

Cd_xZn_{1-x}S/ZnS/Mg_yZn_{1-y}S 分離閉じ込めヘテロ構造 における励起子分子の発光特性

石崎真也 (電気電子工学専攻) 村田晃 (電気電子工学科)
山田陽一 (電気電子工学科) 田口常正 (電気電子工学科)

Biexcitonic luminescence properties of Cd_xZn_{1-x}S/ZnS/Mg_yZn_{1-y}S Separate Confinement Heterostructures

Shinya ISHIZAKI (Department of Electrical and Electronic Engineering)
Akira MURATA (Department of Electrical and Electronic Engineering)
Yoichi YAMADA (Department of Electrical and Electronic Engineering)
Tsunemasa TAGUCHI (Department of Electrical and Electronic Engineering)

Luminescence properties of Cd_xZn_{1-x}S/ZnS/Mg_yZn_{1-y}S separate confinement heterostructures (SCH), Cd_xZn_{1-x}S/Mg_yZn_{1-y}S multiple quantum well (MQW) structures, and Cd_xZn_{1-x}S/ZnS MQW structures grown by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition have been studied by mean of temperature-dependent and time-resolved photoluminescence spectroscopy. Biexcitonic luminescence was clearly observed from these structures at 4K. In comparison with the thermal quenching of integrated luminescence intensity observed from Cd_xZn_{1-x}S/ZnS MQW structure, the thermal quenching observed from Cd_xZn_{1-x}S/ZnS/Mg_yZn_{1-y}S SCH structure was suppressed by approximately one order of magnitude. The suppression was attributed to the enhancement of carrier confinement effect by the insert of Mg_yZn_{1-y}S cladding layer.

Key Words : Cd_xZn_{1-x}S/ZnS/Mg_yZn_{1-y}S SCH, Cd_xZn_{1-x}S/Mg_yZn_{1-y}S MQW, Cd_xZn_{1-x}S/ZnS MQW, Biexciton, Exciton, Temperature-dependent PL, Time-resolved PL

1. はじめに

現在までに、ZnSe を中心とした II-VI 族及び GaN を中心とした III-V 族化合物半導体において、短波長半導体レーザの研究開発は盛んに行われている。ZnSe 系半導体レーザでは、発振波長が約 500 nm で室温連続発振寿命 400 時間が報告されている¹⁾。ところが近年 GaN 系半導体レーザは目覚ましい発展を遂げ、活性層に InGaN 混晶を用いた発振波長が約 400 nm の半導体レーザは、室温連続発振寿命が 10000 時間を超え実用化されている。

我々の研究材料である ZnS は、直接遷移型のバンド構造を有し、室温での禁制帯幅が 3.73 eV と大き

く、その波長領域が紫外領域に位置することから、紫外発光素子材料として有望である。同時に、ZnS は II-VI 族化合物半導体の中でも比較的大きな励起子及び励起子分子結合エネルギー (約 37 meV 及び約 8 meV) を本来的に有している。したがって、その発光特性において顕著な励起子効果を期待することができる半導体材料である。

半導体発光素子デバイスの高性能化を図る目的で、励起子系の輻射再結合過程を利用することは、励起子系の光学遷移過程が有する大きな振動子強度を考慮すると、発振しきい電流密度の低減化につながり、デバイスの室温安定動作及び長寿命化に、プラスの因子として働くものと期待されている^{2,3)}。

よって現在、ZnS をベースに作製された量子構造において様々な研究がなされている⁴⁾。我々はこれまでに、 $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}/\text{ZnS}$ 多重量子井戸構造 (Multiple quantum well : MQW)⁵⁾において 200 K 付近まで励起子分子による誘導放出を観測している⁶⁾。しかしながら、実際のデバイスへ応用するためには、室温における顕著な励起子及び励起子分子効果⁷⁾が必要不可欠である。

