



經濟部工業局 105 年度
中小企業即時技術輔導計畫
執行成果報告

一般個案輔導 共通性技術輔導

計畫代號：10510593

計畫名稱：以微機電製程製作光纖式壓力感測元件

計畫期間：105 年 05 月 27 日至 105 年 10 月 26 日

主辦單位：經濟部工業局

彙整單位：財團法人中衛發展中心

輔導單位：中華學校財團法人中華科技大學

受輔導業者：富智光電股份有限公司

中 華 民 國 1 0 5 年 1 0 月 2 6 日

中小企業即時技術輔導計畫

執行成果報告摘要表

計畫代號	10510593				
計畫名稱	以微機電製程製作光纖式壓力感測元件				
計畫主持人	李昆益	電話	0227851154	手機	0922615156
		傳真	0226534518	Email	kelvin119@gmail.com
計畫聯絡人	陳彥伶	電話	(02)2782-1862#151	手機	0981379603
		傳真	(02)2788-2607	Email	melodychen@cc.cust.edu.tw
計畫期間	105年05月27日至105年10月26日				
簽約金額	政府輔導經費(元)		業者自籌款(元)		合計(元)
	170,000		50,000		220,000

主要執行內容及成果摘要：

一、計畫執行內容摘要

- 1.針對計畫相關之光纖式壓力感測元件之開發，完成零組件選用及模擬驗證軟體分析。
- 2.針對計畫相關之光纖式壓力感測元件之開發，完成元件模擬，包括：適用壓力範圍 30~110kPa，靈敏度 0.133kPa。
- 3.完成期中執行成果報告及輔導紀錄表 1 份。
- 4.針對實體製作光纖式壓力感測元件，完成樣品試作一份，有實體產出驗收及照片 2 張呈現，實驗室量測報告預計達到預期技術指標含：適用壓力感測範圍: 30~110kPa，靈敏度: 0.152 kPa，產出物良率 80% 以上。
- 5.進行受輔導業者教育訓練，含軟體模擬及樣品實作技術，上課講義及簽到表各 1 份，時數 8 小時。軟體模擬及樣品實作達到元件適用壓力感測範圍: 30~110kPa，靈敏度: 0.152 kPa，產出物良率 80% 以上。
- 6.完成期末執行成果報告及輔導紀錄表2份。

二、計畫成果摘要

- 1.完成光纖式壓力感測元件樣品試作，有實體產出驗收及照片 2 張呈現，實驗室量測報告預計達到預期技術指標含：適用壓力感測範圍: 30~110kPa，靈敏度: 0.152 kPa，產出物良率 80% 以上。上述規格達成對解決商品化問題之具有實際功效。
- 2.完成受輔導業者教育訓練，含軟體模擬及樣品實作技術，上課講義及簽到表各1份，時數8小時。軟體模擬及樣品實作達到元件適用壓力感測範圍: 30~110kPa，靈敏度: 0.152 kPa，產出物良率80% 以上。

一、面臨問題

目前全球包括美國、德國、日本及中國大陸等大國都在積極推動「工業 4.0」，工業 4.0 是以智慧製造為主導的第四次工業革命，著重智慧自動化與機器人產業，未來智慧工廠之生產將會轉向人機協同合作模式。

臺灣在推動工業 4.0 方面，當務之急應優先發展智慧自動化與機器人產業環節中的關鍵元件—各類型工業級感測器 (Sensor) 與感測頭等相關先進技術。

光纖感測器具有抗電磁干擾、輕巧、靈敏度高等優勢，將資訊傳感與信號傳輸合二為一，便於構成分散式網路，易於實現遠距離監控和多點即時監測。從美國發展經驗看，2007 年美國光感測器市場規模為 2.35 億美元，此後以 30% 的年複合增長速度增長，2014 年已達到 16 億美元。

本計畫即是研發以微機電技術製作光纖式壓力感測元件。希望透過學界現有研發能量，提供企業短期程之技術輔導，協助業者排除急迫性之技術障礙，降低產品開發成本，提升附加價值與產品競爭力。

二、輔導內容及執行情形

預定輔導內容及執行方式	實際輔導內容及執行方式
<ol style="list-style-type: none">1. 零組件選用及模擬驗證軟體分析，列出實驗數據一份，包含：適用壓力範圍 30~110 kPa，靈敏度 0.133kPa2. 期中執行成果報告 完成期中執行成果報告 (含輔導紀錄表 1 份)3. 實體製作光纖式壓力感測元件樣品試作一份，有實體產出驗收及照片 2 張呈現，實驗室量測報告預計達到預期技術指標含：適用壓力感測範圍: 30~110 kPa，靈敏度: 1.5 mV/10 Pa，產出物良率 80% 以上4. 教育訓練：進行受輔導業者	<ol style="list-style-type: none">1. 針對計畫相關之光纖式壓力感測元件之開發，進行元件模擬，列出實驗數據一份，包含：適用壓力範圍 30~110 kPa，靈敏度 0.133kPa，如 pp.17 圖 12 所示。2. 期中執行成果報告 完成期中執行成果報告 (含輔導紀錄表 1 份)3. 完成實體製作光纖式壓力感測元件樣品試作，有實體產出驗收及照片呈現，實驗室量測報告預計達到預期技術指標含：適用壓力感測範圍: 30~110kPa，靈敏度: 0.152 kPa(在第二次輔導紀錄表中，經過與受輔導業者討論，為更符合業界常用技術指標及本計畫執行結果，將靈敏度之預計達到預期技術指標修改為 0.152kPa)，產出物良率 80% 以上(如 pp.25 附件 5 產品檢測報告所示)，如 pp.17 圖 12 所示元件量測結果及

<p>教育訓練，含軟體模擬及樣品實作技術，上課講義及簽到表各 1 份，時數 8 小時。軟體模擬及樣品實作達到元件適用適用壓力感測範圍：30~110kPa，靈敏度：1.5 mV/10 Pa，產出物良率 80% 以上本案可以驗收。</p> <p>5. 完成執行成果報告及輔導紀錄表 2 份。</p>	<p>pp.15，圖 9 所示。</p> <p>4. 完成進行受輔導業者教育訓練，含軟體模擬及樣品實作技術，上課講義及簽到表各 1 份，時數 8 小時(已提供受輔導業者用印修正簽到表之佐證資料如 pp.21 附件 3 所示)。軟體模擬及樣品實作達到元件適用適用壓力感測範圍：30~110kPa，靈敏度：0.152 kPa，產出物良率 80% 以上本案可以驗收，如附件 3、4 所示。</p> <p>5. 期末執行成果報告 完成期末執行成果報告 (含輔導紀錄表 2 份)</p>
---	--

1.計畫目的

目前全球包括美國、德國、日本及中國大陸等大國都在積極推動「工業 4.0」，工業 4.0 是以智慧製造為主導的第四次工業革命，集中控制變成分散式增強控制。工業 4.0 著重智慧自動化與機器人產業，未來智慧工廠之生產將會轉向人機協同合作模式。

