

# 明日之星—人工寶石

陳平夷\*、彭國禎、黃義仁、黃欽群、吳政龍

美和技術學院珠寶技術系

91202 中華民國台灣省屏東縣內埔鄉美合村屏光路23號

TEL: 08-7799821#6506

Email: x00008415@meiho.edu.tw

摘要：材料的演進代表了人類的歷史演化，強大的國力也表示它擁有尖端科技之材料並掌握了製造技術。一種來自於人類天性追求真、善、美的極致『物質』——**珠寶**——。它於時代潮流中，呈現不同於以往的面貌。因應未來光電產業之發展，人工寶石的晶體應用已日漸廣泛，其重要性已由傳統珠寶產業擴及各種高科技產業，它不單單有艷麗的外表，更是極具深不可測的涵養，它內外兼備，它是『明日之星』。未來能掌握晶體就能掌握材料，掌握材料就能掌握國力，國家有國力就能掌握未來，國家因此才得以永續經營。

本文對人工晶體的晶體製造方式，與分類及應用，以及製程進行了介紹。

關鍵字：晶體生長，人工晶體，壓電水晶，半導體，雷射，晶體光纖，光子晶體

## 壹、前言

珠寶產業是人類一種結合求真、求善、求美之極致的產業。在歷經各種時代風潮而不衰退，其原因在於珠寶與貴金屬所散發出來迷人的光彩，展現出人類從自然中追求擁有美麗與尊貴之天性。偏偏這些珍品在自然界本身就極其稀少，再加上自然的礦石原料歷經多年大量氾濫式的開採，使得量產與品質急劇的銳減，開採之成本越加昂貴而增值；為彌補此一原料之不足，並降低相關原料之成本，並使珠寶商品普及化，一種結合先進科技的晶體生長技術的人工晶體做為寶石的產品也因應誕生。它的應用亦由珠寶產業擴及至工業的應用諸如光電、半導體、醫療與切割等等產業。在2009年element的期刊中，特別對珠寶產業作一專題探討，文中提到至2009年初止珠寶產業產值已達到約每年150億美金，世界各國之相關產業亦蓬勃發展，因此人工寶石成為現今產業主流，名符其實的『明日之星』。

一般而言，固態材料組成方式大致區分為晶體與非晶體兩類，所謂『人工晶體』，就是以人工方法合成出的晶體。我們週遭很多物質都是晶體，譬如地上的石頭、沙土。沙土顆粒雖小，人用肉眼無法觀察到它的晶面、晶形，但它幾乎都是由晶體構成的。構成物質的原子、離子或分子在空間做長程有序的排列，形成一定的點陣結構，就是晶體；而內部沒有長程有序排列（只有短程有序）的物質就是非晶態固體，如玻璃、石蠟、橡膠等。晶體通常具有規則的晶體外形結構，棱角分明，具有固定的熔點等物性。圖1-1所呈現就是包覆晶纖材料之邊界所呈現非晶體玻璃與Cr:YAG晶體晶格排列之TEM影像。

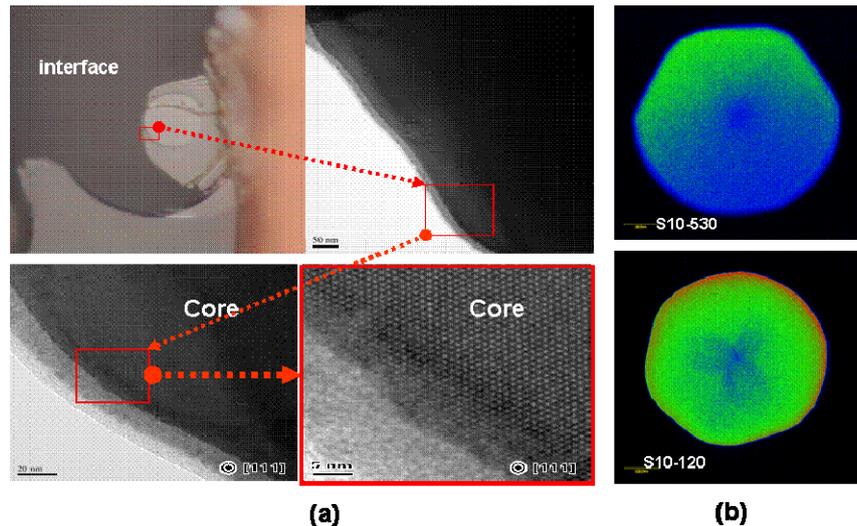


圖 1-1 (a)Cr:YAG 晶體包覆玻璃材料之 TEM 影像圖(中山大學超快雷射實驗室);(b)晶纖共焦顯微鏡下呈現三夜瓣圖形。

一、基本上，人工晶體研發的目的有兩方面：

(A)晶體純化：

用人工的方法合成並生長出自然界已有的晶體，如水晶、雲母、金剛石、食鹽(NaCl)、紅寶石( $\text{Cr}:\text{Al}_2\text{O}_3$ )、人工合成的胰島素等。自然界已有的晶體中有些品質不好；有些晶體品質雖好，但自然界中所剩無幾。例如人工合成金剛石已十分便利，人工合成金剛石雖比天然的小，但已能滿足一般性的需求。金剛石是自然界中硬度最大的物質，人工合成金剛石廣泛用於各種切割工具。另外；世界上第一台雷射就是紅寶石雷射，其的增益物質就是紅寶石。天然紅寶石色彩豐富，常用於製作各種首飾。但因為含有包裹體，天然紅寶石在科學研究中的效能差，應用價值不大，必須合成無包裹體的人工紅寶石供研究使用。還有就是醫藥學上之應用，人工合成之胰島素供醫藥等使用。

