

# 應用處於週期一振盪的光注入半導體雷射於微波光電傳輸

陳仕俊<sup>1</sup>、黃勝廣<sup>2\*</sup>、劉佳明<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 電機工程學系，美國加州大學洛杉磯分校

<sup>2</sup> 光電工程學系，國立成功大學

\*Email: [skhwang@mail.ncku.edu.tw](mailto:skhwang@mail.ncku.edu.tw)

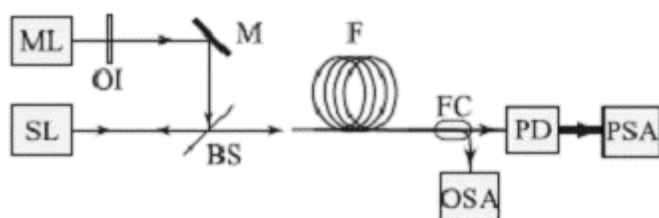
Optics Express 15 (22), 14921 (2007)

## 微

波光電子學(Microwave Photonics)在過去十年中吸引相當多的學術研究和產業研發 [1]，其中一個重要的驅動力量在於利用光纖通訊技術來傳遞微波訊號的需求大幅增加 [2]。在此一微波光纖傳輸(Radio-Over-Fiber, RoF)系統中，中央處理機房與遠端的基地台間，藉由光纖中的光波來傳輸載有訊號的微波。遠端的基地台則利用光偵測器將微波擷取出來，並利用無線的方式將訊號傳遞至最終接收者。RoF的優勢在於將昂貴的設備集中在中央處理機房，以降低硬體、維修與管理的成本，同時亦可有效的將微波訊號傳輸至遠端。然而，由於光訊號的雙旁模(Double Sideband, DSB)特性，大多數的RoF系統非常容易受到光纖色散的影響而導致微波功率的衰減，進而影響無線部分的傳輸 [3]。這個問題可以利用單旁模(Single Sideband, SSB)調變的方式來改善，因此有許多SSB光源系統被研發出來，例如外插式雙雷射系統、SSB電光調變雷射系統、多區段雷射系統、濾波式直接調變雷射系統。然而，這些SSB光源系統通常在微波的穩定性、光波的效能或微波頻率的可調性上有著相當程度的不足。



在這個研究中，我們將一個遭受外部光注入的半導體雷射系統研發成一個具有上述特性的SSB光源。



源。

圖 1. 系統裝置的簡要架構。ML:主雷射; SL:副雷射; OI:光隔離器; M:鏡子; BS:分光鏡; F:光纖; PD:光偵測器; PSA:微波頻譜分析儀; OSA:光波頻譜分析儀。

圖1為此一雷射系統的簡要架構。主雷射(ML)的輸出光注入到一個單模的副雷射(SL)，接著將副雷射的輸出光送到一個檢測系統，以監測其光波和微波的頻譜。注入到副雷射的光將誘發出副雷射的非線性動態，使其進入週期一振盪(Period-One Oscillation) [4]。這樣的一個振盪使得副雷射的輸出光載有一個微波調變，因此形成一個可以產生微波訊號的雷射系統。這個系統所產生的微波頻率不但可調，而且可調的範圍遠大於原副雷射的調變頻寬。在我們的研究中發現，這個系統可以產生一個頻率大於六倍副雷射鬆弛振盪頻率(Relaxation Oscillation Frequency)的微波訊號，相當於60 GHz。因此，這個系統不需要光能量損耗大的外部調變器來產生微波訊號。此外，所產生的微波訊號可藉由微波鎖頻的方法來穩定之。同時，藉由注入條件的調整，這個系統所產生的光訊號可以近似SSB，以消除光纖色散所造成的功率衰減。根據我們

