

超快光波助變振盪器及放大器之原理、實例與模擬

為了擴展超快雷射技術在各個領域上的應用，不可避免地需要調變超短雷射脈衝波長。超快光波助變技術為達到這個目的所最常用的方法。文中探討該技術的基本原理、實作經驗及電腦模擬。

王俊程、王俊凱

一、簡介

隨著超快雷射技術越趨於成熟，該項技術也被廣泛地應用在物理、化學、生物與醫學上的研究。筆者曾分別在 1993 年及 1996 年受邀在科儀新知撰寫「快速雷射在化學上的應用」⁽¹⁾ 及「超短雷射脈衝與物質的激烈作用」⁽²⁾ 兩篇介紹性文章。此次筆者願就近年的研究成果來介紹調變超短雷射脈衝波長的光波助變技術，以提供有興趣的讀者製作與應用時的參考。

物質（氣體、液體、或固體）與光波的作用大小及光波波長有非常緊密的關係，因此在超快雷射應用上必須時常調變波長。譬如在超快雷射光譜技術中的激發 - 探測動態吸收光譜 (pump-probe

transient absorption spectroscopy) 實驗⁽¹⁾，激發雷射脈衝首先必須將在基態 (ground state) 的物質系統激發躍遷至激發態 (excited state)。然後經過一定的時間差 (time delay) 後，探測脈衝再透過激發態的吸收促使在激發態之物質系統躍遷至另一個能階，以觀察其在激發態的演進情形。由此可知，激發脈衝的波長必須調變至所感興趣的某一個能階躍遷，以觸發光物理或光化學的作用。而更必須能夠連續調變探測脈衝波長，以便詳細地描畫出物質系統在此一特定的激發態上的弛張 (relaxation) 或其化學反應過程。再例如固體物質皆有一個光吸收的最小光子能量，稱為能量間隙 (band gap)。若與之作用的超快雷射脈衝光子能量大於此一能帶間隙 (也就是說， $\hbar\omega > E_g$)，或者若其波長小於此一能帶間隙所相對之臨界波長 ($\lambda < \lambda_c = hc/E_g$)，則物質系統將可以進行單光子吸收 (one-photon absorption)。若脈衝波長大於此一能帶間隙所相對之波長 ($\lambda > \lambda_c$)，則物質系統將只能藉由超快雷射脈衝之高功率以進行多光子吸收 (multiphoton absorption)⁽²⁾。前者吸收效

王俊程先生現為國立台灣大學光電工程研究所博士班學生。

王俊凱先生為美國哈佛大學應用物理學博士，現任國立台灣大學凝態科學研究中心副研究員。

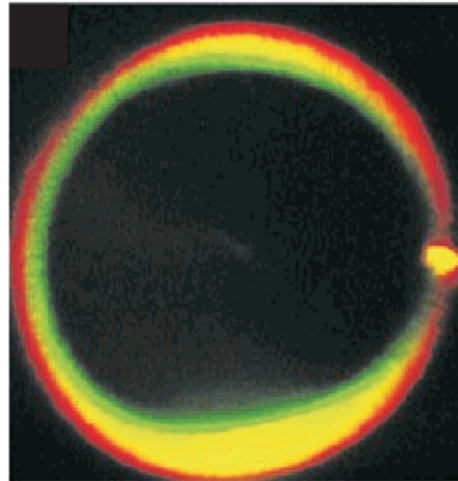
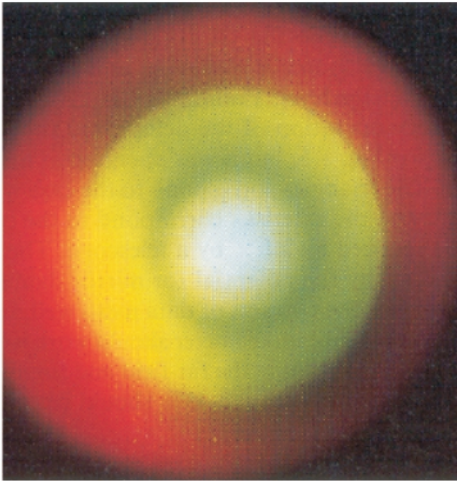


圖 1.
自發助變螢光的空間分佈圖。(a) 以 10 奈秒 (ns), 355 奈米 (nm) 的激發雷射脈衝照射在尿素 (urea) 非線性光學晶體⁽⁵⁾; 而 (b) 以 150 飛秒 (fs), 390 奈米 (nm) 的激發雷射脈衝照射在 BBO 晶體⁽⁶⁾。

率顯然遠大於後者，而其對物質所造成的光學破壞 (optical damage) 也會大不相同。由以上兩個例子可知，調變超快雷射波長在應用超快雷射技術上是非常重要的。

在本文中，筆者將介紹一種常用於調變超快雷射波長的技術：超快光波助變 (optical parametric generation) 技術。以筆者近年來在這一方面的實作研究為基礎，介紹此項技術的原理、實際製作上的考慮，以及利用電腦模擬來對該項技術的瞭解。

二、原理

光波助變效應幾乎與雷射有相同長的歷史。此一效應乃是利用二次非線性光學效應將一個激發光子 (其波長為 λ_p) 分開為兩個低能量 (長波長) 光子 (其波長為 λ_s 與 λ_l)，並且滿足能量守恆定律，

