

國立交通大學

光電工程研究所

碩士論文

利用週期性極化反轉結構之光參數過程

產生可調可見光與寬頻光源

Generation of tunable visible and octave-spanning light source
via parametric process in periodic poled structure

研究生：徐維駿

指導教授：潘犀靈 教授

孔慶昌 教授

中華民國九十八年六月

利用週期性極化反轉結構之光參數過程

產生可調可見光與寬頻光源

Generation of tunable visible and octave-spanning light source
via parametric process in periodic poled structure

研究生：徐維駿

Student: Wei-Chun Hsu

指導教授：潘犀靈 教授

Advisor: Prof. Ci-Ling Pan

孔慶昌 教授

Prof. Andy Kung

國立交通大學

光電工程研究所

碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute of Electro-Optical Engineering
College of Electrical Engineering and Computer Science
National Chiao Tung University

In partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of

Master of Engineering

In

Electro-Optical Engineering

June 2009

Hsinchu, Taiwan

中華民國九十八年六月

利用週期性極化反轉結構之光參數過程

產生可調可見光與寬頻光源

研究生：徐維駿

指導教授：潘犀靈教授

孔慶昌教授

國立交通大學光電工程系碩士班



首先在第一章、第二章的部分，簡單的介紹非線性頻率轉換、準相位匹配、隨機準相位匹配、光參振盪器的理論。第三章，主要是多段式晶體的設計與實驗細節介紹，在單一塊週期性鉭酸鋰晶體中，產生七道諧波，其中二、三、四、五道諧波為準相位匹配所產生的結果。由這些諧波所合成的脈衝會達到波包寬度為 1.4 飛秒的轉換極限脈衝。

這些研究最終的目的是希望能夠透過光和物質的作用來控制物質裡的電子運動，爲了要達到這個目的，我們需要發展能夠產生超寬頻頻譜和合成波型的技術。

第四章，主要是介紹寬廣可調的可見光，由近紅外光參振盪器產生近紅外光，近紅外光的非相位匹配二倍頻產生可見光波段，大約有百分之五的轉換效率，遠超過非相位匹配所產生的轉換效率。探討隨機準相位匹配的發現與模擬分析來解釋實驗的結果。最後是結論與未來展望，針對實驗上可以改進的地方與未來前景做探討。



Generation of tunable visible and octave-spanning light source via parametric process in periodic poled structure

Student: Wei-Chun Hsu

Advisor: Prof. Ci-Ling Pan
Prof. Andy Kung

Institute of Electro-Optical Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

This thesis includes three parts:

In the first part, I will introduce the theory of quasi-phase match, random-quasi-phase-matching (RQPM) and optical parametric oscillation. In the second part, I will illustrate the design of cascade nonlinear crystal and the experiment results. Up to seven laser harmonics covering more than two octaves in frequency have been generated efficiently in a single PPLT crystal, permitting the synthesis of 1.4 femtosecond pulses in a stable and compact setting.

Ultrashort subfemtosecond pulses with attosecond timing are essential for probing the evolution of electronic processes in atoms and molecules. The ultimate goal of these studies is to achieve coherent control of electronic motion in matter with light. To reach this goal, developing the ability to generate light pulses with an octave-spanning spectrum and having the ability to shape the pulses are required.

In chapter three, I will introduce the design of cascade nonlinear crystal and explain experiment results of generation of harmonic wave via cascade nonlinear crystal. Moreover, due to the inaccuracy from fabrication, in the chapter four, I will illustrate the theory and simulation and experimental results of random-quasi-phase-matching. We report broadly-tunable light generation by non-phase-matched intracavity SHG of a near-IR OPO with a several percent conversion efficiency. Simulation

shows that random-phase-matching is the dominant cause of the efficiency enhancement. Finally, conclusion and future work will be included in chapter 5.



致謝

在碩士班兩年的日子，首先我要感謝指導教授孔慶昌教授，他研究上的熱誠與謙遜的態度是我尊崇的典範，是我畢生學習的對象，在研究室不只學習到如何做研究與解決問題，更讓我學會做人處世的道理，感謝潘犀靈教授在開會時給我的指導與在選課時給我明確的方向，讓我獲益良多，感謝彭隆瀚教授提供實驗上所需要的多段式晶體與研磨拋光設備，讓我實驗得以順利進行，感謝口試委員彭隆瀚教授、賴暎杰教授、黃承彬教授，不辭辛勞的從各地奔波來參與這次的口試，您們寶貴的建議，除了使這本論文更完整，也讓我在學術研究的態度上，更為小心的要求自己。此外，還要感謝黃升龍教授，您所提供的儀器設備，讓我的眾多實驗得以順利完成。



從一開始進實驗的蒙懂無知，到學習的路上碰到的困難，很幸運的都有老師、學長姐、學弟妹的解惑與幫忙，感謝善莊學長在實驗室教我們各種儀器的使用與做人處事的道理還有各種活動的參與，讓我認識不少實驗室以外的人，在實驗與未來的路上都有很大的幫助，感謝時雨學長教導我在光學測量上的技巧與經驗的傳承，可以說是我光學實驗的啓蒙老師，讓我獲益良多，你離開實驗室前的指導，令我難以忘記，奠定了我畢業的基礎，感謝建任學長在模擬分析方面的幫助，讓我實驗與模擬可以相輔相成，還要感謝林苑師父，每當有急件的時候，都會以超音速的速度幫我趕出來，

也不忘吃飯娛樂我們，一路幫助我的人很多，請耐心往下看，感謝威廷學長在我論文的撰寫與實驗上的教導都有很大的幫助，感謝鈺珮學姊在晶體上的模擬與經驗，因為有你的經驗，讓我成功的設計出多段式的晶體，感謝為弘同學從我大學一路陪伴我一起成長，是個不可或缺的好夥伴，一起努力的日子讓我看到你面對事情的態度，讓我知道面對事情的態度必須更積極努力，感謝思瑩學妹幫我解決許多學問上的疑難雜症，也為我清楚的講解出國念書的相關事宜，感謝蔚然學長在實驗室大大小小的事情與規範都很有系統，讓大家做起事來更有效率，感謝智明學長當我在實驗碰到問題時，能夠幫助我解決問題，你處理問題的方法，讓我學習到需要靠經驗慢慢累積才能學會的實驗技巧，謝謝你無私的奉獻，感謝維洵學長不管在電腦或是實驗，都傳授我不少他過來人的經驗，感謝翰松學長從修課到實驗室都是一個很熱於討論的人，從中切磋學習到不少東西，還有感謝雅婷，實驗室大小瑣事因為有你的幫忙，讓整體更順利的進行。

感謝英耀，你鋁酸鋰製程的技術，帶給我豐富的實驗成果，更為我的畢業論文增添不少內容，感謝益寧，耐心的教導我如何研磨拋光與相關細節，感謝 2008CLEO 一起出國的夥伴，晏聖、善莊、建任，這是我一輩子難忘的回憶。

感謝在交大的同學，Moya、Mika、晏徵、俞良、承山，一切來的很快

去的也很快，短短一年在交大修課的時間，感謝在實驗室中和諧的氣氛與課業之間的討論，讓我渡過歡娛的時光。

最後感謝我的家人，從小到大很開明的讓我選擇人生的道路，你們一路的扶持與信任，讓我這一路走來能無後顧之憂完成學業，謝謝女友這三年的陪伴，不管考研究所或在實驗室都給我莫大的支持，未來如果有小小的成就，一定不會忘記有這群夥伴的幫助。

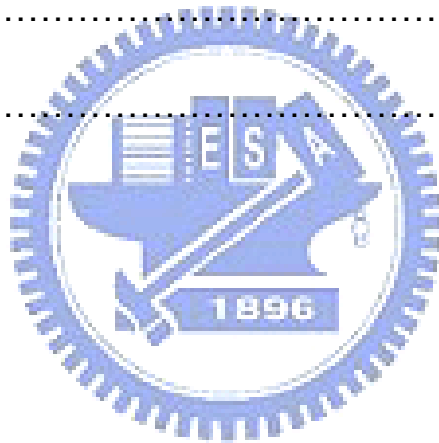
維駿 2009 年 6 月



目錄

第一章 緒論	1
1.1 背景與動機	1
1.2 鉭酸鋰晶體介紹	3
第二章 非線性光學與準相位匹配原理	5
2.1 基本方程式	5
2.2 二倍頻(Second Harmonic Generation, SHG)	7
2.3 和頻(Sum Frequency Generation, SFG)	8
2.4 準相位匹配(Quasi-Phase-Matching, QPM)	10
2.5 隨機準相位匹配(Random-Quasi-Phase-Matching, RQPM)[8].	11
2.6 鉭酸鋰的折射係數.....	14
2.7 掠射光參振盪器(Grazing-incidence OPO)[9].....	15
第三章 多段式非線性晶體	18
3.1 介紹	18
3.2 多段式晶體材料與泵浦光的選擇	19
3.3 計算鉭酸鋰晶體週期	21
3.4 多段式晶體的設計	24
3.5 晶體端面研磨拋光.....	30
3.6 多段式晶體的模擬.....	32

3.7 多段式晶體的實驗.....	36
第四章 可調式寬頻可見光光源	47
4.1 介紹	47
4.2 實驗架構.....	48
4.3 實驗結果.....	52
第五章 結論	58
5.1 結論	58
參考文獻.....	60
附錄.....	62



附圖目錄

圖 1-1 鉬酸鋰的晶體結構(a)鐵電相(b)順電相	4
圖 2-1 倍頻	7
圖 2-2 和頻	8
圖 2-3 差頻	9
圖 2-4 準相位匹配結構示意圖	10
圖 2-5 極化反轉週期	11
圖 2-6 理想極化週期與實際上週期的差異	12
圖 2-7 理想週期與有誤差週期的能量轉換與晶體位置之情形	13
圖 2-8 光參振盪器架構示意圖	15
圖 2-9 PPLN 掠射光參振盪器系統架構圖	16
圖 2-10 光參振盪器輸出波長與溫度之關係	16
圖 3-1 多段式晶體的多倍頻過程	20
圖 3-2 在單一週期中，倍頻晶體示意圖	21
圖 3-3 在多週期中，多倍頻晶體示意圖。	23
圖 3-4 先找到準確的相位匹配週期與溫度關係，再整合到同一塊晶體(粗線區表示相位匹配溫度為 120 °C 的週期之通道)	24
圖 3-5 直接做成一塊完整的晶體，找到其中一個通道相位匹配溫度都相同	

的週期(粗線區表示相位匹配溫度為 120 °C 的週期之通道).....	25
圖 3-6 比較 1st order、2nd order 的轉換效率與 duty cycle	27
圖 3-7 設計成多週期晶體的示意圖(多片晶體中的其中一片).....	28
圖 3-8 在顯微鏡下面觀察每段的極化反轉情況.....	29
圖 3-9 拋光之後鉬酸鋰入射端面(300X).....	30
圖 3-10 當入射波長為 2406.6 nm，強度為 180 MW/cm ² 時，模擬之轉換效率圖.....	33
圖 3-11 當入射波長為 2406.6 nm，強度為 60 MW/cm ² 時，模擬之轉換效率圖.....	33
圖 3-12 當入射波長為 2406.6 nm，強度為 20 MW/cm ² 時，模擬之轉換效率圖.....	34
圖 3-13 入射波長與第五階諧波轉換效率以及相位匹配溫度之關係圖	35
圖 3-14 入射波長與第四階諧波轉換效率以及相位匹配溫度之關係圖	35
圖 3-15 掠射光參振盪器實驗架構圖(R409)。	37
圖 3-16 實驗架構圖(R411).....	38
圖 3-17 多週期晶體 1-2(b)	39
圖 3-18 由實驗可以看出第五階諧波可接受泵浦光的頻寬.....	39
圖 3-19 各階諧波隨溫度變化的情形.....	40
圖 3-20 在實驗中所測量到的平均能量，包含第二階諧波到第五階諧波	41

圖 3-21 多週期晶體 1-5.....	42
圖 3-22 第五階諧波可接受泵浦光的頻寬.....	42
圖 3-23 各階諧波隨溫度變化的情形.....	43
圖 3-24 晶片 1-5-5 在溫度 123 °C 與 126 °C 各階諧波的分布情形	44
圖 3-25 諧波被菱鏡散射後的實驗結果.....	46
圖 4-1 實驗架構圖	49
圖 4-2 訊號光透鏡穿透頻譜	50
圖 4-3 閒置光透鏡穿透頻譜	50
圖 4-4 晶體鍍膜結果	51
圖 4-5 模擬計算訊號光與閒置光與倍頻光的可調曲線.....	52
圖 4-6 訊號光與閒置光倍頻波長與溫度的關係.....	53
圖 4-7 訊號光透鏡在產生訊號光倍頻波段的穿透頻譜.....	54
圖 4-8 閒置光透鏡在產生閒置光倍頻波段的穿透頻譜.....	54
圖 4-9 訊號光倍頻波長與能量輸出.....	56
圖 4-10 閒置光倍頻波長與能量輸出.....	56
圖 4-11 隨機相位匹配所產生光束的圖形.....	57

附表目錄

表格 2-1 Sellmeier coefficients for CLT and SLT[6].....	14
表格 2-2 泵浦光特性	17
表格 2-3 光參振盪器使用晶體規格	17
表格 3-1 波長轉換與不同溫度在 CLT 材料中的週期	22
表格 3-2 不同溫度在 CLT 材料中各波長轉換的週期大小	26
表格 3-3 使用晶體規格	27
表格 3-4 四段式晶體的所有週期設計	28
表格 3-5 研磨拋光使用的拋光液與水砂紙規格	31
表格 3-6 模擬參數值	34
表格 3-7 晶片編號方法	36
表格 4-1 可調雷射光源近年來的發展	47
表格 4-2 實驗光參振盪器之特性	53
表格 5-1 QPM 與 Raman 的比較	59

第一章 緒論


1.1 背景與動機

從最早的光學非線性現象說起，Franken 等人在 1961 年以高能量紅寶石雷射泵浦石英中發現倍頻現象[1]，隔年 Bloembergen 和 Armstrong 等人隨即發表非線性頻率轉換的概念。非線性頻率轉換包含各類頻率疊加的過程，例如倍頻(Second Harmonic Generation, SHG)、和頻(Sum Frequency Generation, SFG)以及差頻(Difference Frequency Generation, DFG)等型式，可用於波長轉換之輸出。倍頻、和頻主要應用在產生 200 nm ~ 780 nm 之紅、藍、綠光以及 UV 雷射，可作為雷射顯示技術之光源或微機械加工等等；而差頻其中一個的主要應用是光參振盪器(Optical Parametric Oscillator, OPO)，提供具有波長可調特性的雷射。

光在非線性過程的轉換效率受晶體的色散現象所影響，能量的轉換一直到 Bloembergen 等人於 1962 年提出準相位匹配(Quasi-Phase Matching, QPM)觀念[2]，才有比較好的轉換效率。1992 年 M. M. Fejer 等人則以人為加工的方式，於晶體中製作一倒晶格光柵向量，補償因色散造成的動量不守恆，達成高效率的非線性轉換[3]。1998 年，二維週期性極化反轉的非線

性光子晶體(nonlinear photonic crystal) 由 V. Berger 提出[4]，此概念可用以達成二維準相位匹配。與一維週期性極化反轉結構比較，二維週期性極化反轉結構可達成較多波長的準相位匹配，透過適當的週期調制，可使準相位匹配之輸出波長近乎連續而達到寬頻準相位匹配的效果。

晶體的準相位匹配的觀念被提出之後，利用週期極化反轉所製作成的非線性晶體，可達成高效率的非線性轉換，拓展了非線性光學晶體的應用範圍。而在實驗室中，自行架設的光參振盪器所產生的近、中紅外光波段光源，可以廣泛應用於環境監控、醫療、遠距離量測[5]及光譜學等各種領域。



本篇論文之目的，第一是利用模擬設計週期性極化反轉鉭酸鋰(Periodically Poled Congruent Lithium Tantalate, PPCLT)晶體建立一多倍頻、和頻系統；同一塊晶體採用多段式設計，以產生能量大小相近的諧波，其特性以及量測實驗結果會在後面一一做介紹與討論；第二為分析光參振盪器，利用週期性極化反轉-摻氧化鎂-化學計量比-鉭酸鋰(Periodically Poled MgO doped Stoichiometric Lithium Tantalate, PPMgSLT)晶體，藉由腔內倍頻技術獲得一寬頻可調 mW 等級可見光輸出。

1.2 鉭酸鋰晶體介紹

在晶體內的原子，由於不同的堆疊結構，使得正負電荷產生相對位移，形成電偶極矩(electric dipole moment)，讓晶體在無外加電場時就具有自發性極化(spontaneous polarization)現象，且極化的方向可被外加電場反轉或重新定向，稱為區域反轉，這就是鐵電(ferroelectric)材料的特性。鉭酸鋰屬於鐵電性材料，可穿透波長範圍從 $0.28 \sim 5.5 \mu\text{m}$ [6]，居禮溫度(Curie temperature)約為 874 K (congruent LT, $[\text{Li}]/[\text{Ta}] = 0.942$)[7]，當溫度超過居禮溫度時自發性極化就會消失，若溫度低於居禮溫度，由於鉭離子 Ta^{5+} 與鋰離子 Li^+ 的不對稱排列，使自發性極化現象的發生，極化之正向為+Z 軸，此時存在電光、壓電等效應，稱為鐵電相(ferroelectric phase)，如圖 1-1 (a)所示，但當溫度高於居禮溫度時，鉭離子與鋰離子的不對稱排列會消失，鋰離子回復於氧三角平面上，極性亦隨之消失，這種狀態叫做順電相(paraelectric phase)，如圖 1-1 (b)所示。

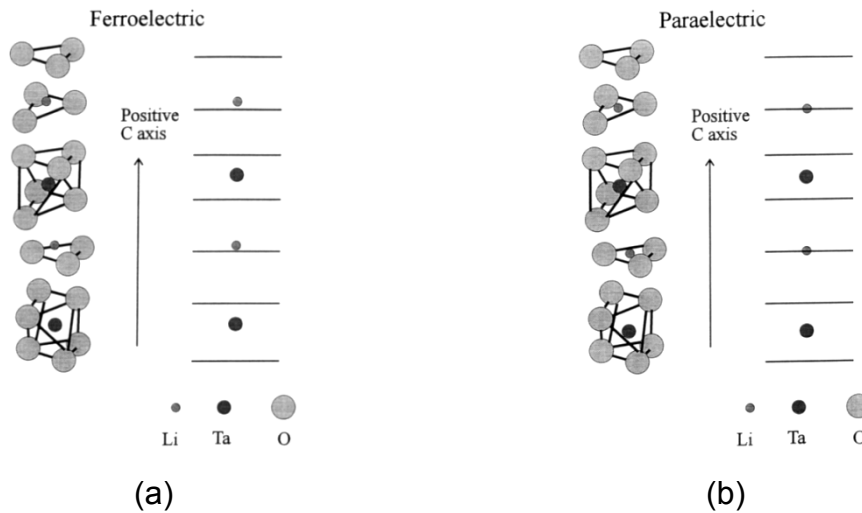


圖 1-1 鉭酸鋰的晶體結構(a)鐵電相(b)順電相

我們在選擇非線性晶體時，必須選擇非線性係數較大的材料，因為直接關係到轉換效率，還有抗光折變(photorefractive effect)能力也是我們必須所考慮因素之一。考量以上條件，選擇以共融組成鉭酸鋰(Congruent Lithium Tantalate, CLT)做為非線性頻率轉換之晶體。雖然近年來，等化學計量比-鉭酸鋰(Stoichiometric Lithium Tantalate, SLT)以及摻氧化鎂-等化學計量比-鉭酸鋰，已被成功地生長出來，兩者皆具有較好的抗光折變效應(anti-photorefractive effect)及較高的抗損害閾值(anti-damage threshold)，但其價格昂貴許多。

第二章 非線性光學與準相位匹配原理

2.1 基本方程式

光場在非線性材料中傳播，可以用下列波動方程式表示：

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} = \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{P}_N \quad (2.1)$$

\vec{P}_N : 為非線性極化

μ_0 : 為真空中的磁導係數

ε : 為介質中的介電常數

如果只考慮第二階的非線性係數，可寫成

$$\vec{P}^{(2)}(t) = \varepsilon_0 \chi^{(2)} \vec{E}(t)^2 \quad (2.2)$$

係數 $\chi^{(2)}$ 大小與非線性材料有關，為三階張量，僅存在於非中心對稱 (non-centro-symmetric) 的晶體中，是造成非線性頻率轉換最重要的參數。

假設光為平面波在晶體中沿 +Z 方向做傳播，可用(2.3)表示

$$\vec{E}(z, t) = \frac{1}{2} [\vec{E}(z, \omega) e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{z})} + c.c.] = \frac{1}{2} [\vec{E}(z, \omega) e^{j\omega t} + c.c.] \quad (2.3)$$

$$\vec{P}_N(z, t) = \frac{1}{2} [\vec{P}_N(z, \omega) e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{z})} + c.c.] = \frac{1}{2} [\vec{P}_N(z, \omega) e^{j\omega t} + c.c.] \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{\vec{E}}}{\partial t^2} = -\frac{1}{2} \omega^2 \overline{\vec{E}} e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{z})} + c.c. \quad (2.5)$$

$$\nabla^2 \tilde{\vec{E}} = \frac{\partial^2 \tilde{\vec{E}}}{\partial z^2} = \left[\frac{1}{2} \frac{\partial^2 \overline{\vec{E}}}{\partial z^2} - jk \frac{\partial \overline{\vec{E}}}{\partial z} - \frac{1}{2} k^2 \overline{\vec{E}} \right] e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{z})} + c.c. \quad (2.6)$$

