

非線性光學—— 改變傳統雷射輸出頻率與其應用

王寵棟

綠光雷射筆幾乎人人唾手可得，但您了解綠光雷射產生的方式嗎？

事實上，這是非線性光學的現象之一。

非線性光學是現代光學的嶄新領域，由於可以用來產生各種不同波段的同調光源，因此衍生了很多新的應用。

非線性光學的源起

在日常生活中，人們早已熟知並應用一些光學現象，如：反射、折射、干涉、繞射、透鏡成像。這些現象都屬於線性光學的範疇，它們的發展可追溯至西元前 700 年，當時的古埃及人與美索布達米亞人就有使用透鏡的經驗，這些線性光學的研究仍舊持續至今。非線性光學則發展得非常晚，開始於西元 1960 年代。非線性光學現象屬於非線性物理，透過非線性光學原理，光能夠改變物質的折射率，或是在非線性光學晶體上外加一道調製電壓，就能夠把入射的光訊號作振幅或相位調製，甚至藉由適當設計與晶體的選用還能夠改變入射光的波長。



湯匙在水杯中的折射現象（圖片來源：種子發）

透過非線性光學原理，
能夠調製入射的光訊號，甚至藉由適當設計還能夠改變入射光的波長。

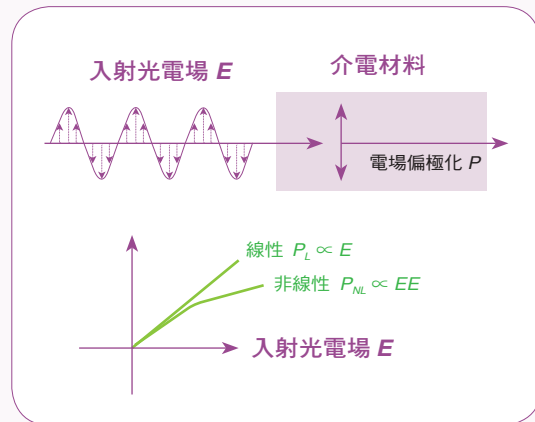
細究非線性光學，其實是一門結合電磁學、基礎光學、晶體光學的學問，探討研究電磁波與介質交互作用的機制，進而延伸這方面的應用。也就是探討光或電磁波如何改變介質特性或控制介質特性，從而影響同一介質中其他的光，甚至影響注入的光或電磁波本身而產生光的非線性現象。

雖然光學發展歷經了數千年，但是非線性光學真正在實驗上的進展卻是在 1960 年第一支雷射—紅寶石雷射的發明之後。為何非線性光學的進展是在發明雷射之後呢？這是因為產生非線性光學現象通常需要很高的光場（光的電場分量），這樣的光場通常又需要具有光束同調性極佳的光源，也就是雷射才能辦得到，同時還需要經過適當的聚焦才能夠提供足夠的非線性現象進行觀察。

西元 1961 年，也就是第一支雷射發明後的第二年，弗蘭肯（Franken）就以紅寶石雷射產生的 694.2 奈米波長的光射入石英晶體，產生二倍頻波長 347.1 奈米的紫外線光，實驗雖然簡單，卻是一個跨時代的結果。其他有關非線性光學中雷射頻率變換的現象，如：和頻、差頻、光參數產生與振盪等，在非線性光學的理論與實驗上也一一地探討與實踐了。

同時，透過非線性晶體的研究與開發，雷射波長可以藉由這些非線性效應產生其他波段，這些波段的光源特性也一樣具有雷射在時間與空間方面同調的特性，彌補了雷射本身只能輸出特定波長的遺憾。這是目前產生不同波段同調光最為簡單的方式，可以說非線性光學開拓了雷射應用的波長限制。