臺灣在推動工業 4.0 方面，當務之急應優先發展智慧自動化與機器人產業環節中的關鍵元件—各類型工業級感測器 (Sensor) 與感測頭等相關先進技術。

由於具有不受電磁波干擾、光功率損耗小、重量輕、易佈放，且有一線多點量測等優點，使得光纖感測技術具有實用價值。加上光纖感測系統可用來測量各種物理量的微小變動，如聲音、溫度、壓力、磁場、振動等，尤其對於應變和溫度變化的量測。以布拉格光纖光柵(Fiber Bragg Grating, FBG)做成的感測頭，更具有高靈敏度及高動態範圍，因此成為近年各國重點發展之關鍵技術之一。2007 年美國光感測器市場規模為 2.35 億美元，此後以 30% 的年複合增長速度增長，2014 年已達到 16 億美元。

一般光纖布拉格光柵式感測器的型態大致可分成兩種類型：一種類型稱為標準型光纖布拉格光柵，其光柵的形成是在光纖的核心形成週期性的折射率變化。另一種稱為表面浮雕光纖布拉格光柵(Surface Relief Fiber Bragg Grating; SR-FBG)，其主要是在光纖核心的表面製作週期性的高低起伏光柵，以達到布拉格反射條件。

由於標準型光纖布拉格光柵其光柵結構是埋入光纖的披覆層，當作為感測元件時，其外在的物理或化學變化必須穿透披覆層而進入核心層，較不易感測，其應用也受到某種程度的侷限。例如：對於氣體及液體的變化

就無法感測。反觀表面浮雕光纖布拉格光柵，其光纖必須除去部分的披覆層，將光纖核心層週期結構製作在光纖核心層或靠近核心層的表面，較容易感測外在的物理及化學變化，較適合作為感測元件。

對於標準型布拉格光柵感測器的研製，國內外已有部分研究機構投入。然而，對於表面浮雕布拉格光柵感測元件，雖然具有潛力更適於感測運用，由於製程難度較高，目前較少國內外研究團隊投入。

本計畫即是研發以微機電技術製作表面浮雕布拉格光柵光纖式壓力感測元件。希望透過學界現有研發能量，提供企業短期程之技術輔導，協助業者排除急迫性之技術障礙，降低產品開發成本，提升附加價值與產品競爭力。

2.國內外有關本計畫之研究情況:

對於標準型光纖布拉格光柵壓力感測器的研製，國內外有相當多的研究機構投入。Raman團隊直接對裸光纖光柵施予不同壓力，因為光纖光柵的彈性模數較大，所以光纖光柵對於壓力反應靈敏度不佳。Zhang et al修改Raman的研究中靈敏度不佳的問題，利用聚合物的彈性係數較小的特性，將光纖光柵封裝於聚合物中，此方式可以提高光纖光柵對於應變的靈敏度。Xu et al. 發展出以球狀玻璃為外殼的壓力感測器，當玻璃球受壓時，該玻璃球內徑將隨著壓力的變化而改變，而黏貼於玻璃球直徑上的光纖光柵也會產生軸向應變。Zhang et al. 發展出以聚合物為外襯加以封裝之壓力感測器，此感測器有鋁質外殼，光柵穿過鋁質圓桶的中心，並以軟性聚合物將光柵固結於鋁質圓桶中，藉外界壓力對聚合物產生擠壓變形時，聚合物會往軸向變形，進而帶動光柵的變形。唯此種方式可能造成光纖光柵產生非均勻的應變，使得感測器的量測誤差較大。Liu et al. 利用特殊的聚合物封裝，發展出一壓力感測器，運用兩個光柵會發生不同的應變量，藉此得到壓力值。Heo et al. 發展出微型光纖光柵壓力感測器，其感測物件由一圓形板所構成，光纖光柵穿過於圓板中，當壓力由物件的上方施加時，光纖光柵會被拉伸。Zhao et al. 利用雙FBG 方式製作感測器，此感測器的感測原理為將兩條光纖光柵分別黏貼於懸臂樑上下兩相對應的位置，當懸臂樑變形時，兩個光纖光柵會分別承受拉應力與壓應力。國內各大專院校，如：台灣大學、清華大學、交通大學、成功大學等皆有研究實驗室進行相關的研究。

然而，目前各國研究機構對於表面浮雕光纖布拉格光柵壓力感測元件，由於製程難度較高，目前較少國內外研究團隊投入。因此，本計畫有助於我國在這個領域的產品開發與技術提昇。

參考文獻

1. Luis Rodriguez-Cobo; et al. (2015). "Embedded compaction pressure sensor based on Fiber Bragg Gratings". Measurement 68 257–261.
2. Pachava, VR; et al (2015). "Fiber Bragg grating-based hydraulic pressure sensor with enhanced resolution". OPTICAL ENGINEERING 54(9) 257–261.
3. Chiang, CC .; et al (2015). "Novel Optical Fiber Pressure Sensor Using

