

II-VI族ナノ構造

野村 一郎

1. 研究目的

ナノ及びサブナノメートルに制御された InP 基板上 II-VI 族化合物半導体超格子の新物性発現及びそのデバイス応用に向けた基礎検討を行う。ZnCdSe/BeZnTe タイプ II 超格子は周期や層厚を変えることで可視全域から近赤外までの広い範囲において波長を制御でき、様々な光デバイス材料として期待される。例えば、赤、緑、青の三原色で発光する LED や半導体レーザー、また演色性に優れた白色光源への応用が考えられる。更に、当該超格子は伝導帯に 1.8eV 程の大きなバンド不連続があることから、これをサブバンド間遷移に利用したデバイスへの展開も期待される。例えば、遷移波長を光通信波長帯に調整することで超高速光変調や検出といった高性能通信デバイスへの可能性が開ける。また、カスケードレーザーやサブバンド間遷移を用いたテラヘルツ帯デバイスへの応用も考えられる。ここでは、ZnCdSe/BeZnTe 超格子の光学特性等、基礎物性を調べ、デバイス応用に向けた検討を行う。また、当該超格子の伝導帯バンド不連続を評価し、超格子の設計、理論解析、デバイス応用のための基礎データを明らかにする。一方、デバイス化に向けた基礎検討も行う。具体的には、電極抵抗の低減や透明導電膜の形成、またデバイスシュミレーターを用いた構造設計を行い、高性能化、高効率化のための技術開発を行う。他にも、BeZnTe/ZnSeTe 超格子疑似混晶による組成制御性等、超格子を用いた材料限界の打破に向けた検討を進める。

2. 研究方法

InP 基板上 II-VI 族半導体材料やその超格子、またそれらを用いたデバイスを作製し、評価すると共に理論解析による検討を行う。作製には分子線エピタキシー (MBE) 法を用いる。III-V 族用と II-VI 族用の別々の成長室を有するダブルチャンバー MBE 装置を用いて (100)InP 基板上に II-VI 族結晶をエピタキシャル成長させる。結晶の高品質化のために、先ず InP 基板表面の酸化膜除去及び InP、InGaAs バッファー層成長を III-V 族成長室で行い、その後 II-VI 族成長室で超格子やデバイス構造の成長を行う。得ら

れた結晶やデバイスは、X線回折測定、フォトルミネッセンス（PL）測定、光起電力測定、電圧電流（I-V）測定、電流注入における発光特性等により評価する。一方、超格子中の量子準位の理論計算やデバイスシュミレーターを用いたダイオード特性の理論解析を行い、実験と比較検討する。

3. 研究成果

①ZnCdSe/BeZnTe 超格子の特性評価

ZnCdSe/BeZnTe 超格子のエネルギーバンド図を図 1 に示す。図の様に当該超格子はタイプ II 構造となっており、BeZnTe の伝導帯下端 (E_c) は ZnCdSe より約 1.8eV 高く、BeZnTe の価電子带上端 (E_v) も ZnCdSe より 0.76eV 高くなっている。尚、図中に示されているエネルギー値は文献値やこれまで我々が得た実験値より推測したものであるが、確定したものではない。これらの値の妥当性は今後調べていく必要があり、後の②で述べるように本研究課題の 1 つでもある。

当該超格子の特長の一つは、バンド間遷移エネルギーの最小値が ZnCdSe の E_c から BeZnTe の E_v 間の 1.3eV であり、これは超格子を構成している ZnCdSe 及び BeZnTe の禁制帯幅 (E_g) よりも低エネルギーとなっていることである。即ち、当該超格子では ZnCdSe ($E_g=2.06\text{eV}$) や BeZnTe (BeZnTe は間接遷移型で $E_g=2.77\text{eV}$ 、図 1 では Γ 点 (直接遷移) での $E_g=3.12\text{eV}$ で示してある) の E_g よりも低エネルギー (長波長側) の発光や光吸収が得られる可能性があり、その分広い波長域に対応できる。図 2 は ZnCdSe/BeZnTe 超格子の遷移波長の計算値である。これより、ZnCdSe 及び BeZnTe の層厚を 1 分子層 (ML、1ML は約 0.29nm) から 10ML に変えることで遷移波長を 430nm から 800nm に制御でき、青から赤の可視光全域に加え近赤外光においても発光吸収が得られることが示された。

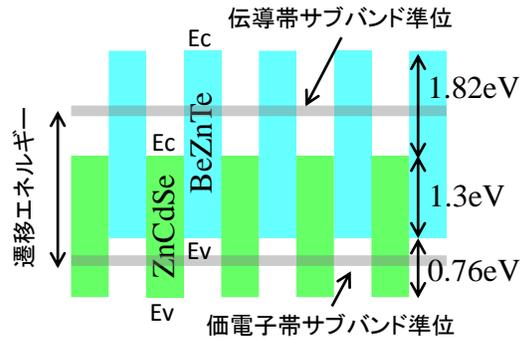


図 1 ZnCdSe/BeZnTe 超格子のエネルギーバンド図。

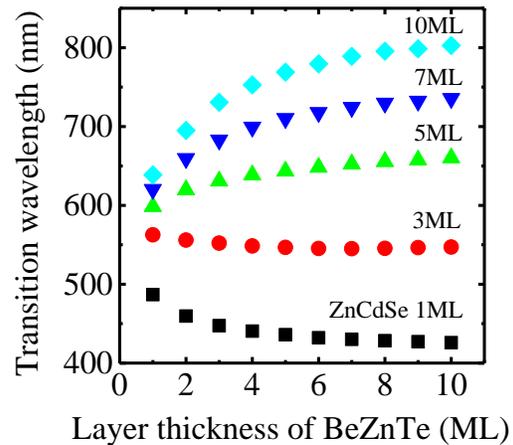


図 2 ZnCdSe/BeZnTe 超格子の遷移波長と層厚の関係 (計算値)