非線性光學現象除了光頻率變換外，尚有自聚焦、自相位調製、拉曼散射、布里淵散射等，本文的討論將著重於光頻率變換與這方面的應用。

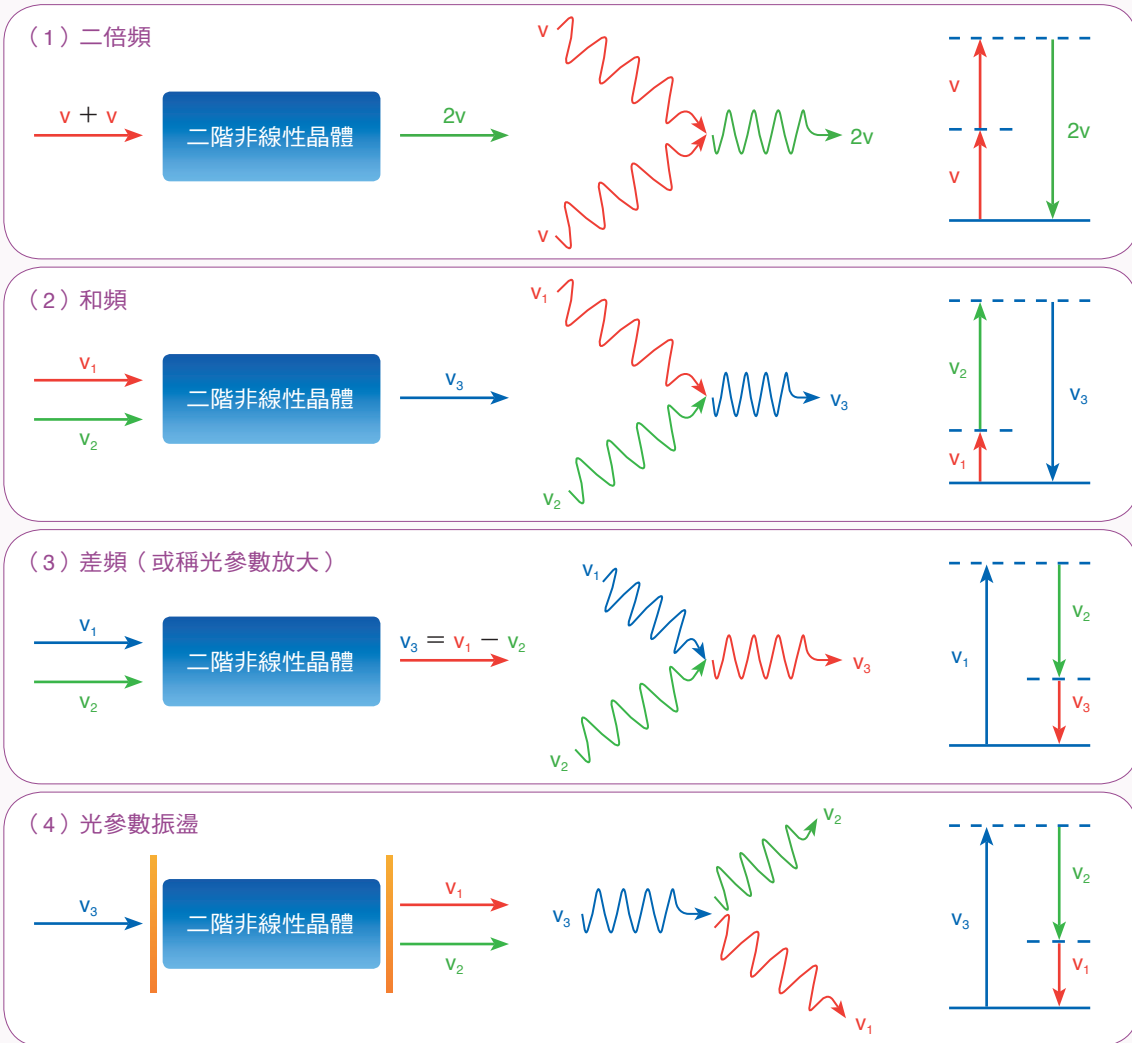


一道光的電場（ E ）注入介電材料後，引發材料內部的電場偏極化（ P_L ），在一般情況下，電場偏極化大小正比於注入光的電場（ $P_L \propto E$ ）；但當光電場夠強時，介電材料會產生非線性電場偏極化（ P_{NL} ），而電場偏極化大小正比於注入光的電場的二次方（ $P_{NL} \propto EE$ ）。

非線性光學的原理

通常非線性光學晶體絕大部分也是介電材料，而入射於介電材料的電磁波的電場必須足以改變材料的介電特性。在外加電場（一般簡寫為 E ）下，介電材料會產生感應電偶極矩。電偶極矩是由電量相等但電性相反的電荷所組成，而單位體積下的電偶極矩的數量則稱為電偶極矩密度或電場偏極化，一般簡寫為 P 。

感應電偶極矩的產生是用來抵抗外加電場，大部分情況下 P 隨外加電場 E 而線性改變。如果這時電場是具有頻率 ν 的電場或光場，則電偶極矩也會帶有頻率 ν 的振盪。然而，在許多非中心對稱的介電材料中，只要注入光的電場夠強（通常是雷射），就會出現稱為非線性電場偏極化振盪現象，一般簡寫 P_{NL} 。這時候 P_{NL} 正比於外力電場大小的二次方，這樣的數學表示式稱為二階非線性光學效應。