従って本報告では、 $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW 構造の量子井戸活性層への更なるキャリアの閉じ込めを目的として発光効率の増大を目指し、クラッド層に ZnS よりも大きいバンドギャップエネルギーを有する $\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ 混晶⁸⁾を挿入した $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}/\text{ZnS}/\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ 分離閉じ込めヘテロ構造 (Separate confinement heterostructures : SCH)と^{9,10)}、励起子分子の結合エネルギーの増大を目的として、障壁層に $\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ 混晶を挿入した $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}/\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ MQW 構造を作製し、それら試料の励起子系発光特性の評価を行った。

2. 実験

2.1 試料の成長

$\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}/\text{ZnS}/\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ SCH 構造及び $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}/\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ MQW 構造の作製は、減圧有機金属気相成長 (Metalorganic chemical vapor deposition : MOCVD)法により行った。成長基板には GaAs(100)面を用い、II 族原料としては、ヘリウムガス中にそれぞれ 1.1 %、0.13 %の濃度で希釈されたジメチル亜鉛、ジメチルカドミウム、及び 99.9999 %ピシクロペンタジエニルマグネシウムを、VI 族原料としては水素ガス中に 10.8 %の濃度で希釈された硫化水素を用いた。試料の作製は、GaAs 基板上に ZnS バッファ層を成長した後に、量子井戸層として $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ 混晶を、障壁層として ZnS 及び $\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ 混晶を、クラッド層として $\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ 混晶を用いて行った。

2.2 光学評価

作製された試料の光学評価は、フォトルミネッセンス (Photoluminescence : PL) における温度依存特性の測定及び、時間分解フォトルミネッセンス (Time-resolved photoluminescence : TRPL) 測定により行った。PL 測定の励起光源には、He-Cd レーザ (発振波長 325 nm) 及び Xe-Cl エキシマレーザ (発振波長 308 nm, パルス幅 2.5 ns, 繰り返し周波数 100 Hz) を用い、CCD を検出器とする分光器により測定を行った。また、半導体中のキャリアの寿命は

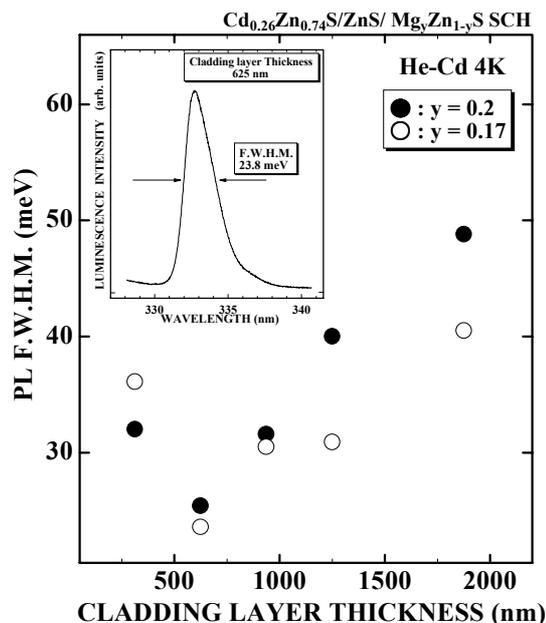


Figure 1. Cladding layer thickness dependence of PL F.W.H.M. at 4K taken from $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}/\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ SCHs. The inset shows PL spectrum at 4K taken from a $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}/\text{Mg}_{0.17}\text{Zn}_{0.83}\text{S}$ SCH.

ps (10^{-12} s) から ns (10^{-9} s) のオーダーであり、その再結合寿命を測定するには、この寿命よりも短いパルスレーザが必要である。そのため時間分解 PL 測定には、モードロックチタンサファイアレーザおよびその再生増幅されたフェムト秒光パルスの第 3 高調波 (発振波長 267 nm、パルス幅 200 fs (200×10^{-15} s)、繰り返し周波数 250 kHz) を用いた。発光ダイナミクスの測定には、シンクロスキャンストリークカメラを用いた。