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_l} \quad (1)$$

讀者可以參考沈元壤的書⁽³⁾ 有關光波助變效應的原理，也可以參考 Barnes⁽⁴⁾ 有關光波助變振盪器 (optical parametric oscillator, OPO) 設計的介紹。這兩個長波長的光波分別稱為訊號光波 (signal wave) 和游光波 (idler wave)。簡言之，光波助變效應乃是和頻 (sum-frequency generation) 的反向過程。除了能量守恆定律須遵守之外，動量守恆定律 (光子動量為 $\hbar k$) 也必須滿足。也就是說，在非線性光

學晶體內， $\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_l$ ，此又稱為相位匹配 (phase matching) 條件。假若這三個光波的傳導方向相同，則相位匹配條件簡化為 $k_p = k_s + k_l$ ，又稱為共平行 (collinear) 相位匹配。此一條件成為

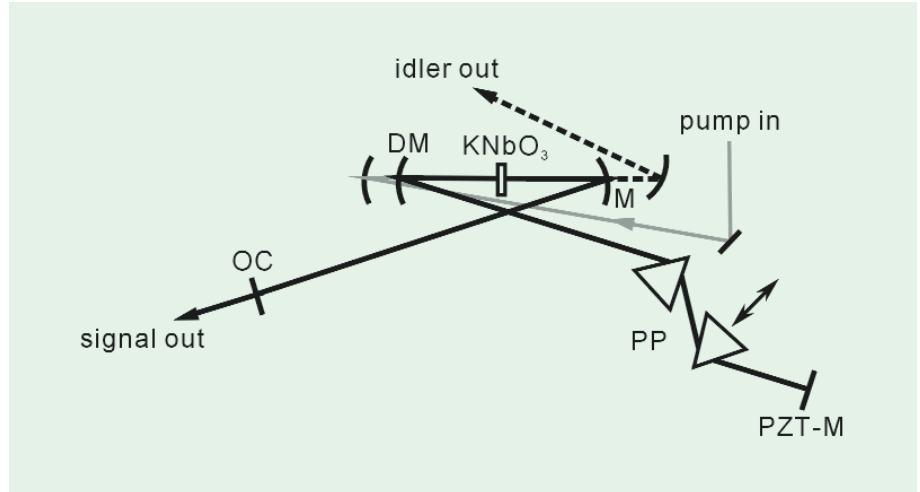
$$\frac{n_p}{\lambda_p} = \frac{n_s}{\lambda_s} + \frac{n_l}{\lambda_l} \quad (2)$$

$$k_j = \frac{2\pi n_j}{\lambda_j}$$

因為晶體的折射係數隨波長而變化「色散效應 (dispersion effect)」，因此在共平行相位匹配情況下，公式 (2) 的條件無法在普通的勻稱性 (isotropic) 晶體內滿足。為了滿足此一條件，常仰賴非勻稱性 (anisotropic) 晶體的雙折射 (birefringence 或 double refraction) 效應。簡言之，不同偏振方向的光波在此種介質之折射係數不同。若將激發雷射脈衝與某非線性光學晶體作用，則將在所有滿足相位匹配條件的方向上產生自發助變螢光 (spontaneous parametric fluorescence)。圖 1(a) 為以 10 奈秒 (ns)、355 奈米 (nm) 的激發雷射脈衝照射在尿素 (urea) 非線性光學晶體所產生的自發助變螢光⁽⁵⁾；而圖 1(b) 為 150 飛秒 (femtosecond, fs)、390 奈米 (nm) 的激發雷射脈衝照射在 BBO 晶體所產生的自發助變螢光⁽⁶⁾。因此由這種自發助變螢光的空間分佈圖，可以決定其相位匹配條件。讀者可以參考 Dmitriev 等人所著之書⁽⁷⁾ 內各種相位匹配設計及不同非線性光學晶體特性。

圖 2.

KNbO₃ 超快光波助變震盪器的配置圖⁽¹⁴⁾。M，反射鏡；DM，兩色向性反射鏡 (dichroic mirror)；OC，輸出耦合鏡片 (output coupler)；PP，雙稜鏡組 (prism pair)；PZT-M，壓電微移動裝置。



對於單頻光波在共平行相位匹配情況下的光波助變效應，可以用下列非線性光波耦合方程式 (nonlinear coupled wave equations)⁽³⁾ 來描述：

$$\frac{dB_p}{dz} = \frac{i\omega_p}{2n_p c} \epsilon_0 \chi_{\text{eff}}^{(2)} B_s B_i e^{-i\Delta k z} \quad (3)$$

$$\frac{dB_s}{dz} = \frac{i\omega_s}{2n_s c} \epsilon_0 \chi_{\text{eff}}^{(2)} B_p B_i e^{i\Delta k z} \quad (4)$$

$$\frac{dB_i}{dz} = \frac{i\omega_i}{2n_i c} \epsilon_0 \chi_{\text{eff}}^{(2)} B_p B_s e^{i\Delta k z} \quad (5)$$

其中 $E_j(z, t) = B_j(z)e^{-i\omega_j t} + c.c.$ ，且 $\Delta k = k_p - k_s - k_i$ 。在這裡，三個光波都往同一個方向 (z 方向) 傳播。有效的二次非線性光學係數 $\chi_{\text{eff}}^{(2)}$ 與晶體種類、色散效應 (dispersion)、雙折射特性及相位匹配的種類有關⁽⁷⁾。公式 (3) - (5) 中的 $e^{i\Delta k z}$ 代表相位匹配效應對輸出的影響。

