

知識天地

量子點／量子井混模式紅外線偵測器

Quantum-Dot/Quantum-Well Mixed-Mode Infrared Photodetectors

林時彥助研究員、周淑婷博士後（應用科學研究中心）

砷化鎵／砷化鋁鎵量子井紅外線偵測器從 1980 年代開始受到廣泛的注意，由於容易利用砷化鎵／砷化鋁鎵材料進行能隙調變工程（Bandgap engineering），因此從問世以來，出現了各式的砷化鎵／砷化鋁鎵量子井紅外線偵測器，其中偵測波段（detection window）由 6 μm 擴展到 25 μm 包括單波段（single color）、多波段（multi-color）以及電壓控制多波段（voltage-tunable multi-color）GaAs-based 量子井紅外線偵測器都已成功的發展出來，再加上由於砷化鋁鎵和砷化鎵為晶格匹配（Lattice-matched）之物質，所以不論是用 MBE 或是 MOCVD 成長都能得到高品質的磊晶片，因此在 1995 年首先由美國的噴射實驗室（Jet Propulsion Laboratory）製造出第一顆 128 x 128 量子井紅外線焦面偵測器陣列（共有 128 x 128 顆約 30 μm^2 的砷化鎵／砷化鋁鎵量子井紅外線偵測器）。而後由於技術的繼續精進而產生了 256 x 256，640 x 480 的焦面偵測器陣列，由於 QWIP FPA 能得到不同波段的紅外線熱影像，因此不論是軍方或是民間都有廣泛的應用空間。然而雖然量子井紅外線偵測器具有上述許多優點，但是由於其操作溫度需要在 77 K 以下，因此尚不能達到高溫操作以及便於攜帶的目標。而相較於量子井紅外線偵測器，量子點紅外線偵測器除了具有寬偵測頻段（Wide detection window）、高反應率（High responsivity）以及高溫操作的特性外，其正向入射的吸收比起 QWIP 要高出百分之二十以上，因此用量子點所作成之紅外線偵測器要比傳統之 QWIP 要來的更適用於偵測器陣列製作（無需額外的導光機制）且特性更佳，此外理論上預測量子點元件之暗電流較低，光電增益較大，此一特性將有助於高溫操作之偵測器陣列的研製。

在近年來量子點紅外線偵測器的發展歷程中，各項元件結構對此元件特性的影響皆有文獻進行探討，其中包括插入一高能隙材料砷化鎵鋁（AlGaAs）來降低元件之暗電流 [1-3]，量子點結構摻雜濃度對其響應度及正面入射吸收特性的影響 [4]，以及我們在 2007 年所提出的具有薄 p 型砷化鎵層來提高其操作溫度的新穎結構 [5-6]。而藉由這些元件結構的最佳化，我們亦透過與中山科學院的合作而達成了在 135 K 操作之 256 x 256 量子點紅外線熱像儀 [7]。然而，這些元件最大的問題還是在於 (a) 偵測波段侷限於中紅外線波段（MWIR, 3-5 μm ）以及 (b) 量子點結構之樣品均勻度遠遜於量子井結構，以至於其良率不如一般的量子井紅外線偵測器，為了解決此問題，我們提出一量子點／量子井混模式紅外線偵測器（Quantum-Dot/Quantum-Well Mixed-Mode Infrared Photodetectors），在下述的研究結果中，我們第一次能透過單一元件同時觀察到量子點結構的一次光子吸收（MWIR）及量子井結構之二次光子吸收（LWIR），我們認為此元件將有助於高溫操作多波段量子紅外線偵測器之應用。

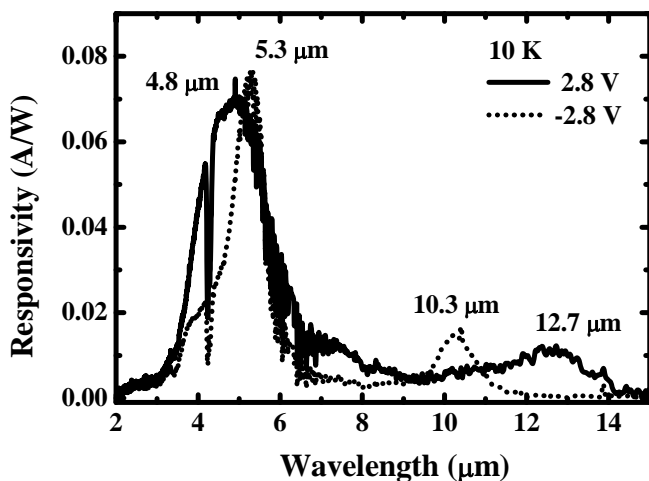
由於砷化鎵／砷化鋁鎵量子井紅外線偵測器在長紅外線波段（8-12 μm ）具有良好之元件特性，而量子點紅外線偵測器主要操作在中紅外線波段（3-5 μm ），因此我們希望能以一元件結構結合量子點及量子井的優點，進而達成多波段偵測的目的。在幾次的嘗試後，我們發覺若將 InAs/GaAs 量子點結構埋在 9 nm 的砷化鎵量子井層中，並使用 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 高能隙層作為障礙層，在選擇適當的量子井摻雜濃度後，我們可以同時觀察到量子點結構的中波段響應及量子井結構的長波段響應，其 10 K 頻譜響應如圖一所示 [8-9]。在初步的歸類中，我們認為短波長（3-5 μm ）的響應應為量子點結構之吸收而長波長（8-12 μm ）部份的響應應為量子井結構之吸收。為了證明此一推論，我們針對此元件進行了不同偏振方向紅外線入射光之頻譜響應量測，由於一般來說，量子井結構之正面入射吸收應低於量子點結構 [4]，因此此兩波段之響應若導因於不同的躍遷機制，其正面入射吸收便因有所區別。在實際的量測結果中，我們發現長波段響應的正面入射吸收較中波段為低（40 % V.S. 60 %），由此可看出中波段的響應確實應歸因於量子點結構之吸收而長波段的響應則屬量子井結構。

