

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

遠紅外光之光子晶體分光元件的設計與製作

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2215-E-216-003-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：中華大學電機工程學系

計畫主持人：鄭劭家

共同主持人：陳學禮

計畫參與人員：陳仲耀

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 30 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告

## 遠紅外光之光子晶體分光元件的設計與製作

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 93-2215-E-216-003

執行期間：93年8月1日至94年7月31日

計畫主持人：鄭劭家

共同主持人：陳學禮

計畫參與人員：陳仲耀

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、  
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：中華大學

中華民國 94 年 10 月 31 日

中文摘要：

本計畫完成了光子晶體的設計與製作，並建立其所適用的量測系統，可提供的波長範圍由 9.2  $\mu\text{m}$  至 10.62  $\mu\text{m}$ 。計畫中光子晶體的材料為矽晶片，其製程較為普遍，線寬上的限制以 1  $\mu\text{m}$  為主。運用平面波展開法(Plane Wave Expansion Method)進行發生能隙現象的光子晶體設計，發現「三角形排列」為最佳的排列方式，並討論如何選擇尺寸與避免製程誤差。光子晶體的蝕刻深度到達 46  $\mu\text{m}$ ，此為製程上最大的困難。其考量在於以足夠的深度形成足夠的通過截面，使通過的雷射功率足以被檢測。能隙與光子晶體排數的關係，藉由計畫中建立的量測系統進行穿透率上的討論。其實驗結果與理論結果相符，驗證了本計畫在各項工作上的結果。

關鍵詞：光子晶體、CO<sub>2</sub> 雷射

英文摘要：

The design and fabrication of photonic crystal has been carried out in this project in “Plane Wave Expansion Method”. One measurement system with tunable CO<sub>2</sub> Laser has been established in range from 9.2  $\mu\text{m}$  to 10.6  $\mu\text{m}$ . The material of the photonic crystal is silicon, which with mature process support for 1  $\mu\text{m}$  line width limit. The “triangular” arrangement is the best method for presenting the band gap phenomena in this work. The choice of the photonic crystal structure which related to the fabrication error has been discussed. Most difficulty in fabrication is the deep etching to 46  $\mu\text{m}$  in considering for larger cross-section for stronger detected signal. The transmittance of the photonic crystal with various row numbers has been measured, the experimental result matches well with the theoretical result. All jobs in this work were validated by this accomplishment.

Keywords: photonic crystal, CO<sub>2</sub> laser

## 一、前言：[1-14]

如液晶顯示器、發光二極體、光纖通訊等光電元件的應用上，通常以光學介質本身的偏光性、電激發光、反射能力等特性來改變光的行為。大部分的這些特性，是光學介質在原子分子尺度內的結構來達成。但在近年來的研究發現，電磁波在物質中的電磁特性，也可以藉由在波長尺度上（10 nm ~ 10  $\mu$ m）的特定物理結構來加以改變。在 1987 年，E. Yablonovitch 和 S. John 首先指出，如果我們在電磁波中置入具有其波長尺度的週期排列介質，則相似於電子的物質波（De-Broglie wave）與原子晶格大小的關係。電磁波在此巨觀排列的行為，將會類似電子而在晶體中被「週期排列的空間結構」與「介質的介電常數」來控制，而不需要改變物質的原子分子結構。因此，我們可以依照我們的需求，並在電磁波的波長尺度下設計並製造出光波尺度下的人工晶體，即為「光子晶體」（photonic crystal）。相對於電子在半導體晶體的特性，我們也可以在這種光子晶體中製造出光子的能隙（photonic band-gap）。使得特定波長的光子無法在此晶體中傳播，形成一種光子的絕緣體。這種光子晶體在光波導元件的製造上有很大的應用空間，因此被視為是相當嶄新且重要的新一代光電材料。目前在國外有超過 500 多個研發單位投入在此種晶體的理論與製造上。其中比較有名的如美國麻省理工學院 Dr. John d. Joannopoulos 的實驗室、日本 Kyoto 大學 Dr. S. Noda 的實驗室等。

在光電子元件中，常需要藉由光學波導將光束限制在一狹小區域之內以利於調變。但一般傳統的光學波導，是利用折射率較高的區域與折射率較低的介質之間的全反射現象，將光波侷限在高折射率介質中。但是光束在這類的波導中傳遞必定會受到折射率的影響，使得光波的能量傳遞、色散效應、可彎曲程度等皆受到限制。相對於全反射式的波導，光波在具有光子能隙的光子晶體結構中，光場將無法傳遞出去。如此一來，在光子晶體中可以製造特定的瑕疵線，使電磁波僅能在此瑕疵線上傳播，並達成光學導波的效果。若在此能隙結構中製造一通道，則光波將被強迫在此通道中前進。有別於傳統之光學波導必須在高折射率的介質中傳播，這種波導可以在折射率極低（如空氣  $n = 1.00003$ ）的環境下傳播，也可以在 90°大轉彎的光學波導中轉彎，而僅有非常少的能量損失。此種在光子能隙中的新導波行為有很多很重要的應用，尤其在以光子晶體取代光纖作為光通訊通路上與積體光學器件上，更是具有非常大的商業價值。