不同於普通的光波助變振盪器，超快光波助變技術必須考慮以下兩項因素。首先，由於介質的色散效應，使得這三個飛秒雷射脈衝 (pump, signal and idler) 在非線性光學晶體內傳導時，會產生脈衝擴展 (pulse broadening) 效應⁽⁸⁾。此乃導因於在介質內的光速隨波長而異，如此使得具有大頻寬 (line width) 的飛秒雷射脈衝的傳導造成不同波長間有光程差 (optical path length, $n(\lambda)L$)。這將造成激發雷射脈衝功率密度的降低，並且使得輸出的訊號及游光波脈衝寬度增加。尤有甚者，由於這三個光波

波長差異甚大，也造成它們隨著在非線性光學晶體內傳導而越行分離⁽⁹⁾，如此而減低光波助變的效率。這將影響非線性光學晶體、其厚度及相位匹配設計的選取。再者，由於飛秒雷射脈衝的功率極高 (約一百億瓦)，容易使得光波助變效應極易達到飽和，而造成脈衝波形扭曲的現象。並且使得更高次的非線性光學效應出現 [自聚焦 (self-focusing)^(3,9)、自相位調變 (self-phase modulation)^(9,10)、助變四光波混頻 (parametric four-wave mixing)^(3,10) 及光學破壞 (optical damage)⁽²⁾ 等]，這將大大影響二次的非線性光波助變的效果，也因此顯現出在光波助變系統中激發功率密度選擇的重要性。

三、實例

自從超快雷射技術發展以來，光波助變技術就立即被應用來產生波長可調的超快雷射脈衝。其發展的方向可分為超快光波助變振盪器 (optical parametric oscillator) 及超快光波助變放大器 (optical parametric amplifier)。以下筆者將對此兩種技術概要陳述。

1. 超快光波助變振盪器 (Ultrafast Optical Parametric Oscillator)

圖 2 為光波助變振盪器的示意圖⁽¹⁴⁾。激發光源為飛秒鈦藍寶石雷射振盪器 (femtosecond Ti:sapphire oscillator)，其激發功率為一至二瓦

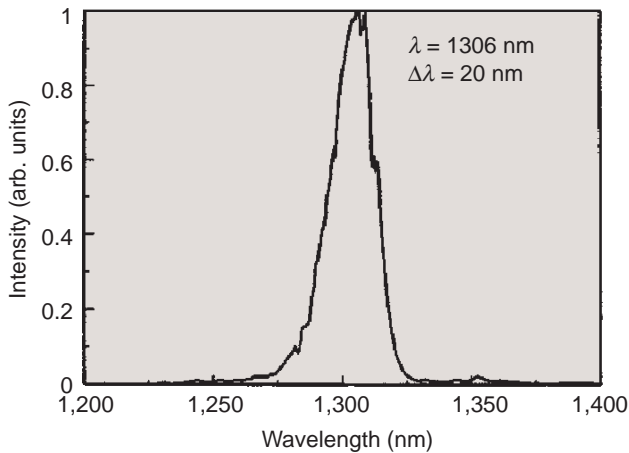


圖 3. KNbO_3 超快光波助變振盪器的訊號脈衝光譜⁽¹⁴⁾。

(W)，振盪頻率為 82 MHz，脈衝寬度約為 100 飛秒。而光波助變振盪腔是由一個一毫米厚的 KNbO_3 非線性光學晶體和一對色散補償 (dispersion-compensated) 稜鏡 (PP) 所組成的線型共振腔 (linear cavity)。光波在此一共振腔所環繞的光程時間與激發光源的振盪週期 (time period) 相匹配。並且在一個反射鏡上裝設壓電微移動裝置 (PZT-M) 來隨時保持此一匹配關係。 KNbO_3 晶體為第一類 (Type-I) 角度相位匹配設計 (angle phase-matching)。乃是以調動晶體角度來改變所產生之訊號和游光波波長。當激發脈衝在晶體內產生訊號和游光波的光子後，其中的訊號或游光子則可藉由光波助變共振腔的高反射鏡環繞共振腔而回到 KNbO_3 晶體，以便接受下一個激發脈衝的光波助變放大，使得訊號或游光子數目逐次增加。共振腔中的一個輸出耦合鏡片 (output coupler) 可將每次傳導至此一鏡片的部分訊號或游光波超短脈衝輸出。由於在平衡狀態下，輸出的超短脈衝都環繞共振腔多次，使得經過晶體所累積的群速色散效應 (group velocity dispersion) 相當可觀。因此相同於超快雷射共振腔的設計，必須有一個補償群速色散效應的元件。在此 (圖 2)，一個反平行 (anti-parallel) 擺置的稜鏡組被用來達到此一目的。為了補償輸出脈衝穿透輸出耦合鏡片所累積的群速色散效應，常常會在輸出端再附加一個色散補償稜鏡組來再壓縮其脈衝寬度。圖 3 及 4 為在中心輸出波長為 1306 奈米

