

準分子雷射回火結晶系統簡介

林世平

工研院電子工業研究所

微電子工程技術發展組 設備技術發展部

黃光技術課 課長

摘 要

本文簡介低溫複晶矽薄膜電晶體(LTPS TFT)技術中，製造複晶矽薄膜的關鍵製程設備“準分子雷射回火結晶系統”的原理與架構。文中簡單描述雷射產生之基本原理，並介紹屬於脈衝式氣體雷射之準分子雷射的類型與產生模式，最後則針對應用於製造玻璃基板上之低溫複晶矽薄膜的準分子雷射回火結晶系統作一概述。

關鍵詞

準分子(Excimer)；雷射(Laser)；低溫複晶矽(Low Temperature Polysilicon, LTPS)；薄膜電晶體(TFT)；準分子雷射回火結晶(ELA or ELC)；居量反轉(Population Inversion)；調變器(Homogenizer)。

前言

在低溫複晶矽薄膜電晶體(Low Temperature Polysilicon TFT)的製造技術中，準分子雷射結晶回火系統扮演著舉足輕重的角色，由於非晶矽(Amorphous Silicon, a-Si)薄膜對UV光具有超高吸收率之特性，屬紫外波長輸出的準分子雷射便提供了一絕佳的製程方式，在低溫〈600°C〉的製程環境下，讓基板上之非晶矽薄膜進行回火結晶而成為複晶矽薄膜

(Poly-Si)，以提供TFT元件作為具有高電子/電洞移動率（相對於a-Si）的通道材料。（另一種應用，則是將經過離子佈植製程摻入雜質的薄膜，利用雷射提供能量進行回火，以提供雜質進行活化製程。）

由於複晶矽薄膜形成品質的優劣，影響LTPS TFT的元件性能至深，因此準分子雷射回火結晶的製程能力，將是左右LTPS TFT發展的重要關鍵。以下便從基本的雷射原理開始切入，並介紹所謂的準分子雷射，接著便針對準分子雷射回火結

晶系統的架構進行分析，說明系統的工作原理，並探討獲得高品質複晶矽薄膜所應具備的系統特性與要求。

雷射基本原理

雷射為英文Laser之音譯，其語源為英語Light Amplification by Stimulation Emission of Radiation，其主要字開頭字母之縮寫，原文意為受輻射的激發放射之光增幅作用，為1960年7月，於實驗室內首度實現第一台紅寶石雷射(Ruby Laser)之美國物理學家梅曼博士(Dr. Maiman)所命名。雷射的最基本原理，可追溯至二十世紀初，愛因斯坦由普朗克的能量不連續概念所推展出之光量子論，其中愛因斯坦在推導普朗克公式時，引用了光與物質相互作用的兩個重要概念：自發輻射(Spontaneous Emission)與受激輻射(Stimulated Emission)，為往後雷射的發明奠定了理論基礎^[1,2]。

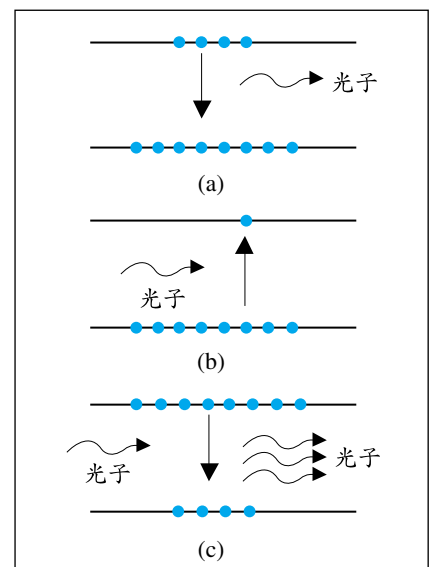
實際上，光與物質的相互作用可分為自發輻射、受激吸收、受激輻射三種方式，如圖一所示。

其中第二種之受激輻射，為當物質粒子受到與兩能階差相同能量之光子激發，由高能階躍遷至低能階時，發射出能量相同之光子，而這種輻射過程中所產生的光即為產生雷射之基本模式。

