

NSAP 實驗室暑假課程

準分子雷射介紹

國立成功大學 機械工程系

指導老師：李永春教授

講者：傅冠傑

Date: 2026/07/20

課程內容

第一章 雷射基本原理

- 1-1 什麼是雷射
- 1-2 雷射形成的三個基本條件
- 1-3 雷射如何形成
- 1-4 雷射的三大特性
- 1-5 雷射的發光模式
- 1-6 光束圖案

第二章 準分子雷射

- 2-1 什麼是準分子雷射
- 2-2 KrF 準分子雷射的工作原理
- 2-3 使用 KrF 準分子雷射的原因
- 2-4 本實驗室使用的 KrF Excimer Laser
- 2-5 見的準分子雷射與用途

第三章 本實驗室 KrF 準分子雷射機台介紹

- 3-1 機台整體架構
- 3-2 準分子雷射部分
- 3-3 光學導引區
- 3-4 光學元件介紹

第四章 課程總結

第一章 雷射基本原理

課程目標

本章將介紹雷射 (Laser) 的基本概念，包含雷射的定義、特性以及形成雷射所需的基本條件，作為後續介紹準分子雷射 (Excimer Laser) 及本實驗室機台的基礎。

1.1 什麼是雷射

LASER 為 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的縮寫，中文翻譯為 受激放射光放大。

LASER 並不是一種特殊的光，而是一種利用受激放射 (Stimulated Emission) 原理所產生的光源。

1.2 雷射形成的三個基本條件

雷射並非只要提供光源即可形成，而必須同時具備以下三項基本條件。

I. 增益介質 (Gain Medium)

增益介質為產生雷射的核心材料。

不同種類的雷射具有不同的增益介質，例如：

固體、氣體、液體或半導體

本實驗室所使用的準分子雷射，其增益介質為 Kr 與 F₂ 氣體形成的 KrF。

II. 激發源 (Pumping Source)

激發源的功能是提供能量，使增益介質中的電子被激發至高能階，建立雷射形成所需的條件。

常見的激發方式包括：

高壓放電 (Electrical Discharge)

閃光燈 (Flash Lamp)

雷射激發 (Optical Pumping)

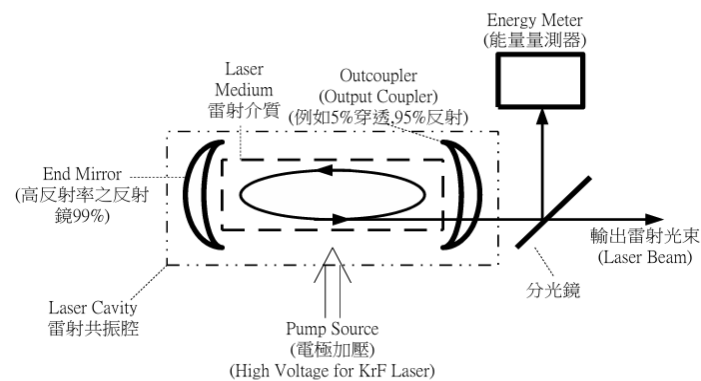
電流注入 (Current Injection)

