

利用半導體雷射之非線性動力特性進行全光頻率轉換

黃勝廣^{1*}、陳浩夫²、林哲揚³

¹國立成功大學 光電工程學系

²國立陽明大學 生醫光電研究所

³國立中正大學 光機電整合工程研究所

skhwang@mail.ncku.edu.tw

Optics Letters 34 (6), 812-814 (2009)

在目前的光纖通訊中，波長分工多工(wavelength division multiplexing)是一個能大幅提升光纖資訊傳輸量的科技 [1,2]，要使此科技被實際應用，其中一關鍵配合技術為頻率轉換(frequency conversion)。此類頻率轉換技術乃將入射光的頻率轉換成另一頻率，並同時盡量保持其所傳輸的數據訊號之完整性。目前有相當多的方法被提出，其中最直接的方法乃將某一頻率的入射光所載之數據訊號，以光檢測器擷取出來成為電訊號，接著將該電訊號直接調制一個輸出光頻率與入射光頻率不同的半導體雷射。然而，該方法的缺失(例如，系統的複雜性與耗電量)迫使科學家轉向研究所謂的全光(all-optical)方法，亦即頻率的轉換不需要先將光轉成電後再轉成光，而是直接將光轉成光。這樣的方法不但降低系統的複雜性與耗電量，同時也大幅提升系統的彈性與重組性。然而，目前所提出之全光方法(例如，利用半導體光放大器的增益調制)，除待轉換的入射光外，大多需要一額外且高強度的雷射光源，而且大多也僅能允許特定調制格式的數據訊號。此外，可轉換的頻率通常是固定的，或其調整需要非常複雜的過程。這些特性意味目前所提出之全光方法需要複雜的系統結構與操作，同時所能發揮的功能相當有限。

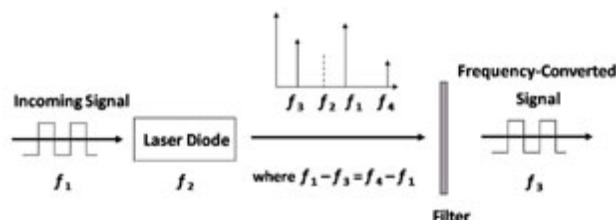
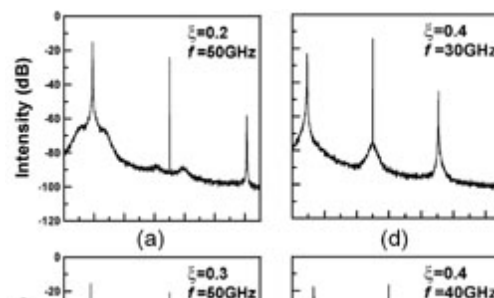


圖 1. 系統的簡要架構。

在此論文中，我們將討論如何利用半導體雷射之週期一非線性動態行為(period-one nonlinear dynamics)進行全光頻率轉換。圖1為此一系統架構的簡要說明。一頻率為 f_1 的待轉換光入射一頻率為 f_2 的半導體雷射，迫使該雷射振盪於 f_1 而非 f_2 。然而，該雷射所需的增益因外部注入光的引進而產生變化，導致雷射增益介質中電子電洞對的數目減少。因為反導引效應(antiguide effect)，這會改變該增益介質的光學

折射係數，而導致雷射腔共振頻率的紅移而小於 f_2 。因此，雷射腔內部同時存在兩股力量(紅移的雷射腔共振與注入光強迫的雷射振盪)在進行對抗與競爭，進而大幅改變該雷射的動力特性。在適當的操作條件之下，這可經由Hopf分歧(Hopf bifurcation)過程而產生不同於 f_1 的 f_3 與 f_4 訊號，這種雷射輸出光的頻率組合乃一典型的週期一非線性動態[3,4]。若入射光載有數據訊號，則該雷射增益介質中的電子電洞對數目與光學折射係數，將根據該數據訊號隨時間變化的情形而改變，如此便能將該數據訊號轉譯於 f_3 與 f_4 上。透過適當的光學濾波器，我們可得到一頻率被轉換至 f_3 (或 f_4)並載有原數據訊號的光訊號。

圖2呈現數個在不同入射光條件下(不載有數據訊號)所形成之週期一非線性動態的光譜。圖中所使用的注入參數(injection parameter) ξ ，其平方值正比於雷射實際接受到的入射光強度，而偏移頻率(detuning frequency) f 則為入射光與原雷射光的頻率差。於圖中可發現，在任何一種入射光條件下，該雷射因鎖頻



