

# 發明專利說明書

96年8月2日	修正 補充
---------	----------

(本說明書格式、順序及粗體字，請勿任意更動，※記號部分請勿填寫)

※申請案號：94100579

※申請日期：94. 1. 10

※IPC 分類：G02B 6/122  
G02B 6/16 (2006.01)

## 一、發明名稱：(中文/英文)

B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導

## 二、申請人：(共 1 人)

姓名或名稱：(中文/英文)

國立交通大學

代表人：(中文/英文) 吳重雨

住居所或營業所地址：(中文/英文)

新竹市大學路 1001 號

國 籍：(中文/英文) 中華民國 TW

## 三、發明人：(共 1 人)

姓 名：(中文/英文)

呂明峰

許世欣

黃郁惠

黃遠東

國 籍：(中文/英文)

中華民國 TW (皆同)

四、聲明事項：

主張專利法第二十二條第二項第一款或第二款規定之事實，其事實發生日期為：93年7月15日。

申請前已向下列國家（地區）申請專利：

【格式請依：受理國家（地區）、申請日、申請案號 順序註記】

有主張專利法第二十七條第一項國際優先權：

無主張專利法第二十七條第一項國際優先權：

主張專利法第二十九條第一項國內優先權：

【格式請依：申請日、申請案號 順序註記】

主張專利法第三十條生物材料：

須寄存生物材料者：

國內生物材料 【格式請依：寄存機構、日期、號碼 順序註記】

國外生物材料 【格式請依：寄存國家、機構、日期、號碼 順序註記】

不須寄存生物材料者：

所屬技術領域中具有通常知識者易於獲得時，不須寄存。

### 五、中文發明摘要：

本發明之 B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導為光波傳導的元件，此一元件垂直方向係由 B 型抗諧振反射光波導結構構成，水平方向係由光子晶體結構構成，在光子晶體結構上設計出線缺陷，使等效為基模傳輸的光波導，同時具有傳輸縱模和橫模的能力。配合光纖輸出入耦合之需求，本元件可彈性選擇與光纖匹配之尺寸與材料折射率，而能具有較大的垂直波導核心尺寸，解決光子晶體波導與光纖在垂直方向上耦合的問題，並可供作積體光電元件之設計平台。

### 六、英文發明摘要：

This photonic crystal waveguide with B-type antiresonant reflecting optical waveguide (ARROW-B) structure is a kind of optical waves guiding device. It is constructed by ARROW-B structure in the vertical direction and by photonic crystal structure in a lateral plane. A line defect is formed on the photonic crystal structure, which is equivalent to a fundamental modes waveguide. This device supports transverse and longitudinal modes. Depending on the requirements for coupling with optical fibers, the size and the corresponding film materials of this ARROW-B structure can be designed flexibly. Having a large core size, the ARROW-B-based photonic crystal waveguide can solve the coupling issue with optical fibers in the vertical direction and be a platform for integrated optoelectronics.

七、指定代表圖：

(一)本案指定代表圖為：第(一)圖。

(二)本代表圖之元件符號簡單說明：

B型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導

1: 空氣孔洞

2: 核心層

3: 第一覆層

4: 第二覆層

5: 基板

$a$ : 晶格常數

$r$ : 空氣孔洞半徑

$d_c$ : 核心層厚度

$d_1$ : 第一覆層厚度

$d_2$ : 第二覆層厚度

$n_c$ : 核心層折射率

$n_1$ : 第一覆層折射率

$n_2$ : 第二覆層折射率

$n_s$ : 基板折射率

八、本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式：

無

## 九、發明說明：

### 【發明所屬之技術領域】

光子晶體(photonic crystals)係折射率週期性變化之材料，利用光子晶體可以設計與製作性能優異的光電元件，像是高速光子開關、高效率發光二極體、低功率雷射等。本發明之B型抗諧振反射光波導(B-type Antiresonant Reflecting Optical Waveguide, ARROW-B)結構之光子晶體波導是運用B型抗諧振反射光波導結構和光子晶體結構設計之光路傳導元件，具有縱模和橫模的基模傳輸能力，可運用在光通訊、光資訊等領域，同時元件有較大的波導核心尺寸，可以解決光子晶體波導與光纖在垂直方向上耦合的問題，也是積體光電元件的設計平台。

### 【先前技術】

光子晶體是一種折射係數週期性變化的結構，特定波長的光在光子晶體中因布拉格繞射(Bragg's diffraction)的影響而無法穿越，形成光子能隙(photonic bandgap, PBG)，光子能隙可以類比成半導體材料的電子能隙。Eli Yablonovitch在1987年首先提出光子晶體和光子能隙的概念<sup>[1]</sup>，S. John同時也提出光子晶體中光侷限性的理論<sup>[2]</sup>。

