

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

砷銻化鎵第二型量子元件技術(I)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2215-E-002-024-

執行期間：92年08月01日至93年10月31日

執行單位：國立臺灣大學電子工程學研究所

計畫主持人：林浩雄

計畫參與人員：劉珀瑋 廖剛華 張福裕 蔡宗霖 林健銘

報告類型：精簡報告

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 93 年 12 月 20 日

砷銻化鎵第二型量子元件技術

GaAsSb type-II Quantum Devices

計畫編號: NSC- 92-2215-E-002-024

執行期限: 92/08/01~93/07/31

主持人: 林浩雄 台灣大學電子工程學研究所教授

中文摘要

本研究係以固態源分子束磊晶法在砷化鎵基板上成長銻砷化鎵/砷化鎵第二型量子井以及雷射二極體，並探討其溫度特性。在單量子井雷射的研製中，獲取的室溫振盪波達 1290nm，起振電流密度也僅有 300 A/cm²，具有光纖通信應用的潛力。此外，我們也對雷射進行溫度特性分析，並藉著量測起振前自發性發光強度對注入電流的關係以獲取起振電流的成份特性。雷射特徵溫度在 50~60K，而歐傑復合在高溫時 GaAsSb/GaAs 雷射的溫度特性有相當大的影響。

關鍵詞：分子束磊晶，含銻化合物半導體，銻砷化鎵量子井，特徵溫度。

Abstract

We report the grown and fabrication of GaAsSb/GaAs type-II quantum wells (QWs) and lasers. The photoluminescence emission wavelength of the type-II quantum well reaches 1300nm with a FWHM of 80 meV. On the results of the type II GaAsSb/GaAs single quantum-well laser diode, an emission wavelength of 1290nm and a low threshold current density of 300A/cm² are demonstrated at room temperature. The thermal properties of the type-II lasers were also investigated. The characteristic temperature of the lasers is within 50 ~ 60K. By measuring the relation between the spontaneous emission intensity and injection current of the lasers, we obtained the dominant mechanisms in the threshold

current. It is found that the Auger recombination dominates the characteristic temperature at high operation temperature.

Keywords: molecular beam epitaxy, Sb-based compound semiconductor, GaAsSb quantum well, characteristic temperature.

緣由與目的

在未來 1.3 μm 波長的光纖傳輸光源上，砷化鎵長波長雷射逐漸受到重視，除了可利用砷化鎵目前已成熟的製程技術及其較低廉的成本外，在砷化鎵基板可直接成長具有良好的晶格匹配和較高的折射率的砷化鎵-鋁砷化鎵 (GaAs-AlGaAs) 布拉格反射器，以克服傳統磷化銦 (InP) 基板由於其較小的折射率差，造成了布拉格反射器製作上的困難。隨著磊晶技術的長足進步，成長於砷化鎵基板上的主動層材料相繼有明顯的突破。如氮砷化鎵銦 (InGaAsN) 量子井 [1]，砷化銦/砷化鎵 (InAs/InGaAs) 量子點 (quantum dots) [2] 及銻砷化鎵/砷化鎵 (GaAsSb/GaAs) 量子井 [3-5] 的主動層結構皆具有將雷射放光推向 1.3 μm 波段的潛力。其中銻砷化鎵/砷化鎵 (GaAsSb/GaAs) 量子井結構為第二型異質接面，其正負載子分別侷限在異質接面的不同材料中，所以載子復合放光的機制由同一位能井區 (well region) 內載子復合轉變為由位障區 (barrier region) 電子與位能井區電洞的復合，也就是所謂的介面放光效應 (interface transition)。這種放光機制的躍遷能量可以低於量子井層與位障層材料的基本能隙，

所以適合於長波長雷射的應用。在這種第二型量子井的內部，除了前述介面放光機制之外，位障層與量子井之間也會出現空間電場。這些現象都與傳統的第一型量子井雷射不同，對於雷射特性的影響都是值得研究的主題。在本計畫中，我們已經成功將單量子井雷射的室溫振盪波長推達 1290 nm[6]，起振電流密度也減少至 300 A/cm² 以下。我們同時也研究雷射二極體的特徵溫度。藉著量測自發性輻射強度與注入電流的關係，得以瞭解雷射在各個溫度下，起振電流的成份，以及限制特徵溫度的主要機制。

