



行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

藍光半導體雷射材料-Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe 超晶格之界面研究

計畫編號：NSC 87-2112-M-032-012

執行期限：86年12月01日 ~ 87年7月31日

主持任：鄭振益 淡江大學物理系

一、中文摘要

II-VI 族半導體超晶格因相鄰層膜間之格子係數的差異較大，因此處於兩積層膜間之格子會被旁邊不同材料之格子的影響而造成扭曲，而且在不同材質積層間形成凹凸之島狀界面。積層間凹凸之界面以及 Cd 濃度之不均勻將可形成一激子的局在化能帶。當半導體材料被電流，熱，或光激發後，電子由價電帶激發到導電帶上而在價電帶形成電洞。然後電子及電洞因相互間之庫倫吸引力而形成激子。激子於形成後迅速掉到此局在化能帶中而形成局在化激子，而只能作局部性的位移。激子在局在化能帶中會再結合而產生一光子。當激子的濃度很高時，激子會在此局在化能帶中形成激子分子，或發生激子-激子碰撞而形成反轉分佈(低溫時)。本計畫為探討低溫時 Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe 超晶格積層間之局在化能帶寬度對半導體雷射機構之影響。

關鍵詞：藍光半導體雷射，超晶格，局在化激子，激子分子，激子-激子碰撞，電子-電洞電漿

Abstract

Due to the difference of the lattice constant in the II-VI semiconductor superlattice, the island will be constructed in the interface. Therefore, the fluctuation in the interface causes the energy fluctuation of the exciton energy in the superlattice. The fluctuation of the exciton energy in the interface is named localization energy. The exciton will localize in the localization area, and the movement of the exciton will be restricted in this area. Localized excitons will recombined in the localization area then emit a photon, or become bi-excitons, or the exciton-exciton scattering takes place when the density of excitons is high. This project study the influence for the localization energy to the laser mechanism in Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe Superlattices.

Keywords: Blue light semiconductor laser, superlattice, localized excitons, bi-excitons, exciton-exciton scattering, electron-hole plasma.

二、緣由與目的

半導體雷射因為體積小，耗電量低，以及可大量製造；所以被廣泛地應用於雷射印表機，CD-ROM，影碟機... 而目前市面上所使用的半導體雷射都是屬於長波長的紅色光半導體雷射。藍色光的半導體雷射首先於1991年為美國的3M公司所發現。¹⁾ 3M公司使用II-VI族的ZnSe系單一量子井，在液態氮溫度下成功地產生了藍色光的雷射脈衝。從此以後，許多研究者即投入II-VI族藍光半導體雷射材料的研究工作。經過幾年的努力，II-VI族藍光半導體雷射已經由液態氮之低溫提高到可在室溫下產生；而且由脈衝式雷射進步到連續性雷射現象。而目前所發表的報告中，以日本新力公司(SONY)所提者最為成功：在室溫下可連續產生數百小時的雷射現象。一般相信只要雷射現象可維持在10000小時以上，則藍色光半導體雷射的商品化將是指日可待。

藍色光由於其波長較紅色光短，因此可聚成更小的光點。如果應用在CD-ROM時則可以使資訊的儲存量提高數倍，而且可提高數據的傳輸速度。當資訊儲存量增加時可以在影像處理上得到全畫面(Full Screen)，高解析度的效果；以及可以儲存長時間的影片。而數據傳輸速度的增加除可提高畫質的穩定外，亦可提高電腦的效率。此外；由藍，綠，紅等三種半導體雷射光源的組合，將可合成任何種顏色的光；而可取代高壓電式的映像管。當三種雷射光組合成白色光時，則可作為照明的光源。

本半年計畫以組裝光激發發光(photoluminescence)，誘導發光(stimulated emission)，光激發分光(photoexcitation spectroscopy)及光激發反射(photoreflectance)等系統為主。然後再對一組 $Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe$ 超晶格作以上各項實驗，並分析比較各實驗之數據；以探討II-VI族半導體ZnSe系列超晶格之各積層間的界面對半導體雷射機構之影響。此次申請之儀器費祇夠購買一單色分光儀，此外另以學校補助之經費購買一低溫恒溫系統；其餘之儀器(雷射，光偵測器，光學桌...等)則向其他教授借用。目前已建立光激發發光及光激發反射等系統，而誘導發光以及光激發分光等實驗則借用唐建堯教授的MOPO系統實驗。

