

学位論文題名

Fabrication and Characterization of  
GaAs-based Photonic Crystals by  
Selective Area Metalorganic Vapor Phase Epitaxy

(有機金属気相選択成長法による  
ガリウム砒素系フォトニック結晶の作製と評価)

学位論文内容の要旨

フォトニック結晶は、屈折率の異なるものが光の波長程度の周期で周期的に配列されたものであり、光を微小空間において様々に制御することができる。一つの大きな特徴として、フォトニックバンドギャップ (PBG) の発現が挙げられる。これは結晶中の電子のバンドギャップに類似したもので、PBG を持つフォトニック結晶中においては光の伝搬や光の存在そのものを禁止する。そのため、周期性に乱れを導入すると、バンドギャップ中に準位が形成され、その部分に光が集中する。そのため高効率な光導波路や共振器として応用することが可能である。また、自然放出光の制御やこれらの集積化による微小な光集積回路への応用も提案されている。

有機金属気相選択成長法は、部分的に非晶質マスクを堆積させたパターン基板を作製し、その基板上に半導体材料を気相エピタキシャル成長することによって、半導体結晶低指数面 (ファセット) によって囲まれた様々な立体構造を作製することができる方法である。この手法を(111)面パターン基板に行うと、成長条件によっては[-110]垂直側面によって囲まれた立体構造を作製することが可能である。成長前のマスクパターンを工夫することにより、(111)面の三回対称性を反映して六角柱や三角柱、六角空孔、三角空孔といった周期構造を作製することができる。

本研究では、二次元的に周期性を持った化合物半導体二次元フォトニック結晶を作製する手法の一つとして、有機金属気相選択成長法を用いた新しい作製法を提案し、実際にこの手法を用いて GaAs 系二次元フォトニック結晶の試作を行った。これまで二次元フォトニック結晶は、主にドライエッチング法などを用いて作製されてきたが、この方法は設計の自由度が高いものの、側面の凹凸やプロセス中の結晶へのダメージなどの問題があり、光制御効率が低下し、いまだ実用化にいたっていない。これに対し有機金属気相選択成長を用いた方法は、側面ファセットによる平滑な垂直側面、プロセスによるダメージがない、構造中への量子構造 (発光層) の完全な埋め込みなどの利点が考えられ、光制御効率・発光効率の向上が期待される。

本論文は六章から構成されている。以下に各章の詳細を記す。

第一章においては、本研究の歴史的背景とフォトニック結晶、有機金属気相選択成長法について説明し、その後本研究の目的と各章の概要について記している。

第二章では、有機金属気相選択成長法を用いた周期構造の作製手順、特に成長に用いるパターンマスク基板の作製方法、また周期構造作製に用いた装置の説明を記している。

第三章では、有機金属気相選択成長法を用いた二次元六角柱型フォトニック結晶の作製について説明を行う。はじめにこの構造のフォトニックバンド計算の結果を示し、TM偏光の光においてフォトニックバンドギャップが形成されることを確認した。その後、作製プロセスを説明し、実際の成長結果から六角柱周期配列の成長メカニズム、Al組成依存性等を考察した。成長表面でのAs被覆率や成長温度、成長原子の吸着率によって核形成に影響が出るため、成長条件によって形状が変化することが明らかになった。

第四章では、有機金属気相選択成長法を用いた二次元六角空孔型フォトニック結晶の作製について述べる。はじめに、この構造のフォトニックバンド構造の計算結果を示し、TE偏光の光についてフォトニックバンドギャップが形成されることを確認した。次に成長プロセスを説明し、その後、GaAs六角空孔周期配列の形成についてその基板面方位依存性と成長条件依存性を記した。具体的には、(111)A面上を用いた場合、垂直ファセットが形成される条件が狭く、また横方向への成長が促進してしまうことが明らかになった。また(111)B面を用いた場合、高温・低As圧下で垂直側面を保ったまま横方向成長を抑制することに成功した。次に光情報通信波長帯域の光の制御のため、周期配列の短周期化に取り組んだ。短周期化することにより、横方向成長が長周期のときと比較して顕著になったため、結晶成長の際のガス供給過程を工夫することで、成長表面でのAs被覆率を低減させ横方向成長の抑制に成功した。また発光素子への応用を考え、AlGaAsでの周期配列の作製にも取り組んだ。Al原子はGa原子よりも吸着しやすいため、横方向成長が顕著になることが明らかになった。さらに、ここでは完全PBGの形成が期待される二次元三角空孔型フォトニック結晶の作製にも取り組み、その結果を述べている。様々なマスクパターンの基板を用いて作製した結果、六角空孔周期配列から横方向成長を用いて作製したものが、より制御性に優れていることを確認した。

第五章では、実際にフォトニック結晶へと応用するため、中空構造を用いたGaAs二次元フォトニック結晶スラブの作製に取り組んだ。これは、AlGaAs犠牲層を成長したのちGaAs周期配列を作製し、さらに犠牲層を選択エッチングすることによって作製を行った。また、発光素子への応用のため、GaAs量子井戸を埋め込んだAlGaAs周期配列の作製を行い、その断面SEM像などにより埋め込み量子井戸の作製を確認した。

第六章では以上のことをまとめて結論を出し、将来の展望を述べている。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 福井孝志  
副査 教授 橋詰保  
副査 教授 雨宮好仁  
副査 助教授 本久順一