3. 結果と考察

図 1 に、 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}/\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ SCH 構造の 4K における励起子発光半値幅のクラッド層膜厚依存性を示す。挿入図は、クラッド層の Mg 組成比及び膜厚がそれぞれ、 $y = 0.17$ 及び 625 nm の SCH 構造における励起子発光スペクトルである。各試料の構造は、量子井戸層の Cd 組成比が $x = 0.26$ であり、量子井戸層及び障壁層の膜厚が、それぞれ 1.4 nm 及び 8.1 nm 一定である多重量子井戸構造を、Mg 組成比が $y = 0.17$ 及び $y = 0.2$ である $\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ クラッド層で挟んだものとなっている。この図より、クラッド層の Mg 組成比が $y = 0.17$ 及び $y = 0.2$ のどちらの場合においても、クラッド層膜厚が 625 nm のときに励起子発光半値幅が最小値をとることがわか

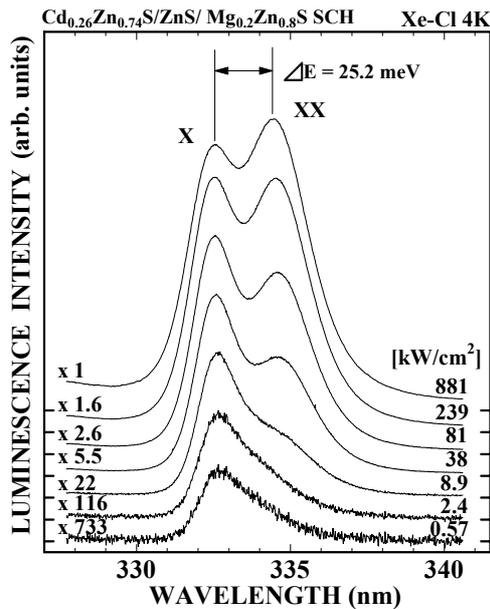


Figure 2. Excitation-power-density dependence of PL spectra at 4K taken from a $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}/\text{Mg}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{S}$ SCH.

る。特に、Mg 組成比が $y = 0.17$ 及び膜厚が 625 nm のクラッド層を有する SCH 構造の励起子発光半値幅は 23.8 meV であり、クラッド層を有していない $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW 構造の値 (22.5 meV) とほぼ同程度であった。量子井戸層の $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ 系混晶は、ワイドギャップ半導体の中でも非常に小さい励起子のボーア半径を有しているため、励起子の局在化が生じ、励起子線幅の不均一広がりが顕著に現れる (アロイブロードニング効果)¹¹⁾材料系である。Cd 組成比が $x = 0.26$ の $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}$ 混晶における、アロイブロードニング効果による励起子線幅の理論値は約 20 meV である¹²⁾。したがって、Mg 組成比 $y = 0.17$ 及びクラッド層膜厚が 625 nm の SCH 構造の発光半値幅は 23.8 meV であるので、その不均一広がりはアロイブロードニング効果によるものがほとんどであると考えられる。これらの結果より、クラッド層膜厚を最適化することで量子井戸界面の揺らぎが抑制された SCH 構造を作製できることがわかった。

クラッド層の膜厚が 625 nm 及び Mg 組成比が $y = 0.2$ である、 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}/\text{Mg}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{S}$ SCH 構造の 4K における PL スペクトルの励起パワー密度依存性を図 2 に示す。励起パワー密度の比較的低い 0.57 kW/cm^2 の場合、励起子発光 (X) が支配的であるが、励起パワー密度の増加に伴い、その低エネルギー側に、励起パワー密度の増加に対して非線形的に増大する励起子分子発光 (XX) が観測された。これまで

