

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

半導體兆赫波發射元件之研究(3/3)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC96-2221-E-009-190

執行期間：96年 8月 1日至 97年 7月 31日

計畫主持人：顏順通

共同主持人：

計畫參與人員：王德賢、鐘佩鋼、李冠成、謝泓文、石正瑜、李志浩、黃信傑

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立交通大學電子系所

中 華 民 國 97 年 10 月 06 日

半導體兆赫波發射元件之研究(3/3)

“Research on Semiconductor Terahertz Emission Devices”

計畫編號：NSC96-2221-E-009-190

執行期間：96年8月1日至97年7月31日

主持人：國立交通大學電子系顏順通教授

一、中文摘要

近年來利用雜質摻雜的半導體塊材研發兆赫波段輻射源的研究有日益增加的趨勢。該系統的潛力在於(a)輻射波頻率本身就位於兆赫波段(b)可以外加應力、磁場改變輻射波頻率(c)材料取得容易。然而雜質的物理特性使該系統的操作溫度必須足夠的低，濃度也有一定的範圍限制。

為更能深入了解雜質摻雜的塊材作為遠紅外兆赫波段發光源的潛力，本研究計畫探討雜質摻雜之半導體塊材之物理特性。除了以理論計算來了解應力下載子躍遷的特性外，也致力於量測電場激發下的兆赫波輻射頻譜與不同溫度下之吸收頻譜。在理論方面，我們第一次計算在外加[001]應力下三價錯中雜質能階之間電偶極躍遷的振體強度(oscillator strength)。對於G系列譜線和D系列譜線我們發現在應力小於0.3kBar的範圍中，應力造成振體強度的變化量小於 2×10^{-2} 。這樣的變化量對D系列譜線之間振體強度的比例不會造成可觀的影響，但對微弱的G系列譜線卻造成重要的影響。對於C系列譜線，我們發現其有些譜線在應力接近零時會劇烈的變化。這些振體強度隨應力的變化可以從波函數的觀點來解釋。此外本研究的計算結果與實驗對照可以得到定量上的吻合。量測方面，本年度除了以所建構之兆赫波輻射量測技術持續研究鎵摻雜的錯塊材於低溫下的電激放射頻譜外，也著重於更基本的吸收頻譜量測，目的在了解溫

度與不可避免的室溫背景輻射對上述塊材系統的影響。搭配基本電性量測能讓我們更進一步了解並區分上述兩變因的重要性與差異。此研究的結果除能幫助我們了解此系統的特性外，也能使我們將來於實際應用時能對雜質摻雜的塊材之相關物理參數做更佳的操控。

英文摘要

The research on developing terahertz emitters based on impurity-doped single crystals is getting more and more popular in recent years. Impurity-doped bulk crystals are chosen as candidates for terahertz sources for several reasons: (a) The emission spectra lie directly inside the terahertz region, (b) Emission wavelength is tunable through applying external stress or magnetic field, and (c) It is easy to get the bulk material from the market. However, the operating temperature and impurity concentration are somewhat limited by the type of dopant or host crystal chosen. To realize the potential of impurity-doped crystals as terahertz sources, we investigate acceptor-doped single crystal germanium. We theoretically analyze the oscillator strengths of electric dipole transitions as functions of stress along the [001] direction for Group III acceptors in Ge for the first time and use the effective mass approach considering six-band coupling for strained semiconductors.

We find the variations of oscillator strengths with increasing stress for transitions of *G* series and *D* series are smaller than 2×10^{-2} when the applied stress is smaller than 0.3kBar. Such variations are insignificant to the oscillator strengths for transitions of *D* series but not for those of *G* series. For transitions of *C* series, we find some of them vary rapidly when the stress is close to zero. These phenomena can be explained by investigating the wave functions of initial and final states of each transition. The results of present work agree quantitatively with experimental data. During the present research, we choose gallium-doped single crystal germanium as the measurement sample. We measure not only the emission spectra under different pulse conditions but also the absorption spectra at different temperatures. The IV measurements allow us to further analyze the obtained spectra. These results can help us to optimize the parameters needed for the development of the impurity-based terahertz sources.

二、計畫的緣由與目的

就理論計算與分析方面，銻中淺摻雜受子已被廣泛探討。然而其中大多數是對其中能階做分析，而少有研究探討能階間躍遷的振體強度。在這當中雖然有些研究人員利用理論計算[1-4]或是實驗量測[5,6]去定量地探討振體強度。但他們都沒有探討應力的效應。當外加應力時，由於對稱性變差，造成某些躍遷在應力下會分裂成不同的分量。Rodriguez *et al.* [7]利用群論解析出應力下不同偏振躍遷分裂後的分量其振體強度之間的比例關係，但其結果僅能適用在應力趨近於零的情況。在有限應力下，由於應力造成受子態之間的耦合，振體強度的特定比例關係不再存在。在我們的研究

中，我們針對摻雜三價雜質的銻受子能階之間的躍遷，計算其振子強度隨應力的變化。並對不同譜線其不同的行為提出解釋。並且將計算所得到的結果與現有實驗比較，發現可以得到定量一致的結果。