本實驗室使用 高壓放電 (High Voltage Discharge) 作為激發方式。

III. 光學共振腔 (Optical Resonator)

光學共振腔通常由兩面鏡子所組成，一面為全反射鏡，另一面為部分反射鏡。

光在共振腔內持續來回反射，使受激放射產生的光不斷被放大，最後由部分反射鏡輸出形成雷射。



1.3 雷射如何形成

雷射形成流程：

雷射的形成並非單一步驟，而是經過一連串的物理過程，最終才產生具有高方向性、高單色性及高同調性的雷射光。

形成流程如下：

電子吸收能量 → 電子躍遷 → 受激放射 → 粒子數反轉 → 共振腔放大 → 雷射輸出

I. 電子能階 (Energy Levels)

原子中的電子只能存在於固定的能階，並不能停留在任意能量的位置。

通常將最低能量稱為基態 (Ground State)，較高能量稱為激發態 (Excited State)。

在正常情況下，大部分電子都位於基態。

II. 吸收 (Absorption)

當電子吸收足夠的能量後，便會由基態躍遷至激發態。

此能量通常由 Pump Source (激發源) 提供。

吸收能量只是將電子提升至高能階，此時尚未形成雷射。

III. 自發放射 (Spontaneous Emission)

電子停留於激發態一段時間後，會自行回到基態，同時放出一個光子 (Photon)。

自發放射具有以下特性：

- ◆ 放射時間隨機
- ◆ 放射方向隨機
- ◆ 相位隨機

因此，一般燈泡或太陽光主要都是由自發放射所產生，無法形成雷射。

IV. 受激放射 (Stimulated Emission)

若有一個光子通過激發態電子附近，便可能誘發電子回到基態，同時放出另一個光子。

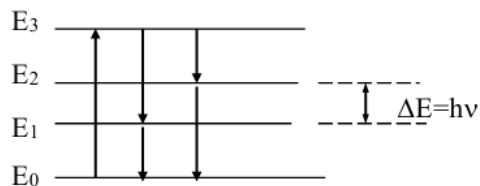
最重要的是：

新產生的光子與原來的光子完全相同。

具有相同的：

- ♦ 波長 (Wavelength)
- ♦ 頻率 (Frequency)
- ♦ 相位 (Phase)
- ♦ 偏振 (Polarization)
- ♦ 傳播方向 (Propagation Direction)

這就是 Stimulated Emission (受激放射)，也是雷射形成最重要的原理。



V. 粒子數反轉 (Population Inversion)

在正常情況下，大部分電子位於基態，因此受激放射發生的機率很低。

若持續由 Pump Source 提供能量，使激發態電子數量多於基態電子數量，便形成粒子數反轉 (Population Inversion)。

只有建立粒子數反轉，受激放射才能持續發生，並形成雷射。

VI. 光學共振腔放大 (Optical Resonator)

受激放射所產生的光子會在光學共振腔內來回反射，不斷誘發更多受激放射，使光的能量持續放大 (Light Amplification)。

當光強累積至一定程度後，部分光會由 Output Coupler 透射出去，形成雷射光束 (Laser Beam)。

1.4 雷射的三大特性

相較於一般光源，雷射具有以下三項重要特性，因此被廣泛應用於加工、醫療、量測及半導體製程等領域。

I. 高方向性 (High Directionality)

雷射光束具有極佳的方向性，能量集中，不易向四周發散，因此可以在長距離內保持良好的光束品質。

相較之下，一般燈泡或手電筒發出的光會向四周擴散，能量容易分散。

II. 高單色性 (High Monochromaticity)

一般白光由許多不同波長所組成，而雷射幾乎只具有單一波長，因此稱為高單色性。

不同種類的雷射具有不同的波長，例如：

雷射種類	波長
He-Ne Laser	632.8 nm
Nd:YAG Laser	1064 nm
KrF Excimer Laser	248 nm

本實驗室所使用的為 KrF 準分子雷射，波長為 248 nm。

III. 高同調性 (High Coherence)

雷射光中的光波具有固定的相位關係，因此能夠保持高度一致地傳播，此特性稱為高同調性。

同調性可分為**時間同調 (Temporal Coherence)**及**空間同調 (Spatial Coherence)**。

① 時間同調 (Temporal Coherence)

時間同調是指同一束光在不同時間仍能保持固定的相位關係。

時間同調性越高，表示光的波長越單一，因此可以維持較長的同調長度 (Coherence Length)。

對於本實驗室使用的 **KrF 準分子雷射 (248 nm)** 而言，其波長固定，因此具有良好的時間同調性。

② 空間同調 (Spatial Coherence)

