

國防科技學術合作研究計畫成果報告

鑄雷射測距定位儀能量及光束測試調校及更換研究

(計畫名稱)

計畫編號：NSC 94-2623-7-216-001

執行期間：94年1月1日至94年12月31日

計畫主持人：陳振文 助理教授

共同主持人：蘇重光 中校技術室主任

康慶順 上尉光電所代所長

執行單位：中華大學 機械系暨機械航太工程研究所

中華民國 九十五年 一月 一日

國防科技學術合作計畫研發成果資料表

日期：95年3月1日

計畫名稱：鑄雷射測距定位儀能量及光束測試調校及更換研究							
計畫主持人：陳振文 助理教授							
計畫編號：NSC 94-2623-7-216-001							
論文	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%; text-align: center; vertical-align: middle;">期刊</td> <td style="padding: 5px;">Optics and Laser Technology，國際 SCI 期刊； 94年12月27日投稿，審稿中。</td> </tr> <tr> <td style="width: 15%; text-align: center; vertical-align: middle;">研討會</td> <td style="padding: 5px;">2005年國防科技學術研討會論文刊登發表及講演研討。</td> </tr> </table>	期刊	Optics and Laser Technology，國際 SCI 期刊； 94年12月27日投稿，審稿中。	研討會	2005年國防科技學術研討會論文刊登發表及講演研討。		
期刊	Optics and Laser Technology，國際 SCI 期刊； 94年12月27日投稿，審稿中。						
研討會	2005年國防科技學術研討會論文刊登發表及講演研討。						
技術報告	雷射測距追蹤導引儀，雷射測距追蹤導引儀技術，雷射測距追蹤導引儀維修技術。						
專利	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%; text-align: center; vertical-align: middle;">申請</td> <td style="padding: 5px;">商用高精度中長距離雷射測距技術專利準備申請中。</td> </tr> <tr> <td style="width: 15%; text-align: center; vertical-align: middle;">獲得</td> <td style="padding: 5px;"></td> </tr> <tr> <td style="width: 15%; text-align: center; vertical-align: middle;">應用</td> <td style="padding: 5px;">可應用於土木、建築、裝潢、休閒等雷射測距使用。</td> </tr> </table>	申請	商用高精度中長距離雷射測距技術專利準備申請中。	獲得		應用	可應用於土木、建築、裝潢、休閒等雷射測距使用。
申請	商用高精度中長距離雷射測距技術專利準備申請中。						
獲得							
應用	可應用於土木、建築、裝潢、休閒等雷射測距使用。						
與軍方研發機構互動之具體研發成果	<ol style="list-style-type: none"> 1. 協助軍方維修單位，進行五級維修工作。 2. 協助軍方維修單位，獲得五級維修工作知識、技術及標準步驟。 3. 協助軍方維修單位，獲得五級維修工作額外自製儀器設備。 						
可推廣於民間產業之技術或可開發之產品	<ol style="list-style-type: none"> 1. 協助民間產業，獲得雷射驅動儀器設計能力及開發產品。 2. 協助民間產業，獲得自製雷射量測儀器設計能力及開發產品。 3. 協助民間產業，建立自製雷射測距儀能力及開發產品。 						
可推廣之產業別 (如無限通訊、微機電等)或可能技轉之廠商	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可推廣的民間產業為電子、光電、雷射等產業界及廠商。 2. 可能技轉廠商有，雷射標示廠商，提昇技術生產雷射測距儀。 3. 可能技轉廠商有，光電機械廠商，提昇技術生產雷射測距儀。 						

本表若不敷使用，請自行影印使用。

中、英文摘要及關鍵詞:

本研究計畫是對一特殊的雷射做知識、技術及經驗的解析研究，使軍方需求單位掌握此一特殊的雷射的五級維修能力。我們對計畫的緣起做了說明及並對需求單位完全配合。在計畫的執行中做了最佳的每一元件及元件組的解析研究，並對所有的介面做最完整詳細的說明，更對量測及調校和元件的更換做了標準程序說明，還有設計了各類、各級雷射自主的驅動電源電路設計，使得使用者可以自主的完全掌握基修能量。

關鍵詞:雷射、雷射共振腔、雷射量測、雷射調校、雷射驅動。

This research project is to analyze and research a specific laser configuration to obtain complete knowledge、technologies and experiences to transfer to the project initiator for the conducting of the fine detail maintenance work. We describe in detail of the project approval processes and all the subjects that project initiator demanded. In the execution of the project, we analyze and research all the components and modulars, link all the interfaces, establish the standard of processes for the measurement、alignment、replacement of all components, and even more we have designed all the different levels of the laser driving circuits, so the operators can obtain complete self-contented abilities to do the maintenance.

Keywords: Laser、laser resonator、laser measurements、laser alignments、laser driving circuits。

計畫成果自評:

本計畫完成之研究及報告，其研究內容與原計畫規劃完全相符。預期目標完全達成，且更可在最近未來，軍方需求單位可額外獲得兩件研究執行單位自製並且調整及校正過的雷射脈衝波形量測器，可量測雷射脈衝波形、雷射高脈衝率、甚或雷射鎖碼脈衝波串；以及第二件研究執行單位自製並且調整及校正過的雷射能量計。本計畫完成之研究成果，對軍方需求單位有非常重要的實際應用價值。當然單純的雷射的基礎研究，如與本系統完全不同的雷射被動式 Q 調制方式及技術可以做純學術研究成果，適合在學術期刊發表。但是由於雷射的原始架構是美軍系統裝備，故不適合申請專利。而且本研究計畫是對一特殊的雷射做知識、技術及經驗的解析研究，使軍方需求單位掌握此一特殊的雷射的五級維修能力。故建議本計畫完成之研究及報告，完全對軍方需求單位公開。但對非贖續研究者，或其他非軍方需求單位同意者，不公開。

一、計畫緣起.....	1
二、需求單位現況.....	1
三、計畫目標.....	1
四、本計畫執行內容.....	1
五、本計畫執行成果內容.....	2
5.1. 系統之解析及研究.....	2
(a) 雷射系統架構 Laser configuration	10
(b) 雷射系統介面 Laser interfaces	16
(c) 雷射激勵 Optical pumping.....	20
(d) 雷射共振腔 Porro resonator.....	54
(e) 雷射三面直角稜鏡 Corner cube.....	61
(f) 雷射轉折稜鏡 Folding prism.....	67
(g) 雷射腔內望遠鏡組 Telescope in the resonator.....	69
(h) 雷射Q調制組件 Q-switch modulars	73
(i) 雷射鎖碼Q調制 Coded Q-switch modulation	89
(j) 雷射輸出導引 Output coupling	98
(k) 雷射共振腔內萊斯立稜鏡組Risley Prisms	101
5.2. 雷射基修技術及調校步驟標準程序.....	107
(a) 雷射基修技術.....	107
(i) 雷射原理及技術.....	107
(ii) 雷射Q調制原理及技術.....	123
(iii) 雷射基修技術.....	127
(b) 雷射調校步驟標準程序.....	130
(i) 雷射共振腔.....	130
(ii) 雷射調校.....	132
(iii) 多元件雷射調校及步驟標準程序.....	133
5.3. 雷射驅動系統及介面解析及試製.....	147
(a) 雷射驅動系統.....	147
(i) 雷射電源供應器.....	147
(ii) 雷射激勵電源供應器.....	149
(iii) 雷射閃光燈脈衝成形電路.....	158
(iv) 閃光燈觸擊發電路.....	166
(v) 雷射Q調制電源供應器	171
(vi) 高脈衝率雷射驅動及技術.....	181
(b) 雷射驅動系統介面.....	183
(i) 雷射驅動系統時序技術.....	183
(ii) 雷射驅動系統時序控制電路.....	189
5.4. 雷射輸出量測.....	190

(a)	雷射輸出.....	190
(i)	雷射能量輸出.....	190
(ii)	雷射輸出光束點.....	192
(iii)	雷射脈衝輸出及功率.....	195
(iv)	雷射脈衝串輸出及鎖碼技術.....	199
(b)	雷射輸出量測.....	200
(i)	雷射能量輸出量測.....	200
(ii)	雷射脈衝輸出及功率量測.....	204
(iii)	雷射脈衝串輸出及鎖碼技術量測.....	217
5.5.	雷射系統優化調校.....	220
(a)	雷射發射及能量輸出優化調校.....	220
(b)	雷射脈衝波形優化調校.....	220
(c)	雷射功率優化調校.....	222
(d)	雷射脈衝串優化調校.....	222
(e)	雷射鎖碼脈衝串優化調校.....	223
5.6.	部分硬體設備提供軍方維修單位.....	224
(a)	雷射脈衝波形量測模組.....	224
(b)	雷射能量量測模組.....	227
(c)	閃光燈驅動初步電源供應器.....	229
六、	結語.....	231
七、	附件.....	232
7.1.	本計畫參考資料.....	232
7.2.	雷射基修工作室規劃.....	238
7.3.	發表的 2005 年國防科技學術研討會論文.....	239

一、計畫緣起

91 年，連絡、技術討論

92 年，連絡、技術討論，希望建案合作研究

93 年，連絡、技術討論，建案申請提出，奉核定 94 年執行一年

94 年，執行委託合作研究一年

二、需求單位現況

國內軍方，追蹤導引測距高脈衝率雷射，無五級基修單位

國內軍方，追蹤導引測距高脈衝率雷射，無五級基修技術及經驗

國內軍方，追蹤導引測距高脈衝率雷射，無五級基修備料件

我陸軍有多架 OH-58D 及 AH-1W 直昇機，在射控系統最重要的追蹤導引測距高脈衝率雷射，目前只能執行系統及電路板模組，三級模組件抽換檢修。尤其對雷射模組，更無五級基修專責單位、五級基修技術及經驗、五級基修備料件等等。多年來，軍方在超過三級維修需求方面，只有精巧的提高雷射輸入電壓，到不超過臨界極限最高電壓，來維持系統堪用；以及後送美國廠商執行五級檢修。前者提高雷射輸入電壓，直到最高臨界極限電壓，來維持系統堪用，是一種治標方法，有其範圍限制，且無法回覆到正常工作電壓。後者送美國廠商執行五級檢修需耗時十八個月時間，且費用貴並難預估經費。。

三、計畫目標

建立高階追蹤導引測距高脈衝率雷射知識、技術能量及經驗，掌握五級基修技術，提高維修妥善率，增加戰力。

四、本計畫執行內容

測試、瞭解及指導追蹤導引測距高脈衝率雷射，故障情形及原因

測試、瞭解及指導追蹤導引測距高脈衝率雷射，故障修護方法及步驟

研究雷射架構及系統之解析

雷射基修技術及調校步驟標準程序建立

雷射驅動系統及介面解析及試製

雷射輸出量測

雷射系統優化調校技術及步驟標準程序建立

雷射檢測及調校自製部分硬體設備提供軍方維修單位

提供相關參考資料
規劃雷射基修工作室
提供知識及技術教學

五、 本計畫執行成果內容

5.1. 系統之解析及研究

網路搜尋系統相關檔案：www.helicopterpage.com/html/ahip.html





These photos were provided by Cpt. John Creech, [Company C, 1-185th Aviation, U.S. Army](#)

與本計畫有關的鈷離子亞雷射發射器，可執行測距、追蹤、導引等功能，即裝置在此 Mast-Mounted Sight (MMS)內。



Left: The most distinct external feature of the OH-58D is the Mast-Mounted Sight (MMS). It has two windows for a TV sensor (small one) and a FLIR (large one). There is also a laser rangefinder/designator boresighted with the sensors. The MMS can rotate $\pm 190^\circ$ in azimuth and $\pm 30^\circ$ in elevation.

網路 Mast-Mounted Sight (MMS)照片及說明





oh-58d-008-mms.jpg ...
 464 x 650 pixels -
 33k - jpg
www.aeronautics.ru



OH-58D Mast Mounted Sight MMS
 289 x 410 pixels -
 18k - jpg
tri.army.mil



OH-58D Kiowa Warrior with MMS
 764 x 546 pixels -
 126k - jpg
www.abacuspublish.com



The AHIP Program OH-58D
 250 x 300 pixels -
 17k - gif
www.helicopterpage.com



OH-58D Kiowa Warrior with MMS
 300 x 214 pixels -
 27k - jpg
www.abacuspublish.com



OH-58D AHSJ. The ubiquitous OH-58 ...
 640 x 511 pixels -
 54k - jpg
www.ausairpower.net



... Floyd Werner's OH-58D Warrior
 480 x 640 pixels -
 73k - jpg
www.making-history.ca

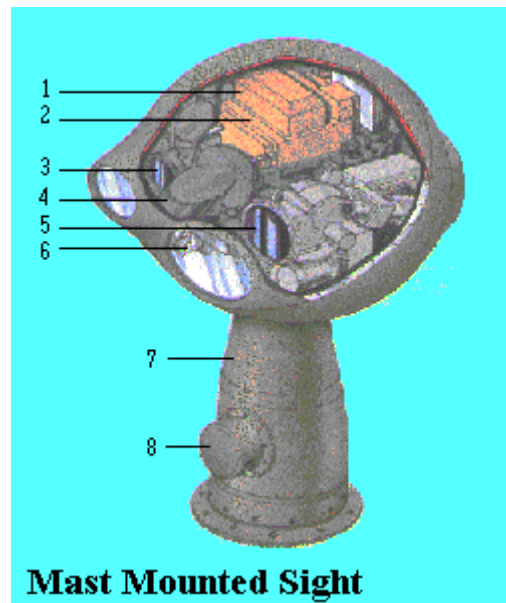


oh-58d-008-mms.jpg ...
 51 x 72 pixels - 2k - jpg
www.aeronautics.ru

Google 網路搜尋 Mast-Mounted Sight (MMS)結果，如上示。

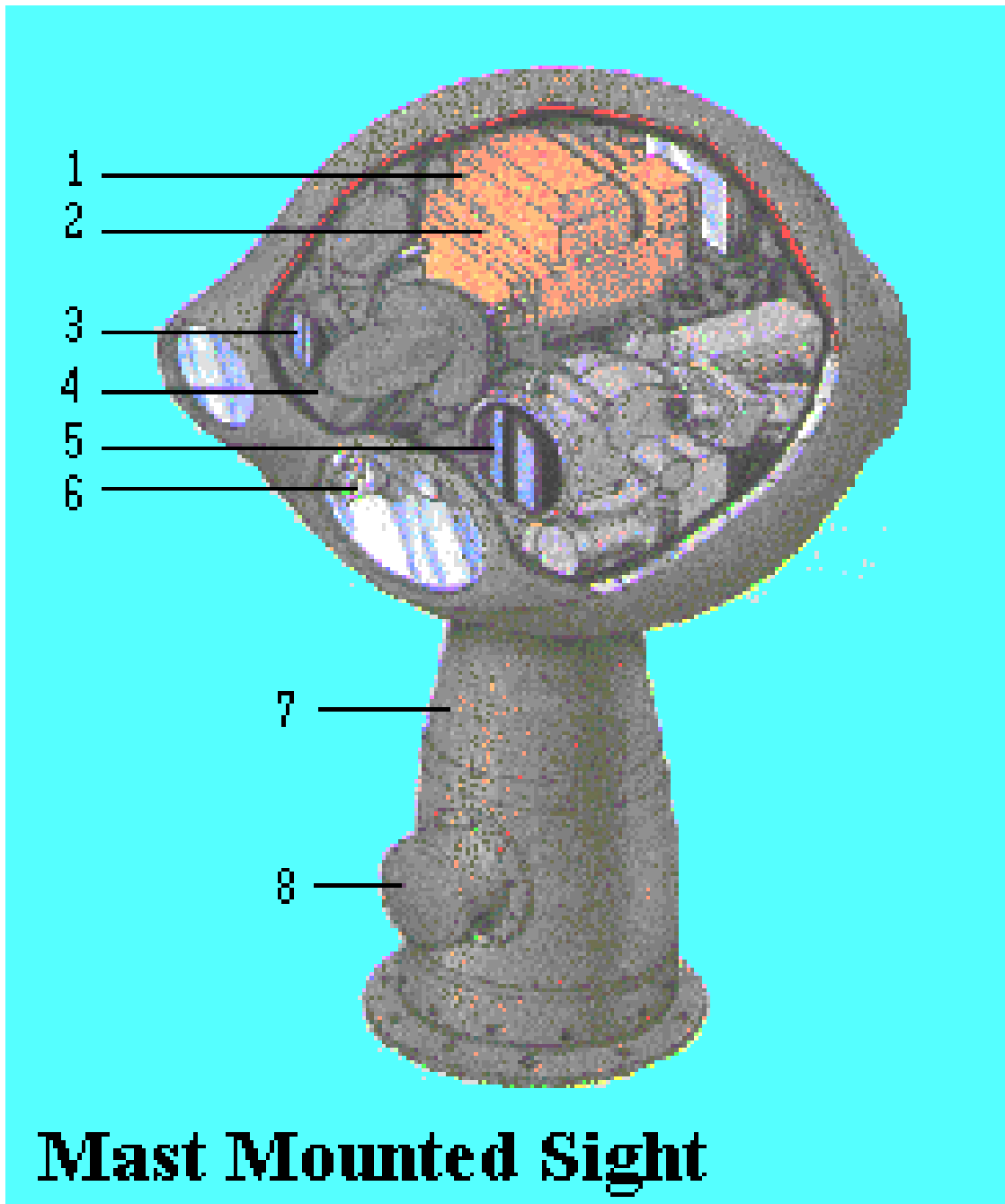


- | | |
|-----------------------------|--------------------------|
| 1. Laser designator. | Thermally stable. |
| 2. Stabilized platform. | Reduces image vibration. |
| 3. TV camera. | Magnifying video sensor. |
| 4. Boresight assembly. | 30 seconds in flight. |
| 5. Thermal imaging sensor. | 120 element module. |
| 6. Multiplexer electronics. | TV/FLIR correlation. |
| 7. Composite post. | Kevlar composite based. |
| 8. Heat exchanger. | Glycol cooled. |



Mast Mounted Sight

Mast-Mounted Sight (MMS)剖面圖照片及功能說明，鈷離子亞格雷射發射器即項 1 橘黃色部分所示。

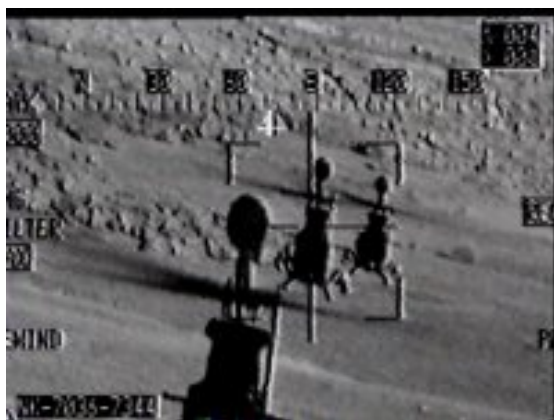


Mast-Mounted Sight (MMS)剖面圖放大照片。

Mast-Mounted Sight (MMS)熱像夜視照片、電視攝影照片、雷射發射照片等功能。



The Mast Mounted Sight!!!

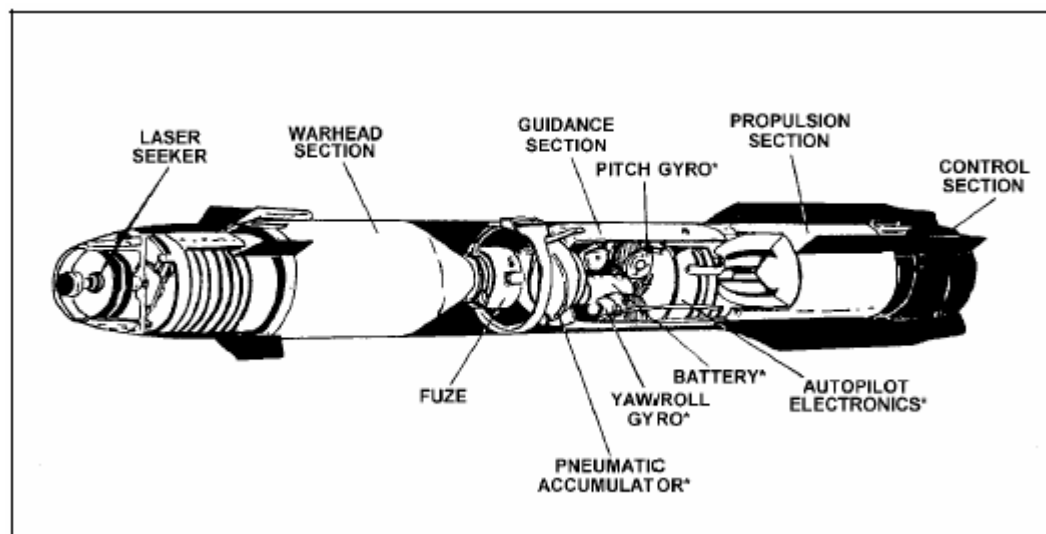


TV Image



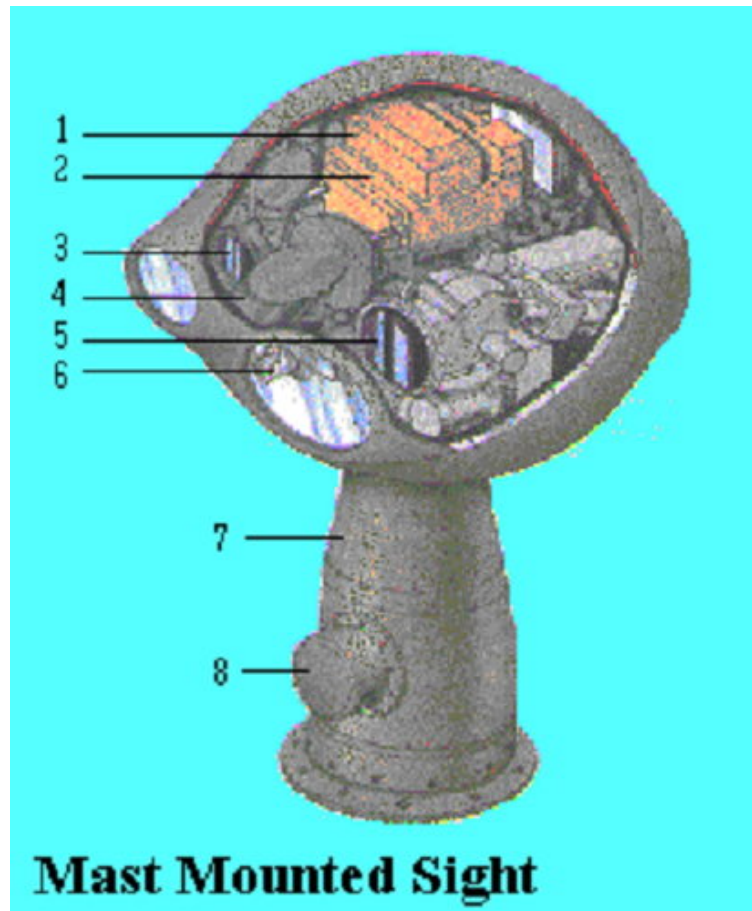
Laser Tracking

雷射導引飛彈說明圖



(a) 雷射系統架構 Laser configuration

鈷離子亞格雷射發射器即 MMS 座內，項 1，橘黃色部分所示。



其中各部份的功能如下：

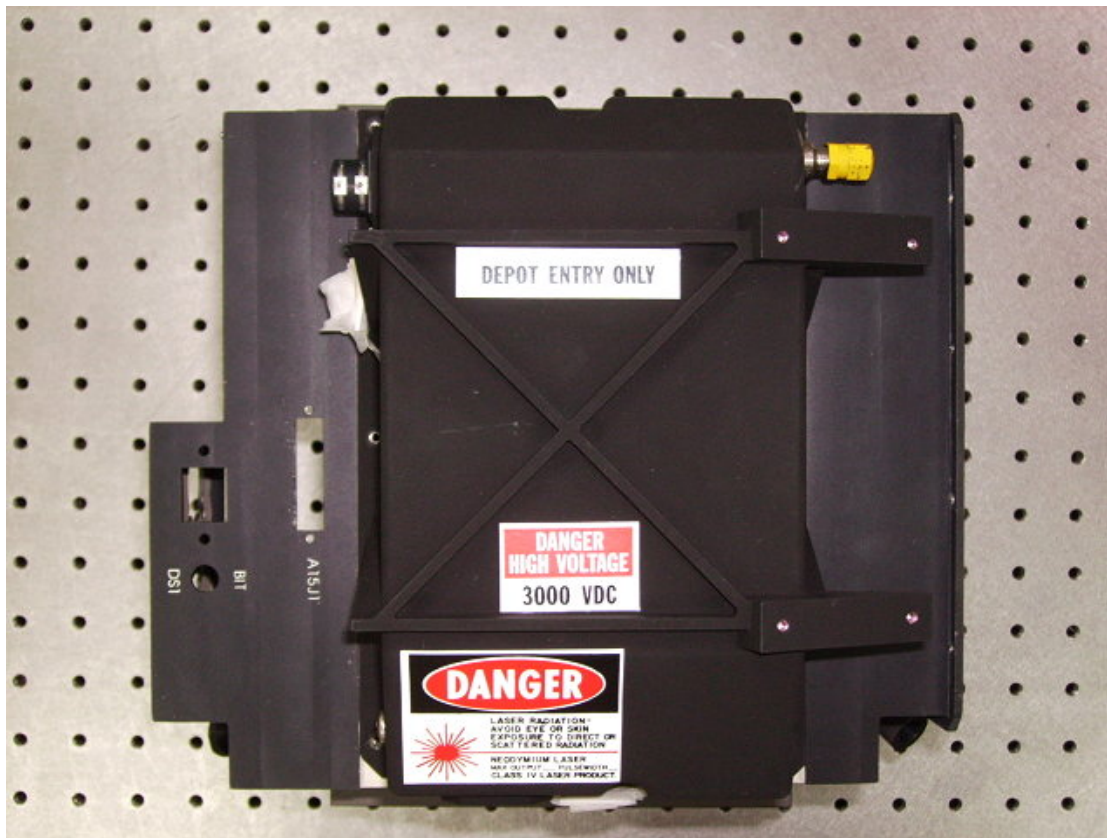
1. Laser designator.
2. Stabilized platform.
3. TV camera.
4. Boresight assembly.
5. Thermal imaging sensor.
6. Multiplexer electronics.
7. Composite post.
8. Heat exchanger.



從實體照片可清楚看到封簽，美軍及美國廠商將雷射模組完全封鎖。我陸軍多架 OH-58D 及 AH-1W 直昇機，在射控系統最重要的追蹤導引測距高脈衝率雷射，目前只能執行系統及電路板模組，三級模組件抽換檢修。尤其對雷射模組，無軍售或商售，更無五級基修專責單位、五級基修技術及經驗、五級基修備料件等等。多年來，軍方在超過三級維修需求方面，只有技巧的提高雷射輸入電壓，到不超過臨界極限最高電壓，來維持系統堪用；以及後送美國廠商執行五級檢修。前者提高雷射輸入電壓，直到最高臨界極限電壓，來維持系統堪用，是一種治標方法，有其範圍限制，且無法回覆到正常工作電壓。後者送美國廠商執行五級檢修需耗時十八個月時間，且費用貴並難預估經費。

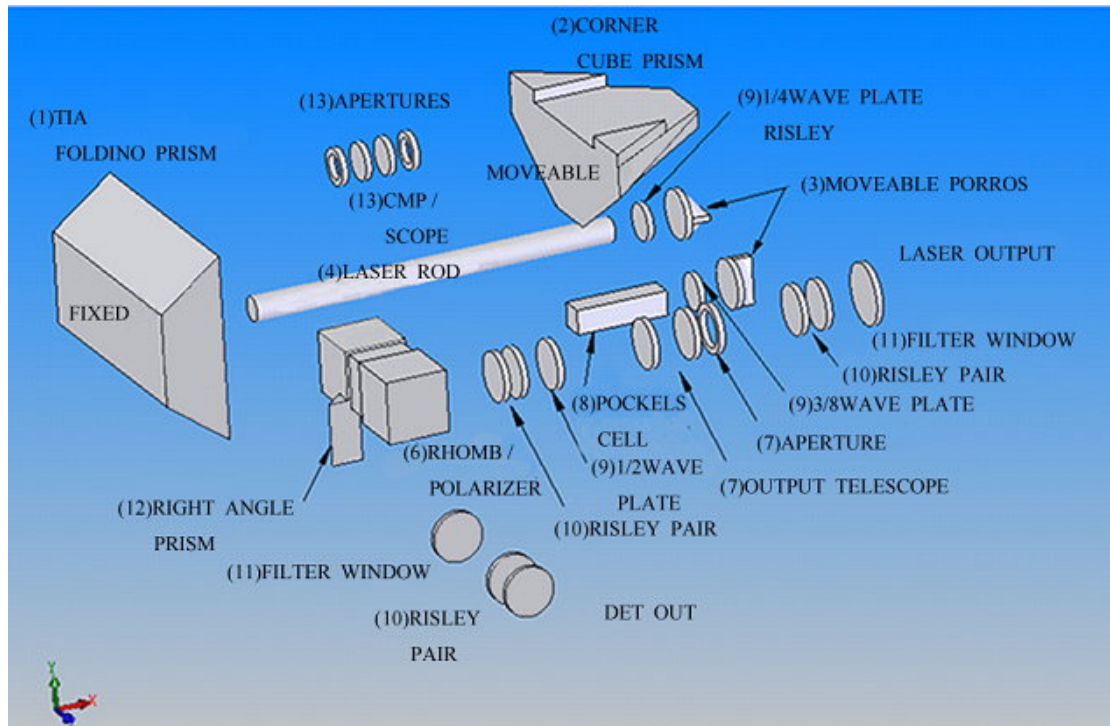
本研究計畫的執行，不但要對完整複雜的雷射共振腔研究解析，更還對基本的雷射共振腔結構，做由簡至完整複雜的雷射共振腔研究報告，祈使雷射檢測技術建立於軍方最高階維修單位。

下列照片，是雷射模組的封殼照片：

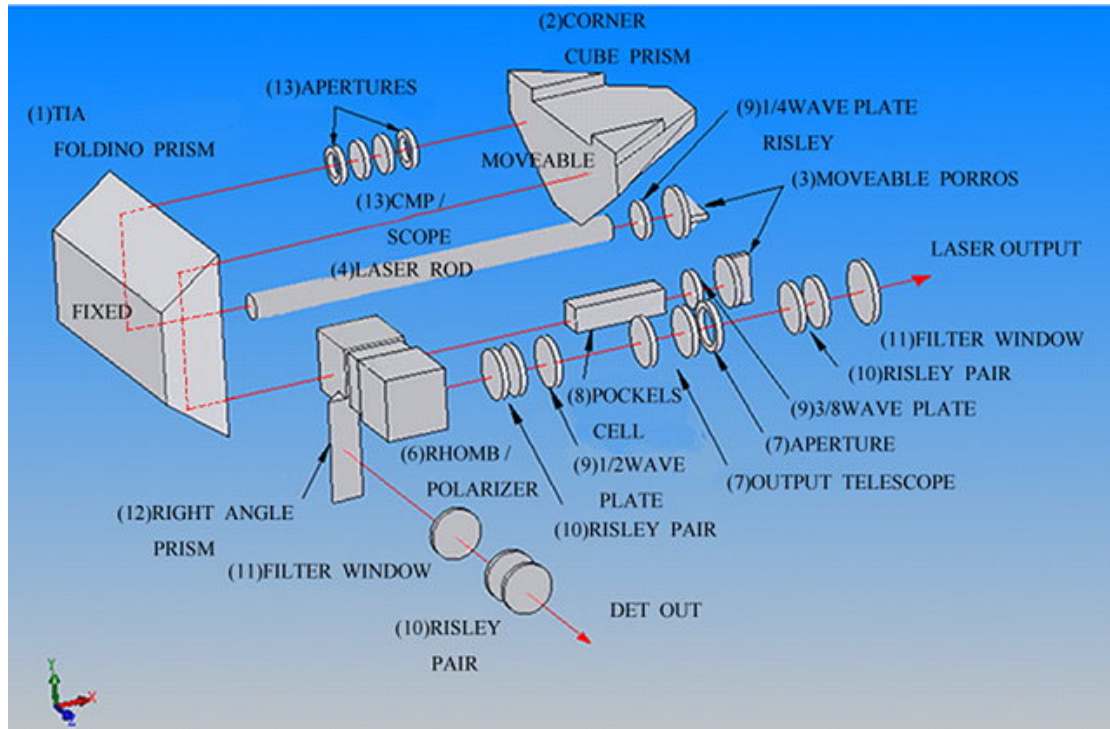


鈷離子亞格雷射發射器，其內部的元件組成、系統架構、功能特性等，是本計畫的核心研究。我們在計畫中不但要了解每一元件的基本功能特性，更要了解每一元件組的基本功能特性，以及最終為何一個鈷離子亞格雷射發射器要用到總計二十六個光學及光電元件才能組成，而非傳統的雷射發射器只需要五至八個光學及光電元件即能組成雷射發射器。

下圖是本計畫系統中鈷離子亞格雷射發射器，其內部的元件組成：

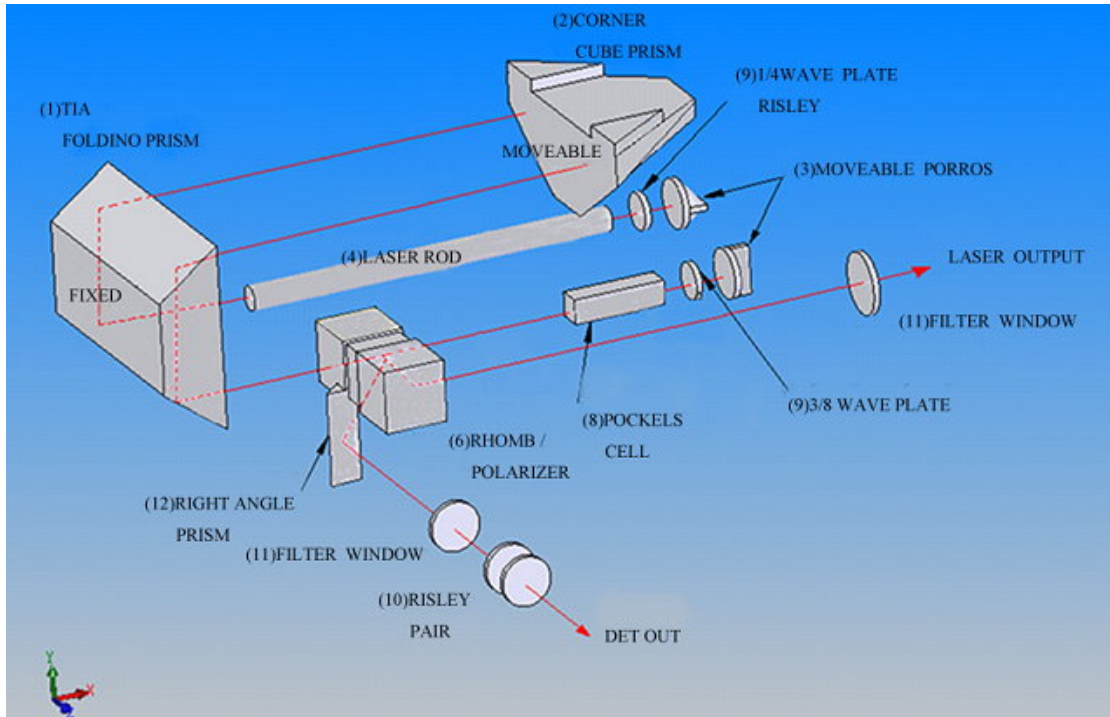


對一個雷射發射器而言，當然最重要的就是雷射光的形成，也就是雷射光的光徑。下圖是本計畫系統中鈷離子亞格雷射發射器其內部的元件組成及光徑標示：

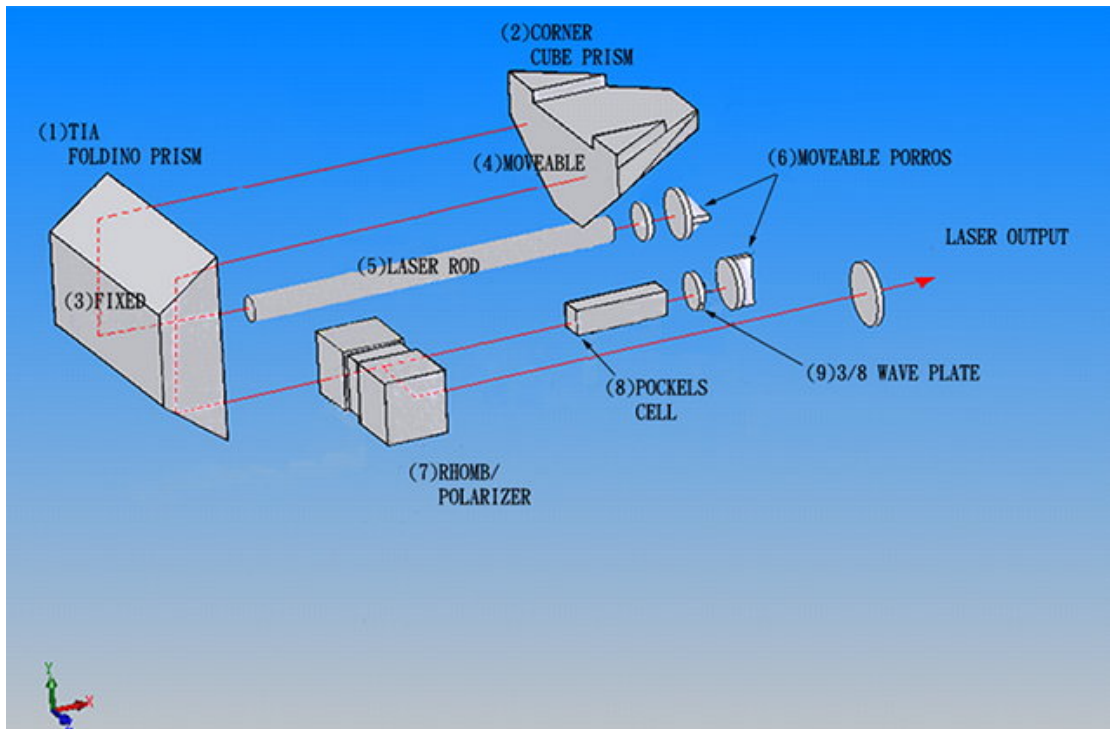


從上圖，雷射發射器其內部的元件組成及光徑標示，我們可以很清楚的看到整個雷射發射的產生，及雷射的輸出指向和測距導引，基準光輸出。

但是基本的全功能測距導引雷射發射器(高脈衝率鎖碼巨脈衝雷射光:High repetition rates coded giant pulse Q-switched laser output)其內部的元件組成，也可由下圖基本的元件圖可完成，其中的差異當然有技術及必需行存在，這更是我們要解析的精要部份。



當然即使立用此雷射共振腔架構，下圖也就是最簡單的雷射共振腔。



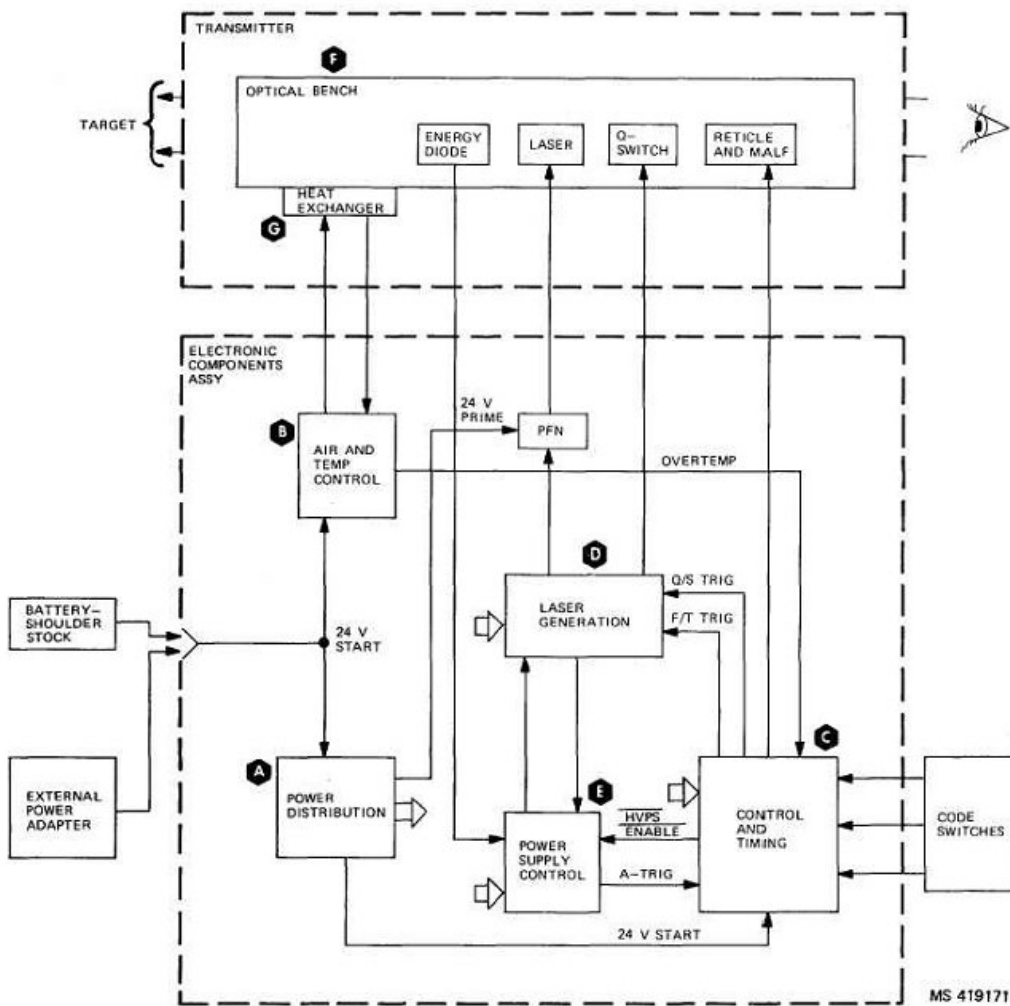
本計畫報告，不但要對完整複雜的雷射共振腔研究解析，更還對基本的雷射共振腔結構，做由簡至完整複雜的雷射共振腔研究報告，祈使雷射檢測技術建立於軍方最高階維修單位。

(b) 雷射系統介面 Laser interfaces

閃光燈激勵:電源、PFN、
Q 調制:驅動電路(電壓)、同步及時序、
鎖碼:調頻、調幅、密碼

下圖是鈷離子亞格雷射測距導引雷射發射器，功能方塊及介面圖。從以上的示意圖，我們可以知道，一個完成全功能的鈷離子亞格雷射測距導引器，應包含有電源、閃光燈激勵電源、閃光燈放電脈衝形成電路(PFN pulse forming network)、巨脈衝 Q 調制驅動電路(電壓)、雷射脈衝輸出同步及時序、當然還要有鎖碼功能的調頻、調幅、密碼等驅動電路及控制系統。

TM 9-1260-479-30 Figure 1-15. LTD System Block Diagram 1-16

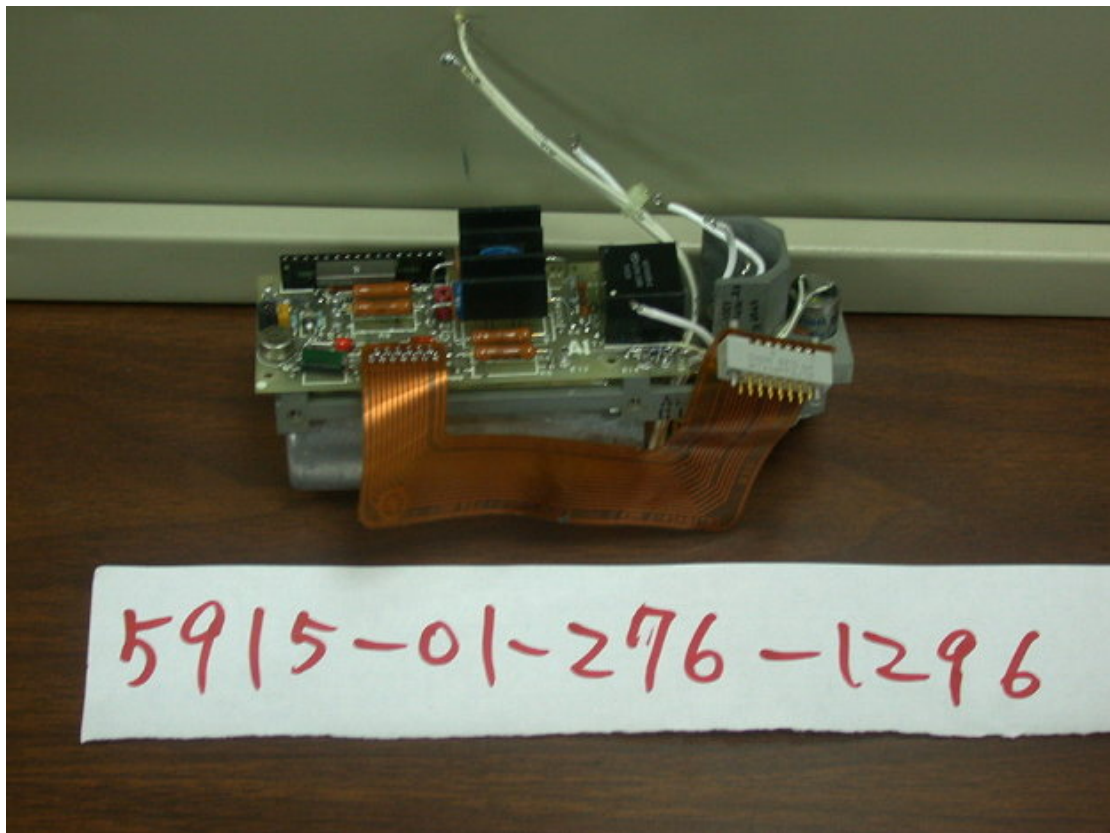


TM 9-1260-479-30 Figure 1-15. LTD System Block Diagram 1-16

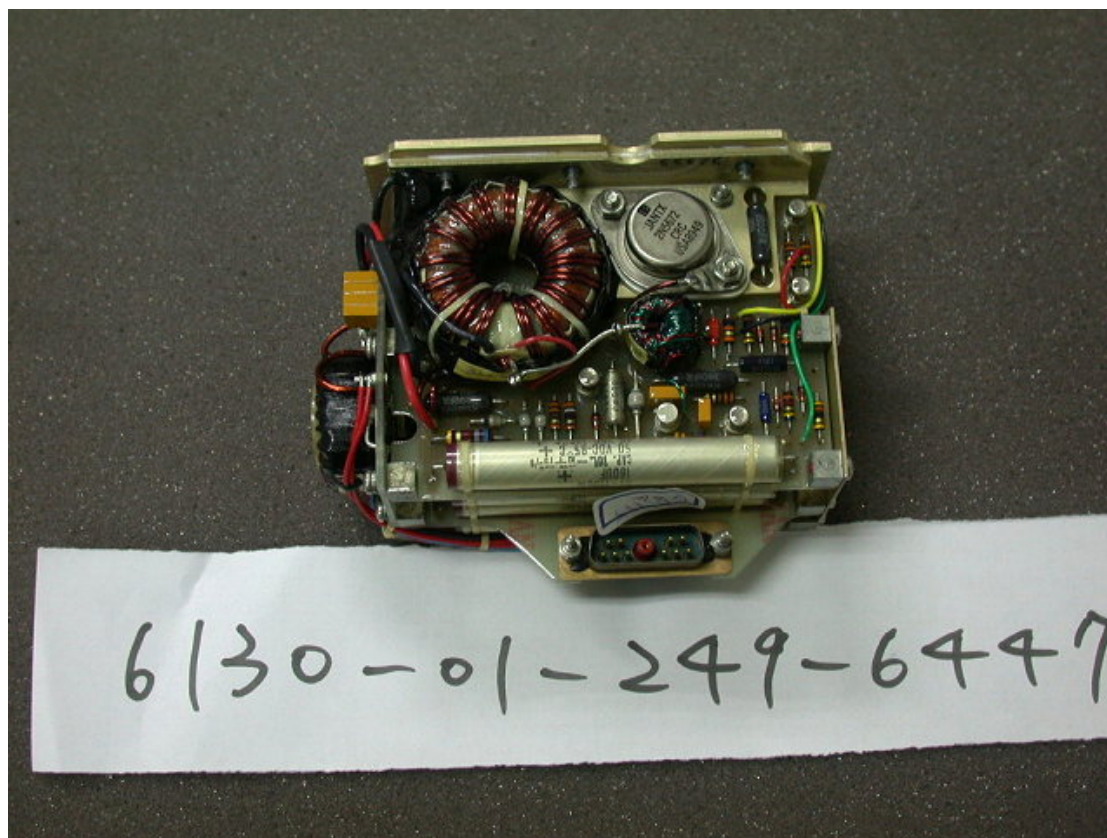


我軍方所有鈷離子亞格雷射發射器全觀照片，從上圖照片中我們也可以知道，雷射發射器是要相關的系統介面來驅動運作的。

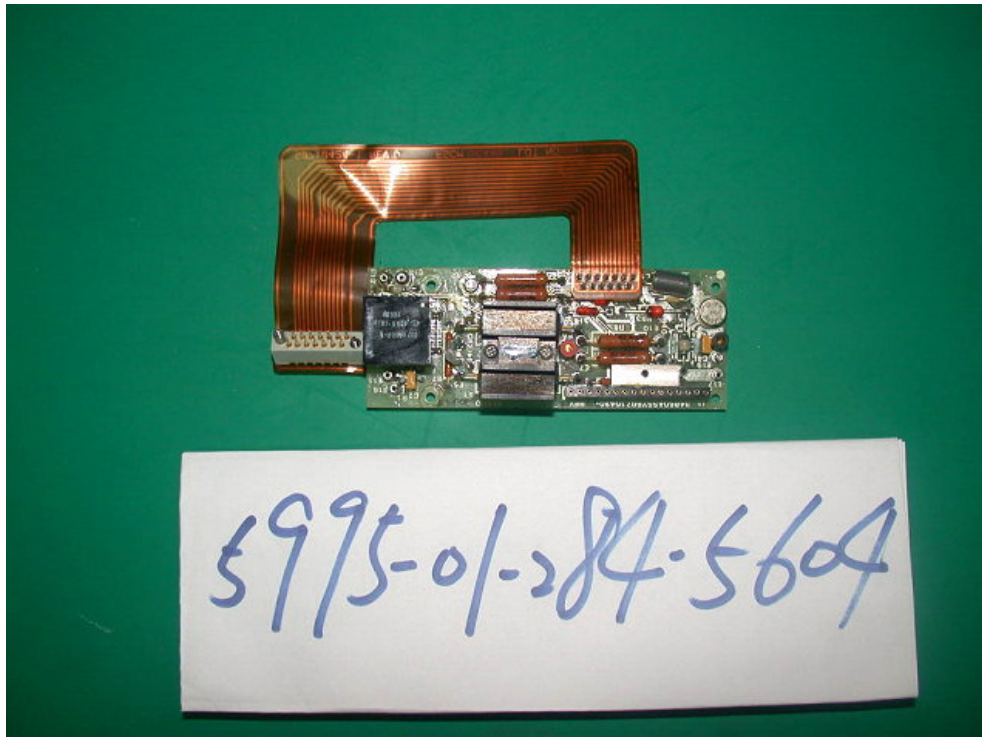
下圖是鈷離子亞格雷射發射器雷射激勵光源閃光燈儲能電容、閃光燈激勵電源電路板及元件等、及接線和軟板式控制線和接頭座。



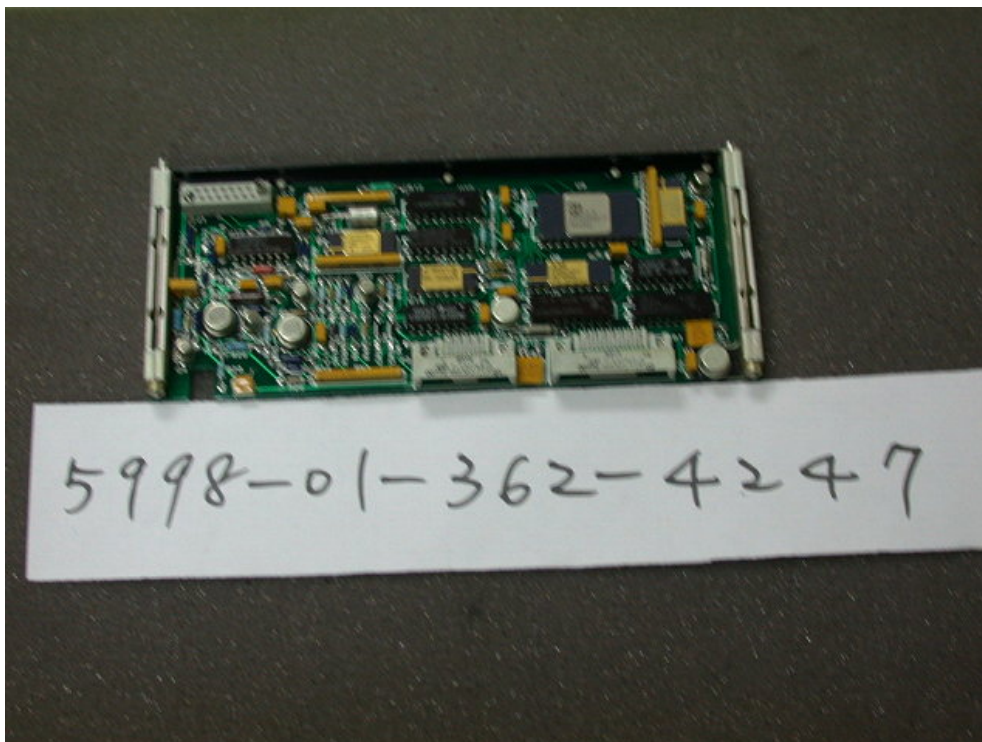
下圖是鈷離子亞雷射發射器閃光燈激勵電源電路板及元件、閃光燈高壓擊發觸擊電源電路板及元件、閃光燈放電脈衝形成電路(PFN pulse forming network)元件及接線和軟板式控制線和接頭座。



下圖是鈷離子亞格雷射發射器雷射巨脈衝 Q 調制驅動電路(電壓)、雷射脈衝輸出同步及時序等驅動電路及控制系統。



下圖是鈷離子亞格雷射發射器雷射，雷射脈衝輸出同步及時序、以及鎖碼功能的調頻、調幅、密碼等驅動電路及系統邏輯控制電路。



(c) 雷射激勵 Optical pumping

本章節對脈衝式固態雷射所用閃光燈從基礎的理論研析和推導，到計畫主持人二十多年實際研究製作固態雷射的經驗，做完整的特性、選擇、操作情況的優化及使用生命期等各方面研究結果，做了一個通盤的報告。

I、簡介

閃光燈是一種填充氙氣(Xenon)或氪氣(Krypton)的氣體放電管，設計來產生脈衝式的輻射光源。雖然有頗多的更高亮度的光源可用，例如渦動燈(Vortex Lamp)，電漿捏擠元件(Plasma Pinch Device)等；但閃光燈具有高亮度，高效率，長生命期及操作方便的優點，使得它廣泛的被使用在脈衝式固態雷射的光激發(Optical Pumping)上。

閃光燈有許多不同的大小及形狀，包括直線型，螺旋狀型及 U 型。雖然第一具晶體雷射是利用螺旋狀閃光燈當激發光源的，但現在的雷射系統已很少使用螺旋狀式的閃光燈對圓柱型的雷射晶棒提供較均勻的光照射，其螺旋內徑長在 0.7 到 6 公分之間，其圈數通常少於 6 圈，且其圈與圈間的間隙通常是要求越小越好。其他螺旋狀式閃光燈的要求如內外徑的大小，弧光距，閃光燈推動電路設計及使用期長等都和直線形閃光燈相似。

近代的固態雷射大部份是使用弧長 2.5 公分到 15 公分，徑寬 1 厘米到 10 厘米左右的線型式閃光燈。而其最有效的電子，機械及光的設計參數和推動閃光燈的電源供應器都幾乎仔細的研究過了，而簡化成商用上規格的例行參數了。

II、閃光燈之選擇

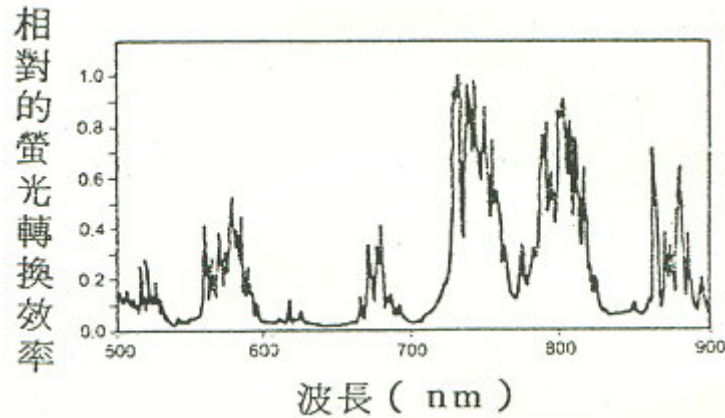
選擇激發固態雷射的閃光燈最重要的是(1)閃光燈的發射光譜與雷射晶棒的吸收光譜的重疊性，(2)閃光燈冷卻的問題，(3)光反射腔的要求，(4)效率的測量。

通常閃光燈的大小是受雷射棒的限制而不是由於閃光燈製造技術所限制的；其要求是閃光燈的內徑與雷射棒的直徑相等。

利用閃光燈激發產生雷射的效益大約是 3%，接近 4%的效益亦可得到，不過通常其效益大約是 2%~3%左右。

1. 光譜的重疊

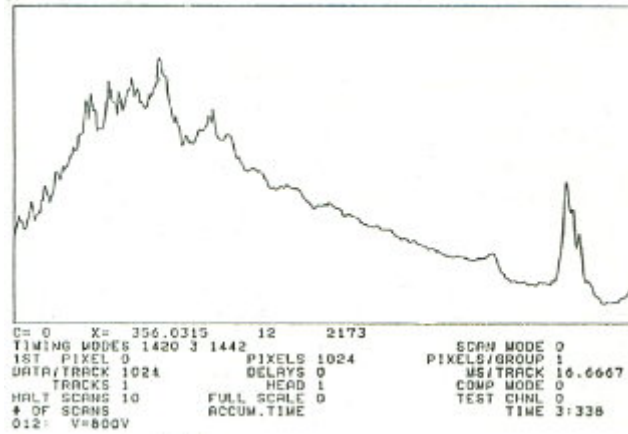
激發光源最重要的要求是其發射光譜與晶體的吸收光譜的重疊，圖一顯示典型的鈷離子亞格雷射的吸收光譜。



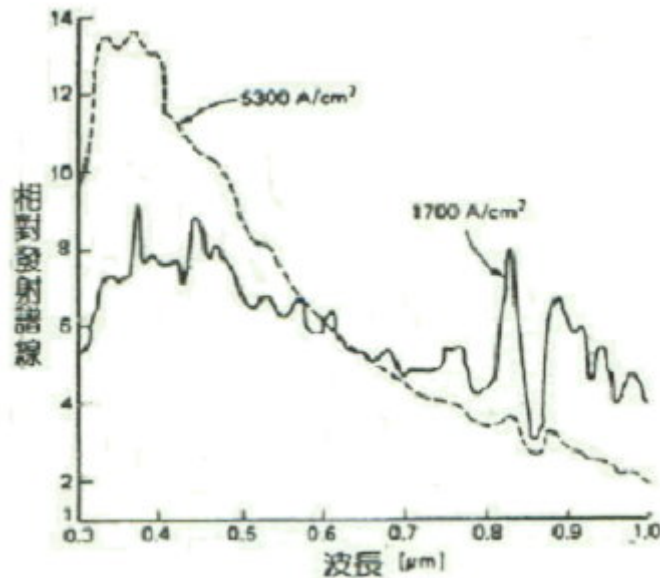
圖一、鈷離子亞格晶體的吸收光譜

在較低的功率範圍內(約每個輸入 10 焦耳以下)，不論是連續式或脈沖式，氬氣所發出的線輻射(line radiation)其發射光與雷射的吸收光譜較相符。但在較高的功率範圍內(每個輸入能量 10 焦耳以上)，從弧光光源所發出的光大部份是連續輻射 (Continuum Radiation)，而線輻射光譜反而被其假黑體光譜 (Pseudo-blackbody Spectrum)所掩沒了。在這功率範圍內通常是選用氬氣閃光燈，因為雖然其線狀光譜的結構與鈷離子亞格雷射的吸收光譜不完全重合，但其由電的能量轉變成黑體輻射的效率卻更高。

圖二顯示典型氬氣閃光燈發射光譜。閃光燈的發射光譜不但與其所充的氣體種類有關，而且與氣體的壓力和放電時的電流密度亦有密切的關連。圖二(a)中可見在較低的電流密度下線輻射較明顯；在較高的電流密度下則大致為連續輻射，且整個發射光譜的尖峰會偏移到較紫外的範圍。圖中兩條曲線分別為兩個不同電流密度下的發射光譜，且分別對應於 $7000^{\circ}K$ 及 $9400^{\circ}K$ 的黑體輻射溫度。



圖二、利用 OMA- II (Optical multi-channel Analyzer)所測得的典型的閃光燈輸出光譜



圖二(a)、不同電流密度下氙氣閃光燈的發射光譜

2. 冷卻

閃光燈的冷卻要求有很明確的區分，通常有單位面積平均功率小於 15 Watts/cm^2 時，普通的空氣散熱即已足夠；單位面積平均功率介於 15 到 30 Watts/cm^2 時，則需風扇鼓風式的散熱；單位面積平均功率大於 30 Watts/cm^2 ，但小於 200 Watts/cm^2 則一定要用水冷的方式散熱。而此單位面積平均功率的定義是全部的輸入功率(能量乘上脈沖重複率)除以全部的閃光燈管內部面積。

以上所有功率的標準是假設在激發光腔下操作，而且有大部份的輻射經激發光腔反射回燈管上。對管壁厚度小於 1 厘米的閃光燈，由於散熱性較佳，以上所提及的單位面積平均功率可稍為提高。但如用吸收此外波長的石英做管壁則冷水

方式單位面積平均功率要降至 160 Watts/cm^2 ，而如用可穿透紫外波長光的石英做管壁則單位面積平均功率可放寬至 200 Watts/cm^2 。

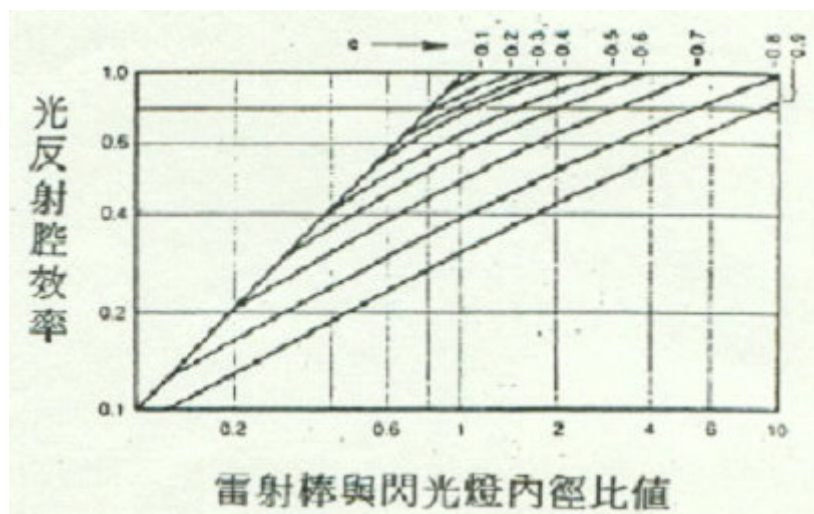
至冷卻溶液的選擇，經過許多嘗試實驗最後證實去離子水(De-ionized Water)是最適當的。去離子程序是非常必要的，因為水的導電性會使閃光燈觸發脈沖短路，造成不可靠的觸發。此外使用去離子水可減低電極接頭的腐蝕。通常冷卻液要求電阻係數大於 $200 \text{ K}\Omega$ 以上，並且所有冷卻的元件都要用塑膠，不鏽鋼或鍍鎳的金屬。

另外較具可用的溶液是乙二醇乙稀(ethylene Glycol)與水或二氯二氟代甲烷(Freon) E-3 的混合液。通常選擇此種溶液的原因是考慮雷射系統要使用在 0°C 以下的環境中。在使用此種冷水液時如果閃光燈所發出的短波長幅射不完全過濾掉，將會使溶液漸漸退化。

(三)光反射的要求

固態雷射系統光反射腔通常設計成圓柱狀，而把與雷射棒同直徑的閃光燈與雷射棒放在橢圓光反射腔的兩個焦點上。如圖三，可看出小離心率的橢圓

($e \sim 0.1$ ； $e = \frac{c}{a}$ ， $e \rightarrow 0$ ，圓； $e \rightarrow 1$ ，線)且閃光燈的內徑與雷射棒的直徑幾乎完全相等的情況下，其效益最高。越大的閃光燈內徑其效益越差；小的閃光燈內徑雖然可使用橢圓反射腔的離心率要求稍為放鬆，但也嚴格限制了閃光燈的功率與雷射輸出功率。太小的閃光燈內徑較不合算，因為絕對的效益隨內管壁面積與全部放電容積的比例之增加而漸減。



圖三、橢圓光反射腔的效率與雷射棒直徑和閃光燈內徑比值與離心率的函數關係

另外一種高效益的光反射腔是”緊”的光反射面板。雷射棒與閃光燈儘量是貼近，外面用卵形的圓柱緊密的包圍著。其效益與精密設計的橢圓光反射腔堪比擬，但有下列的缺點：

1. 雷射棒的激發不均勻(要用 Diffuser 改進)。
2. 閃光燈與雷射棒很少能足夠的散熱。
3. 閃光燈的負載>Loading)增加時，其輻射光的特性會變得很差，且燈中電漿的不透明性會增得很大。

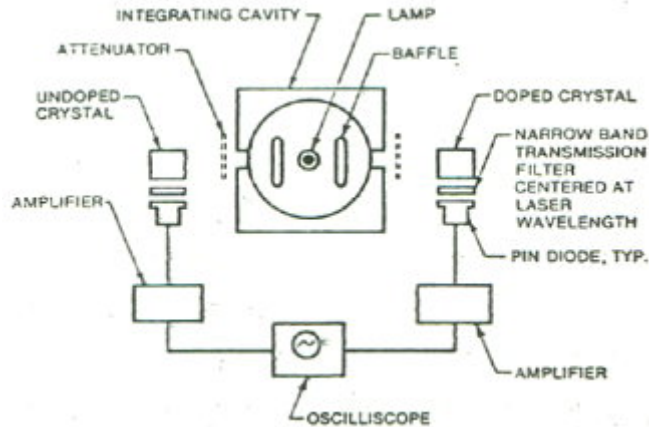
如果使用橢圓是光反射腔為了避免直接照射所引起的雷射棒不均勻激發，則要考慮把雷射棒與閃光燈皆偏移開其兩個焦點，尤其是在高重複率使用情況下，此點非常重要。

由於閃光燈在使用時會受到由光反射腔所反射回來的輻射影響，使閃光燈的弧光電漿產生變化，所以閃光燈的優化應該放在光反射腔中來設計。尤其在閃光燈有很強的反射光的流量情況下，通常會使用閃光燈的輻射光譜偏移到較紫外的波長。

管狀弧光放電的輻射其遠場空間的分佈並不完全是一種蘭伯特分佈(Lambertian Source)在正側45°角會多出30%左右。但由於大部份的雷射腔設計是先把閃光燈及雷射棒分置於適當的距離下，再設計有關的橢圓，然後再橢圓的兩端加上反射面，所以通常遠場輻射的分佈圖形則可以不考慮了。

(四)效率測量

如圖四，一種測量固態雷射晶體在光腔中之螢光現象的系統，通常拿來量閃光燈的相對特性，並做為閃光燈優化的標準。如圖被測的閃光燈同時激發對稱光腔中的兩片晶體，其中一片是沒有其他異種離子的主材料，另一片是加入所需已知特定離子濃度的材料。由於只看雷射輸出波長左右的小波頻範圍內的螢光倍數值輸出即可得知閃光燈激發的效益。此方法可避色閃光燈及雷射鏡子調整的差異及閃光燈線路的耦合效應等問題。由此方式所得的結果與真正雷射輸出效益的比較頗相符的。



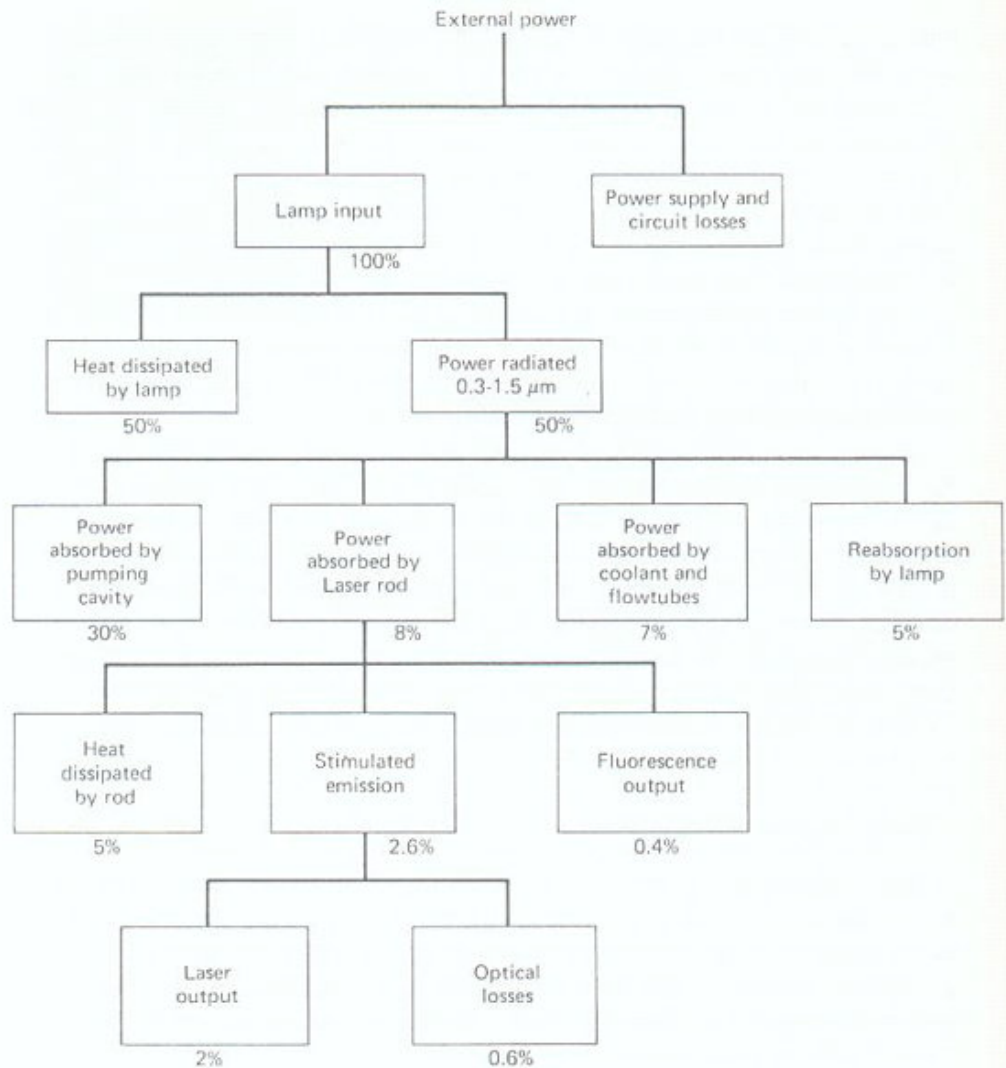
圖四、優化激發燈特性的螢光測量儀器

III、閃光燈的優化

最佳效益的閃光燈要求其發射之光譜與雷射棒的吸收光譜最好完全重疊。因此我們設計閃光燈時首要看其發射光譜的優化：其中包括了光譜範圍，輻射強度，充氣種類，壓力大小，有效黑體輻射與電流的密度等。此外放電電路的優化，保證最佳電能與光能間之轉移及最佳激發雷射的是當時間；閃光燈材料的優化，包括材料的選擇，封管方法及技術，電極大小，形狀及材料；以及閃光燈處發方式的考慮等等。以上的幾點都與閃光燈的發射光譜，及雷射的輸出效益有很重要的因果關連。

優化的第一步驟是考慮所需雷射的輸出能量和系統的效率，再決定每一脈沖需要閃光燈多少能量；雖然鈷離子亞格雷射系統其效益曾達 4%，但通常大約在 2~3% 左右。如果利用其他固態雷射材料，其效率通常是比鈷離子亞格雷射較小。

下面圖五，顯示固態雷射系統的能量消耗，通常其損失大部份是固定的。波長在 250nm 到 1000nm 之間閃光燈的輻射效益約佔有全部輻射能量的 45% 到 65%，而光反射腔的效益大約是 70% 到 90%。共振腔的繞射損失及非輻射能階轉移的損失都是固定的。而其中最主要的損失現象是光譜重疊的程度，這也是雷射設計者所應控制的。



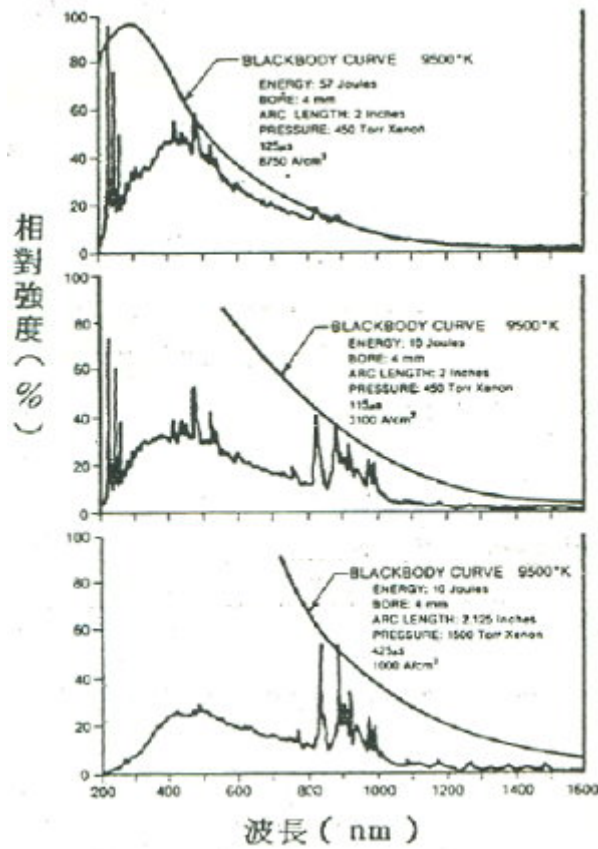
圖五、固態雷射典型的損失分布

(一) 光譜優化

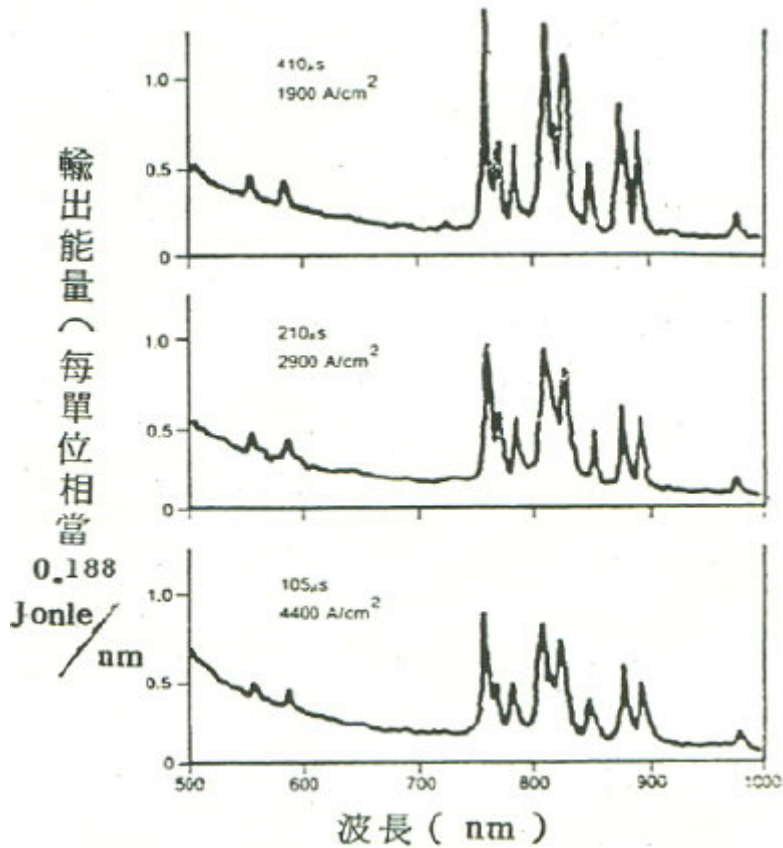
閃光燈的輻射光譜包含了很寬的波長，從石英的紫外截止波長(通常是160nm 至 270nm)到紅外的截止波長(通常是 2.5 至 5 μm)。這些輻射是由連續輻射及原子的線輻射子組成的。線輻射是中性的原子及離子的束縛電子對的能階轉移產生的；而連續輻射是由電子與離子的碰撞而產生的剎止輻射(Bremsstrahlung Radiation)及自由電子與束縛電子的能階轉移而產生的。

幾乎所有的固態雷射都是使用充氙氣或氬氣的閃光燈當激發光源的。其中氙氣閃光燈可以提供在可見光頻及近紅外線光頻範圍上全面較高的電能與光能的轉換效益；但是仍然氬氣閃光燈的線輻射與固態雷射晶體的吸收光譜較符合。所以氬氣閃光燈通常是使用在較低的功率範圍內，因為其線輻射

發射光譜與雷射材料的吸收較符合。但在 3 厘米及 4 厘米內徑寬的閃光燈，當電流密度大於 4000 到 5000 Amperes/cm² 時，氙氣閃光燈的效率卻較好，這是因為此時電漿的幅射較像一個黑體幅射體，而線幅射取幾乎是全部隱藏在黑體連續幅射內。圖六，七，顯示 4 厘米內徑的氙氣閃光燈及 3 厘米內徑的氙氣閃光燈在不同的電流密度下其發射光譜的比較。



圖六、4 厘米內徑氙氣閃光燈在不同電流密度下的發射光譜



圖七、3 厘米內徑氬氣閃光燈在不同電流密度下的發射光譜，能量 100 Joules，壓力 1500 torrs。

稀有氣體電漿的有效黑體溫度 T 主要是閃光燈的電流密度 J ，及閃光燈內徑 D 兩個參數的函數。其方程式是

$$T = \left[(9450D^{0.03}J^{0.01})^6 + (93D^{0.27}J^{0.34})^6 \right]^{1/6} \dots\dots\dots(1)$$

其中黑體溫度的單位是克氏溫度，閃光燈內徑的單位是米，電流密度的單位是每平方釐米安培(Aeperes/cm²)。

值得特別注意的是產生固定電漿溫度(即穩定的光譜輸出)的電流密度對閃光燈內徑的增加反而減小。

實際上如方程式(2)所指出，對小內徑的閃光燈其有效內徑是一個減縮的內徑 D_R ：

$$D_R = \frac{D}{1 + \frac{0.0008}{D}} \dots\dots\dots(2)$$

此外除了閃光燈電漿的有效黑體溫度外，閃光燈電漿的發射率(emissivity)在雷射系統的設計上也是很重要的。閃光燈電漿的發射率是閃光燈內徑，電流密度及波長的函數，而且是依照 $E_\lambda = 1 - \exp(-\alpha_\lambda T)$ 此方程式，其中以 α_λ 是吸收-發射係數，T 是電漿的溫度。

在閃光燈及光反射腔設計中通常為了得到幅射的最大效益要求在雷射吸收光譜帶閃光燈有最大的發射率。譬如對鈷離子亞格雷射晶體，使用 3 厘米或 4 厘米閃光燈，最佳的電流密度要求是每平方厘米 4000 到 5000 安培之間。因為在此種情況下在 700 到 900 奈米範圍內其發射率趨近於 1，而此範圍也是雷射最主要的激發吸收光譜。

對一個固定內徑的閃光燈而言，如果電流密度低於最佳值，雖然比例上來講黑體幅射曲線較偏向近紅外波長，也與鈷離子亞格雷射棒的吸收光譜相符，但是因為發射率低，其總合的雷射效益並不大。同樣的，如果電流密度大於最佳值，由於黑體雷射的尖峯值偏到紫外波長，雖然其發射率大大的增加了，但因為發射光譜與雷射晶體的吸收光譜並不吻合，其總合的雷射效益反而大大的減低了。此外，電流密度高，紫外波長幅射較多，也造成了許多不需要的浪費及困擾。不過通常如果是設計高功率的雷射脈衝，這種效益的降低必需考慮其他因素而容忍。

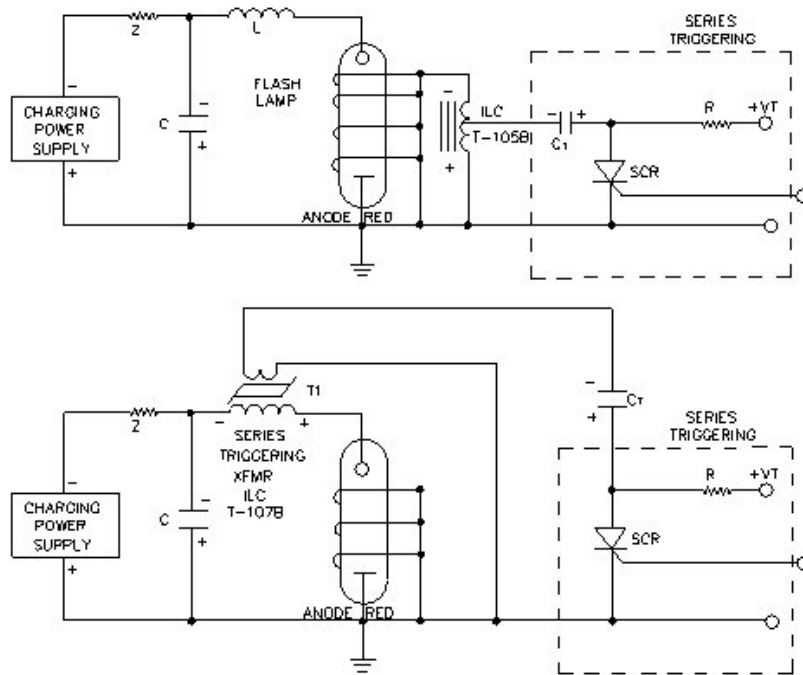
到此的討論皆忽略了電漿溫度的徑向變化及輸出光譜的時間變化。閃光燈在穩定管壁情況下操作好像是一個均勻的幅射體。但是如果輸入能量偏低，其所產生之電漿並不會均勻的充滿閃光燈的內部，而是一種跳躍不穩定的幅射體。當電流脈衝在閃光燈內產生時，原子的線幅射先產生^(11,12)，當電漿溫度較高後，則紫外波長較明顯了。同理當電漿冷卻下來時，黑體幅射較晚才會消失。圖六及圖七是整個閃光燈沖的全部積成光燈，實際上隨閃光燈放電時間的變化，其瞬時幅射的光譜分佈與積成光譜稍有差異。

短時脈波(10μsec 或更小)的閃光燈發射光譜其黑體幅射的尾巴效應非常明顯，而且在此種情況下，閃光燈的電能有一大部份只是加熱閃光燈的管壁，而使整個閃光燈的效益大大的減少。通常這種短脈沖式的應用很少使用在固態雷射上，因為固態雷射晶體的儲存激發時間是頗長的。

要由閃光燈不同的功率密度所發出的光譜與雷射晶體的吸收光譜配合來測閃光燈的效益是頗困難的，通常的最佳值優化大都要利用如圖四所示的儀具做實際的模擬較能相近。

(二)放電電路的優化

固態雷射閃光燈的推動電路通常是由如圖八所顯示的單迴路，低阻抗的RLC 電路組成的，其中充電電容的電壓約在 500 至 2000 伏特，而整個放電脈沖寬約數十個微秒到數個毫秒。



圖八 典型的閃光燈放電及觸發電路

在設計時，我們首先考慮損失因子不明顯的狀況，然後再推廣到考慮損失因子，最後把閃光燈的管壁效應也考慮進去。

Markiewicz 及 Emmett⁽¹³⁾ 兩位作者在所發表的文章中對低損失因子的閃光燈電路分析有標準的處理方法。首先由閃光燈的電壓—電流特性開始：

$$V = \pm K_0 |i|^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (3)$$

此方程式對小內徑的閃光燈，且電流密度大於 500Amperes/cm² 的情況下大致頗確實的。而其中 K₀ 是一個由閃光燈的幾何形狀及所充氣體種類決定的一個常

數：

$$K_0 = 1.28 \times \left(\frac{p}{450}\right)^{0.2} \times \frac{1}{d} \text{ 對氬氣閃光燈} \dots\dots\dots(4)$$
$$= 1.28 \times \left(\frac{p}{850}\right)^{0.2} \times \frac{1}{d} \text{ 對氬氣閃光燈}$$

其中 P=充氣氣壓，單位 torr。

l=閃光燈兩電極間長度

d=閃光燈內徑

K_0 值通常是在 10 到 100 歐姆—安培^{1/2} ($\Omega\text{-Amp}^{1/2}$)。

而整放電電路最簡化的近似方程式是：

$$\frac{dI}{d\tau} \pm \left[\alpha + \beta |I|^{1/2} \right] |I|^{1/2} + \int_0^{\tau} I d\bar{\tau} = 1 \dots\dots\dots(5)$$

其中 $I = \frac{i\sqrt{L/C}}{V_0}$ ，中化電流

$\tau = t/\sqrt{LC}$ ，中化時間

$\alpha = \frac{K_0}{(V_0 Z_0)^{1/2}}$ ，阻滯參數

$Z_0 = \sqrt{L/C}$ ，阻抗

$\beta = \gamma\sqrt{C/L}$ ，中化電阻

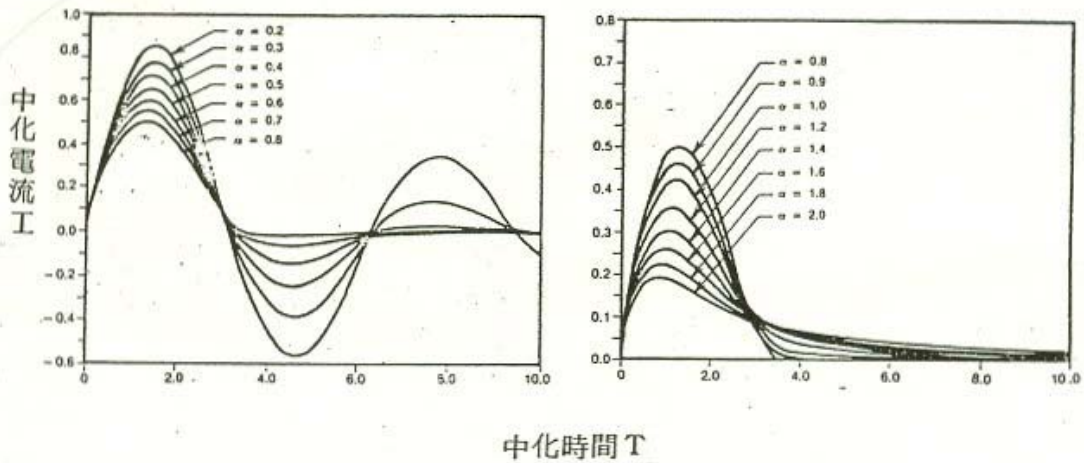
i = 放電電流，單位安培。

V_0 = 儲存電容的電壓，單位伏特。

C = 儲存電容值，單位法拉(Farad)。

L = 總電感值，單位亨利(Henry)。

r = 除閃光燈電漿阻外的總電阻值。



圖九 不同阻滯參數 α 下之中化電流與時間關係

圖九顯示 β 趨近於 0，即無電阻損失情況下放電電路的解。由於瞬時閃光燈的光功率(Optical Power) 是與閃光燈放電電流的三分之二成正比，所以圖九顯示閃光燈發出之光在不同的阻滯參數下與時間之關係。

欲得到最大的光輸出，即最大的閃光燈及雷射效益，則閃光燈放電電流脈波要在臨界阻滯振盪的情況下，即 α 值約等於 0.8 左右。如果 α 值過低，而使放電電流反向倒流則很可能會損壞到閃光燈及其他電路元件。通常設計時要取在所需最高充電電壓值下產生臨界阻滯振盪的現象為最佳。