至於實驗量測方面，目前已在使用或正在研究階段的兆赫波光源主要分為下列幾種：(a) 汞燈、(b) 半導體表面結構受激放光、(c) 自由電子雷射、(d) 單載子注入異質結構發光、(e) 電漿子震盪以及(f) 雜質摻雜之半導體光激或電激發光。高壓汞燈於使用時能產生近似於高溫黑體輻射的頻譜，可涵蓋到兆赫波段，約 1-20 THz。不過使用中需要冷卻水避免燒毀，且為非同調性的光源。有別於汞燈，以快速雷射激發半導體表面，並透過天線結構能產生強度較強、高同調性的兆赫波光源。頻段涵蓋從數百 GHz 到約 3 THz 左右，但偵測系統需要 EO sampling 或許多光學元件的配合(如 $\lambda/4$ plate, balanced detector, EO crystal 等)。另一種近年來頗熱門的題目是利用半導體塊材(矽或銻)或異質結構(III-V 族或 SiGe)來製作兆赫波雷射。相較於 SiGe 結構，目前塊材與 III-V 族異質結構透過不同的激發模式，已成功的激發出兆赫波雷射。異質結構發光模式為將載子注入多層堆疊的量子井或超晶格，使載子於其間的 mini-band 躍遷放光，稱之為 quantum -cascade-laser(QCL)。但由於 QCL 製作過程耗時複雜，且須有昂貴分子束磊晶系統，一般實驗室難以製作。相較之下，塊材反而是比較易於研究的系統。而目前利用塊材發出兆赫波雷射的兩種方式，一為以 CO₂ 雷射激發 *n* 型矽(Si:P)的雜質躍遷雷射(intra-center laser)，另一為外加脈衝或直流電場於應力下 *p* 型銻(Ge:Ga)的共振態雷射(resonant-state laser)。由於光激發光的方式需要用到昂貴的激發光源與相關光學元件，所以實驗室目前採用並研究的主題為利用外加電場激發雜質摻雜的塊材所產生之兆赫波輻射源。此種研究方法

其實由來已久，稱之為電致發光 (Electro-luminescence)，只是波段大都限於可見光或近紅外的區域。從 2003 年開始，Kolodzey 等人利用外加電壓脈衝的方式激發 B、P、Ga 摻雜之 Si 塊材[8-10]。藉由因電場加速的高能自由載子產生 impact ionization，系統將會於回復穩態的過程中(脈衝施加或結束後)放出兆赫波。另外他們也嘗試藉由應力了解內部輻射機制[11]。至今已實驗證實此系統能於高過 77K(液氮)的溫度下(~120K)運作[12]，並合理推論其它五族摻雜雜質甚至能於更高溫下工作(因其有較高之游離能)，但未對激發與放光機制做出解釋且還未能產生兆赫波雷射光。在鍺塊材中，雖然 *n* 型摻雜的電致發光頻譜於 70 年代左右已被研究過，但 *p* 型摻雜的電致發光頻譜直到最近才由 A. V. Andrianov 等人第一次量得[13]，但也未對激發機制有所解釋，且摻雜只限於固定濃度 (~10¹⁴-10¹⁵ cm⁻³)的純 *n* 或 *p* 型的矽或鍺塊材。為深入探討此系統的特性，我們採用鍺摻雜的鍺塊材並量測其電激放光與吸收頻譜，藉由分析實驗結果來了解內部之相關物理機制。

三、研究方法

有關在外加[001]應力下鍺淺摻雜受子能階的計算可參考去年的結案報告。利用計算得到的本徵波函數，我們可以得到能階之間躍遷的振體強度。對於初態能階 E_i 與末態能階 E_f 之間電偶極躍遷(electric dipole transition)其振體強度可寫為：

$$f_{i \rightarrow f} = \frac{2m_0}{\gamma_1 \hbar^2} \frac{1}{g_i} (E_f - E_i) \sum_{\nu, \nu'} \left| \langle f | \nu' | \mathbf{e} \cdot \mathbf{r} | i \nu \rangle \right|^2 \quad (1)$$

其中 γ_1 為 Luttinger-Kohn 參數， g_i 為能階 E_i 的簡併數，方程式中對 ν 和 ν' 取和分別代表對初態能階和末態能階所有的簡併態取和。在 Luttinger-Kohn 考慮六條價帶的等效質量的近似下，振體強度可表示為[2]：

$$f_{i \rightarrow f} = \frac{2m_0}{\gamma_1 \hbar^2} \frac{1}{g_i} (E_f - E_i) \sum_{\nu, \nu'} \sum_{q=1}^6 \left| \langle F_{f\nu'}^{(q)} | \mathbf{e} \cdot \mathbf{r} | F_{i\nu}^{(q)} \rangle \right|^2 \quad (2)$$