- Embedded Fiber Bragg Grating in Acrylonitrile Butadiene Styrene Structure ". *SENSORS AND MATERIALS* 27(8) 787-792
4. Alan D.Kersey, Michael A.Davis et al. "Fiber Grating Sensors," *J.Lightwave Technol.*, 15(8), p1442, 1997.
 5. Meltz, G.; et al. (1989). "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method". *Opt. Lett.* **14**: 823.
 6. Tyson L. Lowder, Kevin H. Smith, Benjamin L. Ipson, Aaron R. Hawkins, Richard H. Selfridge, and Stephen M. Schultz, High-Temperature Sensing Using Surface Relief Fiber Bragg Gratings, *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, VOL. 17, No. 9, 2005.
 7. K.O.Hill and Gerald Meltz, "Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview," *J.Lightwave Technol.*, 15(8), p.1263, 1997.
 8. Simpson, A. G. (2005). "Optical Fibre Sensors and Their Interrogation". Ph.D. Thesis, Aston University.
 9. Simpson, A. G.; Kalli, K.; Zhou, K.; Zhang, L.; Bennion, I. (2003). "An ideal method for the fabrication of temperature compensating IA-I strain sensors". *OFS16: postdeadline paper PD4*.
 10. Dong, L.; Archambault, J. L.; Reekie, L.; Russell, P. S. J.; Payne, D. N. (1993). "Single-Pulse Bragg Gratings Written During Fibre Drawing". *Electronics Letters* **29** (17): 1577-1578.
 11. Archambault, J. L.; Reekie, L.; Russell, P. S. J. (1993). "100-Percent Reflectivity Bragg Reflectors Produced in Optical Fibres By Single Excimer-Laser Pulses". *Electronics Letters* **29** (5): 453-455.
 12. Xie, W. X.; Niay, P.; Bernage, P.; Douay, M.; Bayon, J. F.; Georges, T.; Monerie, M.; Poumellec, B. (1993). "Experimental-Evidence of 2 Types of Photorefractive Effects Occurring During Photo inscriptions of Bragg Gratings Within Germanosilicate Fibres". *Optics Communications* **104** (1-3): 185-195.
 13. Niay, P.; Bernage, P.; Legoubin, S.; Douay, M.; Xie, W. X.; Bayon, J. F.; Georges, T.; Monerie, M.; Poumellec, B. (1994). "Behaviour of Spectral Transmissions of Bragg Gratings Written in Germania-Doped Fibres - Writing and Erasing Experiments Using Pulsed or CW UV Exposure". *Optics Communications* **113** (1-3): 176-192.
 14. Erdogan, Turan (August 1997). "Fiber Grating Spectra". *Journal of Lightwave Technology* **15** (8): 1277 – 1294. doi:10.1109/50.618322.
 15. Gang-Chih Lin, Likarn Wang, C. C. Yang, M. C. Shih, and T. J. Chuang, "Thermal Performance of Metal-Clad Fiber Bragg Grating Sensors" , *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol 10, No.3, March 1998.
 16. Kevin P. Chen, Ben Mcmillen, Michael Buric, Chuck Jewart, and Wei Xu, "Self-heated fiber Bragg grating sensors," *Appl. Phys. Lett.* 86, 143502, 2005.
 17. H. Nishihara, Masamitsu Haruna and Toshiaki Suhara, *Optical Integrated Circuits*, McGraw-Hill Company, Inc., 2001.
 18. Alan D.Kersey, Michael A.Davis et al. "Fiber Grating Sensors," *J.Lightwave Technol.*, 15(8), p1442, 1997.
 19. K.O.Hill and Gerald Meltz, "Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview," *J.Lightwave Technol.*, 15(8), p.1263, 1997.
 20. *Laser and Holography*, edited by P. C. Mehta and V. V. Rampal, World Scientific, Singapore, 1993.
 21. T. V.Galstyan, B.Saad, M.M.Denariez-Roberge, *J.Chem.Phys.*,107,22, p9319-9325 , 1997.
 22. Chung-Yen Chao, Cheng-Yen Chen, and Cgee-Wee Liu, "Direct writing of silicon gratings with highly coherent ultraviolet laser," Graduate Institute of Electro-Optical Engineering and Department of Electrical Engineering, National Taiwan University, Taipei 116, Taiwan.
 23. Schmahl. G., and D.Rudolph, "Holographic diffraction grating," In: *Progress in Optics*, E.Wolf, ed., North-Holland, Amsterdam, 14, pp.195, 1976.
 24. Nishihara. H., Y.Handa, T. Suhara, and J. Koyama, "Electron-beam directly written micro

- gratings for integrated optical circuits,” Proc. SPIE, 239:134, 1980.
25. Liu, X.; De La Rue, R.M.; Krauss, T.F.; Thomas, S.; Hickd, S.E.; Atchison, J.S.; “Electron Beam Production of Phase Masks for Direct Writing of Photo-Induced Gratings,” Lasers and Electro-optics Europe, 1996. CLEO/Europe., Conference on, 8-13 Sept. 1996.
26. Y. Cheng, T. Huang, C.-C. Chieng, “Thick-film lithography using laser write,” Microsystem Technologies 9 (2002) 17–22 _ Springer-Verlag, 2002.

3.計畫進行方法、步驟

(1) 元件結構

本計畫擬研發的元件結構如下圖所示：

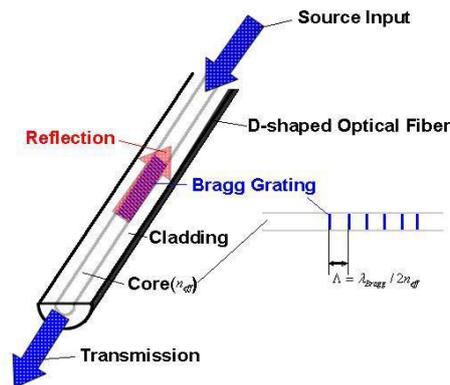


圖 1. 光纖光柵元件結構圖

當寬頻光源由光源輸入端(Source Input)輸入後，受到D形光纖上表面光柵的影響，達到布拉格反射條件後，特定波長的光就會反射，反射波長滿足以下的條件：

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

其中， n_{eff} 為光在D形光纖中傳導的等效折射率， Λ 為表面光柵的週期。因此，如果外界的物理或化學變化改變了等效折射率的值，就可以得到不同的反射光譜，由光譜中反射波長來判斷外界物理量的改變大小，具備感測功能。

整個計畫分成理論分析的部分、D形光纖製作的部分、光柵模仁製作及壓模製程，最後元件特性量測及應用。以下就各個部分說明：

(2) 理論分析

本計畫所採用的理論為模態耦合理論，如果光波導因為感光或是表面皺褶而造成介電常數在傳播方向形成週期性的變化，或是介電常數在z方向形成週期性的微擾，那模態和模態之間就會互相耦合，也就是說它們

之間就會有能量的交換，而這樣週期性的結構也被廣泛的應用在光纖光柵、光學濾波器、分佈反饋式(DFB)雷射等元件上。以下內容說明光纖光柵的耦合波理論之分析：

在未寫入光纖時，光纖中的光場模式可以表示為：

$$\frac{d}{d_z} a_+(z) = +i\beta a_+(z) \quad (2-1)$$

$$\frac{d}{d_z} a_-(z) = -i\beta a_-(z) \quad (2-2)$$

其中， $a_+(z)$ 、 $a_-(z)$ 分別表示沿 z 軸正方向和反方向傳輸的場， $\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}$ 表示光在波導中的傳輸常數。

當在光纖上面寫入光柵時，根據耦合模理論，光纖光柵中的光波可以用如下的耦合模態方程表示成：

$$\frac{d}{d_z} a_+(z) = +i\beta a_+(z) + \kappa e^{+ik_g z} a_-(z) \quad (3-1)$$

$$\frac{d}{d_z} a_-(z) = -i\beta a_-(z) + \kappa e^{-ik_g z} a_+(z) \quad (3-2)$$

(3-1)式中的第一項與(2-1)式相同，第二項是表示光柵寫入的影響， $k_g = 2\beta_0 = \frac{2\pi}{\Lambda}$ 是光纖光柵的傳播常數，其中 κ 為模間耦合係數，它表示每單位長度光柵對光的反射量，用來描述折射率變化所引起的微擾深度，當 κ 的數值比較小時，我們稱這種耦合為弱耦合，反之為強耦合。 κ 可以表示為：

$$\kappa = \frac{m\pi}{\lambda} \Delta n_{max} \quad (4)$$

其中， λ 是光波長， m 是一個常數。

精過對於上述耦合波方程式之推導，可以得到：

$$\delta = \beta - \frac{1}{2}k_g = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} = 2\pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \quad (5)$$

