

2005 年諾貝爾物理獎得主--- 漢希 (T.W. Hänsch) 與霍爾 (J.L. Hall)

文/鄭王曜、施宙聰

2005 年是愛因斯坦發表狹義相對論以及光電效應和布朗運動理論的 100 週年，為了推動物理教學與研究，聯合國特別將 2005 年定為世界物理年。愛因斯坦假設光速在慣性座標中為恆定，透過此絕對的基本物理量建立了狹義相對論和質能關係，此外他提出光子成功解釋光電效應。非常巧合的，2005 年 10 月發佈的諾貝爾物理獎得主漢希 (Theodor W. Hänsch)、霍爾 (John L. Hall) 與葛勞柏 (Roy J. Glauber) 的貢獻跟光速及光的量子性質有密切的關係。漢希及霍爾兩人因在精密雷射光譜，包括光頻梳 (optical frequency comb) 技術的發展而獲此殊榮。

霍爾是美國 JILA (Joint Institute of Laboratory of Astrophysics) 的資深研究員，是雷射穩頻高手。漢希是德國慕尼黑大學教授及普朗克量子光學研究所主任，是氫原子 1S-2S 光譜高手。他們兩人是好朋友，都熱愛實驗。到 JILA 拜訪霍爾，通常要在地下室的實驗室才能找到他。漢希在慕尼黑大學物理系辦公室對面有一個人實驗室，他常在那裡做一些有趣的實驗，霍爾來訪時也會邀他一起做實驗。在這篇文章我們將簡介漢希與霍爾的學術工作及光頻梳。

雷射穩頻

雷射的本徵線寬 (intrinsic linewidth) 由 Schawlow-Townes relation 所限制，除了半導體雷射因其微小共振腔內光子數目不多線寬大外，大部分雷射的本徵線寬小於 1 Hz。如 1 mW 的紅光 633 nm HeNe 雷射，其 Schawlow-Townes 線寬小於 1 mHz。然而由於各種不同的技術性噪音 (technical noise)，例如雷射結構的振動、折射率的擾動等，實際的雷射系統離 Schawlow-Townes 線寬有一段不算小的距離。

雷射穩頻包括線寬壓縮和頻率穩定兩部份。壓縮雷射線寬的方法通常使用高反射鏡組成的光學共振腔，而雷射頻率穩定則利用由次都卜勒 (sub-Doppler) 光譜取得的原子或分子光譜。原理如圖 1。

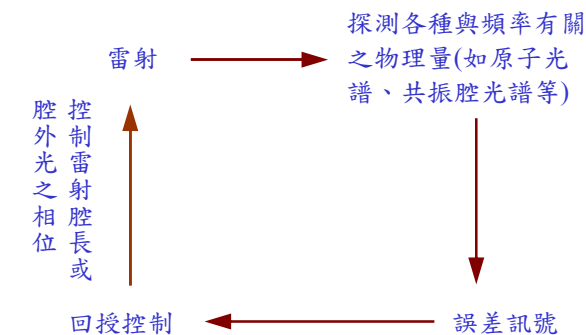


圖 1 雷射穩頻的原理。參考頻率可以是原子光譜或共振腔的光譜。

霍爾在雷射穩頻的貢獻卓越，包括：1、甲烷 (CH_4) 穩頻 3.39 μm HeNe 雷射及碘分子穩頻 1064 nm Nd:YAG 雷射，這兩種穩頻雷射是最穩定的參考波長；2、FM spectroscopy、NICE-OHMS 和 Pound-Drever-Hall 等高靈敏的光譜方法。利用這些方法及技術雷射線寬已達 1 Hz 以下，雷射穩定度已高於銫原子鐘。即光鐘在未來有可能取代銫原子鐘。

穩定性和同調性這麼好的雷射究竟有甚麼用？這些雷射廣泛使用於高解析光譜研究和高靈敏干涉儀應用。除了建立一級波長 (或長度) 標準外，霍爾使用穩頻雷射做了下列工作：測量光速 (導至 1983 年長度標準的新定義：一公尺為光於 299,792,458 分之 1 秒在真空中所走的距離)，測量空間的等向性 (isotropy of space)，檢驗狹義相對論，測量光反衝作用 (photon recoil 為原子發射光子時因光子的動量引起的反衝)，觀察黑體輻射 (或溫度) 對原子光譜的作用等。這些工作的細節在此不做說明，有興趣的讀者可從霍爾的 publication list 中找到 (<http://jilawww.colorado.edu/hall/>)。

