

知識天地

高效率微奈米共振腔雷射 (High Efficient Micro-/Nano-Cavity Lasers)

楊怡君研究助理、施閔雄助研究員(應用科學研究中心)

雷射的概念自1960年由Schawlow及Townes提出[1]後，引起科學界相當大地興趣，1960年紅寶石雷射率先問世[2]，而後1962年砷化鎵(GaAs)半導體雷射也緊接出現[3-5]，因半導體雷射體積小、壽命長且穩定性高目前已廣泛地應用在許多不同領域中，例如光纖通訊、光儲存與雷射列印、分子光譜與生物醫學、軍事以及娛樂用途。雷射系統基本上是由激發源(pumping source)、增益材料(gain material)與光學共振腔(optical cavity)組合而成，其運作原理是激發源輸入電能或光能使增益材料中的電子吸收並躍遷至激發態，待導電帶中的電子濃度達居量反轉(population inversion)後與價電帶中的電洞大量結合成電子電洞對並放出光子，以達到受激輻射(stimulated emission)之狀態，而光學共振腔可侷限光子、選擇操作模態並使其重覆前述過程以達到雷射增益效果。換句話說，絕大多數雷射元件在達到雷射閾值(threshold)之前，都必須經過吸收能量的過程，才會大量輸出單頻、高同調性、高準直性、高強度、高度相干性的雷射光束，如圖一(a)所示。地球的能源在未來終有枯竭之時，當前除了致力於開發新能源以外，節制已開發能源的使用也是相當重要的議題，如何降低閾值、減少為了放出雷射光而必須消耗的能量，即為高效率的零閾值雷射(threshold-less laser)是光電領域中許多研究學者的目標之一。

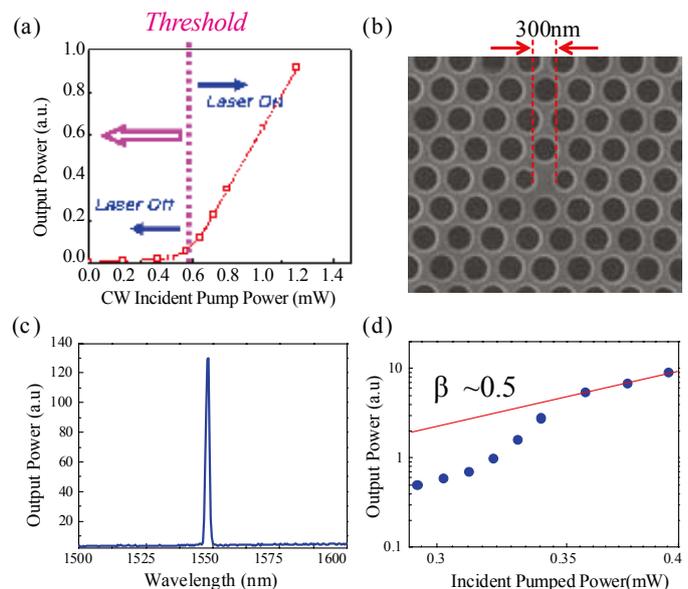
市面上常見的半導體雷射種類有Fabry-Perot邊射型雷射(edge-emitting laser)、分佈式回饋單頻雷射(DFB laser)與垂直共振腔面射型雷射(VCSEL)等等，其最明顯之差異在於光學共振腔的形式。光學共振腔侷限光子的能力優劣以品質因子(quality factor, Q)量化說明，品質因子的定義是在單一週期內光學共振腔所儲存的能量與漏失的能量之比值，簡單來說，光子存在增益材料中的機率會因光學共振腔擁有高品質因子而大大提升，產生自發輻射(spontaneous emission)的機率也隨之提高。自發性輻射增益的程度由Purcell factor(F_p)[6]表示，

$$F_p = \frac{3}{4\pi^2} \left(\frac{\lambda_c}{n} \right)^3 \left(\frac{Q}{V_m} \right),$$

λ_c 為發光波長， n 為材料折射率，Purcell factor與品質因子(Q)成正比但與雷射模態體積(mode volume, V_m)成反比，為了提高Purcell factor，大多數研究皆從提高共振腔品質因子或縮小雷射模態體積著手。若Purcell factor極高，自發輻射耦合因子 β (spontaneous emission coupling factor $\beta = F_p / (F_p + 1)$)會趨近於1，即自發輻射耦合至受激輻射的比例趨近於1，則雷射閾值趨近於零，此為超高效率之半導體雷射。

在本文內的第一個例子是利用光子晶體(photonic crystals)構成一個極微小的共振腔，並保持很高的 Q 值，來得到一個極高的Purcell factor值，以達成很高的自發輻射耦合因子 β 。圖一(b)為在磷化銦(InP)基板上

製作的光子晶體奈米共振腔之SEM照片，其尺寸約為 $300 \times 450 \text{ nm}^2$ 大小，經由模擬計算推估其模態體積僅 $0.02 \mu\text{m}^3$ 。



