

可調法布里 - 珀羅截光器之可行性研究

THE INVESTIGATION OF A TUNABLE FABRY-PEROT CHOPPER FOR LIGHT

顏國安^{*} 周正三^{**} 廖運炫[†]
K. A. Yen C. S. Chou Y. S. Liao

^{*}博士班研究生 ^{**}研究員 [†]教授

^{*†}國立台灣大學機械工程研究所

^{**}精密儀器發展中心

^{*}Graduate Student ^{**}Researcher [†]Professor

Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan 10617, R.O.C.

Precision Instrument Development Center, 20 R&D Road VI, Hsinchu Science-based Industrial Park, Hsinchu, Taiwan 300, R.O.C.

Abstract

The switching or modulation of light intensity is crucial in many laser applications. However, the low cost, electrical-controllable light switches that can operate around several tens to hundreds of kHz but maintain high extinction ratio are still very lacking. The use of a silicon-micromachined Fabry-Perot device as the light switch or modulator is proposed in this paper. A piezo-driven Fabry-Perot apparatus is used for feasibility study. A switching time of $3\mu\text{s}$, an extinction ratio of 2570:1 and an operation frequency up to 50kHz are obtained. Some practical issues on micromachined Fabry-Perot chopper are also discussed.

Keywords: modulation, extinction ratio, silicon micromachined, Fabry-Perot, light switch, modulator.

摘要

在許多雷射的應用上必須控制光的強度，因此光的開關或調制器非常重要，但是工作頻率約數十至數百 kHz 可電控及高對比而又價位低的光開關至今仍極欠缺，本文提出以矽微加工技術製造的法布里 - 珀羅截光器 (Fabry-Perot chopper) 的構想。為研究其可行性，以 PZT 驅動之 Fabry-Perot 裝置進行測試，可得到開關時間為 $3\mu\text{s}$ ，對比為 2570 : 1，工作頻率可達 50kHz 的結果。文中也討論了微型 Fabry-Perot chopper 所會遇到的問題及解決之道。

關鍵詞：調制，對比，矽微加工，法布里 - 珀羅，光開關，調制器。

1. 前言

在許多雷射的應用中必須對光的強度做開關或調制。對於要求高速開關或調制的應用，一般均使用電光調制器 (Electro-Optic Modulator, 簡稱 EOM) 或聲光調制器 (Acousto-Optic Modulator, 簡稱 AOM)，其工作頻率可達數十 MHz 至數 GHz，但價格相對較高且會有一定程度的漏光。對於較低工作頻率的應用，一般則使用機械式的開關，如截光器 (optical chopper) 或快門 (shutter)。截光器是許多光譜研究不可或缺的儀器，其工作原理是利用馬達轉動來帶動摺空的扇葉而能週期性的遮擋光源。光開關的頻率取決於馬達的轉速及扇葉數，商品化的產品最高頻率約 6kHz；快門通常用於某一段時間對光作開關，而非週期性開關，最簡單的是用電磁鐵驅動一遮擋物。機械式的開關使用上較方便、開關完全且較便宜，但亦有

其缺點，例如開關時通常會造成明顯的振動，且其反應有延遲加上一定的恢復時間，限制了其最高的開關速度，一般最高開關速度只有幾百 Hz；除此之外，機械式的截光器在某些光譜研究上常會覺得其功能或有不足之處，例如：一、其工作週期 (duty cycle) 變化有限，若將兩片相同的扇葉重疊使用，雖然可得到 0% ~ 50% 可調的工作週期，對於有些情況須大於 50% 的工作週期，甚至有時須不同的工作週期交替變換時，就必須製作特殊扇葉 [1]。二、當應用兩台截光器的頻率及相位必須鎖住時，機械式的截光器受限於扇葉間距的誤差及馬達旋轉的穩定性，鎖相很難做得很好 [2]。文獻報告 [3] 中以壓電材料驅動刀口遮擋聚焦的光點，最高開關頻率只達 10kHz、壓電材料必須移動約 $10\mu\text{m}$ 的長距離 驅動電壓須高達 100 伏特 低對比、開關時間不夠快、量產性不夠等為其缺點。基於前述的理由，開發等級介於 EOM、AOM 及機械

式、工作頻率約數十 kHz 至數百 kHz、可電壓控制以提高工作週期之自由度、且開關之對比 (extinction ratio) 又大的光開關，將對許多應用有莫大的幫助。