(1) 二倍頻：兩顆相同頻率 ν 的光子在晶體中，透過滿足非線性轉換條件加成一顆二倍頻光子 2ν ；(2) 和頻：頻率較低，分別是 ν_1 與 ν_2 的兩顆光子，在晶體中透過滿足非線性轉換條件加成一顆高頻光子 ν_3 ；(3) 差頻（或稱光參數放大）：一道高頻且電場能量較高的光子 ν_1 在非線性晶體內產生非線性增益，同時注入一道低頻光子 ν_2 取得非線性增益而放大，這時會同時產生另一頻率是 ν_3 的光子；(4) 光參數振盪：頻率是 ν_3 的光子非線性晶體內產生兩顆低頻光子 ν_1 與 ν_2 ，但由於非線性增益不足，因此採用共振腔架構方式共振低頻光子達成足夠的增益輸出。

二階非線性光學效應是一種應用相當廣的雷射光頻率變換技術，通常是三種不同頻率的光在非線性光學晶體中作用，又稱為三波混頻。在這樣的關係下有幾種可能的非線性光混頻產生：二倍頻、和頻、差頻。值得注意的是無論是何種機制，

這三波混頻都滿足光頻率的恆等式，這個恆等式又稱能量守恆。

以上介紹了強度高的雷射在二階非線性光學晶體內所產生的非線性電場偏極化振盪，這種振盪能夠產生新的電磁波頻率，而這些新頻率的相位與引發它們的入射雷

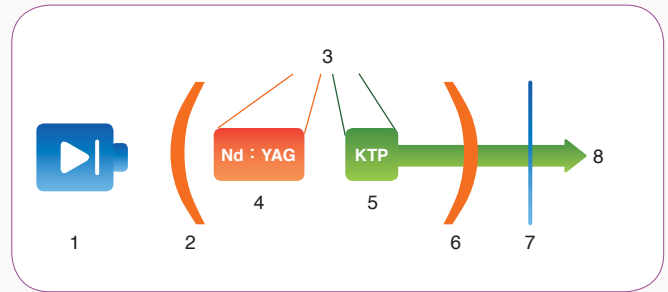
射光的相位有關，唯有這些新頻率的相位跟入射雷射的相位是同調時，才能造成建設性疊加而成為同調光波。這樣的觀念又稱為相位匹配，有時也稱動量守恆。換句話說，二倍頻、和頻、差頻等都須滿足動量守恆才能夠產生這些現象。

滿足相位匹配的方式有很多種，通常是先選擇好入射的雷射光頻率與想要產生的光頻率後，接著選擇使用合適的晶體產生所設計的波長。當三波頻率與晶體決定後，就要計算入射雷射光的電場偏振方向與入射晶體的角度，必要時得控制溫度來達成。但近 20 年來還發展出效率更高的方式稱為準相位匹配，這是一種人造的相位匹配條件，能夠免去很多如雷射入射晶體角度與電場偏振控制的麻煩。話雖如此，要理解相位匹配的概念，還是要對固態物理、晶體光學、光電學等深入了解後才能真正清楚它的內涵。

非線性光學混頻與應用實例

綠光雷射 以綠光雷射為例，由於近代科技在半導體工藝上的進步，已經能夠製作出便宜的半導體雷射激發固態雷射。整個雷射產生的過程是從一輸出光波長是 808 奈米的半導體雷射開始，功率約幾百毫瓦。

把這光束注入 Nd:YVO₄ (摻釹釩酸鈮) 或 Nd:YAG (摻釹鈮鋁石榴石) 材料，兩者都可有效率地被 808 奈米的雷射激發，產生 1,064 奈米的自發輻射。1,064 奈米的光輻射在一共振腔來回振盪後可有效得到增益，也就是從光輻射變成雷射。同時共振腔內也置有二倍頻晶體，通常是磷酸鈦氧鉀 (KTiOPO₄, KTP)。KTP 材料受到 1,064 奈米的光激發後，就會有二倍頻，也就是 532 奈米的綠光輸出。



1：808 奈米半導體雷射；2：共振腔面鏡，針對 808 奈米的光鍍有抗反射鍍膜，同時反射 99.9% 波長是 1,064 奈米的光；3：1,064 奈米和 532 奈米光的抗反射鍍膜；4：Nd:YAG 雷射晶體；5：KTP 非線性晶體；6：共振腔鏡，針對 532 奈米的光鍍有抗反射膜，同時反射 99.9% 波長是 1,064 奈米的光；7：過濾 808 奈米與 1,064 奈米的濾波片；8：綠光雷射輸出。Nd:YAG：摻釹鈮鋁石榴石，KTP：磷酸鈦氧鉀。

