

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 展波偏振加波鎖模摻鉕光纖雷射之研究

### Study of Polarization Additive-Pulse-Modelocking Er-fiber Lasers

計畫編號：NSC 88-2215-E-009-010

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

主持人：賴映杰 交通大學光電工程研究所

#### 一、中文摘要

在本計畫中我們針對展波偏振加波被動鎖模摻鉕光纖雷射進行研究，包括針對此種雷射架構進行理論模擬以及在實驗上進行實製。我們也針對了被動鎖模摻鉕光纖雷射的雜訊特性進行了理論及實驗上的探究，除了發展出計算鎖模雷射雜訊的電腦程式之外，也藉著對一自組之半導體飽和吸收體被動鎖模摻鉕光纖雷射進行量測來驗證鎖模摻鉕光纖雷射的低雜訊特性。這種半導體飽和吸收體被動鎖模的方法將可用來幫助展波偏振加波鎖模摻鉕光纖雷射之啟動，使得較容易可以製作出自啟動之展波偏振加波被動鎖模摻鉕光纖雷射。

關鍵詞：鎖模光纖雷射、展波偏振加波鎖模、摻鉕光纖

#### Abstract

In this project we investigate the properties of polarization-additive-pulse-modelocking Er-fiber lasers both theoretically and experimentally. We have also studied the noise properties of passive modelocked Er-fiber lasers and verified their low noise characteristics by measuring the performance of a home-made self-started passive modelocked Er-fiber laser with a semiconductor saturable absorber. In

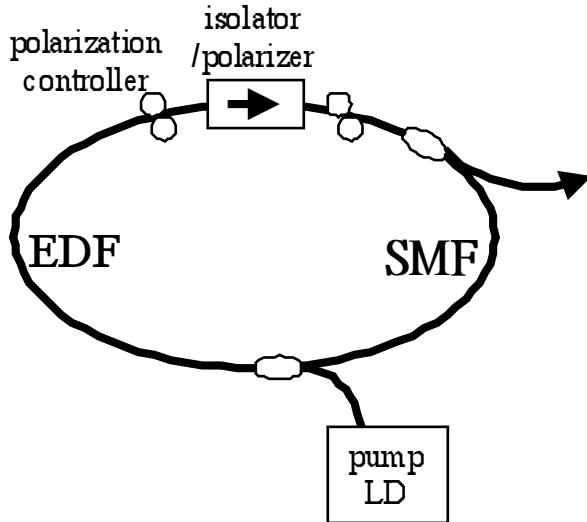
principle this kind of modelocking mechanism by using a semiconductor saturable absorber can help to build a self-started polarization-additive-pulse-modelocking Er-fiber laser.

**Keywords:** Modelocked fiber laser, Additive Pulse Modelocking, Er-fiber

#### 二、緣由與目的

近幾年來在國際上有多種飛秒(fs)級之摻鉕光纖鎖模雷射被發展出來，其中要以由MIT電機系 Prof. Ippen 及 Prof. Haus 實驗室所發展出之展波偏振加波鎖模摻鉕光纖雷射(Stretched-pulse P-APM Er-fiber laser)的表現最為突出。此類型的雷射利用偏振加波鎖模的機制來產生超短脈衝、利用展波技術來提高輸出能量、最後再加上摻鉕光纖增益介質的低噪音特性，可以達到100fs以下之輸出脈衝寬度，脈衝能量可達1nJ以上，能量上的雜訊相當小，jitter雜訊更可接近量子極限。有鑑於此，本計畫即是要來針對展波偏振加波被動鎖模摻鉕光纖雷射進行實驗及理論上的研究。除此之外，由於相較於其他種雷射而言，鎖模摻鉕光纖雷射具有很好的低雜訊特性，所以本計畫的另一個重點則是要來針對被動鎖模摻鉕光纖雷射的雜訊特性進行實驗及理論上的探討。

#### 三、結果與討論



圖一：最簡單之展波偏振加波被動鎖模摻鉕光纖雷射之架構

一個最簡單之展波偏振加波被動鎖模摻鉕光纖雷射約如圖一所示，摻鉕光纖（EDF）和單模光纖（SMF）具有相反符號之色散值，所以光脈衝在共振腔內傳播會有時大時小之寬度變化，這就是所謂的展波效應。光纖的三次非線性會使橢圓偏振之光脈衝有偏振上的旋轉，而且旋轉的角度同瞬時光功率有關。藉著一個偏振器的使用就可以使脈衝頂端所看到的損耗較脈衝兩邊所看到的損耗要來得小，從而可獲得脈衝縮短之效果，這就是偏振加波被動鎖模的原理，而展波效應則是可以帮助降低非線性效應而使光脈衝的能量可以提高。