在一個適當設計的脈波形成線路(PFN, Pulse Forming Network)中放電電路的電阻值應很低，則方程式(5)中的解可歸納成三個相互關連的方程式⁽¹⁴⁾：

$$C^3 = \frac{2E_0\alpha^4 T^2}{K_0^4} \dots\dots\dots(6)$$

$$L = \frac{T^2}{C} \dots\dots\dots(7)$$

$$V_0 = \left[2 \frac{E_0}{C} \right] \dots\dots\dots(8)$$

其中 E_0 = PFN 中儲存的電能，單位焦耳

T = 放電脈波寬的 $\frac{1}{3}$ 值，單位秒。

這個方程式是設計閃光燈放電電路最常用的，其設計步驟如下：

(1) 先知所需輸入的能量，幫併激發的脈沖寬，查出所用閃光燈之 K_0 值，則

可由(b)式得放電電容值。

(2)由(7)式中求得放電電路的電感值 L。

(3)由(8)式中求得放電電路中電容所需補充的電壓。

方程式(5)中，如果 $\beta \neq 0$ ，很難簡單的歸納出其解。雖然如此，在有限小線路電阻值的情況下，還是可以預估其解的⁽¹⁵⁾。當 β 值是一個小值時，閃光燈放電電路的效率有一個趨近線性的跌止(hold off)。如果 $\beta=0.15$ 時，其放電電路的效益約降至 90%。同時在 $\beta \neq 0$ 時，臨界阻滯振盪的現象同樣可以由減少 α 值而得到，其關係也是線性的。譬如 $\beta=0$ 時， $\alpha=0.8$ ；在 $\beta=0.4$ 時， $\alpha=0.6$ 。

β 值不等於零的其他效應有：

- (a)減少閃光燈放電電流的尖峯值。
- (b)電流的尖峯值偏移到較早的時間。
- (c)放電脈波有過份阻滯振盪現象。
- (d)增加放電脈波波寬。

在 $\beta \neq 0$ 的情況下，閃光燈線路的方程式⁽¹⁶⁾：

$$I_n = \frac{1 - \Delta\tau \sum_1^n I_{n-1} \frac{\alpha I_{n-1}}{\sqrt{I_{n-1}}} + I_{n-1} (1/\Delta\tau - \beta/2)}{1/\Delta\tau + \beta/2} \dots\dots\dots(9)$$

其中 $I_0 = 0$ ，

$\Delta\tau = 0.1$ ，代表值

可化減成符合數理邏輯的方程式，並可放入袖珍計算器或計算機中很快的求得其解。

這方程式可很方便的計算隨時間不同的放電電流變化，由此可決定改變一個線路參數所產生的影響。(譬如改變 V_0 ，而讓 α ， β ，C 及 L 不變)。

到目前為止，我們都假設閃光燈電漿是依照 $V = \pm K_0 |i|^{1/2}$ 這關係來設計閃光燈的推動電路的。然而，閃光燈的電壓與電流特性是否緊密的被閃光燈管壁所拘限而影響的。以前的討論是假設很穩的放電，即在放電電流的起始時弧光的流量即已完全充滿閃光燈的管壁了。但是這是要一種很高的燈管壁負載效應(即每公分弧距約要 100Joules 以上的能量)下才會有的。而在普通固態雷射所用的閃光燈使用情況下，這是很難得到的。

Dishington⁽¹⁷⁾ 在其發表的文章解出了低及中等程度管壁效應的影響，方程式(3)要變成

$$V = \pm K_0 \left(\frac{d}{da} \right) |i|^{1/2} \dots \dots \dots (10)$$

其中 da 是弧光的直徑。

而 da 是依照經驗公式

$$da \cong 1.5 \left[\frac{E}{1} \right]^{0.6}$$

$$E = \int_0^t iV dt \dots \dots \dots (11)$$

da 依照此公式成長一直到接觸到管壁為止，其中

$$\delta = 0.7d^{0.15} \cong \delta_c,$$

$$\delta \cong \frac{da}{d} \dots \dots \dots (12)$$

在此情況下，PFN 電路的微分方程式必須同時與下面兩式並解。

$$\frac{d\delta}{d\tau} = 1.2 \cdot \alpha \cdot \frac{E}{1} \left(\frac{1.5}{\delta d} \right)^{5/3} |I|^{3/2}, \delta \leq \delta_c$$

$$\frac{d\delta}{d\tau} = 1.2\alpha \frac{E}{1} \left(\frac{0.77}{\delta} \right)^{13} |I|^{3/2}, \delta > \delta_c \dots \dots \dots (13)$$

要解此組方程式，唯有利用計算機才能計算，其解顯示了：

- (a) 電流脈沖的尖峰值永遠比單由 PFN 電路的微分方程解的值小。(例如內徑 4 厘米的閃光燈，在每厘米 1 焦耳的管壁效應下， $\alpha=0.8$ 時尖峰電流少了 73%)。
- (b) 電流脈沖寬比單由 PFN 電路的微分方程解得的值大。(例如同(a)的情況，波寬大了 10%)。
- (c) 低阻滯振盪電路反向電流的發生值比 0.8 小，即考慮管壁效應時，臨界阻滯的 α 值小於 0.8。

在利用雷射做切割及銲接的使用上，通常要求雷射的脈寬較長，在此情況下，則要使用多圈迴路的 PFN 線路，通常三個迴路的 PFN 線路 (三個相同電容一一電感如輸送線接連) 已能供給頗方的方波了⁽¹⁸⁾。其設計的通用方程式如下：

$$T = 2N(LC)^{1/2}, N > 2$$

N=圈數

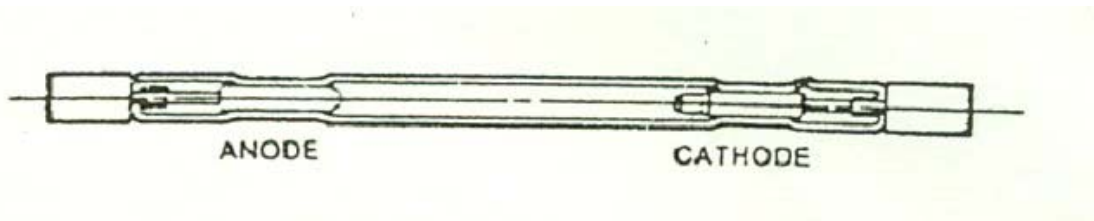
$$V_0 = 2(K_0^2 E/T)^{1/3}$$

$$C = \frac{1}{2}(ET^2/K_0^4)^{1/3}$$

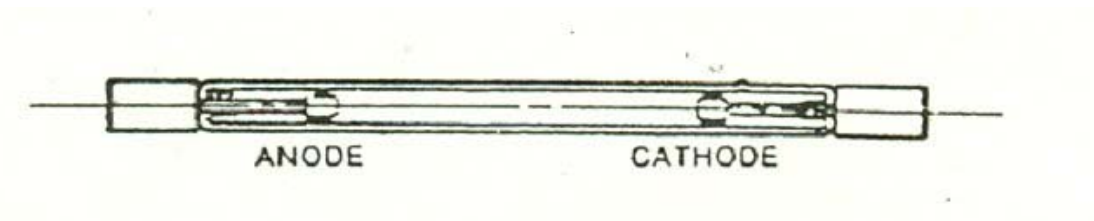
$$L = \frac{1}{2}(T^4 K_0^4 / E)^{1/3} \dots\dots\dots(14)$$

(二) 閃光燈材料的優化

圖十及圖十一顯示典型的脈沖式固態雷射所使用的閃光燈。閃光燈本身的優化包含了許多選擇，譬如管壁材料，充氣種類，壓力大小，電極形狀及大小，內徑大小，弧距長及封管的形式等。



圖十 典型的固態雷射所使用的液冷式閃光燈，內徑 5mm，弧長 5cm，450torr 氙氣

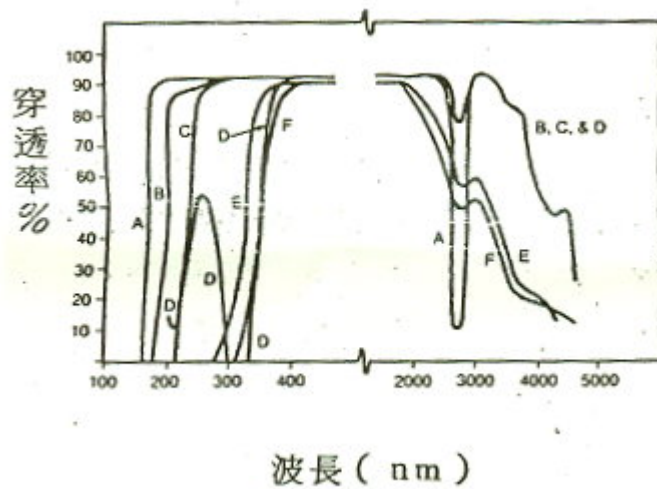


圖十一 典型的固態雷射所使用的氣冷式閃光燈，內徑 5mm，弧長 5cm，450torr 氙氣

閃光燈管壁的材料通常是用石英(quartz)，雖然用玻離做管壁的閃光燈也常被用來做照像或頻率測量儀器中使用，但玻離的管壁所能容忍的管壁負載能量較石英為小。在平均能量較高的應用上，石墨製的管壁也市頗熱門的。

圖十二顯示一些製做閃光燈管壁材料的穿透曲線，其中最通常使用的是中性(透明)熔合成的石英(natural L clear fused quar-tz)。整個石英管在製做時要注意看是否有小缺陷，以免引起突然的崩裂；這些缺陷包括了括痕，凹洞，裂縫及氣線(air lines)，有時後管壁上的長條氣泡也被常常誤認為是括痕。此外閃光燈的製造

商應說明製造時管壁不純體(impurity)水平的控制程度，以防止使用時產生過度曝光(solorization)的現象是由於管壁不純體連續吸收多量紫外輻射而造成管壁的內部陰暗，不透光，即造成閃光燈管子的一種色心現象(colour centres)，如此會逐漸降低閃光燈的有用光譜輸出，另一個惡果是由於連續吸收光能，造成管壁熱負載的效應。



- (A) 合成熔合矽石。
- (B) 中性熔合矽石。
- (C) 滲鈦的中性熔合矽石。
- (D) 滲鈷的中性熔合矽石。
- (E) “Pyrex”玻璃。
- (F) “Nonex”玻璃。

圖十二 閃光燈管壁材料的光穿透性，厚 1mm

在使用空氣當冷卻的系統中，透明熔合的石英管壁所穿透出來的紫外線會產生臭氧(Ozone)，而對 O 形環或塑膠零件造成破壞。在液冷的系統中，紫外輻射會使雷射棒產生過度曝光現象，使光反射片的材料產生暗化現象，使冷卻液酸化或產生化學的衰變，尤其是對乙二醇乙烯影響最大。由於這些原因，閃光燈的管壁通常是用吸紫外光的透效矽製成的，並含鈦原子當供給體。也因為如此，用吸收紫外線的透明矽當管壁，閃光燈的最大可容忍的內管壁負載則要減少 20%了。

此外如果用吸收不可見光能及紫外光能而放出有用的紅外光能的材料包圍在閃光燈或雷射棒上，則可增大雷射的效益。例如用滲有鈷原子的透明熔合的石英當管壁則可吸收波長在 350nm 以下的輻射；雖然滲鈷原子透明熔合的石英主要的功能是濾掉衰變冷卻液，光反射腔，及雷射棒晶體的無用且有害的輻射，它也可以在可見光譜範圍內發射有用的螢光增加雷射的效益。同樣的，可發螢光的染料亦頗有用的，如 Rhodamine 6 G 當冷卻液時，可以提高有用的光明益約 15%，可惜就只在普通的能量水平下，即約每個脈沖 10 焦耳左右，這種染料打

了將近百下就會很快的衰減壞了。

除了滲有不純體及沒有滲不純體的透明熔合石英外，高純度的合成熔成石英亦是做成閃光燈管壁很有用的材料，通常做成“Suprasil”及“Spectrosil”。這種材料有很低的不純度，所以過度曝光的阻抗性很好，而且這種材料可以做到很好的光學品質，且對紫外光譜的穿透性也很好。有些閃光燈製造商對要求高效益及長生命期者特別推介這種合成熔成石英的閃光燈。但是用這種閃光燈時要特別注意紫外線輻射的隔離，並且其價格也遠比其他透明熔成石英材料的閃光燈還貴。



圖十三 焊接式封管閃光燈

雷射用的閃光燈其封管的形式可歸納成三種形式：焊接封管，帶狀封管及圓柱(漸近)式封管。

焊接式封管通常用於製造大型的閃光燈，如圖十三是焊接式封管閃光燈，其好處是結構的組合可減少一些複雜性，且較便宜；其缺點是(1)使用時溫度不可太高，因為會影響到電極與石英的焊接。(2)使用生命期會因其只能忍受較低處理的溫度而受到限制。

帶狀封管的閃光燈，如圖十四可用於普通程度的電流應用。它們的主要好處是由於使用很厚的石英圈包圍在電極的鉬 (molybdenum)帶上，其堅硬性較強，而且此種封管較少無用容量(dead volume)；其缺點是從被封困的鉬帶上只能提供較低的脈沖式尖峰電流。

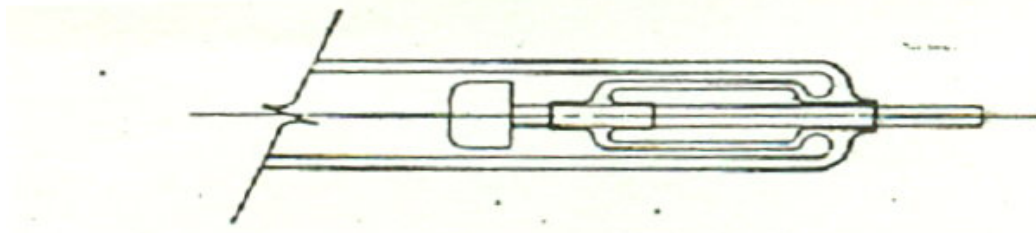


圖十四 帶狀式封管閃光燈

圓柱(漸近)式封管閃光燈最常被用在固態雷射系統上，因為它的可靠性，高

的尖峰及均方根電流及較可高的平均功率容量。如圖十及十一顯示一個通常小於4mm 直徑的鎢絲圓柱以銅鋅合金焊接成整個電極組合，而電極與石英體的封管是利用一兩種中間膨脹係數的材料幫忙焊接而成的。這種封法可容許較高的操作溫度及較高真空度的處理，使得閃光燈之可靠性及再製性大大的提高了，並且操作生命期也較長。

另一種較優異且頗有用的漸近式封管是再進入式封管(re-entrant seal)。如圖十五所示，鎢絲棒及石英再進入封固方式的典型漸近式封管。其電極頭是由銅鋅合金在封端的凸面焊接到鎢絲柱上的，而再進入式封管的石英體才熔到閃光燈的石英壁上。用此種再進入式封管的閃光燈使用到理論上會爆炸的範圍內最有可能逃脫惡運，這是因為管中放電時的壓力波有壓縮漸近式封管的趨向；如果是非再進入式封管的閃光燈，這壓力會有伸張漸近式封管的趨向。另外再進入式封管的最大好處是在管徑大於 10mm 次上的閃光燈此種封管方式是封閉電極的最方便方法。



圖十五 再進入式封管閃光燈端頭

閃光燈中最敏感的元件可以說是電極了。陽極通常是純鎢或含鈷的鎢(thoriated Tungsten)，尤其是含鈷的鎢由於易加工性，更常代用。陰極通常是施與陰極(dispenser cathode)，對較平常的用途也常用含鈷鎢絲或其他鎢絲合金。施與陰極包含了在表面注入了能降低工作函數的發射性材料的鎢絲母體，如此可使鎢絲在較低的溫度下較易放出電子。每家製造廠商都有其特有的發射材料來處理施與陰極的。

陽極及陰極的形狀也是很重要的，通常陽極是用圓凸形的，因為可以較易在其中心引發與陰極間的弧光。在功率低於 30watts/cm^2 的普通或壓縮空氣冷卻的閃光燈，電極的尖點溫度通常不會比最高臨介溫度為高。這些電極的頭可以用以鎢絲支柱的形式而且不必靠近管壁以求散熱。功率高於 30watts/cm^2 時，閃光燈通常要液冷，而石英管壁通常在電極處縮窄下來，而電極也較厚大，約有 1 至 5 公分左右。如圖十一，如此則可使冷卻液流經閃光燈時可從電極帶走較多一點得熱。閃光燈的生命期會因為電極的得不到良好散熱而大大的減低。

通常而言，在普通的電流下，較高的充氣壓力有較高的激發固態雷射的效益。使用中最高壓力達到 3000torr。一般而言，450torr 的氙氣閃光燈及 700torr 的氬氣閃光燈較普遍。因為較高的充氣壓力下，其觸發的不易程度也跟著增加了。如用氙氣閃光燈，對鈦離子亞格雷射，壓力從 1000torr 增加到 3000torr，(管徑 4mm，弧距 5cm 輸入能量約 7.5 焦耳，

放電脈寬 100 μ sec 以下效率約有 20% 的增加，而如用氬氣閃光燈，效率則約只有 10% 的增加。

重要的要注意的是決定閃光燈的阻抗及效益的是閃光燈放電時的氣體壓力而不是充氣時的氣體壓力。這個操作時的壓力是由充氣壓力，閃光燈的幾何形狀，及無用容積，如圖十六所示，而決定的。無用容積愈小，放電時的阻抗愈高，效益也愈大。另一點值得注意的是無用容積的影響在閃光燈放電脈寬達幾個毫秒或極高的平均功率下其影響是非常大的。



圖十六閃光燈中的無用容積

IV、觸擊方式的考慮

閃光燈儲存電容所充電壓 V_0 通常遠比使閃光燈管內所充氣體產生崩潰而開始放電的電壓為小。幾乎所有固態雷射所使用的閃光燈都是以如圖八所示的串聯式或並聯式等兩種方法來觸發的。兩種方法都是首先在電極間產生一個小的導流，再使主放電能產生。這個導流是由一足夠高的電壓梯度使管中氣體游離而產生的。其中穩定的參考電壓或接地面使電壓梯度能很可靠的發生。通中接地面或參考電壓是一個數圈的導電絲纏繞在閃光燈管外，而約每圈間隔一吋左右。

並聯式與串聯式觸發各有其優劣點：並聯式觸發在設計上有較大的可變性，因為其次極線圈只產生高壓脈沖並不當做 PFN 中的放電電感，價格較便宜，鐵心也較小；串聯式觸發卻有較高的穩定度，且因為高壓並不暴露在空氣中和觸發的電壓較低，所以產生的電磁干擾也較小。串聯式觸發雖可減少一個電感元件，但鐵心的選擇及大小卻也限制了設計的變化。實驗顯示，串聯式觸發其效益比並

聯式觸發大約大了 10%，其主要原因可能是較平均的游離流光所致的。

閃光燈的觸發程序如下：首先起始崩潰產生在一端或兩端電極上，由電壓的梯度產生，游離放電開始後，導流沿接地面傳導向另一電極。當小導流形成後，整個弧光再由中心向管壁擴張。並聯式觸發導流由兩電極向電極中央部分進行，在那導流將要形成一單一流光時停止了；因為兩個導流的電位相同，而沒有力量推使它們合一。這種不游離的小距離間隙也許正是並聯觸發比串聯式觸發較不穩定的主要原因。

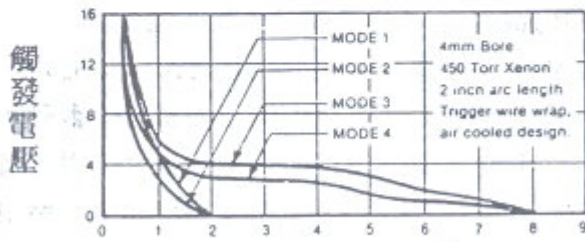
很難能精確的定義觸發脈沖的需求；每一閃光燈都有如圖十七所示的觸發特性曲線。然而即使是最嚴密的製做程序控制下，不同的閃光燈也是會有不同的觸發曲線。一個簡單的通則如下：(1) 穩定觸發所要的電壓因所充氣體壓力之增加而增加。(2) 穩定的串聯式觸發電壓並聯式觸發電壓為低。(3) 隨閃光燈使用時間的增加穩定的觸發電壓要稍大，這是因為管壁材料的剝落所產生的氧及水氣所產生的污染所至。在設計時觸發線路時要非常保守的，通常要設計在閃光燈觸發電壓的兩倍以上，以確保有種定的觸發。

除了觸發電壓及儲存電容電壓（即閃光燈的端電壓）外，其他不同極性的組合也頗重要的。如圖十七所示，不同的線路極性及閃光燈和觸發脈波極性的組合。

閃光燈觸發另一個要考慮的因素是要穩定產生導流的觸發脈波波寬。這值通常是每一吋弧長要 $100 \eta s$ ，如果觸發脈波寬不夠，則雖然放電電路的能量很高，其觸發也會是不規則的，甚至不能觸發。

觸發線或接地平面的安排對弧光的穩定度和弧光最亮部份射到雷射棒的影像有很大的影響。接地平面應環繞管壁且愈平均愈好，實驗顯示較平均的接地平面下閃光燈的生命期也較長。

MODE	COMMON ELECTRODE	POLARITY	
		POWER SUPPLY	TRIGGER PULSE
1	CATHODE	PLUS	PLUS
2	CATHODE	PLUS	MINUS
3	ANODE	MINUS	PLUS
4	ANODE	MINUS	MINUS



閃光燈端電壓 (KV)

圖十七閃光燈觸發極性的安排及觸發電壓與閃光燈端電壓的關係

V、效益優化後閃光燈生命期的考慮

如圖十八所示，閃光燈的生命期與閃光燈輸入能量有很密切的關係。每一根閃光燈都有其爆炸能量，雖然文獻裏有許多不同的經驗方程式⁽¹⁹⁾，其中最普遍的是：

$$K_{\theta} = f(d) \cdot l \cdot d$$

= 閃光燈爆炸能量常數

$$f(d) = \text{爆炸限制常數} \dots \dots \dots (15)$$

□ 24600，對 d < 8mm

□ 17000，對 d □ 19mm

l = 弧距，單位公分

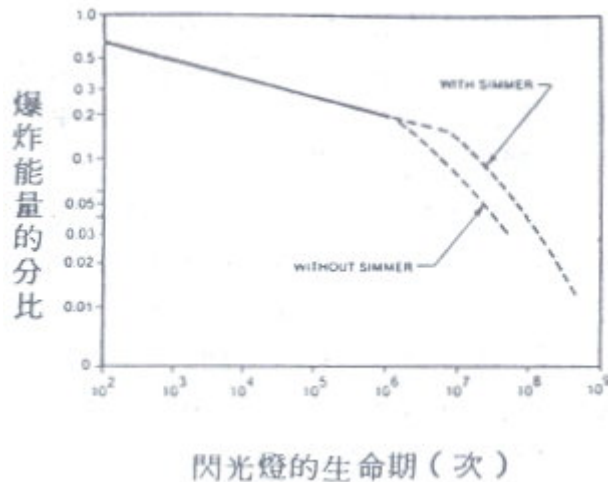
d = 徑寬，單位公分

對臨界振盪，小損失閃光燈推動電路：

$$E_x = K_{\theta} (T)^{1/2}, = \text{單脈沖爆炸能量} \dots \dots (16)$$

$$T = \sqrt{LC}$$

單脈沖爆炸能量的大小隨所充氣壓之增大而增加，以上公式中皆假設氣壓力為 300 到 500torr。



圖十八 閃光燈脈沖爆炸能量的分比與閃光燈生命期的關係

閃光燈有兩個不同的失效模限。在較高的輸入能量範圍 ($0.2E_x$ 到 $1E_x$) 閃光燈的生命期受張伸張應力，封管強度，管壁材料剝除及崩裂而限制。此時閃光燈生命期依照如下公式：

$$\text{生命期} = (E/E_x)^{-\beta} \dots\dots\dots (17)$$

$$\beta \square 8.5 \text{ 對 } d > 6\text{mm}$$

$$\beta \square 14 \text{ 對 } d \geq 15\text{mm}$$

然而實驗的差異值頗大的，甚至有超過 E_x 兩倍或更多的爆炸能量。以上的生命期方程式最適合脈寬超過 $200 \mu \text{sec}$ 的情況，有跡象顯示當脈寬小於 $10 \mu \text{sec}$ 時以上的估計可以說是過份樂觀的清其值應大大的減低。同樣的，如果尖畢功率超過某些界限同時管壁剝落的現象發生時，以上的估計則也要降低。並且如果電流上升大於 $100\text{A}/3 \mu$ 時，管壁的損害會很快的發生了。

在低輸入能量時，(即 $< 0.2E_x$) 閃光燈的生命期是受到電極的潑潑 (Sputtering)，施與陰極的衰損，及石英管壁的長期污染所影影。在此情況下，有幾個方缺可以增加閃光燈的生命期：(1) 把閃光燈以微小長時導通小電流方式操作，(2) 增加充氣壓力以減少電極的潑潑，(3) 使電極及管壁有較好的冷卻。

管壁的剝落是由於內管壁在放電時其溫度超過了界限溫度，這是因為每一脈沖發生時管壁內有瞬間的高尖峰功率發生之故。

充氬氣的閃光燈較充氙氣的閃光燈產生管壁剝落現象所需的尖峰功率較低；並且氬氣閃光燈的從電能轉換成光能的效率較氙氣閃光燈來得低。所以使用氬氣閃光燈時為了要達到相同的效益，通常管壁內會產生較高的管壁溫度，管壁

剝落現象也無可避免的會較屬命了。

對 450torr，的氬氣閃光燈，下表是一個減少管壁剝落增大閃光燈生命期的最大尖峰電流：

管徑 (mm)	尖舉電流 (Amperes)
2	100
3	220
4	450
5	600
6	750
7	900

管內壓力大時尖峰電流可稍大，但管內壓力降低時則尖舉電流要降低。如充氣由氬氣換成氬氣則尖峰電流值要減少 20%左右。

此外如果閃光燈放電脈寬大於 2ms 時陰極會很快的衰壞掉，尤其又是高功率的狀況下，唯有改變陰極材料或電極形狀才可改進。

VI、閃光燈的其他考慮因素

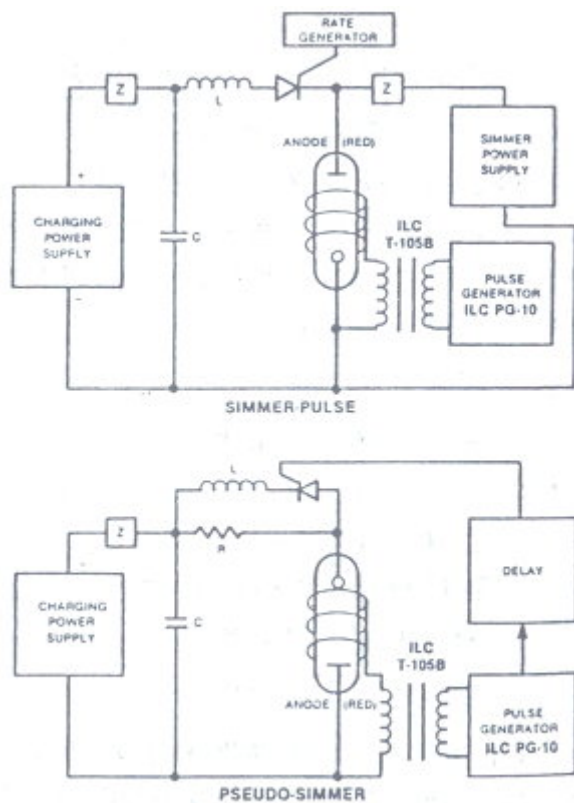
在高連續工作率及高操作功率狀況下，小常通電流的操作情況可以有如下的好處⁽²⁰⁾：

- (1) 較高的雷射效益。
- (2) 較大的閃光燈生命期。
- (3) 脈沖有較穩定的重複性及弧光形成較穩。
- (4) 可工作在更大的連續工作率。

圖十九顯示典型的小常通電流及假小常電流 (Pseudo-simmer mode) 操作方式電路。小常通電流脈沖的操作是隨時維持一個小功率直政電，電流從 20mA 到 5A 左右，而真正的脈沖能量是由 SCR 控制放到閃光燈中。實驗得知，以小常通電流方式操作其效益會增大 20%或更多。其現象在小輸入能量時最明顯，而到高尖峰電流狀況下其效應漸減，這是因為小常通電流弧光所產生的紫外輻射的影響。

小常通電流操作閃光燈會增大雷射效益的原因可歸納是因為小常通電流使弧光通路阻抗小且拘限在燈管的中央，這使主放電脈沖有較大的電流密度及較大的效益。這點也可由小常通電流方式其連續輻射遠大於線性輻射證明。

在較低的連續工作率的狀況下，小常通電流頗浪費的。通常用一假常通電流操作方式取代，如圖十九閃光燈如平常狀況觸發，但其放電電流先由一電阻 R 控制在 50mA 之小值，約



圖十九 典型小常通電流及假常通電流電路

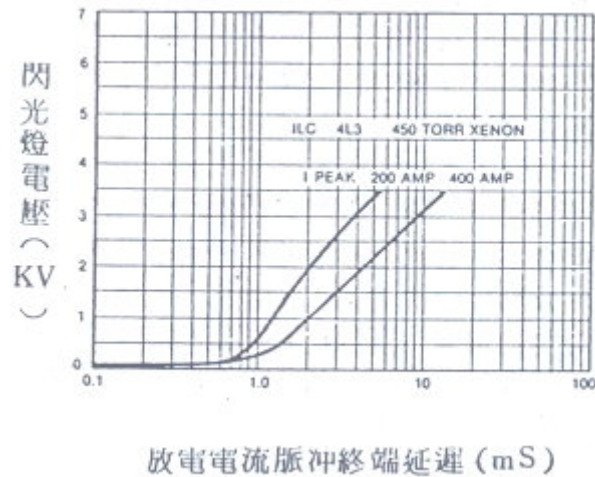
100 μ sec 到 200 μ sec 左右，然後電阻 R 為 SCR 短路再由真正主放電產生，在此狀況下，效率曾達 15~20% 的增加。

小常通電流方式操作時，在固定電流下，電壓是電極工作函數的一個變數，所以選擇閃光燈時要注意閃光燈是否要用在小常通電流方式下，否則閃光燈會過熱。最好是如圖十中的電極，且電極材料要特別處理，這才會增加閃光燈的生命期及穩定性。

第三種增加閃光燈輸出功率的方法是先小脈沖式的使閃光燈放電⁽²¹⁾，(Pre-pulsing)，實驗證明其效果與小常通電流方式差不多，不過還要經過先放電小脈沖高度，脈寬及延遲時間的優化。

閃光燈在高連續工作率下使營時要特別注意其恢復時間。如圖二十，當閃光燈脈沖放電接由於放電時的不穩態離子的緩慢變化，閃光燈的內阻有一段延遲的

時間內會很小。此時如果 PFN 繼續充電，則閃光燈會有一大直流電流導通，這可用振盪充電電路來防止，使充電電路在這段時間內不充電，或是在 PFN 線路中設計自動停止放電的裝置以避免受閃光燈內阻減少而繼續導電的情況發生⁽²²⁾。在放電頻率大於 500Hz 以上，閃光燈的恢復時間是最大的困難因素。



圖二十 典型的閃光燈恢復時間曲線

另一限制閃光燈連續脈沖放電率的因素是閃光燈內部的聲頻振盪。高頻率放電時的聲頻壓力波會使閃光燈的弧光中斷或打壞燈管⁽²³⁾。改進的方法就是增加閃光燈的內徑⁽²⁴⁾或改變充氣壓力或增加小常通電流量。

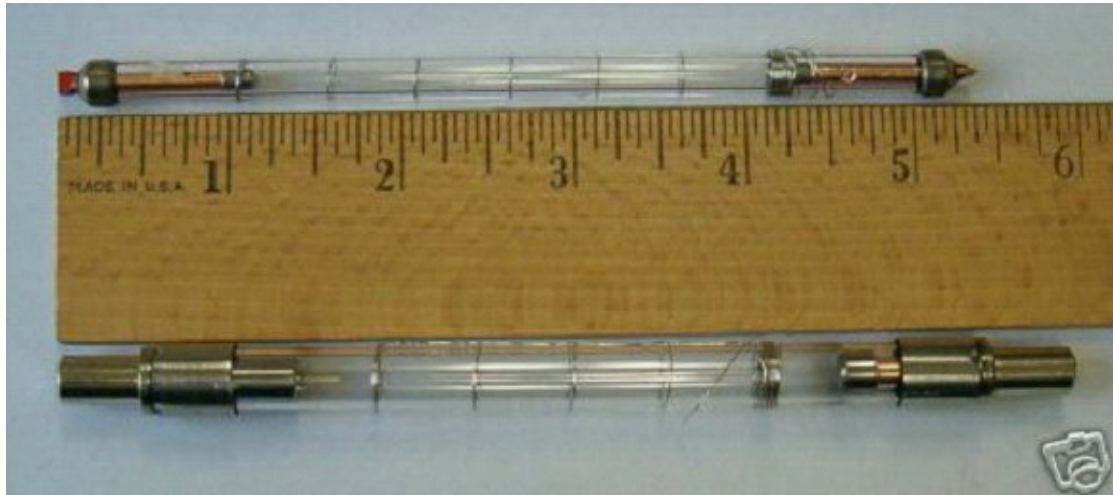
在使用高頻率放電閃光燈時以石墨做管壁有較多的好處，尤其在小能量，液冷式的雷射系統更有效。與石英來比其尖峰功率甚可大於兩倍以上，而閃光燈的生命期尚不會受到影響。

參考資料

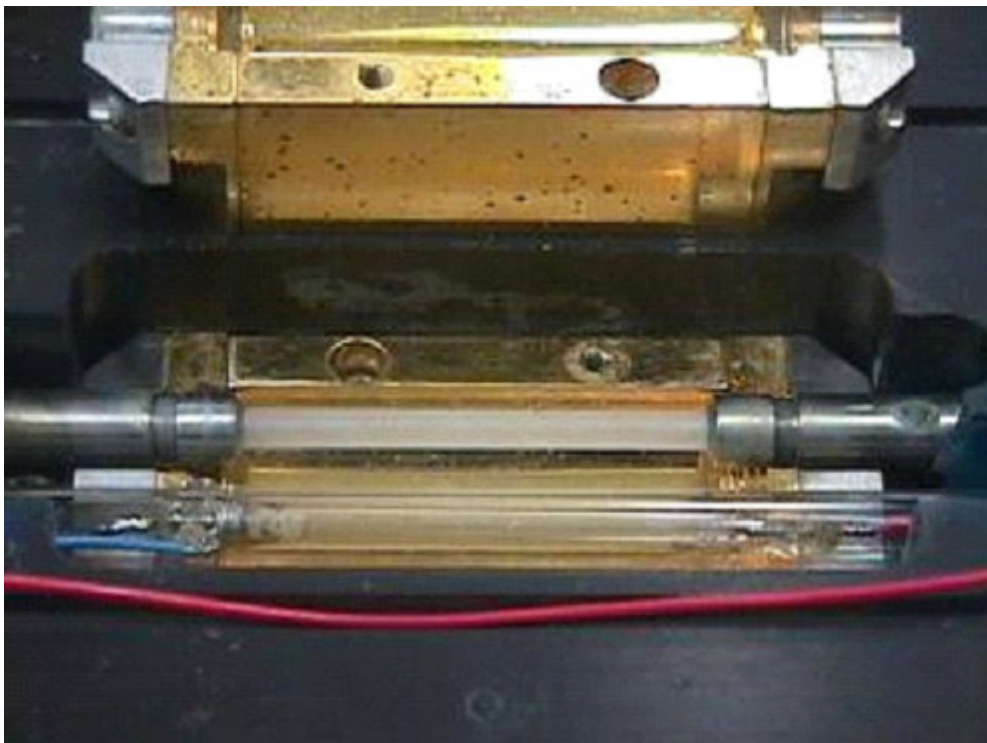
1. W. Koechner, "Solid-Stat Laser Engineering", Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 1976.
2. Yu A. Kalinin and A. A. Mak, Sov.J. of Opt. Tech., Vol. 37, page 129, 1970.
3. Appl. Opt. Vol. 20, No. 6. P.968, 1980.
4. L. Noble, et al, ILC Technology Tech. Rpt. ECOM-O239-F, October, 1973.
5. Bulletin 1524, Sunnyvale, CA : ILC Technology.
6. S. Yoshi Kawa, et al, Appl. Opt. Vol. 10, page 1620, 1971.
7. D. C. Brown, "High Peak Power Nd : Glass laser Systems", Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlay, 1981.

8. J. H. Goncz and P. B. Newell, J. Opt. Soc, Am. Vol. 56, page 87, 1966.
9. J. H. Trenholme and J. L. Emmett, "Prcc, 9th Intern. Conference on High Speed Photography", SMPPIE, page 299, 1970.
10. J. L. Emmett, et al, J. Appl. Phys. Vol, 35, page 2601, 1964.
11. J. H. Kelly, et al, Appl. Opt. Vol. 19, page 3817, 1980.
12. P. A. Lovoi, "Advance in Laser Technology", SPIE, Vol. 138, page 2, 1978.
13. J. P. Markiewicz and J. L. Emmett, IEEE J. Q. E. Vol. 2, page 707, 1966.
14. ILC Technology, An Introduction to Flashlamps, Sunny Vol, CA.
15. J. F. Holzrichter and J. L. Emmett, Appl. Opt. Vol. 8, page 1459, 1969.
16. J.L. Tuner, Engineering Note #111, Sunnyvale CA. ILC Technology.
17. R. H. Dishington, et al, Appl. Opt. Vol. 13, page 2300, 1974.
18. D. E. Perlman, Rev. Sci. Instr. Vol. 37, page 340, 1966.
19. V. M. Podgaetskii and B. V. Skvortsov. Sov. J. of Q. E. Vol. 2, page 359, 1973.
20. ILC Technology, Liquid Cooled. Flashlamp Bulletin, Sunny vale CA.
21. ILC Technology, Prepulse Engineering Note, Sunnycal CA.
22. H. E. Edgerton and D. A. Cahlander, J. of SMPTE, Vol. 70, page 7, 1961.
23. N. L. Yeamans and J. E. Creedon, Tech. Rpt. ECOM-3043, Nokember 1968.
24. C. F. Gallo and J. E. Courtney, Appl, Opt. Vol. 6, page 939, 1967.

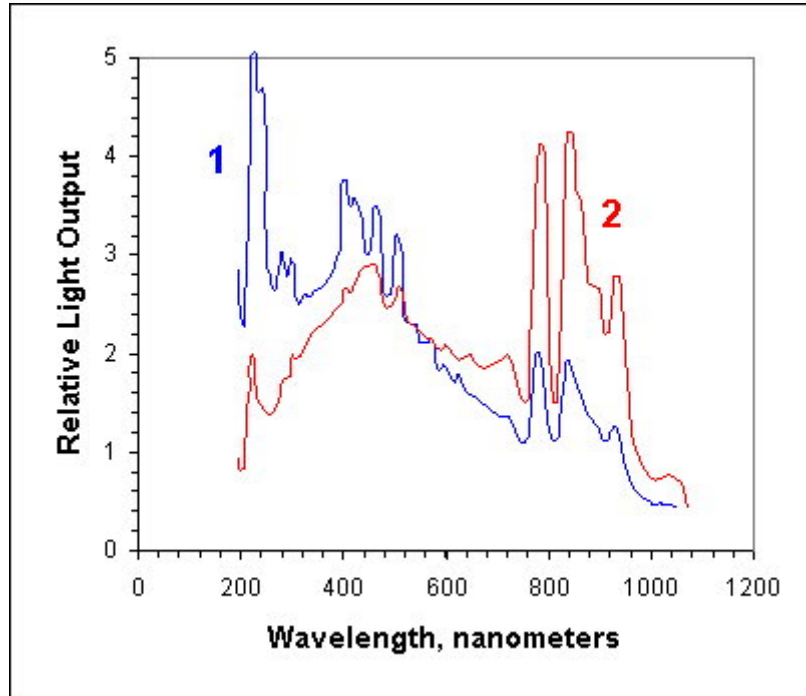
兩種雷射測距儀使用的激勵雷射閃光燈，其電極型狀的不同，與使用時之起始放電弧徑、最大電流大小及發射光譜皆有相關連。而且更應注意的是閃光燈管壁上所纏繞的觸擊發電位線，更有應用的奧妙，其間距大小、正負高壓驅動等更是閃光燈發射光譜匹配與雷射輸出效益最重要因素。



典型雷射測距儀使用的激勵雷射閃光燈，與雷射棒所組成的雷射腔照片。



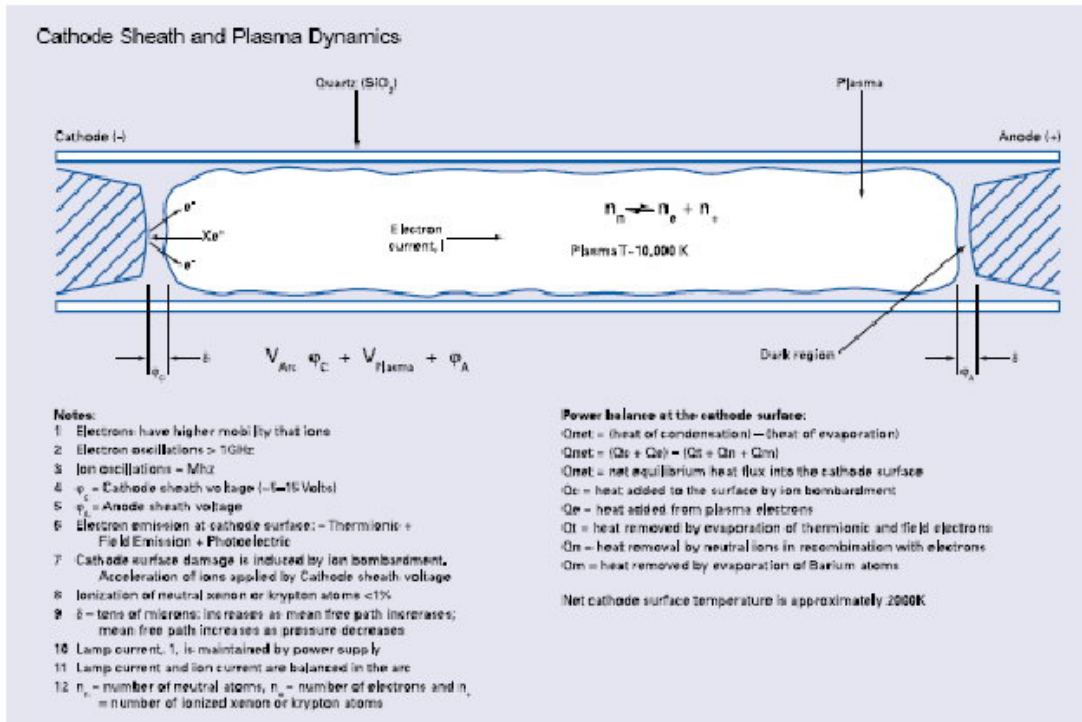
閃光燈管壁上所纏繞的觸擊發電位線，其間距大小、正負高壓驅動等是閃光燈發射光譜偏短波長(1)及偏長波長(2)，如下圖所示，使其匹配雷射棒吸收光譜帶而影響到雷射輸出效益最重要因素。



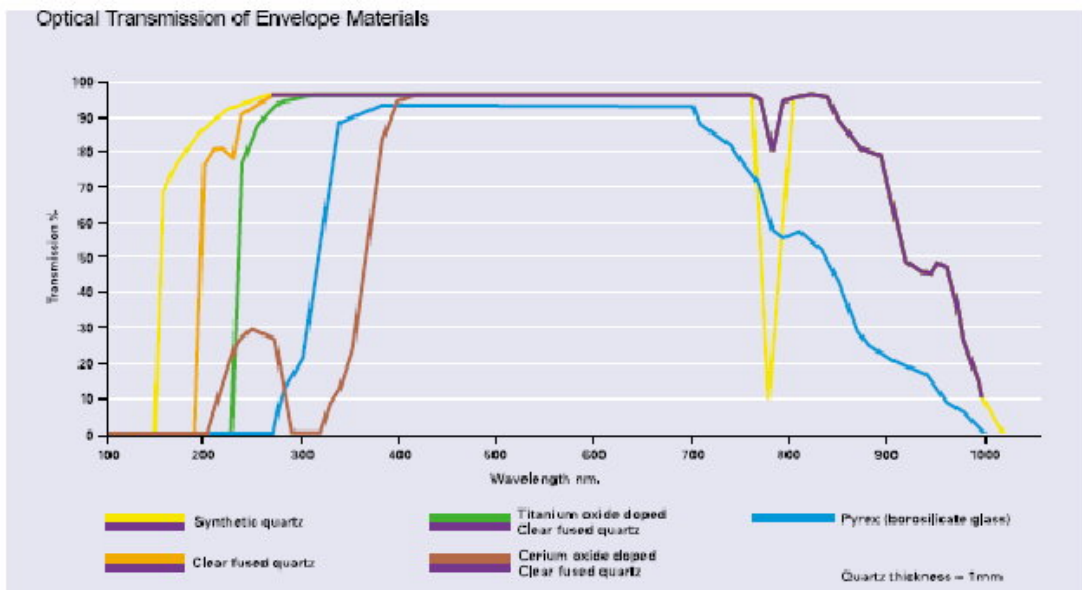
閃光燈其電極型狀的不同，與使用時之起始放電弧徑、最大電流大小及發射光譜皆有相關連。下圖示各類閃光燈其不同的電極型狀。



下圖示各類閃光燈其不同的電極型狀，所引起的起始放電電漿弧徑形成的結果。



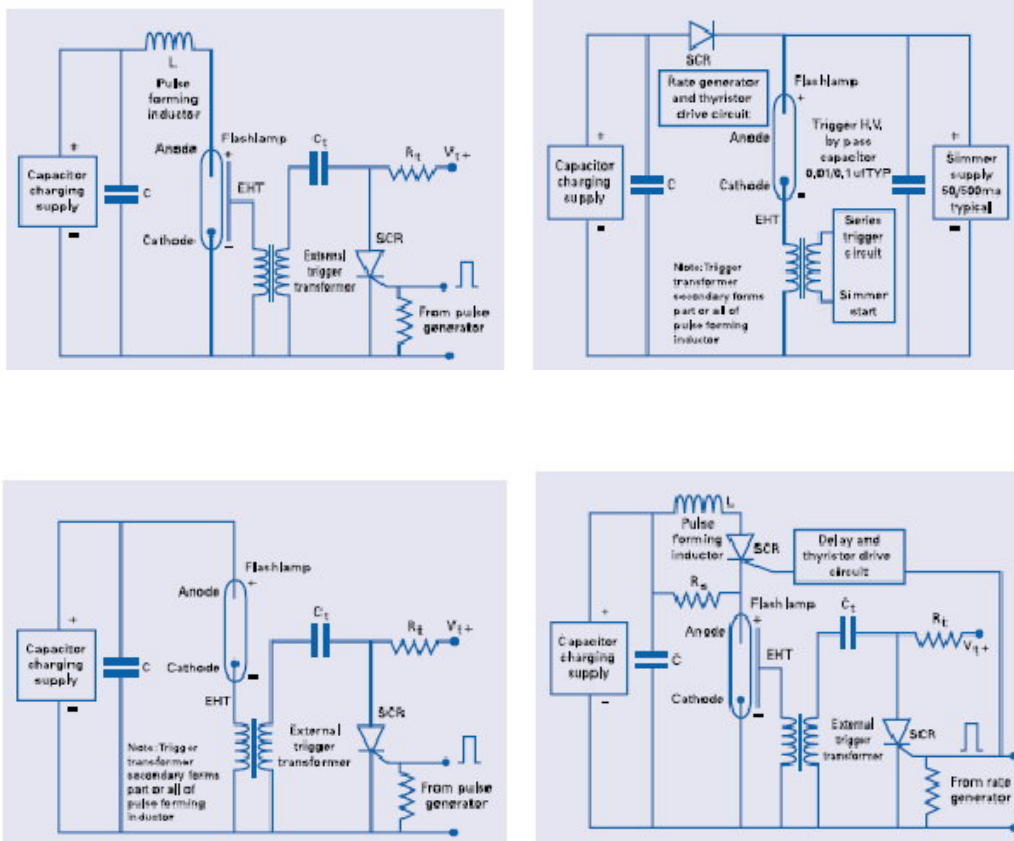
此外，閃光燈其外壁玻璃材料的不同，與使用時之閃光燈發射光譜穿透率、雷射棒激勵光吸收及雷射效率皆有相關連。下圖示各類閃光燈其不同的外壁玻璃材料的光譜穿透率。

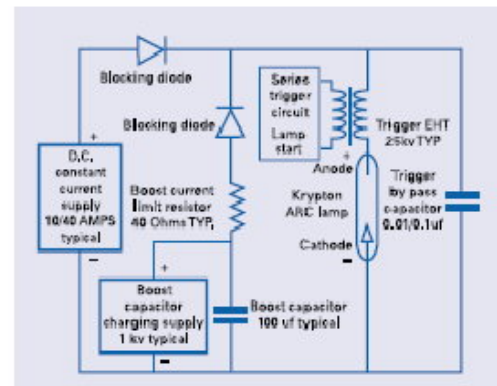
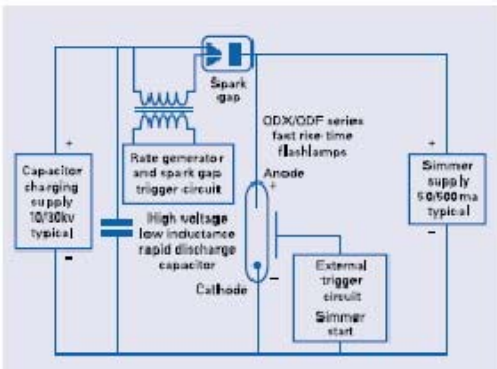
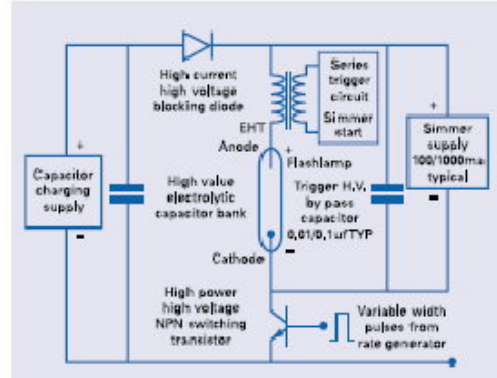
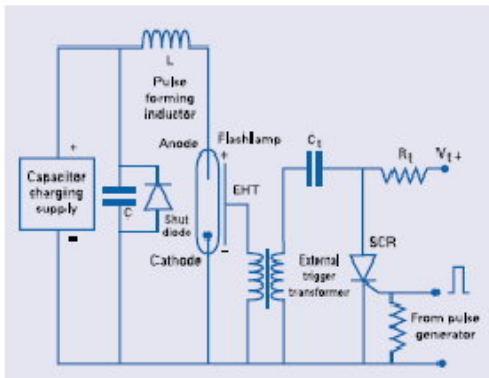


另外閃光燈其內外徑壁的不同粗細，與使用時之閃光燈放電電流大小、閃光燈待發細微電流大小、及閃光燈暴裂最大電流、雷射激勵效率等等皆有相關連。下圖示各類閃光燈其不同的外徑壁玻璃的粗細，與使用時之閃光燈放電電流大小、閃光燈待發細微電流大小、及閃光燈暴裂最大電流等之相關連表。

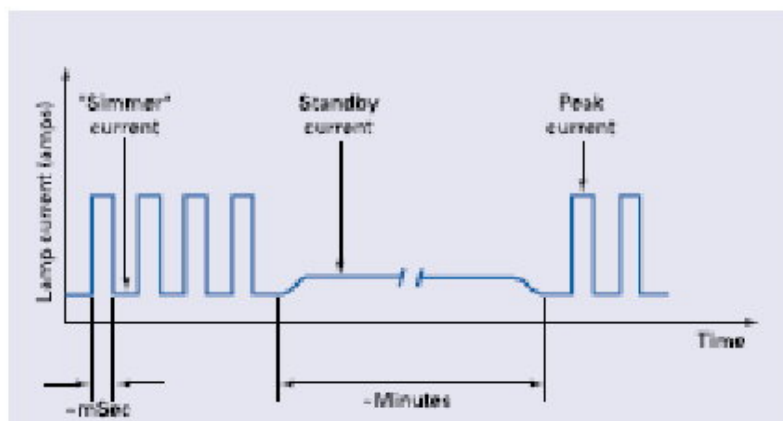
Bore (mm)	Recommended Maximum Peak Current (Amps)	Recommended Nominal Peak Current (Amps)	Minimum "Simmer" Current (Amps)	Minimum Standby Current (Amps)	Recommended Maximum Wall Loading (Watt/cm ²)
3	12	10	1	5	320
4	24	20	2	10	320
5	33	30	3	15	320
6	45	40	5	20	320
7	56	50	10	28	320
8	73	65	20	33	320

當然，閃光燈的應用最重要是激勵雷射。所以如何去驅動它放電發光，非常重要。而且由於它是高壓氣體管，要用多少電壓才可以觸擊擊發動，它電漿形成及放電電流大小、閃光燈發射光譜對雷射激勵效率等等皆有相關連。下圖是各類閃光燈我們曾使用過之閃光燈驅動電路。





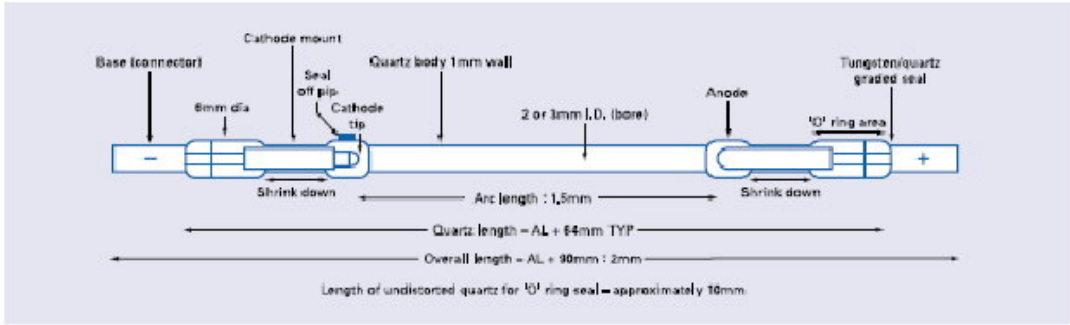
下圖是閃光燈放電的時序圖，我們不但可以看到單一閃光燈放電的脈衝，也可以看到閃光燈放電的脈衝串，閃光燈待發細微電流大小等等，更重要的它的脈衝率(PRF pulse repetition frequencies)更是鎖碼雷射的要素。



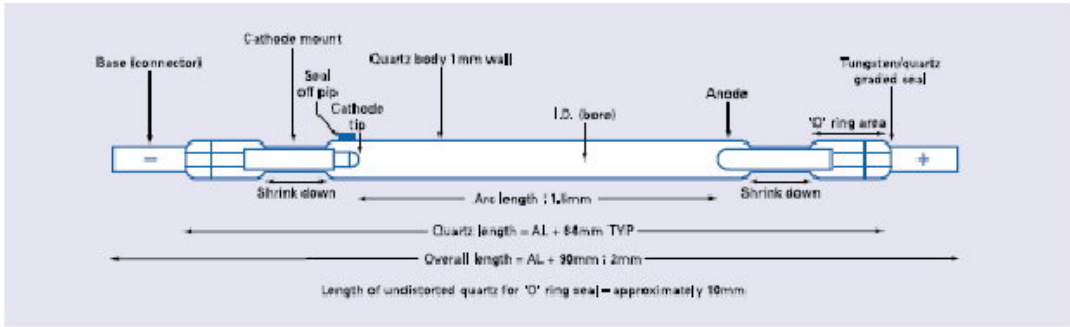
最後，我們擷錄重要測距導引雷射所用的閃光燈規格，以供參考應用。

QXF SERIES

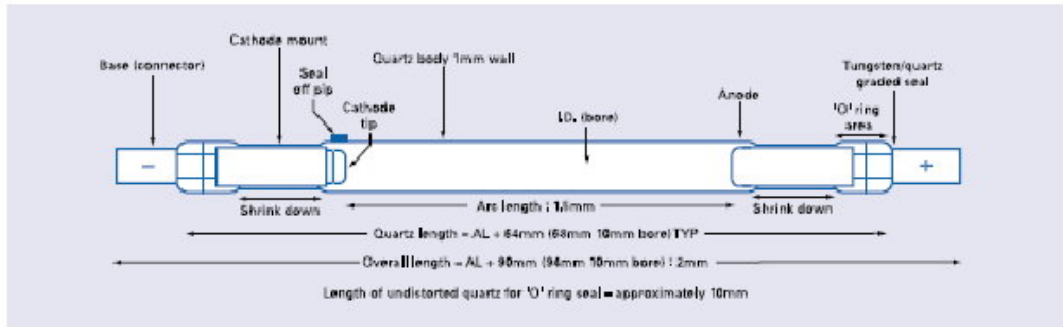
Liquid Cooled, Xenon Filled Flashlamps for High Average Power, Medium Peak Power Operation



Bore Diameter (mm)	Arc Length (mm)	Overall Length (mm)	Base Size Dia/Length (mm)	Impedance Parameter K_p Ohms-Amps ^{0.5}	Explosion Energy Const. K_e Watts (sec) ^{0.5}	Maximum Average Power (watts)	Maximum Average Power (amps)	Operating Volts V min	Operating Volts V max	Minimum Trigger kV	Pulse msec
2	25	115	4.75/13	16.0	1.23×10^4	314	125	400	1400	16	0.2
2	50	140	4.75/13	32.0	2.46×10^4	626	125	500	1750	16	0.4
2	75	165	4.75/13	48.0	3.69×10^4	943	125	600	2100	16	0.6
3	25	115	4.75/13	10.7	1.84×10^4	471	280	400	1400	16	0.2
3	50	140	4.75/13	21.3	3.69×10^4	943	280	500	1750	16	0.4
3	75	165	4.75/13	32.0	5.53×10^4	1414	280	600	2100	16	0.6
3	100	190	4.75/13	42.7	7.38×10^4	1885	280	700	2450	16	0.8



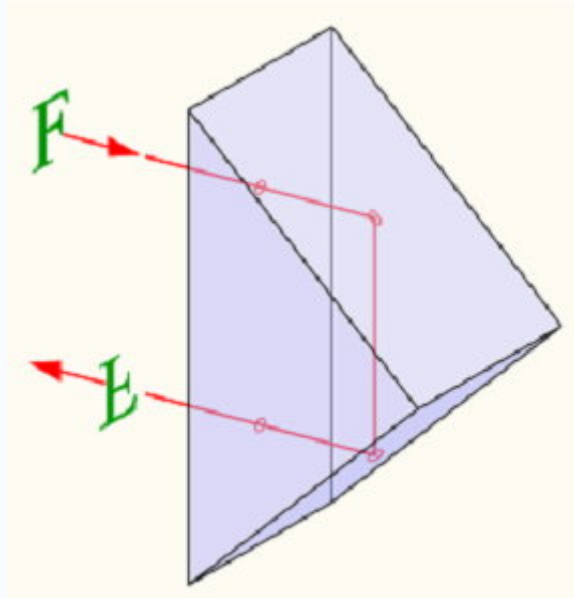
Bore Diameter (mm)	Arc Length (mm)	Overall Length (mm)	Base Size Dia/Length (mm)	Impedance Parameter K_p Ohms-Amps ^{0.5}	Explosion Energy Const. K_e Watts (sec) ^{0.5}	Maximum Average Power (watts)	Maximum Average Power (amps)	Operating Volts V min	Operating Volts V max	Minimum Trigger kV	Pulse msec
4	25	115	7.14/13	8.0	2.46×10^4	626	500	400	1400	16	0.2
4	50	140	7.14/13	16.0	4.92×10^4	1257	500	500	1750	16	0.4
4	75	165	7.14/13	24.0	7.38×10^4	1885	500	600	2100	16	0.6
4	100	190	7.14/13	32.0	9.84×10^4	2514	500	700	2450	16	0.8
4	125	215	7.14/13	40.0	1.23×10^5	3142	500	800	2800	16	1.0
5	50	140	7.14/13	12.8	6.15×10^4	1571	800	500	1750	16	0.4
5	75	165	7.14/13	19.2	9.22×10^4	2357	800	600	2100	16	0.6
5	100	190	7.14/13	25.6	1.23×10^5	3142	800	700	2450	16	0.8
5	125	215	7.14/13	32.0	1.53×10^5	3928	800	800	2800	16	1.0
5	150	240	7.14/13	38.4	1.84×10^5	4713	800	900	3150	16	1.2



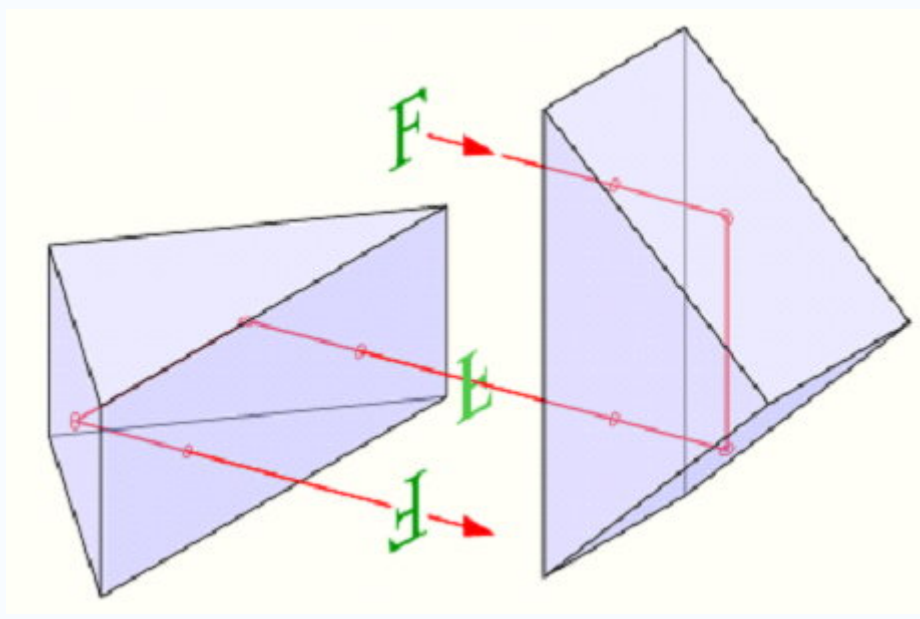
Bore Diameter (mm)	Arc Length (mm)	Overall Length (mm)	Base Size Dia/Length (mm)	Impedance Parameter K_a Ohms-Amps ^{0.5}	Explosion Energy Const. K_{exp} Watts (sec) ^{0.5}	Maximum Average Power (Watts)	Maximum Average Power (amps)	Operating Volts V min	Operating Volts V max	Minimum Trigger kV	Pulse msec
6	50	140	7.14/13	10.7	7.38×10^6	1885	1100	500	1750	16	0.4
6	75	165	7.14/13	16.0	1.10×10^7	2828	1100	600	2100	16	0.6
6	100	190	7.14/13	21.3	1.47×10^7	3770	1100	700	2450	16	0.8
6	125	215	7.14/13	26.7	1.84×10^7	4713	1100	800	2800	16	1.0
6	150	240	7.14/13	32.0	2.21×10^7	424	1100	900	3150	16	1.2
6	200	290	7.14/13	42.7	2.95×10^7	566	1100	1100	3650	16	1.6
7	75	165	7.14/13	13.7	1.29×10^7	3299	1400	600	2100	18	0.6
7	100	190	7.14/13	18.3	1.72×10^7	4399	1400	700	2450	18	0.8
7	125	215	7.14/13	22.9	2.15×10^7	5499	1400	800	2800	18	1.0
7	150	240	7.14/13	27.4	2.58×10^7	6598	1400	900	3150	18	1.2
7	200	290	7.14/13	36.6	3.44×10^7	8798	1400	1100	3650	18	1.6
8	75	165	7.14/13	12.0	1.47×10^7	3770	1800	600	2100	18	0.6
8	100	190	7.14/13	16.0	1.96×10^7	5027	1800	700	2450	18	0.8
8	125	215	7.14/13	20.0	2.46×10^7	6284	1800	800	2800	18	1.0
8	150	240	7.14/13	24.0	2.95×10^7	7541	1800	900	3150	18	1.2
8	200	290	7.14/13	32.0	3.93×10^7	10054	1800	1100	3650	18	1.6
8	250	340	7.14/13	40.0	4.92×10^7	12568	1800	1300	4550	18	2.0
8	300	390	7.14/13	48.0	5.90×10^7	15082	1800	1500	5250	18	2.4
10	75	169	7.14/13	9.6	1.57×10^7	4713	2800	600	2100	20	0.6
10	100	194	7.14/13	12.8	2.10×10^7	6284	2800	700	2450	20	0.8
10	125	219	7.14/13	16.0	2.62×10^7	7855	2800	800	2800	20	1.0
10	150	244	7.14/13	19.2	3.15×10^7	9426	2800	900	3150	20	1.2
10	200	294	7.14/13	25.6	4.20×10^7	12568	2800	1100	3650	20	1.6
10	250	344	7.14/13	32.0	5.25×10^7	15710	2800	1300	4550	20	2.0
10	300	394	7.14/13	38.4	6.30×10^7	18852	2800	1500	5250	20	2.4
10	450	530	7.14/13	57.6	9.45×10^7	2121	4242	2100	7350	20	3.6

(d) 雷射共振腔 Porro resonator

下圖是我們計畫中，雷射共振腔中所用到最重要雷射元件組，Porro prism pair, Porro 稜鏡組雷射共振腔。下圖，是 Porro 稜鏡元件的結構及功能示意圖。

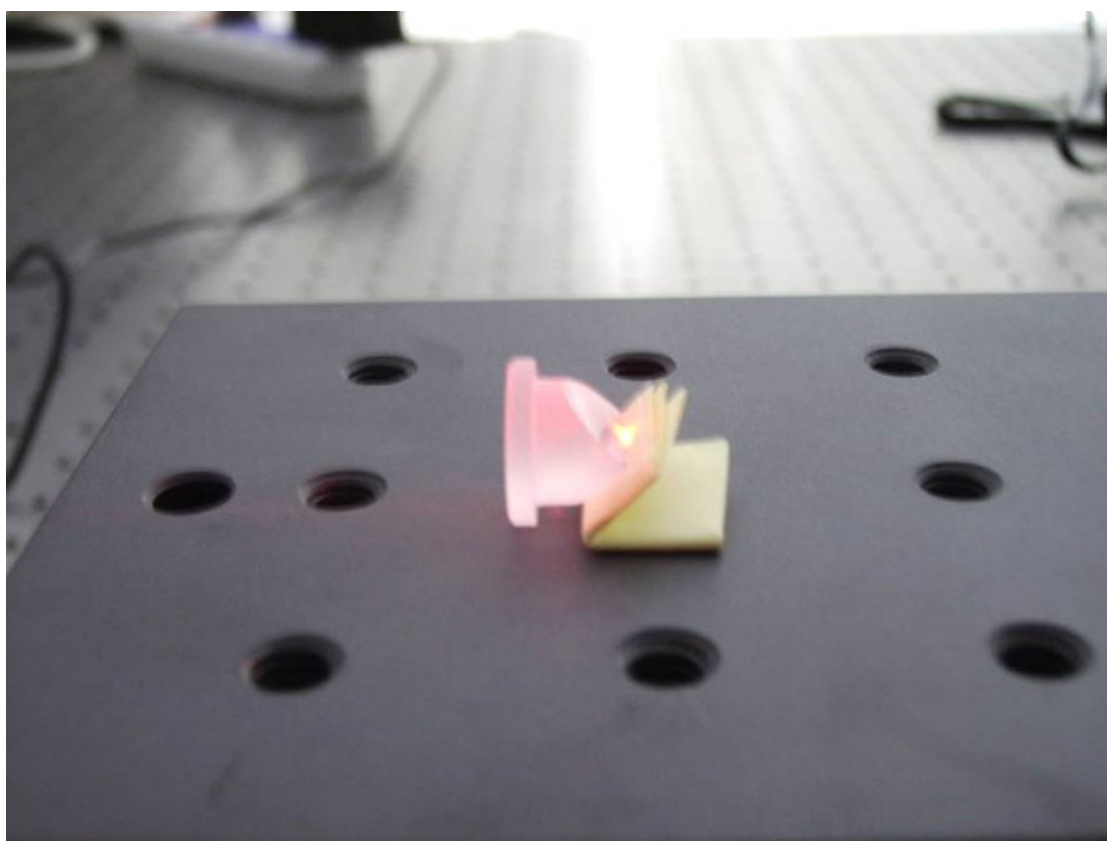
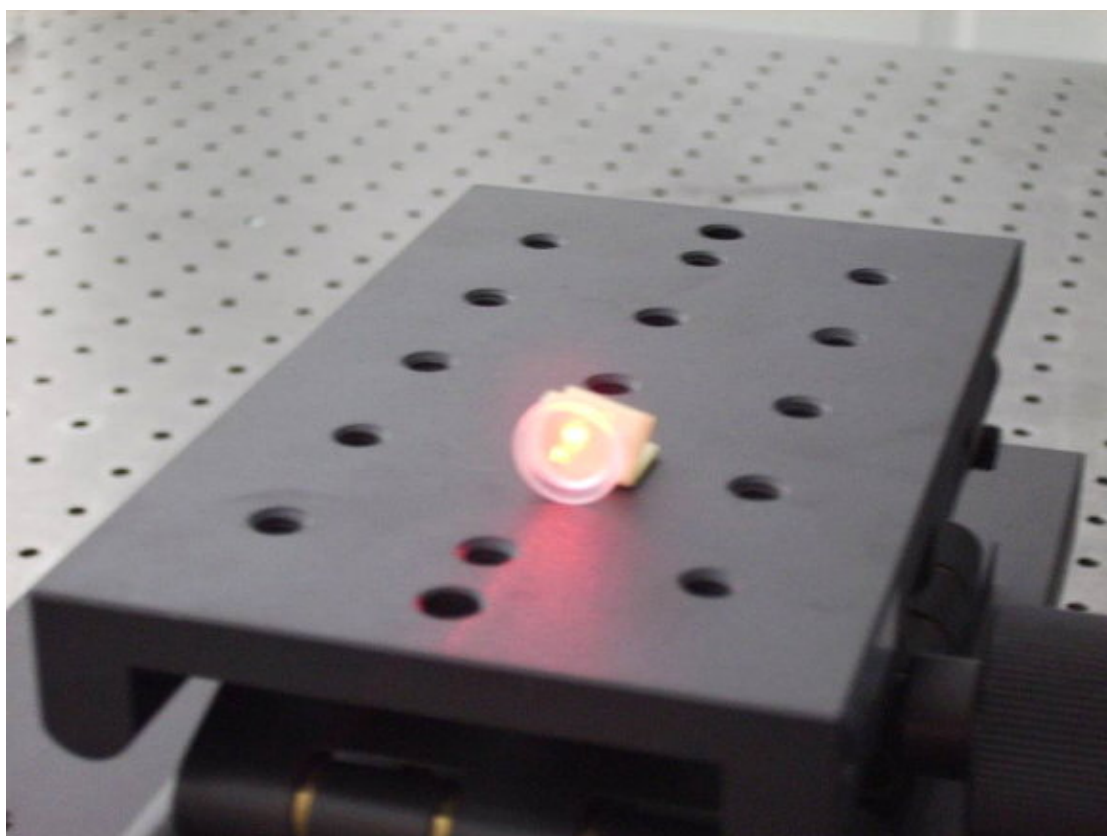


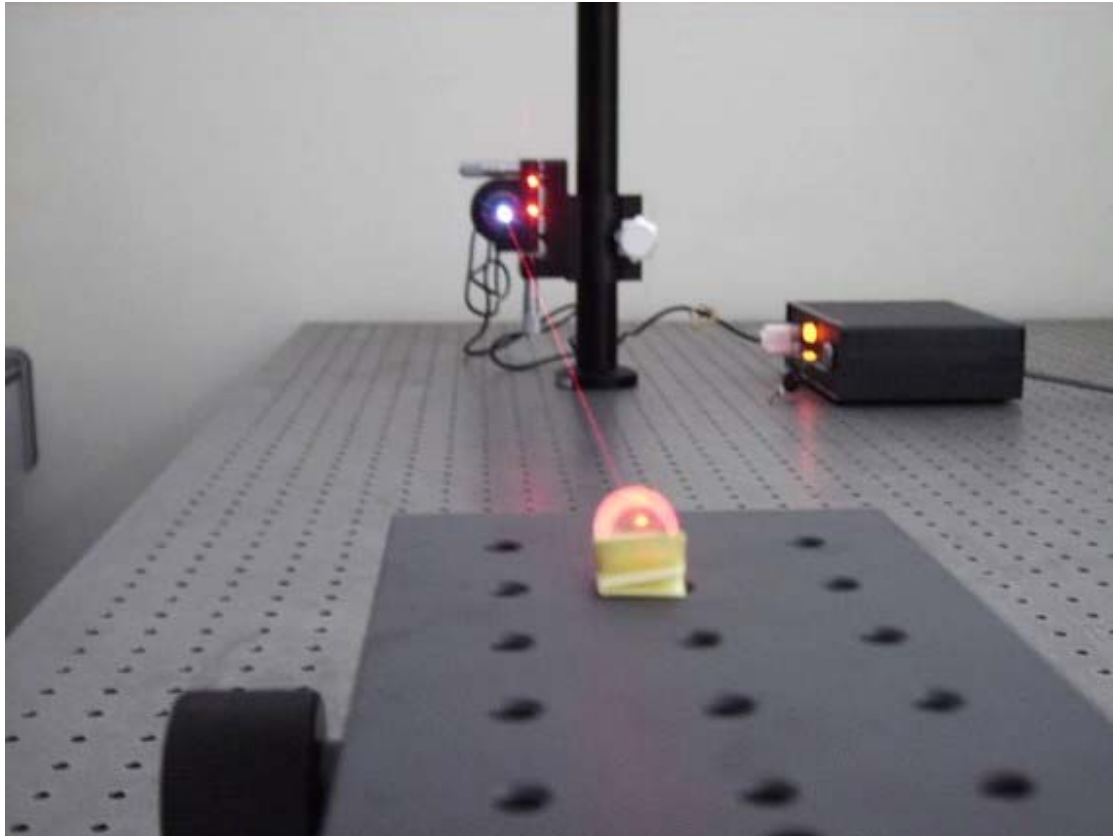
我們也可以看到，當 Porro 稜鏡元件是對稱的一對時，它的結構及功能示意圖如下：



下三張照片是我們在實驗室所拍攝的雷射腔用 Porro 稜鏡元件，它的實際照

片及功能結果照片。

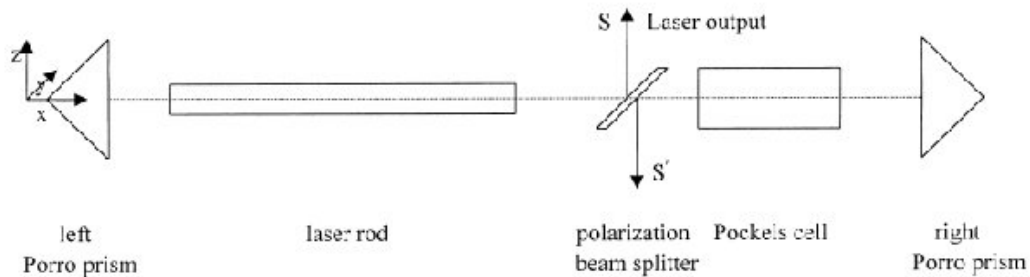
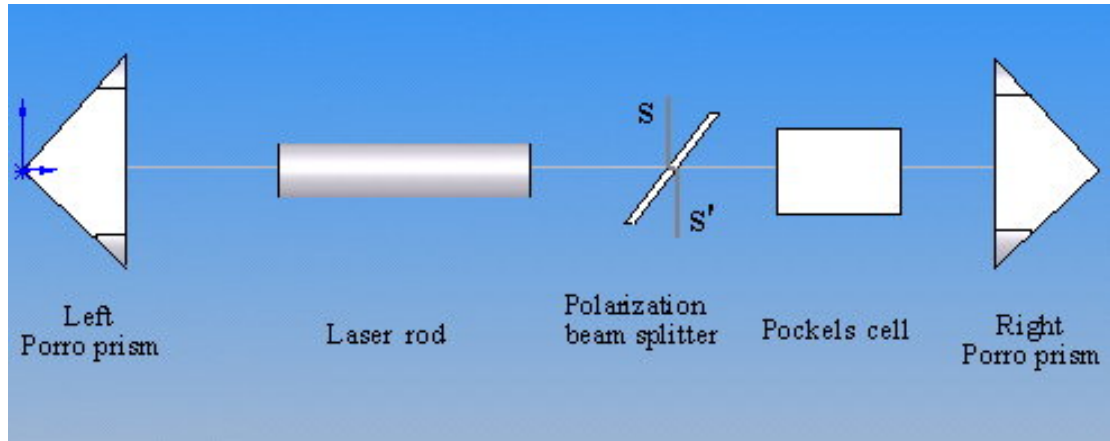




事實上，Porro 稜鏡組成的雷射共振腔，有最重要的雷射共振腔特性，也就是，它可以利用兩個稜鏡對角直線，相對的垂直夾角大小與雷射共振腔內相位元件(phase plate)，組成偏極性的雷射光腔內輸出的可連續變化的輸出率大小。這是商用，且尤其是軍品雷射使用時，優化調整雷射最大輸出能量最有效的機制。另外 Porro 稜鏡組成的雷射共振腔，更重要的雷射共振腔特性，也就是，它的兩個稜鏡組成的雷射共振腔，它的對光失調(misalignment)忍受度最大。由其用在軍品雷射使用時，要求雷射穩定性高、對光失調忍受度大、以及長時間不要微調優化雷射輸出時，更需要用 Porro 稜鏡組成的雷射共振腔。

以下是我們就 Porro 稜鏡組成的雷射共振腔，做理論分析及實際架構雷射輸出的量測優越點的結果報告。

基本 Porro 稜鏡組雷射共振腔是如圖一所示的四個光學雷射元件所組成：其中兩個 Porro 稜鏡是共振鏡片組，雷射棒是核心材料，以及一個偏極分光雷射輸出光件。



Porro 稜鏡組共振腔，是由一對端反射面相對且平行的兩個 Porro 稜鏡組成的。其中這兩個 Porro 稜鏡，是要依共振腔內偏極光相位的變化，而要對應旋轉的。並由一個偏極分光片，做雷射輸出的導引。當然共振腔中還要有雷射棒，以及可以做巨脈沖 Q-值調制的 Pockels cell 光電晶材。Porro 稜鏡組共振腔，最重要的優點是，它對共振腔光學元件的失調(misalignment)有較大的穩定度(insensitivity)⁽¹⁾。此外 Porro 稜鏡組共振腔，其他的優點還有：更小的 diffraction loss，利用 Porro 稜鏡組端角線的轉動，可連續轉調輸出導引比值(output coupling ratio)⁽²⁾。

在雷射的 Porro 稜鏡組共振腔架構中，靠左側第一個 Porro 稜鏡的端角線，是調置於 X 軸的水平面上。而靠右側的第二個 Porro 稜鏡的端角線，是調置於與 X 軸的 XZ 平面有一個 δ 角度，其中 β 角是介於 0° 與 90° 間的數值。且共振腔中其輸出穿透率值(resonator transmittance)，可由 Jones Matrix 乘式計算偏極光矩陣、Porro 稜鏡組矩陣、再一偏極光矩陣的方式計算：

$$M_{prp} = M_p M_r M_p$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & jB \\ jB & A^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{Bmatrix} A \\ 0 \end{Bmatrix}$$

其中 $A = \cos(P/2) + j\sin(P/2)\cos(2\beta)$,

$$B = \sin(P/2)\sin(2\beta),$$

A^* 是 A 的共軛複數,

P 是隨折射率改變的 Porro 稜鏡內相位偏移角,

β 是 Porro 稜鏡與水平軸夾角,

M_r 是 Porro 稜鏡的行列式

M_p 是偏極光的行列式

所以對 Porro 稜鏡其相位偏移角與全反射的關係為：

$$P = \pi + 4 \tan^{-1} \{ [\cos i (\sin^2 i - n^{-2})^{1/2}] / \sin^2 i \}$$

其中 i 是稜鏡的入射角， n 是稜鏡的折射率。由於 Porro 稜鏡其 roof angle 是 90° ， i 是 45° ，所以當稜鏡的折射率不是 $2^{1/2}$ 時，都會有一特定的相位偏移角。

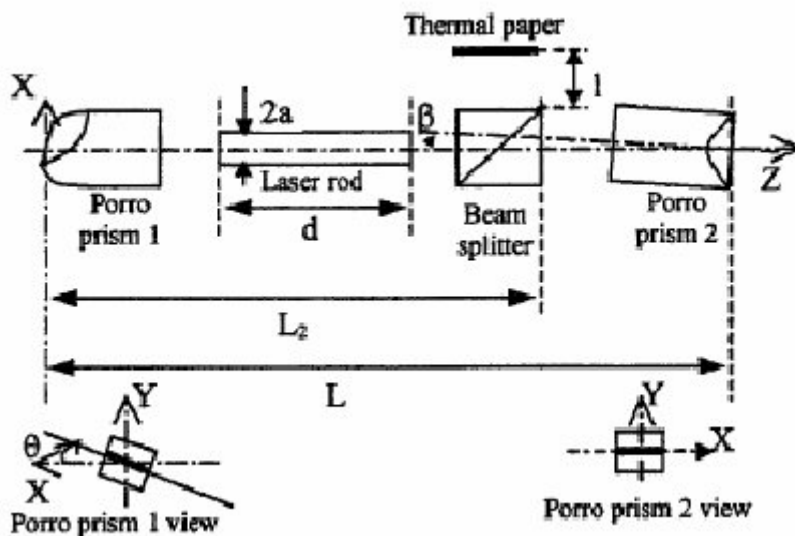
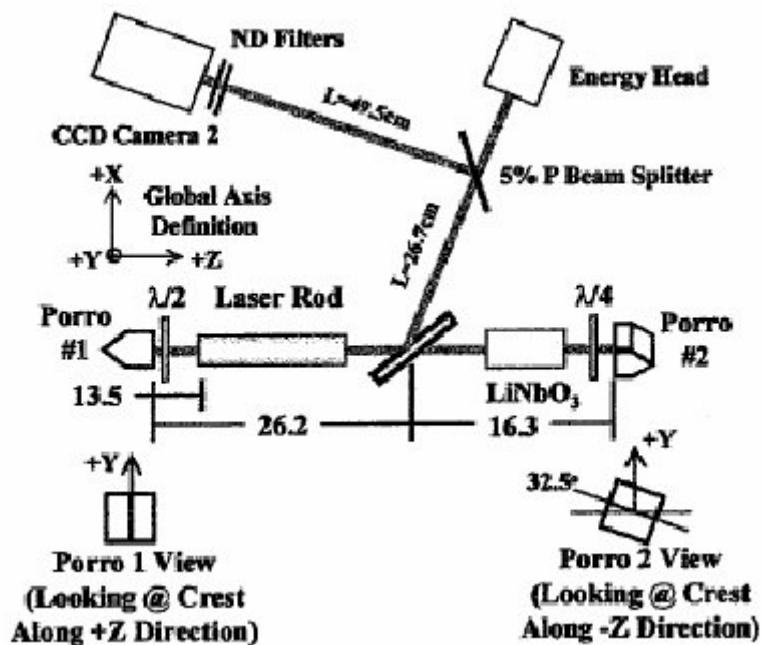
因此，其有效反射率 R 為：

$$R = M_{prp}^* M_{prp}$$

$$= \cos^2(P/2) + \sin^2(P/2)\cos^2(2\beta) \text{-----}(1)$$

可知反射率，是水平夾角 2 倍 β 的函數，並且會隨 Porro 稜鏡折射率而改變。所以我們可以知道，Porro 稜鏡其共振腔中雷射的輸出率，是與水平夾角有關的連續變化。至於最高雷射輸出能量，當然我們可以計算及實測，知道它是介於 Porro 稜鏡水平夾角 0° 與 90° 間的數值。

下列雷射的架構是我們做 Porro 稜鏡共振腔雷射系統的研究用。



而下表是 Porro 稜鏡共振腔兩個稜鏡對角直線，相對的垂直夾角大小與雷射共振腔內相位元件(phase plate)，組成偏極性的雷射光腔內輸出的可連續變化的輸出率大小。另外 Porro 稜鏡組成的雷射共振腔，它的兩個稜鏡組成的雷射共振腔，它的對光失調(misalignment)忍受度量測的優異結果。

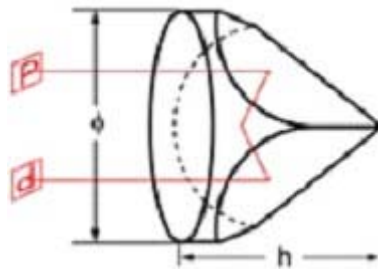
TABLE I
OPTICAL AXIS DIRECTION FOR VARIOUS
MISALIGNMENT ANGLES OF PORRO PRISM 2

Porro 1 Azimuth angle (θ ,deg)	Porro 2 Horizontal misalignment angle (β , Arc min)	Output beam direction about Y-axis (Arc min)		Output beam direction about Z-axis (Arc min)	
		ASAP	Analytical solution	ASAP	Analytical solution
30	-5	5	5	-2.8887	-2.8888
	-4	4	4	-2.3094	-2.3094
	-2	2	2	-1.1548	-1.1547
	0	0	0	0.0000	0.0000
	2	-2	-2	1.1547	1.1547
	4	-4	-4	2.3094	2.3094
	5	-5	-5	2.8887	2.8888
45	-5	5	5	-5.0006	-5.0000
	-4	4	4	-4.0002	-4.0000
	-2	2	2	-2.0000	-2.0000
	0	0	0	0.0000	0.0000
	2	-2	-2	2.0000	2.0000
	4	-4	-4	4.0000	4.0000
	5	-5	-5	5.0000	5.0000

(e) 雷射三面直角稜鏡 Corner cube

本雷射共振腔中所用到，另一重要雷射元件就是三面直角稜鏡 Corner cube prism。它是由三個互相垂直的平面(three mutually perpendicular surfaces)以及一個直角三角形的斜邊平面(hypotenuse surface)所構造的全反射光學雷射元件。它是利用光的全反射原理(total internal reflection, TIR)，只要從有效入射孔徑(effective aperture)進入的光線會被三個直角平面全反射(reflected by the three roof surfaces)，而且從輸入光線同一平面(emerges from the entrance/exit surface)平行射出(parallel to itself)。所以三面直角稜鏡 Corner cube prism，是一個非常重要的雷射共振腔中所用到的雷射光學元件。

