

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

砷銻化銮中紅外線材料與元件(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2215-E-002-022-

執行期間：92年08月01日至93年07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：劉珀璋、蔡濟印

報告類型：精簡報告

報告附件：國際合作計畫研究心得報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 6 月 1 日

砷銻化銾中紅外線材料與元件期中報告

計畫編號：NSC 92-2215-E-002-022

執行期限：92 年 08 月 01 日至 93 年 07 月 31 日

主持人：林浩雄 單位：台灣大學電子工程學研究所

計畫參與人員：劉珀璋、蔡濟印 單位：台灣大學電機工程學研究所

一、中文摘要

本計畫的目標在於研究 InAsSb/InAs 第二型量子井的分子磊晶成長並應用此結構製作波長 3-5 μm 之中紅外線發光二極體、雷射。我們成功地成長出 InAsSb/InAs 量子井，獲得通量比與固態成份的關係與最佳基板溫度。樣本的低溫 PL 量測顯示量子井的波長範圍可由 3.5 μm 達 5 μm 。此外我們也成長出與 InAs 接近晶格匹配的 InPSb，此材料具有 0.64eV 的能隙將用作 InAsSb 雷射元件的波導夾層。

關鍵詞：砷化銾、銻砷化銾、銻磷化銾、中遠紅外線光電元件。

Abstract:

The MBE growth of InAsSb/InAs type II quantum well (QW) and its applications on mid-infrared photonic devices have been studied. The growth conditions for InAsSb QW including the relation between the Sb/As BEP ratio and the solid composition as well as the optimized growth temperature were obtained. Low temperature PL on these QWs demonstrates a wavelength range covering 3.5 ~ 5 μm . Besides, the growth of InPSb, which will serve as the cladding layer for InAsSb laser device, is also studied. The best InPSb sample is near InAs lattice-matched and with only 65 arcsec XRD linewidth.

Keyword: InAs, InAsSb, InPSb, mid-infrared.

二、緣由與目的

在 III-V 族半導體材料系統中，砷銻化

銾(InAsSb)合金具有最低的能帶間隙，在室溫時， $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ 之能帶間隙為 $E_G = 0.35-0.75x+0.58x^2$ [1,2]。InAsSb 合金本身或與 InAs 構成 InAs/InAsSb 異質接面結構適合於中紅外線波段 3 μm 甚到到遠紅外線波段 10 μm 的波段範圍。InAs/InAsSb 具有第二型能帶排列之異質接面，這種排列具有更長波長的紅外線的潛力。InAsSb 的應用領域則包括了紅外線影像—軍方之夜視系統、紅外線遙測；氣體偵測—毒氣偵測或氣體成份分析還有大氣通信、醫療診斷、溫度偵測等[3,4]。在此波段範圍，除 InAsSb 系統之外，尚有 II-VI 族半導體 HgCdTe 材料系統及 Quantum Cascade 元件。與兩者相比，InAsSb 較 HgCdTe 穩定容易控制，同時元件結構也比 Quantum Cascade 元件簡單。由於 InAsSb 磊晶與製程技術已逐漸成熟具有競爭優勢，成為一個值得研究的主题。

本計畫以分子束磊晶法進行 InAsSb/InAs 量子井紅外線材料與光電元件之研究。除了量子井的成長與光學特性研究之外，並將製作波長在 3-5 μm 的中紅外線發光二極體與半導體雷射。我們同時也研究用作雷射夾層之銻磷化銾(InPSb)波導夾層(cladding layer)的成長 [5,6]；在所有與砷化銾晶格匹配之無鋁三五族化合物中，InPSb 具有最大的能帶間隙與最小的折射係數，適合作為光電元件之載子侷限層與光波導材料；當 $\text{InP}_{1-x}\text{Sb}_x$ 之銻含量為 0.311 時可與砷化銾晶格相匹配，此時之能帶間隙約為

