

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

半導體雷射之鎖模與載體動態

Mode-Locking and Carrier Dynamics of Semiconductor Lasers

計畫編號：NSC 88-2112-M-002-038

執行期限：87 年 8 月 1 日至 88 年 7 月 31 日

主持人：林清富 台灣大學光電工程研究所

一、中文摘要

本研究使用一種全新的鎖模技術，稱為自我混成鎖模。此項技術使用 RF 調變，其頻率是雷射腔頻率的一半。利用此技術，可在適當的調變下使增益元件載子濃度達到透明濃度以下，而倒轉為可飽和吸收體，不需要額外使用一個可飽和吸收體，就可以同時產生主動鎖模與被動鎖模的機制。在相同的雷射腔中，利用自我混成鎖模可以產生的脈衝寬度約只有主動鎖模所產生的一半。

關鍵詞：自我混成鎖模、鎖模、半導體雷射

Abstract

A new mode-locking method named self-hybrid mode-locking is explored. This method uses RF modulation at the subharmonic of pulse repetition frequency. By suitable biasing condition, the carrier density inside the gain media can be lower than transparency carrier density, and the gain medium will turn into a saturable absorber. Both active and passive mode-locking mechanisms operate in the same gain region without the necessity of additionally integrated absorbers. With the same cavity configuration, self-hybrid mode-locking can generate pulses about two times shorter than the traditional active mode-locking.

Keywords: Self-hybrid mode-locking, mode-locking, semiconductor laser

二、計畫緣由與目的

由於短脈衝雷射在寬頻通信上及物理

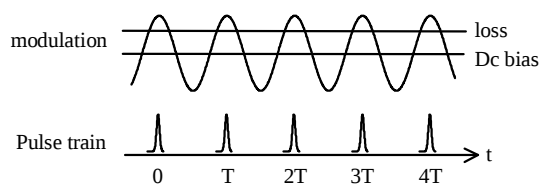
量測上有廣泛的應用價值，使得短脈衝的研究長期以來吸引許多研究者的興趣。產生雷射光短脈衝的方式，一般歸類為以下幾種方式：增益切換、主動鎖模、被動鎖模與混成鎖模。比起增益切換，採鎖模的方式可以產生較短的雷射脈衝。比較上述三種鎖模方式的優點，被動鎖模能產生最短的雷射脈衝，而主動鎖模能產生時間抖動最少的脈衝，混成鎖模則兼顧上述兩種優點，能產生相當短且時間抖動極微小的雷射光脈衝¹。雖然混成鎖模有許多特別的優點，它需要相當複雜且特殊設計的元件才能成功的達成混成鎖模。混成鎖模使用之典型的元件都是多段、多電極的元件^{2,3}。與他鎖模方式相比，混成鎖模相對上是較困難與複雜的。本文中，我們提出一種新奇的鎖模技術，稱為自我混成鎖模。自我混成鎖模只需使用一般普通的雷射放大器，透過適當的偏壓與RF調變，放大器本身便會自我產生混成鎖模所需的飽和吸收體，而不再需要使用複雜且特殊設計的元件。

三、結果與討論

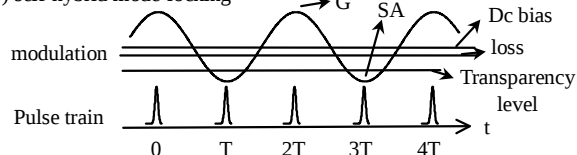
自我混成鎖模的技術是由主動鎖模技術演化而來。主動鎖模技術的原理如圖一(a)所示。RF的調變頻率須與脈衝的重複率相同，脈衝在放大器內由最大增益處發出，經雷射腔返回放大器時，脈衝中心與增益的峰值再次疊合，使中心處受增益放大的效果比脈衝邊緣強烈。因此在數百回共振後，可產生短脈衝。

自我混成鎖模的操作與主動鎖模相似，但直流偏壓位準與RF調變頻率不同。自我混成鎖模的原理如圖一(b)所示。RF調變頻率是脈衝重複率的一半。當元件偏壓在增益峰值時，脈衝由放大器發出，經雷

