

高重複率非同步鎖模光纖雷射動力學特性與應用

Laser Dynamics and Applications of High Repetition Rate Asynchronous Mode-Locked Fiber Lasers

鞠曉山、江國豪、王聖閔、賴暎杰

S.-S. Jyu, G.-H. Jiang, S.-M. Wang, Y. Lai

高重複率非同步鎖模光纖雷射除了具有超短光脈衝寬度輸出與容易長期穩定等優點之外，也同時展現了慢速光脈衝時序與中心頻率週期性變化的獨特雷射動力學特性。本文將介紹如何在理論上來詳細探討非同步鎖模光纖雷射的雷射動力學特性，在實驗上如何來準確量測慢速光脈衝時序與中心頻率週期性變化的實際大小，以及在實用上如何利用這些獨特的鎖模雷射動力學特性來發展量測光纖色散的新穎方法。

High repetition rate asynchronous mode-locked fiber lasers not only have the advantages of ultra-short output pulse-width and long-term stability, but also exhibit the unique laser dynamics of slow periodic pulse timing and central wavelength variation. In this article, we explain how to investigate the laser dynamics of asynchronous mode-locked fiber lasers theoretically, how to accurately determine the magnitudes of pulse timing and central wavelength variation experimentally, and how to develop a practical new method for measuring the fiber dispersion based on the studied laser dynamics.

一、非同步鎖模光纖雷射簡介

近幾年來鎖模光纖雷射大致朝以下幾個趨勢來發展：(1) 高重複率、(2) 低雜訊、(3) 短脈衝寬度、(4) 高功率。至於所採用的方法則大致有以下幾個種類：(1) 高重複率：通常使用主動或被動諧波鎖模機制；(2) 低雜訊：通常需使用環境穩定之雷射架構，各種雜訊的可能來源（如激發光源雜訊、主動調變信號雜訊等）都需盡可能降低；(3) 短

脈衝：通常使用被動鎖模機制（偏振加波鎖模、快速飽和吸收體等），必要時再搭配腔外脈衝壓縮；(4) 高功率：通常在共振腔內或腔外使用 cladding pump 增益光纖來提高功率。而主要發展的應用則大致有以下幾個領域：(1) 高重複率：通常被應用來成為光通訊、微波光電等應用所需的光源；(2) 低雜訊：通常被應用來成為精密量測、量子光學與時序同步等應用所需的光源；(3) 短脈衝：通常被應用來成為超快速量測、超連續光譜 (super

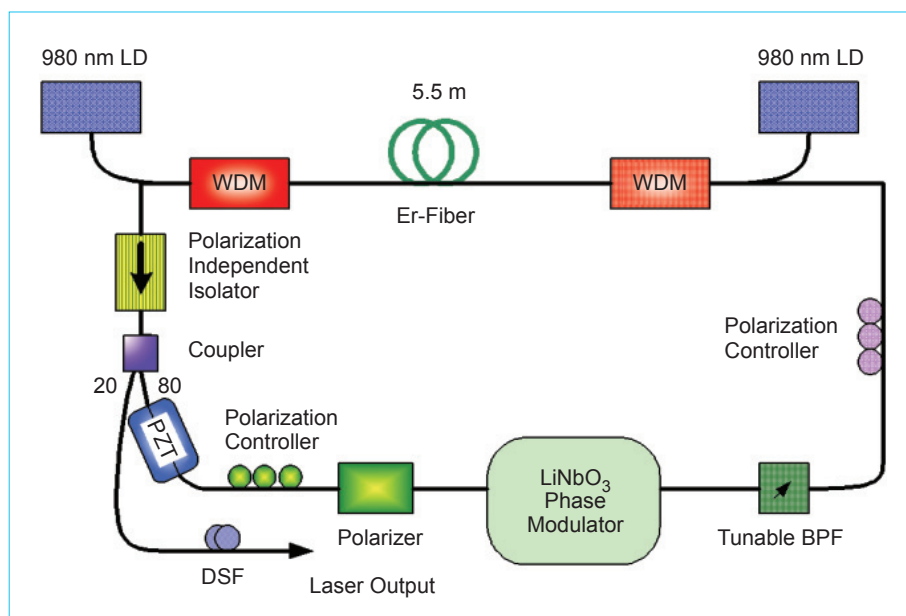


圖 1. 高重複率非同步鎖模光纖雷射架構。

continuum) 產生、光梳頻產生等應用所需的光源；
 (4) 高功率：通常被應用來成為各種工業應用所需的光源。

上面所述的是鎖模光纖雷射的一般發展趨勢，而本文所要集中介紹的高重複率非同步鎖模光纖雷射 (high repetition rate asynchronous mode-locked fiber lasers) 則主要是針對高重複率與低雜訊這兩個重點來發展的一種新型光纖鎖模雷射技術⁽¹⁻⁵⁾。此雷射之架構約如圖 1 所示，是一個具有相當豐富雷射動力學特性的有趣雷射⁽¹⁾，也是我們過去幾年來的一個主要研究主題。