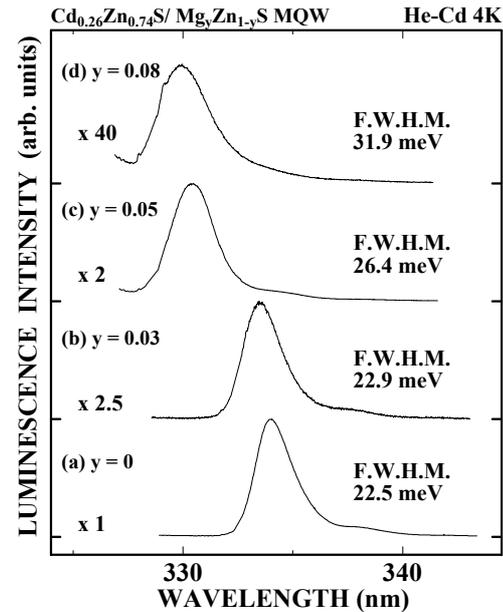


Figure 3. PL spectra at 4K taken from $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ MQWs with different Mg compositions of (a) $y = 0$, (b) $y = 0.03$, (c) $y = 0.05$, and (d) $y = 0.08$.

に我々は $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW 構造において、励起子分子結合エネルギーを求める際に目安となる値である励起子発光と励起子分子発光のエネルギー間隔 (ΔE) が約 27 meV という値を得ているが¹³⁾、その MQW 構造にクラッド層を挿入した SCH 構造における ΔE は 25.2 meV と MQW 構造の値と同程度であった。この結果より、この SCH 構造は $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW 構造と同程度に界面制御がなされた試料であると考えられる。

次に、励起子分子に対する閉じ込め効果の増大を図るために、障壁層に $\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ 混晶を挿入した $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}/\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ MQW 構造の 4K における励起子発光スペクトルを図 3 に示す。試料の構造は、量子井戸層の Cd 組成比が $x = 0.26$ 、障壁層の Mg 組成比がそれぞれ $y = 0, 0.03, 0.05, 0.08$ であり、井戸層及び障壁層の膜厚が、それぞれ 1.4 nm 及び 8.1 nm である。障壁層の Mg 組成比が増加するにつれて、発光強度の減少及び発光半値幅の増大が観測された。これは、障壁層の Mg 組成比が増加するにつれて、量子井戸界面の揺らぎが増大し、励起子の局在化の度合いが大きくなることなどが原因であると考えられる。また、Mg 組成比が増加するにつれて発光ピーク位置のブルーシフトが観測された。 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ MQW 構造において井戸層の $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}$ 混晶は圧縮歪みを受けているが、障壁層の Mg 組成比が増加していくと、井戸層の

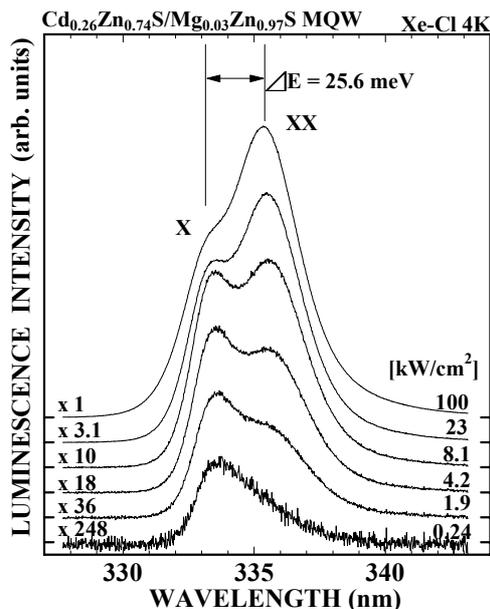


Figure 4. Excitation-power-density dependence of PL spectra at 4K taken from a $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{Mg}_{0.03}\text{Zn}_{0.97}\text{S}$ MQW.