本計畫為對已由日本仙台東北大學提供之II-VI族半導體 $Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe$ 超晶格樣品作積層膜間界面對半導體雷射機構之影響的研究。樣品為Cd濃度30%($x=0.3$)之 $Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe$ 40週期之超晶格，障壁固定為20Å而量子井則由10Å變化到144Å。光激發發光之光源為使用氬鎘雷射光，而誘導發光則借用唐教授的氬雷射的二次諧調光作激發光源。所有實驗皆使用密閉循環式低溫系統來作溫度的控制。

三、結果與討論

在10 K時，量子井由10Å變化到144Å之 $Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe$ 超晶格的光激發發

光光譜顯示在下面的圖 1 中(此處祇顯示部分數據)。圖中顯示出局限(confinement)在多層量子井中的部分局在化(partial localization)激子的能量隨著量子井寬度的變窄而增大。²⁾ 由此而證明了人工製作的半導體量子井對激子形成了局限效果。而以 Kronig-penney 模型來計算各量子井寬度所對應的激子能量亦與發光帶之能量吻合。由此亦可證明各樣品之量子井寬度之正確。此外，當量子井寬度增大時發光帶之半高寬亦隨著變寬；此乃當在多層膜介面有一個原子層之不均勻(fluctuation)時，對於量子井寬度較窄之樣品內的激子能量所造成的影響比寬量子井者大的緣故。所以當一個原子層的厚度為 5Å 時，對於一量子井寬度為 10Å 的樣品為例其量子井寬度將變化為 5Å 和 15Å。而量子井寬度為 5Å 和 15Å 內之激子能量的差異使得其發光帶變成兩個。在 $Zn_{1-x}Cd_xSe/ZnSe$ 多層量子井的場合，當量子井寬度較寬時 Cd 濃度之不均將影響帶寬較巨。當量子井寬度較窄時則在介面形成的寬度不均勻性將會影響帶寬較巨。

