

7199-22

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博 士 論 文 概 要

## 論 文 題 目

InAs 量子ドットの MBE による作製と  
半導体レーザーへの応用

(Fabrication of InAs quantum dots by molecular beam epitaxy  
and their application to semiconductor lasers)

申 請 者

斎藤 英彰  
Hideaki Saito

1999年 11月



理 2502 ( 3018 )

半導体量子微細構造は、電子を任意の領域に閉じ込めることで望みの電気・光学的特性を引き出すことを可能にする。量子微細構造内に閉じ込められた電子の振る舞いは、永年にわたる理論、実験両面からの研究により、その全貌がほぼ明らかにされてきたといえる。しかし、電子の振る舞いを十分予測できる量子微細構造を作るには、数十ナノメートル以下のサイズで、しかも、きわめて欠陥の少ない良質な構造単位を作製する技術が不可欠である。

1次元の方向が量子化された構造である量子井戸は、原子層レベルで構造単位の作製を制御できる分子線エピタキシー法や有機気相成長法といった結晶成長法によって実現可能となった。現在、この量子井戸を利用したデバイスはいくつも実用化されているが、その代表的なものに量子井戸レーザーがある。このレーザーは、量子井戸の状態密度が階段状になるのを巧みに利用することによって、バルク結晶のものと比べて、低しきい値、かつ、発光効率の高いレーザー特性を持つことができた。このことが以後の半導体レーザーの普及に果たした役割は大きい。

量子化する方向を増やし、3次元領域に電子を閉じ込めた量子ドット構造は、究極の量子微細構造と呼べる。この構造では、電子の取りうるエネルギーが、固有のエネルギー準位それぞれがつくる列に集中することから、量子井戸と比べても、さらに桁違いに優れたレーザー特性を持つデバイスの実現が期待されている。しかしながら、以下で述べるように、量子ドットレーザー実現のためには乗り越えねばならないいくつかの大きな障壁がある。一つは、原子レベルでかつ3次元方向で積層構造の作製を制御しなければならないことである。その手法としてリソグラフィを中心とした微細加工法が、1980年代から長く試みられてきた。しかし、この方法では加工に際しダメージが入りやすいために、結晶性の優れた量子ドットを作ることが困難であった。この問題を回避するがため、1993年にLeonardらが成長のみで量子ドットを作る自己形成法を報告した。この方法は優れた特性を持つ量子ドットレーザーの実現に大きな前進を与えた。もう一つの大きな障壁は、多数の量子ドットを均一なサイズで作ることである。なぜなら、一つの量子ドットの基底準位には高々数個の電子しか存在できないからである。したがって、多くの電子を制御するレーザーなどのデバイスでは、量子ドットを高密度で作り込むことができねばならない。その意味では、半導体基板上に一度に多数の量子ドットを形成できる自己形成法は理想的な手法ではある。しかし、通常、この方法で得られる量子ドットには10%程度のサイズばらつきが存在する。これが大きいと、せっかく一個のドット内の電子のエネルギーが、エネルギー列個々に集中したものであっても、量子ドット全体では電子の存在するエネルギーは広がったものとなる。サイズのばらつきの程度によっては、量子井戸のエネルギー広がりよりも大きいものになってしまう場合すらある。したがって、自己形成法では量子ドットの成長条件

を制御して、できるだけ均一なサイズのドットを作ることが、このタイプのレーザーの実用化には欠かせないものとなる。

以上述べてきたように、自己形成法は、いくつかの問題をクリアできれば、量子ドット構造の作製法としてきわめて優れたものとなりうる。しかしながら、量子ドットの自己形成過程の詳細は未だ不明な点が多い。そこで、本研究では、量子ドットの自己形成過程を、量子ドットの形状が種々の成長条件のもとでどのように変化するかを詳細に観察することによって明らかとし、量子ドット作製技術が抱える課題の一つ、サイズ均一性を改善することを行った。さらには、量子ドットを半導体レーザーに適用することを目的として、理想的にはデルタ関数的な状態密度を反映した鋭いピークを持つ量子ドットの発光スペクトルを、サイズの均一な量子ドットを使って、デバイスの動作環境となる高温、高キャリア密度下において評価した。次に、その発光スペクトルの広がり程度を手がかりとし、量子ドットレーザーの設計を行った。設計後のレーザー構造を用いて、量子井戸レーザーを超える特性を実現するのに不可欠である、量子ドットの基底準位における光利得を使ったレーザー発振を試みた。

