

# 「Si基板上GaAs系面発光レーザに関する研究」



# 第1章

## 序論

### 1.1 はじめに

「インタラクティブ」、この言葉で表現されるメディアアプリケーションが近年急成長を示している。「インタラクティブ」とは、ワープロや表計算のような「アクティブ」に操作するアプリケーションとテレビ番組のような「パッシブ」に情報を受け取るだけのアプリケーションの中間に位置するもので、従来その代表的なものはテレビ・ゲームであった。しかしながら、近年、通信カラオケ、インターネット、視聴者参加番組などに代表される多様なインタラクティブ・アプリケーションが普及してきている。この要因として通信方式 (ISDN: Integrated Services Digital Network etc...) や電子機器 (PC: Personal Computer etc...) の発達と低価格化があげられる。そして未知なる可能性を秘めるこの種のアプリケーションが更なる発展を遂げるためには次のことが必要となる。

まず第一に通信媒体の発達で、そのために現在は幹線のみ実現されている光ファイバー網の末端までの拡大である。光ファイバーは、電線と比べて低価格、低損失、広帯域などの特徴を持っており、計画段階ではあるが2010年をメドに全国の家を対象として、住宅の最寄りの電柱まで完全に光ファイバー化する計画をNTTが発表している。第二として、通信によって得られた情報や、通信したい情報を蓄積しておく記憶媒体の発達である。従来から記憶媒体として使われているのは主に磁気を用いたものであるが、近年、書き込み過程では磁気とレーザー光を用い、読み取り過程においては光ピックアップを用いるものが登場してきている (光磁気ディスク、デジタルビデオディスクなど)。これらは、光を用いることから高面密度に記録でき、また読み取り時に非接触であるので記録の保持にも向いている。特に書き込み可能なデジタルビデオディスクは、今春にも発売

され、家庭用 VTR の代替として期待されている。そして第三として、通信機器の性能を決める MPU(MicroProcessing Unit) の向上があげられる。61 年に発売された世界初の IC(Integrated Circuit) には数個のトランジスタが載っているにすぎなかったが、71 年の MPU 登場時にはその数が約 3000 個そして現在の MPU では約 1000 万個のトランジスタが集積化され、動作周波数も 750 kHz から 200 MHz へと向上し、2010 年には 10 億個のトランジスタを集積し 4 GHz で動作する MPU の登場が予期されている。そして更なる革命的な進歩をもたらすと考えられているのが光電子集積回路 (OEIC: Opto-Electronic Integrated Circuit) の実現である。従来の電子デバイスに変えて部分的に光デバイスを用いることで、光配線により素子の配置や配線の自由度が増し、また高周波になっても電磁誘導を生じないという利点があるからである。

この様に、私達の生活を豊かにするインタラクティブ・アプリケーションの拡充には光デバイスが不可欠であることがわかる。現在、発光素子としては、LED 及び半導体レーザが代表的で、InGaAsP(1.55  $\mu\text{m}$ 、1.3  $\mu\text{m}$ 、光通信用)、AlGaAs(0.78  $\mu\text{m}$ 、光記憶装置用) 及び AlGaInP(0.66  $\mu\text{m}$ 、可視表示用) の半導体材料が用いられ、それぞれ格子整合する InP、GaAs 基板上に作製されている。これらの基板材料は高価であるので、低価格化が難しい。一方、電子デバイスは、高熱伝導率、機械的堅牢さ及び低価格などの利点をもつ Si を材料とし既に集積化が進んでいる。しかし、Si は間接遷移形半導体であり発光機能を持たないために受光素子には用いられるものの、発光素子用材料としては適していない。そこで、従来より用いられてきた発光素子用半導体材料を Si 基板上に結晶成長することで、安価な上に OEIC の実現にもつながる発光素子の作製が可能となる。本研究室では、なかでもヘテロ構造が容易に作製可能な GaAs 系半導体に注目し、それを Si 基板上に成長し、半導体レーザに加工してきた。しかしながら、従来の端面発光型レーザにおいては、劈開により反射鏡を作製する必要があり、また素子のサイズも数百  $\mu\text{m}$  程度と集積化に向けた構造とは言い難い。そこで本研究では、これらの問題が生じず、高密度 2 次元アレーも可能となることから、光インターコネクットのキーデバイスとして考えられている垂直共振器構造面発光型レーザ (以下、面発光レーザ) を Si 基板上に作製することを目的とした。基板と垂直に方向に共振器を持つ面発光レーザは、成長時に反射鏡をモノリシックに作製するので、劈開が不必要で、素子サイズを数十  $\mu\text{m}$  程度まで微小化できる。更に低電流動作の可能性があり、OEIC 向きである。この Si 基板

