

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

半導體兆赫波主被動元件之研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 97-2221-E-009-164-
執行期間：97年08月01日至98年10月31日
執行單位：國立交通大學電子工程學系及電子研究所

計畫主持人：顏順通

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：謝泓文
碩士班研究生-兼任助理人員：黃信傑
碩士班研究生-兼任助理人員：李志浩
碩士班研究生-兼任助理人員：賴威良
碩士班研究生-兼任助理人員：黃品維
碩士班研究生-兼任助理人員：石正瑜
博士班研究生-兼任助理人員：鐘佩鋼
博士班研究生-兼任助理人員：王德賢
博士班研究生-兼任助理人員：李冠成

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 99 年 01 月 27 日

半導體兆赫波主被動元件之研究

Study on Semiconductor Terahertz Active and Passive Devices

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 97-2221-E-009-164-

執行期間：97年 08月 01日至 98年 10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、黃信傑、李志浩、石正瑜、黃品維、賴威良、張皓宇、蕭晉勳

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 99 年 01 月 26 日

中文摘要

本計畫分為三個研究主題:(1)低溫與應力下的 p 型鍺於兆赫波段的光學特性(2)兆赫波段偵測器製作與光電流頻譜量測與(3)兆赫波段濾波器製作與穿透率量測。我們量測 p -Ge 於[110]單軸壓縮應力下的吸收頻譜變化，觀察到輕電洞帶與重電洞帶隨應力分離的現象，但並未於兩能帶間發現共振態的存在。我們亦製作兆赫波段 Si(B)偵測器。首次利用離子佈植的技術來製作平面的阻擋雜質能帶偵測器，我們成功將偵測器的偵測波段由 10 THz 向下延伸至 7.5 THz。而高偏壓下光電流頻譜出現的兩條譜線我們推測為基態載子吸收光至激發態後，再被高能自由載子游離的結果。此外，我們於矽基板上製作兆赫波段的金屬網狀濾波器，研究改變單元形狀對穿透的頻譜的影響，並設計製作出有窄頻寬、峰值穿透率接近 100 % 的兆赫波段濾波器。

關鍵詞:兆赫波、 p 型鍺、單軸壓縮應力、吸收頻譜、偵測器、濾波器。

Abstract

The project is divided into three research topics: (1) Optical properties of stressed p -Ge at low temperatures in the terahertz (THz) regime, (2) Manufacturing of THz detectors and measurement of photo-response, and (3) Fabrication of THz optical filters and measurement of transmittance spectrum. We measured the low temperature absorption spectra of p -Ge under uniaxial compression along the [110] direction. We observed the splitting of the heavy-hole band and light-hole band with stress. However, we did not find the existence of the resonant states between the two bands. We also manufactured Si(B) photo-detectors. Adopting the ion-implantation technique, we demonstrated for the first time a planar Si(B) block-impurity-band photo-detector. The detection region was successfully extended from 10 THz down to 7.5 THz. We attributed the appearance of two additional lines in the photoconductivity spectrum under high bias condition to the result of intra-center absorption of the ground state carriers followed by subsequent ionization process. We also fabricated THz metal-mesh filters on silicon substrates. We investigate the effect of changing the shape of the unit cell on the transmission spectra of a filter. We then designed and implemented a narrow band THz filter having peak transmittance of nearly 100 %.

Keywords: Terahertz wave, p -Ge, uniaxial compression, absorption spectrum, detector, filter.

計畫前言

兆赫輻射波段介於可見光與微波之間，一般定義為頻率介於300 GHz ~ 3 THz的電磁波。此波段範圍的電磁波十分特述，其能量與室溫熱輻射相近，可被多數的分子或化學物質以其特徵頻率所吸收。亦能如微波般穿透許多可見光無法透射的物質，對金屬物質有十分優良的反射率。上述特性使得兆赫波段顯像技術等相關應用於近年來受到廣泛的研究與重視。[1-3]應用涵蓋醫療顯像、機場之安檢、偵測郵件或包裹內有毒或含爆裂性質之化學物等。此外，兆赫輻射之高頻(~THz)特性亦能滿足未來通訊需要大資料量傳輸的需求。近年無論於學術或業界，對此波段重視的程度與研究能量逐年增加，期能於兆赫波段發現新的物理現象並開發與普及不同領域之應用。因此兆赫波段之輻射源、偵測器、光學元件的特性研究、量測與開發便顯得日趨重要。

常見的兆赫波輻射源有汞燈、半導體表面結構受激輻射、以及光激發或電激發之兆赫波雷射。我們探討的輻射系統為低溫應力下摻鎵的鍺塊材於電激發下之兆赫波雷射。自1980年代末期，I. V. Altukhov 和M. S. Kagan 等人觀察到摻雜鎵的鍺單晶塊材於電場與單軸應力下，發出兆赫波(遠紅外頻段)的輻射[4]開始，*P*型鍺塊材隨即於液態氦的溫度下實現受激輻射。亦能透過外加單軸壓縮應力調整元件輻射頻率，涵蓋寬達5 THz到10 THz的頻寬[5]，且能以直流或脈衝偏壓模式操作。不過對於*p*型鍺受應力與電場激發下產生兆赫輻射的解釋眾說紛紜。在應力的作用下，鍺價帶的輕重電洞帶能量分離，透過外加電場加速自由電洞使束縛於雜質的電洞解離。兆赫波雷射的產生可能源於自由載子於(1)重電洞帶與輕電洞帶間[4]或(2)共振態與雜質基態間的居量反轉[5]。為了解共振態是否存在，Y. E. Pokrovskii 等人研究*p*型鍺沿[100]與[111]方向高應力下的吸收頻譜[6]，觀察載子於雜質能階基態與激發態間躍遷時所產生的吸收譜線隨應力的變化。他們觀察到重電洞帶與輕電洞帶間的能量間距，其隨應力升高而增加，但並未發現重電洞帶與輕電洞帶間預期的共振態的吸收譜線。迄今尚未有實驗直接證據證實兩種理論解釋的正確性。