(B)晶體創造：

用人工的方法合成並生長出自然界沒有的晶體，如單質的Si與Ge、化合物的 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 、 $\text{KTiOPO}_4$ 等無機晶體，以及有機晶體青黴素，硝基苯胺等。Si為半導體工業的基礎，自然界中沒有單晶的純矽存在，人工合成矽單晶主要是從二氧化矽中製備。 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 為前經常使用的雷射器的增益物質，摻Nd的 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 雷射器能發射1064nm的鐳射。 $\text{KTiOPO}_4$ ，簡稱為KTP，是一種性能優良的非線性光學晶體。這類化合物在自然界中都不存在，人們一般通過先合成後製備的方法來生長出單晶。

二、人工晶體的研究領域亦涵蓋以下幾項：

(A)研究人工晶體的合成及晶體的生長工藝。

(B)研究人工晶體的切磨拋鍍等冷加工工藝。

(C)研究晶體生長設備和溫度、生長速率等控制系統。

(D)研究晶體結構（晶胞參數、點陣、空間群、鍵參數、結構基元等），晶體物理化學性能（力、熱、光、聲、電、溶劑、溶解度、雜質分凝係數等）以及晶體功能特性。

(E)開拓人工晶體的應用領域。

(F)改進成熟晶體，探索新型人工晶體。

## 貳、人工晶體的生產方式

人工晶體的製程，若按照產品生長尺度大小可區分為晶纖與塊材，其製程就是把組成晶體的基元(原子、分子或離子)解離後又重新使它們組合的過程。按照晶體解離組成之製程，大致可分為三大類：

(A)溶液法(Growth from solution)：

使晶體原料溶解在溶液中，具體地包含有水溶液法、水熱法與助熔劑法。水溶液法在常壓下生長晶體，溫度約為八、九十攝氏度；水熱法是在高溫高壓下生長；而助熔劑法則是在常壓高溫下生長晶體。

(B)熔融法(Growth from the melt)：

使晶體原料完全熔化，包含有提拉法、坩堝相對移動法、區熔法、基座法、冷坩堝法與焰熔法等。

(C)氣相法(Growth from the vapor phase)：

使晶體原料蒸發或揮發，包含有化學氣相沉積與射頻濺射兩種方法。

基於以上三大類長晶分類，以下為一般實驗室與產業常用之晶體生長製程方法：

### 1、水溶液法

圖2-1是水溶液法，其基本原理是將原料(溶質)溶解在水中，採取適當的措施造成溶液的過飽和狀態，使晶體在其中生長。圖中水溶液法中利用降溫法生長晶體的裝置，前面提及的磷酸二氫鉀(KDP)、磷酸二氘鉀(DKDP)晶體就是使用這種裝置生長的。KDP晶體雖然有非線性係數小、易潮解等缺點，但卻易於生長，能滿足雷射核爆模擬所要求的特大尺寸。因此，到目前為止，能應用於雷射核反應等研究的高功率系統中的晶體，也僅僅有KDP。

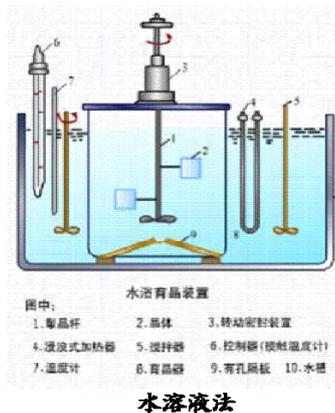


圖 2-1 水溶液法

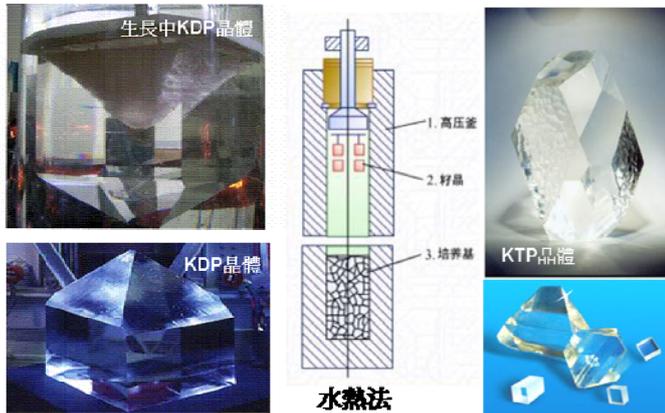


圖 2-2 水熱法 KTP 晶體

### 2、水熱法

圖2-2是水熱法，是一種在高溫高壓下從過飽和水溶液中進行結晶的方法。工業化批量生長水晶即採用這種方法。晶體生長在特製的高壓釜內進行，晶體原料放在高壓釜底部，釜內添加溶劑。加熱後上下部溶液間有一定的溫度差，使之產生對流，將底部的高溫飽和溶液帶至低溫的籽晶區形成過飽和而結晶。最初美國生長的KTP晶體是在3000大氣壓、800°C下於內徑僅38mm的高壓釜內生長的，長度約10mm。KTP晶體非線性係數大，透光波段寬，化學