其中 $F_{i\nu}^{(q)}$ 和 $F_{f\nu'}^{(q)}$ 為初態和末態波函數的 envelope functions。

實驗方面，本年度計畫所使用的研究主項儀器為用於頻譜量測的傅式紅外光譜儀(FTIR)與用於冷卻樣品之低溫恆溫器(cryostat)。我們選取的樣品為三價受子鍺摻雜的鍺塊材。為量取微弱的兆赫波發射頻譜，我們以電場對樣品作特定頻率激發，搭配步進技術與鎖相放大器的使用，將發光頻譜以 FTIR 量測出來。FTIR 備有汞燈光源、Mylar 6 um 分光鏡、PE 材質的光窗與靈敏的遠紅外線偵測器(Silicon bolometer)，使我們可以量測的波段約介於 30-680 cm⁻¹。外加激發源方面，我們使用電壓脈衝產生器(HP 8110A)對樣品施加特定頻率的電壓脈衝，使樣品激發出相同頻率之輻射光。再藉由步進技術與鎖相放大器的使用，將不同電壓下的干涉頻譜量出。

四、結果與討論

理論方面，在本年度的計劃中，我們進一步地探討受子能階之間電偶極躍遷的強度。表一列出無應力下 Ge:Al 中的激發態受子能階以及從基態躍遷至激發態的振體強度。並將計算的結果與文獻[6]的實驗結果作比較，得到在定量上一致的結果。表二列出摻雜其它三價雜質的結果。我們發現大多數的躍遷的振體強度隨著原子序的增加會單調地增加。原因是隨著原子序的增加，受子的基態的束縛能會越大，其電洞波函數會越侷限在雜質的附近，造成與奇對稱的激發態波函數的重疊會越小。

接著我們考慮外加[001]方向應力的情形。當外加[001]方向的應力時，晶體會從對稱性較好的 T_d 群變為對稱性較差的 D_{2d} 群。此時原本為四態簡併的 $\Gamma_8(T_d)$ 受子態會分裂成兩個二態簡併的受子態。其對稱性分別為 $\Gamma_6(D_{2d})$ 和 $\Gamma_7(D_{2d})$ 。而 $\Gamma_6(T_d)$ 和 $\Gamma_7(T_d)$ 仍保持二態簡併，在應力下對稱性分別變為 $\Gamma_6(D_{2d})$ 和 $\Gamma_7(D_{2d})$ 。

應力下對應不同偏振光的電偶極躍遷的選擇律如下：當電場(\mathbf{E})偏振方向垂直應力(\mathbf{P})時(記為 \mathbf{E}_\perp)所有受子態之間的躍遷都允許的。然而電場方向平行應力方向時(記為 \mathbf{E}_\parallel)只允許不同對稱性受子態之間的躍遷 [i. e. $\Gamma_6(D_{2d}) \leftrightarrow \Gamma_7(D_{2d})$]。Rodriguez, Fisher 和 Barra 進一步指出當一個 $\Gamma_8(T_d) \leftrightarrow \Gamma_i(T_d)$ ($i=6,7$) 的躍遷在受應力後分裂成 $\Gamma_6(D_{2d}) \leftrightarrow \Gamma_6(D_{2d})$ 和 $\Gamma_7(D_{2d}) \leftrightarrow \Gamma_6(D_{2d})$ 兩個分量。不同偏振的此兩個分量所對應的振子強度會有特定的比例關係。此比例關係只與初態和末態的對稱性有關。而與初態和末態的選擇無關。對於 $\Gamma_8(T_d) \leftrightarrow \Gamma_8(T_d)$ 的躍遷受應力

Final State Symmetry	Transition Energy from $1\Gamma_8^+$ (meV)	Oscillator Strength	
		Theory	Experiment
$1\Gamma_8^-$	6.569	2.46	3.1
$2\Gamma_8^-$	8.272	96.27	98
$1\Gamma_7^-$	9.021	54.51	56
$3\Gamma_8^-$	9.043	7.83	8.4
$4\Gamma_8^-$	9.666	5.46	5.3
$5\Gamma_8^-$	9.929	1.91	1.5
$2\Gamma_7^-$	10.002	3.92	7.3
$1\Gamma_6^-$	10.005	1.95	
$6\Gamma_8^-$	10.018	1.99	
$3\Gamma_7^-$	10.134	3.66	
$7\Gamma_8^-$	10.215	2.30	2.5
$8\Gamma_8^-$	10.347	0.86	3.3
$9\Gamma_8^-$	10.382	0.15	
$2\Gamma_6^-$	10.387	0.62	
$10\Gamma_8^-$	10.403	0.90	
$4\Gamma_7^-$	10.403	1.32	
$3\Gamma_6^-$	10.411	0.47	

