

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 89-2112-M-002-034

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：林清富 台灣大學光電工程研究所

計畫參與人員：吳秉叡、陳敏璋、李柏霖、陳耕兆、林清富
台灣大學光電工程研究所

一、中文摘要

本研究探討鎖模技術及開發新的寬頻半導體雷射材料，以提升鎖模半導體雷射的特性。鎖模技術上，我們使用主動鎖模和自我混成鎖模。主動鎖模上達到脈衝寬度 10-15ps，波長調變範圍達 62 nm，而自我混成鎖模可使用 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。利用自我混成鎖模可以產生的脈衝寬度可以短至 2ps。在開發新材料方面，我們研製出 InGaAsP/InP 半導體光放大器，頻寬可接近 300nm。

關鍵詞：自我混成鎖模、鎖模、半導體雷射、半導體光放大器

Abstract

This project studies mode-locking techniques for semiconductor lasers and develops new semiconductor materials for better mode-locking performance. In the mode-locking techniques, we use active mode-locking technique for short-pulse generation and develop new technique, named self-hybrid mode-locking. Using active mode-locking technique, we achieve the generation of 10-15 ps short pulses with the tuning range of 62 nm. For self-hybrid technique, RF modulation at the subharmonic of pulse repetition frequency is used. By suitable biasing condition, the carrier density

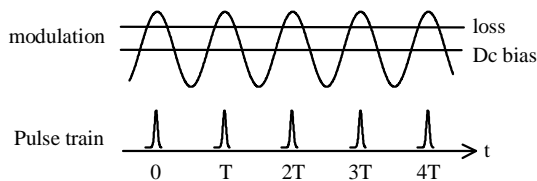
inside the gain media can be lower than transparency carrier density, and the gain medium will turn into a saturable absorber. Both active and passive mode-locking mechanisms operate in the same gain region without the necessity of additionally integrated absorbers. Self-hybrid mode-locking can generate pulses as short as 2 ps. In the material development, we had fabricated semiconductor optical amplifiers with the bandwidth nearly 300 nm..

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

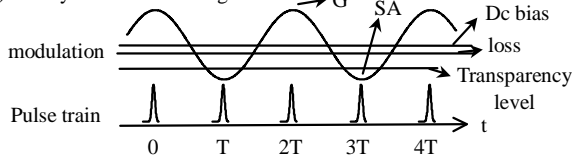
二、計畫緣由與目的

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。本計畫中，我們使用主動鎖模在新開發的 AlGaAs/GaAs 材料上，此材料應用不同寬度多重量子井，可

(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。

使半導體雷射之增益頻寬提高甚多，所以使得主動鎖模達到脈衝寬度10-15ps，波長調變範圍達62 nm。另外，我們也提出一種新奇的鎖

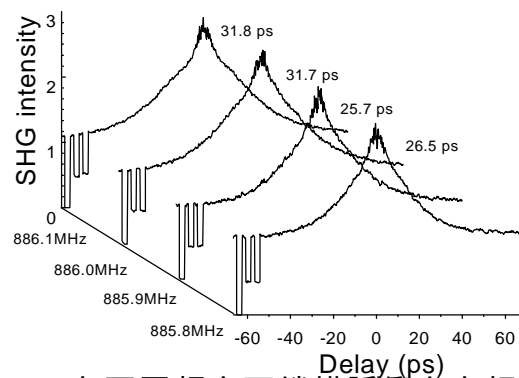
模技術，稱為自我混成鎖模。自我混成鎖模只需使用一般普通的雷射放大器，透過適當的偏壓與RF調變，放大器本身便會自我產生混成鎖模所需的飽和吸收體，而不再需要使用複雜且特殊設計的元件。此外，我們也應用不同寬度多重量子井的技術，在仔細考慮載體動態後，設計並研製出頻寬將近300nm的InGaAsP/InP半導體光放大器，對鎖模技術的進一步發展將有幫助，且此半導體光放大器的頻段涵蓋1.3μm到1.55μm，是通訊上的有用波段，對未來通訊上光脈衝的放大、修正等處理也有助益。

