

# 半導體兆赫波發射源及偵測器

## THz Emitter and Detector Based on Semiconductor

鄭鴻祥

Hung Hsiang Cheng

本文對兆赫波發射源及偵測器作深入淺出之介紹。首先我們對此研究之背景及目前發展做一簡略概述。並且列舉兆赫波之實際應用，以提高讀者對此領域之興趣。接下來對目前所發展之半導體兆赫波發射源及偵測器工作原理加以闡述，並示範元件之發射光譜及吸收譜。藉由實例及說明，增進讀者對此領域之了解。

In this report, semiconductor terahertz (THz) emitters and detectors are introduced. The background and present status in the area are briefly described, followed by a practical example for application. The operation principle of both emitter and detector based on III-V and IV-IV semiconductor compound is discussed. Both emission spectrum and detector's spectral response are demonstrated.

### 一、背景

兆赫波發射源及偵測器研究為新興發展之科學領域。由光譜能量來看，兆赫波 (terahertz) 頻率位於 1 THz (300  $\mu\text{m}$ ) 至 20 THz (15  $\mu\text{m}$ ) 之間。前者頻率以下為電子元件之操作頻率。後者頻率以上為目前許多日常光學元件之工作頻率，如音響唱片用的雷射等。兆赫波位於此兩者頻率之間，目前並無簡易輕便之元件裝置。此能量對應於物質分子 (原子) 轉動、振動之頻率，所以可以廣泛應用於如醫療、民生及軍事用途等。舉例來說，我們可應用於燒傷之皮膚表面，藉由燒傷細胞組織及非燒傷細胞之組織對兆赫波吸收係數 (absorption coefficient) 之不同，即可分辨皮膚燒傷損壞之深度，以提供醫療上必要之資訊，如作切除或治療等。又如我們可用於檢測鈔票真偽，若紙鈔塗佈特殊化學材料，因化學

材料對兆赫波源有不同的吸收反應，則很容易分辨出塗佈與沒有塗佈此化學材料之影像。

### 二、發展現況

於過去十餘年中，科學界開始發展兆赫波發射源及偵測器。於發射源部分，有數種光學之方式可產生兆赫波。例如使用高功率之二氧化碳雷射去激發特定化學物質即可產生次毫微米功率 (sub mill watt) 之兆赫波<sup>(1)</sup> (光之放射能量為此化學物質之分子轉動、振動鍵結能量)。於偵測器部分，目前大部分為使用感熱式之矽偵測器，但其熱雜訊高，所以須於低溫操作。考慮其實用性，由以上敘述可知，能產生兆赫波源之儀器都相當龐大，所以並未被廣泛應用。而半導體具有輕薄短小的特性，所以可普遍的使用，也是目前發展的方向。

### 三、半導體兆赫波發射源及偵測器

#### 1. 發射源

目前產生兆赫波源之物理機制有兩種，分別是：(1) 穿隧效應 (tunneling effect)，及 (2) 粒子於雜質能階之躍遷 (interband transition of impurity levels)，分述如下。

##### (1) 穿隧效應

此發光的機制為藉由量子能階之躍遷，產生光源。樣品之基本結構，為兩種不同半導體材料所構成之量子井 (quantum well)，如：砷化鎵/砷化鋁鎵 (GaAs/AlGaAs)、矽鍺/矽 (SiGe/Si) 等。由於兩種材料之能隙 (energy band gap) 不同，即產生量子效應，此結構即所謂量子井半導體，如圖 1 所示。窄能隙之區域即為量子井，此量子井之位能 (potential offset) 為由兩者材料之能隙差及 band offset ratio 所決定。矽之能隙為 1.17 eV，矽鍺之能隙為  $1.17 - 0.43x + 0.206x^2$ 。x 代表鍺含量。兩者能隙之差為  $-0.43x + 0.206x^2$ 。量子井之位能為  $(0.43x - 0.206x^2) \times 0.3$  (0.3 為 conduction band offset ratio)。當量子井之厚度小於一定的厚度下，量子井即具有束縛態，如圖 1(a) 之虛線所示 (此臨界厚度約為 10 nm)。於簡化的考慮下，此束縛態能量可表示為  $E_n = C(n^2/d^2)$ ，C 為常數，n 可為 1、2、3 等。d 為量子井厚度。由此可知量子井具有多個束縛態。