其中 δ 為失諧量，即表示對布拉條件的偏離。

最後布拉格波長的峰值反射率可經推導如下：

$$|r(\delta = 0)|^2 = \tanh^2(\kappa L) \quad (6)$$

根據上述的理論分析，可以得到我們所需要的光柵週期及反射量大小，也可以決定其反射量的頻寬。

波長漂移量與應力的關係

根據文獻，可知布拉格光纖光柵反射波長的偏移量 $\Delta\lambda_B$ 與所受壓力 ϵ 的變化量有關，把系統放在恆溫的狀態下，可得到其關係式如下：

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu[p_{12} + p_{11}]] \right) \epsilon \quad (7)$$

P_{11} 和 P_{12} 是光纖的應力光學係數， ν 是光纖的波松比(Possion's ratio)

(3) D 型光纖製程

本計畫所使用的 D 型光纖係使用單模光纖來加工製成，但是在利用研磨技術對單模光纖進行研磨時，必需確保整個研磨過程，只侷限在需要做出 D 型光纖的線段範圍內，因此我們先利用 UV 高分子材料在玻璃基板上製作凸型結構，再同樣利用 UV 高分子材料將單模光纖固定在凸型結構上，這樣便完成了光纖研磨元件，利用這擁有凸型結構的玻璃基板，我們可以把需要進行加工的光纖線段以突出的方式獨立出來。之後再將固定上光纖的光纖研磨元件以熔接的方式固定在研磨盤上，接著便拿到研磨機台上進行研磨，在研磨過程中，會將單模光纖的兩端分別接上 SLD(Super Luminescent Diode)寬頻光源及光功率量測器(optical power meter)，藉由這兩台儀器，可以很清楚的觀察到單模光纖的研磨進度。最後待研磨深度達到 D 型光纖標準之後，再以拋光絨布及氧化鋁粉進行拋光，結束後即可完成 D 型光纖的製作。

光纖研磨元件的製作方式如下：

步驟一：

先使用玻璃切刻機將玻璃片裁成我們所需要的大小，為確保玻璃表面上的髒汙及裁切玻璃時造成的細微玻璃碎片不會對之後的製程造成不利因素，在裁切出所需要的尺寸後，便會拿到超音波震洗機(DELTA, Model: DC400)進行震洗，清潔玻璃表面的任何雜質；最後使用去離子水把剩餘有

機溶劑去除乾淨，以氮氣槍吹去玻璃基板上殘留水珠後，送進烤箱去除玻璃基板上水氣，烤完後將玻璃基板取出並放置室溫下冷卻。

步驟二：

將清潔完畢的玻璃基板，覆蓋上事先準備的具有凹形槽的模型，之後在兩者之間的空隙內，以滴管吸取高分子材料，利用毛細現象的方式將高分子材料從側面滴入空隙內，再放置到 UV 燈具下進行曝光，曝光結束後再將凹形模具拿開便能夠得到具有凸型結構的玻璃基板，如下圖所示。

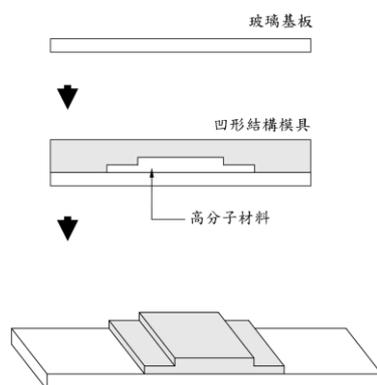


圖 2. 光纖研磨元件製作圖

步驟三：

裁剪兩條單模光纖，使用光纖剝線鉗將兩條光纖的中間處剝去其披覆層，之後將兩條單模光纖中間沒有披覆層的部分，對準玻璃基板上的凸型結構處並將兩條光纖作簡單的固定，接著用同樣的手段將高分子材料注入其中並且曝光使材料硬化，這樣光纖研磨元件就算完成了，如下圖所示。基板上的凸型結構會將單模光纖缺少披覆層的部分突出，同時也能在研磨時給予光纖足夠的保護使其可以承受研磨製程時可能造成的多餘損害。

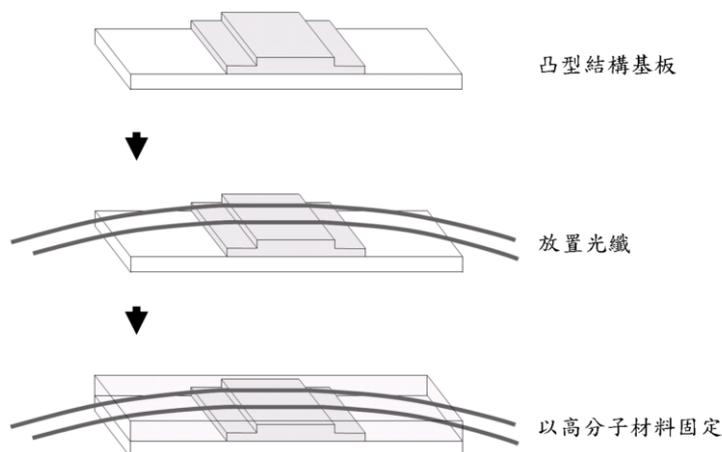


圖 3. D 型光纖元件製作圖

研磨製程

利用水砂紙對單模光纖的纖殼進行研磨，將表面持續磨損破壞直到幾乎接近纖芯為止，這是以研磨技術製作 D 型光纖的製程原理，其步驟如下：

步驟一：

一般研磨機的懸臂無法將研磨元件固定住，所以我們將事先準備的光纖研磨元件，固定在能夠與研磨機懸臂耦合的研磨盤上。先將研磨盤加熱至足以將臘融化的高溫，再將光纖研磨元件以蠟熔接在研磨盤的研磨面上。

步驟二：

在開始研磨之前，我們會將單模光纖的兩端以熔接機接上跳線，一端接上寬頻光源，另一端接上光功率計，這兩台儀器能夠讓我們一邊進行研磨，一邊觀察單模光纖的研磨深度，以確保不會有研磨深度不足或是研磨過頭造成纖芯破損的情形，如下圖所示。

