

外 97-15

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

MOVPE選択成長によるファセット形状制御
と微小レーザへの応用に関する研究

申 請 者

安藤 精後

Seigo Ando

1997 年 10 月

GaAsやInPに代表される化合物半導体は、Siに比べて高移動度であること、直接遷移で禁制帯幅が赤外から近紫外までをカバーすること、混晶にすることにより禁制帯幅を自由に変えることができる等、そのポテンシャルの高さから様々な電子デバイス、光デバイスに利用されている。これらのIII-V族デバイスの大半は、ヘテロ構造を基本構造とするため、界面準位の少ない、平坦で急峻なヘテロ界面の形成が必須であり、これまでもその実現のために多くの研究が行われてきた。その結果現在では、様々な成長法およびモニタ法の導入により原子レベルでのヘテロ界面制御が可能となってきた。一方、新しいデバイス開発の要請から、成長の厚さ方向の制御に加え、横方向のサイズや形状を制御した、量子細線、量子箱および微小共振器レーザ等の微小立体構造の研究が盛んに行われるようになってきている。この横方向のサイズ制御には、一般的に結晶成長した後リソグラフィとエッチング技術により加工する方法が用いられる。しかし、加工ダメージや汚染、それらによる表面再結合の増大等の問題が生じ、それらは寸法が小さくなるほど顕著となるため、高品質で制御性のよい微小立体構造の作製法が強く望まれている。

本研究は、これらの問題解決のために、GaAs/AlGaAs系において、有機金属気相成長法による選択成長技術を用いて、成長の際に現われるファセットおよびその形状を成長条件により三次元的に制御して、微小立体構造を作製することをねらいとしている。研究を進めるにあたっては、選択成長機構の解明とその知見をもとにしたミクロンサイズの微小立体構造の成長、さらに新しいデバイス構造への応用に留意して行っている。

本論文は7章からなる。以下に各章の概要を述べる。

第1章は序論であり、微小立体構造作製における問題点と選択成長技術の有効性についてふれる。さらに従来の選択成長の研究を総括し、本論文の目的と課題を明確にしている。

第2章では、MOVPEの選択成長について概説する。具体的には、マスク基板の作製法、および成長温度やV/III比等の成長条件を変えた時のファセット形状の変化から、選択成長機構を考察する。さらに本研究では、成長用基板として(111)B面のGaAs基板を用いているが、この(111)B面を用いることの有効性について述べる。すなわち、(111)B面上の選択成長では、(1) (110)面の垂直ファセットで構成された矩形、三角柱、六角柱および基板と35度の角度をもつ(110)面で囲まれた四面体などの様々な立体構造を選択成長できること(2) (100)面上の選択成長でよく現われる、リッジ成長がない平坦な成長面が得られること(3) (111)B面と(110)面の成長速度は、成長温度に対して相反する性質を持つため、成長条件により構造を三次元的に制御できることである。

第3章では、成長条件を変えることにより、厚さ方向成長と横方向成長を自由に制御できることについて述べる。これは、GaAs微小立体構造をAlGaAsで三次元的に覆い表面再結合を防ぐために重要である。具体的には、側面が(110)垂直ファセットで構成された矩形形状の選択成長とその側面上への横方向成長について述べ、それらの成長速度が成長条件に対して相反する性質があることを示す。さらに、その成長機構は、表面のAs被覆率に依存することを明らかにする。

本章では、次に(110)垂直ファセット間は結晶学的に完全に平行平板であり、劈開面に匹敵する平坦性をもつため、これを共振器に利用したファブリペローレーザについて述べる。上述した成長方向の制御により、GaAs活性層端面をAlGaAsで覆って作製したレーザは、5 μ mの短共振器までレーザ発振した。このような短い共振器長でのファブリペローレーザ発振の実現は初めてであり、活性層端面をAlGaAsで覆うことが表面再結合によるキャリアのロスを防ぎ、低しきい値化に重要であることを明らかにした。