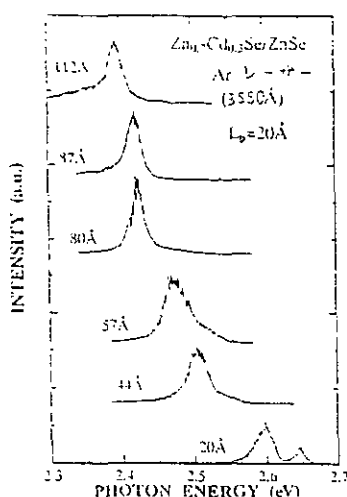


圖 1

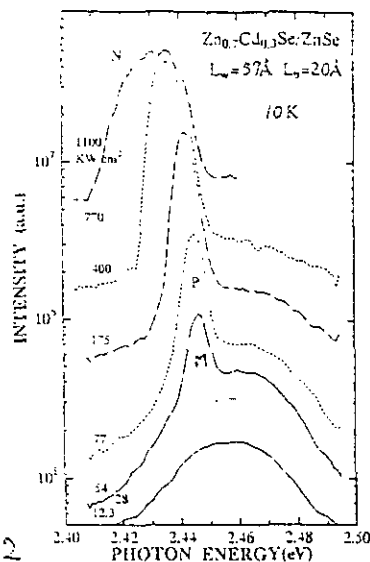


圖 2

上面圖 2 內顯示出在 10 K 時， $L_w = 57\text{Å}$ $L_b = 20\text{Å}$ 之樣品在不同激發強度所產生誘導發光的發光光譜。在激發強度較低時；半高寬(FWHM)較寬的誘導發光的發光帶，乃是由局限在多層量子井中的部分局在化激子之電子電洞的再結合所發出的自然發光所貢獻。當激發強度提高時，在自然發光帶的低能量處出現了一個新的發光帶(M 帶)。³⁾ M 帶的半高寬比自然發光帶窄小，其發光強度隨激發強度之增大而呈非線性增加；因此，我們認為此 M 帶為以激子分子所造成的誘導發光。我們認為此時之發光為由激子分子分解成一個激子和一個光子所造成。因此我們稱 M 帶與自然發光之能量差為激子分子的結合能。當激發強度再增加時，此誘導發光帶能量則開始向低能量處位移；而且其發光強度也隨激發強度之增大而呈非線性增加。我們稱此時之發光帶(P 帶)系由激子-激子散射所造成之誘導發光。⁴⁾ 當激發強度再繼續增加，使得激子密度超過 mott 密度時，則發光帶的能量不但繼續向低能量處位移；而且其發光帶的半高寬逐漸變寬。可是其發光強度卻變成隨與激發強度呈線性關係。我們稱此時的發光為由電子-電洞電漿的再結合所產生的自然發光。⁵⁾

當激發強度較小時，材料內部的激子密度較小；此時的發光以激子的電子-電

洞結合所造成的自然發光為主。當激發強度較強時；因材料內部的激子密度提高，而使得激子間的距離減少而形成激子分子。此時的發光帶因此為由激子分子分解成一個激子和一個光子所造成。當激發強度再增強時，激子的密度因再次提高而使得激子間的距離非常接近；此時因電子-電子與電洞-電洞間的斥力加大，而使得激子間產生排斥性的散亂並使得分子不易形成。所以，此時的發光以激子-激子散射所造成之誘導發光為主。當激發強度再繼續增強時，激子的密度因已非常高；而使得激子間產生了屏壁作用(screen effect)。電子-電子與電洞-電洞間的斥力大於激子的束縛能時，激子便解離成電子-電洞對。而此時之激子密度因已非常高，所以解離成高濃度的電子-電洞對而形成電子-電洞電漿。而這時的發光便由電子-電洞電漿的再結合所產生的自然發光所形成。

四、結論

一般認為在室溫時，ZnSe系量子井的誘導發光乃是由電子-電洞電漿所主導。在本報告中，我們在最高激發強度時曾觀測到電子-電洞電漿的再結合所產生的自然發光。我們預測在更高的激發強度時，應可觀測到由電子-電洞電漿所產生的誘導發光(在塊材時即有此情形)。但因顧慮到對材料的破壞，我們未曾使用更強的激發強度。由本研究可知，如果能使室溫時的誘導發光為由激子-激子散射所主導，則所須的電流將會小很多。如此將使ZnSe系的藍光半導體雷射早日商品化。

由本實驗亦可知在激子-激子散射所主導的誘導發光中，我們推想此時之誘導發光帶(P帶)的低能量位移量應與量子井內的局限能量(localization energy)有關。而調查其關係即為本計畫之目的。在本半年計畫中，我們祇觀查到不同樣品中P帶的低能量位移量。在下半年度(88)的接續計畫中，我們將調查各樣品中的局限能量大小。然後，再比較各樣品中P帶的低能量位移量與局限能量的關係，我們預期可瞭解其間的關係。由此，我們將可降低在激子-激子散射所主導的誘導發光中之激發閾值。如此，將可降低產生雷射所須的電流。

瞭解半導體超晶格中積層間的界面對半導體雷射機構之影響，將有助於半導體超晶格半導體雷射構造的設計。而其實驗方法與III-V的氮化鎵(GaN)之研究方法一樣，亦可施行於氮化鎵超晶格半導體雷射材料的開發上。

五、參考資料

1. M. A. Hasse, J. Qiu, J. M. Depuydt and H. Cheng, Appl. Phys. Lett. **59**, 1272(1991).
2. F. Kreller, M. Lowisch, J. Puls and Henneberger, Phys. Rev. Lett. **75**, 2420(1995).
3. J.-Y. Jen; T. Tsutsumi; I. Souma and Y. Oka, Jpn. J. Appl. Phys. **32**, Suppl. **32-3**, 728 (1993).
4. J.-Y. Jen; T. Tsutsumi; I. Souma; Y. Oka and H. Fujiyasu, Jpn. J. Appl. Phys. **32**, L1542 (1993).
5. J.-Y. Jen; T. Tsutsumi; I. Souma; Y. Oka; J. R. Anderson and M. Gorska, Appl. Surf. Sci. **92**, 547 (1996).