性質穩定，機械性能優良，是一種綜合性能非常優良的非線性光學晶體。

### 3、焰熔法

圖2-3焰熔法，又稱Verneuil法，是在1890年由法國科學家Verneuil發明的，用於生長人工寶石。下圖是焰熔法生長寶石裝置示意圖。料錘週期性地敲打裝在料斗裏的粉末原料，粉料從料斗中逐漸地往下掉，落到位置6處，由入口4和入口5進入的氫氣氧氣形成氫氧焰，將粉料熔融。熔體掉到籽晶7上，發生晶體生長，籽晶慢慢往下降，晶體就慢慢增長。使用此方法生長的晶體可長達1m。由於生長速度較快，利用該法生長的紅寶石晶體應力較大，只適合做手錶軸承等機械性能方面。

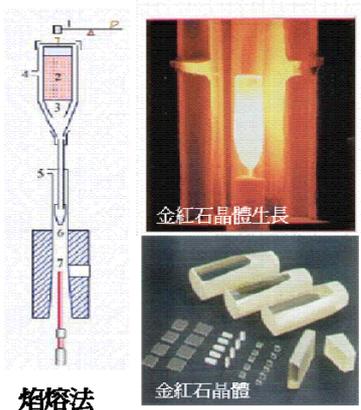


圖 2-3 焰熔法

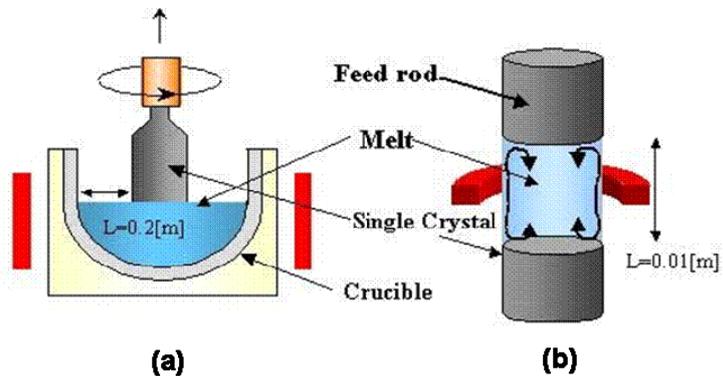


圖 2-4 提拉法

### 4、提拉法

圖 2-4 是提拉法，它是普遍被採用的晶體生長方法。基本上它有兩種形式，圖 2-4a 是第一種，它將原料放在鉑或鈦坩堝中加熱熔化，在適當的溫度下，將籽晶浸入液面，讓熔體先在籽晶的末端生長，然後邊旋轉邊慢慢向上提拉籽晶，晶體即從籽晶末端開始逐漸長大，最著名的就是 CZ( Czochralski) 法，圖 2-4b 是另一種綜合區熔法與提拉法長晶方式，利用表面張力支撐熔區，使其不受容器污染，以利用結晶使其晶體純化，稱之為浮動熔區法。當要生產細小之晶纖時，此浮動熔區法可降低尺度大小與改變加熱方式成為以雷射加熱之微浮動熔區法(laser-heated pedestal growth method; LHPG)，使用最多的鐳射晶體 Nd:YAG 就是採用此法生長的(如圖圖 2-5)。

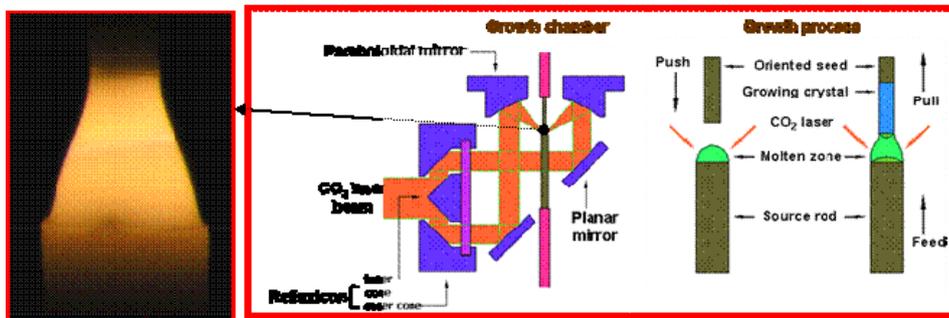


圖2-5LHPG法，左圖為熔區影像圖，右圖為架構圖。

### 5、熔劑法

圖2-6是熔劑法對於熔點太高，或未到熔點即分解的晶體，採用加助熔劑的方法將其熔點降下來生長，改為熔劑法。很多非線性光學晶體。例如KN、KTP、BO、LBO等，都是用這

種方法生長的。

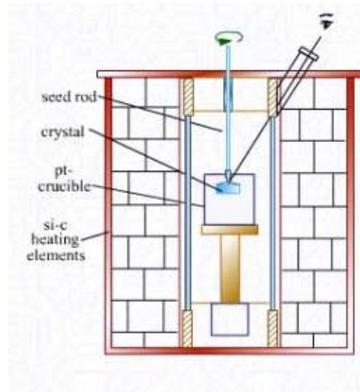


圖 2-6 熔劑法

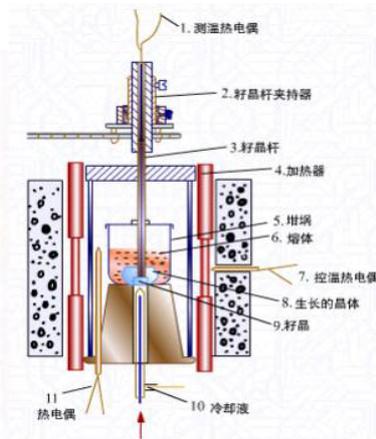


圖 2-7 底部籽晶法

### 6、底部籽晶法

圖2-7為底部籽晶水冷實驗裝置示意圖。與提拉法相反，這種生長方法中坩堝上部溫度高，下部溫度低。將一管子處在坩堝底部，通入水或液氮使下面冷卻，晶體圍繞著籽晶從坩堝底部生長。