而產生一光訊號於入射光頻率上。因為入射光的影響，該雷射的鬆弛震盪被大幅改變，而導致於旁模(sidebands)的出現。這些旁模的強度大小不一，但相距入射光頻率一樣遠。此外，每一個旁模的強度與頻率隨不同的入射光條件而改變。例如，在圖2(a)到2(c)中， f 保持不變，這些旁模與入射光的頻率差隨 ξ 由0.2增加至0.4而由51 GHz增加至54 GHz。另一方面，在圖2(d)到2(f)中， ξ 保持不變，這些旁模與入射光的頻率差隨 f 由30 GHz增加至50 GHz而由41 GHz增加至54 GHz。

圖3呈現頻率轉換的幅度隨不同的 ξ 和 f 而改變的關係圖。在保持 $f = 50$ GHz之下，頻率的轉換隨 ξ 由0.05增加至0.4而連續地且線性地由50 GHz增加至54 GHz。要增加頻率轉換的幅度，可以從增加入射光的光強度著手，亦可以從提高入射光的頻率著手。例如，在保持 $\xi = 0.4$ 之下，頻率的轉換隨 f 由30 GHz增加至60 GHz而連續地且線性地由41 GHz增加至63 GHz。由實驗的觀察得知，頻率的轉換可以由0.001 THz的數量級改變到0.1 THz的數量級，其最大幅度的限制在於所使用雷射的free spectral range [3,5]，因此我們可以使用腔體比較短的雷射以進行更大幅度的頻率轉換。

圖2中所呈現的是週期一非線性動態在入射光的光強度與頻率不隨時間改變下的靜態特徵，這告訴我們如果入射光的光強度或頻率隨時間改變，則圖中每一頻率訊號的光強度與頻率也將跟隨改變。這個結果顯示，此系統可進行的頻率轉換並不侷限於振幅調制(amplitude modulation)的入射光，還可以應用於頻率調制(frequency modulation)與相位調制(phase modulation)的入射光。此外，這個結果也告訴我們，此系統可以同時將頻率往低頻轉換、不轉換以及往高頻轉換(frequency down-, no-, and up-conversion)。圖4呈現此系統在入射條件為 $\xi = 0.4$ 與 $f = 50$ GHz以及調制速度為2.5 Gbits/s下，不同調制格式於不同頻率轉換功能的誤碼率(bit-error ratio)與訊雜比(signal-to-noise ratio)之關係圖。我們發現誤碼率在不同的條件下皆可達到 10^{-12} ，而且這些頻率轉換後的誤碼率隨不同訊雜比的變化關係都與原頻率之誤碼率隨不同訊雜比的變化關係相似。同時，沒有誤碼平台(error floor)的出現，亦沒有或僅有些微的光能量需求增加(power penalty)。這些結果顯示，原數據訊號在經過光頻率轉換後仍維持相當的完整性。