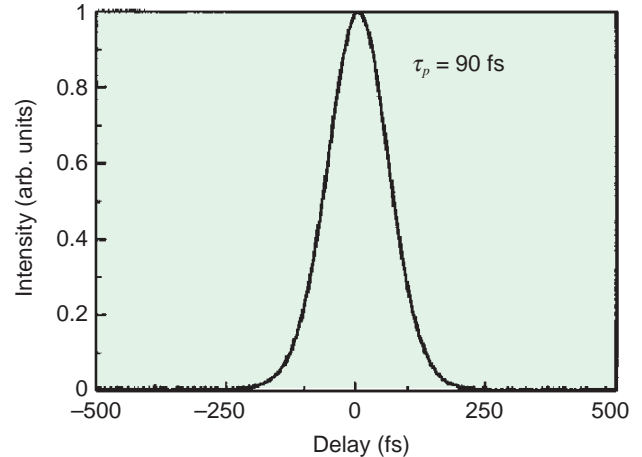


圖 4. KNbO_3 超快光波助變振盪器的自相關行跡⁽¹⁴⁾。

時的光譜及自相關行跡 (autocorrelation trace)。為了將輸出波長調變至其他波長，可以利用倍頻和差頻 (difference frequency generation) 產生在可見光、紫外光和紅外光波長的超短雷射脈衝。

筆者在表 1 中，詳列了至今代表性的超快光波助變振盪器，以供讀者參考。

2. 超快光波助變放大器 (Ultrafast Optical Parametric Amplifier)

由於上述光波助變振盪器的輸出脈衝能量相當小 [<100 奈焦耳 (nJ)]，因此多被利用於吸收係數較大的半導體和染料系統的研究。並且，也因此使得藉由再次倍頻及差頻作用來產生的波長範圍有限。為了擴展可研究物質系統的種類及可用波長範圍，因此有光波助變放大器的發展。圖 5 為筆者實驗室內超快光波助變放大系統的實例。激發光源為從飛秒鈦藍寶石雷射共生放大系統 (femtosecond Ti:sapphire regenerative amplifier system) 所產生之高能脈衝 [1 毫焦耳 (mJ)]。首先分出約 5 微焦耳的激發能量，用以在藍寶石 (sapphire) 晶片產生寬廣波長範圍的超連續 (supercontinuum) 光源。此一光源被利用為光波助變放大過程中的訊號光波種子光源 (seeded signal wave)。再分出約 150 微焦耳的激發能量來作第一級的光波助變放大之用。前述之訊號種子光波與第一級之激發光束重疊平行傳播至 BBO 非線性光學晶體。此一晶體為共平行第二類

表 1. 超快光波助變振盪器一覽表。NLC, PM, 非線性光學晶體及相位匹配設計；KNB, KNbO_3 ；PPLN, 週期撐張式 (periodically poled) LiNbO_3 晶體； Q , 類相位匹配 (quasi-phase matching)； τ , 脈衝寬度； P_p , 激發功率； P_s^* , 最大訊號功率； P_l^* , 最大游功率。

NLC, PM	λ_p (nm)	P_p (W)	τ_p (fs)	λ_s (μm)	P_s^* (W)	τ_s (fs)	λ_l (μm)	P_l^* (W)	τ_l (fs)
BBO, I ⁽¹¹⁾	775	2	80	1.1 - 1.35	0.37	130	1.8 - 2.25	0.2	130
KTP, II ⁽¹²⁾	790	2.5	70	1.2 - 1.5	0.35	57	-	-	-
KTA, II ⁽¹²⁾	780	1.2	90	1.29 - 1.44	0.03	85	1.83 - 1.91	0.04	150
RTA, II ⁽¹²⁾	760 - 820	1.8	70	1.03 - 1.3	0.25	58	2.1 - 3.65	0.2	250
CTA, II ⁽¹³⁾	809	1.12	70	1.01 - 1.18	0.235	56	2.59 - 4.12	-	-
KNB, I ⁽¹⁴⁾	800	1.45	100	-	-	-	2.8 - 6.8	0.17	60
PPLN, Q ⁽¹⁵⁾	810	1.5	100	-	-	-	3 - 3.9	0.014	160

相位匹配設計 (collinear Type-II phase matching)。其中激發及游光束皆為普常式光波 (ordinary wave) 偏振方向，而訊號光波為異常式光波 (extra-ordinary wave) 偏振方向。此種設計有兩個重要目的。第一，在此種相位匹配情況下，訊號及游光波的偏振方向互相垂直。因此，當兩者波長接近所謂的重疊點 (degenerate point)，也就是訊號光波波長與游光波波長相同時，可以很容易的利用偏振片 (polarizer) 來分開兩者。第二，在第一類相位匹配 (Type-I phase matching) 下的重疊點時，無法分辨訊號及游光波，而造成其輸出脈衝及光譜寬度有相當巨大的變化，且對晶體調整角度相當敏感，而無法使用。而這種情況並不會在第二類相位匹配設計中

出現。第一級的放大倍數為一百萬倍。然後再將經第一級放大產生之訊號及游光束與剩下激發光束重合在同一塊 BBO 晶體上，來進行第二級放大。而第二級放大倍數約為一百倍。為了使得光波助變放大過程是保持低於或近飽和狀態下進行，因此其激發光束在晶體上的功率密度需適當設計與細微調整，以免產生變形的輸出脈衝。圖 6 為輸出脈衝能量與輸出波長的關係。其輸出波長可從 1.1 微米 (μm) 調變至 2.8 微米。藉由二倍頻晶體 (如 BBO)，可產生從 550 奈米至 1.1 微米的脈衝光源。再藉由另一個二倍頻晶體，可產生從 280 奈米至 550 奈米的脈衝光源。或者可藉由訊號及游光波在一個差頻晶體 (如 AgGaS_2) 的作用，將波長延伸