假設緩慢變化之振幅 (Slowly Varying Envelope Approximation,

$$\text{SVEA}) \left| \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} \right| \ll \left| k \frac{\partial E}{\partial z} \right| \text{可得到(2.7)}$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{\vec{E}}}{\partial z^2} \approx \left[-jk \frac{\partial \overline{\vec{E}}}{\partial z} - \frac{1}{2} k^2 \overline{\vec{E}} \right] e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{z})} + c.c. \quad (2.7)$$

將(2.3)(2.4)(2.5)(2.7)代入(2.1)得到

$$\frac{\partial \overline{\vec{E}}_\omega}{\partial z} = -j \frac{d_{\text{eff}} \omega}{c_0 n_\omega} \overline{\vec{E}}_{2\omega} \overline{\vec{E}}_\omega^* e^{-j(\vec{k}_{2\omega} - 2\vec{k}_\omega) \cdot \vec{z}} \quad (2.8)$$

\vec{P}_N 針對二階非線性極化可寫成

$$\vec{P}_N(z, \omega) = c^{(2)} \varepsilon_0 \sum_{j,k} \chi_{ijk}(-\omega; \omega_1, \omega_2) \hat{E}_j(z, \omega_1) \hat{E}_k(z, \omega_2) \quad (2.9)$$

當 $\omega = \omega_1 + \omega_2$, $c^{(2)} = \begin{cases} 1, & \omega_1 \neq \omega_2 \\ 0.5, & \omega_1 = \omega_2 \end{cases}$, 針對二倍頻我們習慣寫成

$\chi_{ijk}(2\omega; \omega, \omega) = 2d_{ijk}(2\omega; \omega, \omega)$, 所以 1/2 在二倍頻方式式中, 最後會被消

去。

2.2 二倍頻(Second Harmonic Generation, SHG)

二倍頻為加總兩顆存在的光子($\omega + \omega = 2\omega$)，可看到圖 2-1 倍頻過程中，頻率轉換的結果。其非線性極化可代入(2.9)得到(2.10)

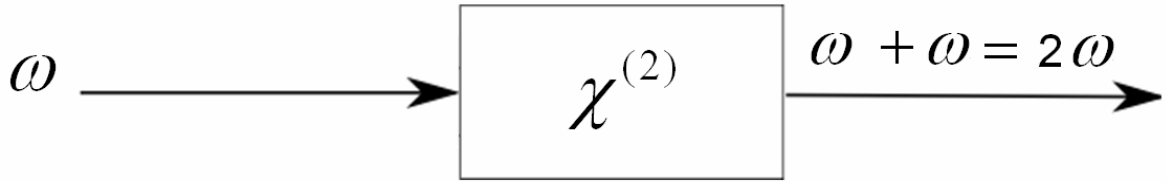


圖 2-1 倍頻

$$\vec{P}_{2\omega}(z, 2\omega) = \varepsilon_0 d_{eff} \vec{E}_\omega \vec{E}_\omega e^{-j2\vec{k}_\omega \cdot \vec{z}} \quad (2.10)$$

基頻光極化可表示為

$$\vec{P}_\omega(z, \omega) = 2\varepsilon_0 d_{eff} \vec{E}_{2\omega} \vec{E}_\omega^* e^{-j(\vec{k}_{2\omega} - \vec{k}_\omega) \cdot \vec{z}} \quad (2.11)$$

d_{eff} 大小決定波長與相位匹配情況，並且 $k_{2\omega} = \frac{2\pi}{\lambda_{2\omega}} n_{2\omega} = 2 \frac{2\pi}{\lambda_\omega} n_{2\omega}$ 。

把(2.10)代入(2.8)得到二倍頻方程式:

$$\frac{\partial \vec{E}_{2\omega}}{\partial z} = -j \frac{d_{eff} \omega}{c_0 n_{2\omega}} \vec{E}_\omega^2 e^{-j(2\vec{k}_\omega - \vec{k}_{2\omega}) \cdot \vec{z}} \quad (2.12)$$

把(2.11)代入(2.8)得到基頻光方程式:

$$\frac{\partial \vec{E}_\omega}{\partial z} = -j \frac{d_{eff} \omega}{c_0 n_\omega} \vec{E}_{2\omega} \vec{E}_\omega^* e^{-j(\vec{k}_{2\omega} - 2\vec{k}_\omega) \cdot \vec{z}} \quad (2.13)$$

假設基頻光和倍頻光在相同的方向傳遞如果 $\Delta \vec{k} \cdot \vec{z} = (\vec{k}_{2\omega} - 2\vec{k}_\omega) \cdot \vec{z} = 0$ ，則為同一直線的相位匹配情況(collinear phase-matching condition)。

2.3 和頻(Sum Frequency Generation, SFG)

和頻是利用存在的光子 ω_1 和 ω_2 產生光子 ω_3 ，可看到圖 2-2 和頻過程中，頻率轉換的結果。

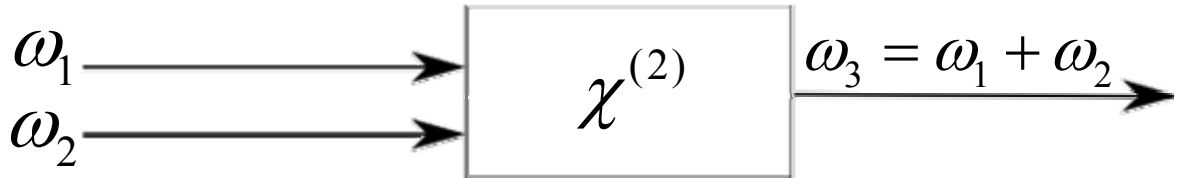


圖 2-2 和頻

$$\frac{\partial E_{\omega_1}}{\partial z} = -j \frac{d_{eff} \omega_1}{c_0 n_{\omega_1}} \bar{E}_{\omega_3} \bar{E}_{\omega_2}^* e^{-j\Delta\bar{k}\cdot\bar{z}} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \bar{E}_{\omega_2}}{\partial z} = -j \frac{d_{eff} \omega_2}{c_0 n_{\omega_2}} \bar{E}_{\omega_3} \bar{E}_{\omega_1}^* e^{-j\Delta\bar{k}\cdot\bar{z}} \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial \bar{E}_{\omega_3}}{\partial z} = -j \frac{d_{eff} \omega_3}{c_0 n_{\omega_3}} \bar{E}_{\omega_1} \bar{E}_{\omega_2} e^{j\Delta\bar{k}\cdot\bar{z}} \quad (2.16)$$

$$\Delta\bar{k} = \bar{k}_{\omega_3} - \bar{k}_{\omega_1} - \bar{k}_{\omega_2} = 2\pi \left(\frac{n_3}{\lambda_3} - \frac{n_1}{\lambda_1} - \frac{n_2}{\lambda_2} \right) \quad (2.17)$$

在(2.17)中，可以注意到 \bar{k}_{ω_1} 、 \bar{k}_{ω_2} 、 \bar{k}_{ω_3} 不一定都會在同個方向，在相位匹配的情況下 $\Delta\bar{k} = \bar{k}_{\omega_3} - \bar{k}_{\omega_1} - \bar{k}_{\omega_2} = 0$ ，在我們實驗的條件下， \bar{k}_{ω_1} 、 \bar{k}_{ω_2} 、 \bar{k}_{ω_3} 在同一直線且在+Z 方向傳播。

差頻為高頻的光子 ω_3 與低頻的光子 ω_1 ，產生低頻的差頻光子 $\omega_2 = \omega_3 - \omega_1$ ，可參考圖 2-3 差頻，而差頻的其中一個例子就是光參振盪器。差頻的方程式與和頻的方程式大同小異，在這邊就不多做描述。

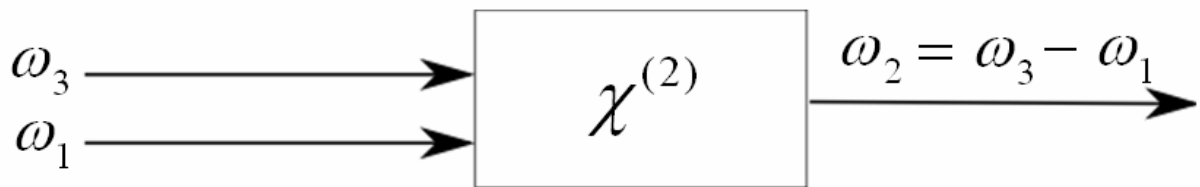


圖 2-3 差頻



2.4 準相位匹配(Quasi-Phase-Matching, QPM)

在 1962 年，哈佛大學 Bloembergen 教授提出準相位匹配的概念。透過對晶體極化週期性調變，提供入射光進行非線性轉換頻率所需之特定大小的光柵動量，避免因相位不匹配，造成頻率轉換的能量無法持續累積，

圖 2-4 為準相位匹配結構。

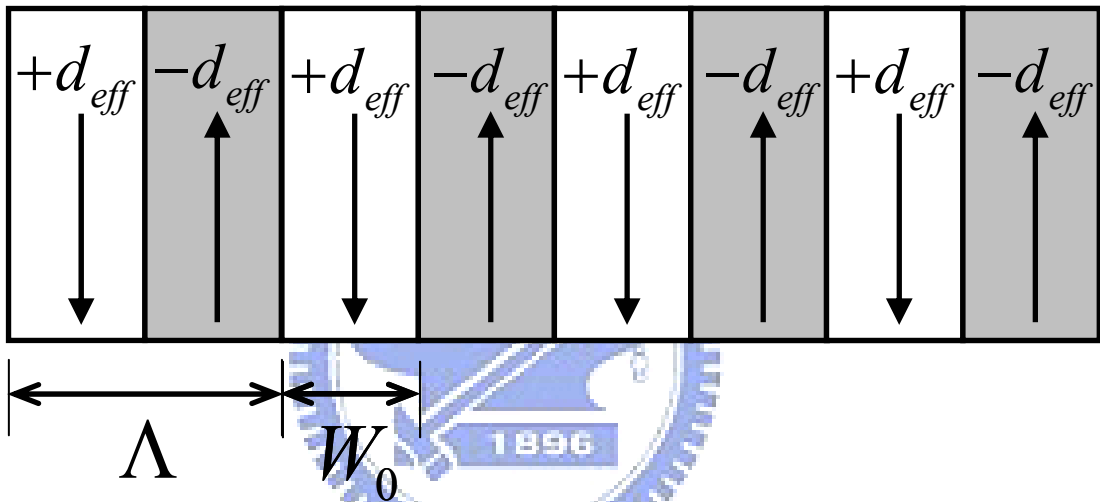


圖 2-4 準相位匹配結構示意圖

W_0 為正或負極化反轉週期的寬度， d_{eff} 的正或負為極化的向量大小， $D = \frac{W_0}{\Lambda}$ 稱為 **duty-cycle**， Λ 是空間上晶體極化調變的週期。經過調變後的相位差修正量令為 Δk_q ，與(2.17)相比，多出一可調變的 k_m 項。如下所示：

$$\Delta k_q = k_3 - k_2 - k_1 - k_m = 2\pi \left(\frac{n_3}{\lambda_3} - \frac{n_1}{\lambda_1} - \frac{n_2}{\lambda_2} - \frac{m}{\Lambda} \right) \quad (2.18)$$

當 $\Delta k_q = 0$ ，稱為相位匹配條件， $m = 1, 2, 3 \dots$ 為第幾階相位匹配。

2.5 隨機準相位匹配(Random-Quasi-Phase-Matching, RQPM)[8]¹

週期性極化反轉之非線性晶體為具有一系列相互交錯的極化向量排列而成之晶體(參考圖 2-3)，為了符合相位匹配條件 $\Delta k_q = 0$ 。在晶體的製作過程中，會有一些無法避免的隨機誤差，造成極化週期(Λ)、正或負極化反轉週期寬度(w_0)有微小的差異(參考圖 2-5)，這小節主要是介紹非預期的極化向量週期改變所造成的影響與可應用的範圍。

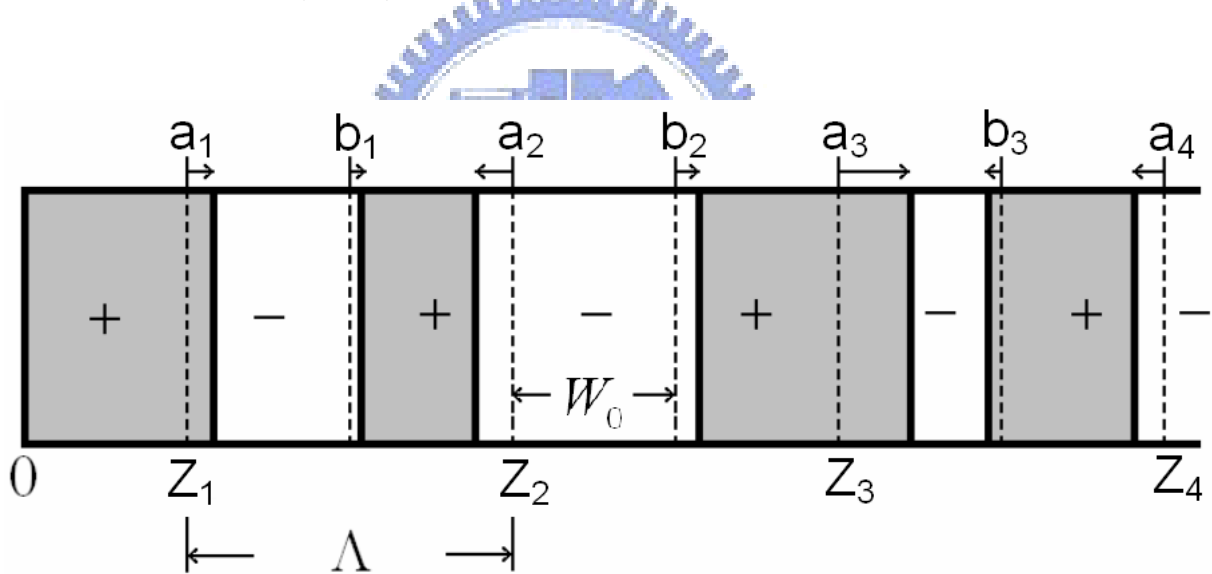


圖 2-5 極化反轉週期

Λ :理想極化週期

w_0 :理想正或負極化反轉週期寬度

Z_m :理想極化週期位置

a_m, b_m :實際週期與理想週期的隨機誤差大小

¹感謝人在麻省理工的賴建任學長提供隨機相位匹配教學與模擬程式。

如果極化區域沒有任何的誤差與我們設計的週期全部相同，極化函數可表示為 $d_{ideal}(z)$ ，如果考慮製程上的誤差，極化函數可表示為 $d(z)$ ，製程與理想極化週期的差異為 $d_{rand}(z) \equiv d(z) - d_{ideal}(z)$ (參考圖 2-6)。

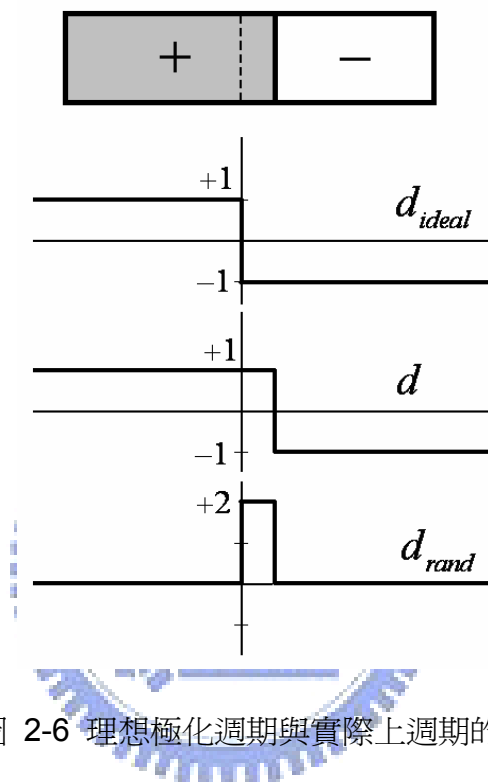


圖 2-6 理想極化週期與實際上週期的差異

如果晶體週期沒有誤差，則轉換的光強度會在傳播方向做週期性的振盪，亦即轉換的光會週期的轉回成激發光，而這些 d_{rand} 的出現使得這個反向轉換變得不完全，造成轉換的光會逐漸累積變大而得到比預期要大的轉換效率。

圖 2-7 為模擬隨機相位匹配的結果，輸入實驗室目前擁有的晶體規格參數，晶體長度為 5 cm，材料為鋇酸鋰晶體，週期為 $28.7 \mu\text{m}$ ，選擇非相

位匹配的波長 1800 nm 當作基頻光，模擬倍頻光的能量大小，虛線為模擬理想上的週期得到的結果，實線為代入極化週期標準差 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ ，極化反轉寬度標準差 $2.6\text{ }\mu\text{m}$ ，此標準差大小接近晶體的實際標準差大小，模擬結果可以看到圖 2-6 實線，二倍頻的能量輸出與晶體距離的關係，我們可以發現理想週期的二倍頻能量非常弱，呈現週期性的轉換，參考圖 2-6 虛線，隨機相位匹配則有較大的轉換效率，與隨機誤差的分布模式息息相關，使用不同的分布模式，相同的標準差去模擬，發現得到結果差異頗大，所以如果需要模擬實驗上的值，必須代入晶體實際上的週期分布，才能得到較理想的模擬值。

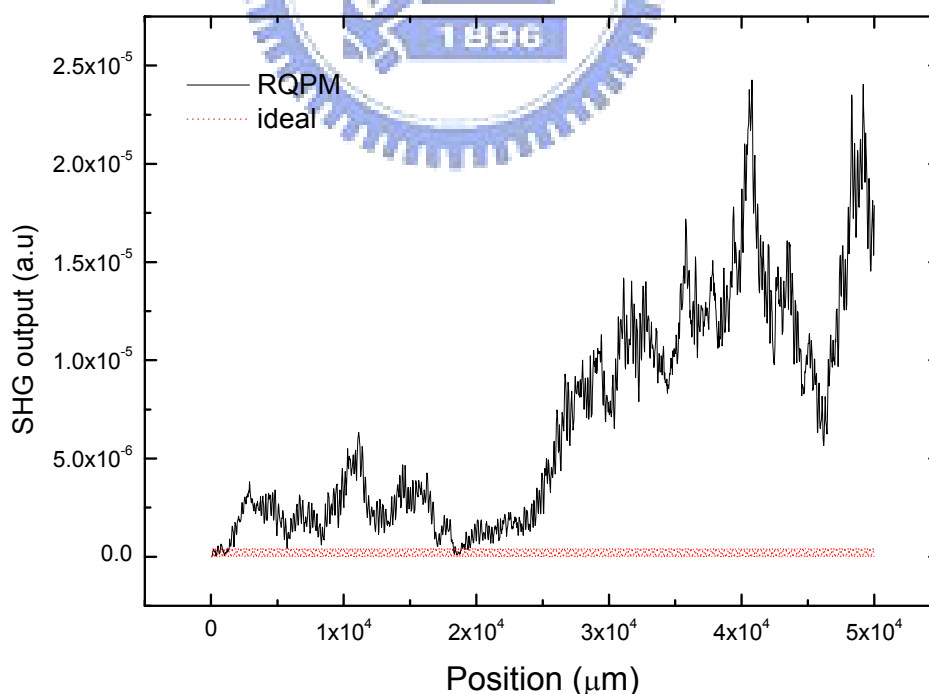


圖 2-7 理想週期與有誤差週期的能量轉換與晶體位置之情形

2.6 鉬酸鋰的折射係數

鉬酸鋰的色散方程式折射係數與溫度(T)、波長(λ)的關係如下[6]，溫度範圍 30 ~ 200 °C、波長範圍 0.39 ~ 4.1 μm 。

Sellmeier equation of SLT:

$$n_e^2(\lambda, T) = A + \frac{B + b(T)}{\lambda^2 - [C + c(T)]^2} + \frac{E}{\lambda^2 - F^2} + \frac{G}{\lambda^2 - H^2} + D\lambda^2 \quad (2.19)$$

Sellmeier equation of CLT:

$$n_e^2(\lambda, T) = A + \frac{B + b(T)}{\lambda^2 - [C + c(T)]^2} + \frac{E}{\lambda^2 - F^2} + D\lambda^2 \quad (2.20)$$

A, B, C, D, E, F, G, H: 為常數

c, b: 為溫度相關的係數

T: 為攝氏溫標

λ : 為波長 (μm)

表格 2-1 Sellmeier coefficients for CLT and SLT[6]

Coefficient	SLT	CLT
A	4.502483	4.514261
B	0.007294	0.011901
C	0.185087	0.110744
D	-0.02357	-0.02323
E	0.073423	0.076144
F	0.199595	0.195596
G	0.001	
H	7.99724	
B(T)	$3.483933 \times 10^{-8} \times (T + 273.15)^2$	$1.82194 \times 10^{-8} \times (T + 273.15)^2$
C(T)	$1.607839 \times 10^{-8} \times (T + 273.15)^2$	$1.5662 \times 10^{-8} \times (T + 273.15)^2$