実際に ZnCdSe/BeZnTe 超格子を作製し、発光特性を調べた。図 3 に室温での PL スペクトルを示した。BeZnTe 層を 5ML に固定し、ZnCdSe 層を 1ML から 6ML に変えることで 509nm から 740nm の広い範囲で発光が観測された。次に、これら発光ピーク波長を遷移波長の理論値と比較した。図 4 に PL ピーク波長と遷移波長（理論値）の ZnCdSe 層厚依存性を示した。図より、PL ピーク値が理論値より 70nm 程度長波側にあることが分かった。この原因について検討した結果、超格子の各界面に挿入している ZnTe の影響である可能性が示された。当該超格子では、各層の界面において ZnCdSe 中の Se と BeZnTe 中の Be が結合し BeSe が形成されると、BeSe の格子不整合度 (-12%) のため大きな結晶歪が生じ、結晶欠陥の発生及び結晶性劣化の原因になってしまう。そこでこの問題を解決するために超格子の各界面に 0.5ML 相当の ZnTe を挿入し、Be と Se の結合を抑制している。このとき、各界面での ZnTe は 1ML 以下であるので層として存在せず、ZnCdSe 層や BeZnTe 層に取り込まれていると考えられる。しかし、図 4 での理論値ではこの ZnTe の影響を考慮していないため実験値とのずれが生じたものと推察される。そこで、ZnTe が ZnCdSe または BeZnTe に取り込まれたと仮定して再度理論値を求めた。結果を図 4 に示した。これより、ZnCdSe 層厚が 1、2ML の場合は ZnTe が ZnCdSe 層に取り込まれた場合に計算値と実験値がよく一致し、ZnCdSe が比較的厚い 6ML の場合は ZnTe が BeZnTe 層に取り込まれたと考える方が妥当であることが示された。この様に、PL ピークと理論値の違いは界面に挿入された

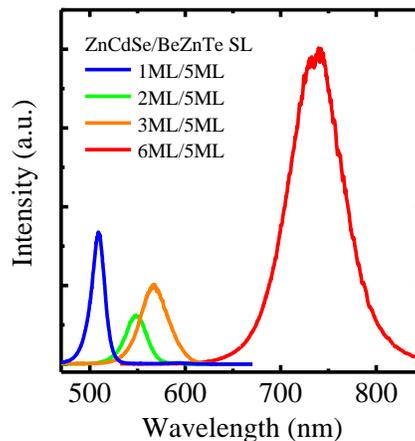


図 3 ZnCdSe/BeZnTe 超格子の室温での PL スペクトル。

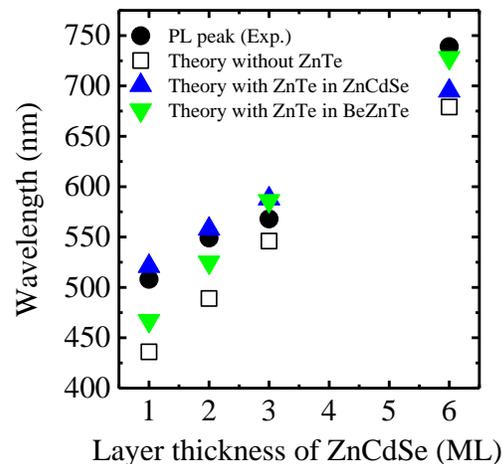


図 4 ZnCdSe/BeZnTe 超格子における PL ピーク波長と遷移波長（理論値）の ZnCdSe 層厚依存性。

ZnTe の影響によるものと考えられ、またその影響は ZnCdSe の層厚によって異なることが分かった。

上述のように、ZnCdSe/BeZnTe 超格子では各層の厚さを変えることで可視から近赤外域で波長を制御できることが示された。そこでこの特長を利用した多色発光について検討した。ここでは、層厚を変えた 3 種類の超格子を 1 つの基板上に積層した試料を作製した。超格子の各層厚は下から順に ZnCdSe(5ML)/BeZnTe(5ML)、2ML/5ML、1ML/5ML とし、各々の超格子の全層厚は 100nm とした。図 5 に試料からの室温 PL スペクトルを示した。試料上部の超格子から順に 506nm、530nm、631nm の 3 つの発光ピークが観測され、青、緑、赤の三原色発光が確認された。このように、白色 LED 等の多色発光 LED に向けた基礎的な成果が得られた。

次に、ZnCdSe/BeZnTe 超格子におけるサブバンド間遷移について理論解析を行った。

図 1 に示したエネルギーバンド図の伝導帯ポテンシャルにおける第 1 量子準位と第 2 量子準位間のサブバンド間遷移波長を計算した。図 6 に BeZnTe 層を 1~16ML、

ZnCdSe 層を 5~10ML に変えた場合の遷移波長の計算値を示した。図より、1.1 から 3.1 μ m においてサブバンド間遷移が得られることが示された。また、ZnCdSe を 7ML、BeZnTe を 4~6ML とすることで遷移波長を光通信波長帯の 1.5 μ m に制御できることが分かった。

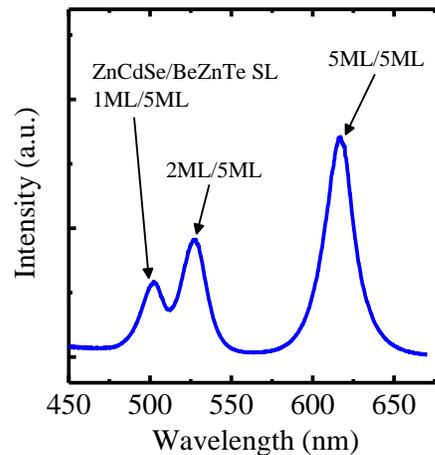


図 5 3 種類の ZnCdSe/BeZnTe 超格子を積層した試料からの室温 PL スペクトル。

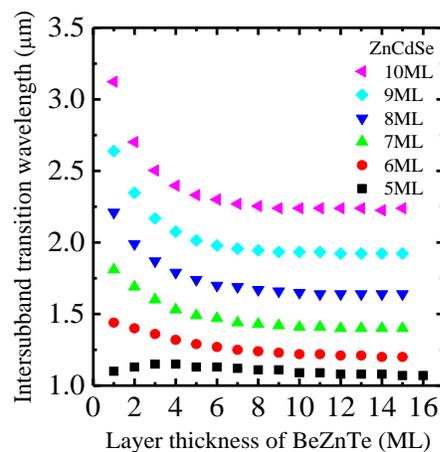


図 6 ZnCdSe/BeZnTe 超格子における伝導帯サブバンド間遷移波長の BeZnTe 層厚依存性 (計算値)