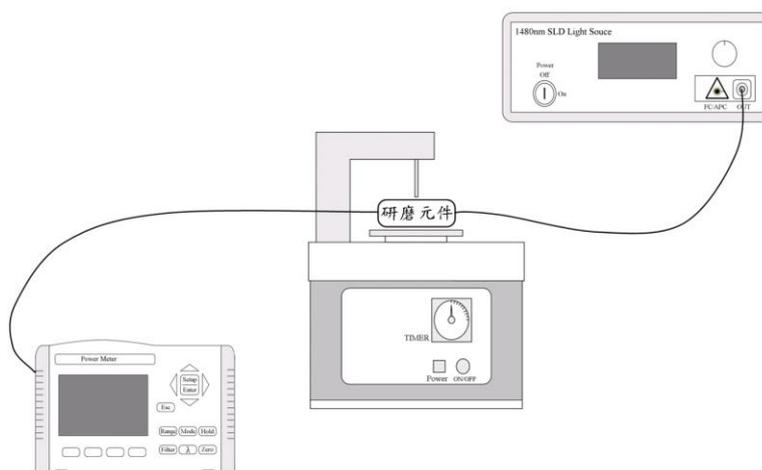


圖 4. D 型光纖元件研磨製程系統圖

步驟三：

使用砂紙進行研磨，為了將覆蓋住光纖的高分子材料給去除，持續研磨直到光功率計量測到的數值開始下降，代表光纖開始從高分子材料中露出並受到磨損，此時便會停下研磨機的運轉，以酒精稍微清潔研磨元件更後換更低系數的砂紙。

步驟四：

這個階段的研磨深度已經接觸到了光纖，所以我們使用更細緻的砂紙來對元件進行研磨，可以在不會破壞光纖的前提下持續研磨光纖的纖殼，使單模光纖的研磨深度靠近纖芯。

步驟五：

當研磨深度已逼近纖芯時，便會換上更細緻的砂紙，能夠對光纖的研磨面進行拋光，並且讓光纖的研磨深度更趨近於理想中的 D 型光纖，待光功率計的量測數值下降到預計的標準時便會停止砂紙的研磨製程。

步驟六：

此時 D 型光纖的雛形大致完成，接著研磨材料會從砂紙換成拋光絨布搭配氧化鋁拋光液，主要是對 D 型光纖的研磨面進行更進一步的拋光，而拋光過程分為三階段，每個階段都會使用不同研磨顆粒的氧化鋁粉所調製的水溶液，直到拋光結束後 D 型光纖便是完成了。

(4) 光柵模仁製作及壓模製程

其次以光學全像干涉技術與黃光微影製程技術製作出布拉格繞射光柵母模，或稱為布拉格表面光柵；其所應用到的光學架構及原理說明如下：

首先探討研究中所應用的光學架構與原理：“全像干涉原理”，此利用兩束雷射光束干涉製作光柵之方法亦稱為“全像術干涉微影(Holographic Interference Lithography)”，其傳統全像術干涉架構如下圖所示。

實驗架構中所使用的光源為氦鎘雷射(Helium-Cadmium Laser；He-Cd Laser)。首先，雷射光束經由分光鏡後分成兩束光強度相同的平面波，兩平面波分別再經由反射鏡後交會於一平面上，此時在此平面上由於兩束光的干涉而形成繞射光柵圖案，由於本實驗之系統架構其干涉面(Sample Holder)與反射鏡B並非垂直，所以兩束光入射干涉面之夾角並非相同，所以兩束平面波入射此一平面之角度分別為 θ_1 與 θ_2 ，所以繞射光柵週期與入射光角度之關係無法近似，需參考下面式子來推算兩者間之關係：

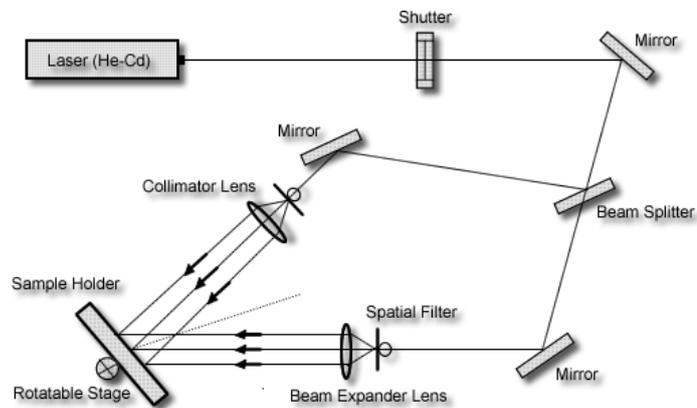


圖 5. 全像術干涉架構圖

$$T = \frac{\lambda}{\sin\theta_1 + \sin\theta_2}$$

其中T為光柵週期， θ_1 、 θ_2 分別為光束入射平面之角度， λ 為氦鎘雷射波長為325nm。

光柵母模微影製程如下：

本計畫利用全像術干涉技術與黃光微影製程技術製作布拉格繞射光柵母模以翻置軟模，其製作流程參考如圖所示：

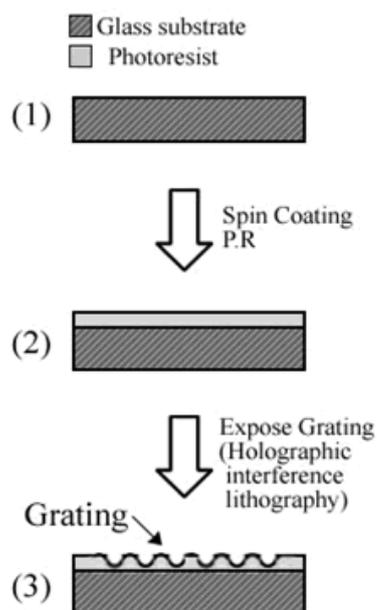


圖 6. 光柵母模微影製程圖

布拉格光柵模型翻印

上述布拉格光柵還需要翻印到軟模上面，才能夠和 D 型光纖組裝成具表面浮雕光柵，實現以微機電製程製作光纖式壓力感測元件。本計畫選擇 H-PDMS(Hard-Polydimethylsiloxane)作為光柵材料，另外還會在上面追加製作一層聚二甲基矽氧烷(PDMS)，與 H-PDMS 結合成布拉格光柵，其製程如下：

步驟一：上脫模劑

將帶有布拉格光柵的玻璃片放置在烤盤上進行加熱，在玻璃片附近滴上脫模劑，使脫模劑揮發且均勻的散布在光柵上，避免翻印材料與光柵結合過於緊密，在取模時造成光柵的撕毀損壞。

步驟二：製作 H-PDMS 模型

H-PDMS 是一種透明無色的彈性材料，材質與 PDMS 相比之下更脆，但也因此擁有比 PDMS 更好的硬度，用來作為光柵結構的材料。將 H-PDMS 滴在光柵上以流動的方式覆蓋整個光柵結構，之後送到烤箱，H-PDMS 會因此而固化。

步驟三：製作 PDMS 模仁

PDMS 為無色無味無毒的透明彈性材料，與 H-PDMS 相比之下更加強韌，而且擁有更優異的柔軟性及彈性，能夠給予 H-PDMS 適當的保護，同時也彌補了 H-PDMS 易脆的缺點。將 PDMS 放置在真空球內進行空氣抽離，之後倒在已經固化的 H-PDMS 模型上進行固化，結束後便能獲得由 PDMS 覆蓋住 H-PDMS 的雙層結構光柵模型，如下圖所示。