在能隙範圍內的光波無法在光子晶體內傳播，如果在光子晶體中設計線缺陷(line defects)，則能隙中特定波長的光就可以在光子晶體結構中傳輸。這種外加的缺陷能有效地引導光線經過指定的路徑，此種元件即稱為光子晶體波導(photonic crystal waveguides)。光子晶體波導的導光機制有別於傳統光波導：傳統光波導是利用內部全反射的原理導光，所以在在大角度轉彎處，光波會有很大的損耗；而光子晶體波導是以光子能隙作為侷限光線的機制，所以能做出大角度彎

折的高傳輸效率光波導<sup>[3]</sup>。

現有的光子晶體波導元件，雖然水平方向以二維光子晶體作為侷限光的機制，但是垂直方向上仍然沿用內部全反射的原理。為了要讓波導維持在單模態的傳輸條件，波導核心的尺寸必須小於 1 微米，相較於光纖的核心直徑約 6~10 微米，光子晶體波導與光纖之尺寸及光場不匹配會造成相互耦合效率的低落，限制了光子晶體元件的量測及後續的應用。為了解決耦合的問題，有多個研究團隊提出改善的方式，例如光柵 (grating)、鏡面聚焦 (prism or mirror)、漸進式結構 (tapered structure) 等<sup>[4-7]</sup>，但是上述方法只能解決水平方向耦合的問題，垂直方向的耦合仍然沒有具體可行的方案。因此本發明以 B 型抗諧振反射光波導結構設計來解決光子晶體波導與光纖之垂直方向耦合問題<sup>[8]</sup>。

#### 【先前技術檢索資料】

1. E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, " *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 20, pp. 2059-2062, 1987.
2. S. John, "Strong localization of photons on certain disordered dielectric superlattices, " *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 58, pp. 2486-2488, 1987.
3. Attila Mekis, J. C. Chen, I. Kurland, Shanhui Fan, Pierre R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, "High Transmission through Sharp Bends in Photonic Crystal Waveguides," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 77, pp. 3787-3790, 1996.
4. Attila Mekis and J. D. Joannopoulos, "Tapered Couplers for Efficient Interfacing Between Dielectric and Photonic Crystal

- Waveguides," *J. Lightwave Technol.*, vol. **19**, pp. 211-217, 2001.
5. Yong Xu, Reginald K. Lee, and Amnon Yariv, "Adiabatic coupling between conventional dielectric waveguides and waveguides with discrete translational symmetry," *Opt. Lett.*, vol. **25**, pp.755-757, 2000.
  6. Wan Kuang, Cheolwoo Kim, Andrew Stapleton, and John D. O'Brien, "Grating-assisted coupling of optical fibers and photonic crystal waveguides," *Opt. Lett.*, vol. **27**, pp. 1604-1606, 2002.
  7. Dennis W. Prather, Janusz Murakowski, Shouyuan Shi, Sriram Venkataraman, Ahmed Sharkawy, Caihua Chen, and David Pustai, "High-efficiency coupling structure for a single-line-defect photonic-crystal waveguide," *Optics Letters*, vol. **27**, no. 18, pp.1601-1603, 2002.
  8. M. A. Duguay, Y. Kokubun, T. L. Koch, and L. Pfeiffer, "Antiresonant reflecting optical waveguides in SiO<sub>2</sub>-Si multilayer structures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. **49**, no. 1, pp. 13-15, 1986.

#### 【發明內容】

本發明提出「B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導」，其結構如圖一所示，元件的垂直方向如圖二所示係由 B 型抗諧振反射光波導結構構成。抗諧振反射光波導的第一覆層反射率高於核心層與第二覆層之反射率；而 B 型抗諧振反射光波導的第一覆層反射率則略低於核心層與第二覆層之反射率。利用抗諧振反射將基模反射至核心層，高階模態散逸至高折射率的基板，以達到單模高效率傳輸的目的。元件的水平方向係由圓形空氣孔洞在介電材料上週期性排列成三角形晶格

構成光子晶體結構，在光子晶體結構上移去一排圓形孔洞設計出線缺陷，等效為基模傳輸的光波導。因此本發明的水平方向是以光子能隙作為侷限光線的機制，垂直方向則由抗諧振反射光波導結構來侷限光線，而非傳統波導的內部全反射機制，所以能做出大角度彎折的高傳輸效率的光波導。

抗諧振反射光波導結構具有下列優點：(1) 低傳輸損耗；(2) 單模傳輸；(3) 可彈性地選擇光波導層的厚度與材料折射率，以配合輸出、入光纖的厚度與折射率，達到最高的輸出、入耦合效率；及(4) 可製作於高折射率基片上。本發明採用 B 型抗諧振反射光波導結構除了具有上述的優點之外，同時對橫向電場 (transverse electric field, TE) 和橫向磁場 (transverse magnetic field, TM) 兩種模態的基模 (fundamental modes) 都有低傳輸損耗的特性，因此具有縱模和橫模的傳輸能力。並可彈性選擇波導各層的厚度與材料折射率，使本發明元件具有與光纖匹配的較大波導核心尺寸與對應折射率材料，解決光子晶體波導與光纖在垂直方向上耦合的問題，並可供作積體光電元件之設計平台。