首先，此雷射是一個主動鎖模光纖雷射 (active mode-locked fiber laser)，在共振腔內使用了一個電光相位調變器 (phase modulator) 並透過外加弦波電調變信號來產生鎖模光脈衝序列。此外，加弦波電調變信號之頻率 (10 GHz 數量級) 約為雷射共振腔重複頻率 (10 MHz 數量級) 的 1000 倍，所以這也是一個諧波鎖模光纖雷射 (harmonic mode-locked fiber laser)，在雷射共振腔內有許多個光脈衝 (1000 數量級) 在同時循環傳播。其次，此雷射也是一個被動鎖模光纖雷射 (passive mode-locked fiber laser)，共振腔內的兩個光偏振控振器 (polarization controller) 與光偏振器 (in-line polarizer) 加上光纖的三次非線性光學效應 (Kerr nonlinearity)，可共同產生非線性偏振旋轉鎖模 (nonlinear polarization

rotation mode-locking) 效應，此種非線性光學效應，可讓共振腔內的光脈衝寬度變得更短，不會受限於主動調變信號的寬度，從而能產生飛秒 (fs) 等級的光脈衝輸出。一般而言，超短光脈衝寬度的大小需透過光學自相關 (optical auto-correlation) 的量測才能得到，圖 2(a) 中即是一個典型的光學自相關量測結果，此雷射可以在 10 GHz 的重複率下輸出 550 飛秒寬度的超短光脈衝序列，較一般的 10 GHz 主動鎖模光纖雷射輸出 (ps 數量級) 為短，這是透過非線性偏振旋轉之被動鎖模效應，才能在不經腔外脈衝壓縮的情況下有如此短的輸出脈衝寬度。超短光脈衝的光譜量測可以告訴我們更多有關光脈衝特性的訊息，圖 2(b) 中即是一個典型的光譜量測結果。此雷射有相當乾淨的光譜輸出，由光譜的寬度搭配已知的光脈衝時間寬度來計算，可以得知此雷射的輸出脈衝是所謂的轉換極限 (transform limited) 光脈衝，在時間上的啾啾 (chirp) 效應很小，整個光脈衝有著相同的相位。

由這些最基本的量測結果來看，非同步鎖模光纖雷射可以用來直接產生高重複率 (> 10 GHz) 飛秒等級的轉換極限光脈衝序列，應該可以有很好的應用潛力。不過，在發展實際應用之前，還必須對此類型雷射的穩定性及動力學特性進行更進一步的研究，這將在下一節作詳細說明。

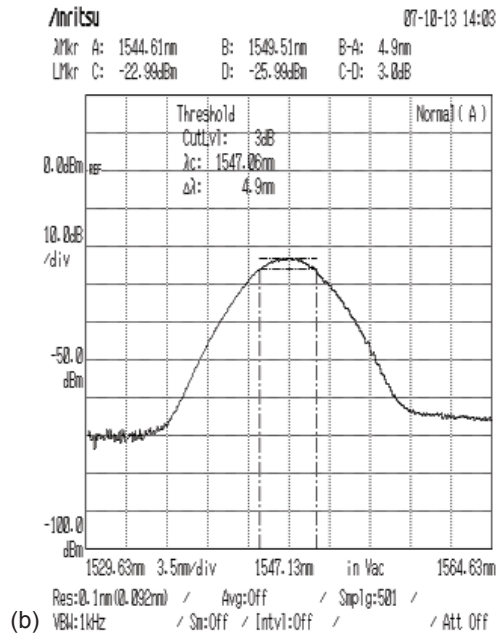
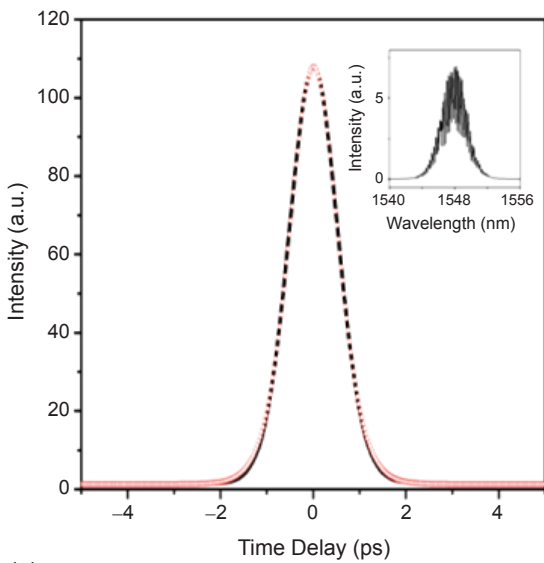


圖 2.
(a) 脈衝寬度自相關量測與 (b) 脈衝光譜量測。

二、非同步鎖模光纖雷射之動力學特性

實驗上要對諧波鎖模光纖雷射的穩定性作檢測的第一步，通常是使用一個快速光偵測器將雷射輸出光脈衝序列轉換為電脈衝序列，然後用高頻電子頻譜量測設備量測此電脈衝序列的高頻頻譜 (RF 頻譜)。圖 3(a) 是靠近第一個 10 GHz 諧波分量附近較大範圍 (數 10 MHz) 的 RF 頻譜，可以看到只有一個主要諧波分量存在，間隔雷射共振腔重複頻率 (10 MHz 數量級) 之整數倍的頻率位置看不到有信號，這表示此雷射的超模抑制比 (super-mode suppression ratio) 很好，可以完全抑制諧波鎖模光

纖雷射之其他超模的產生，只讓一個超模在雷射共振腔內共振。

超模雜訊是造成諧波鎖模光纖雷射不穩定的一個主要原因，高超模抑制比顯示，我們的非同步鎖模光纖雷射相當穩定。如果將頻譜的量測範圍縮小，只看數百 kHz 的範圍，則此時的 RF 頻譜約如圖 3(b) 所示，可以看出此時出現了許多等間距的次頻分量 (spectral side peaks)，這是非同步鎖模光纖雷射所獨有的頻譜特性，所以進一步的問題是這些次頻分量到底是如何產生的？