(a) active mode-locking



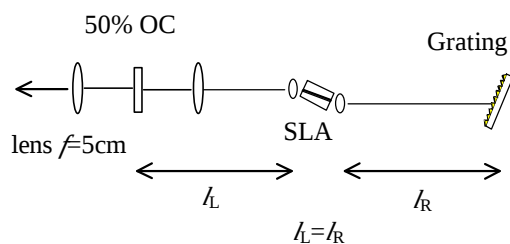
(b) self-hybrid mode-locking



圖一：(a)主動鎖模與(b)自我混成鎖模的操作偏壓方式與時間關係圖。G 是增益，SA 為可飽和吸收體。

雷射腔返回放大器時，脈衝遇到增益谷值。透過適當的偏壓條件，可以將增益谷值變成飽和吸收體。增益峰值如同主動鎖模般，可以壓縮脈衝。增益谷值則如同被動鎖模般，亦可以壓縮脈衝。此種操作的方式與概念與傳統使用半頻率調變的雷射系統^{4,5}是完全不同的。結合這兩種效應，混成鎖模可以自我生成，並產生較短且較無時間抖動之短脈衝。

適當的偏壓條件是成功產生自我混成鎖模之重要因素。要產生自我混成鎖模有三個重要的條件要滿足。第一個是前述的調變頻率，需是脈衝重覆率的一半。第二個條件是 $I_{dc} - I_{mod} < I_{tr}$ ，其中 I_{dc} 是直流電偏壓電流， I_{mod} 是 RF 調變電流， I_{tr} 為透明電流。每一個調變週期中，脈衝會有兩次行經放大器。一次會遇到增益峰值 G_{max} ，另一次遇到增益谷值 G_{min} 。 G_{min} 必須是個飽和吸收體才能產生自我混成鎖模。所以 G_{min} 的偏壓電流 $I_{dc} - I_{mod}$ 應在透明電流 I_{tr} 的位準之下。第三個條件是直流偏壓 $I_{dc} > I_{th}$ 。這與傳統的主動鎖模有相當大的差異。主動鎖模需要降低直流偏壓的位準到臨界電流以下，但自我混成鎖模卻需要提高偏壓電流。直流偏壓需使 G_{max} 與 G_{min} 的平均值大於損耗的位準，又因調變電流 I_{mod} 所造成之增益減少，大於調變電流 I_{mod} 所造成之增益增加，所以直流偏壓電流需從臨界電流 I_{th} 往上調高，以保證全



圖二：自我混成鎖模實驗所採用的雷射腔架構。

部的增益能克服損耗，且對於越強的 RF 調變，需要增加越多的直流偏壓電流。

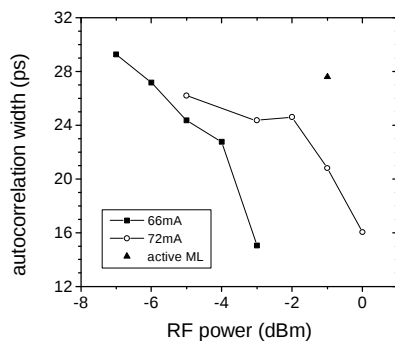
實驗所用的共振腔結構如圖二所顯示。增益元件為 540 微米的斜角脊狀波導之超亮度雷射放大器。波導與鏡面法線夾角七度。傾斜的波導不需要額外的抗反射鍍膜即可將鏡面反射率降到極低⁶。雷射由一個數值孔徑 0.55 的準直鏡準直。光柵為每毫米 1200 條鍍金的繞射式光柵。光柵是用來反射某一特定波長的光回放大器，並有頻寬限制的功能。輸出耦合器的反射穿透比為 50 / 50。兩個焦距 50 毫米的透鏡，將光聚焦到輸出耦合器上，並重新準直雷射光。雷射腔的兩臂調整到長度相同。實驗時，長度由 RF 調變的頻率響應來校正。兩臂的頻率皆為是 803 MHz，雷射腔的頻率是 401.5 MHz。雷射光的波長調整到 830 nm，臨界電流是 50 mA。

在這架構下，首先是做主動鎖模實驗。驅動電流由 HP8114A 脈衝產生器所提供，為 3 毫秒的脈衝電流驅動，重複頻率為 1 kHz。RF 調變信號則由 HP83732B 合成信號發生器所提供，並由 Mini-Circuit 之 TIA900-10 射頻功率放大器做放大。元件偏壓在臨界電流以下，並加上 RF 調變信號。RF 調變頻率與其中一臂的頻率相同，為 803 MHz，並微調使之產生最佳的主動鎖模。當 HP83732B 所提供的 RF 功率大於 -5 dBm 時，可以順利產生鎖模脈衝。在直流偏壓 10 mA 時及 RF 功率 -1 dBm 時可得最佳的脈衝。由於微波電路需高難度的阻抗匹配技術，為使實驗快速達成，實驗用的元件之阻抗匹配沒有最佳化，但仍可達到調制的目標，只要加大輸入功率即可。在 RF