的研究結果顯示，這個處於週期一振盪的光注入半導體雷射是應用於RoF系統中一個理想的選擇。

圖2呈現兩個在不同注入條件下所形成之週期一振盪的光譜，兩者的主雷射光頻  $f_i$  皆設定為高於副雷射光頻20 GHz，但其注入光的強度  $\xi_i$  並不相同。兩者的光譜由出現在光頻  $f_i$  的再生注入光，以及等頻率相隔的許多旁模所組成，而該頻率即為光波上的微波調變頻率，或稱作週期一振盪頻率  $f_0$ 。然而，這些組成成分的相對光強度以及  $f_0$  會隨著注入光強度的改變而改變。如圖2(a)所示，當  $\xi_i = 0.065$  時，該週期一振盪的主要訊號出現在  $(f_i - f_0)$  處，而  $f_0$  大約為20 GHz。同時，在這個主要訊號的兩旁  $(f_i - 2f_0)$  和  $f_i$  處各出現一個光強度相近的訊號。因為這兩個旁模的光強度差大約在3dB左右，所以這個週期一振盪可被視為一近似DSB的光訊號。然而當  $\xi_i = 0.268$  時(如圖2(b)所示)，這個週期一振盪的主要訊號卻出現在注入光的光頻  $f_i$  處，而且  $f_0$  變成30 GHz。同時，在這個主要訊號的兩旁  $(f_i - f_0)$  及  $(f_i + f_0)$  處亦各出現一個訊號，然而兩者的光強度卻相差21 dB之多。這樣一個光強度極不對稱的特徵非常近似SSB，因此這個週期一振盪非常適合應用於低微波功率衰減的RoF系統。因此，隨著注入條件的不同，處於週期一振盪的光注入雷射系統將可以產生DSB或SSB特徵的光輸出，同時產生不同的週期一振盪頻率  $f_0$ 。為此，我們將在下面的討論中分析這個雷射系統最佳的光注入條件。

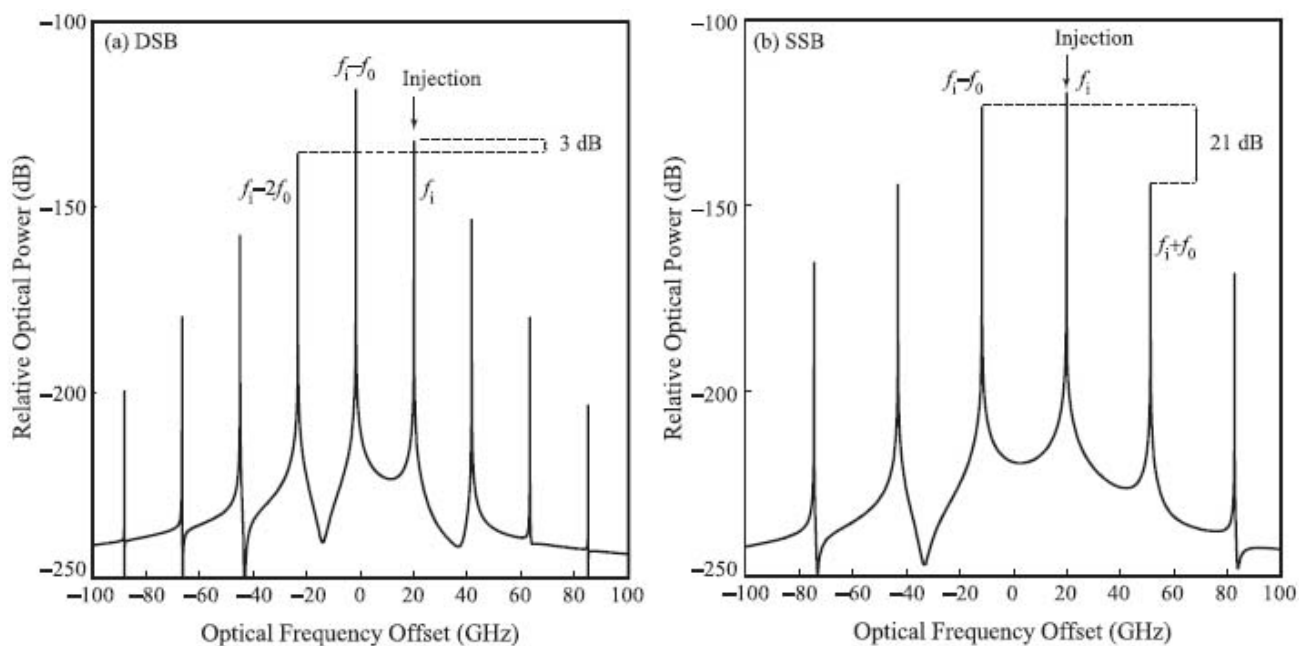


圖2. 兩個在不同注入條件下所形成之週期一振盪的光譜。(a) DSB週期一振盪， $(\xi_i, f_i) = (0.065, 20: \text{GHz})$ ，(b) SSB週期一振盪， $(\xi_i, f_i) = (0.268, 20: \text{GHz})$ 。橫軸上的讀值是相對副雷射光頻的頻率值。