2.7 掠射光參振盪器(Grazing-incidence OPO)[9]

光參振盪器的基本現象來自於光參產生 (Optical Parametric Generation, OPG)。大部分命名短波長的輸出光子為訊號光(signal)，長波長的輸出光子為閒置光(idler)，參考下圖。

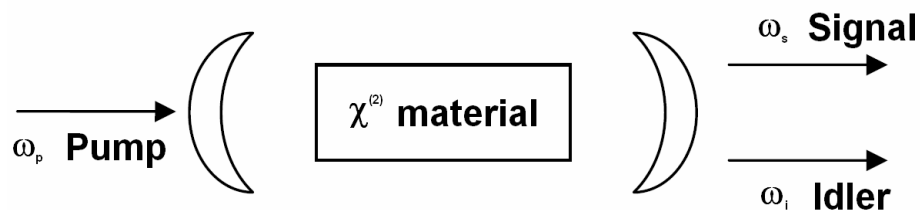


圖 2-8 光參振盪器架構示意圖

因具有波長可調範圍廣、架構簡單等優點，因此被廣泛的研究與應用在許多領域，例如光譜學、遙測感應技術、以及光通訊領域，在生活中可應用於檢測氣體，例如:甲烷(CH_4)和氨氣(NH_3)等。

我們實驗使用的掠射光參振盪器參考圖 2-9，主要好處是線寬 (linewidth)較窄，線寬的大小決定於光柵的入射角度與光柵寬度，入射角愈接近 90° ，線寬越窄，入射角小於 90° 越多，線寬越寬，當實驗要求線寬時，掠射光參振盪器是其中一種選擇。此種光參振盪器如果要微調波長可以選擇旋轉共振腔反射鏡的角度，如果要大範圍調整波長，可以變化晶體的溫度後，調整共振腔銀鏡的角度找到新的共振波長位置。參考圖 2-10 光參振盪器輸出波長與溫度關係圖。

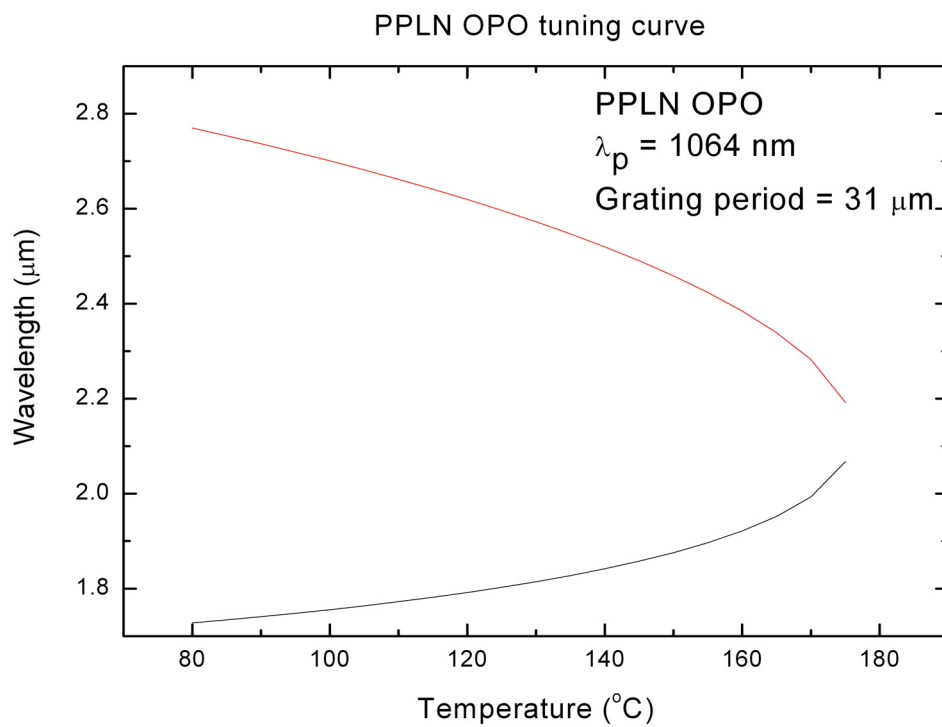
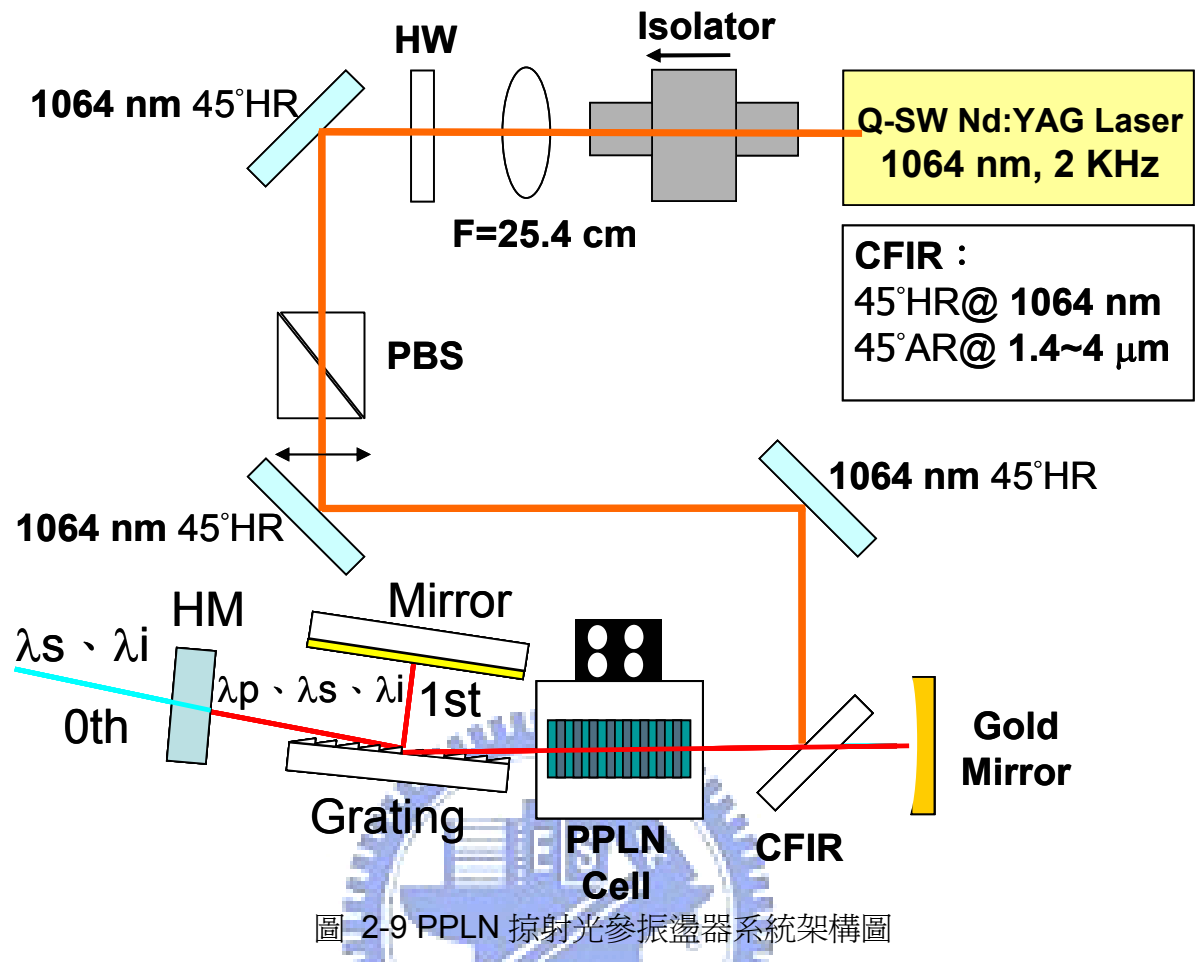


圖 2-10 光參振盪器輸出波長與溫度之關係

我們在做多段式非線性晶體實驗時，由於晶體週期會有製程、色散方程式折射係數上的誤差，必須調整入射泵浦光的波長，找到其中一個波長的轉換效率是比較好的，所以我們選擇用光參振盪器當作光源，其優點為光參振盪器很容易的可以調整波長的特性，表 2-2 為掠射光參振盪器所使用的泵浦光特性，表 2-3 為掠射光參振盪器所使用的晶體規格。

表格 2-2 泵浦光特性

波長	重複率	脈衝寬度	空間模態	光腰直徑	脈衝能量	峰值強度
1064 nm	2 kHz	19 ns	TEM ₀₀	250 μm	1.5 mJ	125 MW/cm ²

表格 2-3 光參振盪器使用晶體規格

材料	晶體尺寸(mm)	光柵週期	端面鍍膜	閒置光	操作溫度
CLN	50(L)	31 μm	1064 nm(R<0.3%)	1.48 ~ 2.06 μm	80 ~ 200 °C
	7.9(W)		2406 nm(R<0.3%)	訊號光	
	1(T)		1907 nm(R<1.5%)	2.19 ~ 3.75 μm	

第三章 多段式非線性晶體

3.1 介紹

透過光和物質的作用來研究或者控制物質裡的電子運動，需要阿秒 (attosecond) 時寬的雷射脈衝，要得到阿秒時寬的脈衝，必須發展產生超寬頻頻譜之方法以及合成波形的技術，一般來說有一些途徑可以讓我們產生 single-cycle 至 sub-cycle pulses 第一種方法由兩台奈秒雷射激發絕熱拉曼同調光所產生之在頻域上極寬廣之頻率光梳來合成[10][11]，另一種方法是由兩台鎖相飛秒雷射產生同調相位光脈衝[12]。改良後面這種方法，混合飛秒脈衝雷射，同時激發光參振盪器，產生極寬廣之光譜[13]，這些過程相當複雜且必須有良好且穩定可控制載波相位的傅立葉波形，才有方便且實際上的應用。本章節將介紹只利用一塊多段式非線性晶體來達到多諧波產生 (multiple harmonics generation)。

3.2 多段式晶體材料與泵浦光的選擇

多段式晶體的設計並不容易，不過其構造簡單，使用方便，我們會在後面一一介紹，多段式晶體因為使用相同的泵浦光，所以二、三、四、五倍頻所產生光的相位都是相關的，本實驗使用之晶體設計為供波長 2406 nm 為泵浦光入射，主要是因為實驗室目前現有波長為 2406 nm 光源，還有光參振盪器產生可調且中心波長在 2406 nm 附近之光源等因素，故第一階段實驗選擇了針對波長 2406 nm 之光源，所設計晶體來做測試。

在材料方面，會選擇鉬酸鋰作為準相位匹配的材料，主要是因為其具有很大的有效非線性係數(d_{eff})且相較於鋁酸鋰有較寬廣的可穿透光範圍(280 nm ~ 5200 nm)，抗光折變的能力也較比好，製作費用相對也比較便宜(相對於 SLT、SLN)。

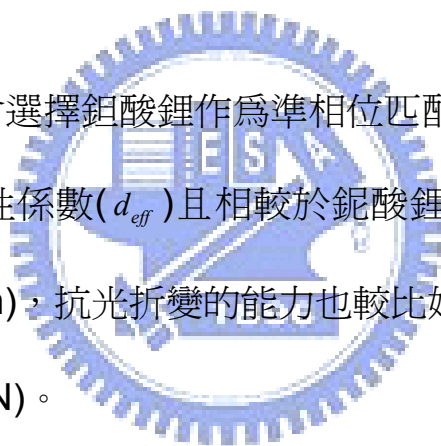


圖 3-1 描述多段式晶體各段的變化過程產生多倍頻效果，泵浦光選擇 2406 nm，使用掠射光參振盪器產生的奈秒(nanosecond)光源當作泵浦光，主要關鍵技術在於非線性晶體的製作與設計，四段週期必須操作在相同溫度且同時滿足各個諧波相位匹配條件。

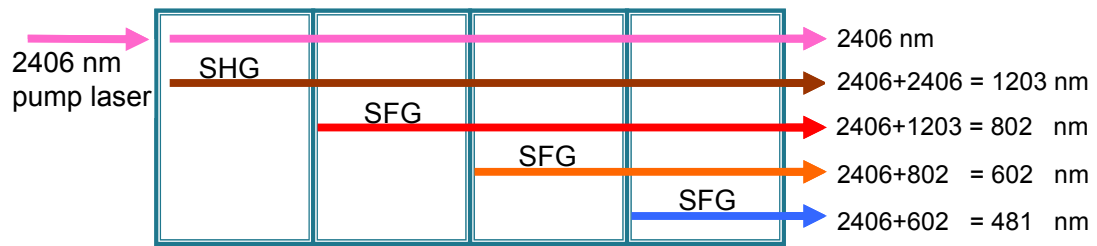


圖 3-1 多段式晶體的多倍頻過程



3.3 計算鉭酸鋰晶體週期

在製作晶體時，如果只需要製作一種週期在一塊晶體裡面，設計出來的準相位匹配溫度與實際溫度通常有 $5 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 之誤差。在此段舉一個例子，參考圖 3-2，一塊 1064 nm 倍頻晶體，當初在設計時把準相位匹配的溫度設計在 $130 \text{ }^\circ\text{C}$ ，但實驗結果卻在 $145 \text{ }^\circ\text{C}$ ，會造成這樣的結果可能是因為 Sellmeier equation、光罩、製程等誤差所造成。

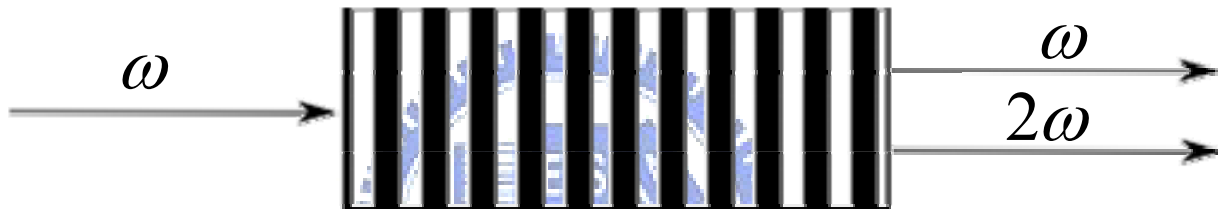


圖 3-2 在單一週期中，倍頻晶體示意圖

由以前的經驗可以知道製作多段式晶體是很困難的，因為要把不同的波長轉換週期製作在同一塊晶體上面，且每段準相位匹配的溫度又要在相同的溫度發生，首先我們利用 Sellmeier equation(3.1)與準相位匹配條件(3.2)，計算出不同波長轉換的晶體週期，在相同的波長轉換條件之下，不同溫度的相位匹配週期差異很小，以波長 $2406 + 2406 \rightarrow 1203 \text{ nm}$ 來舉例， $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 與 $125 \text{ }^\circ\text{C}$ 的週期分別為 $34.0906 \text{ }\mu\text{m}$ 與 $34.0491 \text{ }\mu\text{m}$ ，相差 $0.0415 \text{ }\mu\text{m}$ ，也就是只有 41.5 nm 的差異，不管在 Sellmeier equation 或是製程上都必須非常的精準才可能做到，再舉一個例子，以波長 $2406 + 481 \rightarrow 401 \text{ nm}$ 來說， $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 與 $125 \text{ }^\circ\text{C}$ 的週期分別為 $5.0293 \text{ }\mu\text{m}$ 與 5.0153

μm ，相差 $0.014 \mu\text{m}$ ，也就是只有 14 nm 的差異，參考表格 3-1 波長與溫度在 CLT 材料中的週期，使用 Sellmeier equation 與準相位匹配條件計算得到的結果，也就是說 Sellmeier equation、光罩、製程的誤差必須小於 14 nm ，以現在的技術來說，要製作這麼精準是非常困難的，我們必須利用設計許多不同週期的方式，提高實驗上的成功率。圖 3-3 在多週期中，多倍頻晶體示意圖，顯示多段式晶體轉換過程，後面小節我們會討論如何解決誤差所造成的問題。以下方程式為我們計算週期時，必須考慮的條件。

表格 3-1 波長轉換與不同溫度在 CLT 材料中的週期

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	50 $^{\circ}\text{C}$	75 $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$	125 $^{\circ}\text{C}$	150 $^{\circ}\text{C}$
波長轉換 (nm)	Period (μm)	Period (μm)	Period (μm)	Period (μm)	Period (μm)
2406.6+2406.6 \rightarrow 1203.3	34.1658	34.1295	34.0906	34.0491	34.0051
2406.6+1203.3 \rightarrow 802.20	22.4718	22.4245	22.3739	22.32	22.2629
2406.6+802.20 \rightarrow 601.65	13.2058	13.1729	13.1377	13.1003	13.0606
2406.6+601.65 \rightarrow 481.32	8.0321	8.0154	7.9935	7.9681	7.9455
2406.6+481.32 \rightarrow 401.10	5.0547	5.0424	5.0293	5.0153	5.0005

Sellmeier equation of CLT:

$$n_e^2(\lambda, T) = A + \frac{B + b(T)}{\lambda^2 - [C + c(T)]^2} + \frac{E}{\lambda^2 - F^2} + D\lambda^2 \quad (3.1)$$

QPM OPO condition equation:

$$\Delta K = \frac{1}{\Lambda} \left[\frac{n_e(\lambda_{\text{pump}})}{\lambda_{\text{pump}}} - \frac{n_e(\lambda_{\text{signal}})}{\lambda_{\text{signal}}} - \frac{n_e(\lambda_{\text{idler}})}{\lambda_{\text{idler}}} \right] = 0 \quad (3.2)$$

$$(3.4) \alpha、\beta \text{ 爲熱膨脹係數，} T \text{ 爲晶體的溫度，} \alpha = 1.6 \times 10^{-5}、\beta = 7 \times 10^{-9}，$$

由於影響約在數奈米左右，週期設計目前暫時不考慮熱膨脹的影響。(3.3)

在實驗時，經常測量訊號光的波長反推閒置光的波長或是測量閒置光的波長反推訊號光的波長，在這邊列出，以方便使用。

Energy conservation equation:

$$\frac{1}{\lambda_{pump}} = \frac{1}{\lambda_{signal}} + \frac{1}{\lambda_{idler}} \quad (3.3)$$

LiTaO₃ crystal thermal expansion equation:

$$\Lambda(T) = \Lambda(25^\circ C)[\alpha(T - 25^\circ C) + \beta(T - 25^\circ C)^2] \quad (3.4)$$

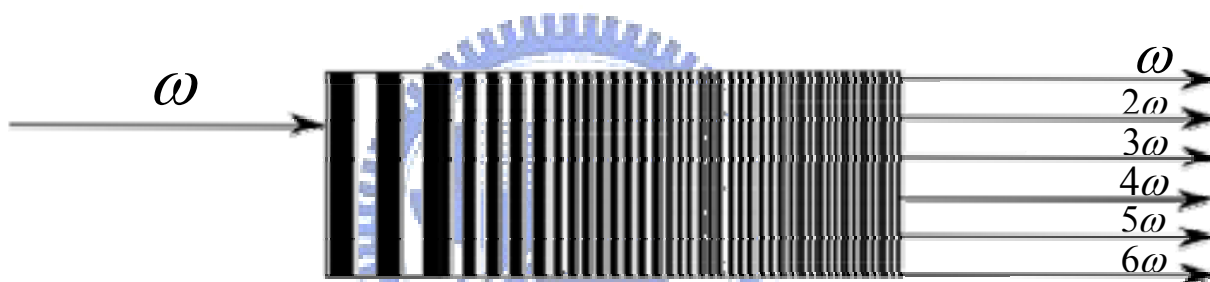


圖 3-3 在多週期中，多倍頻晶體示意圖。

3.4 多段式晶體的設計

要如何解決誤差所造成相位匹配溫度不一致的問題，經過討論與研究，大致上有兩種方式，第一種方式是計算出 50 ~ 100 °C 準相位匹配的週期，使用多通道(multi-channel) 的方式設計晶體週期，在單一通道中，單一諧波只設計一種週期，測量出不同週期之間準相位匹配的溫度，最後把實驗上得到的週期重新製作在同一片晶體上面，參考圖 3-4。