氫原子 1S-2S 雙光子光譜

N. Bloembergen (諾貝爾獎得主) 和 M.D. Levenson 認為「氫原子 1S-2S 雙光子光譜是物理中最重要的課

題之一，是具高度挑戰性的實驗…」〔1〕。由於 2S 能階的生命期約為 1/7 秒，1S-2S 雙光子光譜的線寬僅有 1.3 Hz，解析極限為 10^{-15} 。氫原子及其同位素的 1S-2S 雙光子光譜可用來檢驗量子電動力學 (QED)、決定雷德堡常數 (Rydberg constant) 及電子質子質量比 (electron-proton mass ratio)。

漢希自從在 1975 年，利用一脈衝染料雷射，首先觀測到氫原子 1S-2S 雙光子的次都卜勒光譜以來，已經花了半輩子的精力觀測此躍遷。最新的成果是以一窄線寬的 CW 486 nm 染料雷射，經倍頻產生 243 nm 的紫外光，再利用一光學共振腔增強紫外光，去觀測一氫原子束的 1S-2S 雙光子光譜。為了壓縮線寬，放電產生的氫原子先經一液氮冷卻的噴嘴將溫度降至 5~6 K 後進入光學共振腔。以一小電場將 2S 原子轉至 2P 能階，測量 2P 至 1S 的螢光，即可得 1S-2S 雙光子吸收信號。486 nm 染料雷射的頻率則是利用一光頻梳測出，整個實驗系統見圖 2。

目前氫原子 1S-2S 雙光子光譜線寬約 530 Hz ($\lambda = 243 \text{ nm}$; $\delta\nu/\nu = 4.3 \times 10^{-13}$)，離自然線寬尚有 3 個數量級；中心頻率 $\nu(1S-2S) = 2,466,061,413,187,103 \text{ (46) Hz}$ ，準確度 (1.8×10^{-14}) 已逼近鉀原子鐘，這是現在

QED 最嚴格的驗證。漢希預期氫原子 1S-2S 雙光子光譜的準確度將於幾年後超越鉀原子鐘，到時候時間標準需要進一步的更新。

光頻測量 (光頻梳前)

雷射光頻率為鉀原子鐘的數萬倍，在過去，雷射光頻率之直接測量是由鉀原子鐘出發，藉著所謂的頻率鏈 (frequency chain) 達成的。傳統的頻率鏈中有幾個不同的高頻振盪器 (Backward Wave Oscillator; BWO) 和穩頻雷射做為頻率的轉移標準，每一個穩頻雷射是以鎖相 (phase locking) 的技術鎖定在前一級的頻率轉移標準的諧波 (harmonics) 上，經過好幾次的倍率相乘，即可產生一非常接近待測雷射光頻的輻射，且其頻率為已知。最後藉著外差方法測得拍頻，即可得到待測雷射光頻率。這類的頻率鏈系統複雜、龐大，維持不易；到目前為止，僅有少數幾個國家實驗室擁有類似的頻率鏈，可測量可見光範圍的光頻率。圖 3 為德國 PTB 國家實驗室測量 Ca 原子 $^3P_1-^1S_0$ intercombination transition 使用的頻率鏈〔2〕，整個用了 10 台穩頻雷射！需要好幾十坪的空間才能安置的下！