## 二、研究目的：

運用自製的 CO<sub>2</sub> 雷射所提供的波長，進行光子晶體應用於波導的各項研究。藉由入射光的波長較長，對於光子晶體的製作的尺寸可以有較大的空間。不僅對於製作精度上比較可以要求，光子晶體結構上的尺寸大小也可以有更多的變化。不同形狀的週期架構，也有嘗試的機會。主要的研究方向，將對於能隙因為光子晶體波導結構改變的影響進行討論。包括光子晶體要達到能隙所需要的「週期層數」等等，皆可以藉由此一計畫進行深入的探討。對於往後的模擬工作，也可以提供更多資訊。對於波長在數微米（ $\mu$ m）的 Terahertz Radiation 的應用上，目前以醫學影像、太空、化學與生物訊號感測等為主。這個計畫的研究可以作為一個先鋒，對往後在此波段的光訊號產生、傳遞與解讀上，應可提供部分參考價值。

## 三、文獻探討：

在適用波長為 10.6  $\mu$ m 的光子晶體波導元件上，目前的應用研究也很蓬勃。主要

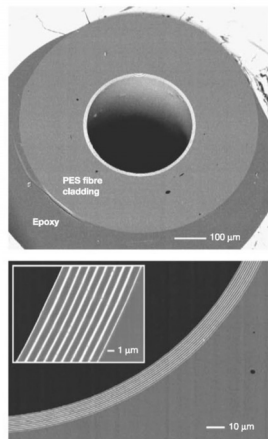


Figure 1 Cross-sectional SEM micrographs at various magnifications of hollow cylindrical multilayer fibre mounted in epoxy. The hollow core appears black, the PES layers and cladding grey, and the  $As_2Se_3$  layers bright white. This fibre has a fundamental photonic bandgap at a wavelength of  $\sim 3.55 \mu\text{m}$ .

圖 3-1、中空的  $CO_2$  雷射光子晶體光纖。  
[15]

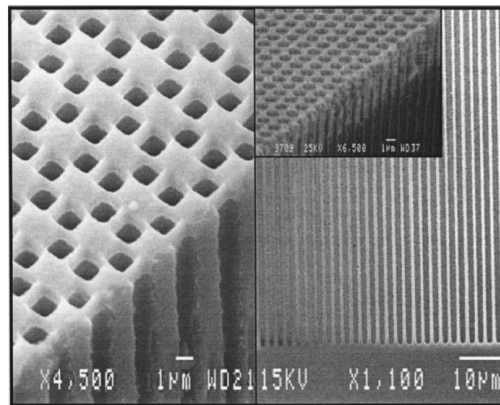


Fig. 2. Micrograph of etched macroporous silicon with a distance between two cylinder axes of  $2 \mu\text{m}$ . Left: hexagonal lattice with sawed interface. Right: cleaved interface of a triangular lattice.

圖 2-3、Macroporous Silicon 之二維光子晶體。  
[17]

的原因是這個波長，並沒有適合的材料可作為光纖。因此這方面的研究多集中於「光子晶體光纖」(Photonic Crystal Fiber)，以週期性的管狀結構將  $10.6 \mu\text{m}$  的光波侷限在光纖中央的缺陷結構中，以達到光波傳遞的目的。2003 年，Rave [15] 等於 Applied Physics 發表了以此構想製作的紅外光光子晶體光纖。如圖 3-1，是其中利用這種週期性結構造成能隙，使  $10.6 \mu\text{m}$  之光波可以被侷限在光纖當中。

對於  $10.6 \mu\text{m}$  的遠紅外光波段一直到  $1.3\sim 1.5 \mu\text{m}$  的通訊波長範圍，近幾年來也有光子晶體的相關研究發表。在 2002 年 M.U.Pralle [16] 發表於 Applied Physics Letter 的文章，以波長由  $1 \mu\text{m}$  至  $14 \mu\text{m}$  的入射光垂直入射到二維之光子晶體，並討論其反射率。其結果顯示這樣的二維光子晶體，其利用「矽-空氣」所架構的二維光子晶體，其對於波長為  $10.6 \mu\text{m}$  的反射率可達到 90%，應用於紅外發光元件具有獨特的潛力。較早幾年，於 1999 年 S.Rowson [17] 利用 Silicon 製作二維的細孔型光子晶體，探討二維光子晶體在不同波長與極化方向的入射光照下的反射現象。S.Rowson 等利用濕蝕刻的方式在方向為  $\langle 100 \rangle$  之 N 型矽晶片上製作深度大於  $100 \mu\text{m}$  的孔洞，其洞寬約為  $1 \mu\text{m}$ 、週期約為  $2 \mu\text{m}$ 。其排列方式為「六方排列」(hexagonal lattice) 與「三角排列」(triangular lattice) 兩種，如圖 3-2 所示。對於能隙的寬度來說，實驗結果以 triangular 週期排列的光子晶體，會有波長範圍較寬的能隙。而以不同偏極方向的入射光入射至光子晶體，其反射率也隨之改變，如圖 3-3 所示。

