

逢甲大學學生報告 ePaper

報告題名：科學儀器學期末專題報告：外腔半導體雷射機構設計

Scientific Instrumentation Final Project Report: External-Cavity Semiconductor Laser Optomechanical Design

作者：蔡依宸、王韋翰、施芳宜、莊岫芳

系級：光電二乙、光電二乙、光電二甲、光電二甲

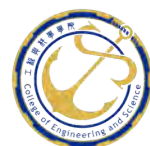
學號：D1325373、D1362921、D1325402、D1390371

開課老師：周哲仲 教授

課程名稱：科學儀器學

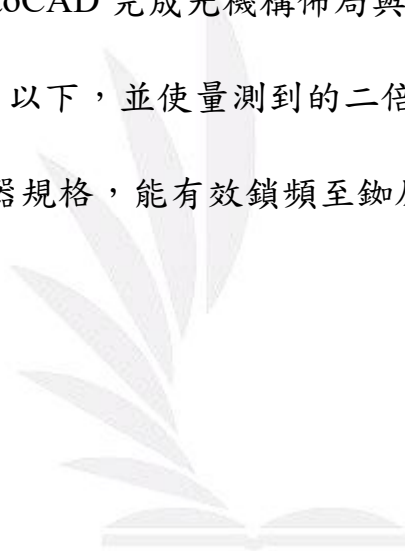
開課系所：光電科學與工程學系

開課學年：114 學年度 第 2 學期



中文摘要

本報告主要研究外腔半導體雷射(ECDL)的機構設計，旨在改善二極體雷射輸出線寬過寬與頻率不穩定之缺點。方法上採用利特羅(Littrow)架構，利用繞射光柵的一階繞射光形成外部共振腔，將約 1560 nm 的目標波長反射回二極體以加強光回授，並透過雙色分光鏡引導內二倍頻產生的 780 nm 光束注入鉀原子蒸氣室。主要結果成功利用 Shapr3D 與 AutoCAD 完成光機構佈局與光線追跡模擬，將雷射線寬壓低至 500 kHz 以下，並使量測到的二倍頻光功率達 27.80 fW，符合飛瓦級偵測器規格，能有效鎖頻至鉀原子躍遷頻率。



關鍵字：內二倍頻、外腔半導體雷射、光柵繞射、利特羅配置、鉀原子吸收

Abstract

This report focuses on the optomechanical design of an external-cavity diode laser (ECDL), aiming to overcome the broad linewidth and frequency instability of conventional diode lasers. A Littrow configuration is adopted, in which the first-order diffraction from a diffraction grating forms an external resonant cavity and reflects the target wavelength of approximately 1560 nm back into the laser diode to enhance optical feedback. A dichroic beamsplitter is then used to direct the 780 nm beam generated through intracavity second-harmonic generation into a rubidium vapor cell. The results demonstrate the successful completion of the optomechanical layout and ray-tracing simulations using Shapr3D and AutoCAD. The laser linewidth was reduced to below 500 kHz, while the measured second-harmonic power reached 27.80 fW, satisfying the specifications of a femtowatt-level photodetector. The proposed system therefore provides an effective approach for frequency locking to the transition frequency of rubidium atoms.



Keyword : External-Cavity Diode Laser (ECDL) 、 Grating Diffraction 、
Intracavity Second-Harmonic Generation (SHG) 、 Littrow Configuration 、
Rubidium Atomic Absorption

目 次

一、摘要	P.1
二、外腔半導體雷射簡介	P.1-2
三、外腔半導體雷射原理	P.2-6
四、外腔半導體雷射	P.6-13
五、結論	P.13
參考文獻	P.13-15
附錄	P.15-16



一、摘要

本報告主要研究外腔半導體雷射(ECDL)的機構設計，旨在改善二極體雷射輸出線寬過寬與頻率不穩定之缺點。方法上採用利特羅(Littrow)架構，利用繞射光柵的一階繞射光形成外部共振腔，將約 1560 nm 的目標波長反射回二極體以加強光回授，並透過雙色分光鏡引導內二倍頻產生的 780 nm 光束注入鉀原子蒸氣室。主要結果成功利用 Shapr3D 與 AutoCAD 完成光機構佈局與光線追跡模擬，將雷射線寬壓低至 500 kHz 以下，並使量測到的二倍頻光功率達 27.80 fW，符合飛瓦級偵測器規格，能有效鎖頻至鉀原子躍遷頻率。

關鍵詞：外腔半導體雷射(ECDL)、利特羅配置(Littrow configuration)、鉀原子吸收、內二倍頻、雷射二極體、光柵繞射

二、外腔半導體雷射簡介

雷射組成的要件包括激發來源、增益介質及光共振腔。激發來源主要分為光激發源和電激發源，而此專題使用的二極體雷射是使用加電流方式的電激發源，透過電的注入讓半導體中的電子與電洞複合而產生光子。共振腔則是形成雷射振盪的必要結構，主要功能是將光限制在腔內以產生共振，使光反覆經過增益介質不斷地被放大，達到臨界值時就會激發雷射，而共振的目的除了增益放大，更重要的是窄化雷射線寬[1]。然而，二極體雷射一般為低 Q 值共振腔，其輸出線寬非常寬、頻率穩定度不足，且輸出波長會隨溫度或注入電流增加而增長，並不適合用於干涉儀及光譜等需高精密度之儀器。為了改善這些缺點，我們引入外腔結構，讓雷射光在晶片外部與繞射光柵之間來回共振，藉以

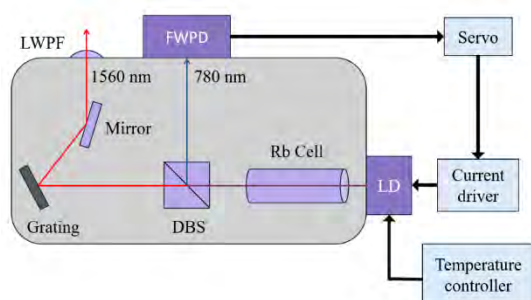
選出特定波長並加強回授。外腔的分光鏡我們選擇對特定波長具有高反射率的元件，進而對雷射輸出波長進行篩選與穩定。藉此方式，我們可以利用光學元件對波長的選擇性來設計外腔式半導體雷射(ECDL)。其特色為具備窄線寬、波長可調、高頻率穩定度與高邊模抑制比等優點[2]，特別適合用於吸收光譜、雷射冷卻、頻率鎖定與其他需要精確頻率控制的實驗。

本次外腔半導體雷射(ECDL)設計採用繞射光柵回授原理，並以 Littrow 架構建構外腔共振系統。其運作機制是利用繞射光柵的波長選擇特性，將半導體雷射輸出的多模光中約 1560 nm 的目標波長反射回二極體形成回授，使該波長在雷射內部獲得優先增益並被有效放大，而其他波長則受到抑制[3]。其次，Littrow 架構的特色在於光束以特定角度入射光柵，使第一階繞射光沿入射方向返回雷射二極體形成回授，而零階繞射光則作為輸出光，因此僅需單一光柵即可完成外腔設計，結構相對簡單，且輸出功率通常較 Littman 架構高，因為雷射只繞射一次[4]。在設計上，外腔長度的穩定性是影響雷射表現的重要因素，因為共振腔長會直接決定共振條件與輸出線寬，因此本研究需透過穩定外腔長度、加強機械固定，並降低外界振動與熱漂移的影響，以維持共振條件並縮小輸出線寬[5]。此外，腔長與鏡面反射率也會共同影響共振腔的線寬，因此在元件選擇上需搭配合適反射率的光柵與反射元件，以提升回授效率並改善雷射穩定性。另一方面，半導體雷射對光回授極為敏感，回授光強需控制在適當範圍內，若回授過強或過弱，都可能使線寬變寬或穩