$\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ 混晶と障壁層の $\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ 混晶の格子不整合は減少するので、その圧縮歪みは減少する。よって、歪みの効果を考慮すると Mg 組成比の増加により、発光ピーク位置はレッドシフトするはずである。しかしながら、今回作成した $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ MQW 構造ではブルーシフトしている。これは、量子井戸構造によって形成された量子準位が、障壁層の Mg 組成比が増加することによって高くなり、発光エネルギーが増大したためであると考えられる。

図 4 に、障壁層の Mg 組成比が $y = 0.03$ である $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{Mg}_{0.03}\text{Zn}_{0.97}\text{S}$ MQW 構造の 4K における PL スペクトルの励起パワー密度依存性を示す。先ほどの SCH 構造と同様に、比較的励起パワー密度の低い 0.24 kW/cm^2 の場合は、励起子発光 (X) が支配的であるが、励起パワー密度の増加に伴い、その低エネルギー側に、励起パワー密度の増加に対して非線形的に増大する励起子分子発光 (XX) が観測された。この試料における ΔE は 25.6 meV と $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW 構造の値と同程度であり、 ΔE の増大は確認されなかった。また ΔE は、障壁層の Mg 組成比が増加するのに伴い減少していくという結果が得られた。このことから、Mg 組成比が増加するのに伴い量子井戸界面の揺らぎが増大することなどにより、MQW 構造における界面の品質が低下していると考えられる。

図 5 に、今回作製した $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}/\text{Mg}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{S}$ SCH 構造 (◎)、 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{Mg}_{0.03}\text{Zn}_{0.97}\text{S}$ MQW 構

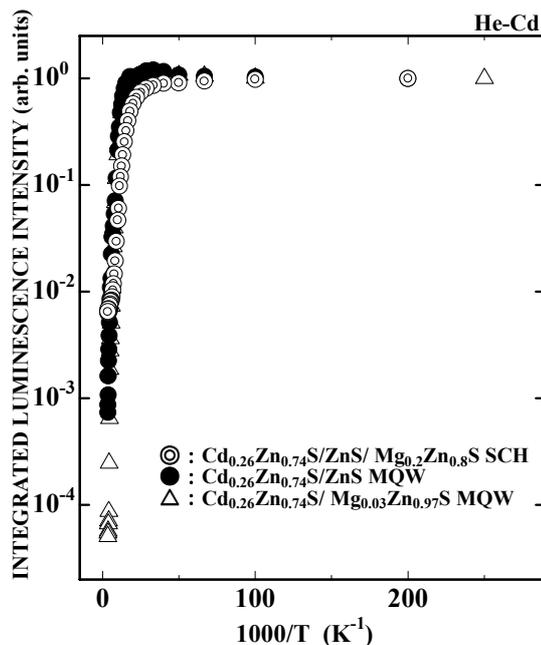


Figure 5. Temperature dependence of integrated luminescence intensity in $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}/\text{Mg}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{S}$ SCH, $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{Mg}_{0.03}\text{Zn}_{0.97}\text{S}$ MQW, and $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW.

造 (△) 及び $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW 構造 (●) の励起子発光における積分発光強度の温度依存性を示す。比較するために、各試料の積分発光強度は規格化してある。どの試料においても、温度に対する積分発光強度の変化はほぼ同じで、50K 付近から緩やかに減少していき、70K 以上の温度になると急激な減少をすることが観測された。しかし、 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW 構造において、室温での積分発光強度は、低温の値に比べて 3 桁程度の減少が観測されたのに対して、その MQW 構造に $\text{Mg}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{S}$ 混晶クラッド層を挿入した $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}/\text{Mg}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{S}$ SCH 構造では 2 桁程度の減少、また、障壁層を $\text{Mg}_{0.03}\text{Zn}_{0.97}\text{S}$ 混晶にした $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{Mg}_{0.03}\text{Zn}_{0.97}\text{S}$ MQW 構造では 4 桁程度の減少が観測された。この結果より、 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW 構造に、 $\text{Mg}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{S}$ 混晶クラッド層を挿入して SCH 構造にすることで、積分発光強度の温度消光を 1 桁程度抑制できることがわかった。これは、温度上昇により熱エネルギーを得て量子井戸活性層を飛び出したキャリアが、クラッド層を越えることができずに、再び量子井戸活性層へ戻り輻射再結合したことに起因すると考えられる。このことより、 $\text{Mg}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{S}$ 混晶クラッド層はキャリアを活性層に閉じ込めるのに有用であることが示された。また、障壁層を $\text{Mg}_{0.03}\text{Zn}_{0.97}\text{S}$ 混晶にした $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{Mg}_{0.03}\text{Zn}_{0.97}\text{S}$