空間同調是指光束不同位置之間仍能保持一致的相位關係。

高空間同調性的雷射容易聚焦成很小的光點，因此適合高解析度加工。

然而，過高的空間同調性也容易產生干涉現象 (Interference)，形成亮暗不均的 **Speckle (散斑)** 或能量分布不均勻的情形。

高同調性可使雷射具有：

- ◆ 良好的聚焦能力
- ◆ 較高的能量密度
- ◆ 較佳的加工精度

因此非常適合微細加工及半導體製程。

1-5 雷射的發光模式

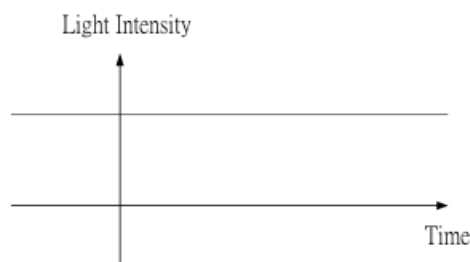
雷射依照輸出方式可分為兩種：

- 連續波雷射 (Continuous Wave, CW Laser)
- 脈衝雷射 (Pulsed Laser)

兩者最大的差異在於雷射能量輸出的方式不同。

I. 連續波雷射 (Continuous Wave, CW)

連續波雷射 (Continuous Wave, CW) 是指雷射在運作期間持續輸出能量，只要雷射處於開啟狀態，光束便會持續發射，不會中斷。



特性

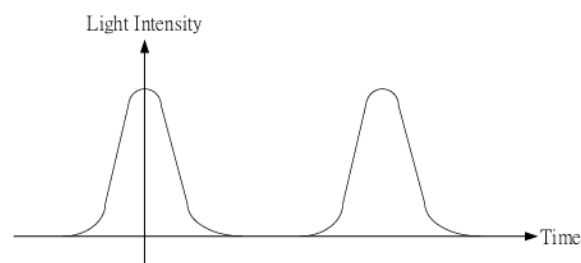
- 能量持續輸出
- 平均功率穩定
- 熱量容易累積
- 適合長時間照射

常見應用

- 雷射切割
- 雷射焊接
- 雷射雕刻

II. 脈衝雷射 (Pulsed Laser)

脈衝雷射並非持續發光，而是在極短時間內輸出一個雷射脈衝 (Pulse)。每一次脈衝都具有很高的瞬間能量，而脈衝與脈衝之間則有短暫的間隔。



特性

- 能量集中於極短時間
- 瞬間峰值功率 (Peak Power) 高
- 熱影響區 (Heat Affected Zone, HAZ) 較小
- 適合高精度加工

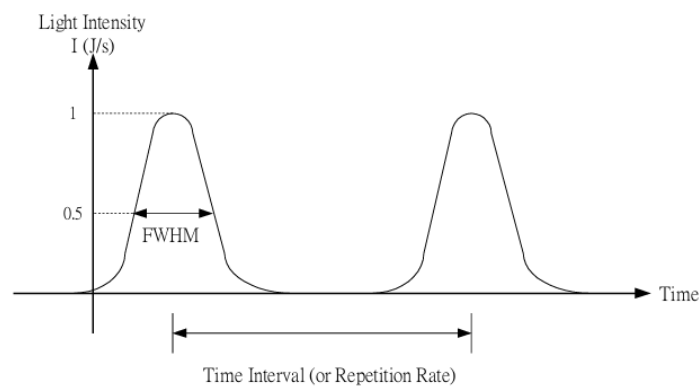
脈衝雷射的重要參數:

在使用脈衝雷射時，除了功率之外，還會看到幾個重要參數。

A. 脈衝能量: Pulse energy: [J/pulse] or [mJ/pulse]

B. 脈衝時間: Pulse time duration: FWHM

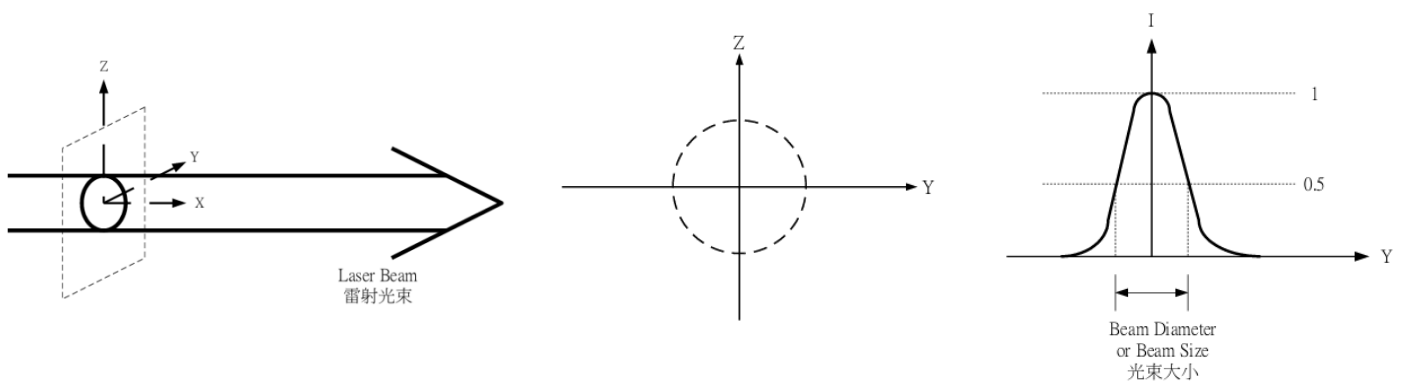
半值全寬 FWHM: Full-Width-Half-Magnitude



C. 脈衝重複率 Pulse Repetition Rate: 與連續相鄰的二個雷射脈衝之時間差成反比

1-6 光束圖案 (Beam Pattern)

一般雷射光束的 Beam Pattern 為圓形，且其能量呈高斯分布，Beam 的大小 (beam diameter or spot size) 可以由其能量之分布決定。



第二章 準分子雷射 (Excimer Laser)

課程目標

了解準分子雷射 (Excimer Laser) 的基本原理，認識本實驗室使用之 KrF 準分子雷射的組成、工作方式及其特性。

2-1 什麼是準分子雷射 (Excimer Laser) ？

Excimer 為 **Excited Dimer** 的縮寫，中文稱為準分子或激發二聚體。

所謂準分子，是指只有在激發態 (Excited State) 下才能形成穩定分子的特殊分子。

當其回到基態 (Ground State) 時，便立即解離成原本的原子，因此稱為「準分子」。

本實驗室所使用的準分子雷射為 **KrF Excimer Laser**。

2-2 KrF 準分子雷射的工作原理

KrF 準分子雷射是以高壓放電 (High Voltage Discharge) 作為激發源 (Pumping Source)，使 Kr 與 F₂ 形成激發態準分子 (KrF)。

當 KrF 回到基態時，會釋放出波長 **248 nm** 的紫外光 (Ultraviolet, UV)，形成準分子雷射。

項目	內容
增益介質 (Gain Medium)	Kr + F ₂ 氣體
激發源 (Pumping Source)	High Voltage Discharge
雷射波長	248 nm
雷射型式	Pulsed Laser
雷射種類	Ultraviolet Laser

2-3 使用 KrF 準分子雷射的原因

KrF 準分子雷射最大的特色為**波長短 (248 nm)**。

由於波長較短，因此具有較高的光子能量，可有效破壞材料中的化學鍵，並提高加工解析度，因此非常適合微細加工。

KrF 準分子雷射常應用於：

- 半導體微影 (Photolithography)
- 微結構加工 (Microfabrication)
- 聚合物加工 (PC、PMMA)
- 醫療雷射

2-4 本實驗室使用的 KrF Excimer Laser

本實驗室使用 KrF 準分子雷射進行微結構加工，主要加工材料包括：

- PC (Polycarbonate)
- PMMA (Polymethyl Methacrylate)