圖3呈現  $f_0$  隨不同的  $\xi_i$  和  $f_i$  而改變的等高線圖。由圖中可以得知，週期一振盪在穩定鎖住區中沿著Hopf分歧線的上方佔有一非常大的區域。同時，在整個週期一振盪區內都呈現出  $f_0$  隨著注入強度  $\xi_i$  的增加而增加。我們發現這個系統可以產生一個約為60 GHz的微波訊號，相當於六倍的副雷射鬆弛振盪頻率。頻率更高的微波訊號可藉由增加  $f_i$  值來達成，而最大的  $f_0$  值將取決於雷射Free Spectral Range。就邊射型雷射而言，Free Spectral Range一般為數百個GHz。其實在這個系統中，我們已經在實驗上觀察到高於100GHz的週期一振盪。

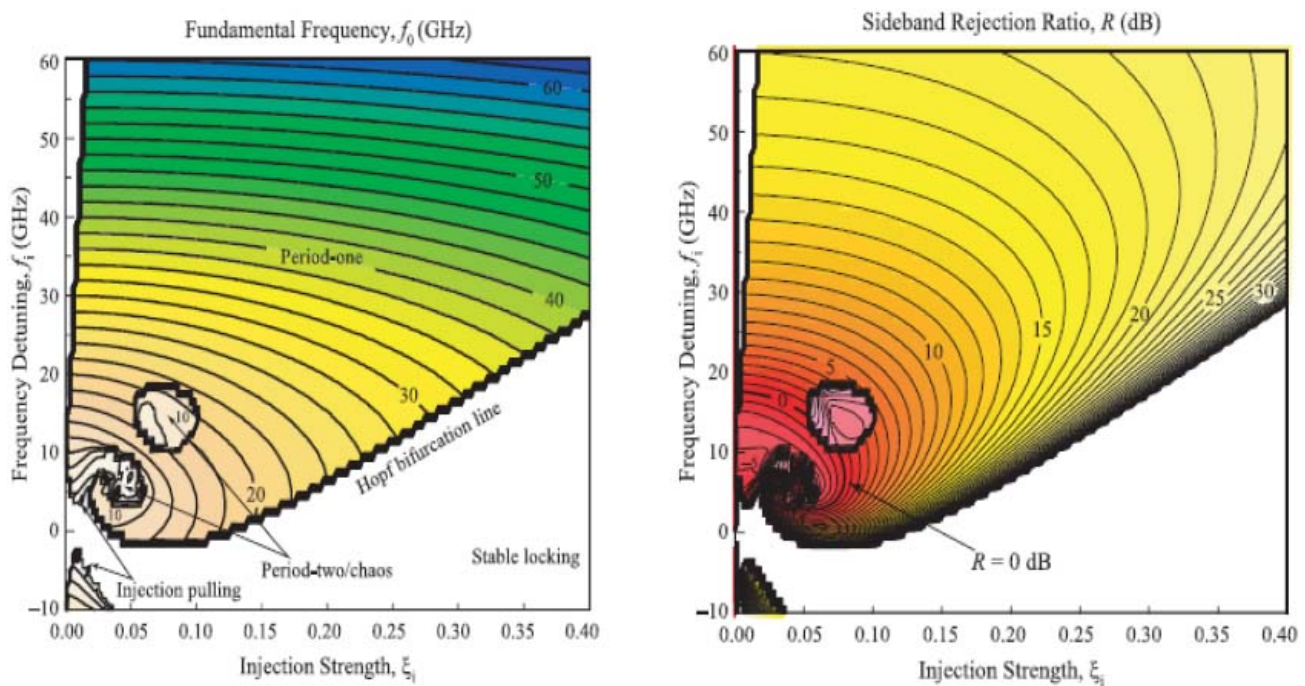


圖3. 週期一振盪頻率 $f_0$  (左圖)和Sideband Rejection Ratio  $R$  (右圖)的等高線圖。

由圖2我們可以發現，週期一振盪主要由一個處於 $(f_i - f_0)$ 的中心載波及其兩旁位於 $(f_i - 2f_0)$ 和 $f_i$ 的訊號所構成，其他頻率成分的光強度則相對微弱很多，因此對系統的影響是微弱到可以被忽略。取決於 $(f_i - 2f_0)$ 和 $f_i$ 這兩個訊號的相對光強度，我們發現這個系統所產生的SSB訊號將只由位於 $(f_i - f_0)$ 和 $f_i$ 的兩個頻率成分所組成，而DSB的訊號將會由位於 $(f_i - f_0)$ 的主要訊號以及兩個分別位於 $(f_i - 2f_0)$ 和 $f_i$ 且光強度相同的旁模所構成。因此，我們可以利用Sideband Rejection Ratio ( $R$ )來描述這個系統所產生的光訊號與SSB的相似程度，而這個 $R$ 值在此定義為 $f_i$ 和 $(f_i - 2f_0)$ 這兩個訊號的光強度比值。圖3呈現 $R$ 隨不同的 $\xi_i$ 和 $f_i$ 而改變的等高線圖。沿著0-dB等高線，我們發現週期一振盪的光訊號特徵為DSB。但當注入條件離0-dB等高線越遠，我們則發現有越來越多趨向SSB特徵的週期一振盪。在Hopf分歧線的附近，我們可以輕易找到 $f_i$ 比 $(f_i - 2f_0)$ 大20dB的週期一振盪，這樣的光訊號特徵在實用上已經可以當成是SSB。因此，為降低因光纖色散而導致的微波功率衰減，我們可以將此雷射系統操作在這個區域內。