下圖是我們計畫中，雷射共振腔中所用到重要雷射光學元件，三面直角稜鏡 Corner cube prism，其元件的結構及功能示意圖。



而其主要的元件材料及規格如下列：

Material BK7 Grade A optical glass

Dimension Tolerance +0.0, -0.2 mm

Clear Aperture >85%

Deviation 3 arc sec

Flatness 1/4 @632.8 nm on big surface

1/10 @632.8 nm on other surfaces

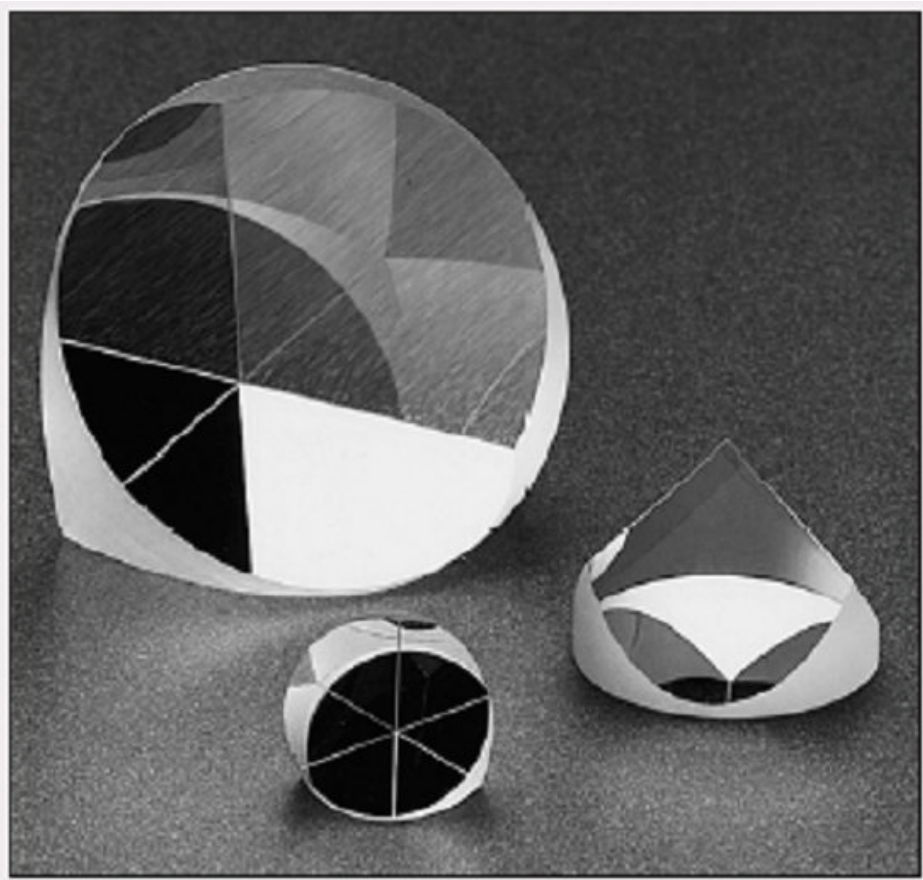
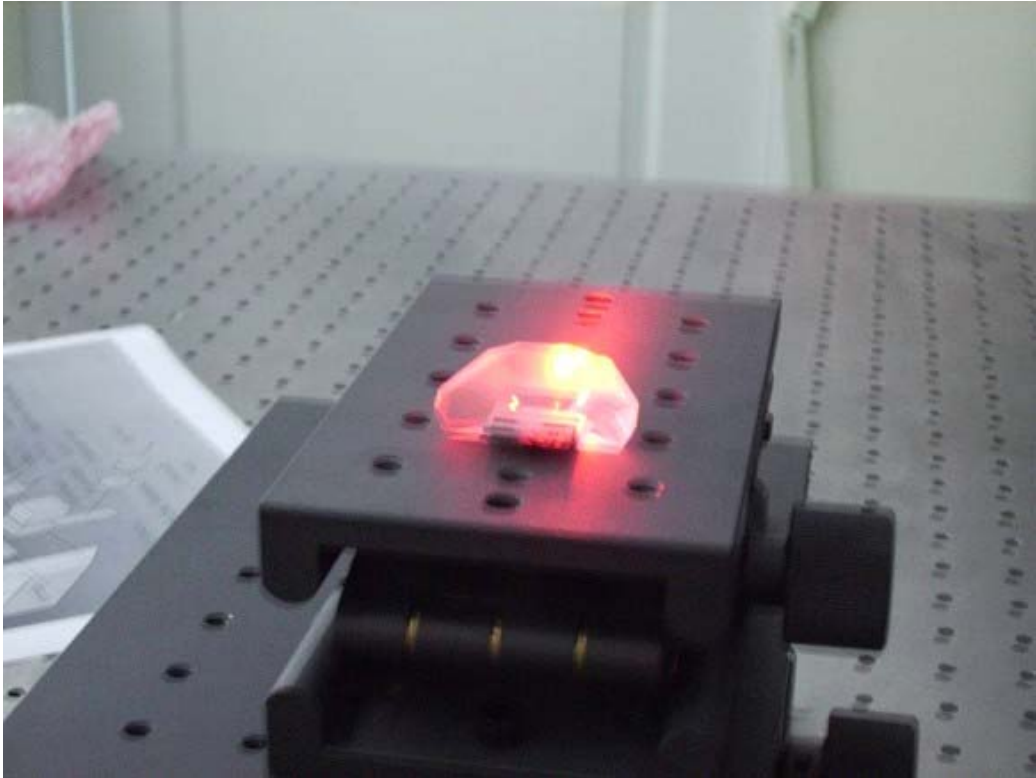
Surface Quality 60-40 scratch and dig

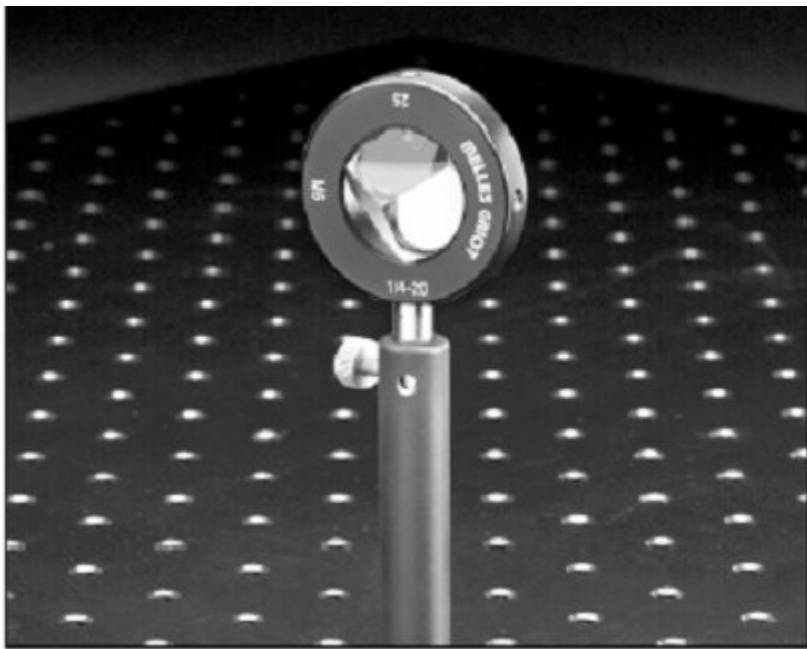
Wavefront Distortion 1/2 @632.8nm

Bevel 0.2 mm to 0.5 mm

special size and coating are available upon request

以下三張照片是我們在實驗室所拍攝的三面直角稜鏡 Corner cube prism 雷射腔用元件，它的實際照片及功能結果照片。

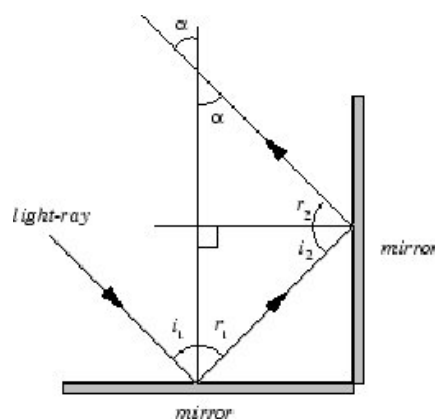






事實上，三面直角稜鏡 Corner cube prism 組成的雷射共振腔，有最重要的雷射共振腔特性，特點是它由三個互相垂直的平面(three mutually perpendicular surfaces)以及一個直角三角形的斜邊平面(hypotenuse surface)所構造的全反射光學雷射元件。它是利用光的全反射原理(total internal reflection, TIR)，只要從有效入射孔徑(effective aperture)進入的光線會被三個直角平面全反射(reflected by the three roof surfaces)，而且從輸入光線同一平面(emerges from the entrance/exit surface)平行射出(parallel to itself)。

以下是我們就三面直角稜鏡 Corner cube prism 的雷射共振腔，做理論分析及實際架構雷射輸出的量測優越點的結果報告。



從幾何圖形結構中(from trigonometry)

$$i_2 = 90^\circ - r_1.$$

且由光反射定律：

$$r_1 = i_1 \quad i_2 = r_2,$$

及

$$r_2 = 90^\circ - i_1.$$

可得到

$$\alpha = 90^\circ - r_2.$$

所以

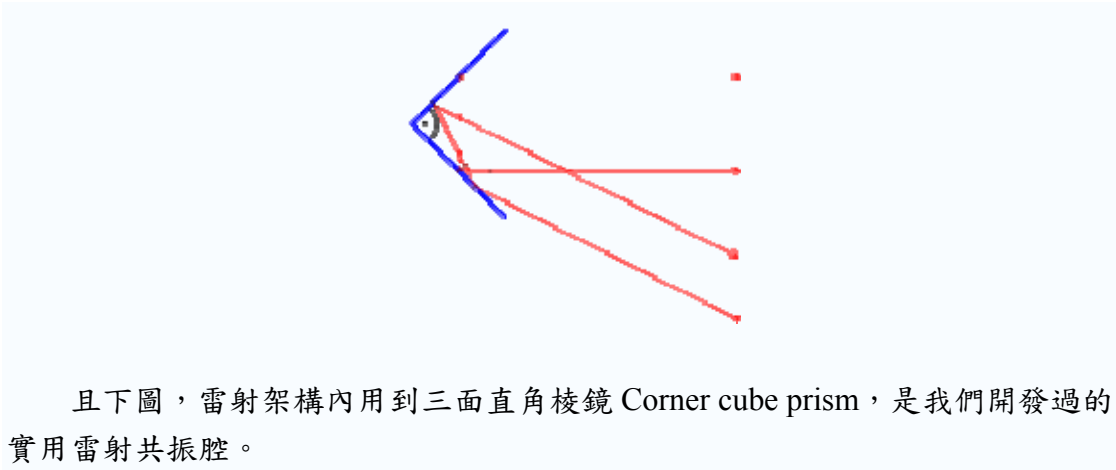
$$\alpha = 90^\circ - (90^\circ - i_1) = i_1.$$

可得到證明

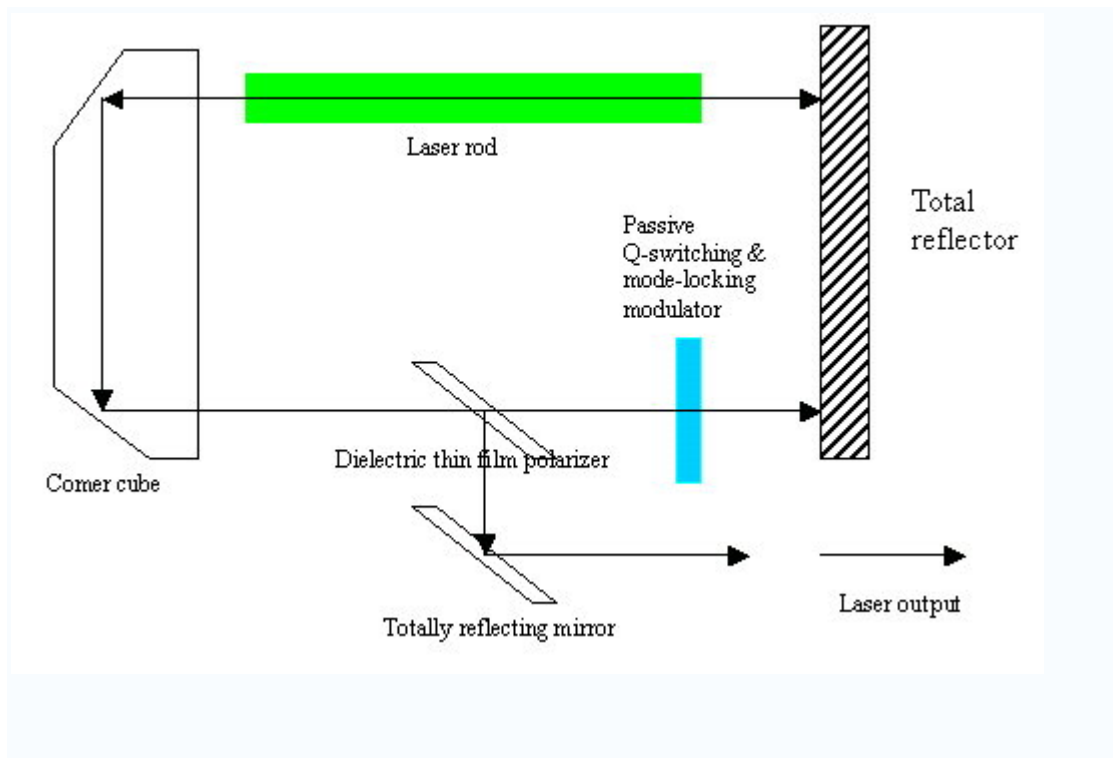
$$\alpha = i_1$$

可知任何只要從有效入射孔徑(effective aperture)進入的光線會被三個直角平面全反射(reflected by the three roof surfaces)，而且從輸入光線同一平面(emerges from the entrance/exit surface)平行射出(parallel to itself)。

下圖是一大角度的功能示意圖，可知任何只要從有效入射孔徑進入的光線會被三個直角平面全反射，而且從輸入光線同一平面平行射出(parallel to itself)。



且下圖，雷射架構內用到三面直角稜鏡 Corner cube prism，是我們開發過的實用雷射共振腔。

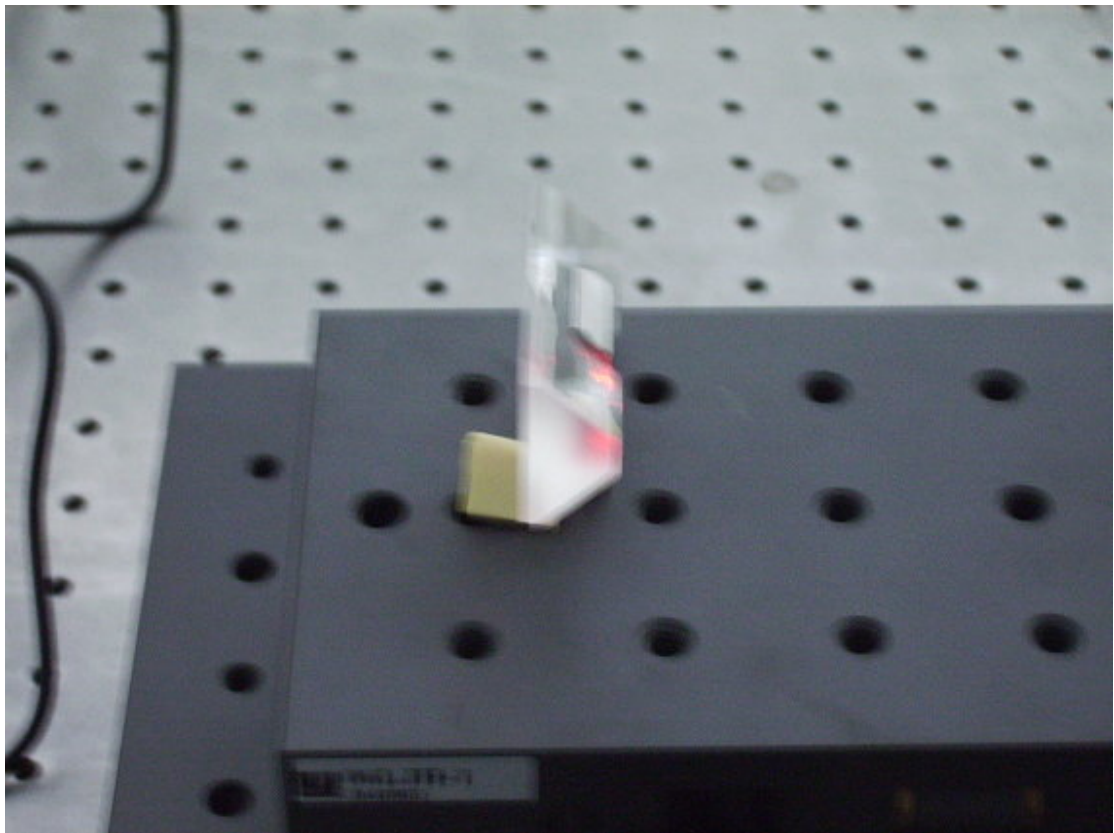


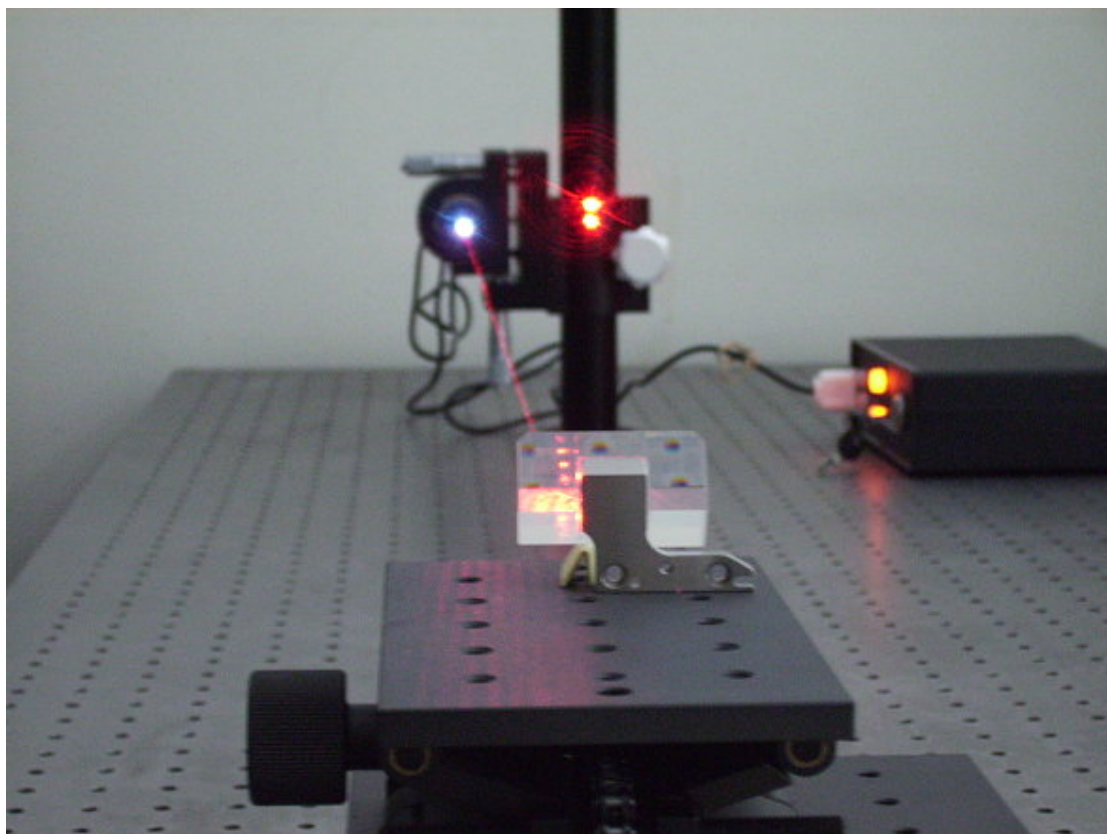
(f) 雷射轉折稜鏡 Folding prism

本雷射共振腔中所用到，另一重要雷射元件就是脊角稜鏡 roof-angle prism，又稱為雷射轉折稜鏡 Folding prism。它是一個直角三角稜鏡 right-angle prism 所構造的全反射光學雷射元件，只是它有差異在其直角稜線處有一依不同需求所切割研磨而成一平行直角平面的有脊角平面稜鏡。它也是利用光的全反射原理 (total internal reflection, TIR)，只要從有效入射孔徑 (effective aperture) 進入的光線，就會被直角平面全反射 (reflected by the roof surface)，而且從輸入光線同一平面射出。是一個重要的雷射共振腔中所用到的雷射光學元件。

通常脊角稜鏡 roof-angle prism，在雷射共振腔中所用到功能是轉折雷射共振腔的光徑，可使雷射共振腔短、小及精巧。

下圖是我們計畫中，雷射共振腔中所用到重要雷射光學元件脊角稜鏡 roof-angle prism，其元件的結構及功能示意圖及實驗室照片。



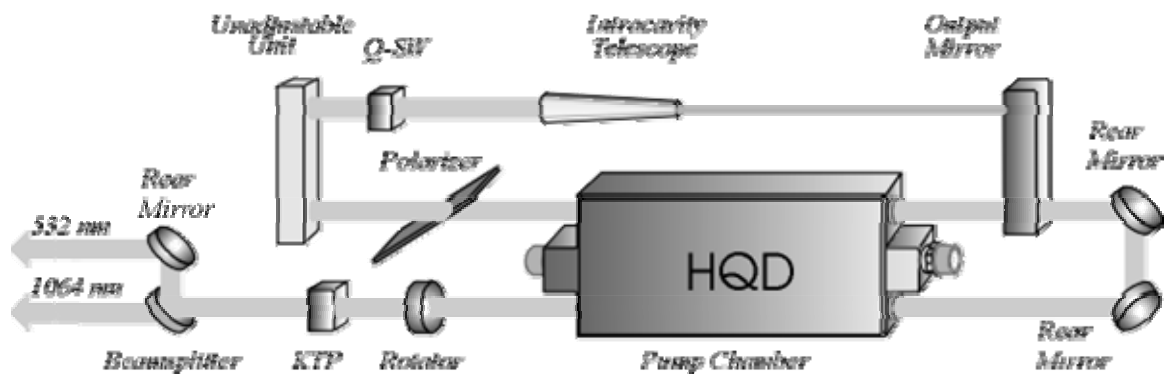


(g) 雷射腔內望遠鏡組 Telescope in the resonator

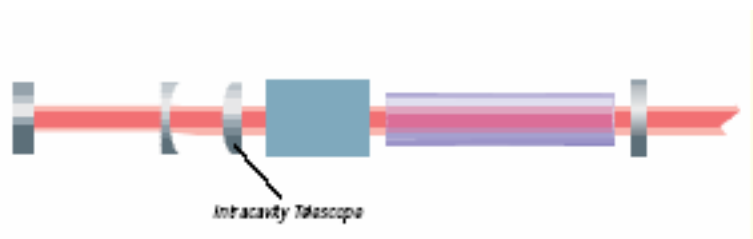
雷射共振腔內，通常會加有雷射腔內望遠鏡鏡組(intra-cavity telescope)，尤其是在高功率雷射系統中經常有需要。

雷射腔內望遠鏡鏡組，基本上是由一個凸透鏡及一個凹透鏡所組成的。它在雷射共振腔內，最主要的功能就是，將雷射共振腔內光束，做由大縮小，或由小增大的作用(intra-cavity telescope for collimate laser beam spot)，以匹配雷射棒最佳孔徑，及最大輸出效率。此外在高功率雷射系統中，為了避免太高光點強度，造成的熱鏡聚焦效應(intra-cavity telescope for overcoming thermal lensing)，破壞雷射光電元件，所以經常有需要將雷射共振腔內光束，做由小增大的作用，這就需要用到雷射腔內望遠鏡鏡組。

下圖，可看到雷射共振腔內，加有雷射腔內望遠鏡鏡組。

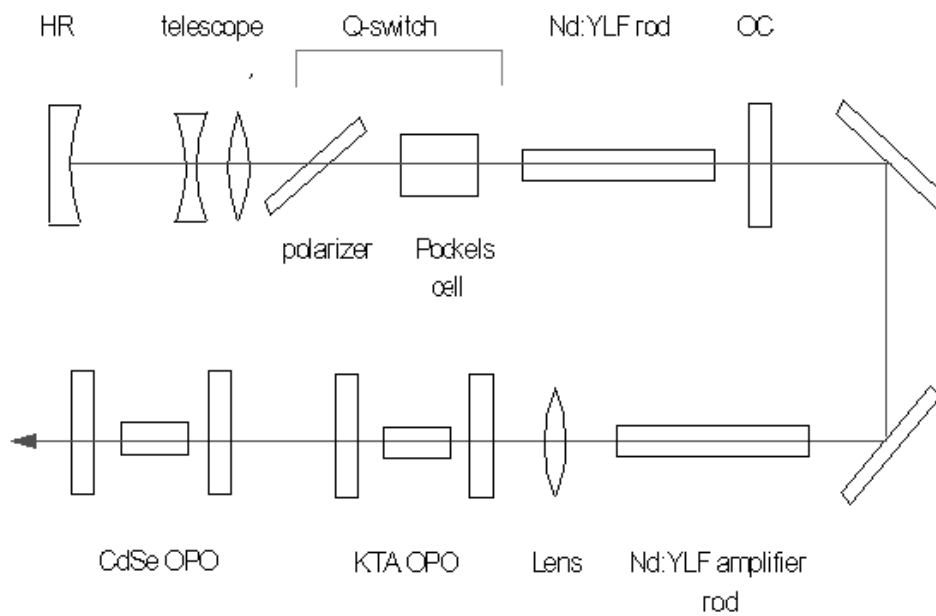


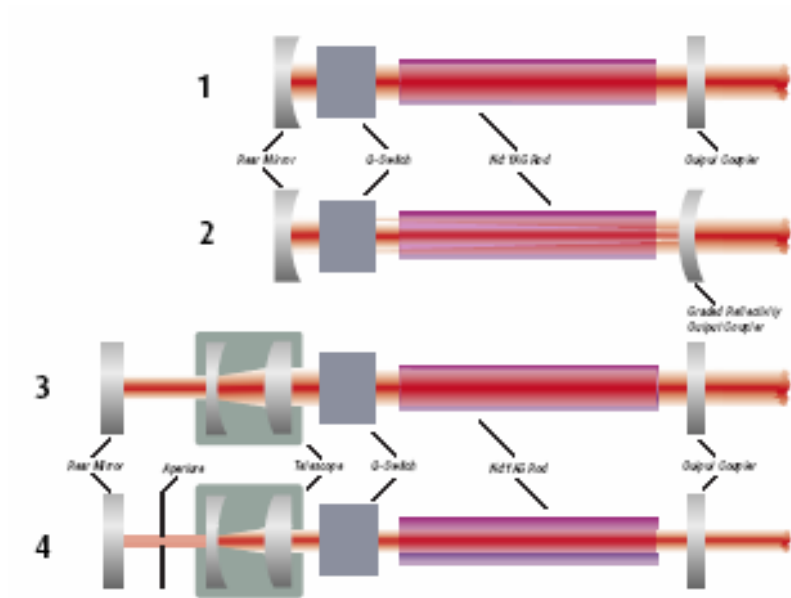
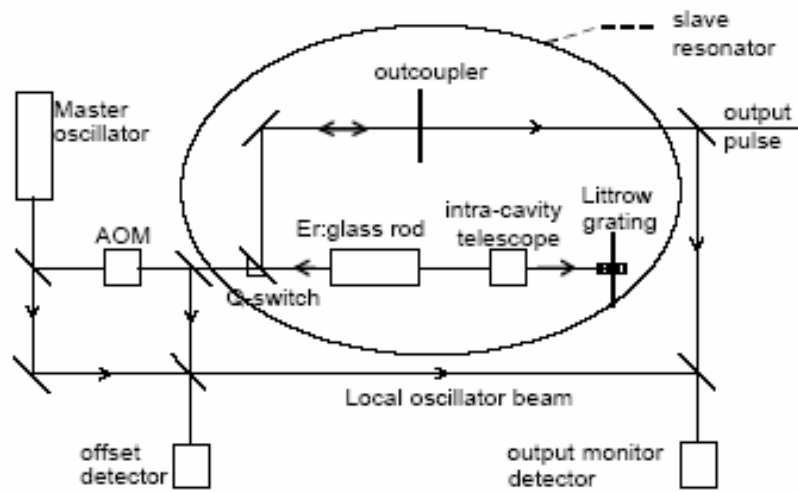
雷射腔內望遠鏡鏡組，基本上是由一個凸透鏡及一個凹透鏡所組成的。下圖，可看到雷射腔內望遠鏡鏡組的實體架構。



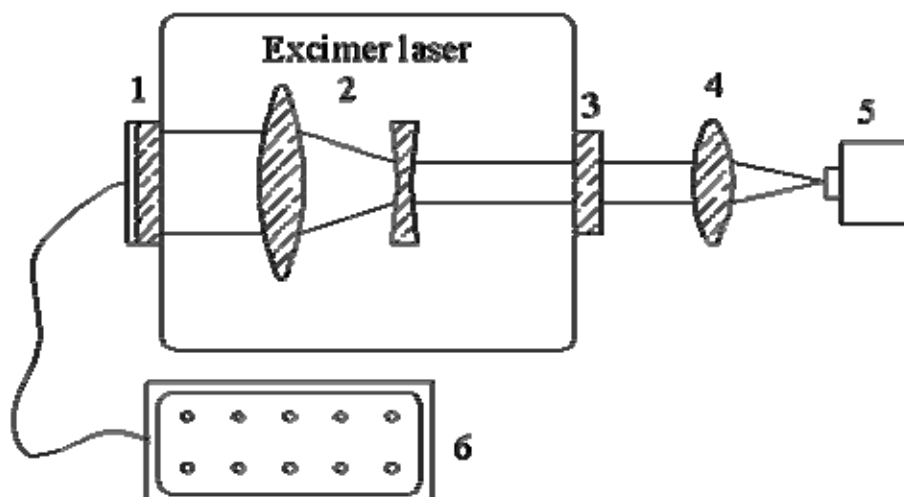


下面更多雷射架構圖，可看到雷射共振腔內，都加有雷射腔內望遠鏡鏡組。





更有甚者，雷射腔內望遠鏡鏡組，也加在準分子氣體雷射(excimer laser)腔內。

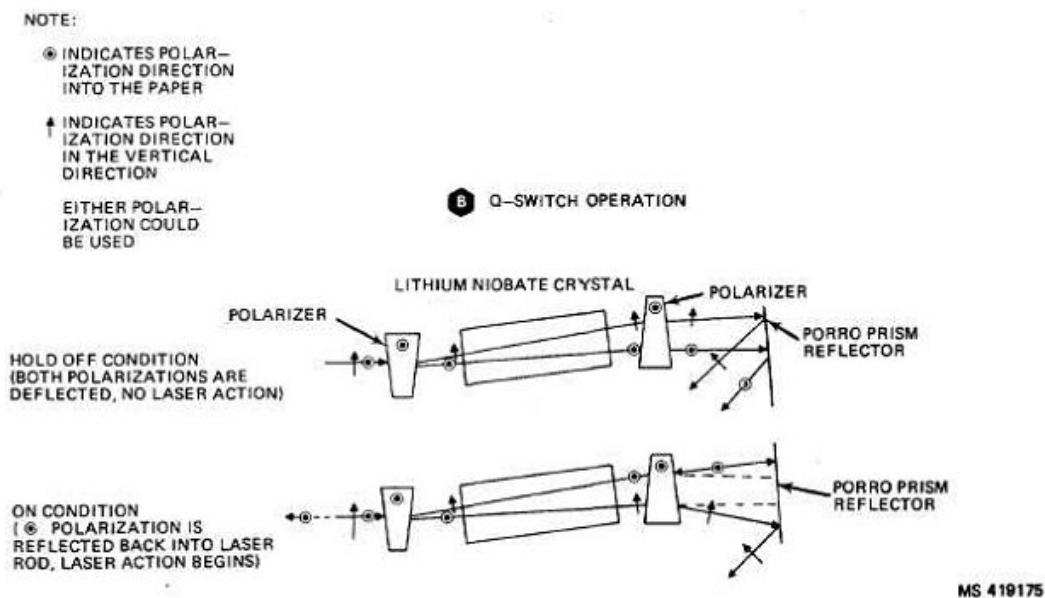


Excimer laser with intracavity bimorph corrector: 1 – bimorph mirror; 2 – 3^{\times} telescope; 3 – output coupler; 4 – focusing lens; 5 – photocamera; 6 – block of manual control

The maximum filling of the adaptive mirror surface with the radiation due to the discharge in the XeCl laser was ensured by a quartz telescopic expander (with a magnification 3^{\times}). The distribution of the intensity over the beam cross section was photographed at a distance of 1 m from exit window of the laser and in the focal plane of a lens ($f=15$ cm).

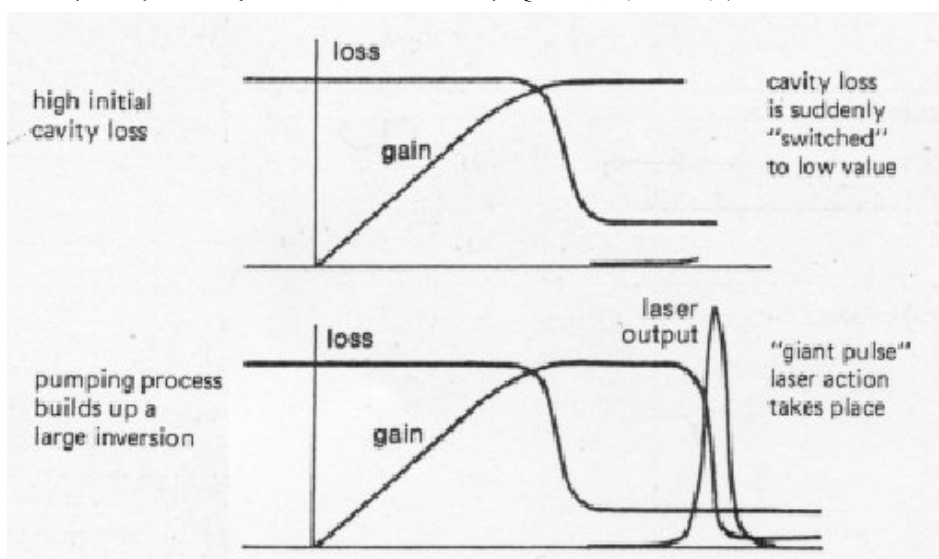
(h) 雷射 Q 調制組件 Q-switch modulars

下圖是美軍裝備，雷射測距導引器(laser target designator)，巨脈衝 Q-調制元件組及機制示意圖。



TM 9-1260-479-30 Figure 1-18. LTD Optics Diagram 1-20

換言之，巨脈衝 Q-調制雷射的輸出即如下列所標示，當雷射共振腔累積足夠的大能量，而其過程中幾乎沒有消耗，然後在一個非常短的時間，所有雷射能量，以脈衝形式，一洩全出，產生巨脈衝 Q-調制雷射的輸出。



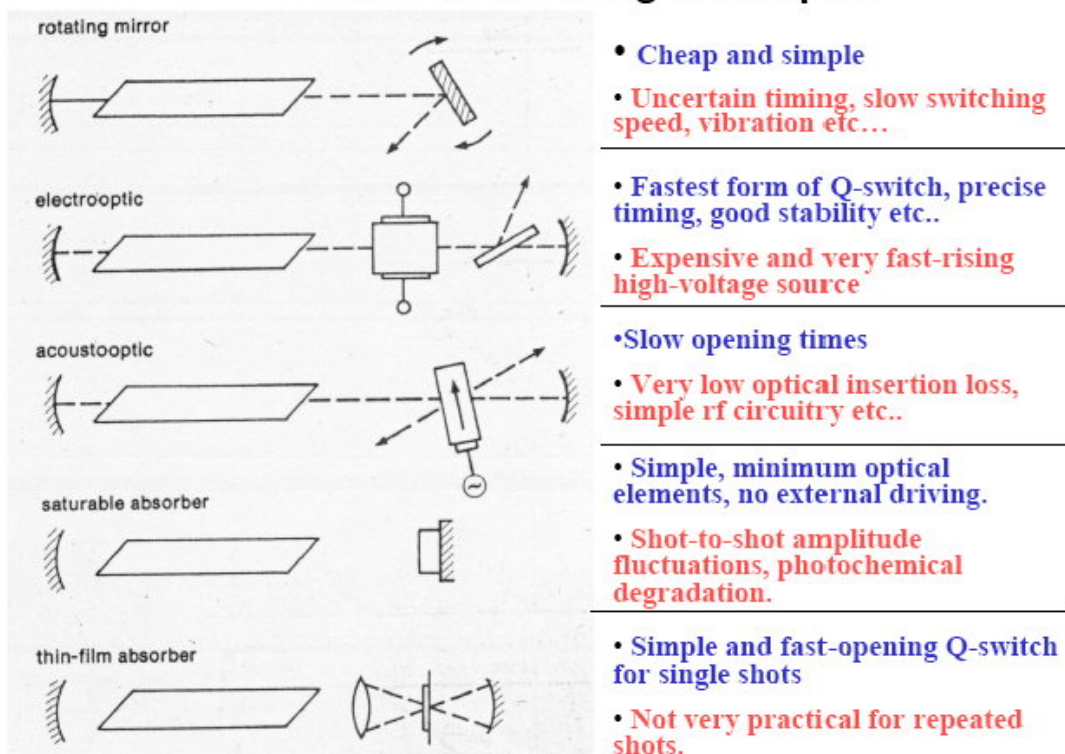
所以輸出的雷射脈衝只要數個奈秒(10^{-9} 秒)，而且功率可達百萬瓦(10^6 瓦)以

上。這是利用雷射做測距導引，所必須達到的，雷射輸出能量及功率。

Duration	Peak powers	Method
10 μ s	kW	free running
ns	MW	Q-switch

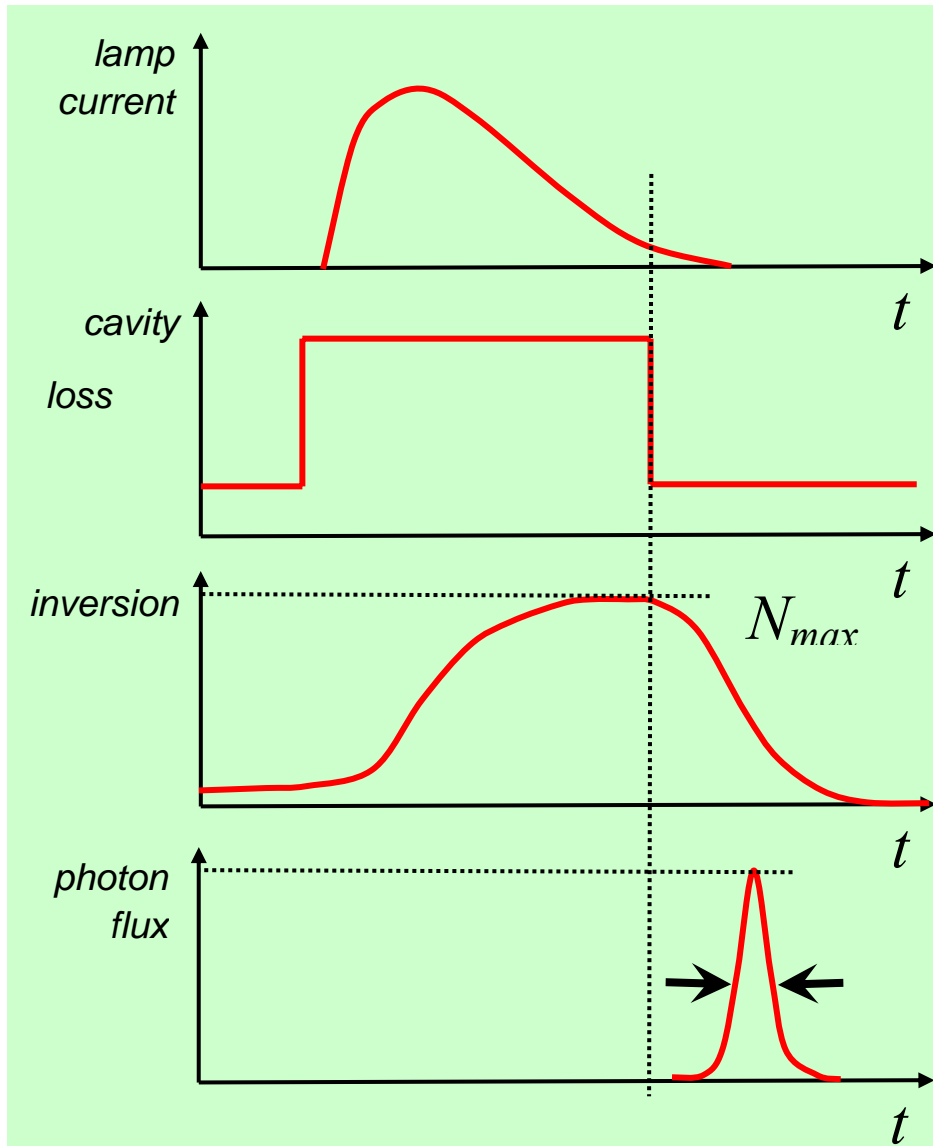
下圖是巨脈衝 Q-調制雷射的各種不同的方法，但是對需要鎖碼的測距導引雷射，我們只能用光電元件式，Q-調制雷射的技術。

Laser Q-switching techniques

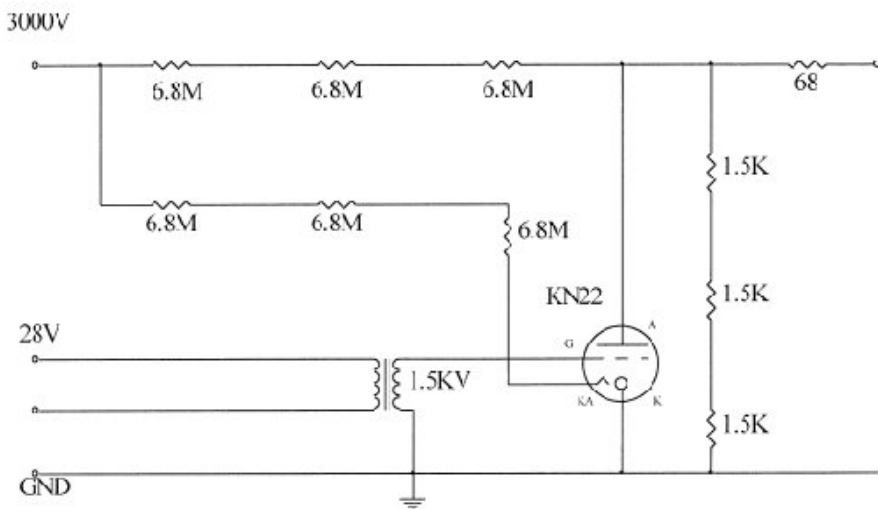


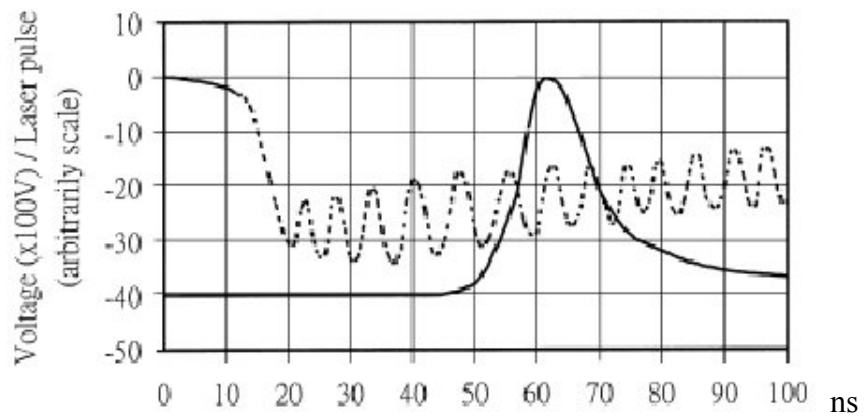
巨脈衝 Q-調制雷射的理論可簡述如下： γ 為居量轉換因子， n 為雷射共振腔內的光子數， N_g 為居量反轉數； N_a 為可飽和吸收體基態的電子數； N_{a0} 為 N_a 的初始值； $g_g = 1/t_g$ 為雷射上能階的衰減速率，其中 t_g 為雷射晶體的放射生命期； $g_a = 1/t_a$ 為可飽和吸收體的鬆弛速率， t_a 則為可飽和吸收體的放射生命期； R_p 為激發速率， g_c 為雷射光在雷射腔內的衰減速率， K_g 及 K_a 為耦合係數，其中 $K_g = 2sg/trAg$ ； $K_a = 2sa/trAa$ ， sg 為雷射晶棒的放射截面積； sa 為可飽和吸收體基態的吸收截面積， tr 為光子在雷射腔內的週期， Ag 與 Aa 分別為雷射光束於雷射晶棒與可飽和吸收體上的截面積； β 為可飽和吸收體激態吸收截面積與基態吸收截面積的比值。

或更清楚的利用下面時序圖來表示：

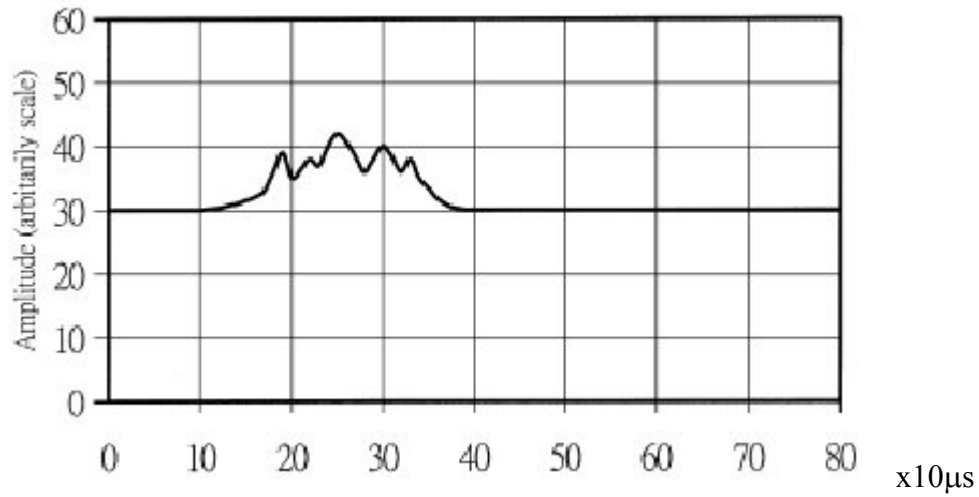


而其驅動電路，及觸擊發高壓電壓，和雷射脈衝的輸出時序圖，如下所示：

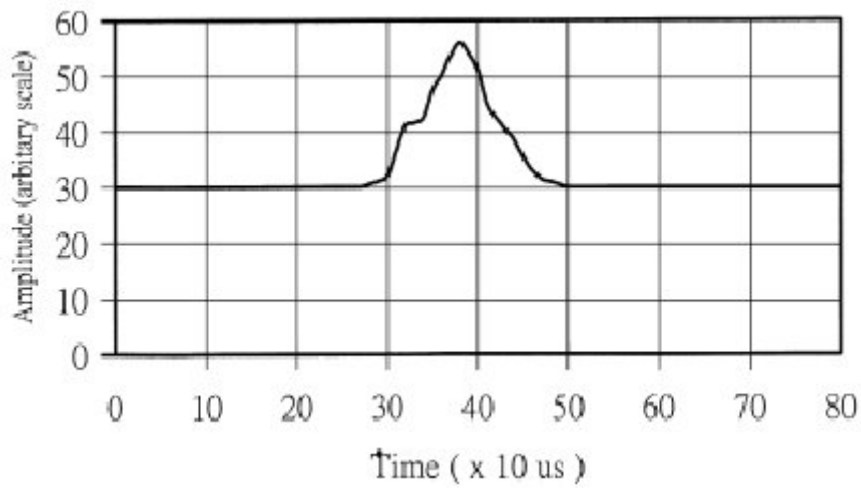
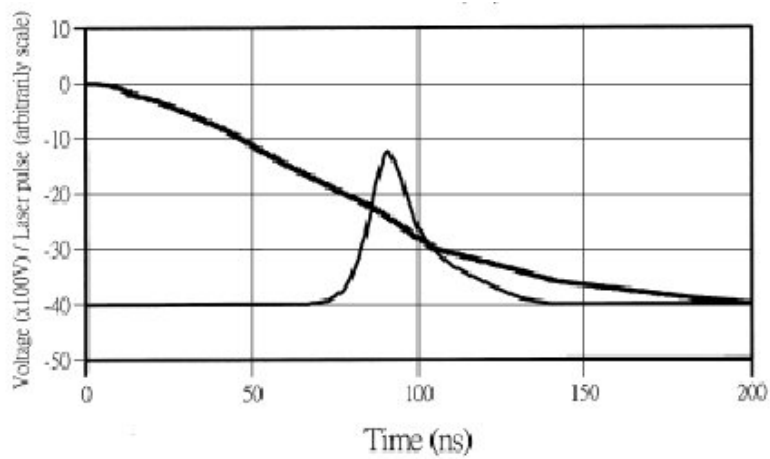
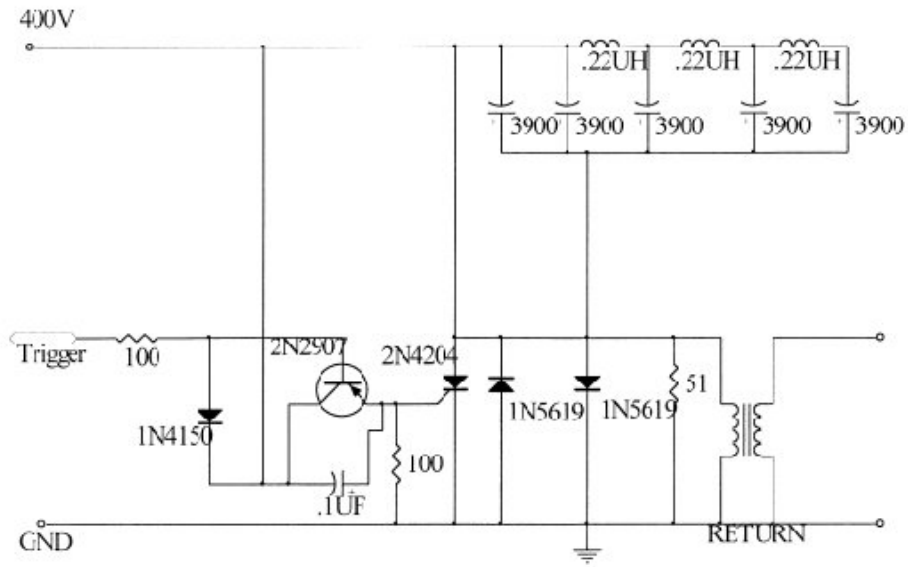




下圖，則是輸出雷射光，其能量的空間分布圖形：



如果我們用我們獨特研究並已發表的優化的緩開關驅動電路，其觸擊發高壓電壓，和雷射脈衝的輸出時序圖，輸出雷射光，其能量的空間分布圖如下做對比，我們可發現雷射的輸出能量及功率可以提高百分之三十以上。



	Laser pulse yield by slowly opened switch	Laser pulse yield by fast opened switch
Output energy	$E_p = 63 \text{ mJ}$	$E_p = 48.9 \text{ mJ}$
Beam divergence	0.457 mrad	0.6 mrad
Laser pulsewidth (FWHM)	18 ns	20 ns
Output peak power	3.5 MW	2.45 MW

下列所示，是巨脈衝 Q-調制雷射的核心晶體，LiNbO₃ 的規格：

Specifications:

Parameter	Value
Transmission at 1064nm	>98.5%
Apertures Available	3, 4 and 6mm
Half wave voltages at 1064nm	1,000V, 1,300V and 2,000V
Contrast ratio	>20dB
Acceptance Angle	>1°
Damage Threshold	>600MW/cm ² at 1064nm (t = 10ns)
Physical Dimensions:	35mm Ø, 45mm long

及高壓電路和電源驅動器：

Pockels Cell Q-switch Driver



但是對需要鎖碼的測距導引雷射，我們還要考慮可控制調頻、調幅及高脈衝

率(10-25 Hz) Q-調制雷射的高壓電路和電源驅動器。

Provisional Specifications:

Parameter	Value				
Repetition Rate	0 to 100kHz in five decade steps by internal or external generator				
Output Voltage	+200 to +2,000V adjustable with visual display				
Output Pulse	The standard system generates a positive going step function above zero. The generator can also be supplied giving a negative going step from the set HT level down to zero for quarter wave switching				
External Trigger In	+3.0 to 10.0V min. 10ns f.w.h.m. into 50Ω				
Synchronization Output	TTL approx. 30ns after trigger				
Overload Protection	(1) Repetition rates above 100kHz (2) HT Current above 25mA (3) Output stage fault overload Protection occurs by automatic removal of the HT supply which can be re-instated by the reset switch				
Power Input	Universal 90 - 265V a.c. 47 - 440Hz via fused IEC inlet				
Dimensions	150(h) x 250(w) x 330(d) (mm) Mass: 6kg				
Step Voltage at End of an Open Circuit 50Ω Line					
50W co-axial cable length	Rise-Time	Flat Top	Fall Time	Maximum Frequency at 2kV	Maximum Voltage at 100kHz
125mm	5ns	175ns	400ns	80kHz	1,700V
250mm	5ns	160ns	500ns	66kHz	1,500V
500mm	<7ns	150ns	700ns	50kHz	1,300V
1,000mm	<8ns	120ns	1,000ns	40kHz	800V

下圖是，巨脈衝 Q-調制雷射的核心晶體，LiNbO₃ 晶體的照片圖：:



下圖是，高脈衝率，高輸出功率，巨脈衝 Q-調制雷射的核心晶體，LiNbO₃ 晶體的規格及高壓電路和電源驅動器照片圖::

Specifications

Parameter	EM508M, EM510M AND EM512M
Aperture:	8mm, 10mm or 12mm
Wavelength Range:	0.3 - 1.2μm
Halfwave Voltage @ 1.06μm:	Approximately 6.0 kV static, 7.2kV dynamic
Maximum Voltage:	10kV
Optical Rise Time:	< 1.0 ns
Contrast Ratio @ 1.06μm:	> 1000:1
Capacitance Unterminated:	< 5 pF

Damage Threshold:	600 MW/cm ²
Insertion loss with AR coatings:	4%
Physical Dimensions:	35mm \varnothing , 42mm long

Model Number	2-019	2-020*	2-021	2-022*	2-019-PC B*	2-020-PC B*
Fast Transition	HV \rightarrow 0 V	0 V \rightarrow HV	0 V \rightarrow HV and HV \rightarrow 0 V	0 V \rightarrow HV and HV \rightarrow 0 V	HV \rightarrow 0 V	0 V \rightarrow HV
HV Output, adjustment	-500 V to -3.5 kV	-500 V to -3.5 kV	0.5 kV to 5.5 kV	0.5 kV to 6 kV	-500 V to -3.5 kV	-500 V to -3.5 kV
Rise Time	\leq 15 nsec	\leq 15 nsec	\leq 35 nsec	\leq 20 nsec	\leq 10 nsec	\leq 10 nsec
Fall Time (or Recovery Time)	\leq 150 μ sec	\leq 150 μ sec	\leq 25 nsec	\leq 20 nsec	\leq 100 μ sec	\leq 100 μ sec
Maximum Repetition Rate	100 Hz	100 Hz	5 kHz	200 Hz	100 Hz	100 Hz
Package	box	box	box	box	pcb	pcb

HVP50/80 High Voltage Pockels Cell Q-Switch Driver

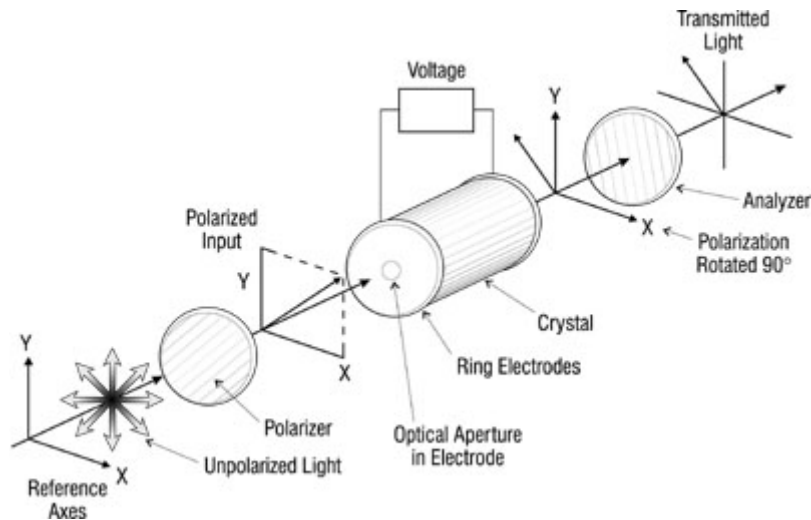


Step Pulse Generator	HVP 50/80
Output Pulse	
Voltage Range	1 - 8 kV
Maximum Output current	200 A
Electrical Falltime	< 3 ns
Recovery Time	100 μ s exponential
Output Impedance	50 Ω
Maximum on time at maximum current	200 ns
Maximum Repetition rate	100Hz
Minimum Pulse Width	10 ns
External Trigger Input	
Amplitude	-3 V to + 3 V
Polarity of Leading Edge	Positive or Negative
Input Impedance	50 Ω
Minimum Internal Delay	40 ns
Sync Output	
Amplitude	\geq 3 V into 50 ohms

Jitter wrt High Voltage Pulse	100 ps
Internal Rate Generator	
Repetition Rate	0.1 Hz - 100 Hz
Pulse Terminating Load (designed to correctly terminate a 50 ohm coaxial cable)	
AC Impedance	50 ohms nominal
Cabinet	
Volume (W x D x H)	330 x 330 x 100 mm
Weight	4 kg
Environmental Temperature	
Range	0°C - 40°C
Supply	
Mains Voltage @ 50 or 60 Hz	120 or 240 V ± 10%
Power	50W
Enable Input	
Removal of a short circuit will prevent operation	

Applications

Q-switching	Q-switching Opening Times	< 3 ns
Pulse Slicing	Optical Switching Time	< 3 ns
	Cable length (50 ohm, 100 pF/m)	2 m - 4 m
Pulse Picking Using 4 - Terminal EO Modulator	Cable Delay	5 ns / m
	Pulse Width	10 ns - 20 ns
	Optical Risetime	< 3 ns
	Optical Falltime	< 3 ns



LiNbO₃ 晶體的相位匹配如上圖所示，在使用 Pockels cell 主動式巨脈沖雷射 Q-值調制，我們是用 LiNbO₃ 晶體。這個 LiNbO₃ 晶體的 C-軸則是與雷射的 Porro 稜鏡組共振腔架構 Z 軸有一小傾斜角度(tilted angle)。在整個雷射共振腔激勵振盪時，當腔內光經過偏極分光雷射輸出光片時，其中 s-component 的偏極光部分，就是有效的雷射的輸出。

而其他 p-component 的偏極光，則穿過偏極分光片，繼續在共振腔內共振放大。當腔內 p-component 的偏極光，穿過 Pockels cell 的 LiNbO₃ 晶體時，它會有一個經過 Pockels cell 晶軸傾斜角度的相位偏移角， δ_t 。並且在 Pockels cell 的 LiNbO₃ 晶體加上高電壓做開關器時，同時會有一個電壓的相位偏移角， δ_v 。腔內的光束再經過使用 BK-7 玻璃材料所做成的 Porro 稜鏡的兩次直角全反射偏折，則會有 $180^\circ + 76^\circ$ 的相位偏移角。當腔內的光束再經過 Pockels cell 的 LiNbO₃ 晶體時，它再會 δ_t 與 δ_v 的相位偏移角。所以在共振腔內一個往返(round trip)，它的總相位變化是：

$$-\delta_t - \delta_v + 180^\circ + 76^\circ - \delta_t - \delta_v$$

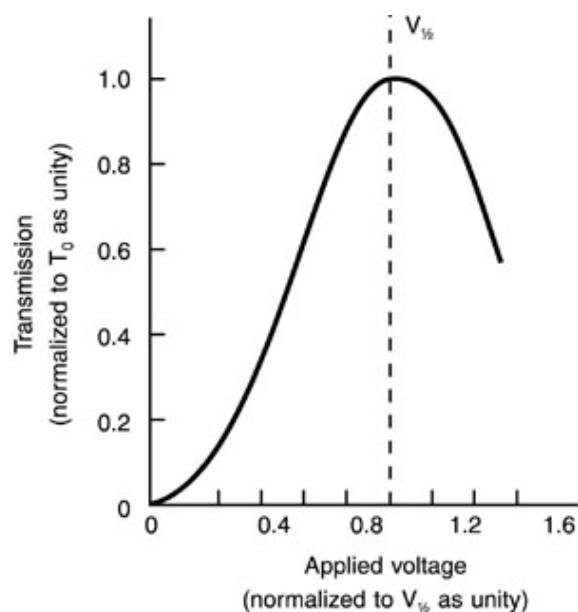
在巨脈沖 Q-值調制的開關條件，要求其總相位差應為 0° 或為 $2m\pi$ (m 是整數)。所以 LiNbO₃ 晶體的 C-軸與雷射的 Porro 稜鏡組共振腔架構 Z 軸有一小傾斜角度，約是 0.96° ，也就是可以補償其中稜鏡 BK-7 玻璃所產生的 76° 的相位偏移角。

接著，我們來計算 LiNbO₃ 晶體，當腔內的光束經過時要產生 δ_v 為 90° 的相位偏移角所需要的高電壓值。Pockels cell 的 LiNbO₃ 晶體，在當巨脈沖 Q-值調制開關，其相位偏移公式為：

$$\Delta\Phi = 2\pi L \times n_0^3 \times \gamma_{22} \times V_0/d \quad \text{-----(2)}$$

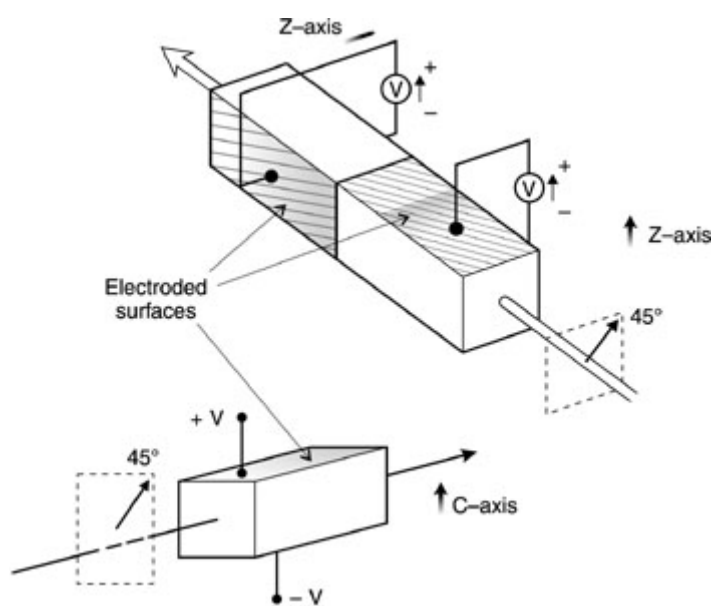
其中 γ_{22} 是 LiNbO₃ 晶體的光電系數，其值為 $2.82 \times 10^{-9} \text{ mmV}^{-1}$; n_0 是 LiNbO₃

晶體的折射率，其值為 2.23568; d 是晶體的厚度; L 是晶體的長度; 以及 V_0 則是 LiNbO_3 晶體，當腔內的光束經過時，要產生相位偏移角，所需要的高電壓值。我們所用的 LiNbO_3 晶體，其體積為 $9 \times 9 \times 25 \text{ mm}^3$ ，要在 LiNbO_3 晶體產生相位偏移 $\Delta\Phi = 2\pi$ ，代入公式(2)計算，我們在 LiNbO_3 晶體上要加 3021V 的高電壓。



上圖是， LiNbO_3 晶體上，要加的電壓值到最高電壓過程中，其 LiNbO_3 晶體的穿透率曲線。

下圖則是 LiNbO_3 晶體上電極得標示和對應晶軸的圖示：

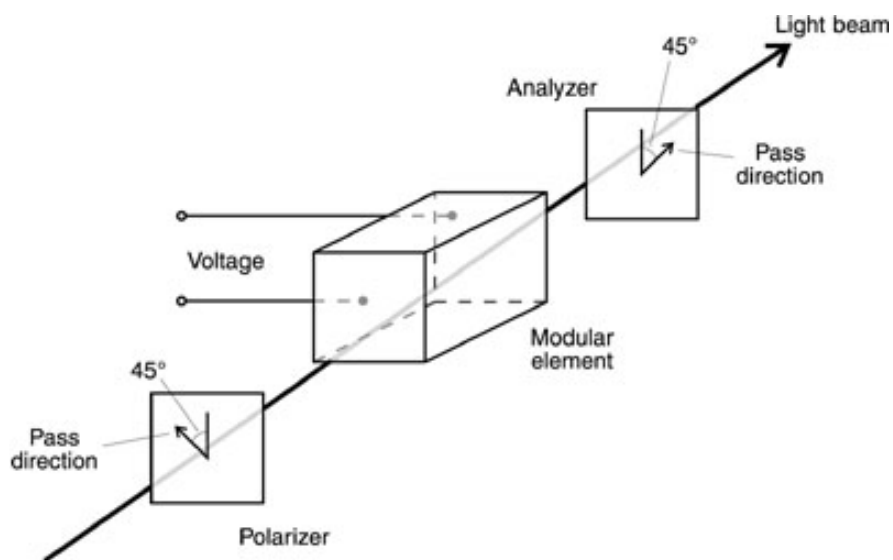
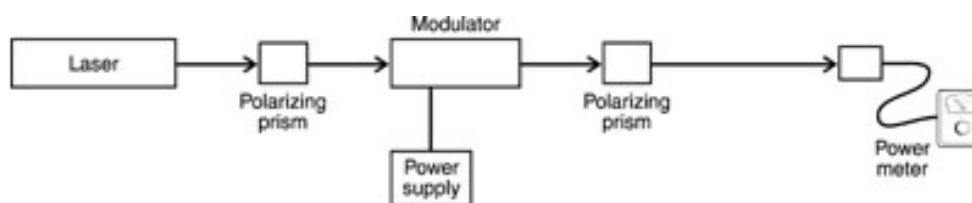
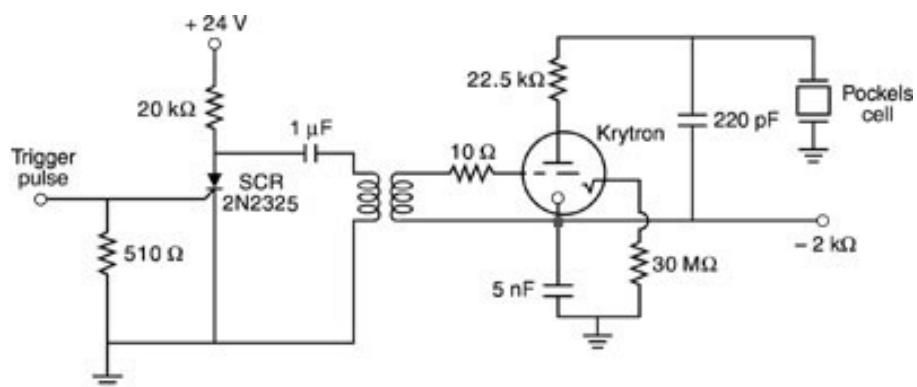


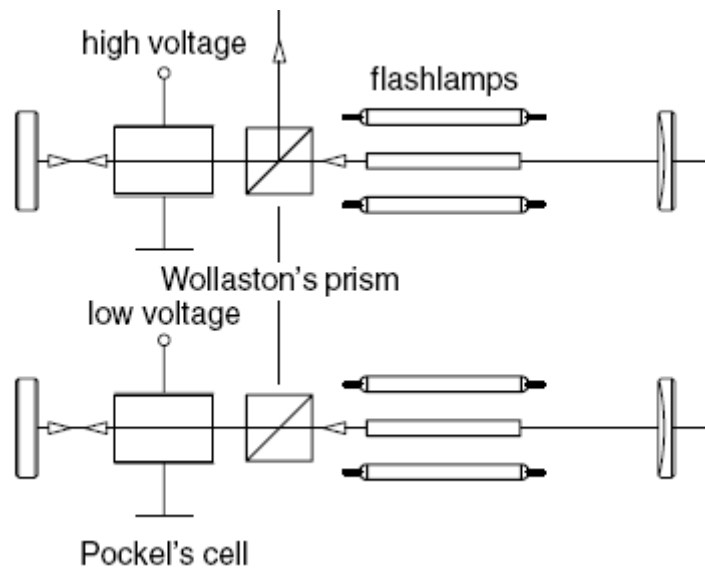
最後，除了 LiNbO₃ 晶體外，一些雷射的核心電-光晶體，我們也製做一個表，可做比較應用。

Table 1. Electro-Optic Materials

Material	Abbreviation	Chemical Formula	Transmission Range (μ M)	Bandwidth (MHz)	Index of Refraction n _o , n _e at wavelength (μm)
Ammonium dihydrogen phosphate	ADP	NH ₄ H ₂ PO ₄	0.3 - 1.2	to 500	1.51, 1.47 at 1.06
Potassium dihydrogen phosphate	KDP	KH ₂ PO ₄	0.25 - 1.7	> 100	1.51, 1.47 at 0.55
Potassium dideuterium phosphate	KD*P	KD ₂ PO ₄	0.3 - 1.1	to 350	1.49, 1.46 at 1.06
Lithium niobate	LN	LiNbO ₃	0.5 - 2	to 8000	2.23, 2.16 at 1.06
Lithium tantalate	—	LiTaO ₃	0.4 - 1.1	to 1000	2.14, 2.143 at 1.00
Cadmium telluride	—	CdTe	2 - 16	to 1000	n _o = 2.6 at 10

另外也附加基本的驅動電路、實驗方塊圖等以為參考。





(i) 雷射鎖碼 Q 調制 Coded Q-switch modulation

CHAPTER IV LASER CODES

"The instruments of battle are valuable only if one knows how to use them."

Ardant du Picq
Battle Studies

1. Introduction

a. **General.** Laser designators and seekers use a **pulse coding system** to ensure that a specific seeker and designator combination work in harmony. By setting the same code in both the designator and the seeker, the seeker will track only the energy with the correct coding. The seeker will track the first correctly coded, significant laser energy it sees. The seeker will always lock on to the most powerful return in its view. The pulse coding used by all systems discussed in this manual is based on PRF.

b. **Designator and Seeker Pulse Codes.** The designator and seeker pulse codes use a **modified octal system** that uses the numerical digits "1" through "8." The codes are directly correlated to a specific PRF, but the code itself is not the PRF and therefore can be communicated in the clear as required. Depending on the laser equipment, either a **three- or four-digit code** can be set. Three-digit code equipment settings range from 111 to 788. Four-digit code equipment settings range from 1111 to 1788. The three- and four-digit code equipment is compatible, and any mix of equipment can be used in all types of laser operations. However, when using a mix of three- and four-digit code equipment, **all personnel must understand that the first digit of a four-digit code is always set to numerical digit "1"**. The remaining three digits will be set to match the three digits of the three-digit code equipment. As an example, a three-digit code of 657 would be set to 1657 on a four-digit code system or vice versa. The G/VLLD only allows for three numbers to be set. Upon receipt of a 4-digit

code, the operator must delete the first number and set the last three numbers on the G/VLLD.

NOTE: Higher PRF (lower number codes) provide greater laser energy for the seeker and LSTs to receive, and so provide a greater opportunity for success. Lower codes also require more power and so cause shorter battery life.

c. **Multiple Codes.** Coding allows simultaneous or nearly simultaneous attacks on multiple targets by a single aircraft, or flights of aircraft, employing LGWs set on different codes. This tactic may be employed when several high-priority targets need to be attacked expeditiously and can be designated simultaneously by the supported unit(s).

2. Management of Coded Laser Systems

Laser codes must be controlled and coordinated to maximize weapon effectiveness. The joint force Operations Directorate (J-3) has overall responsibility for laser code management. The J-3 provides blocks of codes to each component. Each component sub-assigns codes to supporting arms (e.g., Army artillery, Marine air wing, etc.). This controlled code assignment prevents interference among joint force unit activities. Each component's supporting arm divides its codes among its subordinate units. Subordinate units assign codes to individual missions and change codes periodically, as the situation requires. **At each step of this process, laser codes must be allocated to**



Aircraft dropping LGBs.

ensure compatibility between laser designation equipment and munitions. Some munitions and equipment are incapable of using all codes. Additionally, certain codes (low code, high PRF, and/or faster pulse rate) are preferred for laser systems requiring precision guidance. Codes must be briefed to both the FAC and aircrews for situations where communications cannot be established or authorized.

Chapter III, "Procedures," paragraph 3a, discusses exchange of code information between aircrews and ground elements. This code information is also disseminated in operations documents such as the air tasking order special instructions and the fire support plan.

3. Laser Coding in Conjunction With LGBs

Laser coding can be used effectively and securely with LGBs. LGB codes are set on the bombs before takeoff and **cannot be changed in the air**. The aircrew is told the code, but advance coding information might

not be sent to the supported ground unit. When the aircraft is on-station, the aircrew passes the code to the FAC. When the use of an LDO is required, the FAC coordinates with the LDO to ensure that the laser designator is set on the same code as the LGBs.

4. Coding Prioritization

a. **General.** PRF codes can affect target engagement success. The lower the code number, the faster the laser pulse rate. The lower code number and faster pulse rate will give the seeker the most opportunity to acquire the target in the time available, and is appropriate for the most important targets and the most difficult operating conditions. However, lower code numbers cause faster battery drain.

b. **Considerations.** When PRF code prioritization is possible, the target priority and difficulty of field operating conditions must be considered. Technical and environmental limitations to be considered when prioritizing codes are designator location and output, beam divergence, weather, seeker sensitivity, and FOV.

雷射測距導引在戰場上應用，一定要有鎖碼功能，才能針對指定目標完成任務。密碼是機密製定，在本研究中將避免去量測及分析密碼。但是我們已對要標碼的技術如調頻、調幅、脈衝率數，以及實際戰術時序等，技術性能力，都說明了，也有了可以設定密碼的能力了。

Coded Laser Target Designators

- Coded LTDs are ground and airborne systems that have two specific purposes. First, they provide terminal weapons guidance for LGWs. Second, they designate targets for coded laser acquisition/spot trackers. Coded laser target designators emit laser energy with a PRF and require input of specific laser codes for operation. Codes are assigned to LGWs and directly relate to the PRF that harmonizes designator and seeker interface. The airborne platforms having coded laser target designators are shown in Figure A-2. The ground systems having coded laser target designators are shown in Figure A-3.

AIRBORNE PLATFORMS WITH CODED LASER TARGET DESIGNATORS	
Rotary-Wing	System
AH-1 W (USMC)	NTS
AH-64A Apache	TADS
OH-58D Kiowa Warrior	MMS (LRF/D)
MH-60L (DAP)	AESOP FLIR LRF/D
SH-60B/HH-60H	AAS-44 FLIR LTD/R

Coded laser target designators used for terminal weapons guidance must be set to the same code as the LGW. Certain LGWs, such as LGBs, are coded prior to takeoff and cannot be changed once the aircraft is airborne. However, all coded laser target designators, with the exception of the AC-130H, can change codes while in the tactical environment. The AC-130H LTD is permanently preset with only one code (1688) and cannot be changed. Terminal weapons guidance of LGBs by an AC-130H is possible provided this code is precoordinated. The AC-130U has a codable LTD and can change codes in flight. Coordination for the LTD to match the LGB code is conducted through the air tasking order or FAC nine-line briefing. Sometimes, a designator will serve the dual purpose of target designation for a coded laser acquisition and/or spot tracker and terminal weapons guidance for LGWs. In these cases, the designator, spot tracker, and the weapon must have the same code.

- Weapons employment of LGBs in conjunction with coded laser target designators is either autonomous or assisted. Autonomous LGB employment uses the aircraft's on-board

LTD for terminal weapons guidance. Most aircraft capable of delivering LGBs can provide on-board autonomous self-designation. Assisted LGB employment uses an off-board LTD for terminal weapons guidance. This is typically accomplished by a ground team operating a designator (such as a G/VLLD) or by another aircraft (known as "buddy lasing"). Assisted LGB employment is often required by aircraft without on-board LTDs (such as A/OA-10s or AV-8Bs) that can carry and deliver LGBs but have no on-board terminal weapons guidance capability.

- The OH-58D Kiowa Warrior is equipped with LTDs. The AH-64A Apache also has an LTD, but it cannot acquire or designate (lase) a small segment of laser codes (1711-1788).
- The USMC AH-1W possesses an LTD compatible with all LGWs, including HELLFIRE missiles.

c. Coded Laser Acquisition and/or Spot Trackers

- Coded laser acquisition and/or spot trackers are systems which allow visual acquisition of a coded laser designated target. LSTs must be set to the same code as the coded laser target designator in order for the user to see the target being designated. In the case of airborne LSTs, the aircrew acquires the laser designated "spot" (target) and either employs LGBs through use of an LTD or executes visual deliveries of non-laser ordnance. The airborne platforms having coded laser acquisition and/or spot trackers are shown in Figure A-4.

The OH-58D Kiowa Warrior and AH-1W, SH-60B and HH-60H do not have "true" LSTs.

However, if these aircraft are carrying HELLFIRE, the missile can provide some target cueing. The on-board HELLFIRE missile's seeker head sensor provides target symbology in the cockpit display of what is being designated by the helicopter's on-board coded laser designator or any other laser source.

- **Codes.** The laser designator and the LGW on the helicopter must be on the **same code**.

HELLFIRE LGM codes can be set or changed from the cockpit, allowing the aircrew to match the ground laser designator's code. LGM designator coding is important because it prevents the seeker from homing in on other reflected laser energy. • **Laser-Target Line.** The laser-target line must be given to the aircrew in **degrees magnetic**.

(U) Figure A-G-1. OH-58D Mast-Mounted Sight (Army)

OH-58D MAST-MOUNTED SIGHT (ARMY)	
Description:	MMS is an electro-optical system mounted above the rotor system in a gyro-stabilized turret incorporating a low light-level television, digital thermal imaging system, and LRF/D
Function:	Sight system is used to detect and identify enemy targets while the aircraft is masked LRF/D is used to locate targets utilizing either GRID or LAT/LONG, self-lase its own weapons or designate for all US or NATO standard LGWs
Platform:	OH-58D (I) KIOWA WARRIOR
Employment:	Employment: Provides day, night, adverse-weather target detection and identification Employed as a scout or as light division attack helicopters
PRF Codes:	Four Digits In-flight selectable
System-Unique Capabilities:	Tracks stationary or moving targets manually or automatically Automatically points to 8 digit or LAT/LONG grid for target acquisition Incorporates digital communications system (ATHS) interface with artillery and LONGBOW APACHE (IDM)
Limitations:	As discussed in Chapter II, "Planning Considerations," for laser designators
Field of View:	Ranges from 2 to 10 degrees depending on the sight and magnification selected

Figure A-G-1. OH-58D Mast-Mounted Sight (Army)

(U) Figure A-H-1. AH-1W Night Targeting System (Marine Corps)

AH-1W NIGHT TARGETING SYSTEM (MARINE CORPS)	
Description:	Laser designator and rangefinder with FLIR, direct-view and Coupled Charge Display sensors
Function:	Same as description
Platform:	AH-1W
Employment:	Provides day, night, and limited adverse weather target ranging and laser designation capability Used to engage point targets with TOW or Hellfire missiles
PRF Codes:	Four digits In-flight selectable
System-Unique Capabilities:	Tracks targets manually or automatically Can launch using direct or indirect methods
Limitations:	No Air Data Sensor to automatically optimize FLIR picture
Field of View:	Ranges from 1.0 to 30 degrees depending on the sight and magnification selected

Figure A-H-1. *AH-1W Night Targeting System (Marine Corps)*

U) Figure A-S-1. AGM-114 HELLFIRE Missile (Army, Marine Corps, and Navy)

AGM-114 HELLFIRE MISSILE (ARMY, MARINE CORPS, AND NAVY)	
Description:	Third-generation air-launched, antiarmor, laser-guided missile
Function:	Used in conjunction with a ground or airborne laser designator
Platform:	AH-1W, AH-64, OH-58D, SH-60B, and HH-60H
Employment:	Employed against armor or other hard point-type targets Autonomous designation or "buddy lasing" for other launch platforms
PRF Codes:	Four digits In-flight selectable
System-Unique Capabilities:	Can launch using direct or indirect methods

	Can employ single, rapid, or ripple firing techniques Seeker lock-on options are LOAL or LOBL
Limitations:	As discussed in Chapter II, "Planning Considerations," for all LGWs Only AGM-114 B/K missiles are authorized aboard Navy ships

Figure A-S-1. *AGM-114 HELLFIRE Missile (Army, Marine Corps, and Navy)*

a. **General.** Laser designators and seekers use a **pulse coding system** to ensure that a specific seeker and designator combination work in harmony. By setting the same code in both the designator and the seeker, the seeker will track only the energy with the correct coding. The seeker will track the first correctly coded, significant laser energy it sees. The seeker will always lock on to the most powerful return in its view. The pulse coding used by all systems discussed in this manual is based on PRF.

b. **Designator and Seeker Pulse Codes.** The designator and seeker pulse codes use a **modified octal system** that uses the numerical digits "1" through "8." The codes are directly correlated to a specific PRF, but the code itself is not the PRF and therefore can be communicated in the clear as required. Depending on the laser equipment, either a **three- or four-digit code can be set**. Three-digit code equipment settings range from 111 to 788. Four-digit code equipment settings range from 1111 to 1788. The three- and four-digit code equipment is compatible, and any mix of equipment can be used in all types of laser operations. However, when using a mix of three- and four-digit code equipment, **all personnel must understand that the first digit of a four-digit code is always set to numerical digit "1"**. The remaining three digits will be set to match the three digits of the three-digit code equipment. As an example, a three-digit code of 657 would be set to 1657 on a four-digit code system or vice versa. **The G/VLLD only allows for three numbers to be set. Upon receipt of a 4-digit code, the operator must delete the first number and set the last three numbers on the G/VLLD.**

NOTE: Higher PRF (lower number codes) provide greater laser energy for the seeker and LSTs to receive, and so provide a greater opportunity for success.

Lower codes also require more power and so cause shorter battery life.

c. **Multiple Codes.** Coding allows simultaneous or nearly simultaneous attacks on multiple targets by a single aircraft, or flights of aircraft, employing LGWs set on different codes. This tactic may be employed when several high-priority targets need to be attacked expeditiously and can be designated simultaneously by the supported unit(s).

(U) Paragraph: 2 Management of Coded Laser Systems

Laser codes must be controlled and coordinated to maximize weapon effectiveness.

The joint force Operations Directorate (J-3) has overall responsibility for laser code management. The J-3 provides blocks of codes to each component. Each component sub-assigns codes to supporting arms (e.g., Army artillery, Marine air wing, etc.). This controlled code assignment prevents interference among joint force unit activities. Each component's supporting arm divides its codes among its subordinate units. Subordinate units assign codes to individual missions and change codes periodically, as the situation requires. **At each step of this process, laser codes must be allocated to ensure compatibility between laser designation equipment and munitions. Some munitions and equipment are incapable of using all codes. Additionally, certain codes (low code, high PRF, and/or faster pulse rate) are preferred for laser systems requiring precision guidance.** Codes must be briefed to both the FAC and aircrews for situations where communications cannot be established or authorized.

Chapter III, "Procedures," paragraph 3a, discusses exchange of code information between aircrews and ground elements. This code information is also disseminated in operations documents such as the air tasking order special instructions and the fire support plan.

(U) Paragraph: 3 Laser Coding in Conjunction With LGBs

Laser coding can be used effectively and securely with LGBs. LGB codes are set on the bombs before takeoff and **cannot be changed in the air**. The aircrew is told the code, but advance coding information might not be sent to the supported ground unit. When the aircraft is on-station, the aircrew passes the code to the FAC. When the use of an LDO is required, the FAC coordinates with the LDO to ensure that the laser designator is set on the same code as the LGBs.

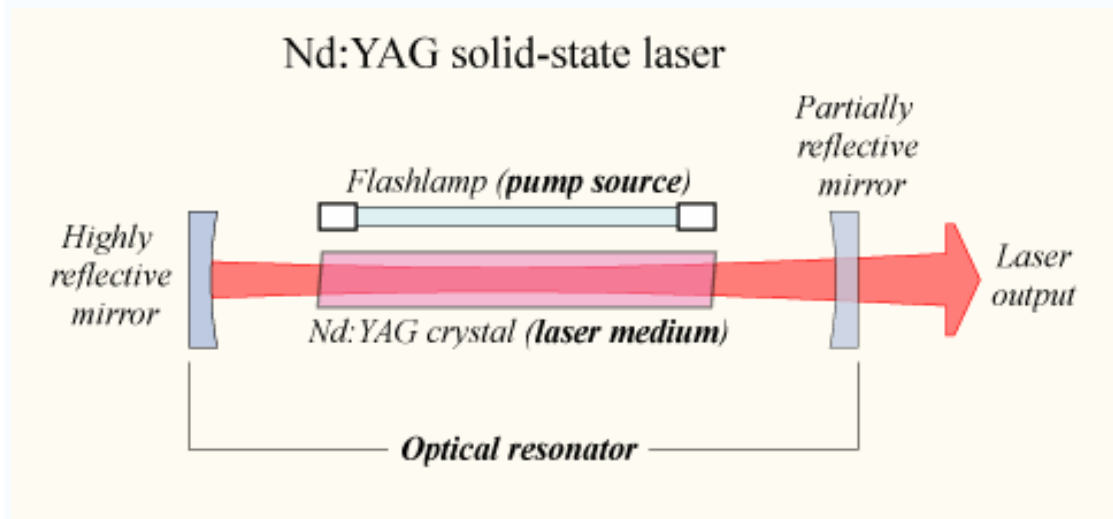
(U) Paragraph: 4 Coding Prioritization

- a. **General. PRF codes can affect target engagement success.** The lower the code
- b. number, the faster the laser pulse rate. The lower code number and faster pulse rate
- c. will give the seeker the most opportunity to acquire the target in the time available,
- d. and is appropriate for the most important targets and the most difficult operating
- e. conditions. However, **lower code numbers cause faster battery drain.**

- b. **Considerations.** When PRF code prioritization is possible, the target priority and
- f. difficulty of field operating conditions must be considered. Technical and environmental
- g. limitations to be considered when prioritizing codes are designator location and output,
- h. beam divergence, weather, seeker sensitivity, and FOV.