表一 Ge:Al 受子基態躍遷至激發態在無外加應力下的振體強度以及所對應的躍遷能量。實驗的結果的出處為文獻[1]。

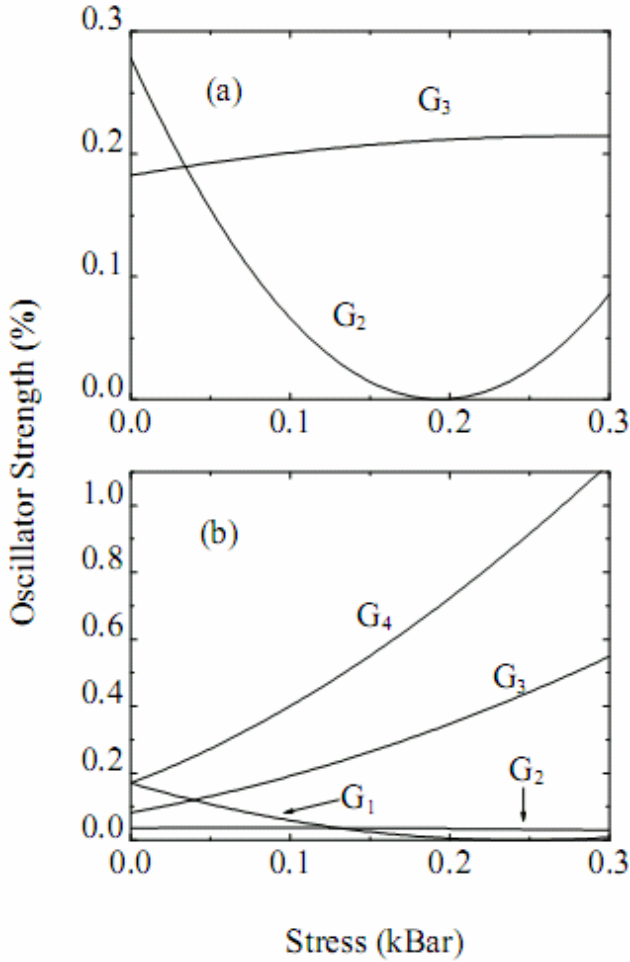
Final State Symmetry	B		Ca		In		Tl	
	Transition Oscillator		Transition Oscillator		Transition Oscillator		Transition Oscillator	
	Energy (meV)	Strength ($\times 10^{-3}$)	Energy (meV)	Strength ($\times 10^{-3}$)	Energy (meV)	Strength ($\times 10^{-3}$)	Energy (meV)	Strength ($\times 10^{-3}$)
$1\Gamma_8^-$	6.233	2.82	6.734	2.30	7.376	1.76	8.848	0.92
$2\Gamma_8^-$	7.936	100.05	8.437	94.47	9.080	87.78	10.551	74.35
$1\Gamma_7^-$	8.685	57.35	9.186	53.18	9.829	48.36	11.301	39.23
$3\Gamma_8^-$	8.707	8.36	9.208	7.58	9.851	6.66	11.322	4.91
$4\Gamma_8^-$	9.329	5.23	9.831	5.56	10.473	5.88	11.945	6.24
$5\Gamma_8^-$	9.593	1.96	10.094	1.89	10.736	1.78	12.208	1.49
$2\Gamma_7^-$	9.665	3.91	10.167	3.92	10.809	3.90	12.281	3.71
$1\Gamma_6^-$	9.669	2.09	10.170	1.89	10.813	1.66	12.285	1.26
$6\Gamma_8^-$	9.682	2.08	10.183	1.95	10.826	1.81	12.297	1.52
$3\Gamma_7^-$	9.798	3.81	10.299	3.59	10.942	3.32	12.413	2.79
$7\Gamma_8^-$	9.879	2.24	10.380	2.32	11.023	2.40	12.494	2.46
$8\Gamma_8^-$	10.011	0.87	10.512	0.85	11.155	0.81	12.626	0.69
$9\Gamma_8^-$	10.046	0.16	10.547	0.15	11.189	0.14	12.661	0.11
$2\Gamma_6^-$	10.050	0.68	10.552	0.59	11.194	0.49	12.666	0.33
$10\Gamma_8^-$	10.066	0.91	10.568	0.90	11.210	0.88	12.682	0.82
$4\Gamma_7^-$	10.067	1.32	10.568	1.32	11.211	1.31	12.682	1.24
$3\Gamma_6^-$	10.075	0.50	10.576	0.46	11.219	0.41	12.690	0.32

表二 在無外加應力時鍺摻雜不同三價雜質時基態躍遷至激發態的振體強度以及所對應的躍遷能量。

時會分成四個分量，不同偏振的此四個分量所對應的振子強度的比例關係可以用兩個與初態和末態相關的參數 u 和 v 來描述。為了方便起見，我們將這些比例關係整理於表三之中。以上討論的比例關係僅限於在外加應力的值為無限小時成立。由於有限的應力會造成受子態間的耦合所以上討論的振子強度的比

Zero-stress Transition	Stress-induced components	Relative intensity	
		\mathbf{E}_\parallel	\mathbf{E}_\perp
$\Gamma_8 \leftrightarrow \Gamma_6$	$\Gamma_6 \leftrightarrow \Gamma_6$	0	3
	$\Gamma_7 \leftrightarrow \Gamma_6$	4	1
$\Gamma_8 \leftrightarrow \Gamma_7$	$\Gamma_6 \leftrightarrow \Gamma_7$	4	1
	$\Gamma_7 \leftrightarrow \Gamma_7$	0	3
$\Gamma_8 \leftrightarrow \Gamma_8$	$\Gamma_6 \leftrightarrow \Gamma_6$	0	$\frac{3}{8}u$
	$\Gamma_6 \leftrightarrow \Gamma_7$	$\frac{1}{2} - v$	$\frac{1}{2}(1 - \frac{3}{4}u + v)$
	$\Gamma_7 \leftrightarrow \Gamma_6$	$v + \frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}(1 - \frac{3}{4}u - v)$
	$\Gamma_7 \leftrightarrow \Gamma_7$	0	$\frac{3}{8}u$