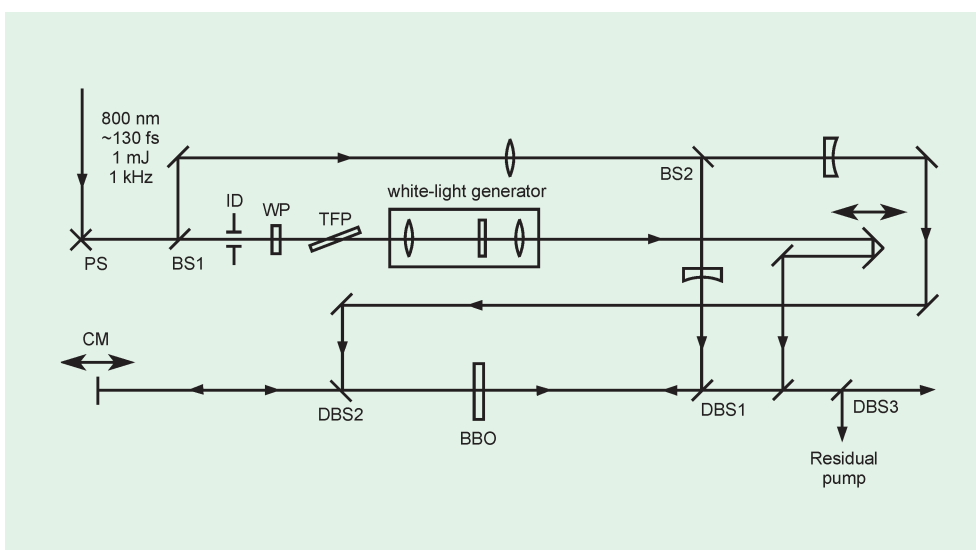


圖 5. BBO 超快光波助變放大器的配置圖⁽¹⁶⁾。PS, 潛望鏡裝置 (periscope)；ID, 光圈 (iris diaphragm)；WP, 半波片 (wave plate)；TFP, 薄膜偏振鏡片 (thin-film polarizer)；BS1 - 2, 分光鏡片 (beam splitter)；CM, 凹面反射鏡片 (curved mirror)；DBS1 - 3, 兩色向性分光鏡片 (dichroic beam splitter)。

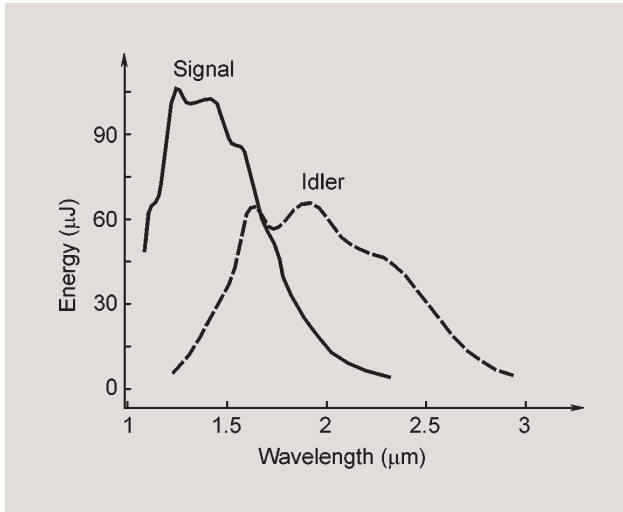


圖 6. BBO 超快光波助變放大器的輸出脈衝能量與波長的關係⁽¹⁶⁾。

至 10 微米以上。

在上述的共平行相位匹配設計中，只考慮了三個光波（激發光波、訊號光波、游離波）相位速度（phase velocity）間的互相匹配。但是因為此三個光波脈衝的群速並不相同，使得這三個光波脈衝在晶體傳播時會漸漸分離，因此並不能有效的進行光波助變的放大。並且在此種相位匹配設計中，其有效頻寬相當窄，使得產生之訊號及游光脈衝寬度無法達至 50 飛秒以下。為解決以上這兩個問題，因此有非共平行相位匹配（non-collinear phase matching）設計的產生。利用非共平行的光波傳導架構，可以達到同時滿足相位速度與群速匹配的條件，這種設計稱為無色差相位匹配（achromatic phase matching）。設計在這種相位匹配中，游光波的群速與訊號光波之群速在共同光波傳播方向的投影相同（圖 7），如此可拓寬可用光譜範圍。以此設計，可產生小於 10 飛秒的光波助變脈衝輸出⁽¹⁸⁾。

