

國立交通大學

電子工程學系電子研究所碩士班

碩士論文

鍺摻雜鎵於電場下之兆赫波放射及吸收頻譜之研究

Studies on Terahertz Wave Emission and Absorption
Spectrum from Ga-doped Ge under Electric Fields



研究生：林哲民

指導教授：顏順通 博士

中華民國九十六年六月

鍺摻雜鎵於電場下之兆赫波放射及吸收頻譜之研究
Studies on Terahertz Wave Emission and Absorption Spectrum from
Ga-doped Ge under Electric Fields

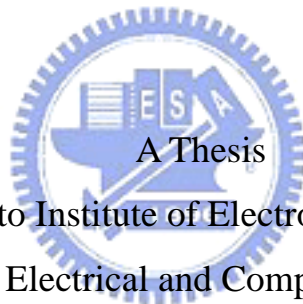
研究生：林哲民

Student : Jer-Min Lin

指導教授：顏順通 博士

Advisor : Dr. Shung-Tung Yen

國立交通大學
電子研究所
碩士論文



A Thesis

Submitted to Institute of Electronics Engineering
College of Electrical and Computer Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master in

Electronics Engineering

June 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年六月

鍺摻雜鎵於電場下之兆赫波放射及吸收頻譜之研究

學生:林哲民

指導教授:顏順通 博士

國立交通大學電子工程研究所 碩士班

摘要

使用傅立葉轉換紅外線頻譜儀(FTIR)的步進掃描振幅調變技術來紀錄在外加脈衝電場下的鍺摻雜鎵樣品於低溫之兆赫波放射頻譜，觀察到受電場激發的電洞從雜質激發態輻射躍遷至雜質最低能階，放出2.01 THz (67.0 cm^{-1})和2.60 THz (86.7 cm^{-1})的兆赫波光子，而且我們是第一次量測到鍺摻雜鎵的2.60 THz放射譜線的實驗團隊。

我們也量測鍺摻雜鎵樣品於低溫受外加電流下的吸收頻譜，這些吸收譜線源自電洞從雜質最低能階吸收兆赫波光子至眾雜質激發態，使用了FTIR的步進掃描相位調變技術來得到穩定的吸收譜線，記錄峰值強度對外加電流的變化，觀察到2.04 THz (68.1 cm^{-1})和2.22 THz (74.1 cm^{-1})的譜線峰值會隨施加電流增加而降低，我們認為在雜質最低能階的電洞已被電場激發至雜質激發態或共價帶，在200~300 mA大電流的情況下，甚至無法從整個吸收頻譜分辨出微弱的吸收譜線。

使用步進掃描調變技術來量測放射和吸收頻譜，將讓我們能夠分析在不同溫度與電流下雜質能階中的電洞分佈與鬆弛機制。這些實驗成果將有助於兆赫波雷射的實現。

Studies on Terahertz Wave Emission and Absorption Spectrum from Ga-doped Ge under Electric Fields

Student: Jer-Min Lin

Advisors: Dr. Shun-Tung Yen

Institute of Electronics Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Step-scan amplitude modulation technique on FTIR has been built and applied to the measurement of electroluminescence spectra of Ga-doped germanium at cryogenic temperature. We found emission lines with maxima at ~ 2.01 THz (67.0 cm^{-1}) and at ~ 2.60 THz (86.7 cm^{-1}), corresponding to the radiative transitions of holes from the excited impurity states to the ground state of impurity center. The line at 2.60 THz was observed for the first time and investigated.

We also measured the intracenter absorption spectra of germanium doped by gallium under external electrical excitation, i.e. electroabsorbance spectra, at cryogenic temperature. Step-scan phase modulation technique was used in FTIR for stable peak intensity of absorption lines. The intensity of absorption lines at 2.04 THz (68.1 cm^{-1}) and at 2.22 THz (74.1 cm^{-1}) decreases as the applied current increases. We attribute this effect to the depopulation of the ground state of the impurities and accumulation of the carriers at the high energy excited states or valence band. The intensity of these peaks can't finally be identified as the driving current increases up to 200~300 mA.

Using step-scan modulation techniques to measure the emission and absorption spectra enables us to analyze the hole distribution and relaxation mechanisms between impurity states under various temperature and pumping current. These results will be useful for realizing the terahertz laser.

誌 謝

首先誠摯的感謝指導教授顏順通博士，老師悉心的教導使我得以一窺兆赫波領域的深奧，不時的討論並指點我正確的方向，使我在這些年中獲益匪淺。老師對學問的嚴謹更是我輩學習的典範。

本論文的完成另外亦得感謝的孫允武教授大力協助。因為有您的經驗提要，使得本論文能夠順利進行。

兩年裡的日子，實驗室裡共同的生活點滴，學術上的討論、言不及義的閒扯，感謝眾位學長姐、學弟的共同砥礪，你/妳們的陪伴讓兩年的研究生生活變得絢麗多彩。

感謝鐘佩鋼、黃士哲、王德賢、李冠成、林宗澤學長們不厭其煩的指出我研究中的缺失，且總能在我迷惘時為我解惑，也感謝同學的幫忙，恭喜我們順利走過這兩年。實驗室的郭建宏、石正瑜學弟們當然也不能忘記，你們的幫忙及搞笑我銘感在心。

女朋友在背後的默默支持更是我前進的動力，沒有的體諒、包容，相信這兩年的生活將是很不一樣的光景。

最後，謹以此文獻給我摯愛的雙親。

目 錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
圖目錄	v
一、 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 文獻探討	2
1.3 研究方向	5
二、 步進掃描振幅調變頻譜	7
2.1 中紅外global光源+chopper	7
2.2 脈衝式LED光源	10
2.3 鍺摻雜鎵之兆赫放射頻譜	12
三、 步進掃描相位調變頻譜	18
3.1 電場對鍺摻雜鎵兆赫吸收頻譜的影響	19
四、 結論與建議	25
附錄A OPUS軟體參數操作要點	26
附錄B 鎖相放大器操作要點	32
附錄C 步進掃描操作要點	35
參考文獻	37

圖目錄

圖1-1	電磁波頻譜.....	1
圖1-2	Si:P與Si:Bi的光學與非輻射性躍遷。Ref[8]	4
圖1-3	摻雜五族雜質的矽樣品之發射頻譜。Ref[14].....	4
圖1-4	矽及鍺的兆赫波源頻率範圍。Ref[14].....	5
圖2-1	快速掃描架設	7
圖2-2	快速掃描配合光圈10 mm	8
圖2-3	快速掃描配合光圈0.25 mm	8
圖2-4	chopper+步進掃描架設.....	9
圖2-5	步進掃描配合光圈0.25 mm	10
圖2-6	LED頻譜產品規格.....	10
圖2-7	脈衝式LED+步進掃描架設	11
圖2-8	LED harI_2.97 mV頻譜	12
圖2-9	LED harI_45 uV頻譜	12
圖2-10	Ref[24]的Ge(Ga)吸收頻譜	13
圖2-11	Ref[24]的吸收譜線符號意義	13
圖2-12	Ref[22]的Ge(Ga)放射頻譜	14
圖2-13	Ref[23]的Ge(Ga)放射頻譜	15
圖2-14	放射頻譜架設.....	16
圖2-15	Ge(Ga)放射頻譜	17
圖3-1	10 K組之外加電流對樣品跨壓與溫度關係.....	20
圖3-2	10 K組之不同電流下的吸收頻譜.....	20
圖3-3	10 K組之吸收峰值變化.....	21
圖3-4	14 K組之外加電流對樣品跨壓與溫度關係.....	22

圖3-5	14 K組之不同電流下的吸收頻譜·····	22
圖3-6	14 K組之吸收峰值變化·····	23
圖3-7	8 K組之外加電流對樣品跨壓與溫度關係 ·····	23
圖3-8	8 K組之不同電流下的吸收頻譜 ·····	24
圖3-9	8 K組之吸收峰值變化 ·····	24
圖A-1	OPUS的Scanner Velocity選單 ·····	26
圖A-2	單頻光的頻譜與干涉圖 ·····	26
圖A-3	低通濾波器 ·····	27
圖A-4	OPUS的頻譜上下限與干涉圖點數·····	29
圖A-5	干涉圖點數 M_0 ·····	30
圖A-6	解析度為2、 $v_1=718.18$ 、 $v_2=0$ 的干涉圖點數 M ·····	30
圖A-7	相位解析度、相位干涉圖點數 ·····	31
圖A-8	single side的干涉圖 ·····	31
圖B-1	SR850主要參數螢幕顯示·····	33
圖B-2	SR850狀態顯示 ·····	34
圖C-1	步進掃描調變 in OPUS ·····	35
圖C-2	步進掃描時序圖 ·····	35
圖C-3	Direct Command Entry視窗·····	36

一、緒論

1.1 研究背景

所謂兆赫波是波長介於微波範圍和光波範圍（包括大部分紅外線）的電磁波，見圖 1-1，通常頻率在0.1至30兆赫的電磁波都可稱為兆赫波(波長 10 μm ~3 mm)。此波段涵蓋數個空窗(windows)以及大部分分子譜線。兆赫波科學有其下列的獨特性質，包括許多大分子的轉動和震動特有頻率落在兆赫波範圍，兆赫波可以穿過許多其他電磁波無法穿過的材料，同時某些兆赫波對水分子特別敏感，容易被水吸收，因此無法滲入富含水的組織深處。因為這些特性，兆赫波相關技術在許多方面的應用未來將扮演重要角色，如天文探勘、環境保護、醫療診斷、農產開發、水資源規劃、塑膠封裝和IC封裝的控管以及短距離保密通訊（衛星通訊）等。目前已經有幾個實驗室利用兆赫波來偵測實驗中欲觀察的物理機制，然而所用兆赫波源往往非常昂貴並且輸出強度非常低，只到奈瓦等級。由於兆赫波技術目前尚未成熟，上述的應用仍只是紙上談兵。最近兆赫波科學和技術已受到很多人的矚目，兆赫波偵測技術的進展也有部分突破。所以目前在兆赫波技術上最大的困難應是欠缺便宜好用的兆赫波源。

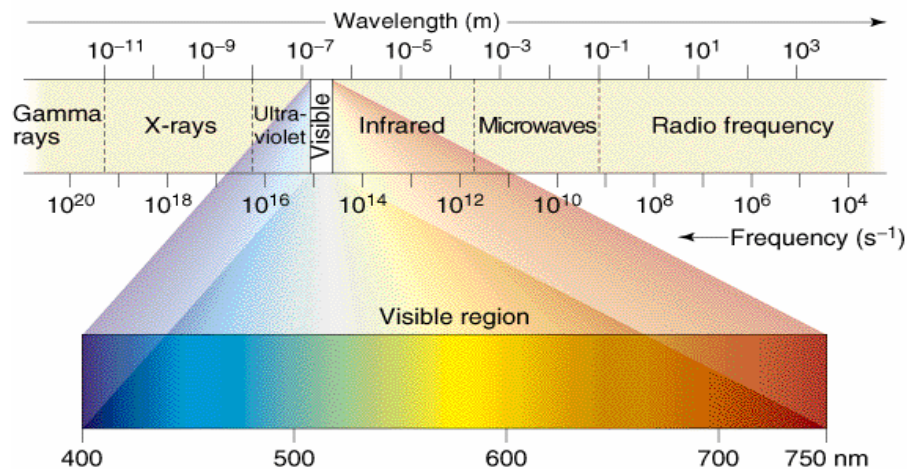


圖 1-1: 電磁波頻譜

資料來源: http://itl.chem.ufl.edu/2045_s00/lectures/lec_10.html

眾所週知，在微波範圍電磁波與帶電粒子間的交互作用所產生的現象可以藉由古典電動理論的詮述得到透徹的了解。然而當頻率進入光波範圍時，量子理論可以簡單而精準地描述光子（電磁波）和電荷間的交互作用。根據古典和量子理論，微波和光波範圍的穩定固態輻射源（包括雷射和震盪器等）早已開發出來。雖近期已有商品化的固態兆赫波雷射問世 (<http://www.alpeslasers.ch/lasers-on-stock/lasersSTANTHz.html>)，但只涵蓋小範圍的兆赫波段，能廣泛應用的成熟兆赫波雷射還待研究開發。原因之一是在兆赫波範圍的電磁波和電荷的交互作用若全以古典理論描述將不夠準確，但若全以量子理論描述則過於複雜，需要古典和量子理論兩者相互配合。傳統的電子元件的操作速度僅能至微波頻率範圍，進一步到兆赫頻率有其困難，原因是受散射機制速度的限制。傳統操作在光波範圍的固態雷射，其機制亦不適用於兆赫波範圍，原因是兆赫波光子的能量低於聲子的能量，傳統的居量反轉機制會受聲子散射的破壞而無法達到，同時載子態的有限壽命使得能量不確定，此不確定能量的大小一般與兆赫波光子能量有相同的數量級。另外自由載子吸收的增加（此吸收和電磁波波長的平方成正比）也是實現兆赫波雷射的一個困難。

現今主要有四種方向來產生兆赫波源。第一：微波技術的延伸，如微波振盪器(Gunn二極體、YIG振盪器)，第二：將兩束紅外線雷射下轉換(downconversion)，第三：quantum cascade laser，是基於砷化鎵/砷化鋁鎵的量子井異質結構，第四：單晶塊材，兆赫波激光已經在施加交叉電磁場或單軸應力的p型鍺上證實，且在摻雜三價或五價雜質的矽單晶，也發現兆赫波。此碩論主要是探討第四種方向，即摻雜三價或五價雜質的四價元素晶體，目前用鎵摻雜之鍺單晶來當作兆赫波源的研究對象。

1.2 文獻探討

先談談跟鍺同樣是四族元素的矽，成功利用單晶矽材料開發兆赫波源的實驗室並不多，在此篇論文主要介紹兩組實驗室。第一：Pavlov等人光激發(photoluminescence)摻雜五價矽單晶，使其發出兆赫波 [1]~[16]。第二：P.-C. Lv 等人也成功電激發(electroluminescence)摻雜雜質的矽單晶 [17]~[21]。

Pavlov等人用CO₂雷射光(9.3~10.6 μm)激發摻雜五價施子的矽單晶樣品，使用摻雜鎵的鍺(Ge:Ga ρ=40 Ω-cm)當作兆赫波的光電導偵測器，反應波長主要為120(截止波長)~40 μm，但在更短於40 μm的波長，Ge:Ga仍有一定反應。Ge:Ga光電流的大小或者反應突然激增，用來判斷自發放射(spontaneous emission)或受激放射(stimulated emission)，樣品發出的兆赫波頻譜則藉由傅立葉轉換頻譜儀(FTS)來量測。1998年開始，Ge:Ga偵測到經CO₂雷射激發的Si:P自發放射訊號 [1][2]，為了良好的共振腔，把長方體的Si:P的兩面磨光滑且平行(polished parallel within 1 arcmin)，就觀察到受激放射 [3]。不久，Si:Bi觀察到自發與受激放射，並由FTS量到Si:P和Si:Bi的兆赫頻譜 [4][5]。藉由放射頻譜與相關理論計算，探討受激電子在鬆弛到雜質最低能階過程，如何與矽聲子交互作用(見圖 1-2)，使得在P與Bi雜質能階中達到居量反轉，放射出兆赫波 [6]-[8]。之後，雜質為Sb與As的受激放射與頻譜也都觀察到 [9][11]，四種五價雜質於矽單晶的兆赫波頻譜整理於圖 1-3。至此，樣品都放在液氮中，改變溫度至8K重新量測四種五價雜質P、As、Sb、Bi頻譜 [12]，也摻雜了少量三價雜質(compensation)，觀察放射強度的改變 [13]，施加磁場達到可調兆赫波頻率功能 [16]。

P.-C. Lv等人對摻雜雜質的矽單晶施加電壓，紀錄樣品低溫的電性，也透過FTIR量測發射頻譜。2003年開始，電激發Si:B，觀察到兆赫頻譜 [17]，不久，得到Si:P頻譜，並說明因缺乏良好腔體，只是自發放射頻譜，且推論是離子游離才導致樣品放射兆赫波 [18]，隨之，Si:Ga頻譜也被量測到