如果將頻譜的量測範圍拉到低頻，只看 dc 附近 100 kHz 的範圍，則此時的頻譜約如圖 4(a) 所示，可以看出靠近 dc 附近也有許多等間距的次頻

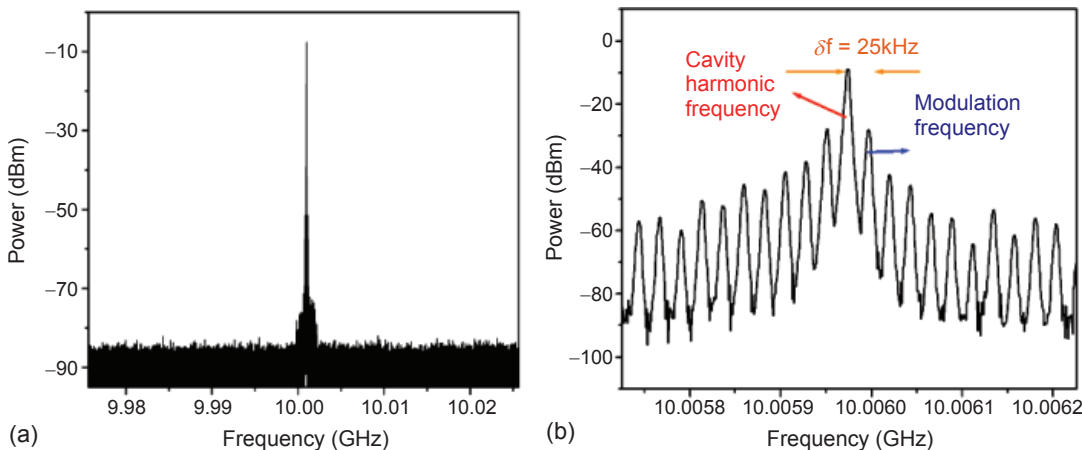
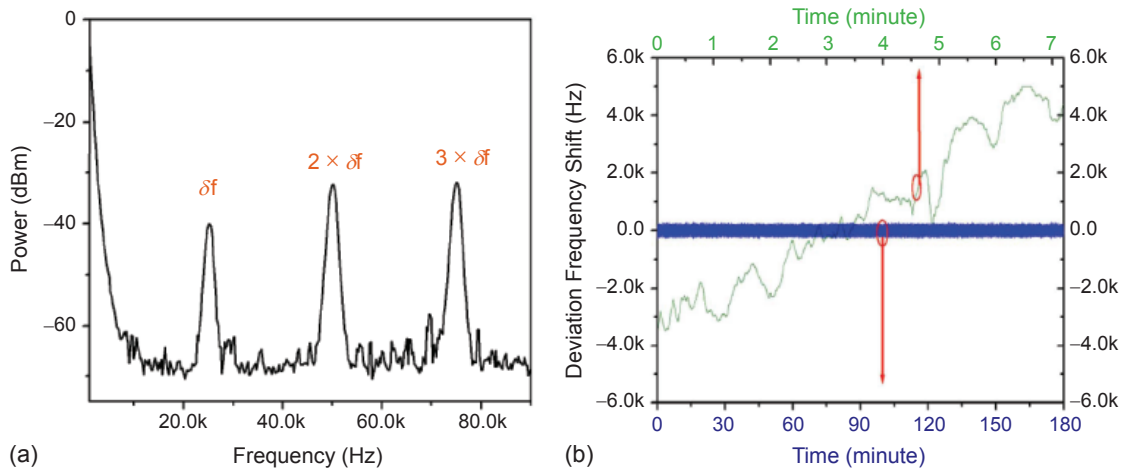


圖 3.
RF 頻譜：(a) 較大範圍，(b) 較小範圍。

圖 4.
(a) 低頻頻譜；(b) 雷射長期穩定之結果。



分量。這些高頻或低頻頻譜的次頻分量的間距並不是固定，而是在一定範圍內可以調整，並且跟雷射共振腔長隨溫度的變化有關。基本上，其週期近似於諧頻頻率與調變頻率之頻差的倒數。透過監控此頻率的改變，我們可以獲得雷射共振腔長因環境溫度微擾而產生的誤差頻移訊號，從而可以藉之來回饋控制 (feedback control) 雷射共振腔中之時間延遲元件 (PZT 或其他形式之 delay-line 模組) 來維持雷射共振腔長，從而確保非同步諧波鎖模光纖雷射能長期穩定操作。由於此次頻分量頻率間距可以從靠近 dc 分量的頻譜來獲得，所以只需利用低成本的低頻電子電路，即可取得誤差信號，不須像傳統方法使用在脈衝重複頻率下操作的高頻電子電路來作回饋控制。而且由於與脈衝重複頻率無關，同一個穩定模組也可適用於更高脈衝重複頻率 (如 40 GHz) 的非同步諧波鎖模光纖雷射。圖 4(b) 即是證明 10 GHz 非同步諧波鎖模光纖雷射能藉此方法長期穩定的一個結果⁽⁴⁾。