定性下降[2]。最後，為了能觀測鉀原子的飽和吸收光譜並進行穩頻，ECDL 的輸出線寬必須足夠窄，至少要低於鉀原子 D_2 譜線約 6 MHz 的自然線寬；此次專題中，外腔雷射線寬可壓低至 500 kHz 以下，因此能有效鎖頻至鉀原子的躍遷頻率[6]。

三、外腔半導體雷射原理

● 架構



圖一、外腔半導體雷射架構圖

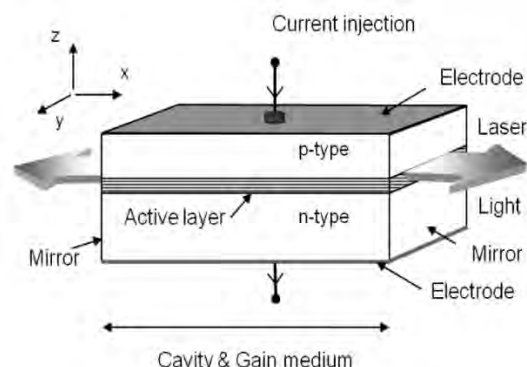
此次專題的外腔式半導體雷射架構圖如圖一所示，其中 LD 為雷射二極體，Rb Cell 為鉀原子蒸氣室，DBS 為雙色分光鏡，Grating 為光柵，LWP 為長波通過濾光鏡，FWP 為飛瓦級光偵測器，Mirror 為反光鏡。

預計透過飛瓦級光偵測器觀察鉀原子吸收內二倍頻光的吸收譜線來穩頻，且利用光柵的一階繞射光回授形成外腔，以產生穩定的外腔式半導體雷射，以下將分為雷射二極體基本原理、高斯光束原理、鉀原子吸收原理、光柵光回授原理和內二倍頻的原理來做講解。

● 雷射二極體基本原理

如圖二所示，雷射二極體是以半導體 p-n 接面作為主要結構，並在順向偏壓下注入電流，使電子與電洞在活性層中進行複合，進而產生光子。當這些光子在共振

腔中反覆反射並持續放大後，便可形成具有方向性、單色性與高相干性的雷射輸出[7]。



圖二、雷射二極體[7]

然而，雷射二極體輸出的光束通常具有較大的發散角，光束並不容易直接作為後續光學系統的輸入，因此實際使用時常需要搭配準直鏡進行光束整形。準直鏡的主要功能是將原本發散的雷射光束轉換為較平行的光束，使光束能夠更有效地傳輸與聚焦。另一方面，為了完整收集雷射二極體發出的光，所選用準直鏡的數值孔徑 (NA) 必須大於雷射二極體的發散角，否則部分光線無法被有效收集，便會降低光輸出品質與後續使用效率[8]。

● 高斯光束原理

由上述可知，我們須先計算雷射二極體的光束發散範圍（等效 NA），並挑選能包容此光束發散範圍的準直鏡後，才能接著計算準直後的光束直徑。但計算上會有個問題，就是雷射二極體的光束屬於高斯光束 (Gaussian Beam)，其光強度會由光束中心點往外指數性衰減，如圖三所示。若直接以規格書中的半高全寬 (FWHM) 全張角去做計算，除了會有無法帶入 NA 公式外，還會因為 FWHM 只描述了光強度降至 50% 的範圍，使得準直鏡無法吸收剩餘的能量。

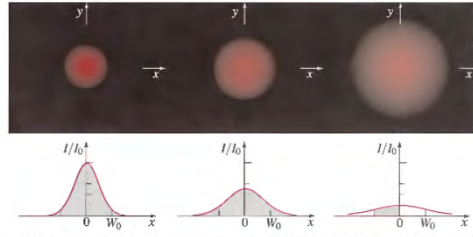


Figure 3.1-1 The normalized beam intensity I/I_0 as a function of the radial distance ρ at different axial distances: (a) $z = 0$, (b) $z = z_0$, (c) $z = 2z_0$.

圖三、高斯光束光強度分布[9]

首先，為了套用 NA 公式，需先找出規格書中的水平發散角($\theta_{\parallel}$)和垂直發散角($\theta_{\perp}$)，也就是 FWHM 的全張角，並計算其半張角為何。接著，要解決 FWHM 的邊界問題，因此我們引用參考文獻 9 的式子(3.1-12)高斯光束橫截面光強度公式[9]：

$$I(\rho, z) = I_0 \left[\frac{W_0}{W(z)} \right]^2 \exp \left[-\frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right] \quad (1)$$

其中 I_0 為軸心最大光強度， ρ 為徑向距離，而 $W(z)$ 在文獻[1]中定義為該傳播距離 z 下之光束半徑參數，但 FWHM 是指光強度下降至軸心最大值一半時($I = 0.5I_{axis}$)的橫截面全寬度。因此，我們在特定距離 z 下，將此條件帶入式(1)，並設 FWHM 的半寬度(半張角對應之距離)為 ρ_{FWHM} ，該處的軸心光強度表示為式(2)：

$$0.5I_{axis} = I_{axis} \exp \left[-\frac{2\rho_{FWHM}^2}{W^2(z)} \right] \quad (2)$$

將等式兩邊同除以 I_{axis} ，並取自然對數(ln)如式(3)：

$$\ln(0.5) = -\frac{2\rho_{FWHM}^2}{W^2(z)} \quad (3)$$

可得 $W(z)$ 如式(4)：

$$W(z) = \sqrt{\frac{2}{\ln 2}} \rho_{FWHM} \approx 1.699 \rho_{FWHM} \quad (4)$$

由此可得 $W(z)$ 約為 FWHM 半寬度的 1.7 倍。而為了驗證 $W(z)$ 的物理意義，若我們將徑向距離 ρ 設為此參數值(即令 $\rho = W(z)$)並帶回式(1)，則會發現此處的光強度為式(5)：

$$I(W(z), z) = I_{axis} \exp(-2) = I_{axis} \frac{1}{e^2} \quad (5)$$

此處若將自然常數帶入計算，則可得到 $\frac{1}{e^2} \approx \frac{1}{2.71828^2} \approx 0.1353$ 。代表此處光強度已下降到軸心最大值的 13.53% 處，也表示此範圍內的能量已有約 86.47%。所以採用 $\frac{1}{e^2}$ 的標準去計算半張角後，再代入等效 NA 的公式，如式(6)，即可得到雷射二極體的光束發散範圍。

$$NA = \sin \alpha \quad (6)$$

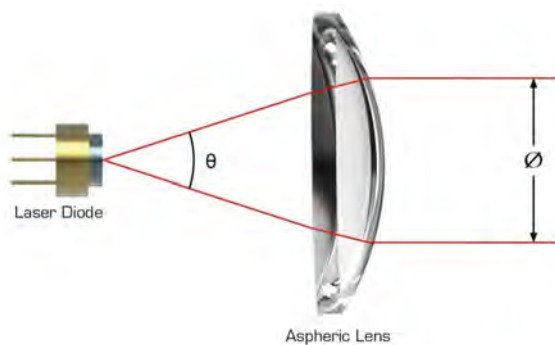
在求得雷射二極體的水平半張角($\alpha_{\parallel}$)和垂直半張角($\alpha_{\perp}$)，並算出光束發散範圍後，就可挑選合適的準直鏡，最後再計算雷射二極體光束經過準直鏡後的光束直徑(Beam Diameter)。

當雷射二極體放置於焦距 f 的準直鏡焦點上時，發散的光束會經過準直鏡並折射為平行光，其光跡圖如圖四所示[10]。光束發散至 $\frac{1}{e^2}$ 邊界之半徑可表示為 $f \times$

$\tan \alpha$ ，因此 D 為半徑乘以兩倍求得，如式(7)所示。

$$D = 2f \tan \alpha \quad (7)$$

計算後即可求得準直後光束直徑，且因為水平及垂直發散角數值有所差異，因此準直出來的光束截面應為橢圓形。



圖四、雷射二極體光束之準直光路圖[10]
(發散全張角 θ 之半張角即為式(7)中之 α ；準直後光束直徑 D 則為式(7)中之 D)