[19]。分析Si:B在不同溫度，不同電流下的各頻譜峰值相對強度，定量描述電洞在雜質硼能階的分布情形 [20]。施加單軸應力於Si:P樣品上，觀察發射頻譜變化，驗證雜質能階分離 [21]。

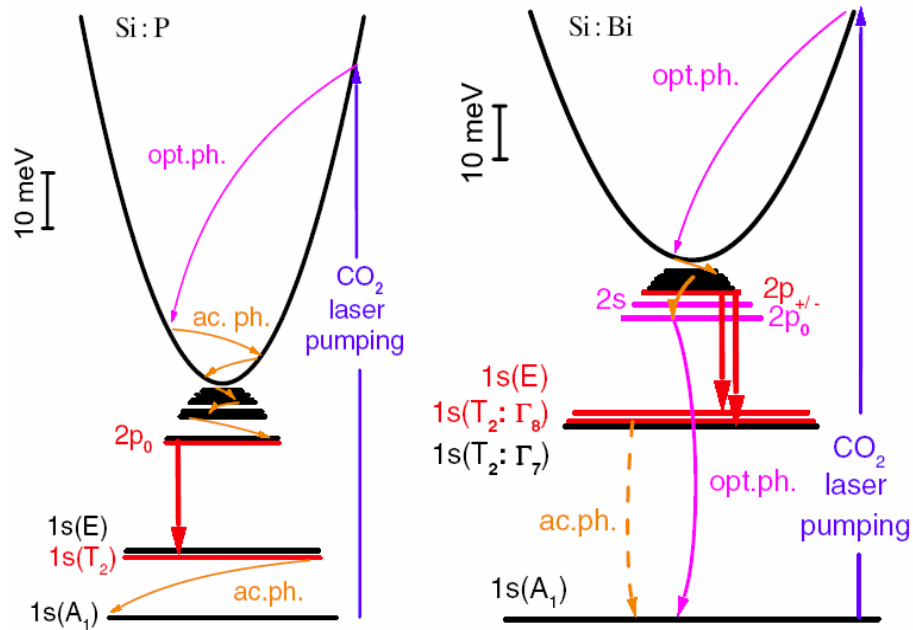


圖 1-2: Si:P與Si:Bi的光學與非輻射性躍遷。Ref[8]

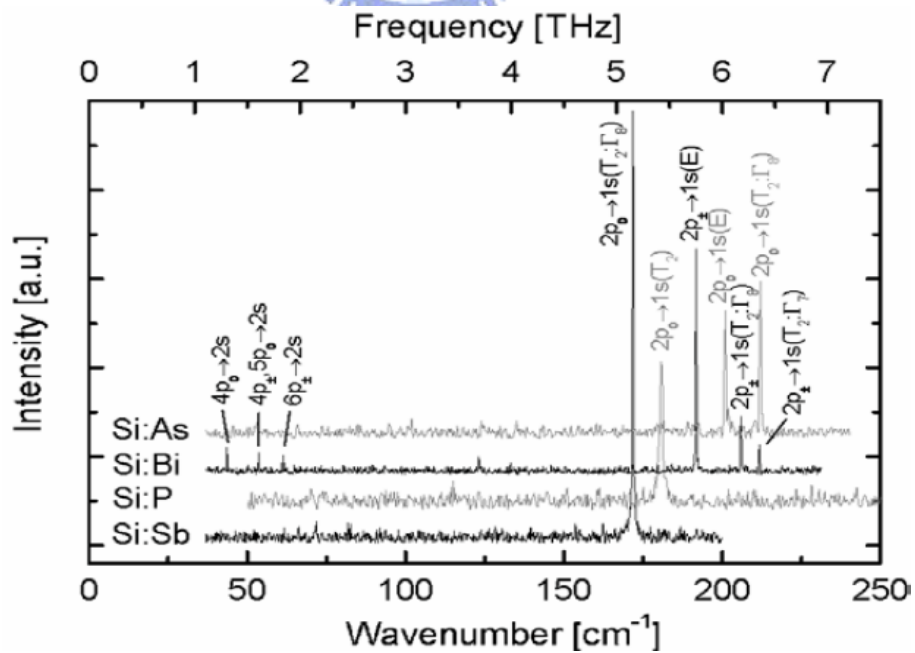


圖 1-3: 摻雜五族雜質的矽樣品之發射頻譜。Ref[14]

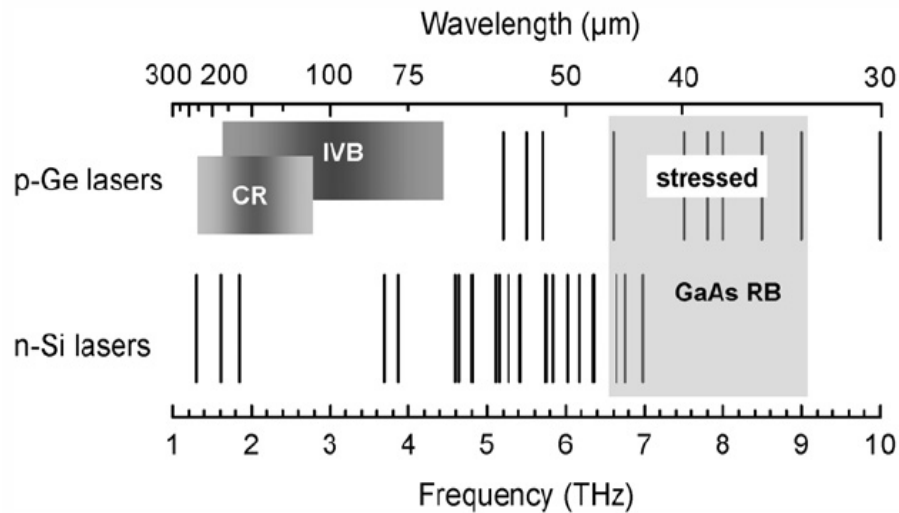


圖 1-4: 矽及鍺的兆赫波源頻率範圍。Ref[14]

再來談談p型鍺，此材料的兆赫激光已開發多年，如圖 1-4所示主要為IVB、CR、stress，即需施加交叉電磁場或者單軸應力[14]。但從前面P.-C. Lv研究可知，摻雜雜質的矽只需施加電場就可發出兆赫波，那麼同樣是四族元素的鍺也可如此。果然在近幾年，俄國實驗團隊藉由FTS得到驗證[22][23]，摻雜鎵的鍺在低溫下，單純施加電壓(無需磁場與應力)，使得電洞在雜質能階躍遷中放射出兆赫波光子

1.3 研究方向

同樣施加電場使載子在雜質能階躍遷中放出兆赫光子，但低溫下(~10 K)，矽因能隙大，阻值比鍺大很多，又儀器提供的電壓(電流)都有個上限，矽在低溫下的歐姆接觸製作便是關鍵，甚至還需要一些特殊結構，才能在儀器限制的前提下，激發大量載子放出足夠(對光偵測器來說)的兆赫波訊號。鍺則無需在製程上花費太多時間，一般儀器綽綽有餘，所以使用鍺，可讓我們把心力集中在建立量測頻譜技術上，等到技術成熟後，矽的兆赫頻譜也是未來要努力的目標。

施加脈衝電壓於摻雜鎵的鍺樣品上，量測其放射頻譜。另外，施加不同的直流電壓與變化溫度，觀察其吸收譜線強度的變化。期望從這些放射與吸收頻譜，進一步了解電洞在電場作用下，如何在雜質能階中躍遷，放出兆赫光子的物理機制。



二、 步進掃描振幅調變頻譜

步進掃描振幅調變頻譜(stepscan amplitude modulated spectroscopy)是量測摻雜三價或五價雜質的四族單晶(矽或鍺)發出兆赫波的必要技術。因樣品放射的兆赫訊號非常微弱，施加週期性電壓(pulse或burst)來調變光源，再採用鎖相放大器來解調，得到穩定的放大訊號，此時scanner就不可使用傳統的快速掃描(rapidscan)，需配合步進掃描來完成干涉圖。步進掃描有很多延伸技術，如時間解析(time-resolved)、相位調變、...等，而我們選擇振幅調變來量測週期性變化光源的頻譜。

振幅調變除了scanner要步進掃描外，還需搭配鎖相放大器，詳細的操作要點已收錄在附錄B和附錄C。在此章，先敘述成功量測到中紅外光源(glowbar)+chopper和pulseLED頻譜，使我們有了信心，也知道了一些要點，再進而用這個成熟的振幅調變技術來量測到兆赫放射頻譜。

2.1 中紅外glowbar光源 + chopper

開啟IFS 66v/S的內建中紅外光源glowbar，使用快速掃描量測(如圖 2-1所示)由光源glowbar、分光鏡(KBr)和光偵測器(DTGS)共同組成的頻譜範圍。

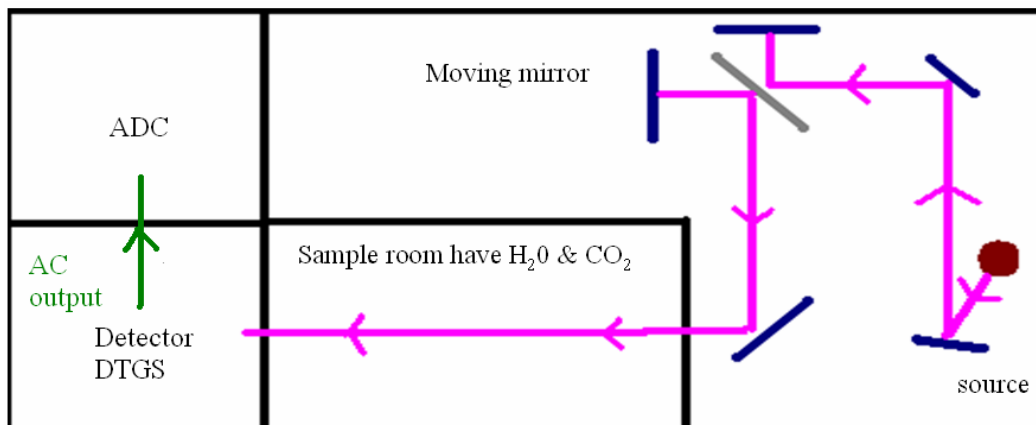


圖 2-1: 快速掃描架設

圖 2-2為光圈10 mm時的頻譜，可看見IFS 66v/S腔體內水與二氧化碳的清晰吸收譜線，整理如下表：

	譜線位置	特徵
水	1300-1950 cm^{-1} 3480-3960 cm^{-1}	series of sharp peaks series of sharp peaks
二氧 化碳	667 cm^{-1} 2348 cm^{-1}	sharp min doublet with central Max

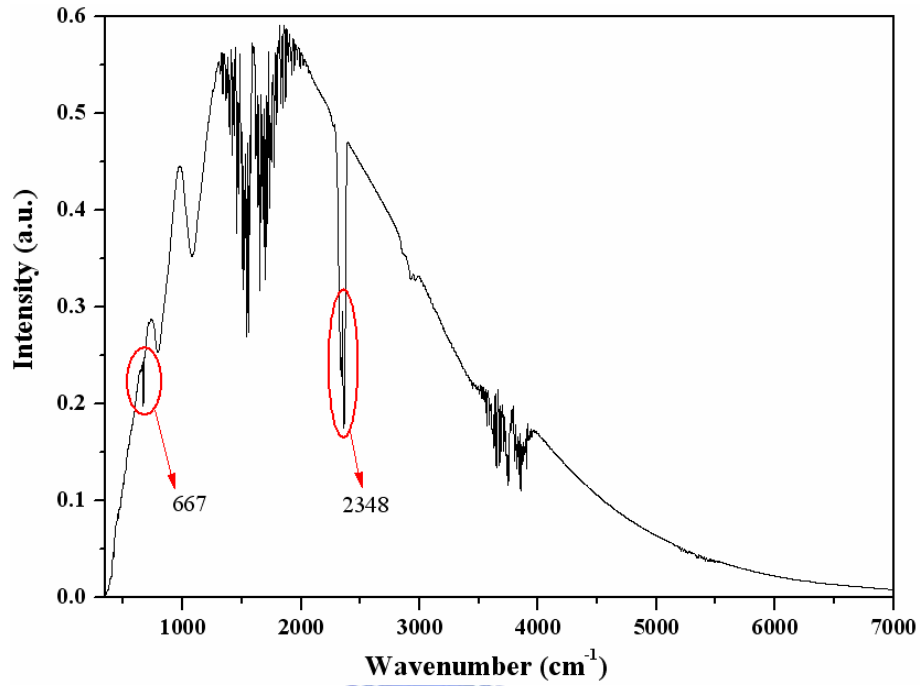


圖 2-2: 快速掃描配合光圈10 mm

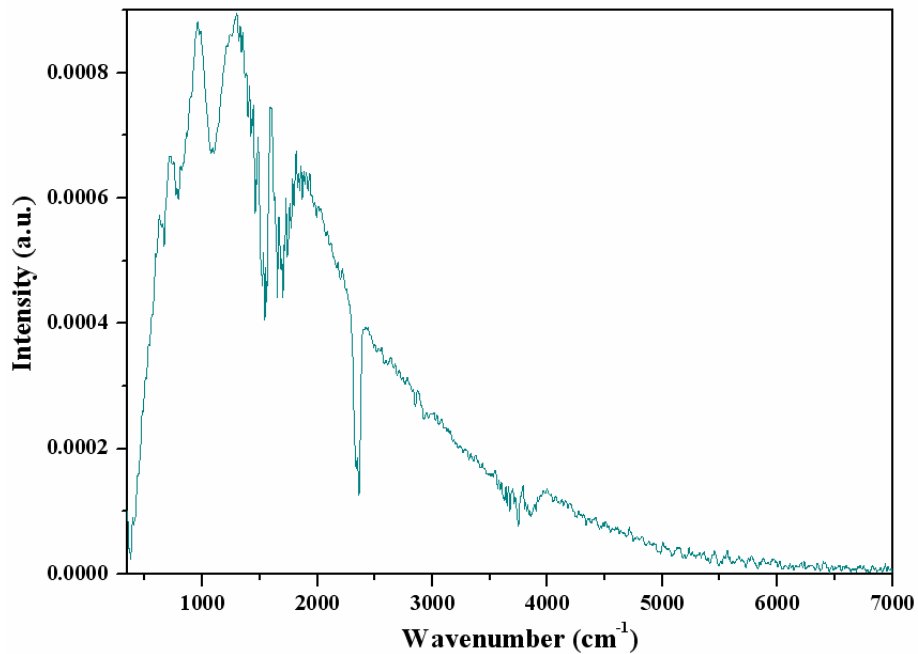


圖 2-3: 快速掃描配合光圈0.25 mm

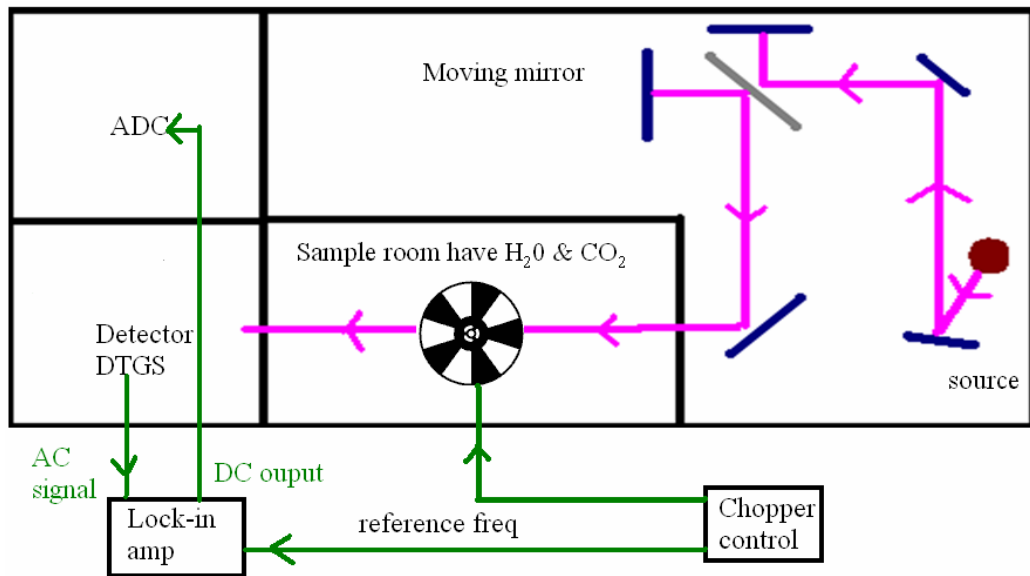


圖 2-4: chopper+步進掃描 架設

相較於光圈10 mm，只有微量的globar光源可通過光圈0.25 mm，量測頻譜如圖 2-3所示，不僅訊號強度嚴重衰弱，一些上述譜線也模糊難見。

因此使用光圈0.25 mm配合chopper來模擬微弱的脈衝光源，我們試著用步進掃描加上鎖相放大器來量測到比快速掃描(同樣光圈0.25 mm)還要清晰的頻譜，儀器架設如圖 2-4所示。實驗參數(請見附錄)為：

chopper 157 Hz(週期6.37 ms)