除了研究兆赫波輻射源，我們對兆赫波段的偵測器亦有所著墨。兆赫波段的偵測器可分為熱感應偵測器與光子偵測器兩大類型。其中光子偵測器頻寬較窄，卻有較高的反應速率。若於半導體材料摻雜適當的雜質，便能於低溫下吸收能量相近於雜質游離能的光子形成光電流。由於雜質游離能正位於兆赫波段，因此此類型偵測器偵測波段可以延伸至中遠紅外線。但雜質游離能的大小亦限制了偵測器最低可偵測頻段。藉由提升雜質半導體內(Si或Ge)的摻雜濃度，能形成所謂的雜質能帶，降低可吸收光的能量，達到延長吸收波長的目的。但是雜質能帶伴隨跳躍傳導(暗電流)的產生。為了克服這個問題，阻擋雜質能帶偵測器(Blocked Impurity Band Photo-Detectors: BIB PD)被提了出來。[7]不過BIB結構中需要一層超高純度的半導體電流阻擋層，這對很多磊晶技術來說是個挑戰。更困難的是這層結構會緊接著一層高摻雜濃度的結構，而這兩層的磊晶和摻雜品質以及介面的品質決定著BIB偵測器的表現好壞。因此如何有效的達到這兩個需求，一直都是BIB元件研究的重點。

因應兆赫波段輻射元與偵測器的開發，濾波器等光學元件的設計與製作亦為熱門的研究題目。早在1967年，Ulrich已運用週期性的方形金屬陣列以及其互補金屬網狀陣列發展出所謂的電容性以及電感性的濾波器，並結合電容性和電感性，發展製造出十字架金屬網狀窄頻濾波器，並使用傳輸線理論去建立其共振模型[8]。由於十字架金屬網狀陣列濾波效果大大提升，也成為之後應用上研究的主流。現今在兆赫波段幾種最常見的光濾波器，可分為(1)free standing 厚金屬網或(2)基板上(矽或塑膠等等)薄金屬網(金或鋁等等)。厚

金屬網狀濾波器的缺點為製作過於繁雜且pattern因無基板支撐易發生形變[9]。使用薄金屬網狀濾波器其最大的原因在於製程相對容易。且由於製程技術的進步，此元件在製程上以往會遇到的問題，如：金屬表面的不平坦，patterns最小線寬限制等等已可以輕易克服；其次是由於它設計容易，且穿透率可以介於80%~90%。不過此濾波器的缺點在於頻寬較free standing之濾波器為大，且有基板吸收的問題。

研究目的

(1)應力下鍺摻鎵之光性與電性量測。

低溫應力下摻雜鎵的鍺塊材受電場激發能產生可調頻之兆赫波雷射。至今雖已提出共振模型來解釋該物理現象，但仍無定論。我們自製樣品加壓機構，並嘗試藉由量測樣品受[110]方向應力下之吸收頻譜來研究此物理系統，觀察共振態是否存在。

(2)金屬網狀濾波器製作。

目前free standing厚金屬網狀濾波器已經可以有很好的濾波效果，然而其元件製程卻非一般簡單微影、蝕刻步驟即可完成。至於薄金屬網狀陣列濾波器，雖然其製程步驟相對簡易，但卻無法有厚金屬網狀濾波器的濾波效果：(a)其main peak穿透率僅約90%，無法接近100%。(b)其stop-band穿透率太大，無法小於20%。我們利用薄金屬網狀濾波器元件之簡易製程，結合簡單的設計概念來提昇其濾波穿透率與降低頻寬，來達到接近厚金屬網狀陣列濾波器之效果。

(3)矽阻擋雜質能帶偵測器(Si:B blocked-impurity-band photo-detector)。

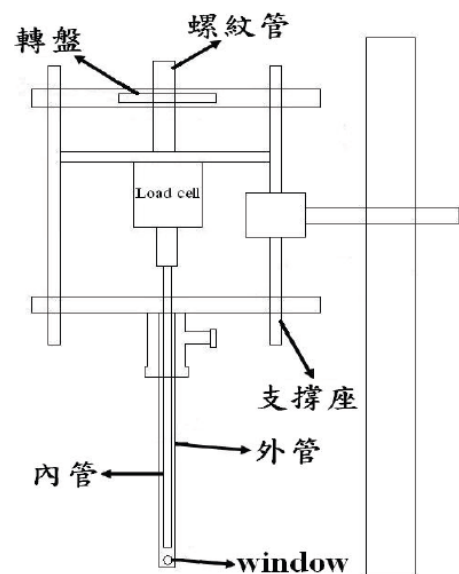
目前Si(B)偵測器偵測頻率位於10 THz以上，我們將此偵測器操作波段向兆赫波段延伸，採用平面BIB光偵測器的結構製作偵測器，並對其光電特性進行量測與探討，了解此方法對偵測頻寬的改進程度。

研究方法

(1)應力下鍺摻鎵之光電特性

應力裝置製作

為量測樣品於不同應力下的吸收頻譜，我們自行設計與製作一可以對樣品施加單軸壓縮應力的裝置，如圖一所示。該裝置採用同軸管的設計，利用外管與內管的相互作用對樣品施加應力。外管固定於支撐座上，使其位置不會改變。內管則與壓力感測元件相連接，可相對於外管上下移動。位移量的變化即可顯示出施於樣品上應力的大小，不受到元件於低溫形變的影響。此應力裝置可施加約400 kg於待測樣品上。外管底部挖兩個與管軸心垂直的孔洞，元件擺於孔洞中間，並置於FTIR光路上來量測吸收頻譜。為能量測低溫光性，此裝置亦設計成能與低溫恆溫器結合。



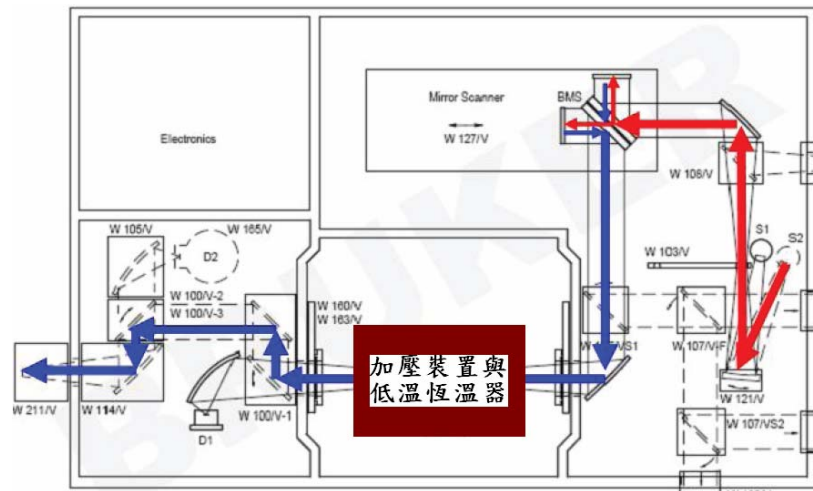
圖一 應力裝置示意

樣品選擇與量測參數

要量測 p 型鍺於應力下的吸收頻譜，我們先將淺摻雜鍺的鍺塊材沿著[110]方向，切割成大小為 $5 \times 5 \times 1$ 或 $5 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ 的試片。實驗所使用的樣品阻值分別為 $8\text{-}15 \text{ } \Omega\text{-cm}$ 和大於 $30 \text{ } \Omega\text{-cm}$ (無刻意摻雜)，置於應力裝置中進行低溫頻譜量測。無刻意摻雜的樣品用於量測吸收頻譜所需之參考頻譜，表面光學特性均與有摻雜的樣品一致，避免反射對量測造成的影響。