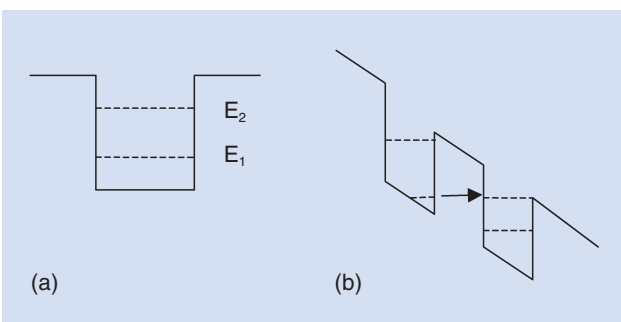


圖 1. (a) 量子井示意圖。虛線代表束縛態  $E_2$  及  $E_1$ 。(b) 於外加偏壓下，能帶結構圖。實線箭頭表示粒子由一層量子井遷移到另一層量子井之穿隧效應。

在外加偏壓下，對於多層量子井 (multi quantum well)，能帶重新排列如圖 1(b) 所示。粒子 (電子或電洞) 由左邊電極行進至量子井之高能態  $E_2$  能階，再藉由量子躍遷至低能態之  $E_1$  能階。於此過程中為了保持能量守恆，即伴隨著光之發射。此光譜之能量即對應於  $E_2$  減  $E_1$  之能量差。藉由不同量子井之寬度，可調變  $E_2$  減  $E_1$  之能量差，給出不同波段之光譜。掉落至低能階之粒子，穿隧至下一層量子井之高能階，如實線箭頭所示。為增加發光強度，上述之過程不斷重複，粒子最後以電流的形式離開電極區域。

實驗上我們已發現兆赫波光譜，分別是在砷化鎵/砷化鋁鎵及矽鍺/矽多層量子井系統<sup>(3-5)</sup>。一個典型的光譜呈現在圖 2<sup>(4)</sup>。於圖 2 中箭頭表示量子井中不同能態之躍遷，分別對應於重電洞 (heavy hole) 高能態至重電洞低能態及重電洞至輕電洞 (light hole) 能態 (重電洞及輕電洞之說明，見下一節)，發射之頻率約為 2 及 8 THz。此光譜之半高寬為 1.5 THz。目前朝向設計共振腔之方向研究，以能增進其發射功率，以達到類似雷射之功能 (雷射之原理為 stimulate emission，所以具有高發射功率)。

##### (2) 粒子於雜質能階之躍遷

另一產生 THz 光譜之物理機制為使用半導體導帶區或價帶區 (conduction band or valence band) 中不同參雜雜質能階之量子躍遷。對單一材料之半

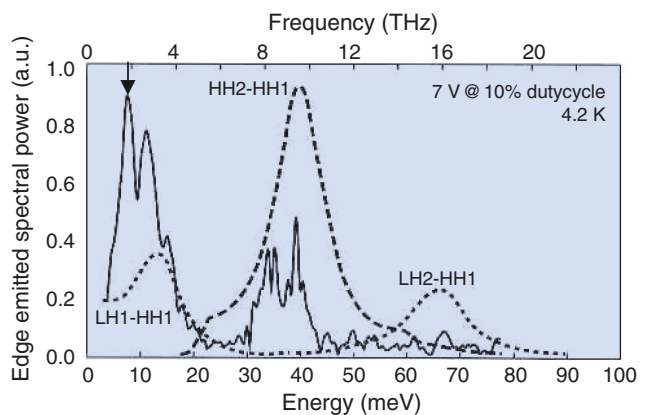


圖 2. 一典型之兆赫波光譜。實線箭頭即為束縛態之躍遷 (light hole to heavy hole)。發射之頻率約為 2 及 8 THz，分別對應於 10 meV 及 32 meV。