與傳統的光波導相比，本發明獨具的優點為：採用 B 型抗諧振反射光波導結構，元件的尺寸與材料折射率的選擇具有相當彈性，沒有傳統光波導尺寸過小的問題。水平方向採用光子晶體結構，利用光子能隙侷限光線，而非傳統波導的內部全反射機制，所以能做出高傳輸效率的大角度彎折。

與一般的光子晶體波導相比，本發明獨具的優點為：垂直方向採用 B 型抗諧振反射光波導結構，而非內部全反射，因此元件尺寸與材料折射率的選擇具有相當彈性，可以依據需求設計與光纖匹配的較大波導核心尺寸與對應折射率材料，解決光子晶體波導與光纖在垂直方向上耦合的問題。



## 【實施方式】

本發明之「B型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導」的設計分為兩個部份。

第一部份在元件的垂直方向上為一B型抗諧振反射光波導結構，包含一波導核心層（core）、一折射率低於核心層之第一覆層（first cladding）、一折射率與核心層相等或較低之第二覆層（second cladding），以及一高折射率的基板（substrate）；首先，依應用需求選定所用光波之工作波長，如本發明實施例之工作波長 $\lambda$ 為 $1.55\ \mu\text{m}$ ，接著決定搭配的波導材料系統，亦即B型抗諧振反射光波導之各層的折射率與厚度。

為了將來積體光學整合的目的，元件的設計配合半導體的製程，選用Si材料作為基板，基板的折射率 $n_s = 3.5$ ；第一覆層的材料選用 $\text{SiO}_2$ ，其折射率 $n_1 = 1.45$ 。為了與單模光纖能作高效率的耦合，波導核心層的厚度設計成 $d_c = 8\ \mu\text{m}$ 。當滿足抗諧振條件（antiresonance condition）時，第二覆層的厚度 $d_2$ ：

$$d_2 = \frac{\lambda}{4n_2} \left( 1 - \frac{n_c^2}{n_2^2} + \frac{\lambda^2}{4n_2^2 d_c^2} \right)^{-1/2} \cdot (2P + 1), \quad P = 0, 1, 2, 3, \dots$$

其中 $n_c$ 與 $d_c$ 為波導核心層的折射率與厚度， $n_2$ 為第二覆層之折射率， $P$ 為大於或等於0之整數；若第二覆層與核心層之折射率相等，則第二覆層的厚度 $d_2$ 可簡化成：

$$d_2 = \frac{d_c}{2} \cdot (2P + 1)$$

上述兩個公式中，通常 $P$ 設為0即可，如此第一與第二覆層都不至於太厚，因此第二覆層的厚度 $d_2 = 0.5d_c = 4\ \mu\text{m}$ 。

第二覆層與核心層選用之材料其折射率必須能產生橫向電場和橫向磁場兩種模態的交疊光子能隙（joint bandgap），圖三為光子晶體不同折射率的能隙圖，可以觀察到折射率必須

大於 3.0 才會有交疊能隙，因此選用 3.2 為第二覆層與核心層的折射率，所以  $n_2 = n_c = 3.2$ ，材料可選用多孔性或高濃度摻雜的矽。圖四和圖五所示為橫向電場和橫向磁場各個模態傳輸損耗與第一覆層厚度  $d_1$  關係圖，本實施例選擇  $d_1 = 0.11 \mu\text{m}$ ，可以獲得低損耗  $\text{TE}_0$  和  $\text{TM}_0$  模態的元件特性，達到長距離傳輸的目的。據此決定 ARROW-B 的元件參數為  $n_a/n_c/n_1/n_2/n_s = 1.00/3.20/1.45/3.20/3.50$ ， $d_c/d_1/d_2 = 8.00/0.11/4.00 \mu\text{m}$ 。

第二部份在元件的水平方向上，以二維空氣孔洞在介電材料上週期性排列形成光子晶體，相鄰孔洞的距離稱為晶格常數，為了產生橫向電場和橫向磁場兩種模態交疊的光子能隙，必須妥善設計孔洞的半徑  $r$  以及晶格常數  $a$ ；同時為了得到最大的交疊能隙，光子晶體的對稱性必須越高越好，因此採用三角形晶格。在交疊能隙中橫向電場和橫向磁場兩種模態之光波皆不能傳播，所以移去一排空氣孔洞引入線缺陷模態，形成光子晶體波導。本發明實施例選用的波導核心材料折射率是 3.2，由圖六根據平面波展開法(plane wave expansion method)計算的光子晶體波導能隙圖看出在空氣孔洞半徑與晶格常數的比值( $r/a$ )為 0.47 的時候，有最大的能隙值。對應的能隙頻率從 0.46 到 0.51 ( $a/\lambda$ )，中心頻率為  $(0.46 + 0.51)/2 = 0.485$ 。據此求得晶格常數  $a = 0.485 \lambda = 0.752 \mu\text{m}$ ，孔洞直徑  $d = 0.94a = 0.707 \mu\text{m}$ 。

