch1: 0.68dB、ch2: 0.71dB、ch3: 1.49dB、ch4: 0.94dB，最快切換時間 5ms，crosstalk < 80dB，長時間撥切 10,000 次後之光損耗值為ch1: 1.67dB, ch2: 0.75 dB, ch3: 1.63dB, ch2:0.98dB，驗證通過Bellcore測試規範之要求。相較於其他微機電式 1x4 光開關及串聯或稜鏡式 1x4 光開關，本光開關尺寸  $20\text{x}20\text{x}25\text{mm}^3$ ，可算是目前市場上尺寸最小與成本最低之 1x4 機械式光開關。

**關鍵字：**1x4，光開關，光纖直接對位，微機電

### 1. 前言

由於網際網路及個人通訊之普及，全世界光纖網路的頻寬需求平均每以每九個月倍增的速度成長，DWDM(Dense Wave Length Division Multiplexing)可將不同波長的光訊號耦合在同一條光纖上進行傳輸，因此可在既有的光纖網路中，輕易的將光纖的傳輸容量增加數十倍到百倍以上，是擴增光纖骨幹網路頻寬最佳的方式。如果將光通訊網路比擬為一條道路，資料流量比擬為車流量，則 DWDM 可說是增加道路寬度（即網路頻寬）的重要技術。但是如果不能將此增加出來的“路寬”與“車流量”做適當的調度，則極有可能產生有些車道大塞車，有些車道毫無車流的窘境。因此，為了充分發揮 DWDM 技術的功能，就必須在光纖通訊網路中使用光開關(Optical Switch)元件，作為流量調度之用[1]。因此，未來趨勢是在節點(node)上讓光訊號儘可能在光域(optical domain)中作交換，路徑保護，上、下路(add & drop)，以增加處理速度，保持光的通透性(transparent)，此時光開關勢將扮演重要角色，故光開關元件的普及將掌握未來 DWDM 網路發展之鑰。

目前光通訊市場上仍以機械式光開關為主，機械式光開關可在不進行光/電轉換動作下，就能切換光訊號傳輸的路徑，它具有插入損耗低、串音小等優點，為目前光開關市場上應用最廣的型式。但體積大、無法自動化量產，仍使用人工尋光對位與組裝，導致良率低成本高是其缺點[2]。本團隊已研製出一 1x2 機械式光開關(Fan, 2005)[3]，它具小尺寸( $20\text{x}16\text{x}7.5\text{mm}^3$ )，低成本(US\$10)與高可靠度之多項優點，為目前機械式光開關中尺寸最小與成本最低者，並已運用開發成功之自動化尋光對位技術達到自動化量產目的，成功突破光通訊“最後一哩”之產業瓶頸。本文持續運用該項已開發成功之關鍵技術，採用 1x4 光纖直接對位(fiber-to-fiber)[4]之設計架構來研發創新型 1x4 光開關。

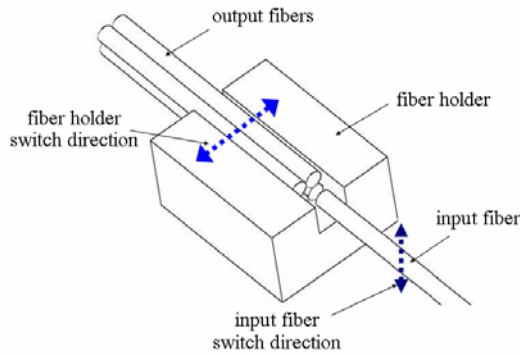
目前 1x4 機械式光開關在研究上大多以 3 顆 1x2 光開關用串聯的方式組成一顆 1x4 光開關，或以 MEMS 用熱驅動光纖方式為主。以 3 顆串聯的方式如 Nagaoka (1999)[5]利用在 fiber 上鍍上一層 Fe-Ni 金屬膜，當作微磁性合金管，因受正反電磁力吸附而作光路的切換，先製作出一顆 1x2 光開關，再利用 3 顆 1x2 光開關串聯方式組裝成一顆 1x4 光開關。在 MEMS 型式光開關研究方面，如 Kopka 等人(2000)[6]利用在 wafer 上以微機電 KOH 蝕刻製作定位用 V-groove 與 U 型熱驅動式懸臂樑當光纖致動器以製作 1x4 光開關。Yasseen 等人(1998)[7]利用微馬達(Micromotor)，微鏡子(micromirror)與 GRIN lenses 等元件製作 1x8 機械式光開關、光線由輸入端進入後，藉著微馬達讓微鏡子旋轉產生光路切換，並藉由 GRIN lenses 耦合到輸出的光纖中，以完成光開關製作。Duparre 等人(2003)[8]利用兩組微鏡片矩陣(Microlens Array)製作 1x4 光開關，當光訊號經過微鏡片矩陣，利用微鏡片的移動使光呈現偏移角度來達到光路切換的目的。Wang 等人(2004)[9]利用 MEMS 技術於 SOI wafer 上以 DRIE 製程技術製作 3 個垂直微鏡子(微鏡子作  $22.5^\circ$  角度扭轉)、comb 與 U-Groove 等元件，以靜電力來驅動 mirror，配合 5 個 Taperd/Lensed 光纖來組裝成 1x4 微機電式光開關。Kanamori 等人(2005)[10]利用微機電 surface micromachining 技術，製作出 SDA 與 cam micromotor 元件，以 SDA(scratch drive actuators)來驅動 cam micromotor(外徑  $550 \mu\text{m}$ )，使其產生間歇性轉動，以

