



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	青色発光素子とワイドギャップ半導体の研究
Author(s)	末宗, 幾夫
Citation	電子科学研究, 3, 20-27
Issue Date	1996-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/24337
Type	departmental bulletin paper
File Information	3_P20-27.pdf



青色発光素子とワイドギャップ半導体の研究

光材料研究分野 末 宗 幾 夫

II-VI 族半導体を用いた青色レーザの研究が進展している。しかし今後に残された課題も多い。特に金属/半導体界面における障壁のためオーミック特性が取りにくい、発光層へのキャリア閉じ込めに関するヘテロ構造の構成と不純物ドーピングにおけるアクセプター添加の限界、素子劣化に関連する欠陥が II-VI/III-V ヘテロ界面から発生している、などが現在取り組まなくてはならない主要な研究テーマである。本稿ではこれらに関する研究状況を解説すると共に、我々のこれまでの取り組みを紹介する。さらに II-VI 族半導体においては励起子効果が顕著に観測されるが、こうした励起子を用いた光素子の今後の展望についても述べる。

1. はじめに

1991 年に 3 M 研究グループから波長 490 nm 帯の青緑ダイオードレーザの低温パルス発振が報告されて以来^[1]、今日まで活発な研究開発が進められている。室温連続発振の達成初期には数秒であったレーザの寿命も^[2]、現在 2 時間程度まで改善している。このような青色レーザならびに青色発光ダイオードは、

- (1) 高密度光ディスクメモリ
- (2) フルカラーレーザディスプレイ
- (3) 高速レーザプリンター

などの実用化光源ならびに

- (4) 光計測
- (5) 光化学反応
- (6) バイオ・医学・医療

などの基礎研究用短波長光源としての応用が期待されている。特に(1)に関しては、マルチメディアの進展と共に高密度光情報記録が要望され、活発な研究開発のひとつの大きな推進要因となっている。よく知られているように、レーザの特徴のひとつは空間的な可干渉性(コヒーレンシー)であり、このおかげでレンズにより極小点に集光することができる。その絞られたビームのスポット径は、光の回折効果により波長に比例するため、短波長のレーザ光源を用いるほど高密度の情報記録ができる。

図 1 に主な II-VI 族半導体のエネルギーギャップと

格子定数を示す。現在主に研究されている青色レーザは、ZnSe を中心としたヘテロ構造であり、GaAs を基板として結晶成長が行われる。従って、GaAs 基板と同じ格子定数を持つ図の破線上に位置する ZnSSe (ZnSe と ZnS の混晶)、ZnMgSSe (ZnSSe にさらに MgS, MgSe を加えた混晶) を中心にレーザ構造が構成される。現在研究の中心である青緑色半導体レーザは発光層に ZnCdSe を用いており、GaAs 基板より格子定数が大きいため、面内に圧縮応力を受けた歪み量子井戸となっている。このような結晶構造を作成する方法としては、分子線エピタキシー (MBE) 法と有機

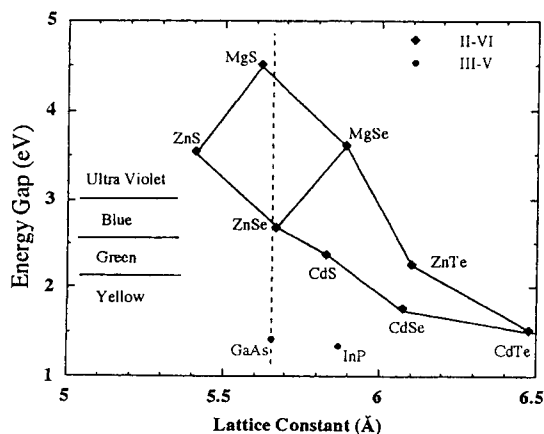


図 1 主な II-VI 族半導体のエネルギーギャップと格子定数の関係。

金属気相成長 (MOVPE) 法が主である。これまでの III-V 族半導体による赤色レーザの研究開発では MOVPE 法が主体となっているが、青色レーザの研究では特に p 形伝導度制御の問題から MBE が現在のところ主体となっている。

今後青色半導体レーザの研究をさらに推進していくための中心的な課題は、

- (1) 半導体/金属電極間のオーミック抵抗の低減
- (2) ヘテロ構造におけるキャリア閉じ込めの強化
- (3) ダイオードの長寿命化
- (4) 低消費電力化, 面発光形による光集積

