

学位論文題名

Study of Selectively Grown II – VI Semiconductor
Photonic Dots Toward Small Light Emitters

(微小発光素子作製を目指したII – VI族化合物半導体選択成長
フォトリックドットに関する研究)

学位論文内容の要旨

微小光共振器構造は光と物質の相互作用により自然放出光の制御を可能とすることから、無しきい値半導体レーザの実現、光・電子相互作用の量子制御による興味深い物理現象解明などを目指し広く研究が行われている。これまで主に研究の行われてきた微小共振器構造は、分布反射ブラッグミラー (DBR)を用いた 1 次元微小共振器構造であった。しかし、この構造では光の閉じ込めは 1 次元のみであり、自然放出光の制御は理論的にも 3 倍程度と限定されたものになってしまう。より強いプーセル効果による自然放出光の制御を可能とするためには、共振の良さを示す Q 値が高いこと、光の量子閉じ込めを強くするために共振器体積を光の波長程度にすることが必要とされる。

そこで本論文では光を 3 次元的に量子閉じ込めする新しい構造であるフォトリックドット構造を提案し、その検討を進めている。フォトリックドット構造は自然放出レートを増大させる際に必要な要素である高い共振の Q 値、光の量子閉じ込めを強くするための光の波長程度の共振器体積の二つを実現する可能性を持つ構造であり、高性能な微小発光素子としての応用、光・電子相互作用の量子制御による興味深い物理現象解明が期待できる。

サブミクロンサイズ(光の波長サイズ)の構造を作製する方法としてはエッチング法と選択成長法が主に挙げられる。両者とも構造の空間配列が可能であるが、選択成長法は側壁が自然形成されるためエッチング法では懸念される表面へのダメージもなく構造を作製することが出来る。このようなことから、フォトリックドット構造の作製方法としては選択成長法が最適である。

本論文では青-緑波長領域の発光素子材料として期待されているワイドギャップ II-VI 族化合物半導体を有機金属分子線エピタキシー法(MOMBE 法)で選択成長させることで作製したフォトリックドットについての検討を進めている。

まず、フォトリックドット構造作製技術の確立を目指し、ワイドギャップ II-VI 族化合物半導体の選択成長メカニズムの検討を行っている。具体的には SEM 内で電子ビームにより堆積させた極めて薄いカーボン膜をマスク材料として使用する。このカーボン膜は従来のマスク材料に比べて低温で ZnS、ZnSe の選択成長が可能である。さらに、ZnS、ZnSe、CdS の選択成長初期における遅れ時間の発生、選択成長において形成されるピラミッド構造と各ファ

セット面の成長速度とピラミッド構造完結に関する理論的な検討などを行っている。

次に、選択成長させた ZnS ピラミッド構造の光共振器特性の評価を行い、3000 以上の高い Q 値を持つ共振ピークを観測している。このような $0.5\mu\text{m}$ 程度の小さな微小光共振器の実現は世界初である。さらに、発光層を組み込んだ ZnS フォトニックドット構造からの発光特性において室温での自然放出光の変調を確認している。このように本論文ではフォトニックドットを用いた高速、高性能な単一モード微小発光素子を実現する可能性について研究を進めている。

以下に本論文の構成を示す。

第 1 章では、序章として本研究の背景、目的、本論文の構成について述べている。

第 2 章では、II-VI 族化合物半導体の選択成長メカニズムについて述べている。まず、選択成長に用いるカーボンマスクの堆積条件、ZnS の選択成長におけるファセット形状のマスクパターンニングによる制御、選択成長初期における遅れ時間の存在、各ファセット面の成長速度とピラミッド構造完結に関する理論的な検討について示している。これらの結果より選択成長させた ZnS の形状、サイズを制御できることを示している。

次に、発光層を ZnS 内に組み込むことを想定し、ZnSe、CdS の ZnS 構造内での選択成長メカニズムについて検討している。この結果により、内部での発光層の位置把握が出来ることを示している。