最後在表 2 中，詳列了至今代表性的超快光波助變放大器，以供讀者參考。

四、模擬

利用超快雷射於設計光波助變系統時，設計者常只知所需的輸出波長範圍、脈衝能量及脈衝寬度

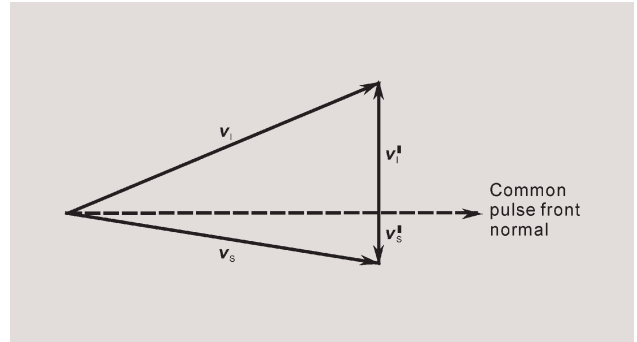


圖 7. 在非共平行相位匹配條件下，游光波與訊號光波的群速在共同脈衝傳播方向的投影相同的關係⁽²⁵⁾。 v_s ，訊號光波之群速； v_i ，游光波之群速； v_s^v ，訊號光波之群速垂直於共同脈衝傳播方向的分量； v_i^v ，游光波之群速垂直於共同脈衝傳播方向的分量。

等，然而卻須決定下列參數：晶體及其厚度、相位匹配種類、激發能量、放大級數及其它波長轉換方式（倍頻、差頻或和頻）等。由於如前所述，超短雷射脈衝的光波助變效應機制相當複雜，如何將輸出需求轉換成設計參數會是設計者所面對的挑戰。目前設計者絕大多數仍仰賴粗淺的估計及嘗試錯誤，因此無法得到最佳設計的結果。詳細而言，所需考慮的因素有下列十項：

1. 該用哪一種相位匹配設計？
2. 激發脈衝能量及功率密度的選擇；
3. 該用幾級放大？
4. 晶體的種類及其厚度的選擇；
5. 群速色散效應的考慮；
6. 如何配合群速色散補償元件的使用？
7. 寬波長範圍之超連續光源當作訊號種子光源的效應；
8. 激發雷射脈衝的啾啾（chirp）對於光波助變放大的影響；
9. 不同光波之間光程時間差對光波助變放大的影響；
10. 如何預測或控制輸出脈衝寬度及時間頻寬相乘值（time-bandwidth product）？

由以上這些複雜因素的考慮可知，設計者無法用簡單的估計和計算來精確預測輸出，也無法找出

表 2. 超快光波助變放大器一覽表。NLC, PM, 非線性光學晶體及相位匹配設計；NC, 非共平行 (non-collinear)；PPKTA, 週期撐張式 (periodically poled) KTA 晶體；MNB, MgO:LiNbO₃；KNB, KNbO₃；Q, 類相位匹配 (quasi-phase matching)； τ , 脈衝寬度； E_p , 激發脈衝能量； E_s^* , 最大訊號脈衝能量； E_l^* , 最大游脈衝能量。

NLC, PM	λ_p (nm)	E_p (μ J)	τ_p (fs)	λ_s (μ m)	E_s^* (μ J)	τ_s (fs)	λ_l (μ m)	E_l^* (μ J)	τ_l (fs)
BBO, II ⁽¹⁶⁾	800	1000	130	1.1 - 1.6	105	150	1.6 - 2.6	65	160
BBO, I ⁽¹⁷⁾	400	1	150	0.45 - 0.7	0.15	150	1 - 2.5	0.045	150
BBO, NC-I ⁽¹⁸⁾	397.5	130	130	0.55 - 0.7	5	6	0.9 - 1.3	0.5	8
KTP, II ⁽¹⁹⁾	800	2600	130	-	-	-	2.8 - 3.7	120	180
KTA, II ⁽¹⁹⁾	800	2600	130	-	-	-	2.8 - 4.1	100	250
PPKTA, Q ⁽²⁰⁾	800	75	100	-	-	-	2.5 - 4.5	5	210
MNB, I ⁽²¹⁾	800	300	100	-	-	-	3 - 3.9	22	160
KNB, I ⁽²²⁾	800	300	200	-	-	-	3 - 4.4	6	200

最佳設計。因此唯有靠精確的電腦模擬才可能回答上面的問題，並且預測其輸出。筆者的研究組最近按照光波助變效應的耦合光波方程式來進行電腦模擬⁽¹⁹⁾，同時考慮群速色散效應、線性吸收、多級放大、超連續訊號種子光源、激發雷射脈衝的初始啾啾及相位匹配的效應等。希望藉此來進行完整的模擬，而能幫助超快光波助變系統的設計，並能預測其輸出。

若考慮非線性光學晶體的單光子吸收及其群速色散效應，則描述激發、訊號及游光波之間的非線性耦合光波方程式可以將公式 (3) - (5) 擴展為

$$\frac{\partial B_p(\omega)}{\partial z} + \frac{i\omega^2}{2} \frac{\partial^2 k_p}{\partial \omega^2} B_p(\omega) + \alpha_p B_p(\omega) \quad (6)$$

$$= \frac{i\omega}{2n_p c} P_p^{NL}(\omega) e^{-ik_p z}$$

$$\frac{\partial B_s(\omega)}{\partial z} - i\omega \left(\frac{1}{v_s} - \frac{1}{v_p} \right) B_s(\omega) \quad (7)$$

$$+ \frac{i\omega^2}{2} \frac{\partial^2 k_s}{\partial \omega^2} B_s(\omega) + \alpha_s B_s(\omega) = \frac{i\omega}{2n_s c} P_s^{NL}(\omega) e^{-ik_s z}$$

$$\frac{\partial B_l(\omega)}{\partial z} - i\omega \left(\frac{1}{v_l} - \frac{1}{v_p} \right) B_l(\omega) \quad (8)$$

$$+ \frac{i\omega^2}{2} \frac{\partial^2 k_l}{\partial \omega^2} B_l(\omega) + \alpha_l B_l(\omega) = \frac{i\omega}{2n_l c} P_l^{NL}(\omega) e^{-ik_l z}$$