などが挙げられる。本稿ではこれらの課題に対する基礎物性の観点からの我々の取り組みを中心に述べる。

2. 発光素子のオーミック特性

青緑色ダイオードレーザが初めてレーザ発振した頃、その動作電圧は 20-30 V と高く、大きな問題となった。動作電圧が高いと動作電流が同じでも消費電力が大きくなり、連続動作時に発熱で簡単に壊れてしまう。p 形 ZnSe/金属界面におけるショットキー障壁は Au, Pt が最も低い、それでも 1.3-1.4 eV あり、III-V 族半導体レーザで通常行われる界面のアニール処理を施してもオーミック抵抗が問題になることは予想はされていた。しかし観測される動作電圧はかなり大きく、これが ZnSe/金属界面の障壁によるものか結論できない状態であった。

このようなダイオードを順バイアスしたときの ZnSe/金属界面付近のバンド構造は図 2 のようになっていると考えられる。このような状態では金属/ZnSe

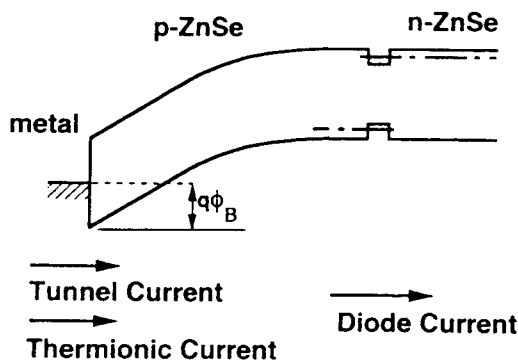


図 2 金属/p-ZnSe/n-ZnSe ダイオードをバイアスした場合のバンド構造。

界面は逆バイアス状態になっており、障壁を通して流れるトンネル電流と障壁を越える熱電子放射電流が可能である。そこで両者を考慮し、ダイオードの p-n 接合との直列接続における電流-電圧特性を解析した結果を図 3 に示す^[3]。実線で示した計算結果は、図の黒丸で示したダイオードレーザにおける測定値と広い電流範囲においてよく一致している。2 種類の電流過程の内、図の破線で示したのがトンネル電流であり、ほとんどの電流範囲でトンネル電流が支配的となり、低電圧領域の低い電流領域でのみ熱電子放射電流が寄与することがわかる。

この計算におけるフィッティングパラメータは、(1) p-ZnSe におけるアクセプター濃度、(2) ZnSe/金属界面の障壁高さと(3)ダイオードの飽和電流である。p-ZnSe におけるアクセプター濃度は不純物添加条件などの同じ他の ZnSe 膜の測定結果から求められる。ダイオード飽和電流の値はダイオード電圧を変化させるがそのおおきさは ~1 V 以下であり、図 3 の特性はほとんど障壁高さのみでフィットされる。この解析から求められる障壁高さは 0.61 eV となり、上述のショットキー障壁の ~1.4 eV に比べてかなり低い値になった。これはアニール処理による ZnSe/金属界面拡散によると思われる。実際アクセプター濃度 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ に対し障壁高さを 1.3 eV と仮定すると、流れうる電流は極端に低くなる。

この結果から障壁高さをどこまで下げれば実用的な動作が可能か調べることができる。アクセプター濃度

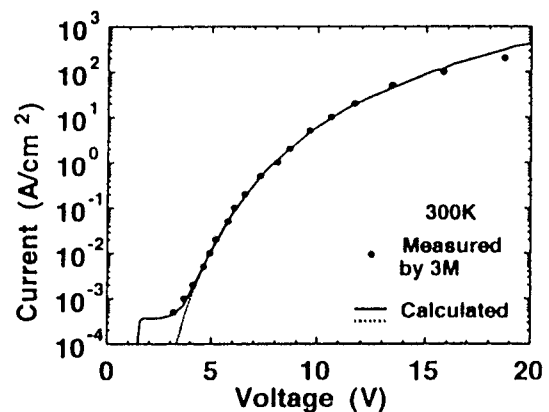


図 3 II-VI レーザダイオードの電流電圧特性 (黒丸) と理論解析結果 (実線)。破線は金属/p-ZnSe 界面におけるトンネル電流のみを考慮した場合の特性。