要了解非同步諧波鎖模光纖雷射的脈衝序列頻譜為何會有如上所述的現象，就必須深入探討非同步鎖模光纖雷射的雷射動力學特性⁽¹⁾。圖 5 是非同步鎖模光纖雷射之調變原理示意圖，要操作在非同步鎖模的狀態，調變頻率必須與雷射共振諧頻有幾 10 kHz 數量級的頻率差距，此頻率差距 (差頻) 使得光脈衝序列與弦波調變信號有一個線性的時間飄移 (linear timing walk-off)，如圖 5 中所示。由於非同步鎖模光纖雷射是採用相位調變，所以當光脈衝看到斜率不等於零的相位調變時，其中心頻率即會

被改變了一些。由於相位調變信號是弦波形式，線性時間飄移的光脈衝所看到的相位調變斜率也將是週期性，而且其頻率將為相位調變頻率與光脈衝重複率之差。由上述說明應該可以了解為何非同步鎖模光纖雷射輸出光脈衝的中心光頻率會有慢速的週期性變化。另外，要注意光纖具有群速度色散 (group velocity dispersion, GVD)，所以不同中心頻率的光脈衝在光纖中傳輸後會有不同的時間延遲。因中心光頻率會有慢速的週期性變化，且光纖共振腔具有群速度色散，使得非同步鎖模光纖雷射輸出光脈衝的時序也會有慢速的週期性變化。

接下來，需要建立的是有關實驗上的量測結果與上述的雷射動力學特性的關連。考慮一個數學上理想的短脈衝序列 (δ -function 序列)，週期為 T_H 。再假定其脈衝時序有一個頻率為 f_d 、大小 Δt_0 之慢速調變，則其數學式可表示：

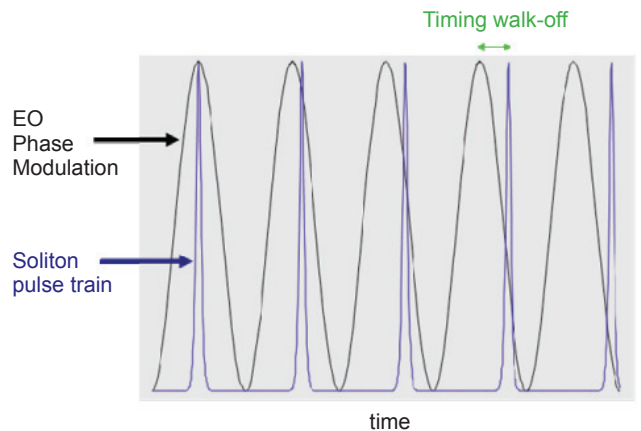


圖 5. 非同步鎖模光纖雷射之調變原理。

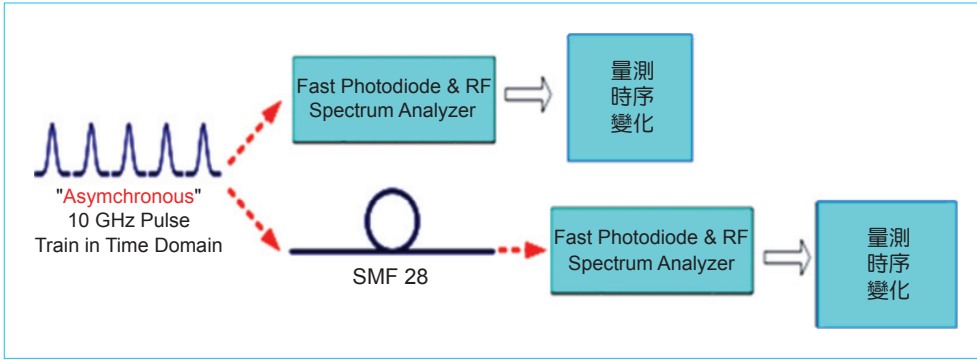


圖 6. 脈衝中心頻率慢速週期性變化之量測方法。

$$i(t) = \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \delta[t - mT_H + \Delta t_0 \sin(m \times 2\pi f_d \times T_H)]$$

對上式作傅立葉轉換，可得：

$$I(\omega) \propto \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} J_n(\omega \Delta t_0) \delta(\omega - 2\pi m f_H - 2\pi n f_d)$$

此處之 f_H 是脈衝重複頻率。由這個式子就可以知道為何會出現如圖 3(b) 中之 RF 頻譜。首先，式中不同的 m 代表不同的諧波分量，對圖 3(b) 中 10 GHz 的諧波分量而言， $m = 1$ 。式中不同的 n 代表不同的次諧波分量，關鍵的結果是這些次諧波分量的功率大小，基本上是正比於 $|J_n(\omega \Delta t_0)|^2$ ，其中 $\omega = 2\pi m f_H$ 。所以只要量測 $n = 0$ 與 $n = 1$ 次諧波分量功率之比值 $R = |J_0(\omega \Delta t_0)|^2 / |J_1(\omega \Delta t_0)|^2$ ，即可藉此比值來決定脈衝時序慢速調變之大小 Δt_0 。我們可以透過實驗來確定比值 R 的大小，如圖 3(b) 中所示大約是 20 dB 左右，如此計算出的 Δt_0 大約是幾個 ps 左右。這樣的脈衝時序慢速調變其實很小，並不容易用直接量測時間的方法來確定。不過透過我們所發展的頻域量測方法，卻可以很準確地來推估，這也是過去的研究所無法達到的新成果。

