

知識天地

埃秒 (Attosecond) 光脈衝—挑戰時空極限

陳蔚然博士後研究、孔慶昌研究員 (原子與分子科學研究所)

時間的概念對人類來說一直是很有趣的。從不同的角度來看，每一個人對時間都有不同的看法。在牛頓機械觀的世界裡，時間是絕對而平穩地流逝著。直到愛因斯坦建立了相對論之後，改變了人類認為時間是一個絕對物理量的觀念。不論如何，時間都標示了這個世界目前所處的狀態，而從狀態的變化亦顯示出了時間的流逝；因此，時間的測量一直是人們很感興趣的課題。

諾貝爾物理獎得主 Nicolaas Bloembergen 教授在 2004 年於夏威夷舉行的一場學術研討會中指出：二十一世紀在量子電子學中最令人振奮的一個發展，就是在埃秒時間尺度下超快科技的浮現。所謂的埃秒 (attosecond) 就是 10^{-18} 秒，就算快如光速，在這麼短的時間內也只能走 0.3 奈米，即大約一個原子的距離。二十一世紀科學已邁進奈米尺度的世界，埃秒的時代亦隨之來臨。

正如其言，最近幾年在埃秒時間範圍下，多種現象的研究正如火如荼地展開。而促成此發展的其中一個重要原因便是脈衝雷射技術的精進。從傅立葉轉換理論，我們得知要達成越短的時間寬度，其相對的頻譜需要則越寬。而一種以摻鈦藍寶石為增益介質的超快雷射，其頻寬已可以使脈衝達到 5 飛秒 (10^{-15} 秒) 的時間寬度。因為此雷射的中心波長大約在 800 奈米，在這麼短的時間寬度下脈衝波包內的電場僅僅存在了少數幾個振盪週期。同時因為能量集中在這麼短的時間之內，它可以輕易的達到每平方公分 10^{14} 瓦的強度，(夏天太陽照到地面上的強度約為每平方公尺 100 瓦左右)。應用此少數振盪週期脈衝的時間及強度特性，足以用來驅動原子中的電子相對於原子核產生強烈的往復運動。若把這個現象作用在氣體原子，觸發非線性效應而產生高次諧頻 (High Harmonics)，已經能有效地把此諧頻調成短至 130 埃秒的脈衝了。在這方面最成功的可算是在德國慕尼黑 Max Planck 研究院的 Ferenc Krausz 教授。他的研究團隊利用這些脈衝，成功地觀察到光波電場隨著時間的變化，以及深藏在原子中電子的游離過程，甚至於可以控制它們的動向及跳躍行為。他們與李院長過去一位博士生 Marc Vrakking 合作，用埃秒雷射可以導向簡單的化學作用。最近他們又測量到在鎢金屬表面的電子與表面下電子游離的時差 (約在 100 埃秒內)。

但於此同時用高次諧頻方式產生的埃秒脈衝也面臨了一些瓶頸。因為以高次諧頻所產生的埃秒脈衝，能量轉換效率很低 (10^{-6} ~ 10^{-9} 次方)。而且所產生的光子能量都落在軟 X 射線的能量範圍內 (30-100eV)。在這個光子能量範圍的低強度光源用來偵測單一原子，或是小分子的光游離及光電子動力學現象是很好用的工具，但是要應用在日常生活中會接觸到的凝態物質、大分子及生物分子系統的研究時則不太適合。因此，對這類分子材料，要進行超快電子動力學的研究及控制，還需要以較低的光子能量所產生的埃秒脈衝。