0.64eV，折射係數為 3.4 [7]。

三、研究方法

本實驗室以固態源分子束磊晶技術來成長銻砷化銦材料，所使用的機台為 VG-V80H 分子束磊晶機；銦(In)來源是以 K-cell 產生，砷(As)是由 As valved crack cell 經由裂解區裂解 As_4 分子成為 As_2 分子再與其他元素於基板上反應，銻(Sb)則是由 Sb cracking cell 產生，我們使用 1050°C 的裂解溫度，因此其分子應大都為單原子的 Sb 分子[8]。在 3-5 μ m 波長應用範圍中，我們選擇砷化銦作為成長之基板材料，因砷化銦之晶格常數(6.0583Å)較接近於我們所欲成長之銻砷化銦而可避免因晶格常數差異過大而造成缺陷。銻磷化銦波導夾層材料之成長所使用之磷(P)係以磷化氫(PH_3)氣相來源，利用壓力差控制氣體流量，再經過 1000°C 裂解產生 P_2 與其他元素於基板上合成銻磷化銦。

四、結果與討論

我們以分子束磊晶法成長一系列 InAsSb 多重量子井結構樣品，表一為其成長條件與結果的摘要。圖一是 InAsSb 樣品 As_2 與 Sb 之分子束等效通量(BEP)比對之 Sb 固體成份圖。由圖中可知，除了 As_2 與 Sb 之通量比會對 $InAs_{1-x}Sb_x$ 中之 Sb 成份造成影響外，在相近之通量及通量比下，成長速度較快之樣品(C1514 及 C1547)會具有較高的 Sb 成份。其原因有可能源於銻化物成長時的表面堆積 (surface accumulation) 現象 [9]，即 Sb 在成長時會析出於表面累積，造成成份漸變的現象。對於較薄的量子井而言，成份漸變會影響到 XRD 量得的整體成份。當我們加快成長速度時，可能抑制表面堆積現象，使在同樣通量比下所成長之 InAsSb 其 Sb 成份較長晶速度慢者為

高。另外也有可能是銦通量的增加，提升了銻的嵌入。在圖一中，我們也把本實驗室所成長的 GaAsSb/GaAs 量子井的結果一併標出。可以明顯看出，在 GaAsSb 中，銻的嵌入遠比 InAsSb 效率要高。

其次我們研究 InAsSb/InAs 多重量子井結構成長時基板之溫度的效應，我們以 PL 放光強度來評估樣品的品質。樣品 C1464、C1466、C1467 之結構與 As_2/Sb 值均相同但分別於 450 °C、420 °C 與 480 °C 下成長。PL 量測結果如圖二所示。樣品放光波長約在 3.2~3.3 μ m 之間，由 DXRD 分析結果可知，樣品中之 Sb 成份約為 0.04，PL 結果中，其放光波長不一是因為基板溫度使 Sb 成份改變所致；基板溫度愈高，Sb 成份愈少。而由樣品放光強度比較，很明顯的，在 450 °C 所成長之樣品(C1464)的 PL 強度最強。因此，在接續的成長中，我們均選擇 450 °C 作為成長樣品之長晶溫度。圖三為不同銻成份之樣品低溫 PL 結果，利用通量比之控制所成長之 $InAs_{1-x}Sb_x$ 樣品放光波長可涵蓋 3-5 μ m 之範圍，銻含量較大之樣品(C1505, C1506)因晶格常數不匹配造成應變使晶體中之缺陷，使光學特性明顯變差。

我們選擇與砷化銦基板晶格匹配的銻磷化銦(InPSb)作為 InAsSb/InAs 雷射元件之高能隙電子位障層。此成份的 InPSb 能帶間隙約為 0.64eV，我們先於 GaAs 基板上成長不同成份之銻磷化銦塊材，其成長條件及成份示於表二。圖四是成長於 GaAs 樣品 DXRD 量測結果，隨著 Sb 成份的下降，磊晶層峰值往 GaAs 基板峰值移動。我們選出與 InAs 匹配的條件後，再以同樣條件下成長 InPSb 塊材於 InAs 基板上。圖五為成長銻磷化銦於砷化銻基板上樣品之 XRD 結果，樣品 C1533 之 InPSb 訊號極窄 (65 秒)，顯示 InPSb 晶體品質極佳，但 C1548

則出現兩個 InPSb 峰值，因此我們需再改變成長條件來求取 InPSb 特性之最佳化。

四、計畫成果自評

我們已經成功地以分子束磊晶法完成 InAsSb/InAs 多層量子井結構的成長。建立出 InAs_{1-x}Sb_x 長晶條件，包括通量比與固態成份的關係與最佳基板溫度。對於樣本我們進行了 PL 量測，低溫的 PL 波長範圍由 3.5μm 至 5μm。在元件製作上，目前我們也進行了 InAs/InAsSb PIN 發光二極體結構的製作，並正進行電性與光學特性量測初步的光譜量測顯示發光波長在 3.5μm，我們將在期末報告提出完整的結果。在雷射結構設計上，我們刻正進行 InPSb 波導夾層的成長研究，目前我們正在求取其最佳化之長晶條件；未來將研究其雜質摻雜 (doping) 的電性，並將之應用於 3.5μm~5μm 的雷射元件製作。