實驗結構之成長

單量子井雷射樣品是以 VG V80MKII 固態源分子束磊晶機成長於 (100) 指向的 n⁺-GaAs 基板上。使用的銻元素由 EPI model 175 K-cell 所提供，使用單原子銻 (Sb monomer) [8]，裂解區溫度為 1050 °C，bulk 區溫度為 430 °C。砷元素則由 150 c.c. K-cell 所提供，使用四原子砷 (As tetramer)，裂解區溫度為 500 °C，成長溫度為 580 °C。對於單量子井雷射樣品磊晶結構的成長，首先在 n⁺-GaAs 基板上成長摻雜 (doped) 為 2×10¹⁸ /cm³ 的 n⁺-GaAs 緩衝層 (buffer layer) 0.5 μm，為了使晶格匹配 (lattice match) 接著成長 AlGaAs 漸變層 (graded layer)，再成長兩層 n⁺-Al_{0.6}Ga_{0.4}As 的夾層 (cladding layer)。厚度與摻雜分別為 1.1 μm、2×10¹⁸ /cm³，0.4 μm 4×10¹⁷ /cm³。接著成長 AlGaAs 波導層 Al_xGa_{1-x}As (x=0.5~0.1) (GRIN Step Confinement Waveguide)。接著成長單週期的 GaAs_{0.64}Sb_{0.36}/GaAs 單量子井當作主動層。而在 p⁺-Al_{0.6}Ga_{0.4}As 的夾層成長上，厚度與摻雜皆與 n⁺ 的條件相同。最後表面成長 0.05 μm p⁺ GaAs 接觸層 (contact layer)，摻雜為 1.5×10¹⁹ /cm³。而在雙量子井雷射的磊晶結構上，我們首先在 n⁺-GaAs 基板上成長摻雜 (doped) 為 2×10¹⁸ /cm³ 的 n⁺-GaAs 緩衝層 (buffer layer) 0.5 μm，接著成長兩層 n⁺-Al_{0.6}Ga_{0.4}As 的夾層 (cladding layer)。厚度與摻雜分別為 1.1 μm、2×10¹⁸ /cm³，

0.4 μm、4×10¹⁷ /cm³。在成長主動層前，我們先成長一層無摻雜 (undoped) 的 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 100 nm，由於氟化氫 (HF) 溶液對鋁成分較低的 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 蝕刻速率極慢，故以此層作為濕式蝕刻的停止層 (etching stop)，有助於雷射元件之製作。接著成長兩週期的 GaAs_{0.66}Sb_{0.34}/GaAs 多重量子井當作主動層。而在 p⁺-Al_{0.6}Ga_{0.4}As 的夾層成長上，厚度與摻雜濃度皆與 n⁺-GaAs 相同。最後表面成長 0.05 μm p⁺-GaAs 接觸層 (contact layer)，摻雜濃度為 1.5×10¹⁹ /cm³。

結果與討論

圖一為雙量子井雷射 (R1974) 和單量子井雷射 (R2244) 的光功率對電流關係圖。R1974 和 R2244 的起振電流密度和發光波長分別 210 A/cm²、302 A/cm²；1284 nm、1292 nm。因為 R2244 為單量子井結構，其 GaAsSb 可以忍受較大的應變，因此使用較大的 Sb 成份，將波長推進到 1290 nm。然而其型態增益 (modal gain, G) 較小。故所需之起振電流密度較大才能使型態增益克服總損失 (total loss)。在第二型量子井中由於電子與電洞在空間分離，分別存於 GaAs 位障層與 GaAsSb 量子井層中。這樣的分離會造成空間電荷電場，使能帶發生彎曲。當載子的數目增加時，電場會增大，進而使電子的能階提升，造成藍位移的現象。以下我們用三角位能井來近似電子電荷在 GaAs 層所造成的空間電荷電場，並估計對其電子能階的影響。我們知道在三角位井中電場強度和載子濃度成正比[9]。假設起振前電子的主要成份是自發性放射，即電流與載子濃度的平方成正比。可推知電場與注入電流的平方成正比。而在三角位能井中，基態 (ground state) 能量與電場的 2/3 次方成正比[9]，故基態能量與注入電流密度的 1/3 次方成正比。圖二即為雷射發光能量對注入電流密度的 1/3 次方的關係圖。明顯可以看出在電流密度增加的時候，會出現藍位移的現象。而兩者的關係符合 1/3 次方的關係。在電流密度為零時，