接受到半導體雷射光入射的鏡面有光學鍍膜，可高反射 1,064 奈米而高穿透 808 奈米的光，而另一端的輸出耦合鏡也有光學鍍膜，可高反射 1,064 奈米的光而部分穿透 532 奈米的光。共振腔內所有晶體表面都鍍上 1,064 奈米與 532 奈米的抗反射鍍膜，使得波長 1,064 奈米的雷射在 KTP 晶體內來回振盪，就可產生更多的 532 奈米光波輸出。

兆赫波段光源 再舉一個較為前瞻的科學研究，就是兆赫波段光源產生。所謂的兆赫波包含了由部分毫米波段（約 0.1 THz）到遠紅外區（約 10 THz）的一段電磁頻譜，由於要產生同調的兆赫波相當困難，因此在電磁頻譜上一直有所謂的兆赫波間隙。

兆赫波有其他頻段電磁波所沒有的光學特性，例如可以有效穿透衣服、紙、皮革、塑膠、木頭等，卻無法穿透金屬，而且某些波長的兆赫波會被水吸收。由於兆赫波可以與許多大分子的振動、轉動能階



各不同波長對應到不同名字，可見光只是全部電磁波頻譜的一小部分，兆赫波段介於紅外線與微波之間。

作用，因此應用吸收譜線法可以拓展物質的辨識範圍到許多有機分子的範疇，而這是 X 光無法相比的，因為 X 光的頻率很高、光子能量大，是一種具危險性的游離輻射。由於炸藥與毒品大多屬於有機物品，因此兆赫波可與 X 光搭配進行安全檢查，保障國土及人民安全。

在生醫方面，許多研究團隊想應用兆赫波，因為兆赫波不但可以不需外加任何螢光染劑直接辨識分子影像，更具有低雷利散射、低光子能量、高穿透深度等特質，使得利用兆赫波完成生物影像對生物組織的破壞會比可見光與 X 光小很多。總結來說，在光譜學、非破壞性醫學影像、毒品檢測等方面，兆赫波光源是一個非常強而有力的工具。