圖一 (a) 光激發半導體雷射閾值示意圖 (b) 製作在磷化銦基板上的光子晶體奈米共振腔雷射，在實驗中獲得其雷射頻譜圖 (c) 與 L-L 曲線 (d)。

此雷射系統中使用的增益材料磷化銻包含了四層砷磷化銻鎵(InGaAsP)的量子井，材料中具有電子-電洞的侷限力，可使區域載子濃度增加以利提高增益效率。圖一(c)與(d)分別為此雷射之雷射頻譜與L-L曲線 (light-in and light-out curve)，其發光波長為1548 nm在常用通訊波長1550 nm附近，且由圖一(d)曲線得知，此光子晶體奈米雷射之入射工作閾值僅需0.34 mW，且此雷射之自發輻射耦合因子 β 高達0.5，遠遠高於邊射型雷射的 β 值 $10^{-4}\sim 10^{-5}$ 以及垂直共振腔面射型雷射 β 值約 $10^{-2}\sim 10^{-3}$ ，為一效率極高的半導體雷射。

第二個例子為如何利用奈米圓盤共振腔和量子點增益材料之間的結合，來達到極低的雷射工作閾值及

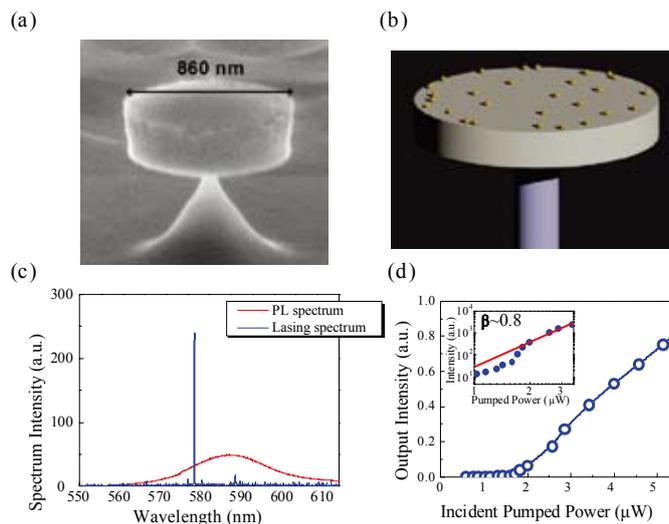
極高的自發輻射耦合因子 β 。圖二(a)為一製作在矽基版上之奈米圓盤(nanodisk)，直徑約為800 nm，該奈米圓盤上佈滿膠狀硒化鎘/硫化鋅量子點(CdSe/ZnS QDs)，如圖二(b)所示。相較於前述量子井結構，量子點具有三維度的電子侷限力會使得區域載子濃度更為集中。在此奈米圓盤雷射上，我們希望藉由量子點(增益材料)的存在位置與矽微米圓盤(光學共振腔)的模態體積耦合極佳，進一步提高Purcell factor使得自發輻射耦合因子 β 趨近於一，我們寄望能在此結構上實現超高效率半導體雷射。圖二(c)與(d)分別為此奈米圓盤雷射在實驗上所獲得的雷射頻譜與L-L曲線，其雷射波長為578 nm，屬可見光範圍，由L-L曲線可知，此奈米雷射工作閾值僅需2 μ W，並可推估其自發輻射耦合因子 β 高達0.8，我們相信若可以精準控制量子點分佈狀況，與光學共振腔模態配合，發展出極低閾值的半導體雷射是指日可待之事。

結論

本實驗團隊追求零閾值雷射的研究工作，由設計具極小模態體積之光學共振腔以及提高增益材料與共振腔模態耦合程度兩方面著手，前者研究工作中使用最常見的半導體雷射增益材料“量子井”，並製作出模態體積僅0.02 μm^3 之光子晶體雷射，其自發輻射耦合因子可達0.5；後者使用膠狀量子點鋪灑在矽奈米圓盤上，此矽奈米圓盤雷射在實驗上觀測到的自發輻射耦合因子高達0.8，與理論上零閾值雷射 β 等於一已不遠矣。

參考文獻

1. A. L. Schawlow and C. H. Townes, Phys. Rev. 112, 1940 (1958).
2. T. H. Maiman, Nature 187, 493 (1960).
3. R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, Phts. Rev. Lett. 9, 366 (1962).
4. N. Holonyak Jr. and S. F. Bevacqua, Appl. Phys. Lett. 1, 82 (1962).
5. T. M. Quist, R. H. Rediker, R. J. Keyes, W. E. Krag Lax, A. L. McWhorter, H. J. Zeigler, Appl. Phys. Lett 1, 91 (1962).
6. E. M. Purcell, Phys. Rev. 69, 681 (1946).



圖二 (a) 直徑約 800 奈米的矽微米圓盤，其上佈滿膠狀硒化鎘 / 硫化鋅量子點，如 (b) 所示，經過測量實驗獲得其雷射頻譜圖 (c) 與 L-L 曲線 (d)，其 β 高達 0.8。