帶動架於 cam 上之 input fiber 與 output fiber 作對位與切換動作，達到 1xN 光開關之目的。

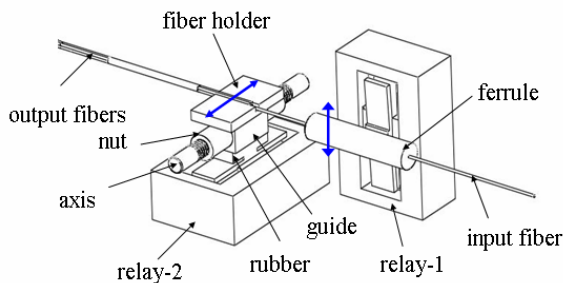
本文針對國內外相關 1x4 機械式光開關研究分析，提出一 1x4 光纖直接對位之設計架構，由於此創新的簡單設計方式可大幅縮小 1x4 光開關體積尺寸及提高光開關的製造良率。並可藉由我們已研發成功之自動化切換尋光對位 (ALTA) 技術以達到 1x4 光開關自動化量產。

## 2. 光開關之設計架構

本光開關之設計架構乃利用 1 對 4 fiber-to-fiber 光路切換設計，藉由設計兩組切換方向相互垂直之撥切機構來達到 input fiber 與 output fiber 對位之目的。fiber-to-fiber 光路切換示意圖，如圖一所示。相互垂直之撥切機構示意圖，如圖二所示。



圖一 Fiber-to-fiber 光路切換示意圖



圖二 切換機構示意圖

### 2.1 優點

相較於其他之 1x4 機械光開關而言，將具有以下之優點：

1. 因採用 1 對 4 光纖直接對位 (fiber-to-fiber) 設計架構，可使光開關體積大幅縮小與元件簡單化。
  - a. 與串聯式 1x4 機械式光開關比較，如 Lightwave link 公司 1x4 光開關 (18x76x76mm<sup>3</sup>) 比較，在體積尺寸上為其 1/11，成本上約為其 1/5~1/10。

- b. 與稜鏡式 1x4 光開關比較，如 DiCon 公司 (70x50x14mm<sup>3</sup>)，體積為其 1/5，成本上因省略了 Prism、collimator 等昂貴零件之費用，約為其 1/10。

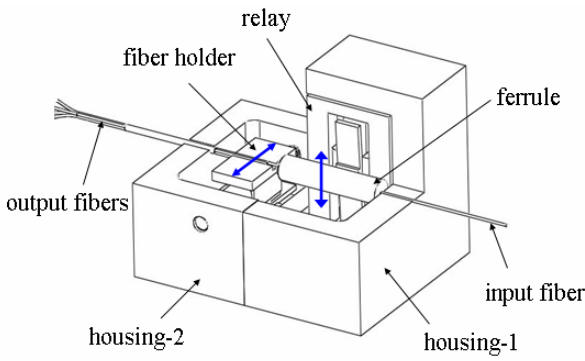
- c. 相對於 MEMS 型式的 1x4 機械式光開關，如美國 MEMSCAP 公司 (76x76x14mm<sup>3</sup>)，體積為其 1/5，更可省略昂貴的微機電設備與製程開發費用，成本為其 1/10~1/20。