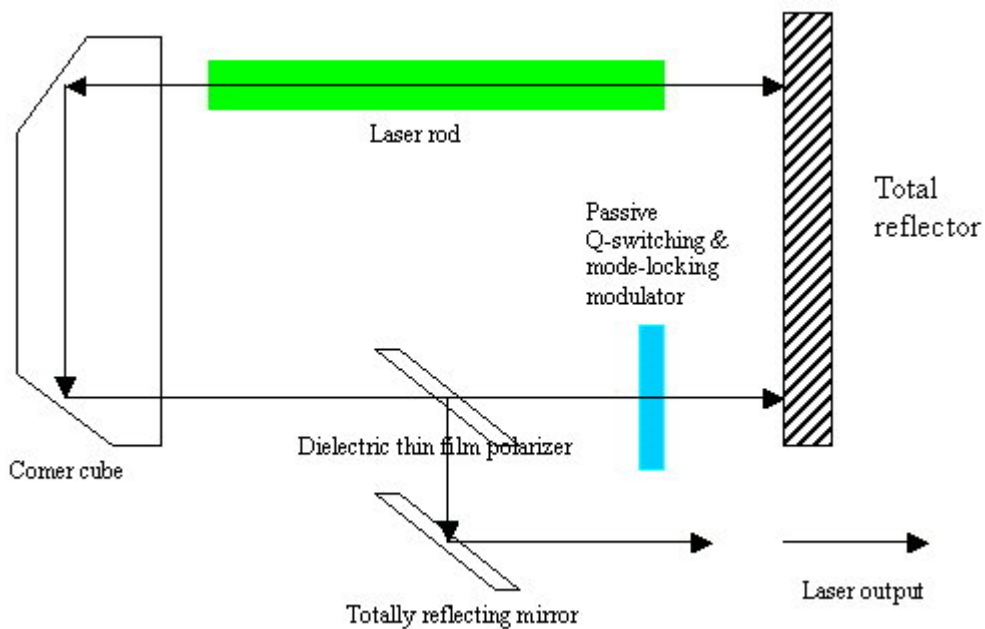
(j) 雷射輸出導引 Output coupling

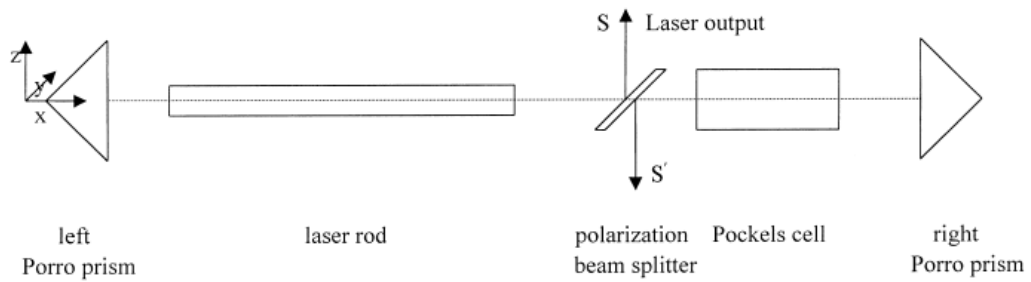
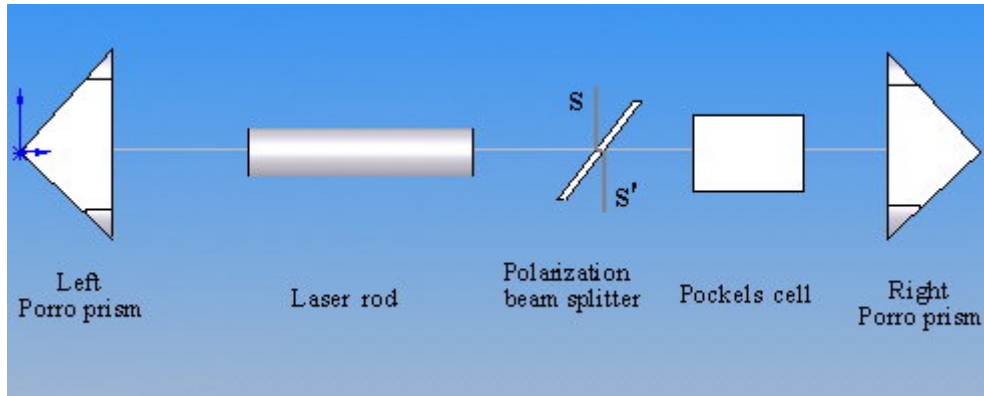
雷射輸出，最普遍的如下圖典型的端面輸出：



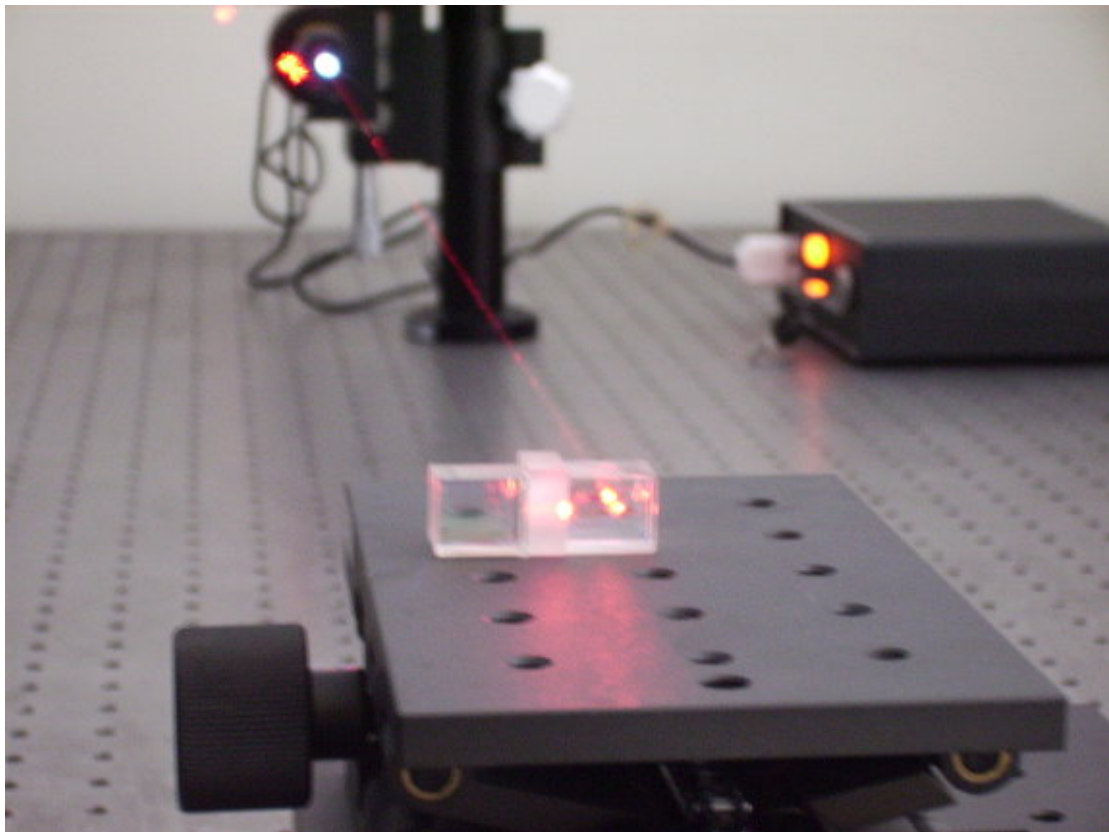
Schematic diagram of a typical laser, showing the three major parts

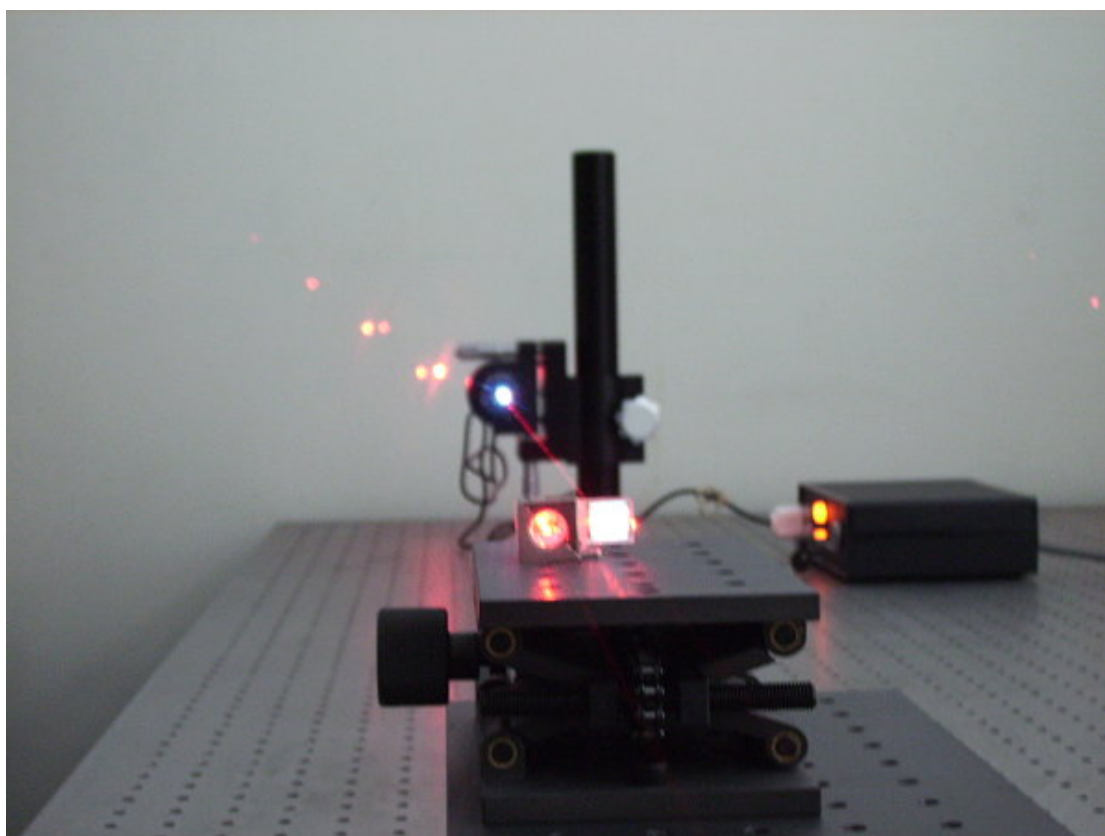
但通常，由於需要高穩定度及特殊雷射輸出特性，雷射共振腔也要有其他不同種植。而其輸出，也會利用各類偏極片及轉折鏡片或稜鏡導引，如下二圖。





本共振腔也有四個元件式雷射導引輸出元件組做雷射相位偏極匹配、分光導引雷射輸出以及雷射測距計數基準參考光電信號。下圖是本共振腔也有四個元件式雷射導引輸出元件組照片及功能示意圖。





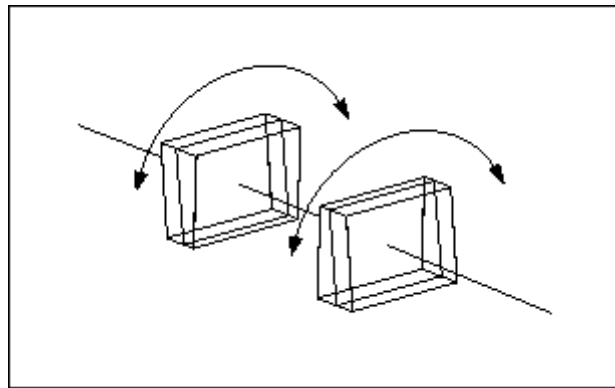
本雷射導引輸出元件組計可有雷射 Q 調制相位偏極匹配、分光導引雷射輸出以及雷射測距計數基準參考光電信號等三束分光導引。

(k) 雷射共振腔內萊斯立稜鏡組 Risley Prisms

本雷射共振腔中所用到，另一重要雷射元件就是萊斯立稜鏡組 Risley prisms。它是由兩個相對的三角片楔形物(wedge)光學元件組成的光學雷射元件。它是利用光的光徑經三角片楔形物光學元件後會偏折的現象，做雷射共振腔內光徑的對光調整。

另外萊斯立稜鏡組 Risley prisms 也可以用來補償光徑中的光譜色散 (dispersion)。下圖是萊斯立稜鏡組 Risley prisms 用來補償光徑中的大氣光譜色散。

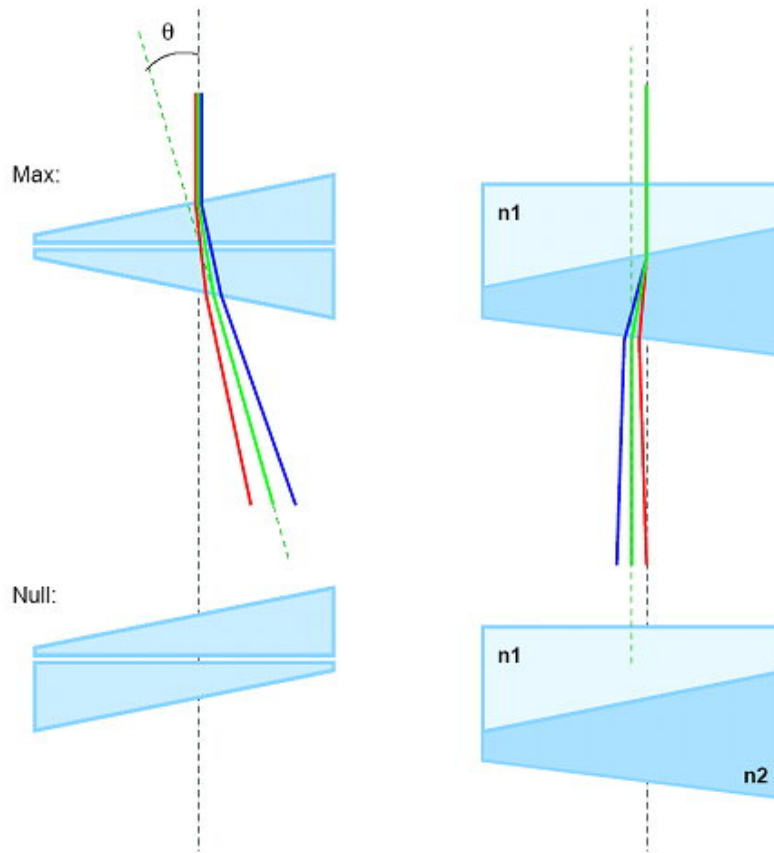
The Risley prisms are set so that their total dispersion has the same magnitude as the atmospheric dispersion, with an opposite direction.



Risley prisms to correct for the atmospheric dispersion.

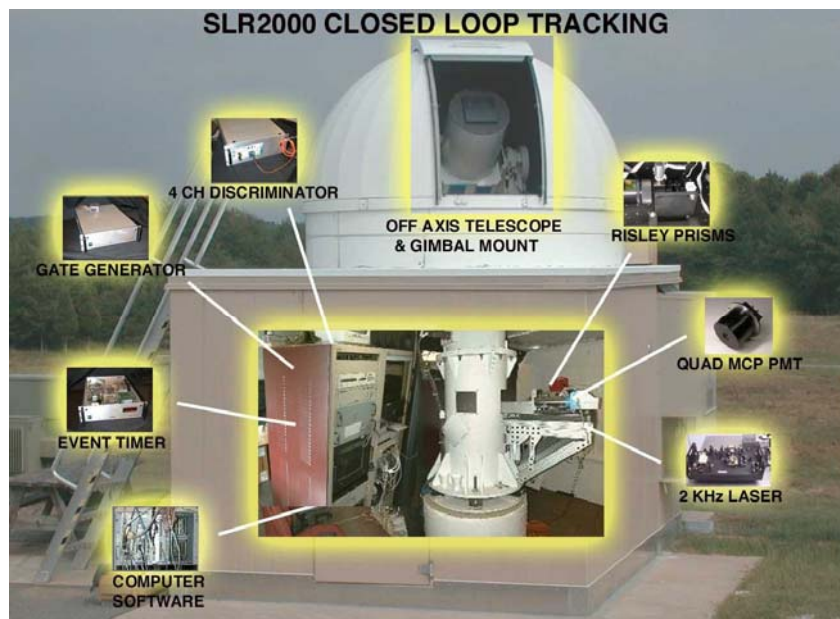
下圖是我們計畫中，雷射共振腔中所用到重要雷射光學元件，萊斯立稜鏡組 Risley prisms，其元件的結構及功能示意圖。我們可知萊斯立稜鏡組 Risley prisms 在這些系統中及本雷射架構中是用來做雷射共振腔內光徑的對光調整的。

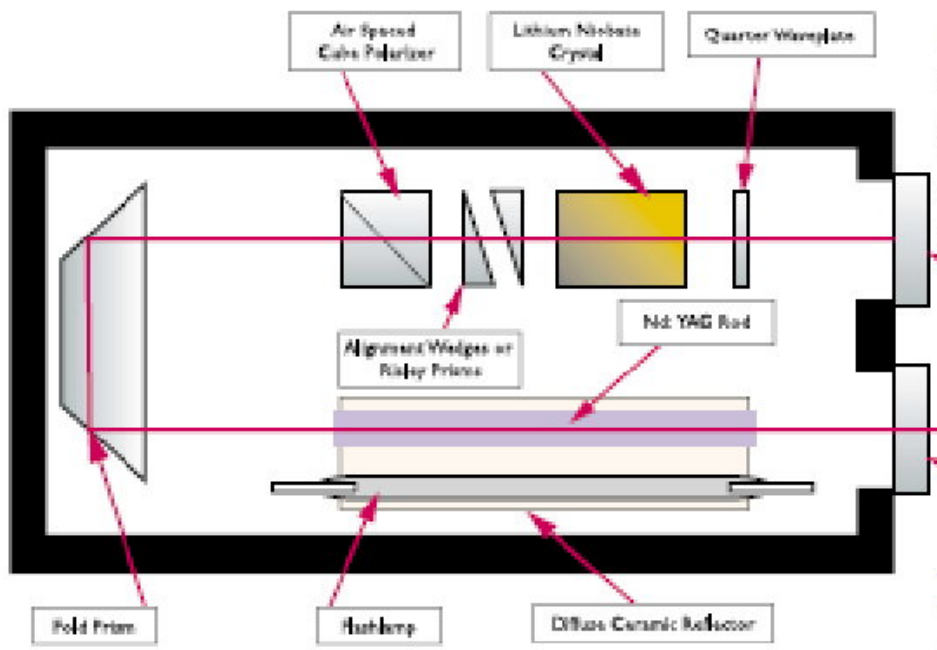
Possible ADC designs



Simple Counter-Rotating Prisms:
 -- Variable tilt of input beam
 -- must be located far from focal plane in practice.

Counter-Rotating Amici -Prism pairs:
 -- zero-deviation at design wavelength, but ...
 -- hard to find UV transmissive glasses with significantly different dispersive properties



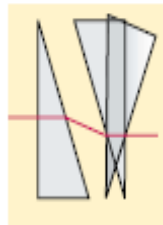


上圖是其他點典型雷射共振腔雷射發射器的系統架構，我們可以看到兩個三角片楔形物(wedge)光學元件組成的萊斯立棱鏡組 Risleys prisms 可做雷射共振腔內光徑的對光調整的用途(Alignment wedges of Risleys prisms)。

此外，最左邊的光學雷射共振腔元件，脊角棱鏡 roof-angle prism，確實也是雷射共振腔內最常用的雷射光徑轉折元件。

Alignment wedges

Alignment wedges require a considerable amount of angular displacement to cause any significant misalignment compared to mirrors.



Alignment wedges or Risleys prisms

Wedge is rotated about the beam axis to effect alignment and then locked down. Even a relatively large movement causes a small shift in the beam.

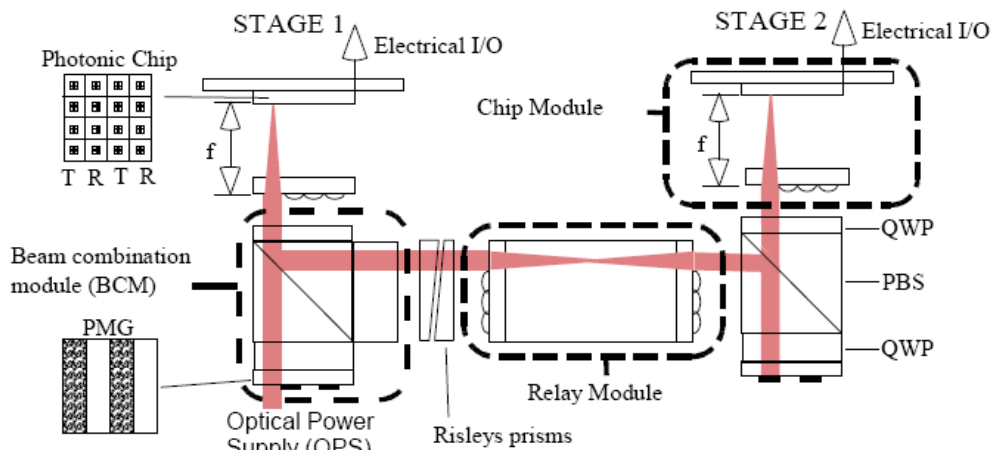
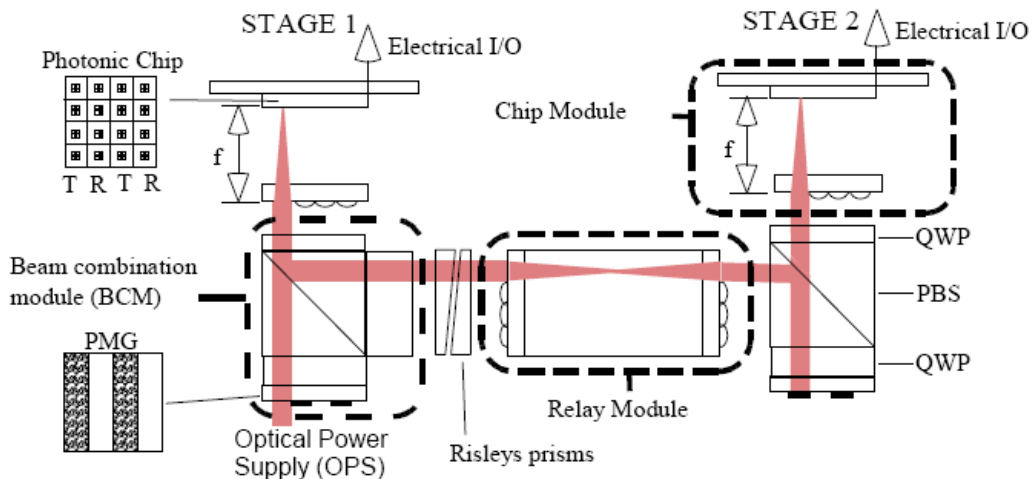
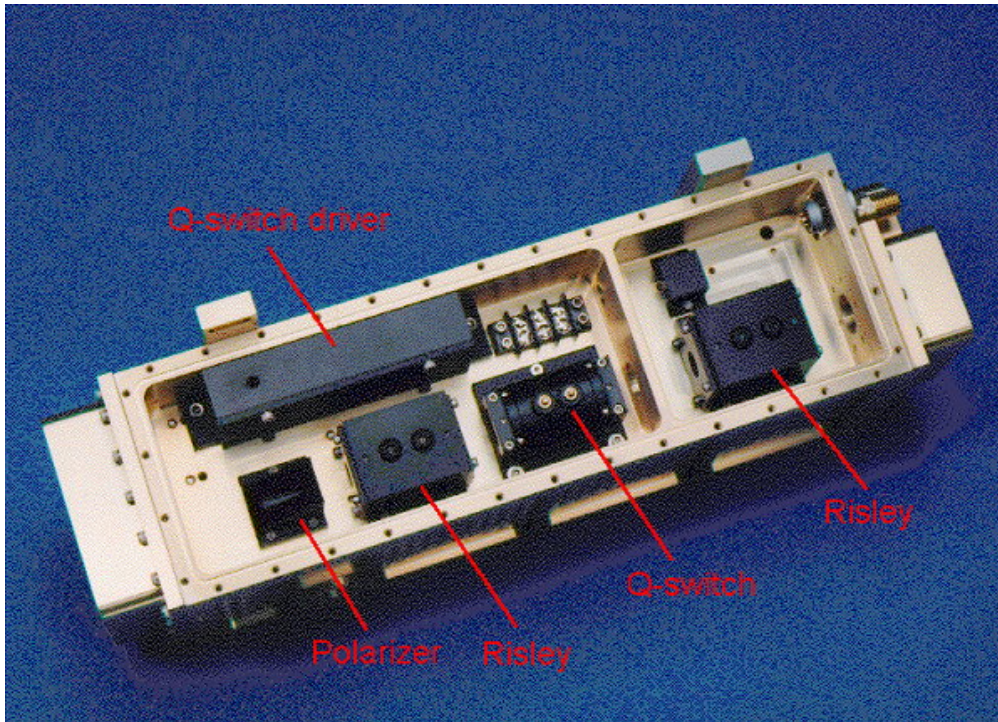


Figure 1. Flattened layout of optical system between a transmitter and a detector stage.



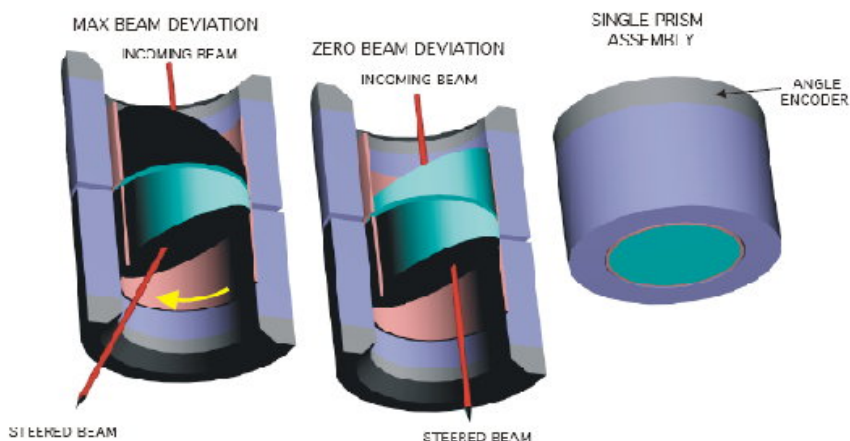
上面圖示等及說明，也可知道萊斯立稜鏡組 Risley prisms 可做雷射共振腔內光徑的對光調整的用途(Alignment wedges of Risley prisms)。

此外詳細文獻上萊斯立稜鏡組 Risley prisms 可做光徑的對光調整的用途 (Alignment wedges of Risley prisms)，也多有記載說明，我們從其中說明及圖示可以更清楚瞭解。



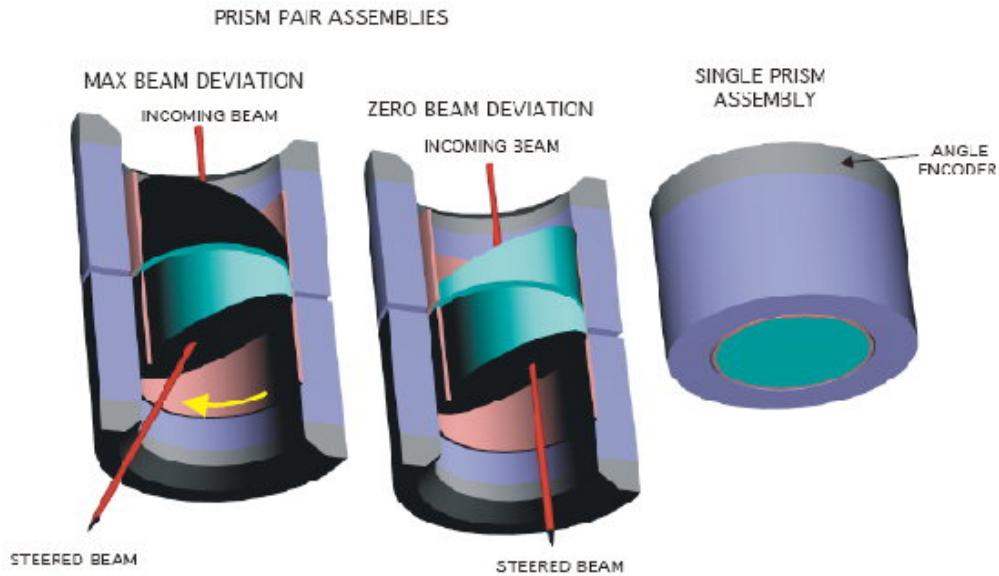
Risley prisms are classical optical devices often used for steering optical beams. Their principle of operation is the angular deviation imparted to an optical beam that passes through a wedge shaped (prism shaped) piece of optically transparent material. The amount of deviation is a function of the wedge angle of the prism and the index of refraction of the material. Prism pairs of similar geometry, when aligned with each other will double the deviation angle; when opposed, they cancel the deviation. Thus a beam can be steered from the zenith (no deviation) to some angle off the zenith. By rotating the prism pair as a rigid body, pointing in azimuth can be accomplished. The combination of prism-to-prism orientation and locked rotation of the pair allows for complete flexibility in terms of pointing the laser beam anywhere within a solid cone angle.

PRISM PAIR ASSEMBLIES



The figure above illustrates the manner in which the separate rotations of two optical prisms (or optical prism pairs) can be employed to steer a beam continuously within a cone of angle that is determined by the individual prism angles, and the refractive index of the

material of which they are made. The relative angular positions of the two prisms determines how far off axis the beam is steered, and the azimuth angle of the pair of prisms determines the azimuth angle in which the beam is steered. A range of materials is available which allows for optimization of beam steering optical characteristics



5.2. 雷射基修技術及調校步驟標準程序

(a) 雷射基修技術

(i) 雷射原理及技術

雷射原理機制、動畫、原理、公式

雷射種類

固態雷射優點

雷射技術

雷射就是：

Laser

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

LASER

光 放大 激勵 發射 輻射
激勵 發射 放大 光 輻射

激勵發射放大光輻射

一種激勵發射的放大光輻射

雷射：一種激勵發射的放大光輻射

雷射：一種激勵發射的放大光輻射

我們對軍方需求單位提供了更詳細的雷射原理機制、動畫、原理、公式，雷射種類，固態雷射優點，雷射技術教學。

Laser Tutorial Presentation

滲鈦離子亞格雷射，雷射材料就是：
Nd:YAG Lasers : Neodymium doped Yttrium Aluminum Garnet ($\text{Nd}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)



而雷射棒的規格如下：

Nd:YAG Crystal Device Specifications

Nd Concentrations Available 0.2 to 1.4%

Standard Rod Dimensions

- Diameter 0.5 mm to 15.0 mm
- Length 1.0 mm to 220.0 mm
- Slabs Miniature to large configurations

Laser Rod Specifications

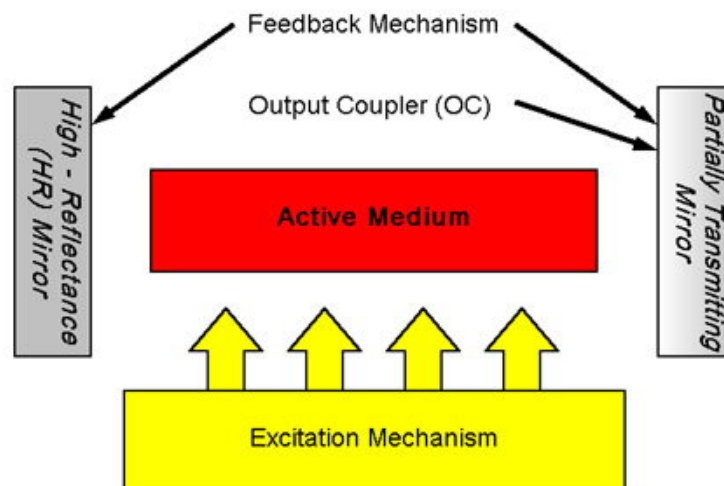
Transmitted Wavefront (per inch of rod length)	Standard Grade $\lambda/8$	Premium Grade $\lambda/20$
---	-------------------------------	-------------------------------

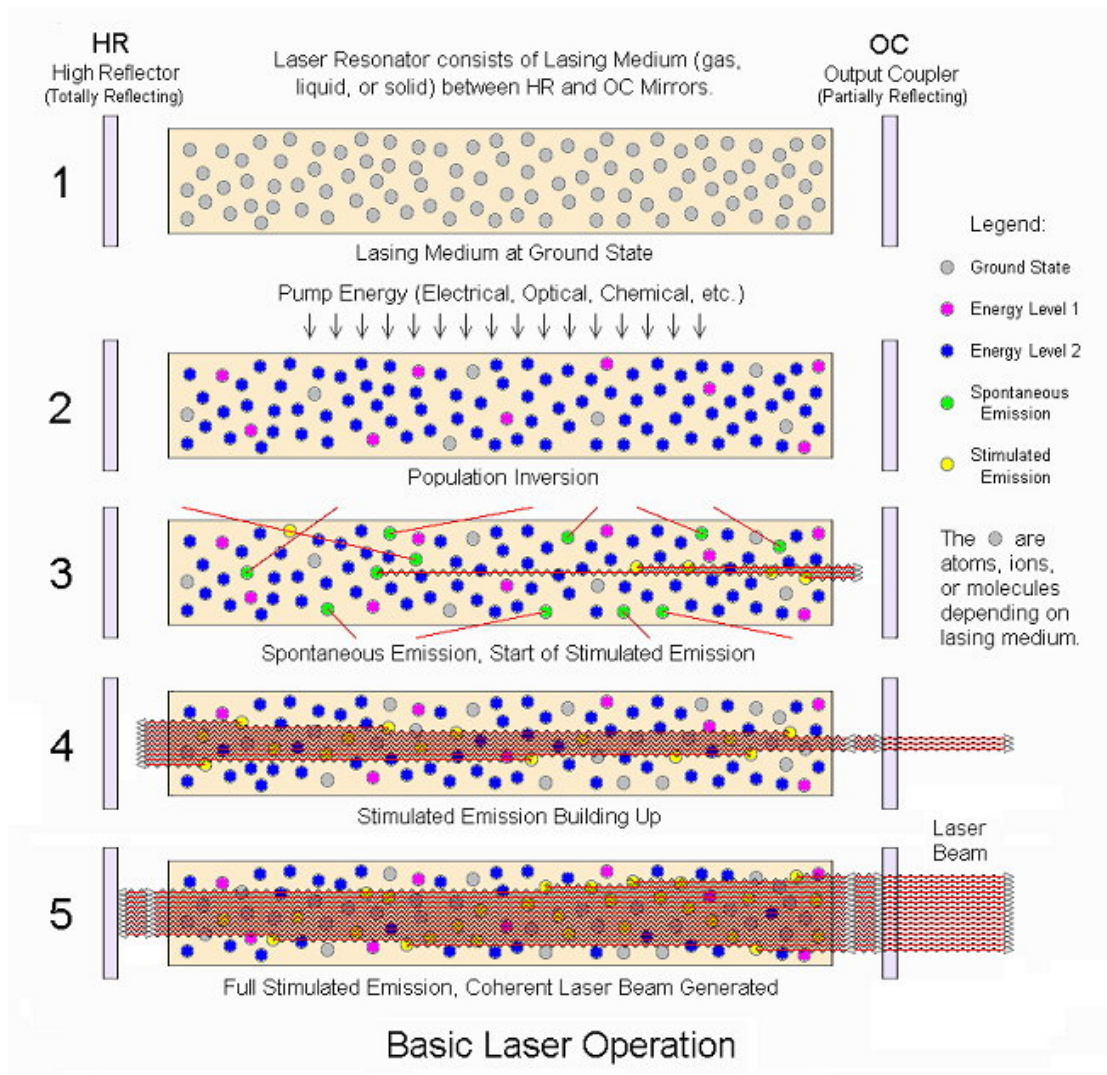
- | | |
|----------------------|-------------------------|
| • Extinction Ratio | Greater than 25 db |
| • Surface Quality | 10/5 |
| • Clear Aperture | 95% |
| • Parallelism | <10 arc seconds |
| • Perpendicularity | <5 minutes |
| • Surface Flatness | $\lambda/10$ @ 632.8 nm |
| • Barrel Finish | Ground or Polished |
| • Chamfer | 0.13 +/- 0.08 mm @ 45° |
| • Diameter Tolerance | +0.0, -0.025 mm |
| • Length Tolerance | +/- 0.5 mm |

Configurations

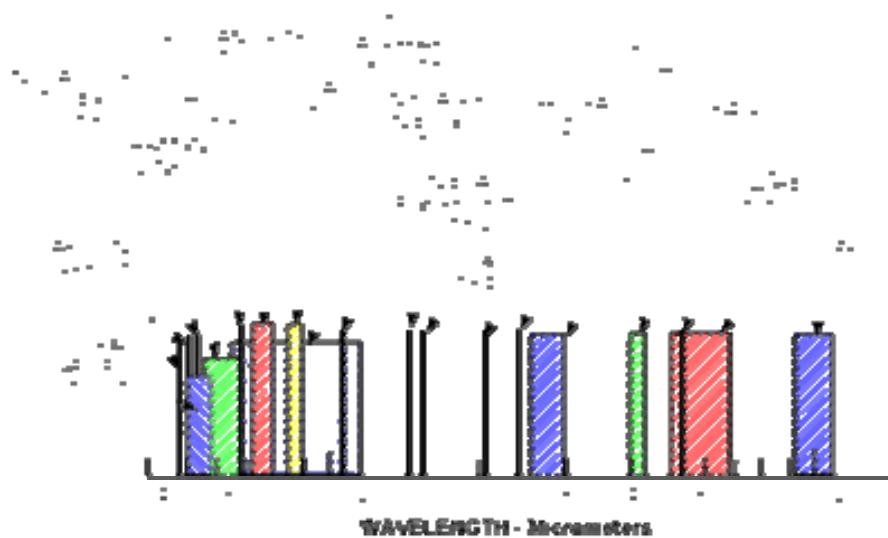
- Flat/Parallel
- Tilt Ends
- Radius Ends
- Brewster/Brewster Ends
- Slab Designs
- Polished and Grooved Barrels
- Diode Pumped Mini-rods
- Custom Geometries

固態氈鈦離子亞格雷射，其原理如下：

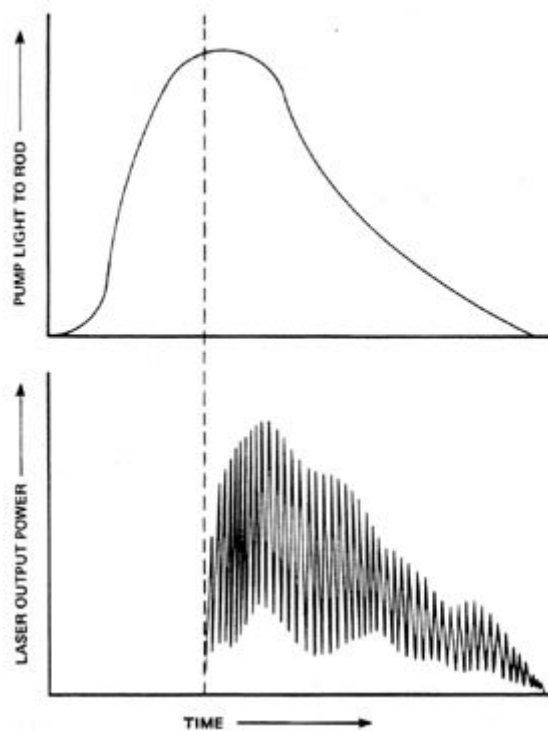




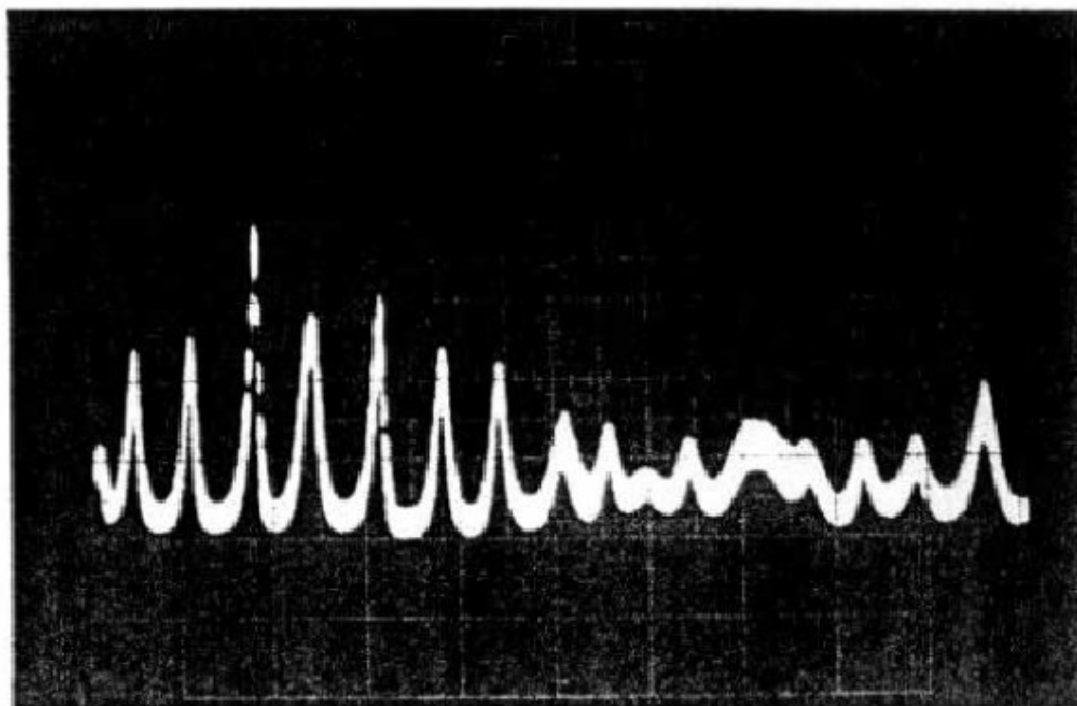
相對的，各類雷射波長可表示如下：

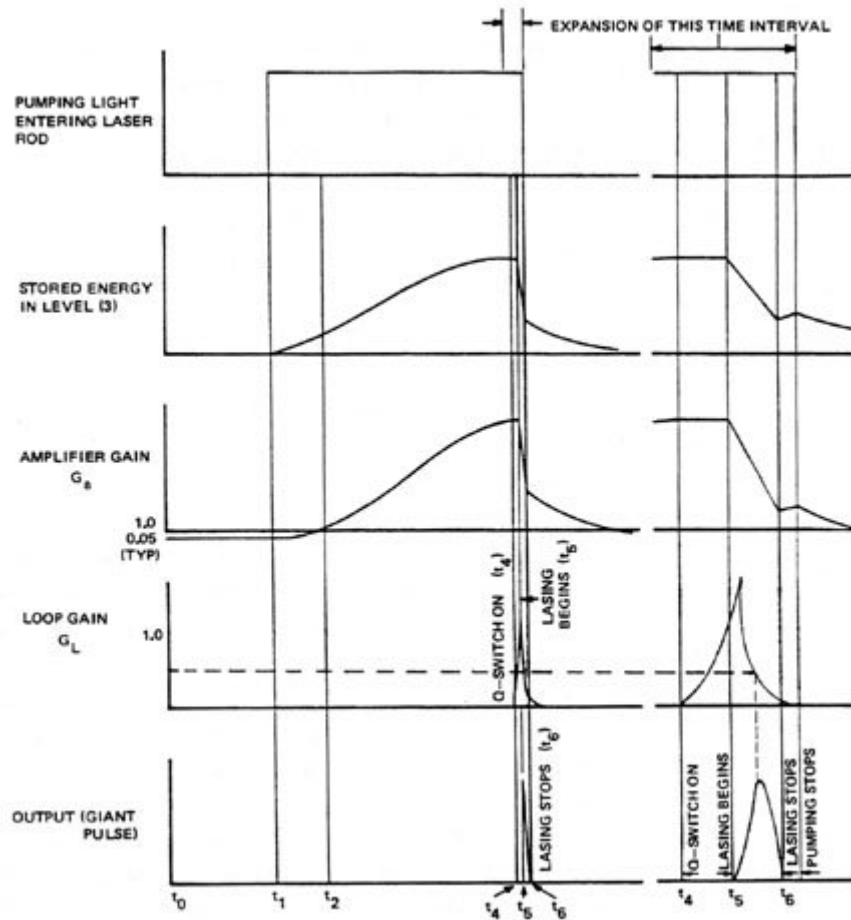


下圖是激勵雷射的閃光燈波形圖，以及 Conventional laser 的輸出。



Conventional laser 的輸出，我們量測的照片圖。





雷射光是非常有殺傷力的，由其對人眼更具危險性。通常維修或研究都要帶護目鏡保護，更要防護戰場上，敵人的致盲攻擊。





Class II -- "Caution"



Class IIIa -- "Danger"



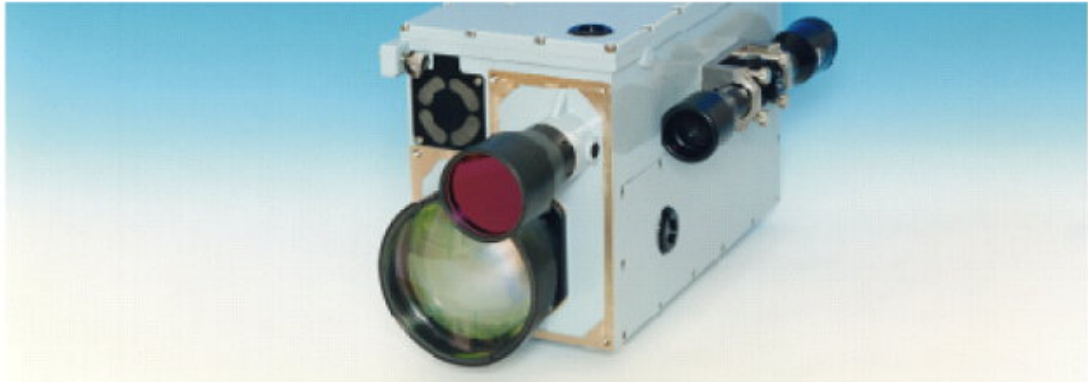
Class IIIb -- "Danger"



Class IV -- "Danger"

以上是雷射功率等級的，區分警示圖。

海軍用的測距追蹤導引雷射：



Eye-Safe Laser Rangefinder for Navy application.



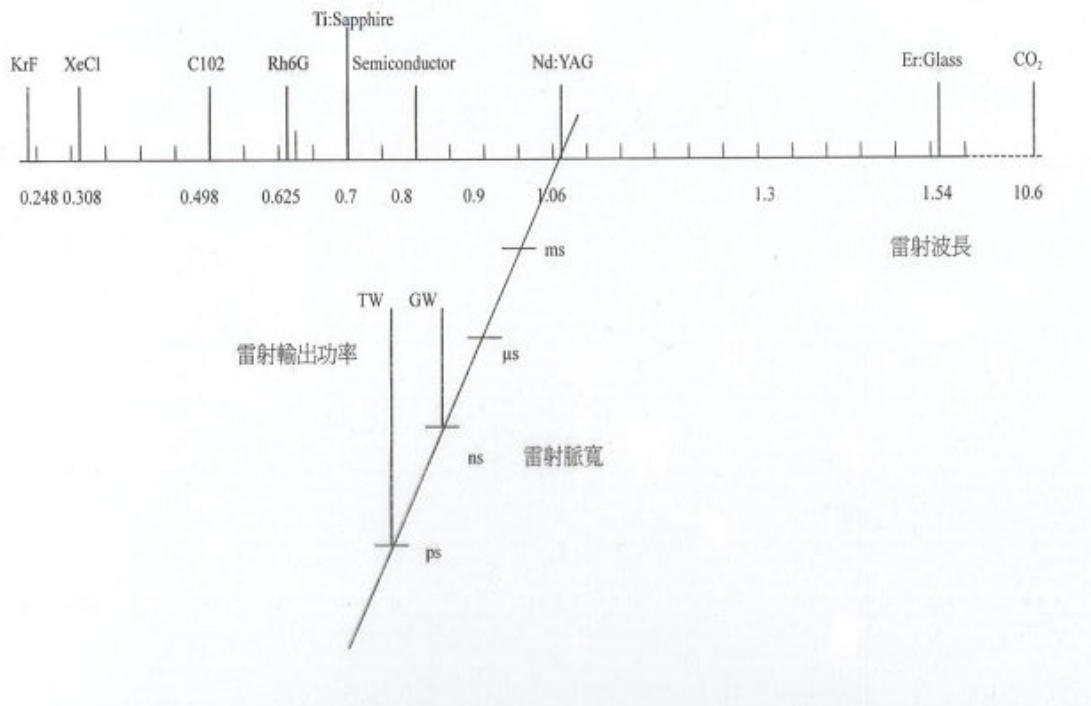
Eye-Safe Laser Rangefinder for Navy application.

雷射之種類，特徵與應用例

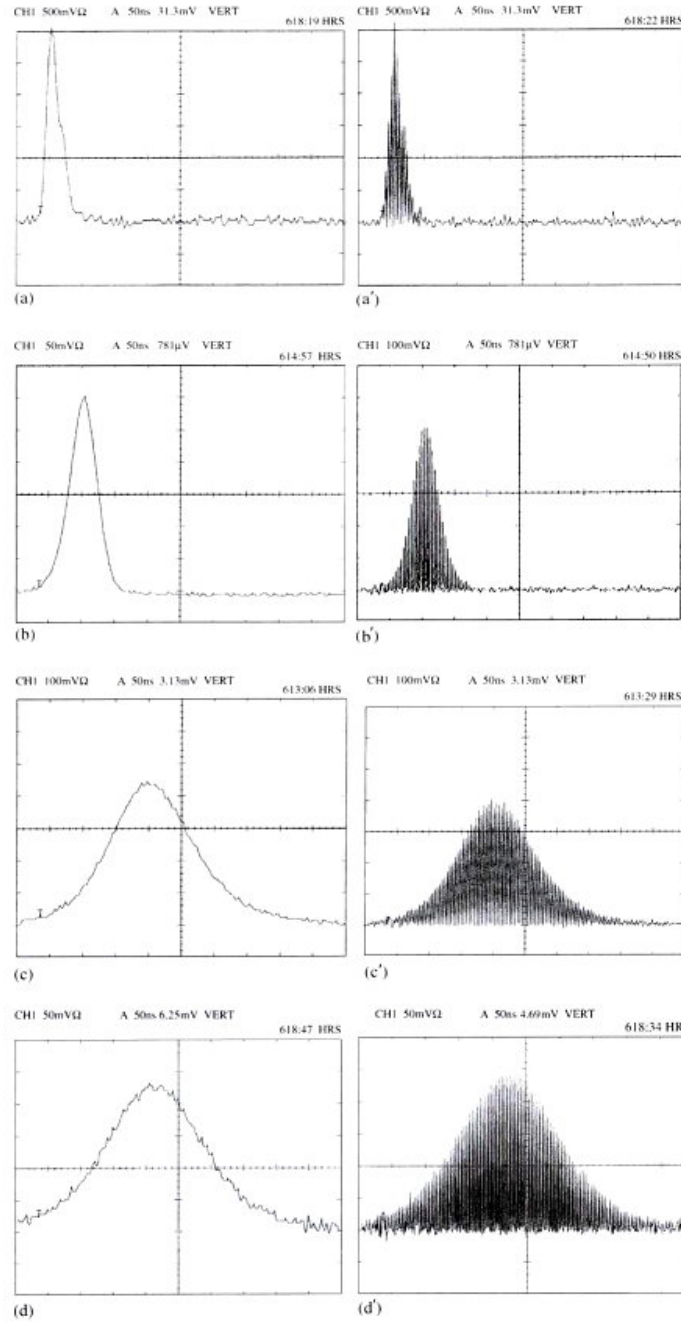
相	種類	活性物質	振盪波長	形態	特徵	應用例
氣	He-Ne 雷射	Ne	632.8nm	連續	功率雖小，但可作同調性佳的穩定輸出、操縱簡單	測量(C)量測(A,B)空中傳播(A、C)、顯示(A、C)、光記憶體、印表機(C)
	氬氣雷射	Ar	488nm 514.5nm 330 nm to 360 nm	連續	功率大，且可作同調性佳的穩定輸出	量測(A,B)、水中通信(A、C)、凝結器、IC 光罩加工(C)工、顯示器(A、C)
	二氧化碳氣體雷射	CO ₂	10.6 μm	連續	高輸出功率、高效率紅外線	加工(C)、雷射手術刀(C)、量測(A、C)、雷射雷達(A、C)
	氮氣雷射	N ₂	337.1nm	脈衝	短脈衝 近紫外線	分光研究、色素雷射用激發光源
	準分子雷射	ArF、 KrF、 XeCl、 XeF	193、 248、 308、 351nm	脈衝	高輸出 紫外線	光化學反應、加工、染料雷射用激發光源、脈衝雷達(A、C)
	金屬蒸汽雷射	Cu、Au	511、 578nm 628nm	脈衝	高速度往復 平均輸出大	色素雷射用激發源、高速度攝影機用光源
液體	染料雷射(色素雷射)	Rhodamin e-6G coumarin 及其它	0.32~1.2 μm	脈衝 連續	波長可變 超短脈沖雷射	研究用光源、同位素分離(A、C)D 雷射雷達(A、C)
固體	紅寶石雷射	Cr:Al ₂ O ₃	694.3nm	脈衝	高能量脈衝 高功率輸出	量測(A、B、C)、雷射雷達(A、C)

YAG 雷射	Nd:YAG	1.06 μm	脈衝 連續	高能量脈衝、高輸出、高速往復	加工(C)、雷射手術刀(C)、雷射測距及雷達(A、C)
玻璃雷射	Nd:Glass	1.05 μm	脈衝	超高能量單一脈衝	雷射核融合(C)
半導體雷射	GaAlAs/ GaAs InGaAsP/ InP (PbSn)Sn Te	0.84 μm 1.2~1.6 μm m 2~20 μm	脈衝 連續	袖珍、可直接調整脈衝	光通信(A、C)、光計算機(B)、光記憶體(C)、雷射光碟(C)

雷射三度參數



我們的 Q 調制雷射的技術成果：



The Q-switched pulses and the Q-switched mode-locking pulses passively modulated by the plastic dye sheets, the LiF:F₂⁻ crystals, the Cr⁴⁺:YAG and the Schott RG1000 color filter glass are shown in (a), (b), (c), (d) and (a'), (b'), (c'), (d') respectively.

我們的雷射技術：

雷射波長調制技術(Spectral shifting)

1. 雷射倍頻
2. 雷射移頻
3. 雷射混頻

雷射脈寬調制技術(Temporal modulation)

1. Q-switch (Q-調制，ns，nanosecond pulses generation)
2. Mode-locking (鎖模，ps，picosecond pulses generation)
3. Ultrashort light pulses generation (超短脈衝產生 femtosecond pulses generation)

雷射能量及功率調制技術(Laser amplification)

1. Laser amplifier

雷射輸出型式(脈寬)

(1) 連續式 CW

(2) Quasi-CW : KHz

(3) 脈衝式 : $\mu\text{s}(10^{-6}\text{s})$, $\text{ns}(10^{-9}\text{s})$, $\text{ps}(10^{-12}\text{s})$, $\text{fs}(10^{-15}\text{s})$

脈衝量測 : 示波器 CW , Quasi-CW , $\mu\text{s}(10^{-6}\text{s})$, $\text{ns}(10^{-9}\text{s})$

Streak Camera , $\text{ps}(10^{-12}\text{s})$

Auto-correlator , $\text{fs}(10^{-15}\text{s})$

1. Q-Switch(Q 調制 ; ns pulse generation)

- 現象

- 主動式 : Rotating mirror

E-O switch , LiNbO_3

A-O switch

- 被動式 : Saturable Absorber

1. Dye sheet : saturable absorbing dye in cellulose acetate form

2. Color center crystals : $\text{LiF} : \text{F}_2^-$

3. Saturable absorbing crystals : $\text{Cr}^{+4} : \text{YAG}$, $\text{Er}^{+3} : \text{Glass slab}$

4. Saturable filter glass : SCOHOTT RG1000 ionically colored glass

5. Semiconductor : GaAs , InP

雷射技術與產品及應用

雷射標示

雷射水平儀
雷射直角尺
雷射T型尺
雷射十字尺
雷射水平尺
雷射鉛垂
雷射標線器
雷射筆
雷射指示器
雷射模組
三合一捲尺

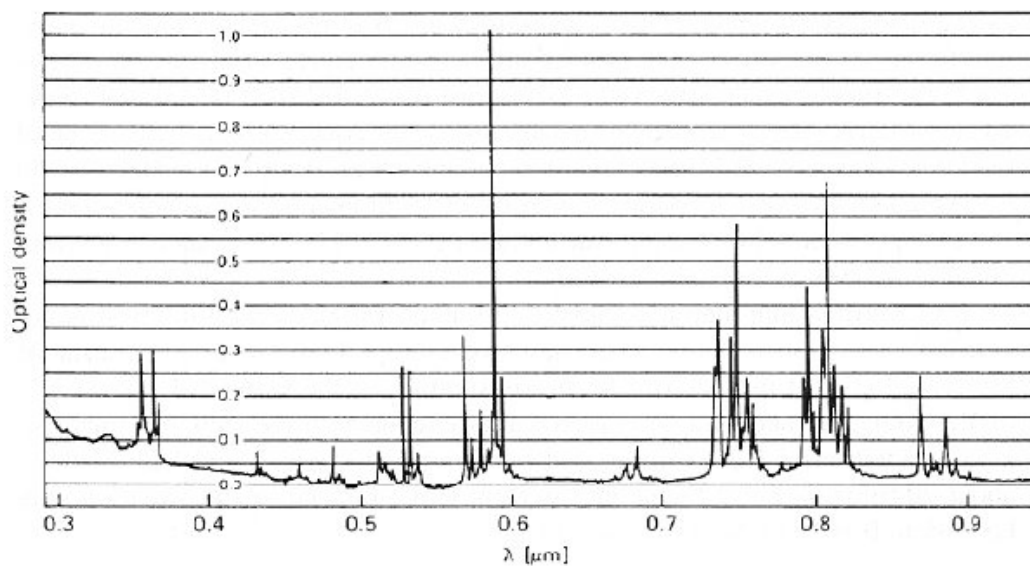
雷射量測

雷射測距
雷射測速
雷射雷達
雷射追蹤導引
雷射導航
雷射自動駕駛

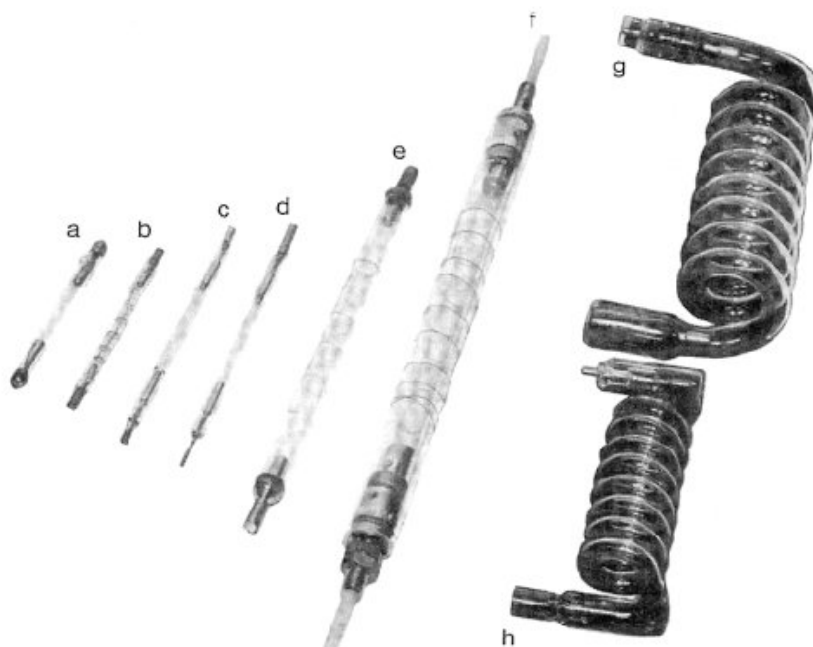
雷射模組及應用

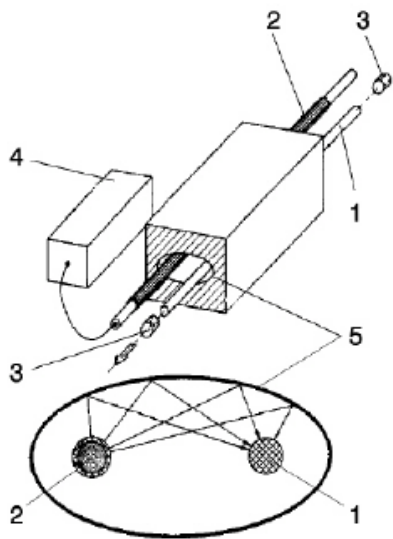
醫療雷射模組
工業加工雷射模組
民生用雷射模組
軍用雷射模組
科學雷射模組

Absorption spectrum of Nd:YAG

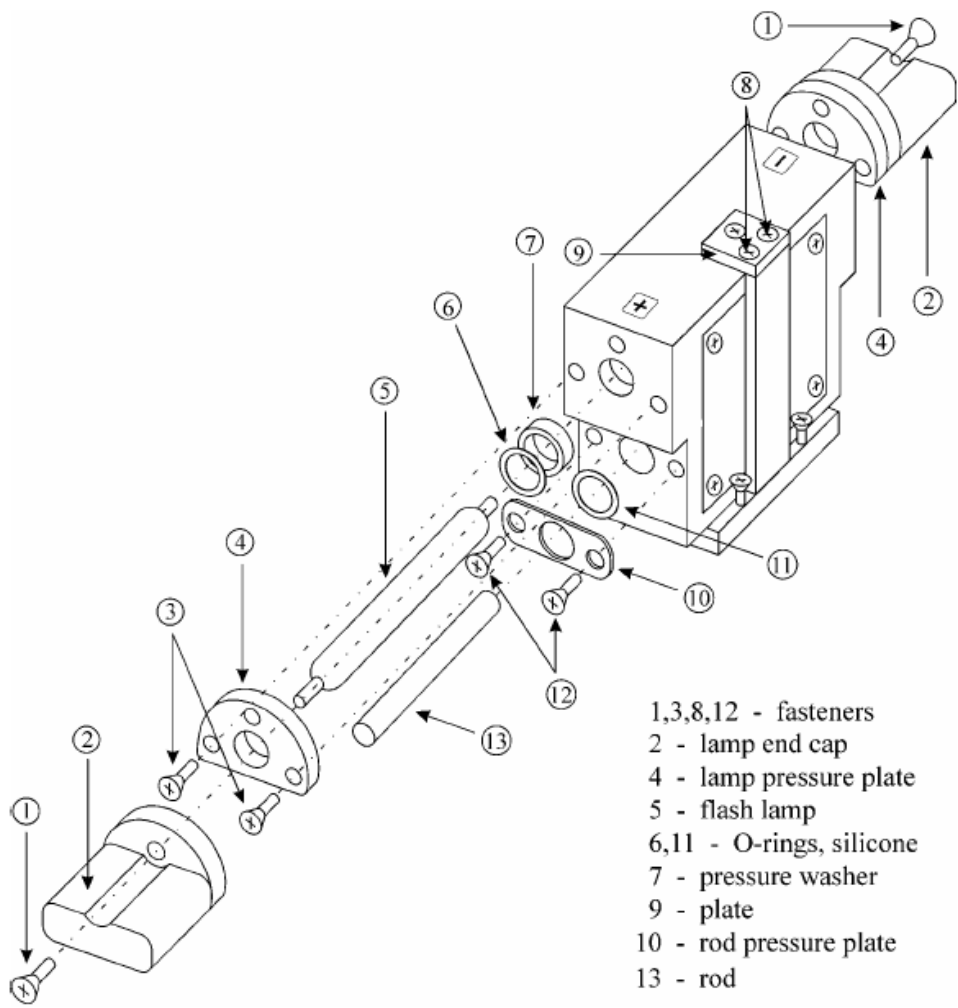


Flash lamps





- | | |
|---------------------|--------------------------------|
| 1 Laser rod | 4 Lamp power supply |
| 2 Lamp | 5 Reflective elliptical cavity |
| 3 Resonator mirrors | |



- 1,3,8,12 - fasteners
- 2 - lamp end cap
- 4 - lamp pressure plate
- 5 - flash lamp
- 6,11 - O-rings, silicone
- 7 - pressure washer
- 9 - plate
- 10 - rod pressure plate
- 13 - rod

(ii) 雷射 Q 調制原理及技術

Q 調制原理

Q 調制種類

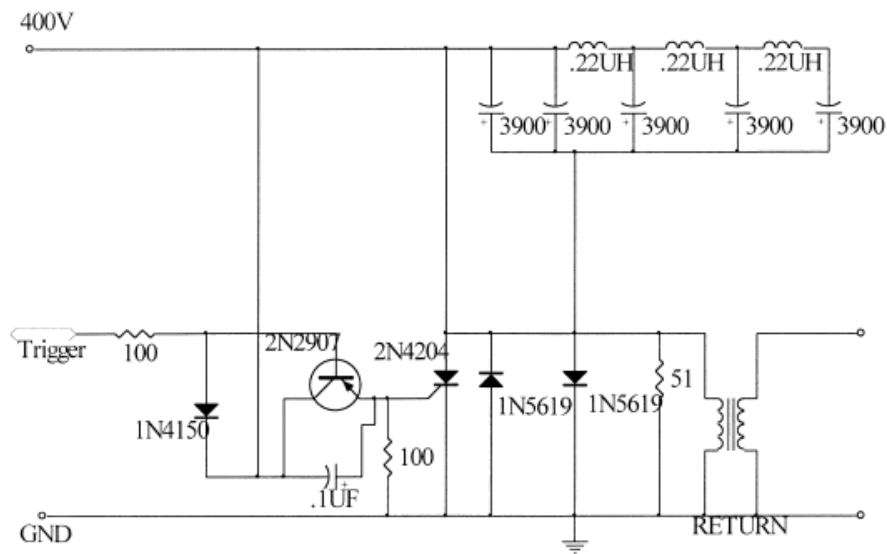
Pockels Cell 結構、分析、特性、優點、應用、照片

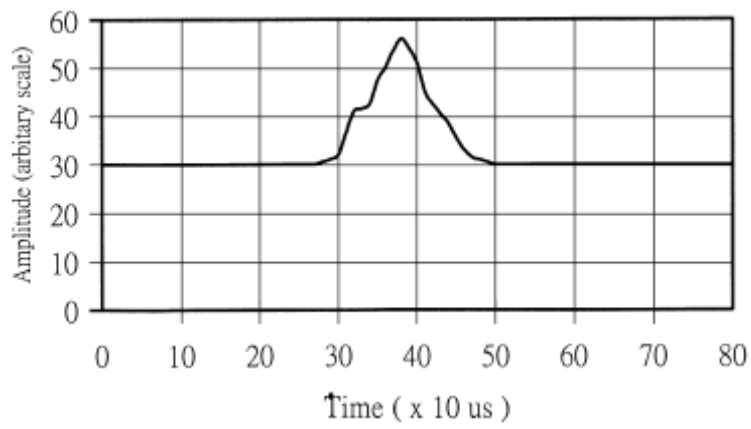
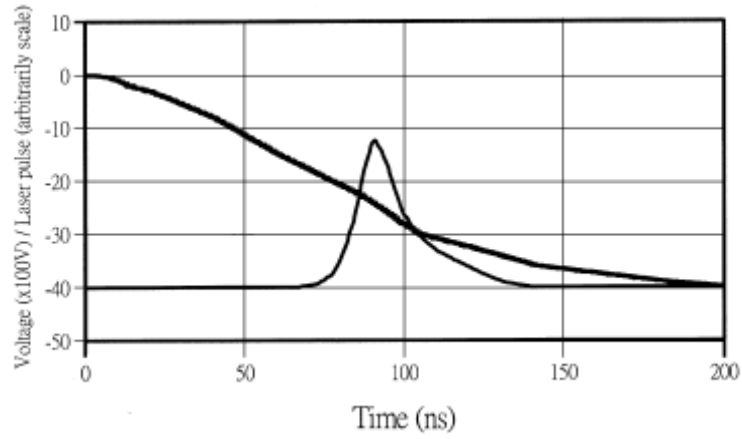
Q 調制:驅動電路(電壓)、同步及時序

Q 調制原理及技術

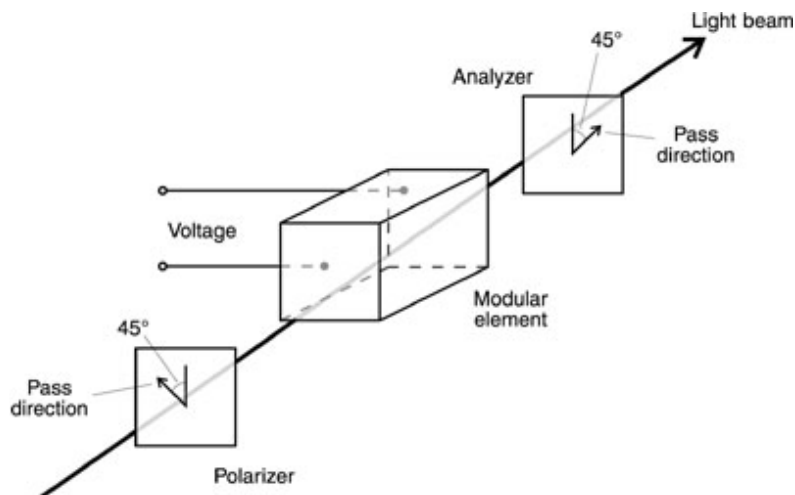
測距追蹤導引的滲鈦離子亞格雷射，一定要用巨脈衝 Q 調制雷射脈衝，及鎖碼的雷射脈衝串，才能達到目的。所以 Q 調制原理，Q 調制種類，Pockels Cell 結構、分析、特性、優點、應用、照片，Q 調制:驅動電路(電壓)、同步及時序，Q 調制原理及技術等等是產生巨脈衝 Q 調制雷射最重要的知識及技術。我們已在本結案報告書中有詳細研究結果報告，下面內容是我們專精的研究成果確實提高 Q 調制雷射輸出效益達百分之三十以上。

我們用我們獨特研究並已發表的優化的緩開關驅動電路，其觸擊發高壓電壓，和雷射脈衝的輸出時序圖，輸出雷射光，其能量的空間分布圖如下做對比，我們可發現雷射的輸出能量及功率可以提高百分之三十以上。

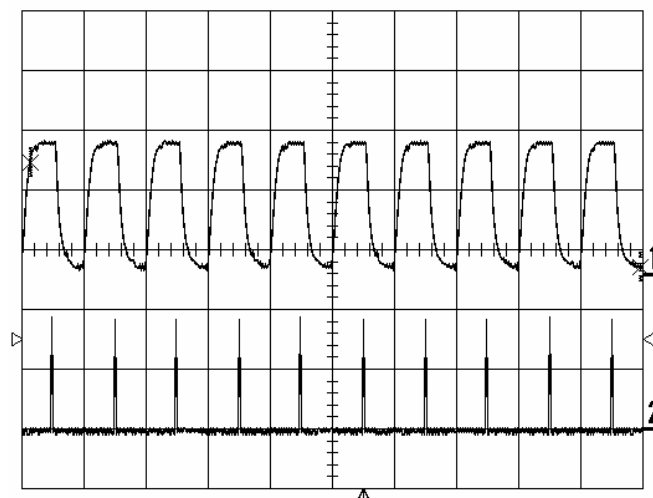
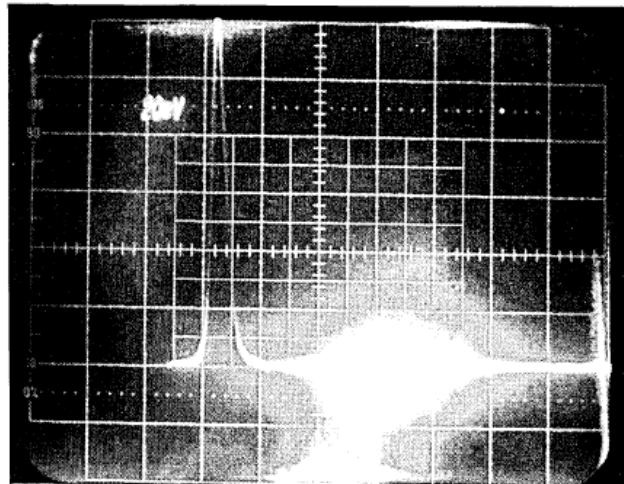
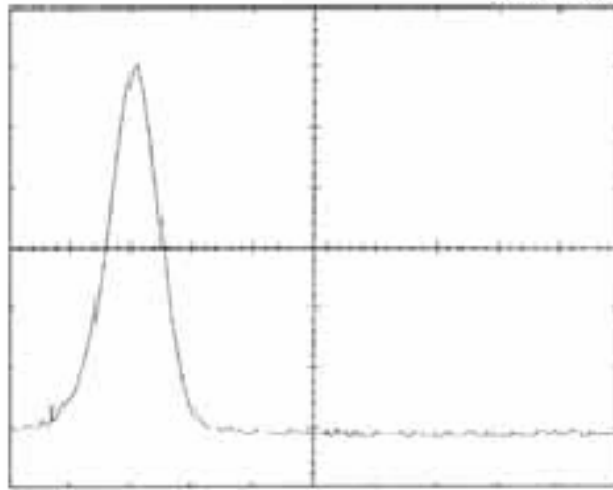


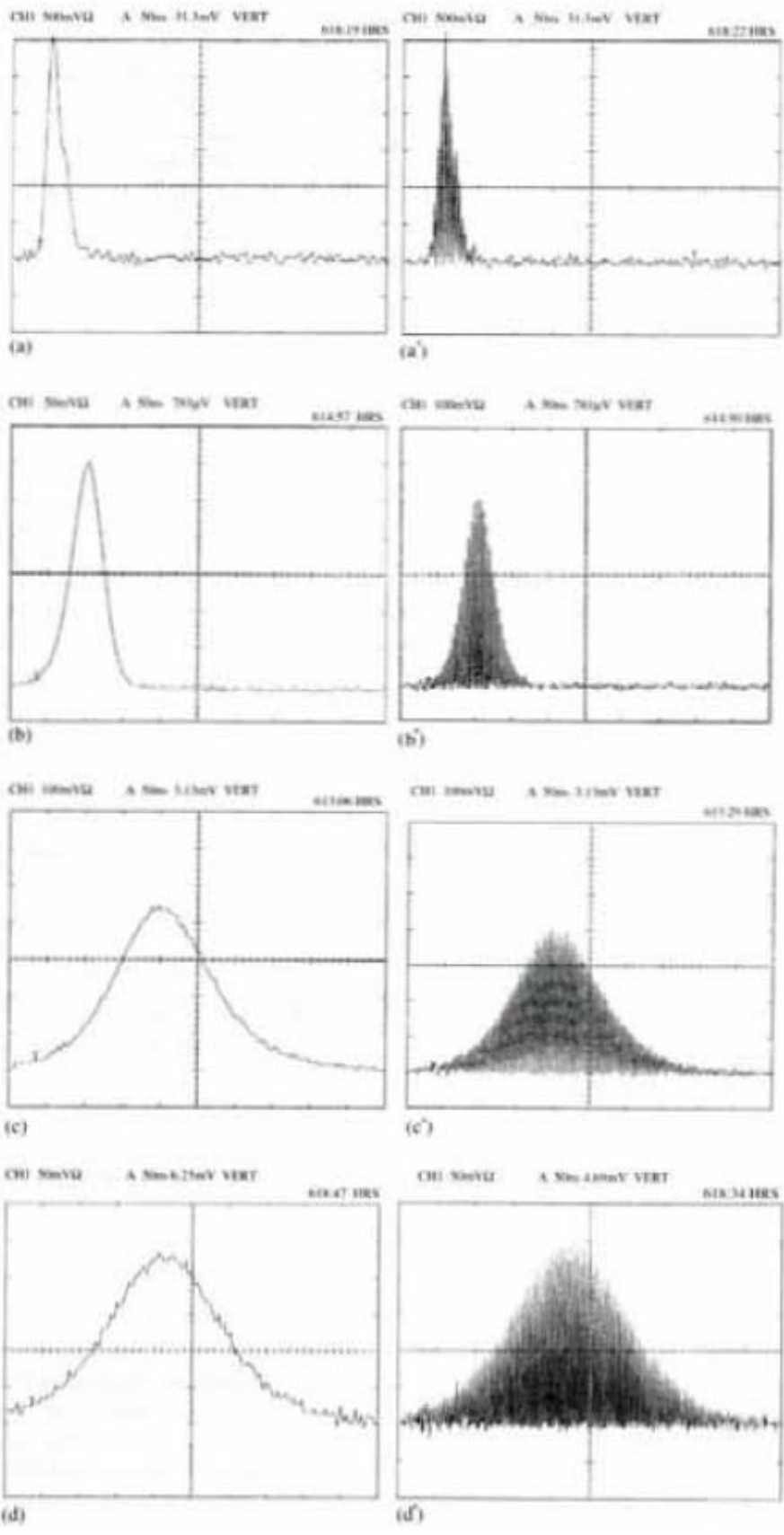


	Laser pulse yield by slowly opened switch	Laser pulse yield by fast opened switch
Output energy	$E_s = 63 \text{ mJ}$	$E_s = 48.9 \text{ mJ}$
Beam divergence	0.437 mrad	0.6 mrad
Laser pulsewidth (FWHM)	18 ns	20 ns
Output peak power	3.5 MW	2.45 MW



下圖等是我們量測到的巨脈衝 Q 調制雷射脈衝，雷射脈衝串的脈衝圖。其中每格為 10ns 時間寬度。





(iii)雷射基修技術

基修知識

雷射安全

無塵室需求及概念

基修技術

要有雷射五級基修技能量，首先最重要的要有雷射，尤其是固態雷射的基本知識，本結案報告書除了研究結果報告，也綜合了固態雷射的基本知識，希望軍方使用單位，在做基修工作時，可以做為量測及調校的技術手冊，及參考資料。

雷射五級基修工作，一定要有固態雷射的基本知識，同時更要有雷射的安全規範，及雷射危險的標示，和安全防護的最重要裝備:護目鏡。

下頁所列，是雷射的安全規範，以及對人眼傷害的說明圖。

當然，雷射是精密且高功率的光源，首先我們知道測距追蹤導引的滲鋁離子的亞格雷射波長是 $1.06\mu\text{m}$ ，也就是說雷射光的波長是 $1\mu\text{m}$ 左右。而空氣中，除非是最嚴格的無塵室，百級或千級，它美立方公尺灰塵的數目小於一百顆或一千顆。否則空氣中，一定充滿了萬顆百萬顆以上的，灰塵的數目。這些灰塵的大小，與雷射光的波長是 $1\mu\text{m}$ 相近，會產生雷射光的干擾，更重要的是。這些灰塵如果沾粘，依物理特性一定會，到雷射光電元件的表面。由於雷射光的強度非常高，任何沾粘到灰塵的雷射光電元件的表面，都會產生物質受高能高熱的作用，而嚴重破壞雷射光電元件的表面鍍膜，及整個雷射光電元件。所造成的熱點或材料的崩裂等，都會大大的減少雷射光的輸出及效益。所以雷射五級基修原則上一定要在百級或千級，的無塵室內執行。或者要在相對非常乾淨單獨房間內執行。

至於基修技術，有關輸出能量的量測，其知識、技術、及儀器等，我們都有示範且詳細說明。再有，其調校及元件的更換，我們有圖示的標準步驟，不但可以調校及作做元件的更換，更顯示了所有二十六個雷射光電元件的架設，從第一個元件開始，依性能特點，一個一個，一組一組，對光調進雷射腔內。

雷射操作及安全守則

- A. 避免用眼睛直接注視雷射光或其反射光。
- B. 雷射管中具有高壓電裝置，在使用時必須保持適當的警覺。電路接地應確實做好。不用雷射時立刻拔掉插頭或關掉電源。
- C. 不可使用雷射光照射到他人的眼睛或臉部，且最好限制不必要的旁觀者。
- D. 在實驗區域附近，不可亂置一些不必要的反光物，尤其是鏡面類物品，更須嚴格列管，對與雷射光路同一水平的鏡片，要格外留意。
- E. 雷射運轉時，應設置警告標誌或警告燈，以防外人不慎進入雷射光路中。
- F. 最好配戴適當的保護眼鏡，保護眼鏡通常是偏光鏡或是針對特殊波長高吸收率的染料鏡片，但勿太倚賴這種眼鏡。
- G. 不可嘗試自行拆開運轉中的雷射作維修工作，應委由專業人員執行維修。有些脈衝雷射裝有高壓電容，即使關機亦不可任意作拆卸之工作。
- H. 實驗室照明盡可能調亮，以縮小瞳孔，減少雷射光射入到視網膜的能量，減低視網膜受傷之可能。
- I. 為了可以長時間直接且舒適的工作，將所需要的雷射儀器與設備選擇一適當高度是必要的，在此建議將雷射大約放置在我們一般人高度的一半，亦即腰部的位置。
- J. 若有意外發生，立即就醫，若眼球受傷，應找眼科大夫醫治。

Fig. 2

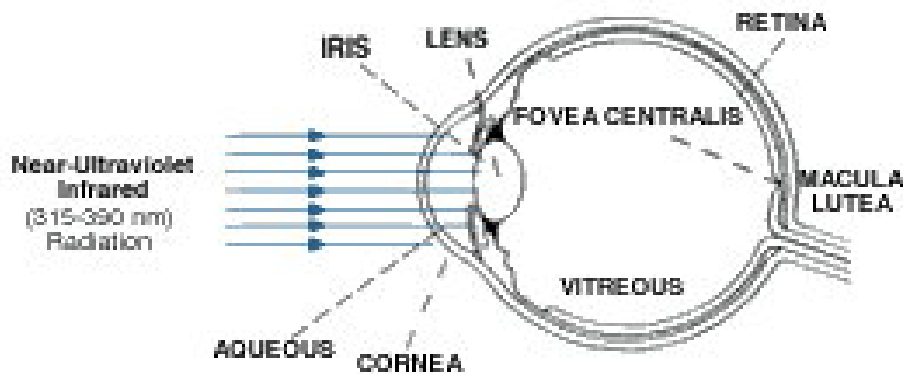
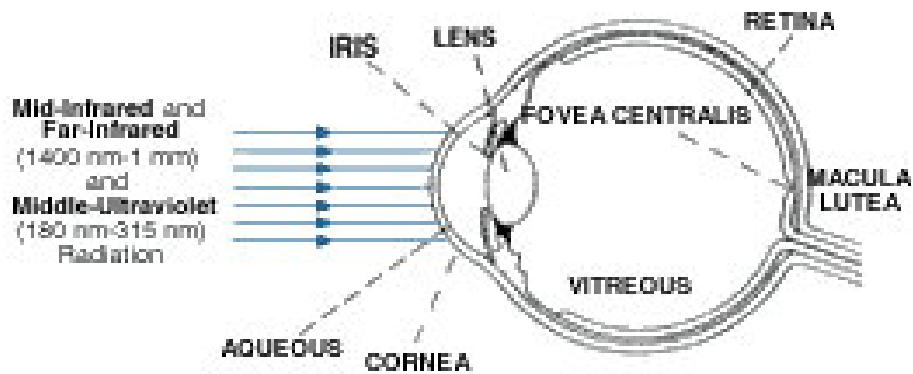
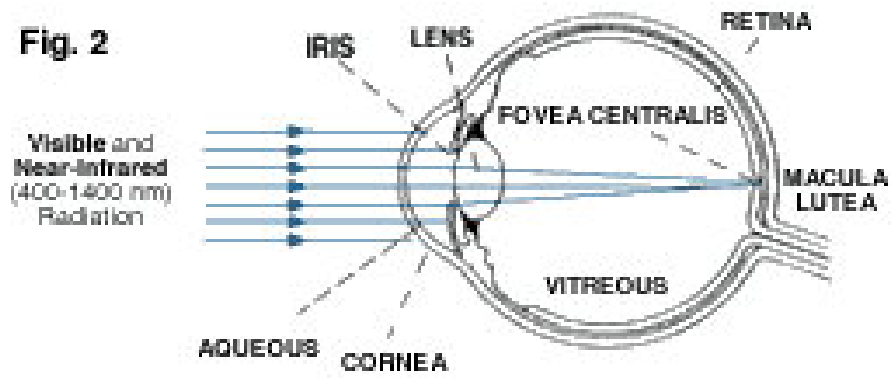
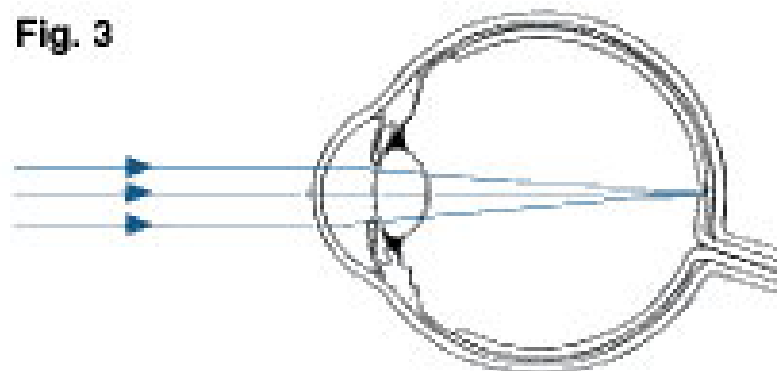


Fig. 3



FOR WAVELENGTHS THAT FOCUS ON THE RETINA (400 TO 1400 nm)
THE OPTICAL GAIN OF THE EYE IS ABOUT 100,000 TIMES

IF THE IRRADIANCE ENTERING THE EYE IS 1 mW/cm^2
THEN THE IRRADIANCE AT THE RETINA WILL BE 100 W/cm^2

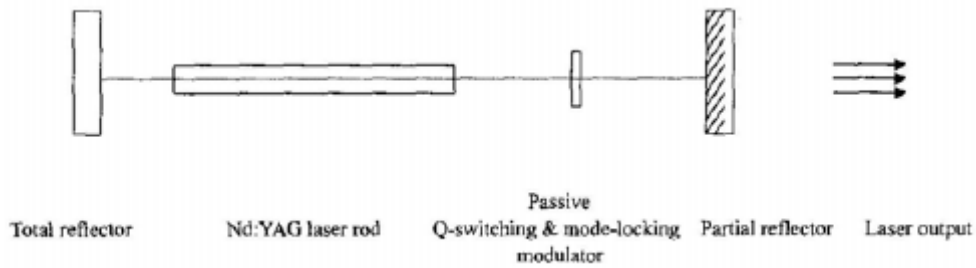
(b) 雷射調校步驟標準程序

(i) 雷射共振腔

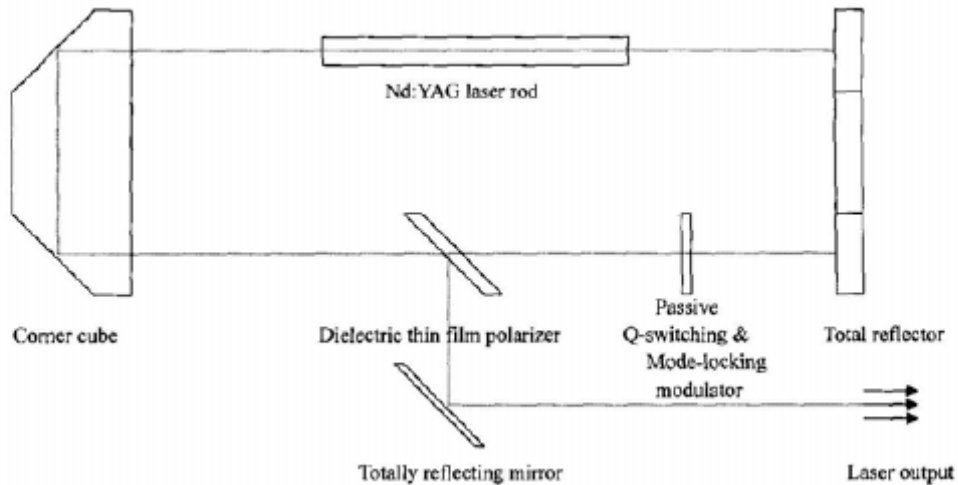
共振腔各種架構

本計畫所用的雷射共振腔，是使用穩定性最高，失調性最低的直角稜鏡組 Porro resonator。當然，它有較好優異點，也會比較難調出雷射架構，但是雷射架構調好後，它的穩定性及失調性都最好，也就是說在嚴苛的高溫及寒冷環境下，以及振動力強的基座上，它的穩定性及失調性都是最好的。

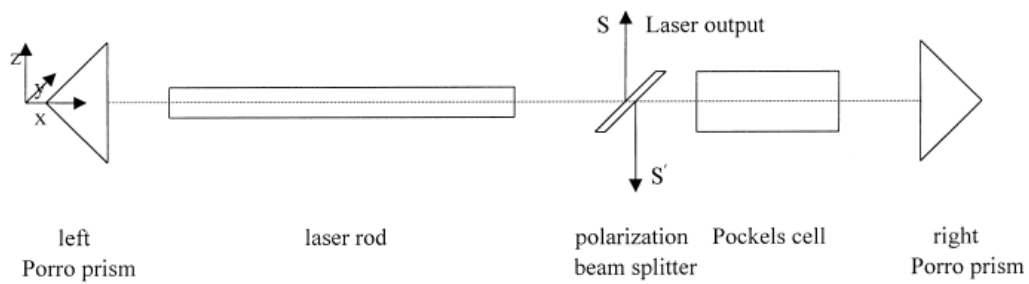
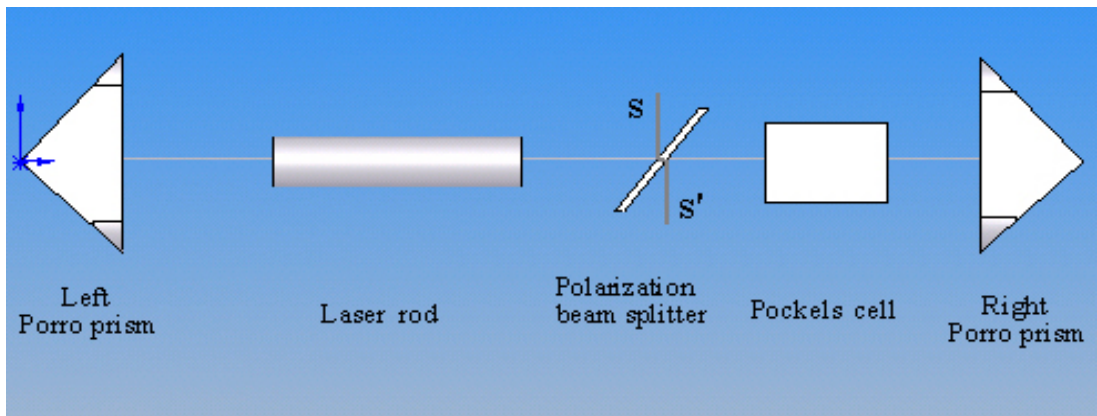
下圖是，傳統的雷射基本架構，簡單且只有最少元件。



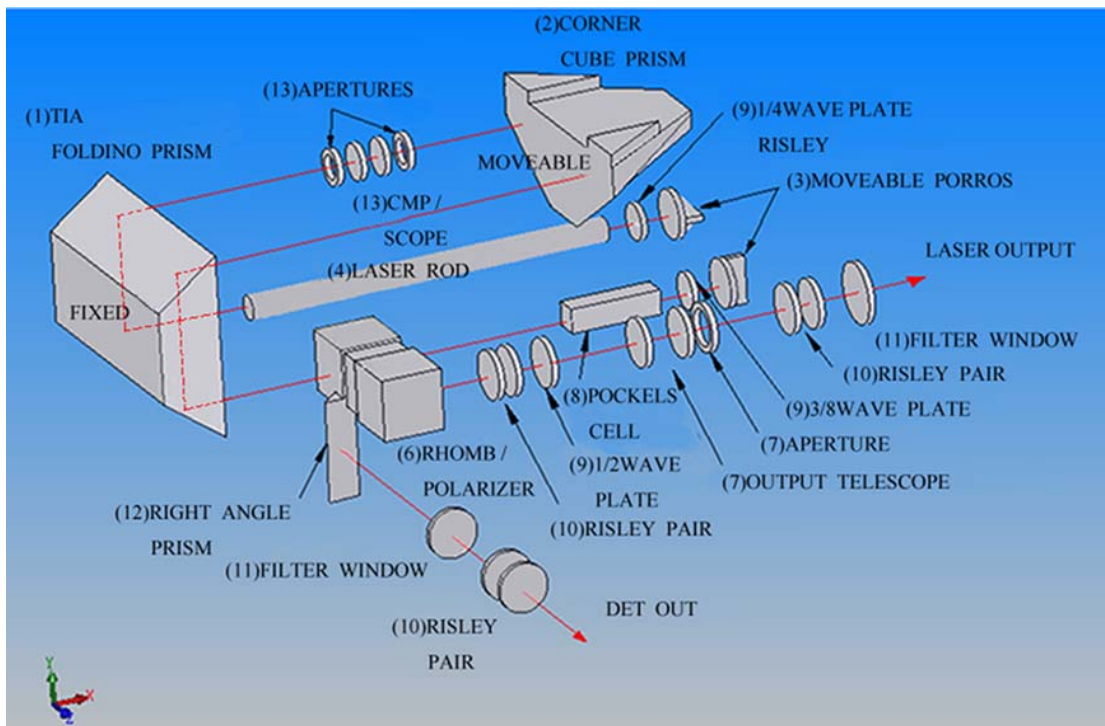
下圖是，以使用高階轉折及穩定的雷射架構。



基本 Porro 稜鏡組雷射共振腔是如圖一所示的四個光學雷射元件所組成：其中兩個 Porro 稜鏡是共振鏡片組，雷射棒是核心材料，以及一個偏極分光雷射輸出光件。



而以上兩圖所示，是 Porro 稜鏡組雷射共振腔的雷射基本架構，簡單且只有最少元件。跟我們完整穩定的下圖共振腔結構還少了二十個元件呢。



- (ii) 雷射調校
 - 中心軸線
 - 對光
 - 第二元件加入
 - 第二元件及以上加入順序
 - 雷射對光調校
 - 雷射優化調校
 - (附動態檔案)