參考文獻

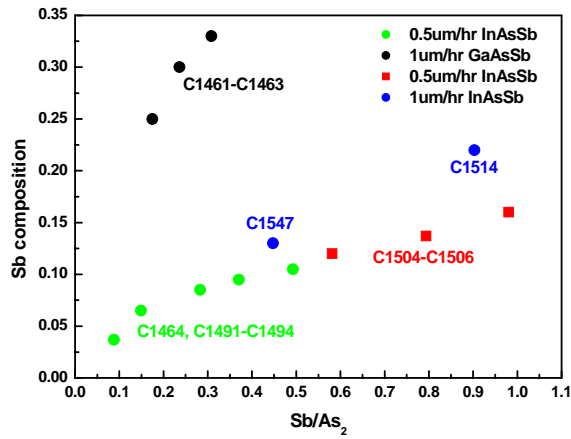
- [1] V. Swaminathan and A. T. Macrander, "Materials Aspects of GaAs and InP Based Structures", Prentice Hall, New Jersey (1991).
- [2] S. R. Kurtz, G. C. Osbourn, R. M. Biefeld and S. R. Lee, Appl. Phys. Lett. **53**, 216 (1988).
- [3] V. V. Sherstnev, A. M. Monahov, A. Krier, and G. Hill, Appl. Phys. Lett. **77**, 3908 (2000).
- [4] W. Dobbelaere, J. De Boeck, C. Bruynseraede, R. Mertens and G. Borghs, Electronics Letters **29**, 890 (1993).
- [5] A. Joullie et al., Appl. Phys. Lett. **76**, 2499 (2000).
- [6] A. Behres, D. Puttjer, and K. Heime, J. Cryst. Growth **195**, 373 (1998).
- [7] S. R. Kurtz, R. M. Biefeld, A. A. Allerman, A. J. Howard, M. H. Crawford, and M. W. Pelczynski, Appl. Phys. Lett. **68**, 1332 (1996).
- [8] Y. Rouillard, J. Cryst. Growth, 156, 30 (1995).
- [9] R. Kaspi and K. R. Evens, J. Cryst. Growth, 175/176, 838 (1997).

表一：InAsSb/InAs 多層量子井結構樣品長晶參數

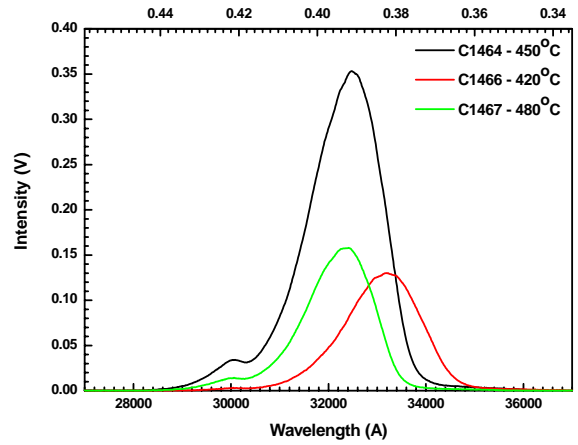
Sample #	T _g	Sb power	As ₂ /Sb	Sb composition	Growth rate
C1464	450°C	16%	11.40	0.037	0.5μm/hr
C1491	450°C	17%	6.71	0.065	0.5μm/hr
C1492	450°C	18.5%	2.70	0.095	0.5μm/hr
C1493	450°C	18%	3.54	0.085	0.5μm/hr
C1494	450°C	19%	2.03	0.105	0.5μm/hr
C1504	450°C	19%	1.72	0.12	0.5μm/hr
C1505	450°C	19%	1.02	0.16	0.5μm/hr
C1506	450°C	19%	1.26	0.137	0.5μm/hr
C1514	450°C	19%	1.10	0.22	1μm/hr
C1547	450°C	19%	2.23	0.13	1μm/hr

