

光子晶體單光子光源之品質研究

中央大學物理系暨

奈米科技研究中心 徐子民 張翔思 陳文彥

一、研究背景

單光子光源(single-photon source)是發展量子資訊(quantum information)所需要的光源[1]，尤其是量子編碼(quantum cryptograph)[2]。早期單光子光源以低密度原子氣體為發光物質，最近則以半導體量子點來取代。這是由於半導體量子點有類似原子的物理特性[3-6]，而且也比較容易耦合到半導體光電元件，未來可被用來製作電激發型的固態單光子光源[5]。但在量子點發光層的成長之中，量子點是被埋在高折射率的半導體介質中，量子點的發光萃取效率(extraction efficiency)因全反射而變得非常低。為了克服這個困難，量子點必須被放置在一個精緻的共振腔內，來改善發光強度及自發性輻射速率(spontaneous emission rate)。在過去幾年之中，用來製作量子點單光子光源的共振腔包含微米圓盤(microdisk)[3]、微米柱子(micropost)[4]、及光子晶體共振腔(photonic crystal nanocavity)[8]。

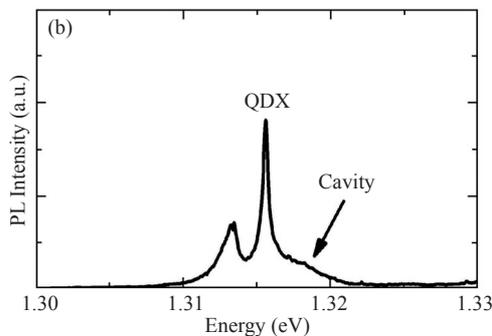
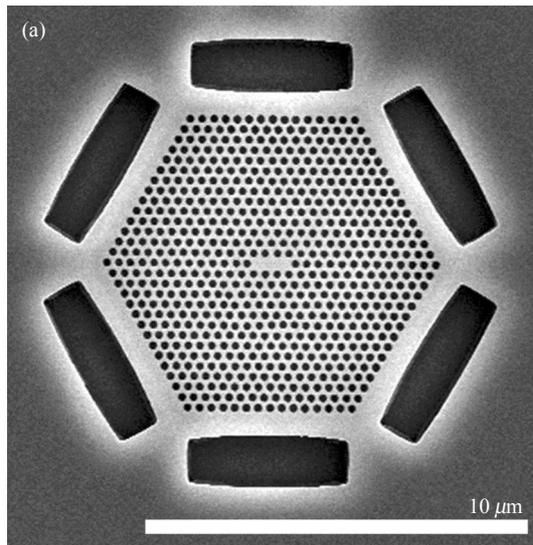
最近的單光子研究傾向於使用光子晶體共振腔，來製作單光子光源。因為它除了具有高品質因子(quality factor)及超小模態體積外，也可藉由腔體的設計來控制共振模態波長、極化形態、及輻射強度等特性[9]。由於光子晶體共振腔具有這些優點，因此它可用來提昇量子點與共振腔的耦合效率，以製作高品質的單光子光源。我們的研究團隊在這幾年之中已應用光子晶體共振腔完成高耦合效率、單模且高溫度穩定性的單光子光源[6,7]。但在最近的實驗之中，我們發現量子點輻射與共振腔共振，除了提昇耦合效率之外，另一方面卻也增加了多重光子輻射的機會。由於多重光子的輻射會劣化單光子的純度，並嚴重的影響到單光子光源在量子編碼的應用，因此探討造成多重光子產生的原因，對製作高品質單光子光源有重大的意義。