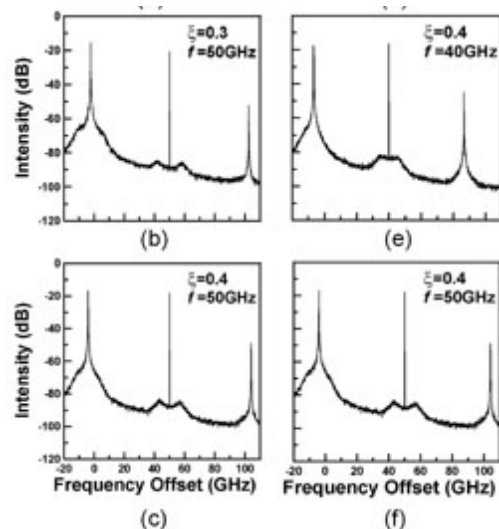


圖2. 數個在不同入射光條件下(不載有數據訊號)所形成之週期一非線性動態的光譜。橫軸上的讀值是相對原雷射光頻的頻率值。

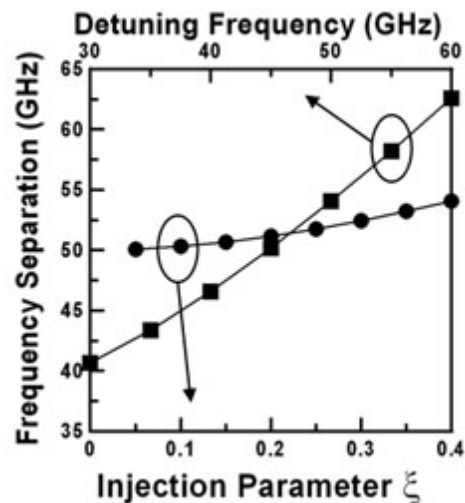


圖3. 頻率轉換的幅度隨不同的 ξ 和 f 而改變的關係圖。圓形代表 f 保持在50 GHz下，而方形代表 ξ 保持在0.4下。

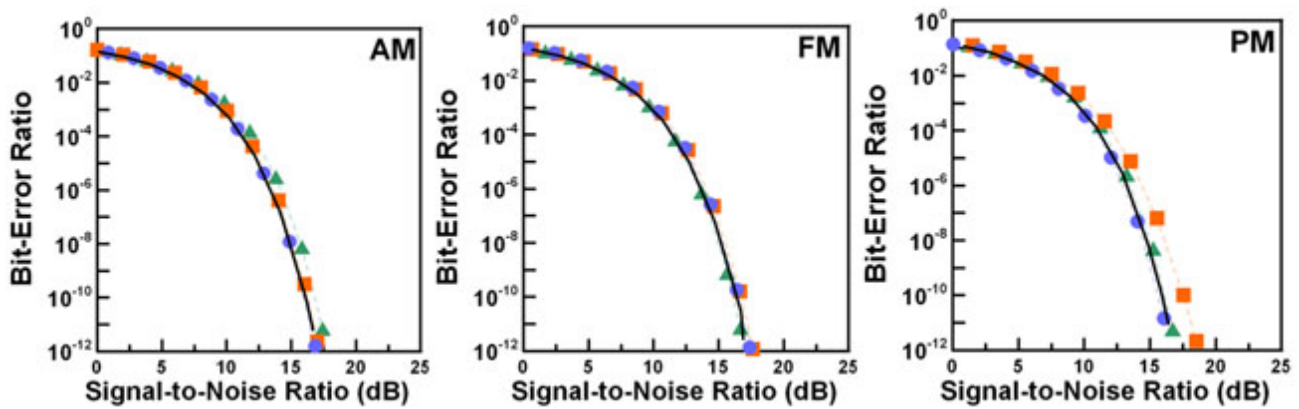


圖4. 在入射條件為 $\xi = 0.4$ 與 $f = 50$ GHz以及調制速度為2.5 Gbits/s下，不同調制格式在頻率往低頻轉換(方形)、不轉換(圓形)以及往高頻轉換(三角形)的誤碼率隨不同訊雜比之變化關係圖。

在這個研究中，我們利用半導體雷射之非線性動態行為來進行全光頻率轉換。當一半導體雷射受到一頻率待轉換的光訊號注入時，該半導體雷射可經由Hopf分歧過程而進入週期一非線性動態。利用這個非線性動態行為，我們可以藉由控制入射光的光強度與頻率，來進行數十到數百GHz連續性的全光頻率轉換。這樣的全光頻率轉換系統只需要一個半導體雷射即可，不像許多其他的系統需要額外的雷射光源來輔助，使得系統架構可以大幅簡化。我們發現當入射光不論是在振幅、頻率或相位調制，其誤碼率在2.5 Gbits/s的調制速度下皆可小於 10^{-12} ，且沒有或只有些微光能量增加的需求，使得此系統擁有調制格式透明度的特性，不像許多其他系統只能允許特定調制格式的入射光訊號。此外，這個系統可以同時將頻率往高頻轉換、不轉換以及往低頻轉換，亦可利用一適當的可調濾波器來選取特定的轉換，這增加了該系統的彈性與重組性。此研究結果顯示，利用半導體雷射之非線性動力行為可以提供波長分工多工科技改進與提升的一有效且簡單的方法。同時，此研究結果亦建議，簡單的非線性動力系統其實具備多樣的功能性，可以應用來簡化甚至取代目前使用線性動力思維所建構的複雜系統與科技。

References:

- [1] T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, S.L. Danielsen, and K.E. Sturbkajer, "All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers," *J. Lightwave Technology* **14**, 942-954 (1996).
- [2] S.J.B. Yoo, "Wavelength conversion technologies for WDM network applications," *J. Lightwave Technology*, **14**, 955-966 (1996).
- [3] 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).
- [4] S.K. Hwang and D.H. Liang, "Effects of linewidth enhancement factor on period-one oscillations of optically injected semiconductor lasers," *Appl. Phys. Lett.* **89**, 061120 (2006).
- [5] S.C. Chan, S.K. Hwang, and J.M. Liu, "Radio-over-fiber AM-to-FM upconversion using an optically injected semiconductor laser," *Opt. Lett.* **31**, 2254 (2006).