

# AND Logic Gate for Optical Processing

Kun-Yi Lee, Cheng-Che Lee, Yen-Juei Lin, Kuen-Cheng Lin, Wei-Yu Lee  
Department of Electrical Engineering  
China University of Science and Technology  
Taipei, Taiwan  
kelvin119@gmail.com

Yi-Pin Yang, Yi-Cheng Yang, Chia-Hsien Chang, Yao-Tsung Tsai  
Department of Electrical Engineering  
National Central University  
Taoyuan, Taiwan  
yib1981@gmail.com

**Abstract**—We propose a AND logic gate based on photonic crystal with cylindrical silicon structure. It takes advantages of the device sizes are drastically reduced to a scale of a few tens of micrometers and the easy-to-implement logic function. Furthermore, the multi-input AND gate can apply to all-optical Arithmetic Logic Unit (ALU) devices of photon computer in the future.

**Keywords**- logic gate; Photonic Crystals

## I. 簡介

現今，極微小型光子積體電路為實時信息通信最具吸引力的裝置，此外，高速且高容量的全光信號處理技術吸引了眾多研究者並蓬勃發展，取代了傳統的電訊系統。全光式邏輯閘的關鍵元素為全光信號處理技術，如處理、交換、數據編碼及加密；然而，在不久之後，許多重要計劃，都成功完成實現各種光電邏輯運算[1-6]。一般來說，早期最常使用全光邏輯閘的技術是傳統的波導元件。這些方法都各有優點，但經實際及探討後，發現仍存在一些困難。基於上述原因，光子晶體就此引起相當大的興趣，它具有諸多的特徵，如設備的尺寸可大幅減少到幾十微米，彎曲的角度以及光折變材料的選擇，將大大改善傳統波導元件的缺點。因此，由於光子晶體的能力為操縱光子波長範圍，結構也被應用在不同的光子晶體元件例如微共振器[7-9]、波導[10-11]、通道-埋入式濾波器[12-16]、及光學關關[17-18]已經成熟的呈現(大量建立)於光子光學積體系統等。本次研究，將設計一個矽柱光子晶體 AND 邏輯閘基板，光子晶體波導結構的梯形干涉區域長度(I)與寬度(J)，初步實驗結果表明，所提出的全光式光子晶體波導結構能夠真正發揮AND 邏輯閘功能。

## II. 設計概述

在此週期性排列的介電材料會造成某部分頻率的電磁波無法在晶體內傳遞，並產生如同破壞性干涉的效果，此區域稱為光子能隙。因此，光子能隙內的波長不能傳輸穿越晶體，所設計的晶格陣列需符合光子能隙範

圍。於晶體結構中安排一些缺陷，由於週期性排列被破壞而可建立一條光傳導之波導路徑。

### A. 全光式 AND 閘之結構

我們提出一個二維三角晶格矽柱的週期光子晶體結構如圖 1 所示，其全光式 AND 邏輯閘的主要電路結構及真值表分別如圖 2 及表 1 所示，其中的參數設定參考圖 1。圖中顯示的  $r$  與  $a$  分別為晶格半徑與晶格常數。元件的主要結構為兩輸入(A、B)一輸出(Y)之光子晶體波導結構，其中組合電路為仿似 Mach-Zehnder 耦合區域與梯形干涉區域。因此，若導入脈衝時，兩個輸入光源可藉由梯形干涉區造成的路徑差異，導致破壞性或建設性干涉來實現邏輯運算的功能。AND 閘的輸出信號為 High(1)或 Low(0)將取決於在輸入端 A 與 B 輸入信號(01)、(10)、及(11)狀態。輸入端 A 與 B 的輸入信號最終將在梯形干涉區域作調制，當輸入端 A 輸入信號在梯形干涉區域經由輸入端 B 的信號調制時將穿越波導結構，反之若沒有經過輸入端 B 信號調制則無法傳播穿越波導。

