

# 知識天地

## 量子點紅外線偵測器及量子點紅外線偵測器陣列

### Quantum-Dot Infrared Photodetectors and Quantum-Dot Infrared Photodetector Focal-Plane Array

林時彥、周淑婷

(應用科學研究中心助研究員、國立清華大學電子工程研究所博士班學生)

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，由於理論上量子井紅外線偵測器並不吸收正面入射光，因此往往需要製作額外的導光機制將 TE-mode 入射光轉換成 TM-mode 入射光，而在我們先前的著作中亦已證明，量子點紅外線偵測器之正向入射吸收比起 QWIP 要高出百分之二十以上[1]，此一特性將有助於簡化高溫操作之偵測器陣列的研製(無需額外的導光機制)。我們在過去的研究中分別就量子點紅外線偵測器之(A)正面入射吸收，(B)高溫操作特性及(C)熱像儀的應用進行一系列的探討，由元件結構的探討，元件特性之物理機制之瞭解，我們成功的透過與中山科學院的合作製作出全世界第一顆以分子束磊晶技術製作之 256X256 量子點紅外線偵測器陣列，其中更重要的是此元件並無需額外的導光機制，並且能操作在 135 K 的高溫下。此一成就不但對此元件研究上有極大的貢獻，同時對此技術之實用性亦有指標性的意義。

針對量子點紅外線偵測器的正面入射吸收特性，我們發現雖然量子點結構一般而言確有增加正面入射吸收的功能，然而在外加電場逐漸增加後，光激電子(Photo-excited electrons)與量子點內固有電子之間的碰撞將會降低正面入射光電流對總體光電流之貢獻，在特定的操作條件下，量子點紅外線偵測器之正面入射光電流比例甚至會接近量子井紅外線偵測器(量子井紅外線偵測器之正面入射光電流的比例隨施加偏壓不會改變，顯示其正面入射光電流主要是由於正面入射光在元件平臺邊緣散射造成非正面入射光所致)[2]。由此可知，雖然量子點紅外線偵測器在正面入射光電流的比例可較一般的量子井紅外線偵測器為高，然而由於其較複雜的傳導特性，不同的元件結構及操作偏壓對此元件之正面入射光電流比例將會有極大的影響。我們成功的釐清了量子點結構對正面入射光之吸收以及量子點紅外線偵測器正面入射光電流比例間存在差異的原因，同時亦展示了此元件相當有趣的正面吸收特性，同時也揭示了對量子點紅外線偵測器之元件特性有更進一步研究的必要。

針對量子點紅外線偵測器中暗電流的抑制，我們進行了深入的研究並提出一全新的元件結構，以量子井紅外線偵測器而言，其暗電流發生的機制主要是基態電子之穿隧電流(Sequential resonance tunneling current)及電極-電極間的熱游子放射電流(Thermionic emission current)[3]。相較於此，由於 InAs/GaAs 量子點紅外線偵測器結構中之能障遠較量子井紅外線偵測器為低，因此此元件之費米級(Fermi level)往往遠高於基態能階，甚至會高於激發態能階，因此，其暗電流主要的成份為電極-電極間的熱游子放射電流。由於此部份電流基本上會隨著偏壓及溫度的增加而呈指數增加，因此，若要使得量子點紅外線偵測器能在更高的溫度操作，暗電流的抑制以及操

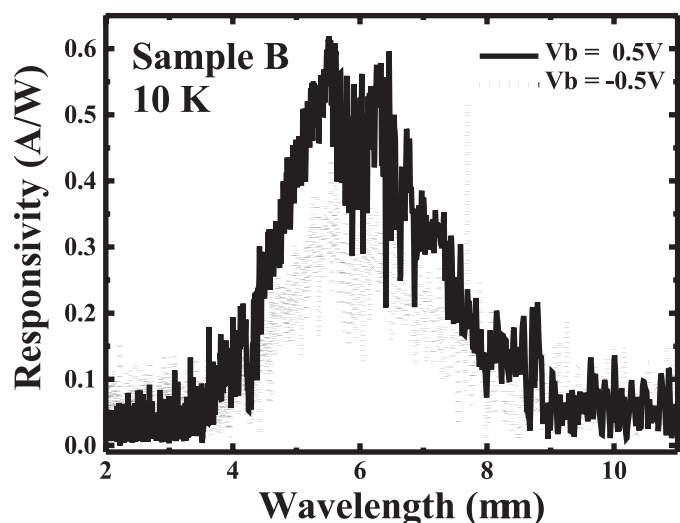


Fig. 1 The 10 K spectral responses of a 5-period QDIP at  $\pm 0.5$  V.