更進一步地來確定非同步鎖模光纖雷射輸出光脈衝中心頻率慢速週期性變化的大小，基本的想法是利用雷射腔外光纖色散的作用，將中心頻率之慢速週期性變化轉為時序之慢速週期性變化，實驗架構約如圖 6 所示。圖 6 中雷射的輸出脈衝序列先透過前述的過程確定脈衝時序慢速調變之大小，然後讓輸出光脈衝序列在固定長度標準單模光纖中傳

輸，再透過相同的過程來確定新的脈衝時序慢速調變之大小，所獲得的實驗數據將大致如圖 7 所示。

當標準單模光纖長度夠長時，脈衝時序慢速調變之大小將大致與單模光纖長度成正比，其斜率大小即正比於脈衝中心頻率 (波長) 慢速調變之大小乘上光纖群速度色散之大小。由於標準單模光纖之群速度色散為已知，透過此斜率即可推估脈衝中心頻率慢速調變之大小。由圖 7 中的數值來計算，此雷射之中心波長慢速調變可達 nm 等級，這也可算是一個掃頻雷射光源。

在圖 7 中，當標準單模光纖長度較短時，為何脈衝時序慢速調變之大小並不是與單模光纖長度成正比？其原因是此雷射的輸出本來就具有 ps 等級脈衝時序慢速調變，而且理論上可以證明此原始脈衝時序慢速調變的相位剛好與脈衝中心波長慢速調變的相位差 90 度，所以新的脈衝時序慢速調變大

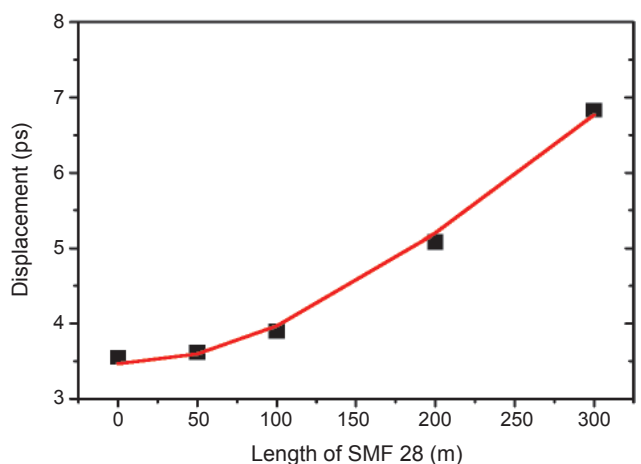


圖 7. 脈衝時序慢速調變大小與標準單模光纖長度之關係圖。

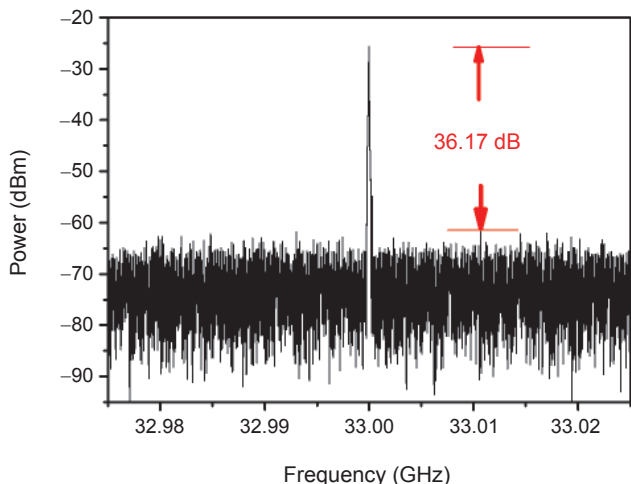


圖 8. 中心頻率 33 GHz 展開 50 MHz 之頻譜圖，超模抑制比 36.17 dB。

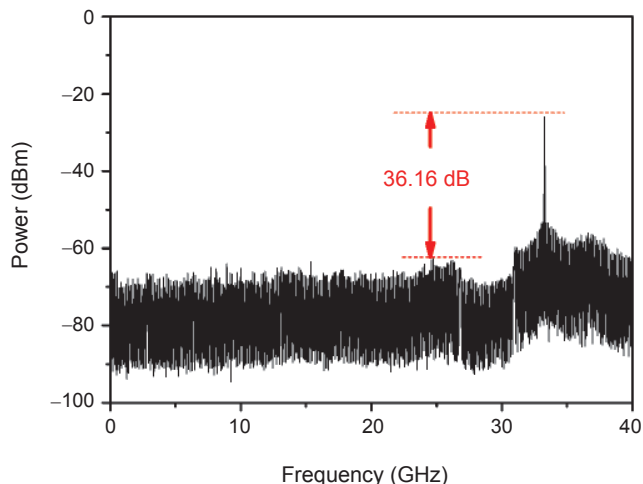


圖 9. 中心頻率 20 GHz 展開 40 GHz 之頻譜圖，旁模抑制比 36.16 dB。

小才會在光纖長度較短時趨於平緩變化而不是線性正比，此種關係可以用來更精確地推估脈衝中心波長慢速調變的大小。

近幾年來我們也嘗試將非同步鎖模機制推展到其他類型的鎖模光纖雷射，包括非同步約分諧波鎖模摻鉬光纖雷射 (asynchronous rational harmonic Er-doped mode locking laser) 及非同步諧波鎖模摻 Yb 光纖雷射 (asynchronous harmonic Yb-doped mode locking laser) 等，也都已經取得很好的成果。