表1 AND邏輯閘的真值表

INPUT		OUTPUT
A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

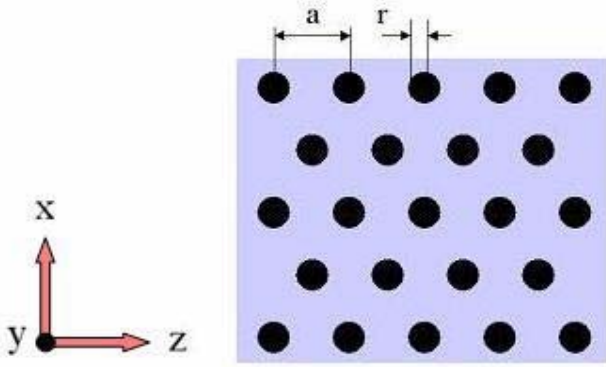


圖1 二維光子晶體三角形陣列結構

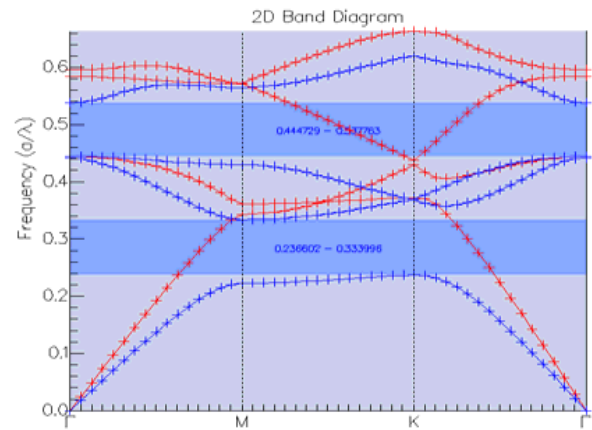


圖3 光子晶體的能隙圖，圖中包含TM與TE模態

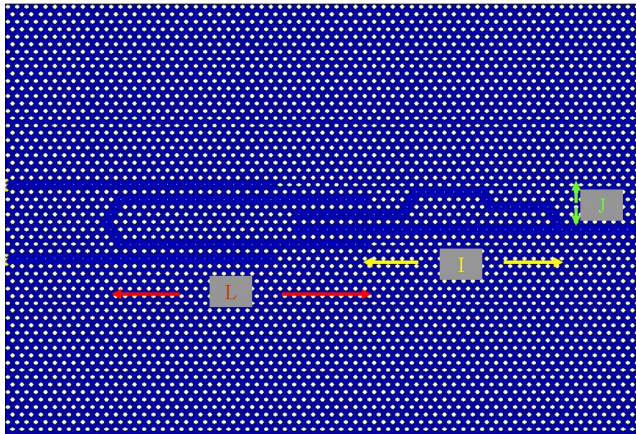


圖2 光學 AND 邏輯閘圖示

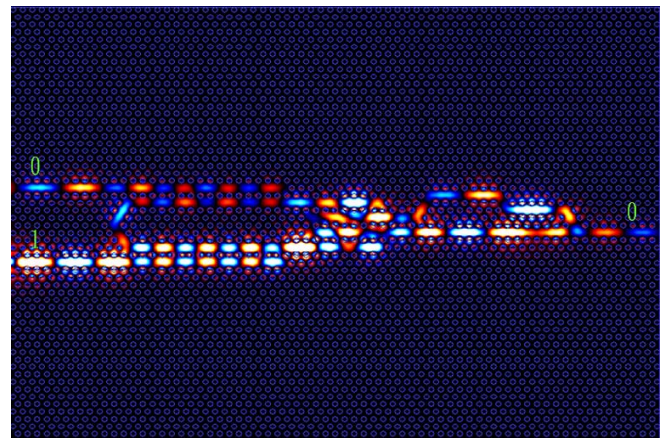


圖4(a) 光學AND閘輸入(0,1)之邏輯運算行為

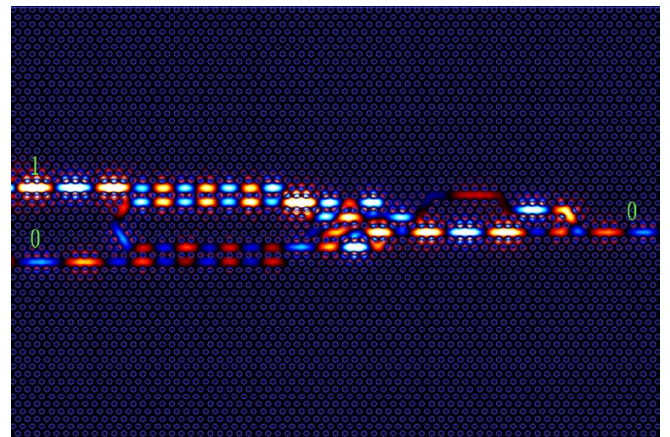


圖4(b) 光學AND閘輸入(1,0)之邏輯運算行為

### B. 結構設計與模擬

決定了全光式AND閘的結構後，模擬分析得以完整。為了驗證我們的研究，我們設計一個二維三角晶格陣列矽柱置於空氣層中之光子晶體結構。其半徑為  $r = 0.35a$  與介電常數為  $\epsilon = 11.56$ 。對應於此結構的能隙圖如圖3所示。