作偏壓的降低便需在同一結構內完成，因此我們提出一迥異於其他結構之 n-p-n 量子點紅外線偵測器結構，經由在 GaAs 能障層微量的 p-type 摻雜，我們成功的將僅有五層的量子點紅外線偵測器之暗電流抑制下來而量測到此元件之頻譜響應如 Fig. 1 所示，同時我們亦將操作偏壓降至 <1V，相較於常見的 n-i-n 結構所需動輒四五十層的量子點結構，五層之量子點紅外線偵測器不但是一新穎結構，同時對此元件之高溫操作特性亦有另一個層面的思考。在我們最新的結果中已藉由具有不對稱結構之五層量子點紅外線偵測器，成功的使得此元件在 10-100 K 的操作溫度間之偵測度不隨溫度改變。我們已將相關的研究成果投稿至國際期刊，而此結構的提出相信對高溫量子點紅外線偵測器的研究具有非常正面的幫助[4]。

而在量子點紅外線偵測器陣列的製作上，我們透過與中山科學院的合作，製作出世界第一顆以分子束磊晶技術製作且能操作在 135 K 的高溫下之 256X256 量子點紅外線偵測器陣列，並成功的顯像[5]。此元件最重要的特性是此元件並無額外的光柵導光機制，相較於其他各國的量子點紅外線偵測器陣列(InP-based QDIP, dot-in-well infrared photodetector)，我們在具有高應力之 InAs/GaAs 量子點結構中，成功的克服晶片均勻度、操作偏壓、光柵結構的製作及暗電流的限制，製作出之可操作在 135 K 之量子點紅外線偵測器陣列更具有技術實用化的意義如 Fig. 2 所示。而此偵測器陣列的成功，除了歸因於我們在分子束磊晶技術方面的努力外，在元件結構方面的努力對於此偵測器陣列的成功更有直接的影響。我們最新的成果中，已將量子點紅外線偵測器陣列由中波段(3-5  $\mu\text{m}$ )推廣至雙波段(3-5 and 8-12  $\mu\text{m}$ )，現正收集資料準備投稿中，相信在團隊共同的努力下，預計在可見的未來，單一元件雙波段、高溫操作之量子點紅外線偵測器陣列便可進入實用的階段。



Fig. 2 MWIR thermal images of the 256x256 QDIP FPA.

## 結論

在我們的研究成果中顯示，相較於傳統的量子井紅外線偵測器，量子點紅外線偵測器在包括正面入射吸收以及高溫操作的特性上確有較佳的表現，然而我們同時亦發現除了其固有的特性之外，元件結構對於量子點紅外線偵測器的特性表現亦有極大的影響。由於量子點結構較難以理論模擬，因此若能建立適當的元件模型來解釋其電子穿隧之特性，相信對此元件特性之瞭解及最佳化應有極大之幫助。

此外經由我們在單一元件上的研究成果，我們亦成功的透過與中山科學院的合作製作出全世界第一顆以分子束磊晶技術製作之無光柵之 256X256 量子點紅外線偵測器陣列(Gratingless 256X256 Quantum-Dot Infrared Focal-Plane Array)，此成果對於量子點紅外線偵測器之實用化具有舉足輕重的地位。

## 參考文獻

- [1] Shih-Yen Lin, Yau-Ren Tsai and Si-Chen Lee, "The Comparison of InAs/GaAs Quantum Dot Infrared photodetector and GaAs/(AlGa)As Superlattice Infrared Photodetector", Jpn. J. Appl. Phys. 40, L 1290 (2001).
- [2] Shu-Ting Chou, Meng-Chyi Wu, Shih-Yen Lin and Jim-Yong Chi, "Influence of Doping Density on the Normal Incident Absorption of Quantum-Dot Infrared Photodetectors", Appl. Phys. Lett. 88, 173511 (2006).

- [3] Shu-Ting Chou, Cheng-Hsuan Tsai, Meng-Chyi Wu, Shih-Yen Lin and Jim-Yong Chi, "Quantum-Dot Infrared Photodetectors with P-Type Doped GaAs Barrier Layers", IEEE Photonics Technology Lett. 17, 2409 (2005).
- [4] Shu-Ting Chou, Shang-Fu Chen, Shih-Yen Lin, Meng-Chyi Wu and Jing-Mei Wang, acception for publication at Journal of Crystal Growth
- [5] Shiang-Feng Tang, Cheng-Der Chiang, Ping-Kuo Weng, Yau-Tang Gau, Jihnn-Jye Ruo, San-Te Yang, Chih-Chang Shih, Shih-Yen Lin and Si-Chen Lee, "High-Temperature Operation Normal Incident 256 X 256 InAs/GaAs Quantum Dot Infrared Photodetector Focal Plane Array", IEEE Photonics Technology Lett. 18, 986 (2006).