は同じとして、障壁高さを0.3 eVまで低減することができれば、5 V以下のダイオード電圧でレーザー発振可能な1 kA/cm²の電流を流せることがわかった^[4]。その有力な候補はp-ZnTe/Auである。そのショットキー障壁高さは~0.2 eVと低い。しかもZnTeはp形になりやすく、~10¹⁹cm⁻³の高濃度アクセプター添加が可能であるため、オーミック特性が得やすい。しかしp-ZnTeからp-ZnSeへ電流を流そうとすると、ZnTe/ZnSeヘテロ界面には価電子帯に1.29 eVものバンド不連続があり、正孔の流れを阻止するため低電圧動作を妨げてしまう。これを解決するためにZnTeからZnSeTeの混晶層を経由してZnSeへ連続的に変化するGraded Gap構造が考案された^[5]。徐々にバンドギャップを増加させればバンド不連続をなくすることができる。実際の作製ではZnSe/ZnTe超格子の層厚を徐々に変化させて疑似Graded Gap構造が作製された。これによって5 V程度のレーザー動作電圧が得られている。

しかし図1からもわかるように、ZnSeとZnTeとは格子定数がかかなり(7.6%)異なっており、上述のZnSe/ZnTeには過大な歪みによる転位・欠陥が発生している。このような欠陥の存在は、通電による特性変化を引き起こしやすく、動作電圧を低減する効果には十分な再現性がないのが現状である。一方、p-ZnSe/金属界面の障壁高さ自体を低減できそうな特性も始めている。図3の特性はMBE法で成長したダイオードに関する結果であるが、MOVPE法で成長したダイオードについても同様の検討ができる。

図4は我々がMOVPE法により成長したダイオード(黒丸)とMBE法により成長したダイオード(白丸)の電流-電圧特性を比較したものである^[6]。同じ動作電圧で比較すると明らかなように、MOVPEで成長したダイオードの場合、大幅に電流が流れやすくなっていることがわかる。この電流特性の解析からp-ZnSe/Auの障壁高さが0.37 eVと求められ、図3の0.61 eVより大幅に低減されている。この結果はダイオードの低電圧動作のために期待される0.3 eV以下にかなり近づいていることがわかる。残念ながら今の所その物理的な機構は明らかでなく、今後の研究課題である。