以上の様に、ZnCdSe/BeZnTe 超格子は可視から赤外の広い波長域に対応する優れた特長を有することが示された。

②ZnCdSe/BeZnTe ヘテロ接合における伝導帯バンド不連続の評価

伝導帯や価電子におけるバンド不連続等のエネルギーバンドパラメータの解明は、ZnCdSe/BeZnTe 超格子の理論解析、設計、デバイス応用において重要である。これまでの知見や文献値より求めたパラメータは図 1 に示されているが、十分に確かめられていない。そこで n-i-n ダイオード素子を用いて ZnCdSe/BeZnTe ヘテロ接合における伝導帯バンド不連続を評価した。作製した素子構造を図 7 に示した。素子は 200nm 厚のノンドーパ BeZnTe 層を 300nm 厚 n 形 ZnCdSe 層で挟んだ n-i-n 構造とした。素子の両面に Au 電極を施し $50\mu\text{m} \times 350\mu\text{m}$ にチップ化した後、室温において I-V 特性を測定した。I-V 特性において、ZnCdSe と BeZnTe との間のバンド不連続により生じたヘテロ障壁によるショットキー特性が確認された。ここで、

得られた I-V 特性とその理論値を比較することでバンド不連続を見積もった。図 8 には I-V 特性の実験値と理論値を示した。理論値においては、バンド不連続 (ΔE_c) を 1.5 から 2.4eV まで変えたものを示した。これより、測定値は $\Delta E_c = 1.9\text{eV}$ の場合の理論値とよく一致していることからバンド不連続は 1.9eV であると見積もられた。この値は、以前の子測値である 1.82eV と比べ若干大きいことが分かった。このように、より正確なバンド不連続値が明らかになることで、超格子の設計や理論解析の精度の向上が期待される。

③p 側電極抵抗の検討

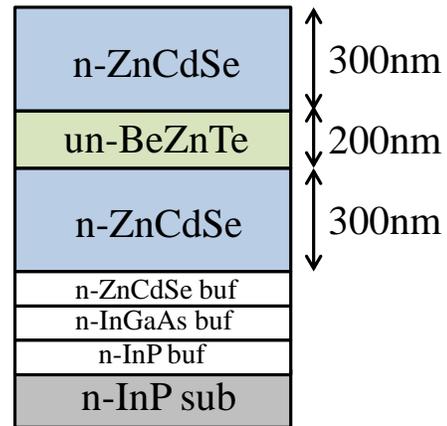


図 7 ZnCdSe/BeZnTe n-i-n 素子の構造。

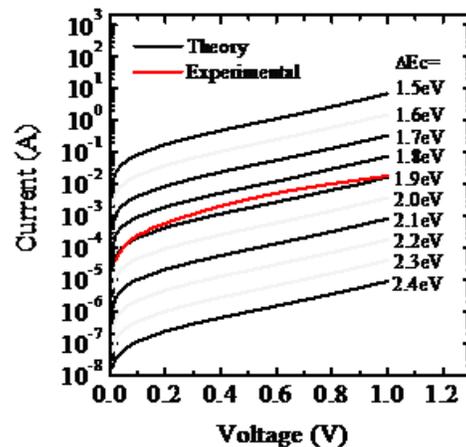


図 8 n-i-n 素子の I-V 特性 (実験値) とその理論値

電極抵抗、特に p 側電極抵抗の低減はデバイスの低抵抗化、高性能化において重要な要因である。ここでは InP 基板上 II-VI 族半導体デバイスにおける p 側電極抵抗低減について検討した。金属と接触するコンタクト層として p 形 ZnTe 及び p 形 ZnSeTe を取り上げ、金属材料として Au、Pd/Au、Pd/Pt/Au について検討した。素子は InP 基板上に n 形 ZnCdSe 層 (250nm)、p 形 BeZnTe 層 (700nm) 及びコンタクト層 (30nm) を積層した構造とした。電極の形成には電子ビーム蒸着法及び抵抗加熱蒸着法を用いた。電極抵抗の評価には、円電極による c-TML (circular transmission line model) 法を用いて、電極とコンタクト層との接触抵抗を測定した。c-TML 法により間隔の異なる電極間の抵抗を測定し、その抵抗値の変化の割合から接触抵抗を算出した。その結果、ZnTe コンタクト層と Pd/Pt/Au 電極の組み合わせにおいて最も低い $6.5 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ の接触抵抗が得られ、上記電極材料とコンタクト層の組み合わせにおいて最適であることが分かった。一方、ZnSeTe と Pd/Pt/Au の組み合わせでは $9.0 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$ の比較的高い抵抗となった。そこで、上記電極材料とコンタクト層による違いについて検討した。ZnSeTe と ZnTe を比較すると、ZnTe は InP に対し +4.0% の格子不整合となるが、ZnSeTe は InP と格子整合し高品質な結晶が得易い。一方、ZnSeTe の p キャリア濃度は約 $6.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 程度であり、ZnTe の $2.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ よりも低い。更に、ZnSeTe 中の Se と電極材料の一部である Pd が反応し易いことが知られており、この反応生成物が抵抗や絶縁体として働いている可能性がある。このことは ZnSeTe コンタクト層において Au 電極と Pd/Pt/Au 電極の接触抵抗を比べた場合に、Pd/Pt/Au の方 ($9.0 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$) が Au ($3.5 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$) より大幅に増加していることとも関連している。以上より、ZnTe と比べ ZnSeTe と Pd/Pt/Au の場合に高抵抗化する原因は、ZnSeTe の低いキャリア濃度及び Se と Pd の反応生成物であると考えられる。