2003: Hydrogen 1S-2S spectrometer

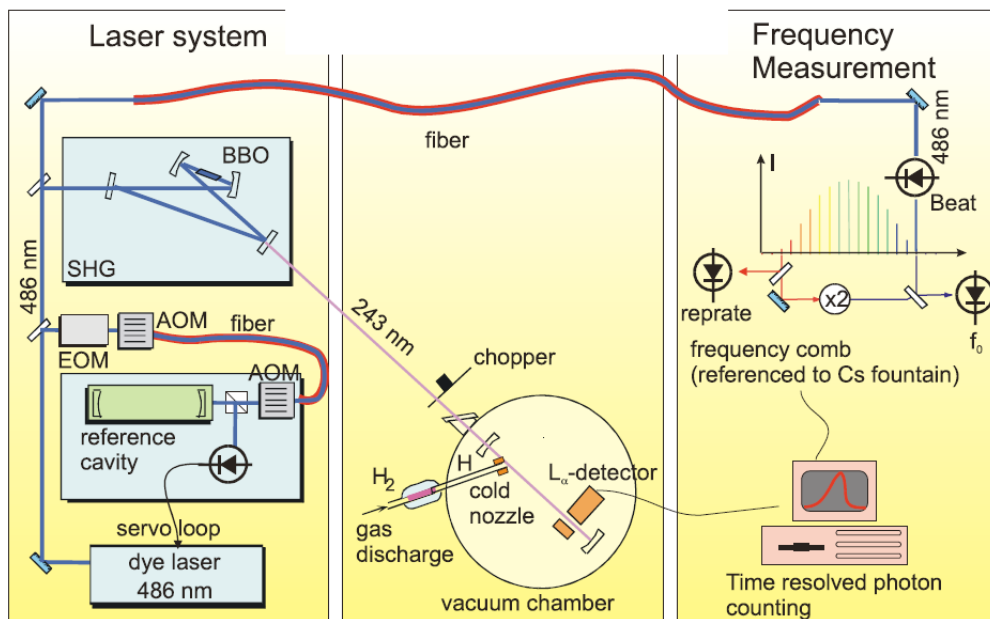


圖 2 氫原子 1S-2S 雙光子光譜儀。取自漢希諾貝爾演講投影片 (<http://nobelprize.org/physics/laureates/2005/hansch-lecture.html>)

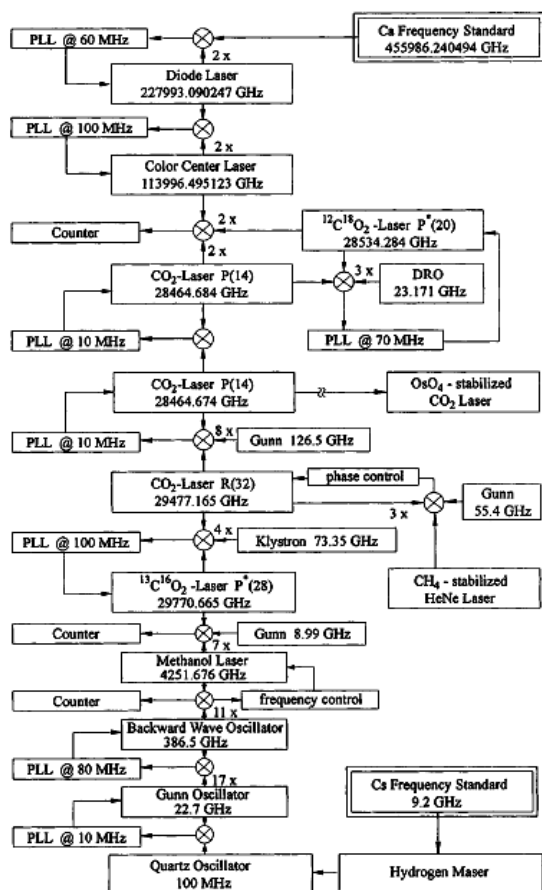


圖 3 德國 PTB 國家實驗室測量 Ca 原子 $^3P_1-^1S_0$ intercombination transition 使用的頻率鏈。〔2〕

光頻梳雷射的發展背景

我們都知道，時間、長度與質量是物理量的基本單位。自從 1983 年光速定為常數後，公尺基本上是經由時間來定義。時間的標準是定義在鉀原子基態超精細躍遷頻率上。雖然這個作為時間標準的躍遷有非常窄的線寬，即這個躍遷有著客觀而穩定的躍遷頻率。可惜的是，這個頻率落在微波的範圍（ ~ 9.2 GHz），譜線 Q 值（ $\delta\nu/\nu$ ）不是很高，且使用它來實現長度定義，是非常不方便的。在可見光附近有些原子譜線的 Q 值大，雷射頻率穩定度已較鉀原子鐘好，科學家一直有一個夢想，希望有一天把這個時間單位，從微波的範圍延伸到可見光的頻率，提高時間量測的準確度，這就是所謂的光鐘。另一方面，我們都知道，對物理定律精密的量測，常導致物理新的發現。因此光鐘的發明不但是計量科學家的理想，也是高精密雷射光譜學家的理想。在 2000 年左右，漢希及霍爾研發成功飛秒