第 3 章では、第 2 章で議論した選択成長 ZnS ピラミッド構造の光共振器特性について述べている。インコヒーレント光を用いた測定ながら、 $1\mu\text{m}$ 以下の微小領域の反射測定法を確立することで ZnS ピラミッド構造の顕微反射測定による共鳴ピークの観測より、ZnS ピラミッド構造が光を 3 次元的に量子閉じ込めするフォトニックドット構造として働いていることを示している。さらに、観測された共振の Q 値は 3000 以上と高い値を観測しており、良好なフォトニックドットとして働くことを示している。また、フォトニックドットの共振ピーク波長の実験結果が理論的解析で説明できることを示している。

第 4 章では発光層を組み込んだ ZnS フォトニックドット構造の発光特性について述べている。ZnSe を発光層とした ZnS フォトニックドット構造からの発光特性において自然放出光の変調を確認したが、変調の効果が弱く、第 2 章で議論した ZnSe 発光層のピラミッド内部での堆積状況と発光特性に対する検討を行っている。さらに、CdS 発光層の導入が改善策として有効であることを示し、CdS 発光層を用いた ZnS フォトニックドット構造からの室温での発光特性について議論している。これにより、自然放出光の顕著な変調を確認し、高性能な微小発光素子としてフォトニックドット構造が有用であることを示している。

第 5 章では、本研究における成果を総括し、今後の展望について述べている。

最後に、著者は光を 3 次元的に量子閉じ込めするピラミッド型フォトニックドット構造を提案し、高い Q 値を持つ微小 3 次元光共振器として動作することならびに自然放出光の変調を確認し、フォトニックドット構造の高性能な微小発光素子実現への可能性を示すとともに、物質からの発光過程の制御、高効率発光素子への応用に関する有益な知見を得た。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 末 宗 幾 夫
副 査 教 授 武 笠 幸 一
副 査 教 授 福 井 孝 志
副 査 教 授 笹 木 敬 司

学 位 論 文 題 名

Study of Selectively Grown II – VI Semiconductor Photonic Dots Toward Small Light Emitters

(微小発光素子作製を目指したII – VI族化合物半導体選択成長
フォトニックドットに関する研究)

微小光共振器構造は光と物質の相互作用により自然放出光の制御を可能とすることから、無しきい値半導体レーザの実現、光・電子相互作用の量子制御による興味深い物理現象解明などを目指し広く研究が行われている。これまで主に研究の行われてきた微小共振器構造は、分布反射ブラッグミラー (DBR)を用いた 1 次元微小共振器構造であった。しかし、この構造では光の閉じ込めは 1 次元のみであり、自然放出光の制御は理論的にも 3 倍程度と限定されたものになってしまう。より強いプーセル効果による自然放出光の制御を可能とするためには、共振の良さを示す Q 値が高いこと、光の量子閉じ込めを強くするために共振器体積を光の波長程度にすることが必要とされる。

そこで本論文では光を 3 次元的に量子閉じ込めする新しい構造であるフォトニックドット構造を提案し、その検討を進めている。フォトニックドット構造は自然放出レートを増大させる際に必要な要素である高い共振のQ値、光の量子閉じ込めを強くするための光の波長程度の共振器体積の二つを実現する可能性を持つ構造であり、高性能な微小発光素子としての応用、光・電子相互作用の量子制御による興味深い物理現象解明が期待できる。

サブミクロンサイズ(光の波長サイズ)の構造を作製する方法としてはエッチング法と選択成長法が主に挙げられる。両者とも構造の空間配列が可能であるが、選択成長法は側壁が自然形成されるためエッチング法では懸念される表面へのダメージもなく構造を作製することが出来る。このようなことから、フォトニックドット構造の作製方法としては選択成長法が最適である。