2. 本 1x4 光開關之最低 insertion loss 極限為 0.37dB (在未鍍膜、未加 index oil 與光纖斷面未切角度條件下)，因本設計只經過一次 fiber-air-fiber 傳輸介質。如以三顆 1x2 光開關串聯的方式來組裝成一顆 1x4 光開關 (在相同條件下)，其最佳 insertion loss 最低極限為 0.74dB (2 x 0.37dB)，因其經過兩次 fiber-air-fiber 傳輸介質。因此設計上可降低插入損耗的最佳極限值。(其中未包含兩顆 1x2 光開關間串聯的光纖接續損耗)。
3. 可利用傳統之精密加工精度，藉由本創新型設計的兩階段幾何縮小誤差原理，達到 0.1 μm 以下之微米定位精度等級。
4. 運用本實驗室開發成功之自動切換尋光對位 (ALTA) 技術，使光開關的製造可自動化量產，相對於以往以人工尋光對光的組裝方式，可大幅減少人工對位與組裝的時間。
5. 採用了低熱膨脹係數 (INVAR) 材料為光開關 housing 基材，減少受熱變化影響。並運用 ANSYS 軟體來作最佳化的分析，計算在高低溫環境溫度變化下，最佳化與補償兩對位光纖因不同組件材料之熱膨脹所產生之光纖錯位 [11]。

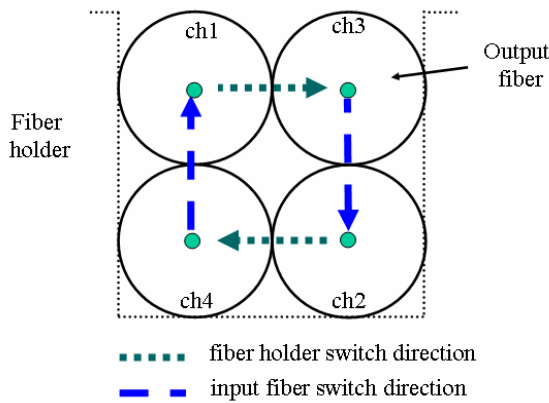
### 2.2 切換機構

切換機構示意圖與光開關實體圖，如圖二與圖三所示。第一組切換機構組成是將 ferrule 固定於 relay 上，中間插入 input fiber，該切換機構負責 input fiber 的 ch1-ch4 與 ch2-ch3 方向之切換，如圖四垂直 (藍色) 箭頭所示。另一組切換機構組成是利用一套環套於中心滑軸上可作精密的左右滑動，兩端利用一定位檔塊 (stopper) 來固定以作為 input fiber 125μm 左右撥切位置的機械死點，此套環下方受另一顆 relay 上之橡膠驅動可作左右位置 ch1-ch3 與 ch2-ch4 的切換，如圖四水平 (綠色) 箭頭所示。

此時，利用微機電技術製作之光纖定位元件-fiber holder，將四根 output fiber 精確的固定位於其 250μm x 250μm 之凹槽內。並將此 fiber holder 固定於撥切套環上，藉由 relay 的撥切帶動左右的切換動作，如圖四所示。