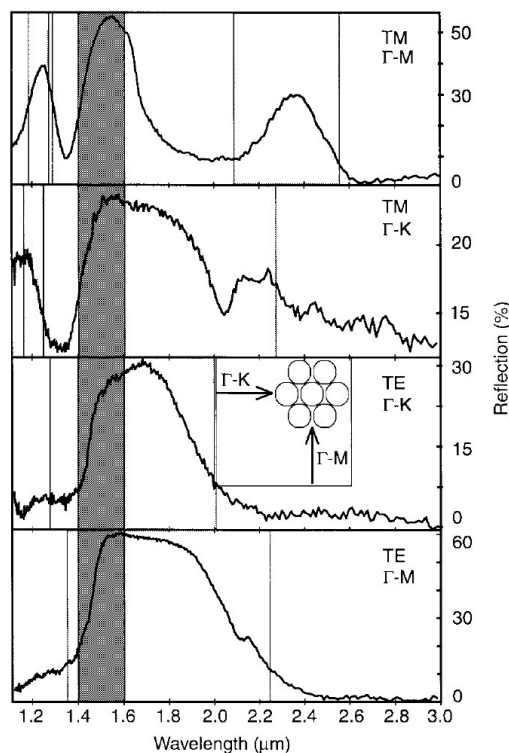


Fig. 6. Reflection spectra measured for the crystal with a  $680 \text{ nm}$  period. From top to bottom: the spectra for TM polarization  $\Gamma\text{-M}$  and  $\Gamma\text{-K}$  propagation directions then for TE polarization  $\Gamma\text{-K}$  and  $\Gamma\text{-M}$  propagation directions. The propagation directions are reminded in the insert. The gray bands represent the position of the numerically calculated forbidden bands. The darker bar presents the numerically calculated position of the complete PBG.

圖 3-3、二維光子晶體隨入射光之偏極方向與入射方向改變下的反射光譜。  
[17]

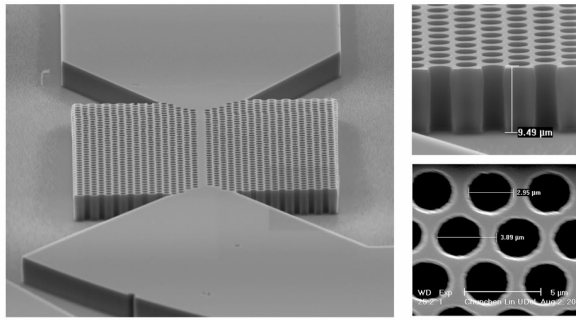


Fig. 1. (Left) SEM picture of PhC waveguide, the total length of it is 120 $\mu$ m, and the width of it is 100 $\mu$ m. (right) SEM pictures of side view and top view of the PhC Waveguide, the thickness of it is 9.49  $\mu$ m, the lattice constant  $a = 3.89 \mu$ m, and the hole diameter is 2.95  $\mu$ m.

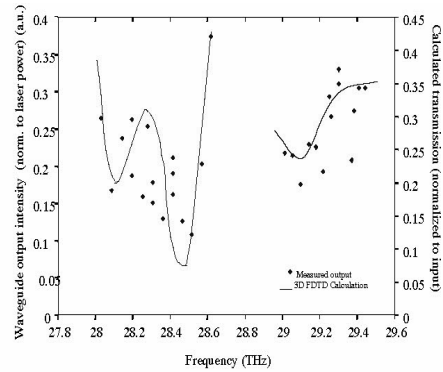


Fig. 6. 3D-FDTD calculated and experimental measured transmittance spectra of 2D-PhC waveguide.

(a)

(b)

圖 3-4、(a)二維光子晶體波導的 SEM 照片；(b)量測與理論的結果。[18]

2004 年 Chunchen Lin 等人之「Wavelength scale terahertz two-dimensional photonic crystal waveguides」[18]將光子晶體應用在遠紅外光範圍波導方面的研究，以 SOI 晶片製作適用於 CO<sub>2</sub> 雷射波長範圍的波導，進而討論此波導的導光能力。其波導採用類似 S.Rowson 等之「空氣管(air hole)一砂」的結構，以 triangular 的排列組成，空氣管的深度約為 9  $\mu$ m、內徑約為 2.95  $\mu$ m，週期約為 3.89  $\mu$ m，如圖 3-4(a)所示。其光子晶體的蝕刻製程，是採用 RIE (reactive-ion etching) 的方式。其量測方法，是以一個聚焦透鏡將光子晶體波導後方的雷射光集中到測光的設備。其量測結果如圖 3-4(b)所示，在 CO<sub>2</sub> 雷射可以調整的波長範圍內 (28 THz ~ 30 THz)，其導光效率約在為 10% ~ 40%。Chunchen Lin 的量測設備簡圖，如圖 3-5 所示。