在分別設計水平及垂直方向結構之後，以三維有限差分時域法(Finite Difference Time Domain, FDTD)計算 B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導的傳輸效率。此波導利用二維光子晶體及抗諧振反射層，分別將水平及垂直方向基模的光波侷限在波導核心層，高階模態則大部份散逸至下方的基板。圖七為空氣孔洞蝕刻深度對傳輸效率的關係圖，得知空氣孔洞被蝕刻到  $8.00 \mu\text{m}$  也就是核心層的厚度時，傳輸效率可以達到最大值；其原因是因為垂直方向的光波由抗諧振反射層反

射到核心層內，所以空氣孔洞只需要蝕刻至核心層的深度即可保證傳輸效率能達到最高。圖八顯示不同頻率的光波在本發明中的傳輸效率，在光子能隙中橫向電場和橫向磁場模的傳輸效率值分別為 89.7% (0.472-dB loss) 以及 92.1% (0.357-dB loss)，驗證 B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導兼具橫向電場和橫向磁場模態的高效率傳輸能力。

本發明提出新的 B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導，水平方向採用光子晶體結構提供光的局限能力，垂直方向靠 B 型抗諧振反射提供光的局限能力，在核心層的厚度達到 8  $\mu\text{m}$  時，仍能提供基模的傳輸能力，橫向電場和橫向磁場模的傳輸值皆可達到 89% 以上。因為核心層的厚度與光纖匹配，可以解決光子晶體波導與光纖在垂直方向的耦合問題，並提供積體光電元件設計的平台。