低溫吸收頻譜量測

我們使用傅立葉紅外線光譜儀(Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)量測樣品之吸收頻譜，分光儀為Mylar $6 \mu\text{m}$ ，偵測器為Silicon bolometer，量測波數介於 $50\text{-}600 \text{ cm}^{-1}$ 。在量測時整個光學路徑必須抽成真空($\sim 3\text{mbar}$)，以防止空氣與水氣的影響。應力裝置外管底部黏上一個溫度偵測器用於偵測樣品附近溫度，整個同軸管放入低溫恆溫器中，通入液態氬並使用溫度控制器將溫度控制在 10 K ，圖二為光路架設。



圖二 應力裝置與光路架設

使用快速掃瞄(rapid-scan)的方式先量測 10 K 時鍺摻雜鍺之透光譜，應力由 0 kbar 到 5 kbar 間距為 0.5 kbar ，再量測未摻雜鍺的透光譜作為背景資料，透過下式轉換為吸收頻譜

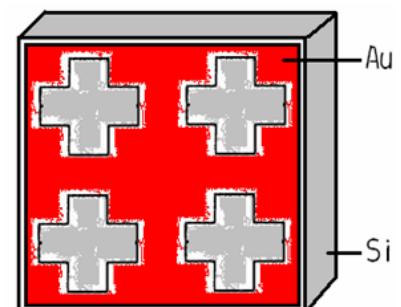
$$\alpha(k) = -10 \ln \frac{T_1(k)}{T_0(k)}$$

其中 $\alpha(k)$ 為吸收係數， $T_1(k)$ 為摻雜鍺的鍺樣品之穿透強度， $T_0(k)$ 為未摻雜參考樣品之穿透強度。

(2) 金屬網狀濾波器製作

元件設計與製作

我們採用高阻值的矽晶片作為金屬濾波器的基板，降低自由載子對兆赫輻射所造成的吸收，以鋁蒸鍍的方式製作金屬薄膜，結構如圖三。為了解並觀察光源在穿過週期性正方



圖三 元件結構示意

形陣列的金屬網之其濾波效果，我們於薄金屬上蝕刻不同形狀的洞，改變其透光面積、長寬比、破壞對稱性等等，以達到控制濾波器半高寬之濾波之效果。我們亦將正方形陣列概念運用在六角形對稱上，同樣週期性蝕刻挖洞，並利用其週期性對稱所造成的異常性穿透，用以獲得比正方形對稱穿透率更高之濾波器。

吸收頻譜量測

我們使用 FTIR 進行樣品穿透訊號量測。由於所量到資料為相對強度，並非穿透率，為得到金屬網的穿透率，我們首先必須量測光源穿透矽基板的訊號強度 $S_i(\nu)$ ，接下來量測光源穿透鋪有金屬網的矽基板的訊號強度 $M(\nu)$ ，最後將兩者相除，即 $T(\nu) = S_i(\nu) / M(\nu)$ ，則可得金屬網的穿透率。

(3)矽阻擋雜質能帶偵測器(Si:B blocked-impurity-band photo-detector)。

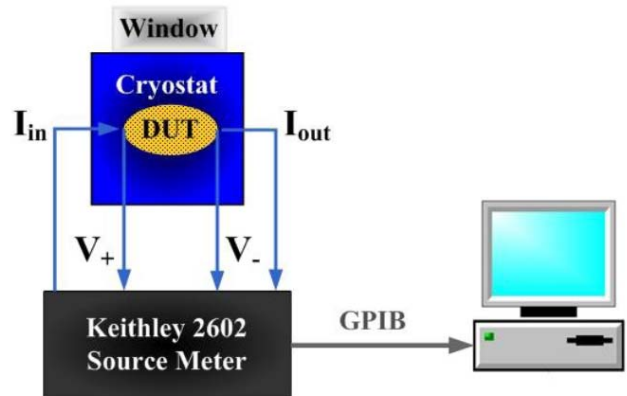
元件設計與製作

欲解決傳統磊晶技術製作 BIB 偵測器所遇到的問題：複雜、耗時且需製作兩層相鄰的高阻值層與高摻雜層，我們利用離子佈植的技術製作平面元件。我們使用高純度無摻雜的矽當做基板來達到高純度和低補償摻雜的需求並利用離子佈植取代磊晶來對吸光層和歐姆接觸層做雜質摻雜。

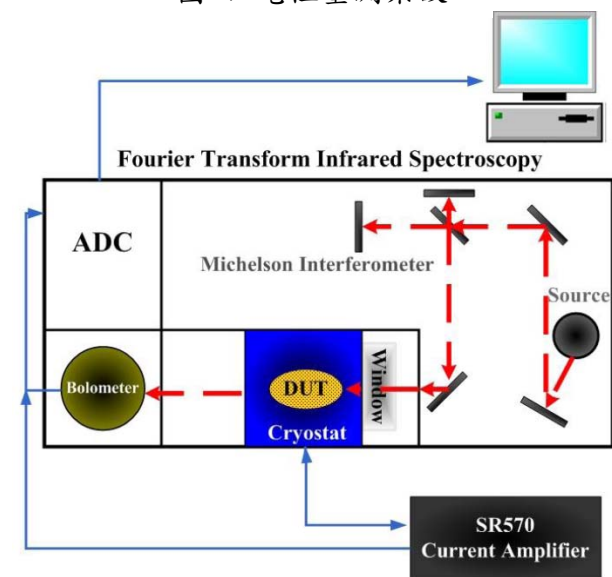
直流電性與光電流頻譜量測

我們使用 Keithley 2602 source meter 來量測暗電流(Dark Current)與背景光電流(Background Photocurrent)兩種 I-V 直流特性，量測系統架設如圖四。