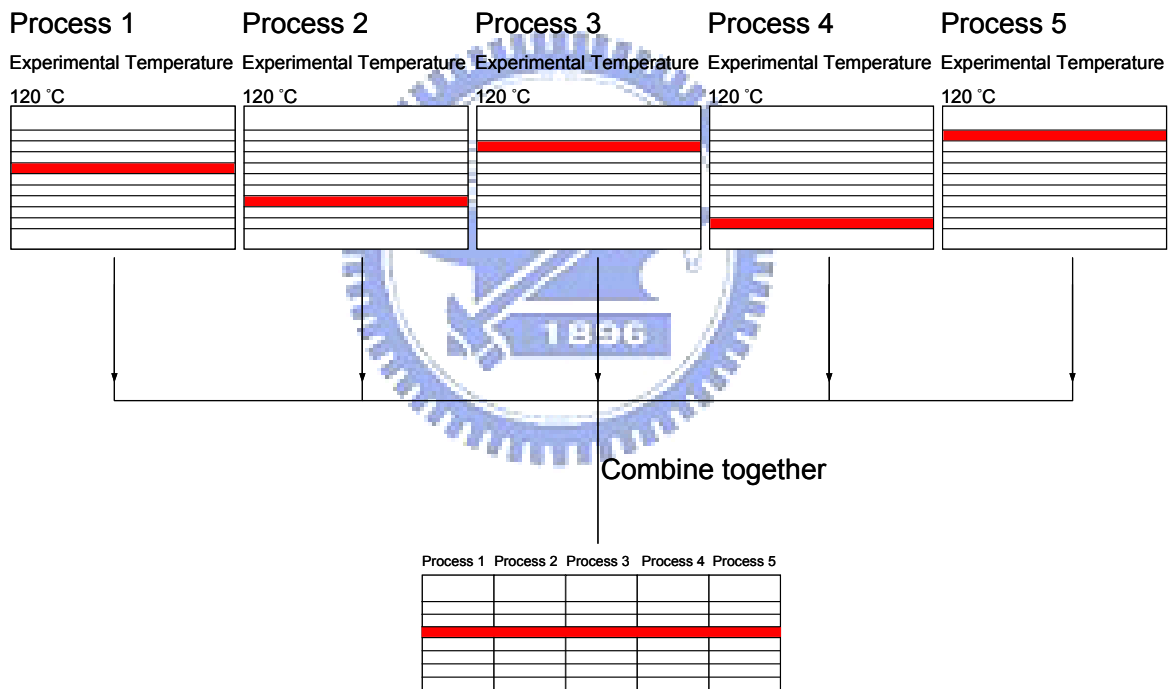


圖 3-4 先找到準確的相位匹配週期與溫度關係，再整合到同一塊晶體(粗線區表示相位匹配溫度為 120 °C 的週期之通道)

第二種方式是直接做成一塊完整的晶體參考圖 3-5，找到其中一個通道相位匹配溫度都相同，在長波長的時候，由於可接受頻寬(acceptance bandwidth)較寬與可接受溫度範圍(acceptance temperature)較大，所以可

以使用第二種方法；短波長的時候，由於可接受頻寬較窄與可接受溫度較小，所以要設計比較多種不同大小的週期，才能先找出正確的週期與溫度之間的關係，當每段週期與溫度的關係我們知道之後，最後再整合到同一塊晶體上面，所以在設計晶體時，我們必須先評估可接受溫度範圍、可接受頻寬範圍，再選擇使用哪一種方式設計晶體。在實驗中前面四個過程(2406 → 1203 → 802 → 602 → 481 nm)的週期設計是使用第二種方式，因為最小的可接受溫度都還大於 5 °C，當可接受溫度小於 5 °C 的時候，我們會建議使用方式一做設計，先找到正確的波長再整合到同一片晶片上面，這樣可以節省不必要的光罩設計。

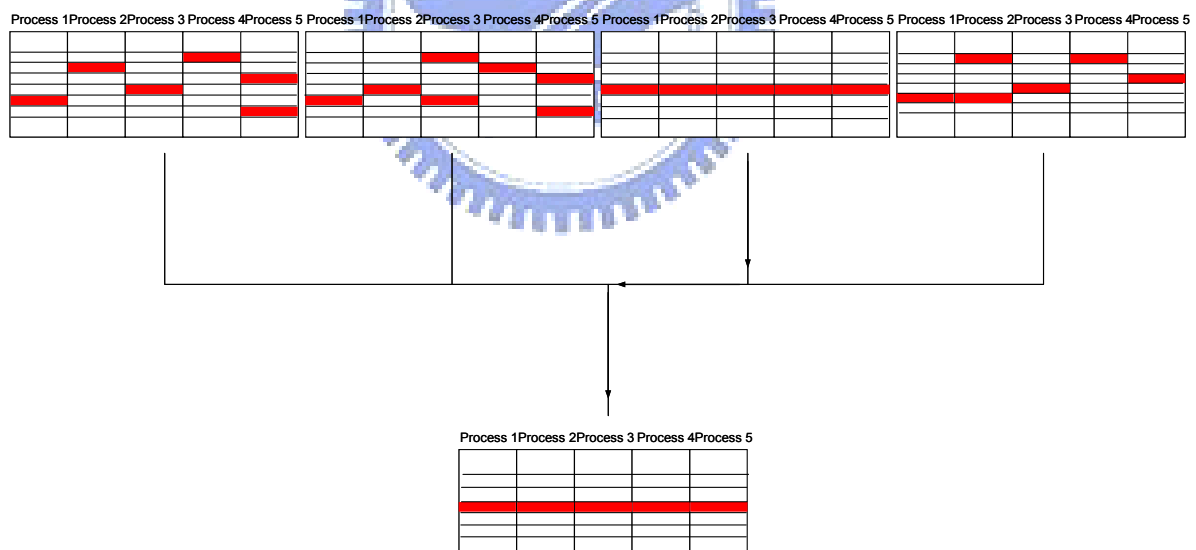


圖 3-5 直接做成一塊完整的晶體，找到其中一個通道相位匹配溫度都相同的週期(粗線區表示相位匹配溫度為 120 °C 的週期之通道)

首先我們必須要知道非線性晶體的製作過程，當我們用 Sellmeier equation(3.1)與準相位匹配條件(3.2)計算出溫度在 100 °C 時，2406 nm 倍

頻的週期在 34.0906 μm ，所以光罩設計為 34.0906 μm (在 AutoCAD 中)，但是光罩畫出來會有些微的誤差(不同機台誤差大小可能會有差異)，且 Sellmeier equation 計算出來的週期與實際的週期可能又會有誤差(例如:CLT 材料化學劑量比微小的差異)，所以我們選擇製作一個溫度範圍可以涵蓋 100 ± 50 $^{\circ}\text{C}$ 的晶體，我們可以計算出在不同溫度與不同波長中，CLT 材料每段週期的大小(參考表格 3-2)；此外在最後一段週期($2406 + 602 = 481$ nm)採用 2nd order 的設計，因為最後一段的週期最小，若採用 1st order 的設計週期大約為 8 μm 左右，晶體的製作上面會有良率的問題，使用 2nd order 其週期大約 16 μm ，使用大週期可有效提升良率，所以我們決定採用 2nd order 的設計。此外 2nd order 還有一個優點，假設 1st order 8 μm 週期可以容忍的誤差為 15 nm，而採用 2nd order 的設計可以容忍的誤差為 30 nm。然而採用 2nd order 雖有上述優點，但是其轉換效率只有 1st order 的 1/4，但為了提升成功率所以仍採用 2nd order 的設計。

表格 3-2 不同溫度在 CLT 材料中各波長轉換的週期大小

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	50	75	100	125	150
Harmonic	Domain period, μm				
$\omega + \omega \rightarrow 2\omega$	34.1658	34.1295	34.0906	34.0491	34.0051
$2\omega + \omega \rightarrow 3\omega$	22.4718	22.4245	22.3739	22.32	22.2629
$3\omega + \omega \rightarrow 4\omega$	13.2058	13.1729	13.1377	13.1003	13.0606
$4\omega + \omega \rightarrow 5\omega$	16.0642	16.3008	15.9870	15.9362	15.891

註解 pump wavelength 2406 nm

因為我們要設計大量不同的週期，所以我們採用多通道的設計，每段的長度決定於模擬多段式晶體的程式，以達到最後出來的每道光強度都接近。需要注意的一點，最後一段的 duty cycle 設計成 1:3，是因為設計成 2nd order 的關係，2nd order 的 duty cycle 在 1:3 時效率最好參考圖 3-6。

晶體規格可參考表格 3-3，晶體設計可參考圖 3-7。

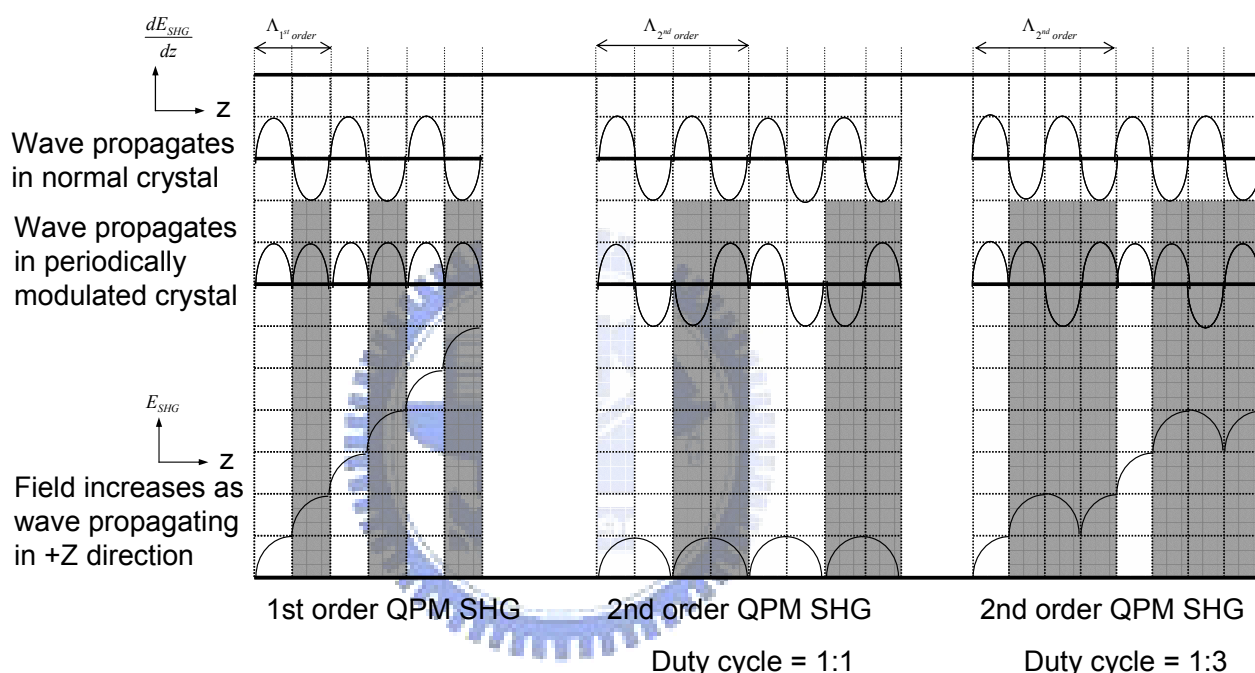


圖 3-6 比較 1st order、2nd order 的轉換效率與 duty cycle

表格 3-3 使用晶體規格

材料	晶體尺寸(mm)	泵浦光	端面鍍膜	段數	操作溫度
CLT	20(L)*12(W)*0.5(T)	2406 nm	否	四段	80 ~ 150°C

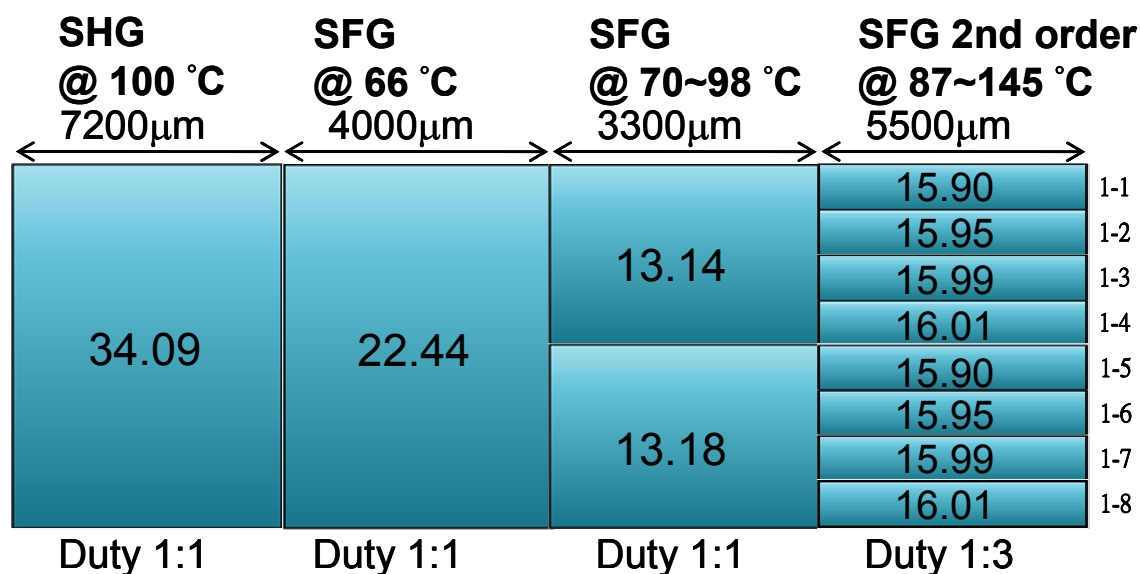


圖 3-7 設計成多週期晶體的示意圖(多片晶體中的其中一片)

我們在設計晶體的時候，選擇固定第一段週期，因為由以前的實驗知道，當週期設計在 $34.09 \mu\text{m}$ ， 2406 nm 的倍頻光準相位匹配的溫度在 120°C 附近，第二段選擇三種不同週期，第三段也選擇四種不同週期，最後一段選擇八種不同週期，排列組合總共有 96 種排列方式，一塊晶體可以畫 8 種週期，所以 12 片晶體可以畫 96 種週期，12 片即可把所有週期完成，所有週期設計可以參考表格 3-4。

表格 3-4 四段式晶體的所有週期設計

波長轉換	1203 nm	802 nm	602 nm	481 nm(2 nd)	
週期 (μm)	34.09	22.33	13.1	15.90	15.99
		22.38	13.14	15.92	16.01
		22.44	13.18	15.95	16.04
			13.22	15.97	16.07
個數	1	3	4	8	總數 96

圖 3-8 為完成的晶體，使用顯微鏡觀察的圖片，可以看出第一段到第

三段的 duty cycle 都非常接近 1:1，最後一段的 duty cycle 接近 1:3，與我們實際設計的 duty cycle 都非常接近²。

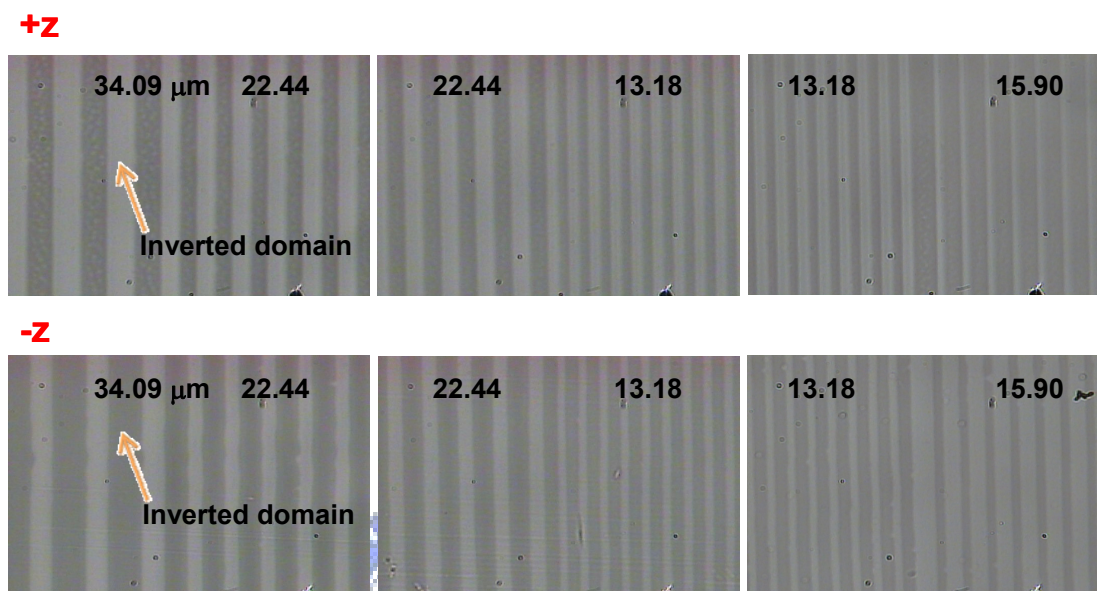


圖 3-8 在顯微鏡下面觀察每段的極化反轉情況

²感謝彭隆瀚老師與賴英耀同學幫忙製作晶體。

3.5 晶體端面研磨拋光³

晶體的端面品質非常重要，因為入射光會經過晶體端面兩次，一面損失 12.6%，兩面就只剩下所有的 76.4%，這是在理想的狀態之下，如果端面平行度不夠好，表面精細度不足，會造成更多的損耗，使轉換效率降低，圖 3-9 為拋光之後的入射端面。

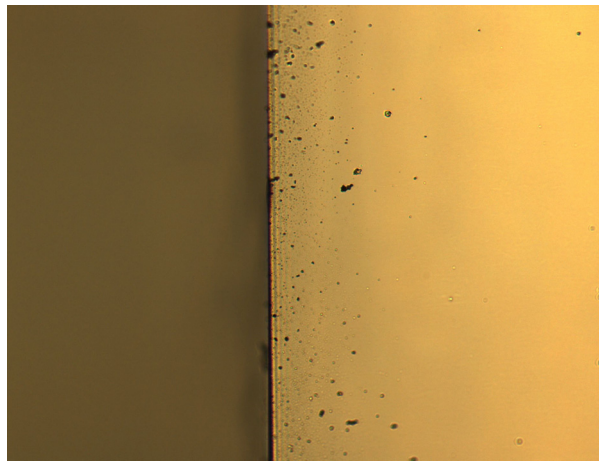


圖 3-9 拋光之後鉭酸鋰入射端面(300X)

研磨拋光使用 3M 公司生產的四種不同顆粒大小的水砂紙及氧化鋁粉末的拋光液進行研磨與拋光，先將樣品置入夾具以 52 μm 顆粒的水砂紙先將晶體形狀研磨出來，再依序以 15 μm 、9 μm 、4 μm 的水砂紙去研磨端面，水砂紙研磨完之後，使用顆粒大小 80 nm 氧化鋁粉末的拋光液在拋光皮上拋光，最後再用顯微鏡觀察端面是否平整。

³感謝彭隆瀚教授研磨拋光設備上的提供與胡益寧學長傳授我拋光的經驗與方法。

表格 3-5 研磨拋光使用的拋光液與水砂紙規格

種類	廠商	型號	顆粒大小
水砂紙	3M	240/280	52 μm
		600/1200	15 μm
		900/2500	9 μm
		#4000	4 μm
拋光液	Jeng Yueh	Polishing slurry P-1	80 nm



3.6 多段式晶體的模擬⁴

多段式晶體的模擬主要是根據(3.5)與(3.6)，在模擬程式當中，設計非線性晶體的每段長度、週期、極化反轉區域大小、泵浦光強度(intensity)、溫度等等。其計算方式假設在一個極化反轉週期中的泵浦光其強度不變，每個極化反轉週期的貢獻可用積分先做出來，然後將每個週期的貢獻累加起來得到模擬結果。

$$\text{SHG: } \frac{d\bar{E}_{2\omega}}{dz} = -j \frac{d_{\text{eff}} \omega}{c_0 n_{2\omega}} \bar{E}_\omega^2 e^{-j(2\bar{k}_\omega - \bar{k}_{2\omega}) \cdot \bar{z}} \quad (3.5)$$

$$\text{SFG: } \frac{d\bar{E}_{\omega_3}}{dz} = -j \frac{d_{\text{eff}} \omega_3}{c_0 n_{\omega_3}} \bar{E}_{\omega_1} \bar{E}_{\omega_2} e^{j(k_{\omega_3} - k_{\omega_2} - k_{\omega_1}) \cdot \bar{z}} \quad (3.6)$$

下圖三張圖顯示不同溫度各階諧波的能量轉換效率，在這邊我們設計每段相位匹配的溫度都在 100 °C，模擬參數值參考表格 3-6，改變入射能量(相當於改變強度)，可以發現各階的轉換效率大致上會隨強度越強，轉換效率越高，但如果入射光強度過強，會造成入射光能量大部分都轉換成倍頻光圖 3-10，當下一道光要繼續轉換時，因為缺少泵浦光，所以轉換效率會變低，必須選擇適當的光強度當作入射光。