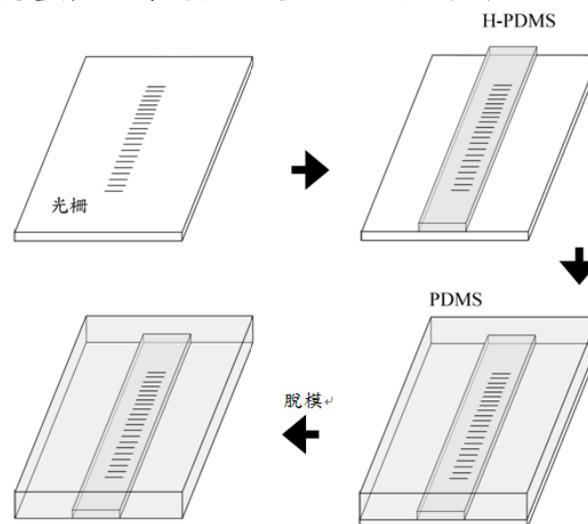


圖 7. PDMS 光柵製程圖

(5)光纖式壓力感測元件製作

光纖式壓力感測器是以圓柱型中空鋼材為外殼，內部含有一光纖光柵與作為感測元件的金屬薄片組成，如圖8所示感測器的構造圖，此感測器的設計原理採用等週期式光纖光柵波長與壓力間之關係來設計。含有光纖光柵的光纖之一端固定於壓力計下方，此部分視為固定不動點，而另一端則黏著於一彈性金屬膜上，當壓力計內部壓力改變時金屬膜隨之變形，因此光纖光柵所感受的應變也隨之變化。在彈性金屬膜的線彈性範圍內，此設計的光纖光柵波長做等週期式之變化，因此光纖光柵波峰值與壓力有一線性關係。

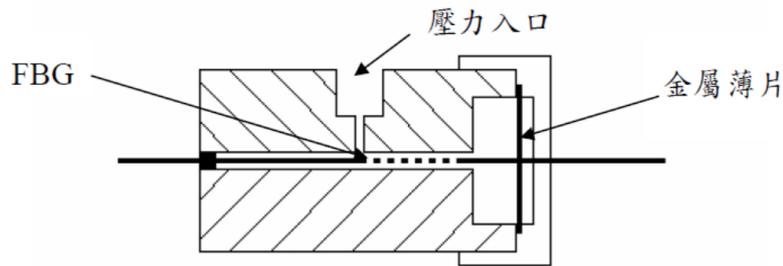


圖 8. 光纖式壓力感測器構造圖

光纖式壓力感測元件的製作流程如下：

- (a) 先以機械加工製作感測器鋼製封裝外殼，外殼封閉端中心鑽有3mm 的小孔，另一端為開口設計；在外殼側邊鑽一1/8NPT孔，用以安裝管線接頭連接加壓裝置。
- (b) 以光柵中心部分為基準，把光柵兩端各 25mm 的光纖外襯剝除，再將光纖穿過鋼製外殼，並置於預拉裝置上，利用此裝置把光纖光柵微微拉緊，使得光纖能夠位於外殼小孔的中心，在小孔內注膠約略4mm 左右，將整組裝置放置在烤盤上，以1300c 加熱1 小時，接著劑開始固化，自此完成感測器的固定端。
- (c) 接著處理作為感測元件的金屬薄片，金屬薄片已於事先在圓心位置鑽直徑1mm 的小孔，使用前先把金屬薄片用丙酮擦拭乾淨；在製作光纖式壓力感測元件的感測端部分，需要將光纖有一1nm 的預拉量，不然會因為光纖仍在做彎曲的變形，產生量測上得盲區，而黏著金屬薄片與光纖的黏著劑power3077，流動性較高所以無法採用預拉裝置的方式，因此使用直立感測元件的方式來施作，首先將完成固定端的感測元件直立於光學桌上，

把金屬薄片置於圓筒的開口端上端，把光纖繞過一PCV管，利用重力的方式來拉伸光纖，待光柵讀數穩定後，開始上膠並盡量使膠的範圍在直徑為5mm 的小圓內，再以催化劑塗抹於黏貼範圍內，約1小時固化完成。

(d)將感測元件的上蓋鎖上，把光纖熔上接頭，光纖式壓力感測元件製作完成，如圖9所示。

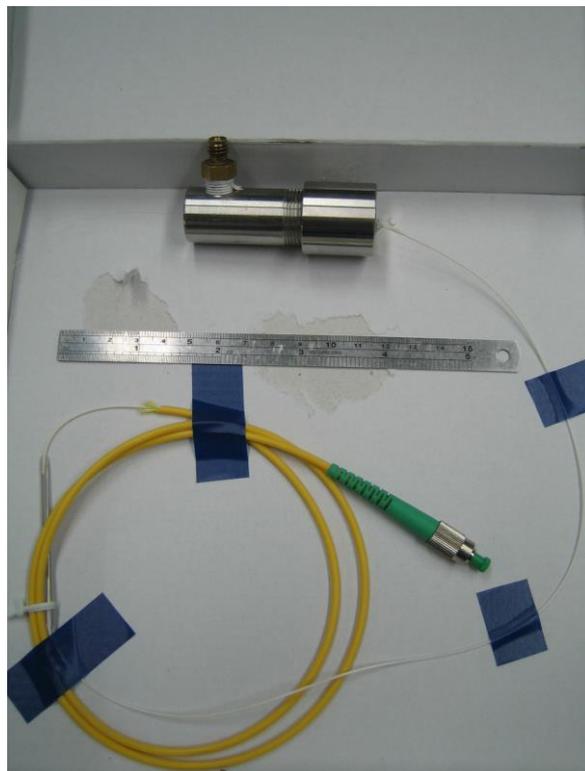


圖 9. 光纖式壓力感測元件

光纖式壓力感測元件的特性量測：

為驗證光纖式壓力感測元件在壓力與光柵波長變動量的關係，實驗配置圖如圖 10 所示，光纖式壓力感測元件被附著至一 T 型橡膠管，一 T 型管出口連接至電子式壓力感測器及資料擷取系統以記錄壓力改變量，T 型管另一出口則連接至壓力增量系統。將可調式寬頻超高亮度雷射光源(SLD)的輸出端接上光循環器的 Port1，Port2 則是接上光纖式壓力感測元件，Port3 則是接上光頻譜分析儀(OSA)。藉由分析符合布拉格光柵條件的反射光，可獲得一跟所施壓力有關之關係函式。實驗開始後先記錄初始讀數，之後增加壓力，待光纖光柵讀數穩定後紀錄讀數，再增加其壓力值，待壓力施加達容許變形極限後，再逐步返回壓力值。