我們使用 FTIR 來量測元件的相對頻譜響應(Relative Spectrum Response)。FTIR 的量測系統架設如圖五。放置在低溫恆溫器(Cryostat)中的待測元件(DUT)被經過邁克森干涉儀調變的紅外線光源照射後，會產生光電流訊號。訊號先經過 SR570 電流放大器放大後再輸回 FTIR 的 AD Converter 做資料取樣，最後經過傅立葉轉換，我們就可以得到光電流的頻譜圖。接著量測紅外線光源的頻譜圖(我們假設使用的熱感偵測器 Silicon bolometer 之頻率響應不隨波長改變)，把兩個頻譜圖在相對應的波數下相除，並把響應峰值定為 1，對整個圖形做歸一化後，即可得到相對頻譜響應。



圖四 電性量測架設



圖五 光電流頻譜量測儀器架設

結果與討論

(1)應力下鍍摻鎵之吸收頻譜

吸收頻譜量測

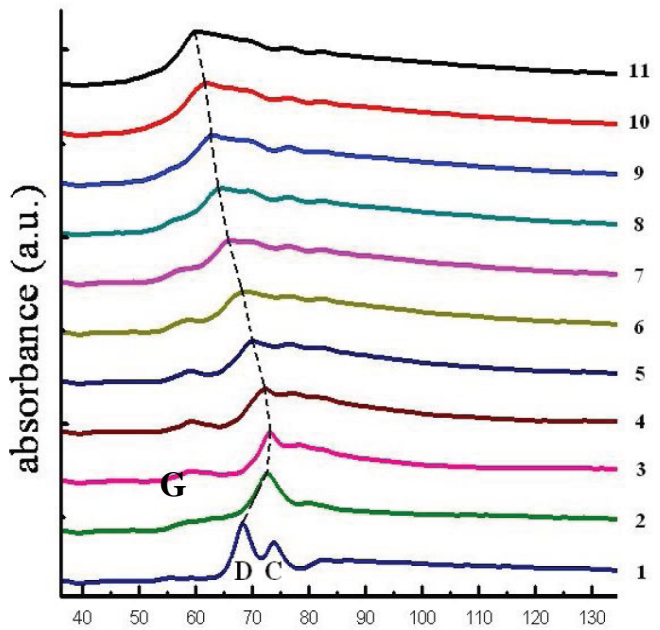
圖六為10 K時[110]方向應力下的吸收頻譜。1-11的譜線對應應力從0 kbar-5 kbar，以0.5 kbar 為間距。當應力為0 kbar 時可以觀察到G-line、D line與C line三條吸收譜線，隨應力上升D-line吸收譜線變寬，C-line吸收譜線消失。此外，D-line譜線位置隨應力大小移動，在低應力(<1 kbar)時往高能量移動，當應力大於1 kbar 時往低能量移動。圖七為D-line 吸收譜線峰值與應力大小關係圖。可知在低應力時雜質基態與激發態的能階差會變大，高應力時其能階差會變小。我們將各應力的吸收譜線放在同一個基準位做比較，如圖八。圖中60-120 cm^{-1} 的區域，吸收譜線隨不同應力呈相似下降的趨勢，對應到輕電洞次能帶底部的位置，隨應力增加往低波數的區域移動。而對應到重電洞能帶110 cm^{-1} -250 cm^{-1} 的區域，隨著應力增大峰值的位置開始往高移動。由此可知，輕電洞次能帶與重電洞次能帶之能隙差隨應力增加而變大。圖中250 cm^{-1} -300 cm^{-1} 的範圍有一吸收增強的趨勢，我們認為這是聲子的吸收，可由文獻上對鍺塊材於低溫下吸收頻譜得知。[10]

(2)金屬網狀濾波器

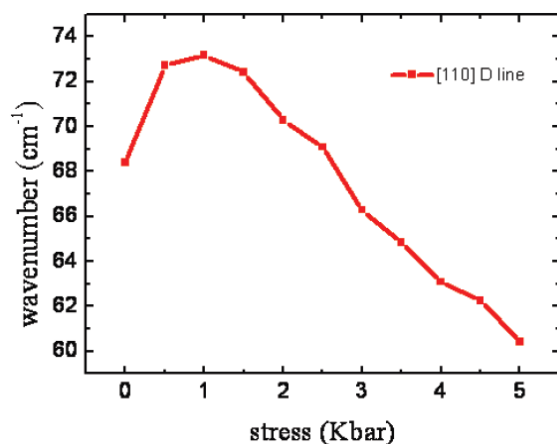
頻譜量測

我們發現十字架挖洞的濾波器其穿透率其穿透率之峰值與頻寬的表現皆優於圓形挖洞與正方形挖洞，如圖九所示。因此著重於此類濾波器的特性分析。

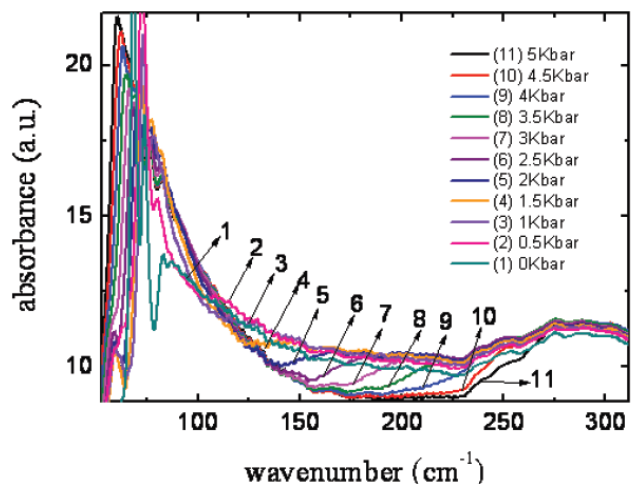
我們改變十字架的長寬比，所量測出來的頻譜如圖十所示，由頻譜圖我們同樣可以發現一些現象：(1) 穿透率會隨著長寬比變大而下降，但會發生此現象並不是長寬比所造成，而是透光面積。(2) 半高寬會隨著長寬比變大而下降，這和我們的預期是相吻合的。我們可以使用不同的長寬比去控制其半高寬。但由於長寬比越大，相對透光面積就會越小，因此實際運用上，長寬比並不能夠無限縮小，此濾波器之半高寬會有其極限。