● 鉀原子吸收原理

鉀原子的吸收原理來自其離散的電子能階結構。當入射光的頻率接近鉀原子基態與激發態之間的能量差時，原子便會吸收該光子，使電子由低能階躍遷至高能階，因此在對應波長處會出現明顯的吸收訊號[11]。對於鉀原子蒸氣而言，由於原子具有熱運動，不同速度的原子會造成都卜勒展寬，使吸收譜線具有一定寬度，而非理想的單一尖峰[12]。

在實際量測中，鉀原子的 D_2 譜線因為躍遷特性明確且容易觀測，常被用來作為吸收光譜分析的參考。若雷射輸出足夠穩定，則其對應的吸收位置應維持在固定範圍內；若雷射頻率發生漂移，吸收訊號的位置與強度則可能隨之改變，因此可利

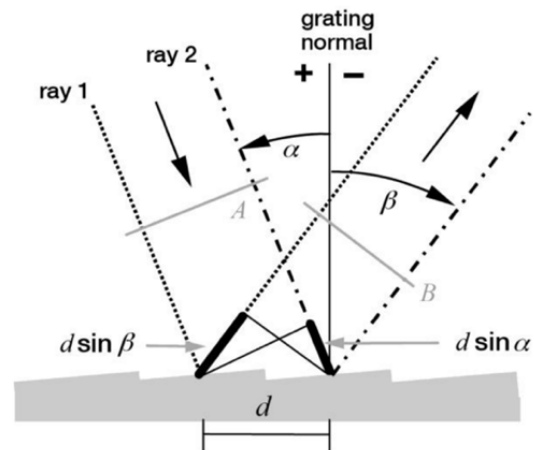
用鉀原子的吸收特徵來評估雷射輸出的穩定性。

● 光柵光回授原理

我們使用的光柵意指「繞射光柵」。繞射是光波在傳播過程中遇到狹縫時會偏離原本的直線路徑，隨後透過光波前建設性干涉，形成不同強度的干涉圖樣。繞射光柵表面具有許多微小的週期性平行刻痕，能把這些刻痕視為狹縫，當入射光射向光柵後產生不同階數的繞射光，進而達到分光或回授的效果。此專題中使用的是反射式閃耀光柵(圖五)，而式(8)為光柵公式。

$$m\lambda = d(\sin\theta_\alpha + \sin\theta_\beta) \quad (8)$$

其中 m 為繞射階數， λ 為波長， d 為光柵線距， θ_α 為入射角， θ_β 為出射角

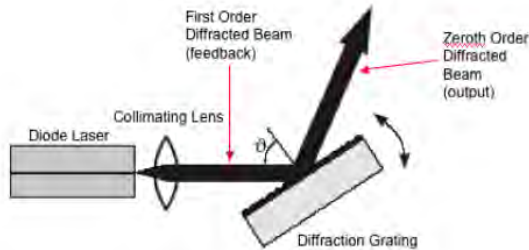


圖五、反射式閃耀光柵示意圖[13]

閃耀光柵與一般光柵不同在於其會在特定波長與特定角度產生效率高的繞射光。

除此之外，我們此專題光柵設置是利特羅配置(Littrow configuration)，如圖六、圖七，其核心原理是第一階繞射光的

繞射角會等於反射角，使光能回受至雷射二極體供共振使用；第零階繞射光以入射角等於反射角，類似反射鏡的概念使用，將光當作為輸出使用。



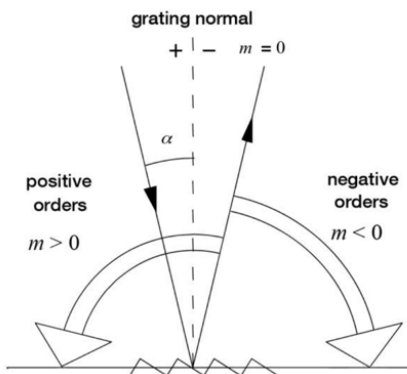
圖六、利特羅配置下的繞射光路徑
(修改自文獻[15]，並由文獻[14]加上標註)

當第一階繞射($m = 1$)時，符合利特羅配置， $\theta_\alpha = \theta_\beta = \theta$ ，將式(8)簡化成式(9)。

$$m\lambda = 2d\sin\theta \quad (9)$$

其中 m 為繞射階數， λ 為波長， d 光柵線距， θ 為入射角。

當第零階繞射($m = 0$)時，依照原本光柵方程式，代入(1)式，得到 $\theta_\alpha = -\theta_\beta$ ，符合鏡面反射。



圖七、利特羅配置繞射示意圖[13]

因此光柵的回受光如同在雷射二極體加上了一個外部的長腔體，增加共振效應。

● 內二倍頻的原理

二倍頻，是一種非線性光學效益。當基頻光通過非線性光學晶體時，會產生頻率增倍、波長減半的光波。在雷射二極體內部存在非線性光學晶體，因此雷射二極體本身存在倍頻概念，稱為內二倍頻。

對於雷射二極體的基頻光功率轉換內二倍頻光功率的轉換效率可以分成綜觀與微觀面相討論：

1. 綜觀方面：

在此專題中，我們使用 FP 雷射二極體(Fabry-Perot laser)，其內部含有 InGaAsP 元素，屬於 III-V 族半導體，因此可由文獻[16]得到此材料在雷射二極體中對於基頻光功率與內二倍頻光功率的關係式(10)、(11)。

$$P_{2\omega} = \frac{T_{2\omega}}{T_\omega} \eta P_\omega^2 \quad (10)$$

$$\eta = \frac{\mu_0 \omega^2}{n^2(\omega) n(2\omega)} d_{\text{eff}}^2 l^2 \quad (11)$$

其中 $P_{2\omega}$ 為二倍頻功率， P_ω 為基頻功率。此公式涵蓋了材料本身的有效非線性 d_{eff} 、共振腔有效作用長度 l 、與基頻與倍頻光的折射率 $n(\omega)$ 、 $n(2\omega)$ ，與鏡面透射率 T_ω 、 $T_{2\omega}$ ，是一個非常理想的關係式。

但由於我們缺少共振腔有效作用長度與鏡面透射率的數據，無法計算出確切數值，因此我們為了克服現況，並評估實驗架構下的實際倍頻行為，我們引用了一個雷射二極體自發二倍頻的經驗關係式，並以微觀方面討論。

2. 微觀方面：

在文獻[17]的實際測量中，基頻雷射功率(P_f)和自發二倍頻功率(P_{ish})呈現平方正比關係，且其比例常數落在 $2.0 \times 10^{-8} W^{-1}$ 左右。而在文獻[17]的實驗架構下，式(12)在基頻雷射功率 $P = 10 \text{ mW}$ 時，可得到最大二倍頻功率 $P = 2 \text{ pW}$ 。但因為我們在後續的計算會以 1 mW 總輸出功率去回推計算，因此所計算出的自發二倍頻功率仍會有誤差。其中式(12)中的 P_f 為式(10)中的基頻功率 P_ω ，式(12)中的 P_{ish} 則為式(10)中的二倍頻功率 $P_{2\omega}$ 。

$$P_{ish} = (2.0 \times 10^{-8} W^{-1}) P_f^2 \quad (12)$$

而文獻[17]跟我們的實驗架構主要的核心差異在於：

- (1) 雷射選用差異：文獻所使用的是 $1.5 \mu\text{m}$ 的分佈反饋式(DFB)雷射，本實驗則是選用法布里-佩羅(Fabry-Perot, FP)腔的雷射二極體，其光譜能量的分散會微幅影響倍頻轉換效率及光譜純度，而其餘晶體結構及摻雜濃度等也會有所影響。
- (2) 實驗架構擺設：我們實驗架構有別於文獻中的光路徑，且在通過元件上也會有損耗的不同，因此在功率的計算上也需考量這些因素。

