

光情報処理デバイス用ワイドギャップ半導体 —エピタキシャル成長と電子・光・磁気物性—

電気電子システム工学科
松本 俊, 鍋谷 暢一

II-VI族化合物半導体の多くは直接遷移型のエネルギーバンド構造をもち、バンドギャップが広いことから、紫外域から可視短波長領域におけるレーザーダイオード、発光ダイオード、光ディテクタ、光変調器などの光情報処理デバイスへの応用が可能である。光デバイスの性能の向上や動作波長の制御を行うためには、電子をナノ領域に閉じ込めてその運動量を制御できる量子構造の採用が不可欠である。また半導体に磁性元素を添加し、電子のスピンを制御することによって既存の光電子デバイスに新たな機能を発現させることが可能である。このような量子構造や磁性半導体には界面急峻性や空間選択的なドーピング技術が要求され、平衡状態での結晶成長法では作製できない。本研究室では、分子線エピタキシー (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 法を用いてII-VI族化合物半導体のエピタキシャル成長を行い、その物性を調べている。

1. 希薄磁性半導体量子構造

希薄磁性半導体である ZnMnSe と非磁性半導体である ZnCdSe を数十Åの周期で積層した ZnMnSe/ZnCdSe 超格子を作製し、外部磁界によるバンドギャップ変化を測定して磁性原子が電子スピンに及ぼす影響を調べた。ZnCdSe の層厚とバンドギャップ変化量の関係を図1に示す。電子が閉じ込められている ZnCdSe の層厚が薄くなると超格子のバンドギャップが磁界で大きく変化することが分かる。この結果は、電子スピン制御に寄与する Mn 原子の実効的な濃度が量子構造をもたない ZnMnSe に比べて増大することを示している。電子をさらに高次元に閉じ込めるために、傾斜基板上に発生する原子ステップを利用した量子細線の作製も行っている。(1)-(4)

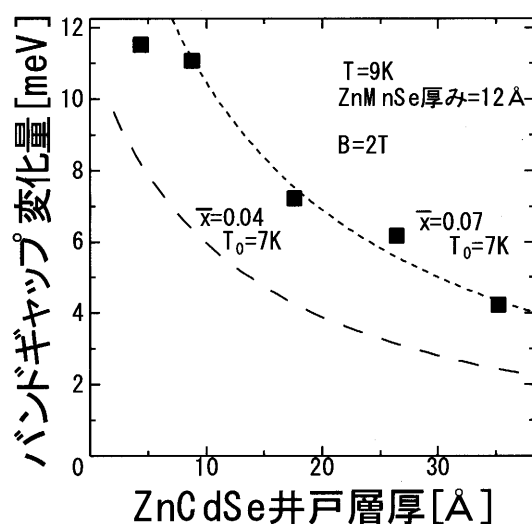


図1 [(ZnMnSe)_{12Å}/(ZnCdSe)_{4~35Å}] 超格子のバンドギャップの外部磁界によるシフト量と ZnCdSe 層厚の関係。電子を閉じ込めている ZnCdSe 層が薄くなると外部磁界の効果が大きくなったように見える。

2. 量子構造の構造評価

量子構造は電子のド・ブロイ波長 (数十Å) 以下の大きさの異なる材料を接合したものであり、その構造が実際に実現されているかどうかを原子レベルで調べる必要がある。この構造評価を、透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope, TEM) を用いて行った。図2(a)は InP 基板上に成長した CdSe/ZnSe 歪超格子の断面 TEM 像である。CdSe と ZnSe はそれぞれ格子定数が 6.07 Å と 5.67 Å と異なるために、格子像の格子点間隔を精密に測定すれば各層の原子組成を知ることができる。図2(b)は図2(a)から求めた Cd 組成であり、超格子の設計値である約12分子層の周期で変調していることがわかった。同様の評価によって、CdSe/ZnSe 量子細線の形成も確認した。この方法でいろいろな半導体ナノ構造を原子レベルで評価している。(5,6)

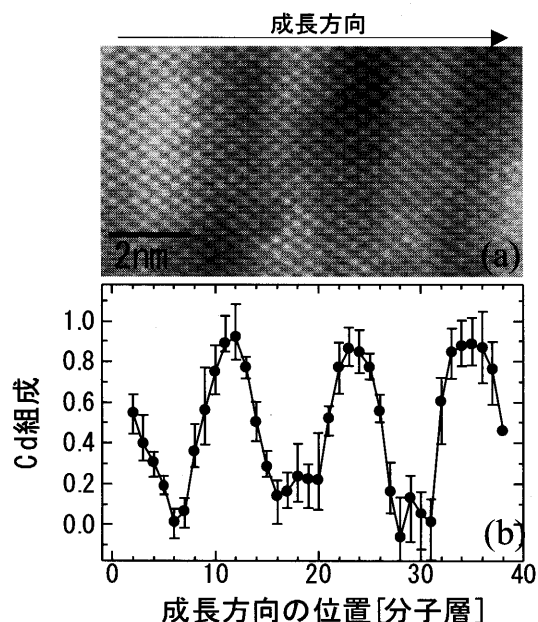


図2 (a)CdSe/ZnSe 歪超格子の断面 TEM 写真. 原子の位置が格子像として写っている. (b)TEM 像より求めた Cd 原子の濃度分布. 設計どおりの構造が原子レベルで確認された.