④透明導電膜の検討

InP 基板上 II-VI 族半導体デバイスにおける透明導電膜の検討を行った。ここでは透明導電膜材料として酸化インジウムスズ (ITO) を取り上げ、ITO を成膜する下地層のコンタクト層として p 形 ZnTe 及び p 形 ZnSeTe について調べた。ITO とコンタクト層との間の電気特性を評価するため、p-n 接合ダイオードを作製し、p 形コンタクト層上に ITO 層を成膜した素子の I-V 特性を測定した。ダイオードは n 形 InP 基板上に n 形 ZnCdSe 層 (270nm)、p 形 BeZnTe 層 (650nm) 及び p 形コンタクト層 (30nm) の構造とし、MBE 法により成長を行った。成長後に、コンタクト層上に ITO (60nm) をスパッタ法により成膜した。ここでは、スパッタ源にコニカル型を使用した。これは、スパッタ中のプラズマやイオンの成膜面への影響を抑制し、コンタクト層の劣化を防ぐ効果があると考えられている。ITO 成膜時の基板温度は 110°C 及び 130°C とした。一方、比較のために ITO の代わりに Au 電極を施した素子も作製した。素子の室温における I-V 特性を図 9 に示した。これより、ZnTe コンタクト層の方が ZnSeTe の場合よりも立ち上がり電圧が低く、良好な電気特性が得られた。また、ZnTe コンタクト層を用いて ITO 成膜温度を 130°C とした場合に最も立ち上がり電圧が低く、比較のための ZnTe コンタクト層と Au 電極の場合とほぼ同様な特性を示した。これより、ITO を用いても Au 電極と遜色のない電気特性が得られることが分かった。一方、

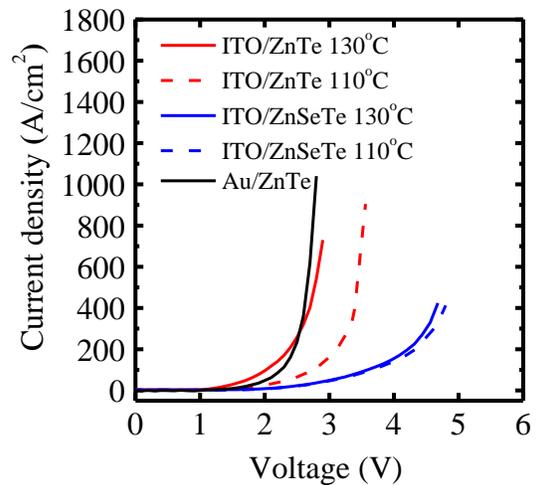


図 9 ITO を成膜した p-n ダイオードの I-V 特性。

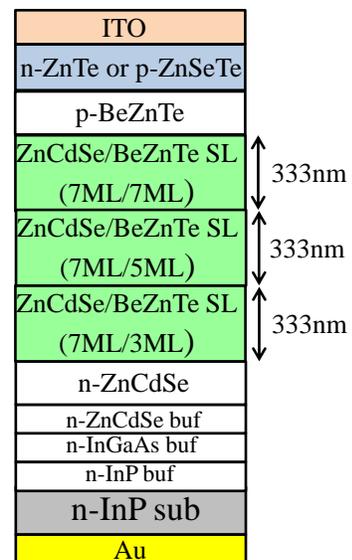


図 10 ZnCdSe/BeZnTe 超格子と ITO を用いた太陽電池の構造。

上記スパッタ法と同条件で石英ガラス上に成膜した ITO 膜を評価したところ、400～1600nm 波長域における光透過特性は 80～95%であり、抵抗率も $3.3 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ であったことから良質な透明導電膜が得られていることが示された。

次に、ZnCdSe/BeZnTe 超格子と ITO を用いた太陽電池の試作を行った。素子構造を図 10 に示した。光吸収層には①で述べた ZnCdSe/BeZnTe 超格子を用い、n 形 ZnCdSe 及び p 形 BeZnTe で挟んだ構造とした。コンタクト層は p 形 ZnTe または p 形 ZnSeTe とし、その上に ITO をスパッタ成膜した。そ

その後、5mm 角の素子に切り出し、ITO 面側に 1.5AM の疑似太陽光を照射しながら発電特性を評価した。図 11 に光照射時の I-V 特性を示した。これより、ZnSeTe コンタクトより ZnTe コンタクトを用いた方が開放電圧及び短絡電流が大きく、発電効率も高いことが分かった。これは先の実験で示されたように、ITO に対し ZnTe コンタクトの方が良好な電気特性が得られることに起因していると考えられる。ZnTe コンタクトの場合の発電特性は、短絡電流が 4.7mA/cm^2 、