### 【圖式簡單說明】

圖一為 B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導的結構示意圖；

圖二為 B 型抗諧振反射光波導結構圖；

圖三為光子晶體不同折射率的能隙圖；

圖四為橫向電場模態傳輸損耗與第一覆層厚度  $d_1$  關係圖；

圖五為橫向磁場模態傳輸損耗與第一覆層厚度  $d_1$  關係圖；

圖六為光子晶體波導能隙圖；

圖七為空氣孔洞蝕刻深度對傳輸效率的關係圖；

圖八為不同頻率橫向電場及橫向磁場的傳輸效率圖。

### 【主要元件符號說明】

1: 空氣孔洞

I287648

2:核心層

3:第一覆層

4:第二覆層

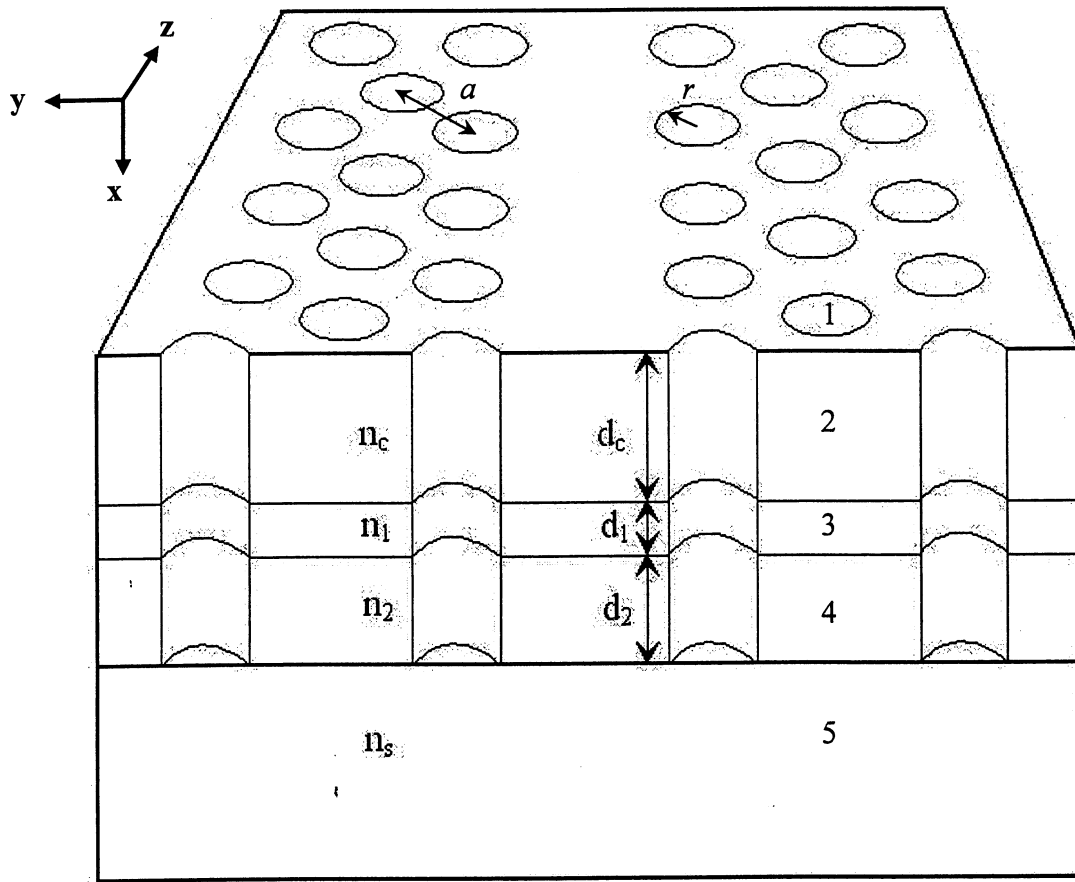
5:基板

## 十、申請專利範圍：

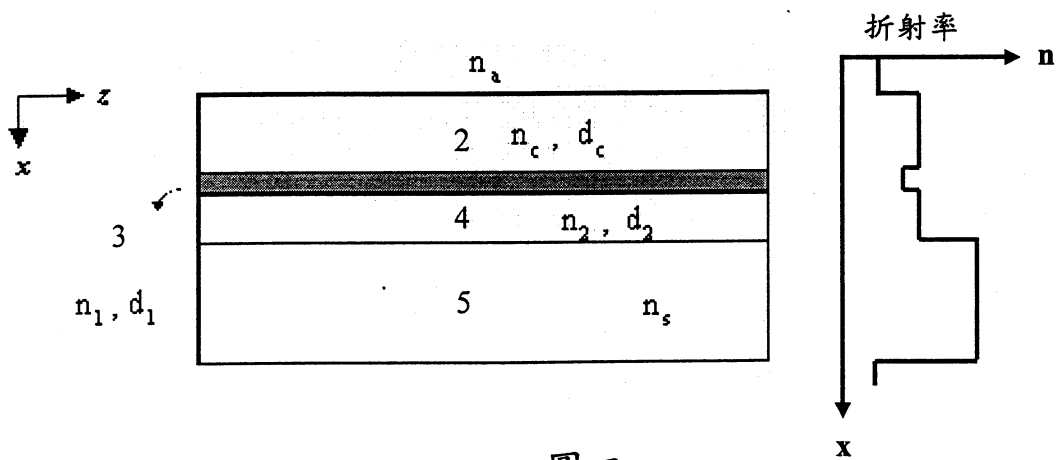
1. 一種 B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導，其包含：  
一光子晶體，該光子晶體具有複數個圓形空氣孔洞，藉由調整孔洞之半徑及晶格常數，以控制光子晶體之光子能隙波段，使得特定波長的光被光子能隙阻擋無法穿越該光子晶體；  
一水平方向引入單一線缺陷形成光子晶體波導；  
一垂直方向 B 型抗諧振反射光波導，該 B 型抗諧振反射光波導是由核心層、第一覆層、第二覆層及半導體材料基板構成。藉由調整各層之折射率與厚度，以實現單模低損耗之傳輸；  
其改良在於該光子晶體波導水平方向由二維光子晶體線缺陷波導及垂直方向由 B 型抗諧振反射層所組成，藉由調整波導核心層之材料及厚度，能與輸入輸出之單模光纖核心尺寸匹配。
2. 如申請專利範圍第 1 項所述之一種 B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導，該光子晶體係為複數個圓形空氣孔洞週期性排列在介電材料上，其排列週期為正三角形。
3. 如申請專利範圍第 1 項所述之一種 B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導，該水平方向引入單一線缺陷形成光子晶體波導。
4. 如申請專利範圍第 1 項所述之一種 B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導，該垂直方向為 B 型抗諧振反射光波導，包含一核心層及兩層以上之抗諧振覆層，使傳播於核心層之光波具有高傳輸效率。
5. 如申請專利範圍第 1 項所述之一種 B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導，該垂直方向之 B 型抗諧振反射光波導之抗諧振覆層，包含一低折射率之第一覆層、一與核心層相等或較低折射率且具有可形成抗諧振厚度之第二覆層。

