

極限、超導穩定性以及HTS陶瓷成材工藝等種種問題，它一直還未能走出實驗室。

但現在形勢很快就要改變了。由於美國能源部以及好幾家私有電力和電纜公司的合作，世界上第一條30米長的實驗性高溫超導輸電纜行將在波士頓鋪設，用以取代目前原有的市區地下銅輸電纜，而且輸載能力將比原纜提高2至5倍。倘若成功的話，它就行將像光纖通訊電纜一樣，用以廣泛代替原有的銅纜網絡。這可以說是另一場「網絡革命」的開端。

當然，建造這條長僅百呎的電纜只是試驗性質，它所面對的主要問題在於生產、絞織和安裝質量均勻穩定的HTS導線。這些導線將緊繞在不銹鋼管表面，管中流動液氮以保持溫度不超過HTS臨界溫度。由於目前的銅纜亦需以油減溫，所以這方面當不致出現太大困難。另一方面，系統的建造費用，以及維持液氮溫度(78K)的運轉費用，當是計劃要探討的重要問題。無論如何，高溫超導體之「走上街頭」，看來為期不遠了。

科技文化：專題報導

以超短脈衝產生超高功率激光

引言

自梅曼(Theodore Harold Maiman)的第一代紅寶石激光器出現之後，科技一日千里。我們只要翻一翻近年的有關文章，必定會對激光技術的廣泛應用大感驚訝。然而，有一點卻無甚改變，那就是激光電源的體積。儘管這些年來，它的體積已略為縮小，但直到今天，一般激光器仍佔用了大半張光學台，而其輸出能量卻和1960年代第一台紅寶石晶體激光器沒有多大差別，依然是每脈衝一焦耳左右。有人可能會奇怪：三十年來，進步到底在甚麼地方？

原來，激光技術最主要的進步在於激光脈衝寬度(pulse length)的控制，即將之縮短至小於原來的 10^{12} 分之一，而又保持其原來能量大致不變。假設我們能夠把激光脈衝從10毫秒縮短至10塵秒，而又維持其能量在一焦耳，那新的峰值功率就是100千瓦，亦即0.1千瓩。這就是以超短脈衝(時標由沙秒至塵秒)達到超高功率(由瓩瓦至千瓩瓦水平)的竅門。

然而，猶如人生許多事情一樣，壓縮激光脈衝而又要保持其能量不變，是知易行難的。

把激光功率提升至千瓩瓦級，激光物理學家其實已克服了很多困難。首先，要把毫秒脈衝壓縮為塵秒脈衝，並非單靠一種科學技術就能一蹴即至的。脈衝每壓縮一級，便須發展各種不同的科技來配合。而在科學研究中經常碰到的墨菲法則(Murphy's Law)(凡是可能出差錯的事情，最後必會出差錯)，在發展千瓩瓦激光脈衝的過程中更是屢見不鮮。另一方面，在短脈衝的傳播中，極高的功率會破壞大部分的激光材料。同時，若沒有精心設計的光學配置，激光材料的色散效應和線性效應亦定必令壓縮進程以失敗告終。

產生超短脈衝

把毫秒脈衝壓縮至纖秒脈衝，關鍵在Q-開關(Q-switching)。Q-開關是指共振腔(resonator cavity)Q因數從低Q(高閾值)快速升高Q(低閾值)，纖秒脈衝激光作用就在此開關過程中產生。