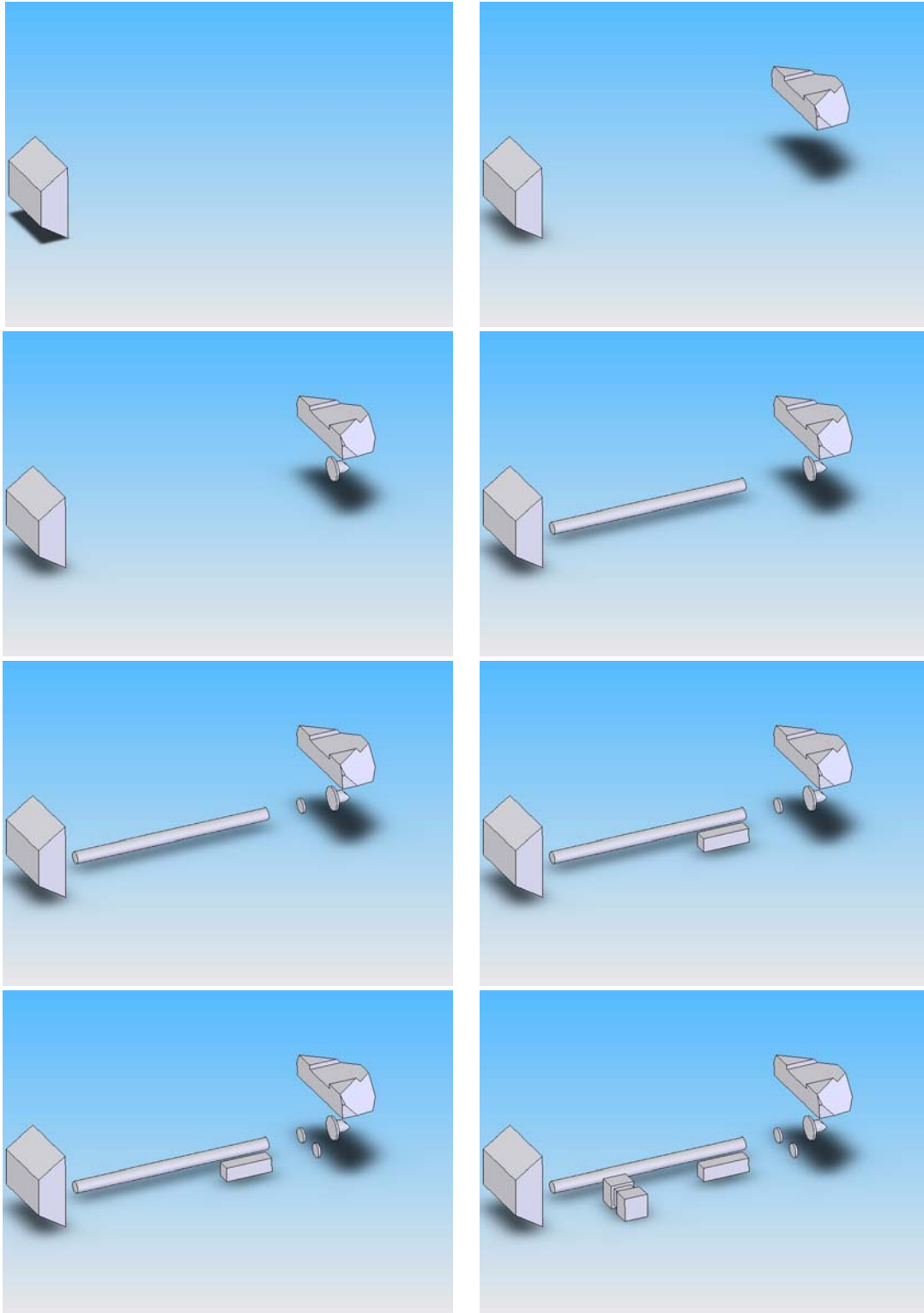
對任何一個雷射系統裝備，甚或雷射發射器本身，我們永遠要記住“雷射”的名稱，應該是“調雷射”的通用簡化名稱。因為雷射的架構是調出來的，而且要優化調校也就是說把它配合所有的變數調到最高能量、最佳波長、最佳脈衝以及最佳光點等的輸出。再者，任何基座，固定、鎖死、封膠後，隨環境不同、振動、應力等一定會有微失調。如果失調過大，造成能量降低，那當然要把雷射調回來。當然，雷射是一個非常複雜，動態的，光電非線性的，光電元件所組成的。任何雷射光電元件。一定會有衰退及驅動偏移的現象，如果衰退及驅動偏移過大，造成能量降低，那當然要把雷射調回來。

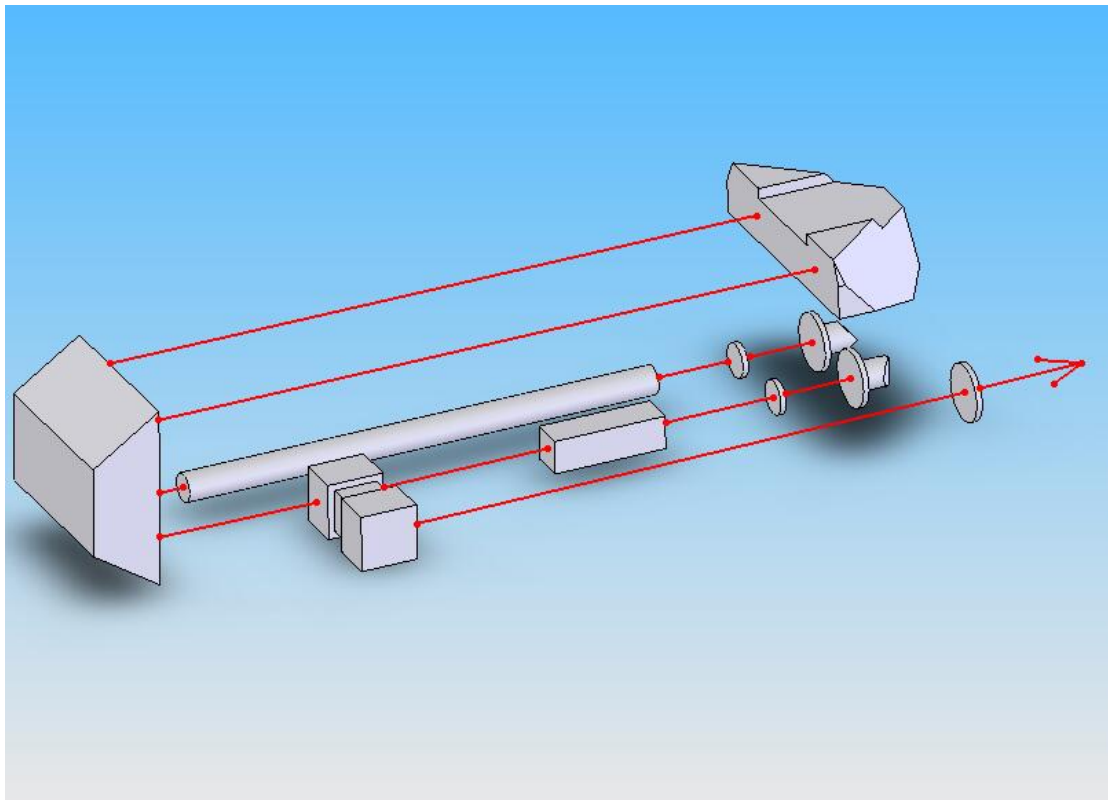
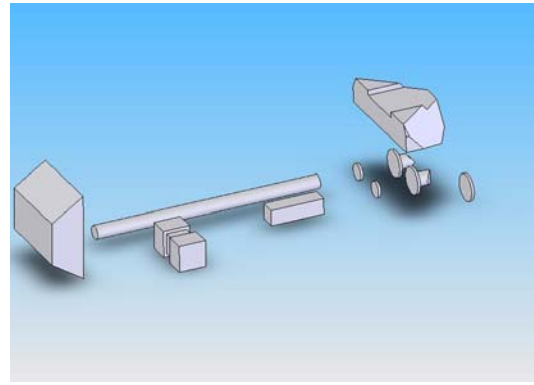
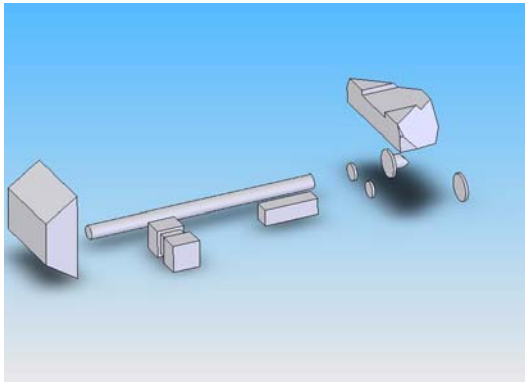
綜上所知，雷射是要調出來，雷射是要優化調校出來，雷射是要失調調回來，以及雷射是要衰退及驅動偏移調回來的。

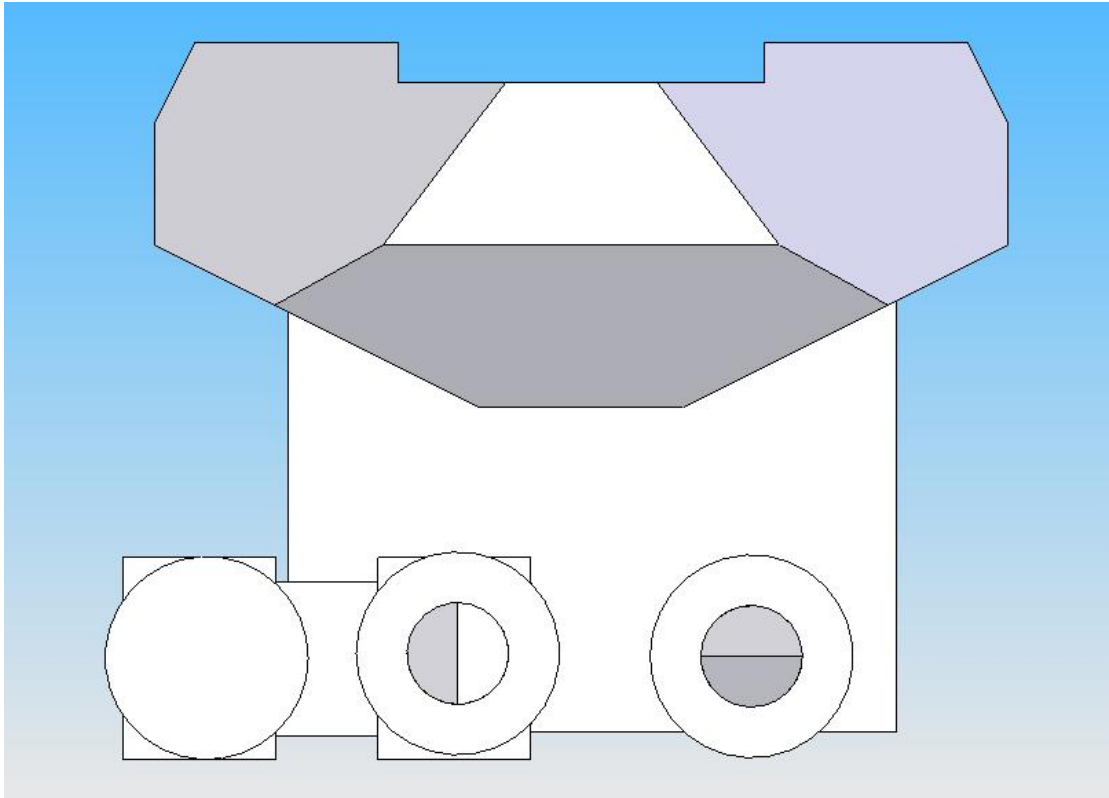
本計畫中已經詳細建立量測、調校、更換元件的標準步驟，只要繼續專心研習，累積經驗，當然可以解決雷射的所有基修問題了。

(iii)多元件雷射調校及步驟標準程序

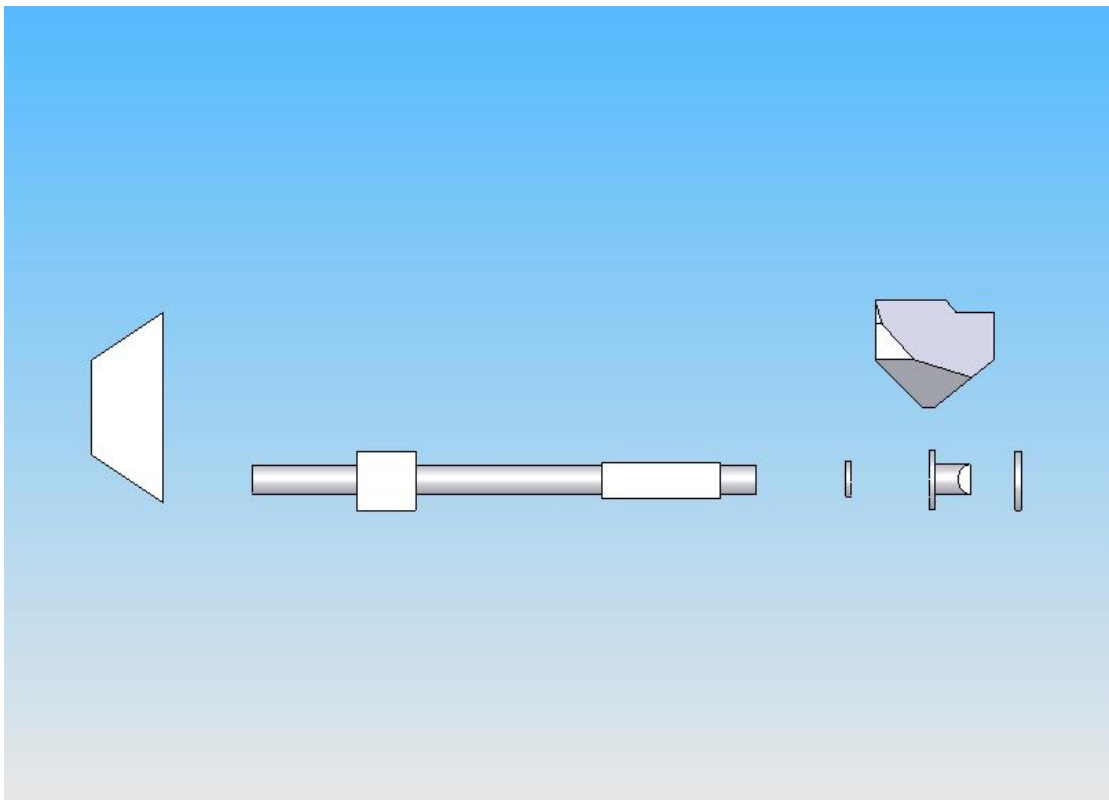
多元件雷射調校照片、3D 照片，另備光碟片及動畫送軍方需求單位。



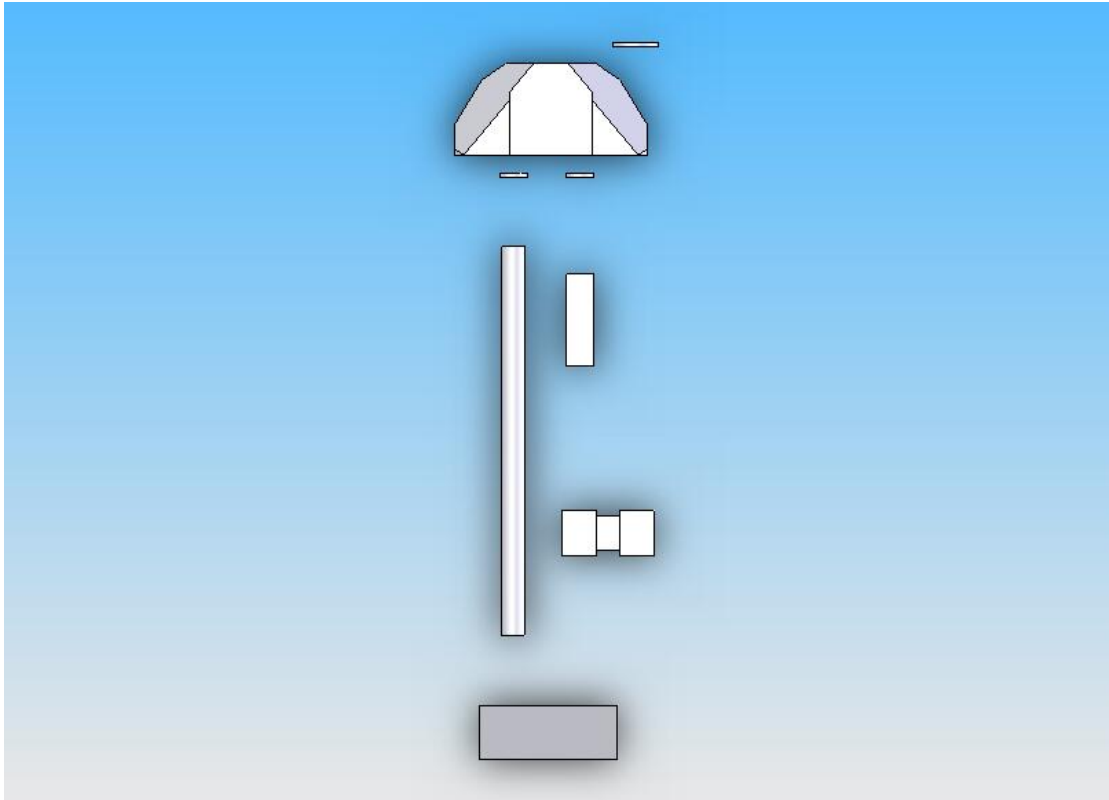




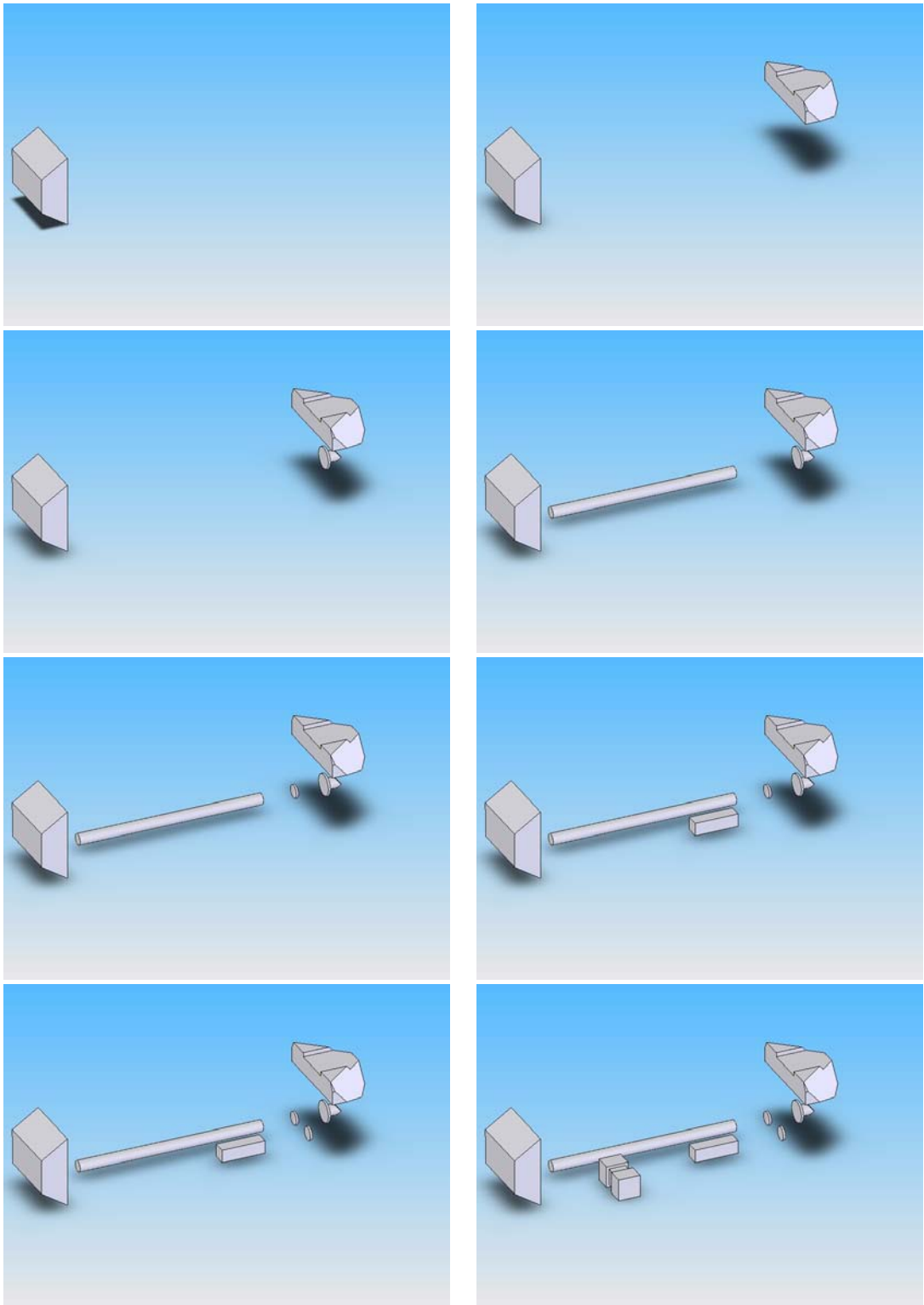
前視圖(Front view)

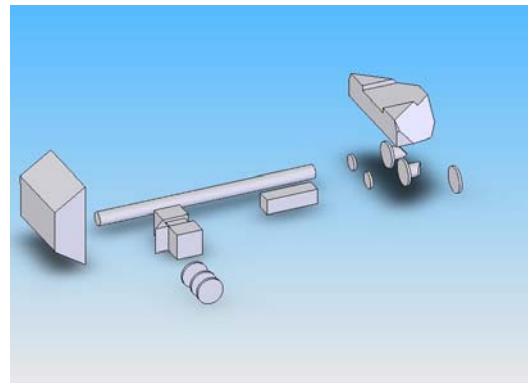
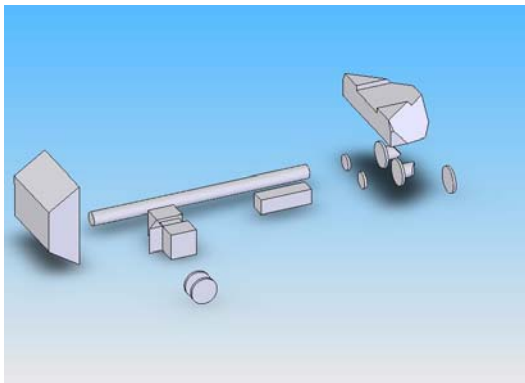
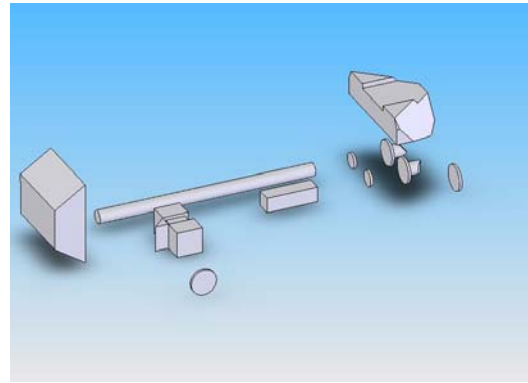
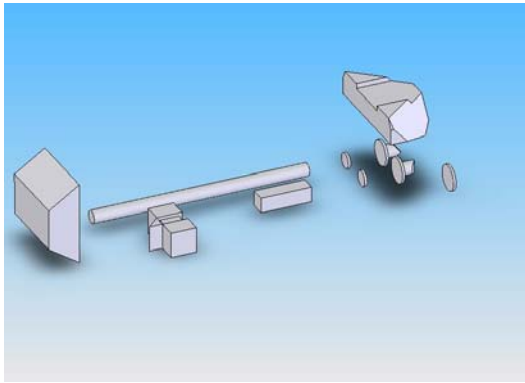
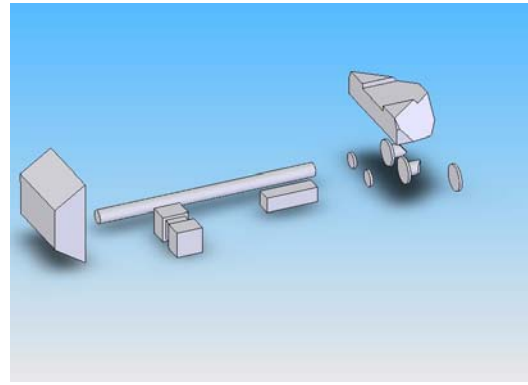
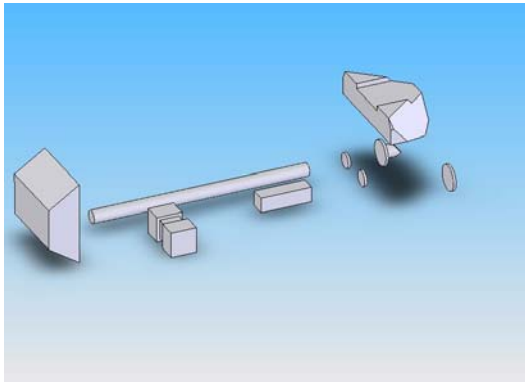


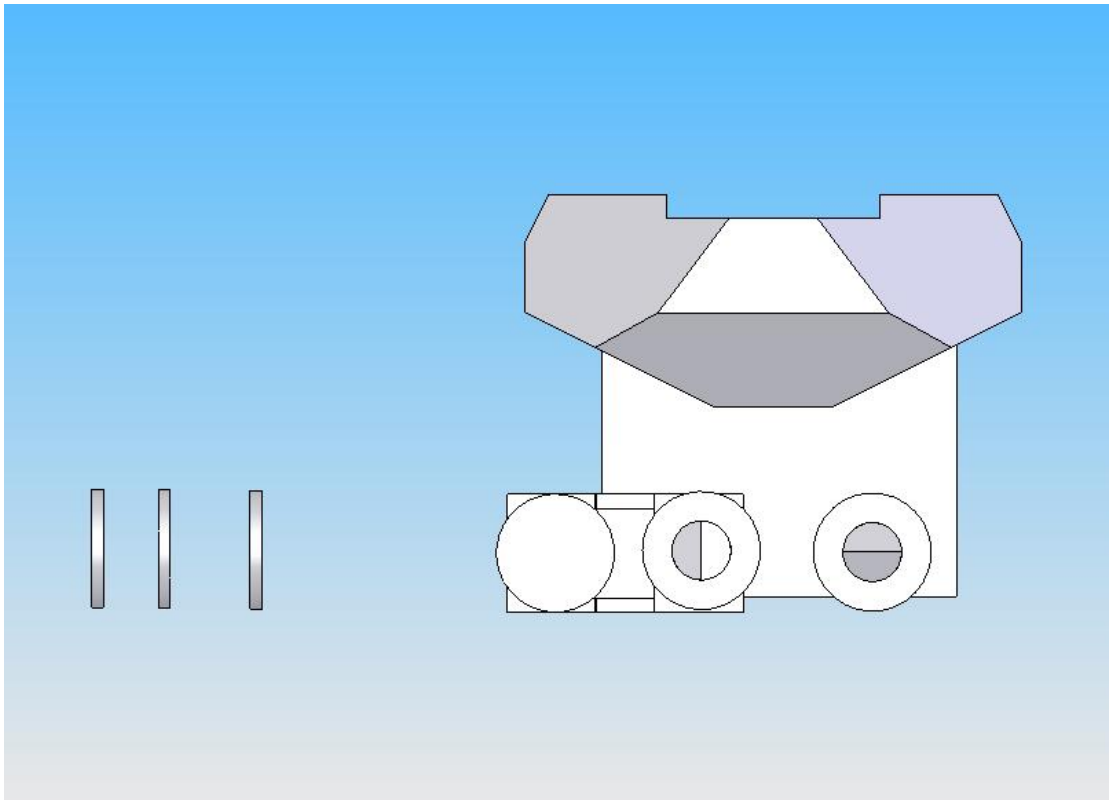
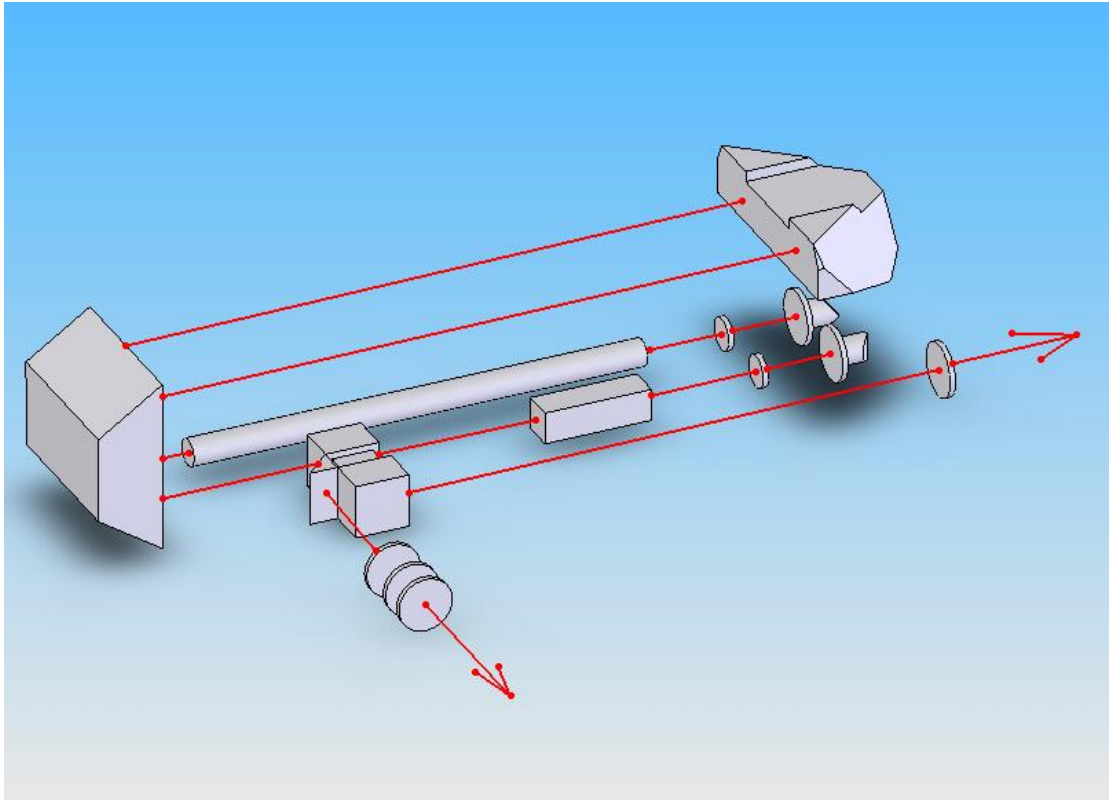
側視圖(Side view)



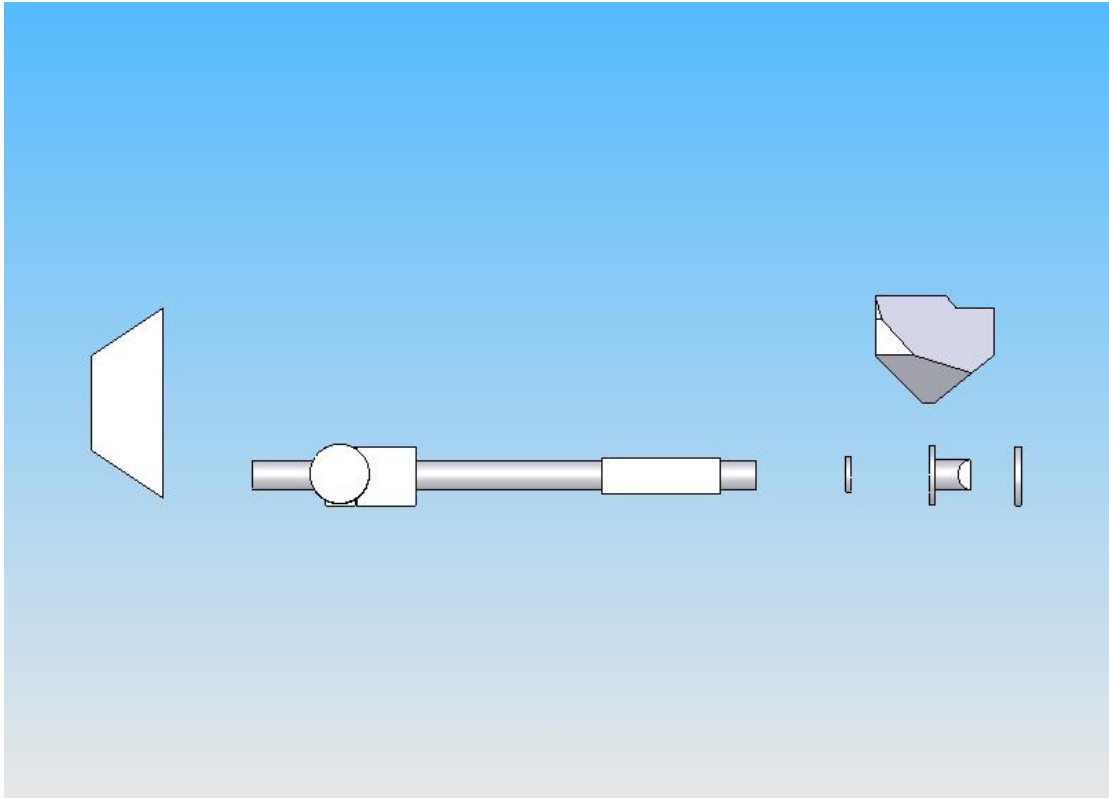
下視圖(Down view)



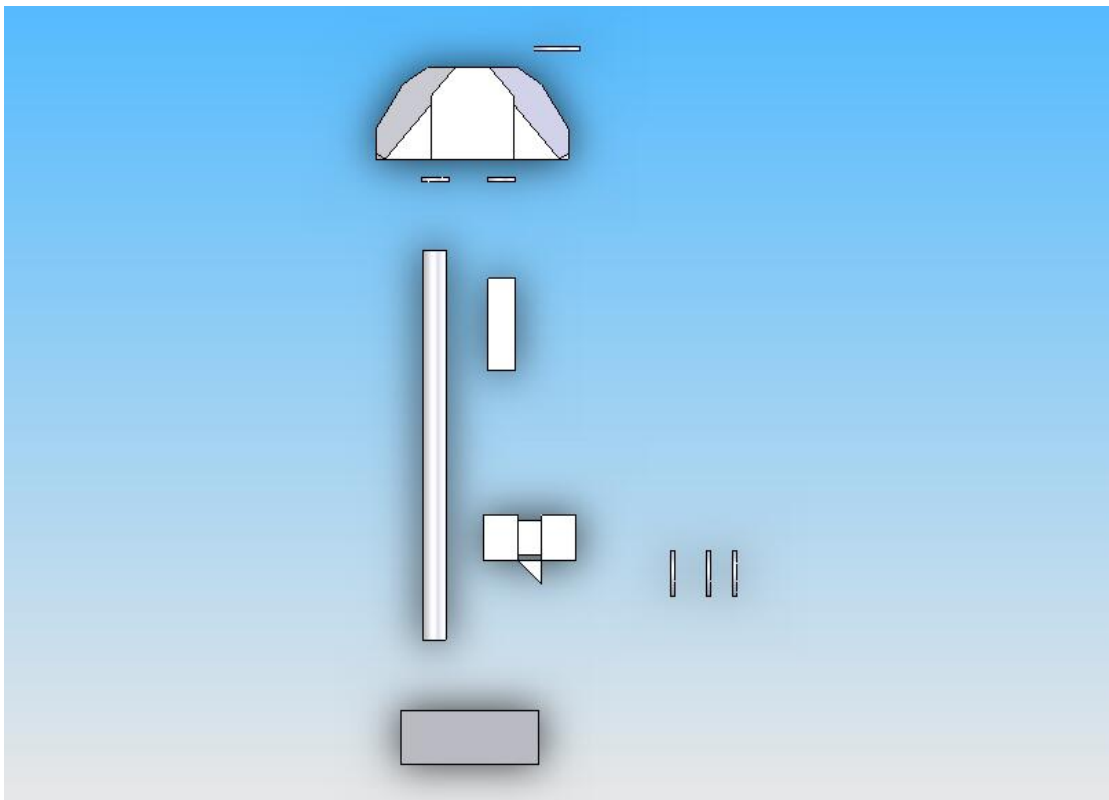




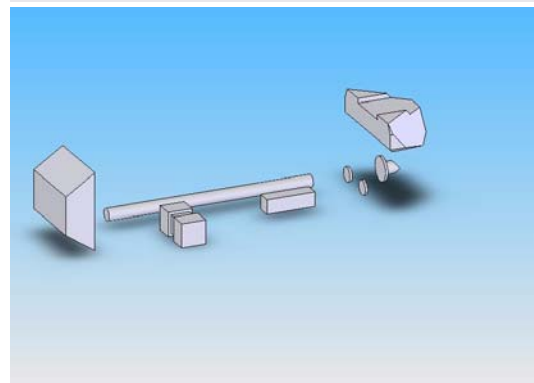
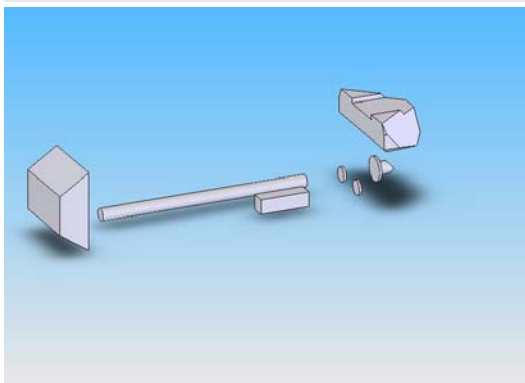
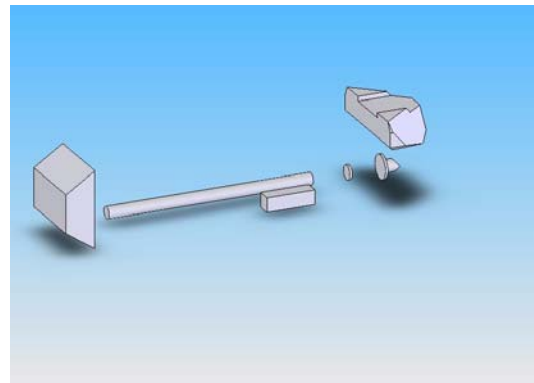
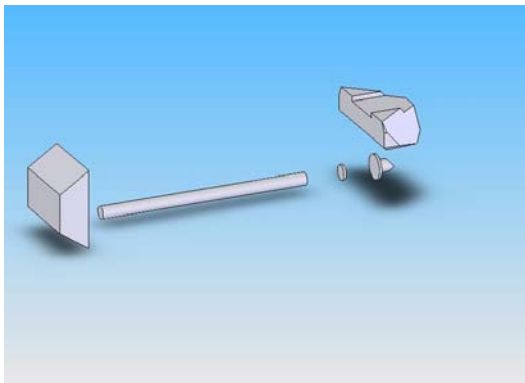
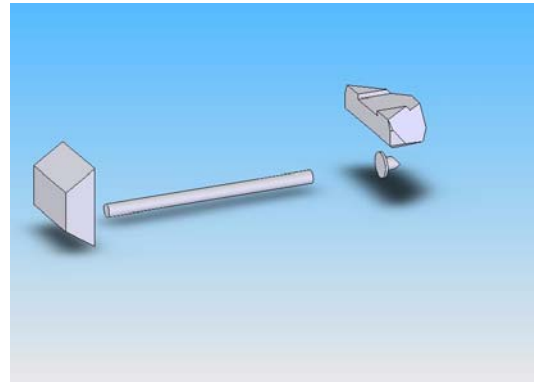
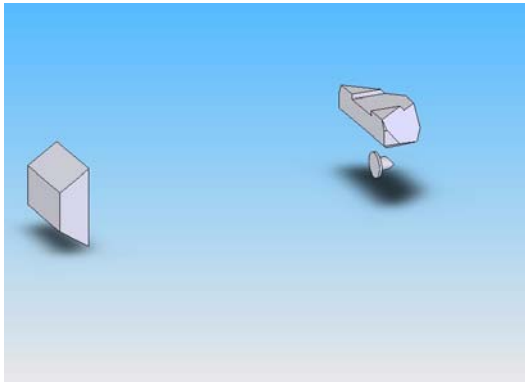
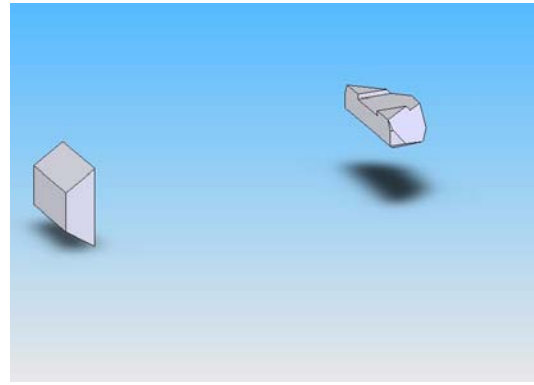
前視圖(Front view)

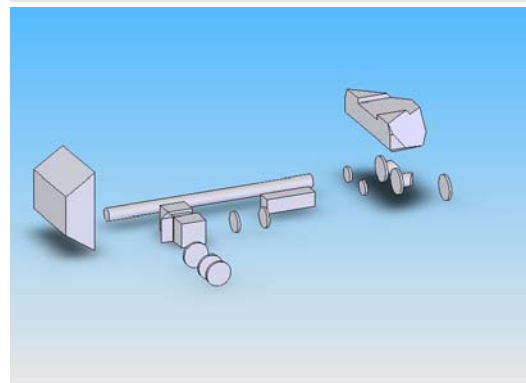
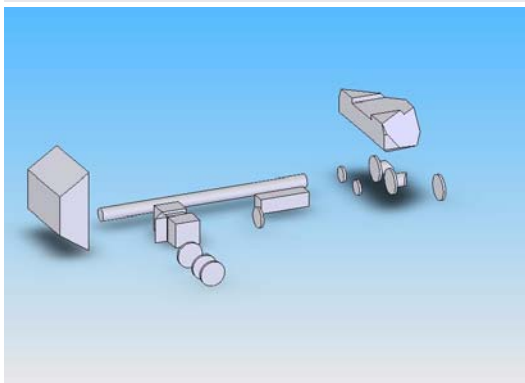
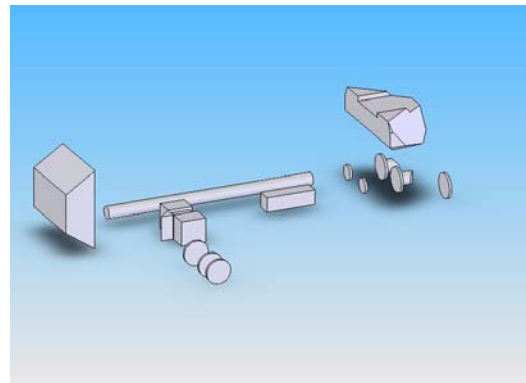
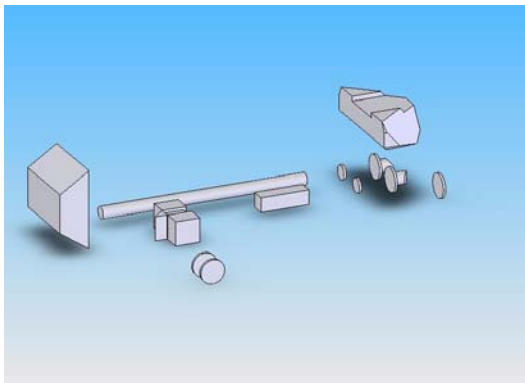
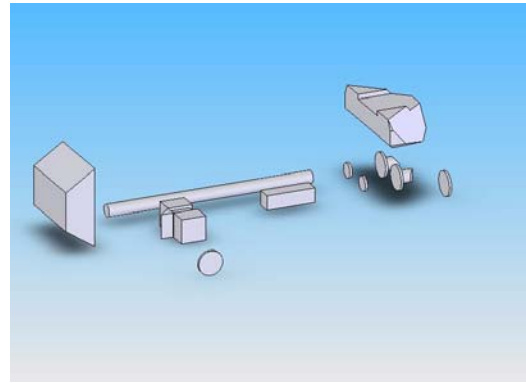
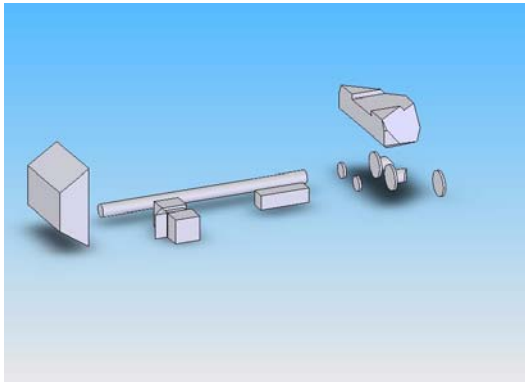
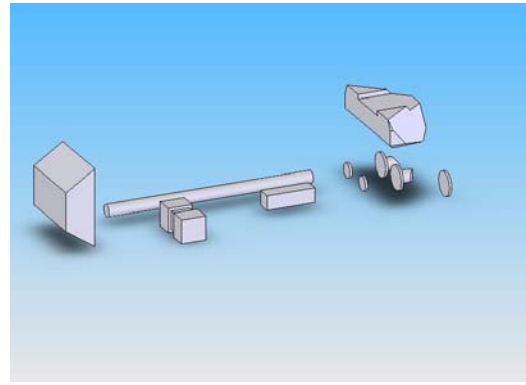
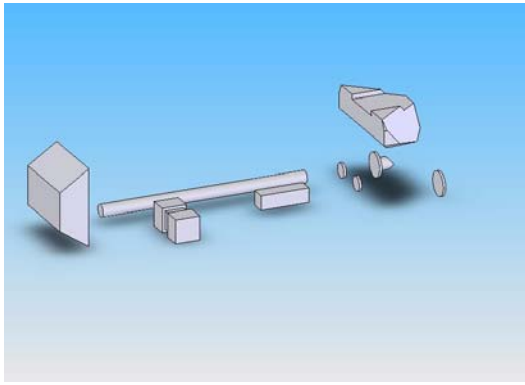


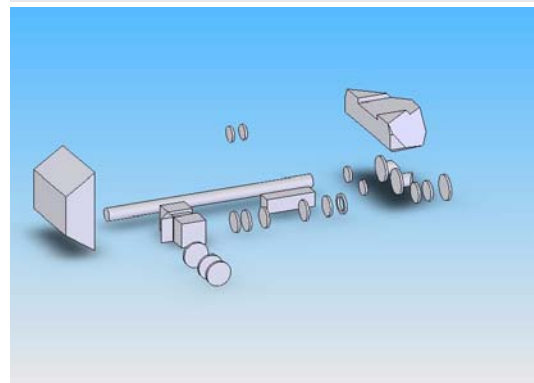
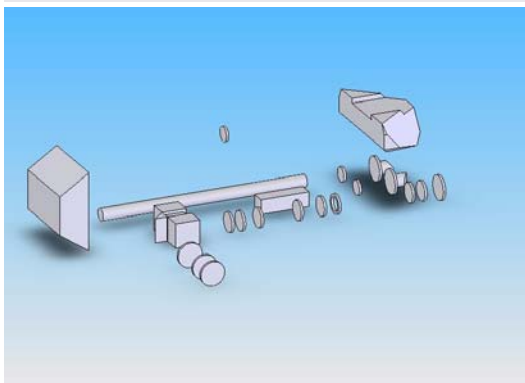
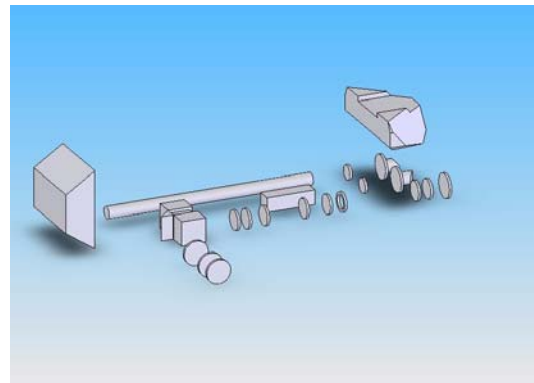
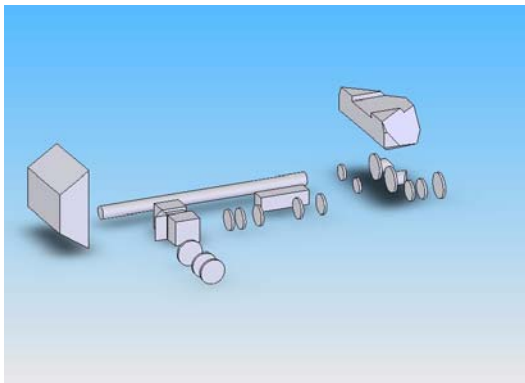
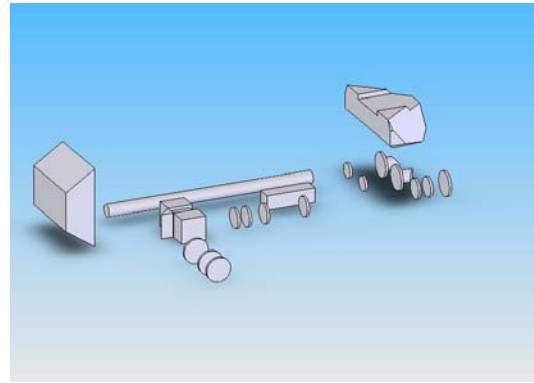
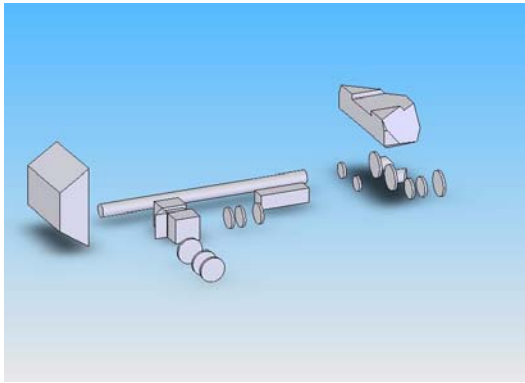
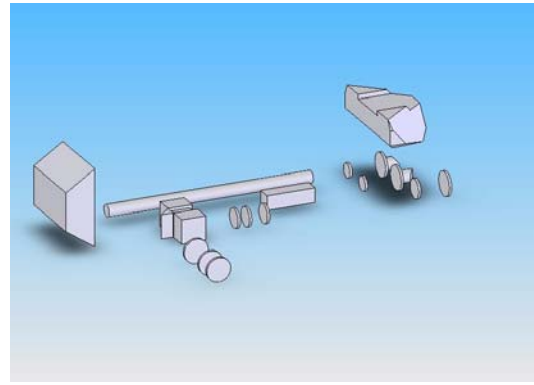
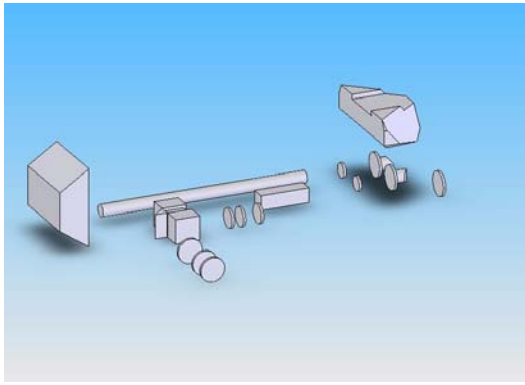
側視圖(Side view)

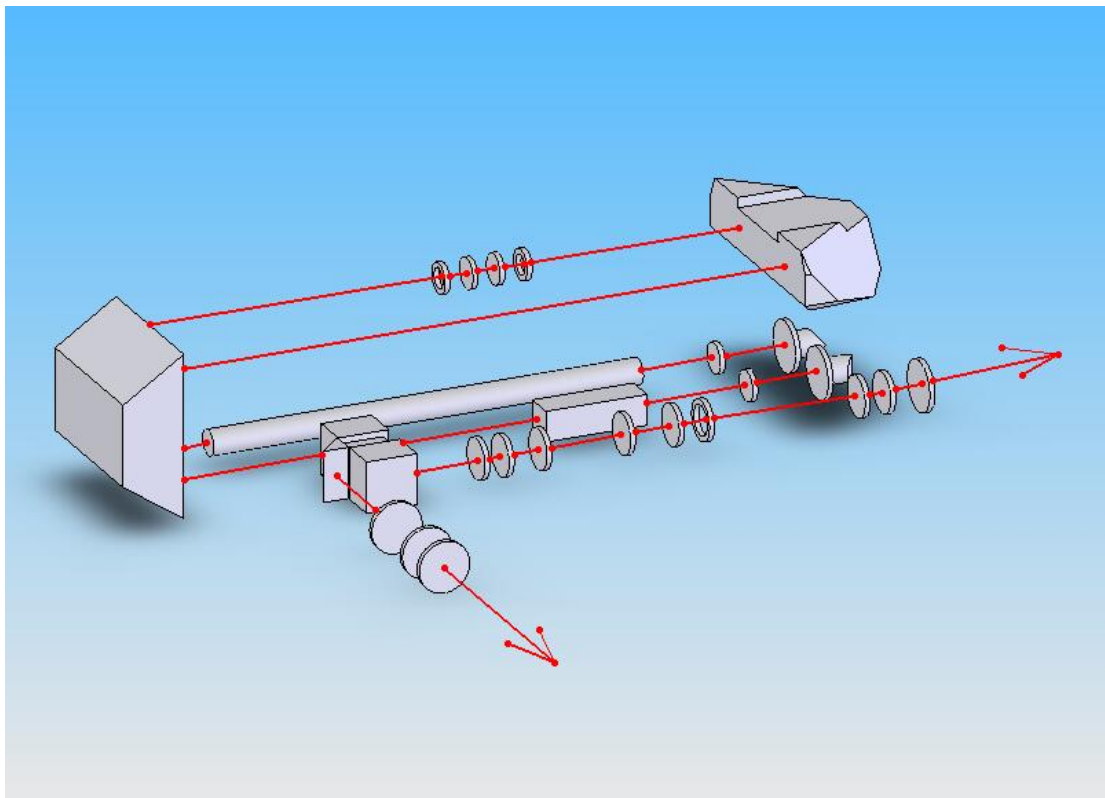
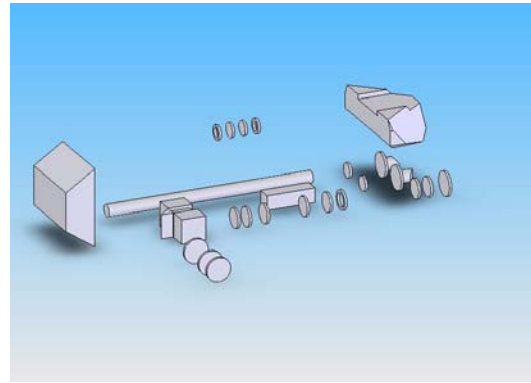
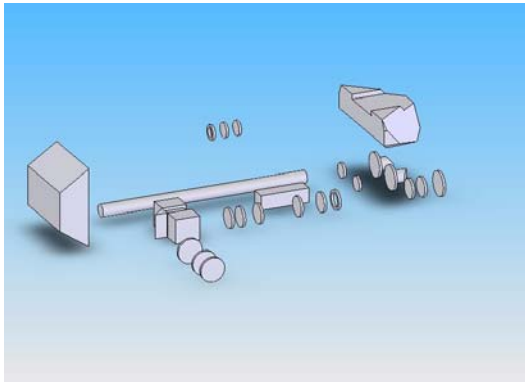


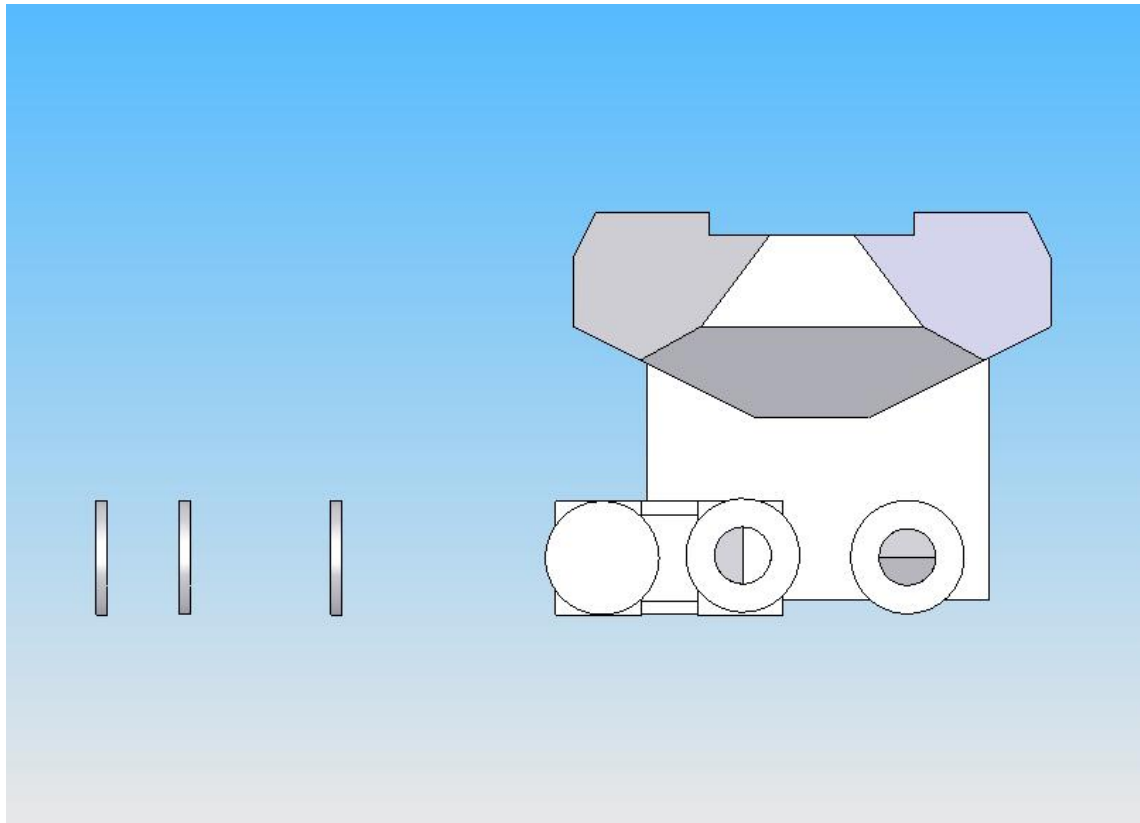
下視圖(Down view)



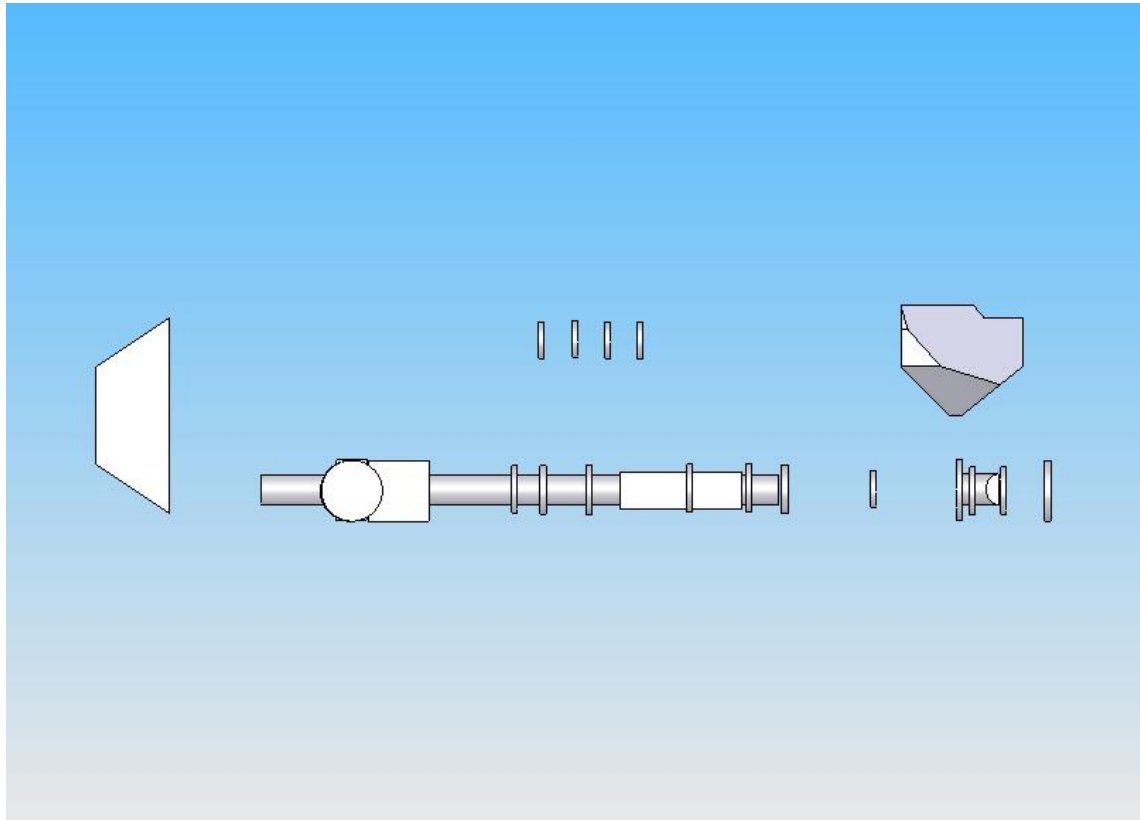




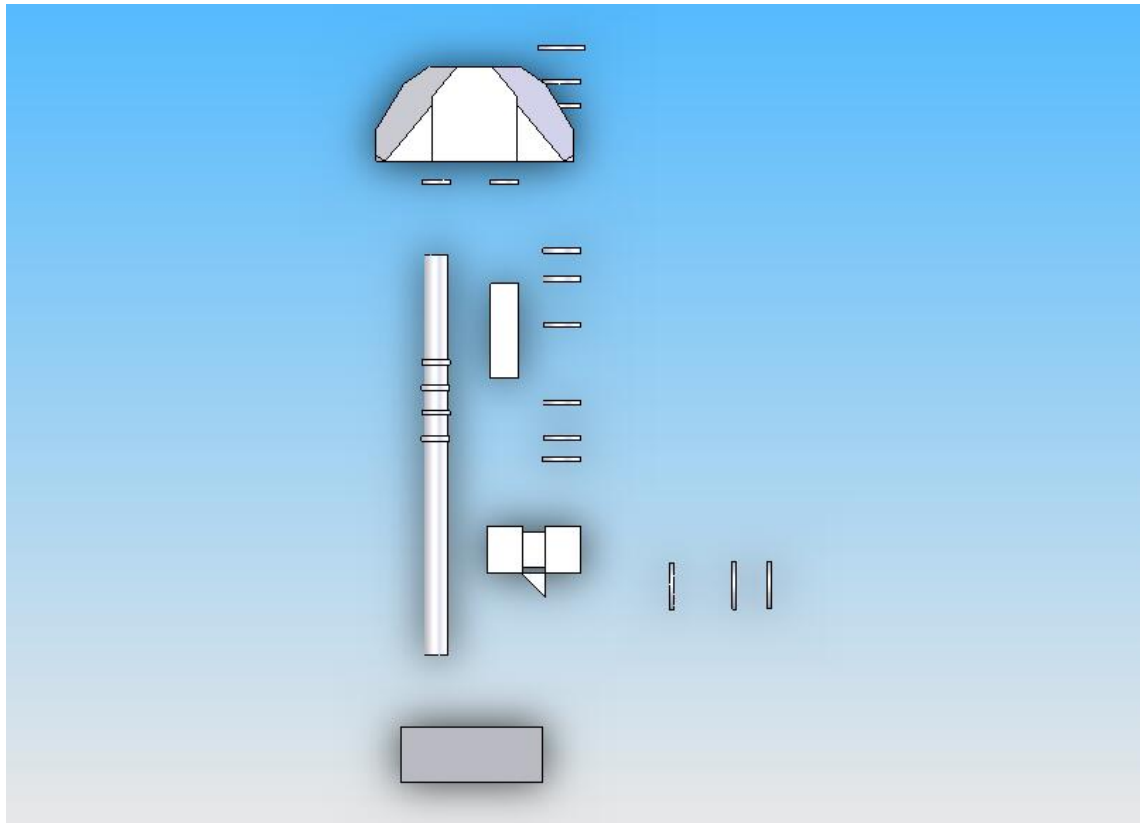




前視圖(Front view)



側視圖(Side view)



下視圖(Down view)

5.3. 雷射驅動系統及介面解析及試製

(a) 雷射驅動系統

(i) 雷射電源供應器

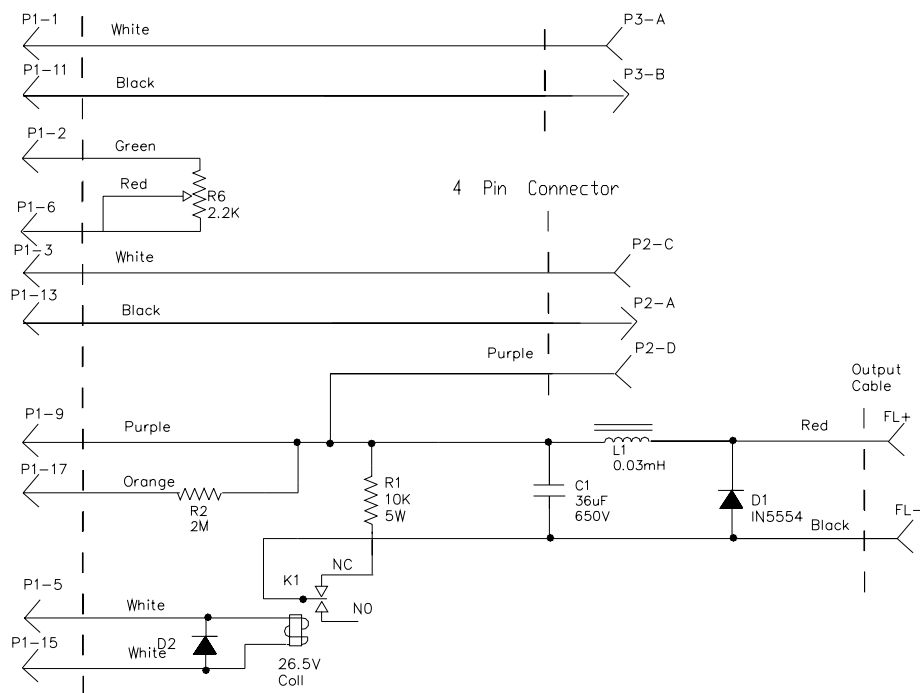
主電源供應電壓及電流需要

主電源模組

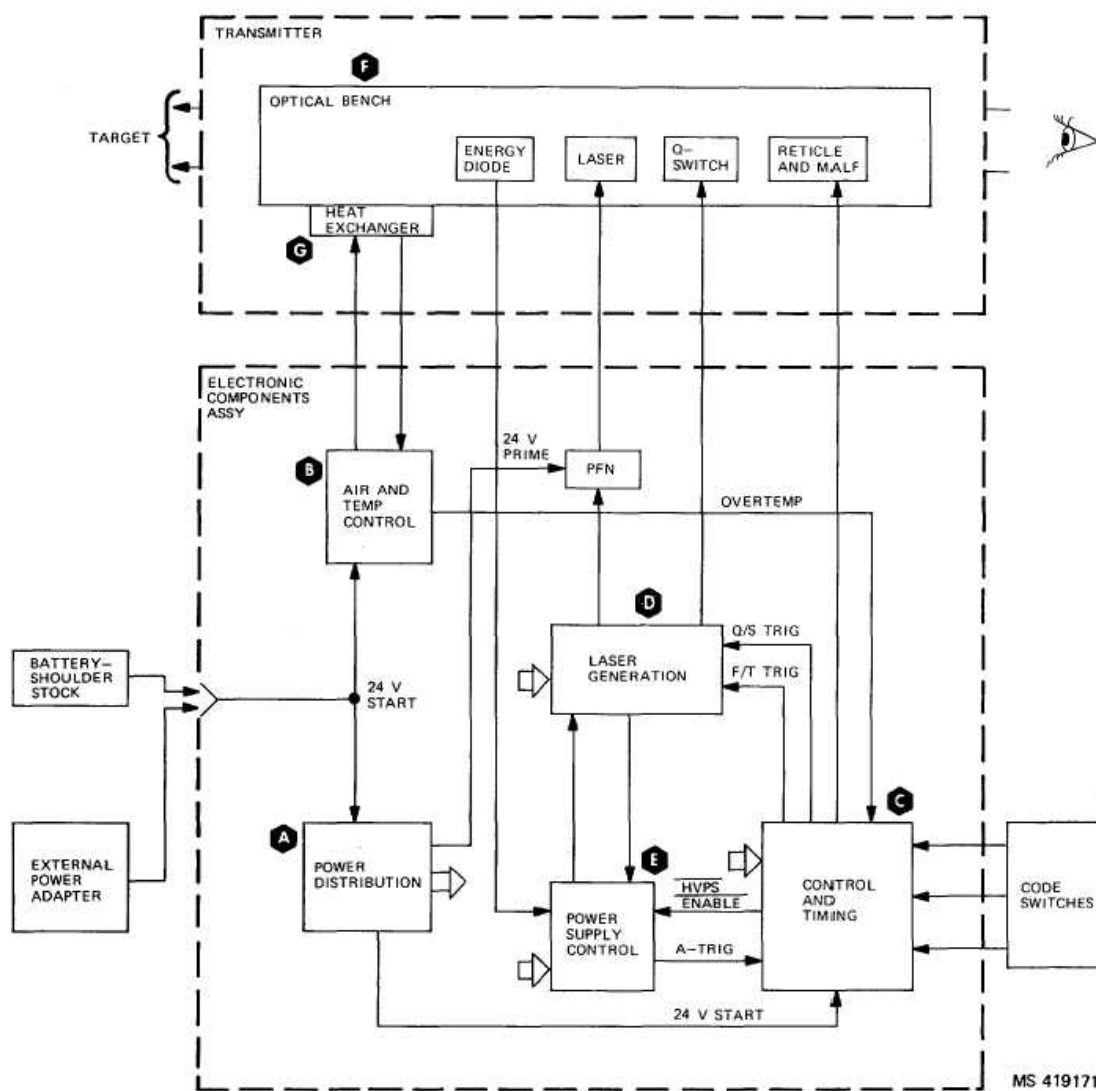
雷射測距追蹤導引定位儀，其系統電源，有多種不同的主電源供應電壓及電流。實用上，大多採用實驗室基本電源供應最方便，也就是說用室內的 110V 或 220V 主電源供應電壓及電流。當然為了高脈衝率的追蹤導引有的雷射測距追蹤導引定位儀，其系統電源主電源供應電壓及電流，用的是 480V 主電源供應電壓及電流。

但是雷射測距追蹤導引定位儀，其內部系統電源，則要用直流的電壓及大電流供應，而其電壓，則是通常軍規裝備通用的 24V 或 28V 直流電源供應電壓及所有的電流。

下面電源佈線圖，是基本電源供應。再經過系統的電源模組，變壓成軍規裝備通用的 24V 或 28V 直流電源供應電壓。或直接接到大武器系統的軍規裝備 24V 或 28V 的主直流電源供應。



TM 9-1260-479-30 Figure 1-15. LTD System Block Diagram 1-16



TM 9-1260-479-30 Figure 1-15. LTD System Block Diagram 1-16

(ii) 雷射激勵電源供應器

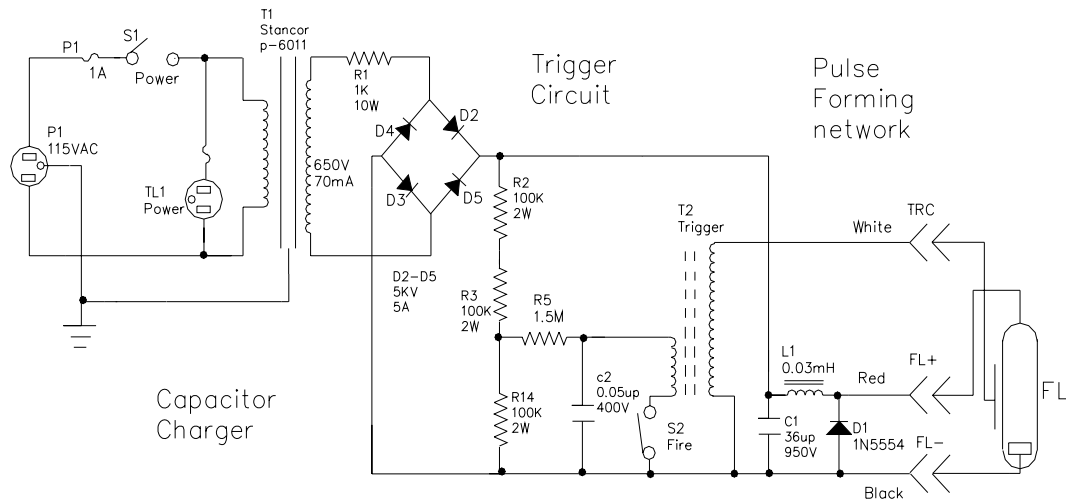
充電電路設計

儲能電容器

高壓量測探棒

從上一節中，我們知道主電源供應，可以是交流多相的室內電源，或是直流的裝備電源。

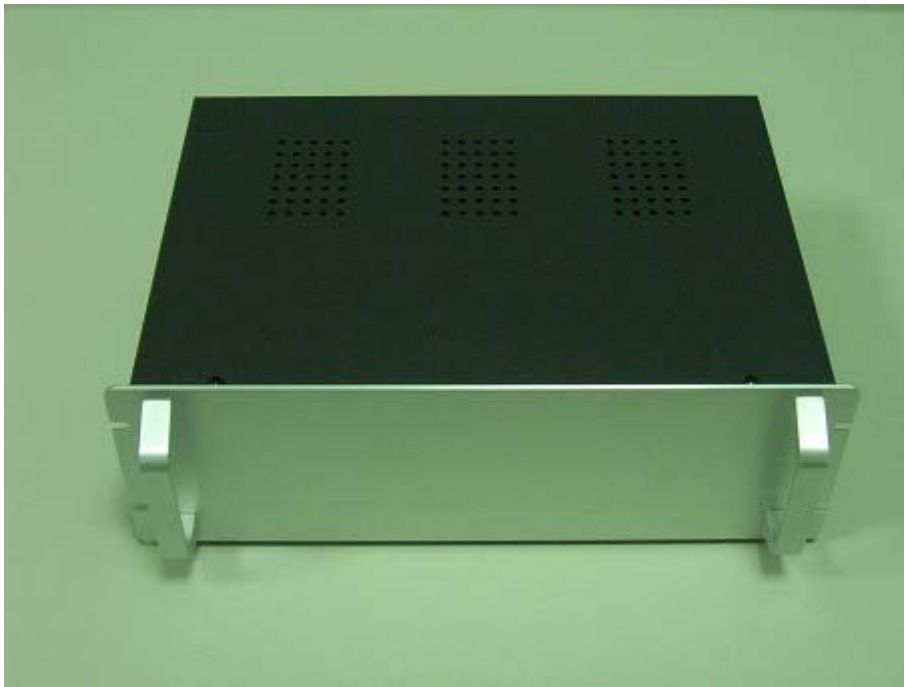
而電源供應，最主要的是提供全系統各個所使用的電源。雷射測距追蹤導引定位儀，其系統電源，首先要提供的就是，雷射激勵閃光燈的充電及電容器儲能。下圖是，雷射激勵閃光燈的，反覆共振式雷射激勵閃光燈的充電電路設計(resonance laser energy storage capacitor charger)。當然我們為了系統的完整說明，也把雷射激勵閃光燈的觸擊發電路設計(laser flashlamp trigger circuit)，和雷射激勵閃光燈的脈衝形成電路設計(laser flashlamp pulse forming network PFN)，也一起顯示出來。



下圖是，未來如果有賡續需求，我們將完成並提供我們額外自製的雷射激勵閃光燈的，反覆共振式雷射激勵閃光燈的充電電路板模組，雷射激勵閃光燈的觸擊發電路板模組，和雷射激勵閃光燈的脈衝形成電路也一起自製出來，安裝在一雷射激勵電源供應器內。當然，這雷射激勵電源供應器內還要有儀器開關、輸入

電源指示燈、充電電壓顯示錶或面板、雷射閃光燈擊發按鈕、雷射閃光燈高壓大電流接線端子組、雷射閃光燈高壓線端子等。希望測試調校完畢後，免費額外提交軍方單位，以為雷射修護工作自有儀器。

我們在計畫過程中，也曾經希望採購合用的雷射激勵電源供應器，甚或開規格國內委製。但是相關廠家，皆因為高壓、大電流、快速充放電、可調閃光燈高電壓、可調閃光燈擊發高電壓等等要求，而不能提供產品。更不用講，事實上很多元件都要軍規。而且就算我們提供技術及經驗，協助配合廠家製作，光就這個雷射激勵電源供應器的價格，實算成本，也一定比本一年期計畫所有全部經費還要高。軍方單位也協助找尋商源，也都發覺採購委製都非常困難。所以我們也只能全力自製雷射激勵電源供應器，以為雷射修護工作自有儀器。



當然，我們也可以參考下圖等的，雷射激勵閃光燈的，快速充電電路設計 (rapid energy storage capacitor charger)。

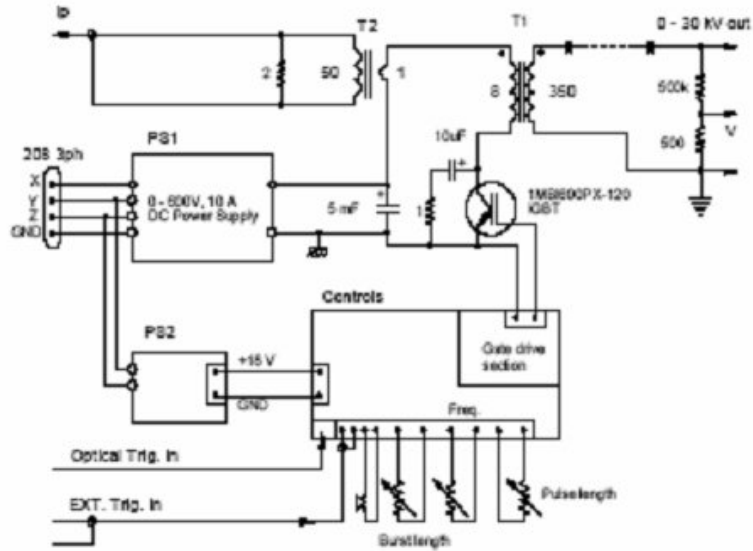
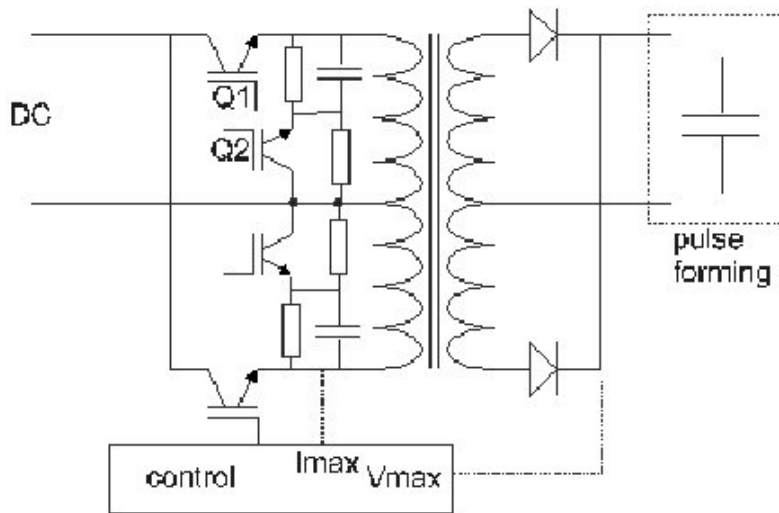
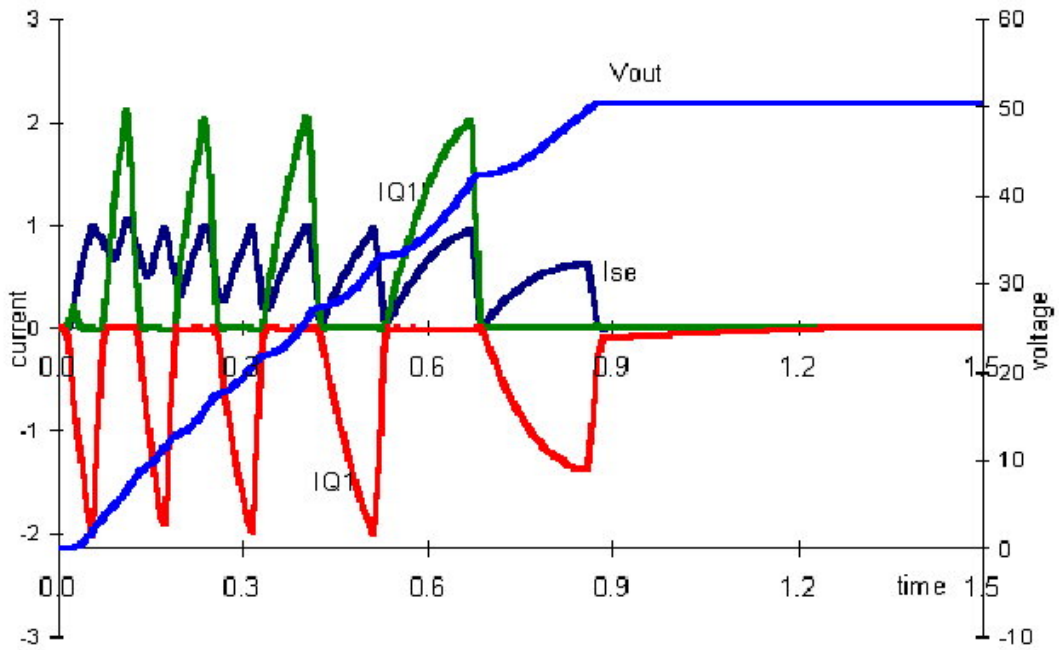


Figure 1. Rapid Charger block diagram

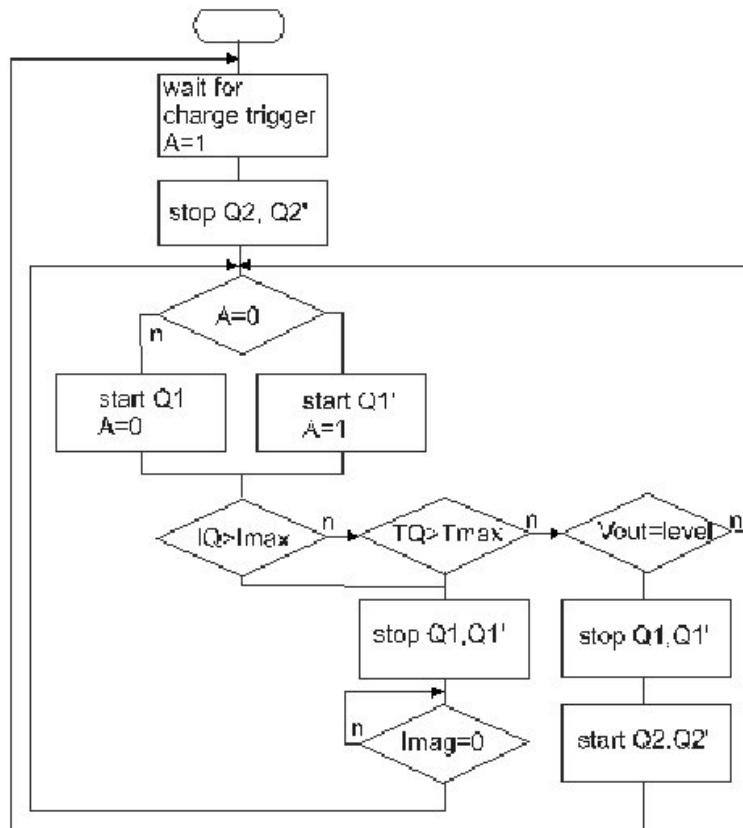
參考用反覆共振式雷射激勵閃光燈的充電電路設計(Resonant charging)也有如下電路設計:



Chopper charging to high voltage PFN



Simulation of the chopper



Flowchart of chopper charger control

The charge takes place after each discharge of the PFN. This is a no command charge (diode instead of a switching device) or free running charge. The repetition rate is dictated by the charge choke, the PFN-capacitors and the delay to the discharge command. During that time there is a certain voltage drop by the leakage of the PFN, so the repetition rate is adjustable only within a small range. To stabilize the PFN unit a de-Q-ing system has added[1] on a secondary of the charging choke. Whenever the correct pfn-voltage has attained, the de-Q-ing thyristor has triggered and the stored energy of the charge choke has stored in the capacitor and dissipated in the resistor. Hereby it provokes a voltage drop on the charging device which blocks the pfn-voltage. To reach a stable voltage on the PFN, the de-Q-ing system can be triggered on the bases of;

Power-supply level.

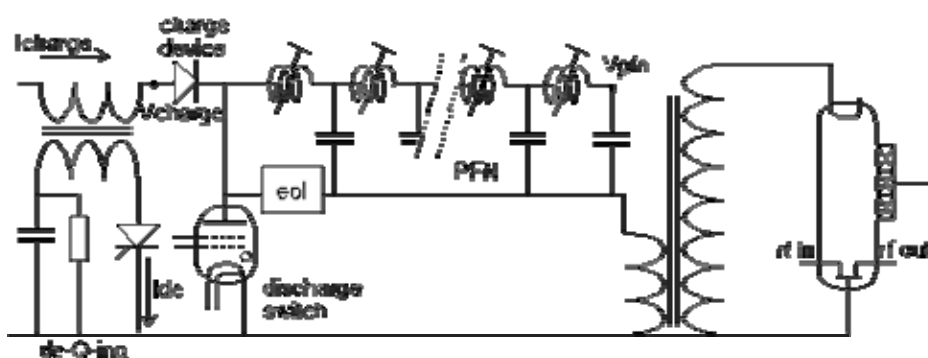
To change the PFN-level we had to change the power supply level. The de-Q-ing go with it and dissipate only the ripple of the power supply.

Minimum and maximum delay after the start of charging.

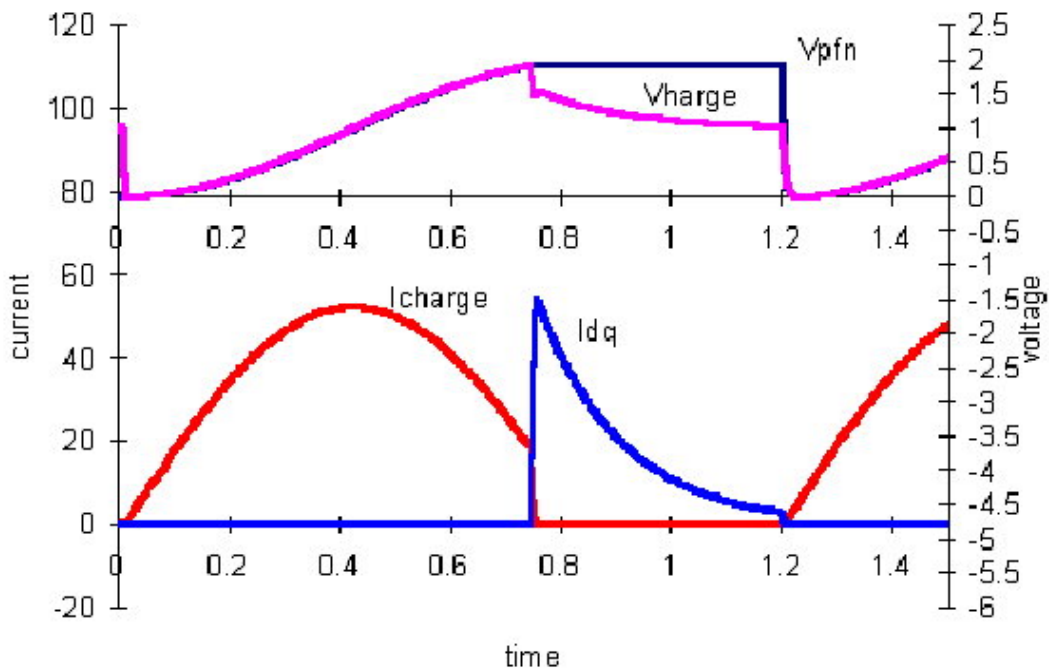
A too short delay means high dissipation in the de-Q-system, so the power supply level has decreased to keep the PFN level by a reasonable dissipation.

A too long delay means no de-Q-ing, so no stable PFN voltage, so the power supply level has increased.

In the example the charge time is about 1ms. The manufacturing of chokes is laborious. Chokes are dissipating elements too but are stable, robust and reliable.



A line-type modulator with resonant charging.