TC= 3 ms、30 ms、300 ms

stabilization delay = 5*TC

number of coaddition = 6369(10週期)

三種TC條件的頻譜結果示於圖 2-5，強度明顯比快速掃描增加，譜線也清晰許多。理論上，TC越長應可量測到越清晰的頻譜，在波數3000 cm⁻¹以上，TC300 ms呈現最小雜訊的譜線，但在低波數，如二氧化碳的667 cm⁻¹，TC300 ms反而看不到此吸收譜線，可能是因我們是採用扇形chopper來調變光源，此型chopper運轉中會產生風，擾動了在步進掃描中原本應靜止的scanner，當TC越長，使得風的擾動時間加長，增加了不可預測的因素。

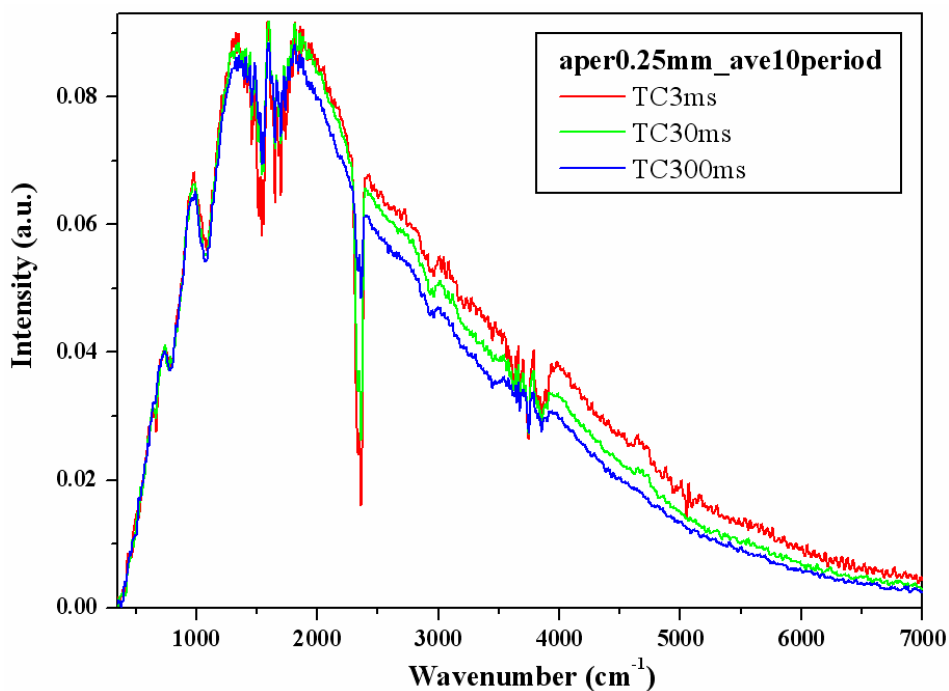


圖 2-5: 步進掃描配合光圈0.25 mm

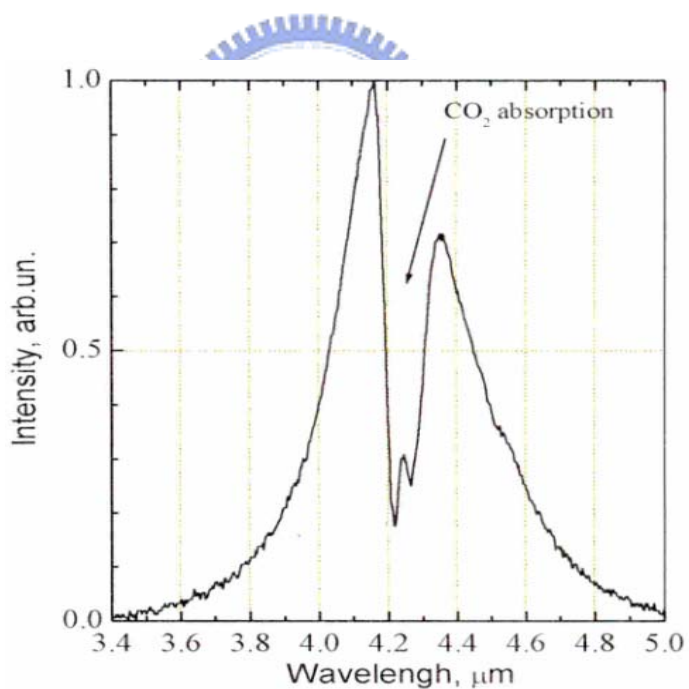


圖 2-6: LED頻譜產品規格

2.2 脈衝式LED光源

在此節使用可施打脈衝電壓的4.2 μm LED來產生脈衝光源，依然是由步進掃描和鎖相放大器來量測頻譜。LED的產品發射頻譜規格如圖 2-6如

示，頻譜中間的吸收正是二氧化碳造成的，儀器架設則如圖 2-7所示。當 scanner 停在一個 step，LED 脈衝光源使光偵測器產生週期電訊號，鎖相放大器則鎖到此週期電訊號的 first harmonic(簡寫 har1)，所以施加 LED 的電壓(或電流)越大，光源強度越大，光偵測器反應大，鎖相放大器的 har1 訊號也大。

我們先用較大脈衝電壓，讓鎖到的 har1 為 2.97 mV，記為條件 A。降低 LED 電壓使 har1 訊號衰弱到只有 45 uV，記為條件 B，條件 B 是用來模擬 Si(B) 或 Ge(Ga) 極微弱的兆赫波源強度。實驗參數為：

LED 電壓脈衝 157 Hz(週期 6.73 ms)

鎖相的 har1 =(2.97 mV for A) ; (45 uV for B)

TC = (3 ms、300 ms for A) ; (3 s、10 s for B)

stabilization delay = (5 or 6)*TC

number of coaddition = 6369(10週期)

A 條件的頻譜如圖 2-8 所示，可看出 TC 300 ms 的雜訊比 TC 3 ms 小很多，符合鎖相放大器理論。關於條件 B 需要使用到這麼大的 TC，是因為 har1 訊號太過微弱，必須花長久的量測時間才能量到可忍受的頻譜，結果如圖 2-9 所示，TC 3s 除了雜訊大之外，二氧化碳的吸收譜線也產生變形，這些都在 TC 10s 獲得改善。

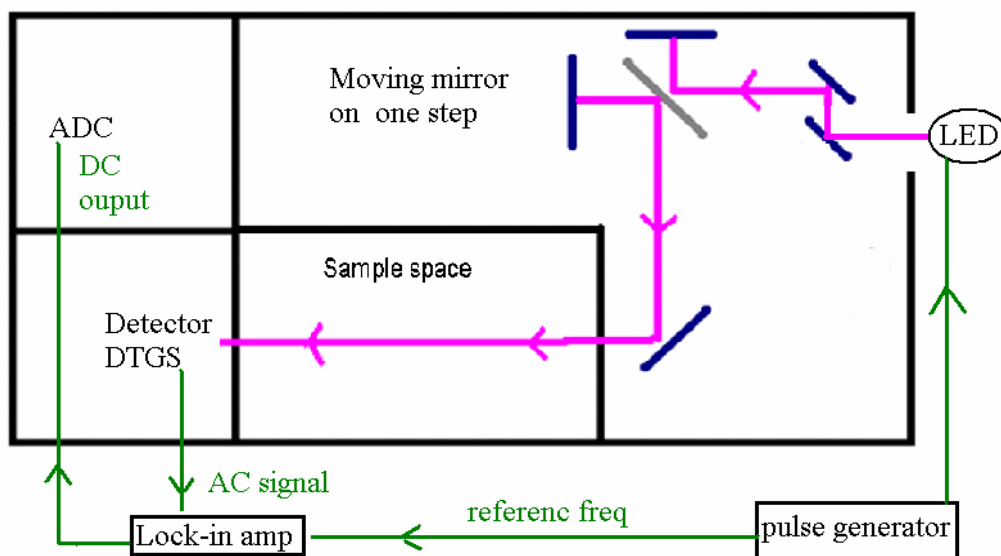


圖 2-7：脈衝式 LED+步進掃描 架設

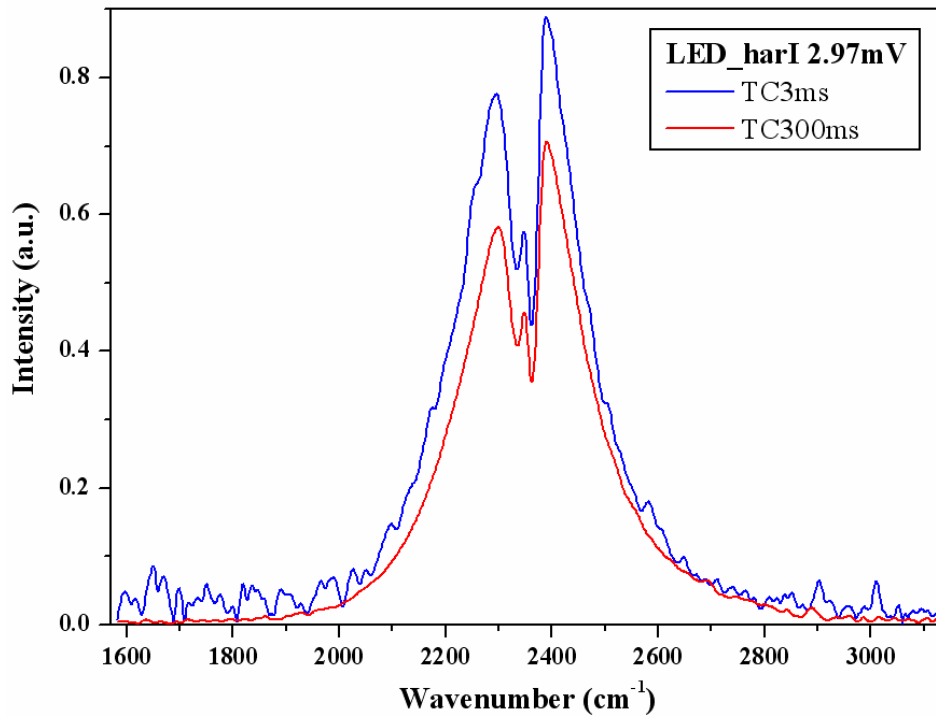


圖 2-8 : LED harI_2.97 mV 頻譜

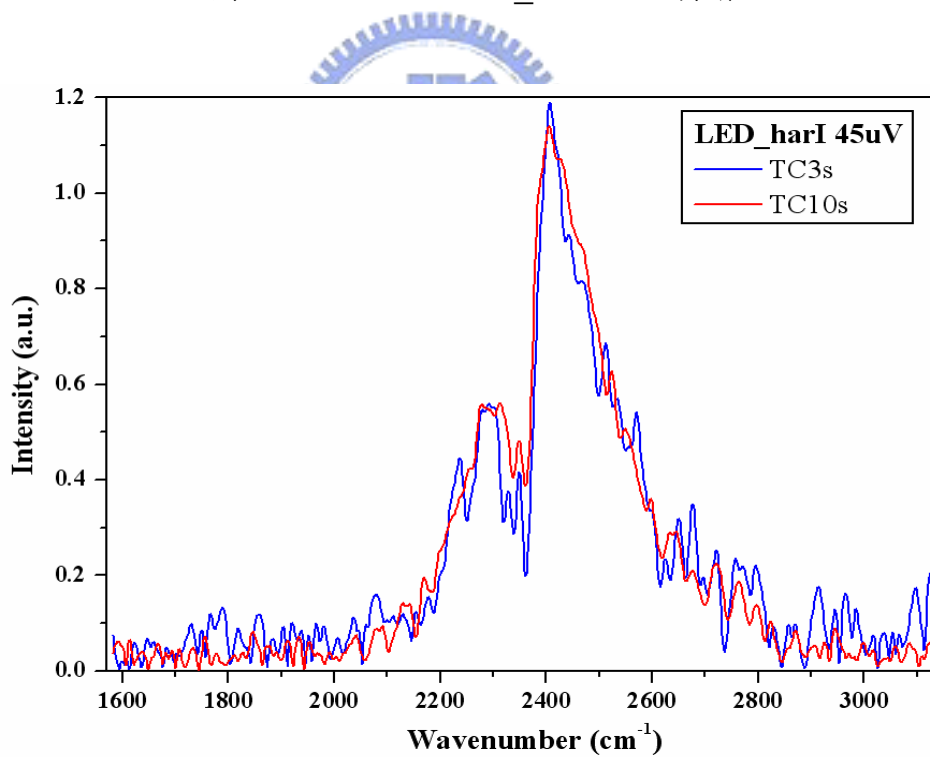


圖 2-9 : LED harI_45 uV 頻譜

2.3 鍺摻雜鎵之兆赫放射頻譜

先說明Ge(Ga)雜質能階的吸收頻譜[24]，結果為圖 2-10，可看見每個

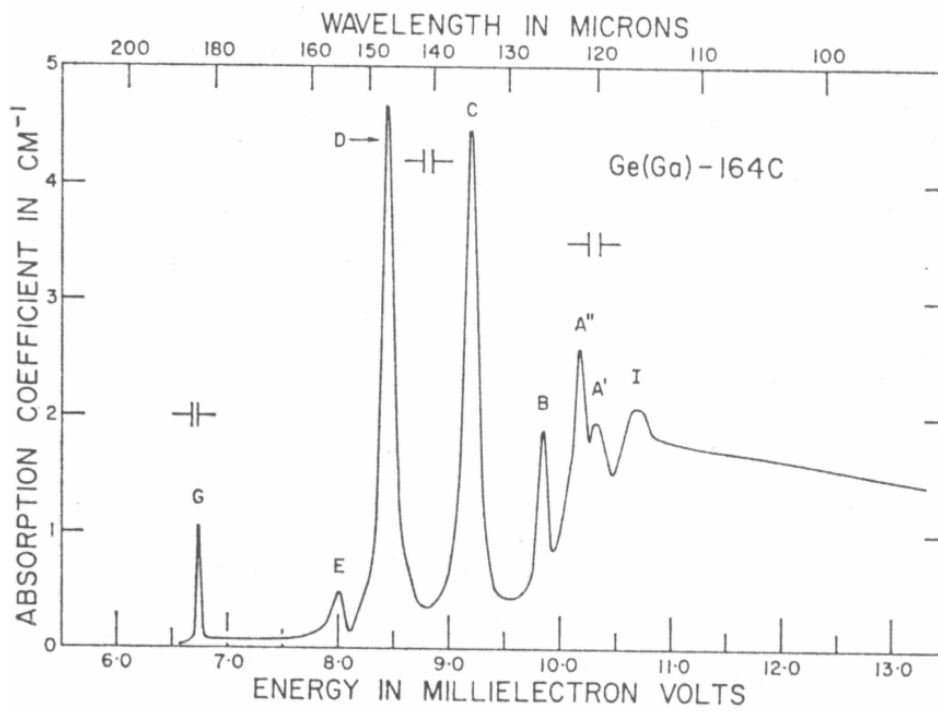


圖2-10: Ref[24]的Ge(Ga)吸收頻譜

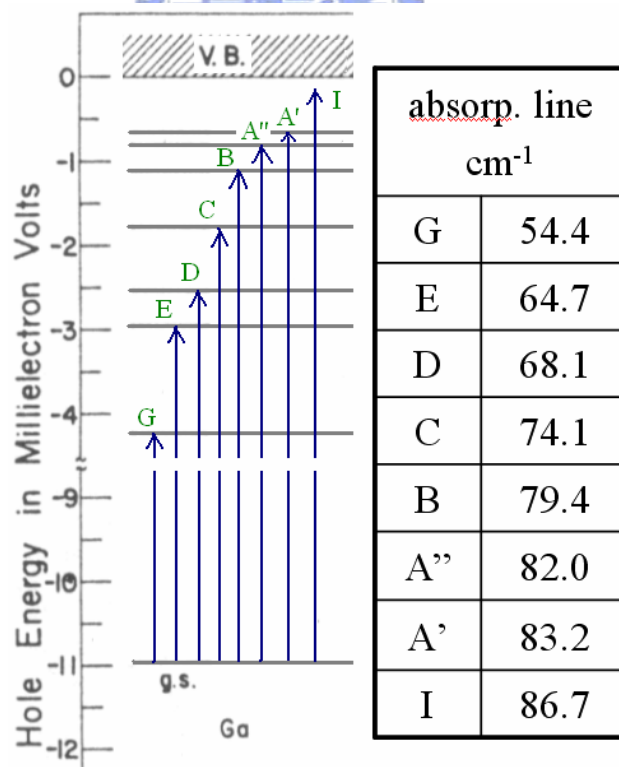


圖2-11: Ref[24]的吸收譜線符號意義

吸收譜線都有一英文字母標記，意義如圖 2-11所示，為電洞從雜質的最低能階到其他激發能階，需注意其中的I譜線，並不是電洞從最低能階到共價帶緣，而是到比A'躍遷更高的眾能階，但因實驗無法解析，造成I呈現寬譜線。