光頻梳雷射，以下簡稱光頻梳雷射，終於實現了人類製造光鐘的夢想。以下介紹光頻梳雷射之發展歷史。

1970 年代，在鎖模（mode-locking）脈衝雷射剛發展之初，俄國科學家 V. Chebotayev〔3〕漢希及霍爾即有利用鎖模雷射來測量光頻的構想。在 1978 年，漢希的實驗室〔4〕曾利用小範圍的等間隔光頻來量測鈉原子超精細光譜之頻率差，這是利用鎖模脈衝雷射測頻的濫觴。但畢竟要達到上述，可以從光頻連結到微波的範圍的鎖模雷射，以致可以做絕對頻率的量測，並不容易。原因是：1、早期的鎖模雷射，頻率夠穩定的，如氫離子雷射，Nd:YAG 雷射等，頻寬都不夠寬。2、如染料雷射等頻寬夠寬的，雷射相位穩定度很難控制。同時在要求更大頻寬時，雷射共振腔中之色散問題將趨於嚴重，造成重複率不穩定，而不利於頻率量測。因此曾有短暫的時間，人們發展了以連續光為主的光頻梳〔5〕，頻寬可達數個 THz（ 10^{12} Hz）。

當 1991 年鈦藍寶石（Ti:sapphire）Kerr-lens 鎖模脈衝雷射被 Wilson Sibbett 研發出來後，寬頻鎖模變得可行。霍爾稱此雷射為一“intelligent and beautiful princess”〔6〕。因為此雷射增益頻寬很寬，同時為固態雷射幫浦之固態雷射系統，較染料雷射安靜許多，因此像是眾多雷射中同時兼具聰明與美麗的公主。在 1998 年，漢希成功的證明飛秒脈衝雷射是可以是個很好的同步光頻產生器（optical synthesizer）〔7〕，並將其中一個模鎖在一個參考雷射上。當然，還有人有些疑慮，諸如，如此寬頻下，任意兩個模之間的頻差都一樣嗎？時間軸上來看，超短脈衝的相位真的是可以任意控制的嗎？在 2000 年時，霍爾想出了一個辦法去量測鎖模雷射之絕對頻率，即俗稱的 self-reference〔8〕，並用干涉的方法證實其相位的穩定性，至此人們才真正認識光頻梳雷射的美。

光頻梳雷射原理與其重要性

雷射在發明之初，其在學術界之應用分為二個主流：一為頻寬超窄之穩頻雷射；一為頻寬超寬且時間超短之脈衝雷射。穩頻雷射的性質已在前文提過，而

超短脈衝雷射就像是超快的快門一樣，只讓我們看到 10^{-13} 到 10^{-15} 秒的光一閃而過。脈衝雷射在化學及非線性光學上有重要的應用，穩頻雷射在探討物理定律與計量學上有重要應用。因此這兩個性質極端不同的雷射似乎永遠不可能碰在一起，在五年前，一般人很難想像有一支雷射可以頻寬很寬，又可以很穩定。漢希及霍爾則很巧妙的將二種雷射美好的性質連接起來。目前我們稱此種雷射為飛秒光頻率梳雷射。要解釋其原理，要先從什麼是鎖模雷射說起。我們知道，要是雷射介質可以很寬頻的放大光，則，只要符合雷射共振腔駐波條件的光，都會形成雷射輸出。這是寬頻雷射的第一步。我們又知道光就是電磁波，電磁波可以線性疊加，若剛好每種頻率的波峰都對到彼此的波峰，就會有最大光強度的加強性干涉。其他部份由於不同頻率相位不同，平均起來便幾乎沒有光，因此在這一瞬間形成超短脈衝。如果人為可以使得不同頻率的雷射光，兩兩拍頻的相位都是固定的，那麼上述超短脈衝便會有規律的形成與重複。我們稱這種技術為鎖模 (mode locking)。鎖模雷射的頻率與時間行為如圖 4 所示。鎖模雷射的每個模絕對頻率並非固定，他們是可以一起飄移的。有人說，這簡單，把其中一個固定在一個頻率已知的穩頻雷射上，則所有模的頻率就都知道了。沒錯，但是一般鎖模雷射大約有一百萬根模，每個模的能量大約 4 nW，怎麼找出拍頻來鎖？1999 年漢希實驗室團隊還是做到了〔7〕。因此鎖模雷射的每個模的頻率在頻率軸上有序排列，都不會動，如同梳子一樣，因此被稱為光頻梳。但這樣的光頻梳雷射有一個不方便的地方，必須要有一個絕對頻率已知的穩頻雷射做參考雷射。原因是，鎖模雷射第 n 個模假設頻率為 $f_n = nf_{rep} + \delta$ ，其中 f_{rep} 為脈衝重複率 (repetition frequency) 與模數 n 的值都容易判斷出來，如果沒有一個絕對頻率已知的穩頻雷射的話 δ 的值無法得知。霍爾想了一個辦法，不須多加任何雷射便可把上述之 δ 找出來。如圖 5 所示，第 $2n$ 個模頻率為 $f_{2n} = 2nf_{rep} + \delta$ 。因此若能把雷射第 n 個模倍頻，與第 $2n$ 個模產生拍頻，即