上面発光レーザの研究内容と結果をこの論文に記す。

## 1.2 Si 基板上 GaAs 系発光素子の軌跡

表 1-I: Si 基板上 GaAs 系発光素子の軌跡

| 年    | 本研究室   | 他研究機関  |
|------|--|--|
| 1986 | AlGaAs/GaAs LD on Si<br>(300 K, Pulsed)  |  |
| 1987 |  | AlGaAs/GaAs LD on Si (Illinois Univ.)<br>(300 K, CW)                                 |
| 1988 |  | AlGaAs/GaAs LD on Si (Illinois Univ.)<br>lifetime ~16 h (300 K, CW)                  |
| 1989 | AlGaAs/GaAs LD on Si<br>(300 K, CW)  |  |
| 1990 |  | AlGaAs/GaAs VCSEL on Si (AT&T)<br>(300 K, Pulsed)                                    |
| 1991 | AlGaAs/GaAs LD on Si<br>with AlGaAs/AlGaP IL<br>(300 K, CW)                          | AlGaAs/InGaAs LD on Si (MIT)<br>lifetime ~56.5 h (300 K, CW)                         |
| 1992 | AlGaAs/InGaAs LD on Si<br>lifetime ~24 h<br>(300 K, CW)                              | Undercut AlGaAs/GaAs LED on Si<br>(Tokushima Univ.) lifetime > 1000 h<br>(300 K, DC) |
| 1993 |  | AlGaAs/GaAs LD on sawtooth Si<br>(IMEC) lifetime ~100 h (300 K, CW)                  |
| 1994 | AlGaAs/GaAs QWRs-like<br>LD on Si (300 K, Pulsed)                                    |  |
| 1995 | AlGaAs/GaAs VCSEL<br>on Si (150 K, CW)<br>InGaP/GaAs LED on Si<br>2000 h (300 K, DC) |  |
| 1996 | AlGaAs/GaAs QDs-like<br>LD on Si (300 K, Pulsed)                                     |  |

QWRs···Quantum wires, QDs···Quantum dots

## 1.3 本論文の構成

本論文の構成は、6章立てになっており、第2章では面発光レーザの特徴と現状についてまず述べたあと、面発光レーザの動作原理と反射鏡の特性及び閾値電流密度の導出

について理論的な面から述べる。

第3章では、有機金属気相成長法やその他の成長法について述べ、続いてGaAs化合物半導体をSi基板上にヘテロ結晶成長する際の問題点と転位密度低減法について述べる。

第4章では、まず、本研究における素子化プロセスについて述べる。次に、本研究の基本構造となるGaAs基板上に作製した面発光レーザの諸特性について述べたあと、特性向上のための最適化を光出射側反射鏡及び活性層構造について行う。そして、Si基板上へ応用を考えた場合に最も適した構造の面発光レーザを作製し諸特性を測定する。

第5章では、Si基板上に面発光レーザを作製するときの結晶成長法について述べたあと、レーザの諸特性として温度特性や寿命試験そして劣化観察についても述べる。次に成長層を円柱状にエッチングし熱処理を施すことにより、残留応力の緩和と転位密度の低減を試みる。最後に、歪み層を活性層及び基板側反射鏡に用いたときの効果について述べる。

第6章では、本研究で得られた成果をまとめ、総括とする。

## 参考文献

- 1) 日経エレクトロニクス 12-2 (1996)
- 2) 長谷川: 博士論文 (1996)
- 3) 井奈波: 修士論文 (1996)
- 4) 村田 他: 電子情報通信学会研究報告 ED 95-67 55(1995).
- 5) 小川 他: 電気学会研究会 EFM 96-24 31(1996).