第4章では、側面が垂直ファセットで構成された六角柱の選択成長とそのファセットを反射器として利用したミクロンサイズの微小リングレーザについて述べる。ここでは微小な六角柱構造の選択成長機構を(111)Bと(110)面の成長速度の成長条件依存性から明らかにし、次にこの六角柱構造を用いた微小レーザの作製方法と光学特性について述べる。作製したレーザは、サイズの小ささと全反射による強い光閉じ込めのために、低しきい値でのシングルモード発振を実現している。

本章では、次にレーザ光の取り出しとレーザ間の結合をねらいとした、矩形光導波路一体型のレーザ構造について述べる。この矩形光導波路は、レーザ構造と同じ(111)B成長面と(110)垂直ファセットで構成され、六角柱の各コーナーから三方向に取り出すことが可能であり、マスクのデザインだけで一回の選択成長でレーザと同時に形成できることが特徴である。しかし、矩形導波路と六角柱レーザとの結合部(角度60度)は、本質的にステップやキンクが多いために、横方向の成長が増大し、形状を制御することが困難になる問題が生じる。これを抑制するために、成長用原料を交互に供給する流量変調エピタキシー(FME)法を導入している。さらに、このFME法は、高温でしか成長できない(111)B面の成長に対して成長温度の低温化が可能であること、AlAsを選択成長してもマスク上にまったく多結晶が析出しない良好な選択性が得られるという優れた特徴をもつことも明らかにしている。従って、FME法の選択成長への適用は、複雑な構造も選択成長でき、デバイス作製の自由度を大きく広げる点で大きな成果である。ここではこれらの成長機構を考察するとともに、作製したレーザの導波路先端からレーザ光が有効に取り出せることを示す。

第5章では、三角柱ファセットレーザの選択成長とその発振特性について述べる。(111)B面上の三角柱構造は、レーザへの応用を考えたとき、六角柱構造を超えた優れた特徴を持つ。すなわち、三角柱構造は例えマスク形状にサイズ揺らぎがあっても、(111)B基板面の三回対称性のために、結晶学的に必ず正三角形を構成するよう

に現われることである。従って、レーザの発振モードは正確な内接正三角形となる。これは反射したレーザ光は必ずもとの位置にもどることを意味し、しきい値の低減につながるばかりでなく、レーザ構造を微細化しても本質的に形状にゆらぎが生じない。この発振モードが正三角形になることは、実際に作製したレーザの縦モード間隔と共振器長から計算した縦モード間隔を比較することにより明らかにしている。

本章では、次にこの三角柱レーザを二個、矩形の光導波路で結合することにより、レーザ光の変調が可能であることを提案し、実現している。すなわち、三角柱レーザの一方を発振器、他方を変調器として動作させると、発振器から出たレーザ光は変調器の三角モードに結合し、変調器の励起光強度を変えることにより変調できることである。またこのように結合した構造では、ポンププローブ法を用いることにより、変調器内のキャリア寿命時間を測定することもできる。この測定から、GaAs活性層端面をAlGaAsで覆ったレーザは、表面準位の減少により、バルクと同程度のキャリア寿命時間をもつことを明らかにしている。

第6章では、基板と35度の角度をもつ三つの斜め(110)ファセットで囲まれた四面体成長と量子ドットへの応用について述べる。これは将来ファセットレーザと量子ドットを組み合わせることをねらいとしている。GaAs量子ドットは、四面体成長の頂上付近でAlGaAs成長からGaAs成長に切り換えて作製している。サブミクロンの微小領域での四面体成長は、成長が途中で自動的に停止する現象があり、ここでは、この選択成長固有の現象を利用するとサイズの高均一制御が可能になることを示す。さらにこの現象をGaの拡散距離の成長条件依存性から考察し、この現象を利用して作製した量子ドットについて述べる。

最後に第7章では、本論文の主な結果をまとめて結論とし、さらに本研究の意義を明らかにするとともに、将来展望を述べる。

以上のように、本研究の意義は、選択成長の際に現われるファセットを成長条件により三次元的に制御して微細立体構造を作製できることを示し、その成長機構を明らかにしたこと、成長用原料を交互に供給するFME法が選択成長に非常に適した成長法であることを示したこと、さらに基板に垂直なファセットをレーザの反射器として利用することにより、様々な微小共振器レーザを同一基板上に作製できることを示したことにある。