KrF 雷射經由後續光學系統（鏡組、均光鏡、光罩及投影鏡組）後，將雷射能量均勻投射至樣品表面，以製作高品質微結構。

後續將於第三章介紹本實驗室準分子雷射機台及各光學元件的功能。

2-5 常見的準分子雷射與用途

準分子雷射	波長 (nm)	常見用途
ArF	193	極紫外微影、高解析度光刻
KrF	248	微影、微結構加工、聚合物加工
XeCl	308	醫療、表面處理
XeF	351	科學研究、特殊光學應用

第三章 本實驗室 KrF 準分子雷射機台介紹

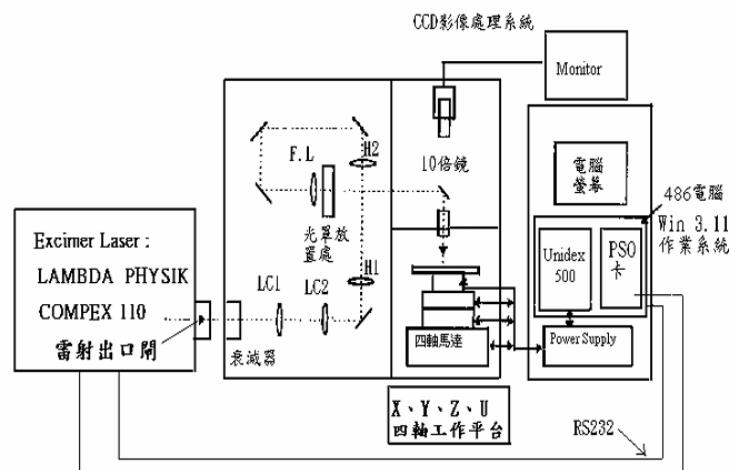
課程目標

認識本實驗室 Exitech PS-2000 KrF 準分子雷射加工機的主要架構，了解雷射光在機台中的傳遞路徑，以及各光學元件的功能。

3-1 機台整體架構

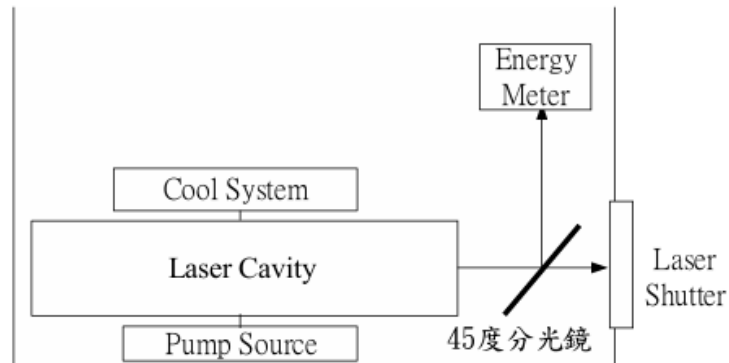
整台機器主要可以分成四個子系統：

1. 準分子雷射系統 (Excimer Laser)
2. 光學導引區 (Optical System)
3. 四軸位移平台 (X-Y-Z-U Stage)
4. 控制系統 (Control System)



3-2 準分子雷射部分

準分子雷射部分包含雷射共振腔(Laser Cavity)、冷卻系統；能量泵(Pumping Source)、能量計(Energy Meter)、分光鏡(Laser Shutter)及雷射出口閘(Laser Shutter)、冷卻系統(Cooling System)



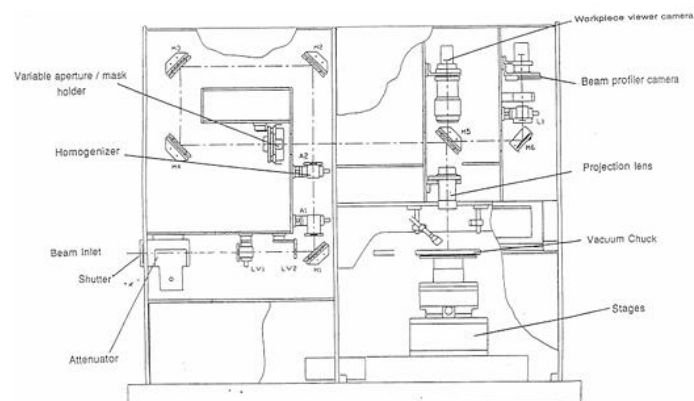
以下是各元件的功能:

元件	功能
Laser Cavity	產生 248 nm 雷射
Pump Source	提供高壓放電能量
Cooling System	冷卻雷射主機
Beam Splitter	分出部分光束量測能量
Energy Meter	監測每發 Pulse Energy
Laser Shutter	控制雷射是否輸出

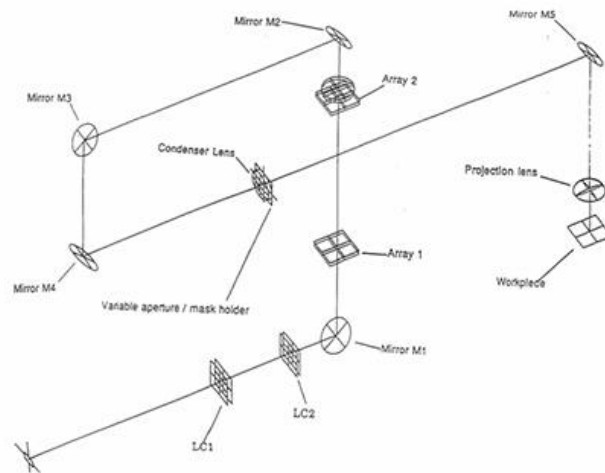
3-3 光學導引區 (Optical System)

光學導引區由五個反射鏡(M1~M5)、2 個柱狀透鏡(LC1, LC2, 一凹一凸)、1 個聚光透鏡(Condenser Lens or Field Lens)及 1 個投射鏡(Projection Lens)所組合，反射鏡目的在於控制雷射光行徑路徑。

光學引導路徑:



光路 3D 示意圖：



3-4 光學元件介紹

I. Attenuator (衰減器)

- ◆ 調整雷射能量
- ◆ 控制通過的 Pulse Energy

II. Mirror (反射鏡)

- ◆ 改變雷射傳播方向

III. Cylindrical Lens (柱狀鏡 LC1、LC2)

- ◆ 改變光束形狀
- ◆ 將原本長方形光束整理成接近正方形
- ◆ 方便後續均光

IV. Homogenizer, Array1 and Array2 (均光鏡)

- ◆ 能量重新分布
- ◆ 能量更加均勻

V. Mask(光罩)

- ◆ 決定雷射照射圖案

VI. Condenser Lens(球面透鏡)

- ◆ 將光束集中至 Mask
- ◆ 提高光利用率

VII. 10x Projection Lens(10 倍投射鏡)

- ◆ 將光罩圖案縮小並投影至工件

第四章 課程總結

第一章 雷射基本原理

本章介紹了雷射的基本概念與形成方式，包含：

- LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) 的定義
- 雷射形成原理
- 雷射三大特性
- 雷射形成三要素
- Continuous Wave (CW) 與 Pulsed Laser

重點：

了解雷射是如何產生，以及雷射與一般光源的差異。

第二章 準分子雷射 (Excimer Laser)

本章介紹了準分子雷射的基本原理，包含：

- Excimer (Excited Dimer) 的定義
- KrF 準分子雷射的形成方式
- 高壓放電 (High Voltage Discharge)
- 248 nm 紫外光
- KrF 準分子雷射的特色

重點：

了解本實驗室所使用的 KrF 準分子雷射之工作原理及其優勢。

第三章 實驗室機台介紹

本章介紹了本實驗室 Exitech PS-2000 準分子雷射加工機，包含：

- 機台整體架構
- 光路介紹
- 光學引導區元件
- 各光學元件對雷射造成的影響

重點：

了解雷射光如何經過各光學元件後，完成微結構加工。