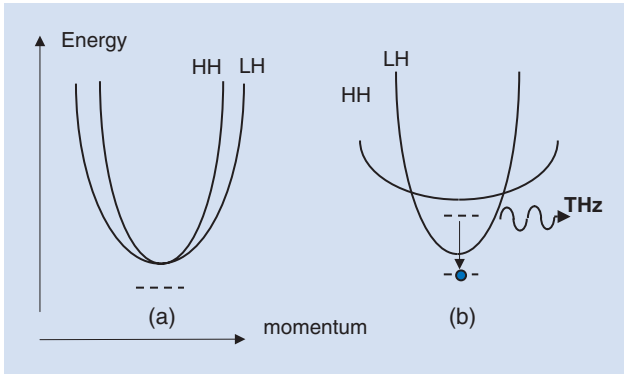


圖 3. (a) 重電洞 (HH)、輕電洞 (LH) 分裂後能帶示意圖。虛線代表雜質能階。(b) 重電洞、輕電洞分裂後能帶示意圖。藉由電激發，電洞佔據重電洞之雜質能階，接著躍遷至輕電洞之雜質能階放出光源。藍色圓圈代表雜質粒子。

導體，其價帶區在  $k = 0$  時為簡併態，如圖 3(a) 所示。從能量 (energy) 對動量 (momentum) 之作圖可看出 (dispersion relation)，於動量等於零之位置其能量是相同的。但對於異質結構而言，由於晶格常數之不同，簡併態被破壞，形成分裂的能階。舉例來看，於矽鍺／矽異質結構，對價帶而言，其分裂為重電洞及輕電洞能態，如圖 3(b) 所示。此分裂之能量差正比於鍺之含量。我們可利用此能階之差製作發射源。

為使能態中具有粒子，元件須作參雜 (doping)。參雜雜質在半導體中，造成許多不同的能階，就如同粒子於氫原子中 (氫原子模型) 具有  $1s, 2s$  等能階。對  $N$ -type 參雜，其能階附著於導帶區。對  $P$ -type 參雜，其能階附著於價帶區。圖 3(a) 為其示意圖，實線代表導帶區或價帶區之最低能量階 (band edge)，虛線代表雜質能階。於異質結構中 (heterostructure，如矽鍺／矽兩種不同半導體材料所構成)，價帶區的重電洞及輕電洞分裂，雜質分別附著於此兩個能帶，如圖 3(b) 所示。藉由電激發的方式，可將自由粒子填入高能態 (重電洞之雜質能階)。因高能態非為穩定態，所以藉由量子躍遷掉落至低能態能階後 (輕電洞之雜質能階)，並發出對應於重電洞，輕電洞能階差之光譜。藉由製作不同鍺含量之異質結構，即可調變發射源之頻率。一典型之矽鍺／矽 THz 光譜示於圖 4<sup>(6-8)</sup>。如箭頭

實線所示，其發射之頻率約為 3 THz。對應於重電洞至輕電洞雜質能態。

## 2. 偵測器

目前所使用之偵測器為 Si bolometer。於低溫時此元件具有特定之電流－電壓特性 (current-voltage)，當 THz 光源照射在此元件上時，累積之光能量轉換成為熱能，使元件溫度改變，造成電流－電壓特性之改變。光譜即反映在此元件電性之改變。由上之描述可知，此元件之工作原理為感測光譜之熱能，也因此對周圍的熱能非常敏感。舉例來說，將手指接近此偵測器，即可對其電性產生微小之影響。所以可想而知此元件之熱雜訊相當高，因此並不被普遍應用。

於此我們提出另一類型之偵測器，類似以上所述發射源之原理，我們使用具參雜之塊狀 (bulk) 半導體作偵測器。如上所述，於半導體中雜質具有不同之能階。舉矽材料為例，硼於矽中  $1s$  及  $2s$  之能量分別為 45 meV 及 11 meV。(於此，為簡單起見，我們忽略其他高階能態如  $2p$  等。) 假設其低能階未被填滿，則當 THz 光源照在此元件上時，其即可吸收對應於高能階至低能階之光能量 ( $1s-2s$ )。吸收至高能階之電子，因接近於能帶之最低狀態 (band edge)，所以很容易游離成為自由電子，進而對其電性產生影響 (於固定電壓下，電流為正比於自由電子之數目)。由電性之變化，進而我們可紀錄其光譜。不同之雜質具有不同之  $1s, 2s$  等