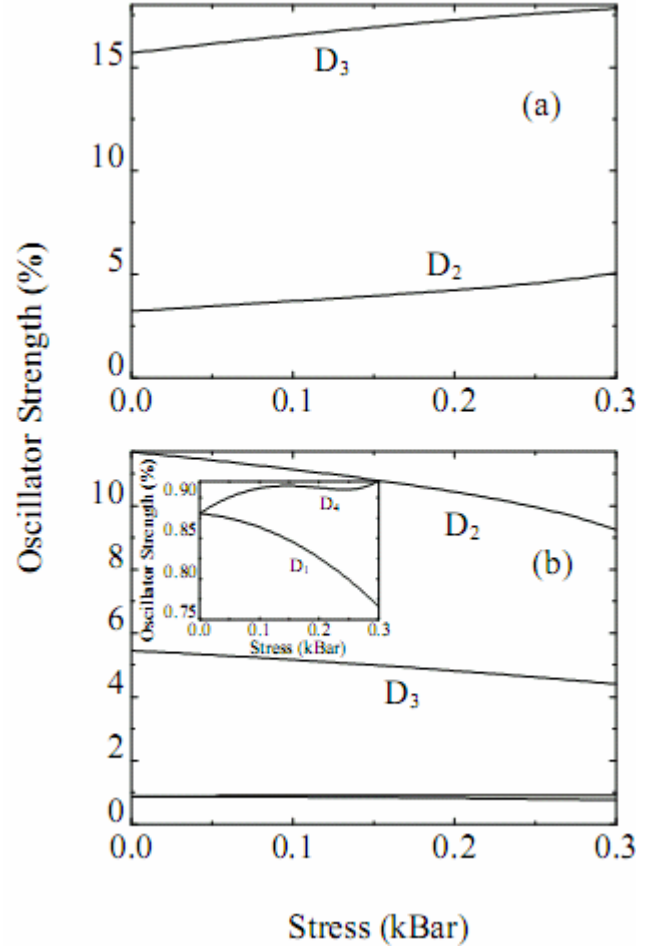
表三 應力下不同分量振體強度的相對比例。



圖一 (a)針對 E_0 (b) 針對 E_1 ，Ge:Ga 的 G 系列譜線的振體強度，其包含四個分量 $G_1(1\Gamma_6^+ \leftrightarrow 1\Gamma_6^-)$ ， $G_2(1\Gamma_6^+ \leftrightarrow 1\Gamma_7^-)$ ， $G_3(1\Gamma_7^+ \leftrightarrow 1\Gamma_6^-)$ 和 $G_4(1\Gamma_7^+ \leftrightarrow 1\Gamma_7^-)$ 。

例關係在外加有限應力下並不適用。

以下我們討論有限應力下的情形並乎略對稱群的標記符號。若無額外註明所考慮的對稱群皆為 D_{2d} 。圖一至圖三為不同躍遷的振體強度的值隨應力的變化。在此我們僅考慮初態為 $1\Gamma_6^+$ 或 $1\Gamma_7^+$ 的情形。在低溫熱平衡的情況下，僅 $1\Gamma_6^+$ 或 $1\Gamma_7^+$ 有可觀的電洞分佈。圖一針對 G 系列譜線作圖，其末態為 $1\Gamma_6^-$ 和 $1\Gamma_7^-$ 。圖二針對 D 系列譜線作圖，其末態為 $2\Gamma_6^-$ 和 $2\Gamma_7^-$ 。圖三針對 C 系列譜線作圖，其末態為 $3\Gamma_7^-$ 、 $3\Gamma_6^-$ 與 $4\Gamma_7^-$ 。我們可發現在應力趨近於零時對應不同偏振躍遷的不同分量，它們之間振體強度的比



圖二 (a)針對 E_0 (b) 針對 E_1 ，Ge:Ga 的 D 系列譜線的振體強度，其包含四個分量 $D_1(1\Gamma_6^+ \leftrightarrow 2\Gamma_6^-)$ ， $D_2(1\Gamma_6^+ \leftrightarrow 2\Gamma_7^-)$ ， $D_3(1\Gamma_7^+ \leftrightarrow 2\Gamma_6^-)$ 和 $D_4(1\Gamma_7^+ \leftrightarrow 2\Gamma_7^-)$