3. 透明酸化物半導体 ZnO

酸化物半導体である ZnO はバンドギャップが室温で 3.3 eV と大きく、375 nm より長波長の光に対して透明である。透明な電子デバイスや紫外領域での光デバイス用材料として研究を進めている。図 3 は MBE 装置内で酸素プラズマを発生させることに

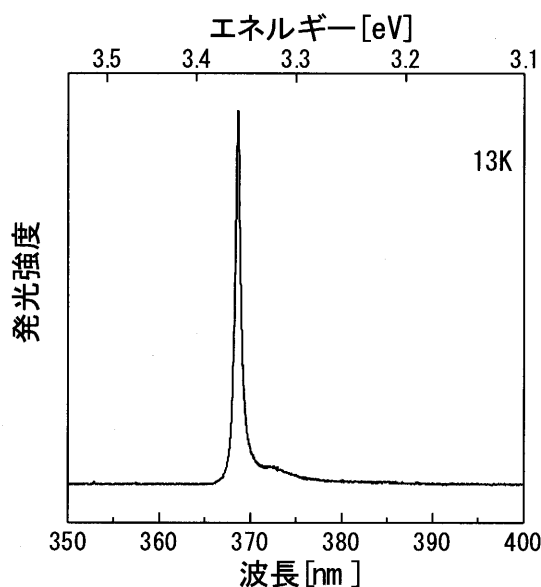


図3 ZnO 結晶の発光スペクトル. バンドギャップ付近に鋭い発光が観測され高品質結晶であることがわかる.

よって GaAs 基板上に成長した ZnO の発光スペクトルである。励起子の発光が支配的で、結晶欠陥や不純物による発光が極めて小さいことから、高品質結晶であることがわかる。現在、p 型 ZnO の作製を目的として窒素ドーピングや、希薄磁性酸化物半導体の作製を目的として Mn を添加した ZnMnO の成長を行っている。

4. 広帯域対応半導体 ZnSeO

酸素 (O) は電気陰性度が 3.5 と他の VI 族元素よりも大きいため、例えば ZnSe 中の一部の Se を O と置換すると電子は O 原子に束縛され、強い発光を示す。さらに O の濃度を高くした ZnSeO 混晶のバンドギャップは、図 4 に点線で示すような O 組成に比例して ZnSe と ZnO のバンドギャップの間の値をとるのではなく、特異なふるまいが期待される。Tight-Binding モデルによる理論計算によって図 4 の実線で示すように大きく湾曲することを明らかにした。このような巨大ボーイングが発現すると、バンドギャップの制御範囲が広がるため、ZnSeO 混晶は紫外から赤外までの広い波長範囲への応用が可能である。MBE を用いて実際に ZnSeO 混晶を成長し、その光学特性を調べた結果、バンドギャップがほぼ計算どおりの酸素組成依存性もつことがわかった。現在、バンドギャップ広帯域制御の研究を進めている。

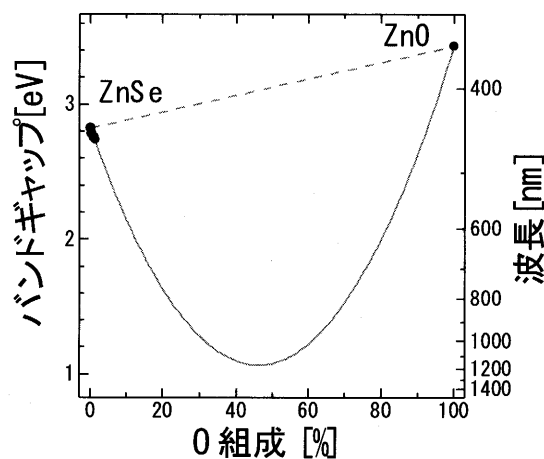


図4 ZnSeO 混晶のバンドギャップの酸素組成依存性. 酸素組成を制御して紫外線領域から赤外線領域までバンドギャップを広帯域に変化させられる.

主な発表論文

- (1) MBE growth and RHEED characterization of MnSe/ZnSe superlattices on GaAs (100) substrates, I. Ishibe, Y. Nabetani, T. Kato, and T. Matsumoto, *J. Crystal Growth*, **214/215**, p. 172 (2000)
- (2) MBE growth of MnTe/ZnTe superlattices on GaAs (100) vicinal substrates, T. Suzuki, I. Ishibe, Y. Nabetani, T. Kato, and T. Matsumoto, *J. Crystal Growth*, **237-239**, p. 1374 (2002)
- (3) Potential profile and quantum energy level in ZnSe/CdSe/ZnSe strained quantum well grown on vicinal GaAs substrate, Y. Nabetani, T. Kato, and T. Matsumoto, *J. Crystal Growth*, **214/215**, p. 665 (2000)
- (4) Arrangement of atoms and strain distribution in CdSe/ZnSe strained single quantum well on vicinal GaAs substrate, Y. Nabetani, T. Kato, and T. Matsumoto, *J. Appl. Phys.*, **89**, p.154 (2001)
- (5) High resolution transmission electron microscope analysis of CdSe/ZnSe strained layer superlattices grown on InP, Y. Nabetani, Y. Kobayashi, T. Kato, and T. Matsumoto, *Phys. Status Solidi B*, **229**, p. 209 (2002)
- (6) HRTEM observation of CdSe/ZnSe SQWs grown on vicinal GaAs substrate, Y. Nabetani, Y. Kobayashi, Y. Ito, T. Kato, and T. Matsumoto, *J. Crystal Growth*, **237-239**, p. 1541 (2002)