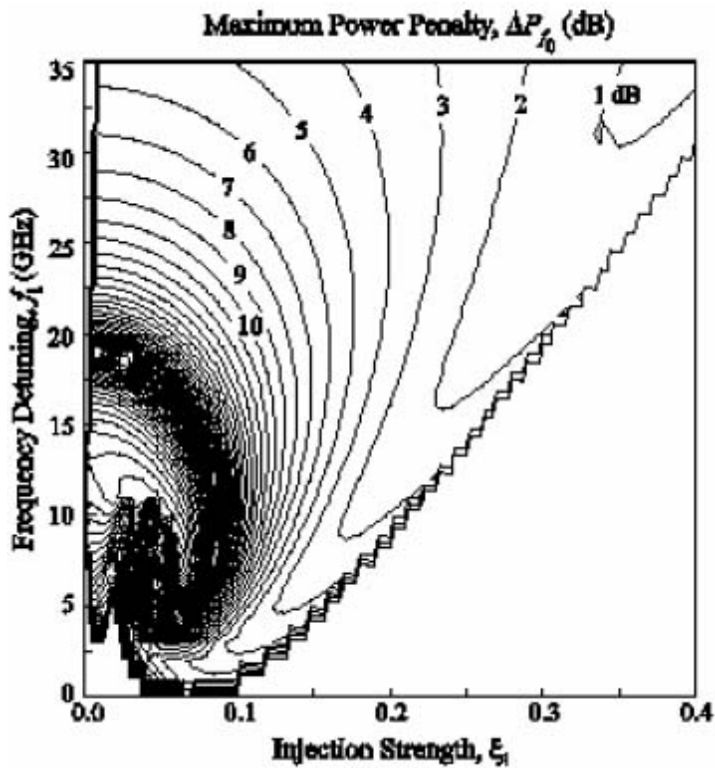


圖4. 不同週期一振盪於光纖中傳播後的最大微波功率衰減量。

圖4呈現不同週期一振盪於光纖中傳播後的最大微波功率衰減量。我們發現在Hopf分歧線上方的區域，微波功率衰減的程度較小，與我們在圖3中所觀察到的SSB區域相吻合。綜合圖3與圖4的結果，我們發現如果3 dB是可以被容忍的最大微波功率衰減量，週期一振盪頻率 $f_0$ 可以在相當大的範圍內(22至62 GHz)作調整。因此，對於在RoF的應用上，適當注入條件下的週期一振盪將會是一個降低微波功率衰減量的理想方法。

在這個研究中，我們應用處於週期一振盪的光注入半導體雷射於RoF系統，並分析該雷射系統的相關特性。這個系統所產生的微波頻率不但可調，而且可調的範圍比原雷射的鬆弛振盪頻率大六倍。此外，在這可調的範圍內，不但微波的輸出功率幾乎保持不變，同時光訊號的特徵近似SSB。因此，就算發生最嚴重的微波功率衰減情況，仍有相當大的範圍來調整週期一振盪的頻率，並保持相近的微波功率。我們的研究結果顯示，處於週期一振盪的光注入半導體雷射是一個相當適合應用於經由光纖來傳輸微波訊號的系統。

#### References:

- A. J. Seeds, "Microwave photonics," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **50**, 877–887 (2002).
- C. Lim, A. Nirmalathas, D. Novak, R. Waterhouse, and G. Yoffe, "Millimeter-wave broad-band fiber-wireless system incorporating baseband data transmission over fiber and remote LO delivery," *J. Lightwave Technol.* **18**, 1355–1363 (2000).
- G. H. Smith, D. Novak, and Z. Ahmed, "Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **45**, 1410–1415 (1997).
- S. K. Hwang, J. M. Liu, and J. K. White, "Characteristics of period-one oscillations in semiconductor lasers subject to optical injection," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **10**, 974–981 (2004).