最後に、上記以外の量子ドットに固有な特性として、量子ドットからの発光の偏光特性を明らかとした。これによって、量子ドットレーザーを光学システムに応用する際に不可欠なレーザー光の偏光制御を行った。

本論文は、1章から6章までで構成される。第1章では、本論文の背景と目的および概要について述べる。

第2章では、量子ドットの形成法と量子ドットの基本的な光物性、そして、量子ドットを代表的な半導体光デバイスであるレーザーに適用した場合に予想される特性について述べる。特に、後者についてはレーザーの低しきい値発振、温度に対する安定動作について注目し、従来の量子井戸レーザーのものと比較を数値的に行った結果について述べる。

第3章では、半導体レーザーに用いられる化合物半導体の一つであるInAsを使って、自己形成量子ドットを作製する。その際に、量子ドットの形状やサイズばらつきを制御する目的で、量子ドットの形成過程に大きな影響を及ぼす成長温度を変化させることを行う。高温の成長条件下では、従来の量子ドット形状とは異なる、{110}ファセット面を持つ高アスペクト形状のドットが形成され、この高アスペクトドットでは、サイズ均一性が大きく向上されることを見出したことについて述べる。また、ドットのサイズが大きくなると、低アスペクト形状から高アスペクト形状へ、ドットがより安定なエネルギーを持つように形状転移することを明らかにする。

第4章では、第3章で述べた高温成長によって得られる、サイズばらつきの小さい高アスペクトドットを使って、量子ドットの基底準位での発光スペクトル幅を評価する。理論的に予測された通り、量子ドットの発光スペクトル幅は

温度、キャリア密度にはほとんど依存せず、デバイスの動作条件となる高温、高キャリア密度下でも、量子ドットが離散的なエネルギー準位を形成していることを明らかにする。このことは、第2章で述べる量子ドットが従来の量子井戸レーザーを超える特性（例えば、低しきい値発振、高温での安定動作等）を持ちうることを実証することになる。また、形状異方性を有する低アスペクトドットには、その形状に依存した偏光特性があることについて述べる。この特性は、光デバイスの偏光制御に欠かせないものである。

第5章では、量子ドットレーザーの基底準位発振を目的に、ドットに必要な密度の見積もりを行い、 $10^{11}\text{cm}^{-2}$ 程度の高密度化が必要なことを明らかとする。このことから、多層構造によって高密度化が可能な低アスペクト形状のドットを使って端面発光型と面発光型の二つのレーザー構造を作製し、両方の構造で量子ドットの基底準位発振を成功したことについて述べる。この発振では、従来の低密度の量子ドットを用いた高次発振の量子ドットレーザーと比べ、しきい値電流密度を1/6まで低減させることができる。さらに、発光スペクトル幅の狭い高アスペクトドットが $10^{11}\text{cm}^{-2}$ の高密度で作製できた時には、量子井戸レーザーよりも低いしきい値が得られることを示す。また、面発光型レーザーを光学システムで使用する際に重要となる偏光制御を、第4章で述べる偏光異方性を持つ低アスペクトドットを使って実現したことについて述べる。これは、従来の量子井戸を使っては得られない機能であり、量子ドットレーザーの優位性を初めてデバイス動作の中で達成することになる。

第6章では、以上各章の総括を行い、さらに今後に残された課題を指摘する。