二、實驗研究方法

本實驗所使用的砷化銦鎵自聚性(self-assembled)量子點是利用低壓有機金屬化學氣相磊晶(MOCVD, Metal-Organic Chemical Vapor Deposition)來成長的。在砷化鎵基板上成長完一層 500 nm 厚的砷化鋁鎵之後，再成長一層中間夾有一層低密度砷化銦鎵量子點的砷化鎵波導層。在磊晶條件優化之後，這一層量子點的密度非常低，使得每一個共振腔中量子點的數目可以被控制在一至兩顆之間。在磊晶完成之後，我們在試片表面用電漿輔助化學氣相磊晶(PECVD, Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition)以及旋轉塗佈機鍍上一層 100 nm 的 SiN 和一層 200 nm 的 PMMA (polymethylmethacrylate)。光子晶體圖形首先利用電子束微影先寫在 PMMA 上，再利用乾蝕刻技術將光子晶體結構先轉移到 SiN 的硬式遮罩(hard mask)，之後再蝕刻到砷化鎵上。而底層的砷化鋁鎵犧牲層則用氫氟酸蝕刻掉後將光子晶體形成懸浮的薄膜。圖一(a)顯示我們所製作的光子晶體共振腔的電子束掃描影像圖(SEM)。此光子晶體結構是由三角晶格的孔洞所組成。其中，空氣孔洞的週期(a)為 300 nm 而空氣洞的半徑(r)為 $0.31a$ ，此種結構所對應的光子能隙波長剛好在 0.9-1.2 微米的範圍。奈米共振腔的製作則藉由在光子晶體結構中移去同一線上的三個空氣孔洞而形成 $L3$ 缺陷共振腔。其中，線共振腔兩邊的孔洞則被往外移動約 $0.1a$ 的距離以提昇發光品質。

三、實驗結果

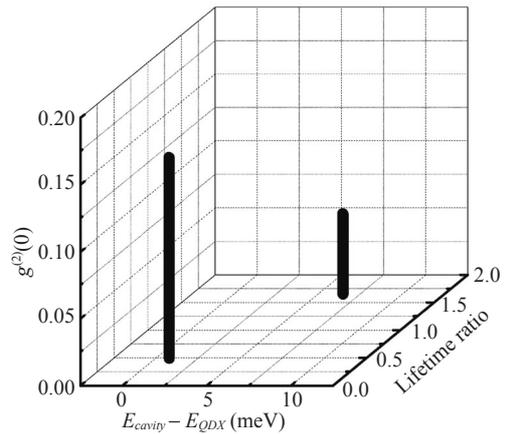
在此實驗中，我們利用微螢光光譜(micro-photoluminescence)來探測量子點與共振腔輻射的耦合狀況。圖一(b)為光子晶體共振腔試品所量測到的微螢光光譜。此圖顯示量子點激子輻射譜線與共振腔模態相互共振，因為從光譜可



圖一 (a)光子晶體共振腔的電子束掃描影像圖。(b)共振腔模態(cavity)與量子點激子(QDX)輻射的微螢光光譜圖

看到較細的激子輻射譜線座落在一個較寬的共振腔模態譜線之上。若量子點激子輻射譜線不與共振腔模態相互共振，則較細之激子輻射線並沒有與較寬的模態譜線之頂峰重疊。

單光子光源的單光子純度是藉由HB-T干涉儀的二次相干函數($g^{(2)}(0)$)來量測[3-7]。相干函數的量測是使用 1.55 eV 脈衝式雷射來做為激發量子點激子的光源。圖二是兩個不同的量子點激子的相干函數量測結果，這兩個量子點激子與共振腔模態的輻射能量差(共振失調： $\Delta E = E_{\text{cavity}} - E_{\text{QDX}}$)是不同的，這代表著其中一個量子點激子有較小共振失調($\Delta E < 1$ meV)；而另外一個量子點激子則有較大之共振失調($\Delta E \sim 7$ meV)。對於一個理想的單光子光源而言，相干函數 $g^{(2)}(0) = 0$ ，這種現象稱之為單光子反成束(photon antibunching)。在我們所量測的量子點激子輻射之中，我們觀察到較小共振失調有較大之