由此可知，式(12)在本實驗中扮演了趨勢參考的角色。

四、外腔半導體雷射

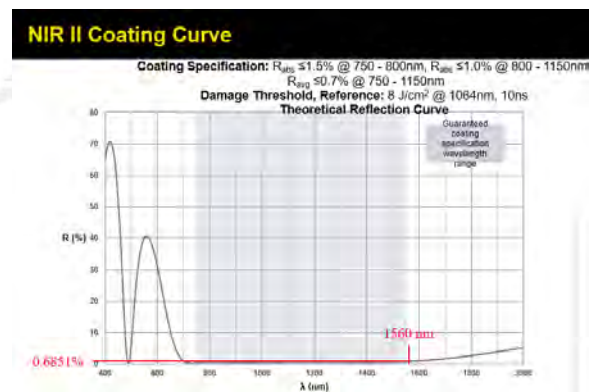
● 元件的選用

首先，本專題的雷射二極體選用的是 Thorlabs 的 ML925B45F，其中央波長為 1550 nm 接近我們設計的基頻光 1560 nm 。同時，其為單橫模分佈，能讓雷射

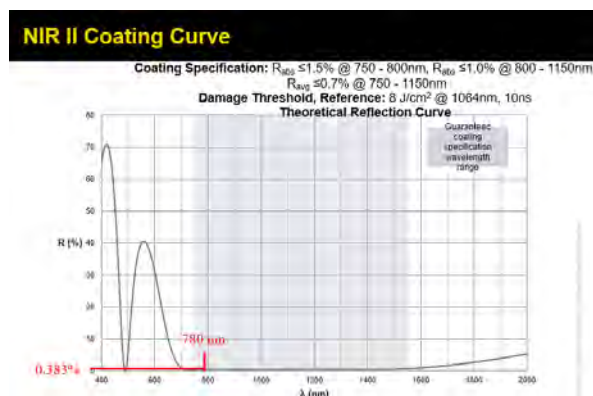
二極體的光斑集中且能量密度較高。而在規格上其外徑為 5.6 mm ，封裝型態則是 D Pin Code。

雷射座的選用則是 Thorlabs 的 LDM56/M，其雷射外徑要求符合 5.6 mm 且螺孔為公制規格，更符合一般實驗室的架設；在封裝型態上，其也符合 D Pin Code 的管腳配置。此雷射座還內建了制冷機制，能避免雷射二極體因溫度升高而導致輸出波長偏移過多，進而影響鎖頻效果。另外，雷射座上面還有一個轉接環的鎖孔，其尺寸為 SM1。

準直鏡方面，我們選用的是 Edmund 的 #67-439 裸鏡，其焦距為 3.0 mm 、 $\text{NA} = 0.50$ ，且上面的 NIR II 鍍膜也能讓我們的雷射光穿透。而焦距會選擇 3.0 mm 是因為我們想將光束直徑控制在適當的大小，除了能夠集中能量，同時避免光束過大而不好對準。其中， 1560 nm 和 780 nm 雷射光的玻璃穿透率皆約為 99.5% ，而鍍膜的反射率則為圖八、九[18]。



圖八、準直裸鏡鍍膜穿透率(1560 nm)[18]



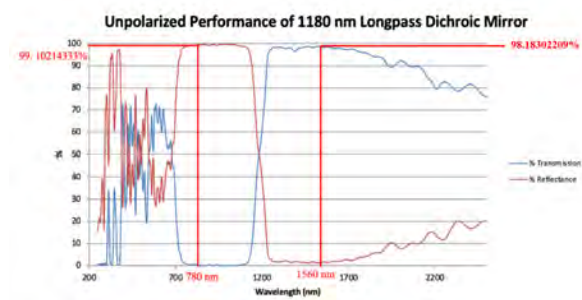
圖九、準直裸鏡鍍膜反射率(780 nm)[18]

在規格方面，由於準直裸鏡外徑只 3 mm，因此我們的準直鏡轉接環會分為三個部分。一是固定裸鏡的 Thorlabs 的 LMRA3 裸鏡轉接環，其內徑為 3 mm，而外徑為 $\varnothing$ 12.7 mm ($\varnothing$ 0.50 in)。二是為了讓 LMRA3 能符合轉節環鎖孔(SM1)而找的增徑轉接環，是 Thorlabs 的 SM05P05，其內徑為 12.8 mm($\varnothing$ 0.50 in)，外徑為 SM05。三是為了讓上述元件能跟雷射座整合的 SM05 轉 SM1 增徑轉接環，為 Thorlabs 的 SM1A6，其內徑為 SM05，外徑為 SM1。

銦原子蒸氣室選用的是 Thorlabs 的 GC19075-RB，其尺寸為 $\varnothing$ 19 mm x 75 mm，它的優點是在特定波長（780 nm 的 D2 線）擁有銳利且絕對穩定的吸收光譜，實現極高精度的雷射穩頻與波長校準。另外，它的材質是紫外熔融石英，在極寬的光譜範圍內（特別是紫外光到近紅外光）具備卓越的穿透率。

雙色分光鏡(DBS)選用的是 Thorlabs 的 DMLP1180T，因為我們的光束直徑為 2.86 mm × 2.33 mm，所以選用大小為 $\varnothing$ 1/2（直徑大約 12.7 mm）的分光鏡，且反射角為 45°反射出去，大小比較合適且

不會佔空間也不會增加成本。其次，此片 DBS 的截止波長是 1180 nm，符合我們 1560 nm 的波長要穿透、780 nm 反射，並且如圖十[19]所示，在 780 nm 時的反射率高達 99.10214333%，在 1560 nm 時的穿透率高達 98.18302209%，數據非常好而價格也相較其他 DBS 便宜，性價比很高。



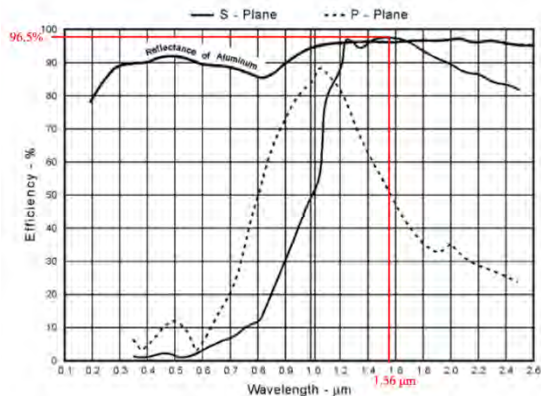
圖十、雙色分光鏡於 780 nm 與 1560 nm 之反射率與透射率[19]

其中，為了使穿透光及反射光不被鏡架擋住，我們使用 Thorlabs 的 KM05FR/M，它是後裝式右手透明象限鏡支架，這樣就不會有光線被鏡架擋住的問題。

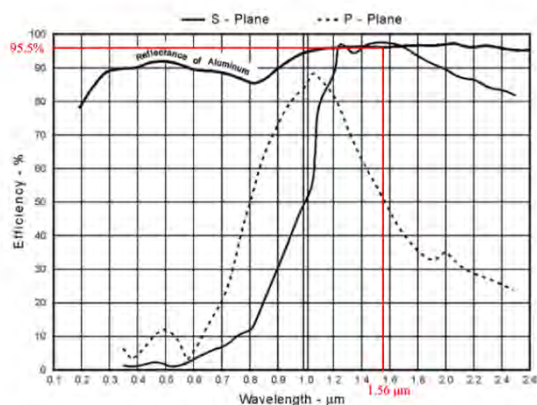
飛瓦級光偵測器選用 Newport 2151，它的光譜響應範圍：320 nm - 1050 nm，從分光鏡反射過來的 780 nm 反射光剛好在響應範圍內。此外，其內部整合極高增益的轉阻放大器，能夠精準解析出飛瓦 (10^{-15} W) 等級的超微弱光訊號。