### 7、坩堝下降法

圖 2-8 是坩堝下降法，爐膛上部溫度高、下部低，在隔板上方溫度都高於熔點，在隔板處達到結晶溫度。晶體生長開始時，坩堝全部在隔板上方，待坩堝中的原料全部熔融後，由托架帶動坩堝下降，到達隔板處，熔融的原料結晶。坩堝不斷下降，熔體不斷結晶，晶體慢慢長大。(b)是另一種形式之坩堝下降法的裝置示意圖。

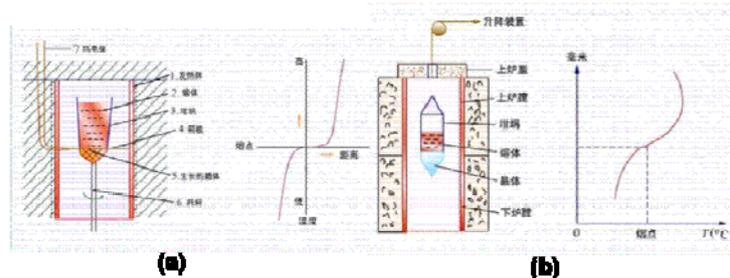


圖 2-8 坩堝下降法

### 8、昇華法

圖2-9是昇華法，為氣相法生長晶體的一種，其裝置示意圖如圖所示。氬氣為輸運介質，熱端原料與摻雜劑加熱後揮發，在氬氣的輸運下到達冷端重新結晶。昇華法生長的晶體品質不高，為薄片狀。

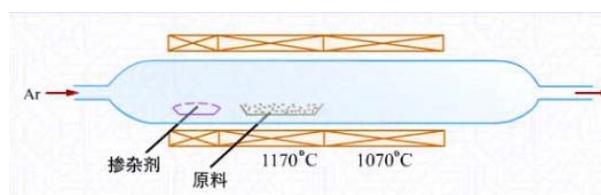


圖 2-9 昇華法

### 9、冷坩堝法

圖2-10是人工合成氧化鋯即採用冷坩堝法，因為氧化鋯的熔點高（ $\sim 2700^{\circ}\text{C}$ ），找不到合適的坩堝材料。此時，用原料本身作為"坩堝"進行生長，裝置如圖所示。原料中加有引燃劑（如生長氧化鋯時用的鋯片），在感應線圈加熱下熔融。氧化鋯在低溫時不導電，到達一定溫度後開始導熱，因此鋯片附近的原料逐漸被熔化。同時最外層的原料不斷被水冷套冷卻保持較低溫度，而處於凝固狀態形成一層硬殼，起到坩堝的作用，硬殼內部的原料被熔化後隨著裝置往下降入低溫區而冷卻結晶。

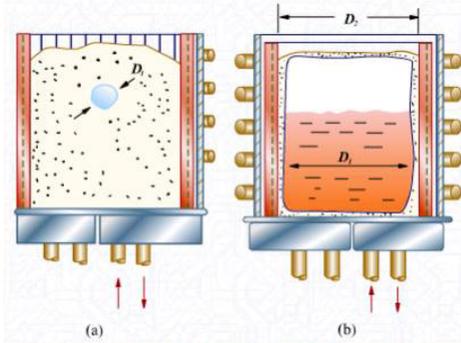


圖 2-10 冷坩堝法

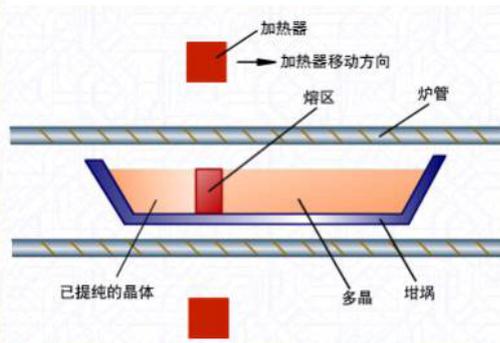


圖 2-11 水平區熔法

### 10、水平區熔法

水平區熔法實驗裝置示意圖如圖2-11所示。熔區被限制在加熱器加熱的狹小範圍內，絕大部分的原料處於固態。加熱器從一端向另一端緩慢移動，熔區也緩慢移動，晶體逐漸生長。水平區熔法的主要用途在於材料的物理提純。加熱器不斷地重複移動，雜質被逐漸趕到一邊，原料從而得到提純。該法的創始人是美國人Pfann，矽單晶生長初期的提純即採用此法。