理論計算的結果與實驗相較之下，在目前的文獻之中都還尚有誤差。因此，在不同結構之下的光子晶體行為，仍有很大的研究空間。例如，對於二維光子晶體的「空氣管」(air-hole) 深度應為多少的問題，Brian [19]等在 1998 年的文章中提出討論。其針對「空氣管」深度討論的方向分為「只蝕刻至 cladding 層」、「蝕刻至 cladding 之底層」以及「將 cladding 層換為空氣層」等。對於 GaAs 半導體雷射的共振腔而言，將上下兩個 cladding 層接採用空氣層似乎在目前是一個解決損耗的好方法。而在光束進入光子晶體的方向上面，週期數要為多少才可提供足夠的「能隙」障礙，使得能量皆可完全反射。在 1999 年 Robertson [20]的文章中提到 7 層介電係數為  $\epsilon = 8.9$  的柱狀結構就可相當於無限多層的效果。不過，其討論是針對 100 GHz 附近的波長而言。對於波長範圍在 9.2  $\mu$ m 至 10.8  $\mu$ m，其相對應之頻率範圍為 27.8 THz 至 32.6 THz，的入射光而言，這些基本現象是亟需要釐清的部分。目前對於此波長範圍相關的研究，也因此以「兆赫光子晶體」(Tera-Hertz Photonic Crystal) 作為稱呼。

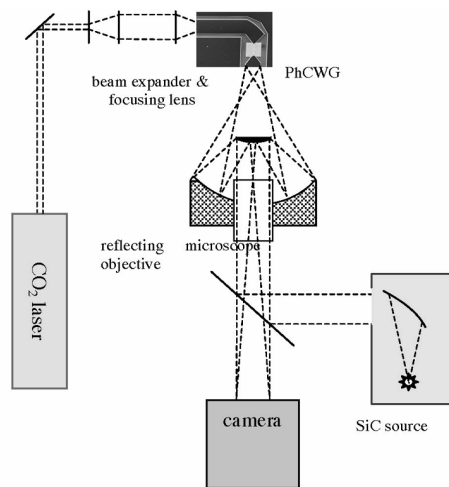


Fig. 4. Schematic layout of the optical setup for measuring transmittance spectra and optical propagation.

圖 3-5、量測裝置圖。[18]

#### 四、研究方法：

計畫進行的步驟區分為兩大部分。一部份為「光子晶體分光元件的設計與製作」，另一部份為「10.6  $\mu\text{m}$  波長的光源與量測系統的建立」。

##### 1. 光子晶體分光元件的設計與製作：

首先以平面波展開法(Plane Wave Expansion Method)對於週期層數至少大於 15 層以上的光子晶體進行模擬。並以設計出在波長範圍 9.2  $\mu\text{m}$  至 10.8  $\mu\text{m}$  之內，具有能隙的光子晶體結構。本計畫中的光子晶體由週期排列的圓柱所構成。於製作此結構的光子晶體時，將光子晶體中圓柱排數由一排增加至 15 排，並逐排地量測其穿透率。此部分的研究成果，可驗證頻率更高至 28 THz 附近的範圍，光子晶體的行為是否仍符合 Robertson [20]在 Microwave 頻率範圍所得的結果。

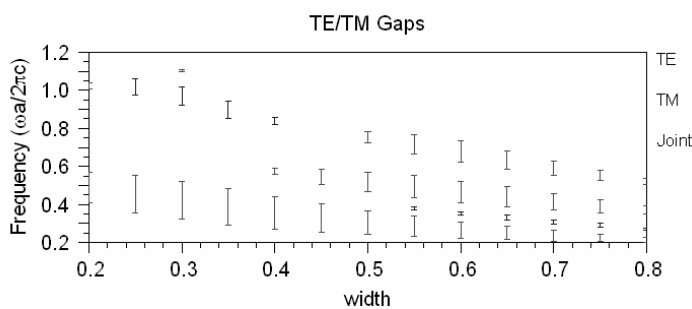
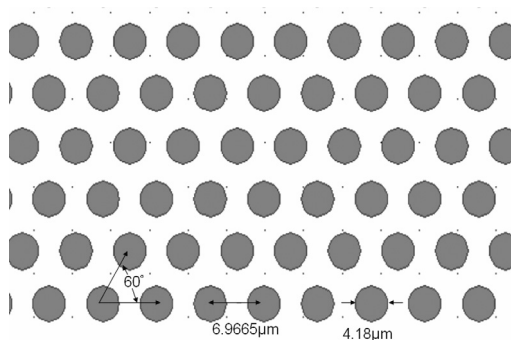


圖 4-1 光子晶體能帶與  $r$  的關係

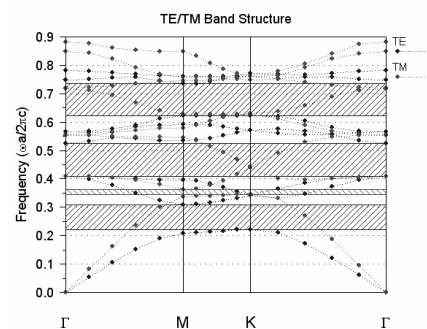
表 4-1 四個 CO<sub>2</sub> 雷射主要波長所分別對應的光子晶體尺寸

波長( $\mu\text{m}$ )	$a$ ( $\mu\text{m}$ )	$r$ ( $\mu\text{m}$ )
10.61	7.21	4.32
10.26	6.97	4.18
9.56	6.50	3.90
9.29	6.31	3.79