$$2f_n - f_{2n} = (2nf_{rep} + 2\delta) - (2nf_{rep} + \delta) = \delta$$

如此便可取得 δ 的訊息而控制 δ ，這便是所謂的自參考 (self-reference) 的辦法〔8〕。

這個想法似乎很簡單，但當時哪有一個鎖模雷射可以寬頻到還可以有第 $2n$ 個模，即涵蓋一個八音度 (octave)？幸好在 1999 年，美國 Lucent 公司研發了一種光子晶體光纖 (photonic crystal fiber)，可使雷射頻率變寬。因此圖 5 的點子變成可能。圖 6 為這種光子晶體光纖輸出光經過三稜鏡後顯示的頻寬，相當於彩虹！很難想像，有一個光源具有燈泡的頻寬，又有雷射的同調性。

將 f_{rep} 和 δ 分別以鎖相方法鎖在銻原子鐘時，此雷射又稱為相控鎖模雷射 (phase-controlled mode-locked laser)，此時脈衝雷射的絕對頻率像銻原子鐘一樣精確時，人們相當於擁有幾百萬支光鐘！而微波和光頻的連接亦變的非常容易，你只要將鎖模雷射的兩個模分別鎖在一穩頻的雷射的頻率 f 及其二倍頻 $2f$ ，即可產生與鎖模雷射一樣精確的微波訊號，實現所謂的光鐘，如圖 7。相信不久的將來會出現更準確的時間標準。

我們知道，光纖及通訊技術使可以把光鐘的精確度到處傳送的，這對於全球衛星定位的精確度尤其有幫助。同時，光頻梳雷射在時間軸上也有很好的性質。當上述之 δ 等於零時，相當於脈衝之相速度等於群速度。因此控制 δ 相當於控制超短脈衝時間軸上的相位，我們叫載波-包跡相位 (carrier-envelope phase) 之控制，這對於量子干涉現象的控制，也是一門新的研究主題。〔9〕

光頻梳雷射技術在這幾年有長足的發展。清華大學物理系施宙聰教授實驗室及工研院量測中心彭錦龍博士已完成 self-reference 光頻梳，並拿來測量 Rb 原子 5S-7S 雙光子躍遷的絕對頻率〔10〕。鄭王曜博士也已於中央研究院原子分子研究所將光頻梳雷射鎖於 822 nm 銻原子雙光子吸收之譜線上。光纖光頻梳已於

2003 年由霍爾的同事於美國國家標準與技術研究院（NIST）研發成功。彭錦龍博士實驗室亦完成高穩定之光纖光頻梳雷射。而漢希研究團隊與葉軍（Jun Ye）的團隊亦於 2005 年相繼發展出真空紫外光頻梳。

〔 11 〕

結語

計量學（metrology）是物理學中經常被忽略的一支，霍爾認為計量學是科學之母（Metrology is Mother of Science），它是理論與實驗之間的橋樑，提供物理進展的方法。雷射光譜、雷射穩頻及光頻測量經科學家多年的努力，已開花結果。相信這些技術將能幫助人類更精確地驗證理論；更深入地了解自然和宇宙。