其中 $E_j(z, t) = A_j(z, t)[i(k_p z - \omega t)] + c.c.$ 及 $B_j(z, \omega) = FT[A_j(z, t)]$ 。而 v_j 是群速， α_j 是線性吸收係數。

以上這三個方程式可以用 Runge-Kutta 四次數值方法⁽²³⁾ 來得到其數值解。我們並且提出一種方法來解決以前的理論皆無法解決的相位匹配問題^(24,25)。在此引用了在頻率區域來處理這個問題。非線性光偏振值 P_j^{NL} 可以表示為

$$P_p^{NL}(z, \omega) = \epsilon_0 \chi_{\text{eff}}^{(2)} \int d\omega' F_s(\omega') F_l(\omega - \omega') \quad (9)$$

$$P_s^{NL}(z, \omega) = \epsilon_0 \chi_{\text{eff}}^{(2)} \int d\omega' F_p(\omega') F_l(\omega' - \omega)^* \quad (10)$$

$$P_l^{NL}(z, \omega) = \epsilon_0 \chi_{\text{eff}}^{(2)} \int d\omega' F_p(\omega') F_s(\omega' - \omega)^* \quad (11)$$

其中 $F_j(\omega) = A_j(z, \omega) e^{ik_j(\omega)z}$ 。這個推導乃根據以下的事實：對某一頻率的光波輸出乃是所有滿足 $\omega_p = \omega_s + \omega_l$ 的頻率組合。如此，就可以化解非線性效應會產生不同頻率光波耦合的問題。我們更進一步利用頻析光學閘門技術 (frequency resolved optical gating, FROG)⁽²⁶⁾ 來測量計算出超連續訊號光波種子脈衝光源 (supercontinuum signal seed pulse) 的電場強度及相位，以便充分模擬輸入光源的特性。圖 8 為模擬 3 毫米 KTP 晶體的超快光波助變放大器所輸出的激發訊號與游光波脈衝之電場強度及相位。反之，若不考慮相位匹配問題，則極易產生波形扭曲的現象⁽¹⁹⁾。

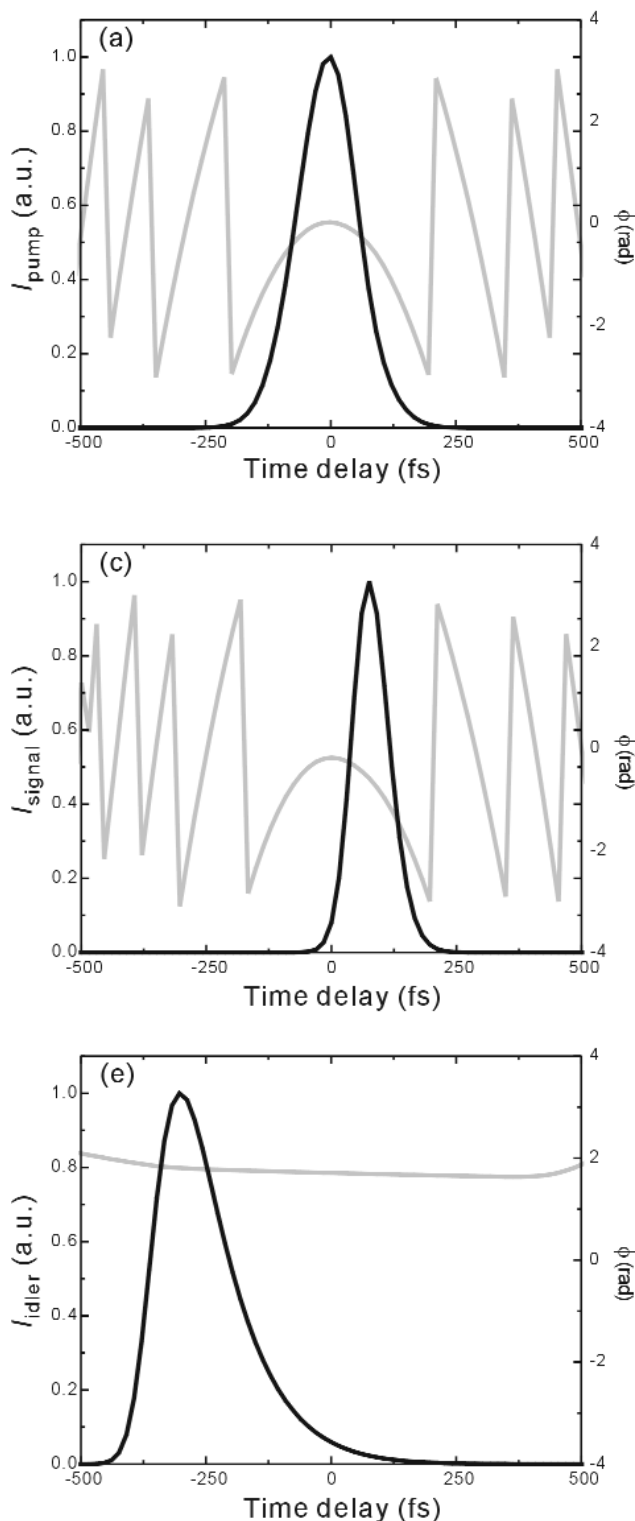


圖 8.3 毫米 KTP 晶體的超快光波助變放大器所輸出激發、訊號及游光波脈衝的電場強度 (I_{pump} , I_{signal} , and I_{idler}) 與相位 (ϕ)。