(b)  
圖三 光路撥切機構示意圖

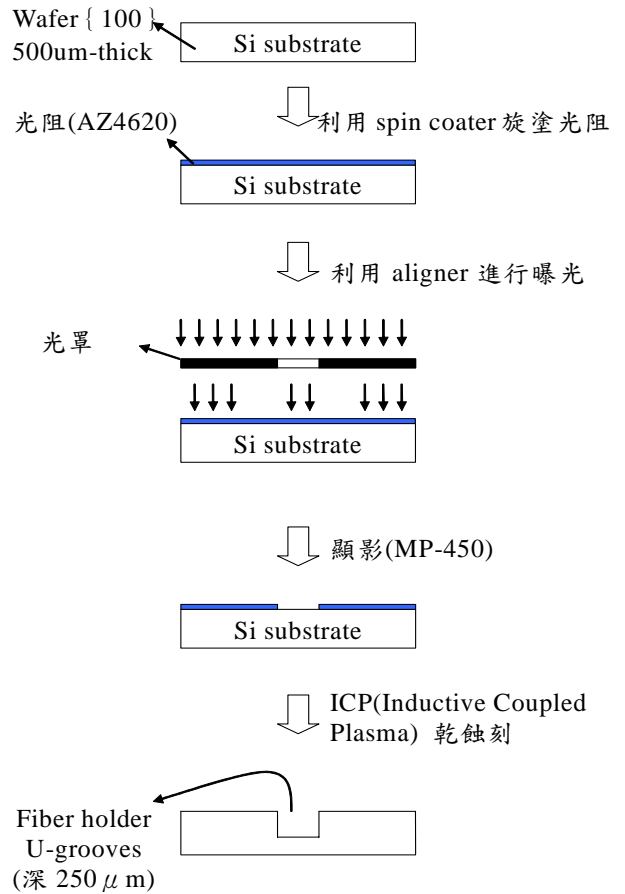


圖四 1x4 切換示意圖

### 2.3 Fiber holder 製作

Fiber holder 元件尺寸為： $4 \times 4.5 \times 0.5 \text{ mm}^3$ ，溝槽  $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ ，厚度  $500 \mu\text{m}$ ，以微機電技術之 ICP 製程製作，藉由微機電製造技術可將其槽寬尺寸精度控制到  $1 \mu\text{m}$  以下，ICP 相關製程步驟，如下說明。

首先，以方向 {100}、厚度  $500 \mu\text{m}$  的矽晶圓 (wafer) 為基底材料，利用旋塗機 (spin coater) 於矽晶圓表面上，先旋塗一層 HMDS 薄膜，用來增加光阻黏附於矽晶圓的附著力，接著，旋塗一層光阻 (AZ4620)，其厚度約  $5 \mu\text{m}$ 。光阻經過軟烤的動作後，進行對準曝光與硬烤過程，可去除光阻內殘留的水分，並增加光阻的附著力。最後，以光阻為蝕刻的擋罩，並利用電感耦合電漿蝕刻機 (ICP) 蝕刻出 fiber holder 凹槽，蝕刻所得的 fiber holder，其寬度為  $250 \mu\text{m}$ 、溝深約  $250 \mu\text{m}$ ，fiber holder 製造流程圖，如圖五所示。

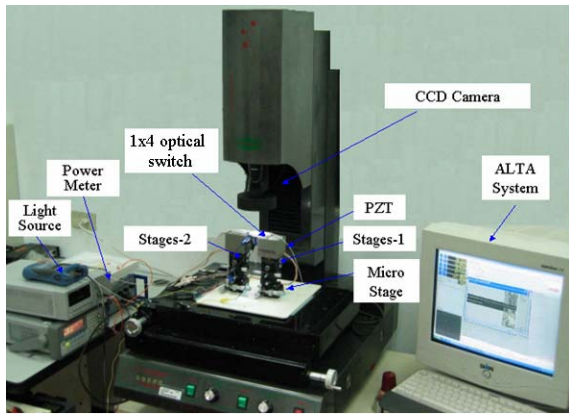


圖五 fiber holder 製造流程圖

## 3. 尋光對位與組裝

### 3.1 光開關尋光對位系統

1x4 機械光開關尋光對位系統係整合 CCD 影像處理單元與 PZT 微動平台單元，最後，利用光損耗檢測單元作為光纖錯位之誤差檢測並回饋至對位系統作後續光纖錯位補償，尋光對位系統設備架構圖，如圖六所示。使用設備包括：CCD 影像處理單元：CCD 影像擷取鏡頭、影像處理系統。PZT 微動平台單元：二組六軸 micro-Stage 與兩組三軸 (X, Y, Z) PZT-stage。光損耗檢測單元包含：1310nm 波長光源 (Light Source)、光功率計 (Power Meter) 等元件。