6. 如申請專利範圍第 1 項所述之一種 B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導，該垂直方向之 B 型抗諧振反射光波導之抗諧振覆層，第二覆層之折射率若是與核心層相等，則其厚度為核心層的一半。
7. 如申請專利範圍第 1 項所述之一種 B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導，藉由調整核心層之材料及厚度能與輸入輸出之光纖核心尺寸匹配。
8. 如申請專利範圍第 1 項所述之 B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導，其特徵為，其抗諧振反射光波導之橫向電場和橫向磁場模態傳輸為單模型式，可低損耗傳輸橫向電場和橫向磁場模態的基模，其餘高階模態皆無法低耗損傳輸。
9. 如申請專利範圍第 1 項所述之 B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導，其特徵為，若空氣孔洞之蝕刻深度等於或大於核心層厚度，則傳輸效率為最佳。
10. 如申請專利範圍第 1 項所述之 B 型抗諧振反射光波導結構之光子晶體波導，其實施例為，工作波長  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ，晶格常數  $a = 0.752 \mu\text{m}$ ，孔洞直徑  $d = 0.707 \mu\text{m}$ 。基板的折射率  $n_s = 3.5$ ；第一覆層的折射率  $n_1 = 1.45$ ；第二覆層與核心層的折射率  $n_2 = n_c = 3.2$ 。核心層的厚度  $d_c = 8.00 \mu\text{m}$ ；第一覆層的厚度  $d_1 = 0.11 \mu\text{m}$ ；第二覆層的厚度  $d_2 = 4.00 \mu\text{m}$ 。