三、結果與討論

自我混成鎖模的技術和主動鎖模類似，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。

在主動鎖模中，調變頻率對鎖模脈衝有相當大的影響，所以能產生良好的鎖模脈衝之頻率範圍頗窄，圖二所示是頻率對光脈衝之影響。

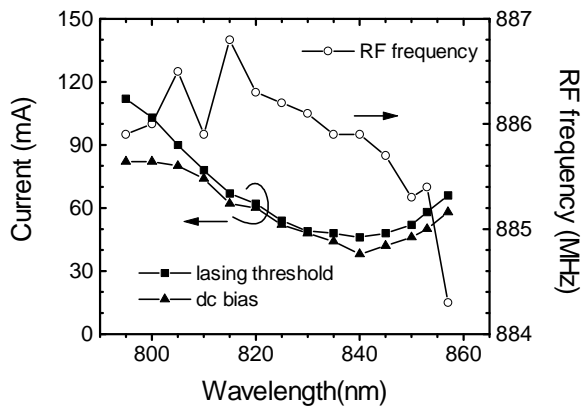


圖二：在不同頻率下鎖模脈衝之自相關圖。

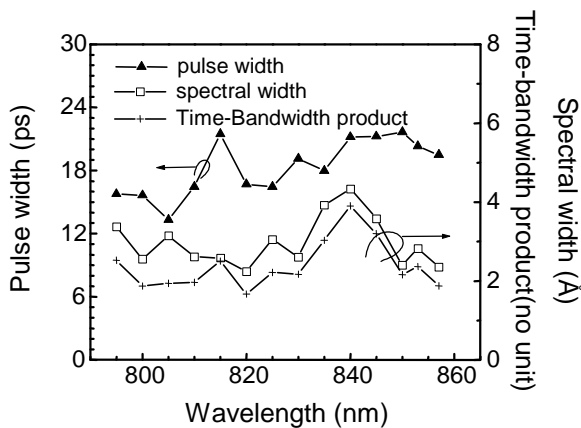
因為我們用的半導體雷射材料具有世界紀錄的增益頻寬，因此可以產生鎖模脈衝的波長範圍極廣，圖三所示是鎖模脈衝在改變波長中的鎖模條件。圖四是鎖模脈衝在改變波長中的特性，我們可以發現，脈衝寬度約可維持在10-15ps，波長可調範圍可達62nm，事實上，適當改變鎖模條件，波長可調範圍仍可更寬。

在自我混成鎖模中，適當的偏壓條件是成功之重要因素。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



圖三：鎖模脈衝在改變波長之鎖模條件。



圖四：鎖模脈衝在改變波長中的特性。

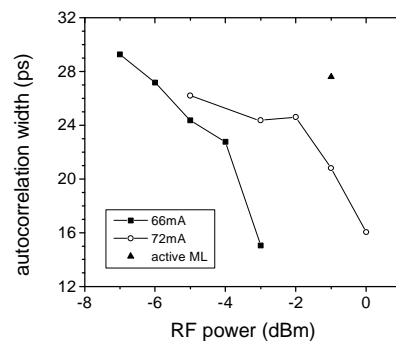
電流。每一個調變週期中，脈衝會有兩次行經放大器。一次會遇到增益峰值 G_{max} ，另一次遇到增益谷值 G_{min} 。 G_{min} 必須是個飽和吸收體才能產生自我混成鎖模。所以 G_{min} 的偏壓電流 I_{dc} - I_{mod} 應在透明電流 I_{tr} 的位準之下。第三個條件是直流偏壓 I_{dc} >臨界電流 I_{th} 。

實驗所用的共振腔結構和主動鎖模類似。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。

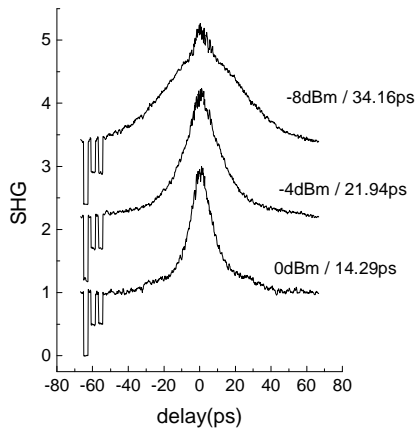
測量到的脈衝寬度如圖五中所示。上三角形的點是主動鎖模實驗的結果。在

803MHz的調變頻率下，RF功率達-1dBm時，自相關軌跡的半高寬是26.2ps。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29ps減小到15ps。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26ps減小到16ps。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24ps，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24ps。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25ps，但66mA的偏壓卻迅速衰減到15ps。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25ps縮短為0dBm時的16ps。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



圖五：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。



圖六：不同調變功率所產生的自相關軌跡之比較。

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。

自相關軌跡圖對於不同RF功率之變化顯示於圖六。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14.3ps。上述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^{4,5}。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。若增加頻寬至1nm，脈衝寬度可短至2ps。

為使寬頻半導體光放大器及鎖模脈衝可以應用在光通訊系統中，我們也研製了涵蓋1260 ~ 1575nm的不同寬度多重量子井結構⁶，未來將進一步探討其寬頻特性，如波長可調範圍，鎖模波長範圍等。

四、計畫結果自評

總結上述，我們開發了大範圍可調波長的主動鎖模半導體雷射，脈衝寬度 10-15ps，波長調變範圍達 62 nm。也研究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 2ps。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。我們也開發寬頻半導體光放大器，其頻帶極寬，涵蓋 1260 ~ 1575nm，可以應用在光通訊系統中，使光通訊波段完全涵蓋光纖之低耗損頻帶⁷，未來將有極大的應用潛力。

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] 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.
- [5] 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.
- [6] Ching-Fuh Lin, Bing-Ruey Wu, Lih-Wen Lai, and Tien-Tsorn Shih, "Semiconductor-laser amplifiers with bandwidth over 300 nm," *Optical Amplifier and Their Applications 2000*, Paper OMD15, Quebec, Canada, July, 2000.
- [7] Stern, T. E. and Bala, K.: 'Multiwavelength Optical Networks', Chap. 4, pp. 193-199, Addison-Wesley, MA, 1999.