本文探討以 Fabry-Perot 裝置做為光開關或調制器的可行性。其在功能上是一個光訊號的濾波器，僅能透過特定波長的光，若先將腔長調至雷射光透過最大的位置 (即滿足腔長為波長的半整數倍)，再調制腔長就能調制透過的光強度。由於干涉儀是光多重干涉的結果，腔長只要改變少許就可使光之穿透率由極大變為極小，因此不管使用壓電材料或用電容調整腔長，只須加較少許電壓就能有相當程度的開關光訊號，因此可在較高頻率開關光且不造成振動，若調制電壓較少未達完全開關則可當成振幅調制器。文中以 PZT 驅動的 Fabry-Perot 裝置做測試，可得到開關時間為 3μs，對比為 2570 : 1，工作頻率可達 50kHz 的結果。在實際應用上，由於腔長短的 Fabry-Perot 其能透過的光頻寬比較大，較能容許因環境溫度改變造成中心透光波長改變或雷射波長改變而使透光率改變，因此以腔長較短的 Fabry-Perot 組件做為光開關比較恰當。依本研究結果，目前正積極研製以矽微加工技術製造的微型 Fabry-Perot chopper。

2. 原理

Fabry-Perot 干涉儀主要結構為由兩個具有高反射係數鏡面所形成的平行腔長。如圖 1 所示，當光行經兩個高反射係數鏡面所形成的平行腔長時，若腔長大小 (d) 滿足入射光的半個波長 ($\lambda/2$) 的整數倍時 (即 $2d = N\lambda$)，則產生建設性干涉而輸出陡峭的光波脈衝。

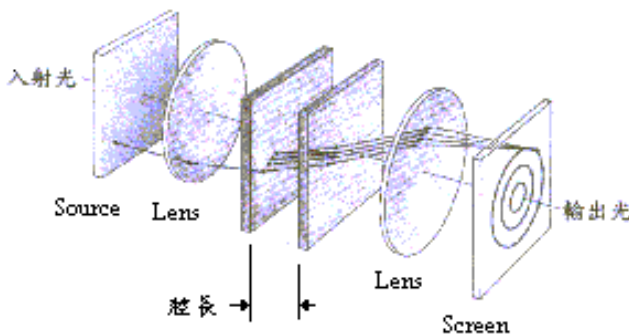


圖 1 干涉儀基本結構圖

Fig. 1 The basic structure of a Fabry-Perot interferometer

平面鏡型 (腔長 d) 的干涉儀，波長 λ 的入射光與穿透率 I 的關係為 Airy 函數 [4,5]：

$$I = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right) \frac{1}{1 + \frac{4R \sin^2(2\pi d \cos \theta / \lambda)}{(1-R)^2}} \quad (1)$$

其中 A 和 R 分別為鏡面之吸收率及反射率， θ 為光束入射方向和鏡面法線之夾角。對於垂直入射光，光之開關狀態如圖 2 所示， λ 為雷射光波長，當調制兩平行面鏡之電壓至 V_1 ，使腔長移動，干涉儀之波形與其沒重疊，波長 λ 的光穿透率為極小，此時為光「關」狀態 (如圖 2 之波形底部)；當調制電壓至 V_2 時，干涉儀之波形與雷射光疊合，波長 λ 的光穿透率為極大，此時為光「開」狀態 (如圖 2 之波形頂部)，因此調制電壓於 $V_1(V_2)$ 轉換便可開關光。

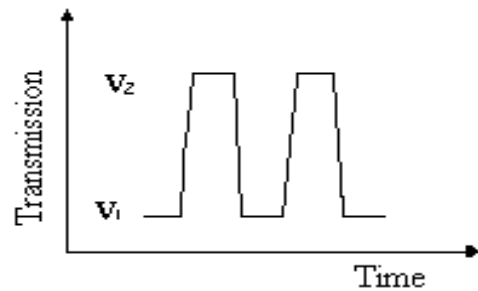


圖 2 Fabry-Perot 干涉儀做為光開關之示意圖
Fig. 2 The schematic diagram of using a Fabry-Perot interferometer as a switch of light

若 c 代表光速，在滿足 $2d = N\lambda$ 的條件下，穿透率為極大；兩相鄰的穿透極大值之距離稱為干涉儀之 free spectral range (FSR)，

$$FSR = \frac{c}{2d} \text{ (in wavelength)} = \frac{c}{2d} \text{ (in frequency)} \quad (2)$$