R1974的基態能量為0.93 eV。R2244基態能量約在0.91 eV。此能量被視為是沒有能帶彎曲效應影響下的平帶 (flat band) 放光能量。從擬合得知R2244的平帶放光能量比R1974低，這是由於R2244的Sb的含量較高所致。而隨著電流增加，R2244三角位井基態能量增加較快，我們認為是因在相同的電流密度下，單一量子井所分配到的載子密度較大，所以產生較大的能帶彎曲所致。圖三、圖四為R1974、R2244的不同共振腔的 T_0 擬合圖。可得R1974和R2244的 T_0 分別約為60K及46K。R1974的 T_0 比R2244的 T_0 高且兩者都有隨著共振腔長度變短而有下降的趨勢。因為起振電流密度越高，歐傑復合會增加，而歐傑為主導 T_0 的關鍵，所以短共振腔長度的雷射，其 T_0 較低。而R1974的 T_0 較R2244高也是同理。測量起振前變溫的自發性發光 (Spontaneous emission) 可得R1974、R2244的起振電流密度的特徵溫度分別為58 K、54 K，其值和歐傑復合主導的 T_0 為31 K、32 K較接近。而不是放射性復合的148 K、250 K。得知GaAsSb/GaAs雷射強烈的溫度敏感特性是來自於非放射性復合機制，而歐傑復合為主要機制之一。第二型量子井雷射在室溫下的起振電流密度很低，是因為第二型量子井雷射在室溫下由放射性復合所主導。然而溫度特性和傳統短波長砷化鎵雷射相比卻不理想，目前在文獻上室溫附近 (15°C ~ 75 °C) 只有73 K。因此我們在不同的溫度下，藉著測量雷射在起振前的自發性發光 (spontaneous emission) 與注入電流的關係來分析雷射電流的成份。由於自發性放光強度與主動層載子濃度的二次方成正比。分析注入電流與放光強度的次方關係，可以得知注入電流 I 與載子濃度 n 的次方關係： $I \propto n^Z$ 。若電流 I 的機制為缺陷復合電流時， $Z=1$ ；為放射性復合電流時， $Z=2$ ；而為歐傑電流時， $Z=3$ 。我們可由 Z 值來判斷主導電流的機制。圖五是GaAsSb/GaAs雷射的 Z_{th} 值 (Z_{th} 為起振前的 Z 值)對溫度的關係圖[10][11]。R2244的 Z_{th} 值在室溫和高溫下都比R1974高，其歐傑所主導的比例也較高。圖中同時也展示

InGaAs/InP[10]和InGaAsN[12]的 Z_{th} 值隨溫度變化圖。在室溫下，InGaAs/InP是由歐傑復合所主導；而GaAsSb/GaAs則和InGaAsN類似，為放射性復合所主導。隨著溫度增加歐傑復合主導比重增加。接著分析歐傑復合在起振電流中所占之電流比例，以DQW之R1974為例，圖六為放射性復合、歐傑復合的比例乘上起振電流密度的溫度關係圖。如圖所示，在室溫下主要由放射性復合主導起振電流密度，而在高溫下則由歐傑復合主導起振電流密度。意即放射性復合電流密度為溫度的弱函數；當溫度增加時，需要提高的電流密度去使得雷射達到足夠的增益而起振發光，而歐傑復合主導的電流在所有的注入電流佔了很大的比例。