圖六 p -Ge 於沿[110]不同應力下的吸收頻譜，應力大小 0~5 kbar，間距 0.5 kbar。

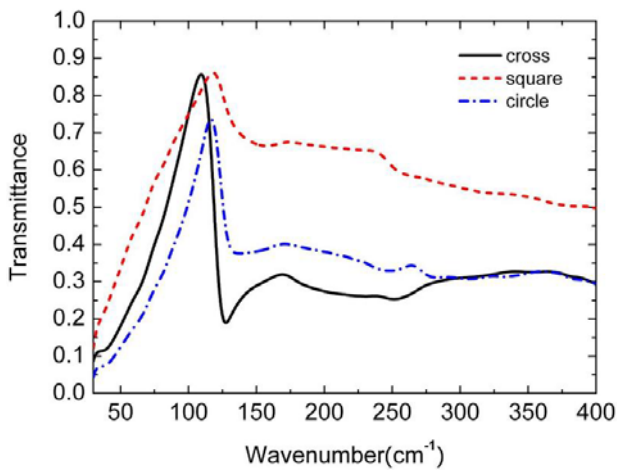


圖七 D-line 能量隨應力變化趨勢

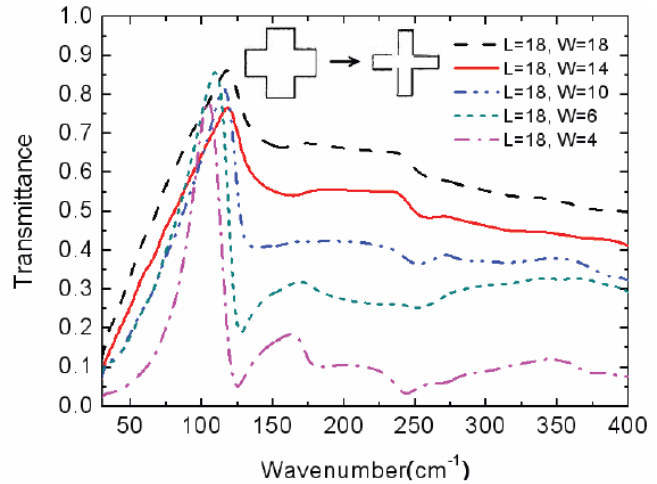


圖八 相同基線下 p -Ge 應力頻譜之比較

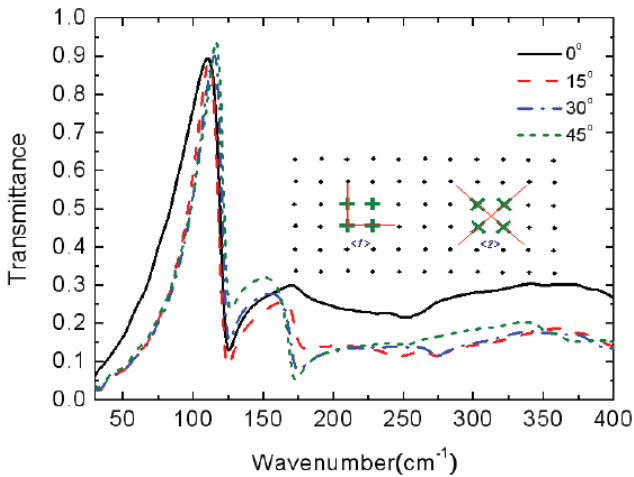
此外，我們藉由破壞 unit cell 與晶格間的對稱性，亦可達到改變半高寬的目的，如圖十一所示。適當的設計單元形狀，我們能提升濾波器的穿透率至接近 100%，如圖十二所示。



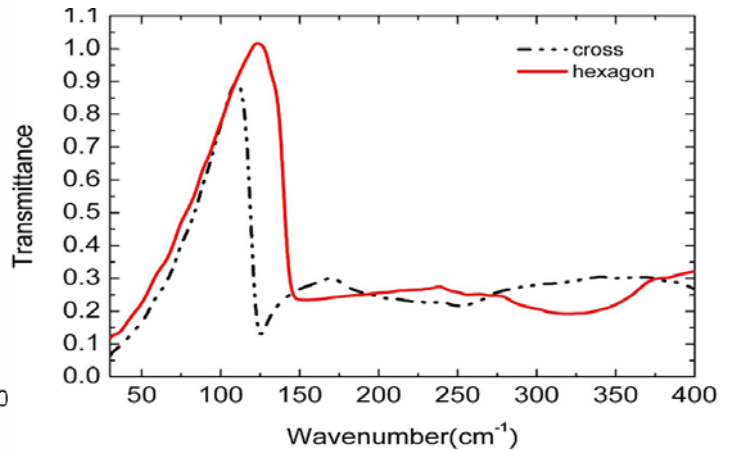
圖九 不同形狀 unit cell 之穿透頻譜



圖十 不同十字架長寬比之穿透頻譜



圖十一 不同角度旋轉 unit cell 之穿透頻譜



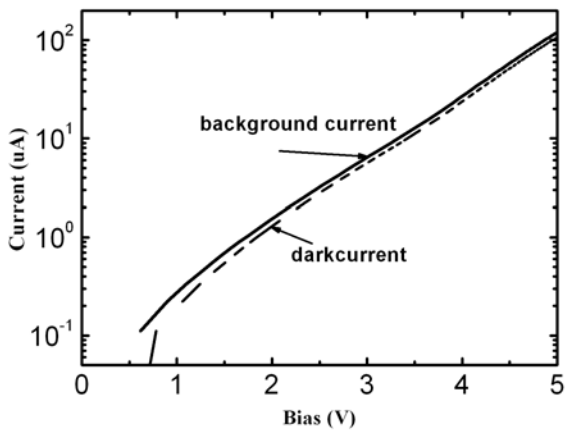
圖十二 穿透率接近 100 % 的濾波器與單元為正方形的濾波器比較

(3)矽阻擋雜質能帶偵測器(Si:B blocked-impurity-band photo-detector)。

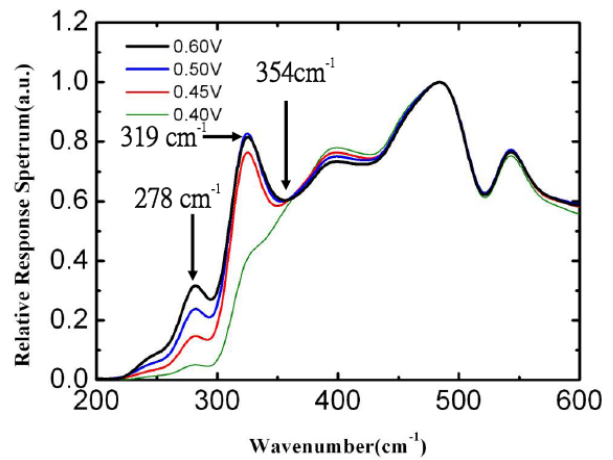
圖十三為樣品電壓電流曲線圖，可以發現背景光電流都大於暗電流，符合需求操作在 BLIP 的狀況下。圖十四為樣品的光電流頻譜圖。硼的 1s 雜質能階到價帶的游離能大約為 44 meV(354 cm^{-1})，因此理論上 Si(B)偵測器只能偵測到 354 cm^{-1} 的頻段。長波長的吸收可以在圖中被觀察到，代表增加樣品摻雜濃度的方法是成功的。而我們量測的結果，最遠到 250 cm^{-1} 都有貢獻電流，而在 300 cm^{-1} 前都還有十分之一的貢獻。