圖二 所測得的二次相干函數隨著量子點激子與共振腔模態輻射的共振失調的變化，量子點激子的生命期與濕潤層激子的生命期的比值亦列入比較

$g^{(2)}(0)$ ，此即較小的共振失調有較差之單光子純度。這顯示在量子點激子輻射譜線與共振腔模態共振時，會產生一些不可忽略的多重光子輻射。而這些多重光子輻射，可歸因於激子再捕捉的效應(exciton recapture effect)。當我們使用 1.55 eV 脈衝式雷射去激發砷化鎵激子時，激子會快速掉進砷化鎵濕潤層(wetting layer)的能階，然後再被量子點所捕捉。只要激子停留在量子點的生命期(τ_{QD})比在濕潤層激子的生命期(τ_{WL})來的長，每一個激發脈衝只輻射出單光子是可以保證的。但是，如果這個前提不能夠滿足的話($\tau_{\text{QD}} < \tau_{\text{WL}}$)，將會有可觀的激子在量子點激子輻射之後，仍存在於濕潤層之中。這些持久的濕潤層激子會在量子點激子輻射之後，再很快的被量子點所捕捉，進而導致在同一個激發脈衝時間裡產生多重光子的輻射[10]。

為了印證激子再捕捉效應，我們利用時間解析螢光光譜(time-resolved photoluminescence)來量測激子在量子點與濕潤層的生命期。當量子點激子與共振腔模態共振有小於 1 meV 失調時，所測得的生命期為 0.28 ns；但在共振失調為 7 meV 時，其激子生命期便因光子能隙的作用而被壓抑至 0.94 ns。比較激子在溼潤層的生命期(0.57 ns)，當量子點激子與共振腔接近共振時，所量測到的量子點激子的生命期比溼潤層激子的生命期短了約一半。因此，明顯的激子再捕捉效應是可以被預期。然而，對於較大共

振失調的量子點激子而言，其生命期比濕潤層激子的生命期長約 1.6 倍，因此可以得到較純的單光子光源。

為了製作高耦合效率的單光子光源元件，量子點激子輻射必須與共振腔模態共振，然而量子點激子卻因共振所產生的生命期變短，而增加激子再捕捉效應的機率，因此抑制激子再捕捉效應是一件很重要的課題。在激子再捕捉的過程之中，濕潤層一直扮演著激子儲存槽的角色，因此如果能利用能量低於濕潤層能階的光源去激發量子點，就可以有效的抑制激子再捕捉效應。我們的實驗結果顯示利用這種方法可以有效的改善光子晶體單光子輻射的純度品質到 $g^{(2)}(0) = 0.03$ 。

四、結語

在這個研究中，我們發現當量子點的激子輻射與光子晶體共振腔模態共振時，其單光子輻射的純度品質有惡化的趨勢。我們推測純度惡化來自於激子再捕捉的過程中，量子點激子在一個激發脈衝時間裡產生的多重光子輻射。對於光激發光源而言，我們提出解決激子再捕捉效應的方案。此即，只要利用能量低於濕潤層能階的光源去激發量子點，就可以有效的抑制激子再捕捉效應。然而，對於未來要發展的電激發單光子光源，激子是由量子點周圍的材料灌進量子點，因此激子再捕捉效應將無法避免。我們未來的工作將朝向光子晶體共振腔結構的設計來改善單光

子輻射的品質。

致謝

我們很感謝中央大學電機系綦振瀛教授及其團隊的支援。感謝中央大學光電中心及奈米科技研究中心在儀器設備上的提供。此外，我們也感謝交通大學電子物理系張文豪教授的協助。最後，感謝國科會在研究經費上的補助。

參考資料

- [1] E. Knill, R. Laflamme, and G.J. Milburn, *Nature (London)*, **409**, 46 (2001).
- [2] N. Gisin et al., *Rev. Mod. Phys.*, **74**, 145 (2002).
- [3] P. Michler et al., *Science*, **290**, 2282 (2000).
- [4] C. Santori et al., *Phys. Rev. Lett.*, **86**, 1502 (2001).
- [5] Z. Yuan et al., *Science*, **295**, 102 (2002).
- [6] W.-H. Chang et al., *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 117401 (2006).
- [7] W.-Y. Chen et al., *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 211114 (2007).
- [8] E. Yablonvitch et al., *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 2059 (1987).
- [9] J. Vučković et al., *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 2374 (2003).
- [10] E. Peter et al., *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 233118 (2007).