三、非同步分數諧波鎖模摻鉬光纖雷射

高重複頻率之鎖模雷射需要高頻的電子元件來產生高頻鎖模脈衝訊號，但是其重複頻率也受限於高頻的電子元件之響應頻寬 (例如：光電調制器、射頻放大器等)，所以如何有效地產生高重複頻率之脈衝是一件值得被探討的課題。早期的研究有人使用振幅調變器產生分數諧波鎖模之脈衝序列，重複頻率高達 200 GHz。其原理為將調變頻率設為 $(n + 1/p)f_m$ ，其中 n 為諧頻階數， p 為 2、3、4、...， f_m 為基頻頻率，在頻率為 $(np + 1)f_m$ 時會產生鎖模的現象，由此可透過較低頻的調變頻率來達成較高頻之鎖模雷射。一般的分數諧波鎖模會產生振幅的變動 (在頻率 $(n + 1/p)f_m$ 附近)，從而影響鎖模品質。在我們的研究中，透過使用相位調變之非同步

鎖模機制，可使得此振幅變動得以被有效壓制。本實驗將調變頻率設定在 11 GHz 附近，透過分數諧波鎖模機制可升頻至 33 GHz。由圖 8 可知 33 GHz 非同步分數諧波鎖模脈衝之超模抑制比至少可超過 36 dB，由圖 9 可知 33 GHz 非同步分數諧波鎖模脈衝之旁模抑制比也至少可超過 36 dB。

另外，由圖 10 可看出非同步鎖模雷射特有的旁模，頻差為 34 kHz。如圖 11 所示，在光學式自相干儀的量測之下，33 GHz 非同步分數諧波鎖模脈衝之脈衝寬度為 1.66 ps。

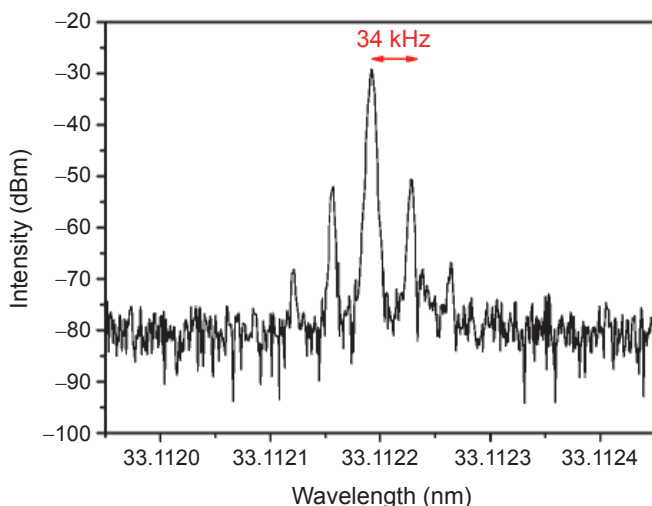


圖 10. 中心頻率 33 GHz 展開 500 kHz 之頻譜圖，次頻分量週期 34 kHz。

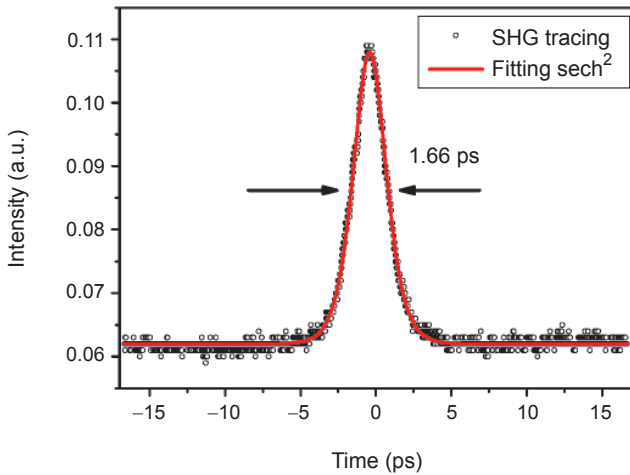


圖 11.33 10 GHz 非同步分數諧波鎖模摻鉕光纖雷射之脈衝寬度為 1.66 ps。

四、非同步諧波鎖模摻 Yb 光纖雷射

傳統的非同步光固子主動鎖模雷射，其雷射共振腔內的群速度色散操作在異常色散 (anomalous dispersion) 的區域，藉由克爾 (Kerr) 非線性效應所產生的光固子可以抵抗非同步調變所引入的頻率偏移，並且穩定存在於雷射共振腔之內。而相較於傳統的非同步光固子主動鎖模雷射，若以摻鉕光纖作為雷射的增益介質，雷射共振腔之內的群速度色散將會操作在正常色散 (normal dispersion) 區域。而基於非同步諧波鎖模的方法，雷射不但可以穩定地產生 10 GHz 與脈衝寬度幾個 ps 的光脈衝序列，

在壓抑超模噪音 (supermode noise) 也有良好特性。我們初步的實驗成果如圖 12 到圖 15 所示，超模噪音抑制比 (supermode noise suppression ratio) 可達 50 dB。此研究工作證實了在正常色散之下雷射可能依舊有機會操作在非同步鎖模狀態，且提供穩定且低雜訊的高頻光脈衝序列。不過我們最近也發現雷射的回復振盪 (relaxation oscillation) 效應也有可能產生類似非同步的信號頻譜，正進一步釐清這些物理機制。