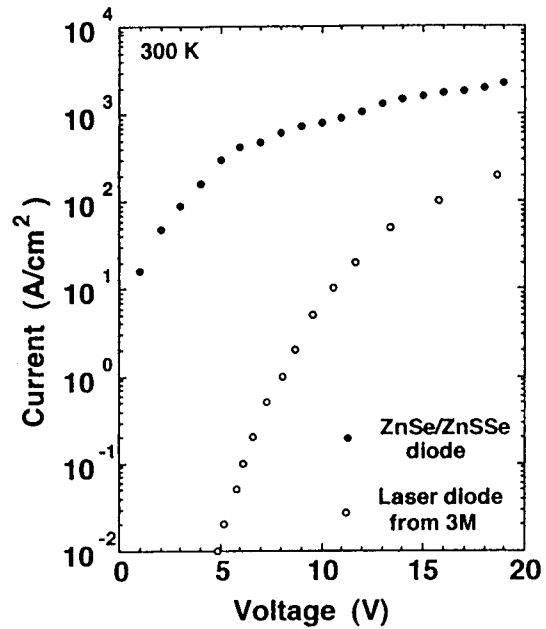


図4 MBE法で成長したレーザーダイオードの電流電圧特性(白丸)とMOVPEで成長したダイオードの特性(黒丸)の比較。

3. ヘテロ構造でのキャリア閉じ込めと不純物ドーピング

現在青緑半導体レーザーの研究は図5のZnCdSe/ZnSSe/ZnMgSSeヘテロ構造が中心である。この場合

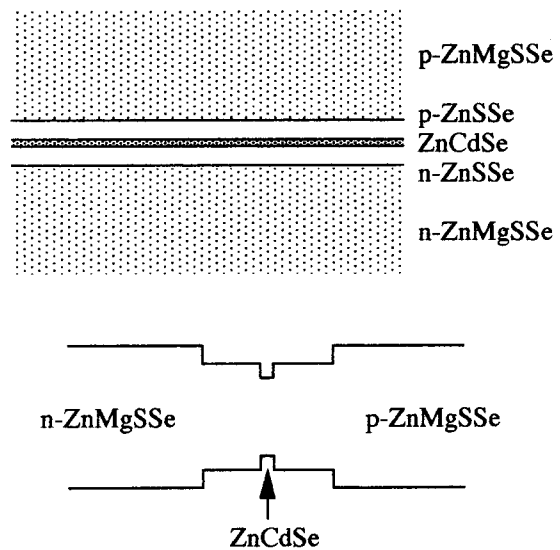


図5 ZnCdSe/ZnSSe/ZnMgSSeヘテロ構造とそのバンド図。

注入された電子と正孔を、発光層である ZnCdSe 層に強く閉じ込めることが重要である。今後さらに青色半導体レーザ、より短波長のレーザへと研究を進めるためには、図 1 から明らかなように、ZnCdSe 発光層を ZnSe, ZnSSe とワイドギャップ化していく必要がある。

ところが最近 ZnSe/ZnMgSSe ヘテロ構造におけるバンド不連続が、10%：90%で価電子帯に偏っているとの研究結果も報告されている^[7]。このような伝導帯バンド不連続が小さい状態では、特に注入された電子が ZnSe 発光層を突き抜けてしまい、いわゆるリーク電流が大きくなる恐れが大きいように思われる。この点についてさらに検討してみる。例えば ZnSe/ZnMnSe や ZnCdSe/ZnSe のように陰原子 Se を共通にもつヘテロ構造では、価電子帯のバンド不連続がほとんどない平坦な状態になりやすい (common anion rule と呼ばれる)。一方 ZnSe/ZnSSe のように陽原子 Zn を共通に持つ場合は伝導帯のバンド不連続が小さい。このような極端な例ではそれぞれ正孔、電子の閉じ込めは起こらないように思える。しかし半導体レーザのように発光層を中心に p-n 接合が形成された場合には状況が変化する^[8]。

図 6 は伝導帯、価電子帯の片側のバンド端が平坦なヘテロ構造の p-n 接合に、順バイアス V_a を加えた場合のバンド構造である。図の一点鎖線はそれぞれのフェルミレベルであり、左の n 形層のフェルミレベルは中央の発光層に注入された伝導帯電子の擬フェルミレベルと一致している。また右の p 形層のフェルミレベルは発光層に注入された価電子帯正孔の擬フェルミレベルと一致する。発光層における電子と正孔の擬フェルミレベルのエネルギー分離が順バイアスに対応するエネルギー差となる。このような状況ではもともと平坦な伝導帯や価電子帯でも、ポテンシャル分布の変化によるバリアが生じ、キャリアの閉じ込めが可能になることがわかる。この結果から明らかなように、例えば図 6 (a) で電子を閉じ込めるためポテンシャルバリアを高くするためには、図右側の p 形光閉じ込め層において