十一、圖式：

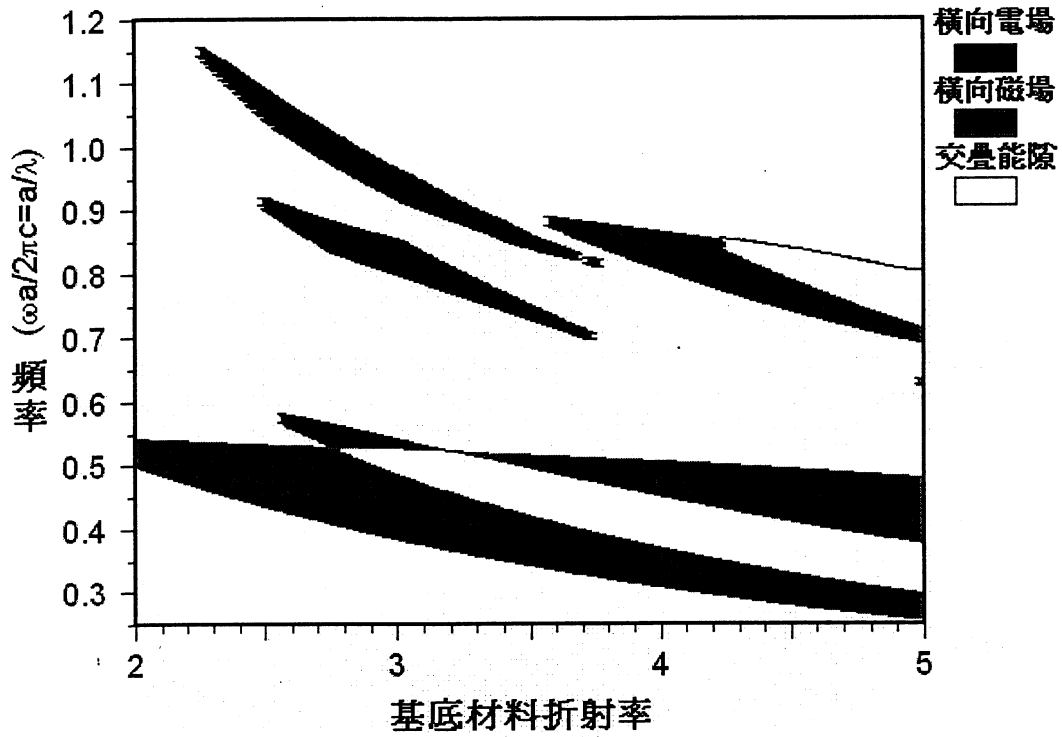


圖一



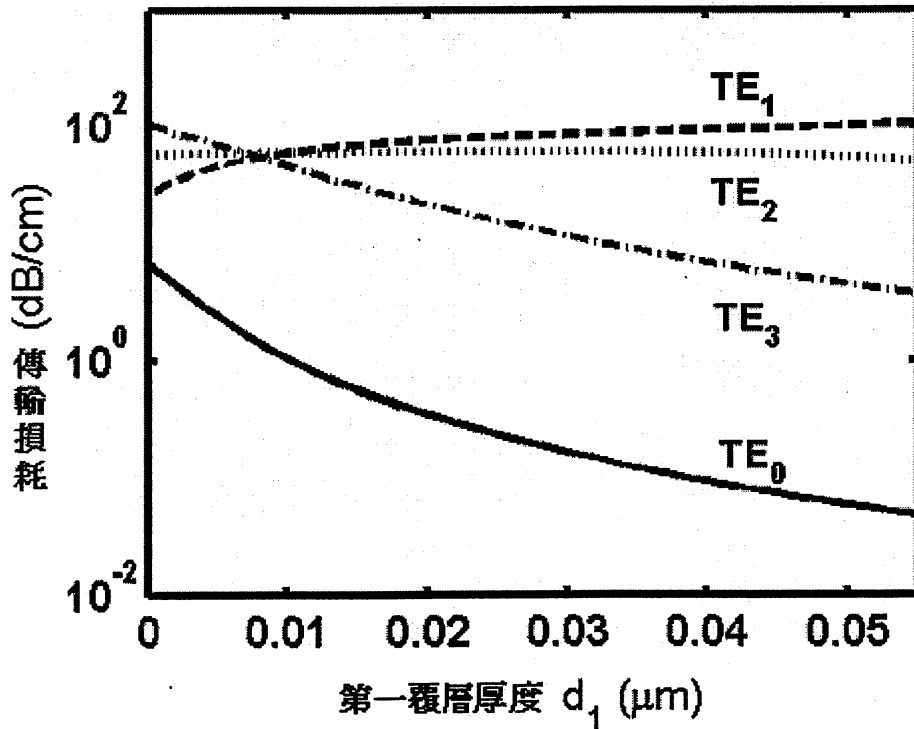
圖二

橫向電場及橫向磁場交疊能隙



圖三

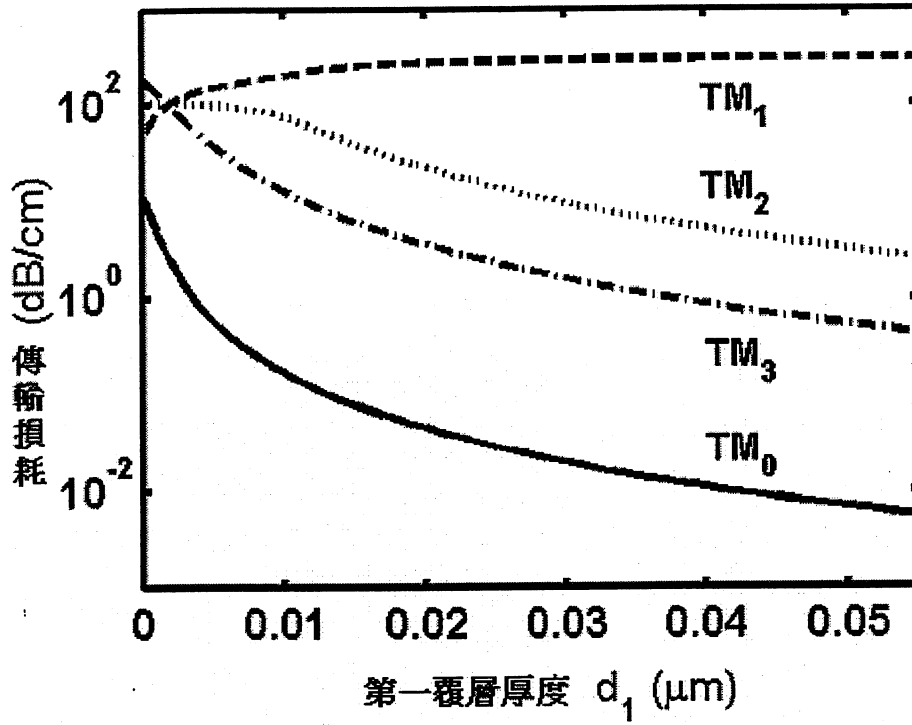
橫向電場傳輸損耗