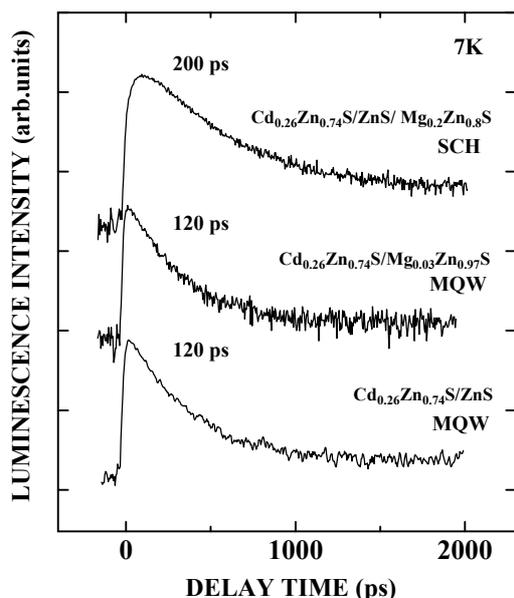


Figure 6. Time-resolved luminescences of the exciton in $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}/\text{Mg}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{S}$ SCH, $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{Mg}_{0.03}\text{Zn}_{0.97}\text{S}$ MQW, and $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW at 7K.

MQW 構造では、積分発光強度の温度消光が $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW 構造に比べて、1桁程度増大することが観測された。一般に、温度上昇に伴う発光強度の減少は、キャリアの消滅、欠陥などに起因した非輻射遷移の増大、及び量子井戸層からのキャリアの飛び出しなどが原因であるとされている¹⁴⁾。したがって、この試料においては障壁層を $\text{Mg}_{0.03}\text{Zn}_{0.97}\text{S}$ 混晶にしたことにより、量子井戸界面の揺らぎ及び欠陥などが増大し、そのことに起因した非輻射再結合の増大などが原因で、積分発光強度の温度消光が一桁程度増大したと考えられる。

次に、 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}/\text{Mg}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{S}$ SCH 構造、 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{Mg}_{0.03}\text{Zn}_{0.97}\text{S}$ MQW 構造及び $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW 構造の励起子発光ピーク位置における発光減衰特性を図6に示す。図6から明らかなように、これらの発光減衰特性は単一指数的な減衰ではないため、2つの発光減衰成分があると仮定し、(1)式を用いて発光寿命を求めた。

$$I(t) = a \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + b \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (1)$$

ここで、 a 、 b は係数、 τ_1 、 τ_2 はそれぞれ発光寿命の速い成分と遅い成分であるが、図中には早い成分のみ記している。この結果より、 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW 構造と $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{Mg}_{0.03}\text{Zn}_{0.97}\text{S}$ MQW 構造の発光寿命は、120 ps と同じ値であることがわかった。

このことより、低温では発光寿命に大きな変化がないために、これら2つの試料におけるキャリアの局在の度合い、非輻射再結合中心へのトラップの割合は同程度であると考えられる。しかしながら、温度消光に1桁程度の差が生じていることより、障壁層に $\text{Mg}_{0.03}\text{Zn}_{0.97}\text{S}$ を用いることで温度上昇に伴い非輻射再結合の割合が大きくなることがわかった。また、 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}/\text{Mg}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{S}$ SCH 構造の発光寿命は、 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW 構造と量子井戸界面の品質が同等であるにも関わらず、他の2つの試料より長い200 psとなった。この結果からも、 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW 構造に $\text{Mg}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{S}$ 混晶クラッド層を挿入し、SCH 構造にすることにより、キャリアを有効に量子井戸活性層へ閉じ込めることができることが確認された。