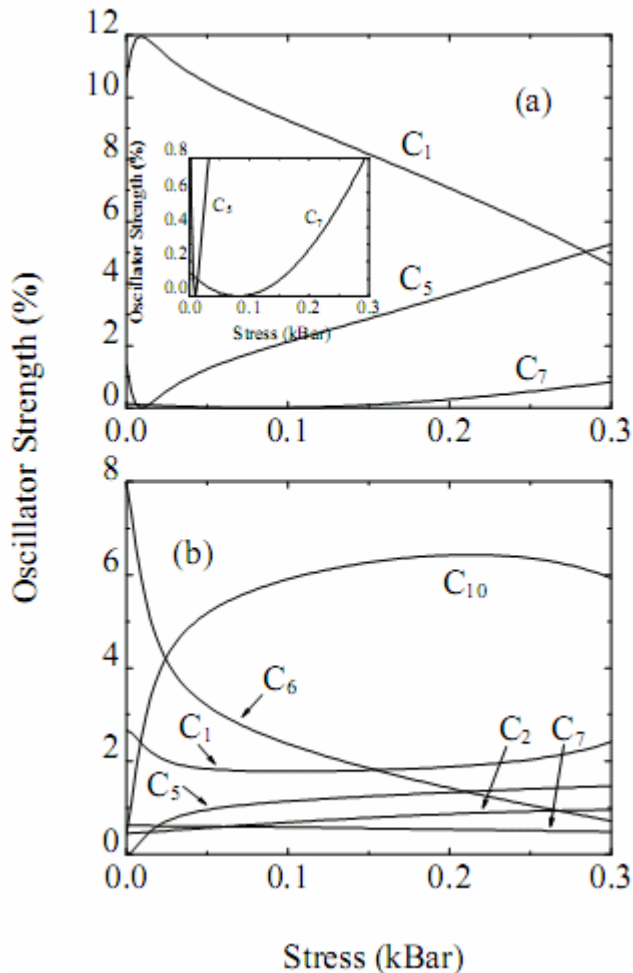
例滿足表三所列的結果。為了進一步瞭解有限應力對振體強度造成的影響，我們必須探討應力對初態和末態的波函數的影響。在此研究中初態的波函數($1\Gamma_6^+$ 和 $1\Gamma_7^+$)主要成份為 s -like 和 d -like。由於相較於其它激發態 $1\Gamma_6^+$ 和 $1\Gamma_7^+$ 與其它相同對稱性的能態的能量差比較大，所以在低應力下，應力造 $1\Gamma_6^+$ 和 $1\Gamma_7^+$ 與其它能態的耦合並不大。因此隨著應力的增加， $1\Gamma_6^+$ 和 $1\Gamma_7^+$ 的波函數的變化對應力並不敏感。所以由末態波函數隨應力變化我們可以瞭解振體強度隨應力變化的行為。對於 G 系列譜線而言，其末態($1\Gamma_6^-$ 或 $1\Gamma_7^-$)主要成份為 p -like。由方程式 1 我們知電偶極躍遷的振體強度正比於電偶極

的矩陣元素的平方。對於G系列譜線其矩陣元素主要成份是 $s \rightarrow p$ 的供獻 (M_{sp}) 和 $d \rightarrow p$ 的供獻 (M_{dp})。它們大小相近，正負號相反。所以對矩陣元素的供獻是嚴重的破壞性的。這也是為什麼實驗上量到的G系列譜線的強度會很弱的原因。此外因為 $1\Gamma_6^-$ 和 $1\Gamma_7^-$ 的波函數對應力的變化也不敏感，所以 M_{sp} 和 M_{dp} 對應力也不敏感。在應力小於 0.3KBar 的範圍裡，應力造成 M_{sp} 和 M_{dp} 的變化相較於 M_{sp} 和 M_{dp} 本身是很小的且振體強度的值的變化量小於 10^{-2} 。然而由於 M_{sp} 和 M_{dp} 的供獻是嚴重的破

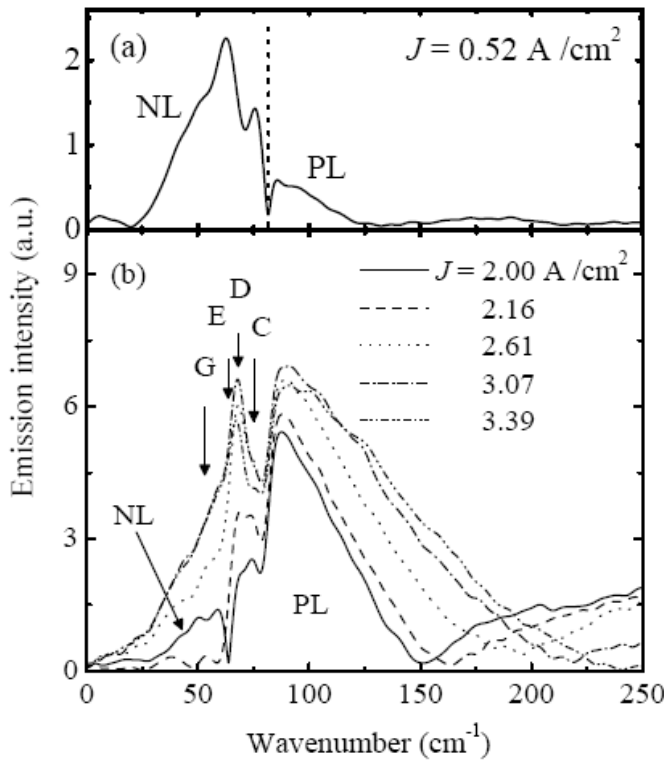
壞性造成G系列譜線振體強度的值本身也很小，因此即使波函數對應力不敏感，但波函數的微小變化對G系列譜線振體強度的比例仍造成嚴重的影響(見圖一)。接下來我們來觀查D系列譜線。其末態 ($2\Gamma_6^-$ 或 $2\Gamma_7^-$) 波函數比起G系列譜線僅稍微敏感一點。在應力小於 0.3KBar 的範圍裡，應力造成振體強度的改變小於 2×10^{-2} 。但由於其矩陣元素的各個分量(主要供獻是 M_{sp} 、 M_{dp} 和 M_{df}) 不像G系列譜線是嚴重的破壞性的供獻，因此一般而言D系列譜線的振體強度遠大於G系列譜線。在應力小於 0.3KBar 的範圍裡，應力造成矩陣元素和振體強度的比例影響不大。(見圖二) C系列譜線一般而言與D系列譜線一樣，其矩陣元素的各個分量不會有嚴重的破壞性的供獻(見圖三)。然而由圖三我們可以看到 C_1 、 C_5 、 C_6 和 C_{10} 在低應力下的振體強度會有劇烈的變化，但 C_2 和 C_7 則否。原因是在C系列譜線的末態中 $3\Gamma_7^-$ 和 $4\Gamma_7^-$ 在低應力下能階靠得很近(在應力趨近於零時，不同種類的受子 $3\Gamma_7^-$ 和 $4\Gamma_7^-$ 能階差不會超過 2.5×10^{-2} (meV))，因此應力會造成這兩個能階有嚴重的耦合使得其波函數對應力十分敏感。也因此 C_1 和 C_6 (末態為 $3\Gamma_7^-$)， C_5 和 C_{10} (末態為 $4\Gamma_7^-$) 的振體強度在低應力會隨應力有劇烈變化。而 C_2 和 C_7 (末態為 $3\Gamma_6^-$) 則否。