功率-1dBm時，其調變電流估計為48mA。主動鎖模的結果，可以產生自相關軌跡之半高寬為26.2皮秒之短脈主動鎖模之後，我們改變操作條件以產生自我混成鎖模。直流偏壓電流調到臨界電流以上，且RF調變頻率改為主動鎖模的一半。在此條件下，由於調變頻率減半，主動鎖模所產生的脈衝壓縮效果變差了。但因為自我混成鎖模的技術有可飽和吸收體的幫助，結果可以使得脈衝變得更短。

在實驗中，直流偏壓增加到66mA，RF調變頻率降到401.5MHz。為了在增益谷值處將放大器轉為可飽和吸收體，RF調變強度需要足夠大以確保偏壓值可達透明電流以下。在波長830nm時，量到的透明電流約是36mA。所以調變電流需要大於30mA以產生可飽和吸收的效果。對我們的系統而言，在66mA直流偏壓下能產生自我混成鎖模所需的RF功率約在-4到-5dBm之間。

測量到的脈衝寬度如圖三中所示。上三角形的點是主動鎖模實驗的結果。在803MHz的調變頻率下，RF功率達-1dBm時，自相關軌跡的半高寬是26.2皮秒。這與我們過去用環形共振腔做主動鎖模的結果相類似。經由使用自我混成鎖模技術，可以得到短很多的雷射光脈衝。在66mA的直流偏壓時，調變功率由-7dB增加到-3dBm，自相關軌跡的半高寬由29皮秒減小到15皮秒。在72mA的直流偏壓時，調變功率由-5dB增加到0dBm，自相關軌跡的半高寬由26皮秒減小到16皮秒。最佳化之RF調變功率隨直流偏壓的條件而變。當RF調變所產生的調變電流大於直流偏壓與透明電流的



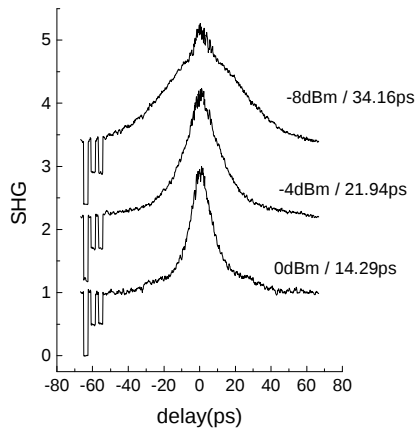
圖三：自我混成鎖模所產生的自相關軌跡之半高寬與調變功率之關係圖。

差距，脈衝會比傳統的主動鎖模縮短相當多。

比較66mA與72mA的直流偏壓的情形，在66mA偏壓下，當RF功率增加到-4dBm時，脈衝寬度緩緩減小到24皮秒，而在72mA偏壓下，當RF功率增加到-2dBm時，脈衝寬度亦緩緩減小到24皮秒。於這區域中，脈衝壓縮的機制主要是由主動鎖模所提供，且與直流偏壓無明顯的相依性。進一步增加調變功率到-3dBm，對72mA的直流偏壓而言，增益谷值仍在透明位準以上，但對66mA的直流偏壓而言，增益谷值已在透明位準以下。72mA的直流偏壓之自相關軌跡的半高寬是25皮秒，但66mA的偏壓卻迅速衰減到15皮秒。當RF功率增到-1dBm時，72 mA之增益谷值亦落到透明位準以下。且脈衝寬度同時也迅速的自-2dBm時的25皮秒縮短為0dBm時的16皮秒。在66mA的偏壓情形中，若RF功率大於-3dBm，輸出光功率變得非常弱，而無法量得自相關軌跡曲線。在72mA的偏壓情形中，再增加RF功率可使增益谷值的位準降低，並進一步壓縮脈衝。為避免退化考慮，在目前的實驗中，我們限制RF功率在0dBm以內。