[22][23]為第一次量測到只加電場的Ge(Ga)就可放兆赫光子，圖 2-12中的1.99 THz和2.36 THz即為電洞雜質激發能階躍遷到最低能階所放出的光子，3.15 THz為電場造成的熱電洞從共價帶躍遷回雜質最低能階所造成。但此團隊使用的頻譜解析度只到 9.7 cm^{-1} ，更詳盡解析度將有助於研究譜線結構。若自行對[24]的吸收譜線作個對照，1.99 THz (66.3 cm^{-1})與2.36 THz(78.7 cm^{-1})應分別是D譜線(68.1 cm^{-1})與B譜線(79.4 cm^{-1})，是不是電壓與溫度造成譜線位移還有待驗證。圖 2-13中，隨著電壓加大，頻譜形狀也跟著變，共價帶的熱電洞越多，往雜質最低能階的輻射躍遷也跟著增加，使12 meV附近頻譜區域的放射強度增加，且3~7 meV的放射強度也增加，應該是輕重電洞間的躍遷造成。

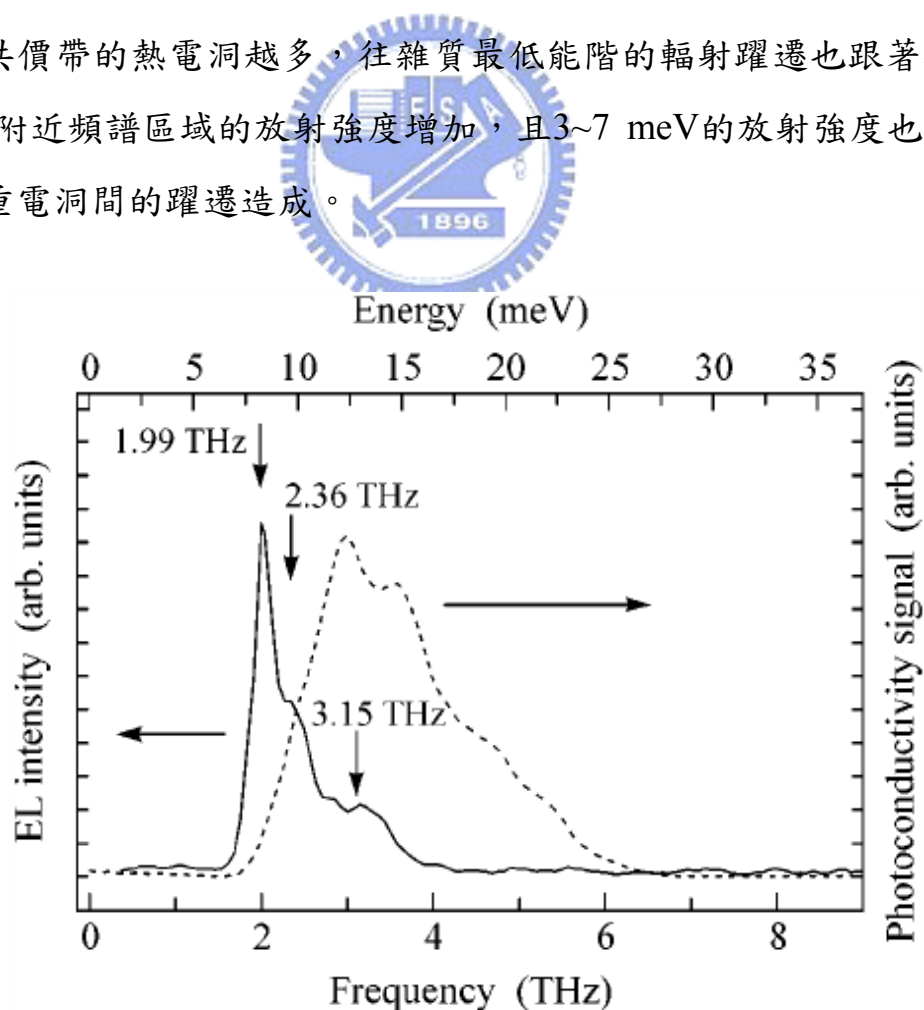


圖2-12: Ref[22]的Ge(Ga)放射頻譜

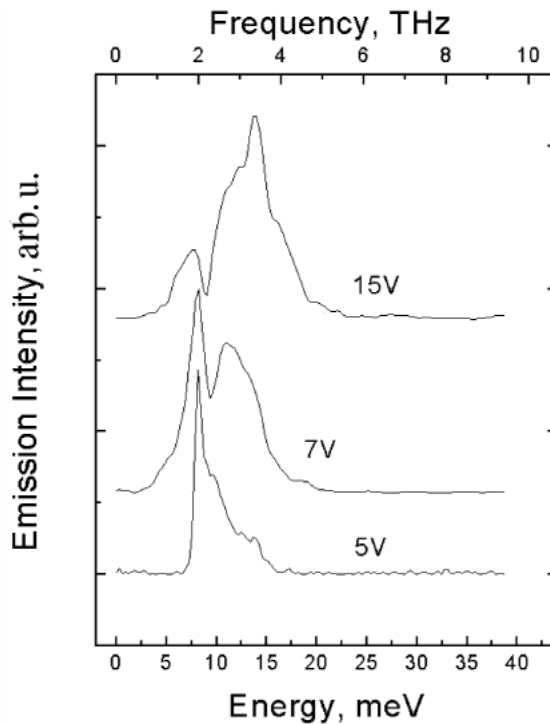


圖2-13: Ref[23]的Ge(Ga)放射頻譜

我們的Ge(Ga)樣品大小為 $5.05 \times 4.30 \times 1.98 \text{ mm}^3$ ，Ga的參雜濃度 $10^{14} \sim 10^{15} \text{ cm}^3$ ，電流由 5.05×1.98 面流過， 5.05×4.30 面則對著光偵測器。對樣品施加脈衝串(burst)，脈衝串的週期為 6.369 ms (157 Hz)，脈衝串中的每個脈衝週期為 20 us 、寬度為 10 us 。樣品發兆赫波的機制為載子在雜質能階的躍遷，此機制非常快速，兆赫波的有無頻率應即是單一脈衝的頻率，但光偵測器Bolometer的反應時間為 $\sim \text{ms}$ ，無法對單一脈衝的兆赫波作出解析，所以光偵測器的電訊號輸出為整群脈衝串週期 157 Hz ，之後的鎖相放大器也是鎖此 157 Hz 。

實驗架設如圖2-14，圖2-15中的紅色頻譜量測條件為：

脈衝電壓使樣品的脈衝電流值為 440 mA

脈衝串含106個脈衝(Bolometer輸出33%)

鎖相放大器的har1(157 Hz)大小為 80 uV

鎖相放大器的TC為 3 s

溫度 10 K

頻譜解析度 8 cm^{-1} ，

藍色頻譜量測條件為：

脈衝電壓使樣品的脈衝電流值為 300 mA

脈衝串含 160 個脈衝 (Bolometer 輸出 50%)

鎖相放大器的 $har1$ (157 Hz) 大小為 39 uV

鎖相放大器的 TC 為 10 s

溫度 9.5 K

頻譜解析度 6 cm^{-1} 。

先量測到紅色頻譜後，為了拉高 67.0 cm^{-1} 強度，使對 12 meV 附近頻譜的對比度增加，我們使用圖 2-13 的觀念，把電壓下降，但鎖相放大器的 $har1$ 訊號相當微弱、 TC 太大，為了有可容許的量測時間，我們把脈衝數增加至 160 ， $har1$ 強度才上升到可接受的範圍，溫度則從 10 K 自然降至 9.5 K ，另外把解析度給提高至 6 cm^{-1} ，預期觀測到更詳細的放射譜線，以上為藍色頻譜條件原因。

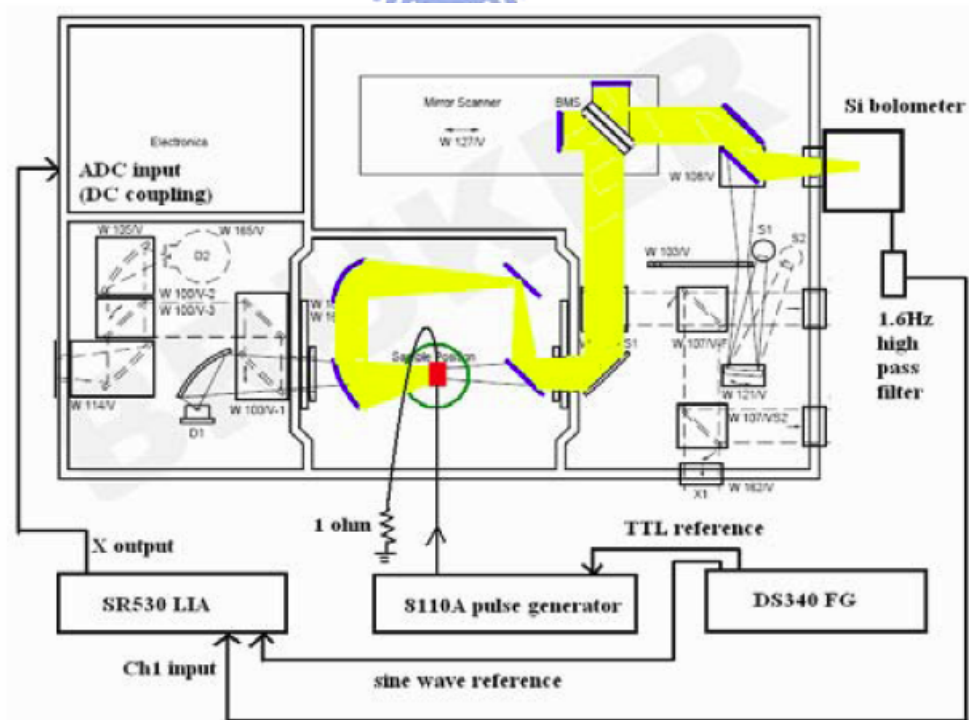


圖 2-14: 放射頻譜架設

從圖2-15，我們發現提高對比度的結果是失敗，原因還待之後更多的實驗來探討。對照圖中兩頻譜，可信度高的一條放射譜線為 67.0 cm^{-1} 或 67.2 cm^{-1} ，這條對應到國外做Ge(Ga)放射頻譜的實驗數據[22]，見圖2-12中的 $1.99\text{ THz}(66.3\text{ cm}^{-1})$ ，且我們比[22]更接近[24]的吸收D譜線(68.1 cm^{-1})。另一條可信的譜線為 86.7 cm^{-1} 或 87.3 cm^{-1} ，對應到[24]的吸收I譜線 86.7 cm^{-1} ，是文獻[22]所沒有量測到的。

兩條可信譜線，紅色(電流大)的波數都比藍色(電流小)小，譜線可能因電流增大而產生紅位移。單獨出現在藍色數據(解析度高的) 74.9 cm^{-1} ，有可能對應到[24]的吸收C譜線 74.1 cm^{-1} 。以上兩點有待更多的實驗來驗證。

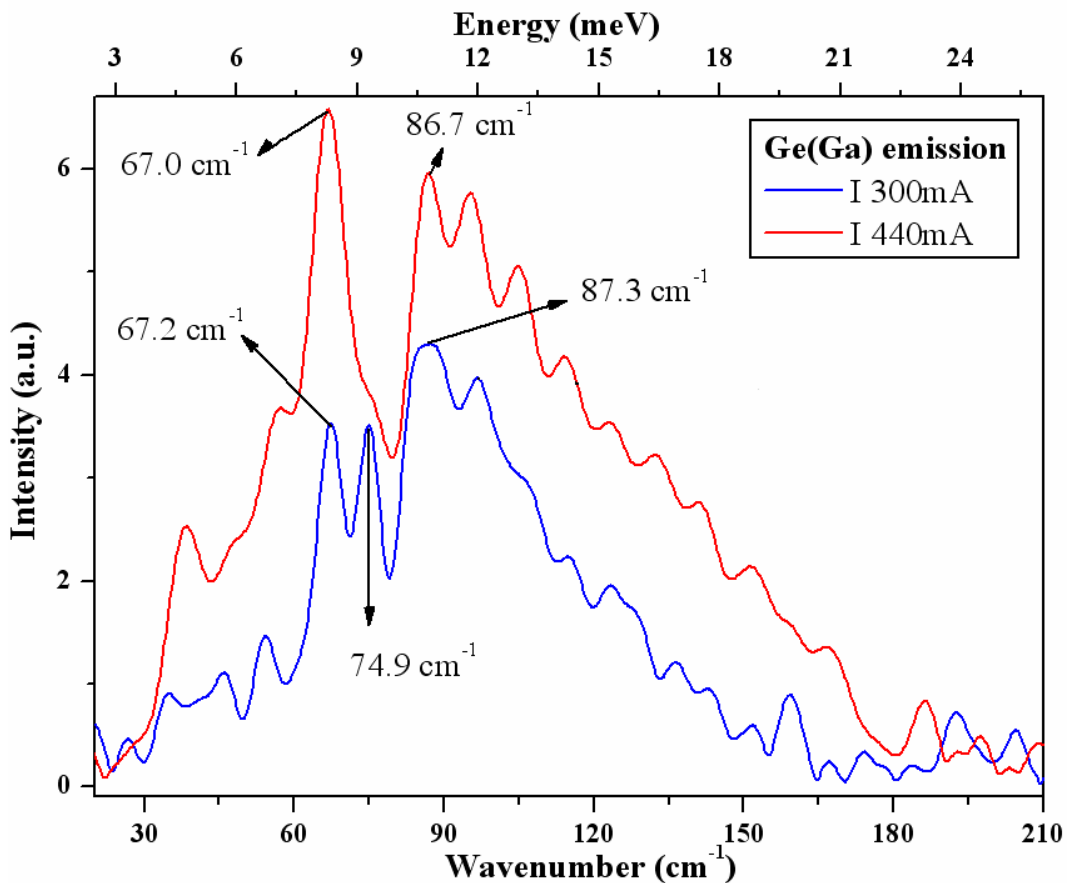


圖 2-15: Ge(Ga)放射頻譜

三、 步進掃描相位調變頻譜

在施加直流電場的情況下，對Ge(Ga)量測吸收頻譜，觀察這些雜質能階之吸收譜線的變化。預期隨電場越大，這些譜線(如圖 2-10)鋒值的強度減小，因電場激發電洞，使最低雜質能階的電洞變少，所以吸收變弱，甚至電場高到某值，某些譜線強度為負，此時便不是吸收而是增益(gain)。

除了量測到Ge(Ga)吸收譜線外，譜線峰值要保證在同樣溫度與電壓下都有一致強度，這樣去分析不同電壓下的鋒值變化才有意義，這使得量測增加困難度。理論上，電壓不是脈衝式而是直流電壓，只需要快速掃描即可完成此頻譜，但因Ge(Ga)為了低溫要放在低溫恆溫器中，量測吸收頻譜時，光路需通過恆溫器內層兩片PE windows(每片1 mm厚)和外層兩片PE windows(每片2.5~3 mm厚)，共四片，又加上Ge(Ga)樣品厚度是毫米等級，使得到達光偵測器的光量十分微弱。快速掃描是可以量測到正確譜線位置，但峰值強度始終無法穩定，儘管平均了500次。迫使我們必須使用相位調變(phase modulation)技術才能解決此困難。

相位調變與振幅調變同樣需要步進掃描與鎖相放大器，不同點在於每個step，scanner會刻意震動而非靜止，此震動有兩個參數，頻率與振幅，藉此在每個step調變訊號，才經由鎖相放大器藉著振動頻率解調光電訊號，完成一個step的干涉圖取樣。如此可使原本不穩定的鋒值強度獲得極好的改善。總之，當訊號微弱時，就試著步進掃描加上振幅或相位調變，再用鎖相放大器解調，這是一重要的觀念!