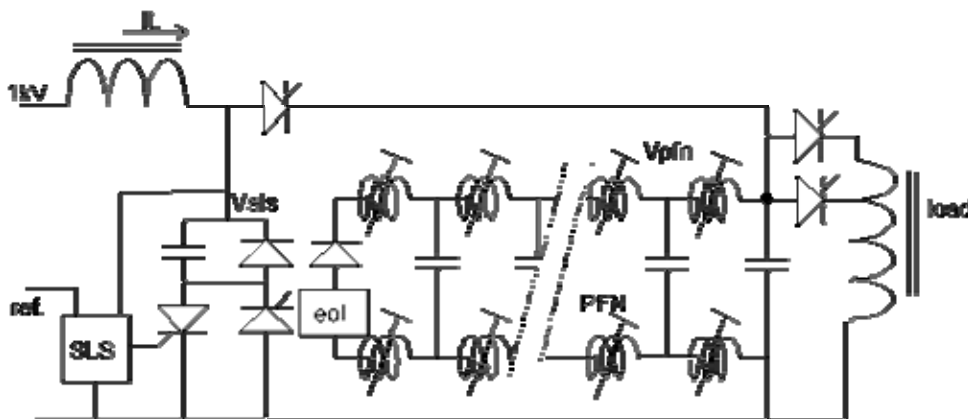


Simulation of resonant charged modulator with de-Q-ing.

G.N.Glasoe, L.V.Lebacz, "Pulse Generators", McGraw-Hill 1948

Resonant charging by command

To explain a resonant charging by command there is chosen for a complete solid state module as used in the MEA-modulator [1].

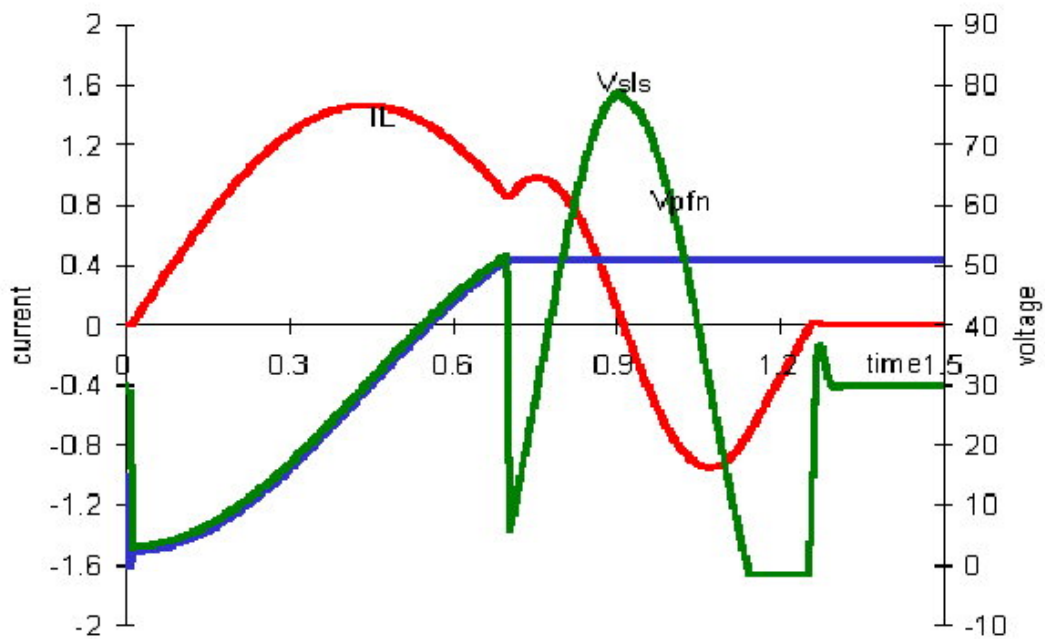


A solid state linetype modulator module

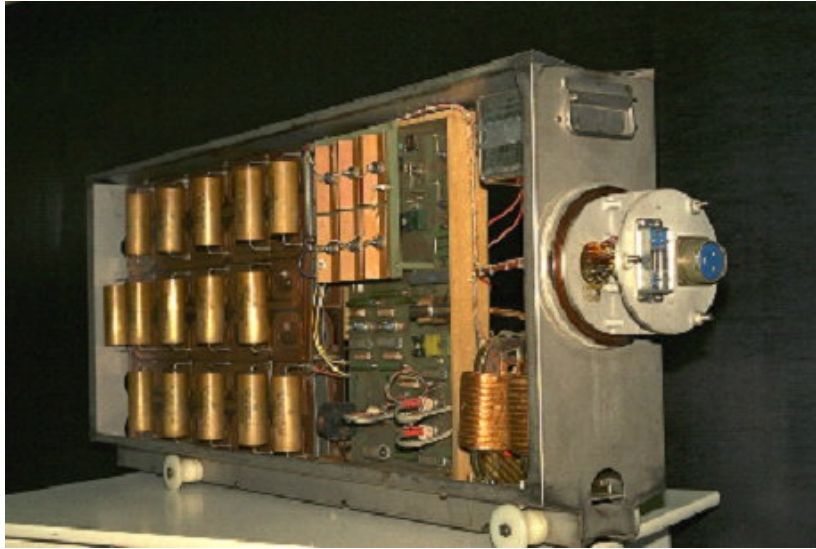
In this modulator the module is used with a cycle pulse transformer. In this design is used a command charge system and a non-dissipating level system (SLS = Stabilizing and Levelling System).

Just before a pulse the charging of the PFN takes place. The advantage is that there is always the same leakage during a short as possible time. This means a more stable output than a free running system independent of the repetition rate.

If the PFN is charged to the right level the SLS-thyristor is triggered. After triggering of the SLS-thyristor the remaining energy of the charging coil together with the nominal charge is stored in the capacitor of the SLS-system. The charge switch is not conducting (anode lower voltage than cathode) and afterwards the energy is stored back in the main power supply by the diode/thyristor. In such a case a not regulated power supply can be used because there are only transfer losses.



simulation of a resonant charge system with a SLS-system



Solid state line-type modulator module

45kg, 125x60x20cm, 1000V-500A-50us pulse, rep.rate <500Hz

P.J.T.Bruinsma, E.Heine et al., "An all solid state line-type modulator", IEEE Trans. on Nucl.Sci. NS-20 1973

注意其體機大小及重量。



Available power outputs are:

- 500J/sec
- 1500J/sec
- 2000J/sec
- 3500J/sec
- 4000J/sec
- 6400J/sec
-

Output voltage up to 15kV

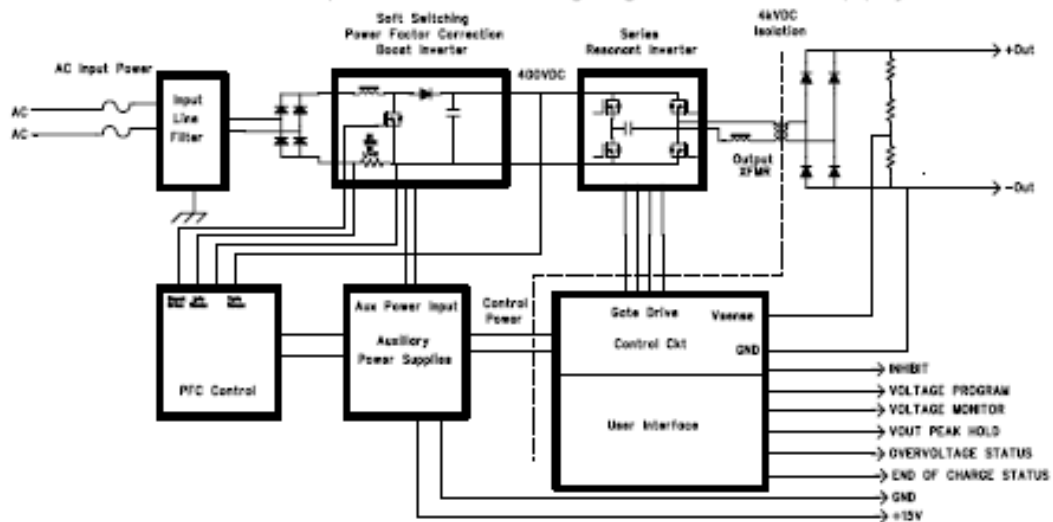
Lumina Power Capacitor Charging Power Supplies

Model Shoebox Style	Pout _{max}	Vout _{max}	Input Voltage	Input Current	Size	Wt
CC-500-XX	500J/sec	500V to 4kV	90-130VAC 180-264VAC	5.5A @115VAC	12" x 6" x 3.5"	8 lbs
CCPF-1500-XX	1500J/sec		90-264VAC	15A @115VAC	12.5" x 4.7" x 4"	8lbs
CCPF-3500-XX	3500J/sec		180-264VAC	20A @220VAC	14" x 5.5" x 6"	12 lbs
CCPF-2700-XX*	2700J/sec		180-264VAC	15A @220VAC	14" x 5.5" x 6"	15 lbs

* Includes internal simmer supply and +24 auxiliary output

Model Chassis Style	Pout _{max}	Vout _{max}	Input Voltage	Input Current	Size	Wt
CCPF-2000-XX	2000J/sec	500V to 15kV	180-264VAC	11A @220VAC	19" x 17.5" x 3.5"	20 lbs
CCPF-4000-XX	4000J/sec	500V to 4kV		23A @220VAC	19" x 17.5" x 3.5"	20 lbs
CCPF-6400-XX	6400J/sec			36A @220VAC	19" x 17.5" x 5"	25 lbs

CCPF Capacitor Charging Power Supply



(iii) 雷射閃光燈脈衝成形電路

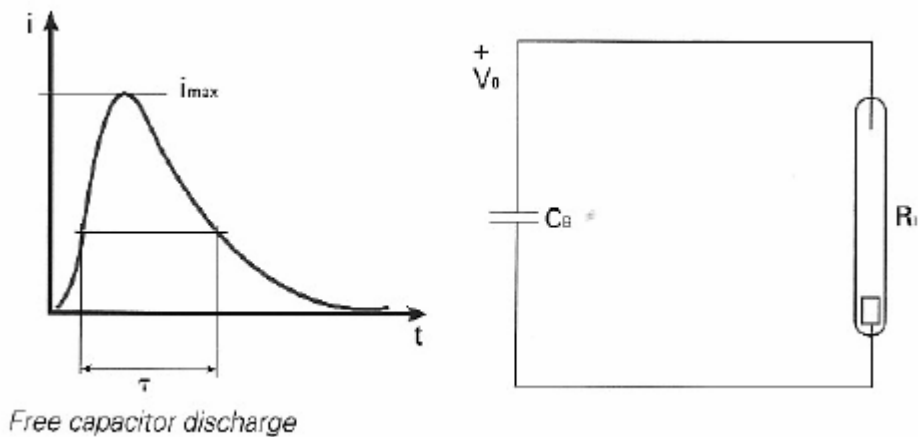
閃光燈放電動態阻抗

PFN 閃光燈脈衝成形電路

PFN RLC 元件

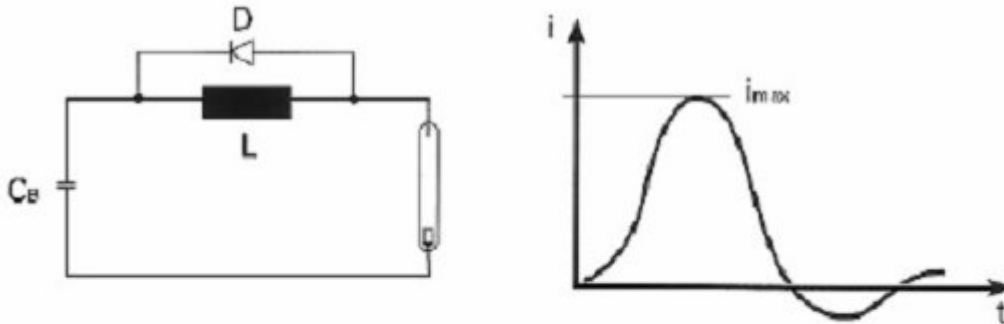
閃光燈脈衝成形電路 Pulse Forming Network, PFN, 是高效益雷射非常重要的因素。它的全部組成只有電容、電感及閃光燈三個元件而已。但是由於閃光燈放電的動態阻抗, 及電容、電感特性, 如我們在前面的分析, 它是隨閃光燈的時間每一瞬間都是動態阻抗及電流電感的特性。使得選擇那一類型閃光燈、儲存能量的電容器及電容值大小、和電感值大小是一組非線性且隨時間瞬時變化的複雜動態的特性。

下圖是它的特性顯示, 如我們在前面的分析, 它是隨閃光燈的時間每一瞬間都是動態阻抗及電流電感的特性。



3. Pulse forming network

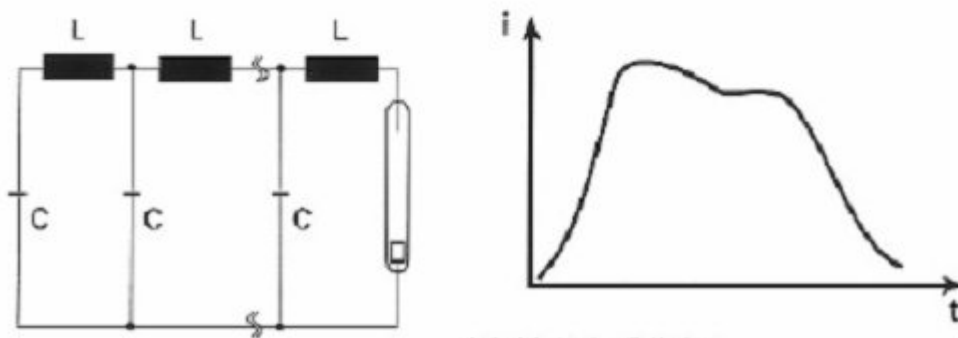
The circuit illustrated below shows the simplest network. L , C_B forms a resonant circuit, which is damped by the tube.



Single LC link

The reversal of current can be suppressed by a diode D . In comparison to the free capacitor discharge, the current rise and peak current i_{max} are reduced.

By using multiple LC links, an almost rectangular discharge pulse can be obtained.



Multiple L, C links

而實際利用閃光燈放電的動態阻抗，及電容、電感特性，模擬及優化閃光燈脈衝成形電路 Pulse Forming Network PFN，的基本電容、電感及閃光燈參數值，我們可以得到閃光燈脈衝成形電路的結果，如下圖所示：我們可以清楚看出來，優化的閃光燈脈衝成形電路的結果，越近似一方波型式，閃光燈放出的光越強，雷射的輸出也更高。

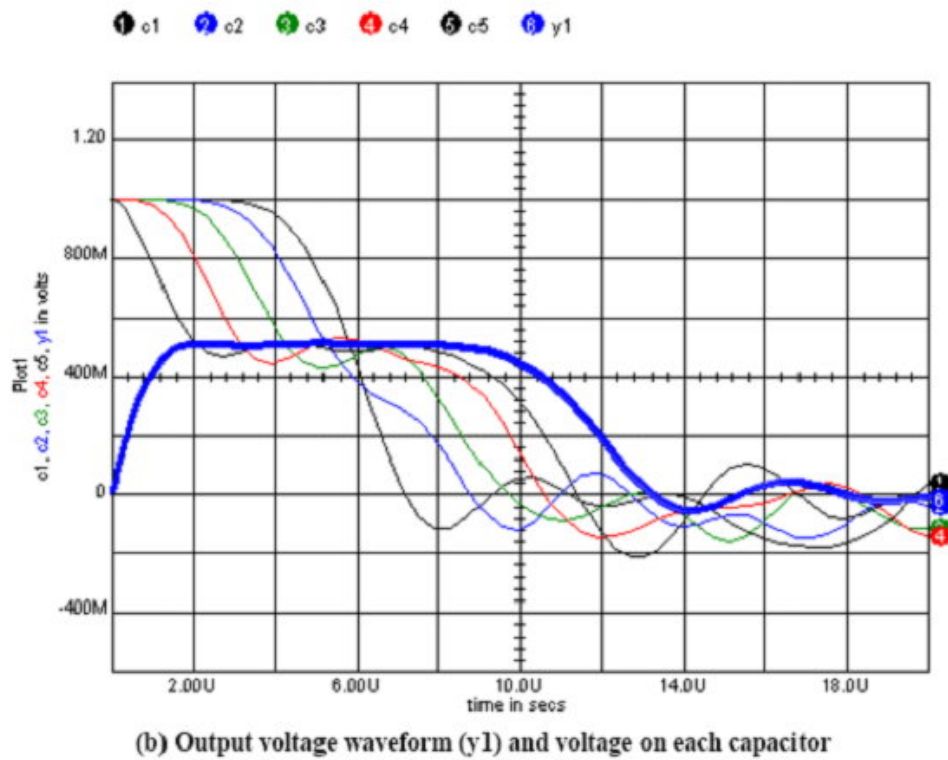
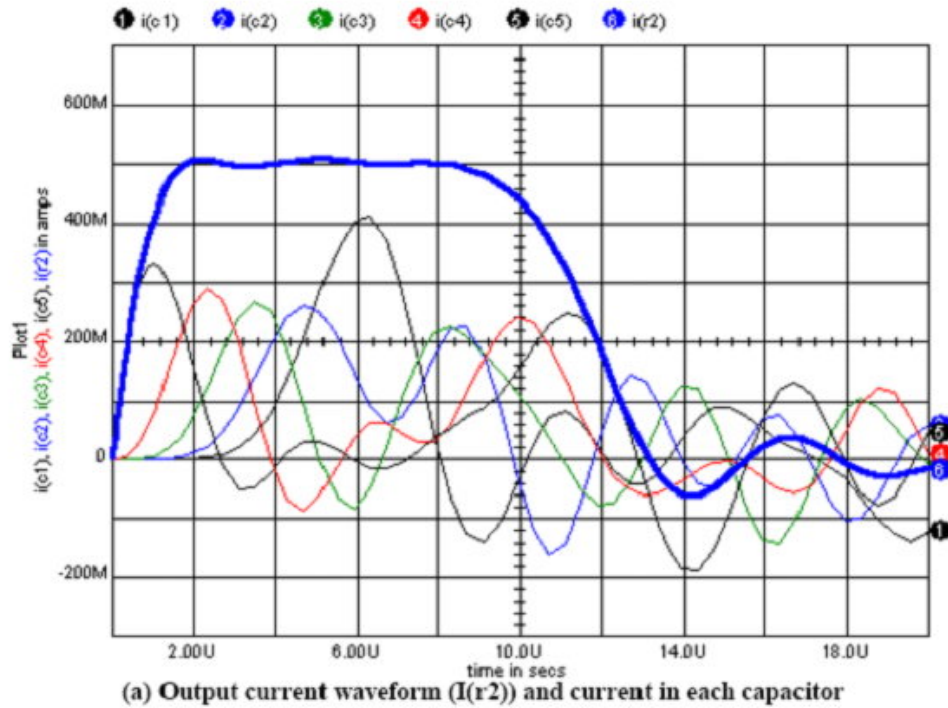
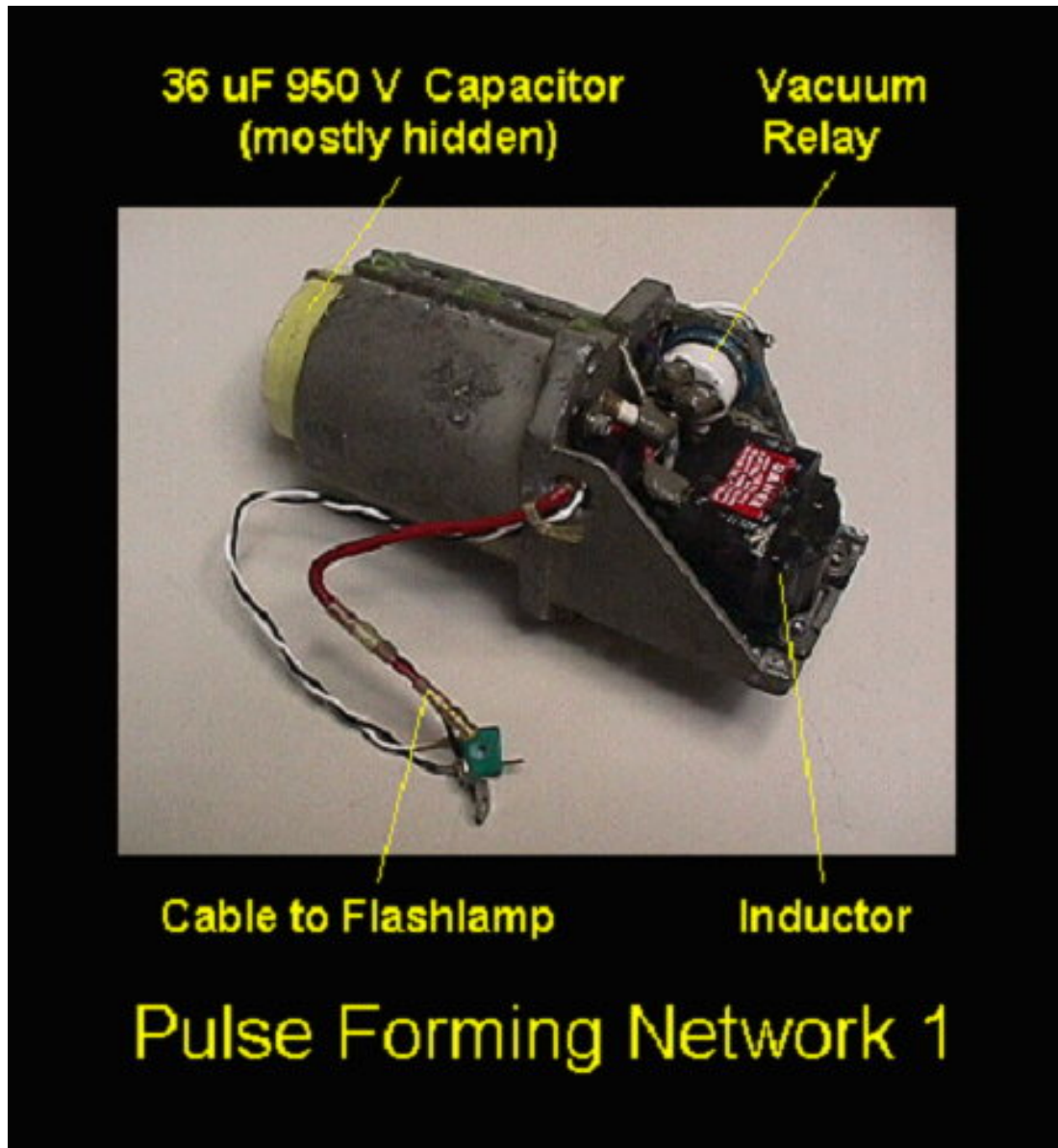


Figure 4. Individual capacitor discharge waveforms and resulting PFN output pulse.

下圖照片，是閃光燈脈衝成形電路 Pulse Forming Network PFN，的基本電容、電感及閃光燈元件的照片。



以下是閃光燈脈衝成形電路 Pulse Forming Network PFN，的基本結構圖，閃光燈參數值，以及驅動電路圖。

Fig.29 Simple pulse lamp driving circuit

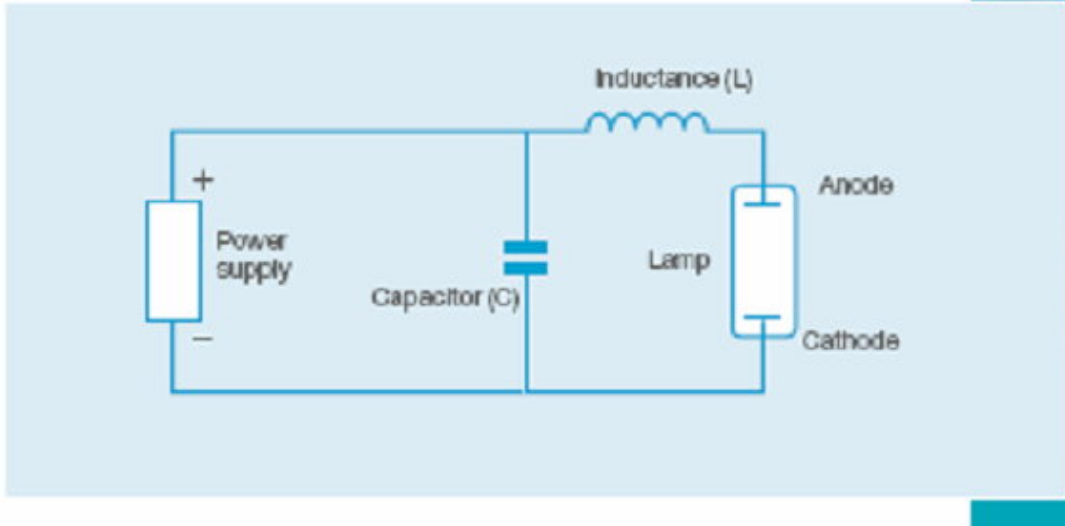


Fig.32 Recommended and maximum simmer currents

Bore size mm	Recommended current	Maximum recommended current
3-4	100mA	300mA
5-6	200-300mA	1A
7-8	500-1000mA	4A
9-13	1-2A	4A

Fig.33 A basic drive circuit for square wave pulsing

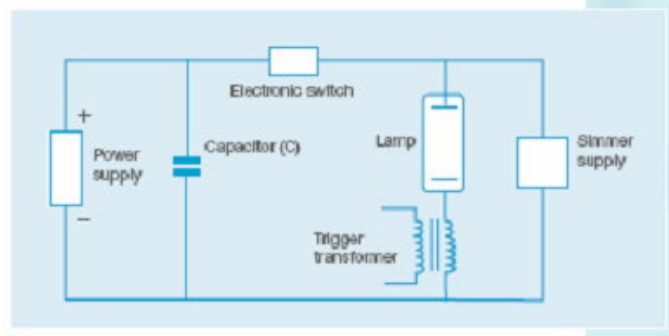


Fig.35 Pulse lamp operation

Bore	K_V/mm		K_{ex}/mm	Max.recommended power/mm		
	Xe	Kr		Convection	Forced	Fluid
3	0.426	0.415	736	1.41	2.82	18.85
4	0.320	0.311	984	1.89	3.77	25.13
5	0.256	0.249	1230	2.35	4.71	31.41
6	0.213	0.207	1476	2.82	5.65	37.69
7	0.182	0.177	1719	3.29	6.59	43.98
8	0.160	0.155	1968	3.76	7.53	50.26
9	0.142	0.138	2217	4.24	8.48	56.55
10	0.128	0.124	2467	4.71	9.42	62.83
11	0.116	0.113	2717	5.18	10.36	69.11
12	0.106	0.103	2970	5.65	11.30	76.39
13	0.098	0.095	3199	6.12	12.25	81.68

Fig.36 Fluid-cooled pulse lamp recommended physical dimensions (mm)

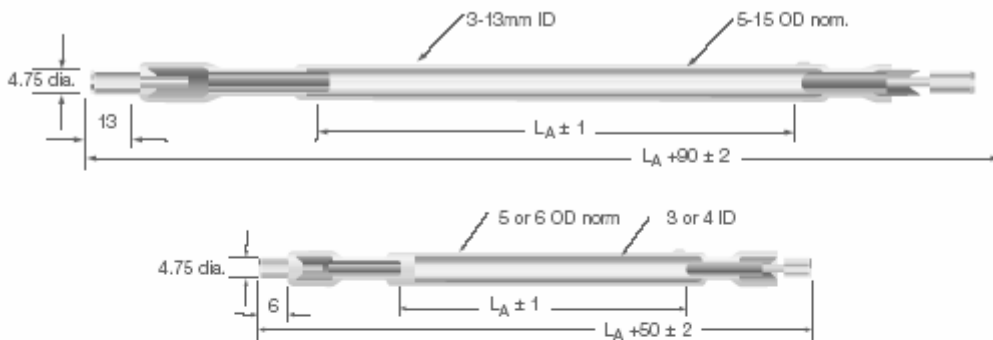
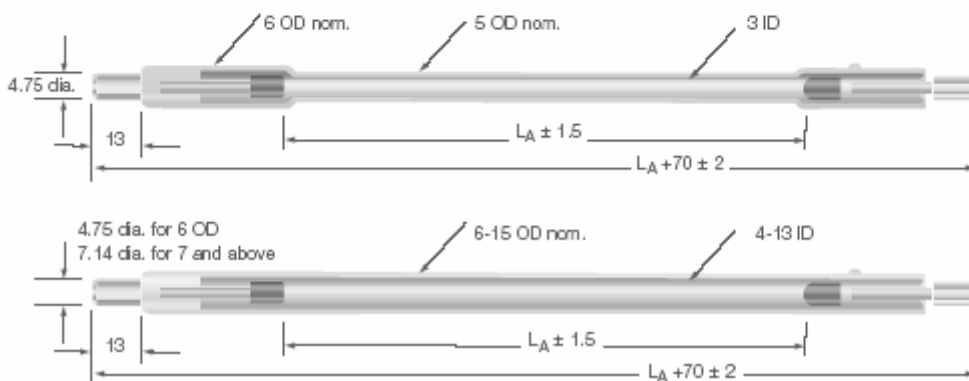


Fig.37 Air-cooled pulse lamp recommended physical dimensions (mm)

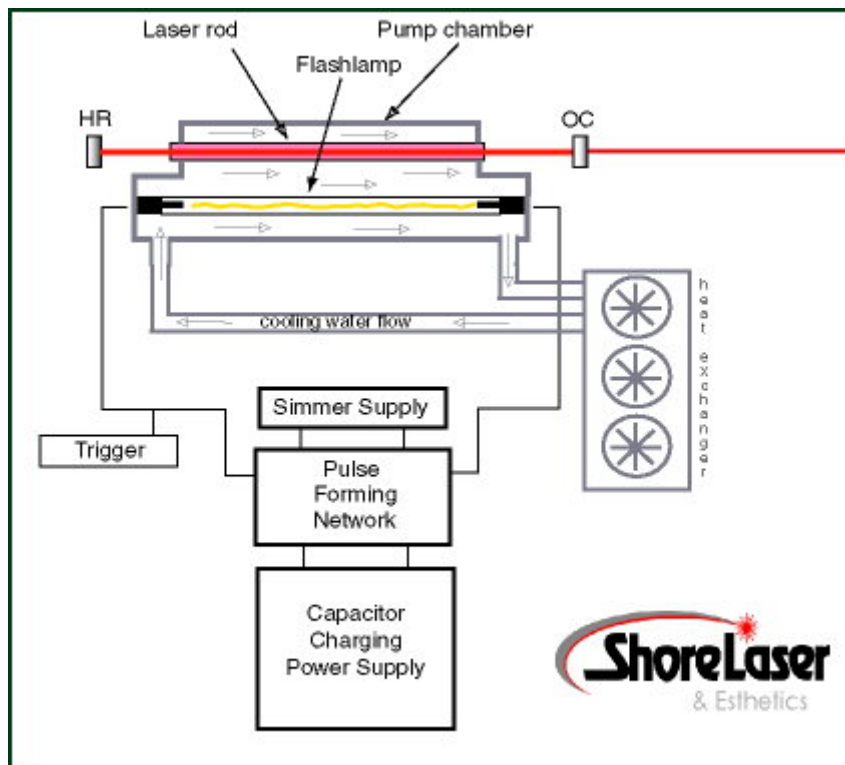


以及閃光燈脈衝成形電路 Pulse Forming Network PFN，它的全部組件電容、電感及閃光燈三個元件，其相關參考數值。但是由於閃光燈放電的動態阻抗，及電流電感特性，如我們在前面的分析，它是隨閃光燈的時間每一瞬間都是動態阻抗及電流電感的特性。使得選擇那一類型閃光燈、儲存能量的電容器及電容值大

小、和電感值大小需要實際且較多的經驗。

OPTIONS		8800-3.5	8800-7
PFN Capacitor Value	10 μ F	-10	-10
	25 μ F (STD)	-25	-25
	50 μ F	N/A	-50
	100 μ F	N/A	-100
	150 μ F	N/A	-150
PFN Inductor Value	60 μ H (STD)	-60	-60
	80 μ H	-80	-80
	100 μ H	-100	-100
	>100 to 300 μ H	-(value)	-(value)
	Power Supply	No Internal Supply	-0
	250W	-1	-1
	500W	-2	-2
	750W	-3	N/A
	1500W	N/A	-5
	2500W	N/A	-10
Charge Voltage (up to 2.5kV) e.g. 1500V		-(value)	-(value)
Simmer Output Current	120mA (STD)	-S	-S
	180mA	-SS	-SS
	300mA	-SX	-SX
Input Voltage	110VAC, 1 ϕ	-C	-C
	230VAC, 1 ϕ	-D	-D

下圖是，整個雷射激勵閃光燈系統的，示意圖及介面圖示。



下列資料表，是外國廠商，部份雷射驅動電源供應器成品規格。當然與在我們計畫系統內的參數是有不同，但是仍非常值得摘錄，俟軍方單位有預算也可以採購，再加調整，是可以當實驗室儀器設備。

	PFN 50	PFN 100	PFN 100D	PFN 500D	PFN 10k	PFN 20k
Rep. Rate	Single-shot to 50 Hz	Single-shot to 50 Hz	Single-shot to 10 Hz	Single-shot	Single-shot	Single-shot
Pulse Energy	50 J	100 J	200 J	750 J	12 kJ	24 kJ
Pulsewidth (3 σ)	212 μ s	300 μ s	300 μ s	300 μ s	400 μ s	400 μ s
Voltage (max)	1500 V	1500 V	1500 V	2.8 kV	7.8 kV	7.8 kV
Simmer	1200 VDC, 100 mA			Not Simmered		
Dimensions	21.5" L x 19" W x 8.75" H		21.5" L x 19" W x 10.5" H		24" L x 31" W x 50" H	
Input Trigger	TTL, 50 Ω					
Power	200-240 VAC, 50/60 Hz					

	LCE 4000
Repetition Rate	0.003 to 50 Hz, adjustable in 0.001 Hz steps
Interlocks	Cooling, laser, user-designated
Fast Output Triggers	2 independent (front panel BNC)
Jitter	\pm 500 ps relative to Pockels cell trigger
Adjustable Delay	\pm 500 ns relative to Pockels cell trigger, 0.5 ns steps
Slow Output Triggers	2 independent (front panel BNC)
Jitter	\pm 200 ns relative to each other
Adjustable Delay	0 to 2 ms in 1 ms steps
Dimensions	21.5" L x 19" W x 5.25" H

	LCS 3000
Capacity	2 gallons
Regulation	\pm 0.2° C
Flow Rate (unrestricted)	>2 Gallons per minute
Flow Switch Interlock Rate	0.5 Gallons per minute
Dimensions	21.5" L x 19" W x 7" H
Power	200-240 VAC, 50/60 Hz

(iv) 閃光燈觸擊發電路

閃光燈觸擊發電壓額值

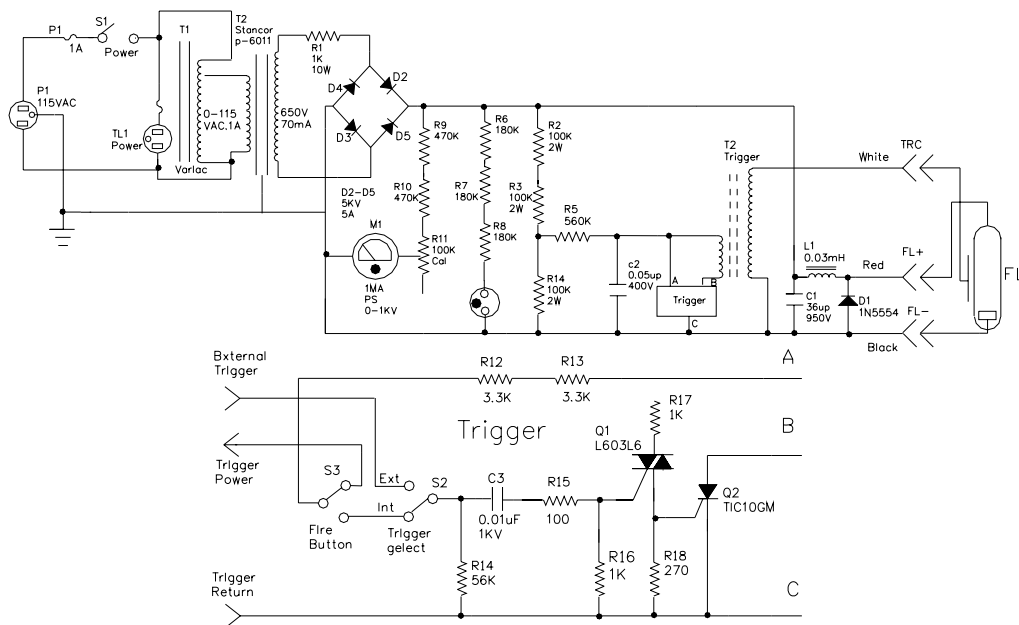
閃光燈觸擊發電壓產生

閃光燈觸擊發電壓極性

閃光燈觸擊發電壓時間寬

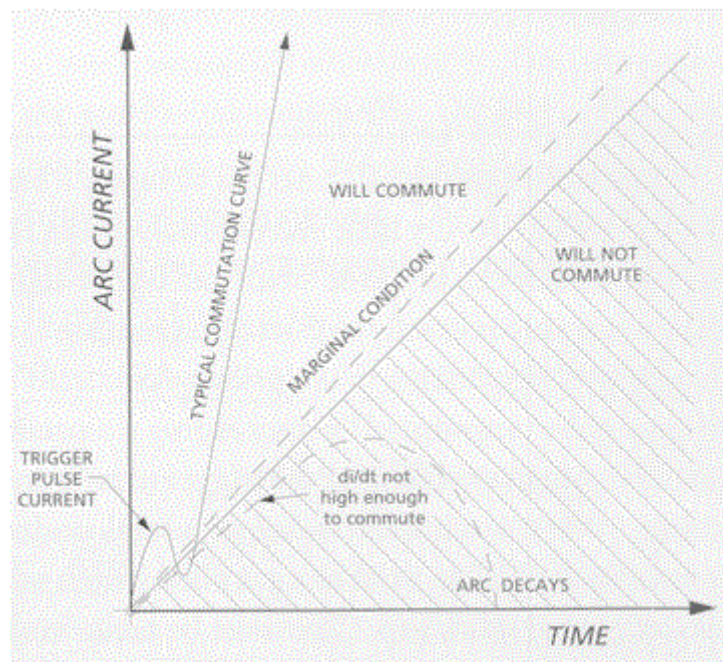
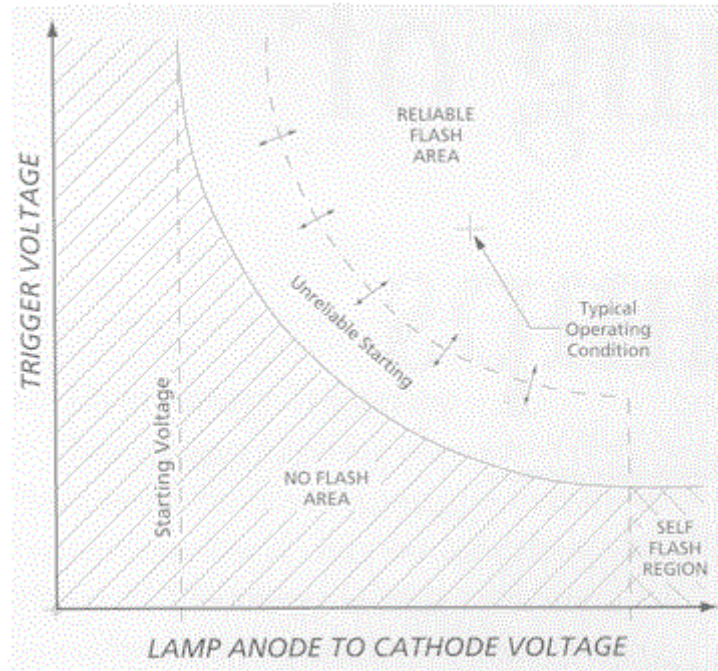
閃光燈觸擊發電壓電路及模組

下圖是，我們設計的自製雷射驅動電路圖。其中對閃光燈有非常重要的，閃光燈觸擊發電壓電路及模組。由於雷射閃光燈是一充滿 Xenon 的，高壓 450torr 氣體。要讓閃光燈驅動，則是要一高電壓加到閃光燈的電極一端，讓此高電壓造成與閃光燈的電極間的弧光放電，進而產生電漿放電而發光。



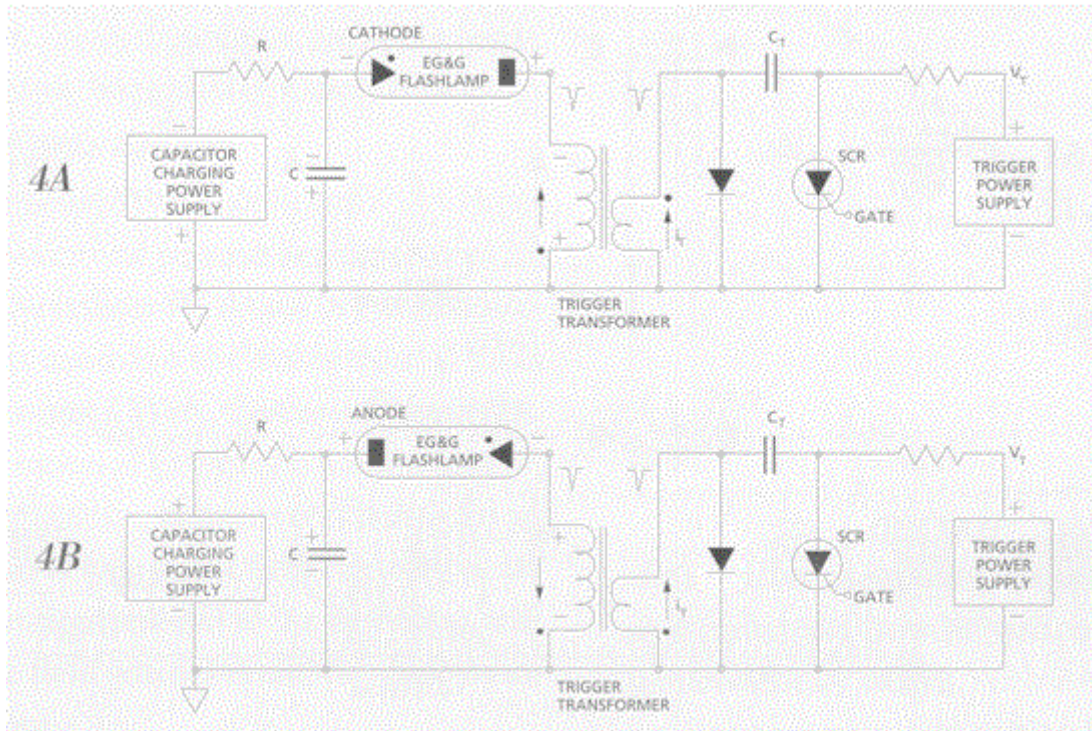
我們研究實做的結果得知，閃光燈觸擊發電壓額值需要達到 1.5KV 以上，閃光燈才會穩定的每次觸擊動，且閃光燈的發光光譜，在相同的輸出能量，及相同的脈衝形成電路參數下，才會穩定。此外閃光燈觸擊發電壓要串聯連接，閃光燈觸擊發電壓產生需要大於 100ns 的脈衝寬度，閃光燈觸擊發電壓極性以負高壓最佳。

以下是我們研究結果的參考閃光燈工作區域資料：

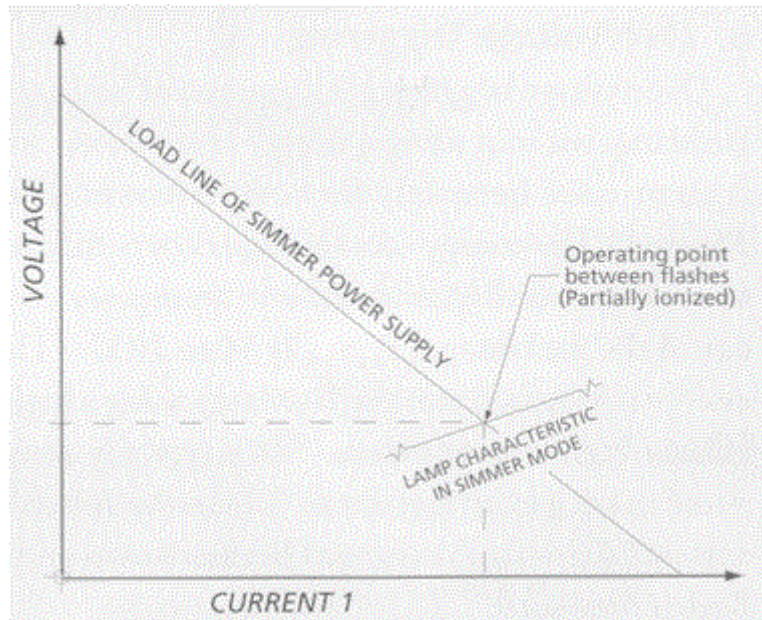


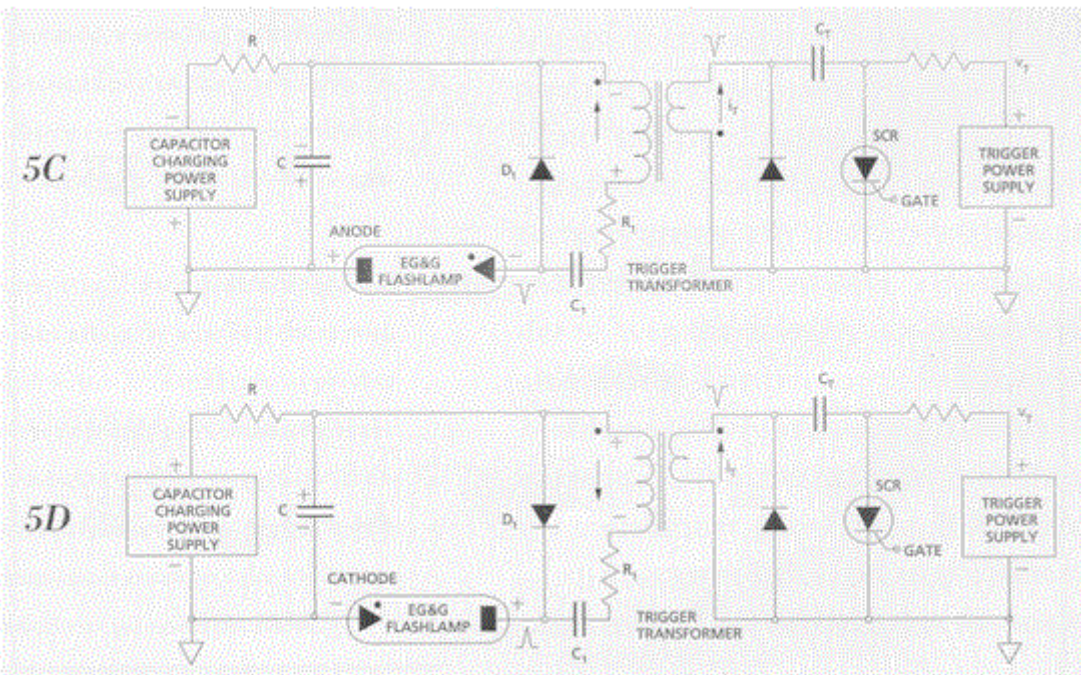
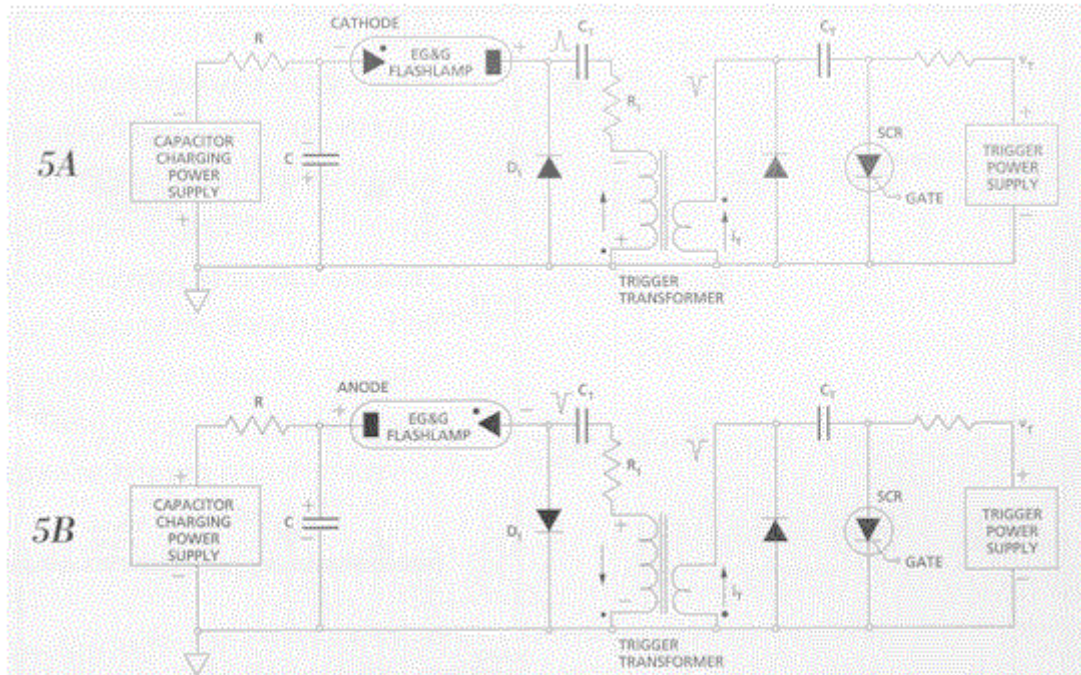
而且對高脈衝率導引追蹤雷射而言，由於鎖碼的調頻及調幅需求，閃光燈的觸擊發要非常穩定。所以對高脈衝率導引追蹤雷射，閃光燈觸擊發電壓電路及模組需要更加有細微小電流束 Simmer current 型式，以維持高脈衝率導引追蹤雷射觸擊發的穩定性。我們也有研究試做利用更省電的假細微小電流束 Pseudo-simmer current 型式，也同樣可以維持高脈衝率導引追蹤雷射觸擊發的穩定性，而且更省電。

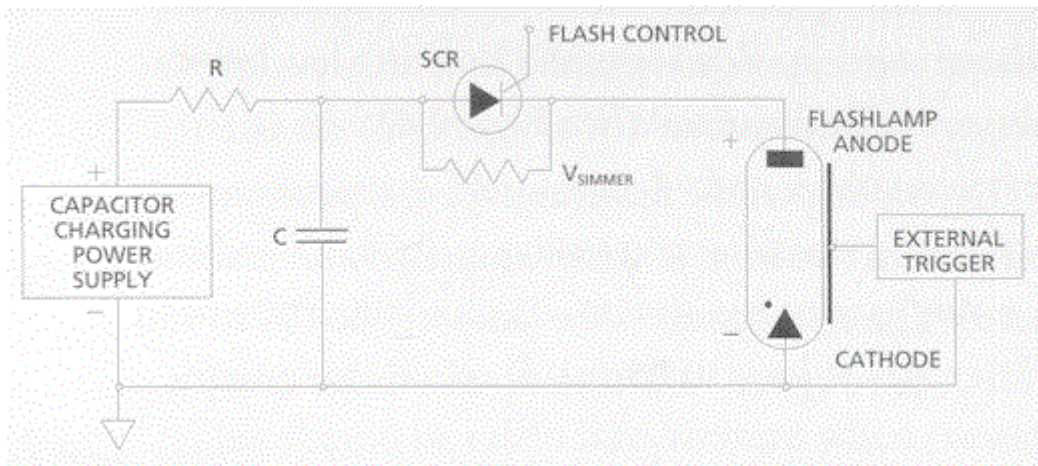
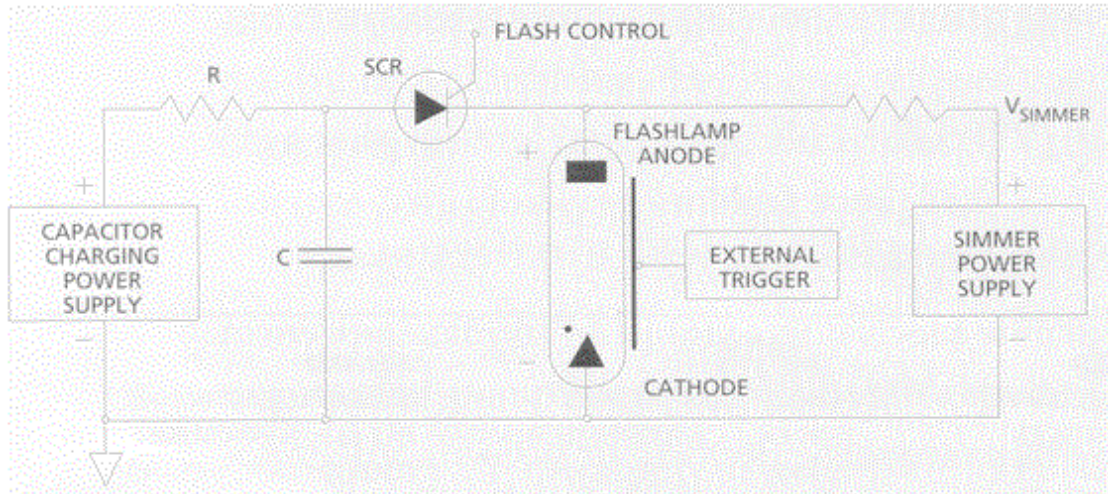
下圖是串聯連接的閃光燈觸擊發電路參考圖，



以及閃光燈觸擊發電壓電路及模組加有細微小電流束 Simmer current 型式，以維持高脈衝率導引追蹤雷射觸擊發的穩定性的電路圖。







(v) 雷射 Q 調制電源供應器

Q 調制模組元件及機制

Q 調制電壓額值

Q 調制電壓產生

Q 調制電壓極性

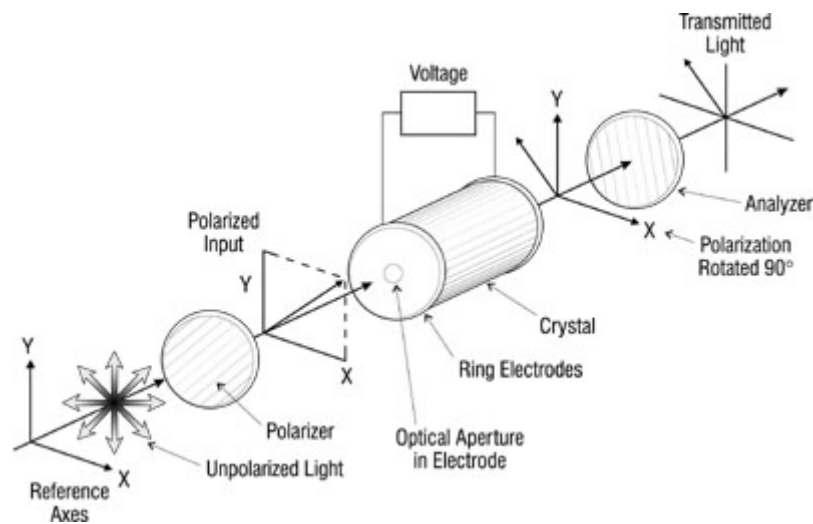
Q 調制電壓時間寬

Q 調制電壓脈波形

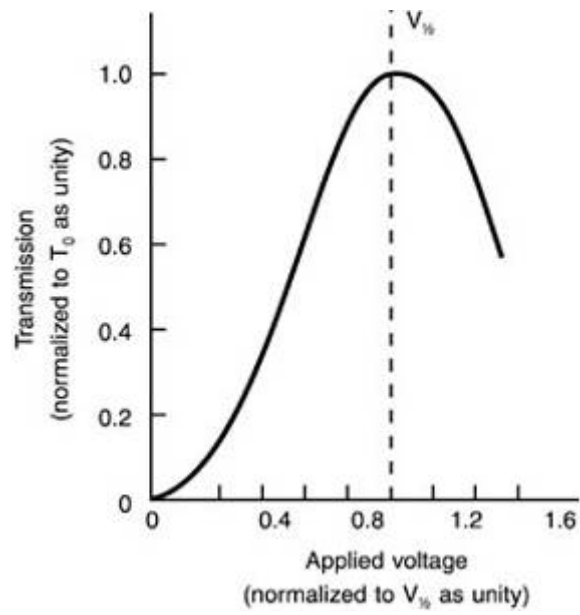
Q 調制電壓脈波快開及緩開

Q 調制電壓電路及模組

Q 調制模組元件如下所示：

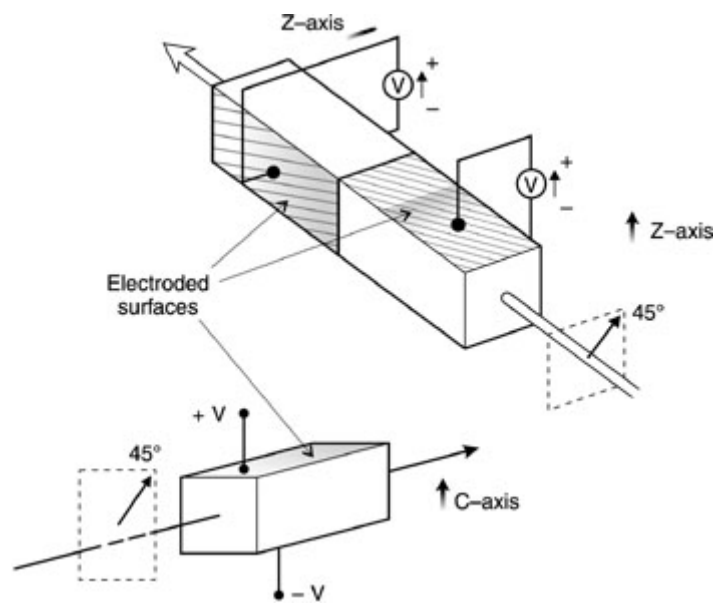


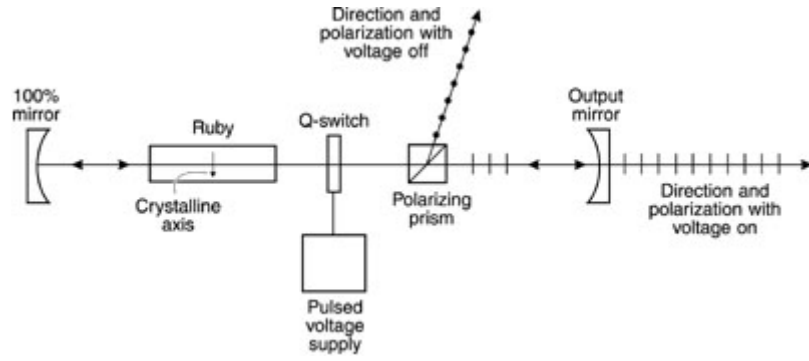
其中 Q 調制模組元件是 LiNbO_3 晶體，我們所用的 LiNbO_3 晶體，其體積為 $9 \times 9 \times 25 \text{ mm}^3$ ，要在 LiNbO_3 晶體產生相位偏移 $\Delta\Phi = 2\pi$ ，代入公式(2)計算，我們在 LiNbO_3 晶體上要加 3021V 的高電壓。



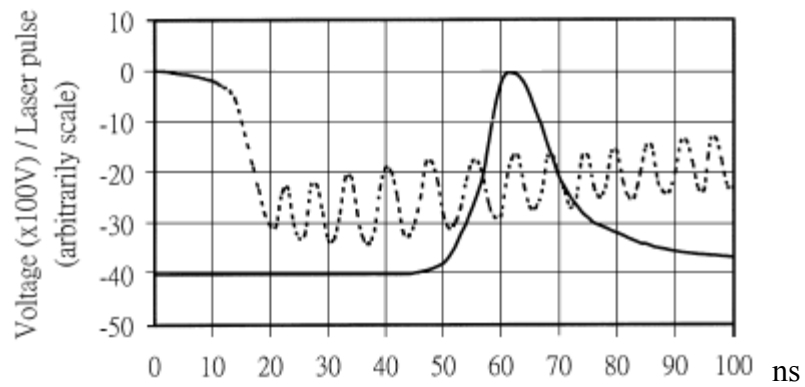
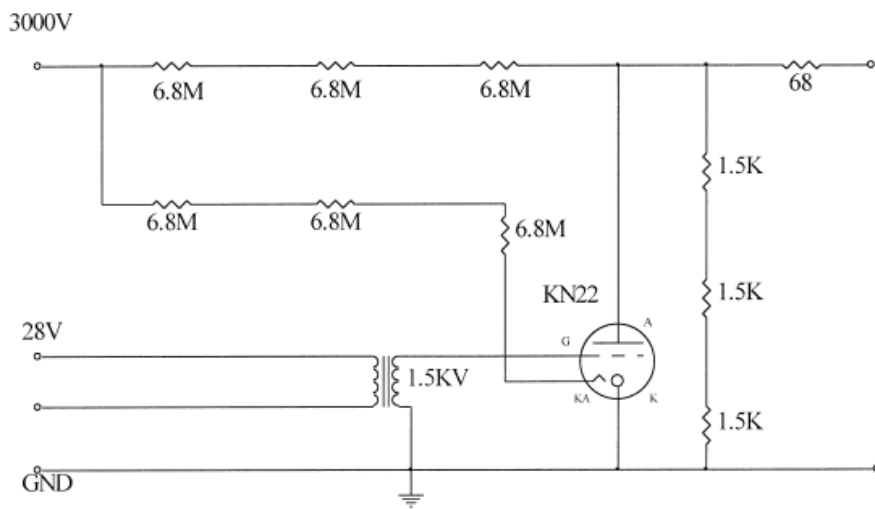
上圖是，LiNbO₃ 晶體上，要加的電壓值到最高電壓過程中，其 LiNbO₃ 晶體的穿透率曲線。

下圖則是 LiNbO₃ 晶體上電極得標示和對應晶軸的圖示：

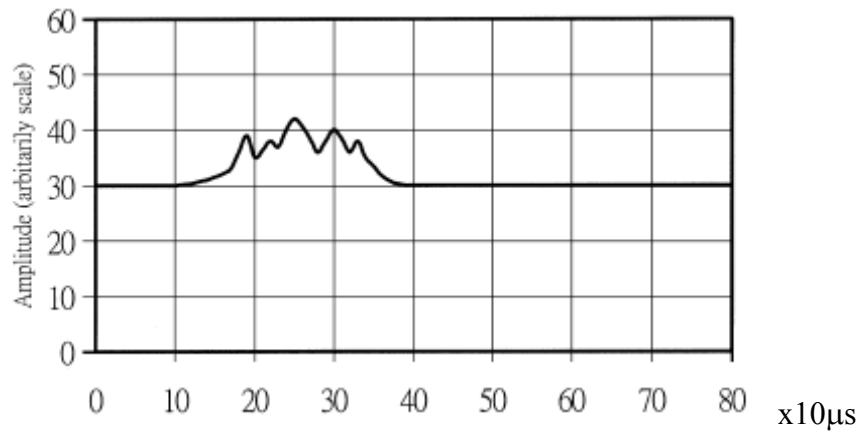




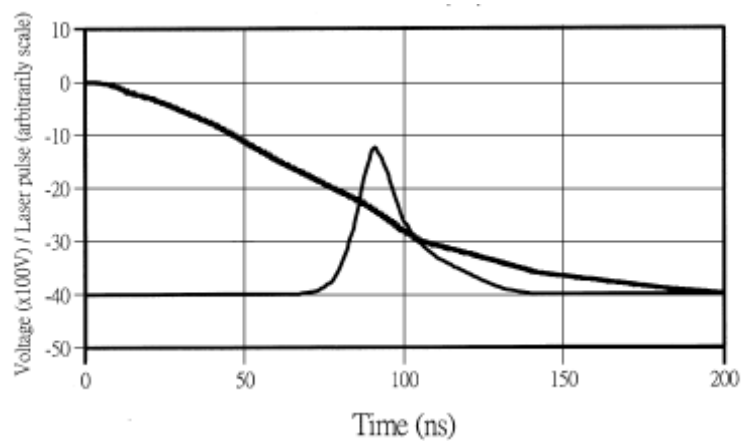
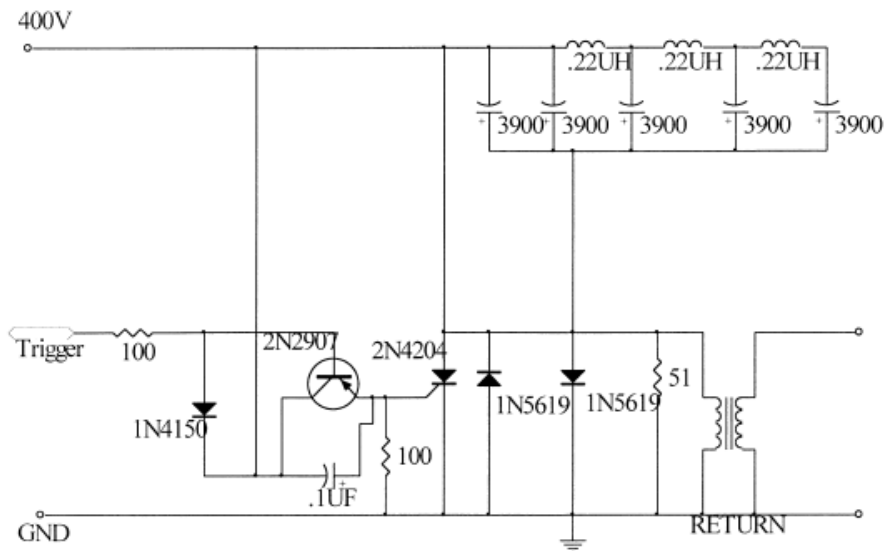
而其驅動電路，及觸擊發高壓電壓，和雷射脈衝的輸出時序圖，如下所示：

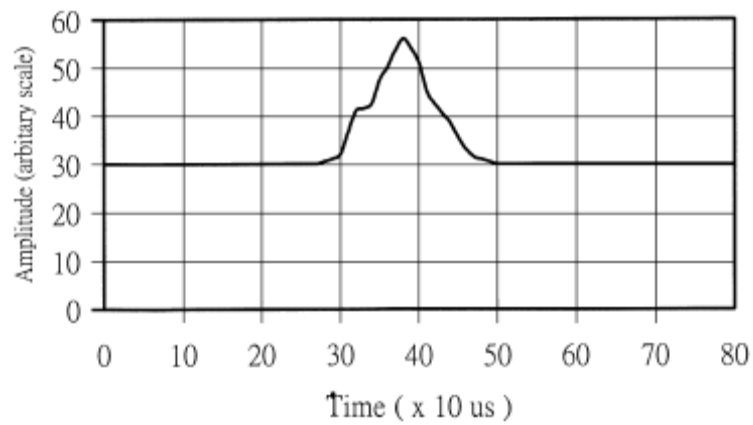


下圖，則是輸出雷射光，其能量的空間分布圖形：



如果我們用我們獨特研究並已發表的優化的緩開關驅動電路，其觸擊發高壓電壓，和雷射脈衝的輸出時序圖，輸出雷射光，其能量的空間分布圖如下做對比，我們可發現雷射的輸出能量及功率可以提高百分之三十以上。





	Laser pulse yield by slowly opened switch	Laser pulse yield by fast opened switch
Output energy	$E_p = 63 \text{ mJ}$	$E_p = 48.9 \text{ mJ}$
Beam divergence	0.437 mrad	0.6 mrad
Laser pulsewidth (FWHM)	18 ns	20 ns
Output peak power	3.5 MW	2.45 MW

下圖是其他廠商出售的，雷射 Q 調制電壓電路及模組和電源驅動器：
Pockels Cell Q-switch Driver

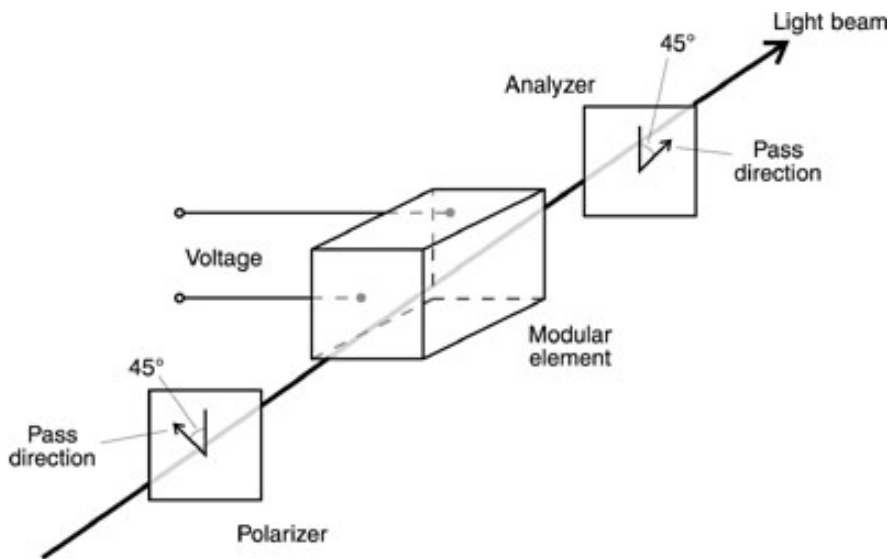
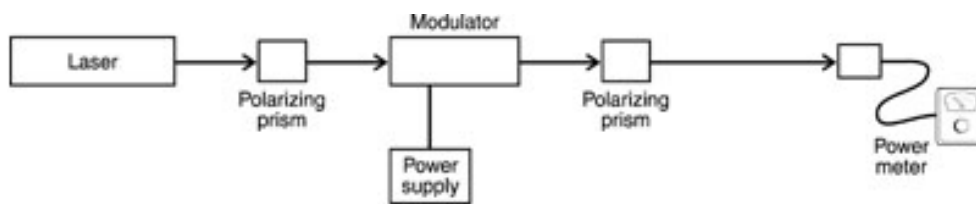
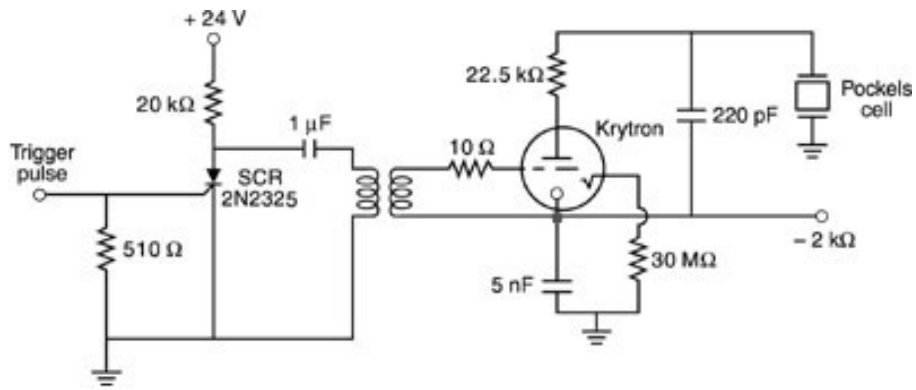


但是對需要鎖碼的測距導引雷射，我們還要考慮可控制調頻、調幅及高脈衝率(10-25 Hz) Q-調制雷射的高壓電路和電源驅動器。

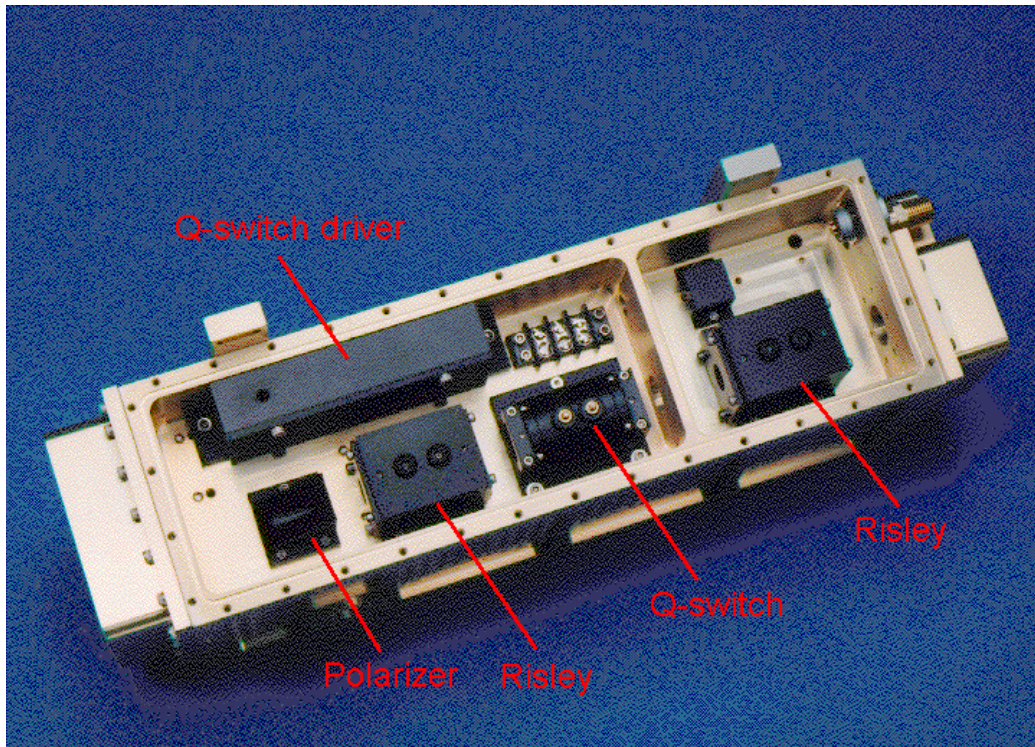
Provisional Specifications:

Parameter	Value				
Repetition Rate	0 to 100kHz in five decade steps by internal or external generator				
Output Voltage	+200 to +2,000V adjustable with visual display				
Output Pulse	The standard system generates a positive going step function above zero. The generator can also be supplied giving a negative going step from the set HT level down to zero for quarter wave switching				
External Trigger In	+3.0 to 10.0V min. 10ns f.w.h.m. into 50Ω				
Synchronization Output	TTL approx. 30ns after trigger				
Overload Protection	(1) Repetition rates above 100kHz (2) HT Current above 25mA (3) Output stage fault overload Protection occurs by automatic removal of the HT supply which can be re-instated by the reset switch				
Power Input	Universal 90 - 265V a.c. 47 - 440Hz via fused IEC inlet				
Dimensions	150(h) x 250(w) x 330(d) (mm) Mass: 6kg				
Step Voltage at End of an Open Circuit 50Ω Line					
50W co-axial cable length	Rise-Time	Flat Top	Fall Time	Maximum Frequency at 2kV	Maximum Voltage at 100kHz
125mm	5ns	175ns	400ns	80kHz	1,700V
250mm	5ns	160ns	500ns	66kHz	1,500V
500mm	<7ns	150ns	700ns	50kHz	1,300V
1,000mm	<8ns	120ns	1,000ns	40kHz	800V

另外也附加基本的驅動電路、實驗方塊圖等以為參考。



下圖是，雷射 Q 調制電源供應器的，時序邏輯控制電路。使整個動態雷射的時序完全達到優化的動態時序控制。



Fast Pockets cell

Fast Pockets cell : LASERMETRICS 5046E

Optical material : KD*P

Optical rise and fall times(10 to 90 %) : < 3ns

Optical pulse width : <10ns to 1 μ s

Jitter, system input to output : <1ns





我們可以綜合結論，說明了 Q 調制模組元件及機制，瞭解 Q 調制電壓額值與晶片材料和體積大小有關，通常要三千伏以上高電壓。而 Q 調制電壓產生，可有傳統式，或我們獨特研究而且效率更高的緩開式。

(vi)高脈衝率雷射驅動及技術

高脈衝率雷射需求及應用

高脈衝率雷射驅動

高脈衝率雷射驅動技術⇒Simmer mode 細微連續式

高脈衝率細微連續式雷射驅動電路

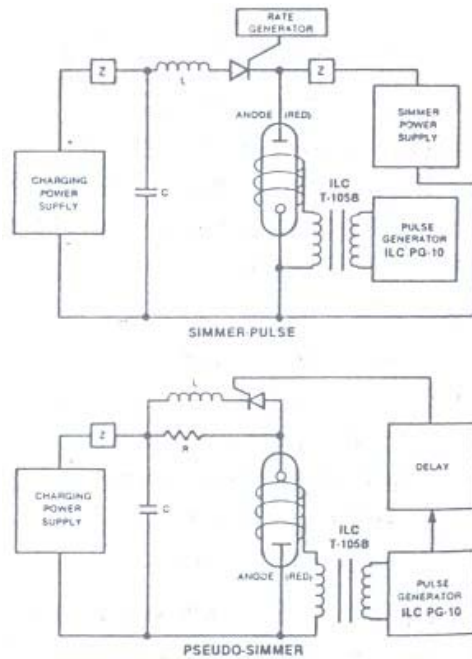
在高連續工作率及高操作功率狀況下，小常通電流的操作情況可以有如下的好處：

- (1) 較高的雷射效益。
- (2) 較大的閃光燈生命期。
- (3) 脈沖有較穩定的重複性及弧光形成較穩。
- (4) 可工作在更大的連續工作率。

下圖顯示典型的小常通電流及假小常電流 (Pseudo-simmer mode) 操作方式電路。小常通電流脈沖的操作是隨時維持一個小功率直流電，電流從 20mA 到 5A 左右，而真正的脈沖能量是由 SCR 控制放到閃光燈中。實驗得知，以小常通電流方式操作其效益會增大 20% 或更多。其現象在小輸入能量時最明顯，而到高尖峰電流狀況下其效應漸減，這是因為小常通電流弧光所產生的紫外輻射的影響。

小常通電流操作閃光燈會增大雷射效益的原因可歸納是因為小常通電流使弧光通路阻抗小且拘限在燈管的中央，這使主放電脈沖有較大的電流密度及較大的效益。這點也可由小常通電流方式其連續輻射遠大於線性輻射證明。

在較低的連續工作率的狀況下，小常通電流頗浪費的。通常用一假常通電流操作方式取代，如下圖閃光燈如平常狀況觸發，但其放電電流先由一電阻 R 控制在 50mA 之電流。



典型小常通電流及假(pseudo)常通電流電路

此小電流存在約 $100 \mu\text{sec}$ 到 $200 \mu\text{sec}$ 左右，然後電阻 R 為 SCR 短路再由真正主放電產生，在此狀況下，效率曾達 15~20% 的增加。

小常通電流方式操作時，在固定電流下，電壓是電極工作函數的一個變數，所以選擇閃光燈時要注意閃光燈是否要用在小常通電流方式下，否則閃光燈會過熱。且電極材料要特別處理，這才會增加閃光燈的生命期及穩定性。

第三種增加閃光燈輸出功率的方法是先小脈沖式的使閃光燈放電，(Pre-pulsing)，實驗證明其效果與小常通電流方式差不多，不過還要經過先放電小脈沖高度，脈寬及延遲時間的優化。

閃光燈在高連續工作率下使營時要特別注意其恢復時間。當閃光燈脈沖放電接由於放電時的不穩態離子的緩慢變化，閃光燈的內阻有一段延遲的時間內會很小。此時如果 PFN 繼續充電，則閃光燈會有一大直流電流導通，這可用振盪充電電路來防止，使充電電路在這段時間內不充電，或是在 PFN 線路中設計自動停止放電的裝置以避免受閃光燈內阻減少而繼續導電的情況發生。在放電頻率大於 500Hz 以上，閃光燈的恢復時間是最大的困難因素。

(b) 雷射驅動系統介面

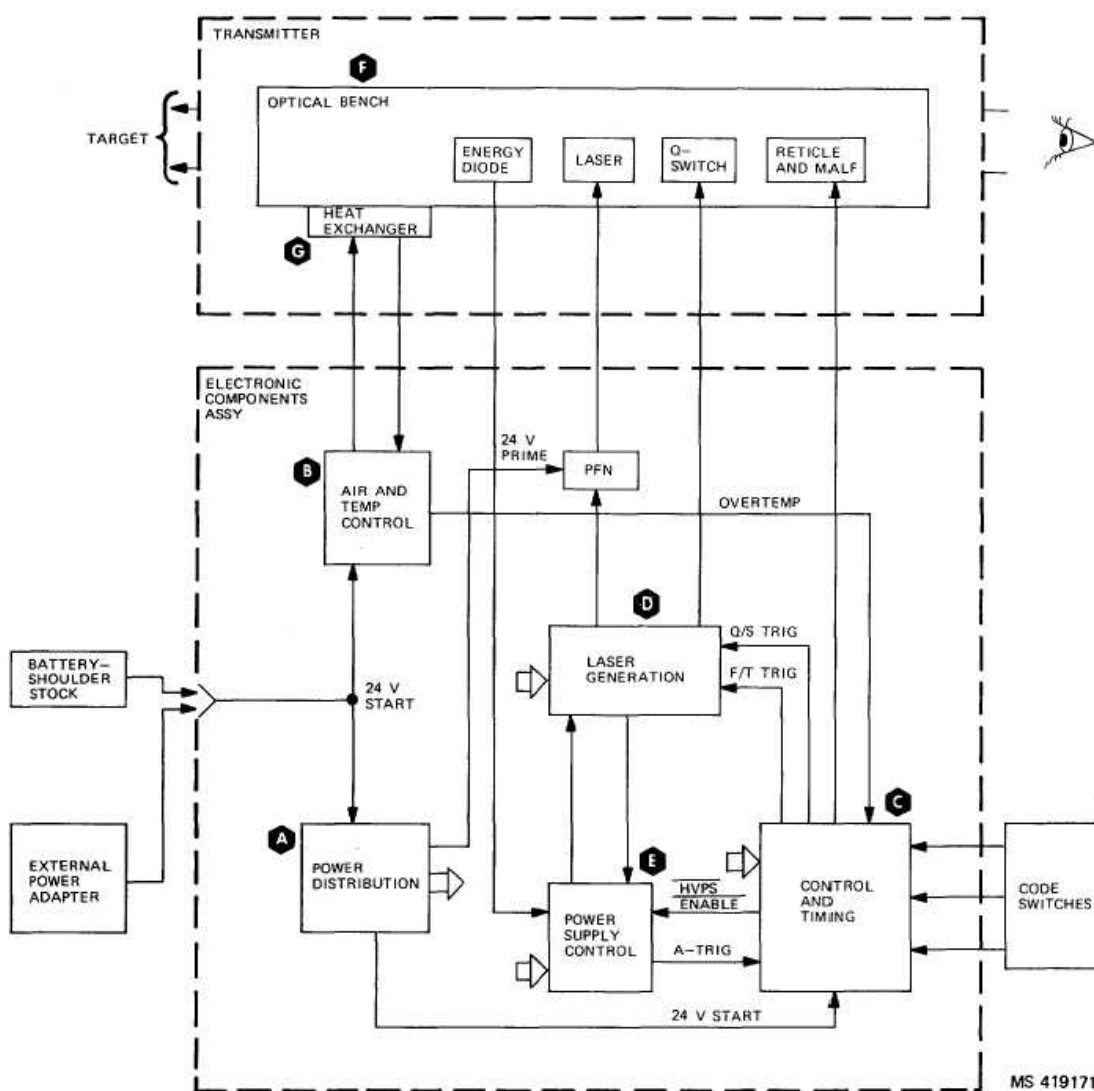
(i) 雷射驅動系統時序技術

雷射驅動系統模組塊

雷射驅動系統時序需求

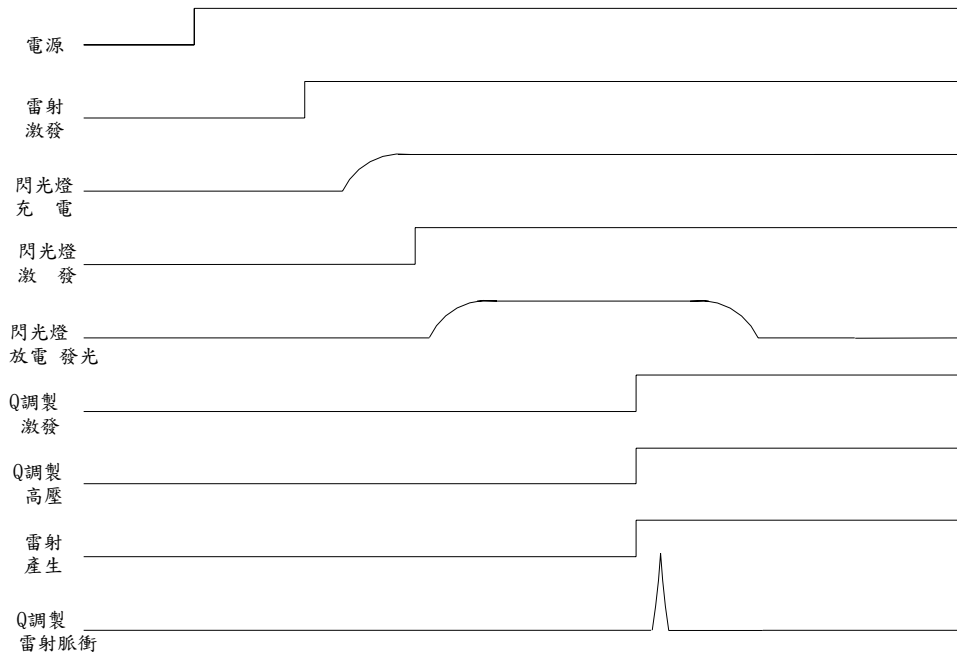
雷射驅動系統技術

從雷射測距追蹤導引儀系統圖中，我們知道整個雷射的架構可分成主電源供應，雷射發射擊發，閃光燈充電，閃光燈觸擊發，閃光燈發光激勵雷射棒，Q 調制啟動擊發，Q 調制高電壓產生，Q 調制開關開通，以及巨脈沖 Q 調制測距追蹤導引雷射產生發射出。

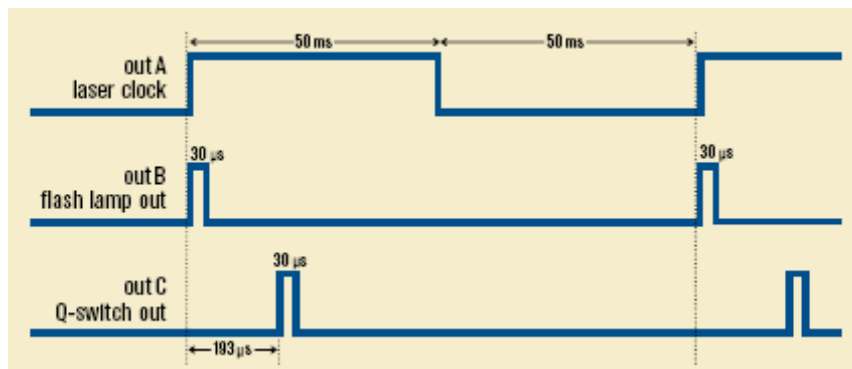


整個雷射產生發射，可由下圖全貌的時序圖顯示出：

雷射產生發射全貌的時序圖：



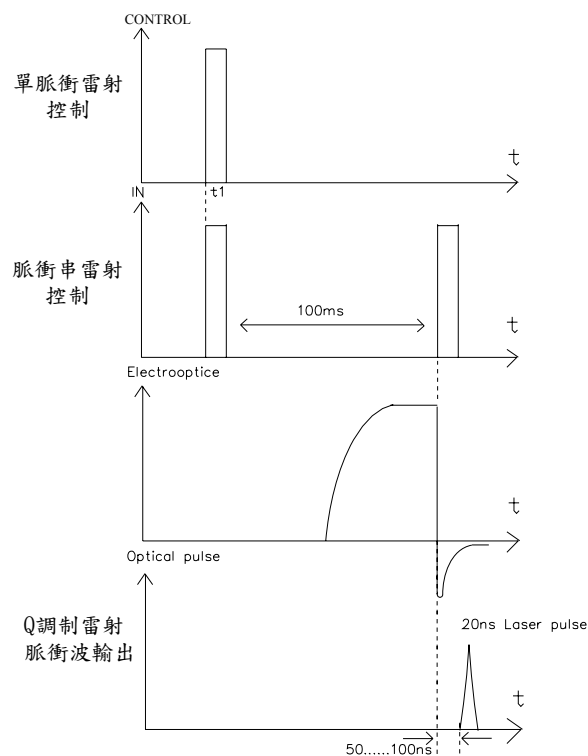
下圖是，巨脈衝 Q 調制雷射的邏輯驅動時序圖。首先，雷射的產生，是由閃光燈發光激勵開始，在閃光燈激勵雷射最高反居量數時，如果我們啟動大通的道路，則光子會立即開始振盪放大，並把高能階儲存的能量，在非常短的時間內，以同調雷射光特性，完全放出來，而產生巨脈衝 Q 調制雷射光。