4. まとめ

減圧 MOCVD 法を用い、 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}/\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ SCH 構造、 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ MQW 構造及び、 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW 構造を作製し、それらの励起子系発光特性の評価を行った。

$\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ MQW 構造においては、励起子分子発光は明瞭に観測されたが、 ΔE の増大は今回確認することができなかった。しかし、障壁層の Mg 組成比を増加させていくのに伴い、量子サイズ効果が増大し発光ピーク位置がブルーシフトするという結果が得られた。

また、 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}/\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ SCH 構造では、膜厚が 625 nm の $\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ 混晶クラッド層ならば、 $\text{Cd}_{0.26}\text{Zn}_{0.74}\text{S}/\text{ZnS}$ MQW 構造に挿入しても、量子井戸界面の品質を低下させることなく SCH 構造を作製することができることがわかった。そして、その試料からの発光には、励起子分子発光を明瞭に観測することができた。また、PL 温度依存性から積分発光強度の温度消光が1桁程度抑制されたこと、発光減衰特性から発光寿命の増加が確認されたことより、 $\text{Mg}_y\text{Zn}_{1-y}\text{S}$ 混晶をクラッド層に用いることは、量子井戸活性層へのキャリアの閉じ込めに対して有用であることが示された。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金、財団法人泉科学技術振興財団の援助を受けて行われたものである。

参考文献

1) E. Kato, H. Noguchi, M. Nagai, H. Okuyama, S.

- Kijima, and A. Ishibashi, *Electron. Lett.* **34**, 282 (1998).
- 2) 川上養一, *応用物理* **65**, 13 (1996).
 - 3) 山田陽一, *応用物理* **70**, 317 (2001).
 - 4) K. Ichino, K. Ueyama, H. Kariya, N. Suzuki, M. Kitagawa, and H. Kobayashi, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 3486 (1999).
 - 5) Y. Yamada, K. Yoshimura, S. Fujita, T. Taguchi, F. Sasaki, S. Kobayashi, and T. Tani, *Appl. Phys. Lett.* **70**, 1429 (1997).
 - 6) K. Yoshimura, H. Watanabe, Y. Yamada, T. Taguchi, F. Sasaki, S. Kobayashi, and T. Tani, *J. Cryst. Growth* **184/185**, 682 (1998).
 - 7) F. Kreller, M. Lowisch, J. Puls, and F. Henneberger, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 2420 (1995).
 - 8) H. Okuyama, Y. Kishita, and A. Ishibashi, *Phys. Rev. B* **57**, 2257 (1998).
 - 9) S. Itoh, N. Nakayama, S. Matsumoto, M. Nagai, K. Nakano, M. Ozawa, H. Okuyama, S. Tomiya, T. Ohata, M. Ikeda, A. Ishibashi, and Y. Mori, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, L938 (1994).
 - 10) S. Itoh, N. Nakayama, T. Ohata, M. Ozawa, H. Okuyama, K. Nakano, M. Ikeda, A. Ishibashi, and Y. Mori, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, L639 (1994).
 - 11) R. Zimmermann, *J. Cryst. Growth* **101**, 346 (1990).
 - 12) Y. Kawakami, M. Funato, Sz. Fujita, Sg. Fujita, Y. Yamada, and Y. Masumoto, *Phys. Rev.* **B50**, 14655 (1994).
 - 13) 石崎真也, 吉村和正, 山田陽一, 田口常正, 2001年春季第48回応用物理学関係連合講演会予稿集1分冊, p. 317.
 - 14) Ru-Chin Tu, Yan-Kuin Su, Ying-Sheng Huang, Giin-Sang Chen, and Shu-Tsun Chou, *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**, 4732 (1998).

(平成13年8月31日受理)