此能隙圖符合所使用的TM模態(E-極化)之約化工作頻率範圍  $0.4447-0.5378(a/\lambda)$ ，這裡的  $\lambda$  為自由空間的波長。此能隙在  $\Gamma K$ 、 $MK$ 、及  $K\Gamma$  三個相位上皆有同樣的狀態。此外，邏輯閘的功能分析使用Finite-Difference Time-Domain (FDTD)方法[19]。模擬的執行結果如圖4所示。如圖4(a)(b)所示，輸出能量皆低於傳播能量23%，而圖4(c)顯示輸出能量高於傳播能量70%以上。此模擬結果驗證了我們設計的光學邏輯閘的邏輯運算功能。



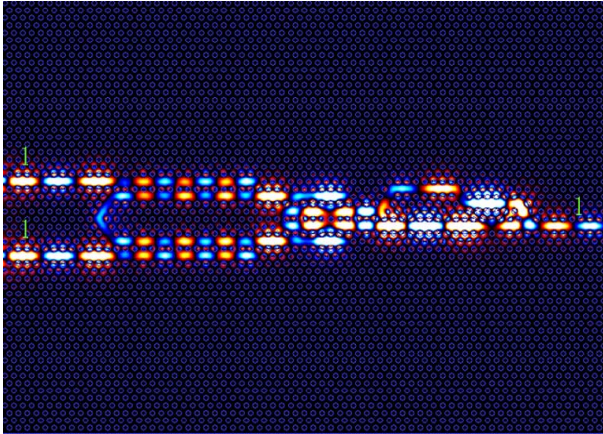


圖4(c) 光學AND閘輸入(1,1)之邏輯運算行為

### III. 結論

本論文中，一個新穎的光子晶體全光式 AND 邏輯閘首次被發表。元件尺寸可以縮小至數十倍甚至百倍、且彎曲角度優於傳統的波導元件是它的優點。本次研究中，提出在三角晶格陣列的光子晶體中，經由二維的 FDTD 模擬全光式邏輯閘(AND 閘)，證實了其設計符合 AND 邏輯閘的邏輯運算功能，應用簡易的梯形干涉區域結構並選擇適當的參數數據即可執行此研究，並且傳輸信號具有高於 70% 的傳播穿透量；此外，這類型的多輸入端 AND 閘在未來同樣可以應用於光學數位系統中。