五、結論

本文介紹了調變超短雷射脈衝波長的光波助變技術。筆者首先概要講述光波助變效應的基本原理，然後敘述了運用此種技術來產生可調波長的超短雷射脈衝時所需的特別考量。接下來，再介紹超快光波助變振盪器及超快光波助變放大器的實例。最後，筆者引用電腦模擬，精確地計算超短雷射脈衝如何藉由二次光波助變效應來影響輸出的脈衝波形與能量。

參考文獻

1. 王俊凱, 科儀新知, **15** (1), 66 (1993).
2. 王俊凱, 科儀新知, **17** (6), 4 (1996).
3. Y. R. Shen, *The Principles of Nonlinear Optics*, New York: Wiley, Chap. 9 (1984).
4. N. P. Barnes, in *Tunable Lasers Handbook*, Ed. by F. J. Duarte, San Diego, 293 (1995).
5. K. Cheng, M. J. Rosker, and C. L. Tang, in *Tunable Lasers*, Ed. by L. F. Mollenauer, J. C. White, and C. R. Pollock, Berlin: Springer, 209 (1992).
6. V. Krylov, J. Gallus, U. P. Wild, A. Kalintsev, and A. Rebane, *Appl. Phys. B*, **70**, 163 (2000).
7. V. G. Dmitriev, Gurzadyan, and D. N. Nikogosyan, *Handbook of Nonlinear Optical Crystals*, 3rd revised edition, Berlin: Springer (1999).
8. A. E. Siegman, *Lasers*, Mill Valley, University Science Books, Chap. 9 (1986).
9. S. A. Akhmanov, A. V. Victor, and A. S. Chirkin, *Optics of Femtosecond Laser Pulses*, New York: AIP (1992).
10. R. R. Alfano, *The Supercontinuum Laser Source*, New York: Springer (1989).
11. Data sheet, *Femtosecond OPAL*, *Spectra-Physics Lasers*, Mountain View (1994).
12. D. E. Spence and C. L. Tang, *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, **1**, 31 (1995).
13. G. R. Holtom, R. A. Crowell, and L. K. Cheng, *Opt. Lett.*, **20**, 1880 (1995).
14. D. E. Spence, S. Wielandy, C. L. Tang, C. Bosshard, and P. Gunter, *Opt. Lett.*, **20**, 680 (1995).
15. P. Loza-Alvarez, C. T. A. Brown, D. T. Reid, W. Sibbett, and M. Missey, *Opt. Lett.*, **24**, 1523 (1999).
16. Data sheet, *Femtosecond OPA-800*, *Spectra-Physics Lasers*; Mountain View (1997).
17. M. K. Reed, M. K. Steiner-Shepard, and D. K. Negus, *Opt. Lett.*, **19**, 1855 (1994).

18. A. Shirakawa, I. Sakane, and T. Kobayashi, *Opt. Lett.*, **23**, 1292 (1998).
19. J.-C. Wang, J. Franken, and J.-K. Wang (in preparation).
20. F. Roermund, V. Petrov, F. Noack, V. Pasiskevicius, J. Hellstrom, and F. Laurell, *Opt. Lett.*, **24**, 1874 (1999).
21. V. Petrov, F. Roermund, and F. Noack, *Appl. Opt.*, **37**, 8504 (1998).
22. V. Petrov and F. Noack, *Opt. Lett.*, **21**, 1576 (1996).
23. R. L. Burden and J. D. Faires, *Numerical Analysis*, 4th edition, Boston; PWS-KENT Publishing (1989).
24. G. M. Gale, M. Cavallari, and F. J. Hache, *Opt. Soc. Am. B*, **15**, 702 (1998).
25. S. Reisner and M. Gutmann, *J. Opt. Soc. Am. B*, **16**, 1801 (1999).
26. R. Trebino, K. W. DeLong, D. N. Fittinghoff, J. N. Sweetser, M. A. Krumbumgel, and D. J. Kane, *Rev. Sci. Instru.*, **68**, 3277 (1997).

即將出版、歡迎預約！

真空技術與應用

VACUUM TECHNOLOGY & APPLICATION

本中心所籌劃涵括真空技術理論基礎與應用實務的書籍 -- 「真空技術與應用」，將於七月隆重出版。本書的編纂從籌編到出版歷時三年，邀集了產、學界五十餘位專家共同執筆撰寫。

本書共有二十四章、七百餘頁，概分為基礎及實務二篇。基礎篇探討真空技術的理論及真空元組件等，內容包括真空的基礎理論、各式真空幫浦的介紹、各類真空元件及材料、真空系統的設計組裝、真空測漏實務，以及真空度量與檢校等；實務篇則介紹真空技術的應用，內容包括真空技術在各種鍍膜技術、製程系統及學科領域的應用與需求。

行政院國家科學委員會
精密儀器發展中心出版

洽詢電話：(03) 5779911 轉 303、304