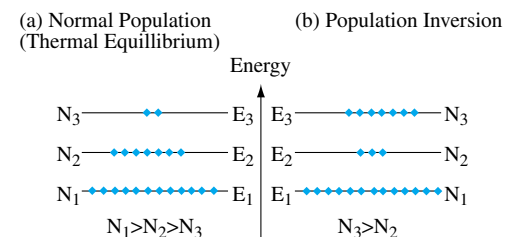
然而要利用受激輻射的方式達到光放大效果的物質，則必須要具備有能實現居量反轉，或稱粒子數反轉(Population Inversion)之特性，如圖二所示。由於一般物質其上能階粒子數總是低於下能階粒子數，因此對於入射光子的激發總是以吸收作用為主，而達不到光放大的效果，因此唯有讓上能階粒子數高於下能階粒子數，才能使受激輻射作用大於受

激吸收作用，而獲得增強入射光的目的。

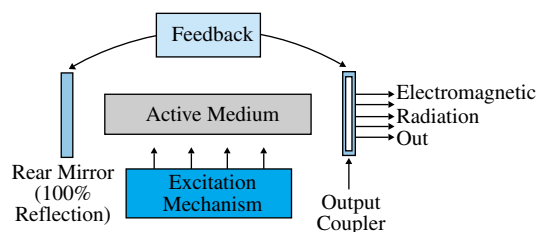
而能達到增強入射光之結果，還不足以產生真正的雷射輸出，因為首次經由自發輻射光子通過工作物質所產生的光增益有限，因此必須利用一光學共振裝置（回授系統），由兩片互相平行之全反射鏡片與部分反射鏡片組成，讓鏡片之間一定方向的光子，來回震盪於工作物質之間，不斷地進行激發作用，以獲得倍數放大之光子能量，而最後由部分反射鏡片方向所透射出來的光能，即一



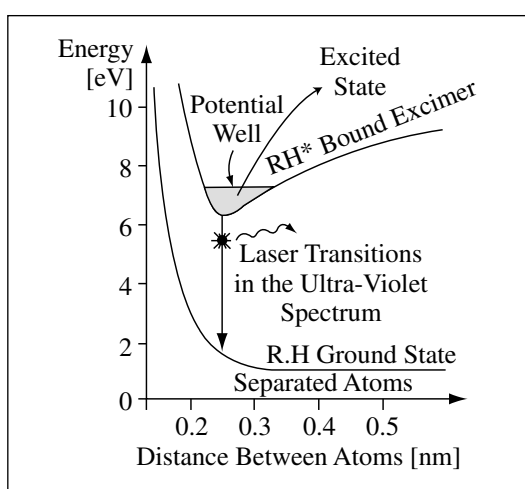
▲圖一 (a)自發輻射；(b)受激吸收；(c)受激輻射^[2]



▲圖二 常態粒子分佈與粒子數反轉分佈示意圖^[5]



▲圖三 雷射共振腔示意圖^[5]



▲圖四 準分子雷射電位能階示意圖

般所謂的雷射光，如圖三所示。

準分子雷射原理與類型

自1960年梅曼博士製造出第一台雷射以來，科學家們相繼發明出各式各樣的雷射並予以實現，大致上可分為氣體雷射（如：氦氖雷射、二氧化碳雷射、離子雷射等）、固體雷射（如：紅寶石雷射、YAG雷射）、染料雷射（Rhodamine 6G、Coumarin 120等）以及半導體雷射（AlGaAs雷射二極體、InGaAsP雷射二極體等），另外還有化學雷射以及自由電子雷射等，現今已商品化的準分子雷射則皆屬於氣體雷射的一種，不過於1970年首度由蘇聯N. G. Bosov實現的電子束激

表一 常見鹵化物稀有氣體準分子雷射之輸出波長(Å)^[4]