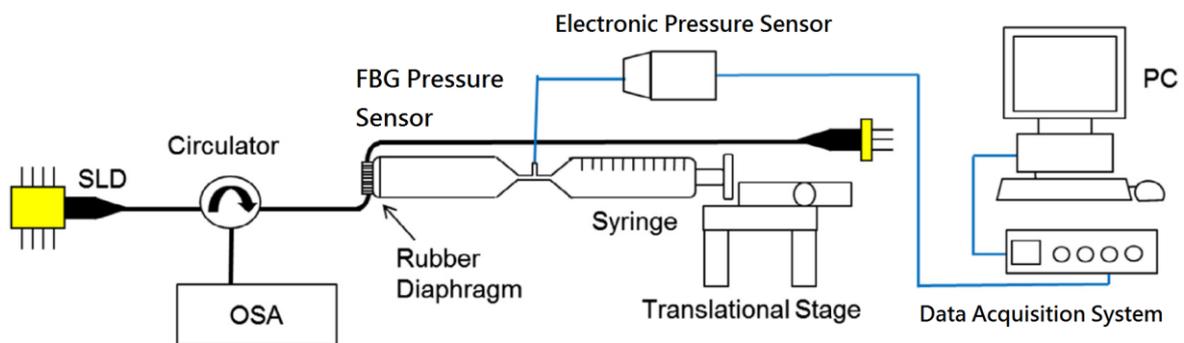


圖10.光纖式壓力感測元件特性量測系統

波長漂移量與應力的關係

根據文獻，可知布拉格光纖光柵反射波長的偏移量 $\Delta\lambda_B$ 與所受壓力 ϵ 的變化量有關，把系統放在恆溫的狀態下，可得到其關係式如下：

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu[p_{12} + p_{11}]] \right) \epsilon \quad (7)$$

P_{11} 和 P_{12} 是光纖的應力光學係數， ν 是光纖的波松比(Possion's ratio)

量測採用光柵的中心波長飄移，如圖11所示為量測光柵中心波長的飄移：

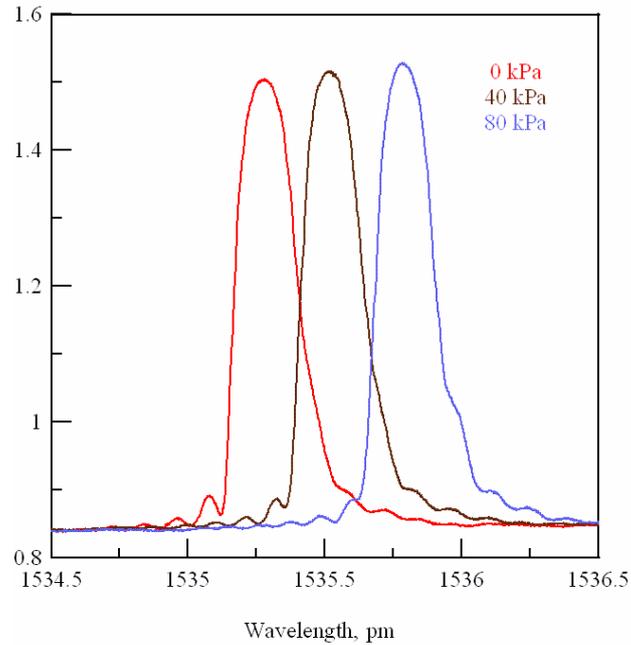


圖11. 光纖式壓力感測元件中心波長飄移

圖12為光纖式壓力感測元件特性量測實驗結果與理論計算的結果比較，實線由理論計算所得，而圓形符號部分則為實際量測所得，由圖中可發現，理論所算出來的靈敏度約為0.133kPa，實驗所量測的靈敏度0.152kPa。實驗值略大於理論值，造成這種情形發生的原因可能為，黏著劑的影響，感測器所採用的黏著劑雖然強度很高，不易發生變形，但是在實際加壓情況下可能會產生一些微小的變形，使得光纖光柵的變形量大於僅考慮圓板的變形的理論值。

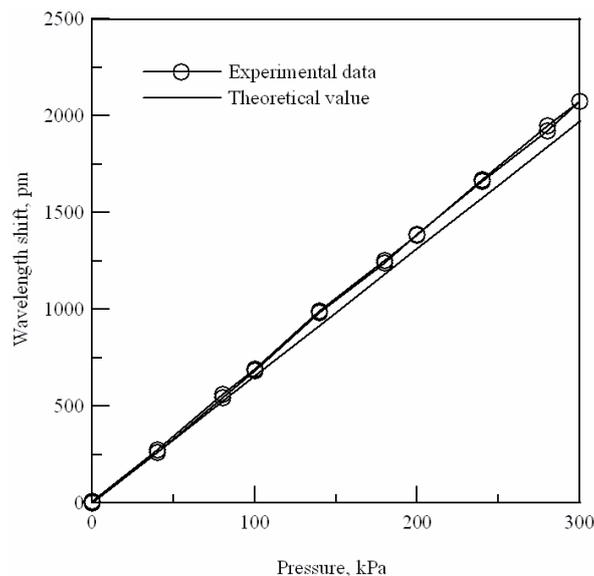


圖12. 光纖式壓力感測元件特性量測實驗值與理論值比較圖

三、執行成果及效益

項次	改善前	改善後
1	無產值	增加產值，營業額增加 2000 萬元
2	開發成本高	降低成本，減少開發費用 150 萬元 (縮短開發時間 1 年，節省 2 位開發人事成本 120 萬元，耗材費用 30 萬元)
3	無投資	增加投資，增加員工 3 人

四、結論

本計畫針對光纖式壓力感測元件之開發，進行進行元件模擬，列出實驗數據一份，包含：適用壓力範圍 30~110 kPa，靈敏度 0.133kPa。本計畫結合全像干涉與黃光微影製程技術製作布拉格繞射光柵母模以翻製軟模元件，進而完成光纖式壓力感測元件製作。

經由光纖式壓力感測元件之特性模擬及實作光譜量測圖，可理論算出元件適用壓力量測範圍 30~110 kPa，靈敏度約為 0.133kPa，實驗所量測的靈敏度 0.152kPa。實驗室量測報告達到預期技術指標。上述規格達成對解決商品化問題之具有實際功效。