震動頻率在OPUS軟體中可從5~1464 Hz，若頻率太小，則鎖相放大器需較長的TC才能有穩定DC輸出，使得scanner的stabilization delay增加，量測時間就拉長，若頻率太大，因scanner的震動必有其機械限制，使得震動振幅不能太大。震動振幅在OPUS中以多少fringes來表示，其意義為多少倍

的HeNe雷射波長為振幅，振幅的大小幾乎不會影響stabilization dealy，但增大振幅，會使得高波數的訊號強度變弱，而低波數的強度變強，因相位調變頻譜是由Bessel函數乘於原始頻譜，調整震動振幅會使得這Bessel函數發生變化，實驗時，調整振幅大小使我們所興趣的波數範圍對到Bessel函數的最大值。更詳細的相位調變內容請參考Bruker廠商提供的步進掃描技術手冊，至於搭配步進掃描與鎖相放大器的操作要點跟振幅調變完全相同，請見附錄B與C。

3.1 電場對鍺摻雜鎵兆赫吸收頻譜的影響

大小為 $5.05 \times 4.30 \times 1.98 \text{ mm}^3$ 的Ge(Ga)樣品，電流由 5.05×1.98 面流過，紅外線光源則穿過 5.05×4.30 面來量吸收。我們給定直流電流，來量測樣品的跨壓。要觀察外加電場對吸收譜線的影響，照理說樣品在不同電流下的溫度要維持固定，但因本實驗室的液氮冷卻技術尚未成熟，所以當電流越大，樣品發出的焦耳熱越多，溫度也隨之增加。電流大小對吸收譜線影響，我們共作了三組數據，分別建立在不同的起始溫度(樣品尚未施加電流)：8 K、10 K、14 K。頻譜解析度分別為 2 cm^{-1} (10 K & 14 K)及 2.5 cm^{-1} (8 K)，量測背景吸收時，是把樣品給拿開，留下低溫恆溫器的四層window。

第一組為10 K，施加電流對樣品跨壓與溫度關係如圖3-1所示，溫度隨電流增加而上升，樣品電阻呈現大變小，再由小變大。圖3-2則為不同電流下的吸收頻譜，每個電流條件我們測量兩次來測試相位調變技術是否能得到穩定的吸收譜線，可看到同電流的兩條曲線重疊性相當高，雖然吸收峰值不是完美一致，但對於不同電流的峰值比較已提供了很高的可信度。

參照[24]吸收譜線，我們量測到C譜線(74.1 cm^{-1})與D譜線(68.1 cm^{-1})的變化，如圖3-2所示，D譜線峰值反而呈現先上升而後下降的情況，並非完

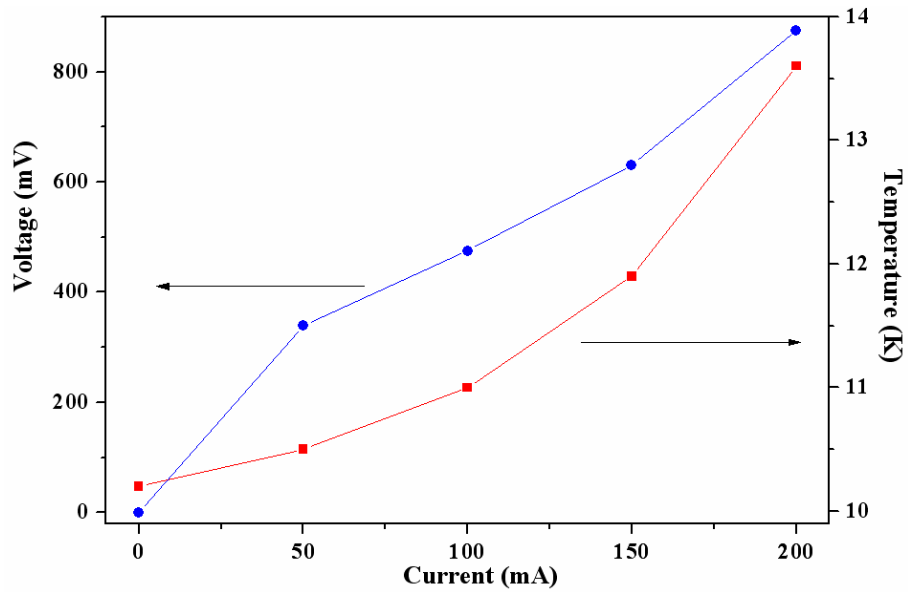


圖 3-1: 10 K組之外加電流對樣品跨壓與溫度關係

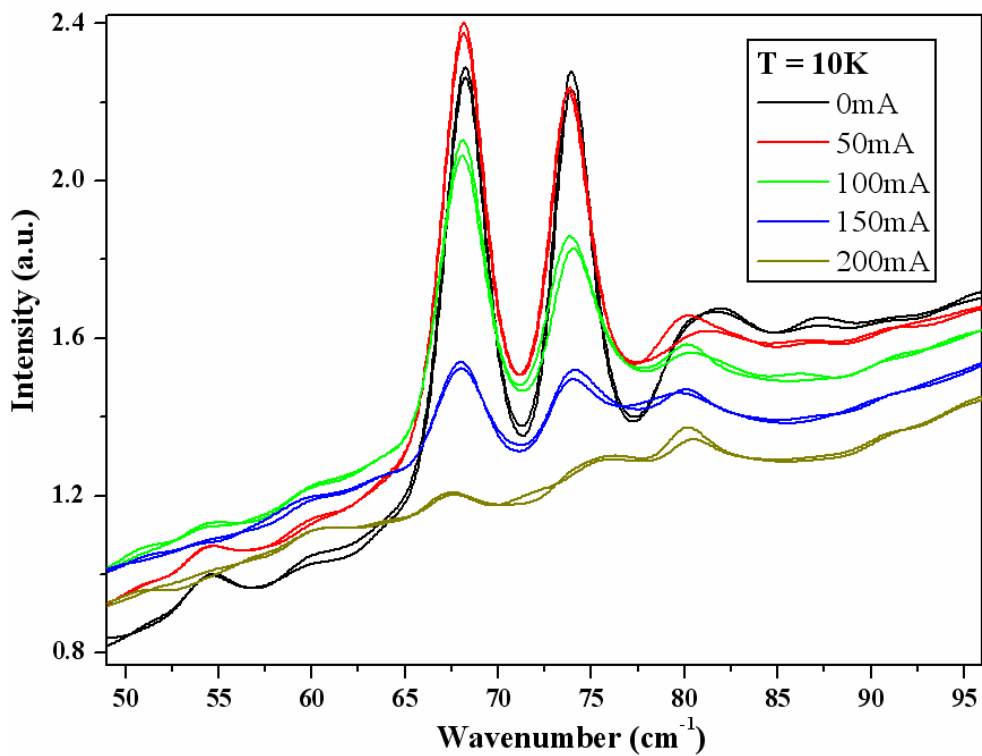


圖 3-2: 10 K組之不同電流下的吸收頻譜

全如我們預測隨電流上升，在雜質最低能階的電洞減少，而使吸收下降。但也發現整個頻譜會隨著電流而變化，如非譜線範圍 $85\sim 95\text{ cm}^{-1}$ 隨著電流上升而吸收量減少，可能是自由載子或聲子造成，還有待證實。因為這是加

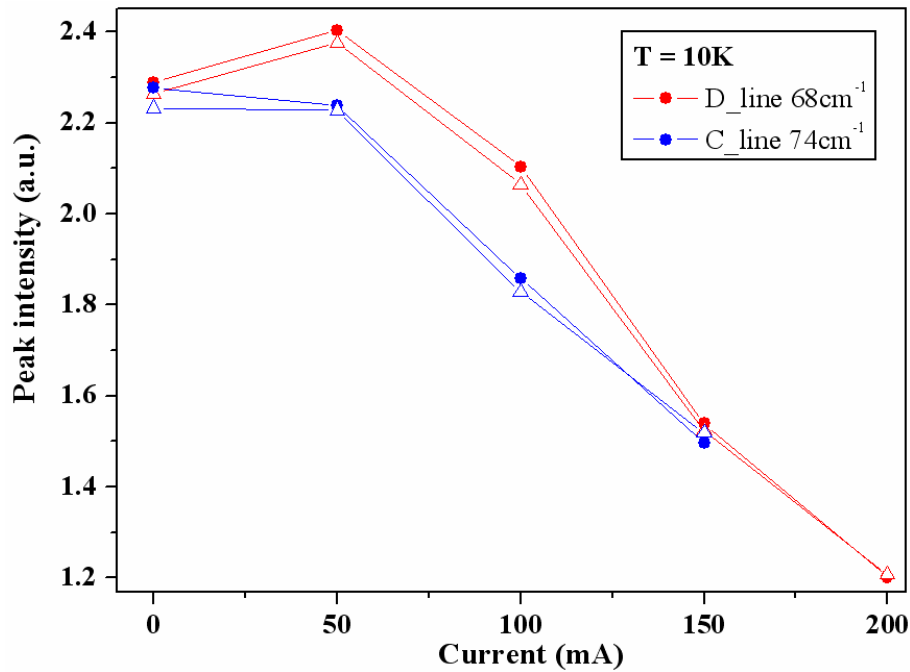


圖 3-3: 10 K組之吸收峰值變化

電流後，樣品整體的吸收變化，無法單獨把雜質能階的吸收譜線從自由載子吸收給分割，這會造成問題。問題為圖3-2中50 mA的D譜線峰值比0 mA的還大，但因50 mA的72 cm⁻¹與63 cm⁻¹這些非譜線高度都比0 mA還高，若結論為50 mA的D譜線吸收比0 mA還強是有問題的，只能說50 mA在D譜線位置的雜質能階吸收加上自由載子吸收的總和比0 mA大。至於電流100 mA以上的譜線，是確實可從圖中就判斷雜質能階的吸收比0 mA還小。圖3-3譜線峰值對電流的變化，峰值為圖3-2中所呈現的大小，即是雜質吸收加上自由載子的結果。

第二組起始溫度升高至14 K。見圖3-4，溫度同樣隨電流而增加，電阻依然呈現大轉小，再小轉大情形。譜線峰值變化則不同於10 K組，D譜線峰值隨電流增加而下降，反而C譜線呈現先升後降情形，如圖3-5與圖3-6所示。

第三組降低至8 K。見圖3-7，電流一開始增加時，跨壓反而減少，呈現負電阻現象，可能產生震盪情形仍待證實，高電流的電阻變化依然是電阻由小轉大。雖低電流的跨壓減少，但輸入功率(電流與跨壓乘積)還是隨著電

流增加而上升，所以樣品溫度是持續上升。C與D譜線都有先升後降的情形，且8 K組的現象極為明顯，直到電流至125 mA，峰值才降至0 mA大小，如圖3-8及圖3-9所示。同樣地，譜線先上升情況是否單純由雜質能階吸收所造成還有待驗證。