若要再進一步跨過沙秒的門檻，鎖模(mode-locking)技術就派上用場。若用聲光調

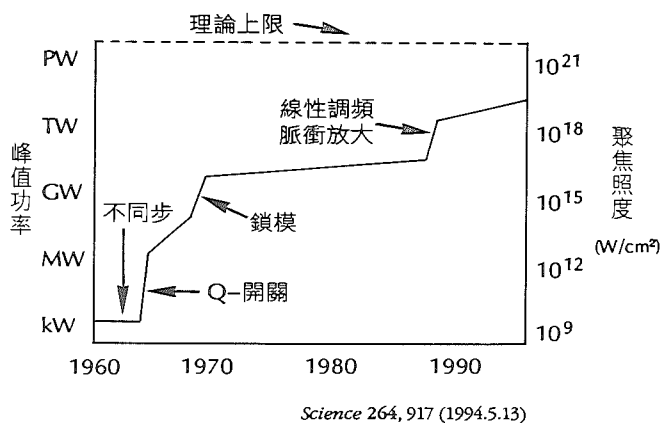
制器強迫數以百計的隨機振盪激光波模作相干(同相的)振盪,原應出現的長激光脈衝就會轉化為一帶有許多尖峰的脈衝序列。尖峰的寬度一般約數十沙秒,而尖峰間的距離則是往返共振腔的時間。飽和吸收體亦可產生鎖模(被動法)。

激光材料的增益帶寬(gain bandwidth)起碼要大於100纖米,才有可能產生10塵秒的超短脈衝。這是因為理論上,所有增益介質(gain medium)的短脈衝極限,是增益帶寬的倒數。比如,著名的激光染料R6G的帶寬由560纖米到635纖米,相應的頻率,即是0.53至0.47千埃赫茲。因此,R6G的最短脈衝大約是19塵秒。最新發展的鈦:藍寶石和紫翠玉的帶寬都達到100纖米以上,是產生超短脈衝的極佳材料。

適當的激光材料,配合線性調頻脈衝壓縮技術(chirped pulse compression),才能邁向短脈衝極限。線性調頻脈衝壓縮其實包含兩個步驟。第一個步驟是頻率掃描(frequency sweep)或線性調頻(chirp),目的是使不同的頻率分量(frequency components)各自佔據脈衝的不同暫時區(temporal spaces)。當低頻暫時超前於高頻,這脈衝就稱為正線性調頻(positively chirped);反之,若高頻超前於低頻,脈衝就是負線性調頻(negatively chirped)。要做到頻率掃描,可利用單模光纖(single-mode fibers)(因它有優越的模式控制、強場約束和

可伸縮的路徑長度,是卓越的非線性光學材料。)的自相位調制(SPM, Self-Phase-Modulation)效應。若再將脈衝通過正群速色散(GVD, Group Velocity Dispersion)媒質,可進一步改善線性調頻脈衝的質量。這種以自相位調制和正群速色散來施加頻率掃描的方法稱為色散性自相位調制(DSPM, Dispersive Self-Phase Modulation)。激光脈衝經過DSPM後,給暫時擴寬了。因此,DSPM其實是一個延伸器。

在第二個步驟,線性調頻脈衝要通過色散媒質(壓縮器)來壓縮。假若負群速色散(GVD)有效,那光纖本身就可作為色散媒質。正線性調頻脈衝通過負群速色散的媒質時,超前於脈衝的低頻分量會變慢,而落後的高頻分量會加快,脈衝因而給壓縮。這其實是孤立子壓縮(soliton compression)模式。目前,更有效的壓縮技術是把DSPM線性調頻脈衝通過外部的光柵對(grating-pair)。光柵對壓縮器作用如一延遲線,而這延遲是與頻率相關的。藉着光柵對的衍射作用,不同頻率的脈衝會通過不同的光學路徑,產生隨頻率升高而降低的時間延遲。如果頻率掃描是線性的(一般經過DSPM後皆如此),光柵對便會產生絕佳的壓縮比率。事實上,光柵壓縮器能把9沙秒脈衝壓縮為0.2沙秒脈衝,壓縮比率高達450。就是今天最短的8塵秒(4個光周期[optical cycles]!)脈衝,亦以相同的光柵壓縮器產生。



Science 264, 917 (1994.5.13)

小規模(面積, 1厘米²)激光峰值功率及聚焦照度的增加

保持能量不變

看過上述的幾段文字,我們不得不佩服科學家為產生短脈衝所付出的努力。然而,讓激光物理學家更苦惱的是:如何克服光學材料的光強感生非線性效應(intensity-induced nonlinear effects)所帶來的困難,使脈衝寬度縮短的同時,能保持能量不變。一般來說,沙秒脈衝在1焦耳/厘米²的能量密度(fluence level)下,能夠在光束質量(beam quality)劇降