五、非同步鎖模光纖雷射之光纖色散量測應用

未知光纖色散特性的量測在光纖通訊與光纖光學的很多應用上都相當關鍵，文獻上也已經有很多量測方法可用，實務上最常使用的一個方法是透過量測光調變信號在光纖傳輸後之相位延遲來推估光纖色散的大小。為了有高的量測靈敏度，此方法之光調變頻率通常都需儘可能地高 (數 10 GHz 等級)，而要在這麼高頻率下來準確量測電調變信號相位並不容易，需要相當昂貴之高頻電子設備 (如高頻網路分析儀)。我們在探討上述非同步鎖模光纖雷射之動力學特性時也同時發展出一個量測光纖色散特性的新穎方法⁽²⁾，不需用到高頻網路分析儀來作相位量測，只需利用高頻頻譜分析儀來作頻譜量測即可，應該具有一些經濟上的優點。

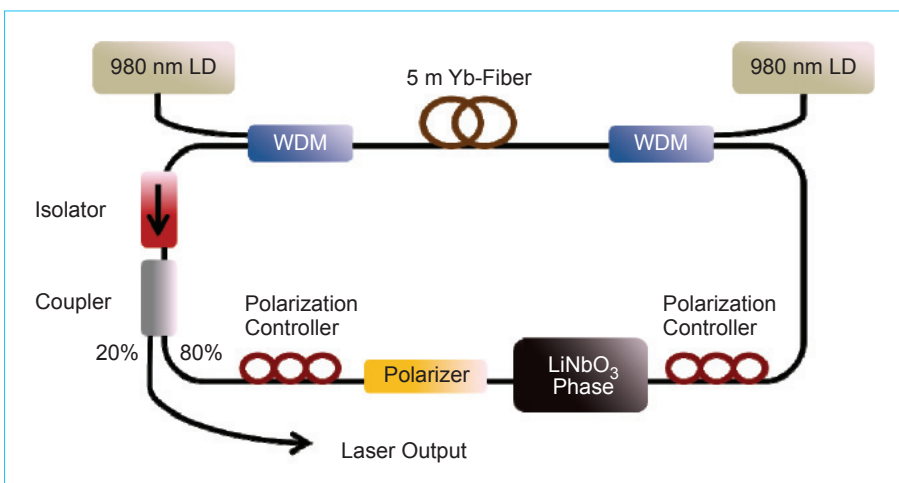


圖 12. 非同步諧波鎖模摻 Yb 光纖雷射之實驗配置圖。

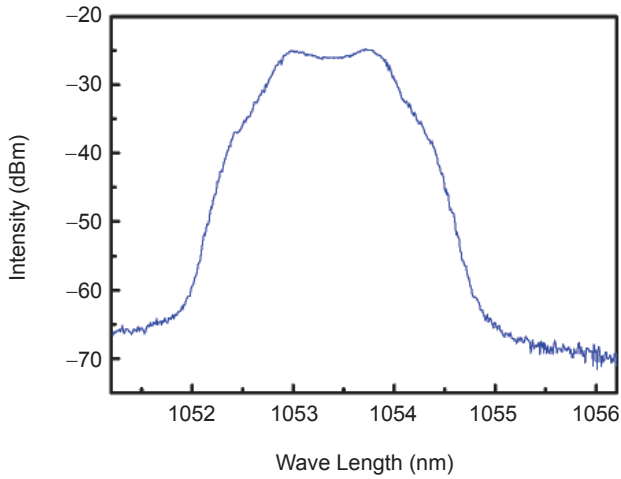


圖 13. 非同步諧波鎖模摻 Yb 光纖雷射之光譜圖。

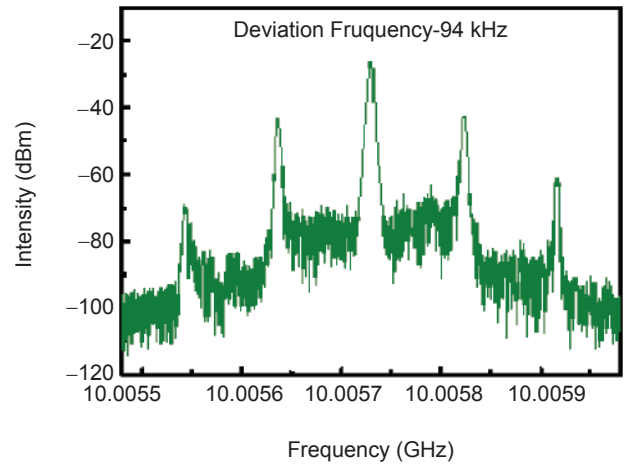


圖 15. 非同步諧波鎖模摻 Yb 光纖雷射之頻譜圖，展開 500 kHz，非同步旁波週期為 94 kHz。

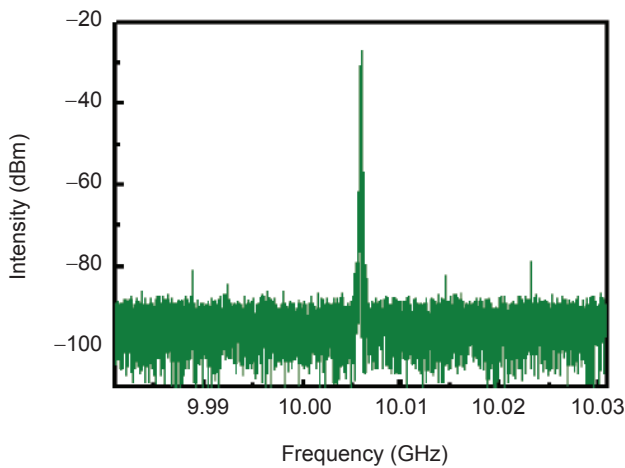


圖 14. 非同步諧波鎖模摻 Yb 光纖雷射之頻譜圖，展開 50 MHz，超模抑制比約為 50 dB。

此種光纖色散特性量測新方法的步驟約如圖 16 所示。首先，需要一個週期性掃頻脈衝雷射光源，我們剛好可以利用非同步鎖模光纖雷射的獨特動力學特性來作為這樣的一個週期性掃頻脈衝雷射光源。量測前，要先確定雷射光源的原始輸出特性，包括原始的脈衝中心波長慢速調變大小與脈衝時序慢速調變大小，確定的方法如前節所述。當要進行光纖色散特性量測時，待測光纖的長度假設為已知，透過量測傳輸後新的脈衝時序慢速調變大小對光纖長度的斜率值，我們即可利用已知的脈衝中心波長慢速調變大小，來推估未知之光纖色散值。這只是單純地將前節量測脈衝中心波長慢速調

圖 16. 量測光纖色散的新方法。

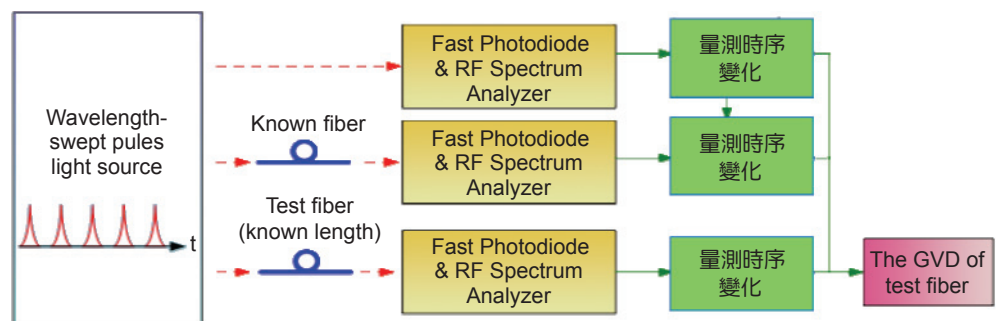


表 1. 光纖色散量測結果。

光纖種類	光纖長度 (m)	中心波長調變 (nm)	原始脈衝時序調變 (ps)	傳輸後脈衝時序調變 (ps)	光纖色散絕對值 (ps/nm/km)
LEAF	380	0.835	2.74	3.05	4.21
DCF	47	0.835	2.74	5.15	111.

變的方法反過來用，利用類似的程序來確定光纖色散值。表 1 是利用此方法來量測大等效面積光纖 (LEAF) 與色散補償光纖 (DCF) 的色散值之實驗結果⁽²⁾，與一般的規格有很好的吻合。

六、結論

鎖模光纖雷射有很多不同類型與應用，本文僅針對高重複率非同步鎖模光纖雷射進行介紹。此種雷射可以輸出飛秒級超短光脈衝序列，也可以透過低頻電子來達到長期穩定，更有趣的是，展現了慢速光脈衝時序與中心頻率週期性變化的獨特雷射動力學特性。希望透過本文的介紹，讀者們已可以正確理解這些獨特的雷射動力學特性是如何產生。我們在實驗上也發展出能準確量測慢速光脈衝時序與中心頻率週期性變化的新方法，這些方法相當具新穎性，更可用來發展高重複率非同步鎖模光纖雷射的應用，包括利用其雷射動力學特性來發展量測光纖色散的新穎方法。