学位論文題名

## Fabrication and Characterization of GaAs-based Photonic Crystals by Selective Area Metalorganic Vapor Phase Epitaxy

(有機金属気相選択成長法による  
ガリウム砒素系フォトニック結晶の作製と評価)

フォトニック結晶は、屈折率の異なる物質が光の波長程度の周期で周期的に配列されたものであり、光を微小空間において様々に制御することができる。一つの大きな特徴として、フォトニックバンドギャップ (PBG) の発現が挙げられる。これは結晶中の電子のバンドギャップに類似したもので、PBG を持つフォトニック結晶中においては特定波長の光の伝搬を禁止する。そのため、周期性に乱れを導入すると、PBG 中に準位が形成され、その部分に光を集中させることもできる。これにより高効率な光導波路や共振器として応用することが可能である。また、自然放出光の制御やフォトニック結晶を用いた光導波路、共振器等の集積化による微小な光集積回路への応用も提案されている。

有機金属気相選択成長法は、部分的に非晶質マスクを堆積させたパターン基板を作製し、その基板の上に半導体材料を気相エピタキシャル成長することによって、半導体結晶低指数面 (ファセット) によって囲まれた様々な立体構造を作製することができる方法である。この手法を GaAs(111)面パターン基板に行うと、成長条件によっては[-110]垂直側面によって囲まれた立体構造を作製することが可能である。

本研究では、化合物半導体二次元フォトニック結晶を作製する手法の一つとして、有機金属気相選択成長法を用いた新しい作製法を提案し、実際にこの手法を用いて GaAs 系二次元フォトニック結晶の試作を行った。これまで二次元フォトニック結晶は、主にドライエッチング法などを用いて作製されてきたが、側面の凹凸やプロセス中の結晶へのダメージなどの問題があり、光制御効率が低下し、いまだ実用化にいたっていない。これに対し有機金属気相選択成長を用いた方法は、側面ファセットによる平滑な垂直側面、プロセスに

よるダメージがない、構造中への量子構造（発光層）の完全な埋め込みなどの利点が考えられ、光制御効率・発光効率の向上が期待される。

本論文は六章から構成されている。以下に各章の詳細を記す。

第一章においては、序論として本研究の歴史的背景とフォトニック結晶、有機金属気相選択成長法について説明し、その後に本研究の目的と各章の概要について記している。

第二章では、有機金属気相選択成長法を用いた周期構造の作製手順、特に成長に用いるパターンマスク基板の作製方法、また作製に用いた装置の説明を記している。

第三章では、有機金属気相選択成長法を用いた二次元六角柱型フォトニック結晶の作製について記している。はじめにこの構造のフォトニックバンド計算の結果を示し、TM 偏光の光においてフォトニックバンドギャップが形成されることを確認している。その後、実際の成長結果から六角柱周期配列の成長条件・Al 組成依存性を考察し、成長表面での As 被覆率や成長温度、成長原子の吸着率が核形成に影響を及ぼすことを明らかにしている。

第四章では、有機金属気相選択成長を用いた二次元空孔型フォトニック結晶の作製について記している。はじめに、この構造のフォトニックバンド構造の計算結果を示し、TE 偏光の光についてフォトニックバンドギャップが形成されることを確認している。次に GaAs 六角空孔周期配列の形成についてその基板面方位依存性と成長条件依存性を記している。具体的には、空孔内部方向への横方向成長を抑制するため、基板としては(111)B 面、成長条件としては高温、低 As 被覆率、低成長速度を用い、成長表面からの脱離レートを高めることにより、均一でマスク形状を踏襲した構造の作製に成功している。また、結晶成長の際のガス供給過程を工夫することで、成長表面での As 被覆率を低減させ、従来、横方向成長が顕著であったサブミクロン周期での構造でも、横方向成長の抑制に成功している。さらに、ダブルヘテロ接合を用いた発光素子応用のため、AlGaAs 周期配列の作製にも取り組んでいる。結果として、Al 原子は Ga 原子よりも吸着しやすいため、横方向成長が顕著になることを明らかにしている。最後に、完全 PBG の形成が期待される二次元三角空孔型フォトニック結晶について、六角空孔周期配列の三つのコーナーからの横方向成長を上手に利用することで、三角空孔周期配列の作製に成功している。

第五章では、空孔周期配列のスラブ構造への応用のため、エアブリッジ型空孔配列の作製に取り組んでいる。これは、AlGaAs 犠牲層を成長したのち GaAs 周期配列を作製し、さらに犠牲層を選択エッチングすることによって作製に成功している。また、発光素子への応用のため、GaAs 量子井戸を埋め込んだ AlGaAs 周期配列の作製を行い、その断面 SEM 像などにより埋め込み量子井戸の作製を確認している。またフォトルミネッセンスにより GaAs 量子井戸からの発光を確認している。

第六章では以上のことをまとめて結論を出し、将来の展望を述べている。

これを要するに著者は、GaAs 系二次元フォトニック結晶において MOVPE 選択成長を用いた新しい作製方法を確立し、(111)面上の選択成長メカニズムの解明、フォトニック結晶を用いた発光デバイスへの応用に関し、有益ないくつかの新知見を得たものであり、結晶工学、半導体工学、光工学の進歩に対して貢献するところ大である。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があるものと認める。