史丹福大學哈里斯 (S. E. Harris) 教授研究群提出以高次受激拉曼散射 (High Stimulated Raman Scattering) 來產生寬的頻譜。這是用兩道高強度的雷射光來驅動分子的轉動或振動運動，經過適當的波長調整使這兩道雷射的波長差值接近分子的拉曼共振頻率之後，將驅使分子的運動趨於同調。這就好像所有的分子同時收到了訊號而跳出相同的舞步。而這些同調運動的分子將會調變驅動雷射光的頻率而發出高階拉曼旁頻的同調光源。而因為分子振盪的頻率遠低於電子躍遷運動的頻率，所以以拉曼效應產生的頻譜均落在可見光與紫外光範圍內，利用此光源足以產生次飛秒及埃秒級的脈衝光。

雖然以上提及的是用兩種不同的方法來產生大頻寬的光譜，但是用來合成超短光脈衝的原理是相同的。圖 1(a)

展示了這個合成的原理，當所有頻率的相對相位都調整到一致時，其頻譜越寬所能得到的脈衝時間寬度就越窄。圖 1(b)顯示了在合成脈衝時各個頻率的電場振盪相對相位關係的重要性，如果沒有仔細的調好它們的相對相位，則所合成的電場將不會形成脈衝波形。

以我們實驗室過去所研發出的高解析波長可調的脈衝雷射為驅動光源，應用在氫分子的振動調變作用，已經成功的產生了一個擁有超過 15 階高轉換效率的拉曼旁頻光譜的光源，其頻寬超過 $70,000\text{cm}^{-1}$ ，頻率涵蓋了近紅外光-可見光-紫外光，光子的能量範圍在 $(0.5-9\text{eV})$ 。若將此頻寬的光譜適當組合時，由傅立葉轉換至時間譜上可以得到約 500 埃秒的脈衝波包寬度。最近我們成功地利用其中 7 階的拉曼光譜來合成

出了 0.7 個電場振盪週期的脈衝，載波電場的時間寬度為 440 埃秒，而脈衝波包的時間寬度為 1.4 飛秒。這是目前為止，在可見光到紫外光波長範圍所產生最短時間的光脈衝。在調制過程中，需要對各個頻率的電場相位調整，我們充分利用臺灣在液晶面板工業的優勢，與交通大學潘犀靈、趙如蘋兩位教授合作，採用自製液晶相位調制器來調控各個頻率的相位，以達到同相的條件。液晶相位調制器是利用外加電壓的改變導致液晶分子轉向進而改變折射率的方式，使經過調制器的光波相位改變。

在脈衝合成的過程中還有一個十分有趣的因素，會影響脈衝波包中載波電場的結構，而此因素就是所採用的光譜中各個頻率間的數值關係。如果這些頻率的數值是為整數比率 (integer) 關係，就是 $f_m = mf_0$ ， f_0 為基頻， m 為整數，則在一連串的脈衝中，每一個脈衝波包內載波電場的振盪波形都是保持穩定不變的。換句話說，也就是載波峰值與波包峰值間相對位置的差異 (載波與波包之間的相對相位) 是保持恆定不變的，如圖 2(a)。但如果這些頻率的數值是非整數比率關係，例如： $f_m = mf_0 + f$ ， $f \neq 0$ 或 f_0 的倍數，則在這一連串的脈衝波包內載波電場的振盪波形會不斷的變更，如圖 2(b)。波形不斷改變，有如不停改變心境的人，不甚理想。

時間寬度如此短的雷射脈衝可以應用的一個重要領域，即是在電子動力學方面。從波耳古典量子論的氫原子來看，電子繞原子核的運動週期僅僅數十埃秒。所以舉凡原子中光游離電子的運動、分子鍵結中電子的運動、化學反應中電子的轉移或是凝體表面光電效應的電子傳輸過程等研究，都是埃秒脈衝可以大顯身手的範疇，而光子的能量範圍在可見光—紫外光的埃秒脈衝更是可以應用在日常生活中會接觸到的凝態物質及生物分子系統的獨特光源。