- (1) アクセプター濃度を高くしてフェルミレベルを価電子帯に近づける
- (2) エネルギーギャップ (発光層とのエネルギーギャップ差) を大きくする

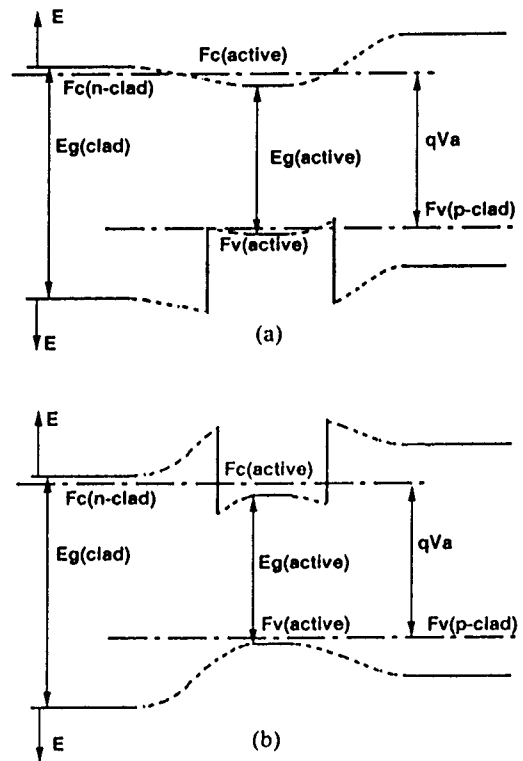


図 6 伝導帯が平坦なヘテロ構造(a)と価電子帯が平坦なヘテロ構造(b)からなる pin ダイオードを順バイアスした場合のバンド図。

ことが有効である。具体的な計算例として、p 形層のアクセプター濃度 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ において電子のリーク電流を無視できる程度に抑えるには、エネルギーギャップ差として 0.3 eV 以上が要求される^[8]。

このように p-n ヘテロ接合においてキャリアを閉じ込めるには、バンド不連続そのものよりも光閉じ込め層のエネルギーギャップを大きくし、アクセプター濃度を高める必要がある。ところがこの点が現在ひとつの大きな課題として残されている。図 1 の破線に沿って ZnMgSSe 中の Mg, S の組成を増していくとある程度までエネルギーギャップを増加させることはできる。ところがそれに伴って添加できるアクセプター濃度が大幅に低下してしまう^[9]。エネルギーギャップ $\sim 2.7 \text{eV}$ の ZnSe に対して 0.3 eV エネルギーギャップの大きい ZnMgSSe では、添加できるアクセプター濃度は $\sim 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ まで低下する。その機構として現在有力になりつつあるのが amphoteric native defect model である^[9]。

このモデルは主に III-V 族半導体の不純物添加限界を説明するために考えられたもので、多くの III-V 族半導体における p 形、n 形不純物添加限界を合理的に説明する。その基本的な考え方は、III-V 族半導体には共通のフェルミレベルの安定化するエネルギー位置があり、不純物の添加によりフェルミレベルがこの安定化エネルギーからずれようとする、これを補償してフェルミレベルを安定化エネルギーの位置に戻そうとする欠陥が生じるというものである。このモデルでは、こうした不純物添加とこれを補償する欠陥生成の均衡により、安定化エネルギーから変化しうるフェルミエネルギーの上限と下限が決まる。また安定化エネルギーは共通と考えるから、価電子帯のエネルギーが真空準位に近い半導体ほど p 形高濃度ドーピングしやすく、n 形ドーピング濃度の上限は低くなる。逆に価電子帯のエネルギーが真空準位から離れた半導体では、n 形高濃度ドーピングしやすく、p 形ドーピング濃度の上限は低くなる。

このモデルによって、ZnSe では n 形高濃度ドーピングしやすく p 形ドーピング濃度の上限が低い、ZnTe では p 形高濃度ドーピングしやすく n 形ドーピングが困難であることが説明できる。ZnSe に比べ ZnS では価電子帯バンド端が真空準位からより大きく離れているため、p 形ドーピング濃度の上限は低くなる。したがって、より S 組成の大きい ZnMgSSe ほど p 形ドーピングが困難になる。このワイドギャップに伴う ZnMgSSe におけるドーピングの問題が本質的であるとすると、上記のダイオードリーク電流の問題は解決できないことになる。かつて ZnSe においても p 形ドーピングが不可能な時代が長く続き、自己補償効果の“理論”によって本質的に解決できない問題と考えられていたが、今そうした雰囲気が強まりつつある。この問題の落ちつくところは今後の展開に待つことになるが、p 形ドーピングが困難である ZnS においてもかつて $6 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のアクセプター濃度が報告されたり、 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ がアクセプター添加の上限とされている ZnSe で Li と P の Codoping により $\sim 7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のアクセプター濃度が得られるなどの例外も報告されており、今後さらにブレイクスルーが見られる可能性も残されている。