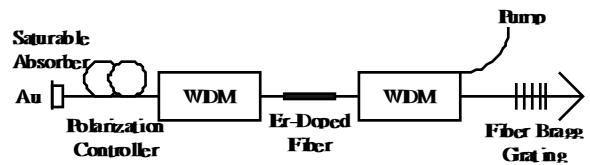
了解了這種機制後我們就可以來進行理論模擬。在光纖中的模擬因須考慮兩個偏振方向，所以須解如下之耦合非線性傳播方程式：

$$\frac{\partial U_1(z,t)}{\partial z} = [g(1 + \frac{1}{\Omega_g^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}) - l]U_1 + id_i \frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} + ik_i (|U_1|^2 + a|U_2|^2)U_1$$

$$\frac{\partial U_2(z,t)}{\partial z} = [g(1 + \frac{1}{\Omega_g^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}) - l]U_2 + id_i \frac{\partial^2 U_2}{\partial t^2} + ik_i (|U_2|^2 + a|U_1|^2)U_2$$

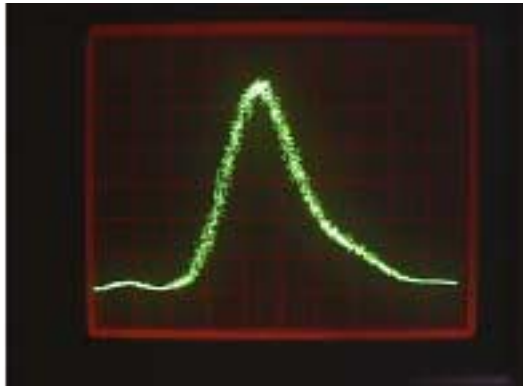
藉助變分法及自動化推導程式之使用我們可將上面之偏微分方程式簡化為脈衝參數之常微分方程組，這可以省下很多計算時間。我們利用這種方法用 Mathematica 寫出了一個模擬程式，可以用來計算展波偏振鎖模雷射之穩態解。

在鎖模雷射雜訊計算方面，我們利用相同之變分方法將鎖模雷射的主方程式簡化為常微分方程組，引進量子雜訊項，用線性化的方法解出在穩態時之雷射雜訊大小。為了來驗證理論之正確性，我們架了如下之半導體飽和吸收體被動鎖模摻鉕光纖雷射：