結語

利用氫氣分子調變所產生的頻譜，我們合成的載波電場已經接近埃秒級的時間寬度了。倘若加入更多的拉曼頻率，即可使脈衝波包的時間寬度也進入埃秒的領域。適當頻率的選定，可以讓我們達到載波包相位固定的脈衝。若再進一步有效調控每一個頻率的相對相位及峰值，便能調出各式各樣的波形，如方波、鋸齒波、三角波等。光脈衝的波形完全受我們任意控制，就如同在射頻領域的波形控制一般。此時不但可以用來探討或控制奈米物質及生物分

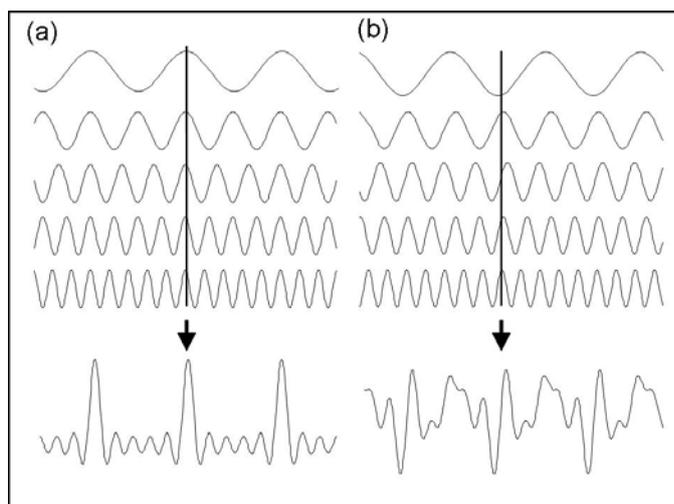


圖 1 由 5 道不同頻率弦波的相加來表示合成的波形。(a)的 5 道弦波的相對相位是一致的，(b)的 5 道弦波的相對相位間存在不同的偏移量。

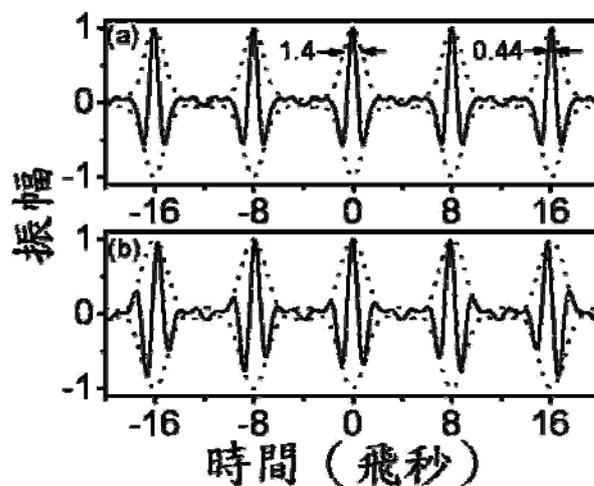


圖 2 虛線表示的是脈衝波包，實線表示的是載波。(a)顯示所有的載波的相位都是相同的。(b)顯示載波的相位持續的變化，從最左邊的波形及最右邊的波形，

子的電子動向，還可以用來探討奈米電子及奈米光電元件的高速反應。此外，這些經過“整形”的脈衝，對於微觀系統的量子控制也有相當大的發揮空間，可見有了埃秒光源，將開啓許多既前瞻又有趣的探討！

參考文獻

1. P. H. Bucksbaum, *Science* 317, 766 (2007).
2. G. Sansone et al, *Science* 314, 443 (2006).
3. M. Y. Shverdin, D. R. Walker, D. D. Yavuz, G. Y. Yin and S. E. Harris, *Phys. Rev. Lett.* 94, 033904 (2005).
4. S. W. Huang, W. -J. Chen and A. H. Kung, *Phys. Rev. A* 74, 063825 (2006).
5. G. G. Paulus, F. Lindner, H. Walther, A. Baltuska, E. Goulielmakis, M. Lezius, and F. Krausz, *Phys. Rev. Lett.* 91, 253004 (2003).