開放電圧が 0.9V、曲線因子が 0.35、発電効率が 1.5%であった。

続いて、ITO をクラッド層に用いた半導体レーザの構造を提案した。ITO は可視光を含む広い波長域で吸収が少なく導電率も高いことから透明導

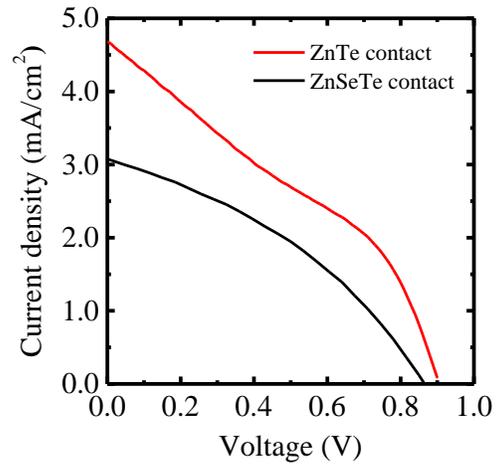


図 11 試作した太陽電池の疑似太陽光照射下での I-V 特性。

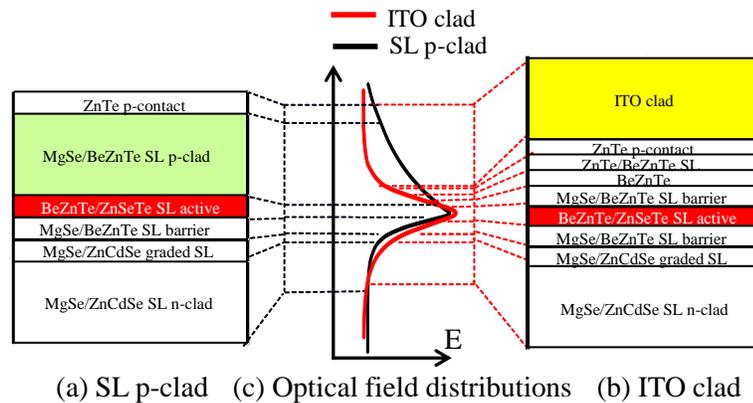


図 12 (a) 超格子 p クラッドを用いた従来のレーザ構造、(b) ITO クラッドを用いたレーザ構造、(c) 各レーザ構造における光電磁界分布の理論値。

電膜として広く応用されているが、それらの特長に加え屈折率が低い（2.0 程度）ことから、半導体レーザのクラッド層としても理想的な材料であることに着目した。ITO をクラッド層に用いることで低抵抗化や光閉じ込めの向上等により素子特性を大幅に改善でき、また従来にない新しい半導体レーザへの展開も期待される。これまで、InP 基板上 II-VI 族半導体を用いたレーザ及び LED では、活性層に BeZnTe/ZnSeTe 超格子、n クラッド層に MgSe/ZnCdSe 超格子、p クラッド層に MgSe/BeZnTe 超格子を用いていた。しかし、p クラッド層材料である MgSe/BeZnTe 超格子は抵抗率や屈折率が高く、クラッド層としての性能が十分でないことが問題であった。そこで、この超格子の代わりに ITO を用いる構造を提案した。図 12 に従来構造と ITO を用いた構造、及びそれらの構造における光電磁界分布の理論値を示した。これより、ITO を用いることで電磁界の活性層への閉じ込めが増加し、p 側クラッド層（即ち ITO 層）への電磁界の染み出しが大幅に低減されることが分かった。これは光閉じ込めに必要なクラッド層厚の薄膜化にも繋がり、素子抵抗の低減にも効果的である。具体的には超格子 p クラッドでは光閉じ込めのために 600nm 以上の層厚が必要であるのに対し、ITO を用いると 40nm 程度で良いことが分かった。このことは従来の超格子 p クラッド層が厚さ 1/10 以下の薄膜 ITO で代替でき、ITO が低抵抗であることから素子抵抗が大幅に低減されることを示している。また、活性層への光閉じ込め係数は、超格子 p クラッドの場合は 15% であるのに対し、ITO を用いると 27% に増加し、これはしきい値電流の低減等レーザ特性の向上に効果がある。一方、ITO は n 形伝導性であり、そのままでは p クラッドに代替できない。そこで、当該レーザ構造では ITO の下に p-BeZnTe 等の p 形層を設け、活性層への正孔注入を行う。即ち、p 形層の価電子帯と ITO の間での電子のトンネル効果により p 形層に正孔が生成され、活性層に注入される構造になっている。このことを確かめるため ITO を用いた LED 構造を作製した。BeZnTe/ZnSeTe 超格子活性層を MgSe/BeZnTe 超格子バリア層で挟み、n クラッド層に MgSe/ZnCdSe 超格子を用いた構造とした。また、正孔注入層に p-BeZnTe、コンタクト層に p-ZnTe を用いた。電流注入により評価したところピーク波長 582nm の黄色発光が得られた。これより、ITO を p 側クラッド層に用いた構造でも活性層に正孔が注入されることが実験的に示され、ITO クラッド層を用いた InP 基板上 II-VI 族半導体レーザの可能性が示された。

⑤デバイス構造の検討

InP 基板上 II-VI 族半導体によるレーザ及び LED 構造の最適化に向けてデバイスシュミレーターを用いた理論解析を行った。素子の基本構造は、BeZnTe/ZnSeTe 超格子活性層を MgSe/BeZnTe 超格子バリア層で挟み、n クラッド層に MgSe/ZnCdSe 超格子、p クラッド層に MgZnSeTe 混晶を用いたものとした。この構造においてシュミレーターによる理論解析の結果を図 13 に示した。図 13(a)には印加電圧 4.25V におけるエネルギーバンド図、また (b)にはその時の各層における電子及び正孔電流のプロファイルを示した。図 13(b)より、n クラッドから注入された電子は活性層に到達する前に再結合により 1/100 以下に減少してしまうことが分かった。一方、正孔は p クラッドから注入された後、活性層を通り越し n クラッドまでほぼそのまま到達してしまっている。このことは、活性層に電子や正孔が殆ど注入されず、素子特性の大幅な低減に繋がることを示している。これは図 13(a)に示されているように、n 側バリア層の伝導帯に大きなヘテロ障壁があり、その障壁のために電子の注入が妨げられているからだと考えられる。即ち、電子はこの障壁を超えられずに活性層に到達せず、一方、正孔は活性層に注入される電子が少ないため再結合しないでそのまま n クラッド層まで到達し、その近傍で堰き止められた電子と再結合してしまうという現象が示されている。以上より、この問題の主因は n 側バリア層であり、解決法の 1 としてそのバリア層を除去することが考えられる。そこで、n 側バリア層がない構造を提案し、再度解析を行った。

n 側バリア層のない場合の印加電圧 2.28V における解析結果を図 14(a)、(b)に示した。図 14(b)より、電子と正孔の両方とも活性層で急激に減少しており、活性層で効率よく再結合することが示された。これは、障壁がなくなったため電子の活性層への注入が促進され、それに付随して正孔の注入効率も改善されたことによる。また、n 側バリア層を除去することで印加電圧の大幅な低減も見込まれる。具体的には、当該構造において同程度の電流密度 ($700\text{A}/\text{cm}^2$) を注入するための印加電圧は、n 側バリア層がある場合は 4.25V に対し、ない場合は 2.28V であった。これは、n 側バリア層がある場合には、電流が流れるために正孔が活性層を超えて n クラッドに到達するために高い電圧が必要であるのに対し、n 側バリア層がない場合は通常のダイオードと同様に、必要な印加電圧は活性層へのキャリア注入に必要な拡散電位程度となるためである。このような印加電圧の低減も消費電力や発熱の低減につながり、素子特性の向上に効果的である。

一方、バリア層は活性層への光閉じ込めにおいて重要であり、バリア層の除去は光閉じ込めの低下を招く恐れがある。そこで、n 側バリア層がある場合とない場合で電磁波解析を行い、光閉じ込め係数を算出した。結果は、n 側バリア層がある場合の光閉じ込め係数が 25.8%で、ない場合は 23.3%であった。このように、バリア層を除去することで光閉じ込めの若干の低下はあるものの大きな