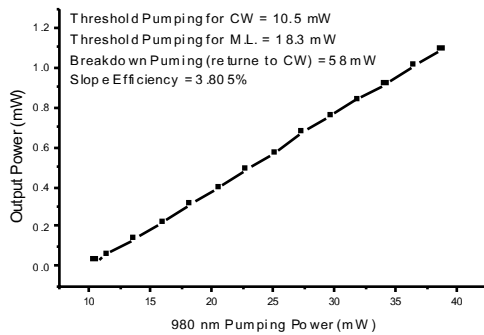


圖二：半導體飽和吸收體被動鎖模摻鉕光纖雷射之架構

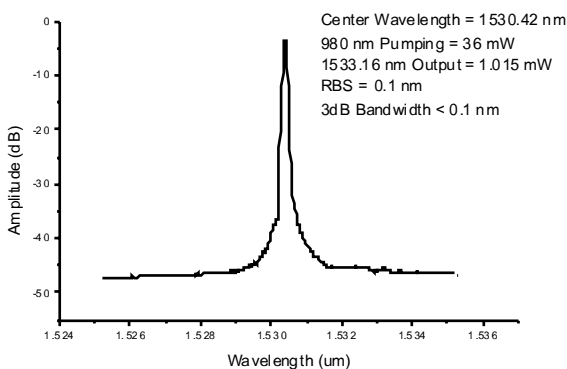
這個雷射的特性約如下面幾個圖所表示：



圖三：Tektronix 7104 類比取樣示波器上所看到的脈衝圖案 (50 ps/div)脈衝寬度約為 95 ps



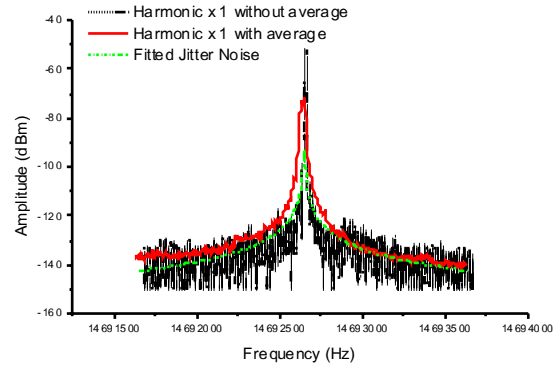
圖四：泵浦功率與雷射輸出功率之關係



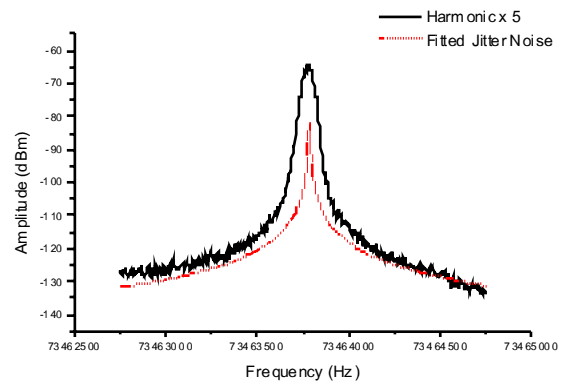
圖五 Anritsu MS9030A 光譜儀上看到被動鎖模雷射的輸出光譜

我們對這雷射量測了其 RF 頻譜，並根據 RF 頻譜上不同諧波分量之形狀大小來決定此雷射之時序雜訊。在計算時序紊亂度噪音時，由於頻譜分析儀有限量測時間所造成頻譜在中心波長不是理想的  $\delta$  圖形，所以我們將拍頻頻譜中心波長左右 5 Hz 的頻寬

去掉，然後對整個頻寬 ( $\leq 2$  KHz) 做積分，求出每個諧波噪音頻譜中時序紊亂度噪音的貢獻與諧波倍數之關係圖(此時對應等效量測時間應為 0.1 秒)。



圖六：一倍諧波拍頻訊號(RBW=1 Hz, Span=2 KHz)



圖七：五倍諧波拍頻訊號(RBW=1 Hz, Span=2 KHz)

我們根據下式來估計時序紊亂度

音：

$$\frac{\int P(\Omega)d\Omega}{\Delta\Omega_{rev}P_0} = (2\pi k)^2 \left(\frac{\Delta t}{T_R}\right)^2 [51]$$

其中  $\Delta\Omega_{rev}$  為量測的解析頻寬， $P_0$  為拍頻頻譜中的中心峰值， $k$  為拍頻諧波的倍數， $T_R$  為脈衝在共振腔內的週期時間。

由上面的式子，我們求出我們的半導體飽和吸收體雷射的時序紊亂度噪音約為  $30.86 \text{ ps} \pm 2.5 \text{ ps}$ 。而由理論所求出的脈的時序紊亂度噪音則為  $4.3 \text{ ps}$ 。此處理論上低估的主要原因是因為我們的理論模型中係假定光纖放大器是一理想的放大器，而且並未考慮泵浦雷射、濾波器、飽和吸收體、與環境變化所引進的額外噪音來

源。不過即令如此，我們的摻鉍光纖鎖模雷射的雜訊已經很接近量子極限了，這證明了摻鉍光纖鎖模雷射的確具有很好的雜訊特性。這種半導體飽和吸收體被動鎖模的方法將可用來幫助展波偏振加波鎖模摻鉍光纖雷射之啟動，使得較容易可以製作出自啟動之展波偏振加波被動鎖模摻鉍光纖雷射。

#### 四、計畫成果自評

在本計畫中所完成的成果中，比較具新穎性的成果應該是有關鎖模雷射雜訊理論的部分。藉著變分法的使用，我們成功地得出一個相當具有一般性之演算法可以來計算鎖模雷射的穩態及雜訊特性。實驗上我們也成功地架設了一部自啟動半導體飽和吸收體被動鎖模摻鉍光纖雷射並量測其特性來與理論計算結果作驗證。在展波偏振加波鎖模摻鉍光纖雷射的實驗方面目前則仍尚未成功，不過我們仍將持續進行這方面的工作。總結這些方面的成果，我想本計畫的執行在實驗上雖未達到原定之目標，不過我們在實驗及理論上的研究都有持續的進展，也仍將持續進行這方面的研究工作。原先設定的目標本來就不容易達到，不過藉著持續的努力總會取得好的結果。

#### 【相關論文發表】

1. 李瑞光、賴映杰, “半導體飽和吸收體被動鎖模摻鉍光纖雷射之研究”, 1999 台灣光電科技研討會 paper FR-III5-C-1。
2. Y. Lai, “Noise Characteristics of modelocked fiber lasers”, 1999 年中華民國物理年會邀請演講。

#### 五、參考文獻

- [1] G. Lenz, K. Tamura, H.A. Haus, and E.P. Ippen, “All-Solid-State Femtosecond Source at 1.55  $\mu$ -M Source”, OPTICS LETTERS, 1995, Vol 20, Iss 11, pp 1289-1291.
- [2] X.X. Yu, S. Namiki, H.A. Haus, “Noise of the stretched pulse laser: Part II---Experiments”, IEEE JQE33, 660(1997).
- [3] Y. Lai, “Pulse dynamics and noise characteristics of modelocked fiber lasers”, Femtosecond Science and