本論文では青-緑波長領域の発光素子材料として期待されているワイドギャップ II-VI 族化合物半導体を有機金属分子線エピタキシー法(MOMBE 法)で選択成長させることで作製したフォトニックドットについての検討を進めている。

まず、フォトニックドット構造作製技術の確立を目指し、ワイドギャップ II-VI 族化合物半導体の選択成長メカニズムの検討を行っている。具体的には SEM 内で電子ビームにより堆

積させた極めて薄いカーボン膜をマスク材料として使用する。このカーボン膜は従来のマスク材料に比べて低温で ZnS、ZnSe の選択成長が可能である。さらに、ZnS、ZnSe、CdS の選択成長初期における遅れ時間の発生、選択成長において形成されるピラミッド構造と各ファセット面の成長速度とピラミッド構造完結に関する理論的な検討などを行っている。

次に、選択成長させた ZnS ピラミッド構造の光共振器特性の評価を行い、3000 以上の高い Q 値を持つ共振ピークを観測している。このような $0.5\mu\text{m}$ 程度の小さな微小光共振器の実現は世界初である。さらに、発光層を組み込んだ ZnS フォトニックドット構造からの発光特性において室温での自然放出光の変調を確認している。このように本論文ではフォトニックドットを用いた高速、高性能な単一モード微小発光素子を実現する可能性について研究を進めている。

以下に本論文の構成を示す。

第 1 章では、序章として本研究の背景、目的、本論文の構成について述べている。

第 2 章では、II-VI 族化合物半導体の選択成長メカニズムについて述べている。まず、選択成長に用いるカーボンマスクの堆積条件、ZnS の選択成長におけるファセット形状のマスクパターンニングによる制御、選択成長初期における遅れ時間の存在、各ファセット面の成長速度とピラミッド構造完結に関する理論的な検討について示している。これらの結果より選択成長させた ZnS の形状、サイズを制御できることを示している。

次に、発光層を ZnS 内に組み込むことを想定し、ZnSe、CdS の ZnS 構造内での選択成長メカニズムについて検討している。この結果により、内部での発光層の位置把握が出来ることを示している。

第 3 章では、第 2 章で議論した選択成長 ZnS ピラミッド構造の光共振器特性について述べている。インコヒーレント光を用いた測定ながら、 $1\mu\text{m}$ 以下の微小領域の反射測定法を確立することで ZnS ピラミッド構造の顕微反射測定による共鳴ピークの観測より、ZnS ピラミッド構造が光を 3 次元的に量子閉じ込めするフォトニックドット構造として働いていることを示している。さらに、観測された共振の Q 値は 3000 以上と高い値を観測しており、良好なフォトニックドットとして働くことを示している。また、フォトニックドットの共振ピーク波長の実験結果が理論的解析で説明できることを示している。

第 4 章では発光層を組み込んだ ZnS フォトニックドット構造の発光特性について述べている。ZnSe を発光層とした ZnS フォトニックドット構造からの発光特性において自然放出光の変調を確認したが、変調の効果が弱く、第 2 章で議論した ZnSe 発光層のピラミッド内部での堆積状況と発光特性に対する検討を行っている。さらに、CdS 発光層の導入が改善策として有効であることを示し、CdS 発光層を用いた ZnS フォトニックドット構造からの室温での発光特性について議論している。これにより、自然放出光の顕著な変調を確認し、高性能な微小発光素子としてフォトニックドット構造が有用であることを示している。

第 5 章では、本研究における成果を総括し、今後の展望について述べている。

これを要するに、著者は光を 3 次元的に量子閉じ込めするピラミッド型フォトニックドット構造を提案し、高い Q 値を持つ微小 3 次元光共振器として動作することならびに自然放出光の変調を確認し、フォトニックドット構造の高性能な微小発光素子実現への可能性を示すとともに、物質からの発光過程の制御、高効率発光素子への応用に関する有益な知見を得たものであり、光エレクトロニクス分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。