執行本輔導計畫後，廠商可增加產值，減少開發成本，增加投資，增聘員工，提昇產業競爭力，培育相關技術人才並解決產業需求人力。

五、附件

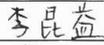
附件 1、輔導紀錄表一

**經濟部工業局 105 年度
中小企業即時技術輔導計畫
輔導紀錄表**

輔導單位：中華學校財團法人中華科技大學

計畫代號：10510593

計畫名稱：以微機電製程製作光纖式壓力感測元件

訪談日期	105 年 07 月 19 日	
訪談地點	富智光電股份有限公司	
訪談地址	臺北市信義區忠孝東路 5 段 669 號 2 樓之 2	
參與人員	輔導單位	李昆益 
	受輔導業者	李政哲 
	其他單位	
輔導重點	<p>1. 針對計畫相關之光纖式壓力感測元件之開發，進行零組件選用及模擬驗證軟體分析，元件模擬項目包括：適用壓力範圍，靈敏度。上述規格達成對解決商品化問題之具有實際功效。</p> <p>2. 針對計畫相關之光纖式壓力感測元件之開發，根據文獻，可知布拉格光纖光柵反射波長的偏移量 $\Delta\lambda_B$ 與所受壓力 ϵ 的變化量有關，把系統放在恆溫的狀態下，可得到其關係式如下：</p> $\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{12} + p_{11})] \right) \epsilon$ <p>P_{11} 和 P_{12} 是光纖的應力光學係數，ν 是光纖的波松比(Possion's ratio)。</p> <p>經由元件模擬驗證軟體分析，可得出元件適用壓力感測範圍：30~110 kPa，靈敏度：1.5 mV/10 Pa。</p> <p>3. 完成期中執行成果報告及輔導紀錄表</p>	
後續待辦	<p>1. 實體製作光纖式壓力感測元件</p> <p>2. 進行受輔導業者教育訓練，含軟體模擬及樣品實作技術，上課講義及簽到表。</p> <p>3. 完成執行成果報告(含輔導紀錄表 2 份)</p>	
附件		

註：1.份數須與查核點次數相符。

2.參與人員需親筆簽名。

附件 2、輔導紀錄表二

經濟部工業局 105 年度 中小企業即時技術輔導計畫 輔導紀錄表

輔導單位：中華學校財團法人中華科技大學

計畫代號：10510593

計畫名稱：以微機電製程製作光纖式壓力感測元件

訪談日期	105 年 9 月 30 日	
訪談地點	富智光電股份有限公司	
訪談地址	台北市信義區忠孝東路 5 段 669 號 2 樓之 2	
參與人員	輔導單位	李昆益 李昆益
	受輔導業者	李政哲 李政哲
	其他單位	
輔導重點	<p>1. 針對計畫相關之光纖式壓力感測元件之開發，進行元件樣品試作及元件特性量測，包含下列數據量測：適用壓力範圍，元件靈敏度。上述規格達成對解決商品化問題之具有實際功效。</p> <p>2. 計畫書中查核工作項目及執行進度之項次 3：樣品試作一份，實驗室量測報告預計達到預期技術指標含：適用壓力感測範圍：30~110 kPa，靈敏度：1.5 mV/10 Pa。經過與受輔導業者討論，為更符合業界常用技術指標及本計畫執行結果，將靈敏度之預計達到預期技術指標修改為 0.152kPa。</p> <p>3. 本計畫結合全像干涉與黃光微影製程技術製作布拉格繞射光柵母模以翻製軟模元件，進而完成光纖式壓力感測元件製作。經由光纖式壓力感測元件之特性模擬及實作光譜量測圖，可理論算出元件適用壓力量測範圍 30~110 kPa，靈敏度約為 0.133kPa，實驗所量測的靈敏度 0.152kPa。實驗室量測報告達到預期技術指標。上述規格達成對解決商品化問題之具有實際功效。</p>	
後續待辦	<p>1. 完成受輔導業者教育訓練，含軟體模擬及樣品實作技術，上課講義及簽到表各 1 份，時數 8 小時。軟體模擬及樣品實作達到元件適用壓力感測範圍：30~110kPa，靈敏度：0.152 kPa，產出物良率 80%以上。</p> <p>2. 完成執行成果報告</p>	
附件		

註：1.份數須與查核點次數相符。

附件 3、教育訓練簽到表

經濟部工業局 105 年度中小企業即時技術輔導計畫

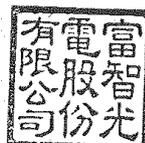
以微機電製程製作光纖式壓力感測元件

元件模擬及實體製作介紹教育訓練

簽到表

時間	105.10.4	地點	富智光電 公司會議室
出席人員	出席名單	簽名	
	李政哲	李政哲	
	鄧仲豪	鄧仲豪	
	王致惟	王致惟	
	李金儒	李金儒	
	蔡昌得	蔡昌得	
	李昆益	李昆益	

教育訓練時間: 105.10.4 09:00-18:00



附件 4、教育訓練講義

附件 5、

產品檢測報告

產品名稱		光纖式壓力感測元件															
生產日期		105.10.4															
檢測日期		105.10.4															
產品編號		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
檢驗項目	合格標準																
壓力感測範圍	30~110kPa	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格
靈敏度	<0.152 kPa	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格
累計合格產品數量		15															
良品率		100%															

經濟部工業局 105 年度 中小企業即時技術輔導計畫 個案輔導計畫簡介

一、 計畫名稱：以微機電製程製作光纖式壓力感測元件

二、 政府輔導經費及業者自籌款

政府輔導經費 170,000 元，業者自籌款 50,000 元

三、 受輔導業者名稱：富智光電股份有限公司

四、 受輔導業者簡介：

富智光電股份有限公司成立於民國 89 年，主要提供光電元件及光電系統之產品服務，包含光電檢測設備設計開發。近幾年，順應市場快速變化之需求，公司研發重點在於將半導體及微機電製程技術導入光機電元件之設計製造，以實現光機電元件降低生產成本的目標。提供客製化的產品及服務，提供滿足客戶需求的產品及服務。

五、 受輔導業者面臨問題：

臺灣在推動工業 4.0 方面，當務之急應優先發展智慧自動化與機器人產業環節中的關鍵元件—各類型工業級感測器 (Sensor) 與感測頭等相關先進技術。光纖感測器具有抗電磁干擾、輕巧、靈敏度高等優勢，將資訊傳感與信號傳輸合二為一，便於構成分散式網路，易於實現遠距離監控和多點即時監測。富智光電公司希望透過學界現有研發能量，提供企業短期程之技術輔導，協助業者排除急迫性之技術障礙，降低產品開發成本，提升附加價值與產品競爭力。

六、 輔導內容：

本計畫針對光纖式壓力感測元件之開發，進行進行元件模擬，列出實驗數據一份，包含：適用壓力範圍 30~110 kPa，靈敏度 0.133kPa。本計畫結合全像干涉與黃光微影製程技術製作布拉格繞射光柵母模以翻製軟模元件，進而完成光纖式壓力感測元件製作。

經由光纖式壓力感測元件之特性模擬及實作光譜量測圖，可理論算出元件適用壓力量測範圍 30~110 kPa，靈敏度約為 0.133kPa，實驗所量測的

靈敏度 0.152kPa。實驗室量測報告達到預期技術指標。上述規格達成對解決商品化問題之具有實際功效。

七、 成果及衍生效益：

執行本輔導計畫後，廠商可增加產值，減少開發成本，增加投資，增聘員工，提昇產業競爭力，培育相關技術人才並解決產業需求人力。

八、 個案輔導人員聯絡資訊：

姓名：李昆益

電話：0227852254 ext237

行動電話：0922615156

E-mail：kelvin119@gmail.com