4. 素子劣化の問題

青緑 II-VI 半導体レーザの当面の課題に素子寿命の改善が挙げられる。劣化した素子の発光層には欠陥の増殖が見られるが、そのもとになる欠陥は GaAs 基板とのヘテロ界面から発生しており^[10]、その密度を低減することによりこれまで寿命の改善が進んできた。こうしたヘテロ界面から欠陥が発生する要因のひとつに、S と GaAs 表面の化学反応が挙げられる。GaAs 表面に S を照射すると明瞭な As の脱離が観測されると共に、その GaAs 表面を原子間力顕微鏡 (AFM) で観測すると、図 7 に示すように表面の特定結晶方向 (<-110> 方向：図の左右方向) に向いた $\sim 10 \text{nm}$ 程度の大きさの微小な孔が無数に生じていることがわかった^[11]。このような (001) 表面とは異なる結晶面からなる孔が生じると、二次元的に平坦な原子面成長が起こらなくなり、欠陥が生じやすくなる。この点は S を含まない ZnSe バッファ層を GaAs 表面に成長することで解決できる。しかし ZnSe/GaAs 界面においても、(1) GaAs 表面の原子レベル平坦性、(2) 界面における Ga-Se, As-Zn などの化学結合の違いによって欠陥の生成密度が変化する。そのため GaAs バッファ層を成長して GaAs 表面を平坦化し、界面で As-Zn 結合が生じるように制御することにより欠陥密度が $\sim 10^5 \text{cm}^{-3}$ まで低減されている。この欠陥密度が今後さらに一桁程度低減されれば、素子寿命は飛躍的に向上す

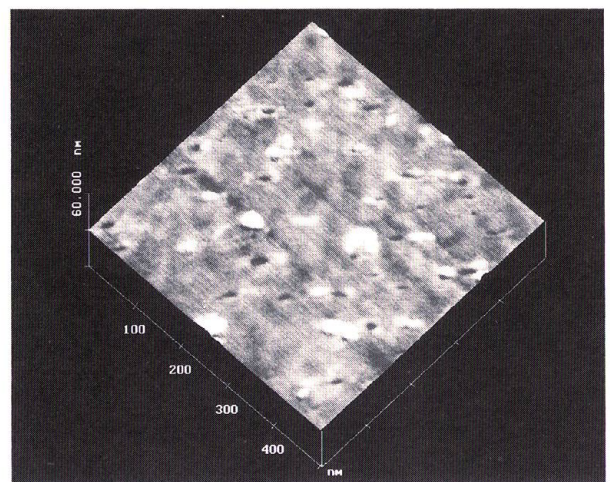


図 7 450°C の GaAs (001) 表面に S を照射し、AFM で観察した表面 (500 nm × 500 nm)。図の左右 (<-110> 方向) に向いた $\sim 10 \text{nm}$ 程度の微小な孔が多数観測される。白っぽい突起物は S 照射による反応生成物ではないかと思われる。

と期待されている。そのためにはさらに界面特性の研究を進める必要がある。

5. II-VI 半導体超格子と励起子光物性

光物性の観点から見ると、青色発光するワイドギャップ II-VI 族半導体では、励起子効果が顕著に観測される。通常、電子と正孔は別々に働くキャリアとして扱われる。一方、互いに異符号の電荷を持つことによるクーロン相互作用により、電子と正孔が励起子という対で準安定状態を形成する可能性がある。III-V 族半導体の代表としての GaAs と、II-VI 族半導体の代表としての ZnSe の励起子特性を比べると、GaAs における束縛エネルギーが ~ 5 meV であるのに対して、ZnSe では ~ 18 meV と大きく、ZnSe における励起子の方が振動子強度がかなり大きい（光学遷移確率が大きい）。これから、ZnSe などにおいては励起子に関連した光学利得が大幅に増大する可能性がある^[12]。光学利得が大きくなればそれだけ発光領域の体積を低減でき、レーザの低消費電力化が可能となる。また共振器長の短い面発光レーザにおいても、光学利得の増大は高い反射率のミラーを要求する制約条件を緩和してくれる。さらに励起子分子を用いた高性能レーザの提案もある^[13]。

量子閉じ込め効果を導入すると、このような励起子特性をより増大させることができる。そのためには、伝導帯ならびに価電子帯双方に大きなバンド不連続を持ったヘテロ構造が必要である。こうした観点から我々は、図 1 の GaAs の格子定数に近く、かつバンドギャップ差の大きい ZnSe/MgS 超格子を提案し、その製作を進めている^[14]。そのバンド不連続の大きさの正確な値は今後の検討を待たなければならないが、コモンアニオン則に従えば伝導帯で 670 meV、価電子帯で 980 meV と大きな不連続が可能となる。これを考慮して、2 変数の変分法により励起子の束縛エネルギーを計算した結果を図 8 に示す^[15]。大きなバンド不連続のため、井戸層が薄くなるにつれて量子閉じ込めが強くなり、励起子束縛エネルギーが増大するのがわかる。一方伝導帯のバンド不連続が小さい ZnSe/ZnSSe 超格子では電子に対する量子閉じ込めが起らず、井戸幅の減少による量子閉じ込めは顕著に認められない。