穿透極大之半高全寬 (FWHM) 和 FSR 及鏡面之反射率 R 有關，

$$FWHM = \frac{FSR}{F} \quad (3)$$

Finesse F 定義為：

$$F = \frac{\delta \sqrt{R}}{1-R} \quad (4)$$

若鏡面之吸光率甚小，則由(1)式知穿透極大跟極小之對比 (extinction ratio) 為：

$$\text{Extinction ratio} = \left(\frac{1+R}{1-R} \right)^2 \quad (5)$$

Fabry-Perot 干涉儀除了可由平面鏡所組成外，一般也常用以凹面鏡組成共焦型結構，此結構的干涉儀的各項參數和平面型公式稍有不同，穿透極大跟極小之對比列出如式(6)，其餘公式可參考 [6]，

$$\text{Extinction ratio} = \left(\frac{1+R^2}{1-R^2} \right)^2 \quad (\text{for confocal Fabry-Perot}) \quad (6)$$

若波長固定，要從穿透極大變為極小腔長須改變 $\lambda/4$ 。因此若腔長做 $\lambda/4$ 週期性調制就可開關光；如果調變距離較小，則可以當光之振幅調制器。正在研製中的微型 Fabry-Perot chopper 如圖 3 所示 (相當於圖 1 之兩鏡面腔長結構部分，利用光在腔長內部產生建設性干涉的原理)，是針對波長為 $1.3 \sim 1.5\mu\text{m}$ 的截光器，光從上方通過抗反射層、矽平台，若腔長滿足建設性干涉條件，則經過平行鏡面而從矽基板輸出；晶片大小 $3.6\text{mm} \times 3.6\text{mm}$ ，可由半導體製程來批量生產，底部為矽基板，上面為可移動矽薄膜平台，其上均各有高反射光學鏡面和驅動 (偵測) 電極，鏡面反射率大於 95%，腔長為 $5\mu\text{m}$ ，利用電極間之靜電力來控制鏡面間距 (相當於圖 1 之腔長)，施以 60 伏特的電壓約可改變腔長 $1\mu\text{m}$ ；依此估計其 Finesse 約 60，FWHM 約 3nm，對比約 1500 : 1，並且可以約 20 伏特的電壓開關。

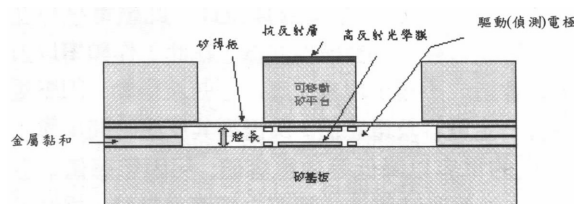


圖 3 Fabry-Perot chopper 微型結構圖

Fig. 3 The structure of a Fabry-Perot chopper

3. 實驗、結果與討論

3.1 實驗裝置

為驗證前述之構想，以一共焦型、PZT 驅動之 Fabry-Perot 裝置進行測試，此裝置之腔長為 5cm FSR 為 1.5GHz，其鏡面反射率約 98%、Finesse 為 300、FWHM 只有 5MHz，由於頻寬甚窄，光源是用線寬小於 1MHz 的外腔式半導體雷射 (波長為 780nm)，為避免因環境溫度飄移而使雷射頻率或 Fabry-Perot 裝置之中心穿透頻率改變造成光穿透率改變，使用鈷原子光譜鎖頻，並略作溫度控制，實驗裝置如圖 4 所示。