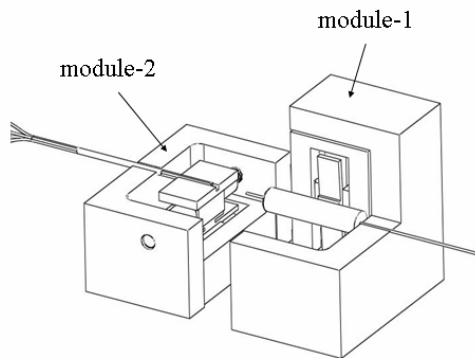


圖六 光開關組裝系統架構圖

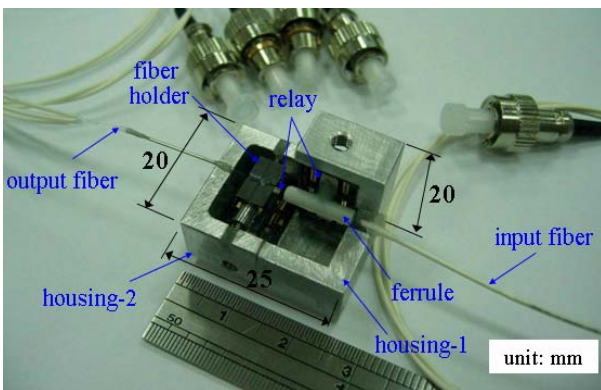
### 3.2 光開關之組裝

1x4 機械式光開關組裝是由模組-1(由 relay-1、ferrule、input fiber 與 housing-1 所組成)與模組-2(由 relay-2、套環、中心軸、擋塊、output fiber 與 housing-2 所組成)來進行兩對位光纖之尋光對位與封裝，如圖七所示。

模組-1 之 input fiber 端接 1310nm 的光源，模組-2 output fiber 端連接 power meter 檢測單元。input fiber 與 fiber holder 內之 4 個 output fiber 作切換尋光對位，直到 4 個 channel 達到最佳值(皆小於 2dB)，即以 UV 膠將模組-1 與模組-2 封裝(package)。1x4 光開關成品圖，如圖八所示。



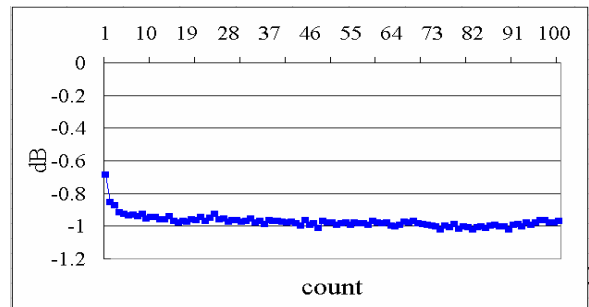
圖七 模組-1 與模組-2 示意圖



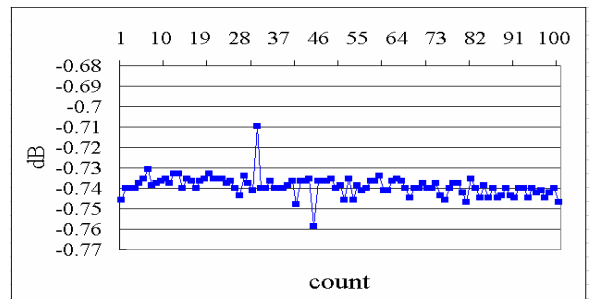
圖八 1x4 光開關成品圖

### 4. 測試結果

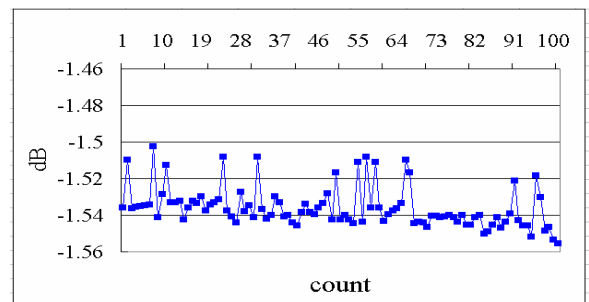
本實驗使用之光纖條件為：多模光纖，外徑 125  $\mu\text{m}$ ，core 62.5  $\mu\text{m}$ ，光纖端面未切角度、亦未鍍抗反射膜(anti-reflection)。依 Bellcore 1073 測試規範要求 1x4 光開關 insertion loss 須小於 2dB[12]。光開關封裝後，測試初始最佳插入損耗值為 ch1: 0.68dB、ch2: 0.71dB、ch3: 1.49dB、ch4: 0.94dB，如圖九(a)~(d)所示。