鹵素 稀有氣體	F	Cl	Br
Ar	1930	1750	
Kr	2490	2220	
Xe	3511, 3531	3080, 3082	2818

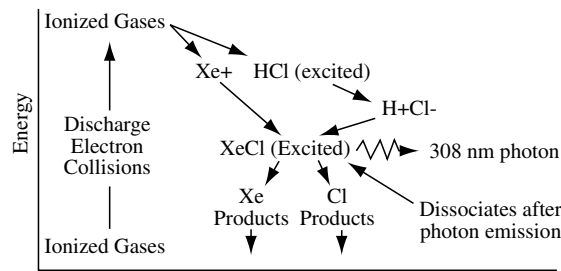
發之Xe₂雷射則為液體^[1]。

準分子雷射顧名思意即工作物質為準分子之雷射，原名為 Excimer Laser，Excimer一字由Excited與Dimer兩字複合而成，意思是屬激發態之複合物，而其另外有一名稱則是Exciplex（為Excited與Complex之複合字），目前一般統稱為Excimer。實際上是一種只有處於激發態時才會存在的複合分子，而其在基態時則呈現分離狀態之離子或分子。

由於準分子在能級上的最大特點是其基態為排斥態，上能級為束縛態，造成雷射下能級之粒子數幾乎永遠是空的，因此極易實現粒子數反轉狀態，可期望的飽和強度相當高，加上其光子輻射躍遷的效率幾乎為100%，因此可獲得相當高能量的雷射輸出，為一種高效率、高功率之雷射結構。圖四則簡單示意準分子雷射之電位能階。

準分子雷射依工作物質種類不同可分為三種：惰性稀有氣體準分子、惰性稀有氣體鹵化物準分子、金屬鹵化物準分子，目前已有廣泛利用之商品化雷射為第二類，其種類以及輸出特性分析如表一所示。

以其中之氙-氯雷射(Xe-Cl)為例，其工作物質XeCl準分子，為激發氙原子與氯化物（一般為氯化氫氣體）反應所形成，而氙-氯雷射的激發、準分子生成以

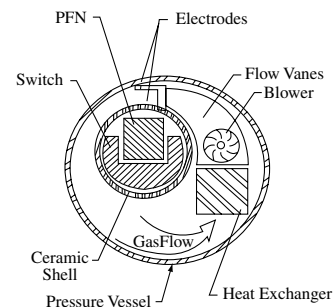


▲圖五 氙-氯雷射(Xe-Cl)反應示意圖

及光子放射過程，可由圖五作一個示意。

由於氙-氯雷射要求將工作物質激發到相當高能級的電子態才能產生雷射，因此一般皆用快速高壓放電脈衝來激發，而為了產生此類脈衝，則必須準備一控制高壓高頻放電的開關，閘流管(Thyratron)為一般常用之開關元件；而為了得到穩定、均勻且大體積之放電來產生脈衝雷射輸出，則必須備妥一預電離電極(Ionizer)，將放電腔中之工作物質均勻解離，以獲得穩定而均勻之放電激發過程；另外在雷射脈衝產生過程中會因高能量放電激發，而產生大量的熱能造成氣體溫度上升，而溫度一旦上升過高，將會延長工作物質形成激發態之時間，間接影響雷射脈衝重複產生的性能，因此需具備一套高效率之氣體循環冷卻系統，進行工作物質之熱交換處理，維持工作溫度，保持雷射之高效率輸出。圖六為一般商用準分子雷射之結構圖示意^[2]。

另外，影響準分子雷射輸出效率的因素還包括氣體的成分、氣體的混和比例、氣體純度、共振腔的形狀、共振腔兩端之Resonator鏡組的平行度等等。當反應過後氣體衰竭、反應離子濃度降低、雜質產生造成反應氣體不純、光學元件污染造成透光率下降、甚至共振腔



◀圖六 準分子雷射結構示意圖^[6]