最後提出一點有趣的現象。由圖一和圖三我們發現對於G系列譜線和C系列譜線中某些分量，即使其為電偶極允許的躍遷，在某些特定的應力下這個躍遷會變成是禁止的。且須要外加的應力小於 0.3kBar。這暗示我們或許可以利用三價銻中這些特定能階間的躍遷來做成應力調變的光電元件。以上理論分析成果將會發表於年底 IEDMS 會議上。

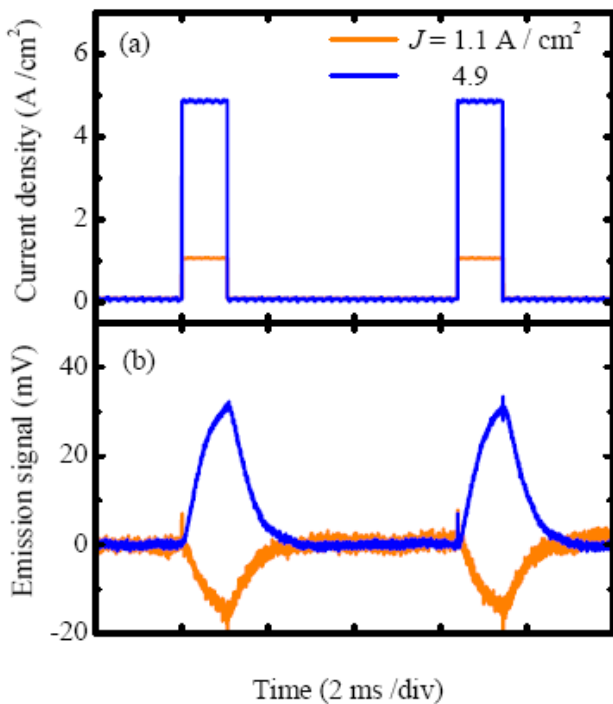
實驗部分，藉由變化外加電場，我們可以觀察到輻射頻譜的變化，如圖一所示。隨著外加電壓或電流的增加，輻射頻譜出現兩個不同區域。一在低能量而另一出現在高能量處，且兩者之間有一明顯的轉折點。除此之外，藉由



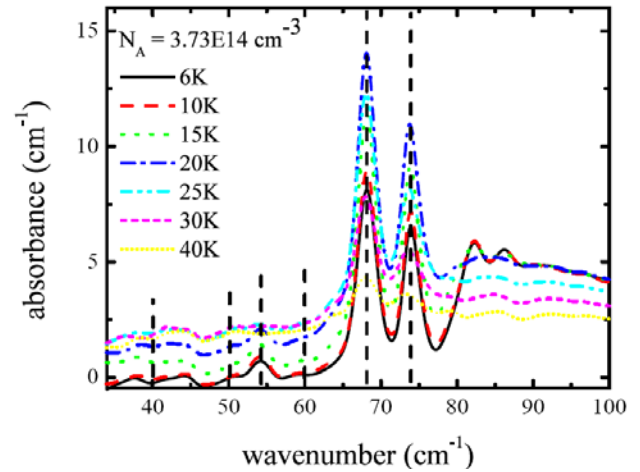
圖三 (a) 針對 E_{\parallel} (b) 針對 E_{\perp} ，Ge:Ga 的 C 系列譜線的振體強度，其包含六個分量 $C_1(1\Gamma_6^+ \leftrightarrow 3\Gamma_7^-)$ $C_2(1\Gamma_6^+ \leftrightarrow 3\Gamma_6^-)$ ， $C_5(1\Gamma_6^+ \leftrightarrow 4\Gamma_7^-)$ ， $C_6(1\Gamma_7^+ \leftrightarrow 3\Gamma_7^-)$ ， $C_7(1\Gamma_7^+ \leftrightarrow 3\Gamma_6^-)$ 和 $C_{10}(1\Gamma_7^+ \leftrightarrow 4\Gamma_7^-)$ 。