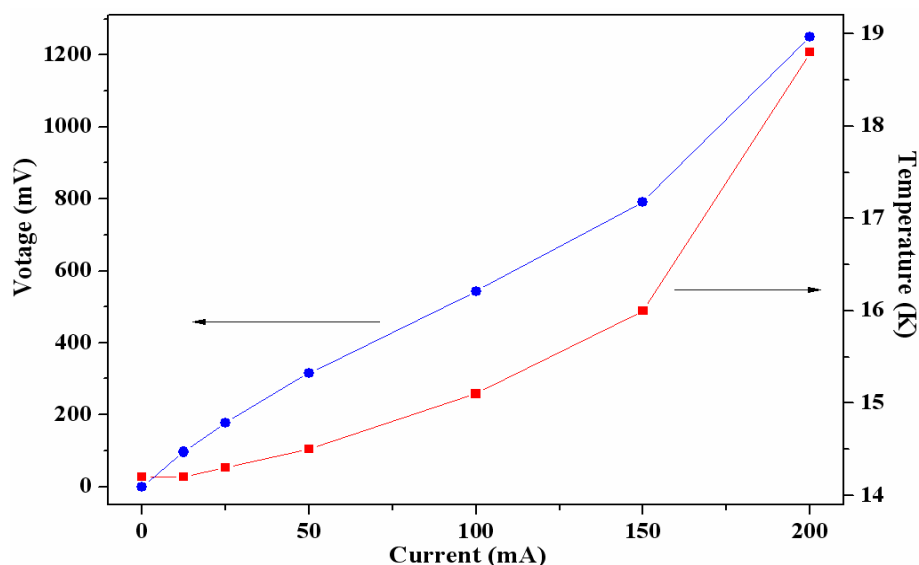


圖 3-4: 14 K組之外加電流對樣品跨壓與溫度關係

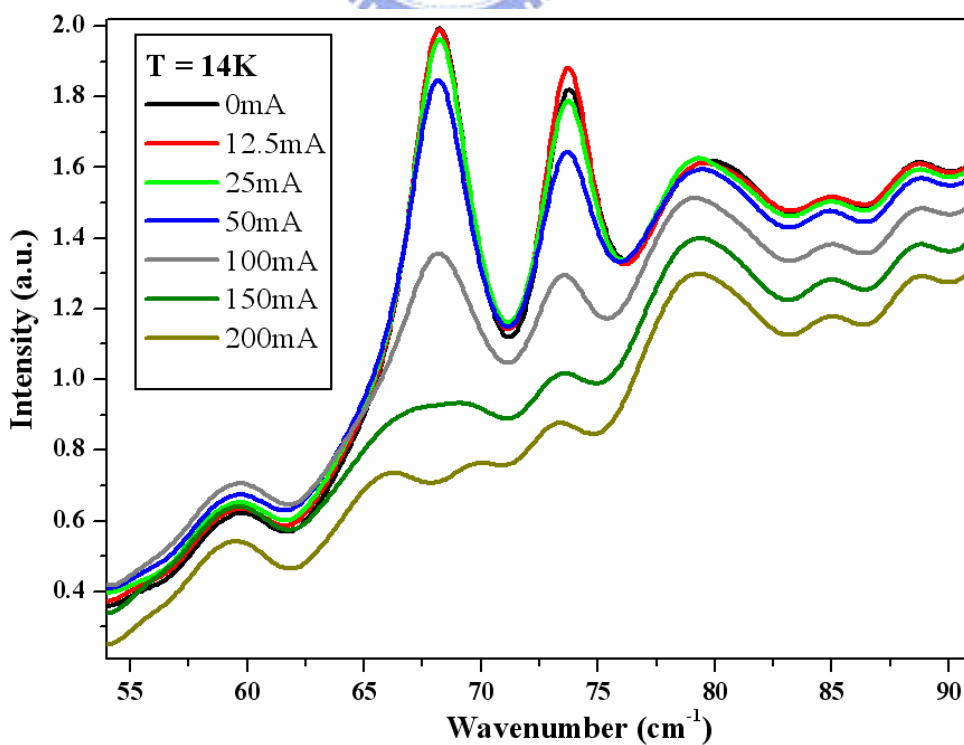


圖 3-5: 14 K組之不同電流下的吸收頻譜

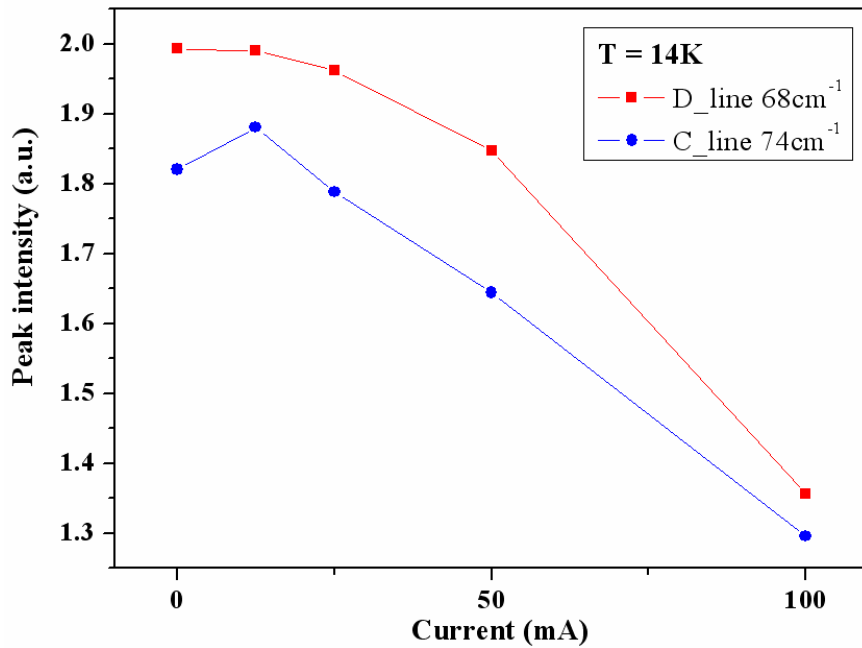


圖 3-6: 14 K組之吸收峰值變化

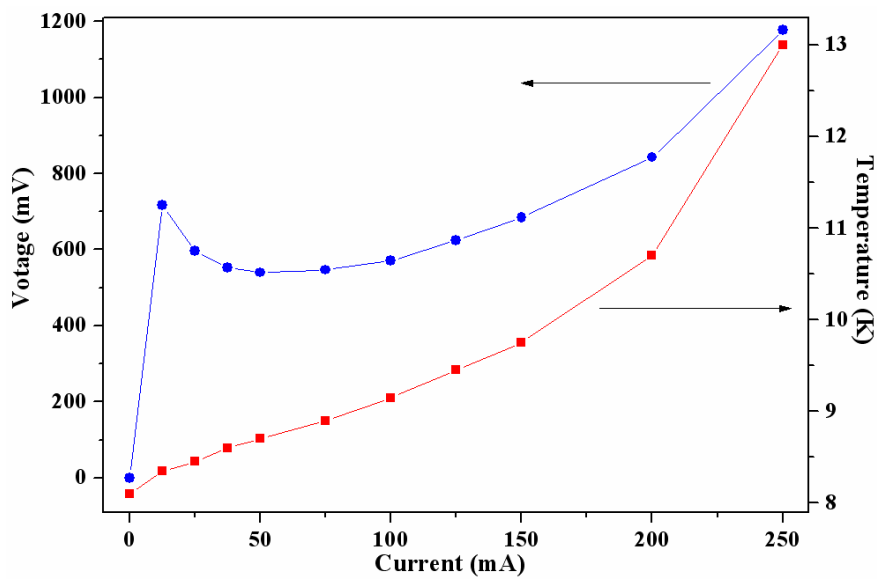


圖 3-7: 8 K組之外加電流對樣品跨壓與溫度關係

總結來說，三組溫度的C和D吸收譜線當電流大到200~300 mA時，幾乎沒法從整個吸收頻譜分辨此兩譜線，應是外加電場大到把在雜質最低能態的電洞激發至激發態或共價帶緣，造成雜質最低能態的電洞數目很少，使得原在雜質最低能態的電洞藉由吸收光子躍遷至雜質激發能階的機制減少許多，吸收譜線強度因此微弱到難以分辨。我們預測此大電流的情況下，

電洞於雜質能階的分布已達居量反轉，與第二章中要量測到Ge(Ga)放射頻譜所需的外加電流值(300 mA以上)非常有一致性。

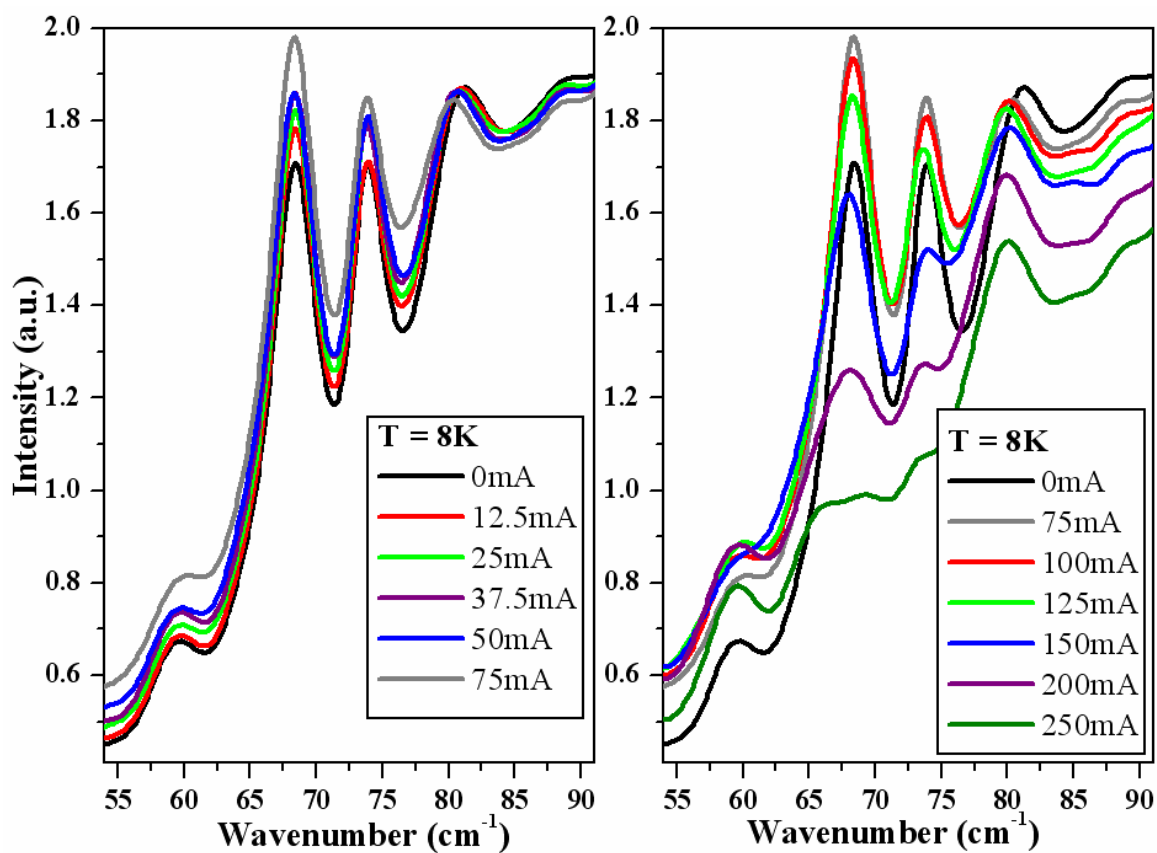


圖 3-8: 8 K組之不同電流下的吸收頻譜

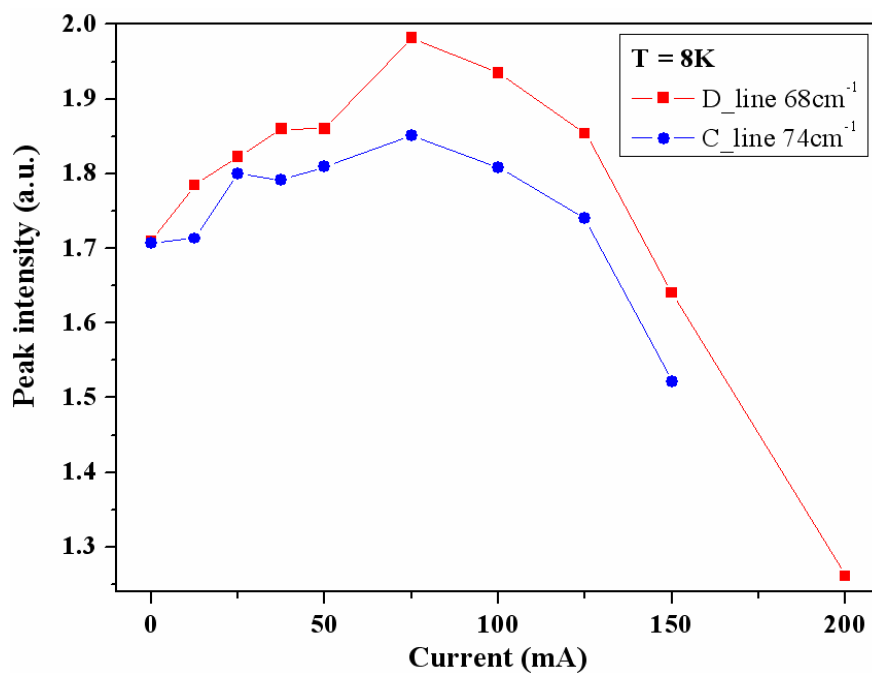


圖 3-9: 8 K組之吸收峰值變化

四、 結論與建議

低溫(~ 10 K)時，施加電場的鍺摻雜鎵樣品，其電洞於鎵雜質能階的躍遷落在兆赫波頻段(遠紅外線)。我們成功使用步進掃描振幅調變技術量測到 Ge(Ga)在外加電場下的兆赫波放射頻譜，這些放射譜線都跟現有文獻有非常吻合的部份，相當有可信度。也使用了步進掃描相位調變技術量測到 Ge(Ga)在不同電流下兆赫波吸收譜線的變化，確實觀察到譜線吸收隨電流有明顯下降趨勢。

未來，在已成熟的技術基礎之上，持續量測更多條件下的頻譜，如放射與吸收頻譜的解析度可往上提升，預期觀察到更多譜線，期望藉由譜線在不同電壓、溫度下的強度變化，放射與吸收頻譜能相輔相成，而對載子於雜質能階的躍遷做更深入的了解。此外，除了 Ge(Ga)，Si(B)、Si(P)...等，四族晶體摻雜三價或五價雜質的樣品，都可以作一連串系統的研究，有助於未來兆赫波雷射的實現。



附錄A: OPUS軟體參數操作要點

壹、Scanner Velocity

圖 A-1 中，OPUS選擇Scanner(moving mirror)速度單位不是(長度/時間)，卻是Hz，為什麼？

Bruker IFS66vs使用He-Ne雷射干涉圖的zero crossing來決定何時取樣。He-Ne雷射為單頻光，波數($1/\lambda$) 15800 cm^{-1} ，干涉圖如圖 A-2所示scanner在建設性干涉位置，光偵測器接受到最強的He-Ne雷射訊號，反之，scanner

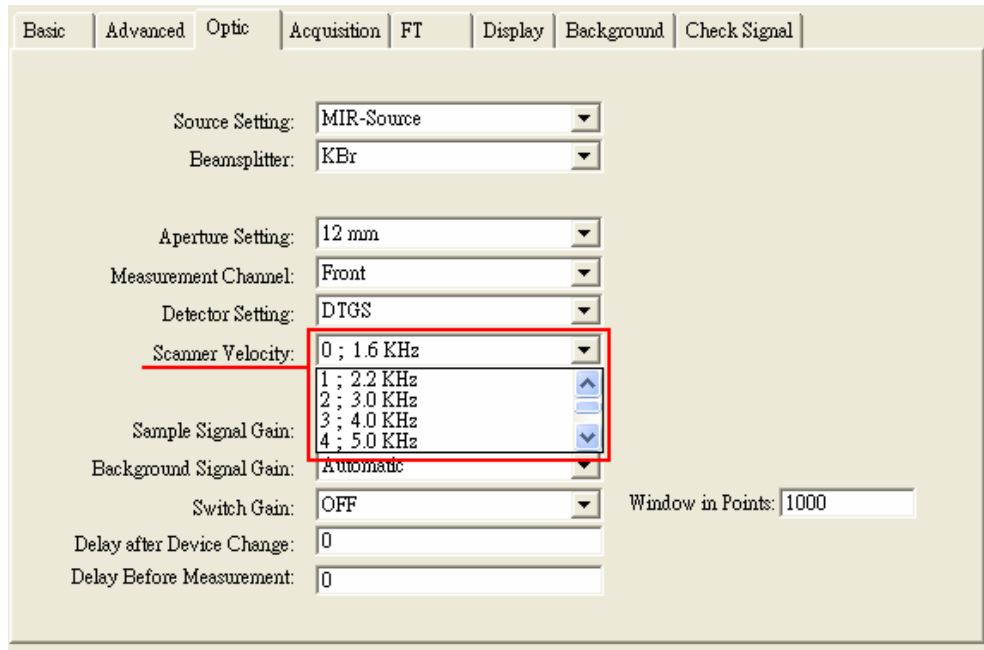


圖 A-1: OPUS的Scanner Velocity選單

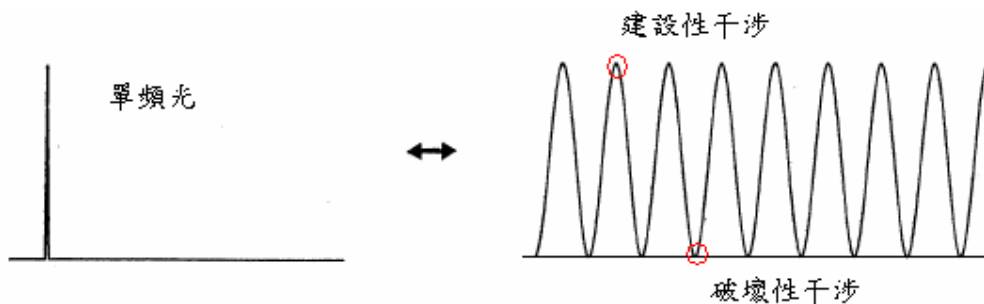


圖 A-2: 單頻光的頻譜與干涉圖

移到破壞性干涉位置，光偵測器幾乎沒有訊號。當scanner以一定速度(rapid scan mode)位移一段長距離，在這段期間，干涉產生了建設-破壞-建設-破壞...週期變化，光偵測器再把光訊號轉成電訊號，可用示波器(AC couple)接LSA point(TC 20 processor board)看到此電訊號為sine波形，其頻率即為選單Hz由來。

有兩個因素可改變此電訊號sine波形的頻率。Sampling用的單頻雷射波長，波長越長，scanner需花越多時間，才能從建設性位置到破壞性位置，但在儀器中，雷射固定使用He-Ne，所以波長(λ)不變。另一是Scanner的速度(v)，速度越快，sine波的頻率(f)越高。知 $v = (1/2)\lambda * f$ ，1/2是因為scanner移動 x 會造成光程差 $2x$ ，在此取 $\lambda=1/15800 \text{ cm}$ 得下表：

		Frequency in OPUS (kHz)										
		1.6	2.2	3.0	4	5	7.5	10	20	40	60	80
Scanner	v (cm/s)	0.05	0.07	0.10	0.13	0.16	0.24	0.32	0.63	1.27	1.90	2.53

貳、Low pass filter(LPF)