⁴感謝人在異鄉唸書的賴建任同學，提供這麼方便使用的模擬程式。

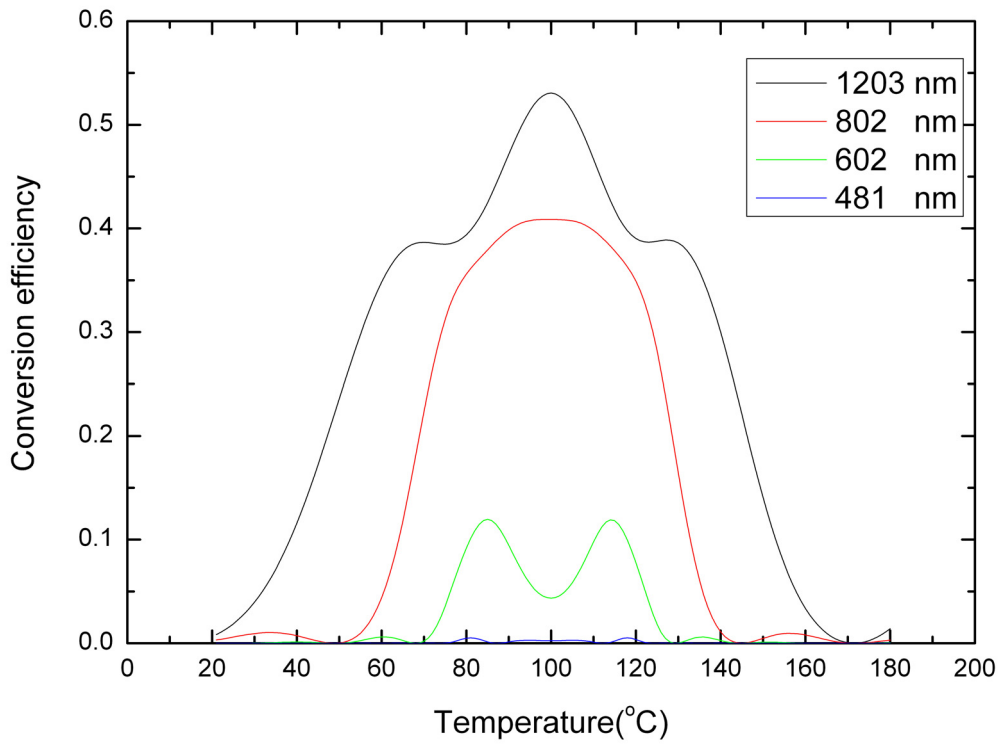


圖 3-10 當入射波長為 2406.6 nm，強度為 180 MW/cm² 時，模擬之轉換效率圖

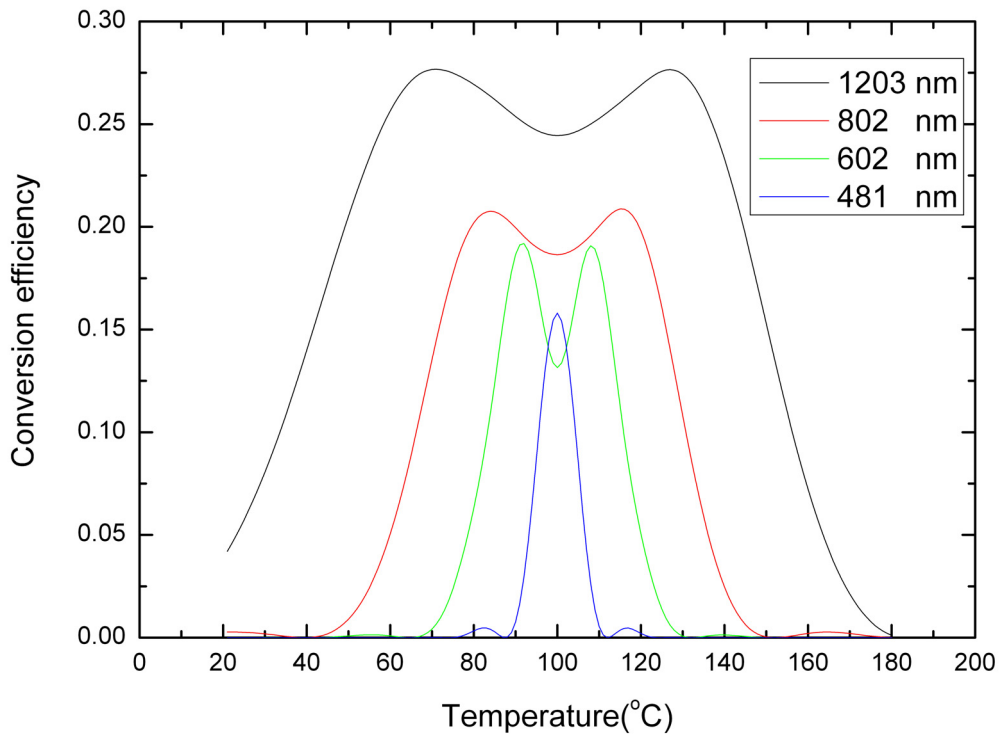


圖 3-11 當入射波長為 2406.6 nm，強度為 60 MW/cm² 時，模擬之轉換效率圖

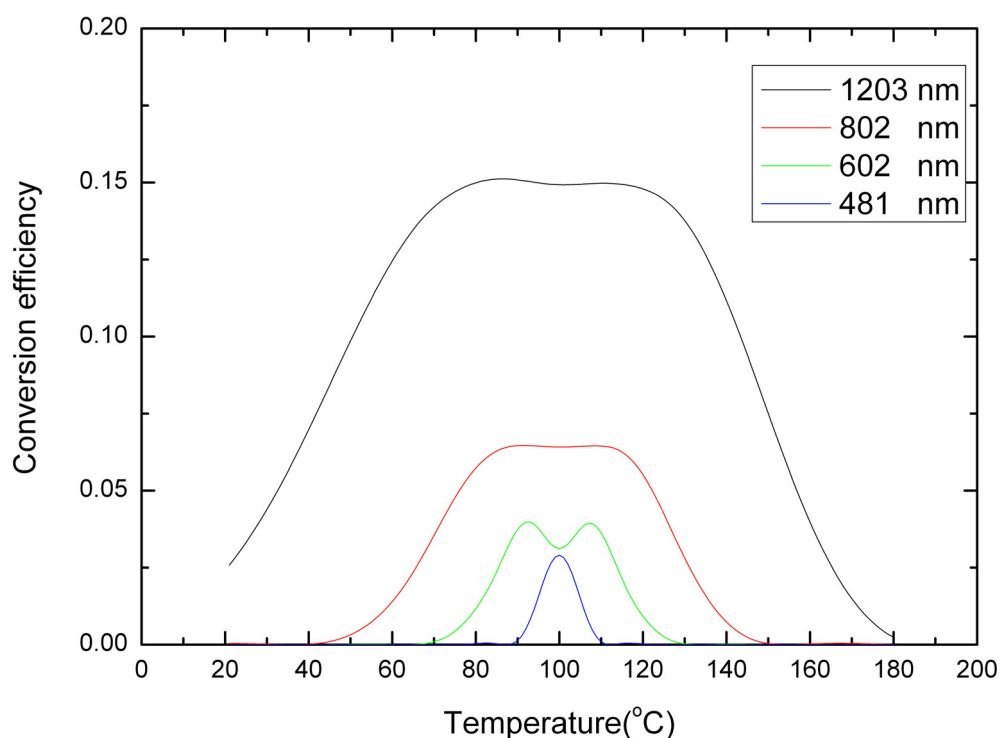


圖 3-12 當入射波長為 2406.6 nm，強度為 20 MW/cm²時，模擬之轉換效率圖

表格 3-6 模擬參數值

週期(μm)	34.0906	22.3715	13.1377	15.987
Duty cycle	50/50	50/50	50/50	25/75
長度(μm)	7200	4000	3300	5500
非線性係數(pm/V)[19]	10.7	10.7	10.7	10.7
相位匹配溫度(°C)	100	100	100	100

接下來我們可以比較圖 3-13 入射波長與第五階諧波轉換效率和相位匹配的溫度關係，也可以比較圖 3-14 入射波長與第四階諧波轉換效率和相位匹配的溫度關係，我們試著計算用不同波長的泵浦光入射，對第四階、第五階轉換效率的影響，由模擬計算可以知道入射光波長的可接受頻寬範圍大小，結果可以發現可接受頻寬第四階的範圍比第五階的範圍廣，是因為第四階波長較長，在長度相同之下可接受頻寬較寬。此外，相位匹配的

溫度會隨入射波長越長而上升。所以實驗上我們可以藉由調變這些參數(溫度、波長)來得到最佳化的結果，模擬參數值參考表格 3-6。

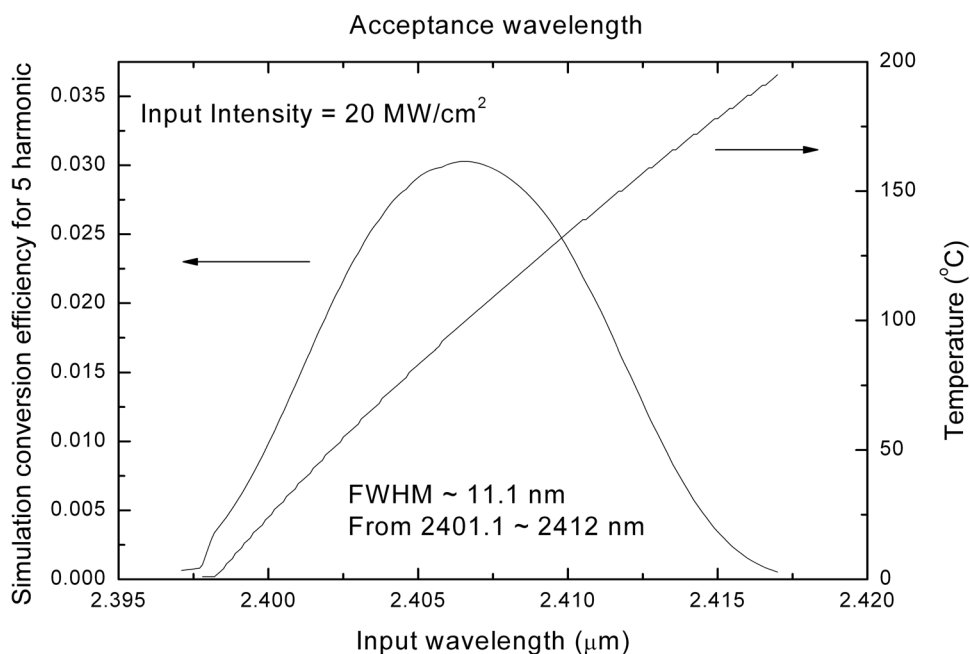


圖 3-13 入射波長與第五階諧波轉換效率以及相位匹配溫度之關係圖

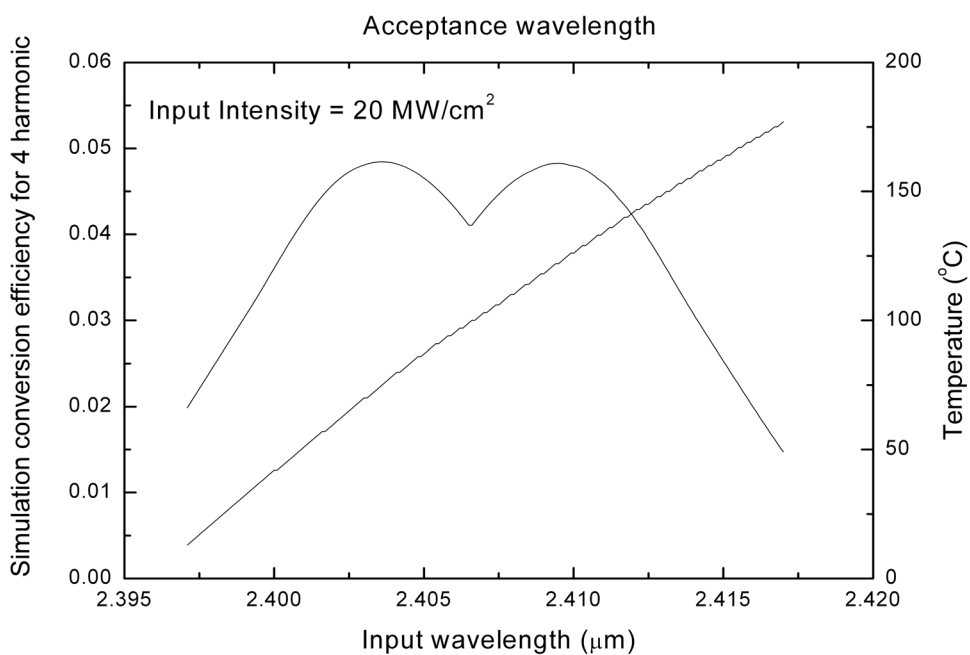


圖 3-14 入射波長與第四階諧波轉換效率以及相位匹配溫度之關係圖

3.7 多段式晶體的實驗

把晶片週期經過設計、模擬分析，使用 AutoCAD 畫出我們所需要的設計圖，送去交大奈米中心製作成光罩(mask)之後，再請彭老師實驗室幫忙製作晶體，再經研磨拋光之後終於可以開始做實驗。由於晶片很多種不同大小週期的設計，所以我們把每片晶片都給予一個編號，次作為日後建檔，標號方法如表格 3-7。

表格 3-7 晶片編號方法

晶片編號	A-B-C-(d)
A	第幾片 mask
B	A mask 的第 B 片晶體
C	A mask 的第 B 片晶體的第 C 個 Channel
d	第幾批次製作的晶體(duty-cycle 有微小的差異)

再來我們可以看到實驗架構圖，實驗有兩種架構方式，主要差異在於雷射光強度與線寬的差別，光參振盪器所產生的光源(參考圖 3-15 實驗架構圖)主要是給我們做測試用，因為光參振盪器很容易的可以改變入射的波長、能量、脈衝重複頻率(repetition rate)，以找到適合的晶體(每段週期都盡量接近準相位匹配條件)，接著使用另一台雷射(雷射參數請參考圖 3-16)，在高強度與窄線寬的條件下能量的輸出情形，實驗架構圖可以參考圖 3-16，中心波長為 2406 nm 的入射光源脈衝寬度為 3.5 ns。當這個光源被聚焦在晶體內，入射光跟產生的其他光源會在離開晶體的地方完全的共線交疊在一起，這一道光束包含了由入射光所產生的五道諧波，而這塊晶

體的溫度控制會由第五階諧波的最佳輸出來調整，在理論設計中，這塊晶體溫度原被定於 100 °C，而實驗上我們發現晶片 1-2-5(b)在波長 2409 nm 和晶片 1-5-5 在入射波長 2410 nm 時，產生相位匹配溫度約在 120 °C，這樣的情況是由於我們對於晶體的材料折射率、製程、光罩並沒有完全的確切掌握。

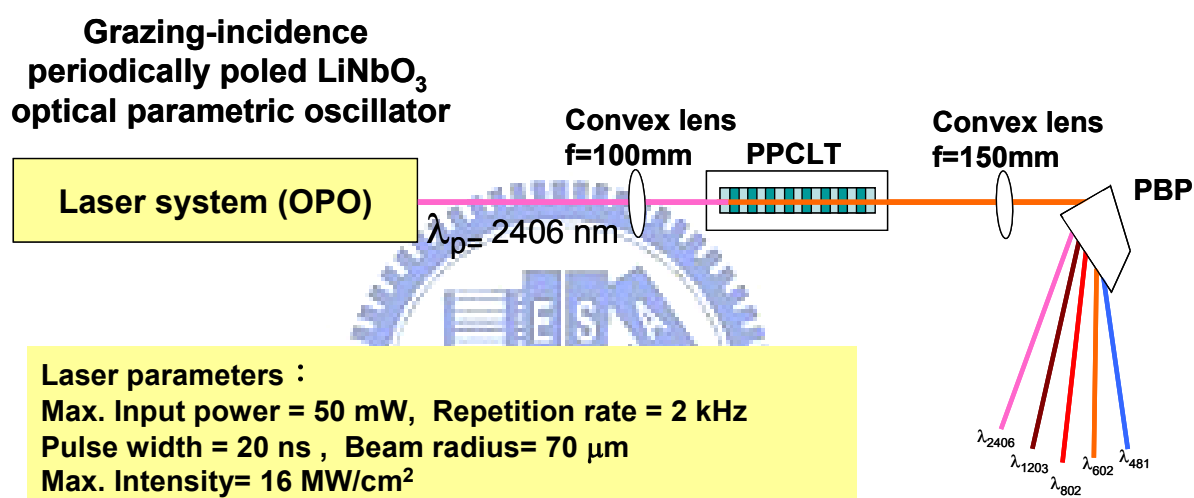


圖 3-15 掠射光參振盪器實驗架構圖(R409)。

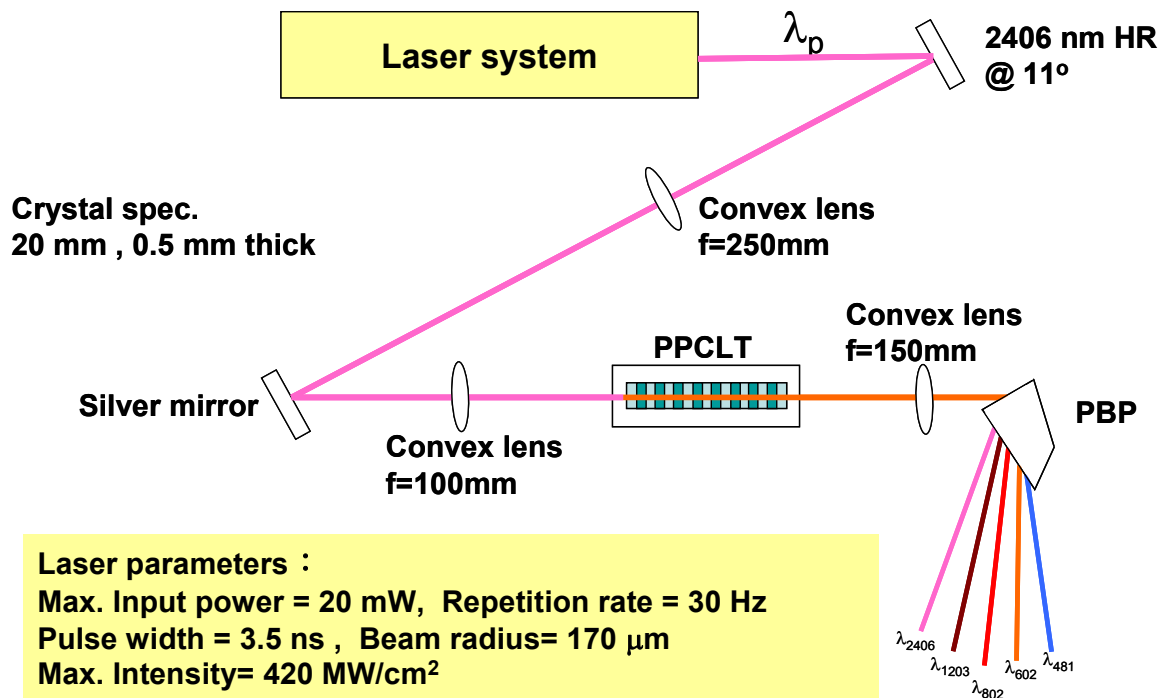


圖 3-16 實驗架構圖(R411)

在這邊我們使用晶片 1-2-5(b)(圖 3-17)，這塊週期性反轉鉍酸鋰 (PPCLT) 晶體長 20 mm、寬 12 mm、厚 0.5 mm。由於實驗時，第五階諧波的光往往是最微弱的(不考慮隨機相位匹配產生的光)，所以一開始我們必須找到第五階最佳的輸出條件，我們使用掠射光參振盪器(圖 3-15)，變換不同波長的泵浦光入射，尋找第五階諧波的最佳輸出，由圖 3-18 我們可以知道針對第五階諧波的最加入射泵浦光波長為 2408 nm，調整圖 3-16 的實驗架構波長到 2408 nm 入射。

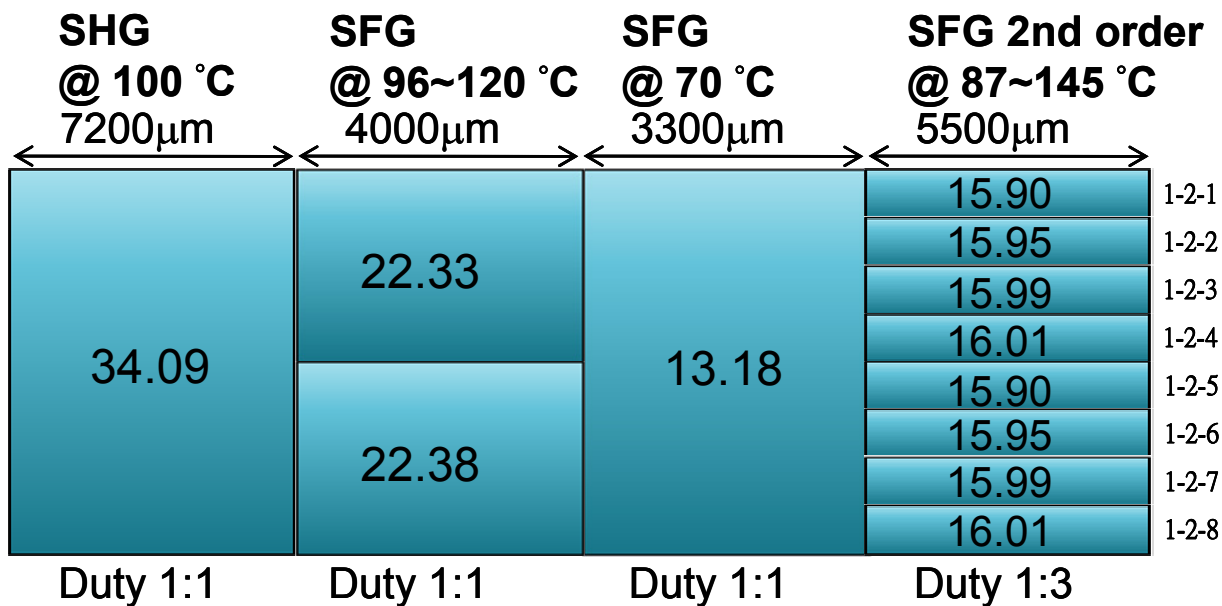


圖 3-17 多週期晶體 1-2(b)