光子晶體的設計的重點除了在考慮「能隙現象」是否發生之外，還要兼顧製程的限制。計畫中的製程限制以 1  $\mu\text{m}$  的線寬為考量，將光子晶體中的曝光區域皆以此限制為設計限制。而光子晶體中的圓柱排列又與圓柱的直徑 ( $r$ )、週期 ( $a$ ) 相關。當排列的方式為「正方形」排列方式時，需要週期與波長的比值 ( $a/\lambda$ ) 很小時才有能隙現象。這會使得曝光線寬小於製程上的限制。而「六角形」(hexagonal) 的排列方式，即使調整  $r$  也無法使週期  $a$  大於曝光線寬的條件之下預測到能隙現象的發生，對於製程上會有極大的困擾。只有「三角形」(triangular) 排列的方式，才可以兼顧各項要求。以此方式排列之模擬計算部分顯示，當  $r$  改變之下將會在不同的  $a$  位置發生能隙現象。如圖 4-1 所示，圖中的橫軸 width 為  $(r/a)$ ，縱軸之  $a$  即為週期  $a$ 。本計畫依照此圖的結果，選定 width 等於 0.6 為製程上的參數。使得當週期  $a$  為 0.697 時，適用於波長為 10.26  $\mu\text{m}$  的週期為 6.97  $\mu\text{m}$ 、 $r$  為 4.18  $\mu\text{m}$ ，圓柱間的空隙間隔為 2.80  $\mu\text{m}$ 。對應於計畫自製的 CO<sub>2</sub> 雷射可提供的波長，其所對應的晶體尺寸如表 4-1 所示，



(a)



(b)

圖 4-2 (a)為此光子晶體的示意圖；圖 4-2(b)為其能隙之結構圖。

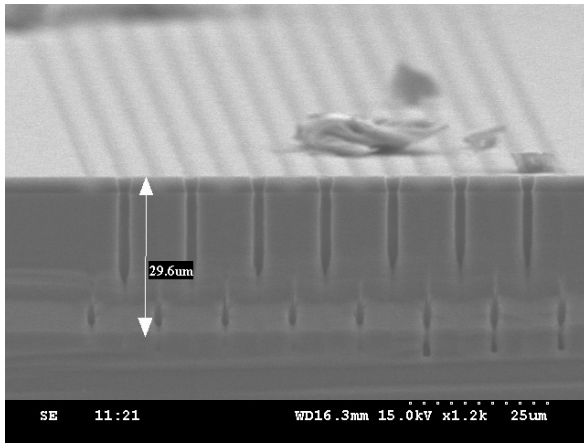


圖 4-3 使用 AZ-4620 的蝕刻結果

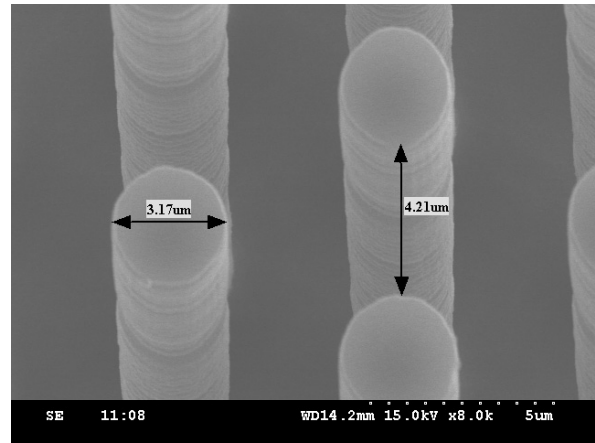


圖 4-4 使用 AZ-5214 所蝕刻的結果

皆可符合製程之線寬限制。圖 4-2(a)為此光子晶體的示意圖，圖 4-2(b)為其能隙之結構圖。

本計畫的光子晶體是由矽晶片為基材所製造的。矽在此波長範圍的折射率為 3.5。因此對於由空氣與矽晶片的介面上，垂直入射的光束因為折射率差異根據理論值的計算，其穿透率只約為 48%。實際量測的穿透率為 47%，與理論值接近。對於實驗上的量測，需要這個光子晶體的截面積夠大，才能取得足夠強度之訊號。量測設備上所能提供的雷射光束，在光子晶體上的直徑約為 200 μm。因此需要光子晶體圓柱結構的高度得以越高越好，對應到光子晶體製程中的蝕刻深度可以越深越好，可以使蝕刻深寬比 (aspect ratio) 達到此範圍的只有 ICP RIE。製程中的 ICP RIE 的部分，是由中央大學的微光電實驗室所進行的。蝕刻運用了兩種光阻：AZ-5214 (負光阻) 與 AZ-4620 (正光阻) 兩種，二者皆使用相同的光罩。AZ-4620 蝕刻結果如圖 4-3 所示，其所蝕刻的部分是圖 4-2(a)中顏色較黑的部分，其蝕刻深度大約可達到 36 μm。不過其所蝕刻的孔洞直徑，會比設計的尺寸要小，同時會使蝕刻深度受限。AZ-4620 所製作的光子晶體，並未在本計畫之中進行更進一步的量測。而使用 AZ-5214 所蝕刻的結果如圖 4-4 所示，其週期與設計上並無差異，但在圓柱直徑上略有出入。蝕刻之後的直徑約為 3.17 μm，會使能隙的發生位置略微改變。蝕刻深度在目前的進度中，可以達到 46 μm 的深度。