### 11、弧熔法

圖2-12是弧熔法，料堆中插入電極，在一定的電壓下點火，發出電弧。電弧放出的熱量將周圍的原料熔化，熔融的原料在燒結的料殼中冷卻結晶，如雲母就是用這種方法生長的。

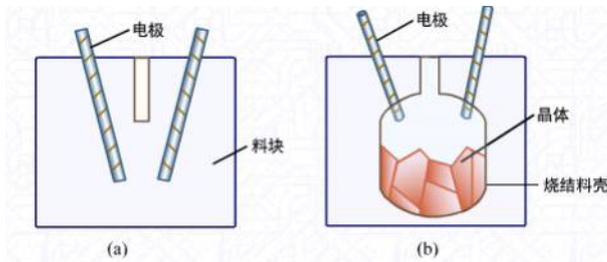


圖 2-12 弧熔法

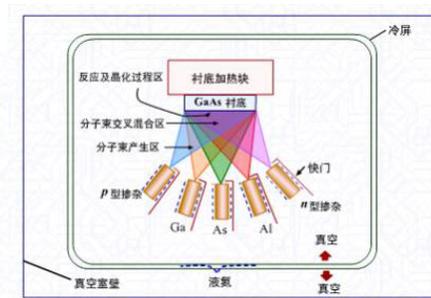


圖 2-13 分子束外延生長

### 12、分子束外延生長

分子束外延技術是目前生長半導體晶體的主要方法。分子束外延生長室簡圖如圖2-13所示，Ga、As、Al源加熱後可向外發射氣態原料，然後在GaAs襯底上沉積生長出晶體。分子

束外延設備是生長半導體超晶格的關鍵設備，結構複雜，價格昂貴。所用的原料純度非常高，這種設備在國外已經普及。

### 13、高溫高壓法

圖2-14是高溫高壓法，裝置中可以得到幾萬大氣壓，1500°C左右的壓力和溫度，是生長金剛石，立方氮化硼的方法。目前，高溫高壓法不但可以生長磨料級的金剛石，還可以生長克拉級的裝飾性寶石金剛石。金剛石底膜可用化學氣相沉積方法在常壓下生長。

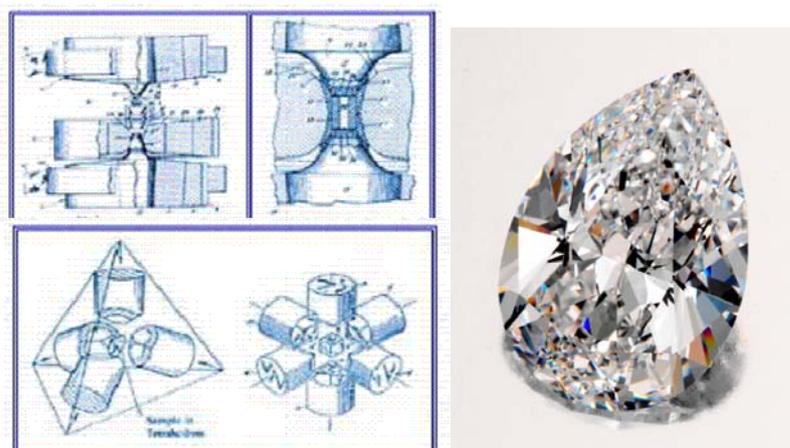


圖 2-14 高溫高壓法，右圖為飾品等級金鋼石

### 參、人工晶體的分類及應用

人類發展的歷史就是一部人類對材料的使用發展史。在原始社會，人類只會使用簡單材料如木頭、石頭等做工具。慢慢發展，人類就學會了使用青銅器、鐵器等。隨著材料的不斷更新，促進著人類社會的不斷發展與變革。人們往往用材料來劃分歷史時期，如：“石器時代”、“銅器時代”、“鐵器時代”等等，可見材料在人類發展過程中的重要性。人工晶體的研製與使用，同樣在科技領域內起到了關鍵的作用。

用壓電水晶製作的諧振器應用於發報機，在第一次世界大戰時已出現，二戰時被普遍採用，它開創了現代通訊新時代。矽單晶及集成技術的成功，把人類帶入方興未艾的現代電腦時代。電腦的運算速度越來越快，並將會出現量子電腦、光子電腦等採用新運算方式的電腦，但矽單晶在電腦中的重大貢獻卻不容置疑。1960年，紅寶石（Cr:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）晶體中首次實現雷射輸出，標誌著光電子時代的來臨。

人工晶體的分類 人工晶體按照功能不同，可粗略分為半導體晶體，鐳射晶體，非線性光學晶體，光折變晶體，閃爍晶體，電光、磁光、聲光調製晶體，壓電晶體，紅外探測晶體，光學晶體雙折射晶體，寶石晶體與超硬晶體等十二類。

帶來資訊技術革命的晶體—半導體晶體，半導體是指電阻率介於典型的金屬和典型的絕緣體之間的一類物質，其電阻率在10<sup>-2</sup>至10<sup>7</sup> 歐姆/釐米之間最常見的半導體晶體是週期表上第IV主族的矽(Si)和鍺(Ge)，此外還有III~V族的神化(GaAs)、銻化銻(InSb)和II~VI族的硒化鋅(ZnSe)等。電子遷移率是衡量半導體運算速度的標誌，其數值越大，半導體的運算速度就越高。矽的電子遷移率比鍺大，但它在半導體中並不是最大的。如果把矽的運算速度比作時

速為60公里的汽車，砷化鎵就是時速為300公里的高速火車，而銻化銮則是時速為3000公里的火箭。雖然矽的運算速度不高，但比砷化鎵、銻化銮易於生長，所以半導體工業中使用最多的還是矽單晶。通過電子管電腦與使用矽單晶做為器件的微機性能的比較（見下表），矽在電腦時代中的重要性可見一斑。電子管是第一代半導體器件，在電子管後人類發明了積體電路。第一塊積體電路誕生於1958年，隨著集成度的不斷增大，大型積體電路與超大型積體電路相繼湧現。1968年人類可在米粒大小的矽片上集成1000多個電晶體，至1978年，在同樣大小的矽片上就可以集成15.6萬個晶體管了。但是，由於量子效應的存在以及矽單晶自身性質的缺陷，積體電路的發展已接近極限。