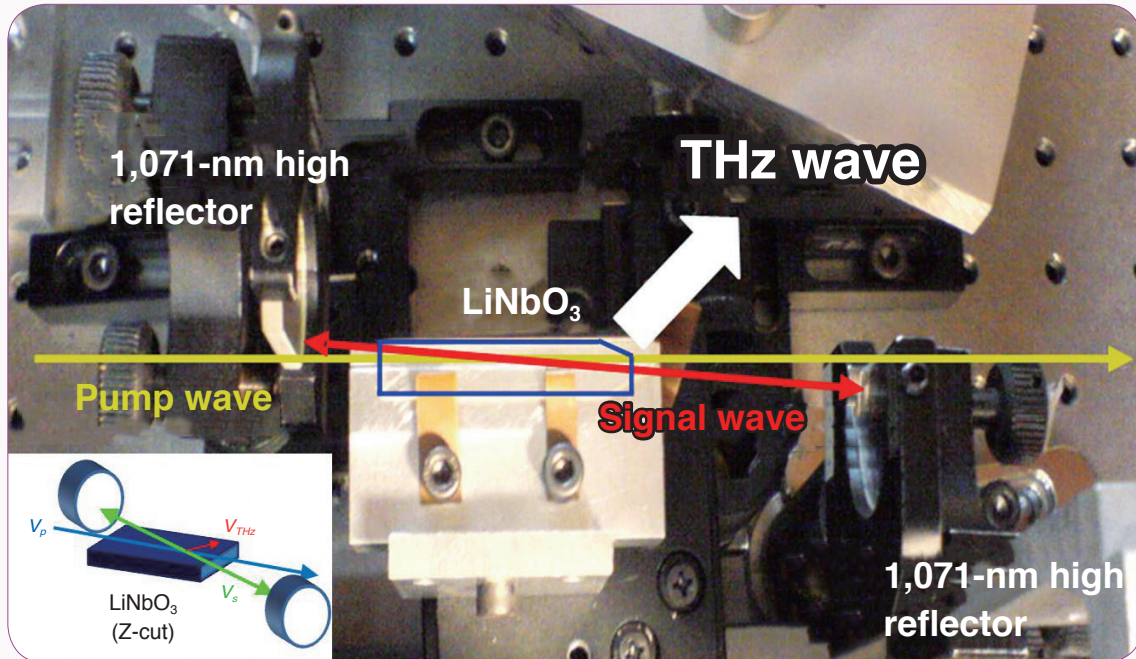
兆赫波如此有用，如何產生兆赫波便是一項重要的研究課題。在過去幾十年，



兆赫波光源能夠穿透塑膠製品與紙類，卻會被金屬反射，因此圖中的皮箱內若藏有刀子，兆赫波將無法穿透。（圖片來源：X.-C. Zhang and J. Xu, Introduction to THz Wave Photonics, Springer, 2010）

許多研究團隊積極地利用超快雷射於電漿或光導天線等材料來產生兆赫波，但是使用的光學技術主要是產生非同調、寬頻的兆赫波。事實上，有很多方式可以產生同

在光譜學、非破壞性醫學影像、毒品檢測等方面，兆赫波光源是一個非常強而有力的工具。



在鈮酸鋰（LiNbO₃）晶體內利用非線性光學混頻方式產生兆赫波，圖中的激發光（Pump wave）是波長 1,064 奈米的雷射，注入鈮酸鋰晶體後產生波長是 1,071 奈米的訊號光與兆赫波。為了使效率提高，使用一組高反射鏡（1,071 奈米的共振腔鏡）增加轉換效率。Pump wave：激發光，Signal wave：訊號光，THz wave：兆赫波，1,071-nm high reflector：波長 1,071 奈米反射鏡。

調的兆赫波。舉例來說，自由電子雷射就可以產生高能量、波長可調的兆赫波輻射，但是自由電子雷射的體積較大，且需要較高的成本才能建立。另外，使用量子串聯雷射也有機會產生兆赫波，缺點是需要低溫下操作。

除了自由電子雷射與量子串聯雷射外，也可以用混頻的方法在非線性光學物質中產生兆赫波。譬如，在鈮酸鋰晶體裡使用非線性光學混頻來產生兆赫波，是另一種具有潛力的方式。這種方式的優勢在於它的架構簡單、方便，可以產生同調且波長可調的兆赫波輻射。

西元 1975 年，美國史丹佛大學的潘特（Pantell）教授利用鈮酸鋰晶體中的電磁偏極子散射產生同調性兆赫波。電磁偏極子

是一種光子與聲子交互作用的行為下產生的量子現象，但由於會利用到非同向性相位匹配，使得產生的兆赫波與入射的雷射光有約 65 度的夾角。

但這方向產生的兆赫波會因為全反射而局限在晶體內，難以耦合出晶體，同時兆赫波在晶體內會被急速地吸收掉。因此，科學家們曾利用矽製作成稜鏡或光柵，把兆赫波耦合出晶體，如此一來利用非線性光學混頻的方式產生的兆赫波源就有機會被人們利用。

非線性光學的未來發展

非線性光學的主要應用與技術開發仍多以光頻率轉換較受科學家的青睞，例如使用非線性光學同時產生紅綠藍三原色，

非線性的積體光學是一個熱門的研究題目，
追求的是在單一晶片上完成雷射的產生、波長轉換與調變、開關、訊號放大等。

可應用於雷射投影機。但由於近年來利用較為一般的脈衝式雷射，透過非線性轉換產生可見光與近中紅外線波段的技術，已經日趨成熟，因此這類波段的研究方向會朝向改用超快雷射當作激發光。

超快雷射在時間上的脈衝寬度小於皮秒（pico second， 10^{-15} 秒），好比是一部高速攝影機，能夠對研究的對象在時間上進行動態解析。而不同的研究對象需要不同波段，非線性光學混頻技術能提供有力的工具進行這些研究。

另外，就是兆赫波段與紫外光波段的產生，這是兩個利用傳統非線性光學能夠變換頻率的極限。通常產生這兩個波段的難度較高，但它們在民生與國防上都有廣泛用途，因此也是非線性光學專家學者研究的方向。

此外，非線性的積體光學也是一個熱門的研究題目，這樣的技術追求的是在單一晶片上完成雷射的產生、波長轉換與調變、開關、訊號放大等，一個全光處理器是邁向下一個世代全光應用的核心。

總而言之，光學這門古老的學問因非線性光學的加入而變得更活潑有趣，還有更多除了非線性光學混頻之外的非線性光學現象也值得探索了解。

王寵棟
國家中山科學研究院