## 2. 10.6 μm 波長的光源與量測系統的建立

計畫中的量測系統以 CO<sub>2</sub> 放電管為光源主體，在雷射共振腔的其中一端利用 Littrow Type Grating 的一階反射做為反射鏡，將所需的波長依旋轉角度區分出來。特定波長的雷射光束輸出至分光鏡後分成兩道，其中一道進入 monitoring power meter

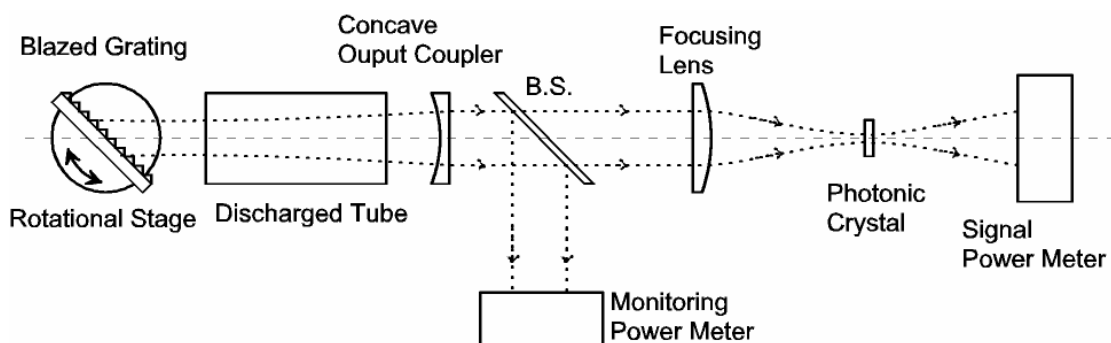


圖 4-5 量測系統的簡圖



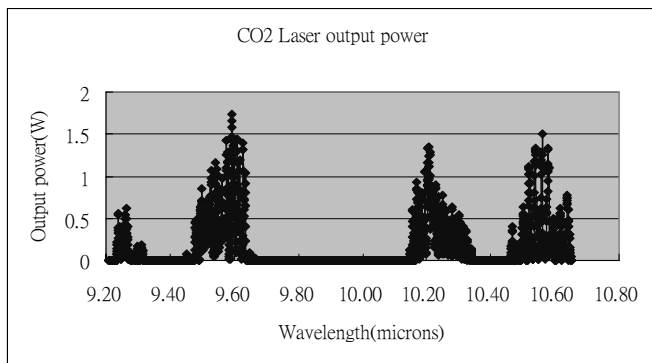


圖 4-6 波長可調 CO<sub>2</sub> 雷射的輸出波長與功率對應結果

用於監測 Laser 之輸出功率，而另一道光則經由另一片透鏡聚焦，使其集中入射至光子晶體的區域中。穿透光子晶體的雷射功率，由另一個 signal power meter 進行量測。量測系統的簡圖如圖 4-5 所示。CO<sub>2</sub> 雷射所使用的光柵規格為 135 grooves/mm，搭配步進馬達進行波長選擇的功能，步進馬達的精度為 0.0025°/step。

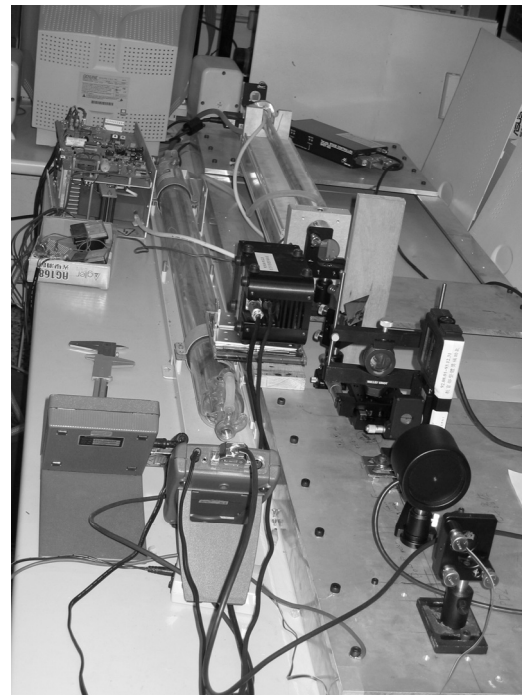


圖 4-7 量測系統的實物照片

雷射的輸出功率最大約在 1.5W，最小在數十 mw 左右，依波長不同會略有差異，如圖 4-6 所示。系統中的分光鏡是一片雙面拋光的矽晶片，實驗中光束的入射角約為 36°，對應於平行入射面的偏極方向，其透射率( $T_{\parallel}$ )<sup>2</sup>=58.6%；對應於垂直入射面的偏極方向，其透射率( $T_{\perp}$ )<sup>2</sup>=37.8%。此處所提之平行入射面的偏極方向，正如模擬計算中所提到的 TE 模態（垂直晶片的圓柱方向）。因此，雖然本系統並未特別在雷射光源的設計上針對偏極化光束的輸出。但在分光鏡之後，約有 60.8%的雷射功率為 TE 模態並入射至光子晶體。計畫中的光子晶體，因為蝕刻深度的限制，無法令光子晶體的截面大到足以涵蓋整個雷射光束（估計需要約 100 mm 蝕刻深度）。因此在實際量測的過程當中，是將兩片相同的晶片上下顛倒並互相對準之後，一起進行量測。量測系統的實物照片，如圖 4-7 所示。