表二：InPSb 樣品長晶參數

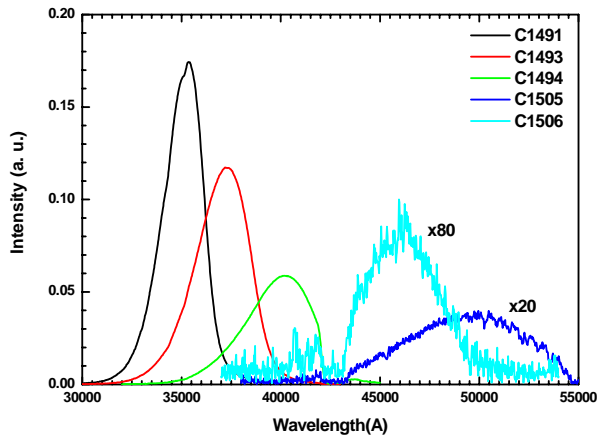
Sample #	Substrate	T _g	Sb power	Sb/In	PH ₃ (torr)	Sb composition
C1507A	n+ GaAs (100)	450°C	19%	2.75	500	0.58(full relax)
C1515	n+ GaAs (100)	450°C	19%	1.139	900	0.45
C1516	n+ GaAs (100)	450°C	18%	0.7735	900	0.25
C1517	n+ GaAs (100)	450°C	17%	n/a	900	0.2
C1533	n+ InAs (100)	450°C	17.6%	0.56	900	0.364
C1548	n+ InAs (100)	450°C	17.5%	0.53	900	-



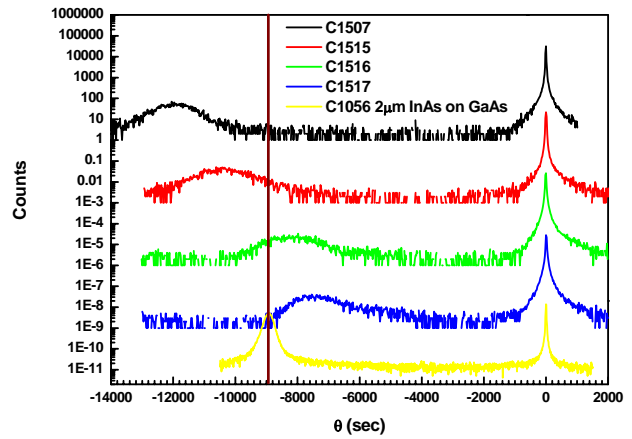
圖一：InAsSb/InAs 多層量子井結構 Sb/As₂ 通量比與 Sb 成份關係圖，在相同通量比下，較高之長晶速度所成長之 InAsSb 有較高的 Sb 成份。



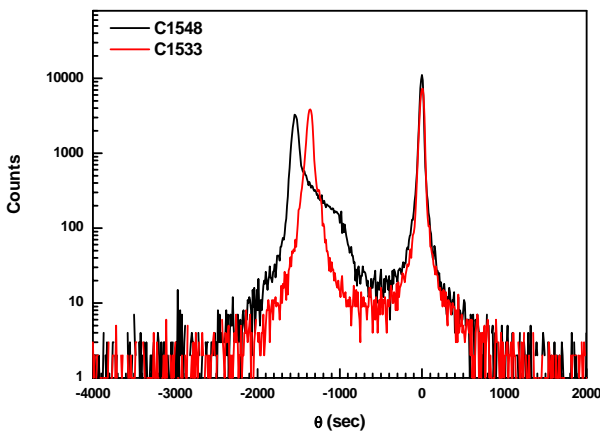
圖二：不同長晶溫度下 InAsSb/InAs 多層量子井樣品 PL 量測結果。450°C 成長之樣品放光強度最強。



圖三：不同銻成份之銻砷化銻/砷化銻量子井樣品低溫(10K)PL 結果。調整 Sb 之含量可使樣品放光波長涵蓋 3-5 μ m。



圖四：InPSb 樣品之 DXRD 結果。黃線為樣品 C1056 (2 μ m InAs 成長在砷化鎳基板上)，相同的峰值表示 InPSb 晶格匹配於砷化銻。



圖五：InPSb 成長於 InAs 基板之 DXRD 結果。C1533 InPSb 半寬為 65 秒，而 C1548 樣品似乎有 Sb phase separation 的現象。