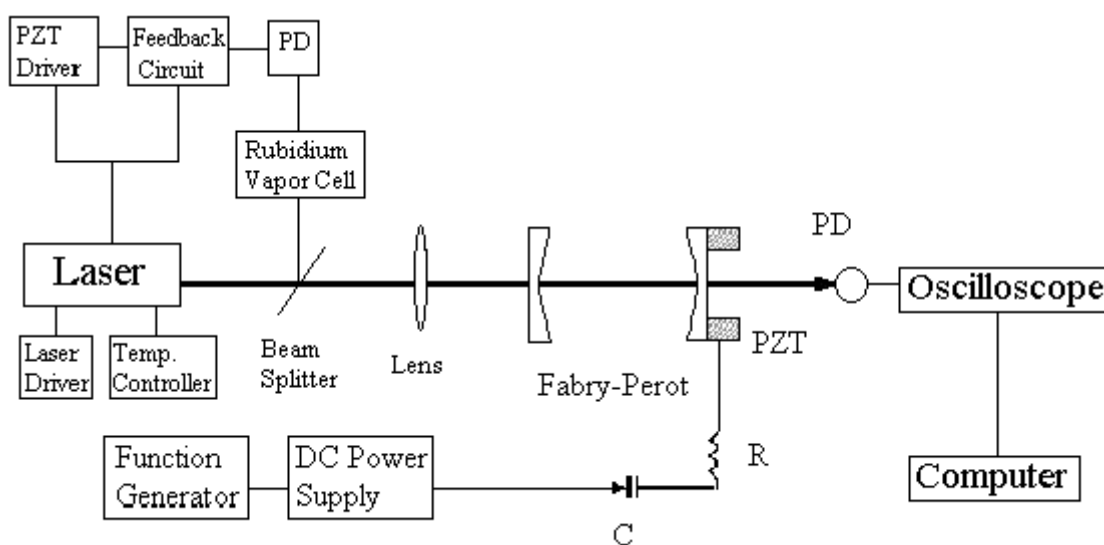


圖 4 Fabry-Perot chopper 之實驗裝置圖

Fig. 4 The experimental setup of a Fabry-Perot chopper

為使光之穿透率較高，雷射光先經一模態匹配 (mode matching) 透鏡使光束之高斯光束參數匹配共焦型 Fabry-Perot 裝置之 TEM_{00} 模 [7]。有一面鏡子黏有壓電材料，可用電壓微調其腔長，此壓電材料在 8~12kHz 左右會發生機械性共振，在此工作頻率以方波驅動會造成不穩定現象，應以正弦波驅動。因壓電材料有一定電容及電感值，為提高其反應時間串聯一 $0.01\mu F$ 的電容以降低等效電容值；另因電感值之存在，以方波驅動時將造成瞬間之感應電動勢，為減低其效應則串聯一 100Ω 的電阻。驅動電壓由波形產生器提供，其輸出和另一可調範圍為 120 伏特的直流電源之輸出串聯再加至壓電材料，此直流電壓用來調整 Fabry-Perot 裝置之中心穿透頻率。穿透 Fabry-Perot 裝置之光以高速光偵測器接收，其 3dB 反應頻率約為 10MHz。數據由數位示波器讀取並藉由 GPIB 傳至電腦儲存與處理。

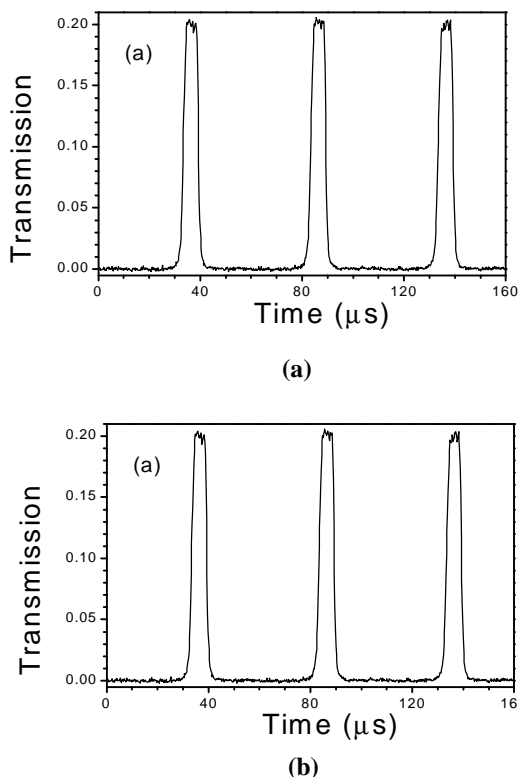


圖 5 (a) 20kHz / 振幅 5V 方波動之光開關情形
(b) 圖 5(a) 之區間放大圖

Fig. 5 (a) The photodiode signal of a square wave with 20kHz frequency and 5V amplitude applied (b) The partial magnification of Fig. 5(a)