當光偵測器把光訊號轉成電訊號，LPF把頻率高於16 kHz給濾掉，如圖 A-3，但右邊的波數代表什麼？且此數字會跟著Scanner速度而變。由壹

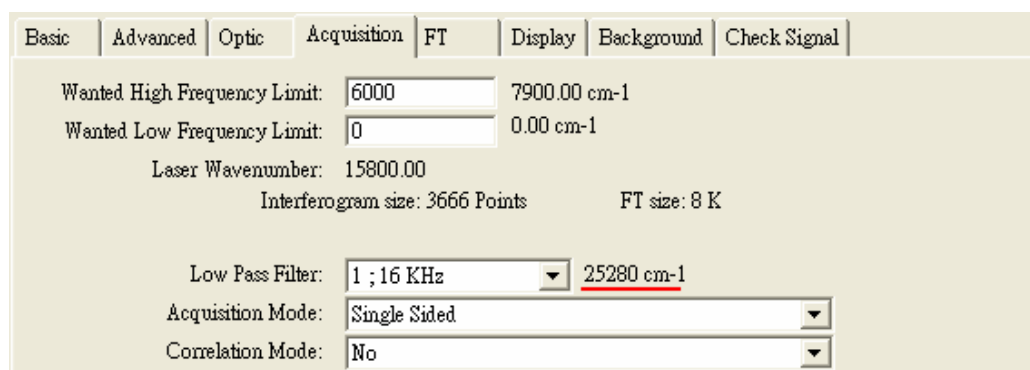
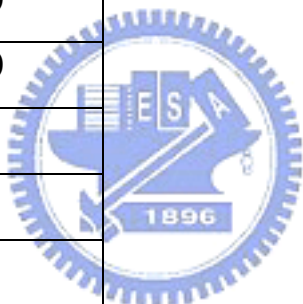


圖 A-3: 低通濾波器

小節得知，單頻光作干涉所產生電訊號的頻率，跟光的波數(也就是波長)與scanner速度有關，固定scanner速度，光的波數大於LPF的波數數字，其產生的電訊號就會高於16 kHz，因此被濾掉。由壹的觀念推得此式，k of LPF = 252800 / f (對應到scanner的v) ，得下表：

		k of LPF (cm ⁻¹)
scanner velocity f (kHz)	1.6	158000
	2.2	114909
	3.0	84267
	4	63200
	5	50560
	7.5	33707
	10	25280
	20	12640
	40	6320
	60	4213
80	3160	



參、Interferogram size points of double side

討論頻譜解析度、頻譜上下限如何影響干涉圖點數。

圖 A-4，頻譜上限 v_1 (Wanted High Frequency Limit)為15800 cm⁻¹，頻譜下限 v_2 (Wanted Low Frequency Limit)為0cm⁻¹，而不是空格內的15700&600。假設He-Ne雷射波數k為15800 cm⁻¹，把上下限填入空格時，OPUS自動會在右邊顯示相對應的 v_1 & v_2 [25]:

$$v_1 = m * k, m = 1 \text{ or 分數}$$

(在此不考慮oversampling，即 $m > 1$)

$$v_2 = (n-1/n) * v_1, n \text{ 為正整數}$$

且(n/m)一定為正整數

要避免aliasing，必須確定所量測頻譜在上下限以外都為零，一旦確定，可經由縮小上下限範圍來減少量測時間。可由[25]知在選定上下限後的sample spacing 為 $\Delta X = 1/(2*|v1-v2|) = (n/m)*\Delta X_{min}$ ，其中 minimum sample spacing $\Delta X_{min} = \lambda/2$ 。

現在討論當double sided時，如何算出干涉圖點數。此方法與phase resolution、phase correction mode、apodization fuction、zero filling factor、光圈大小與scanner velocity都無關。首先設 $v1 = k$ 、 $v2 = 0$ ，也就是 $\Delta X = \Delta X_{min}$ ，再把解析度 Δv 調為 1cm^{-1} ，紀錄此時的干涉圖點數 M_0 。在OPUS中，頻譜上下限與解析度是可以各別設定的，干涉圖點數 M 也因此跟著變動，而改變上下限，就依上段敘述改變 ΔX 。

規則為

$$\Delta v * M * \Delta X = 1 * M_0 * \Delta X_{min} = \text{定值}$$

當我固定上下限， ΔX 不變，讓 Δv 越小，則 M 越大，所以 $M * \Delta X$ 越大，可把 $M * \Delta X$ 想作光程路徑，要有越小的 Δv ，光程路徑勢必要越長。當固定 Δv ，擴大上下限， ΔX 縮小，使得 M 必須增加，但光程路徑長度 $M * \Delta X$ 是不變的。

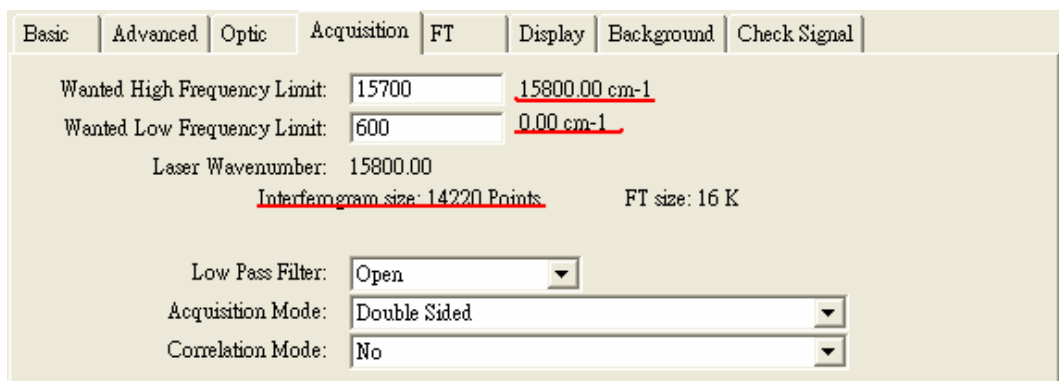


圖 A-4: OPUS的頻譜上下限與干涉圖點數

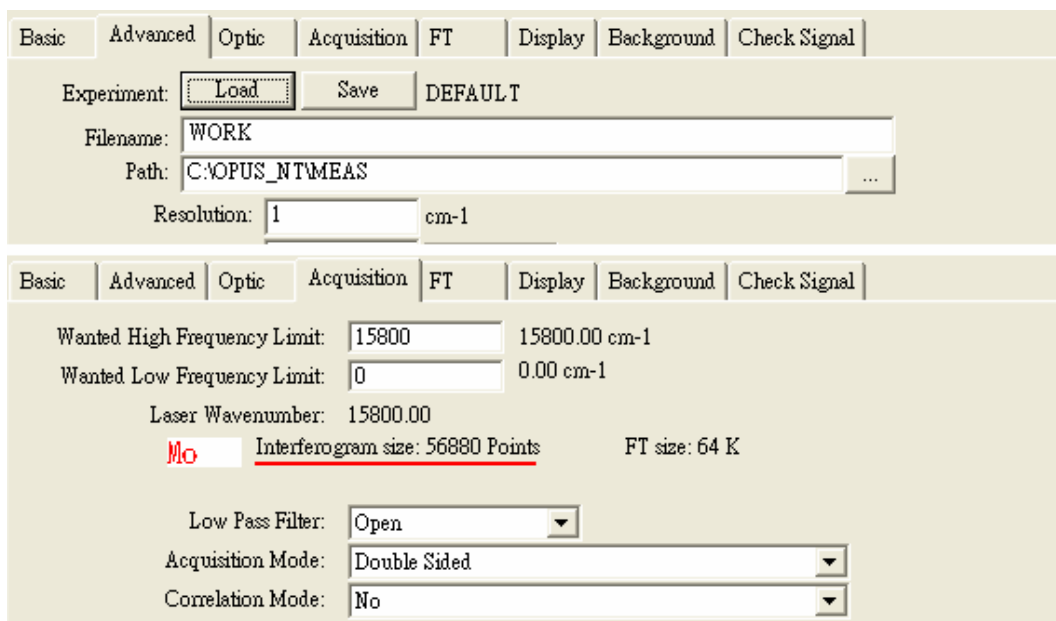


圖 A-5: 干涉圖點數 M_0

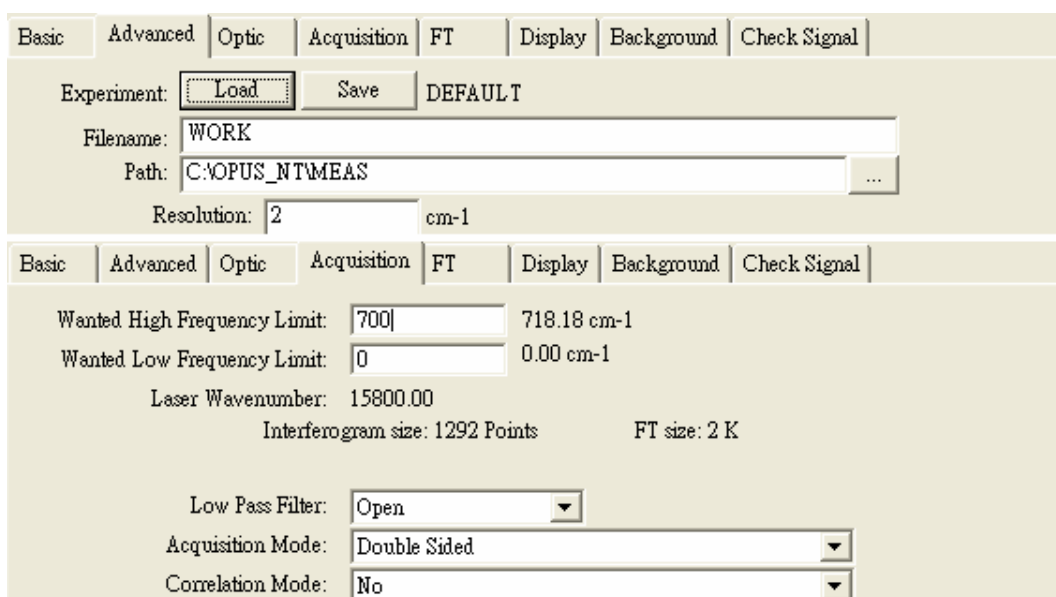


圖 A-6: 解析度為 2cm^{-1} 、 $\nu_1=718.18\text{ cm}^{-1}$ 、 $\nu_2=0\text{ cm}^{-1}$ 的干涉圖點數 M

由圖 A-5得 $M_0 = 56880$ ，練習算出圖 A-6條件下的 M 值。 $\nu_1 = 718.18\text{ cm}^{-1}$ 與 $\nu_2 = 0\text{ cm}^{-1}$ 知 $\Delta X = 22 * \Delta X_{\min}$ ，且 $\Delta \nu = 2\text{cm}^{-1}$ ，所以 $M = M_0/44 = 1292$ ，即為所求。

肆、Interferogram size points of phase & single side

圖 A-7中的相位(phase)干涉圖點數只跟頻率上下限、相位解析度(依 OPUS phase resolution翻譯,但作者不認為即是相位解析度)有關。在某頻率上下限,選擇double side,頻率解析度為 1 cm^{-1} ,將干涉圖點數除以相位解析度,得到的整數即為相位干涉圖點數,且此點數不會隨頻率解析度而變。

Single side的干涉圖點數不是單純為相同條件下double side點數的一半,還必須加上相位干涉圖點數的一半。Single side不能只記錄一側的干涉圖,還須另一側小段的干涉圖,原因是之後的phase correction需要double side資訊,如圖 A-8所示。

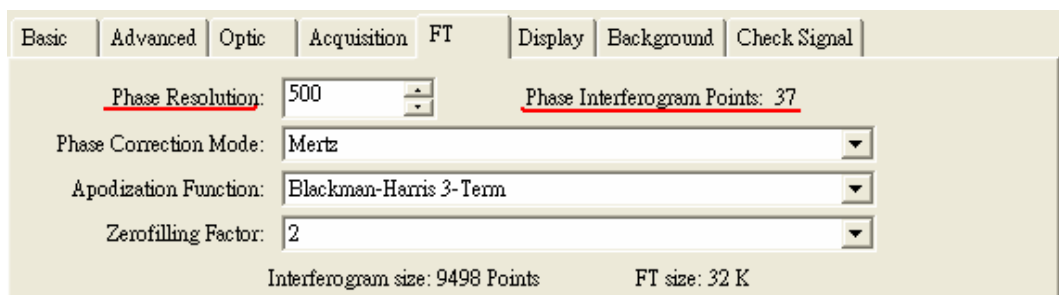


圖 A-7: 相位解析度、相位干涉圖點數

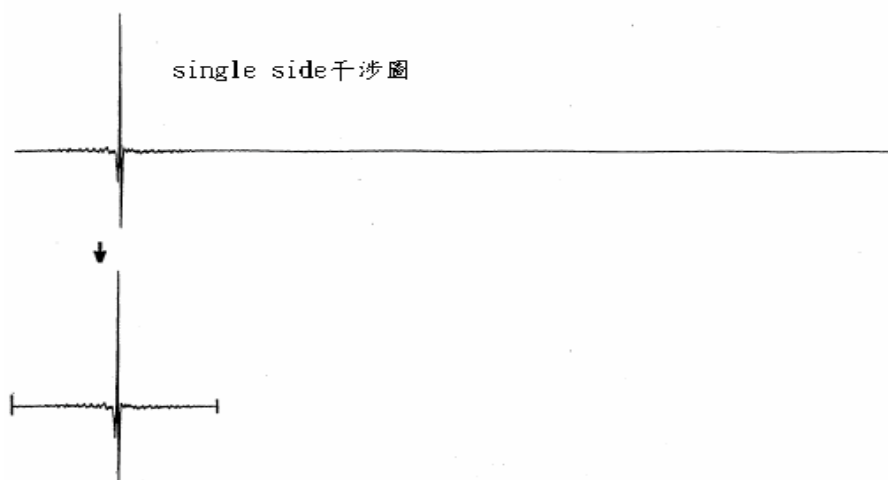


圖 A-8: single side的干涉圖

附錄B: 鎖相放大器操作要點

在做步進掃描頻譜量測時，需要使用到鎖相放大器。Bruker IFS 66v/S 配備的光偵測器大都是AC輸出，包括DTGS和需要LHe冷卻的Bolometer。做步進掃描量測時，scanner停在一點，光偵測器接受到週期性AC光訊號，而輸出AC電訊號，但此AC訊號不可直接送給IFS 66v/S的ADC做干涉圖取樣，必須先經過鎖相放大器把光偵測器的AC電訊號轉成一穩定的DC訊號，再給ADC記錄大小，隨後scanner再移往下一點，就如此循環動作直到完成整個干涉圖。

本實驗室的鎖相放大器為DSP SR850。因為SR850已有不錯的使用手冊，因此不贅述其基本原理及眾多參數的詳細意義，將針對本實驗室的實驗狀況，把SR850主要設定過程描述一番：

1. Sensitivity

圖 B-1右列第一格。SR850接受到光偵測器微弱的AC訊號，要輸出多大的DC電壓，由此參數決定，也就是sensitivity決定了SR850中所有電路gain的總和，其中包含AC gain和DC gain。當sensitivity設定為10 mV時，表示輸入10mV的AC訊號，就有滿格的DC 10V輸出(也是最大DC輸出)，此時gain是60 dB，若輸入3 mV的AC訊號，則會有DC 3V輸出。實驗時，sensitivity不可太小，否則當輸入訊號大於sensitivity值，會使輸出DC超過10V，此時圖 C-2的output燈會亮。但sensitivity也不可太大，因為scanner移到centerpeak時，SR850 DC輸出變大，當scanner移到離ceterpeak遠處，DC輸出會變小，若sensitivity太大，則這DC輸出變化相對變小，干涉圖對比不好。

2. Reserve

當sensitivity決定了total gain之後，AC gain與DC gain的分配就由圖 B-1右列第二格中的dynamic reserve來決定，reserve值加上expand(用dB表