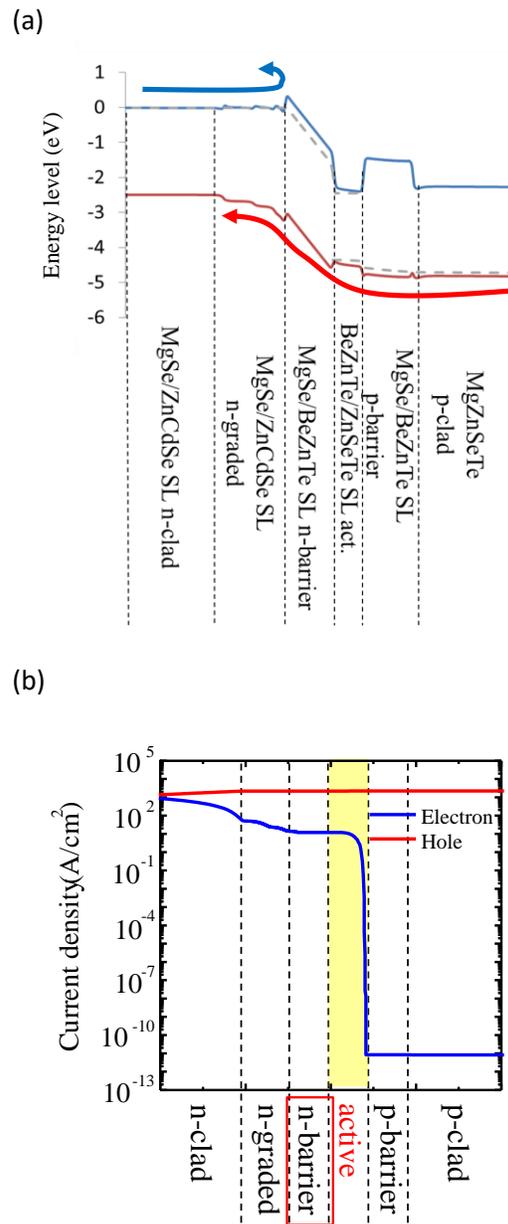


図 13 n 側バリア層がある場合の発光素子構造の理論解析結果。(a) 印加電圧 4.25V におけるエネルギーバンド図。(b) その時の各層における電子及び正孔電

差は見られなかった。従って、当該構造では n 側バリア層の除去は光閉じ込めに大きく影響しないことが分かった。

実際に n 側バリア層がある場合とない場合の素子を作製し、特性の比較を行った。その結果、n 側バリア層を除去することで 5V 以上の電圧の低減が確認された。また、電流注入において n 側バリア層がある素子では何も発光が得られなかったのに対し n 側バリア層が無い場合はピーク波長が 603nm の橙色発光が観測された。これらは、先の理論解析で予測された現象 (n 側バリア層があると活性層にキャリアが注入されず、また電流注入のための印加電圧が高い) と整合し、実験においても n 側バリア層を除去する効果が示されたと言える。以上の様に、理論解析から素子構造における問題点が明らかになり、n 側バリア層を除去することが素子特性の向上に大きく寄与することが理論と実験により示された。

⑥ BeZnTe/ZnSeTe 超格子疑似混晶の検討

InP 基板上的 BeZnSeTe 四元混晶は、基板に格子整合させたまま直接遷移型の禁制帯幅を 2.1 から 2.7eV の間で制御でき、橙色から青の広い可視光域に対応する光デバイス材料として期待されている。また、BeSe 及び BeTe を含むことから結晶の格子強度が増し、II-VI 族半導体デバイスで問題となっている短い素子寿命の改善に効果的であると考えられる。これまで我々は、BeZnSeTe を活性層に用いた LED を作製し、黄色や緑色発光の観測や 5000 時間以上の長寿命動作を達成し

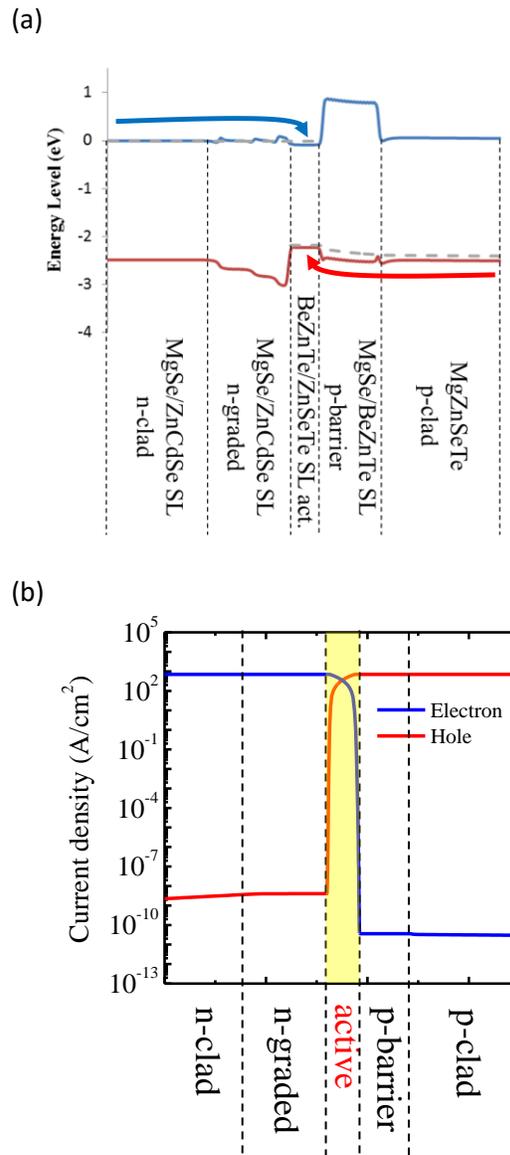


図 14 n 側バリア層が無い場合の発光素子構造の理論解析結果。(a) 印加電圧 2.28V におけるエネルギーバンド図。(b) その時の各層における電子及び正孔電