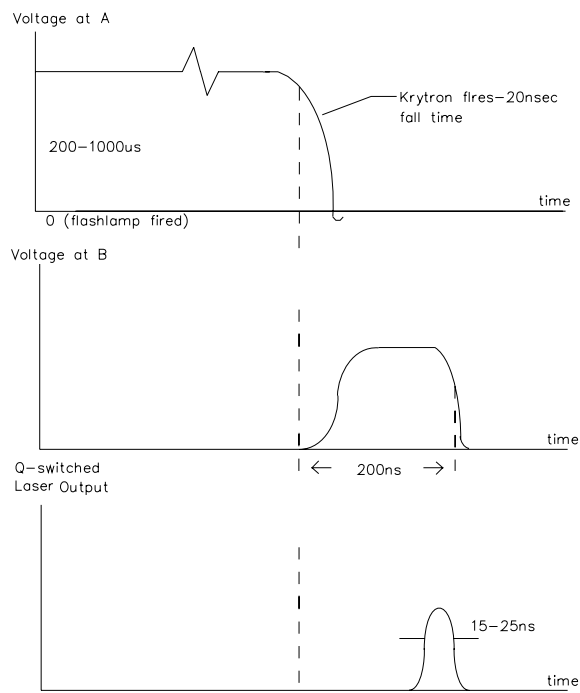
上圖 Q 調制雷射的驅動時序圖中，我們可以看到驅動邏輯信號的時序，首先，30μs 的邏輯信號，觸發閃光燈放電發光，而在在閃光燈激勵雷射最高反居量數時，也即是約 190μs 後，Q 調制的驅動邏輯信號，觸發 Q 調制產生高電壓，

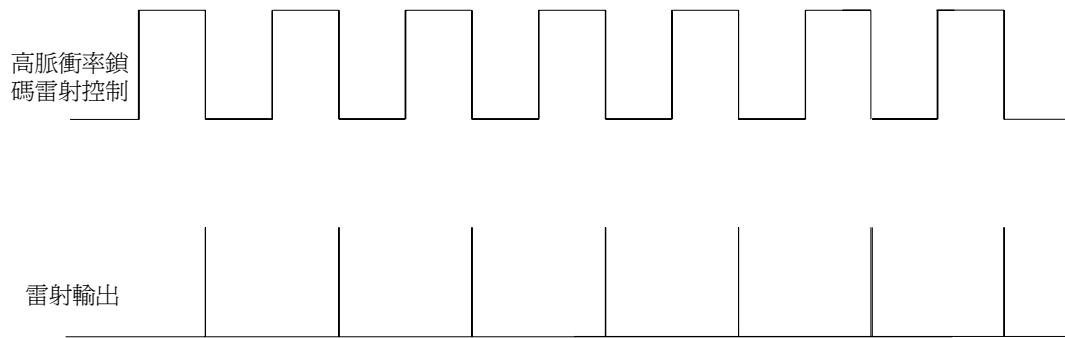
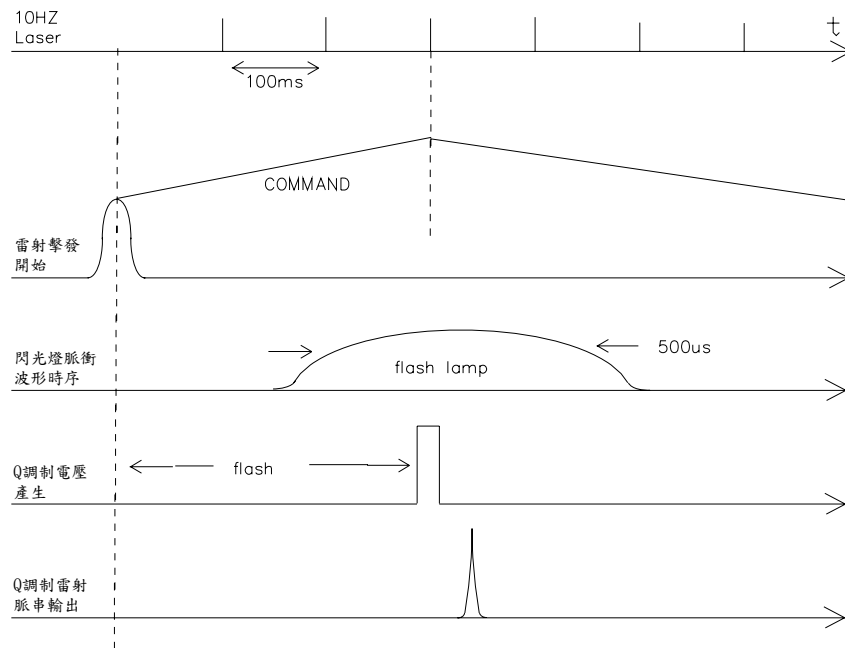
開始打開雷射共振腔的開關，在非常短的時間內，將雷射完全發射出來，而產生巨脈衝 Q 調制雷射光。而最上面的邏輯信號的時序，則是高脈衝率鎖碼雷射的邏輯信號的時序。

下圖是，巨脈衝 Q 調制雷射光脈衝，輸出的機制圖。

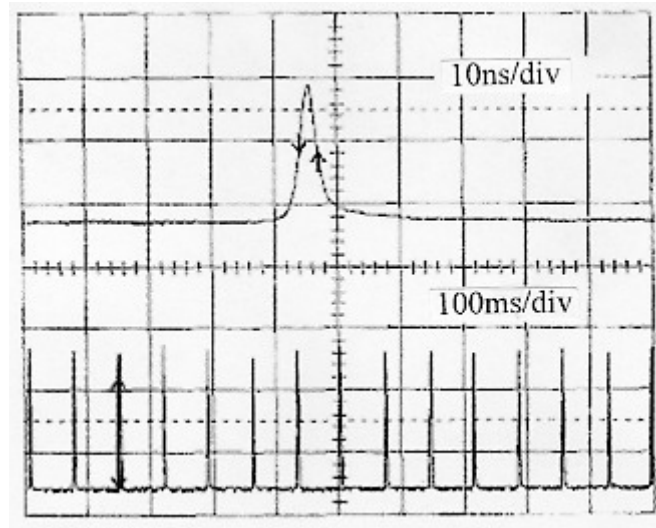


下圖則是，巨脈衝 Q 調制雷射的驅動時序圖。在在閃光燈激勵雷射最高反居量數時，也即是約 $190\mu\text{s}$ 後，Q 調制的驅動邏輯信號，觸發 Q 調制產生高電壓，開始打開雷射共振腔的開關，在非常短的時間內，將雷射完全發射出來，而產生巨脈衝 Q 調制雷射光。





下圖是，Q 調制雷射的脈衝波形圖。注意其雷射的脈衝寬是為 10ns/div。而下半部的脈衝串，則是鎖碼的雷射追蹤導引雷射的脈衝串，且其雷射的脈衝頻率，是為 100ms/div。



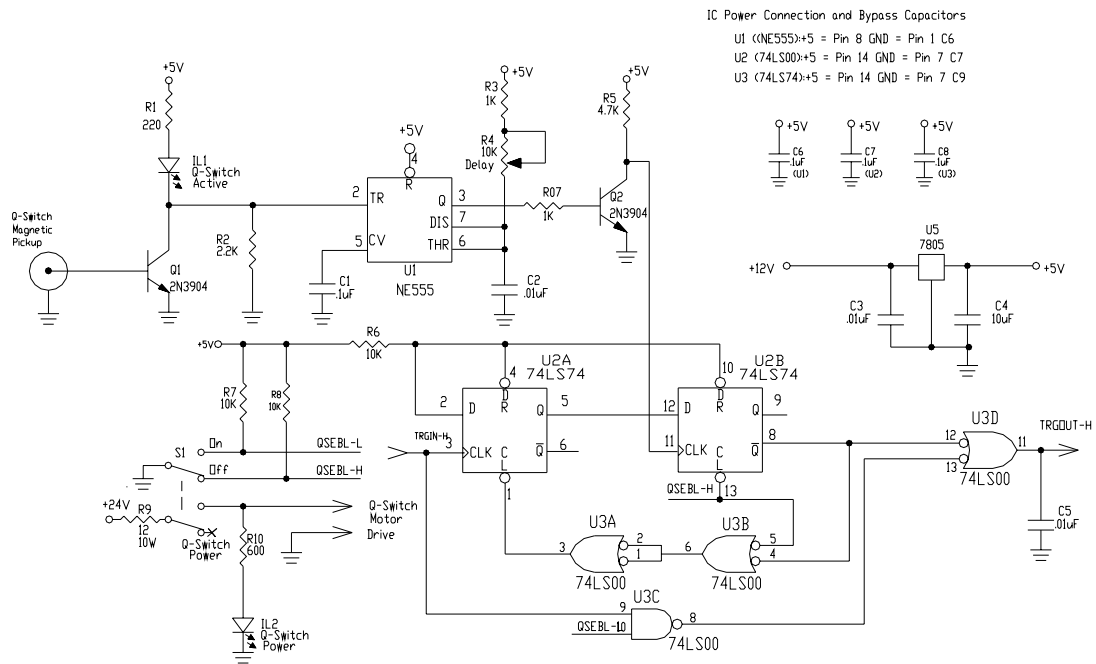
(ii) 雷射驅動系統時序控制電路

雷射驅動系統時序控制

雷射驅動系統時序電路設計

雷射驅動系統時序調整技術

下圖是，雷射驅動系統時序控制，電路設計圖。注意在實際雷射系統中，由於雷射棒及動態的閃光燈激勵，每個雷射光電元件皆不同，所以要有雷射驅動系統時序調整技術，以調整優化得到雷射的最佳輸出。



5.4. 雷射輸出量測

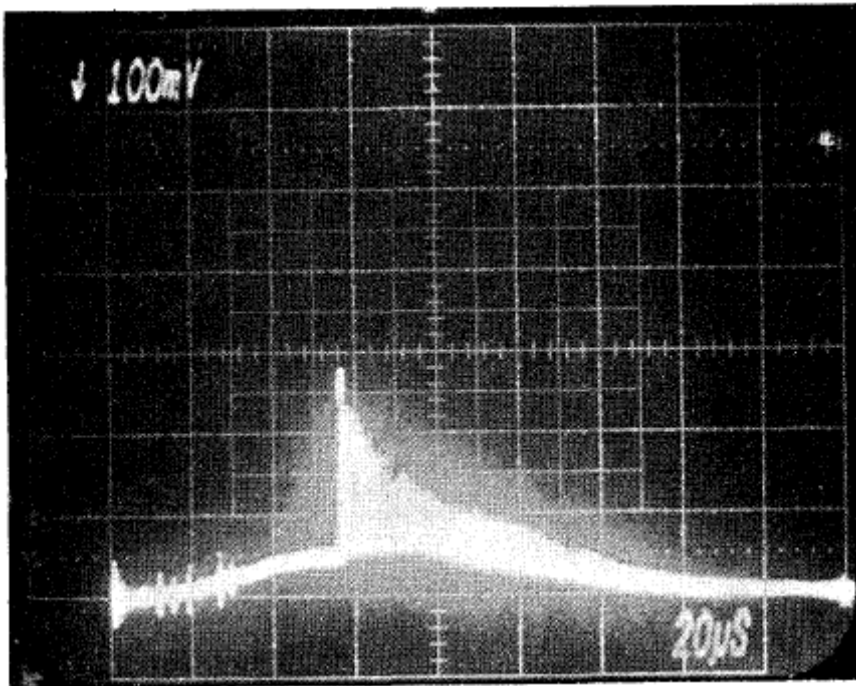
(a) 雷射輸出

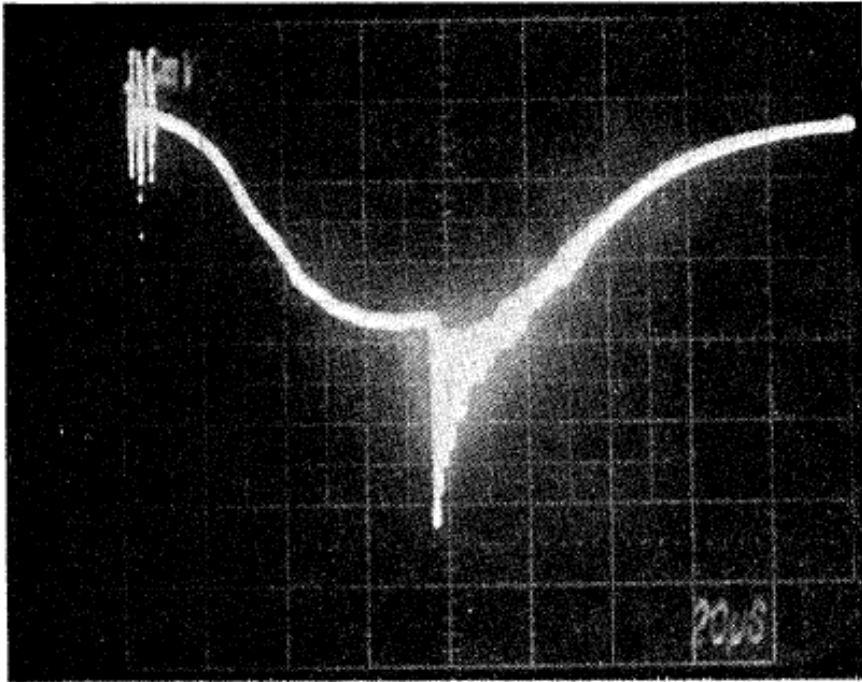
(i) 雷射能量輸出

雷射能量輸出形式

雷射能量輸出額值及範圍

下列照片是，實際量測雷射輸出的信號，加上閃光燈放電發光激勵雷射棒的時序照片。其雷射輸出的能量範圍可在 50mJ 至 100mJ 範圍內。





(ii) 雷射輸出光束點

雷射輸出光束點形式

雷射輸出光束點空間分佈

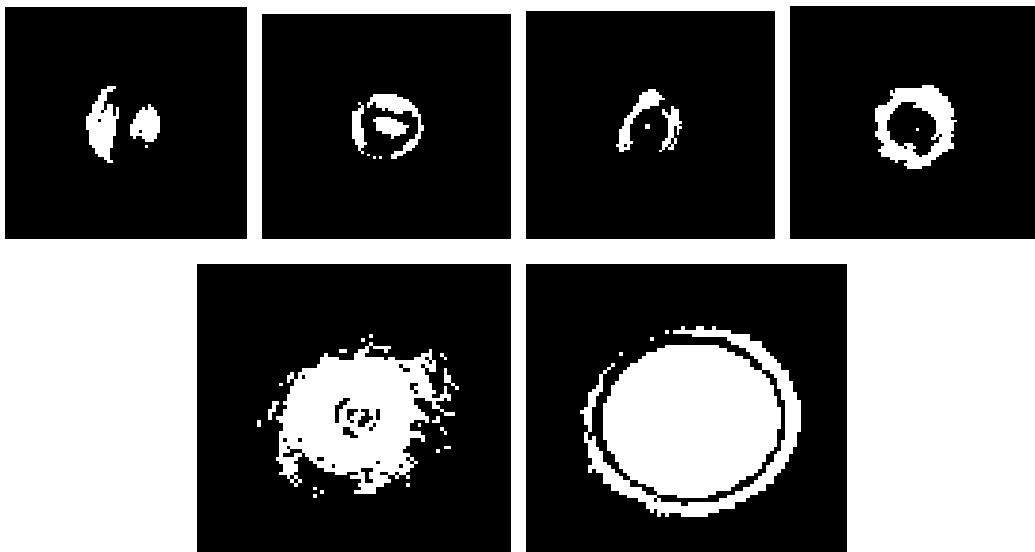
雷射輸出光束點範圍

雷射輸出光束點空間分佈點樣(Pattern)

雷射光的輸出，是以一有空間分佈的光點，顯示出來。下圖是，最簡單且便宜的方式，利用全黑的拍立得照片，讓雷射光光點，打擊在照片上。由於雷射光光點，有不同的模態存在，也即是雷射光光點有不同的能量分佈，及不同的光點圖。

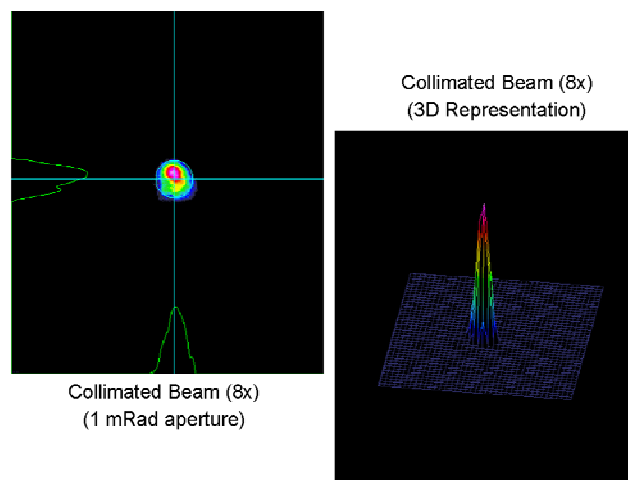
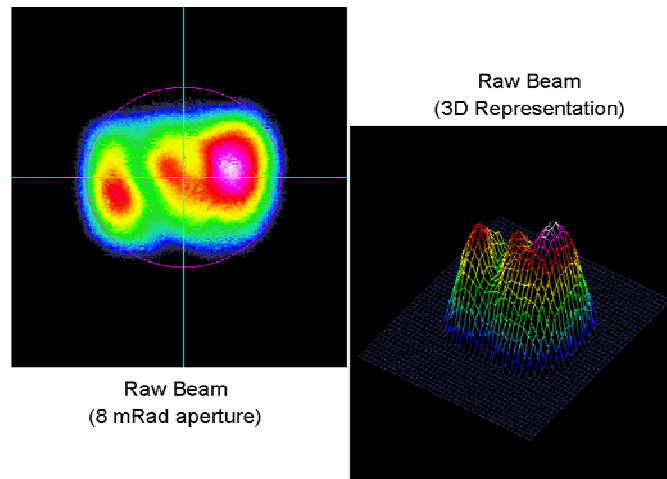


當然，最佳的雷射光的輸出光點圖，是最底下圓形光點圖。

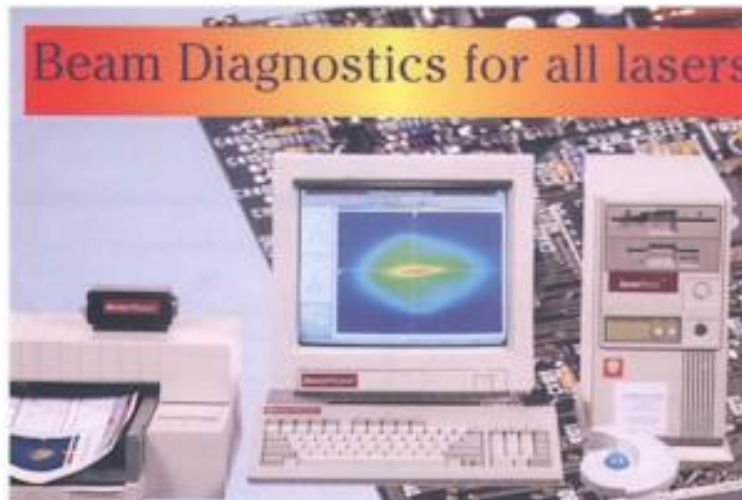


隨著科技的進步，以及儀器設備的發展，現在的雷射光的輸出光點圖，利用 CCD 陣列式光感測元件，讓雷射光光點，打擊在 CCD 陣列式光感測元件上。由於雷射光光點，有不同的模態存在，也即是雷射光光點有不同的能量分佈，及不同的光點圖，再利用影像處理的電路及軟體，可將雷射光的輸出光點圖，在電腦銀幕顯示出來及做儲存應用。

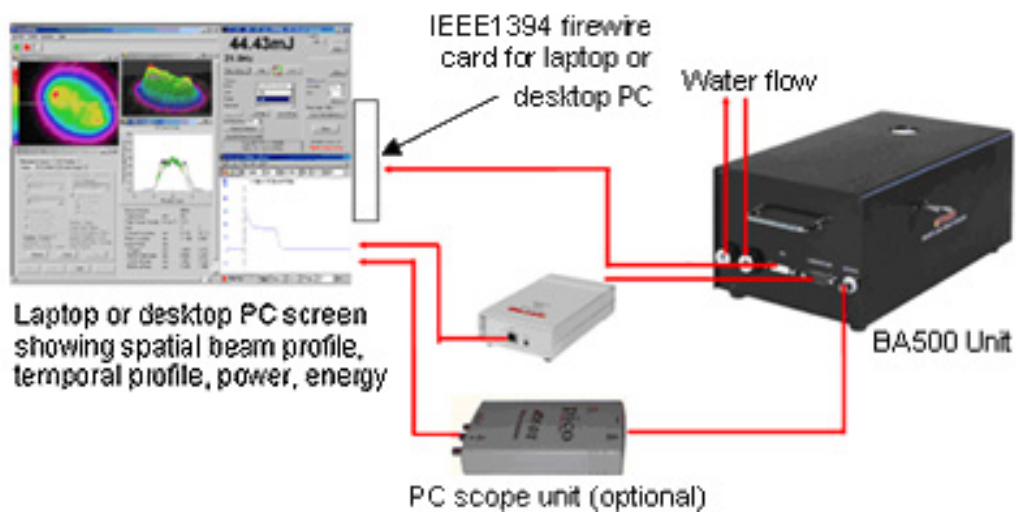
下列照片圖，即是利用 CCD 陣列式光感測元件，讓雷射光光點，打擊在 CCD 陣列式光感測元件上。由於雷射光光點，有不同的模態存在，也即是雷射光光點有不同的能量分佈，及不同的光點圖，再利用影像處理的電路及軟體，可將雷射光的輸出光點圖，在電腦銀幕顯示出來及做儲存應用。



下列圖，即是在電腦銀幕顯示出來的，雷射光的輸出光點圖。



下列圖，即是雷射光的輸出光點圖全系統應體及軟體圖。



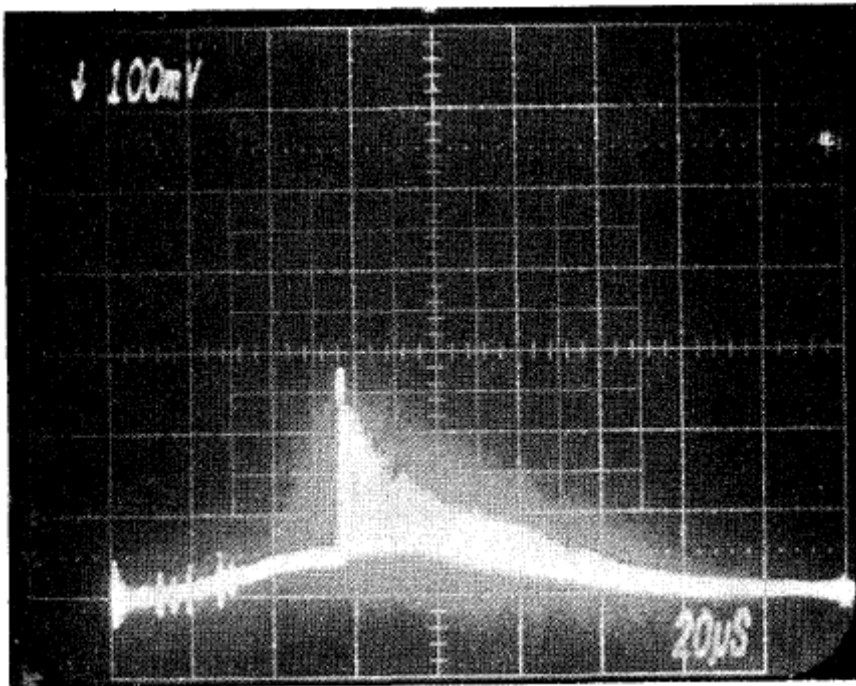
(iii) 雷射脈衝輸出及功率

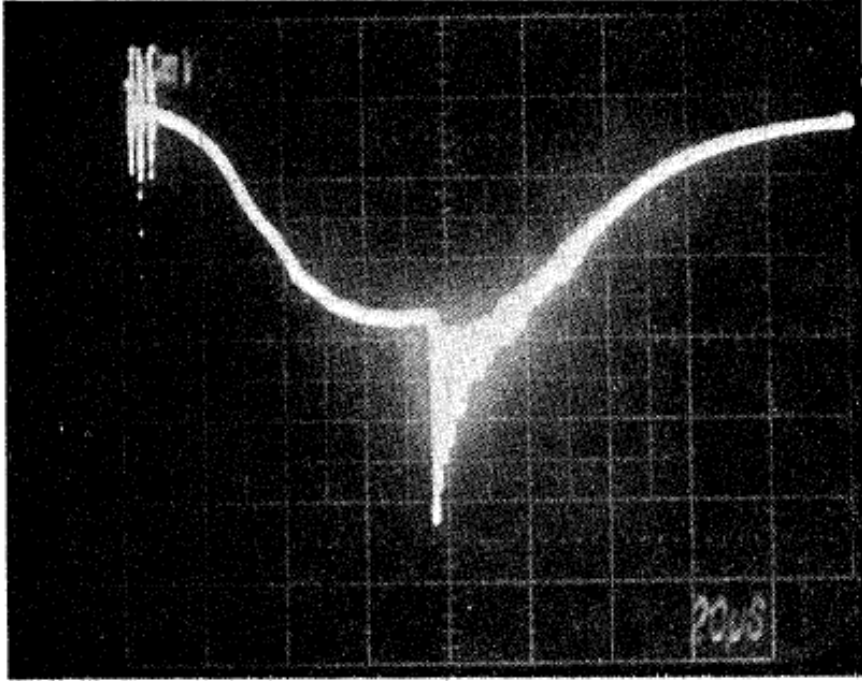
雷射脈衝輸出形式

雷射脈衝輸出時間波形

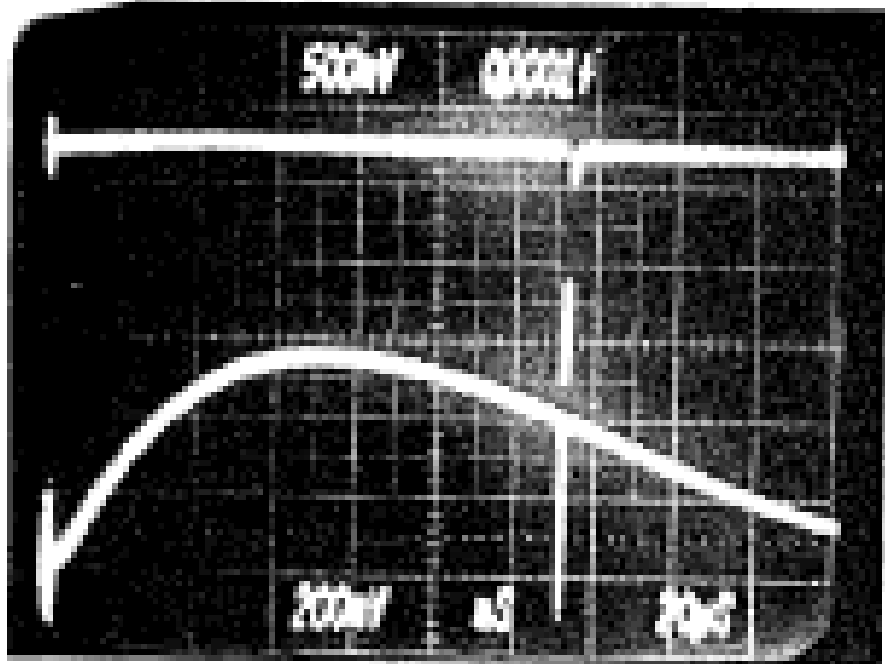
雷射脈衝輸出功率

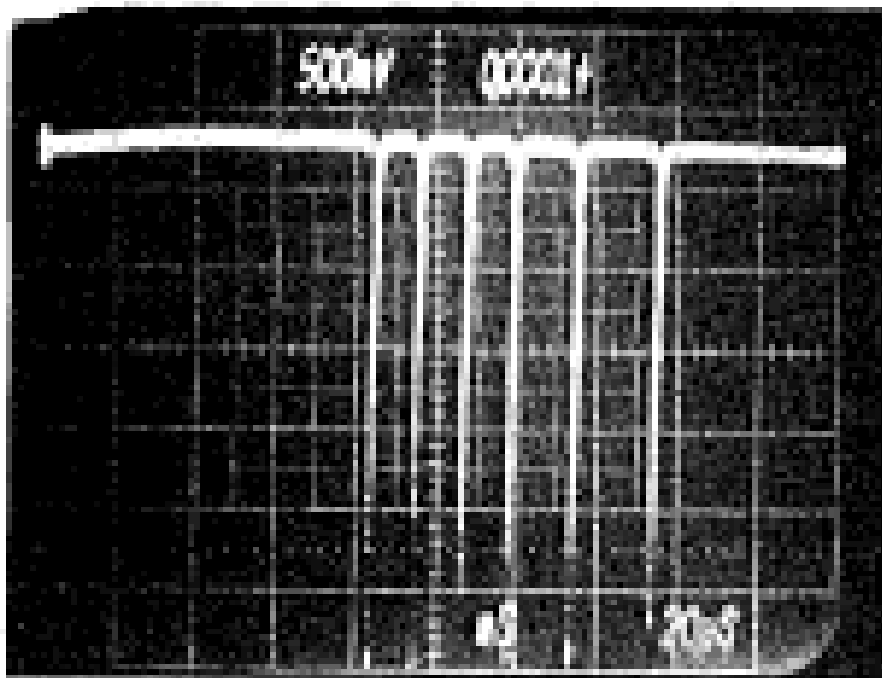
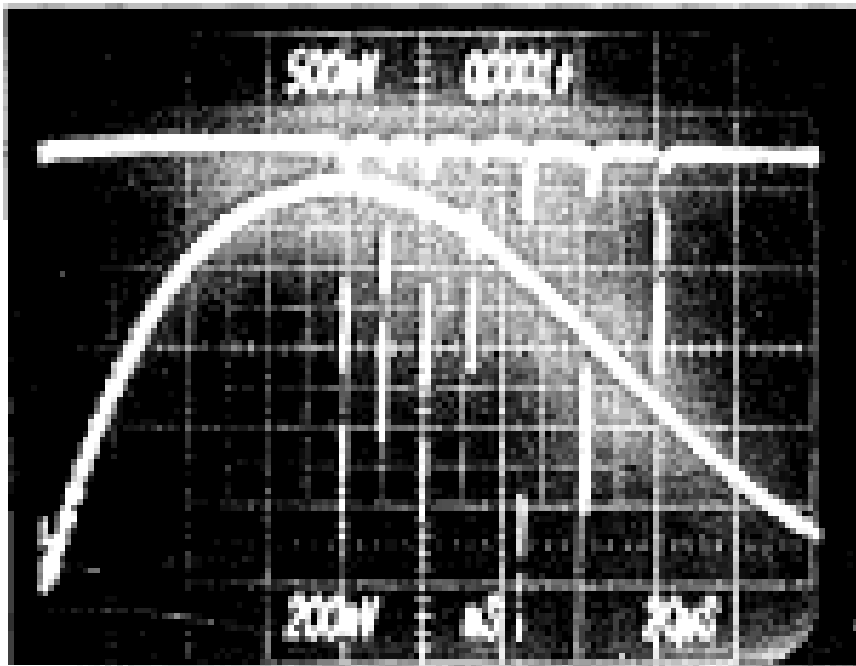
如前所述，下列照片是，實際量測雷射輸出的信號，是基本的雷射輸出，Conventional laser output，加上閃光燈放電發光激勵雷射棒的時序照片。其雷射輸出的能量範圍可在 50mJ 至 100mJ 範圍內。

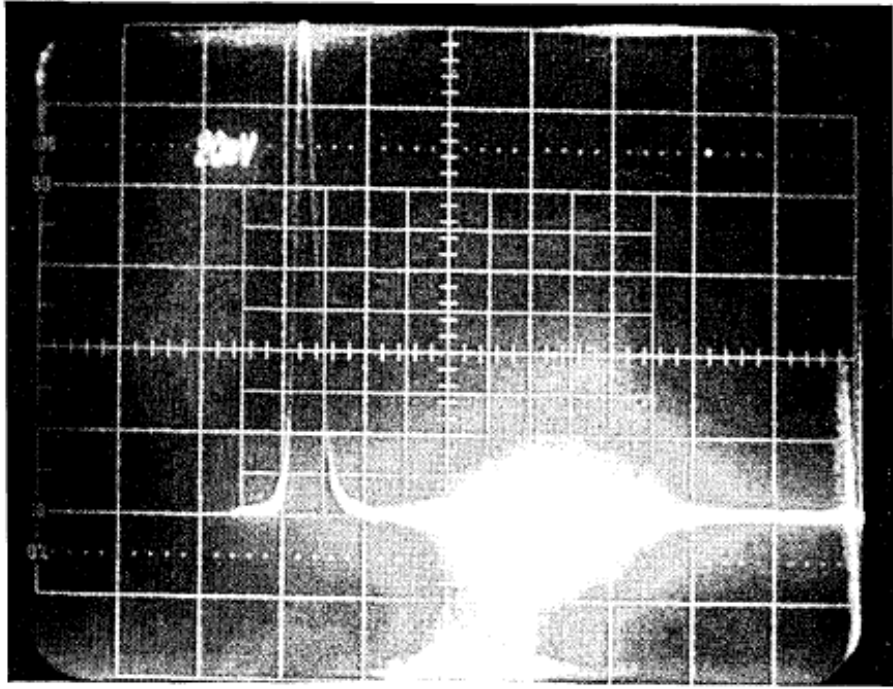




但是，對要達到雷射測距及追蹤導引的雷射輸出，我們一定要有更高的功率。下列照片的量測，就是不但將 Conventional laser output，其雷射輸出的所有能量，範圍在 50mJ 至 100mJ，調制到單一脈衝輸出，而且其單一脈衝輸出脈寬只有 20ns。也就是其雷射輸出的功率將達到 2.5MW 至 5MW，百萬瓦功率級。







(iv) 雷射脈衝串輸出及鎖碼技術

雷射脈衝串輸出

雷射脈衝串輸出技術

雷射脈衝串輸出調制種類

雷射鎖碼

雷射鎖碼控制及技術

雷射鎖碼，就是控制雷射脈衝串有調頻、調幅及密碼式的輸出。而雷射鎖碼控制及技術，就是雷射脈衝串調頻、調幅及密碼式輸出的技術。從本報告所研析完成的高脈衝率雷射電源供應能力、Q 調制雷射脈衝的擊發時序技術等，如需製作鎖碼雷射，我們確實有能力完成。

Coded Laser Target Designators

- Coded LTDs are ground and airborne systems that have two specific purposes. First, they provide terminal weapons guidance for LGWs. Second, they designate targets for coded laser acquisition/spot trackers. **Coded laser target designators emit laser energy with a PRF and require input of specific laser codes for operation.** Codes are assigned to LGWs and directly relate to the PRF that harmonizes designator and seeker interface.

(b) 雷射輸出量測

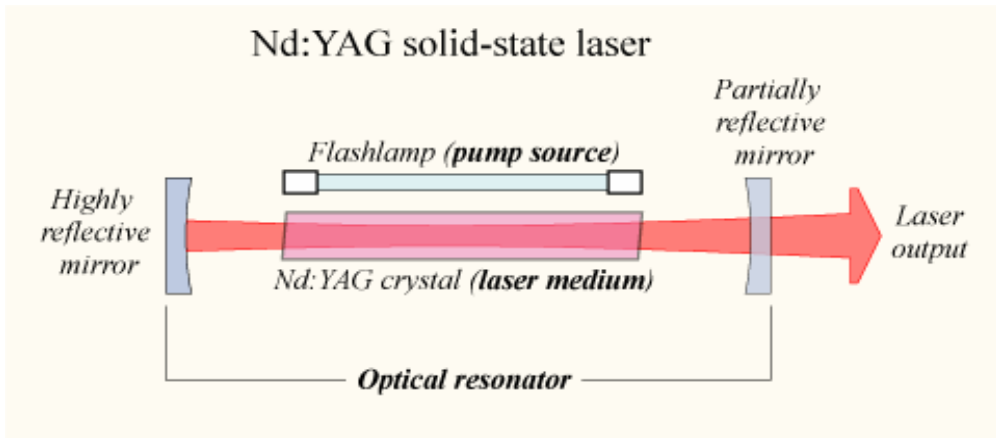
(i) 雷射能量輸出量測

雷射能量輸出量測儀器

雷射能量輸出量測

自製 Energy meter 設計圖

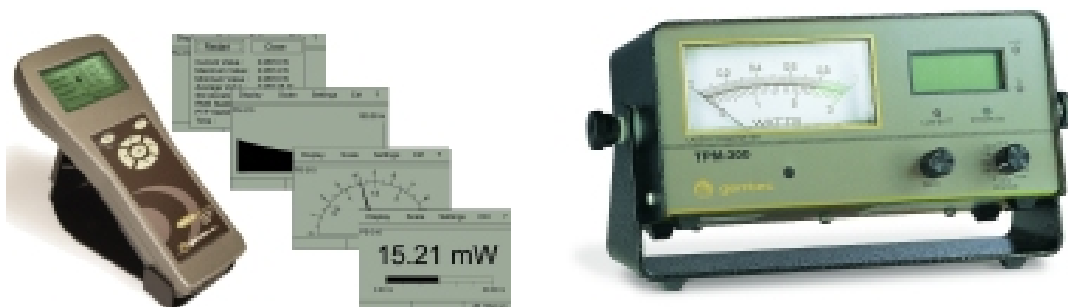
下圖是標準的亞格雷射架構及輸出，



以及，雷射能量量測器，各個不同靈敏度感測頭：

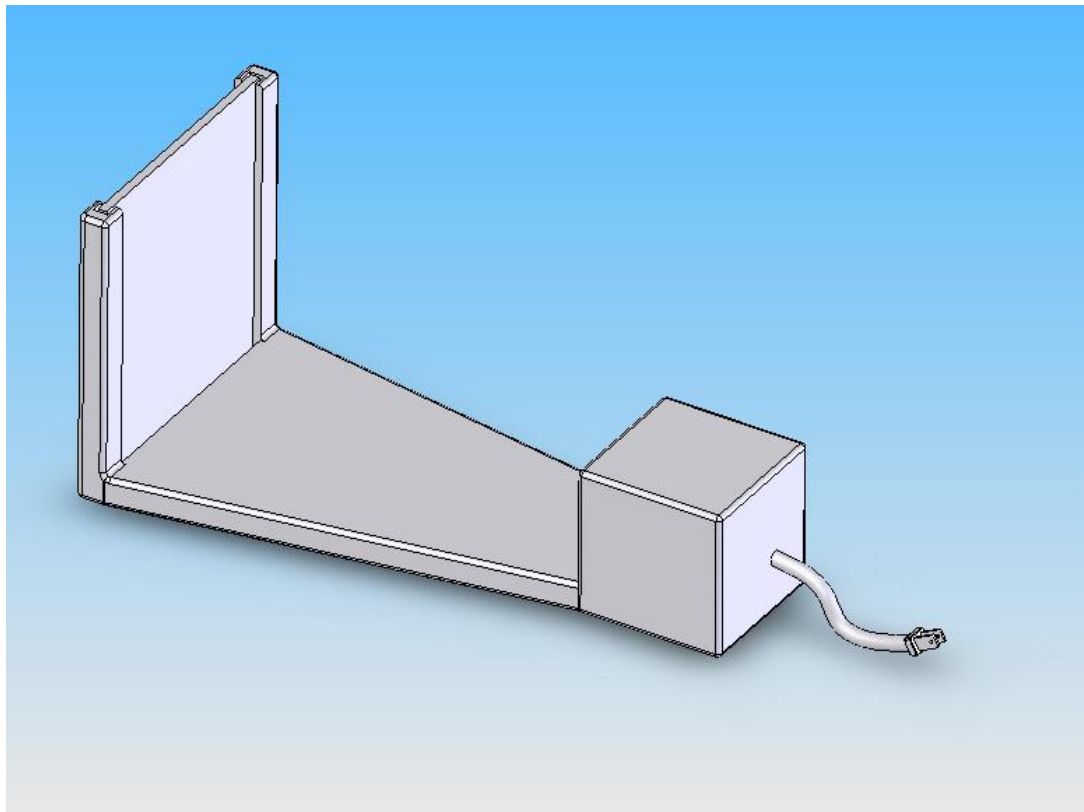


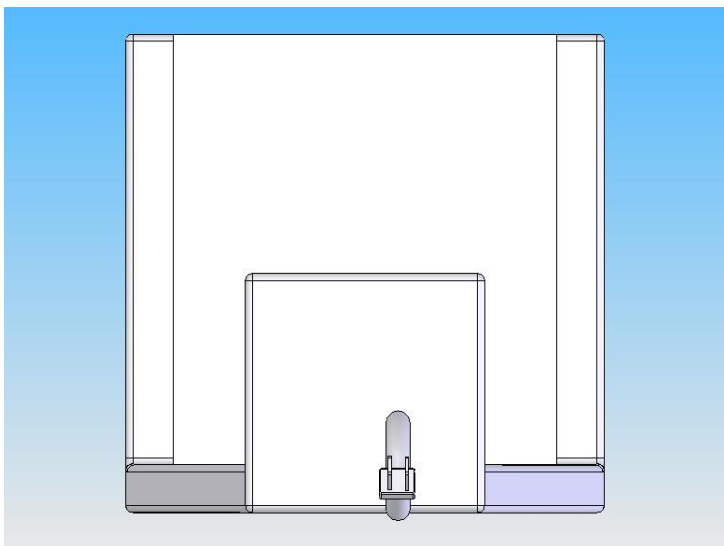
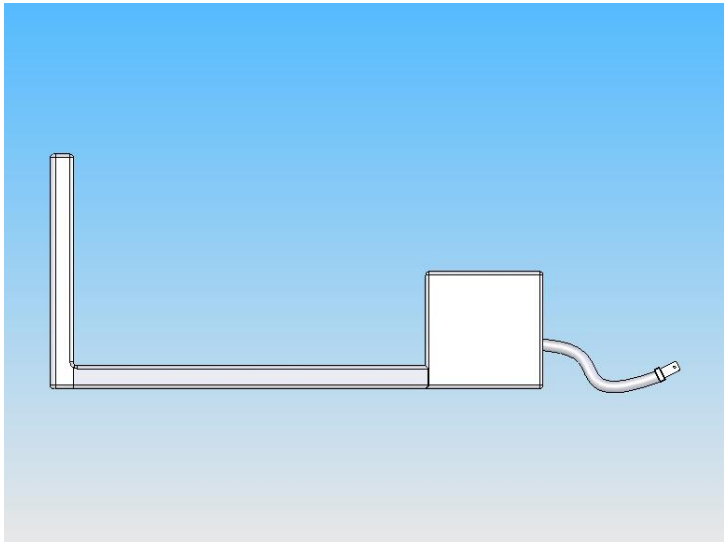
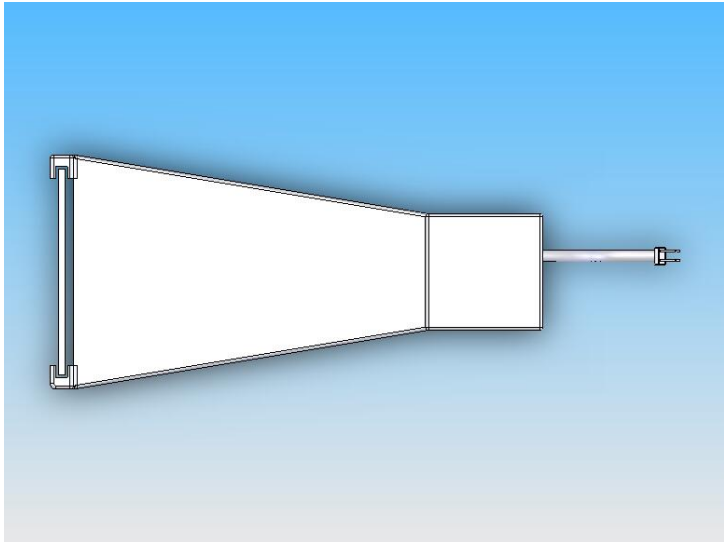
以及，雷射能量量測器，類比式及數位式量測數值顯示。



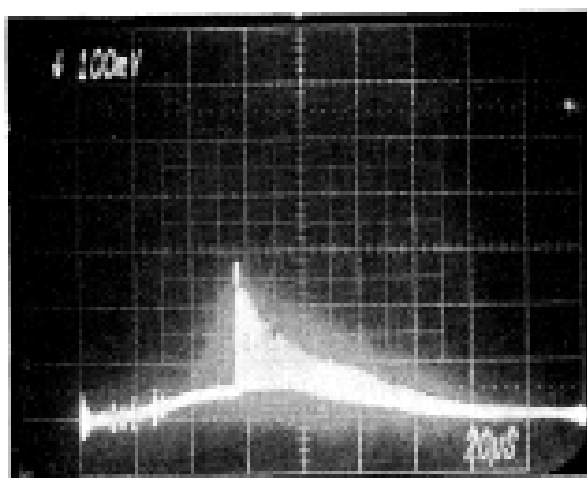
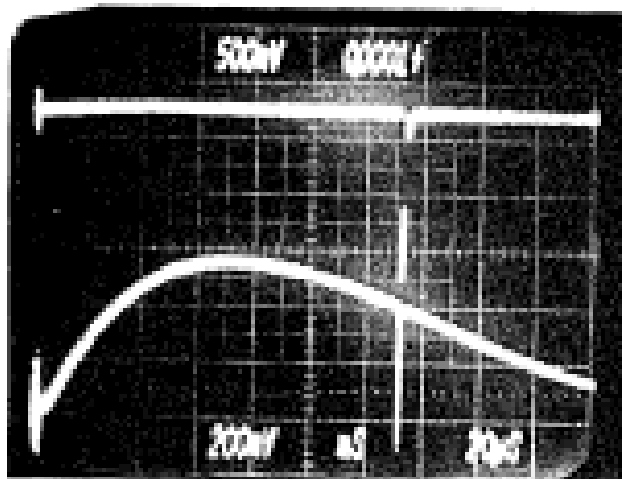
但是同樣的，本計畫中，軍方單位，從無從事五級雷射光電基地修護工作及經驗。為了本計畫之工作需求，及協助軍方單位，從事雷射設備超三級修護工作，我們額外自製雷射能量量測儀器，希望測試調校完畢後，免費額外提交軍方單位，以為雷射修護工作自有儀器。

下圖是，我們自行設計的自製雷射能量量測儀器，Energy meter 的設計圖。雷射光打擊到一片散光片(diffuser)，在進入感測器頭內，其量測電路，會將能量值，經過信號傳輸線，在示波器上顯示。





下圖是，我們可自製雷射能量量測儀器，Energy meter 的能量值，經過信號傳輸線，顯示在示波器上。



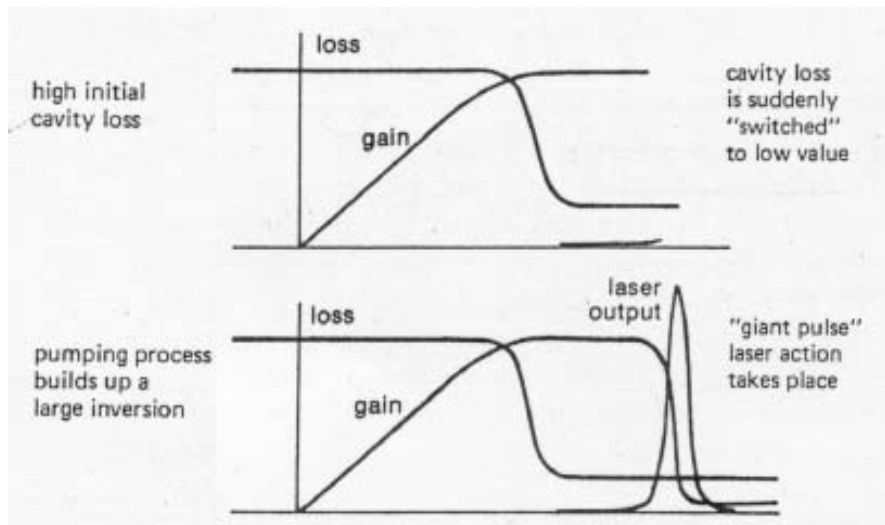
(ii) 雷射脈衝輸出及功率量測

雷射脈衝輸出量測儀器

雷射脈衝輸出量測

雷射脈衝輸出功率量測

巨脈衝 Q-調制雷射的輸出即如下列所標示，當雷射共振腔累積足夠的大能量，而其過程中幾乎沒有消耗，然後在一個非常短的時間，所有雷射能量，以脈衝形式，一洩全出，產生巨脈衝 Q-調制雷射的輸出。



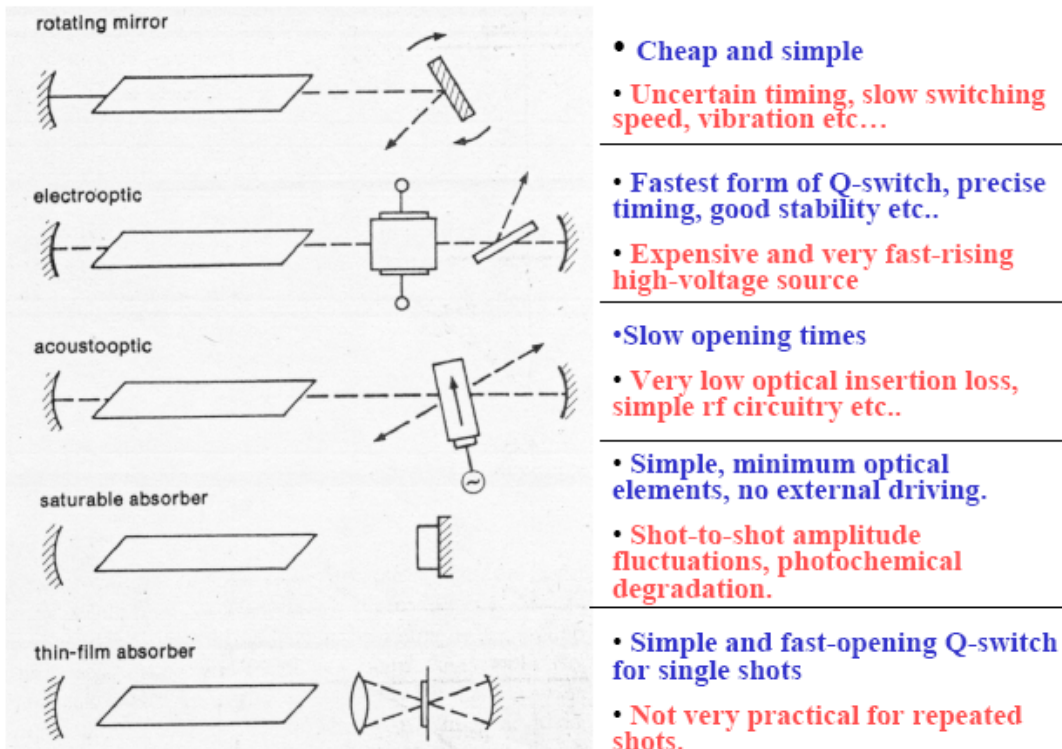
所以輸出的雷射脈衝只要數個奈秒(10^{-9} 秒)，而且功率可達百萬瓦(10^6 瓦)以上。這是利用雷射做測距導引，所必須達到的，雷射輸出能量及功率。

所以輸出的雷射脈衝只要數個奈秒(10^{-9} 秒)，而且功率可達百萬瓦(10^6 瓦)以上。這是利用雷射做測距導引，所必須達到的，雷射輸出能量及功率。

Duration	Peak powers	Method
$10\mu\text{s}$	kW	free running
ns	MW	Q-switch

下圖是巨脈衝 Q-調制雷射的各種不同的方法，但是對需要鎖碼的測距導引雷射，我們只能用光電元件式，Q-調制雷射的技術。

Laser Q-switching techniques



巨脈衝 Q-調制雷射的理論可簡述如下： γ 為居量轉換因子， n 為雷射共振腔內的光子數， N_g 為居量反轉數； N_a 為可飽和吸收體基態的電子數； N_{a0} 為 N_a 的初始值； $g_g = 1/t_g$ 為雷射上能階的衰減速率，其中 t_g 為雷射晶體的放射生命期； $g_a = 1/t_a$ 為可飽和吸收體的鬆弛速率， t_a 則為可飽和吸收體的放射生命期； R_p 為激發速率， g_c 為雷射光在雷射腔內的衰減速率， K_g 及 K_a 為耦合係數，其中 $K_g = 2sg/trAg$ ； $K_a = 2sa/trAa$ ， sg 為雷射晶棒的放射截面積； sa 為可飽和吸收體基態的吸收截面積， tr 為光子在雷射腔內的週期， Ag 與 Aa 分別為雷射光束於雷射晶棒與可飽和吸收體上的截面積； β 為可飽和吸收體激態吸收截面積與基態吸收截面積的比值。

本計畫中，軍方單位，從無從事五級雷射光電基地修護工作及經驗。為了本計畫之工作需求，及協助軍方單位，從事雷射設備超三級修護工作，我們額外自製雷射脈衝輸出量測儀器及自製雷射能量量測儀器，希望測試調校完畢後，免費額外提交軍方單位，以為雷射修護工作自有儀器。

下列照片等，就是我們額外自製雷射脈衝輸出量測儀器，希望測試調校完畢後，免費額外提交軍方單位，以為雷射修護工作自有儀器。其自製雷射脈衝輸出量測儀包括雷射光偵測高速反應 PIN detector，C30807 及 C30808 光電感測二極體元件，與寬頻放大器電路板，及自動調整增益電路板等，共同封裝及電磁隔離佈建放置在金屬盒中。從盒子的一端，我們可以看到雷射光偵測高速反應 PIN

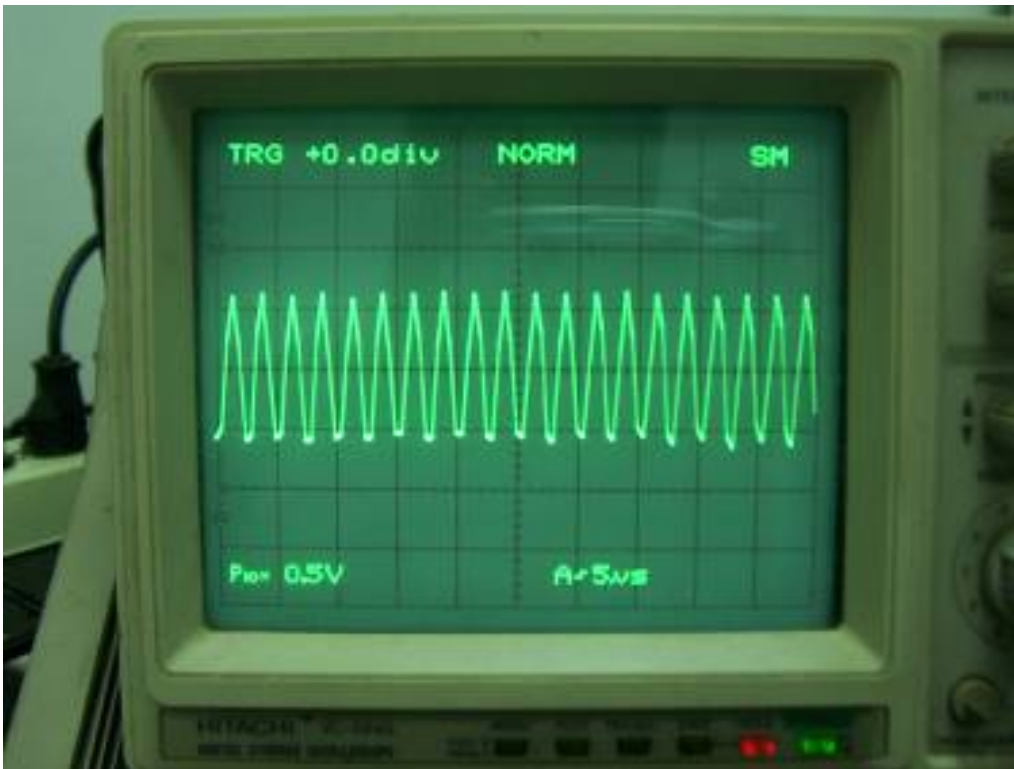
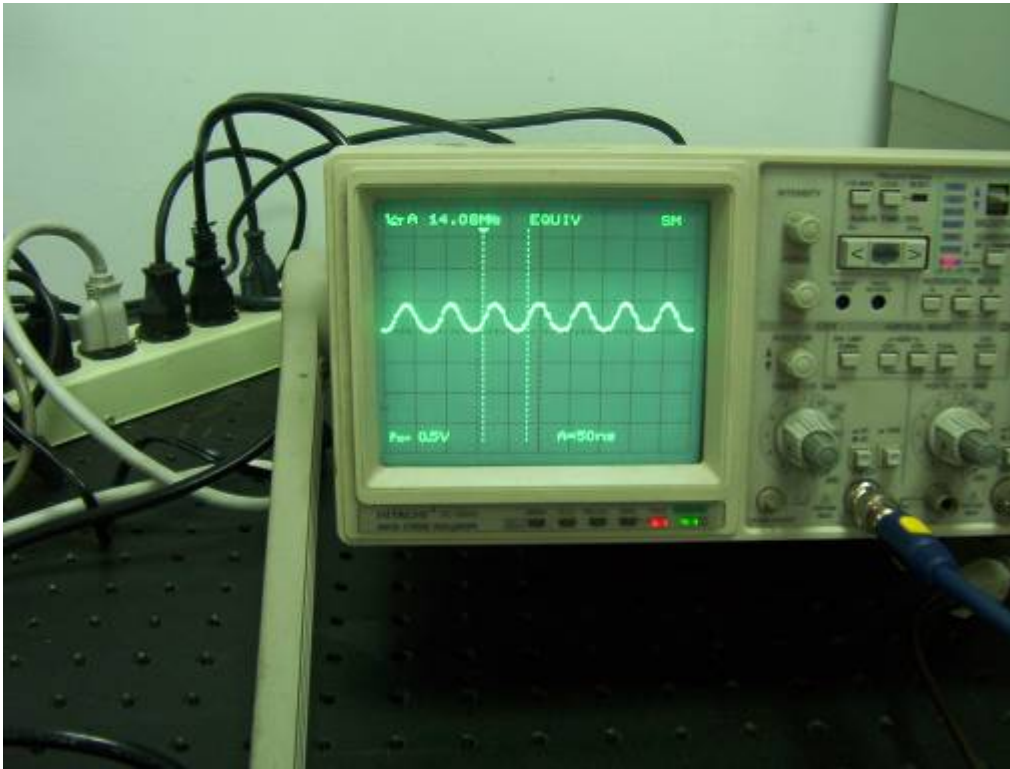
detector, C30807 及 C30808 光電感測二極體元件，可去量測測距雷射脈衝及導引雷射脈衝串。旁邊我們附帶提供了信號傳輸線，接到示波器，可即時顯示雷射脈衝，並將量測資料儲存應用。另外電源部分我們也準備了變壓器可直接接到所有的電源插座。



盒子的另一端，我們可以看到雷射信號傳輸線接頭座，可接線到示波器，即時顯示雷射脈衝，並將量測資料儲存應用。旁邊我們附帶提供了另外電源接頭座，接上變壓器可直接接到所有的電源插座，直接使用。此外全自製雷射脈衝輸出量測器，也加裝了一個開關控制量測儀器的使用。

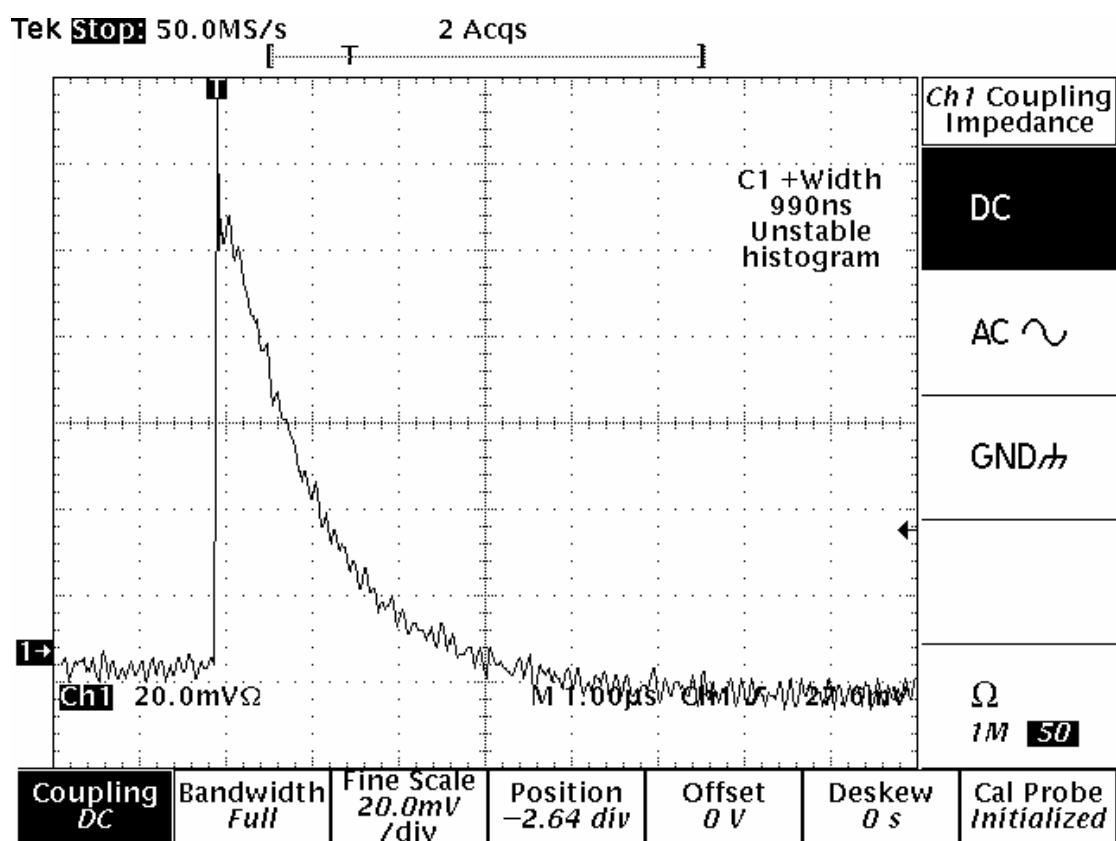


下列量測照片，是我們在實驗室，先對模擬雷射脈衝，做一測試。可以看到 50 ns、5 μ s、50 μ s 模擬雷射信號的量測。

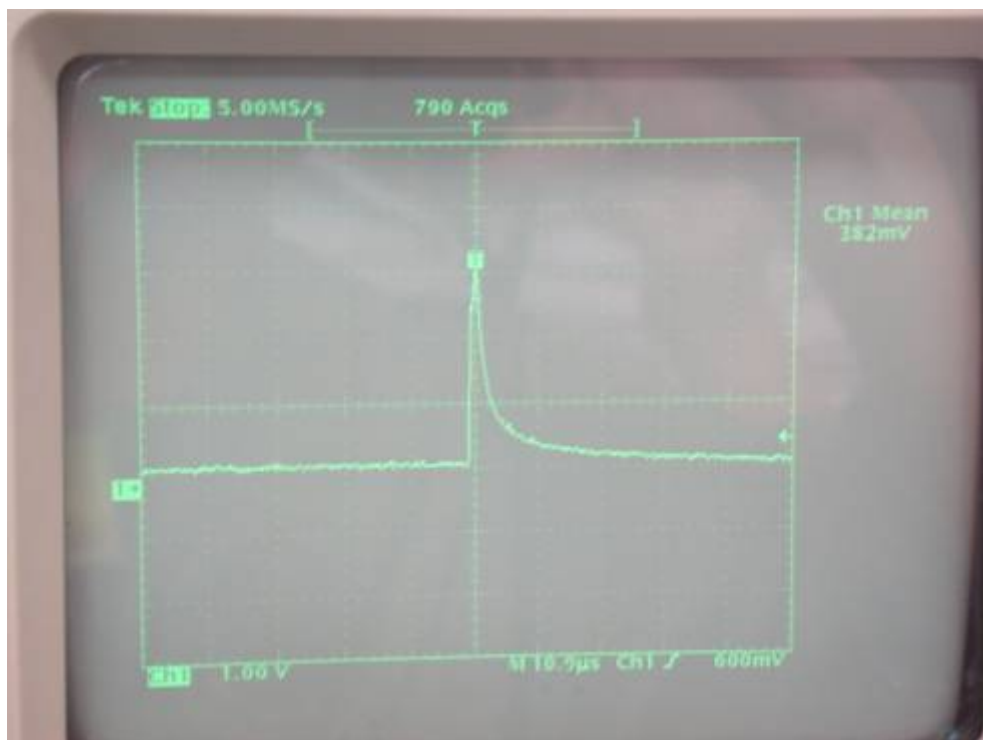
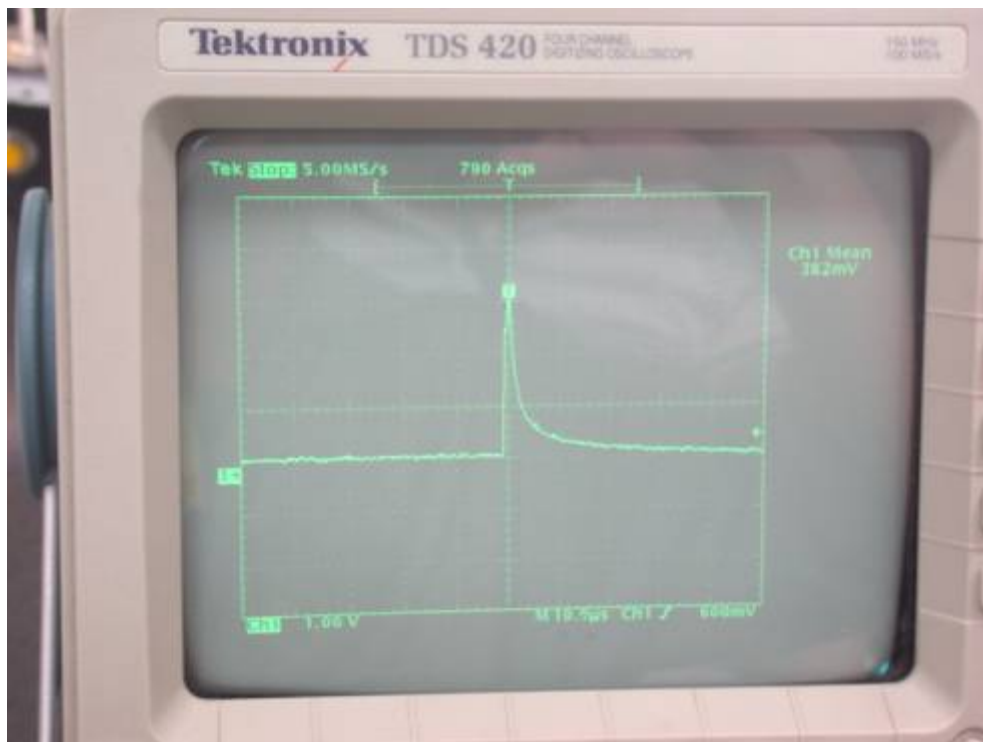


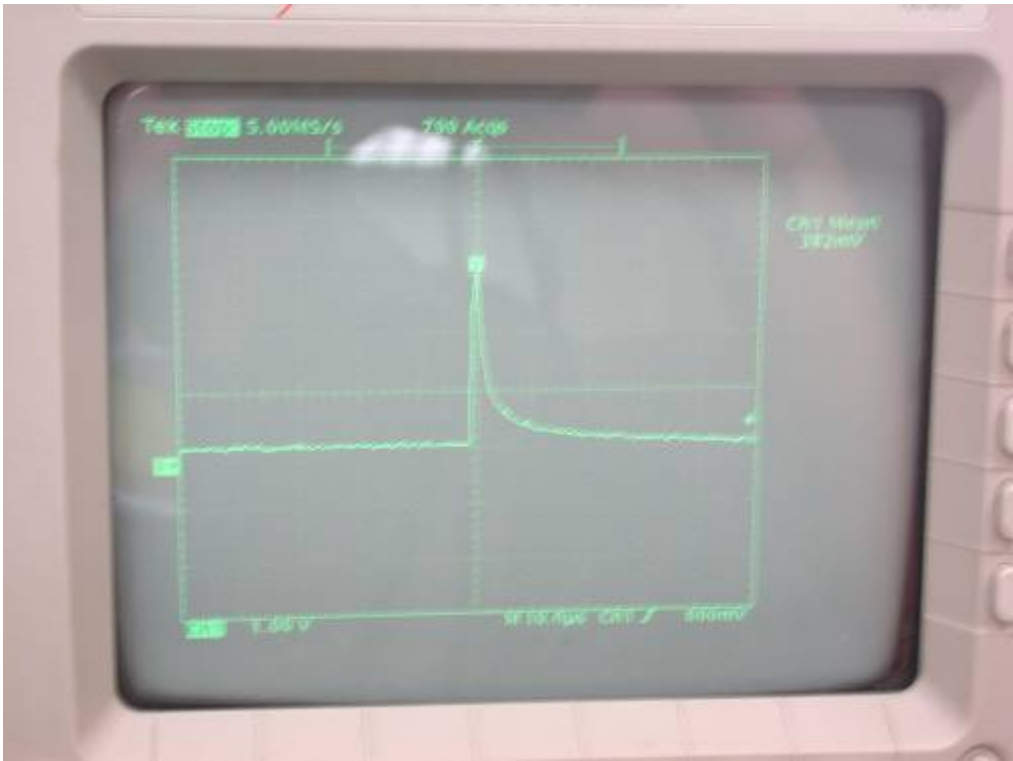


但是自製雷射脈衝量測器，對裝備上測距及導引 1.06 μ m laser 雷射，50 Ω impedance 匹配，由於信號放大器頻寬不夠，顯示不出約 20 ns 脈衝波形。如下圖所示。



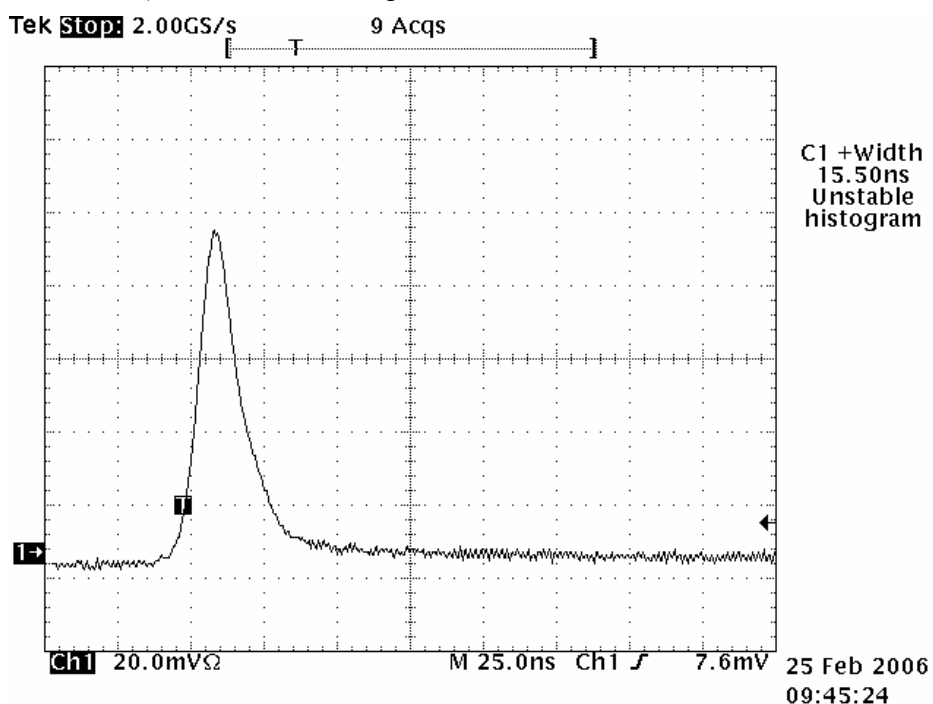
自製雷射脈衝量測器，20051003 量測 MMS 雷射的輸出脈衝波型，由於放大器頻寬不夠，顯示不出約 20 ns 脈衝波型。



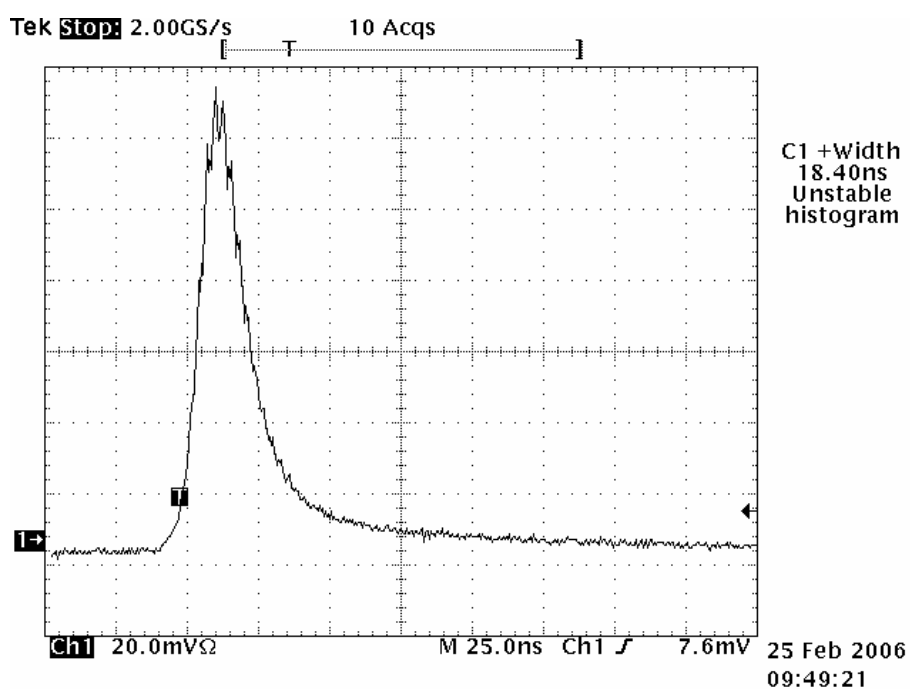


但是使用直接國外採購的儀器量測，我們可以量測到正確的雷射脈衝輸出波形，如下列圖示及照片。我們將再改進自製雷射脈衝輸出量測器的，寬頻放大器電路板，及自動調整增益電路板等，並在測試調校完畢後，免費額外提交軍方單位，以為雷射修護工作自有儀器。

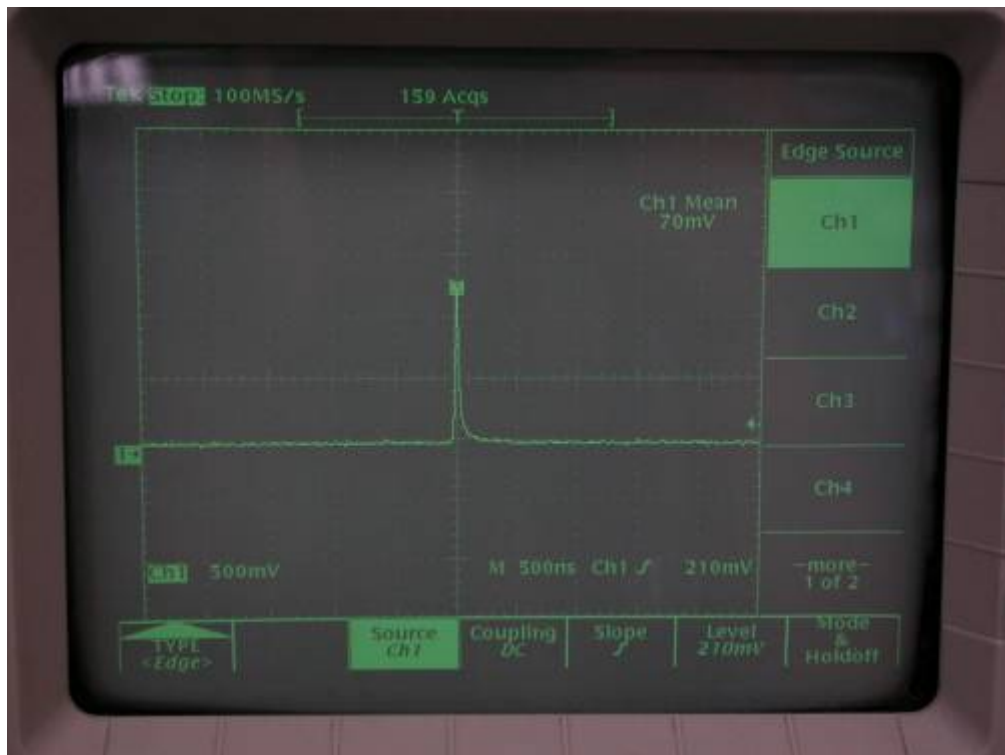
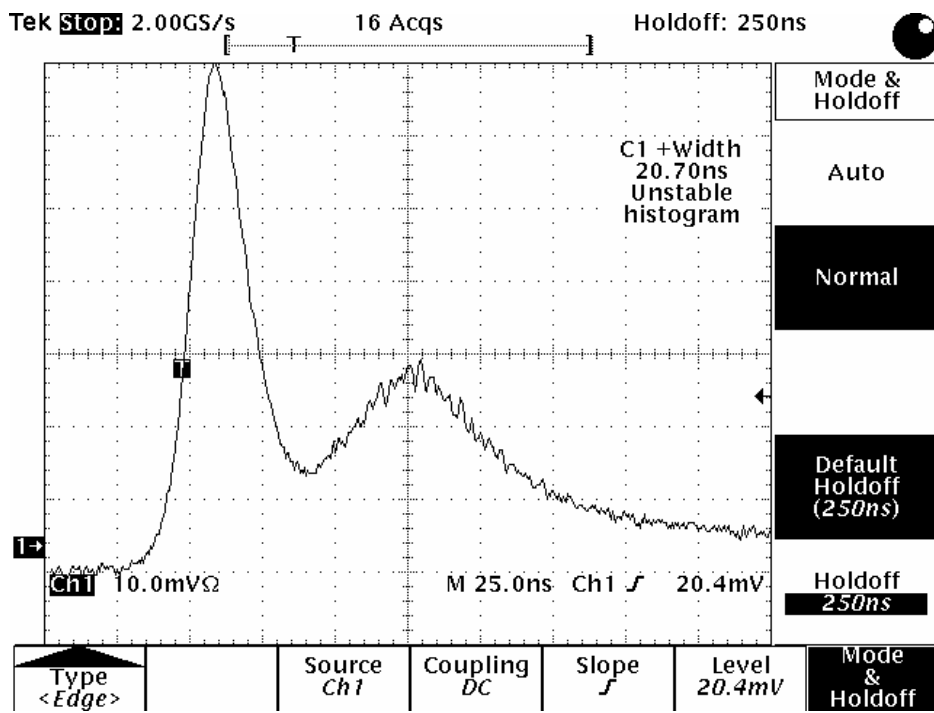
ET-3000A，1.06 μ m laser，50 Ω impedance。

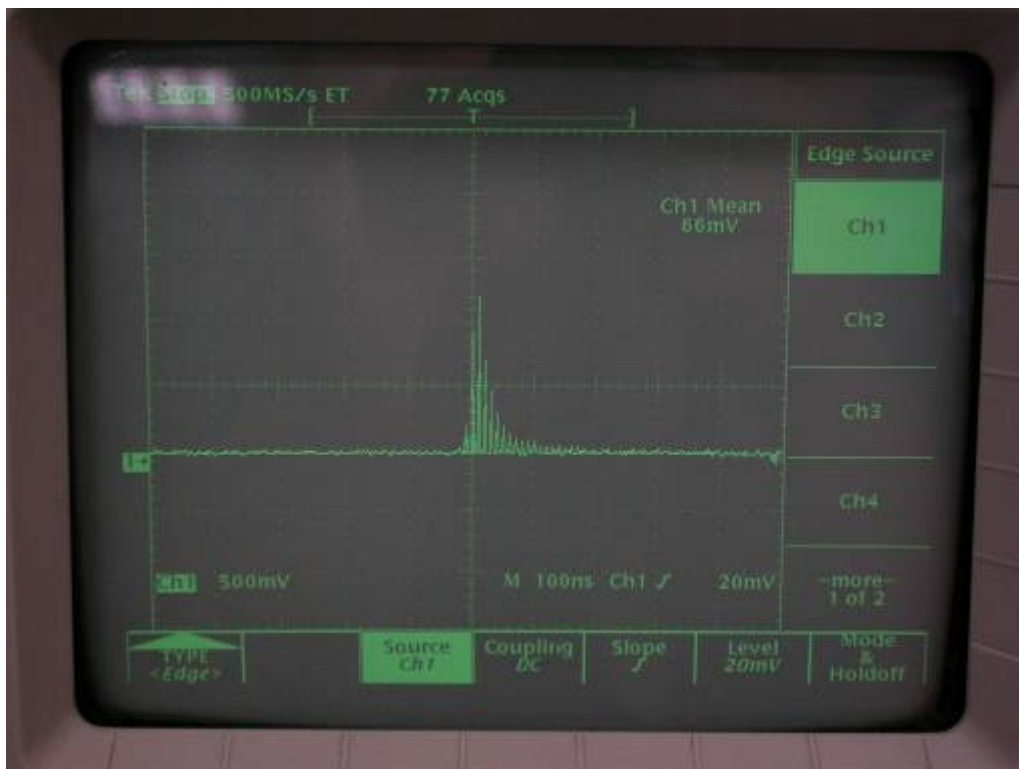
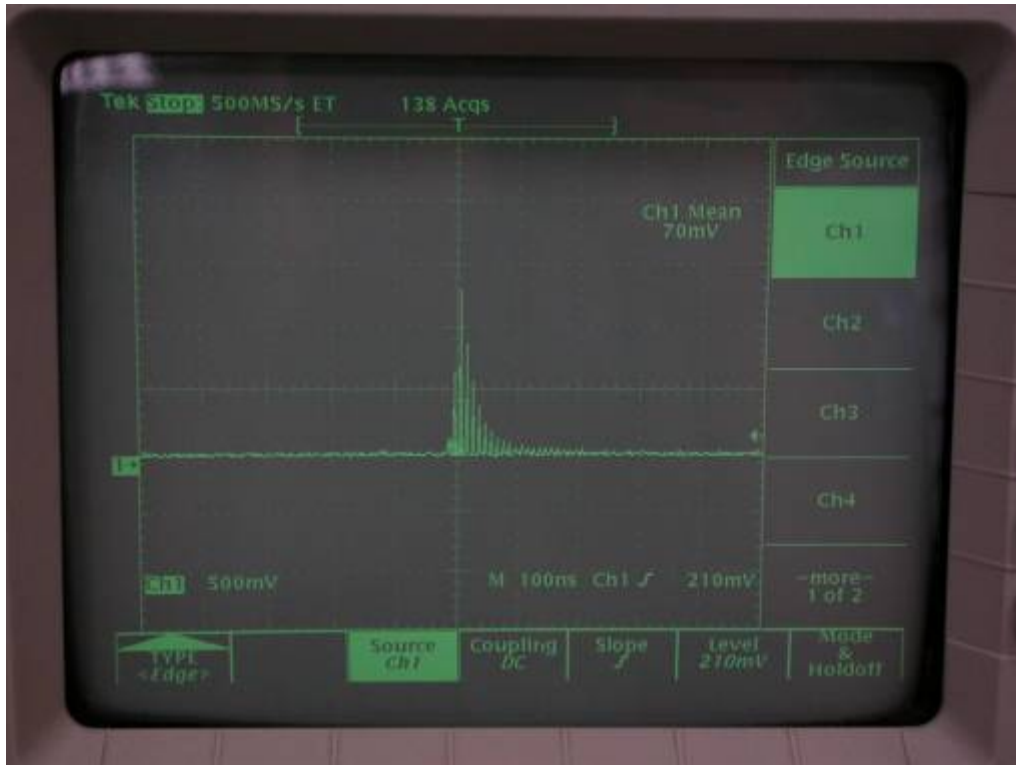


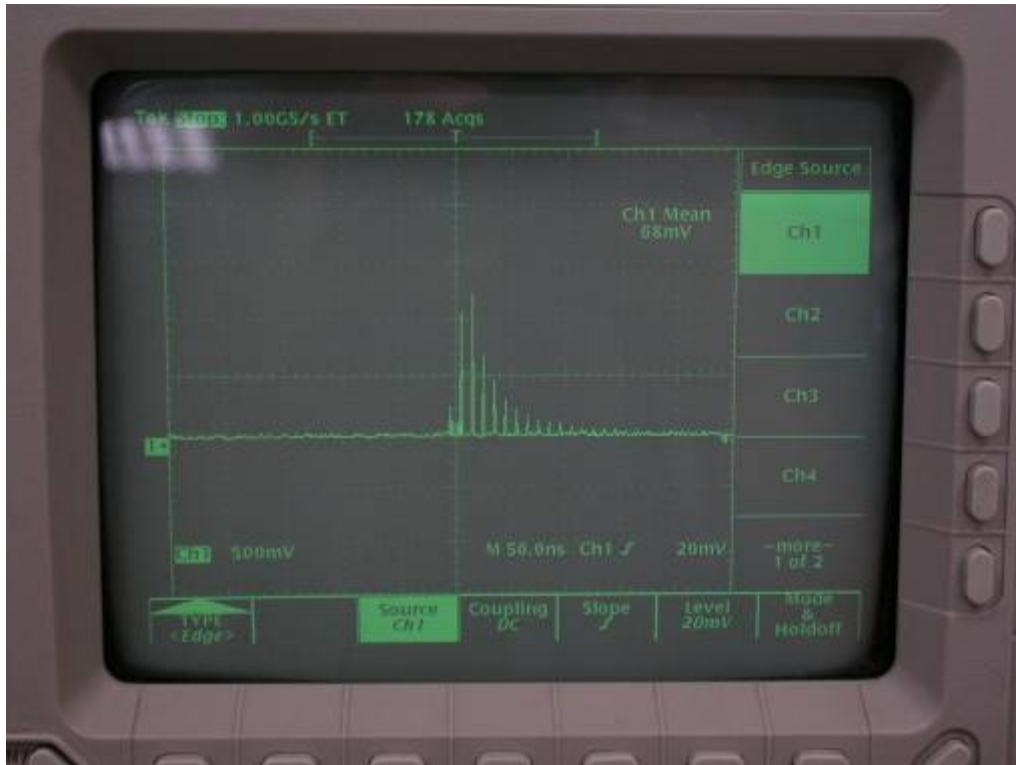
ET-2030A，1.06 μ m laser，50 Ω impedance。

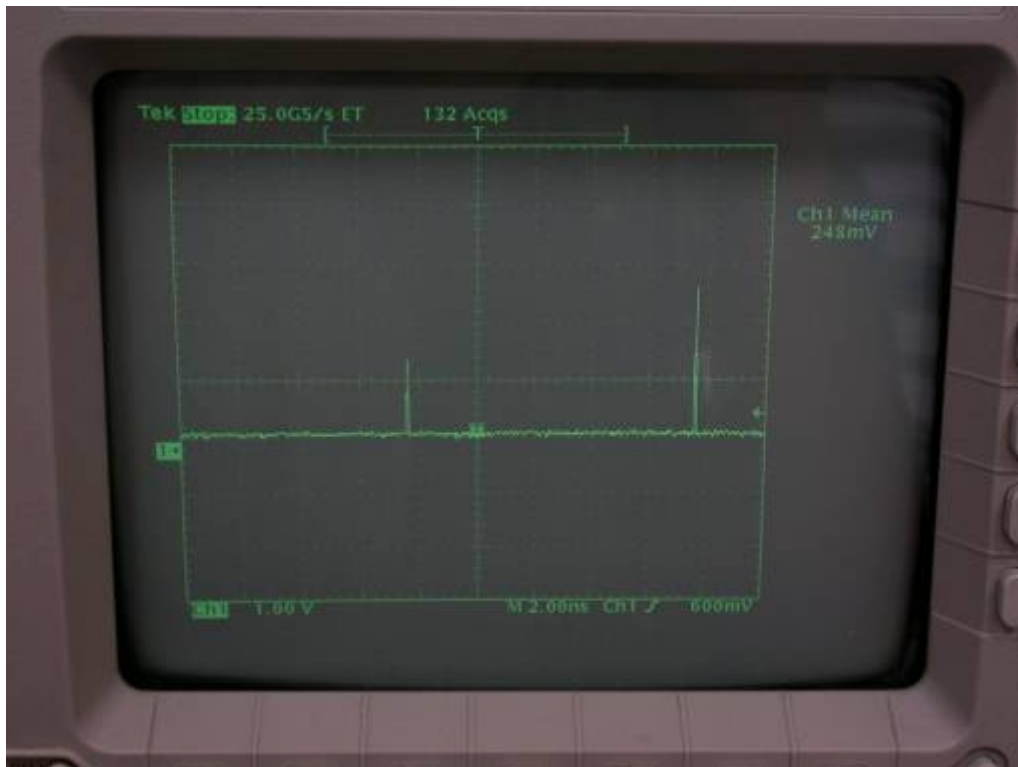
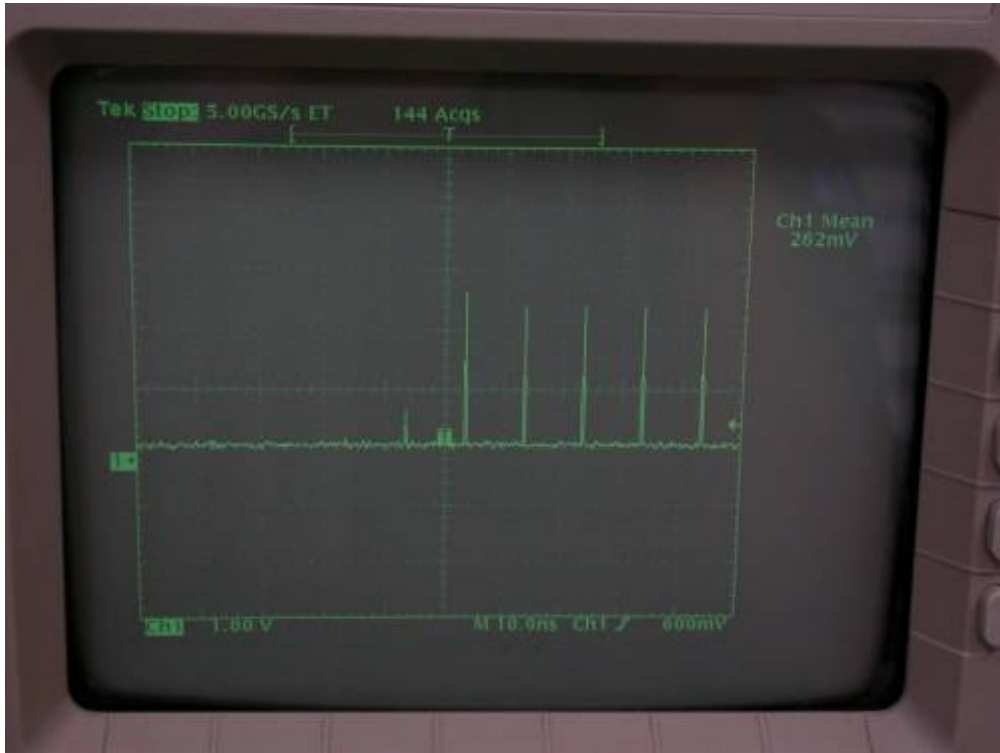


ET-3000A , 1.54 μ m laser , 50 Ω impedance .