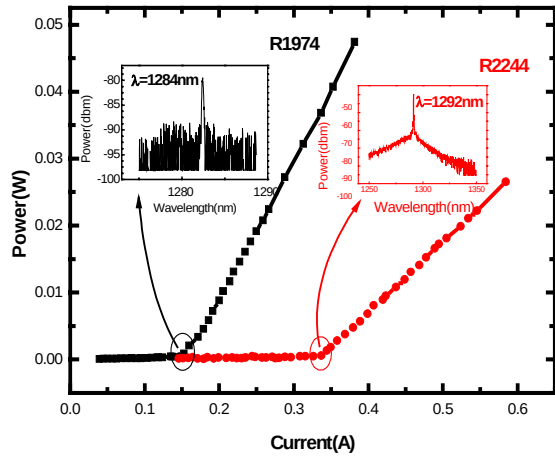
結論

我們在砷化鎵基板上分別成長雙量子井與單量子井雷射結構，並且得到1292nm的發光波長與300A/cm²的最低起振電流密度。並藉由測量起振前變溫的自發性發光功率，得知GaAsSb/GaAs在室溫時其載子復合機制以放射性復合為主，但到高溫時變成以歐傑復合為主，第二型量子井中較高的載子濃度可能是高溫時歐傑復合速率增加的原因。

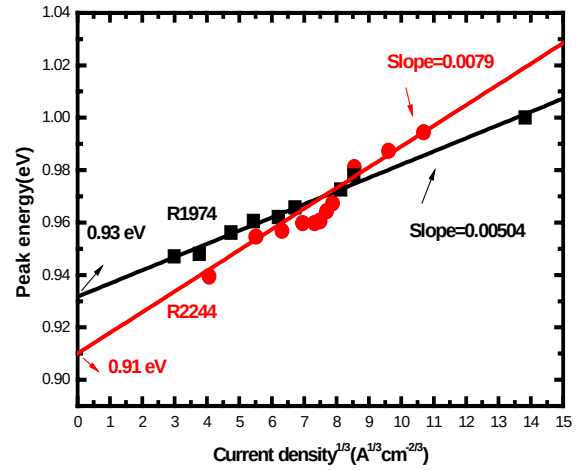
參考文獻

1. T. Takeuchi, Y.-L. Chang, M. H. Leary, D. E. Mars, A. Tandon, C.-K. Lin, R. Twist, S. Belov, D. P. Bour, M. R. T. Tan, Y.-K. Song, L. Mantese and H.-C. Luan, Proceedings of 16th LEOS annual meeting, 35, (2003).
2. N. Ledentsov, Proceedings of 2002 IEDMS, 2, (2002).
3. S. W. Ryu and P. D. Dapkus, IEE Electron. Lett. **36**, 1387, (2000).
4. K. Nishi, T. Anan, M. Yamada, K. Kurihara, K. Tokutome, A. Kamei, and S. Sugou, 2001 Digest of the LEOS Summer Tropical Meetings, 15, (2001).
5. M. Yamada, T. Anan, K. Kurihara, K. Nishi, K. Tokutome, A. Kamei, and S. Sugou, Proceedings

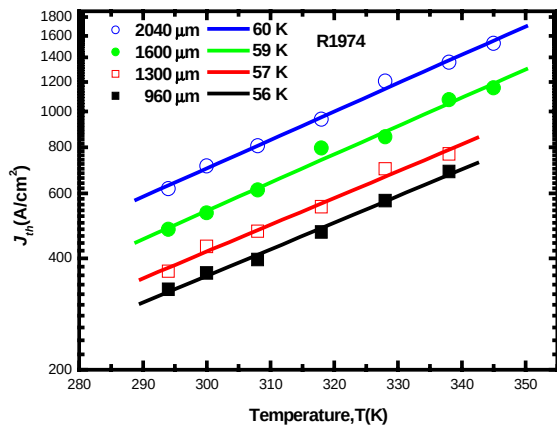
- of 14th LEOS annual meeting, 598, (2001).
6. P. W. Liu, M. H. Lee, H. H. Lin, and J. R. Chen, IEE Electron. Lett. **38**, 1354, (2002).
 7. O.Blum and J. F. Klem, IEEE Photonics Technol. Lett., 12, 771 (2000)
 8. S. Seki , H. Oohashi , H. Sugiura , T. Hirono , and K. Yokoyama , IEEE J. Quantum Electron., vol. 32, pp. 1478–1486, Aug. 1996.
 9. N. N. Ledentsov, J. Bohrer, M. Beer, F. Heinrichsdorff, M. Grundmann and D. Bimberg, Phys. Rev. B, 52, 14058 (1995)
 10. A.F. Phillips, S.J. Sweeney, A.R.Adams, and P.J.A.Thijs, IEEE Select. Topics Quantum Electron., vol. 5, pp. 401–412, May–June 1999.
 11. R. Febse, S. Tomic, A. R. Adams, S. J. Sweeney, E. P. O'Reilly, A. Andreev, and H. Riechert, IEEE J. of Select. Topics in Quantum Electronics, VOL .8, NO.4, 2002.
 12. K. Suzuki, R. A. Hogg and Y. Arakawa, J. Appy. Phys., 85, 8349, 1999.