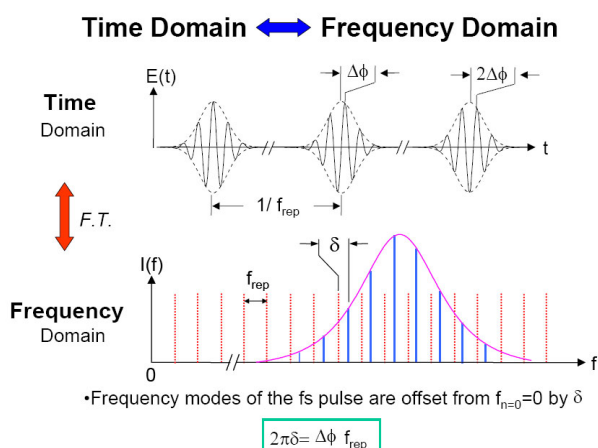


圖 4 鎖模雷射輸出在時間域和頻率域的關係。 $\Delta\phi$ 為相速度不等於群速度造成的載波（carrier）與包跡（envelop）之間的相位差。取自霍爾諾貝爾演講投影片 <http://nobelprize.org/physics/laureates/2005/hall-lecture.html>。

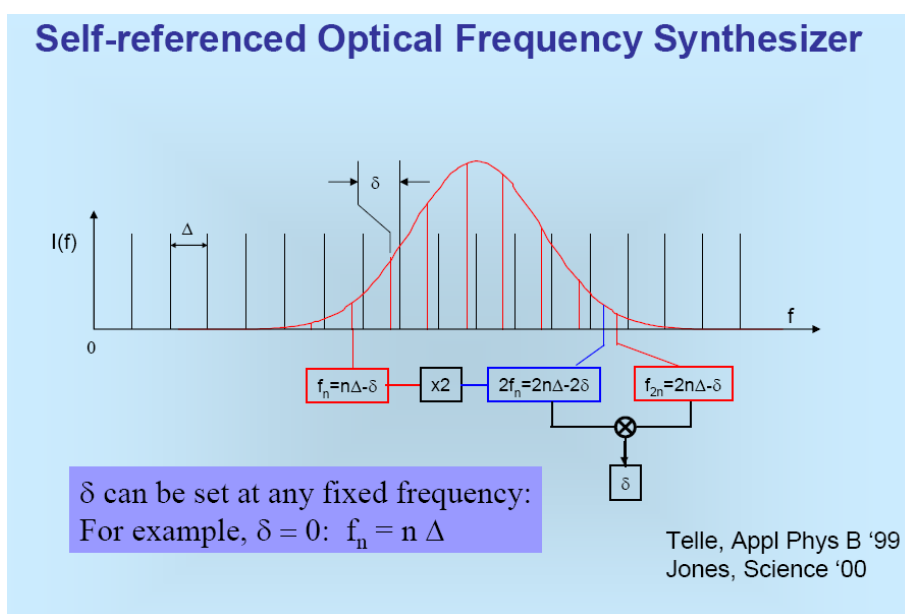


圖 5 利用自參考方法取得 的原理示意圖。取自霍爾諾貝爾演講投影片 (<http://nobelprize.org/physics/laureates/2005/hall-lecture.html>)。