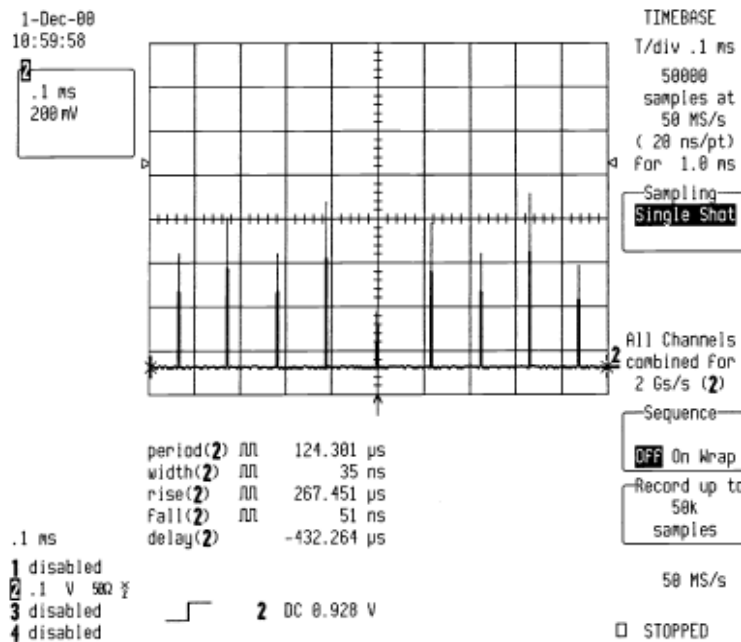
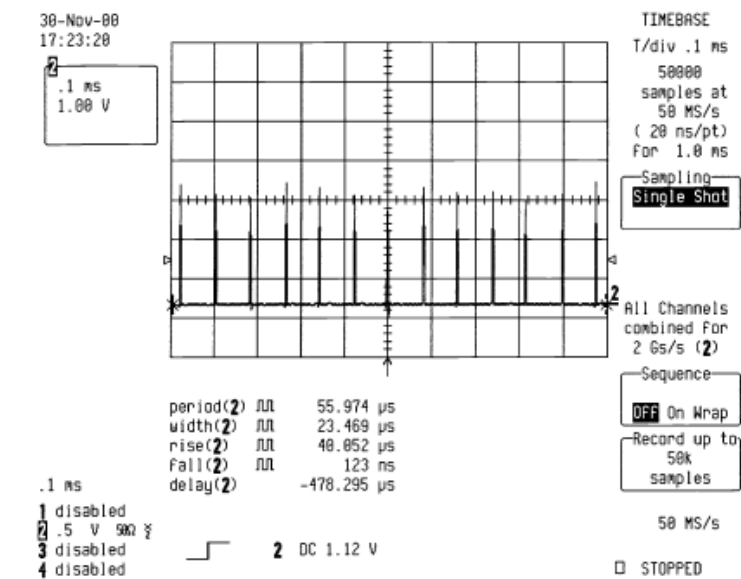
(iii) 雷射脈衝串輸出及鎖碼技術量測

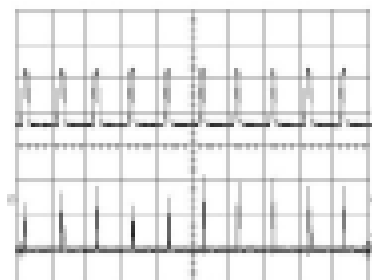
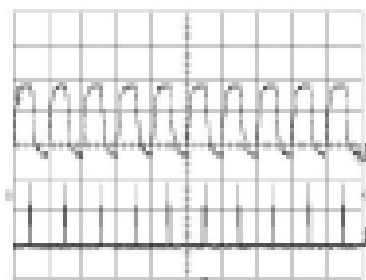
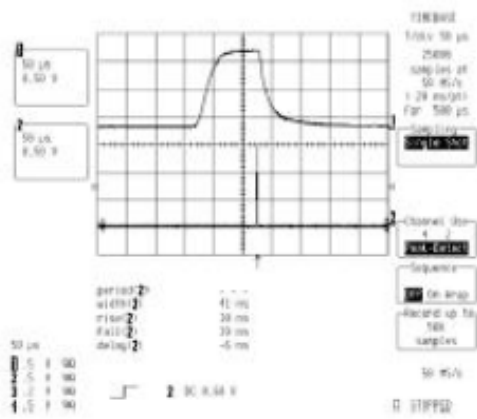
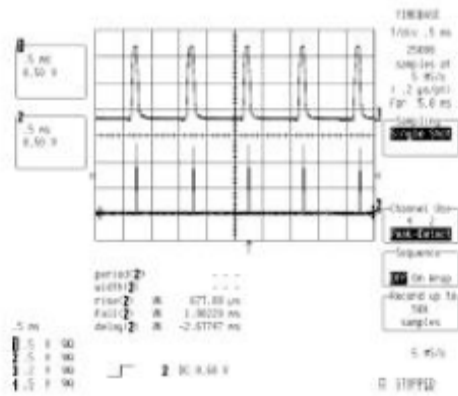
雷射脈衝串輸出量測儀器

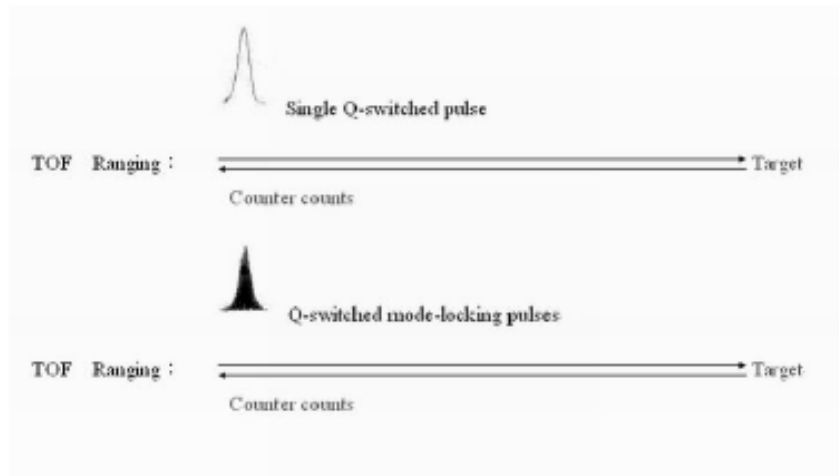
雷射脈衝串輸出量測

雷射脈衝串輸出鎖碼技術量測

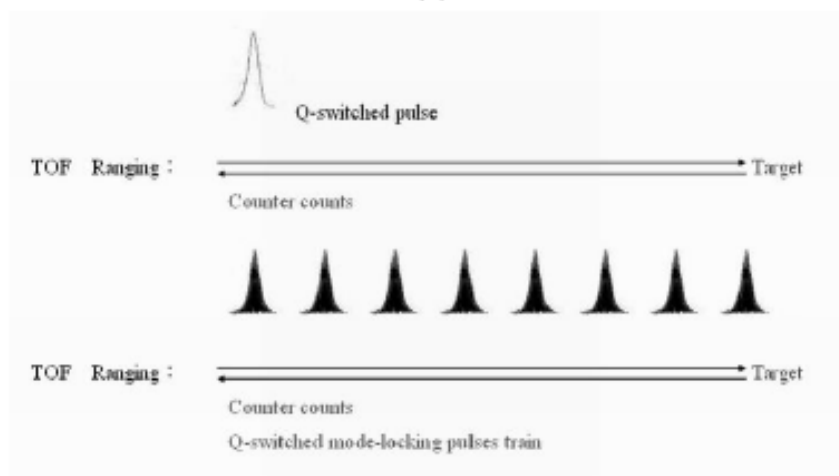
從以下的量測示波器照片顯示，我們確有雷射脈衝串輸出量測的經驗，也有雷射脈衝串輸出量測儀器，可做雷射脈衝串輸出鎖碼量測。此外，軍方需求單位也已買到了高速量測示波器，將可以做雷射脈衝串輸出鎖碼量測。



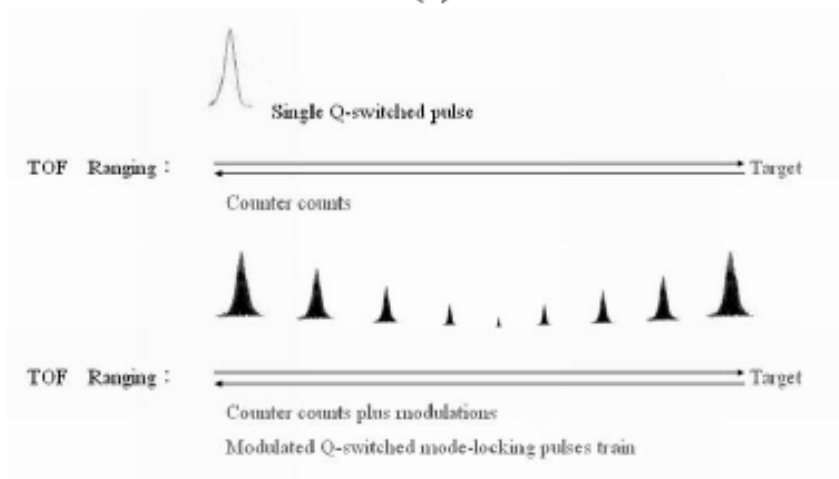




(a)



(b)



(c)

5.5. 雷射系統優化調校

(a) 雷射發射及能量輸出優化調校

最高能量輸出調校

最佳光點輸出調校

雷射發射及能量輸出優化

因為雷射的架構是調出來的，而且要優化調校也就是說把它配合所有的變數調到最高能量、最佳波長、最佳脈衝以及最佳光點等的輸出。且由於雷射是一個非常複雜，動態的，光電非線性的，光電元件所組成的。任何雷射光電元件。一定會有衰退及驅動偏移的現象，如果衰退及驅動偏移過大，造成能量降低，那當然要把雷射調回來。綜上所知，雷射是要調出來，雷射是要優化調校出來，雷射是要失調調回來，以及雷射是要衰退及驅動偏移調回來的。

雷射的最高能量輸出調校，我們由任何雷射能量的產生後，再調整 Porro Prisms pair 直角稜鏡對，使得雷射的最高能量輸出優化到最大值。接著做最佳光點輸出調校，用黑色曝光的拍立得照片看雷射光點圖，優化調校到圓形均勻光點，這就是雷射最佳光點輸出調校。但是對雷射的最佳輸出，應該達到高能量輸出最大值，而且同時是圓形均勻光點，這才達成雷射發射及能量輸出優化最佳值。

(b) 雷射脈衝波形優化調校

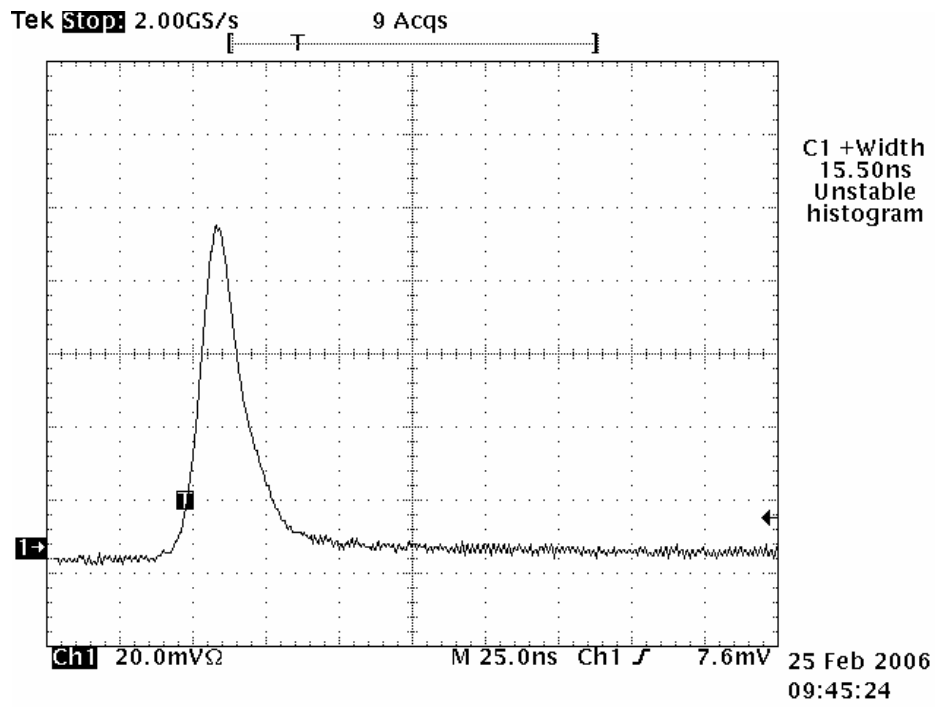
單雷射脈衝波形調校

最佳雷射脈衝波形調校

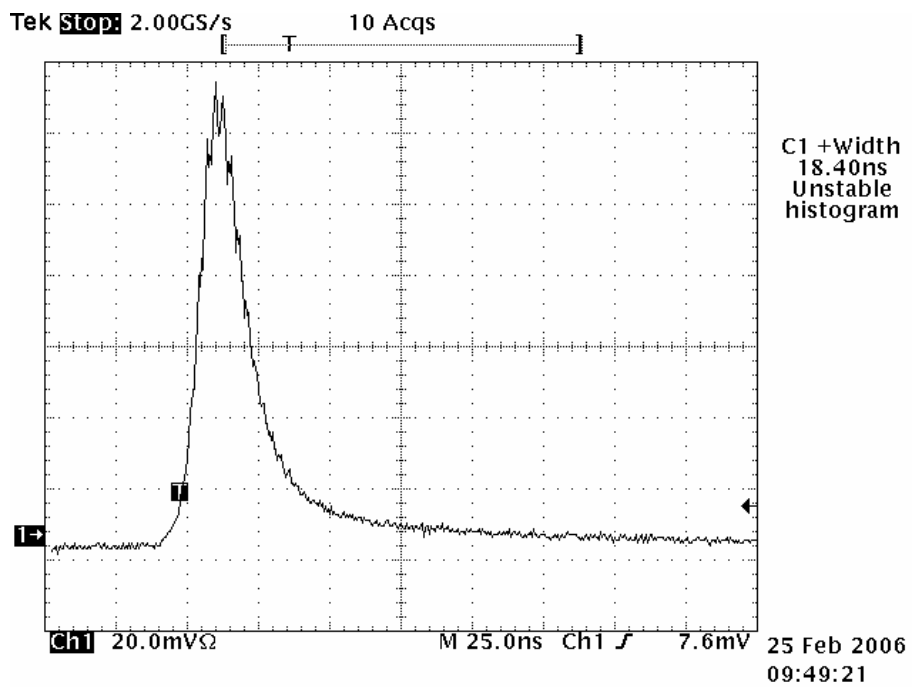
最窄脈寬值雷射脈衝波形調校

雷射脈衝波形優化調校，就是從巨脈衝 Q 調制雷射脈衝產生後，首先微調 Q 調制高電壓產生的時序，Q 調制模組元件的對光等，使得 Q 調制雷射脈衝產生的是單一漂亮如下的巨脈衝 Q 調制雷射脈衝波。接著更要微調 Q 調制高電壓產生的開關開啟的快慢，高電壓產生的波形圖等，直到最窄脈寬值，雷射脈衝波形，穩定產生為止，才算雷射脈衝波形優化調校完成

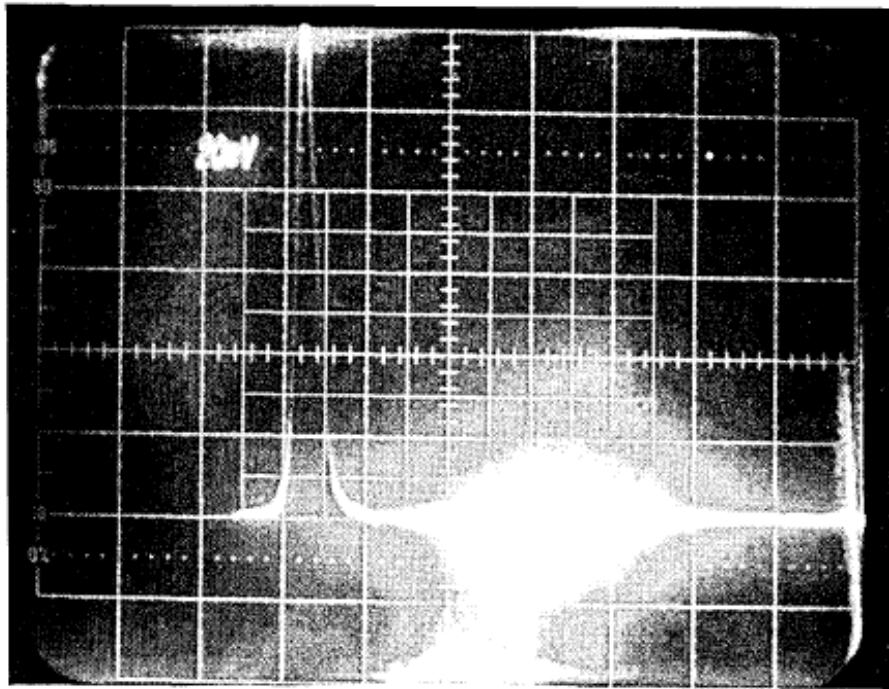
ET-3000A , 1.06 μ m laser , 50 Ω impedance .



ET-2030A , 1.06 μ m laser , 50 Ω impedance .



最窄脈寬值，雷射脈衝波形的，示波器照片圖。



(c) 雷射功率優化調校

最高能量輸出調校

最佳光點輸出調校

最窄脈寬值雷射脈衝波形調校

雷射功率最佳調校

雷射功率最佳優化調校，是要綜合最窄脈寬值，雷射脈衝波形，穩定產生，而且是最高能量輸出，以及最佳光點輸出才能達到雷射功率最佳優化輸出。這最佳優化雷射功率輸出，也就是測距及追蹤導引能力的顯現。

(d) 雷射脈衝串優化調校

雷射脈衝串能量幅度控制穩定性(stability)

雷射脈衝串時序控制精準性(jittering)

由於追蹤導引的雷射，需要約每秒十發以上的雷射發射，才能達到精確的追蹤導引。所以追蹤導引的雷射，需要高脈衝率的雷達發射。而且還要掌握，我們前面建的，雷射脈衝串能量幅度控制穩定性(stability)，以及雷射脈衝串時序控制

精準性(jittering)。

(e) 雷射鎖碼脈衝串優化調校

調幅鎖碼

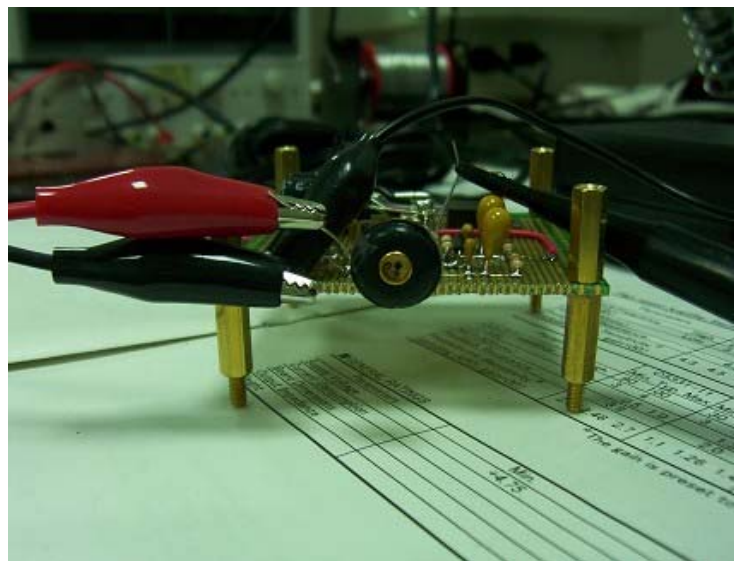
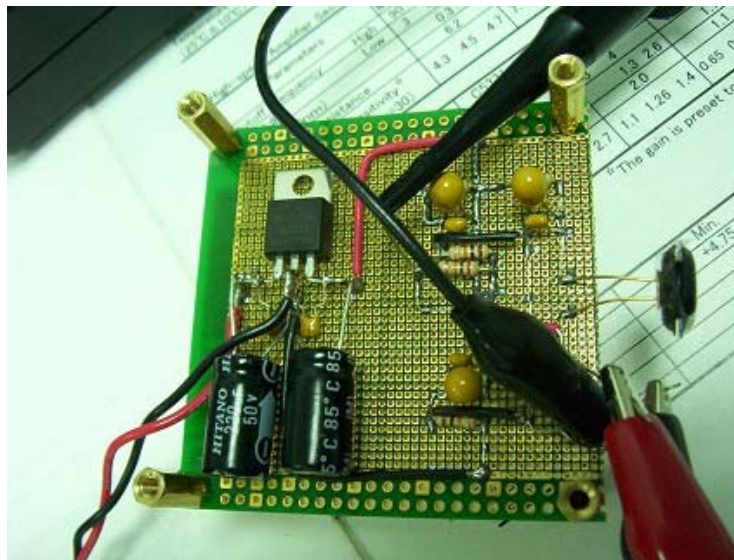
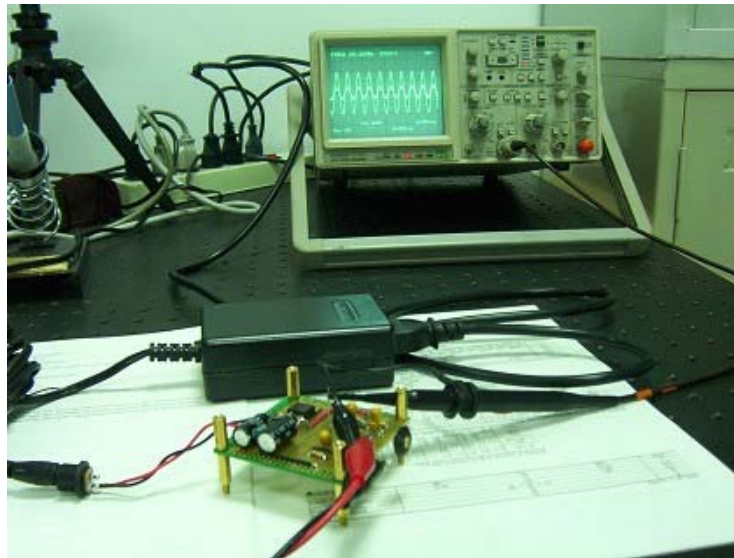
調頻鎖碼

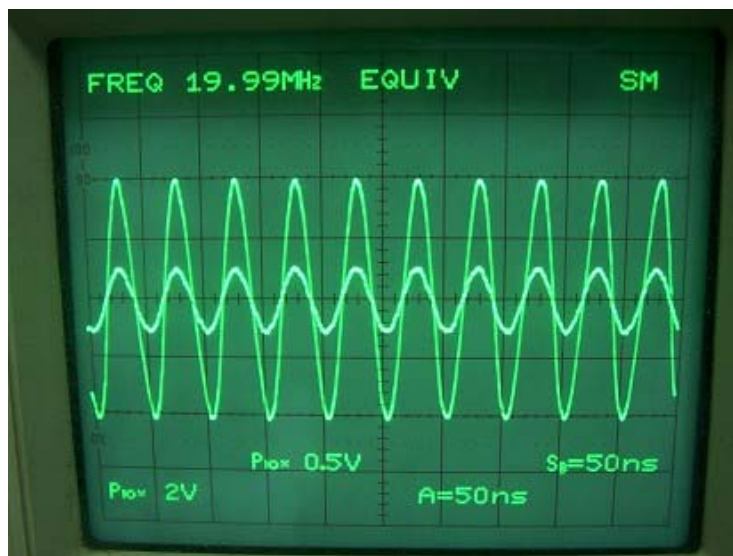
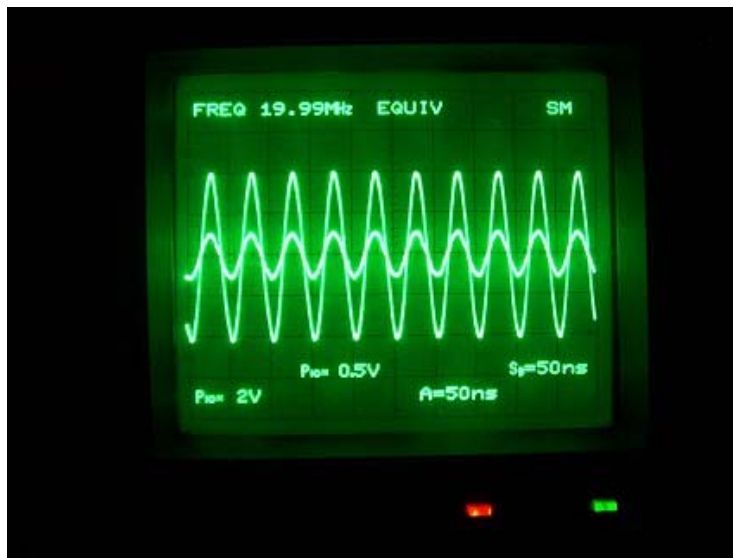
由於追蹤導引的雷射，需要有鎖碼的功能，才能夠找到要找的目標。所以我們要在彈上，設定一密碼，也就是其調幅或調頻的密碼，所以在追蹤導引的時候，彈只會接受，有同樣調幅或調頻的密碼的雷射發射，指揮飛行。

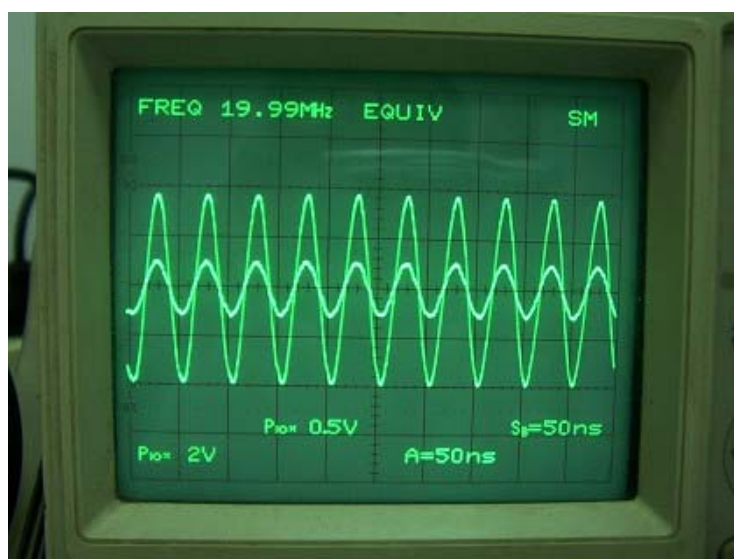
5.6. 部分硬體設備提供軍方維修單位

(a) 雷射脈衝波形量測模組





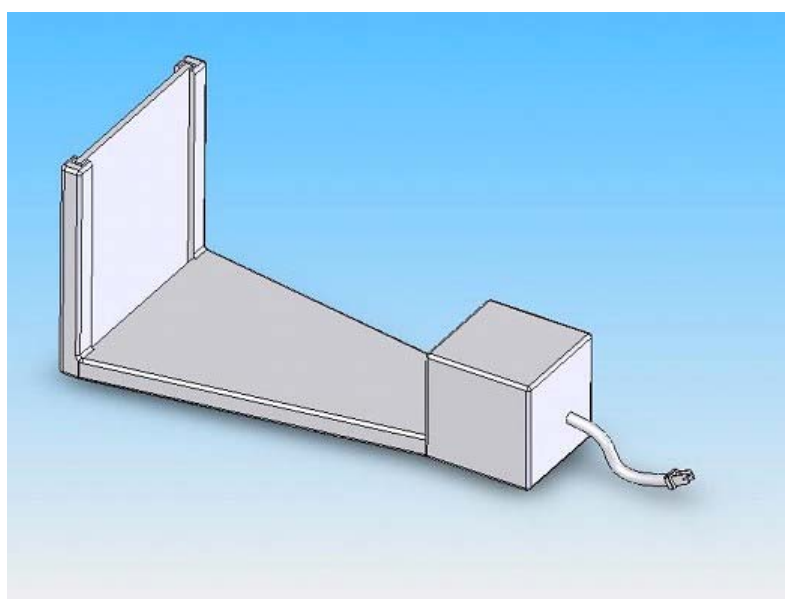


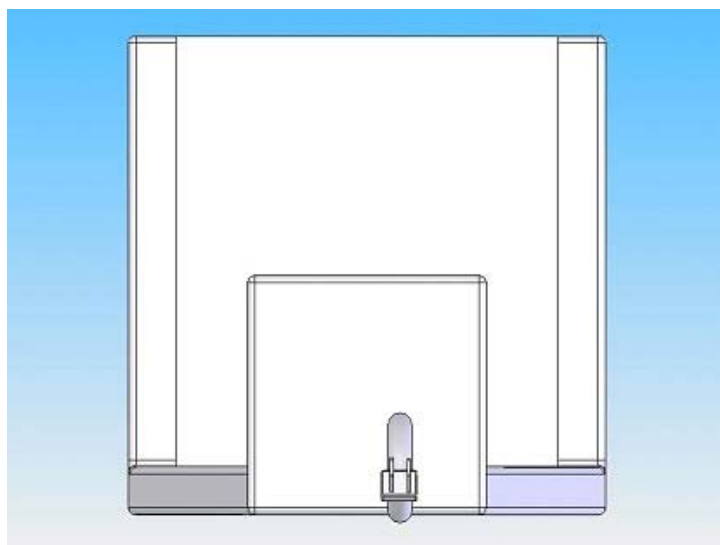
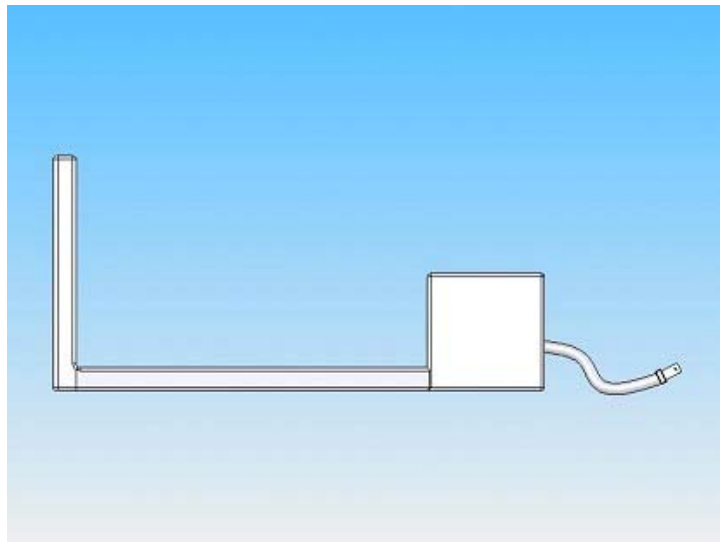
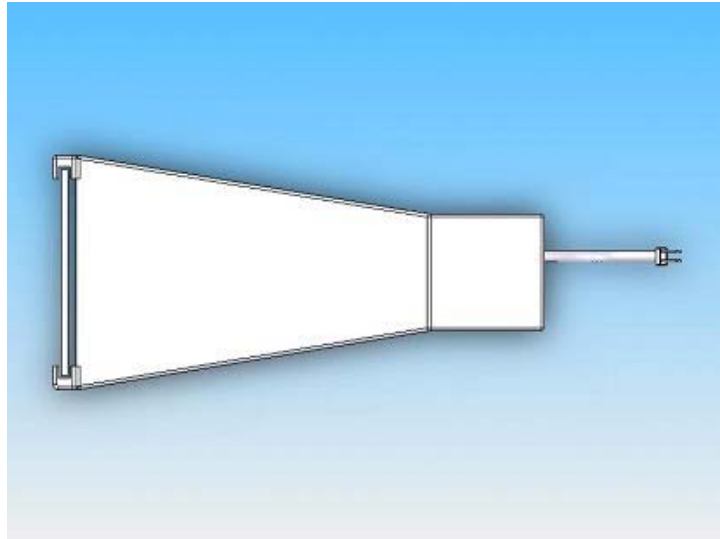


我們將再改進自製雷射脈衝輸出量測器的，寬頻放大器電路板(wide bandwidth, >100MHz)及自動調整增益(AGC)電路板等，並在測試調校完畢後，免費額外提交軍方單位，以為雷射修護工作自有儀器。

(b) 雷射能量量測模組

我們自行設計的自製雷射能量量測儀器，Energy meter 的設計圖。雷射光打擊到一片散光片(diffuser)，在進入感測器頭內，其量測電路，會將能量值，經過信號傳輸線，在示波器上顯示。



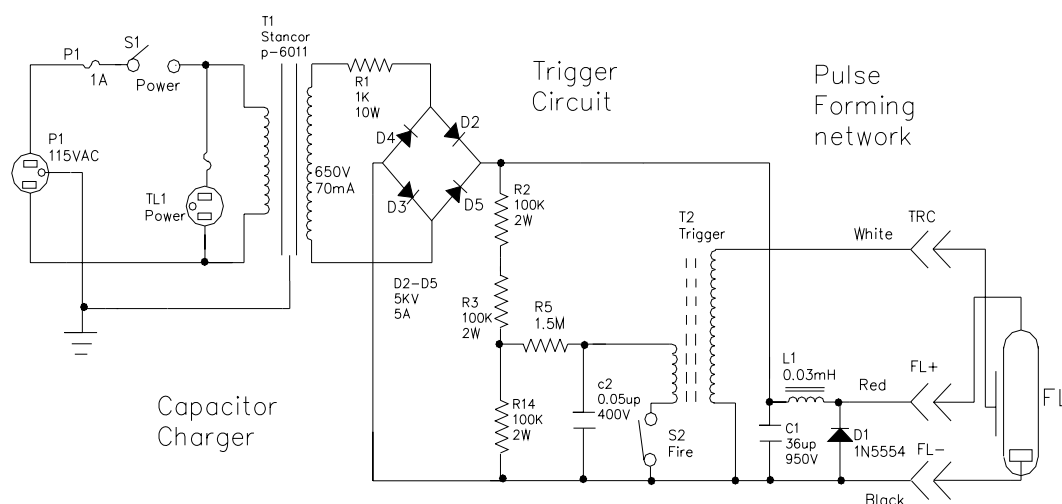


我們將改進自製雷射脈衝輸出量測器的，機械機構、感測光電接收器的反應

速度、放大器的自動增益控制、放大器的頻寬等等。並在測試調校完畢後，免費額外提交軍方單位，以為雷射修護工作自有儀器。

(c) 閃光燈驅動初步電源供應器

雷射測距追蹤導引定位儀，其系統電源，首先要提供的就是，雷射激勵閃光燈的充電及電容器儲能。下圖是，雷射激勵閃光燈的，反覆共振式雷射激勵閃光燈的充電電路設計(resonance laser energy storage capacitor charger)。當然我們為了系統的完整說明，也把雷射激勵閃光燈的觸擊發電路設計(laser flashlamp trigger circuit)，和雷射激勵閃光燈的脈衝形成電路設計(laser flashlamp pulse forming network PFN)，也一起顯示出來。



下圖是，未來如果有賡續需求，我們希望能完成並提供我們額外自製的雷射激勵閃光燈的，反覆共振式雷射激勵閃光燈的充電電路板模組，雷射激勵閃光燈的觸擊發電路板模組，和雷射激勵閃光燈的脈衝形成電路也一起自製出來，安裝在一雷射激勵電源供應器內。當然，這雷射激勵電源供應器內還要有儀器開關、輸入電源指示燈、充電電壓顯示錶或面板、雷射閃光燈擊發按鈕、雷射閃光燈高壓大電流接線端子組、雷射閃光燈高壓線端子等。希望測試調校完畢後，免費額外提交軍方單位，以為雷射修護工作自有儀器。

我們在計畫過程中，也曾經希望採購合用的雷射激勵電源供應器，甚或開規格國內委製。但是相關廠家，皆因為高壓、大電流、快速充放電、可調閃光燈高

電壓、可調閃光燈擊發高電壓等等要求，而不能提供產品。更不用講，事實上很多元件都要軍規。而且就算我們提供技術及經驗，協助配合廠家製作，光就這個雷射激勵電源供應器的價格，實算成本，也一定比本一年期計畫所有全部經費還要高。軍方單位也協助找尋商源，也都發覺採購委製都非常困難。所以我們也只能在未來全力自製雷射激勵電源供應器，以為雷射修護工作自有儀器。



六、 結語

雷射基修工作的執行，需要具備雷射知識、技術及經驗。還需要有無塵工作室，另外儀器設備如：光學平台、光學機座、高速示波器、雷射能量、雷射脈衝波、雷射功率、雷射光點、雷射高壓量測儀器一定齊全。當然更重要的還需要各類、各層級的雷射驅動電源供應器。要執行基修工作，當然還需要備料，每一個雷射元件，目前分別的雷射元件一定可以買得到，但是還是要實際訂製、驗測合格才可當備料件。

我軍方維修單位，能自行提出建立五級量測及更換元件技術需求，全力提昇裝備妥善率，並且已經可以完成超越三級維修的能力(檢測雷射故障原因，適當調整雷射驅動電壓及更換最重要的雷射激勵閃光燈)，實在令人敬佩。

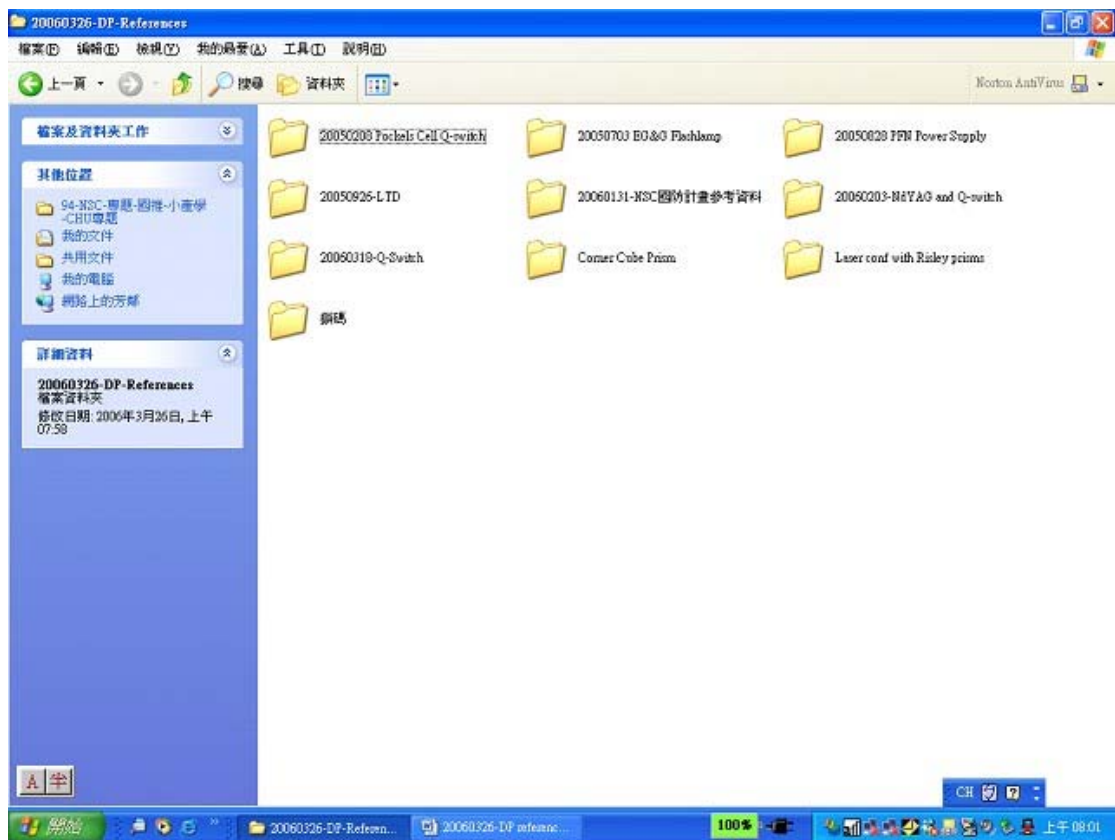
但是雷射基修的工作，確實需要更多的雷射知識、技術及經驗，無塵工作室，儀器設備，各類、各層級的雷射驅動電源供應器，以及備料。需要更多的資源才可完全具備。

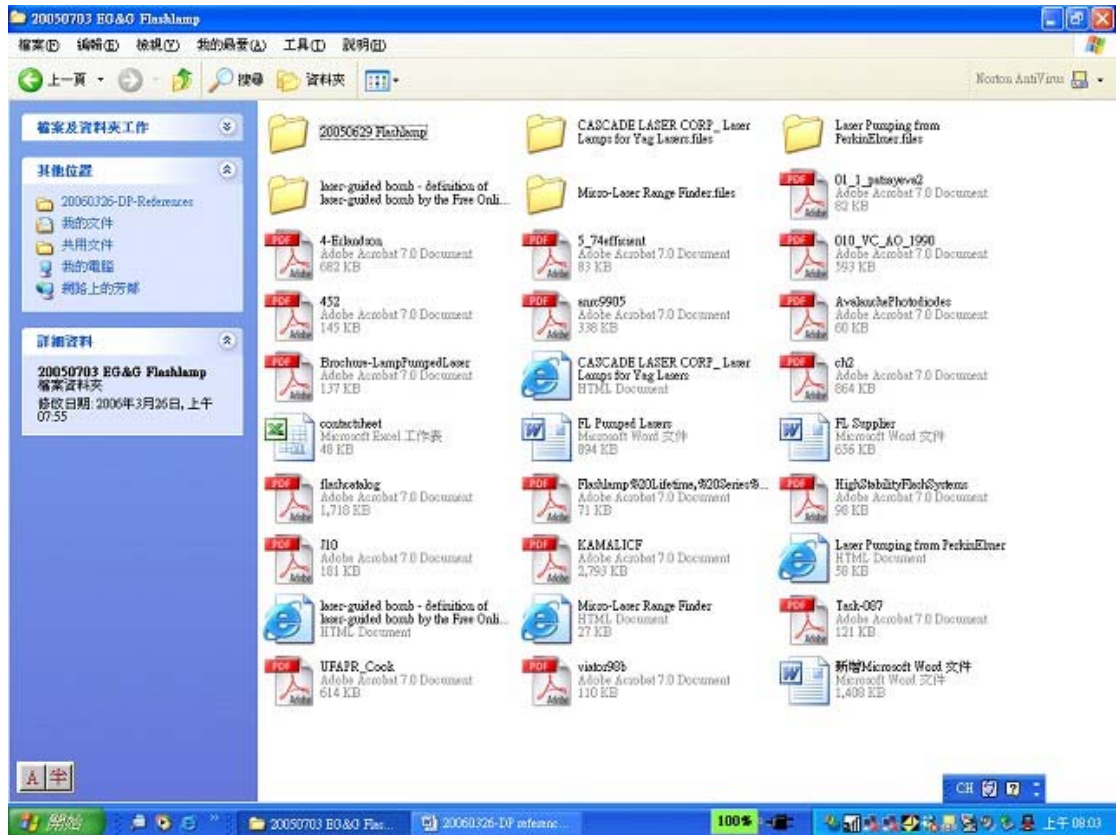
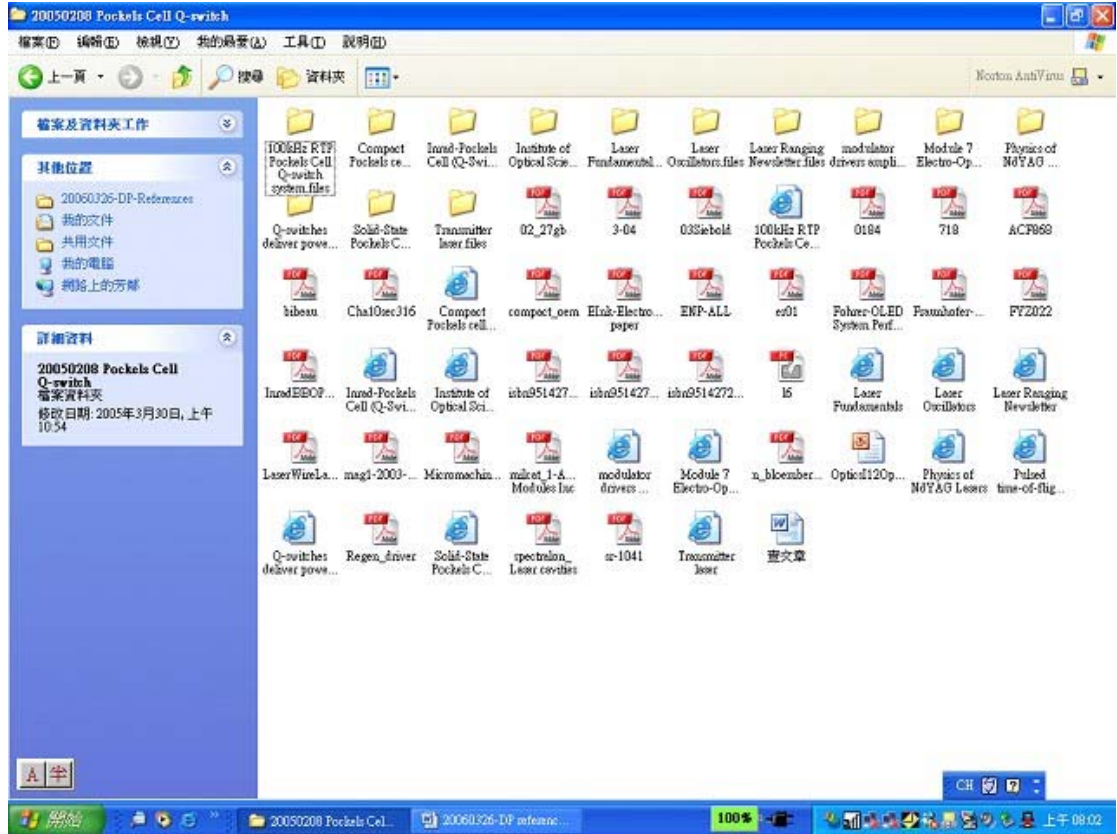
本合作研究計畫已達到本系統裝備的高功率、鎖碼雷射的，知識、技術及經驗的傳授。希望軍方維修單位，能綜合貴軍全軍的需求達到完全的五級基修的無塵工作室、儀器設備、各類、各層級的雷射驅動電源供應器、以及準備備料。相信可以更有效的維持裝備最佳的妥善率，提昇貴軍的最佳戰力。

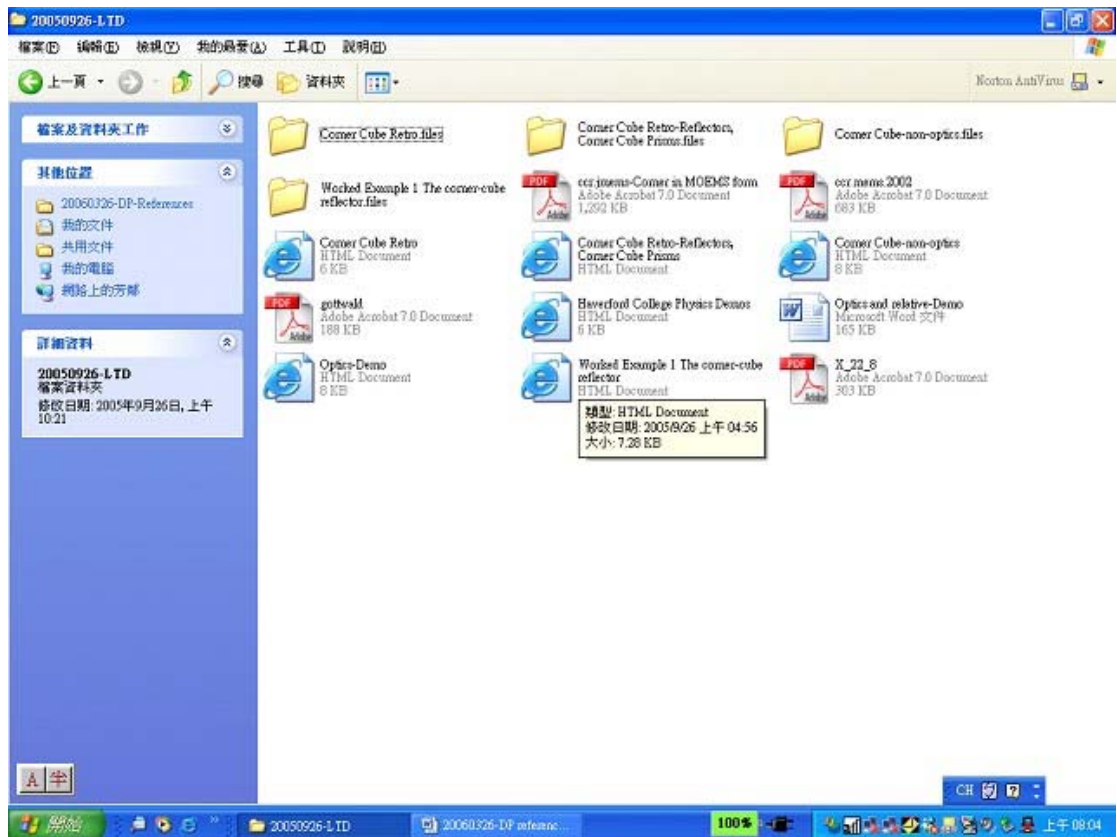
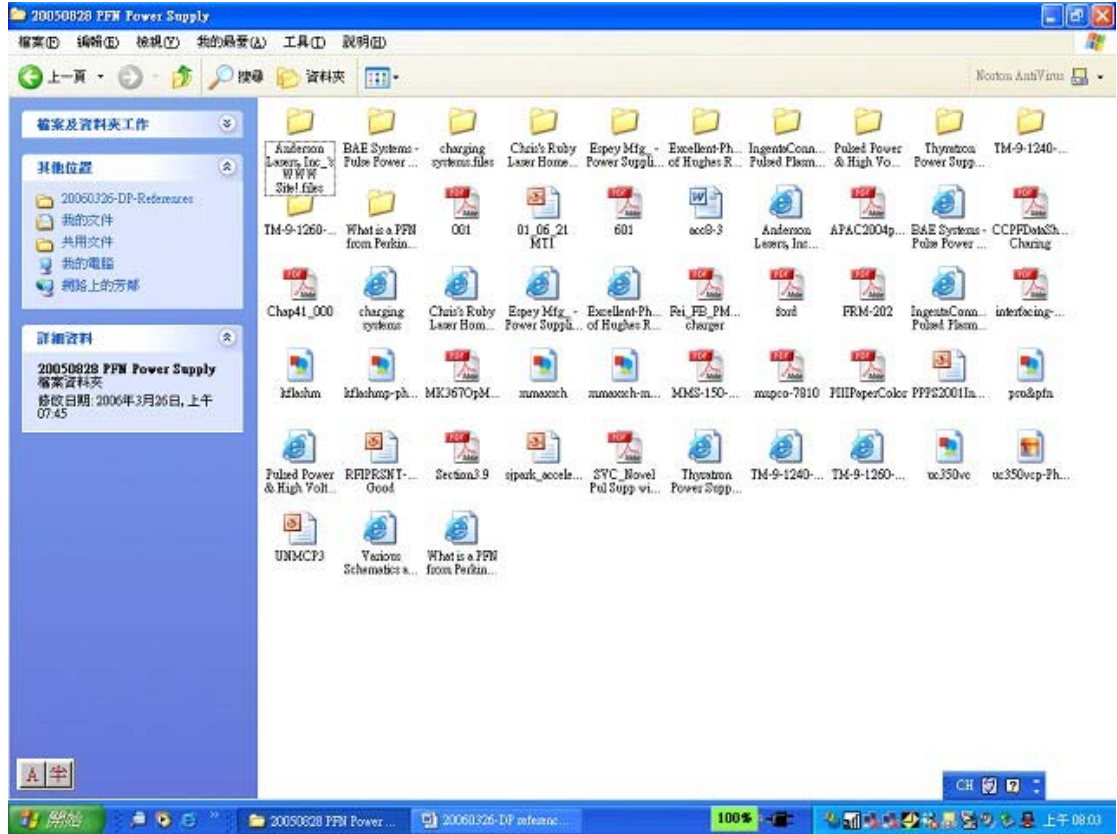
七、 附件

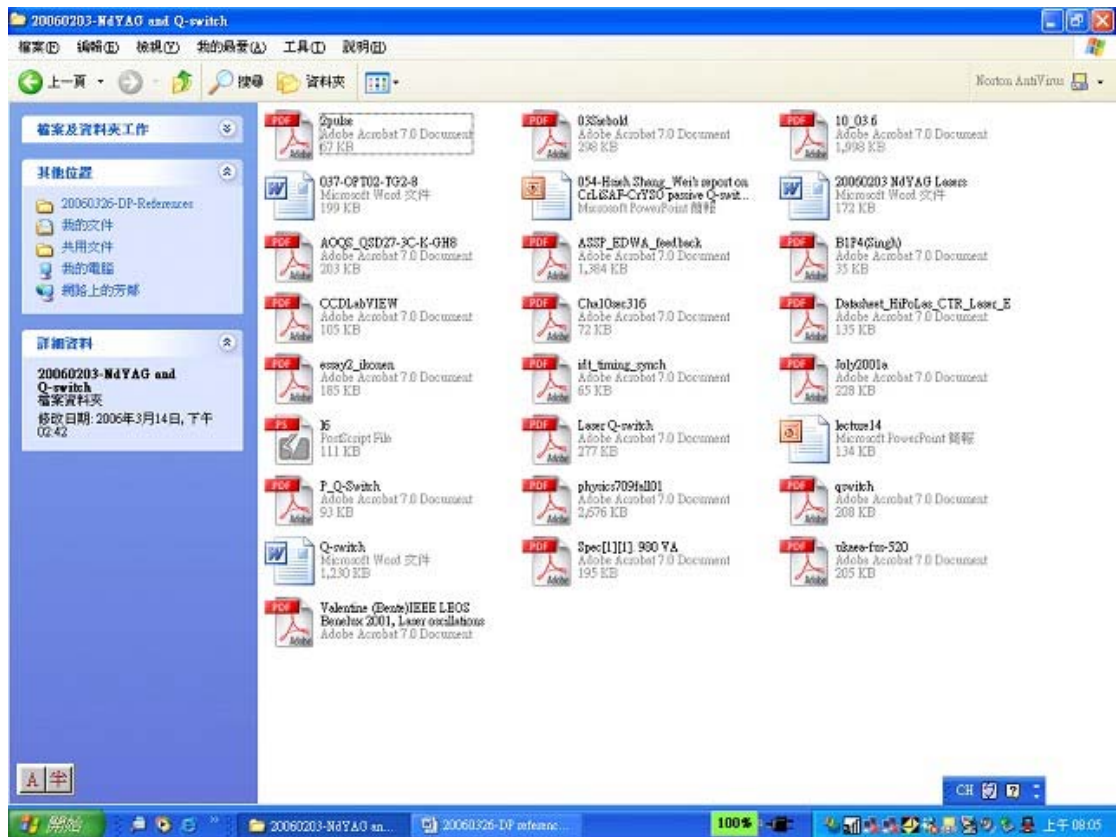
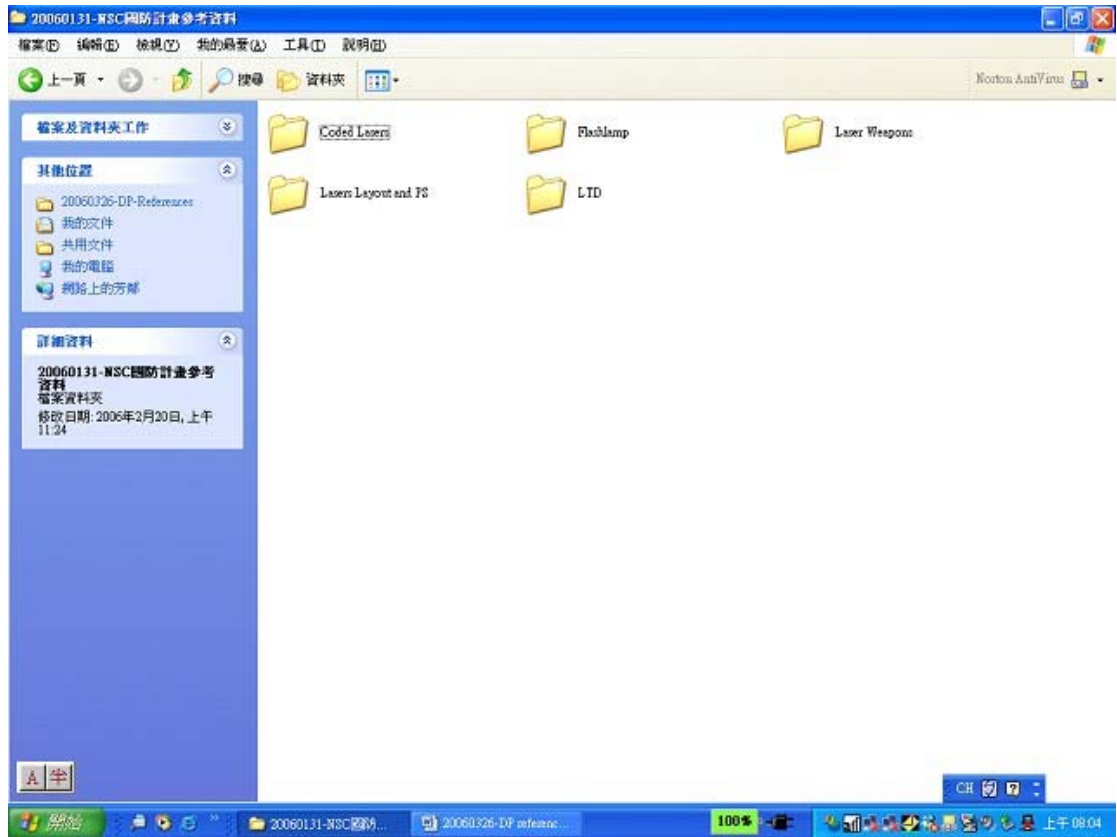
7.1. 本計畫參考資料

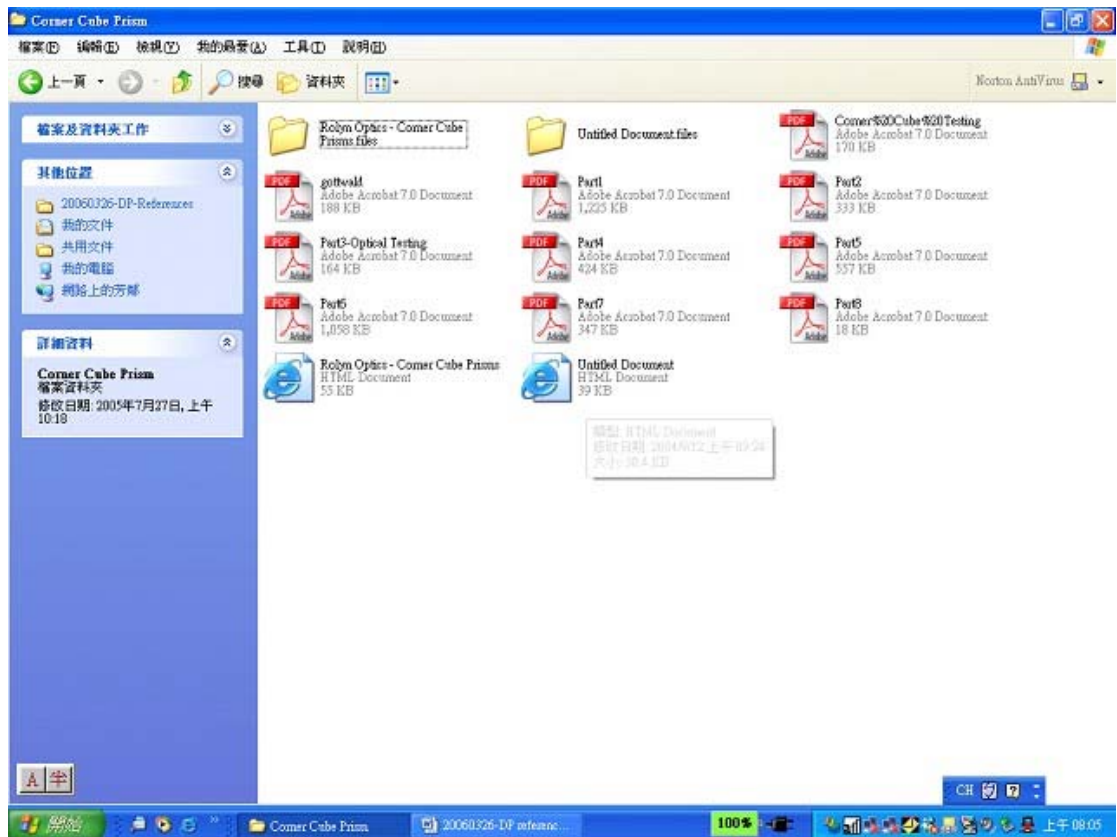
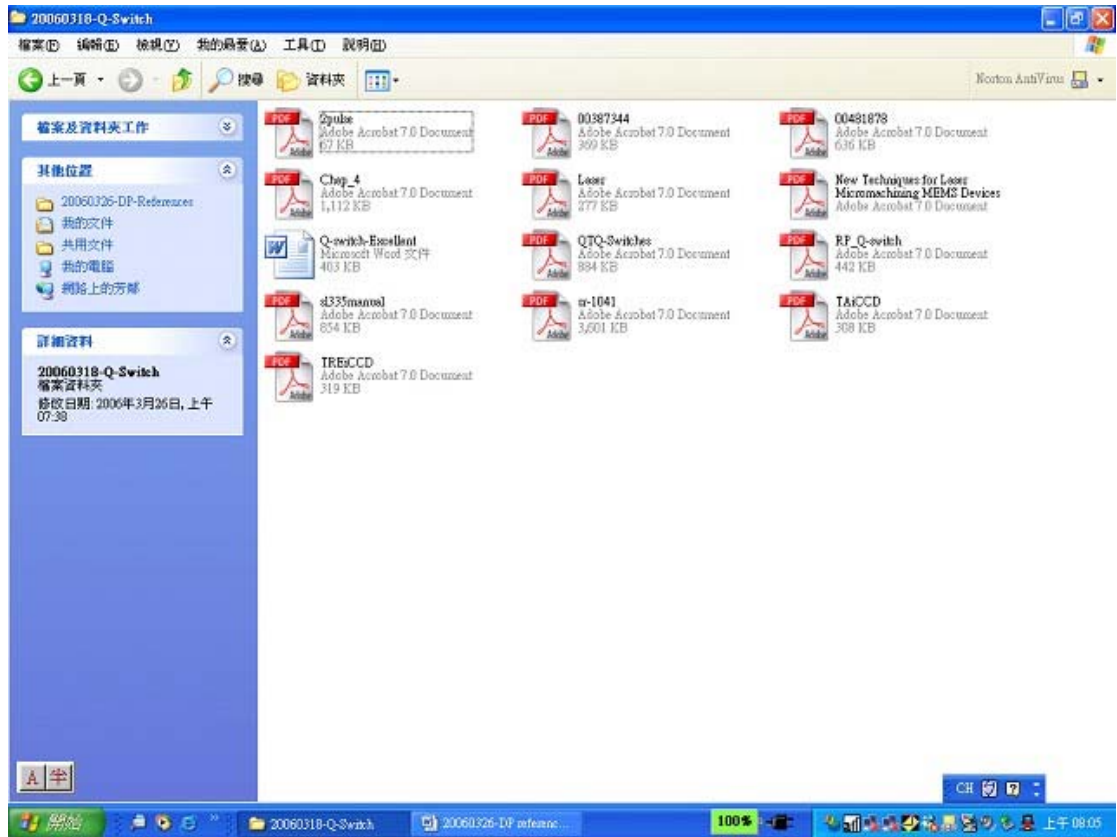
本計畫自 91 年，連絡、技術討論，92 年，連絡、技術討論，希望建案合作研究；93 年，連絡、技術討論，建案申請提出，奉核定 94 年執行一年；94 年，執行委託合作研究一年，其中參考非常多資料。另整理於光碟片中送軍方需求單位參考。

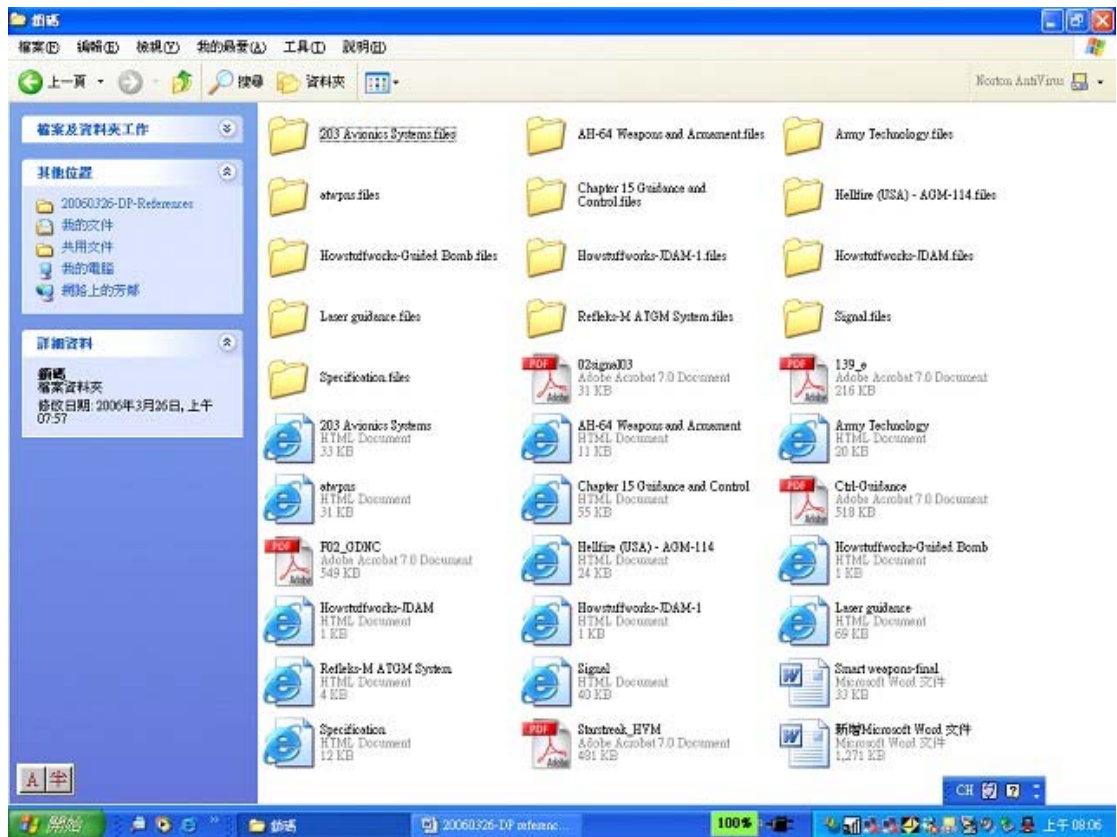
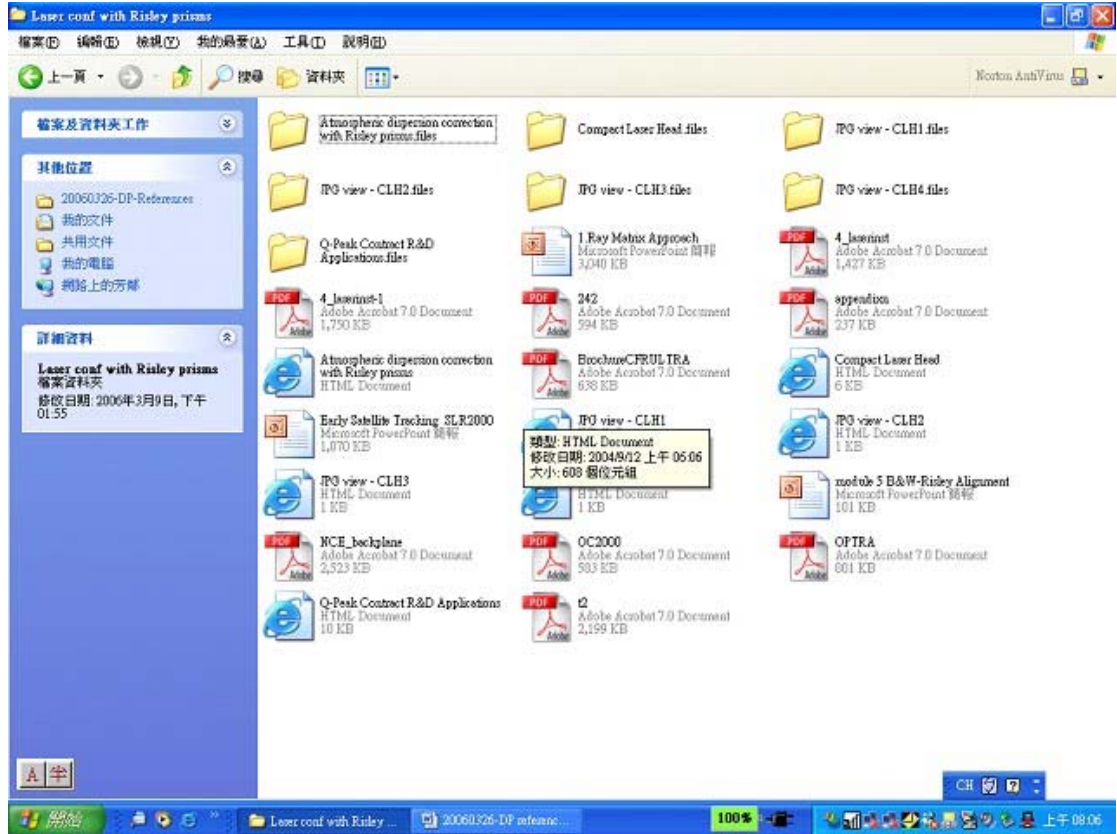












7.2. 雷射基修工作室規劃

雷射是一精密科技產品，尤其是測距、追蹤導引的雷射測距定位儀。要做雷射五級基修工作，當然首先要具備如本報告中研究整理的雷射知識、技術及經驗。此外還需要有無塵工作室，其必需性我們在報告中有說明。另外，光學平台、光學機座、高速示波器、雷射能量、雷射脈衝波、雷射功率、雷射光點、雷射高壓量測儀器一定要有。當然更重要的還需要各類、各層級的雷射驅動電源供應器，而這部份即使可花錢採購，一定也要修改或定製才會符合系統使用的。

要執行基修工作，當然還需要備料。雖然我們已完全研析瞭解，每一個雷射元件，而目前分別的雷射元件一定可以買得到，但是還是要實際訂製、驗測合格才可當備料件。

7.3. 發表的 2005 年國防科技學術研討會論文

滲鈷離子亞格雷射發射器設計及研析

陳振文* 黃福龍* 陳俊男* 莊凱鈞** 葉茂勳***

*中華大學機械暨航太工程研究所
新竹市五福路二段七〇之號

電話：(03)-5186744; 傳真：(03)-5186521; 電子郵件：jwchen@chu.edu.tw

**明新科技大學電機工程學系

***中山科學研究院光電組

N9C 94-2623-7-216-001 雷射測距定位儀能量及光束測試調校及更換研究

摘 要

滲鈷離子亞格雷射應用非常廣，在軍事、量測、加工、醫療、科學研究等等都有大量使用。我們針對一種高穩定性的滲鈷離子亞格雷射共振腔(Nd:YAG Laser Resonator) 發射器，做一個深入的研究討論和設計。並針對電壓充電、閃光燈觸發器、巨脈沖Q-值調制驅動及同步時控等相關動態雷射驅動發射做完整的研究分析。在滲鈷離子亞格雷射共振腔研究我們從基本的四個光學雷射元件Porro鏡鏡組共振腔，研究解析到多層次十個光學雷射元件Porro鏡鏡組共振腔，以及二十二個光學雷射元件雷射光輸出和完全的二十六個光學雷射元件雷射發射器全系統模擬。我們也設計了可調電壓充電式雷射儲能電壓供應器、閃光燈觸發器高壓驅動電路、巨脈沖Q-值調制Pockels cell高壓驅動電路，以及全系統的同步時控動態雷射發射控制電路，完成自足式全系統功能。

關鍵字：滲鈷離子亞格雷射、雷射共振腔、閃光燈觸發器、巨脈沖Q-值調制

Nd:YAG Laser Resonator Design Analysis

Junwen Chen*, Fu-Lung Huang*, Jun-Nan Chen*, Kai-Chun Chuang**,
and Mau-Shiun Yeh***

* *Institute of Mechanical and Aerospace Engineering, Chung-Shan University*
No. 707, Sec 2, Wu-Fu Road, Hsin-Chu, Taiwan 300

Tel: (03)-5186744; Fax: (03)-5186521; E-mail: jwchen@chu.edu.tw

** *Department of Electrical Engineering, Ming-Shin University*

*** *B-O Section, Chung-Shan Institute of Science and Technology*

ABSTRACT

Nd:YAG lasers have very wide applications in the field of military, ranging, material processing, medical and scientific researches. We are investigating a special high misalignment stability Nd:YAG laser resonator. Analyze and optimize the resonator components and designed the system configuration. We have also designed a resonance type fast flashlamp pulse forming network charging supply, that can charge the energy storage capacitor from 400V up to 1000V. The optimized flashlamp trigger high voltage and the series method that gives best pumping efficiency are also investigated in detail. Active Pockels cell Q-switch mechanism and the associated driving circuits and the synchronization control circuits are also investigated in detail as well.

Key Words: Nd:YAG laser, laser resonator, flashlamp trigger, giant pulse Q-switch modulation.

一、前言

淨鈉離子亞格雷射(Nd:YAG laser)應用非常廣泛也非常成熟。在軍事、量測、加工、醫療、科學研究等都有大量使用以及非常好的使用成果。我們針對一種高穩定度的淨鈉離子亞格雷射共振腔(Nd:YAG Laser Resonator)雷射器，做一個深入的研究討論。並且對電源充電、閃光燈觸發器、巨脈沖 Q-值調制驅動及同步時控等相關動態雷射驅動雷射做完整的研究分析。

在淨鈉離子亞格雷射共振腔研究我們從基本的四個光學雷射元件 Porro 鏡組共振腔，研究解析到多層次十個光學雷射元件 Porro 鏡組高失調(misalignment)穩定度共振腔，以及二十二個光學雷射元件雷射光輸出和完全的二十六個光學雷射元件雷射雷射器全系統模組。

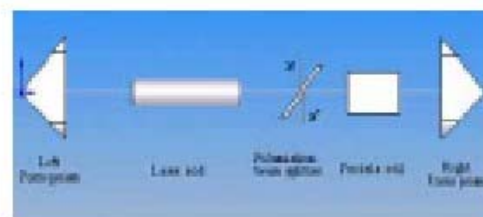
我們也設計了可調電壓反置式雷射儲能電源供應器、閃光燈觸發器高壓驅動電路、巨脈沖 Q-值調制 Pockels cell 高壓驅動電路、以及全系統的同步時控動態雷射雷射控制電路，完成自足式全系統功能。

二、Porro 鏡組共振腔淨鈉離子亞格雷射

我們循序首先研究，解析四個光學雷射元件 Porro 鏡組共振腔，包含一對 Porro 鏡組、雷射棒、偏極分光雷射輸出光件(polarizing output coupling beam splitter, Rhomb polarizer)；其次，達到研究解析，多層次十個光學雷射元件 Porro 鏡組高穩定度共振腔，包含一對 Porro 鏡組、雷射棒、偏極分光雷射輸出光件；腔內轉折鏡體(TIR folding prism)、平行光束全反射鏡體(corner cube prism)、1/4 波片 (wave plate)、3/8 波片(wave plate)、雷射輸出濾光鏡(Laser output filter window)、Q-值調制晶體(Pockels cell)；以及二十二個光學雷射元件雷射

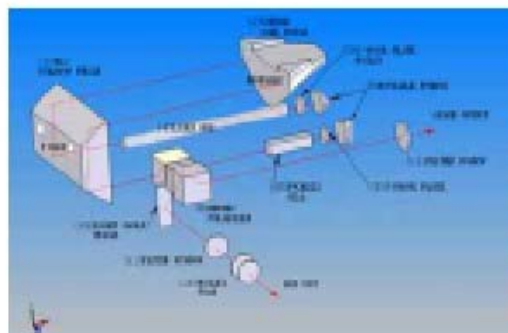
光輸出；加上腔內兩片式望遠鏡片(telescope)、兩個光圈(aperture)、腔外一對 Risley pair、1/2 波片 (wave plate)、兩片式輸出望遠鏡(output telescope)、一個光圈、一對 Risley pair；和完全的二十六個光學雷射元件雷射雷射器；加上腔外一個直角棱鏡(right angle prism)、濾光鏡(filter window)、一對 Risley pair、1/2 波片全系統模組。

基本 Porro 鏡組雷射共振腔是如圖一所示的四個光學雷射元件所組成；其中兩個 Porro 鏡組是共振鏡片組，雷射棒是核心材料，以及一個偏極分光雷射輸出光件。



圖一，Porro 鏡組雷射共振腔。

巨脈沖 Q-值調制 Porro 鏡組雷射共振腔則是如圖二所示的十個光學雷射元件所組成。



圖二，巨脈沖 Q-值調制 Porro 鏡組雷射。

為一個完全的雷射模組則需要用到二十六個光學雷射元件，組成高穩定度雷射雷射器全系統模組。

Porro 棱鏡組共振腔，是由一對端反射面相對且平行的兩個 Porro 棱鏡組成的。其中這兩個 Porro 棱鏡，是要依共振腔內偏極光相位的变化，而相對應旋轉的。還有一個偏極分光片，做雷射輸出的導引。當然共振腔中還要有雷射棒，以及可以被巨脈沖 Q-值調制的 Pockels cell 光電晶體。Porro 棱鏡組共振腔，最重要的優點是，它對共振腔光學元件的失調 (misalignment) 有較大的穩定度 (insensitivity)^[1]。此外 Porro 棱鏡組共振腔，其他的優點還有：更小的 diffraction loss，利用 Porro 棱鏡組端角鏡的轉動，可連續調節輸出導引比值 (output coupling ratio)^[2]。

在雷射的 Porro 棱鏡組共振腔解中，當左側第一個 Porro 棱鏡的端角鏡，是調整於 X 軸的水平面上，而當右側的第二個 Porro 棱鏡的端角鏡，是調整於與 X 軸的 XZ 平面有一個 β 角度，其中 β 角是介於 0° 與 90° 間的數值。且共振腔中其輸出穿透率值 (resonator transmittance)，可由 Jones Matrix 乘式計算偏極光矩阵、Porro 棱鏡矩阵、再一偏極光矩阵的方式計算：

$$M_{\text{opt}} = M_p M M_p$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ B & A' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} A \\ 0 \end{bmatrix}$$

其中 $A = \cos(P/2) + j \sin(P/2) \cos(2\beta)$,

$$B = \sin(P/2) \sin(2\beta),$$

A' 是 A 的共軛複數，

P 是隨折射率改變的 Porro 棱鏡內相位偏移 δ ，

β 是 Porro 棱鏡與水平軸夾角。

M_p 是 Porro 棱鏡的行列式

M_p 是偏極光的行列式

所以對 Porro 棱鏡其相位偏移角與全反射的關係為：

$$P = \pi + 4 \tan^{-1} \{ [\cos(\sin^2 i - n^2)^{1/2}] / \sin^2 i \}$$

其中 i 是棱鏡的入射角，n 是棱鏡的折射率。由於 Porro 棱鏡其 roof angle 是 90° ，i 是 45° ，所以當棱鏡的折射率不是 $2^{1/2}$ 時，都會有一特定的相位偏移角。

因此，其有效反射率只為：

$$R = M_{\text{opt}}^* M_{\text{opt}}$$

$$= \cos^2(P/2) + \sin^2(P/2) \cos^2(2\beta) \text{-----(1)}$$

可知反射率，是水平夾角 2β 的函數，且還會隨 Porro 棱鏡的折射率而改變。所以我們可以知道，Porro 棱鏡其共振腔中雷射的輸出率，是與水平夾角有關的連續變化。至於最高雷射輸出能量，當然我們可以計算及實測，知道它是介於 Porro 棱鏡水平夾角 0° 與 90° 間的數值。

若使用 Pockels cell 主動式巨脈沖雷射 Q-值調制，我們是用 LiNbO_3 晶體。這個 LiNbO_3 晶體的 C-軸則是與雷射的 Porro 棱鏡組共振腔與 Z 軸有一小傾斜角度 (tilted angle)。在整個雷射共振腔共振調適時，雷射內光經過偏極分光雷射輸出光片時，其中 s-component 的偏極光部分，就是有效的雷射的輸出。

而其他 p-component 的偏極光，則穿過偏極分光片，繼續在共振腔內共振放大。雷射內 p-component 的偏極光，穿過 Pockels cell 的 LiNbO_3 晶體時，它會有一個經過 Pockels cell 晶體

傾斜角度的相位偏移角， δ_1 。並且在Pockels cell 的LiNbO₃晶體加上高電壓做開關器時，同時會有一個電壓的相位偏移角， δ_2 。腔內的光束再經過使用BK-7 玻璃材料所做成的Porro鏡體的兩次直角全反射偏折，則會有 $180^\circ + 76^\circ$ 的相位偏移角。當腔內的光束再經過Pockels cell 的LiNbO₃晶體時，它再會 δ_1 與 δ_2 的相位偏移角。所以在其鏡腔內一個往返(round trip)，它的總相位變化是：

$$-\delta_1 - \delta_2 + 180^\circ + 76^\circ - \delta_1 - \delta_2$$

在巨脈沖Q-值調制的開關條件，要求其總相位是應為 0° 或為 $2m\pi$ (m是整數)。所以LiNbO₃晶體的C-軸與雷射的Porro鏡體組其鏡腔無轉Z軸有一小傾斜角度，約是 0.95° ，也就是可以彌償其中鏡體BK-7 玻璃所產生的 76° 的相位偏移角。

接著，我們來計算LiNbO₃晶體，當腔內的光束經過時要產生 δ_1 為 90° 的相位偏移角所需要的高電壓值。Pockels cell 的LiNbO₃晶體，在當巨脈沖Q-值調制開關，其相位偏移公式為：

$$\Delta\Phi = 2\pi L \times n_o^2 \times \gamma_{22} \times V_0/d \quad \text{-----}(2)$$

其中 γ_{22} 是LiNbO₃晶體的光電係數，其值為 $2.82 \times 10^{-7} \text{ mmV}^{-1}$ ； n_o 是LiNbO₃晶體的折射率，其值為2.23568；d是晶體的厚度；L是晶體的長度；以及 V_0 則是LiNbO₃晶體，當腔內的光束經過時，要產生相位偏移角，所需要的高電壓值。我們所用的LiNbO₃晶體，其體積為 $9 \times 9 \times 25 \text{ mm}^3$ 。要在LiNbO₃晶體產生相位偏移 $\Delta\Phi = 2\pi$ 次入公式(2)計算，我們在LiNbO₃晶體上疊加 3021V的高電壓(1000)。

三、鐳離子亞赫雷射發射驅動

我們也設計了可調電壓反饋式雷射儲能電源供應器、閃光燈觸發器高壓驅動電路、巨脈沖

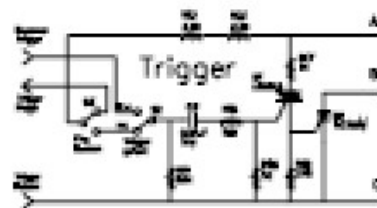
Q-值調制 Pockels cell 高壓驅動電路，以及全系統的同步時控動態雷射發射控制電路，完成自足式全系統功能。

圖三所示的是可調電壓反饋式(resonance)雷射儲能電源供應器的基本電路設計，其中雷射儲能電壓可控制在 400 伏特至 1000 伏特可調範圍。



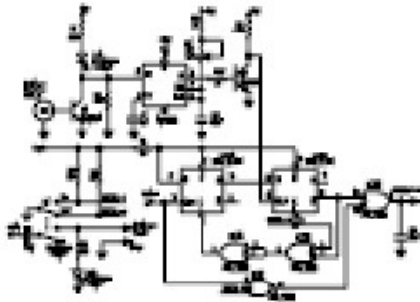
圖三，可調電壓式雷射儲能電源供應器。

圖四所示的則是更精進的閃光燈觸發器高壓驅動電路。雷射晶浦所用的閃光燈，其觸發器有許多參數我們需要特別優化。首先我們是依不同規格閃光燈，找出穩定的擊發的高壓電壓；其次我們是實驗分析閃光燈的電流及電壓的時間動態曲線，以及最重要的發射光譜。找出擊發的高壓電壓，是採用串聯的高壓或是並聯的高壓。



圖四，閃光燈觸發器高壓驅動電路。

雷射淨離子亞格雷射的應用，都是使用在巨脈沖 Q-值調制的擴展。而巨脈沖 Q-值調制的方式有：需要較多電子及光電元件、需要非常高壓、需要偏極化匹配的光學波片元件等、需要同步時控的動態驅動等等主動式的巨脈沖 Q-值調制。但是，它同時也有優點，就是可以做雜鳴的功能。圖五就是主動式的巨脈沖 Q-值調制驅動及同步時控等相關動態雷射驅動發射的電路圖。



圖五。主動式巨脈沖 Q-值調制驅動及同步時控。動態雷射驅動電路圖。

四、結論

我們針對一種高穩定性的淨離子亞格雷射共振腔發射器，做一個深入的研究討論和設計。並且對電源充電、閃光燈觸發管、巨脈沖 Q-值調制驅動及同步時控等相關動態雷射驅動發射做完整的研究分析。在淨離子亞格雷射共振腔研究我們從基本的四個光學雷射元件 Porro 鏡鏡組共振腔，研究解鎖到多層次十個光學雷射元件 Porro 鏡鏡組共振腔，以及二十二個光學雷射元件雷射光輸出和完全的二十六個光學雷射元件雷射發射器全系統鏡組。我們也設計了可調電壓反覆式雷射觸發電源供應器、閃光燈觸發管高壓驅動電路、巨脈沖 Q-值調制 Pockels cell 高壓驅動電路、以及全系統的同步時控動態雷射發射控制電路。完成自足式全系統功能。

參考文獻

- [1] G. Zhou and L. W. Casperson, "Modes of a laser resonator with a retroreflecting roof mirror", *Applied Optics*, Vol. 20, pp3342-3346, 1981.
- [2] R. Haeck, H. P. Cortez and H. Webber, "Misalignment sensitivity of optical resonator", *Applied Optics*, Vol. 19, pp598-601, 1980.
- [3] M. K. Chan and E. A. Tappo, "Laser resonator: an electrooptically Q-switched Porro prism device" *Applied Optics*, Vol. 15, pp1942-1946, 1976.
- [4] Junwen Chen, Peir-Iyh Wang, Hon-Pai Yea and Sio-Poon Chung, "Energy extraction of Porro resonator in Pockels cell Q-switch operation" *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 28, pp1453-1462, 1996.
- [5] Junwen Chen, Hon-Pai Yea, Peir-Iyh Wang and En-Yin Fan, "Mode selection of slowly opened Q-switch operation" *Optics and Laser Technology*, Vol. 31, pp511-516, 1999.
- [6] Junwen Chen, Jun-Ting Lin, Kuan-shen Ho, Wei-Chien Chen and Mao-Shuan Yeh, "Slowly opened switch superior in giant pulse laser operation" *SPIE* 3478, pp 31-36, 2003.