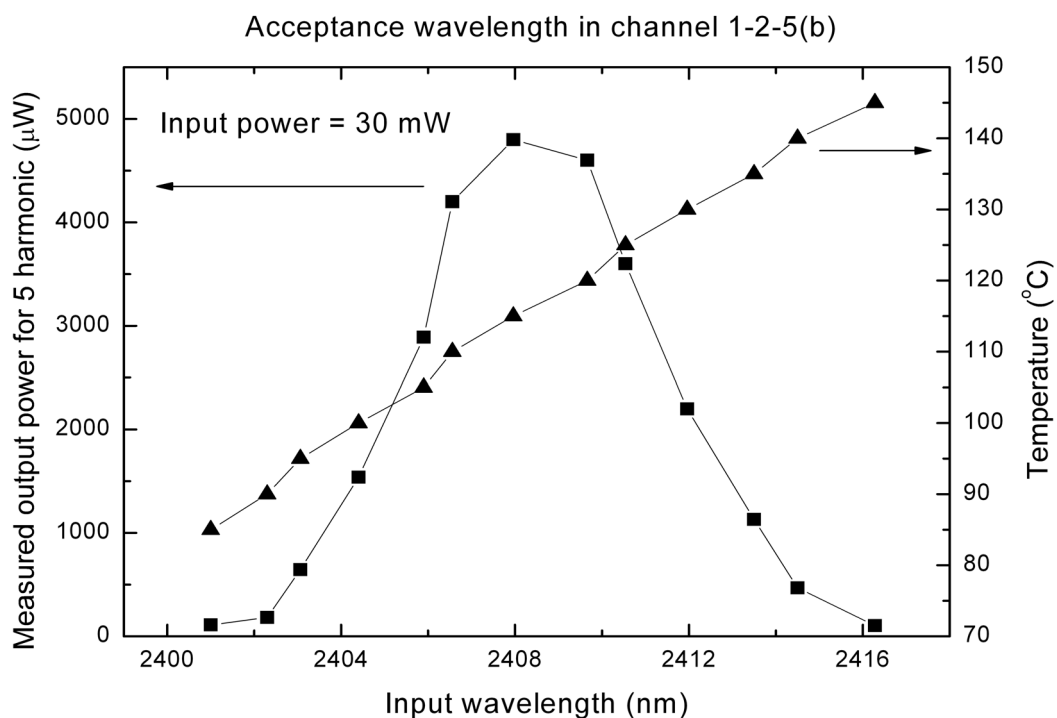


圖 3-18 由實驗可以看出第五階諧波可接受泵浦光的頻寬

當我們找到第五階諧波的最加入射波長與溫度的關係，對於其它諧波

卻一無所知，我們必須針對第五階諧波固定泵浦光入射波長在 2408 nm，變換不同的溫度，同時測量第二階到第五階諧波的能量值，參考圖 3-19 的實驗結果，我們發現除了第三階諧波的轉換效率比較不理想之外，其它諧三道光都有不錯的轉換效率，所以我們必須針對第二段週期設計新的晶體，同時圖 3-19 的實驗結果也告訴我們最佳轉換效率的溫度在 120 °C，現在我們固定波長與溫度，變化泵浦光入射的能量大小，圖 3-20 在實驗中所測量到的平均能量，包含第二階到第五階諧波，在輸入功率為最大時，相對應的輸入功率數值 250 MW/cm² 轉換到高次諧波的效率約為 30%，轉換到第二個諧波的效率約 25%，剩下 5% 為其他的諧波。

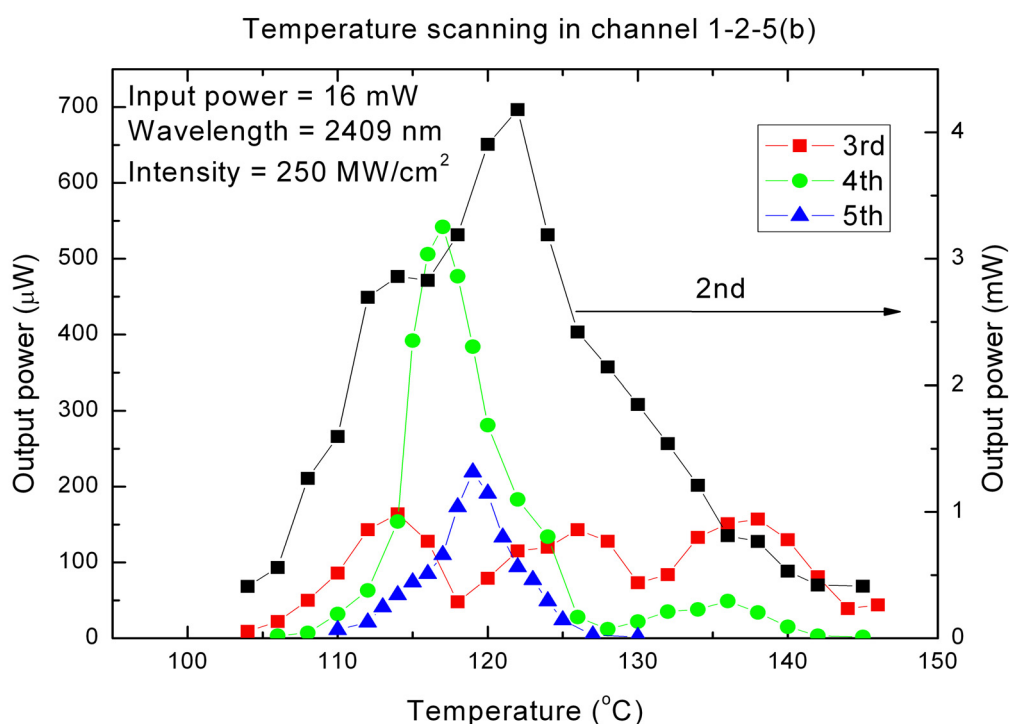


圖 3-19 各階諧波隨溫度變化的情形

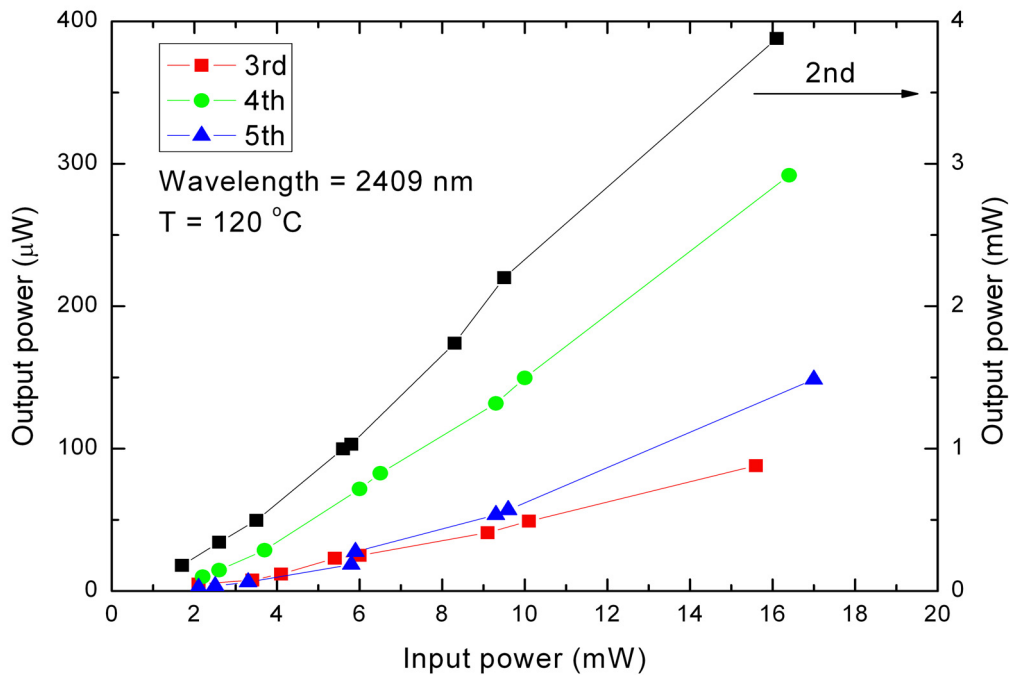


圖 3-20 在實驗中所測量到的平均能量，包含第二階諧波到第五階諧波

由之前所介紹的實驗結果，我們必須改善第二段週期的轉換效率(第三階諧波)，所以我們需要改變第二段週期大小，讓每段的準相位匹配溫度更接近，那轉換效率就會更好，我們選擇晶片 1-5-5 圖 3-21，同樣我們使用掠射光參振盪器調整入射光的波長，測量第五階諧波的平均能量與入射波長的關係(圖 3-22)，找到第五階諧波輸出最佳的條件，由實驗結果可看到當入射光波長為 2410.5 nm 時，第五階諧波轉換效率最高(圖 3-18)，相位匹配溫度與入射波長的關係，可發現入射波長越長，相位匹配溫度越高，最後實驗上得到可接受入射光波長的半高寬範圍大小約 7.3 nm(2406.9 nm ~ 2414.2 nm)。

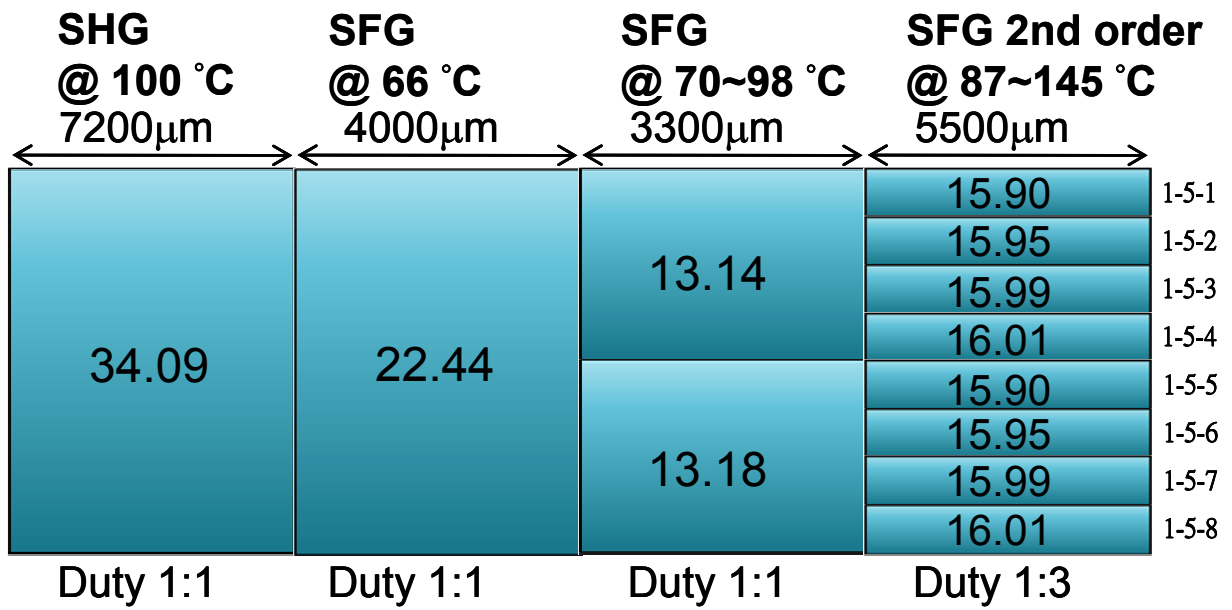


圖 3-21 多週期晶體 1-5

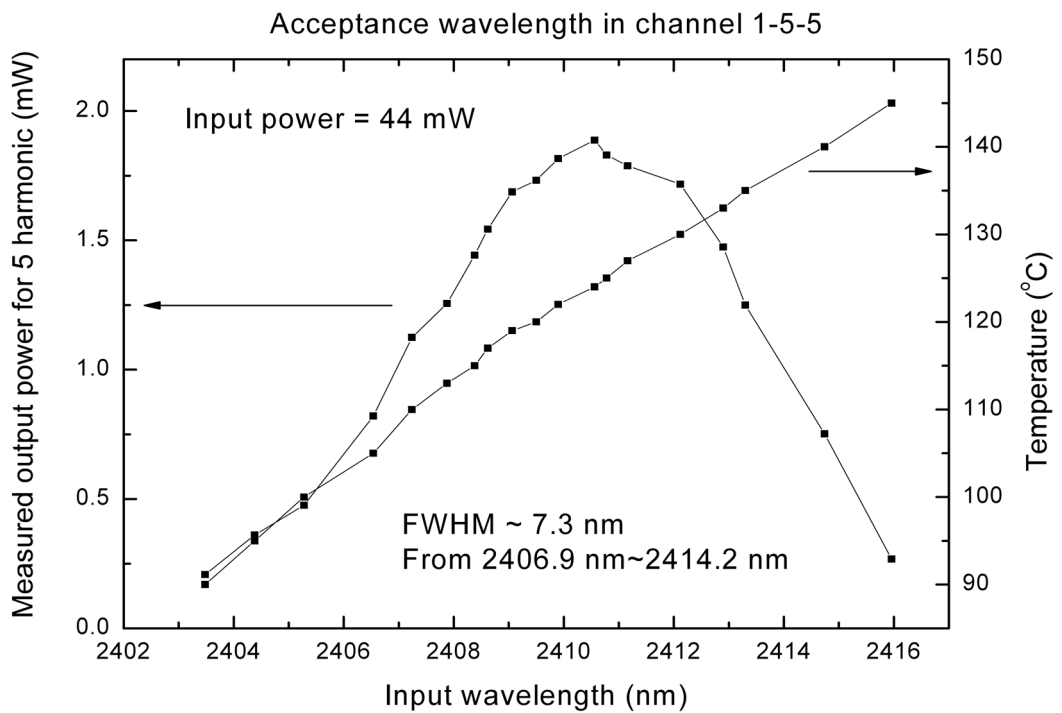


圖 3-22 第五階諧波可接受泵浦光的頻寬

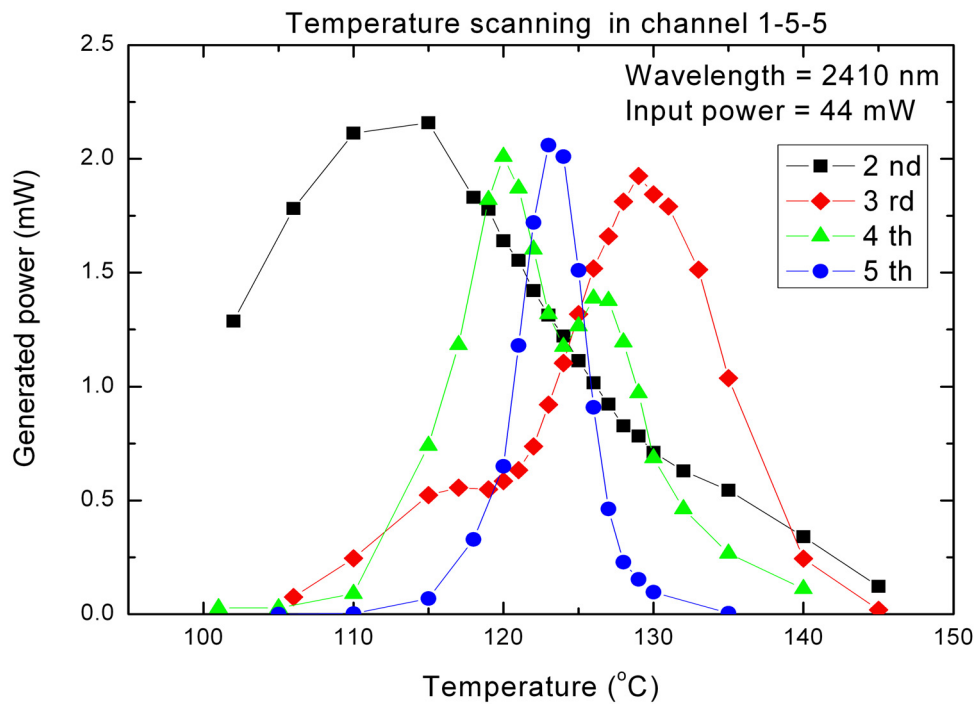


圖 3-23 各階諧波隨溫度變化的情形

當找到第五階諧波最佳的入射波長，現在我們要找最佳溫度，所以我們使用掠射光參振盪器測量各階能量與溫度的關係(圖 3-23 各階諧波隨溫度變化的情形)，我們可以發現在晶片 1-5-5 的輸出之下，溫度達到 123 °C 與 126 °C 時，接近理想的實驗結果之各階能量分布均勻(圖 3-24 在溫度 123 °C 與 126 °C 各階諧波的分布情形)。此外，在實驗當中，可以觀察到第六階諧波(401.7 nm)的光，由於當初設計晶體並沒有針對第六階設計對應的週期，所以第六階的光應該是由隨機相位匹配機制(參考 2-5 節)所產生的光。

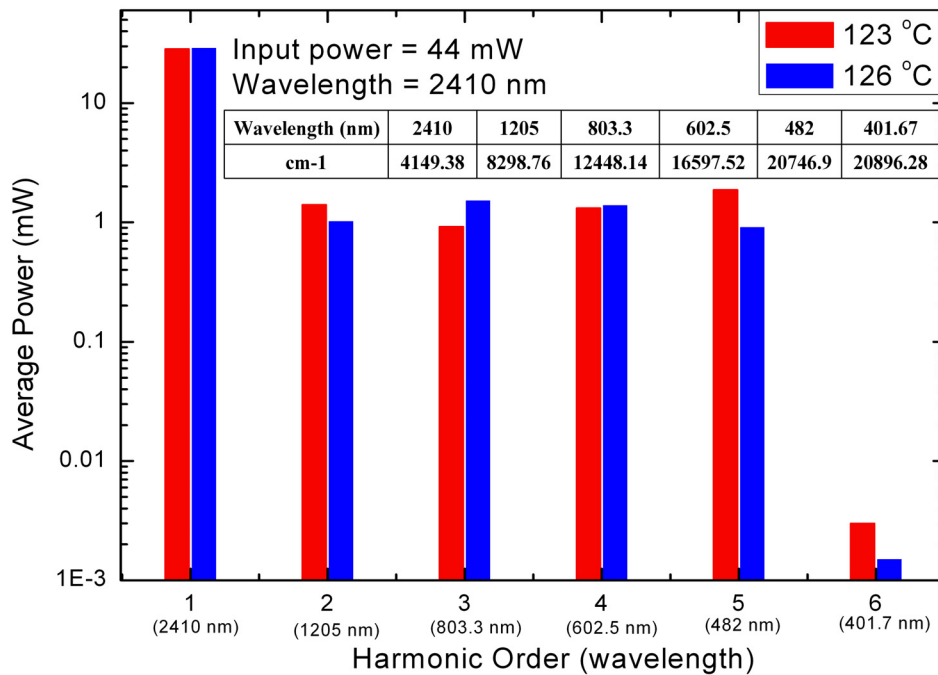


圖 3-24 晶片 1-5-5 在溫度 123 °C 與 126 °C 各階諧波的分布情形

圖 3-25 為諧波被菱鏡散射後的圖示實驗結果(R411)，在這四個可被記錄的諧波裡面，第六道光(401 nm)和第七道光(344 nm)也可在實驗裡被觀察到，但是這兩道光強度非常微弱，因為它們可能是透過隨機相位匹配所得到的光源。

產生的諧波頻率會符合(3.7)的條件，透過插置相位補償器(phase compensator)，即可將相位調整到所要求的條件下，因此我們可以透過這些產生的光源來合成各種穩定的波形，像是鋸齒波型(sawtooth wave)或是方波波形(square wave)。由這些諧波所合成的脈衝會達到週期為 0.6 cycle、電場時寬為 500 attosecond 以及波包寬度為 1.4 fs 的轉換極限脈衝。

$$\omega_q = \omega_{ceo} + q\omega_m, \phi_q = \phi_0 + q\phi_m \quad (3.7)$$

ω_q : 為頻率

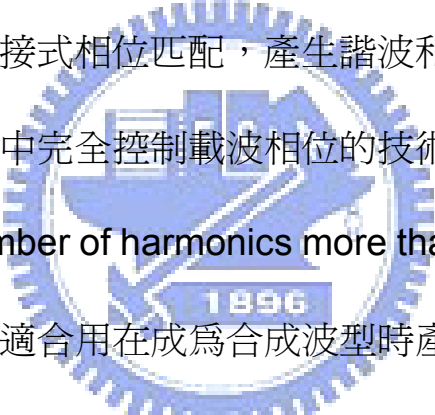
ϕ_q : 為相位:

ω_m : is the Carrier-Offset Frequency, COF

ω_m : is the comb frequency spacing

ϕ_0 : is a static offset

ϕ_m : is a linear phase difference between adjacent comb components



我們所提供的串接式相位匹配，產生諧波和絕熱式拉曼產生過程，是兩種能夠在合成波形中完全控制載波相位的技術，透過拉曼產生技術，大量的諧波(a large number of harmonics more than 10)能夠經由拉曼被有效率的產生，也因此最適合用在成為合成波型時產生最短的間距。我們所提供的相位匹配技術提供了一個互補的優點，過程並不需要被拉曼躍遷所限制，所以輸入的光波頻率選擇相當有彈性，也加大其能應用的範圍，像是提供了量子控制所需的光源。相位匹配產生諧波的方式，提供了一個簡單的架構來合成超短脈衝以及任意波形，使後續可能的發展更為容易。