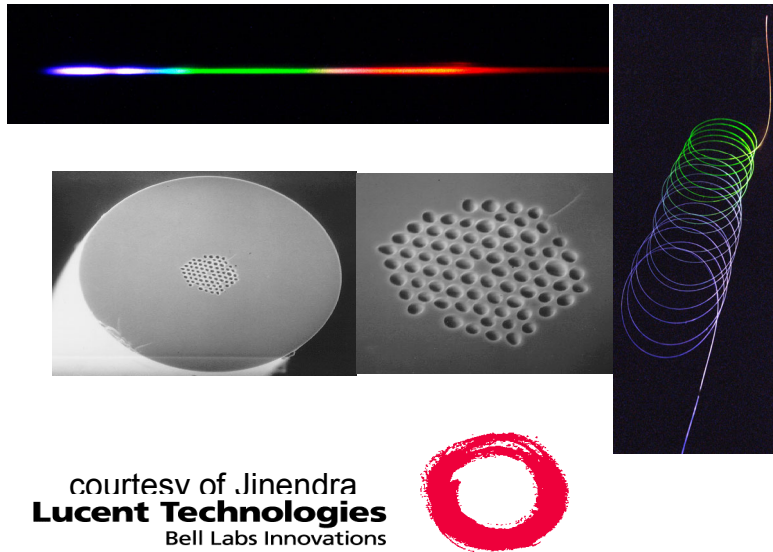


圖 6 光子晶體光纖的結構及鎖模雷射經其產生的白光光譜。

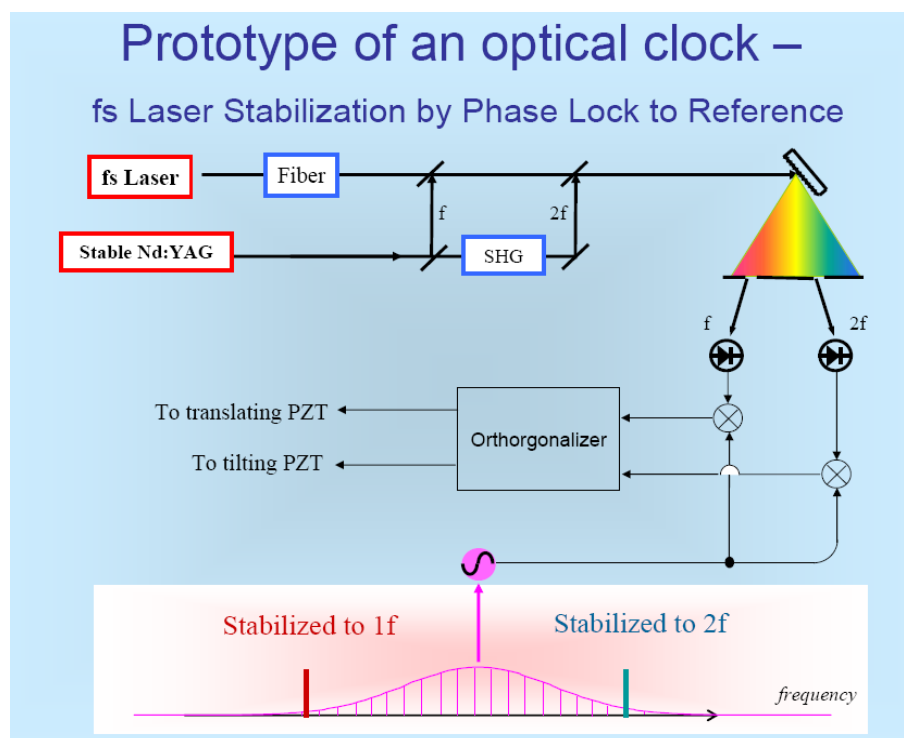


圖 7 光鐘。取自霍爾諾貝爾演講投影片
(<http://nobelprize.org/physics/laureates/2005/hall-lecture.htm>)。

參考資料

1. N. Bloembergen and M.D. Levenson: in *High-Resolution Laser Spectroscopy*, ed. by K. Shimoda, Springer Topics in Appl. Phys., Vol. 13 (Springer-Verlag, 1976).
2. H. Schnatz, B. Lipphart, J. Helmcke, F. Riehle, and G. Zinner, Phys. Rev. Lett. **76**, 18 (1996).
3. V. Chebotayev 於 1992 年過世，享年 54，無法親眼看到光頻梳的誕生。
4. J. N. Eckstein, A. I. Ferguson, and T. W. Hänsch, Phys. Rev. Lett. **40**, 847 (1978)
5. M. Kourogi, K. Nakagawa, and M. Ohtsu, IEEE J. Quantum Electron. **29**, 2693 (1993).
6. J. L. Hall and T. W. Hansch, *Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation, and Applications*, edited by J. Ye and S. Cundiff (Springer-Verlag, 2005).
7. T. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth and T. W. Hänsch, Opt. Lett. **24**, 881 (1999).
8. D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka, A. Stentz, R. S. Windeler, J. L. Hall, and S. T. Cundiff, Science **288**, 635 (2000).
9. T. Udem, Science **307**, 364 (2005).
10. H.C. Chui, M.S. Ko, Y.W. Liu, J.T. Shy, J.L. Peng, and H. Ahn, Opt. Lett. **30**, 842 (2005).
11. G. Gohle, T. Udem, M. Herrmann, J. Rauschenberger, R. Holzwarth, H. A. Schuessler, F. Krausz, and T. W. Hänsch, Nature **436**, 234 (2005); R. J. Jones, K. D. Moll, M. J. Thorpe, and J. Ye, Phys. Rev. Lett. **94**, 193201 (2005).

作者簡介

鄭王曜

中央研究院原子與分子科學研究所助理研究員

e-mail: wycheng@pub.iam.s.sinica.edu.tw

施宙聰 清華大學物理系教授

e-mail: shy@phys.nthu.edu.tw