觀察圖十四，發現會隨著電壓變大，圖形多了兩個峰值。而且隨著電壓越變越大，峰值的強度也越來越大。再仔細觀察峰值隨電壓變化的趨勢，較大波數的峰值在 0.5~0.6V 時的成長趨勢已經趨緩，而較小波數的峰值在 0.5~0.6V 仍有相當的成長。嘗試與 Si(B)的吸收頻譜作比較，可以發現那兩個峰值：319 cm^{-1} 和 278 cm^{-1} 和對應到 Si(B)吸收頻譜的兩個峰值。我們猜測峰值成長的原因如下：在高摻雜的情況下，獨立的雜質能階已經形成雜質能

帶而和價帶結合在一起，但在離雜質基態(Ground State)較近的雜質激發態(Excited State)能階已經有變寬但沒有完全併入價帶中。因此被光激發到這些能帶的電子或電洞需要再一次的激發才能夠到價帶以形成光電流。而受強電場加速而帶有很高能量的自由載子所產生的衝擊離子化就是激發這些電洞的最好方法。因此才會在高電場的時候出現兩個峰值。



圖十三 樣品暗電流與背景電流比較



圖十四 不同偏壓下光電流頻譜

參考文獻

- [1] B. Ferguson, X.C. Zhang, 2002, September, "Materials for terahertz science and technology", *Nature Material* **1**, 26.
- [2] M. Tonouchi, 2007, February, "Cutting-edge terahertz technology", *Nat. photonics* **1**, 97.
- [3] W. L. Chan, J. Deibel, D. M. Mittleman, 2007, August, "Imaging with terahertz radiation", *Rep. Prog. Phys.* **70**, 1325.
- [4] I.V Altukhov, M.S. Kagan, and V.P. Sinis, 1988, February, "Interband emission of hot holes during uniaxial compression of Ge", *JETP Lett.* **47**, 164 (1988).
- [5] Y. P. Gousev, I. V. Altukhov, K. A. Korolev, V. P. Sinis, M. S. Kagan, E. E. Haller, M. A. Odnoblyudov, I. N. Yassievich, and K.-A. Chao, 1999, August, "Widely tunable continuous-wave THz laser", *Appl. Phys. Lett.* **75**, 757 (1999).
- [6] Y. E. Pokrovskii and N. A. Khval'kovskii, 2005, February, "Spectroscopic Study of Ga-Doped Ge under Uniaxial Pressure", *Semiconductors* **39**, 197 (2005).
- [7] M. D. Petroff, and M. G. Stapelbroeck, "Blocked impurity band detectors," U.S. Patent, No. 4 568 960, filed 23 October 1980, granted 4 February (1986).
- [8] R. Ulrich, 1967, March, "Far-Infrared Properties of Metallic Mesh and Its Complementary Structure", *Infrared Phys.* **7**, 37 (1967).
- [9] A. M. Melo, M. A. Kornberg, P. Kaufmann, M. H. Piazzetta, E. C. Bortolucci, M. B. Zakia,

O. H. Bauer, A. Poglitsch, and A. M. P. Alves da Silva 2008, November, “Metal Mesh Resonant Filters for THz Frequencies”, *Applied Optics* **47**, 6064 (2008).

[10] J. R. Aronson, H. G. McLinden and P. J. Gielisse, 1964, August, “Low-Temperature Far-Infrared Spectra of Germanium and Silicon”, *Phys. Rev.* **135**, A785 (1964).

論文發表

1. H. W. Hsieh and S. T. Yen, 2009, May, “Analysis of GaAsGaSbGaAs structures under optical excitation considering surface states as an electron reservoir”, *J. Appl. Phys.*, **105**, 103515. (SCI, NSC 97-2221-E-009-164)
2. T. H. Wang and S. T. Yen, 2009, July, “Electronic structure analysis for group III acceptors in Ge under stress considering screening effect and central-cell correction”, *J. Phys. Condens. Matt.* **21**, 335801. (SCI, NSC 97-2221-E-009-164)

會議發表

1. K. C. Lee and S. T. Yen, 2009, October, “Enhancement of Electroluminescent Refrigeration by Inserting Carrier Blocking Layers”, *The 41st International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2009)*, Sendai, Japan.

畢業生論文

學生姓名	指導教授	論文題目
李志浩	顏順通	單軸應力下 P 型鍺之電性與兆赫波吸收頻譜之研究
黃信傑	顏順通	兆赫波波段金屬網狀濾波器之研究
石正瑜	顏順通	矽摻硼之阻擋雜質能帶紅外線偵測器之研究

Enhancement of Electroluminescent Refrigeration by Inserting Carrier Blocking Layers

Kuan-Chen Lee and Shun-Tung Yen

Department of Electronics Engineering, National Chiao Tung University, Hsinchu, 300, Taiwan, Republic of China
Phone: +886-03-5131471 Email: styen@cc.nctu.edu.tw

1. Introduction

Compared with a conventional cooler with liquid refrigerant, a solid-state refrigerator has some benefits such as smaller in size, integrable with semiconductor devices, and potentially environmental friendly. One of the most interesting methods to cool the environment is by means of luminescence. It has been reported that optoelectronic materials, such as GaAs, could be cooled if the quantum efficiency is nearly unity [1]. This idea introduces two ways to perform refrigeration. One is by photoluminescence (PL) and the other is by electro-luminescence (EL). The optical refrigeration has been recognized as a great success of PL refrigeration [2]. Pumping the Yb-doped glass is capable of reducing a temperature of ~ 80 K below the room temperature. Recently, many researchers have been studying the cooling ability of optoelectronic semiconductors, especially for the EL purpose [3,4]. However, there has been little research addressing the effect of leakage current on the EL refrigeration. The leakage current reduces the internal quantum efficiency (IQE) of a light-emitting diode (LED) based device, and thus lowers the cooling power.

In this paper, we investigate the effect of the carrier blocking layers on the leakage current in bipolar LED-like devices by a self-consistent numerical simulation. The effect of leakage current on cooling power under different temperatures is also evaluated.