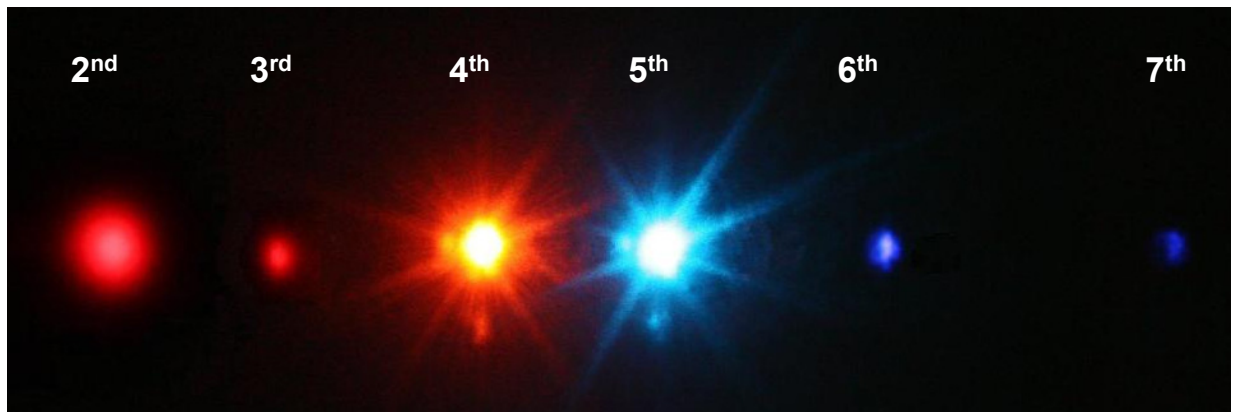


圖 3-25 諧波被菱鏡散射後的實驗結果



第四章 可調式寬頻可見光光源

4.1 介紹

在非性線領域中，設計晶體的週期與選擇適當的材料，在晶體的穿透範圍與高轉換效率之下，製作波長可調雷射，我們一直期望可以做到大範圍的波長可調，但受限於晶體與轉換效率的問題，想要製作大範圍波長可調雷射光源並不簡單，列舉一些目前有關於這方面的論文參考表格可調雷射光源近年來的發展。如何做出使用非線性晶體單一週期做出可調光源雷射涵蓋可見光範圍，在應用上可以廣泛的應用。

表格 4-1 可調雷射光源近年來的發展

Pump	Tuning range
C-W 532nm pump PPMgSLN OPO	788 ~1640 nm
Efficient 1064nm pump PPMgSLT OPO	1510 ~ 1850 nm 2504 ~ 3602 nm
Tunable blue light with LT(532 nm pump)	424 ~ 443 nm
Efficient 532 nm pump PPMgSLT OPO	855 ~ 1410 nm for a 8.0 μm period 650 ~ 3000 nm for 7 grating periods

註解[14]~[18]

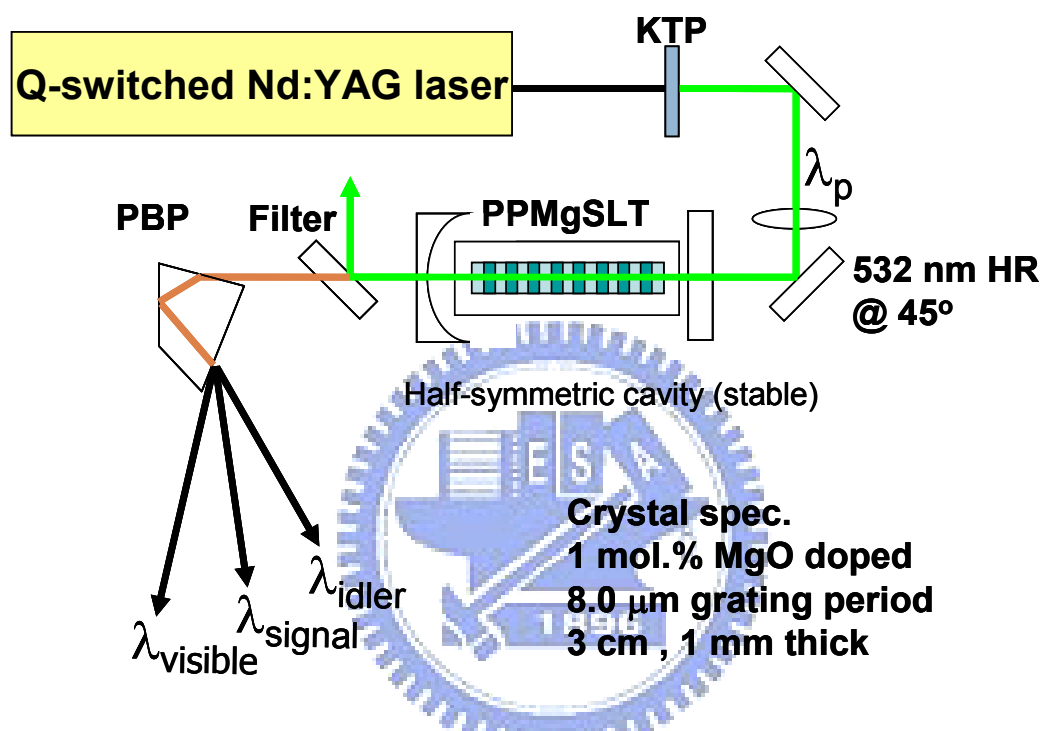
4.2 實驗架構

圖 4-1 為實驗架構圖，一般在光參數振盪器中，爲了減少光在共振腔中之損耗，會盡量縮短共振腔長度與減少共振腔中的元件，輸入耦合鏡必須同時對泵浦光高穿透與信號或閒置光高反射，圖 4-2 與圖 4-3 分別爲使用光譜儀，測量訊號光的穿透率與閒置光的穿透率(爲兩面不同的透鏡)。

此光參振盪器的共振腔採平凹結構，輸入耦合鏡使用平面鏡，輸出耦合鏡使用平凹透鏡，曲率半徑爲 10 cm，而共振腔內光的損耗對光參振盪器來說很重要，除了透鏡的損失之外，晶體端面也會有部分的損失，爲了降低端面的損失，我們在實驗上所用的晶體端面鍍上泵浦光、訊號光、閒置光波段之抗反射膜，以減少光在通過晶體端面時會有多餘的損耗，參考圖 4-4 爲晶體兩面鍍膜的結果。輸入、輸出耦合鏡與晶體的反射率對光參振盪器的輸出特性有很大的影響，所以我們在設計鍍膜與選擇鏡子時，必須考慮我們要使用什麼光源做決定，如果想要使用訊號光就必須選擇使用第一組透鏡，如果要使用閒置光就必須使用第二組透鏡。

非線性晶體對溫度變化非常敏感，溫度如果稍有變化，輸出光的波長就會變動，在實驗之溫度系統中，週期性極化反轉鉍酸鋰晶體置於銅製基座上，使用電熱致冷片(TEC)控制溫度，由 RTD 感溫器測量溫度，最高溫可達 200 °C，溫度控制精準度爲 ± 0.1 °C。

實驗架構中，利用一個焦距為 15 cm 的凸透鏡，將泵浦光聚焦至鉬酸鋰晶體之正中央，光腰(waist)約為 150 μm ，泵浦光最大功率約為 0.86 W，最大強度 44 MW/cm^2 ，可參考圖 4-1 實驗架構圖。



Laser parameters :

Max. Input power = 0.86 W, Repetition rate @ 6 kHz
Pulse width = 20 ns, Beam radius = 110 μm
Max. Intensity = 44 MW/cm^2 , Cavity length = 36 mm

圖 4-1 實驗架構圖

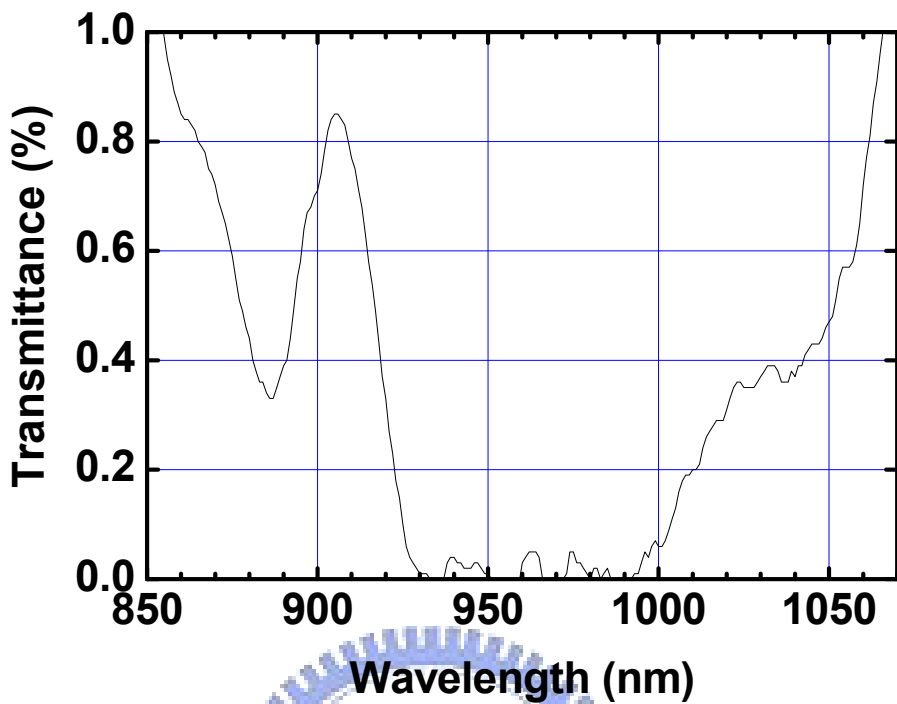


圖 4-2 訊號光透鏡穿透頻譜

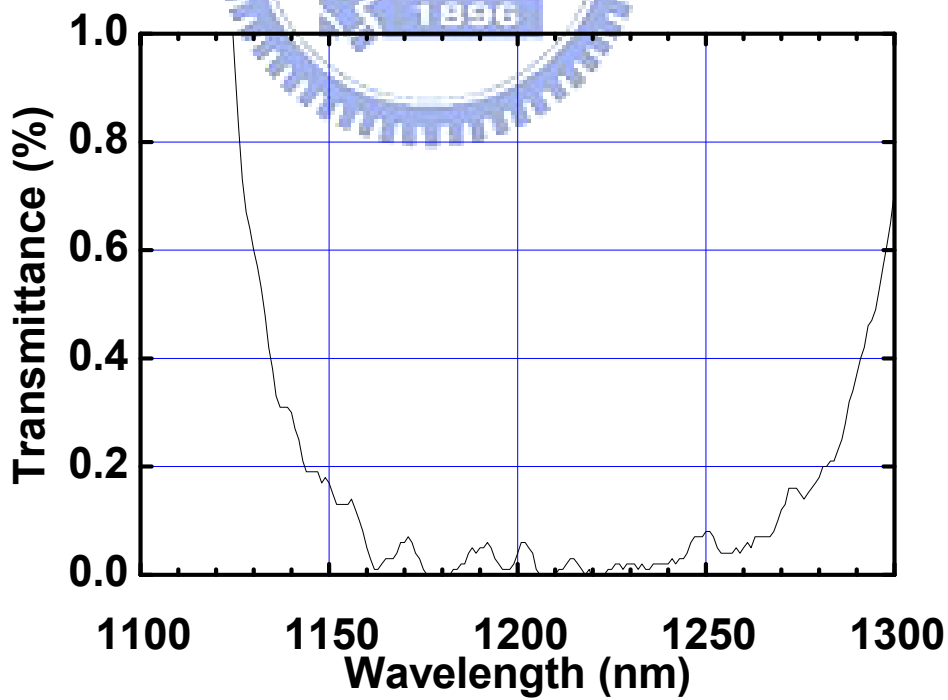


圖 4-3 閒置光透鏡穿透頻譜

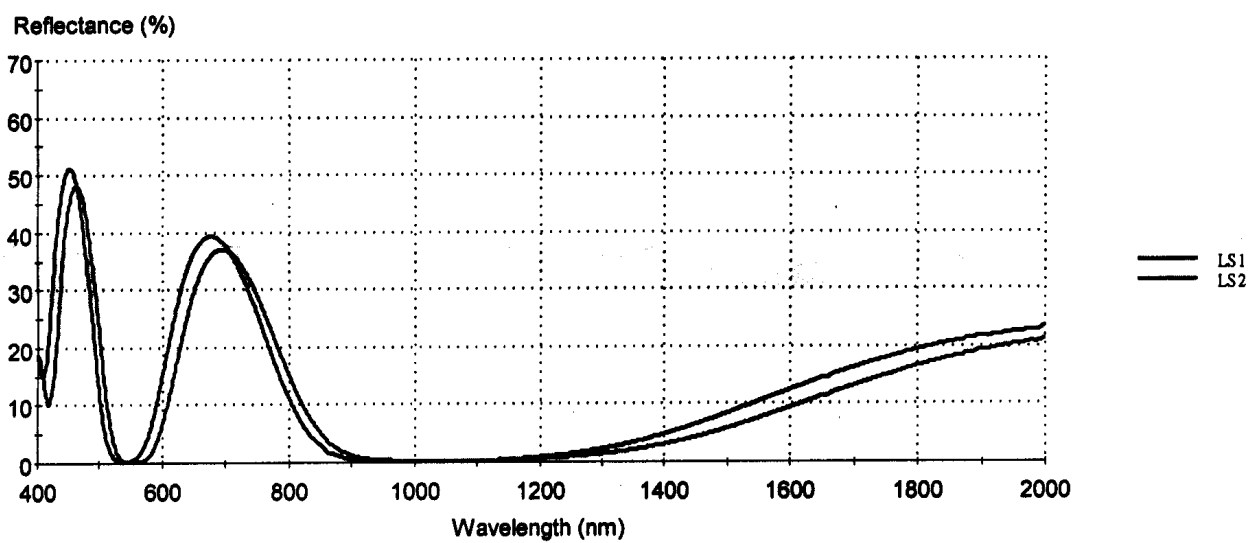


圖 4-4 晶體鍍膜結果



4.3 實驗結果.

首先對此光參振盪器之輸出波長與溫度特性先做測量，圖 4-5 為計算訊號光、閒置光波長與溫度關係圖，由於可見光波段並非相位匹配所產生，我們測量到可見光波長的能量強度，發現比預期中的高出許多，因為計算非相位匹配(Non-Phase-Matching, NPM)的轉換效率並不如實驗的轉換效率，比起實驗值大概小 1000 倍左右，在經過研究與探討之後，發現這種輸出增強的現象可能是發現為隨機相位匹配所產生，圖 4-5 紅線為閒置光的倍頻光，藍線為訊號光的倍頻光，圖 4-6 為實驗上所量取可見光波長的實驗點。

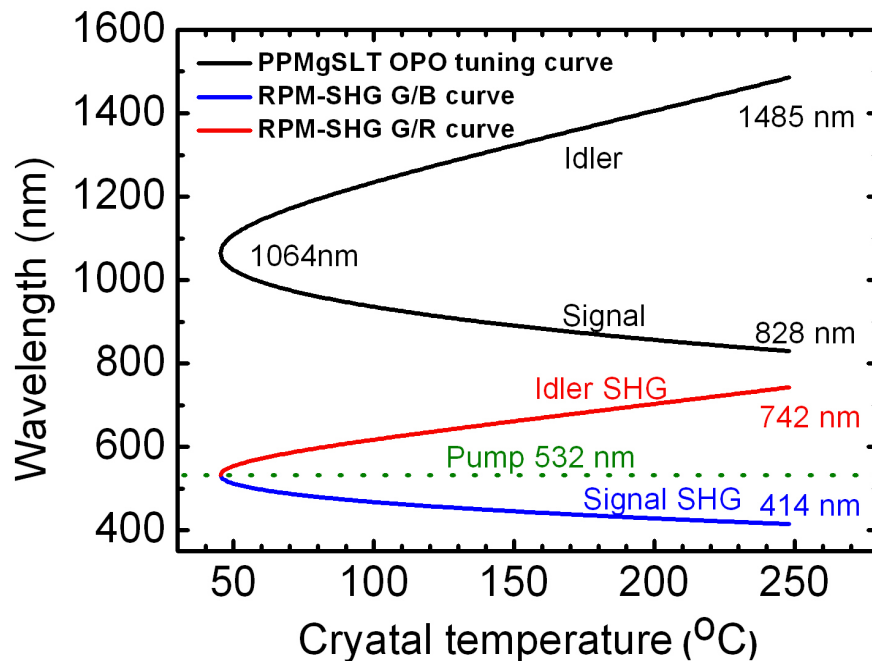


圖 4-5 模擬計算訊號光與閒置光與倍頻光的可調曲線

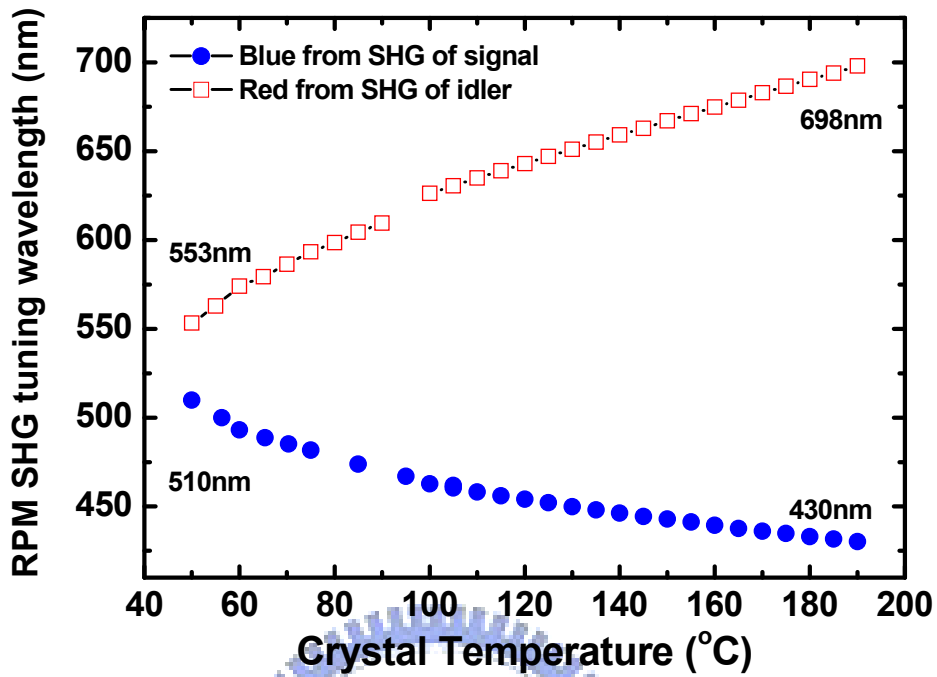


圖 4-6 訊號光與閒置光倍頻波長與溫度的關係

表格 4-2 實驗光參振盪器之特性

泵浦波長	信號光波長	閒置光波長	光柵週期	晶體尺寸
532 nm	840~1064 nm	1064~1400 nm	8 μ m	30 mm (L) 3 mm (W) 1 mm (T)

光參振盪器之能量輸出特性與所使用耦合鏡有關，訊號光倍頻波長與閒置光倍頻波長的能量輸出，受訊號光透鏡與閒置光透鏡鍍膜影響，訊號光倍頻波段的穿透率參考圖 4-7，閒置光倍頻波段的穿透率參考圖 4-8。