光柵選自 Newport 的 33009FL01-560R，規格為 $12.5 \times 12.5 \times 6$ mm³，每毫米刻線數為 600，目的是讓光柵在 1560 nm 入射光能達到高效率。由此光柵的規格表可知在波長 1560 nm 時效率高達 96%，如圖十一、十二[20]所示。光柵鏡架選自 Newport 的 DGF-12，背後轉接頭

是直徑 12.7 mm 的圓，可置於光柵鏡架，規格為可扣住 $12.5 \times 12.5 \times 6 \text{ mm}^3$ 的光學元件，剛好符合我們的光柵規格。鏡架選自 Thorlabs 的 KS05/M，規格為適用直徑 12.7 mm 的光學元件，適用於我們的光柵鏡架。

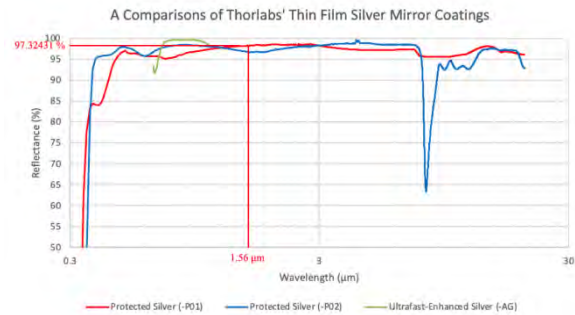


圖十一、光柵波長-相對效率圖[20]



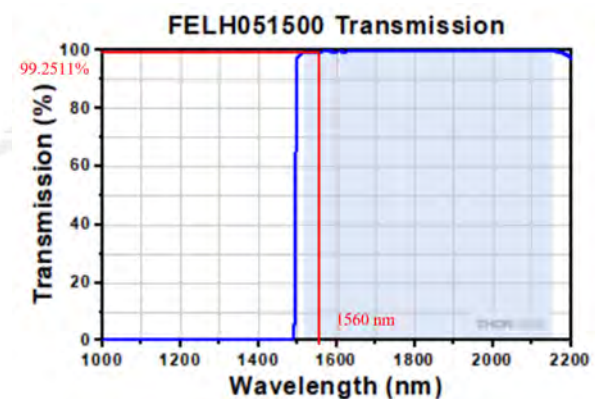
圖十二、光柵之鋁膜波長-標準效率圖[20]

反射鏡選自 Thorlabs 的 PF05-03-P01，規格為半徑 12.7 mm，在 450 nm - 2 μm 有高達 97% 的反射率，如圖十三 [21] 所示，符合我們入射波長 1.56 μm 有很好的反射。



圖十三、反射鏡反射率[21]

長波通過濾光鏡(LWPF)選用的是 Thorlabs 的 FELH051500，為了統一大小跟配合我們的光束直徑，所以選用大小為 $\varnothing 12.5 \text{ mm}$ 的 LWPF。如圖十四 [22]，他的截止波長為 1500 nm，在 1560 nm 時的穿透率高達 99.25111%，而在可見光波段的平均穿透率為 10^{-4} nm。雖然 LWPF 的其中一個功能是防止可見光穿透回來，理論上不需要用到截止波長為 1500 nm 的濾光鏡，但這片 LWPF 比其他濾光鏡能濾掉更多我們不需要的光，價格也沒有比較貴，所以選用這片很適合我們的架構。



圖十四、長波通過濾光鏡穿透率[22]

最後鏡架柱的部分，為了方便能調節並統一透鏡的中心高度，我們皆選用 Thorlabs 的 TR50/M 光學柱及 PH50/M 的柱形支架。光學柱頂部的螺紋規格為 M4，皆可銜接到我們的鏡架上。且其總

伸縮範圍為 50 mm 到 90 mm 之間，可配合我們的雷射高度(82.72 mm)，使雷射通過各個元件的中心點。

● 規格說明

1. 元件規格

我們將所使用的元件整理成表一與表二，如下表。

<表一>選用元件之規格表

名稱	重要規格	適用波長
雷射二極體	5 mW、 Ø 5.6 mm	1550 nm
雷射座	103.4 × 101.6 × 52.6 mm ³ 、 Ø 5.6 mm	
準直裸鏡	Ø 3.0 mm	鍍膜：750 – 1550 nm
準直裸鏡轉接環	內徑：3 mm、 外徑：Ø 12.7 mm (Ø 0.50 in)	
增徑轉接環	內徑：12.8 mm (Ø 0.50 in)、 外徑：SM05	
SM05 轉 SM1 增徑轉接環	外徑：SM1、 內徑：SM05	
鈷原子 蒸氣室	Ø 19 mm × 75 mm	
鈷原子 蒸氣室 架	底螺紋孔：M4	
雙色分 光鏡	Ø 12.7 mm	穿透波長範圍：1260 – 1700 nm 反射波長範圍：750 – 1100 nm

分光鏡架	適用元件大小： Ø 12.7 mm、 螺紋孔：M4	
光柵	25 × 25 × 6 mm ³ 、 每毫米刻線數： 600	
光柵架	適用元件大小： 12.5 × 12.5 × 6 mm ³ 、 轉接頭：Ø 12.7 mm	
光柵/ 反射鏡 鏡架	適用元件大小： Ø 12.7 mm、 螺紋孔：M4	
反射鏡	Ø 12.7 mm × 6 mm	> 97% for 450 nm – 2 µm
飛瓦級 光偵測 器	83.8 × 55.9 × 35.6 mm ³	300 – 1050 nm
長波通 過濾光 鏡	Ø 12.5 mm × 3.5 mm	穿透波長範圍：1518 – 2150 nm 反射波長範圍：200 – 1482 nm
光學柱	高度：50 mm、 頂部螺紋： M4、底部螺紋 孔：M6	
柱形支 架	高度：50 mm、 底部螺紋孔： M6	
鋁金屬 成型機 盒	約為 30.5 × 17.8 × 15.2 cm ³ (12 in × 7 in × 6	

	in)	
--	-----	--

<表二>選用元件之穿透率/反射率規格表

編號 (i)	名稱	穿透率 (T_i)	反射率 (R_i)
1	準直鏡 (780 nm)	99.854 044445 %	0.1459555 55%
2	準直鏡 (1560 nm)	99.532 984800 05%	0.4670151 9995%
3	鈷原子蒸氣 室	93.619 79%	
4	雙色分光鏡 (780 nm)		99. 10214333 %
5	雙色分光鏡 (1560 nm)	98.183 02209 %	
6	光柵	絕對效率 E: 92.1575%	
7	反射鏡		97.32431 %
8	長波通過濾 光鏡	99.2511 %	

表中 T_i 表示第 i 個元件之穿透率； R_i 表示第 i 個元件之反射率； i 為元件編號；光柵效率為 E 。

2. 光束直徑計算：

首先，我們先計算雷射二極體的光束發散範圍(等效 NA)，從規格書上可得發散全張角為 $\theta_{\parallel} = 25^\circ$ 、 $\theta_{\perp} = 30^\circ$ ，進而推得其半張角為 $\theta_{\parallel, \text{半張角}} = 12.5^\circ$ 、

$$\theta_{\perp, \text{半張角}} = 15^\circ。$$

但因為光強度呈高斯分佈，因此我們

以 $\frac{1}{e^2}$ 的標準去計算半張角後，可得 $\alpha_{\parallel} =$

21.25° 、 $\alpha_{\perp} = 25.5^\circ$ 。接著再代入式(6)，就可得到等效 $NA(\parallel) \approx 0.36$ 、等效 $NA(\perp) \approx 0.43$ 。所以在挑選準直鏡時，我們也挑選了 NA 大於雷射等效 NA 的準直鏡，讓光能被吸收更完全。

再來是準直後的光束直徑，由準直鏡的焦距 3.0 mm 和上述所計算出的半張角，代入式(7)，可得 $D_{\parallel} \approx 2.33$ mm、 $D_{\perp} \approx 2.86$ mm，因此我們的光束是直徑 2.86 mm $\times$ 2.33 mm 的橢圓形平行光束。