2. Numerical Method

The electrostatic potential is obtained by solving the coupled Poisson and continuity equations self-consistently. The Fermi-Dirac statistics and the thermionic current boundary condition are also taken into account. The device configuration is shown in the Fig. 1. The outer-most layers (I and VII) are cladding layers. Inside the cladding layers are the carrier blocking layers (II and VI), followed by spacers (III and V). Layer IV is the GaAs active layer. Regarding to the recombination process inside the device, both the Auger recombination and band-to-band radiative recombination are considered in the active layer, while only the Shockley-Read-Hall (SRH) recombination is considered in the other layers. Moreover, an infinite surface recombination velocity is assumed at the cladding layer surfaces.

3. Results and Discussions

The cooling power is defined as the emission photon power minus the input power. It can be expressed as follows:

$$P_{cool} = P_{ems} - P_{input} = P_{ems} - JV. \quad (1)$$

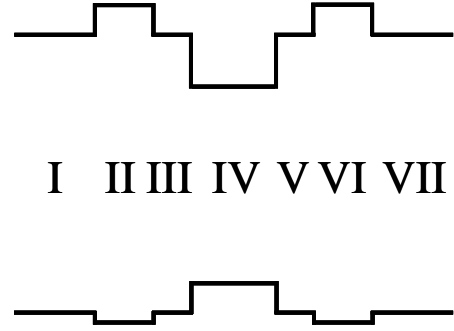


Fig. 1. The device structure. Layers I and VII are 100 nm $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ with doping concentration of 10^{18} cm^{-3} . Layers II and VI are 50 nm $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ with doping concentration 10^{17} cm^{-3} . Layers III and V are 50 nm undoped $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$. Layer IV is the 100 nm intrinsic GaAs active layer.

By an appropriate substitution, Eq. (1) could be re-written in terms of the individual current components as:

$$P_{cool} = \left(\frac{\alpha}{q} - V \right) J_{rad} - J_{heating} V. \quad (2)$$

Where, α represents the average photon energy which is estimated to be about $E_g + 3kT$. q is the elementary charge. J_{rad} is the radiative recombination current and $J_{heating}$ is the sum of the other current components that cause heating to the device. From Eq. (2), we see that the cooling power could be improved by inhibiting the leakage current.

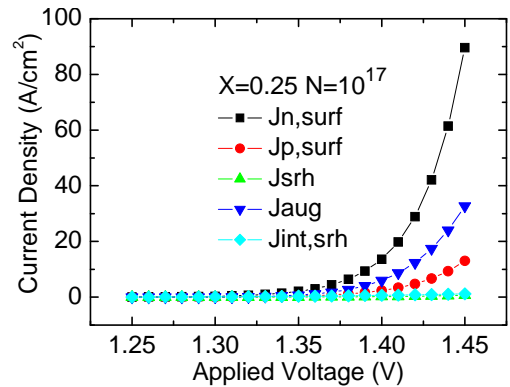


Fig. 2. The current components of a double heterojunction LED structures. $J_{n(p),surf}$ is the electron (hole) surface recombination current. J_{srb} is the SRH recombination current. J_{aug} is the Auger recombination current. $J_{int,srb}$ is the SRH recombination current at the interfaces.

Fig. 2 shows the various current components of the double heterojunction LED structures without blocking layers ($x=0.25$) at 300 K. Remarkably, the electron surface recombination current dominates in the heating current. As a result, a low maximum cooling power is obtained, as the line with $x=0.25$ shows in Fig. 3. The leakage current can be reduced by increasing the barrier of the blocking layers. Fig. 4 shows the heating current components for the blocking layers with an Al fraction $x=0.35$. Comparing with Fig. 2, we find that the surface recombination current can significantly be reduced by inserting the blocking layers. Therefore, the cooling power can be enhanced through reducing the leakage current. The cooling power can reach a maximum of ~ 10 W/cm². There is no further improvement in the cooling power by further increasing x from 0.35 to 0.4 because the leakage current has been almost eliminated by the blocking layers with $x=0.35$. Instead, increasing the Al fraction introduces a higher barrier and reduces the majority carrier flowing into the active layer. This causes the lowering of the radiative current and the cooling power.

To further understand the effect of the current leakage on the cooling power, we also study the cooling capability

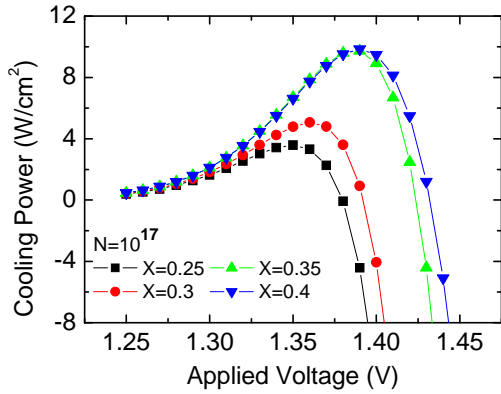


Fig. 3. The cooling power as a function of applied voltage for different Al fractions x in the blocking layer.

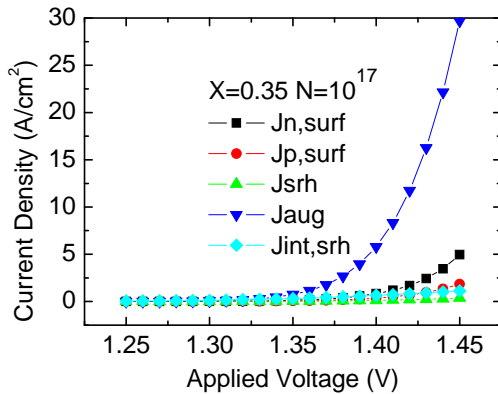


Fig. 4. The current components as a function of applied voltage for the blocking layers with an Al fraction $x=0.35$ and a doping concentration of 10^{17} cm⁻³.