前，在激光材料中傳播大約1毫米。然而，在此過程中極高的功率卻會損壞激光材料。綜上所述，短約1沙秒的激光脈衝，不能任意放大，否則脈衝和放大器材都會受到損壞。那麼，千核瓦級的塵秒激光脈衝該如何產生呢？

正如上文所述，把沙秒或纖秒脈衝先延伸再壓縮，就能產生塵秒脈衝。只要線性調頻質量良好，即頻率掃描是線性的，那激光脈衝就可以隨意延伸或壓縮。因此，在放大過程中使用線性調頻質量優良的較長(纖秒)脈衝，就是邁向千核功率的法門。採用由塵秒脈衝延伸而成的纖秒脈衝有兩個好處：一、光強較低，在放大過程中，大部分激光材料(例如，鈦：藍寶石，鈦：玻璃、紫翠玉)不會受到損壞。二、在沙秒脈衝放大過程中惱人的光強感生非線性效應亦被抑制。

放大過程還有幾點要特別注意。首先，必須按步就班，否則便會出現寄生振盪(parasitic oscillations)。比如，在一個放大階段中只能把微焦耳(μJ)級纖秒脈衝放大至毫焦耳(mJ)級；下一階段再把毫焦耳脈衝放大至一百毫焦耳。如果要把脈衝增至數焦耳的能量級，通常需要經過起碼五個階段才行。此外，脈衝在放大過程中可能有能量損耗，須隨時檢驗和修正線性調頻質量。若一切順利，在最後階段所輸出的，將是一個載有數焦耳高質激光能量的線性調頻脈衝。使用光柵對後，能把線性調頻脈衝壓縮到塵秒級，由此達到千核功率級。

結 語

千核功率塵秒級激光脈衝能夠產生，有賴各學科的突破發展，包括激光物理學、經典光學、纖維光學、材料科學和電子學。最近科學家已能集合這些科學成就，製造出能產生數十核瓦輸出功率的塵秒桌上激光系統。如果我們回頭看看輸出功率只有數百瓦的第一代紅寶石激光器，必會驚嘆激光科技已走過了漫長的道路。

關於桌上核瓦激光器的應用，還有一些補充。由於這些核瓦激光器能產生極高的功率密度(power density)，許多新領域亦由此而打開。核瓦激光器能產生約 10^{19} 瓦/厘米²的照度(irradiance)，相當於 10^{14} 伏/米的電場，這比束縛着原子電子(atomic electrons)的庫侖場(coulomb field)還要強一百倍。物理學必須加入新的一章，才能描述這種強場的作用。在應用方面，核瓦激光器可以產生數以百計的諧波(harmonics)、高亮度 X 射線及固體密度($>10^{23}$ 電子厘米⁻³)等離子體(solid density plasmas)、慣性約束核聚變(inertial confinement fusion)。

參閱M.D. Perry, G. Mourou: *Science* 264, pp. 917-24 (1994).

羅蔭權 加州大學聖地牙哥分校獲博士學位。歷任公司技術顧問、高級工程師。主要研究短波長、高功率激光。曾在國際性科學週刊發表論文達二十多篇。

極小和極大數目

以下記注極小和極大數目名稱的系統辦法是根據《英漢物理學詞匯》(北京：科學出版社，1975)而定的。我們特別在此提出，希望引起注意，因為用簡潔的代稱對促進文字效率是十分重要的。

毫 (milli-) = 10^{-3} 微 (micro-) = 10^{-6}

纖 (nano-) = 10^{-9}

沙 (pico-) = 10^{-12} 塵 (femto-) = 10^{-15}

千 (kilo-) = 10^3 兆 (mega-) = 10^6

京 (giga-) = 10^9

核 (tera-) = 10^{12} 千核 (peta-) = 10^{15}

其中纖、沙、塵、京、核等的用法由於較少人知，所以往往用組合方式代替，例如「沙」稱為「微微」等，但在應用效率上這顯然是不好的。