3. 光柵計算：

為了能讓 1560 nm 入射光的第一階繞射光循原入射路徑回授至二極體雷射、第零階繞射光以約 90° 角出射至長波通過濾光鏡。因此將我們選用的光柵規格帶入式(8)，確認第零階繞射光的出射角度。當第零階繞射時， $\theta \approx 27.9^\circ$ ， $2\theta \approx 55.8^\circ$ ，經過計算發現與目標 90° 角有落差，所以我們多設置一個反光鏡，將第零階繞射光導正，一樣能實現以 90° 角出射。詳細的光軌跡追蹤從 AutoCAD 表示。

4. 雷射腔內的光功率大小：

由我們的外腔半導體雷射架構可知光軌跡路徑由雷射二極體發出入射光束，隨後依序經過準直鏡、鈷原子蒸氣室、分光鏡、光柵與反射鏡，最後射向長波通過濾光鏡輸出。為考慮光的偏振方向，以輸出 1 mW 雷射功率為例時，計算雷射腔內的光功率大小。因此將輸出功率從長波通過濾光鏡回推至準直鏡，得到基頻功率，參考表二。

$$1 \text{ mW} =$$

$$P_{\omega} T_2 T_3 T_5 E T_7 T_8 \\ \Rightarrow P_{\omega} = 1.227839404 \text{ mW}$$

經過計算得到雷射腔內的基頻光功率為 1.227839404 mW。損耗功率為 0.227839404 mW，損耗率約為 18.56%。

5. 內二倍頻光功率轉換

經過計算後，得知基頻功率為 1.231597617 mW，計算雷射二極體產生的內二倍頻功率，將基頻功率帶入式(3)

$$P_{ish} \\ = 2.0 \times 10^{-8} (1.227839404 \times 10^{-3})^2 \text{ W} \\ = 30.15179204 \text{ fW}$$

得到二倍頻功率為 30.15179204 fW。

6. 飛瓦級偵測器偵測到的二倍頻功率

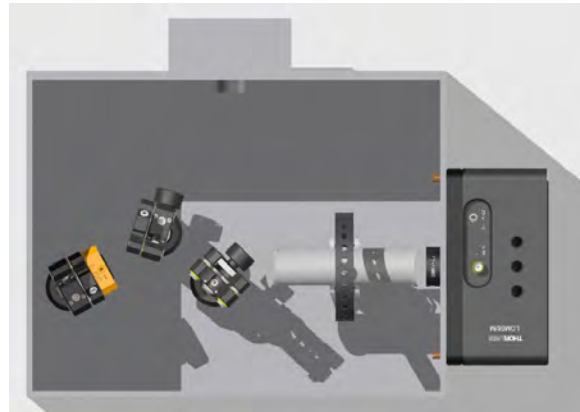
已知二倍頻功率為 30.15179204 fW，隨後二倍頻光會依序經過準直鏡、鉀原子蒸氣室與分光鏡，最後射入偵測器內，參考表二。因此偵測器所偵測到的二倍頻功率光為

$$(30.15179204 \text{ fW}) T_1 T_3 T_4 \\ = 27.80331026 \text{ fW}$$

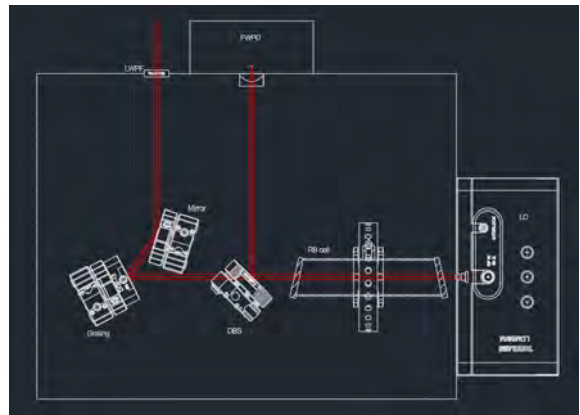
經過計算，偵測器獲得的二倍頻功率約為 27.80331026 fW，量級是飛瓦等級，符合我們選用飛瓦級偵測器。

● 光機構設計

我們使用 Shapr3D 進行外腔式二極體雷射的佈局，如圖十五。另外，使用 AutoCAD 進行光線追跡模擬雷射光在此架構的路徑，如圖十六。

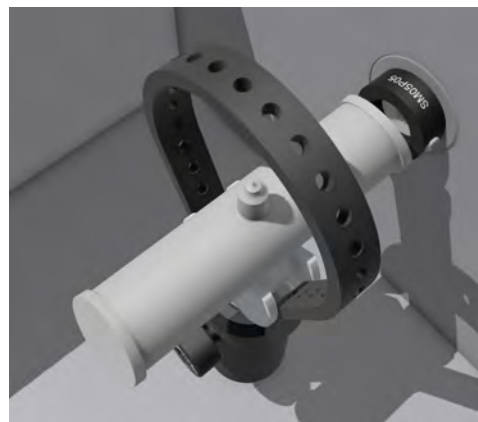


圖十五、設計架構 3D 俯視圖



圖十六、設計架構 2D 俯視圖

光學柱和接桿皆選取 50 mm，高度調到最低再加上鉀原子蒸氣室、蒸氣室架的高度，最後光線中心高度定為 82.72 mm，並且所有的元件接須配合此高度，如圖十七。



圖十七、鉀原子蒸氣室及蒸氣室架
我們將雷射座放在機殼的外面，並用

螺絲固定在機殼上，並將雷射二極體、準直鏡、準直鏡轉接環固定於雷射座上方，雷射座的固定方式為使用座上原有的螺絲孔與機殼開孔對鎖固定，但須配合鈷原子蒸氣室高度，我們設計機殼的螺絲孔位，使雷射座中心的高度剛好能固定在選定的 82.72 mm，並在機殼上開孔使準直鏡轉接環、螺絲能通過機殼，如圖十八。



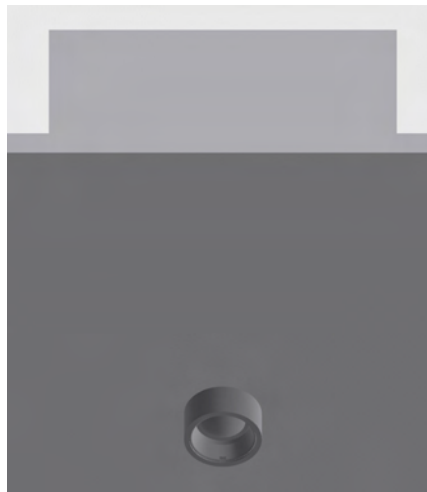
圖十八、雷射座

將雙色分光鏡以 45° 擺放，並在底下加上光學桿以配合雷射高度，此時分光鏡會將 780 nm 的光反射並打入飛瓦級光偵測器，而 1560 nm 的光將會穿透並射向光柵，如圖十九。



圖十九、分光鏡

我們將機殼挖出一個與飛瓦級光測器大小相同的凹槽，使飛瓦級光偵測器嵌在機殼上，並在飛瓦級光偵測器的前方放置一個聚焦鏡，當 780 nm 的光以 90° 反射至飛瓦級光偵測器時，使 780 nm 的光可以被偵測到，如圖二十、圖二十一。