而根據這些實驗結果，我們亦建立了此元件之操作模型，其正負偏壓下之能帶圖如圖二所示。我們認為在正偏壓時，大部份的光電流由 (a)、(c) 兩個躍遷機制之光激電子所組成，而在負偏壓時，則由 (b)、(d) 兩個躍遷機制之光激電子所組成，其中 (a)、(b) 兩個躍遷機制為單一光子吸收而 (c)、(d) 為雙光子吸收機制，其他的支持證據

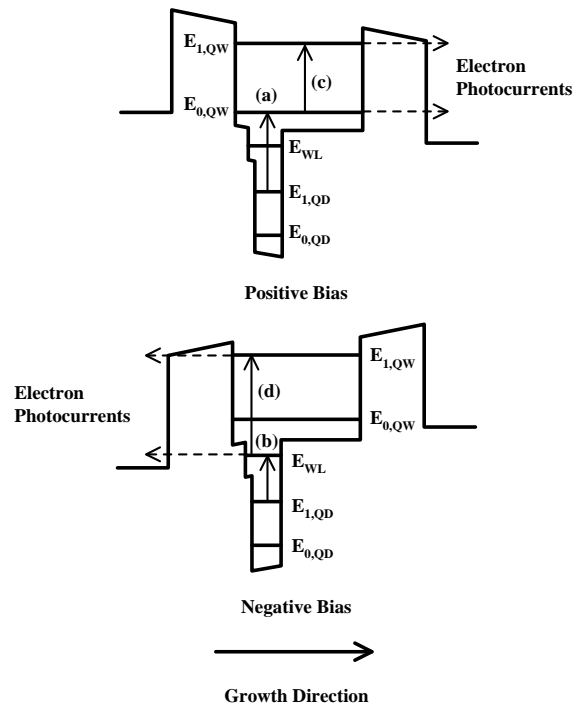
可由 (a)、(b) 及 (c)、(d) 相近之能量差 24.4 及 22.8 meV 中看出此元件模型之正確性。由此元件之特性可看出，我們已成功的結合量子點及量子井結構之優點，除了量子點結構在中波段之吸收之外，我們亦以量子點結構中受激電子較高生命期 (Lifetime) 的特性，以雙光子吸收機制的方式得到量子井結構在長波段的吸收，我們相信此結構將有助於高溫操作多波段量子點紅外線偵測器之發展，而實際上，我們亦已在 77 K 的量測溫度上得到 MWIR 及 LWIR 之頻譜響應，除了成功的在 77 K 的量測條件下達成雙波段操作的目標外，我們同時也發現此元件不論在中波段或長波段之光電流皆有隨溫度增加而增加的狀況，此特性為一般的量子井紅外線偵測器所沒有觀察到的，我們認為此特性將有助於此元件在更高溫度下操作的可能性。

結論

在我們的研究成果中顯示，相較於傳統的量子點紅外線偵測器，我們所提出之量子點/量子井混模式紅外線偵測器 (Quantum-Dot/Quantum-Well Mixed-Mode Infrared Photodetectors) 不但能同時偵測到中波段及長波段之紅外線頻譜，同時我們亦觀察到不論是中波段或是長波段的光電流皆有隨著溫度增加而增加的現象，此一特性迥異於傳統量子井紅外線偵測器之光電流不隨溫度改變而改變之特性，我們認為此特性將有助於量子點/量子井混模式紅外線偵測器在高溫操作之可能性。



圖一、量子井/量子點混模式紅外線偵測器在不同極性偏壓下之 10 K 頻譜響應。(左上)



圖二、量子井/量子點混模式紅外線偵測器在正負偏壓下之能帶結構及躍遷機制。(右)

參考文獻

- [1] S. Y. Lin, Y. R. Tsai, and S. C. Lee, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 2784 (2001).
- [2] S. Chakrabarti, A. D. Stiff-Roberts, P. Bhattacharya, S. Gunapala, S. Bandara, S. B. Rafol, and S. W. Kennerly, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 1361 (2004).
- [3] S. F. Tang, S. Y. Lin, and S. C. Lee, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 2428 (2001).
- [4] S. T. Chou, M. C. Wu, S. Y. Lin, and J. Y. Chi, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 173511(2006).
- [5] S. T. Chou, C. H. Tsai, M. C. Wu, S. Y. Lin, and J. Y. Chi, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**, 2409 (2005).
- [6] S. T. Chou, S. F. Chen, S. Y. Lin, M. C. Wu, and J. M. Wang, *J. Cryst. Growth* **301-302**, 817 (2007).
- [7] S. F. Tang, C. D. Chiang, P. K. Weng, Y. T. Gau, J. J. Ruo, S. T. Yang, C. C. Shih, S. Y. Lin and S. C. Lee, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18**, 986 (2006).
- [8] S. T. Chou, C. C. Tseng, C. N. Chen, W. H. Lin, S. Y. Lin and M. C. Wu, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 253510 (2008).
- [9] S. T. Chou, C. C. Tseng, C. N. Chen, W. H. Lin, S. Y. Lin and M. C. Wu, "Quantum-Dot/Quantum-Well Mixed-Mode Infrared Photodetectors for Multi-Color Detection", MBE 2008, Vancouver, Canada.

※各期知識天地文章請逕於本院網頁：<http://www.sinica.edu.tw/>「常用連結」之「週報〈知識天地〉」項下瀏覽。※