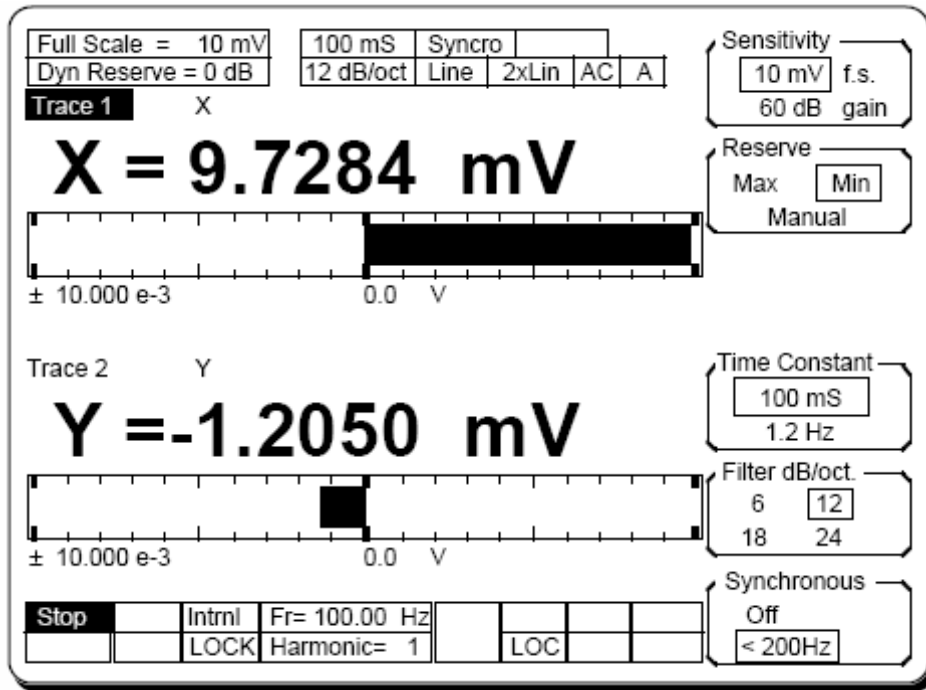


圖 B-1: SR850主要參數螢幕顯示

示)就是DC gain，一般沒使用expand時，reserve即代表DC gain，所以當reserve越大，則DC gain越大、AC gain越小。

實驗中，若圖 C-2的resrve燈亮，表示AC輸入訊號的大小配合AC放大器的gain，使得AC放大器的輸出overload，此時就須把AC gain調小，也就是要增加reserve。但除非需要，否則不必刻意把reserve調的很大。

3. Time Constant & Filter dB/oct

在PSD(phase sensitive detector)之後的RC低通濾波器對SR850重要性，使用手冊都有說明，不再贅述。此濾波器有兩個重要參數，RC乘積(TC time constant)與roll off值。

TC越大表示在步進掃描干涉圖的每點等待時間越久，全程量測時間也跟著增加。但TC也不能太小，否則SR850的DC訊號不是一穩定值，隨著時間飄(可藉由示波器觀察)，造成干涉圖嚴重失真。通常使用最高的roll off值，也就是24 dB/oct，這樣可使所需TC下降，使量測快速。

SR580只提供離散的TC值，如1 ms、3 ms、10 ms、30 ms...，舉例來說，

使用TC=1 s，量測總時間為40min，但干涉圖雜訊仍然太大，想增加TC至3s，此時等待時間就必須為1.5 hr。

4. Other parameters

實驗時，需要給鎖相放大器一個參考頻率，則對輸入訊號可以鎖出(N*參考頻率)，在考慮光偵測器頻率響應範圍與施加到樣品的脈衝週期下，一般N=1，即鎖Harmonic=1的訊號，如圖 B-1下方所示。在N=1的情況下，若參考頻率<200 Hz，可開啟synchronous filter，消除參考頻率的各倍頻(N>1)雜訊干擾，如圖 B-1右下方所示。當參考頻率>160 mHz時，最好把輸入訊號的couple選至AC模式，且參考頻率不在60 Hz或120 Hz附近時，也把兩個line notch打開，以降低市電干擾，如圖 B-1上方所示。



圖 B-2: SR850狀態顯示

附錄C: 步進掃描操作要點

目前本實驗室的步進掃描量測，主要在OPUS的步進掃描 Modulation 視窗下(如圖 C-1所示)進行，尚未使用到時間解析頻譜視窗(TRS)。這視窗下，mirror有兩控制參數分別是Stabilization Delay與Number of Coadditions。

時序圖如圖 C-2，mirror在A量好data，由TKDA訊號控制，step至下一點，時間到B，也可看出laser A在這期間有訊號變化(沒反應表示mirror為靜止狀態)，B->E的mirror靜止時間即為Stabilization Delay，此時並不會取樣儘管XAS有脈衝訊號，到了E，TKDA再次發出訊號，XAS每打出一脈衝，ADC就取樣一次，XAS的脈衝次數就由Number of Coaddition決定，平均這些取樣數據即為mirror在這個step的訊號值，如此回到A直到完成整個干涉圖。



圖 C-1: 步進掃描調變 in OPUS

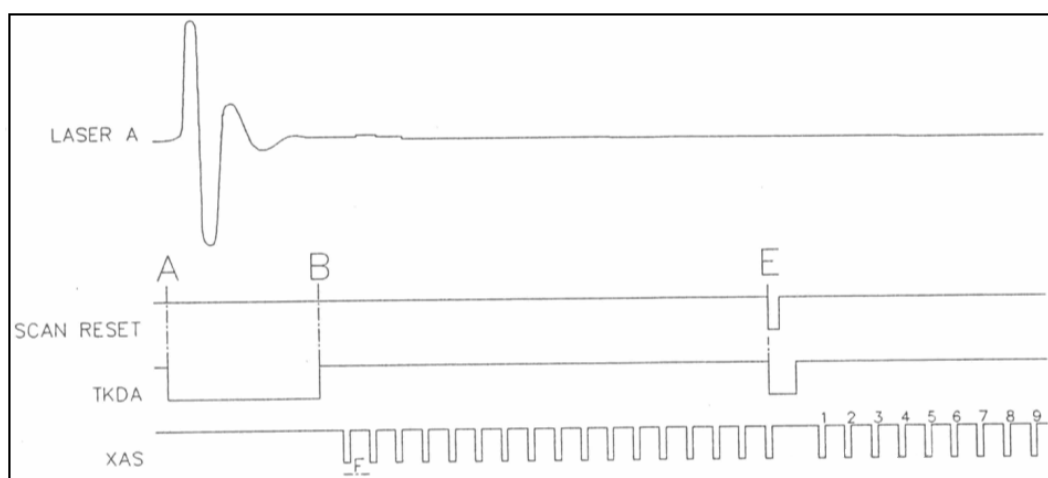


圖 C-2: 步進掃描時序圖

先說明 Number of Coaddition 這個參數，我們是使用 IFS 66v/S 所附 ADC，其頻寬達 200 kHz (5 us)，所以 XAS 脈衝週期 F 在這視窗下設定為 10 us (不能改)，因為是使用鎖相放大器輸出 DC 訊號給 ADC 取樣，IFS 66v/S 輸入需 switch 到 DC couple。而鎖相放大器建議不要以前板的 R output 當輸出，因頻寬只有 512 Hz，應把背板的 X output 當輸出，頻寬達 100 kHz (10 us)，記得按 auto phase。(Number of Coaddition)*XAS 週期 10 us 等於平均時間，但注意 Number of Coaddition 並不是物理上的平均次數，假設現在施加樣品的脈衝電壓週期為 6.37 ms，因鎖相放大器要一完整的訊號週期時間才能改變其 DC 輸出，若現在要在每個 step 平均 10 次，那麼平均時間為 $10 * 6.37 \text{ ms} = 63.7 \text{ ms}$ ，Number of Coaddition 就必須設定為 $63.7 \text{ ms} / 10 \text{ us} = 6370$ 。

每個 step 的 Stabilization Delay 必須是 6 倍的鎖相放大器 TC。但必須補充一點，當鎖相放大器的 AC 輸入訊號突然產生振幅改變時，至少等一個 AC 訊號週期，鎖相放大器的 DC 輸出才能跟得上變化，所以 Stabilization Delay 要修正為 $\text{Max}[6 * \text{TC}, \text{AC 訊號週期}]$ 。附加另一經驗條件，可在 Direct Command Entry 這個視窗輸入 STP、NPT、PPT、POS (圖 C-3 所示) 來移動 mirror 至干涉圖的 centerpeak 處，再移動到干涉圖的邊緣，觀察鎖相放大器的 DC 值變化，Stabilization Delay 必須大於這段鎖相放大器 DC 穩定的時間。

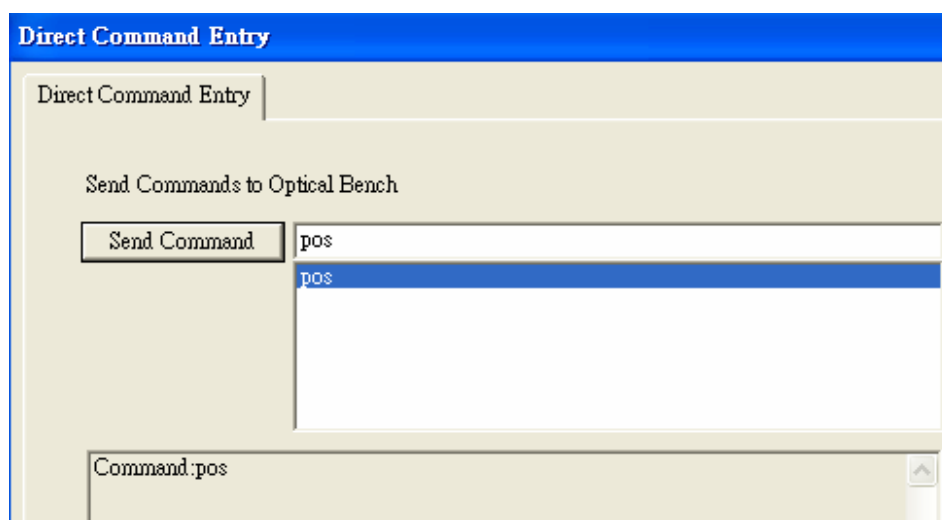


圖 C-3: Direct Command Entry 視窗

參考文獻

- [1] E.E. Orlova, R.Ch. Zhukavin, S.G. Pavlov, V.N. Shastin, “Far-infrared active media based on shallow impurity state transitions in silicon” Phys. Status Solidi B **210**, 859 (1998)
- [2] H.-W. Hübers, K. Auen, S. G. Pavlov, E. E. Orlova, R. Kh. Zhukavin, V. N. Shastin, “Population inversion and far-infrared emission from optically pumped silicon” Appl. Phys. Lett. **74**, 2655 (1999)
- [3] S. G. Pavlov, R. Kh. Zhukavin, E. E. Orlova, V. N. Shastin, A.V. Kirsanov, H.-W. Hübers, K. Auen, H. Riemann, “Stimulated emission from donor transitions in silicon” Phys. Rev. Lett. **84**, 5220 (2000)
- [4] E.E. Orlova, S.G. Pavlov, R.Kh. Zhukavin, V.N. Shastin, A.V. Kirsanov, H.-W. Hübers, K. Auen, M. R.ummeli, H.P. R.oser, H. Riemann, “FIR lasing based on group V donor transitions in silicon” Physica B **302-303**, 342 (2001)
- [5] H.-W. Hübers, S.G. Pavlov, M.H. R.ummeli, R.Kh. Zhukavin, E.E.Orlova, H. Riemann, V.N. Shastin, “Terahertz emission from silicon doped by shallow impurities” Physica B **308-310**, 232 (2001)
- [6] S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, M. H. Rummeli, R. Kh. Zhukavin, E. E. Orlova, V. N. Shastin, H. Riemann, “Far-infrared stimulated emission from optically excited bismuth donors in silicon” Appl. Phys. Lett. **80**, 4717 (2002)
- [7] V. N. Shastin, R. Kh. Zhukavin, E. E. Orlova, S. G. Pavlov, M. H. Rummeli, H.-W. Hübers, J. N. Hovenier, T. O. Klaassen, H. Riemann, I. V. Bradley, A. F. G. van der Meer, “Stimulated terahertz emission from group-V donors in silicon under intracenter photoexcitation” Appl. Phys. Lett. **80**, 3512 (2002)

- [8] H.-W. Hübers, S. G. Pavlov, M. Greiner-Bär, M. H. Rümmeli, M. F. Kimmitt, R. Kh. Zhukavin, H. Riemann, and V. N. Shastin, “Terahertz Emission Spectra of Optically Pumped Silicon Lasers” Phys.Status Solidi B **233**, 191 (2002)
- [9] S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, H. Riemann, R. Kh. Zhukavin, E. E. Orlova, V. N. Shastin, “Terahertz optically pumped Si:Sb laser” J. Appl. Phys. **92**, 5632 (2002)
- [10] S. G. Pavlov, H.-W. Hübers¹, E. E. Orlova, R. Kh. Zhukavin, H. Riemann, H. Nakata, V. N. Shastin, “Optically pumped terahertz semiconductor bulk lasers” Phys.Status Solidi B **235**, 126 (2003)
- [11] H.-W. Hübers, S. G. Pavlov, H. Riemann, N. V. Abrosimov, R. Kh. Zhukavin, V. N. Shastin, “Stimulated terahertz emission from arsenic donors in silicon” Appl. Phys. Lett. **84**, 3600 (2004)
- [12] S. G. Pavlov, H. –W. Hübers, E. E. Orlova, R. Kh. Zhukavin, V. N. Shastin, “Nonequilibrium electron distribution in terahertz intracentre silicon lasers” Semicond. Sci. Technol. **19**, S465 (2004)
- [13] R. Kh. Zhukavin, S. G. Pavlov, K. A. Kovalevsky, H.-W. Hübers, H. Riemann, V. N. Shastin, “D⁻ centers in intracenter Si:P lasers” J. Appl. Phys. **97**, 113708 (2005)
- [14] H.–W. Hübers, S. G. Pavlov, V N Shastin, “Terahertz lasers based on germanium and silicon” Semicond. Sci. Technol. **20**, S211 (2005)
- [15] S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, J. N. Hovenier, T. O. Klaassen, D. A. Carder, P. J. Phillips, B. Redlich, H. Riemann, R. Kh. Zhukavin, V. N. Shastin, “Stimulated terahertz stokes emission of silicon crystals doped with antimony donors” Phys. Rev. Lett. **96**, 037404 (2006)

- [16] S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, M. F. Kimmitt, H. Riemann, V. N. Shastin, “Frequency tunability of the terahertz silicon laser by a magnetic field” Appl. Phys. Lett. **89**, 021108 (2006)
- [17] T. N. Adam, R. T. Troeger, S. K. Ray, P.-C. Lv, J. Kolodzey “Terahertz electroluminescence from boron-doped silicon devices” Appl. Phys. Lett. **83**, 1713 (2003)
- [18] P.-C. Lv, R. T. Troeger, T. N. Adam, S. Kim, J. Kolodzey, I. N. Yassievich, M. A. Odnoblyudov, M. S. Kagan, “Electroluminescence at 7 terahertz from phosphorus donors in silicon” Appl. Phys. Lett. **85**, 22 (2004)
- [19] P.-C. Lv, R. T. Troeger, S. Kim, S. K. Ray, K. W. Goossen, J. Kolodzey, I. N. Yassievich, M. A. Odnoblyudov, M. S. Kagan “Terahertz emission from electrically pumped gallium doped silicon devices” Appl. Phys. Lett. **85**, 3660 (2004)
- [20] P.-C. Lv, R. T. Troeger, X. Zhang, T. N. Adam, J. Kolodzey, M. A. Odnoblyudov, I. N. Yassievich “Hot hole redistribution in impurity states of boron-doped silicon terahertz emitters” J. Appl. Phys. **98**, 093710 (2005)
- [21] P.-C. Lv, X. Zhang, J. Kolodzey, M. A. Odnoblyudov, I. N. Yassievich, “The effects of uniaxial compressive stress on the terahertz emission from phosphorus-doped silicon devices” J. Appl. Phys. **98**, 103511 (2005)
- [22] A. V. Andrianov, A. O. Zakharin, I. N. Yassievich, N. N. Zinovev, “Terahertz electroluminescence under conditions of shallow acceptor breakdown in germanium” JETP Lett. **79**, 365 (2001)

- [23] A. V. Andrianov, A. O. Zakharin, I. N. Yassievich, N. N. Zinovev, “Spontaneous terahertz emission under electrical breakdown of a shallow acceptor in Ge” Acta Physica Polonica A **107**, 142 (2005)
- [24] Rex L. Jones, P. Fisher, “Excitation spectra of group III impurities in germanium” J. Phys. Chem. Solids **26**, 1125 (1965)
- [25] W. Herres, J. Gronholz, “Understanding FT-IR Data Processing” (Bruker)