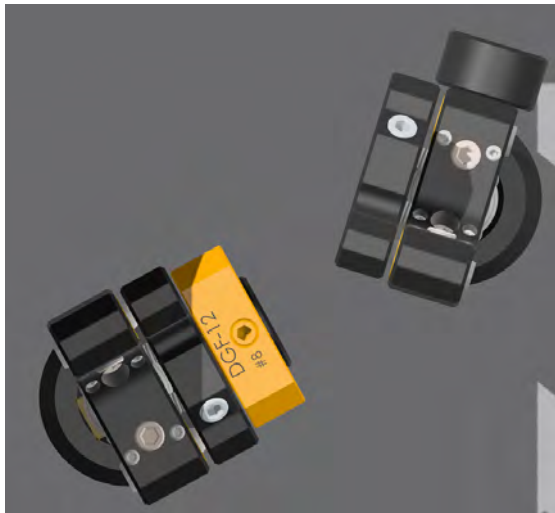
圖二十、聚焦鏡和飛瓦級光偵測器



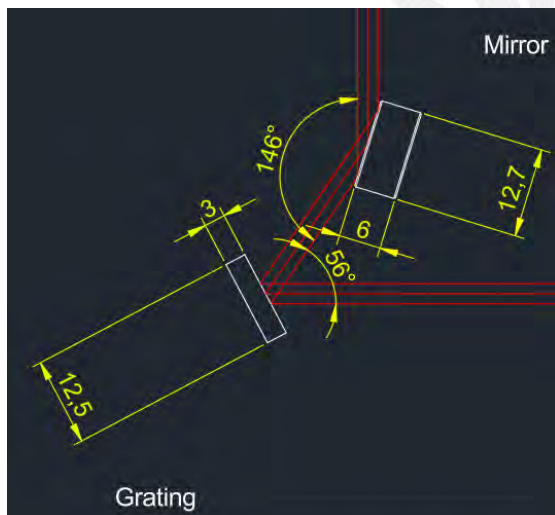
圖二十一、分光鏡和飛瓦級光偵測器

為確保水平入射光最終能垂直出射，此系統之光路設定需經兩階段計算與調整。首先，將底部光柵之入射角設定為 27.9° ，使光線經反射後產生 55.8° 之仰角並射向反射鏡。接著，為使該光線轉向至

90°垂直出射，其行進方向需改變 34.2°，由此可推導出入射光與反射光之內夾角為 145.8°。依據反射定律，法線平分此夾角即可求得上方反射鏡之精確入射角應為 72.9°。綜合上述推導，需將反射鏡以垂直線為基準傾斜 17.1°，如圖二十二、圖二十三。



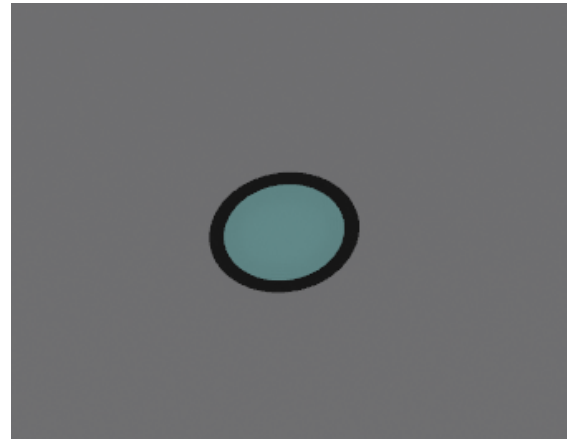
圖二十二、光柵和反射鏡



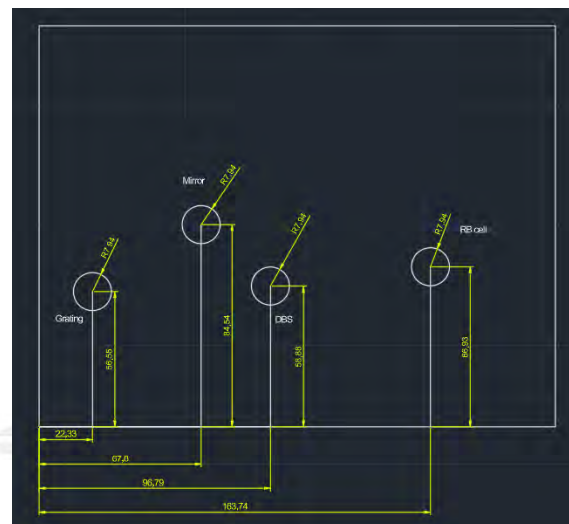
圖二十三、光柵和反射鏡光線模擬

最後我們需要在反射光打到機盒的位置開一個孔洞，使 1560 nm 的光能通過長波通過濾光鏡，長波通過濾光鏡的固定方式採直接在機殼開孔，鑲嵌在機殼上，如圖二十四。而為了能夠發包請機械工廠

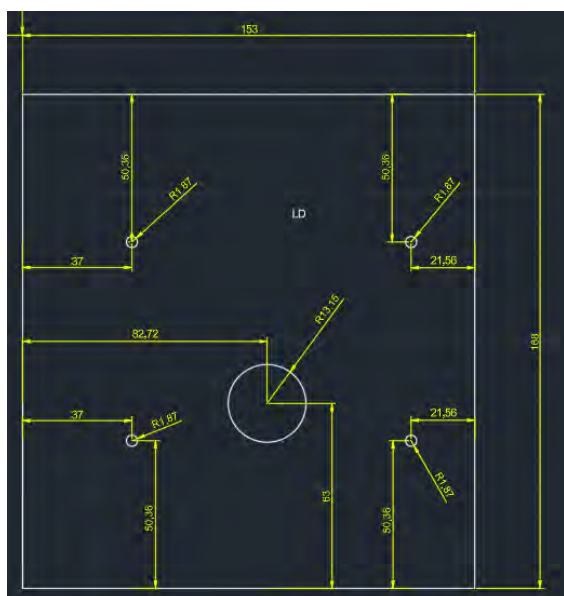
施作機盒，精確的尺寸圖如圖二十五的機殼底部開孔圖、圖二十六的右側雷射座開孔圖、圖二十七的前側長波通過濾光鏡與聚焦鏡開孔圖。



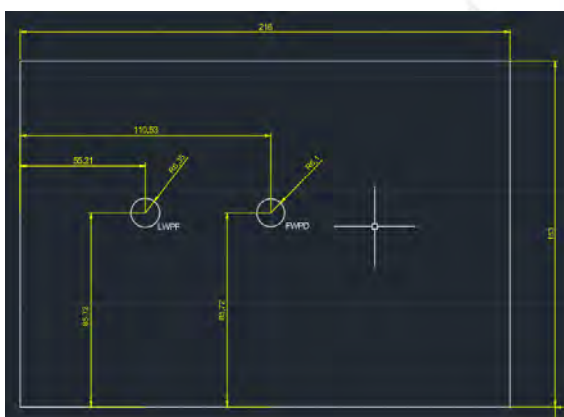
圖二十四、長波通過濾光鏡



圖二十五、機殼底部開孔位置



圖二十六、雷射座開孔位置



圖二十七、長波通過濾光鏡、聚焦鏡開孔位置

五、結論

本專題成功完成了利特羅配置的外腔半導體雷射機構設計與光路模擬。在元件規格方面，系統選用中央波長 1550 nm 的雷射二極體作為增益介質，經焦距 3.0 mm、NA 0.50 的準直鏡整形後，輸出 2.86 mm 乘以 2.33 mm 的橢圓形平行光束。利用每毫米 600 條刻線的反射式閃耀光柵進行波長篩選與光回授，成功將雷射輸出線寬壓低至 500 kHz 以下。此外，系統透過雙色分光鏡引導內二倍頻產生的 780 nm 光束注入鉀原子蒸氣室，經模擬

計算，飛瓦級偵測器端可獲得約 27.80 fW 的二倍頻光功率，完全符合設計預期。

在預算方面，本專題主要硬體花費集中於精密光學元件與機雕結構，核心元件包含雷射二極體與具備溫控定位的雷射座、裸鏡與各式增徑轉接環、雙色分光鏡、繞射光柵與專用鏡架，以及長波通過濾光鏡，搭配精密微調鏡架與光學柱架，並加計客製化鋁金屬成型機盒的加工費用，整體專題所需預算估計約在 4137.89 USD。