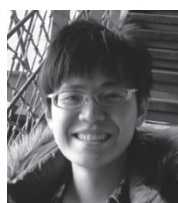
參考文獻

1. W.-W. Hsiang, H.-C. Chang, and Y. Lai, *IEEE J. of Quantum Electronics*, **46**, 299n (2010).
2. S.-S. Jyu, S.-F. Liu, W.-W. Hsiang, and Y. Lai, *IEEE Photonics Technology Letters*, **22**, 598 (2010).
3. W.-W. Hsiang, C. -Y. Lin, and Y. Lai, *Optics Letters*, **31**, 1627 (2006).
4. W.-W. Hsiang, C.-Y. Lin, N.-K. Sooi, and Y. Lai, *Optics Express*, **14**, 1822 (2006).
5. W.-W. Hsiang, C.-Y. Lin, M.-F. Tien, and Y. Lai, *Optics Letters*, **30**, 2493 (2005).



鞠曉山先生現為國立交通大學光電系所博士生。

S.-S. Jyu is currently a Ph.D. student in the Department of Photonics & Institute of Electro-Optical Engineering at National Chiao Tung University.



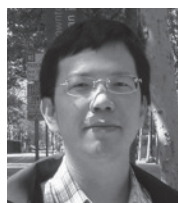
江國豪先生現為國立交通大學光電研究所碩士班學生。

G.-H. Jiang is currently a M.S. student in the Institute of Display at National Chiao Tung University.



王聖閔先生現為國立交通大學光電研究所博士班學生。

S.-M. Wang is currently a Ph.D. student in the Department of Photonics & Institute of Electro-Optical Engineering at National Chiao Tung University.



賴暎杰先生為美國麻省理工大學電機工程與電腦科學博士，現任國立交通大學光電系教授。

Y. Lai received his Ph.D. in electrical engineering & computer science from Massachusetts Institute of Technology, USA. He is currently a professor in the Department of Photonics & Institute of Electro-Optical Engineering at National Chiao Tung University.