### 1、半導體晶體

3-1圖是發光半導體晶體。半導體的帶隙越寬，發射的光波的波長越短，常用的發光半導體為GaAs、InP等。目前發展的GaN半導體帶隙寬，可發射藍光，是半導體研究中的熱門領域。以氣相外延技術合成的Al,Ga,In,N四元材料，可以涵蓋所有的可見光。

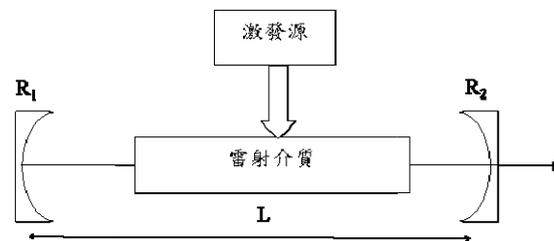


圖3-1紅、綠、藍、白發光二極體圖 3-2 雷射的構造包含雷射介質、激發源及共振腔三部份

### 2、雷射晶體

簡單地講，鐳射晶體就是能夠發射出鐳射的晶體。最早使用的鐳射晶體是摻鉻的紅寶石晶體（Cr:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>），現在用得最多的是摻釹的鈮鋁石榴石(Nd:YAG)。

圖3-2為固體雷射器示意圖，它主要由閃光燈、雷射介質（較多使用的是固態雷射晶體）和反射鏡腔片組成。反射鏡表面鍍有薄膜，一片為全反射鏡，另一片為透射反射鏡，兩片鏡片組成光學諧振腔。當鐳射晶體受到氬燈泵浦後，物質內原子受到光激發遷躍為激發態。只要有一個原子產生自發輻射，則這一輻射光將誘發鄰近原子產生受激輻射。不垂直於反射鏡的受激射將穿過工作物質邊界外泄消失，只有垂直於反射鏡的受激輻射被反射鏡反射折回，重新通過啟動介質並被放大。經多次反復振盪，最終形成強大的受激輻射光，即雷射。目前使用最多的鐳射晶體有Cr<sup>3+</sup>:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Nd<sup>3+</sup>:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>與Nd<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub>。

### 3、變頻晶體--非線性光學晶體

非線性晶體具有非線性光學效應，它可使雷射的波長發生變化。雷射晶體輻射的雷射波長多為紅外光，通過非線性晶體變頻後能變為可見光。非線性晶體拓寬了雷射波段，可使鐳射得到更有效的應用。比如紅外雷射經非線性晶體倍頻後成為綠光，綠光可用于水下通訊、光碟存儲等方面，如圖3-3(a)。國際上首次發現的雷射倍頻效應實驗採用的就是腔外倍頻，國內各研究型大學都積極參與研製各種非線性光學晶體擴增其頻率應用範圍與如圖3-3(b)(c)。