關於未來的改進想法，首先是目前機構僅依靠機殼與常規鏡架進行機械固定，易受外界震動與熱漂移影響，未來可於光柵機構中加入壓電致動器與鎖相迴路回授電路，將譜線解調為微分訊號以主動補償腔長變化，達到更長效且精準的絕對穩頻。其次是在光束整形優化上，雖然目前橢圓形光束已能有效運作，但若加入變形稜鏡組將橢圓光斑整形為對稱的圓形高斯光束，將可進一步提升光柵的繞射效率與鉀原子蒸氣室的相互作用均勻度。

誌謝

本次專題得以順利完成，首先要感謝周哲仲教授在研究架構方向與報告撰寫上給予的悉心指導與耐心協助，使我們在專題進行過程中能夠逐步釐清問題、修正方向，並順利完成報告內容。也感謝老師在課上教導我們如何使用 AutoCAD 和 Shapr3D 繪製我們所需要的平面/立體圖。同時，感謝曾經在進度報告中提供資料、文獻或其他想法的同學，讓我們在研究過程中能夠獲得更多不同面向的觀點，進一步完善專題內容。最後，也感謝組員

們在整個研究與製作過程中的互相配合與共同努力。從資料蒐集、文獻整理、原理研究到報告撰寫，大家都能主動分工、互相支援，遇到問題時也一起討論、一起解決。正因為有每位組員的投入與負責，才能讓本次專題順利完成，並呈現出完整的成果。謹以此文向所有曾經協助本專題完成的人員致上最誠摯的謝意。

參考文獻

1. 陳麗偉, "可調式窄線寬外腔半導體雷射穩定度之比較與探討," 碩士論文, 機電整合研究所, 國立臺北科技大學, 台北, 2014.
2. K. S. Hardman, S. Bennetts, J. E. Debs, C. C. N. Kuhn, G. D. McDonald, and N. Robins, "Construction and characterization of external cavity diode lasers for atomic physics," *J. Vis. Exp.*, no. 86, p. 51184, Apr. 2014.
3. B. Mrozievicz, "External cavity wavelength tunable semiconductor lasers - A review," *Opto-Electron. Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 347-366, Sep. 2008.
4. S. Dutta, D. S. Elliott, and Y. P. Chen, "Mode-hop-free tuning over 135 GHz of external cavity diode lasers without anti-reflection coating," *Appl. Phys. B*, vol. 106, no. 3, pp. 629-633, Mar. 2012.
5. S. D. Saliba and R. E. Scholten, "Linewidths below 100 kHz with external cavity diode lasers," *Appl. Opt.*, vol. 48, no. 36, pp. 6961-6966, Dec. 2009.
6. D. A. Steck, "Rubidium 85 D Line Data." [Online].
7. P. W. Epperlein, *Semiconductor Laser Engineering, Reliability and Diagnostics: A Practical Approach to High Power and Single Mode Devices*. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2013, doi: 10.1002/9781118481882.
8. A. Wang, "Analysis of external cavity diode lasers," *Infrared Phys. Technol.*, vol. 102, pp. 103-110, Oct. 2019.
9. B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2007, ch. 3, sec. 3.1, pp. 77-78.
10. Hyperion Optics, "Collimating Lenses Assembly & Design," *Hyperion Optics*. [Online]. Available: <https://www.hypoptics.com/lens-assembly/collimating-lenses.html>. [Accessed: Jun. 20, 2026].
11. J. I. Ciampini, "Design of a Littrow-configuration external cavity diode laser," in *Semiconductor Lasers and Laser Dynamics IV*, vol. 7720, p. 77200L, May 2010.
12. X. M. Wang, "Simulation and optimization of external cavity semiconductor lasers," *Infrared Phys. Technol.*, vol. 97, pp. 112-118, Mar. 2019.
13. C. Palmer and E. Loewen, *Diffraction Grating Handbook*, 6th ed. Rochester, NY, USA: Newport Corporation, 2005, ch. 2.
14. J. I. Ciampini, "Design and Characterization of a Littrow Configuration External Cavity Diode Laser," Technical Report, Department of Physics, University of Colorado, Boulder, CO, USA, 2010.
15. O. I. Permyakova, A. V. Yakovlev, and P. L. Chapovsky, "Simple external cavity diode laser," *Laser Phys.*, vol. 14, no. 11, pp. 1424-1426, 2004.
16. F. Zernike and J. E. Midwinter, *Applied Non-linear Optics*. New York, NY, USA:

Wiley, 1972.

17. M. Ohtsu and E. Ikegami, "Frequency stabilisation of 1.5 μm DFB laser using internal second harmonic generation and atomic 87 Rb line," *Electron. Lett.*, vol. 25, no. 1, pp. 22-23, Jan. 1989.

18. Edmund Optics, "3.0mm Dia. x 3.0mm FL, NIR-II Coated, Plano-Convex Lens," *Edmund Optics*. [Online]. Available:<https://www.edmundoptics.com.tw/p/30mm-dia-x-30mm-fl-nir-ii-coated-plano-convex-lens/21900/>. [Accessed: Jul. 13, 2026].

19. Thorlabs, "DMLP1180T, $\varnothing 1/2$ " Longpass Dichroic Mirror, 1180 nm Cut-On," *Thorlabs*. [Online]. Available:<https://www.thorlabs.com/zh/item/DMLP1180T?aID=9d844e00235b890d22a512fcc17d3e79&aC=1>. [Accessed: Jul. 13, 2026].

20. Newport, "Ruled Reflection Grating, 25 x 25 mm, 1200 nm, 22° Blaze, 600 g/mm" *Newport*. [Online]. Available:<https://www.newport.com/p/33009FL01-560R>. [Accessed: Jul. 13, 2026].

21. Thorlabs, "PF05-03-P01, $\varnothing 1/2$ " Protected Silver Mirror" *Thorlabs*. [Online]. Available: <https://www.thorlabs.com/zh/item/PF05-03-P01?aID=41c210930e00a04febe2b6dc738fa7c6&aC=1>. [Accessed: Jul. 13, 2026].

22. Thorlabs, "FELH051500, $\varnothing 12.5$ mm Longpass Filter, Cut-On Wavelength: 1500 nm," *Thorlabs*. [Online]. Available:<https://www.thorlabs.com/zh/item/FELH051500?aID=13d4e11c993ca64cf55ce493e4701eb2&aC=1>. [Accessed: Jul. 13, 2026].

附錄

<附錄一>選用元件之價格表

名稱	廠商	型號	數量	價格 (美金)
雷射二極體	Thorlabs	ML925B45F	1	61.64
雷射座	Thorlabs	LDM56/M	1	810
準直鏡	Edmund	編號 #67-439	1	73.50
準直裸鏡轉接環	Thorlabs	LMRA3	1	28.44
增徑轉接環	Thorlabs	SM05P05	1	24.65
S M 0 5 轉 S M 1	Thorlabs	SM1A6	1	24.42

增 徑 轉 接 環				
鉀 原 子 蒸 氣 室	Thorlabs	GC19075-RB	1	781. 55
鉀 原 子 蒸 氣 室 架	Thorlabs	VBC1/M	1	56.7 5
雙 色 分 光 鏡	Thorlabs	DMLP1180T	1	169. 06
分 光 鏡 架	Thorlabs	KM05FR/M	1	73.7 2
光 柵	Newport	33009FL01- 560R	1	未知 (參 考 Thor labs GR2 5- 0613 價 錢) 137.

				27
光 柵 鏡 架	Newport	DGF-12	1	48
光 柵 / 反 射 鏡 鏡 架	Thorlabs	KS05/M	2	90.0 4
反 射 鏡	Thorlabs	PF05-03-P01	1	36.8 9
飛 瓦 級 光 偵 測 器	Newport	2151	1	1356
長 波 通 過 濾 光 鏡	Thorlabs	FELH051500	1	141. 39
光 學 柱	Thorlabs	TR50/M	4	6.31
柱 形 支 架	Thorlabs	PH50/M	4	9.58
鋁	自行繪	參考型號：	1	70.9

金屬成型機盒	製	CU-1124 (貿澤電子)		7
總價	4137.89 USD			