### REFERENCES

- [1] S. A. Hamilton et al, IEEE Photon. Tech. Lett. 14 (2002) 209..
- [2] University, 1974. Wen-Ching Chang, Hung-Jen Wang, Hsueh-Hui Lin, Shih-Wan Weng, and Pei-Sang Tsai, "A Novel Multimode Interference Optoelectronic AND Gate with Partial Index-Modulation Regions," IEEE Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications, 2001 International Symposium on., vol. , no. 343, pp. 335-337, Nov. 2001.
- [3] T. Fjelde et al, IEEE Photon. Tech. Lett. 13. (2001).
- [4] J. Y. Kim et al , J. Lightw. Technol. 24 (2006)
- [5] K. Nakatsuhara, S.-H. Jeong, Y. Tsukishima, T. Mizumoto, B.-J. Ma, and Y. Nakano, "Demonstration of all-optical AND gate operation in a GaInAsP waveguide," IEEE Lasers and Electro-Optics, 1999. CLEO/Pacific Rim '99. The Pacific Rim Conference on., vol. xii+1335, no. 4, pp. 704-705, 30 Aug.-3 Sept. 1999.
- [6] T. A. Ibrahim et al , IEEE Photon. Technol. Lett. 15 (2003) 1422.
- [7] O. Painter, R. K. Lee, A. Scherer, A. Yariv, J. D. O'Brien, P. D. Dapkus, and I. Kim, "Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser," Science **284**, 1819 (1999).
- [8] H. G. Park, S. H. Kim, S. H. Kwon, Y. G. Ju, J. K. Yang, J. H. Baek, S. B. Kim, Y. H. Lee, "Electrically driven Single-Cell Photonic Crystal Laser," Science **305**, 1444-1447 (2004).

- [9] B. S. Song, S. Noda, T. Asano, and Y. Akahane, "Ultra-high-Q photonic double-heterostructure nanocavity," Nat. Mater. **4**, 207-210 (2005).
- [10] M. Tokushima and H. Yamada, "Light propagation in a photonic-crystal-slab line-defect waveguide," IEEE J. Quantum Electron. **38**, 753-759 (2002).
- [11] A. Sugitatsu, T. Asano, and S. Noda, "Characterization of line-defect-waveguide lasers in two-dimensional photonic-crystal slabs," Appl. Phys. Lett. **84**, 5395-5397 (2004).
- [12] S. Fan, P. R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, "Channel drop tunneling through localized states," Phys. Rev. Lett. **80**, 960-963 (1998).
- [13] Z. Zhang and M. Qiu, "Compact in-plane channel drop filter design using a single cavity with two degenerate modes in 2D photonic crystal slab," Opt. Express **13**, 2596-2604 (2005).
- [14] B. K. Min, J. E. Kim, and H. Y. Park, "High-efficiency surface-emitting channel drop filters in two dimensional photonic crystal slab," Appl. Phys. Lett. **86**, 111106 (2006).
- [15] A. Shinya, S. Mitsugi, E. Kuramochi, and M. Notomi, "Ultrasmall multi-channel resonant-tunneling filter using mode gap of width-tuned photonic crystal waveguide," Opt. Express **13**, 4202-4209 (2005).
- [16] H. Takano, B. S. Song, T. Asano, and S. Noda, "Highly efficient multi-channel drop filter in a two dimensional hetero photonic crystal," Opt. Express **14**, 3491-3496 (2006).
- [17] M. F. Yanik, S. Fan, and M. Soljacic, "High-contrast all-optical bistable switching in photonic crystal microcavities," Appl. Phys. Lett. **83**, 2739-2741 (2003).
- [18] X. Hu, P. Jiang, C. Ding, H. Yang, and Q. Gong, "Picosecond and low-power all-optical switching based on an organic photonic bandgap microcavity," Nat. Photonics **2**, 185-189 (2008).
- [19] A. Taflov, Computational Electrodynamics, Artech House Boston, (1995).