## 五、結果與討論：

光子晶體的設計與製作，如上一節所述。光子晶體的週期大小（晶格常數） $a$ 、直徑  $r$  與能隙的關係大致可以歸納如下：(i)週期與波長的比例相同，則其能隙的發生區域也會相同；(ii)晶格寬度的比例( $r/a$ )也決定了可能的能隙區域，類似圖 4-1 的結果，其影響將決定可允許的製程誤差範圍；(iii)晶格的排列方式，以「三角形」結構週期排列最能滿足不同入射方向的光束，同時具有能隙的現象。

在光子晶體的製作上，以矽晶片應用於遠紅外光區的波長是可行的。矽晶片在此波長穿透率在實驗上的量測與理論直接接近，驗證其吸收的比例極低，可運用於光子晶體的製作材質。而目前比較常見的業界製程，大概都以此材料為主，其製程精度也在遠紅外光的光子晶體製作的精度之內。很適合將此計畫的結果應用在更進一步的驗證工作上。

依照 1999 年 Robertson [20]的文章中提到對於 100 GHz 附近的波長而言，7 層介電係數為  $\epsilon = 8.9$  的柱狀結構就可相當於無限多層的效果。本計畫中將光子晶體中圓柱排數由一排增加至 15 排，並逐排地量測其穿透率。依照理論推算，雷射光束通過光

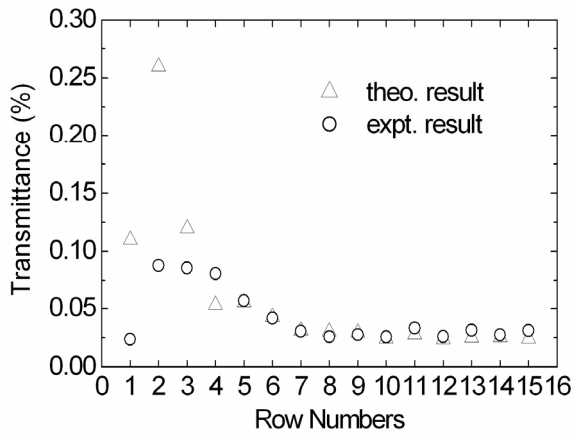


圖 5-1 光子晶體排數與穿透率的關係

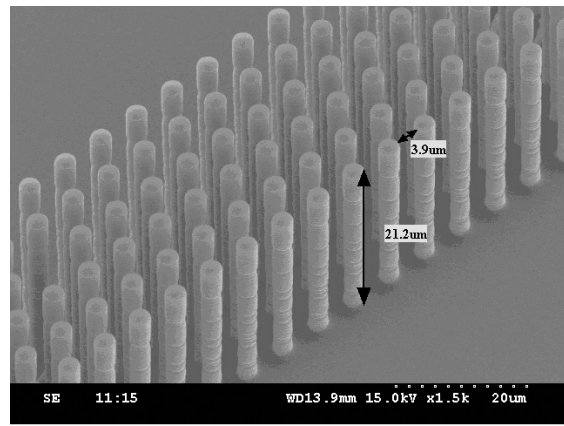


圖 5-2 六排三角排列的光子晶體 SEM 照片

子晶體的穿透率會隨著層數的增加而降低，如圖 5-1 所示。理論計算是以 FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 的方式進行，以光速與時間的乘積的數量超過  $3 \times 10^4$  之後的穿透值為結果。所製作的光子晶體，也由一排開始逐排地增加至十五排。圖 5-2 為其製作出來的光子晶體，其排數為六排。實驗所量得的結果，與理論計算的結果十分接近。在排數大於 7 排之後，穿透率小於 0.05%。與 Robertson 的結果相呼應，也驗證了光子晶體的結構可以依照波長，線性的對於光子晶體的大小進行放大。計畫中的光子晶體，因為蝕刻深度尚未能超越  $46 \mu\text{m}$ ，無法令光子晶體的截面大到足以涵蓋整個雷射光束 (估計需要約  $100 \text{ mm}$  蝕刻深度)。實驗當中無法以單片的光子晶體，觀測到能隙現象的差異，也無法進行穿透率的量測。在實際量測的過程當中，是將兩片相同的晶片上下顛倒、並互相對準之後，一起進行量測。

實驗中的結論如下：(i) 驗證光子晶體的 scalable 的特性；(ii) 其光子晶體的高度  $h$  若不足以觀測到能隙現象所造成的差異，可以對疊的方式增加有效的截面積。(iii) 量測系統的能力，在波長的選擇上以及訊號的檢測上可以成功進行相關實驗。