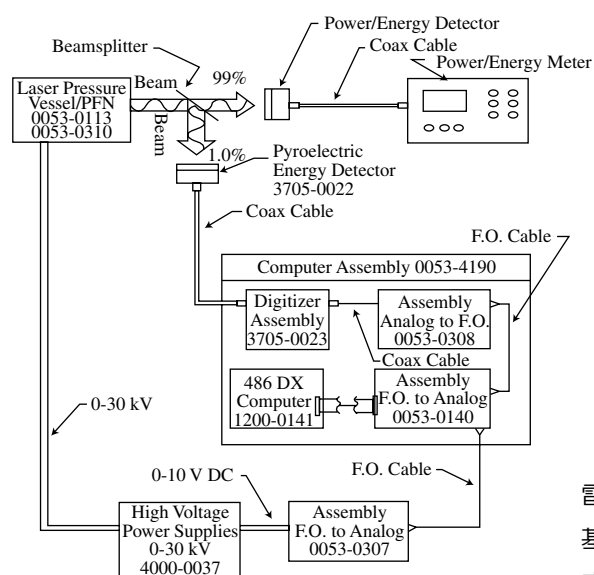
兩端的Resonator鏡組不平行等，皆會造成必須提高放電電壓才能達到相同的能量輸出之結果，致反映出雷射的輸出效率變差與品質降低^[9]。由於影響準分子雷射均勻且穩定輸出的因素相當多，而可進行測量並達到良好控制效果的變因卻很有限，因此至今仍是相當具有挑戰性的一個問題。

準分子雷射回火系統

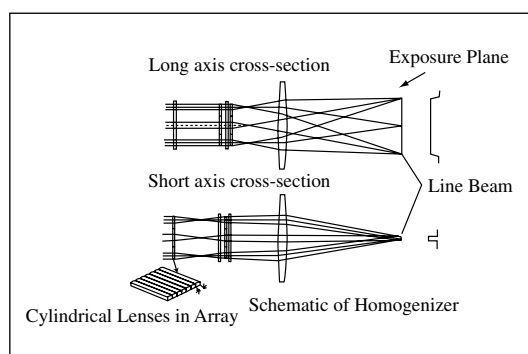
準分子雷射回火結晶系統主要包括：準分子雷射產生器、光學系統（光路校正、波型調變與監測）、雙軸精密移動平台、製程環境構成系統（如真空、 N_2 供給、均溫加熱等），以及基板傳送與轉換系統等。以下便針對各系統之功能做一簡單介紹。

準分子雷射產生器，其架構與原理如前一節所描述，目的在提供一穩定而均勻之紫外光雷射輸出，而雷射輸出能量之控制則是透過輸出端的部分反射鏡片，將少量雷射反射至Power Meter，以量測即時之雷射輸出，經過校正與運算後供伺服系統進行回授控制，以獲得固定能量的雷射脈衝輸出。雷射回授控制系統示意如圖七。

由於目前之LTPS TFT基材均為大面積之玻璃基板（每邊數百甚至一千毫米

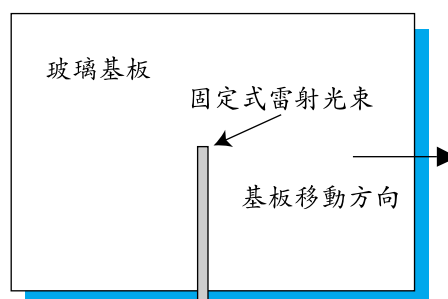


▲圖七 雷射回授控制系統示意圖^[6]



▲圖八 雷射波型調變(Homogenizer)示意圖^[6]

以上)，為了達到大面積基板高效率的回火結晶製程，目前均採用掃描式製程進行，為此必須將矩形之雷射輸出加以調變，形成細長型之 Long Beam 型態，以掃描的方式照射基板表面進行回火結晶，而雷射光束由矩形調變成 Long Beam 的原理可由圖八來作一簡單示意，圖中雷射光束利用雙軸調變器(Homogenizer)，將其中一軸光線進行均勻擴束，而另一軸光線進行均勻集束，最後形成一細長型之雷射光，調變後之