一般にイオン性の強い化合物半導体では、光学フォノン散乱が励起子の（コヒーレント）寿命を決める。

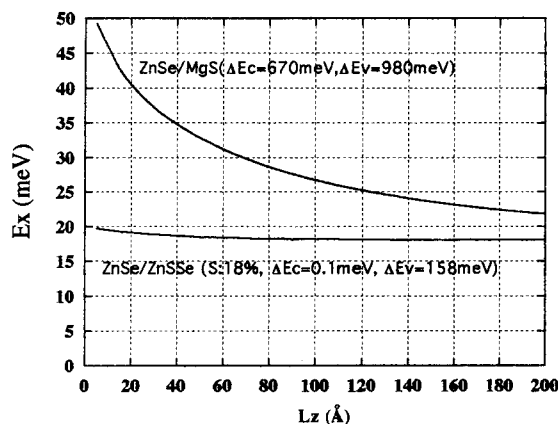


図 8 ZnSe/MgS 量子井戸と ZnSe/ZnSSe 量子井戸における励起子束縛エネルギーの井戸幅依存性の計算結果。

温度の上昇によりフォノン密度が増加し散乱が強まるにつれ、発光線幅が大きくなり励起子の寄与は顕著でなくなる。この場合、励起子束縛エネルギーが増大し光学フォノンエネルギー（ZnSe では ~ 31 meV）より大きくなると、励起子束縛状態から連続状態へのフォノン散乱が起きなくなり、線幅の低減が可能となる。実際に ZnCdSe/ZnSe 系では量子閉じ込めによるフォノン散乱の低減が観測されている^[16]。室温においても線幅の狭い励起子発光が得られれば、数々の可能性が広がってくる。励起子の非線形性を利用した光メモリーも室温動作が可能となる。また微小光共振器構造における自然放出光の制御においても、狭い発光線幅の自然放出光を利用することが基礎ならびに応用の各分野で重要であり、この点が今後実的な室温動作の鍵を握っている。

一方状態密度の観点からみると、一次元量子井戸からさらに二次元、三次元と量子閉じこめした量子細線、量子箱などでは、光学遷移するバンド端に状態密度が集中し、レーザ発振に必要な電流密度が低減できることはよく知られている。こうした多次元量子閉じ込め構造を形成するために、微細加工、選択成長、マクロステップの利用、表面脱離と凝集機構の利用など、様々な研究が進められている。しかし現在用いられている 10 nm 以下の量子井戸幅と同程度の多次元微細量子閉じ込め構造を形成するのは容易ではない。

その点すでに製作可能な量子井戸の井戸幅の変化を積極的に利用することも考えられる。我々は井戸幅が

2 nm と狭い ZnSe/ZnS_{0.11}Se_{0.89} 超格子構造において、ZnSe 井戸層の界面揺らぎによって形成された局在励起子によると思われる明瞭な吸収ピークを観測した。吸収端近くでの吸収スペクトルは、フォノンとの相互作用による Urbach Tail により通常緩やかなすそひきが観測されるが、図9に示す ZnSe/ZnS_{0.11}Se_{0.89} 超格子の例においては、主な HH 1 吸収スペクトルより長波長側に、1/5 程度の強度ではあるが明瞭な吸収ピークが観測された^[17]。さらにこの吸収ピークは PL 発光ピーク位置と一致しており、励起強度を少し大きくしただけでこの低エネルギー側の発光が強くなる。これは周りのより高いエネルギー状態から局在励起子状態に、励起されたキャリアが流れ込むためと考えられる。さらに共振器構造を形成して表面から光励起することにより、この局在励起子に関連した励起子-電子散乱による誘導放出を観測した。今後さらに成長方法ならびに構造評価法の検討を進めることにより、こうした自然量子井戸箱ともいえる構造の実現が容易になり、より強い励起子効果に基づいた高性能青色レーザの開発が期待される。