3.2 結果與討論

實驗時先調腔長至適當位置，再加驅動電壓 (訊號)。圖 5(a) 為以 20kHz、振幅為 5 伏特的方波驅動時光之開關情形，由圖 5(b) 可看出其 10% 至 90% 區間之上升速度為 $3\mu s$ 左右，若驅動電壓愈高則開關速度還可更快。壓電材料之反應實際上有一延遲，圖 6 為以 100Hz、振幅為 10 伏特的方波驅動時，在開關瞬間反應延遲的情形，其反應延遲時間約 $10\mu s$ 左右，這將限制開關的最高速約 50kHz ($f = 1/20\mu s = 50kHz$)。如果驅動電壓未達完全開關，Fabry-Perot 裝置亦可當成振幅調制器，圖 7 為以振幅 0.05 伏特、頻率為 20kHz 的正弦波驅動時，輸出光的振幅調變情形。開關之對比量測值為 2570 : 1 和以 98% 反射率代入式(6)所算出的 2450 : 1 甚接近，其誤差值由反射鏡面的製造誤差和系統量測誤差所造成；但若光路稍偏離最佳化則對比將顯著降低。各圖中所顯示之穿透率大小與腔長條件 (大小) 符合雷射光中心波長的程度有關。

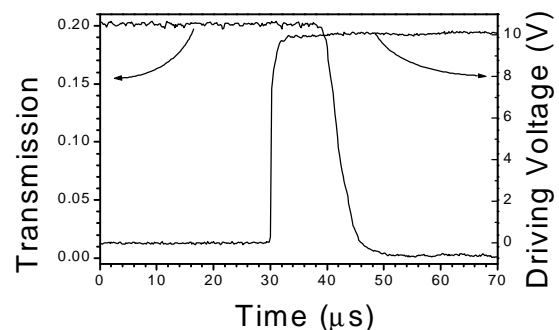


圖 6 光開關之反應延遲測量

Fig. 6 The delay measure of corresponding Photodiode signal

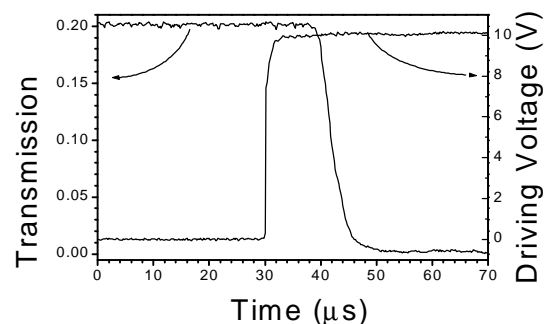


圖 7 20kHz / 振幅 0.05V 正弦波驅動之光振幅調制情形

Fig. 7 The photodiode signal of a sine wave with 20kHz frequency and 0.05V amplitude applied

另外,值得一提的是亦觀察到 Fabry-Perot 裝置在高速掃描狀態下,其穿透行為將偏離 Airy 函數而變成非對稱形狀(如圖 8,以 100kHz / 振幅 2V 之三角波驅動),這在許多文獻報告中有廣泛的探討 [8~10],其不對稱程度決定於一個無因次的參數 $\eta = \beta \tau_c$,其中 β 為頻率掃描速率 (frequency scanning rate, GHz/s), τ_c 為光在共振腔的衰減時間,它和腔長及 Finesse 的關係如下: $\tau_c = Fd / \pi c$, η 為 0.1 時波形就會有顯著的不對稱性,當 η 為 0.5 以上時波形甚至會有振盪 (ringing) 的情形 [9]。實際上, τ_c 可說是 Fabry-Perot 裝置反應的特徵時間,做為光開關的重要判定基準,本實驗裝置 τ_c 約 32ns,若 β 愈大,則 η 愈大,較易有波形不對稱和振盪情形。有利的是,對於相同的 Finesse,腔長愈短則 τ_c 愈小,我們研製中的微型 Fabry-Perot 干涉儀的參數為例,則 τ_c 只有 0.32ns,並不構成任何問題。

Fabry-Perot chopper 有其適用的特定波長範圍,腔長愈短的其適用的波長範圍愈大,可把環境溫度的影響減低;以研製中的微型 Fabry-Perot chopper 為例,對於波長為 1.5 μm 的光其適用波長範圍約 80nm。若室溫的漂移很大,導致干涉儀中心波長的改變很多,因而影響了透光率,則文獻 [11] 所提出的設計方式為不錯的參考方向;他們在 Fabry-Perot etalon 再夾以兩層不同熱膨脹係數的玻璃,當溫度增加時,這兩層玻璃對 Fabry-Perot etalon 的張力擠壓抵消了 etalon 之熱膨脹與折射率改變對光程的影響;對於波長為 1.5 μm 的光,他們可做到溫度於 5 $^{\circ}\text{C}$ ~ 85 $^{\circ}\text{C}$ 範圍,干涉儀中心波長只改變 0.02nm 的程度。