實驗中，也試用較短的雷射腔。雷射腔的兩臂都縮短為9.5公分。雙臂的頻率皆為1.58GHz，並加上790MHz的調變信號以產生自我混成鎖模。我們縮短臂長的用意主要是主動鎖模中，較高的調變頻率可以產生較強的脈衝壓縮力量。但實驗的結果卻與調變為401.5MHz時的結果相仿。當68mA的直流偏壓及0dBm的RF功率時，所量得的自相關軌跡之半高寬為14.3皮秒。自相關軌跡圖顯示於圖五。當RF功率低於-8dBm時，無法產生好的鎖模脈衝。當RF功率大於-8dBm，脈衝始可完全地鎖模。更進一步增加RF功率，可產生自我混成鎖模的效果，且其半高寬迅速地縮短到14.3皮秒。

上述兩個不同頻率時的實驗顯示增加RF頻率自401MHz到790MHz並不會對脈衝壓縮有產生極大的助益。根據我們的觀察，主動鎖模使用400MHz的調變頻率只能



圖四：不同調變功率所產生的自相關軌跡之比較。

對脈衝產生部分鎖模，而使用800MHz的調變則能壓縮脈衝使其自相關軌跡之半高寬達到近25~30皮秒。更進一步將脈衝由30皮秒壓縮到15皮秒，主要是靠直流偏壓與RF調變信號所引發的可飽和吸收體的幫助，因此使用401MHz與790MHz的自我混成鎖模，其結果並無顯著不同。

實驗中雷射的頻寬為0.22nm。在高斯近似下，時間頻寬積為0.96，是轉換極限的2.2倍。相較於傳統主動鎖模而言，這是一個相當小的值。他可能是由於增益與飽和吸收體貢獻相反的chirp所致。通常主動鎖模提供正的chirp，而被動鎖模提供負的chirp^{7,8}。所以使用自我混成鎖模技術，上述兩項效果會使部分chirp互相抵銷。

四、計畫結果自評

總結上述，我們提出一個新的鎖模技術，稱為自我混成鎖模，利用調變增益元件中的載子濃度而達到一個增益元件同時扮演增益與可飽和吸收體的角色。比起傳統主動鎖模，這技術使用較少的RF調變功率與僅用一半的調變頻率，脈衝能縮短到傳統主動鎖模技術的一半。自相關軌跡的半高寬約12-16皮秒。比起傳統混成鎖模，自我混成鎖模使用的元件相當簡單與便宜，自我混成鎖模的產生來自於調變方式的改善，因此不用像一般混成鎖模雷射一樣使用昂貴且複雜結構的雷射。這項技術

可以降低脈衝雷射系統的費用，減少系統的複雜度，並提高穩定度與可靠度。在高速光通信、光資料處理、光儲存的光源上，有無窮的應用潛力。

五、參考文獻

- [1] D. J. Derickson, P. A. Morton, J. E. Bowers, and R. L. Thornton, "Comparison of timing jitter in external and monolithic cavity mode-locked semiconductor lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, no. 26, pp. 3372-3374, 1991.
- [2] P. A. Morton, J. E. Bowers, J. A. Koszi, M. Soler, J. Lopata, and D. P. Wilt, "Monolithic hybrid mode-locked 1.3 μm semiconductor lasers," *Appl. Phys. Lett.*, 56, no. 2, pp.111-113, 1990.
- [3] P. G. May and M. Bierbaum, "Monolithic mode-locking of long cavity GaAs-AlGaAs semiconductor lasers," *Photon. Tech. Lett.*, vol. 3, no. 4, pp.296-298, 1991.
- [4] Tekeshi Hoshida, Hai-Feng Liu, Masahiro Tsuchiya, Yoh Ogawa, and Takeshi Kamiya, "Subharmonic hybrid mode-locking of a monolithic semiconductor laser" *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 2, No. 3, pp.514-522, 1996.
- [5] T. Hoshida, H. F. Liu, M. Tsuchiya, Y. Ogawa, and T. Kamiya, "Extremely low-amplitude modulation in a subharmonically hybrid mode-locked monolithic semiconductor laser", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 9, pp.1160-1162, 1996.
- [6] W. Rideout, R. Holmstrom, J. Lacourse, E. Meland, W. Powazinik, "Ultra-low-reflectivity semiconductor optical amplifiers without antireflection coatings," *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 1, pp.36-38, 1990.
- [7] M. Schell, M. Tsuchiya, and T. Kamiya, "Chirp and stability of mode-locked semiconductor lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 32, no. 7, pp.1180-1190, 1996.
- [8] A. Azouz, N. Stelmakh, J-M. Lourtioz, "Passive modelocking of semiconductor lasers with tunable group velocity dispersion cavity," *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 16, pp.1437-1438, 1993.