6. おわりに

主に青色半導体レーザに関連した II-VI ワイドギャップ半導体の研究について、我々の研究から見た現状と今後の課題について述べた。各項目で述べたよ

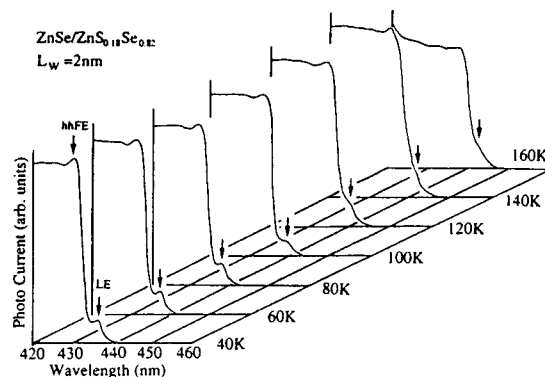


図9 井戸幅 2 nm の ZnSe/ZnS_{0.11}Se_{0.89} 超格子において測定された光吸収によって生じる光電流スペクトルの温度依存性。矢印の位置に局在エキシトンによる吸収ピークが観測される。

うに、今後さらにレーザ特性の向上を進めるためには、基礎材料物性に関する研究をより積極的に進める必要がある。また励起子効果を積極的に取り入れた高性能光素子の研究も大いに将来性が期待される。本稿では II-VI 族半導体について述べたが、窒化物半導体も青色発光ダイオードが実用化されるなど最近研究が進んでいる。今後基礎物性の観点からも、II-VI 族半導体と窒化物半導体でのイオン性の違いによる光物性の比較、素子劣化機構の違いなど、興味深い課題の解明が望まれる。

【参考文献】

- [1] M. A. Haase, J. Qiu, J. M. DePuydt, and H. Cheng, Appl. Phys. Lett. 59, 1272 (1991).
- [2] N. Nakayama, S. Itoh, T. Ohata, K. Nakano, H. Okuyama, M. Ozawa, A. Ishibashi, M. Ikeda, and Y. Mori, Electron. Lett. 29, 16, 1488 (1993).
- [3] I. Suemune, Appl. Phys. Lett. 63, 2612 (1993).
- [4] I. Suemune, J. Cryst. Growth 138, 714 (1994).
- [5] Y. Fan, J. Han, L. He, J. Saraie, R. L. Gunshor, M. Hagerott, H. Jeon, A. V. Nurmikko, G. C. Hua, and N. Otsuka, Appl. Phys. Lett. 61, 26, 3160 (1992).
- [6] Y. Fujii, I. Suemune, and M. Fujimoto, Jpn. J. Appl. Phys. 33, 1B, 840 (1994).
- [7] K. Shahzad, J. Petruzzello, J. M. Gaines, and C. Ponzoni, Appl. Phys. Lett. 67, 5, 659 (1995).
- [8] I. Suemune, Jpn. J. Appl. Phys. 31, 2A, L95 (1992).
- [9] K. Kondo, H. Okuyama, and A. Ishibashi, Appl. Phys. Lett. 64, 25, 3434 (1994).
- [10] S. Guha, J. M. DePuydt, J. Qiu, G. E. Hofler, M. A. Haase, B. J. Wu, and H. Cheng, Appl. Phys. Lett. 63, 22, 3023 (1993).
- [11] 佐藤剛, 大日向利朗, 星山満雄, 末宗幾夫, 第 41 回応用物理学会講演予稿 (1994 年 3 月 28 日~31 日) 28 pW 3.
- [12] T. Uenoyama, Phys. Rev. B51, 15, 10228 (1995).
- [13] 塩谷繁雄, 固体物理, 30, 5, 24 (1995).
- [14] 植杉克弘, 大日向利朗, 熊野英和, 末宗幾夫, 電子科学研究, 3 (1995).
- [15] I. Suemune, (unpublished).
- [16] N. T. Pelekanos, J. Ding, M. Hagerott, and A. V.

Nurmikko, Phys. Rev. B45, 11, 6037 (1992).

Phys. Lett. 61, 10, 1182 (1992).

[17] Y. Kuroda, I. Suemune, Y. Fujii, and M. Fujimoto, Appl.