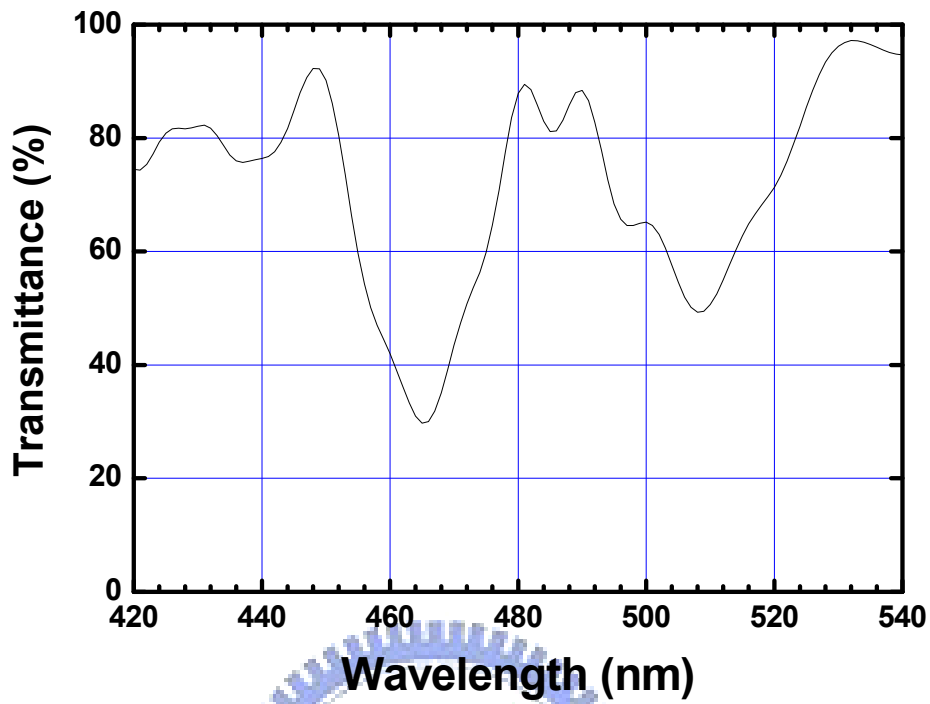


圖 4-7 訊號光透鏡在產生訊號光倍頻波段的穿透頻譜

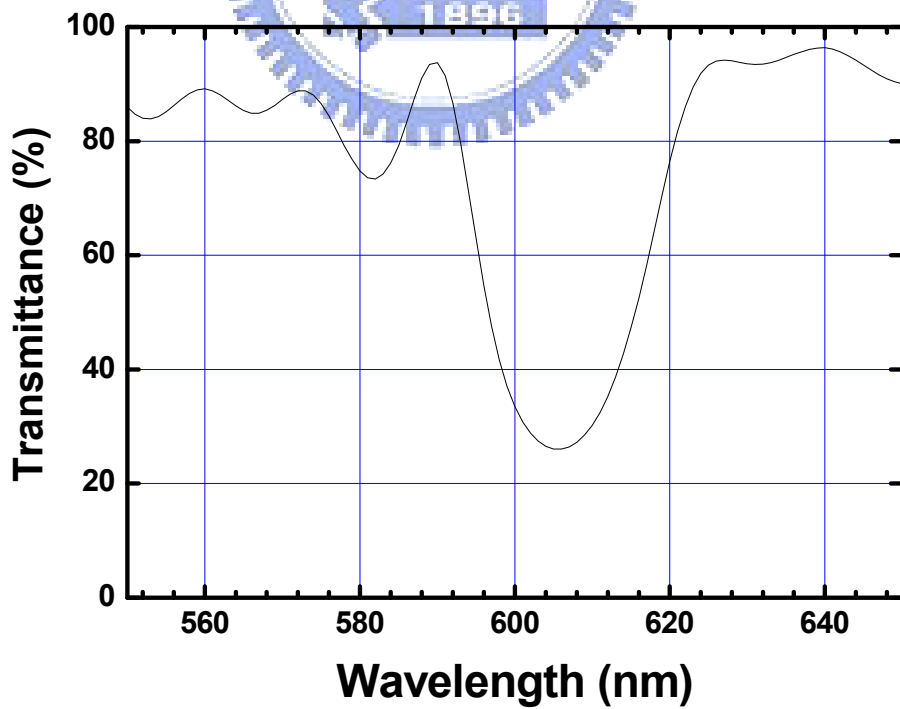
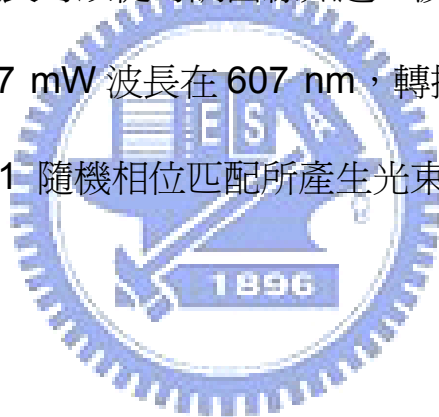


圖 4-8 閒置光透鏡在產生閒置光倍頻波段的穿透頻譜

圖 4-9 訊號光倍頻波長與能量輸出，我們必須補償光學元件的損失，反推實際上隨機相位匹配產生的二倍頻能量大小，溫度從 50 °C 變化到 190 °C，每變化 1 °C 測量一次能量大小，波長可以從可調曲線(tuning curve)知道，波長從 428 nm ~ 503 nm，最大轉換能量大於 37 mW 波長在 464 nm，轉換效率約 4.3 %，藍色實線為模擬的結果。圖 4-10 閒置光倍頻波長與能量輸出，同樣我們必須補償透鏡的損失，反推實際上隨機相位匹配產生的二倍頻能量大小，溫度同樣從 50 °C 變化到 150 °C，每變化 1 °C 測量一次能量大小，波長可以從可調曲線知道，波長從 558 nm ~ 666 nm，最大轉換能量大於 47 mW 波長在 607 nm，轉換效率約 5.5 %。最後實驗結果可以看到圖 4-11 隨機相位匹配所產生光束的圖形。



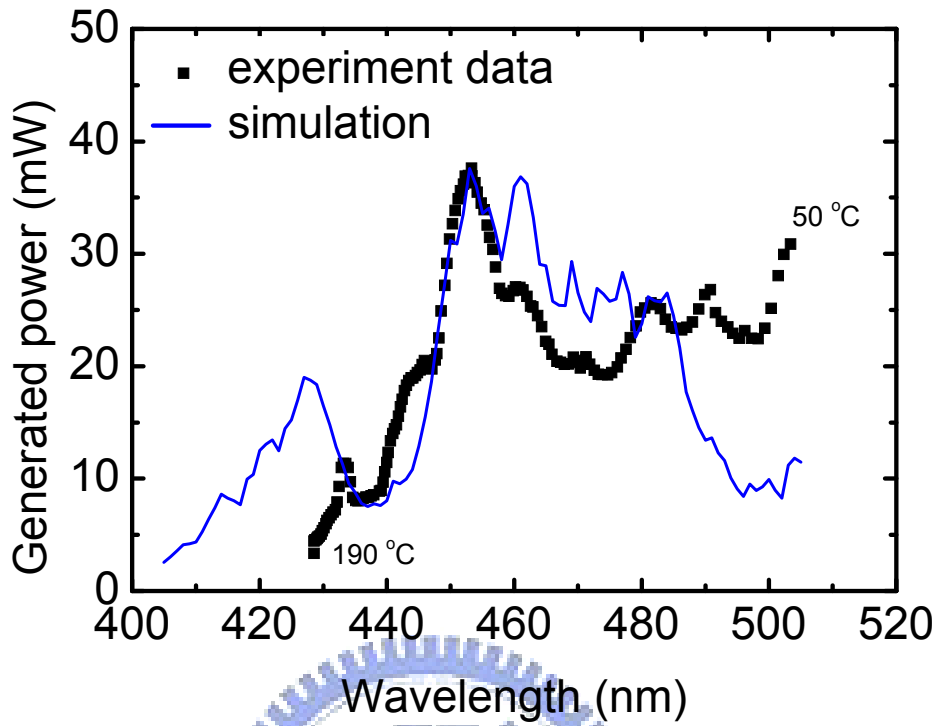


圖 4-9 訊號光倍頻波長與能量輸出

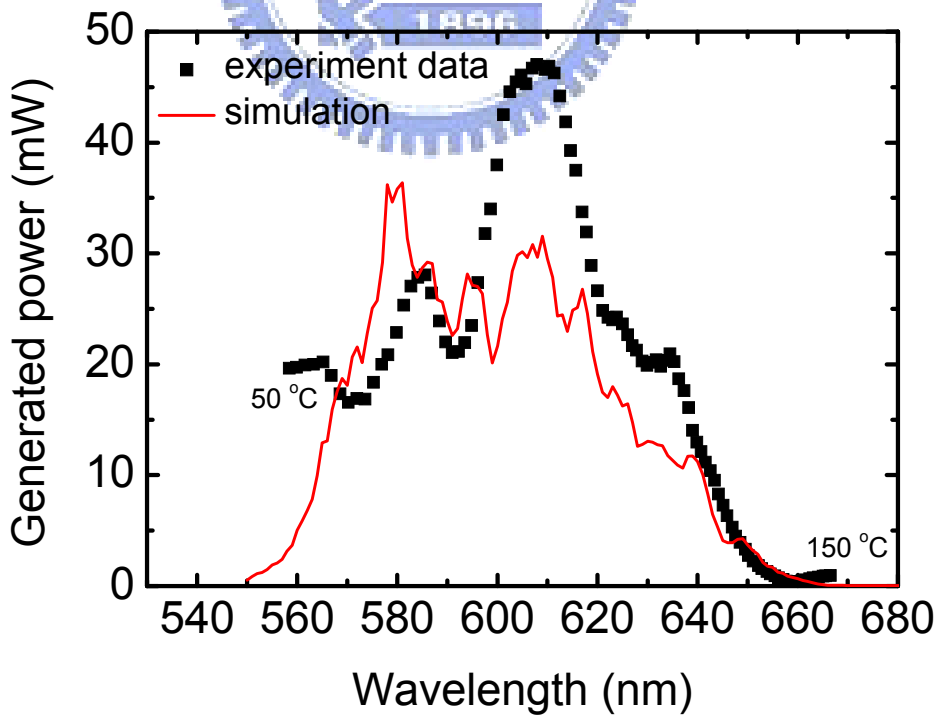


圖 4-10 閒置光倍頻波長與能量輸出

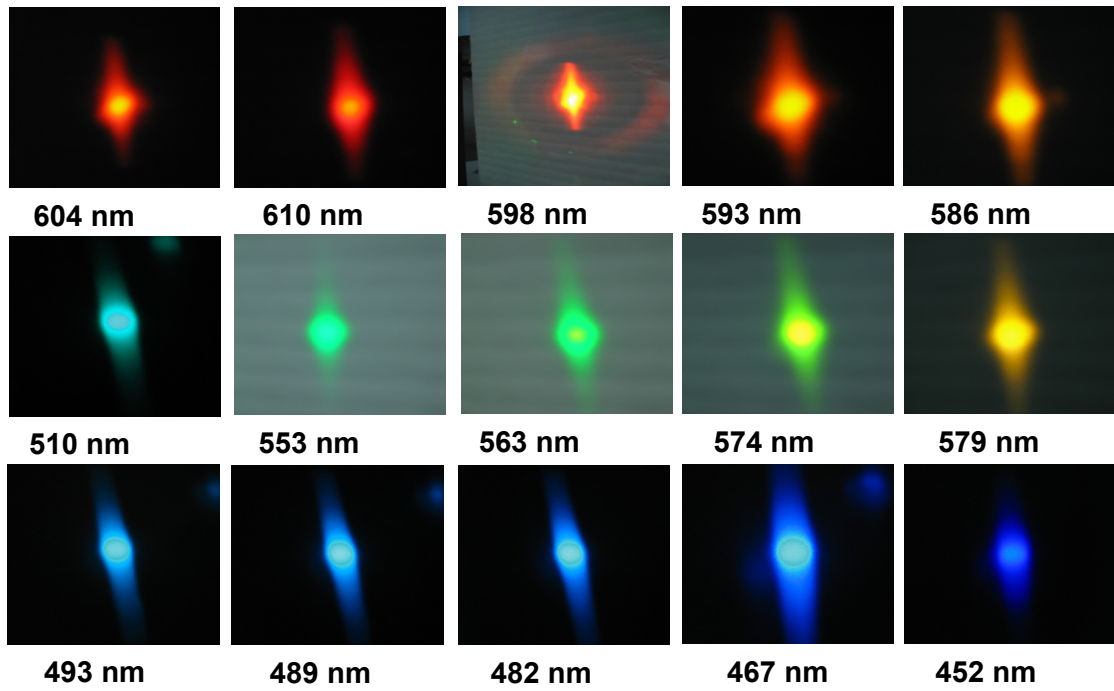


圖 4-11 隨機相位匹配所產生光束的圖形



第五章 結論

5.1 結論

在晶體的製作方面，利用高電壓致極化反轉法，並且使用在光阻圖形上加上一層絕緣層的方式定義區域反轉的結構，成功的設計出可用於倍頻、和頻實驗的一維結構週期性極化反轉鉬酸鋰。尺寸大小為 20 mm (L) x 12 mm (W) x 0.5 mm (T) 有極化反轉的部分為 8 mm (W)。晶體的內部製作了八條週期性極化反轉結構 (由於週期種類眾多，請參考附錄)。利用加熱觀察法觀察晶體發現，晶體的反轉區域結構完整，可達有效率之非線性轉換。利用鉬酸鋰晶體，自行架設了一套 1064 nm 泵浦的光參振盪器，利用光參振盪器產生的閒置光 2406 nm 當作我們的泵浦光源，達成四段準相位匹配晶體的設計與實驗結果，產生了含泵浦光再內總共五個 harmonic 光，提供了一個方便的架構產生阿秒雷射所需之極寬頻的光源。

最後用表 5-1 列出 Raman 與 QPM 各自的優點，各自在不同的領域可以進行不同的應用，如果需要使用高能量時，可以選擇 Raman，當只需要低能量就可以使用，選擇使用 QPM，在這邊只是

做個簡單的說明，目前實驗室兩套系統都有現成的架構可以使用，希望在未來可以達到想輔相成的目的。

表格 5-1 QPM 與 Raman 的比較

	QPM	Raman
Price	Cheaper	Expensive
Space	Small	Grand
Configuration	Simple	Complicate
Input power	Low	High
Harmonic wavelength	Designable	Limited
Tuning range	~ nm	~ GHz
Each harmonic power	Designable	Non-uniformity



參考文獻

- [1] P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters, G. Weinreich, "Generation of optical harmonics," *Phys. Rev. Lett.*, 7, 118 – 119, 1961
- [2] J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing, P. S. Pershan, "Interactions between light waves in a nonlinear dielectric," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 127, 1918 - 1939, Sep. 1962
- [3] M. M. Fejer, G. A. Magel, D. H. Jundt, R. L. Byer, "Quasi-Phase-Matched Second Harmonic Generation: Tuning and Tolerances," *IEEE J. Quantum Electron*, Vol. 28, pp. 2631-2654, 1992
- [4] V. Berger, "Nonlinear Photonic Crystals," *Phys. Rev. Lett.* 81, 4136–4139, 1998
- [5] J. Ng, A. H. Kung, A. Miklos, P. Hess, "Sensitive wavelength-modulated photoacoustic spectroscopy with a pulsed optical parametric oscillator," *Opt. Lett.* **29**, 1206-1208. 2004
- [6] A. Bruner, D. Eger, M. B. Oron, Pinhas Blau, M. Katz, S. Ruschin, "Temperature-dependent Sellmeier equation for the refractive index of stoichiometric lithium tantalate," *Optics Letters*, Vol. 28, Issue 3, 194-196, 2003
- [7] T. Hatanaka, K. Nakamura, T. Taniuchi, H. Ito, Y. Furukawa, K. Kitamura, "Quasi-phase-matched optical parametric oscillation with periodically poled stoichiometric LiTaO_3 ," *Opt. Lett.* Vol. 25 Issue 9, 651-653, 2000
- [8] C. J. Lai, W. T. Chen, A. H. Kung "Random-Phase-Matching in Periodically-Poled Material," *CLEO, CThD2*, 2009
- [9] C. S. Yu, A. H. Kung, "Grazing-incidence periodically poled LiNbO_3 optical parametric oscillator," *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 16 No. 12, 2233-2238, 1999
- [10] M. Y. Shverdin et al. "Generation of a Single-Cycle Optical Pulse," *Phys. Rev. Lett.* **94**, 033904, 2005
- [11] W. J. Chen et al. "Sub-Single-Cycle Optical Pulse Train with Constant Carrier Envelope Phase," *Phys. Rev. Lett.* **100**, 163906, 2008
- [12] R. K. Shelton et al. "Phase-Coherent Optical Pulse Synthesis from Separate Femtosecond Lasers," *Science* **293**, 1286, 2001
- [13] J. Sun and D. Reid, "Coherent ultrafast pulse synthesis between an OPO and a laser," *Opt. Lett.* Vol. 34 Issue 6, pp.854-856, 2009

- [14] M. Tsunekane, S. Kurimura, M. Kurimura, N. Taguchi, "Continuous-wave, broadband tuning from 788 to 1640 nm by a doubly resonant, MgO:LiNbO₃ optical parametric oscillator," Appl. Phys. Lett. Vol. 72, No. 26, 3414, 1998
- [15] N.E. Yu, S. Kurimura, Y. Nomura, M. Nakamura, K. Kitamura, Y. Takada, J. Sakuma, and T. Sumiyoshi, "Efficient optical parametric oscillation based on periodically poled 1.0 mol % MgO-doped stoichiometric LiTaO₃," Appl. Phys. Lett. **85**, 5134-5136, 2004
- [16] P. Xu, K. Li, G. Zhao, S. N. Zhu, Y. Du, D. H. Ji, Y. Y. Zhu, N. B. Ming, L. Luo, K. F. Li, K. W. Cheah, "Quasi-phase-matched generation of tunable blue light in a quasi-periodic structure," Opt. Lett. Vol. 29 Issue 1, pp.95-97, 2004
- [17] S. Y. Tu, A. H. Kung, Z. D. Gao, S. N. Zhu, Kurimura, Sunao, Kitamura, Kenji, "Green-pumped high-power optical parametric oscillator based on periodically poled MgO-doped stoichiometric LiTaO₃," Opt. Lett. Vol. 31, No. 24, pp.3632-3634, 2006
- [18] S. Y. Tu, A. H. Kung, Z. D. Gao, S. N. Zhu, "Efficient periodically poled stoichiometric lithium tantalate optical parametric oscillator for the visible to near-infrared region," Opt. Lett. Vol. 30, No. 18, pp.2451-2453, 2005
- [19] I. Shoji, T. Kondo, A. Kitamoto, M. Shirane, R. Ito, "Absolute scale of second-order nonlinear-optical coefficients," J. Opt. Soc. Am. B 14(9), 2268-2294, 1997
- [20] D. N. Nikogosyan, "Nonlinear Optical Crystal: A Complete Survey," Springer, New York, 2003

附錄-Mask1

1-1

7200micron duty cycle 50:50	4000micron duty cycle 50:50	3300micron duty cycle 50:50	5500micron duty cycle25:75	
34.09	22.37	13.10	15.90	900micron
			15.95	900micron
			15.99	900micron
			16.01	900micron
			15.90	900micron
			15.95	900micron
			15.99	900micron
			16.01	900micron

1-2

7200micron duty cycle 50:50	4000micron duty cycle 50:50	3300micron duty cycle 50:50	5500micron duty cycle25:75	
34.09	22.37	13.18	15.90	900micron
			15.95	900micron
			15.99	900micron
			16.01	900micron
			15.90	900micron
			15.95	900micron
			15.99	900micron
			16.01	900micron

1-3

8000micron duty cycle 50:50	8000micron duty cycle 50:50	6000micron duty cycle 50:50		
34.09	22.34	22.40	13.09	900micron
			13.15	900micron
			13.27	900micron
			13.25	900micron
			13.09	900micron
			13.15	900micron
			13.27	900micron
			13.25	900micron

1-4

7200micron duty cycle 50:50	4000micron duty cycle 50:50	3500micron duty cycle 50:50	5500micron duty cycle25:75	
34.09	22.38	15.14	15.90	900micron
			15.95	900micron
			15.99	900micron
			16.01	900micron
			15.90	900micron
			15.95	900micron
			15.99	900micron
			16.01	900micron

1-5

7200micron duty cycle 50:50	4000micron duty cycle 50:50	3500micron duty cycle 50:50	5500micron duty cycle25:75	
34.09	22.44	15.14	15.90	900micron
			15.95	900micron
			15.99	900micron
			16.01	900micron
			15.90	900micron
			15.95	900micron
			15.99	900micron
			16.01	900micron

1-6

8000micron duty cycle 50:50	6000micron duty cycle 50:50	6000micron duty cycle 50:50		
34.09	22.43	22.47	13.06	900micron
			13.15	900micron
			13.21	900micron
			13.25	900micron
			13.06	900micron
			13.15	900micron
			13.21	900micron
			13.25	900micron

Mask2

2-1

7200micron duty cycle 50:50	4000micron duty cycle 50:50	3500micron duty cycle 50:50	5500micron duty cycle25:75	
34.09	22.30	15.12	15.92	900micron
			15.97	900micron
			16.04	900micron
		15.16	16.07	900micron
			15.92	900micron
			15.97	900micron
			16.04	900micron
			16.07	900micron

2-2

7200micron duty cycle 50:50	4000micron duty cycle 50:50	3500micron duty cycle 50:50	5500micron duty cycle25:75	
34.09	22.35	15.12	15.92	900micron
			15.97	900micron
			16.04	900micron
		15.16	16.07	900micron
			15.92	900micron
			15.97	900micron
			16.04	900micron
			16.07	900micron

2-3

7200micron duty cycle 50:50	4000micron duty cycle 50:50	3500micron duty cycle 50:50	5500micron duty cycle25:75	
34.09	22.41	15.12	15.92	900micron
			15.97	900micron
			16.04	900micron
		15.16	16.07	900micron
			15.92	900micron
			15.97	900micron
			16.04	900micron
			16.07	900micron

2-4

7200micron duty cycle 50:50	4000micron duty cycle 50:50	3500micron duty cycle 50:50	5500micron duty cycle25:75	
34.09	22.30	15.20	15.92	900micron
			15.97	900micron
			16.04	900micron
		15.22	16.07	900micron
			15.92	900micron
			15.97	900micron
			16.04	900micron
			16.07	900micron

2-5

7200micron duty cycle 50:50	4000micron duty cycle 50:50	3500micron duty cycle 50:50	5500micron duty cycle25:75	
34.09	22.35	15.20	15.92	900micron
			15.97	900micron
			16.04	900micron
		15.22	16.07	900micron
			15.92	900micron
			15.97	900micron
			16.04	900micron
			16.07	900micron

2-6

7200micron duty cycle 50:50	4000micron duty cycle 50:50	3500micron duty cycle 50:50	5500micron duty cycle25:75	
34.09	22.41	15.20	15.92	900micron
			15.97	900micron
			16.04	900micron
		15.22	16.07	900micron
			15.92	900micron
			15.97	900micron
			16.04	900micron
			16.07	900micron