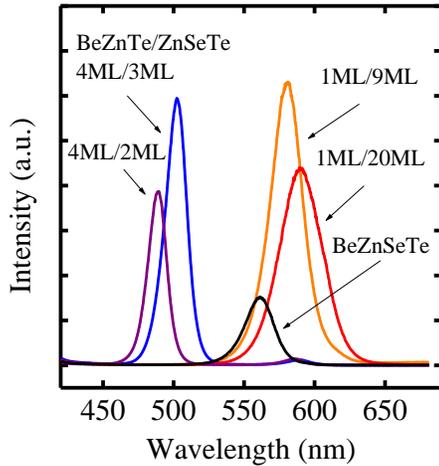


図 15 BeZnTe/ZnSeTe 超格子疑似混晶の室温 PL スペクトル。

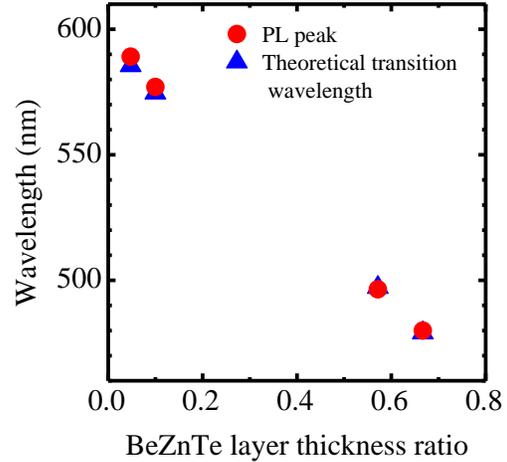


図 16 BeZnTe/ZnSeTe 超格子疑似混晶における発光ピーク波長及び遷移波長の理論値と超格子中の BeZnTe 層厚比の関係。

た。また、黄色/緑色の光励起によるレーザ発振に成功した。一方、BeZnSeTe は四元混晶であるため格子定数や禁制帯幅を調節するための組成制御やその再現性を得ることが困難であり、作製上の問題となっている。そこで、BeZnTe/ZnSeTe 超格子により BeZnSeTe 疑似混晶を得る手法を提案した。当該超格子は、BeZnTe 層及び ZnSeTe 層を各々 InP 基板に格子整合させて超格子全体の格子整合を保ちつつ、各層厚を変えることで遷移波長（禁制帯幅）等の物性を容易に制御できると言った特長を有している。また当該超格子は、各層が数分子層程度の薄膜であり、巨視的には構成元素が同一の BeZnSeTe 混晶と見なせ、物性も似た特徴を示すと考えられる。ここでは、BeZnTe/ZnSeTe 超格子を作製し発光特性を調べることで、発光波長と各層厚の関係や制御性について評価し、また BeZnSeTe との比較検討を行った。更に、BeZnTe/ZnSeTe 超格子を活性層に用いた LED を作製し、特性を評価した。

各層厚の異なる BeZnTe/ZnSeTe 超格子 (BeZnTe/ZnSeTe=4ML/2ML、4ML/3ML、1ML/9ML、1ML/20ML) を InP 基板上に作製し、PL 測定を行った。超格子の全層厚は 600nm とした。図 15 に室温での PL スペクトルを示した。各層厚を変えることでピーク波長が 480nm (青色) から 589nm (橙色) の広い範囲で発光が得られた。また、比較のために示した BeZnSeTe 混晶の発光スペクトルと比べ倍以上の発光強度が得られ、良好な発光特性が示された。次に、発光ピーク波長と遷移波長の理論値との比較を行った。図 16 に発光ピーク波長及び

遷移波長の理論値と超格子中の BeZnTe 層厚比の関係を示した。発光ピークと理論値が良く一致しており、波長制御性にも優れていることが分かった。続いて、BeZnTe/ZnSeTe 超格子を活性層に用いた LED を作製した。構造は、30nm 厚の BeZnTe/ZnSeTe (1ML/9ML) 超格子活性層を MgSe/BeZnTe 超格子バリア層で挟み、n クラッド層には Cl ドープ MgSe/ZnCdSe 超格子、p クラッド層には N ドープ MgSe/BeZnTe 超格子を用いたものとした。結晶成長で得られた素子ウェハに Au 電極を施し、室温におけるパルス電流駆動により発光特性を調べたところ、ピーク波長 584nm の黄色発光が観測された。このように組成制御が困難な BeZnSeTe 混晶を BeZnTe/ZnSeTe 超格子による疑似混晶とすることで組成や物性の制御性が向上し、また混晶と比べ遜色のない優れた特性が得られることが示された。

研究発表リスト

<雑誌論文>

- c1. S. Takamatsu, I. Nomura, T. Shiraishi, and K. Kishino: "Investigation of p-side contact layers for II-VI compound semiconductor optical devices fabricated on InP substrates by MBE," J. Cryst. Growth, Vol. 425, 2015, pp 199-202.
- c2. T. Shiraishi, I. Nomura, K. Murakami, S. Takamatsu, T. Kobayashi, and K. Kishino: "Formation of indium tin oxide (ITO) transparent electrodes by magnetron sputtering for II-VI compound semiconductor optical devices on InP substrates," phys. stat. soli. (c), Vol. 11, No. 7-8, 2014, pp. 1278-1281.
- c3. S. Takamatsu, I. Nomura, T. Kobayashi, K. Murakami, T. Shiraishi and K. Kishino: "Investigation of p-contact layers for BeZnSeTe/MgZnCdSe optical devices on InP substrates," phys. stat. soli. (c), Vol. 11, No. 7-8, 2014, pp. 1273-1277.
- c4. K. Murakami, I. Nomura, T. Kobayashi, T. Shiraishi, S. Takamatsu and K. Kishino: "Wide-range visible luminescence of ZnCdSe/BeZnTe type-II superlattices grown on InP substrates," phys. stat. soli. (c), Vol. 11, No. 7-8, 2014, pp. 1213-1217.
- c5. T. Kobayashi, I. Nomura, K. Murakami, and K. Kishino, "Proposal of BeZnTe/ZnSeTe superlattice quasi-quaternaries on InP substrates for yellow/green light emitting devices," J. Cryst. Growth, Vol. 378, 2013, pp 263-265.
- c6. I. Nomura, Y. Sawafuji, and K. Kishino, "Photopumped lasing characteristics in green-to-yellow range for BeZnSeTe II-VI compound quaternary double heterostructures grown on InP substrates," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 50, 2011, pp. 031201-1-8.