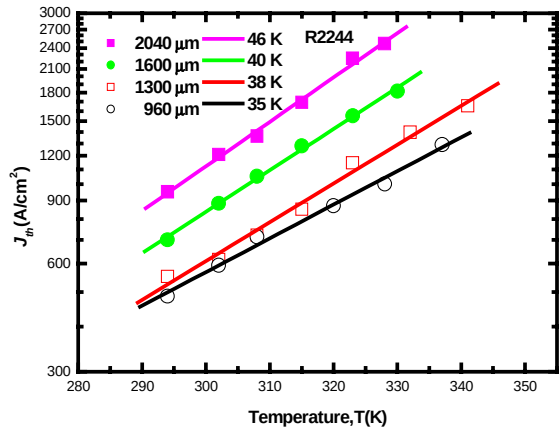
圖一 R1974(DQW)與R2244(SQW)光功率對注入電流關係圖，插圖為起振時的EL光譜。



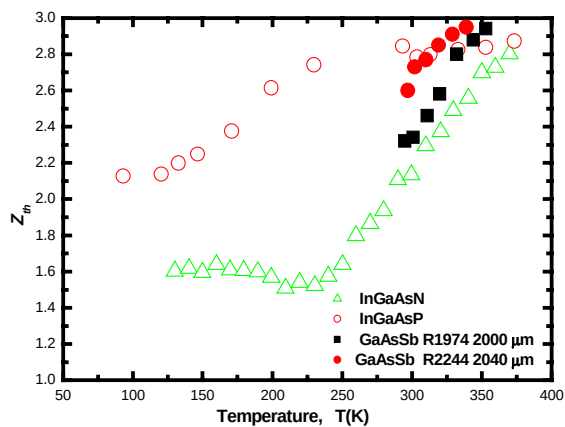
圖二 R1974(DQW)與R2244(SQW)基態能量對注入電流密度的1/3次方關係圖。



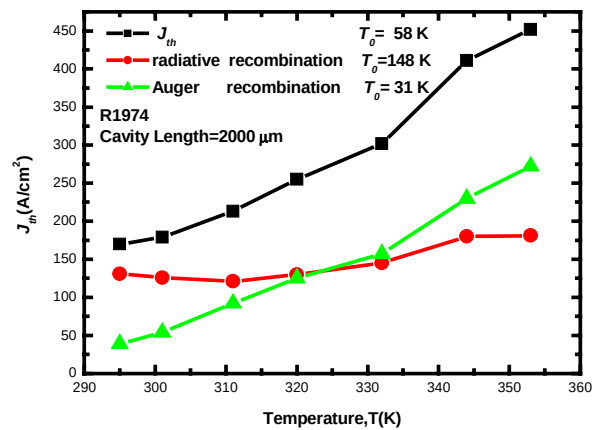
圖三 R1974 (DQW) 變溫自發性發光功率對電流關係圖



圖四 SQW(R2244) 變溫自發性發光功率對電流關係圖



圖五 GaAsSb/GaAs 雷射之 Z_{th} 對溫度的關係圖



圖六 DQW(R1974)放射性復合、歐傑復合的比例電流密度之溫度關係圖