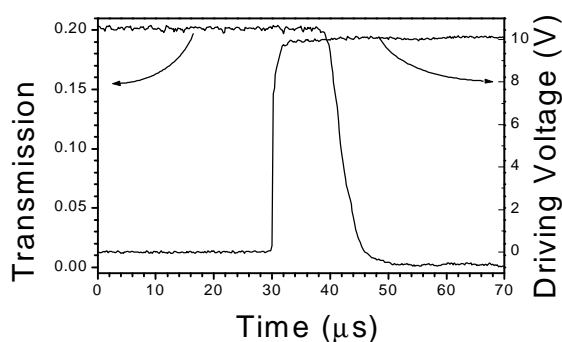


圖 8 不對稱 Airy 函數波形

Fig. 8 The asymmetrical profile of an Airy function

4. 結 論

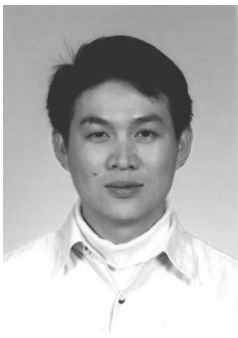
本文提出矽微加工技術製造的微型 Fabry-Perot chopper 的構想,以 PZT 驅動 Fabry-Perot 裝置做測試,初步可得到開關時間為 3 μs ,對比為 2570 : 1,工作頻率可達 50kHz 的結果;同時也討論微型 Fabry-Perot chopper 所會遇到的問題及解決之道。因此所提之構想具有可行性,目前正在研製矽微加工製造的微型 Fabry-Perot chopper。

參考文獻

- [1] H. C. Basso and M. A. Aegerter, "Chopper technique for measuring a delayed fluorescence spectrum superimposed on an excitation spectrum," *Appl. Opt.*, Vol. 20, 1981, p. 12.
- [2] S. M. Jaffe and W. M. Yen, "Phase-locked optical chopper," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 64, 1993, p. 342.
- [3] C. S. Adams, "A mechanical shutter for light using piezoelectric actuators," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 71, 2000, p. 59.
- [4] D. M. Zipoy, *Appl. Opt.*, Vol. 18, 1979, p. 1988.
- [5] W. H. Steel, *Interferometry*, Cambridge U. P., Cambridge, England, 1967, pp. 109–123.
- [6] A. Yariv, *Optical Electronics in Modern Communication*, Ch. 4, Oxford, 1997.
- [7] H. Kogelnik and T. Lee, "Laser beams and resonators," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 54, 1966, p. 1312.
- [8] D. R. Huber and James B. Carroll, "Time domain response of an optically frequency swept Fabry-Perot interferometer," *Appl. Opt.*, Vol. 25, 1986, p. 2386.
- [9] Z. Li and G. E. Stedman, "Asymmetric response profile of a scanning Fabry-Perot interferometer," *Opt. Commun.*, Vol. 100, 1993, p. 240.
- [10] J. Poirson, Fabien Bretenaker, Marc Vallet, and Albert Le Floch, "Analytical and experimental study of ringing effects in a Fabry-Perot cavity. Application to the measurement of high finesse," *J. Opt. Soc. Am B*, Vol. 14, 1997, p. 2811.
- [11] M. Shirasaki, "Temperature insensitive design of Fabry-Perot etalon," *IEEE Photo. Techno. Lett.*, Vol. 11, 1999, p. 1431.



顏國安 (K. A. Yen) 民國 50 年生，民國 75 年畢業於台灣科技大學，曾擔任正峰、貫新公司研發經理，目前為台灣大學機械研究所博士班學生。



周正三 (C. S. Chou) 國科會精密儀器中心研究員，民國 86 年獲得交通大學光電博士，專長於微機電 (MEMS)。



廖運炫 (Y. S. Liao) 台灣大學機械系教授，生於民國 40 年，民國 69 年獲得美國 Wisconsin-Madison 大學機械博士，專長於放電加工、難切削材料加工、工具機的動態分析與控制。