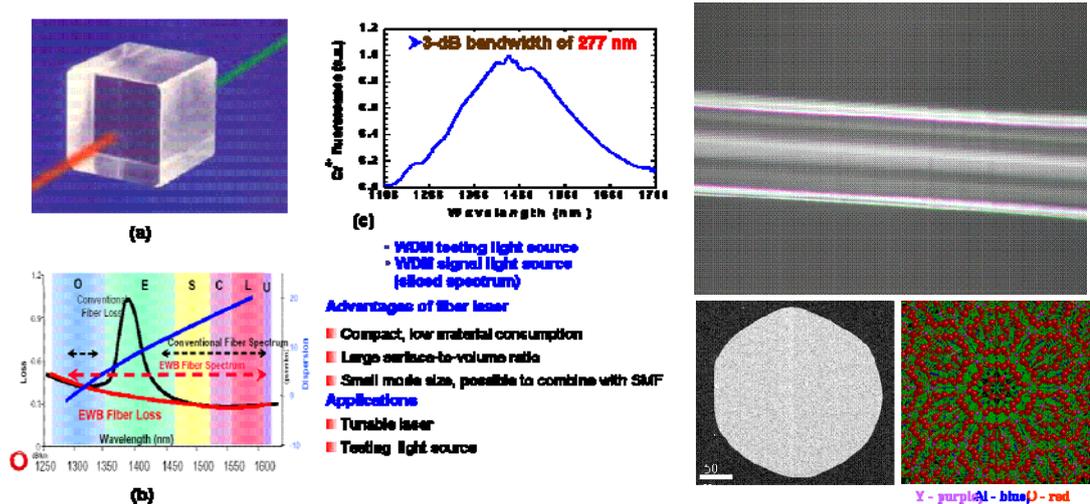


圖 3-3 非線性光學晶體之應用與中山大學雷射超快研究室研發之進展，右圖為 Cr:YAG 晶纖產品

非線性光學晶體最主要的用途就是對雷射的倍頻作用，產生二次諧波。二次諧波的發生有兩種情形，一種是雷射腔外倍頻，一種是腔內倍頻。

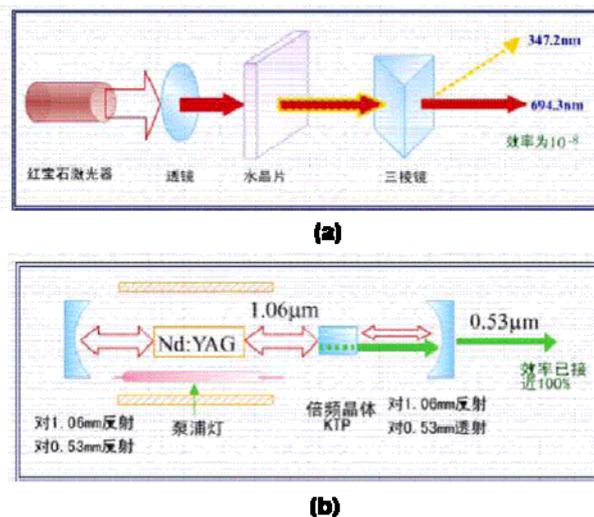


圖3-3(a) 雷射腔外倍頻；(b) 腔內倍頻

#### 肆、人工晶體發展之新趨勢

1966年Franken首次將紅寶石晶體所產生的雷射光束入射到石英晶體，實驗過程中發現兩束出射光，一束是原來入射的紅寶石鐳射，其波長為694.3nm；而另一束就是倍頻光，其波長為347.2nm。當時，紅寶石鐳射倍頻的效率很低，只有 $10^{-8}$ 。如今使用KTP晶體倍頻Nd:YAG發出的紅外鐳射，產生530nm的綠光，效率已接近100%。雷射倍頻的另一個實驗，採用的非線性晶體是鉍酸鉀 (KNbO<sub>3</sub>)。946nm的不可見鐳射通過鉍酸鉀晶體，經倍頻作用後產生473nm的藍色鐳射。又如KDP晶體易於生長，KTP的非線性系數高，AgGaSe<sub>2</sub>晶體的透光波段寬，而CLBO具有優良的紫外雷射倍頻性能等等。因應未來光電與相關產業，例如光通訊、光儲存、光顯示器及光子晶體之發展，新型人工晶體的研發將朝向以下幾個方面進行：

由於光學理論之精進，應用於各種光路系統之光子晶體之研製已迅速發展，對於不同功

能的晶體，其要求會有差異。例如雷射晶體要求螢光壽命長，發光截面大，量子效率高，導熱性好等。非線性光學晶體要求非線性係數大、耐雷射損傷閾值高，能進行相位匹配等。其次是增加其非線性光學效應之應用與研發；再者有機分子與各陰、陽離子團之光學效應研發；及以下重要研發進展

#### (1) 光子晶體與光纖

由於光學理論之精進，應用於各種光路系統之光子晶體之研製已迅速發展。因應資訊與光傳輸等高科技產業之更小、更多、更快、功能更強之發展，微小模組化之光學元件中光路系統理論已被架構並被驗證可以取代傳統半導體之大部分產品，由奈米製程控制晶體生長製程以得到光學波導傳輸以及其他之功能。

#### (2) 光折變與雙折晶體

在一定強度雷射的照射下，折射率會發生變化的晶體，叫光致折射率變化晶體，簡稱光折變晶體。兩束光波入射到晶體中產生干涉，干涉光場分佈為週期的光強分佈，形成空間電荷光柵。另外晶體折射率對於不同方向差異所產生之雙折晶體之開發與應用亦是重要之趨勢。

#### (3) 閃爍晶體

在高能粒子的撞擊下，能將高能粒子的動能變為光能而發出螢光的晶體，稱為閃爍晶體。閃爍晶體在核醫學、高能物理、核技術、空間物理及石油勘探等領域具有廣泛的應用。在閃爍晶體各項性能參數中，密度、光輸出與回應時間等項比較重要。由於入射的是高能粒子，晶體的密度越大越好，如此需求的晶體厚度就會變小，從而易於生長。目前使用較多閃爍晶體的是BGO、CsI、PbWO<sub>4</sub>等。

為了進行高能粒子的研究，國際上建造了越來越多的對撞機與加速器，其中需要閃爍晶體作靶以捕捉高能粒子的蹤跡。丁肇中教授領導的西歐核子研究中心在建設正負電子對撞機時需要十幾噸的BGO閃爍晶體（即鍍酸鉍，分子式為Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>）作靶使用。

#### (4) 電光、磁光、聲光調製晶體

電光晶體在電場作用下，某些晶體的折射率會發生變化，利用這種性質，可對入射到晶體中的光束的強度、相位以及光束的出射方向進行控制，此種晶體稱為電光晶體。電光晶體最重要的用途是作光調製器。只要將電信號加到電光晶體上，鐳射便被調製成載有資訊的調製光。鈮酸鋰晶體雖價格較便宜，但因損傷閾值低，限制了其使用。KD<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>（磷酸二氬鉀）晶體雖然電光品質因數較低，但易於生長，可得到較大尺寸的單晶，所以使用最多。當前KTP的電光性能已被開發，得到很好的應用。

磁光晶體當偏振光被具有磁性的晶體反射或透射後，其偏振狀態會發生改變，偏振面會偏轉，這些磁性晶體稱為磁光晶體。光纖雷射器中，半導體雷射器發出的鐳射大部份進入光纖，有一小部分不可避免地要在光纖前端發生反射。反射光會破壞雷射器的穩定性，形成噪音。因此，光纖雷射器的光纖前端都裝有磁光晶體製作的光隔離器，以達到反射光與雷射器隔離的目的。目前使用較多的磁光晶體是釷鐵石榴石（Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>，簡稱YIG），但YIG晶體無法用於可見波段，為此人們探索了其他一些新的磁光晶體。