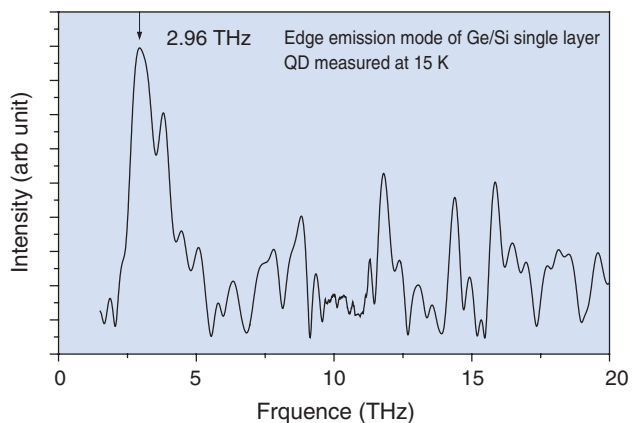


圖 4. 一典型之矽鍺／矽 THz 光譜。如箭頭實線所示，其發射之頻率約為 3 Hz。

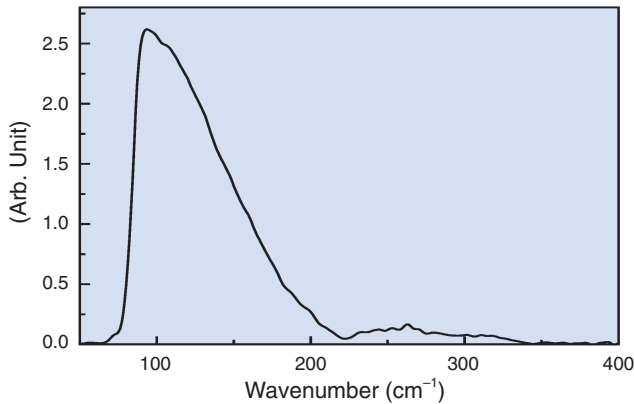


圖 5. 一典型參雜鎵之鍺偵測器之吸收光譜。其偵測範圍為 10–20 meV。

能階。藉由不同之參雜，即可產生不同波段之吸收光譜。

基於以上之工作原理，實驗上，我們可製作參雜不同雜質之偵測器。圖 5 為一典型之參雜鎵之鍺偵測器之偵測譜。在 10–20 meV 之間其具有很強之吸收係數，所以可做為良好的 THz 偵測器。

#### 四、結論

在本文中，我們對半導體兆赫波發射源及偵測器作概略之介紹，並舉例說明其應用性。經由深入淺出之介紹，希望能吸引讀者對此新興研究領域之興趣。目前這個領域之發展為 (a) 提高發射功率及 (b) 製作陣列如 charge coupled device array (CCD)，以能製作如相片之影像 (image)。

#### 參考文獻

1. P. T. Lang, F. Sessler, U. Werling, and K. F. Renk, *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 2576 (1989).
2. H. H. Cheng, S. T. Yen, and R. J. Nicholas, *Phys. Rev. B*, **62**, 4638, (2000).
3. D. J. Paul, S. A. Lynch, R. Bates, Z. Ikonc, R. W. Kelsall, P. Harrison, D. J. Norris, S. L. Liew, A. G. Cullis, D. D. Arnone, C. R. Pidgeon, P. Murzyn, J. -P. R. Wells, and I. V. Bradley, *Physica E*, **16**, 147 (2003).
4. D. J. Paul, S. A. Lynch, R. Bates, Z. Ikonc, R. W. Kelsall, P. Harrison, D. J. Norris, S. L. Liew, A. G. Cullis, P. Murzyn, C. R. Pidgeon, D. D. Arnone, D. J. Robbins, *Physica E*, **16**, 309 (2003).
5. R. Kohler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, D. A. Ritchie, R. C. Lotti, and F. Rossi, *Nature*, **417**, 156 (2002).
6. Z. P. Yang, C. M. Yang, H. H. Cheng, D. Andrey, and V. Tulupenko, *26th International Conference on the Physics of Semiconductors* (2002).
7. A. Blom, M. A. Odnoblyudov, H. H. Cheng, K. A. Chao, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 713 (2001).
8. *Symposium on Terahertz Sciences and Technologies*, H. H. Cheng, invited talk, (2001).

- 
- 鄭鴻祥先生為英國牛津大學物理博士，現任國立台灣大學凝態中心及電子研究所副教授。
  - Hung Hsiang Cheng received his Ph.D. in physics from Cambridge University, UK. He is currently an associate professor in the National Taiwan University Center for Condensed Matter Sciences and the Institute of Electronics Engineering at National Taiwan University.