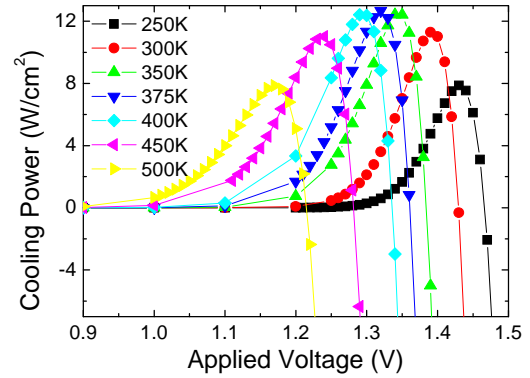


Fig. 5. The cooling power as a function of applied voltage for different temperatures. The blocking layers have an Al fraction $x=0.4$ and a doping concentration of 10^{18} cm⁻³.

at different temperatures. We consider the blocking layers which have an Al fraction $x=0.4$ to block the leaking minority carriers at high temperature and a doping concentration of 10^{18} cm⁻³ to reduce the resistance of the layers. It seems that the cooling power would increase with the temperature because of increasing the average photon energy. However, the cooling power peak reaches the maximum at temperature about 375 K, but not monotonically increases, as shown in the Fig. 5. A current analysis shows that the cooling power degradation at high temperature comes from the increase in the Auger recombination. On the other hand, the cooling power degradation at low temperature is a consequence of a low thermal energy.

4. Conclusions

In summary, we study the influence of the leakage current on the cooling power of electroluminescent refrigeration. The leakage current comes from the minority carrier flowing toward the opposite electrodes and leads to the heat inside the devices. By inserting the carrier blocking layers, the carriers could be confined in the active layer. Thus, this gives an improved internal quantum efficiency and higher cooling power. On the other hand, as the temperature increases, the increase in leakage current also lowers the cooling power. As a result, a maximum cooling power is obtained when temperature is 375K.

Acknowledgements

This work was supported by National Science Council of the Republic of China under Contract No. 97-2221-E-009-164.

References

- [1] G. C. Doumanis et al., Phys. Rev. 133 (1964) A316
- [2] M. Sheik-Bahae et al., Nature Photonics 1 (2007) 693
- [3] O. Heikkilä et al., J. Appl. Phys. 105 (2009) 093119
- [4] A. G. Mal'shukov et al., Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 5570

國立交通大學博士班研究生

出席國際會議報告

報告人姓名	李冠成	報告日期	2009/10/07
系所及年級	電子工程研究所 博士班四年級	核定文號	98年9月7日 09D197
連絡電話	03-5712121#54235	電子信箱	ilv.ee89@nctu.edu.tw
會議期間	2009/10/06~09	會議地點	日本仙台
會議名稱	(中文) 固態元件及材料國際研討會 (英文) International Conference on Solid State Devices and Materials		
發表論文題目	(中文) 利用載子阻擋層提高電激發光式致冷元件的冷卻效率 (英文) Enhancement of Electroluminescent Refrigeration by Inserting Carrier Blocking Layers		

會議心得與報告

International Conference on Solid State Devices and Materials

2009 年的國際固態元件與材料會議(SSDM)為日本應用物理協會所主辦的三大會議之一，今年主辦地點在日本宮城縣仙台市。和以往一樣由日本應用物理協會主辦、國際電子電機工程協會技術協辦，時間為 2009/10/06 到 2009/10/09 含 Short Course 為期四天。本會議投稿共分成兩個階段：一是 Regular Paper，一般截稿日期為五月初到五月底，Acceptance announce 約在七月中、二是 Late News Papers，截稿日期為七月底，Acceptance announce 在八月初。本次與會的除了學界之外，也包含了大量的工業相關企業，耳熟能詳的大廠如：NEC、HITACHI、Panasonic、Sony、TOSHIBA 等。顯示了日本國內業界與學界的緊密結合以及日本工業界對前瞻性研究的重視！該會議近年的議題著重於下列研究重點：

1. Advanced Gate Stack / Si Processing & Material Science
 2. Characterization and Materials Engineering for Interconnect Integration
 3. CMOS Devices /Device Physics
 4. Advanced Memory Technology
 5. Advanced Circuits and Systems
 6. Compound Semiconductor Circuits, Electron Devices and Device Physics
 7. Photonic Devices and Device Physics
 8. Advanced Material Synthesis and Crystal Growth Technology
 9. Physics and Applications of Novel Functional Materials and Devices
 10. Organic Materials Science, Device Physics, and Applications
- 另外，對於前瞻領域的研究也是相當的重視：
11. Micro/Nano Electromechanical and Bio-Systems (Devices)
 12. Spintronic Materials and Devices
 13. Applications of Nanotubes and Nanowires
 14. Power Electronics

本人今年以 Late News Paper 的形式投稿於 Area 9，題目為‘利用載子阻擋層提高電激發光式致冷元件的冷卻效率’主要內容是以元件模擬的方法探討發光二極體(Light Emitting Diode, LED)的冷卻可行性。該研究題目是從光學冷卻系統衍伸而來，可謂相當之新穎。光學冷卻系統的工作原理乃是基於 anti-stoke fluorescence，自 1995 年首先驗證確時可以冷卻之後，至今，該系統可將環境溫度降低約 80K。然而以此系統(Yb 摻雜的氟玻璃)之理論極限約在 150K，主要原因是在此溫度之下，環境熱能將會小於基態的能階差，因而降低 anti-stoke fluorescence 的效率。為了避免此一問題，

近年來，學者開始評估以半導體實現冷卻的可行性。目前，大部分的學者乃是以光致激發放光的角度去研究這個問題。然而，若是以電激發光的角度去思考這個問題將會有而外的好處。由於該研究方向尚未為大眾所熟知，因此與會過程，實驗和模擬的學者多感到新奇，並給我相當多的建議，使我能了解該研究題目可能的發展方向。藉由和他們交流討論，我也了解到自己理論的不足之處，還有學者甚至大方的提出他們的想法給予我模擬的方向。這些都是參與該會議所意想不到的收穫！

藉由這次參訪，我也了解到日本學生的求學態度是相當積極的，這是值得我所學習的地方。並且，我也粗略的了解到其他領域的研究方向，如化學與電機的結合、生物與電機的結合等等。總之，我覺得這是一個相當難得的機會，讓我可以和國外的學者進行學術上的交流，因此我也相當建議政府能夠持續補助類似的研究活動，更鼓勵像我一般的博士生能夠多參加國外研討會，以避免閉門造車的研究方式。另外，我和一些學者也談論到日本學界和業界的合作模式，日本的研究資金主要集中於某些具有潛力的重點學校。而業界對於學界的一些前瞻研究也是相當的積極，除了投入大量的資金之外，並且對於研究成果的商品化亦有大量的貢獻！反觀國內廠商就對學界的前瞻研究較不熱衷，大多要求的是能有速成的結果，產學的交流受到景氣影響太大，因此難有具有創新性、前瞻性的商品與專利，這是值得政府與上位者深思的問題。

最後，我將此次會議之 Extended Abstract 帶回，供大家參考研究之用。另外，也將明年 SSDM 的計畫時間表帶回給與大家參考。