<図書>

なし

<学会発表>

- c7. K. Fukushima, T. Shiraishi, R. Kobayashi, K. Kishino, and I. Nomura: "Application of indium tin oxide to the p-cladding layers of yellow/green II-VI compound semiconductor laser diode structures on InP substrates," 17th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials (II-VI 2015), September 13-18, 2015, Paris, France, MoP-51, pp. 208-209.
- c8. R. Kobayashi, S. Takamatsu, K. Fukushima, K. Kishino, and I. Nomura: "Investigation of yellow/green II-VI compound semiconductor laser diode structures on InP substrates," 17th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials (II-VI 2015), September 13-18, 2015, Paris, France, MoP-56, pp. 215-216.
- c9. 福島浩二, 野村一郎, 白石智裕, 高松眞吾, 小林亮平, 岸野克巳, "InP 基板上 II-VI 族半導体レーザのための酸化インジウムスズ p クラッド層の検討", 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 13p-A17-8, 2015 年 3 月.
- c10. 小林亮平, 野村一郎, 高松眞吾, 白石智裕, 福島浩二, 岸野克巳, "InP 基板上 II-VI

- 族半導体レーザに向けた p クラッド層材料の検討”，第 62 回応用物理学会春季学術講演会，13p-A17-7，2015 年 3 月。
- c11. T. Shiraishi, I. Nomura, S. Takamatsu, and K. Kishino: “Proposal of applying indium tin oxide to p-cladding layers of green/yellow II-VI compound semiconductor laser diode structures,” 10th International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices (ISSLED 2014), Decemberr 14-19, 2014, Kaohsiung, Taiwan, Mo-P13, p. 187-188.
- c12. 高松眞吾, 野村一郎, 白石智裕, 岸野克巳, ” InP 基板上 II-VI 族半導体光デバイスの p 側電極抵抗低減に向けたコンタクト層及び電極材料の検討”，第 3 回結晶工学未来塾(2014)「工学における研究者倫理－研究者倫理の理解から論文発表まで－」，2014 年 11 月。
- c13. S. Takamatsu, I. Nomura, T. Shiraishi, and K. Kishino: “Investigation of p-side contact layers for II-VI compound semiconductor optical devices fabricated on InP substrates by MBE,” The 18th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2014), September 7-12, 2014, Flagstaff, Arizona, USA, P109, pp. 709-710.
- c14. 高松眞吾, 野村一郎, 岸野克巳, “InP 基板上 II-VI 族半導体光デバイスのための低抵抗 p 側電極の検討”，第 61 回応用物理学会春季学術講演会，18a-D2-6，2014 年 3 月。
- c15. 白石智裕, 野村一郎, 村上佳介, 小林俊輝, 高松眞吾, 岸野克巳, “InP 基板上 II-VI 族半導体光デバイスに向けた酸化インジウムスズ透明導電膜の作製と評価”，第 74 回応用物理学会秋季学術講演会，16a-B4-9，2013 年 9 月。
- c16. S. Takamatsu, I. Nomura, T. Kobayashi, K. Murakami, T. Shiraishi, and K. Kishino: “Examination of p-contact layers for BeZnSeTe/MgZnCdSe II-VI devices on InP substrates,” 16th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials (II-VI 2013), September 9-13, 2013, Nagahama, Japan, We-P41, p. 120.
- c17. T. Shiraishi, I. Nomura, K. Murakami, S. Takamatsu, T. Kobayashi, and K. Kishino: “Formation of indium tin oxide (ITO) transparent electrodes by magnetron sputtering for II-VI compound semiconductor optical devices on InP substrates,” 16th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials (II-VI 2013), September 9-13, 2013, Nagahama, Japan, We-P6, p. 85.
- c18. K. Murakami, I. Nomura, T. Kobayashi, T. Shiraishi, S. Takamatsu, and K. Kishino: “Wide-range visible luminescence of ZnCdSe/BeZnTe type-II superlattices grown on InP substrates,” 16th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials (II-VI 2013), September 9-13, 2013, Nagahama, Japan, Tu-P27, p. 51.
- c19. 高松眞吾, 野村一郎, 小林俊輝, 岸野克巳, “InP 基板上 BeZnSeTe 系 II-VI 族半導体光デバイスにおける ZnSeTe p 側コンタクト層の効果”，第 60 回応用物理学会春季学術講演会，27p-G19-3，2013 年 3 月。
- c20. T. Kobayashi, I. Nomura, K. Murakami, and K. Kishino: “Proposal of BeZnTe/ZnSeTe superlattice quasi-quaternaries on InP substrates for yellow/green light-emitting devices,” The 17th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2012), September 23-28, 2012, Nara, Japan, ThB-3-3, p. 254.
- c21. 小林俊輝, 村上佳介, 野村一郎, 白石智裕, 高松眞吾, 岸野克巳, “InP 基板上 BeZnTe/ZnSeTe 超格子擬似混晶における発光波長制御”，第 73 回応用物理学会学術講演会，14p-H8-3，2012 年 9 月。
- c22. 村上佳介, 小林俊輝, 野村一郎, 白石智裕, 高松眞吾, 岸野克巳, “InP 基板上 ZnCdSe/BeZnTe タイプ II 超格子におけるフォトルミネッセンス発光特性の評価”，第 73 回応用物理学会学術講演会，14p-H8-4，2012 年 9 月。

- c23. I. Nomura and K. Kishino: "Development of II-VI compound semiconductors on InP substrates for green and yellow lasers," The 1st Annual World Congress of Advanced Materials Conference (WCAM-2012), June 6-8, 2012, Beijing, China, Symposium 6, Session 6-3 Semiconductors, p. 178.
- c24. 小林俊輝, 野村一郎, 村石一生, 村上圭祐, 岸野克巳, "InP 基板上 BeZnTe/ZnSeTe 超格子擬似混晶の作製と評価", 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 18a-F11-5, 2012 年 3 月.