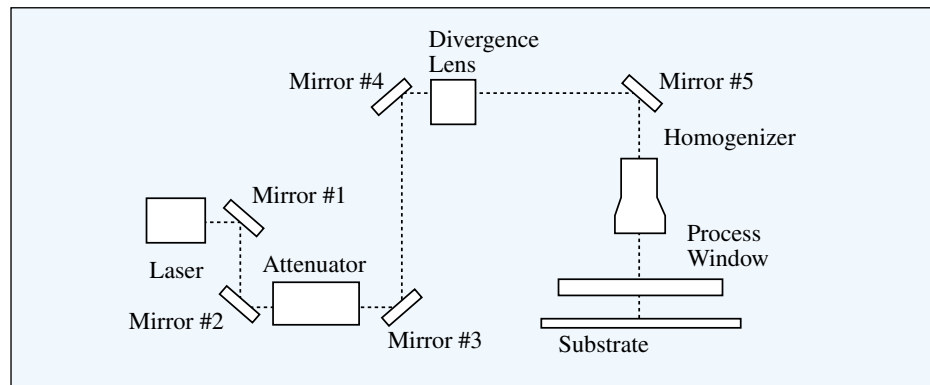
▲圖九 玻璃基板移動掃描示意圖

雷射光束其長度與寬度，則可依照不同基板尺寸所需要的最高效率掃描之考量來進行調整，目前所知調變後光束長度可達300mm以上。

關於達到掃描效果的方式，可分為雷射光束移動掃描與基板移動掃描兩種，目前普遍採用基板移動方式進行，於此必須要有一套精密雙軸移動平台，來承載基板進行步進式移動，圖九顯示基板移動進行雷射光照射的模式。

雷射回火結晶系統之主要目的，在於獲得均勻而且晶粒尺寸(Grain Size)大之複晶矽薄膜，而影響這個結晶結果品質的因素相當多，雷射輸出部分包括雷射能量大小、雷射輸出能量穩定性、雷射輸出方向精確度，雷射光束輸出均勻性等，而光束調變部分影響因素包括雷射光束波形、雷射光聚焦狀況等，此外還會影響結晶品質的則是基板製程環境的條件，如基板溫度的高低、基板環境為真空狀態或是充滿氮氣，均會影響結晶的品質，製程環境構成系統，即是指用來決定基板所處製程環境條件的控制系統，包括基板所處環境為高溫還是室溫，是真空狀態還是氮氣狀態。

圖十則為雷射產生器產生雷射光後，經由光路校正鏡片、波型調變系



▲圖十 系統光路路徑示意圖^[6]

統，再入射至玻璃基板的光路路徑示意圖。

結論

以上簡介低溫複晶矽薄膜電晶體 (LTPS TFT) 技術中，關鍵製程之準分子雷射回火結晶製程設備“準分子雷射回火結晶系統”的原理與架構，包括雷射產生之基本原理、準分子雷射的類型與產生模式，以及準分子雷射回火結晶系統之架構與工作原理。現今在大玻璃基板上製造複晶矽薄膜的研究方向相當多，但是這些技術當中，最有效率且最具有商用價值的，僅準分子雷射回火結晶技術，然而過多的不穩定變因，造成不易維持製程條件的特性，則是準分子雷射回火結晶系統在 LTPS TFT 應用上的最大問題，如何提高雷射光束輸出以及調變後波形的穩定性，以維持製程條件不變的技術，將會是影響 LTPS TFT 產業發展的重要關鍵。

參考文獻

1. 雷射原理與光檢測，陳席卿編著，全華科技圖書出版，民國81年1月初版。
2. 雷射工程導論，丁勝懋編著，中央圖書出版社出版，民國75年5月修訂版。
3. 雷射技術原理實務，秋葉稔光編著，賴耿陽譯著，復漢出版社出版，民國75年6月。
4. 雷射原理與應用，林三寶編著，全華科技圖書出版，民國78年9月3版。
5. 雷射原理與應用課程講義，閻偉中，89年7月。
6. SHI Ltd., ELA 5400 Excimer Laser Annealing System Manual, 2000/9。
7. 光電工程，丁勝懋編著，中國電機工程學會出版，民國88年元月初版。
8. 光電子學—原理、元件與應用，林瑩光編著，全華科技圖書出版，民國88年2月初版。
9. 秦憲台，XMR Excimer Laser Annealing System Model 5300 設備預防保養手冊，工研院內部技資。
10. 林昆志，準分子雷射結晶製程開發，工研院內部技資。