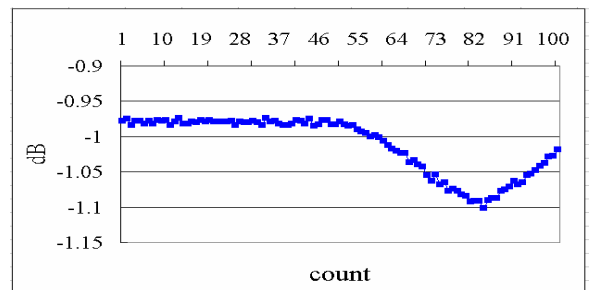
(a) ch1 insertion loss



(b) ch2 insertion loss



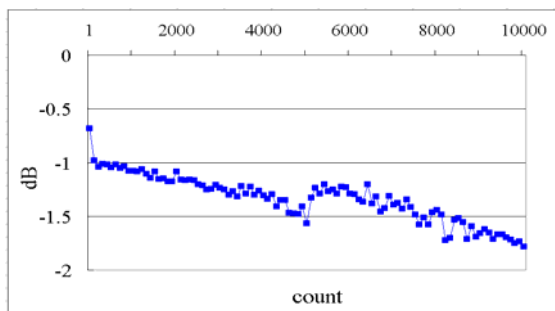
(c) ch3 insertion loss



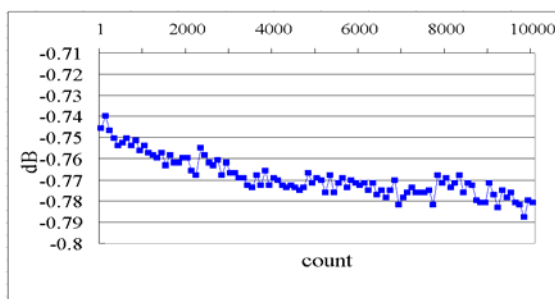
(d) ch4 insertion loss

圖九 初始最佳 insertion loss 值

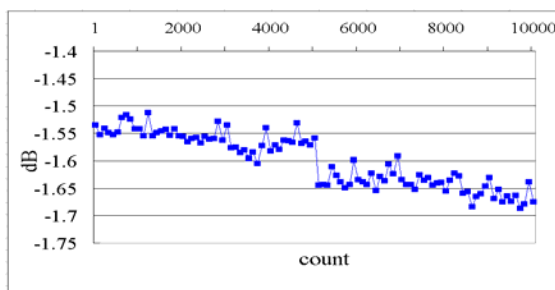
接下來，測試光開關長時間穩定度，持續切換 10,000 次後，最終光損耗值為 ch1: 1.67dB, ch2: 0.75 dB, ch3: 1.63dB, ch2:0.98dB，如圖十(a)~(d)所示。實驗證明已通過 Bellcore 1073 測試規範要求。



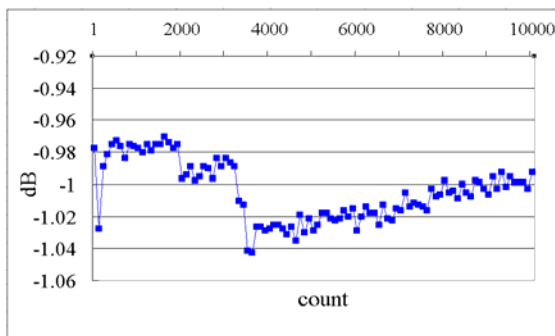
(a) ch1 insertion loss



(b) ch2 insertion loss



(c) ch3 insertion loss



(d) ch4 insertion loss

圖十 10,000 次 insertion loss 值

## 5. 結論

以 1x4 光纖直接對位(fiber-to-fiber)為光路傳輸架構之機械式光開關已被成功開發，成功驗證通過 Bellcore 1073 測試規範(insertion loss<2dB)及長時間可靠度之要求，本 1x4 光開關具有小尺寸、低成本與高穩定度之特性，外觀尺寸為 20x20x25mm<sup>3</sup>，為目前市場上尺寸最小及設計最簡單之 1x4 機械式光開關，尺寸上為其他機械式光開關的 1/5~1/10，成本上更為其他光開關的 1/10~1/20。實驗證明最佳插入損耗為：ch1: 0.68dB、ch2: 0.71dB、ch3: 1.49dB、ch4: 0.94dB。測試長時間穩定度，切換 10,000 次後，插入損耗值分別為 ch1: 1.67dB, ch2: 0.75 dB, ch3: 1.63dB, ch2:0.98dB。

為縮小四個 channel insertion loss 的差值，未來將利用本實驗室所研發成功之自動切換尋光對位 (ALTA) 技術來進行 1x4 光開關的快速組裝與平衡四個 channel，使其光損耗差值至 0.1dB 以下。