#### 六、參考文獻：

1. E. Yablonovitch, "Photonic band gap structures" *J. Opt. Soc. Am. B* **10**(2) 83–295 (1993)
2. R. Ziolkowsky and M. Tanaka, "FDTD analysis of PBG waveguides, power splitters and switches," *Opt. Quantum Electron.* **31**, pp. 843–855 (1999).
3. F. Yang, R. Coccioli, Y. Qian, and T. Itoh, "Planar PBG structures: basic properties and applications," *IEICE Trans. Electron.* **E83** 687–695 (2000).
4. J. R. Sirigiri, K. E. Kreischer, and J. Machuzak et al., "Photonic band-gap resonator gyrotron," *Phys. Rev. Lett.* **86** 5628–5631 (2001).
5. S. A. Asher, M. Kamenjicki, I. Lednev et al., "Photonic crystal chemical sensors: Nanoscopic molecular control of diffraction from mesoscopic periodic structures," *Abstr. Pap. Am. Chem.* **S221** U373-U373 (2001).
6. See <http://www.sst.ph.ic.ac.uk/phonics/ONYX/orderN.html>.
7. J. Yonekura, M. Ikeda, and T. Baba, "Analysis of finite 2-D photonic crystals of columns and lightwave devices using the scattering matrix method," *IEEE-OSA J. Lightwave Technol.* **17** 1500–1508 (1999).
8. D. Felbacq, G. Tayeb, and D. Maystre, "Scattering by a random set of parallel cylinders," *J. Opt. Soc. Am.* **11** 2526–2538 (1994).

9. G. Tayeb and D. Maystre, "Rigorous theoretical study of finite-size two-dimensional photonic crystals doped by microcavities," *J. Opt. Soc. Am.* **14** 3323–3332 (1997).
10. J. Ctyroky and S. Pregla, "Analysis of a deep waveguide Bragg grating," *Opt. Quantum Electron.* **30** 343–358 (1998).
11. A. Giorgio, A. G. Perri, and M. N. Armenise, "Very fast and accurate modeling of multilayer waveguiding photonic bandgap structures," *IEEE-OSA J. Lightwave Technol.* **19** 10 (2001).
12. V. M. N. Passaro, R. Diana, and M. N. Armenise, "Optical fiber gratings. Part I: Modeling of infinitely long gratings," to be published.
13. V. M. N. Passaro, R. Diana, and M. N. Armenise, "Optical fiber gratings. Part II: Modeling of finite length gratings and grating arrays," to be published.
14. A. Giorgio, A. G. Perri, and M. N. Armenise, "Modeling of fully etched waveguiding photonic band-gap structures," to be published.
15. E. Rave, K. Roodenko, and A. Katzir: "Infrared photonic crystal fiber" *Appl. Phys. Lett.* **83** 1912-1914 (2003).
16. M. U. Pralle, etc. : "Photonic crystal enhanced narrow-band infrared emitters" *Appl. Phys. Lett.* **81** 4685-4687 (2002).
17. S. Rowson, A. Chelnokov, and J. M. Lourtioz: "Two-Dimensional Photonic Crystals in Macroporous Silicon: From Mid-Infrared (10  $\mu\text{m}$ ) to Telecommunication Wavelengths (1.3-1.5  $\mu\text{m}$ )" *J. of Lightwave Tech* **17** 1989-1995 (1999).
18. Chunchen Lin, Caihua Chen, Garrett J. Schneider, Pen Yao, Shouyuan Shi, Ahmed Sharkawy, and Dennis W. Prather: "Wavelength scale terahertz two-dimensional photonic crystal waveguides" *Opt. Exp.* **12** 5723-5728 (2004).
19. Brian D'Urso, Oskar Painter, John O'Brien, Tom Tombrello, Amnon Yariv, and Axel Scherer: "Modal reflectivity in finite-depth two-dimensional photonic-crystal microcavities" *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 1155-1159 (1998).
20. Robertson etc., *Phys. Rev. Lett.* **68** 2023-2025 (1992).

七、 計畫成果自評：

1. 研究內容與原計畫相符程度

計畫執行內容與申請所提的研究項目相符：

- (i) 進行光子晶體的設計、製作。
- (ii) 運用 CO<sub>2</sub> 雷射設計並建立光子晶體的量測系統。

2. 達成預期目標情況

- (i) 完成對於光子晶體尺寸上的討論，並製作出所需之光子晶體。
- (ii) 完成並建立應用 CO<sub>2</sub> 雷射的量測系統。
- (iii) 在理論上與實際量測上，進行光子晶體的能隙討論。

對於預期目標大約達成 80%，對於光子晶體的高度  $h$  的討論尚無法進行量化。

3. 研究成果之學術或應用價值

- (i) 可運用此計畫針對光子晶體製作時的設計考量，除了放大尺寸之外，並減少製程誤差的影響。
- (ii) 可利用此計畫所建立的系統，進行光子晶體的量測，驗證其預期之現象。
- (iii) 能隙與排數的討論，具有在光學元件中限制光波能量的應用價值。

4. 是否適合在學術期刊發表或申請專利

目前正進行學術期刊的發表。但並不適合專利申請。

5. 主要發現或其他有關價值

如第 3 點所述。