聲光晶體當超聲波通過某些晶體時，晶體內會產生彈性應力，使晶體折射率發生週期性變化，形成超聲光柵，光通過時就會發生衍射，此種晶體叫聲光晶體。利用聲光晶體可以製

作聲光偏轉器、聲光調製器、聲光濾波器等，聲光器件在資訊處理方面也有重要應用，如脈衝壓縮、光學相關器和射頻頻譜分析等。金剛石是比較好的聲光晶體，但因價格昂貴，使用較少。目前所用的聲光晶體中最重要的是 $\text{TeO}_2$ 和 $\text{PbMoO}_4$ ，雷射印表機中用於偏轉雷射光束的晶體使用的就是 $\text{TeO}_2$ 。

#### (5) 壓電晶體

當對某些晶體擠壓或拉伸時，該晶體的兩端就會產生不同的電荷，這種晶體就叫壓電晶體。當然，產生的電荷的量是非常少的，但卻是儀器可以檢測到的，並能夠加以利用。手錶中用於穩定頻率的諧振子就是用水晶這種壓電晶體製作的。壓電晶體只有按照一定的方向切割，才具有壓電效應。切割方向不同，對晶體的壓電效應影響很大。如果在特定方向的壓電晶片上鍍上電極，加上交流電，則壓電晶片會作週期性的伸長或縮短，產生振盪，如同人唱起歌來一樣。水晶的壓電效應並不是最好，但因價格較便宜，穩定性與機械強度很好，至今仍是用量最多的一種壓電晶體。人工合成水晶主要是在高壓釜中生長，一次可以生長大批的水晶。

#### (6) 熱釋電晶體

熱釋電晶體一種對熱感應敏銳之晶體，重要的用途就是製作火車輪軸的溫度測量系統。火車的車輪安裝不當和超負荷運轉時都會產生大量的熱量，易造成事故。熱釋電晶體可將產生的熱量轉化為電信號，檢測電信號的大小就可以知道輪軸的溫度，判斷是否達到了使用的極限以進行控制。

目前使用較多的熱釋電晶體是TGS（硫酸三甘氨酸）與 $\text{LiTaO}_3$ （鉬酸鋰）。火車輪軸的溫度測量系統中使用的熱釋電晶體就是 $\text{LiTaO}_3$ 。

#### (7) 光學晶體

光學元件亦區分有主動與被動元件，主動元件中有寬的光譜透過能力的晶體，稱為光學晶體。主要用作光學儀器中的各種光學視窗、稜鏡透鏡、濾光和偏光元件等。如光纖網路中，分配光路運行之DWDM等元件等。以及氟化鈣可用作導彈的頭罩，與氟化鈣能夠搜集導彈欲攻擊目標發出的紅外線，因此可以追蹤攻擊目標。

#### (8) 寶石晶體

因應傳統飾品之珠寶產業的產品開發，有極高的硬度、奇特的星彩閃光或豔麗顏色的晶體是必備的。大家所熟悉的寶石晶體如立方氧化鋯的硬度僅次於金剛石，折射率也相當大，可以有很高的星彩效應。氧化鋯晶體製作的孔雀晶體，由於不同的摻雜，顯現出不同的顏色。除金剛石外，其他寶石主要是人工合成品。人工合成金剛石已達到寶石級尺寸，但因價格十分昂貴，尚未進入市場。

#### (9) 超硬晶體

鑽石彩色閃光的原因是什麼呢？眾所周知，白光可看成有紅、橙、黃、綠、青、藍、紫七色光組成。人們將寶石切磨出多個側面，由於色散的存在，一束白光入射寶石後，會分解出不同的色光，經寶石反射或透射後的白光就會出現五顏六色的彩色閃光，這就是鑽石星彩效應的成因。人工合成的金剛石粒度較小，僅半個毫米左右。砂輪與切割機的鋸片所要求的金剛石顆粒很小，約幾百目，稱之為金剛石磨料，所以人工合成金剛石主要應用在工業方面。

金剛石是目前世界上所發現的硬度最大的物質。金剛石與石墨是同素異型體，都是由碳

元素組成。石墨為層狀結構；金剛石為立體網狀結構，屬立方晶系。從成鍵的角度看，石墨中碳原子採取 $sp^2$ 雜化；金剛石中每一個碳原子和四個C等價結合，採用 $sp^3$ 雜化軌道。通過高溫高壓的方式，可以將石墨轉換為金剛石。另外利用奈米製程製造出奈米碳管等等，都是未來發展趨勢。

#### 伍、參考文獻：

- 1.文中圖表均取至於國立中山大學光電工程研究所超快雷射實驗室與沈德忠院士演講稿.
2. Emmanuel Fritsch and Benjamin Rondeau, “Gemology: The Developing science of gems”, J. elements 5, (2009).
3. David D. Awschalom, Ryan Epstein, Ronald Hanson, “鑽石級量子電腦”，科學人期刊, (2007)
4. 沈德忠中國國家院士, 清華大學演講稿, (2009)  
<http://www.coema.org.cn/bbs/dispbbs.asp?BoardID=24&replyID=3236&id=1838&skin=1>
5. 侯印春, “光功能晶體”, 北京：中國計量出版社(1991)
6. 閔乃本, “探索新晶體——光電功能材料的結構、性能、分子設計及製備過程的研究”, 長沙：湖南科學技術出版社(1998)
7. 蔣民化, “晶體物理”, 濟南：山東科學技術出版社(1980)
8. 張克從, “晶體生長科學與技術”, 北京：科學出版社(1997)  
<http://www.coema.org.cn/bbs/dispbbs.asp?BoardID=24&replyID=3236&id=1838&skin=1>