## 6. 致謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會經費補助，計畫編號 NSC 93-2212-E-002-021，特此致謝。

## 7. 參考文獻

- [1] J. J. Pan, Advanced fiber optic components for DWDM communications *IEEE/LEOS Summer Topical Meeting (San Diego, CA)* pp. 115-116, 1999.
- [2] M. A. Bourouha, M. Bataineh and M. Guizani, Advances in optical switching and networking: past, present, and future *IEEE SoutheastCon2002* pp. 405-413, 2002.
- [3] K. C. Fan, W. L. Lin, T. T. Chung, H. Y. Wang and L. P. Wu, A miniature low-cost and high reliability 1x2 mechanical optical switch *Journal of Micromechanics and Microengineering* Vol. 15, pp. 1565-1570, 2005.
- [4] S. Nagaoka, Latching type single-mode fiber switch *Electronics Letter* Vol. 26, No. 11, pp. 744-745, 1990.
- [5] S. Nagaoka, Compact latching-type single-mode-fiber switches fabricated by a fiber-micromachining technique and their practical applications *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronic* Vol. 5, No. 1, pp. 36-45, Jan/Feb 1999.
- [6] P. Kopka, M. Hoffmann and E. Voges, Coupled U-shaped cantilever actuator for 1x4 and 2x2 optical fibre switches *Journal of Micromechanics and Microengineering* Vol. 10, pp. 260-264, 2000.
- [7] A. A. Yasseen, J. Mitchell, T. Streit, D. A. Smith and M. Mehregany, A rotary electrostatic

micromotor 1x8 optical switch *Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 98. Proceedings, The eleventh annual international workshop on 25-29*, pp. 116-120, Jan. 1998.

- [8] J. Duparre', B. Gotz and R. Goring, Micro-optical 1x4 fiber switch for multimode fibers with 600 $\mu$ m core diameters *Applied Optics* Vol. 42, No. 34, pp. 6889-6896, Dec. 2003.
- [9] Z. F. Wang, W. Cao, X. C. Shan, J. F. Xu, S. P. Lim, W. Noell and N. F. Rooij, "Development of 1x4 MEMS-based optical switch *Journal of Sensors and Actuators A* Vol. 114, pp. 80-87, 2004.
- [10] Y. Kanamori, Y. Aoki, M. Sasaki, H. Hosoya, A. Wada and K. Hane, "Fiber-optical switch using cam-micro-motor driven by scratch drive actuators *Journal of Micromechanics and Microengineering* Vol. 15, pp. 118~123, 2005.
- [11] J. H. Chen, Thermal deformation analysis and optimum design for optical switches *MS Thesis National Taiwan University ROC*, Jun. 2004.
- [12] Technical Reference TR-NWT-001073, Generic Requirements for Fiber Optic Switches, Issue 1, Bellcore, Jan. 1994.

## **A micro/nano novel 1x4 mechanical optical switch**

Kuang-Chao Fan<sup>1</sup>, Wu-Lang Lin<sup>2</sup> and  
Li-Hung Chiang<sup>3</sup>, Wen-Cheng Kuo

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Department of Mechanical Engineering,  
National Taiwan University.

NSC Project No.: NSC-93-2212-E-002-021

### **Abstract**

This paper presents the design, fabrication and tests of a novel 1x4 mechanical optical switch, which components are fabricated by precision machining and MEMS technologies. The switch uses two relays as the two actuators perpendicular to one another. The input fiber, which is held by ferrule, aligns to output fibers, which are held by a fiber holder, for the four switch points of the 1x4 switch. Moreover, the fiber positioning error could be drastically reduced to below 0.1 $\mu$ m with special geometry design. Employing the fiber-to-fiber configuration for the novel 1x4 optical switch we have successfully developed the simplest and the lowest cost switch than the others type switch. Its advantages are small size (20 $\times$ 20 $\times$ 25mm<sup>3</sup>), low cost and high reliability. The results show the insertion loss of the ch1: 0.68dB, ch2: 0.71dB, ch3: 1.49dB, ch2: 0.94dB; the shortest switching time is 5ms, crosstalk < 80dB. The reliability tests of the insertion loss after 10,000 cycles in four

channels are ch1: 1.67dB, ch2: 0.75dB, ch3: 1.63dB, ch4: 0.98dB. The size and cost of our 1x4 switch are 1/5~1/10 and 1/10~1/20 than the series and prism type switches. Comparing with the MEMS type switch our switch's cost is about 1/20. In the future, we will apply the Automatic Light Tracing Alignment (ALTA) technique, which have successfully developed by us, to speed up the alignment and packaging process for mass production.

**Keywords:** 1x4, Optical switch, Fiber-to-fiber, MEMS