圖四

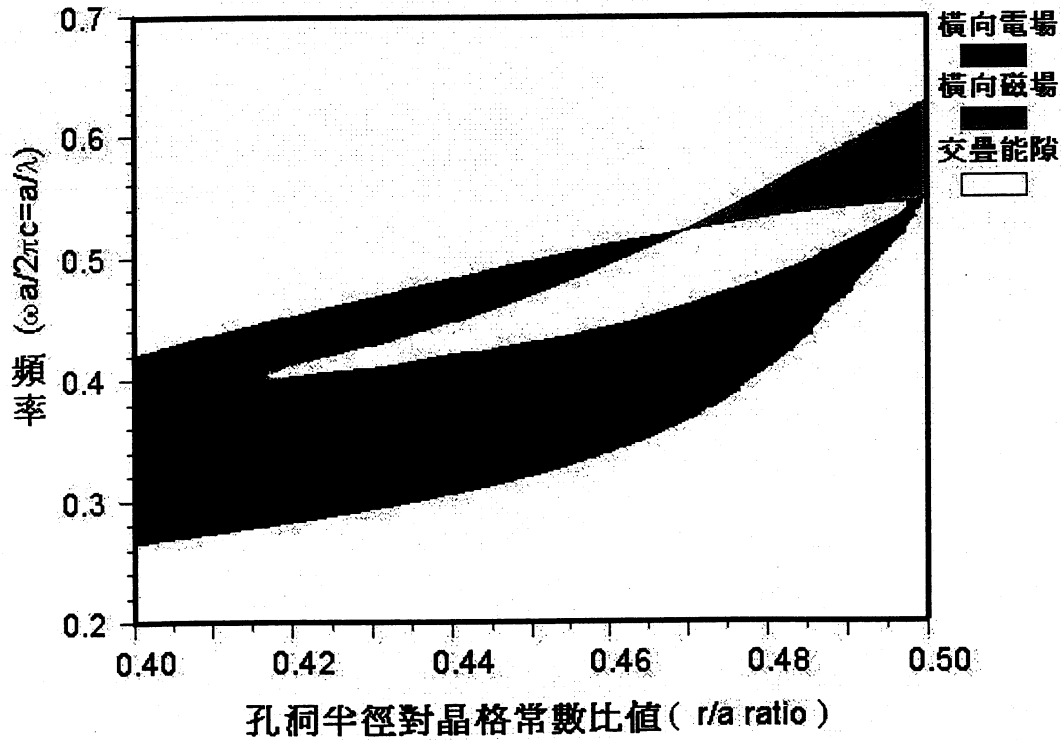


橫向磁場傳輸損耗

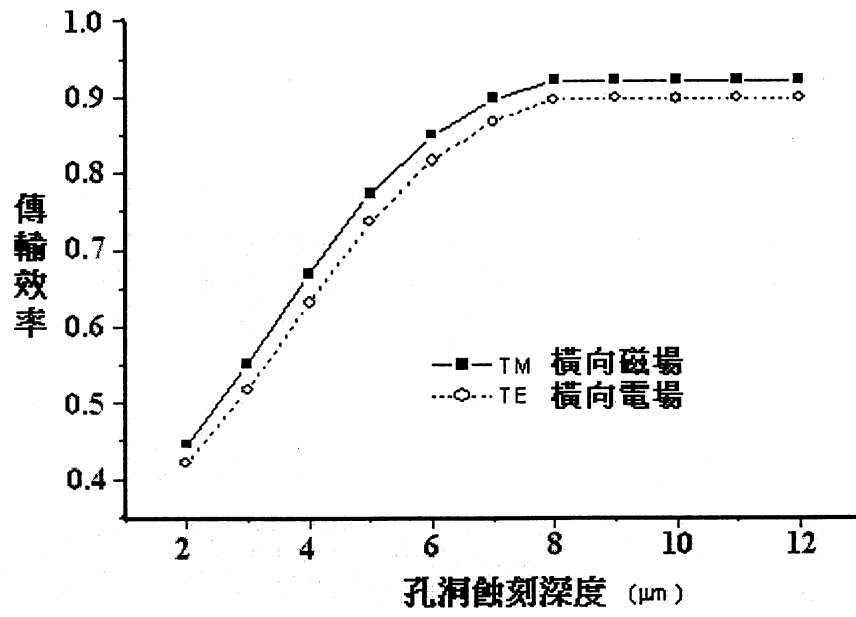


圖五

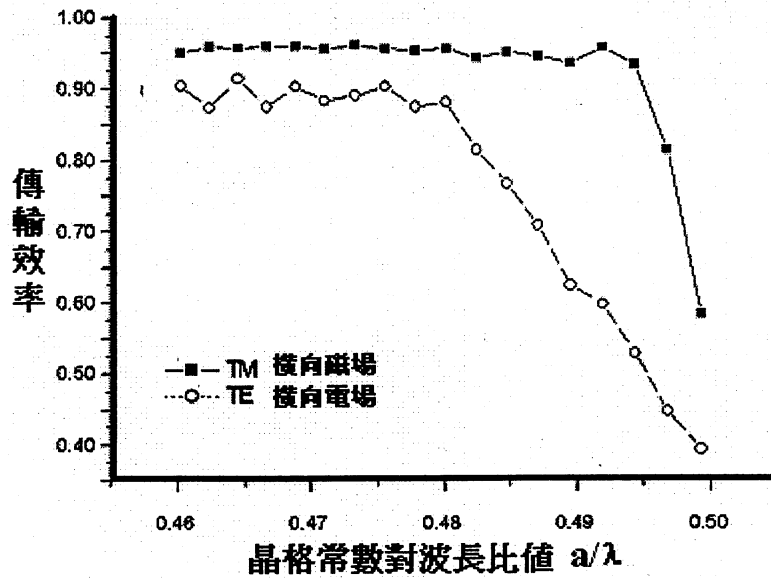
橫向電場及橫向磁場交疊能隙圖



圖六



圖七



圖八