圖一 鎵摻雜的鍺塊材於電場激發下的兆赫波輻射頻譜。



圖二 (a) 激發樣品的脈衝電壓與電流(b) 不同偏壓下所觀察到之反向光電壓變化。



圖三 鎵摻雜的鍺塊材於不同溫度下之吸收頻譜。

光訊號的直接量測，我們發現此兩種輻射頻譜的特性不同(如圖二)。為合理解釋所量測之頻譜與光電流訊號，我們提出一個可能的激發機制。無外加偏壓下樣品於低溫與外界環境達成一個穩態系統，此時樣品所產生之輻射與吸收強度相同。當低電場下的自由載子被加速後能先將束縛於激發態(與基態相比具較低游離能)之載子游離，而穩態下由激發態輻射至基態的越遷因而下降，造成所謂負放光(negative luminescence)現象。此相關研究成果我們已發表於 APL[14]上，更進一步的驗證工作也尚在進行中。除了研究輻射頻譜，我們也對鎵摻雜的鍺塊材做變溫吸收頻譜量測。為獲取有較高之訊雜比之吸收頻譜，我們仍採用步進模式搭配相位調變技術。理論預期的吸收頻譜應隨溫度上升而下降(因為束縛於基態的載子會因溫度提升而逐漸下降)，但我們卻發現部分吸收譜線強度有隨溫度先上升而後下降的趨勢(圖三)。此一現象尚無人加以解釋，我們已初步提出一可能物理機制並將於年底發表於 IEDMS 會議上。

五、參考文獻

1. Kogan, S.M. and A.F. Polupanov, "Oscillator strengths of dipole optical transitions in group III acceptor impurities in germanium", Soviet Physics -

- Semiconductors, 1978. **12**(9): p. 1094-1095. (2007).
2. Binggeli, N. and A. Baldereschi, "Prediction of line intensities and interpretation of acceptor spectra in semiconductors", Solid State Communications, 1988. **66**(4): p. 323-328.
 3. Clauws, P., et al., "Oscillator strengths of shallow impurity spectra in germanium and silicon", Physical Review B, 1988. **38**(17): p. 12377.
 4. Buczko, R. and F. Bassani, "Shallow acceptor resonant states in Si and Ge", Physical Review B, 1992. **45**(11): p. 5838.
 5. Rotsaert, E., et al., "Absorption cross sections in the far-IR spectrum of elemental shallow donors and acceptors in germanium", Journal of Applied Physics, 1989. **65**(2): p. 730-735.
 6. Andreev, B.A., E.B. Kozlov, and T.M. Lifshits, "Oscillator strengths and linewidths of shallow impurity spectra in Si and Ge", Materials Science Forum, 1995. **196-201**(pt 1): pp. 121-126.
 7. Rodriguez, S., P. Fisher, and F. Barra, "Spectroscopic Study of the Symmetries and Deformation-Potential Constants of Singly Ionized Zinc in Germanium", Physical Review B, 1972. **5**(6): p. 2219.
 8. T. N. Adam, R. T. Troeger, S. K. Ray, P.-C. Lv, and J. Kolodzey "Terahertz electroluminescence from boron-doped silicon devices", Applied Physics Letters **83**, 1713(2003).
 9. P.-C. Lv, R. T. Troeger, T. N. Adam, S. Kim, J. Kolodzey I. N. Yassievich, M. A. Odnoblyudov, and M. S. Kagan, "Electro-luminescence at 7 terahertz from phosphorus donors in silicon", Applied Physics Letters **85**, 22(2004).
 10. P.-C. Lv, R. T. Troeger, S. Kim, S. K. Ray, K. W. Goossen, J. Kolodzey, I. N. Yassievich, M. A. Odnoblyudov, and M. S. Kagan, "Terahertz emission from electrically pumped gallium doped silicon devices", Applied Physics Letters **85**, 3660(2004).
 11. P.-C. Lv, X. Zhang, J. Kolodzey, M. A. Odnoblyudov, and I. N. Yassievich, "The effects of uniaxial compressive stress on the terahertz emission from phosphorus-doped silicon devices", Journal of Applied Physics **98**, 103511(2005).
 12. G. Xuan, S. Kim, M. Coppinger, N. Sustersic, J. Kolodzey, and P.-C. Lv "Increasing the operating temperature of boron doped silicon terahertz electroluminescence devices", Applied Physics Letters **91**, 061109(2007).
 13. A. V. Andrianov, A. O. Zakhar'in, I. N. Yassievich, and N. N. Zinov'ev, "Terahertz electroluminescence under conditions of shallow acceptor breakdown in germanium", Journal of Experimental and Theoretical Physics **79**, 365(2004).
 14. P. K. Chung, J. M. Lin, S. T. Yen, and T. H. Wang, "Negative and positive electroluminescence from a compensated *p*-type germanium in terahertz frequencies", Applied Physics Letters **91**, 241106