## 第2章

# 面発光レーザーの特徴、現状及び動作原理

### 2.1 はじめに

この章では、まず垂直共振器構造面発光レーザー（以下、面発光レーザー）の特徴について述べる。そして面発光レーザーが、その特徴を生かし様々な用途で用いられるためには、低閾値電流動作や高温連続動作が必要となる、そこで発光波長別にその現状について諸データを交えて述べる、最後に動作原理を理論的な視点から述べる。

### 2.2 面発光レーザーの特徴

面発光レーザーは、従来の端面発光レーザーと違い、その名が示すように基板表面から光を取り出す構造で、1977年に東工大の伊賀らによって提案された。基板と平行に反射鏡を持ち、基板と垂直に光共振器を持つことから、端面発光レーザーと比較して極短共振器構造となり、その結果非常に高い反射率(99%以上)を有する反射鏡が必要となる。この反射鏡の形成に難があるものの、その特徴的な構造から、

- 非常に多数のレーザーをモノリシックに作製できる（劈開不要より）
- 劈開に不向きな基板にも作製できる
- 極短共振器構造から単一波長性に優れる
- 微小活性領域から極低閾値電流動作の期待がある
- 発振波長及び閾値電流が雰囲気温度に対して敏感でない
- 光ファイバーとの結合性に優れる



- 横方向のサイズが数十 $\mu\text{m}$ より、素子の間隔、配置に大きな自由度がある
- 高密度2次元アレーが可能
- 積層による3次元アレーデバイスの集積化が可能

の優れた点がある。このような特徴から、様々な研究がなされてきており、それを次節で述べる。

## 2.3 面発光レーザの現状

ここでは、発光波長別にその用途、低閾値電流化及び高温連続動作化に向けた問題点と解決法、及び近年の動向について述べ、最後に新たな試みとしての構造について述べる。

### 2.3.1 長波長(1.3~1.6 $\mu\text{m}$ ) 面発光レーザ

1.3~1.6  $\mu\text{m}$  帯の面発光レーザは、並列光インターコネクション、長距離光ファイバー用光源に非常に有望で、また接合電圧が低いため低電圧駆動レーザ実現の可能性がある。

しかしながら、InP 基板上に作製されるレーザの場合、材料を従来の InGaAsP 系に限定すると、格子整合の必要性からバンドギャップ差の大きい材料を選択できないため、以下の二つの問題が生じる。一つは、反射鏡の反射率の問題である。バンドギャップ差の大きい材料を選択できないということは、屈折率差の小さい材料で分布反射型反射鏡(DBR:Distributed Bragg Reflector) を作ることになる。つまり高い反射率を得るためには、反射鏡のペア数を大きくしなければならない(理由は次節参照)。しかし実際問題として、膜厚制御の困難さと多層化によって損失が増大することが考えられ、結局高反射率を有する反射鏡の形成は大きな課題となる。もう一つの問題は、通常端面発光レーザにも見られる利得と温度特性の問題である。AlGaAs/GaAs 系では、特性温度  $T_0$  が 150~200 K であるのに対し、InGaAsP/InP では 40~70 K の値しか得られていない。波長 1.3  $\mu\text{m}$  の InP を基板とするレーザでは、大きな利得を確保するために用いている量子井戸(QW:Quantum Well) の井戸の深さが浅いために、利得に直接寄与しない上位のサブバンドにキャリアが分布したり、オーバーフローを生じたりすることが、利得を小さくし温度特性を悪くしていると考えられる。波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯のレーザでは比較的

深い井戸は形成できるものの、Auger 効果や intervalence band absorption の影響が温度特性を悪くしていると考えられる。

以上二つの問題が InP 基板上の InGaAsP 活性層を有する面発光レーザの閾値電流値を大きくし、その特性を悪化させているが、これらを解決すべく、いくつかの研究がなされている。まず反射率の高い反射鏡の形成であるが、誘電体 DBR 多層膜を用いる試みがなされている。光出射側に Si/SiO<sub>2</sub> DBR を用いたもので閾値電流 30 mA のパルス動作と -25 °C までの連続動作が報告されている<sup>1)</sup>。また、両側に Si/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> DBR を用いた構造で 22 °C において閾値電流 4.7 mA の連続動作が報告されている<sup>2)</sup>。また別の試みとして、貼り合わせの技術を用いて、高反射率の AlAs/GaAs DBR を InGaAsP 量子井戸に接合させた面発光レーザも実現されており、閾値電流 8.8 mA の連続動作が得られている、更に AlAs の酸化による電流狭窄を用いた構造で閾値電流 800  $\mu$ A (300 K) で 64 °C までの連続動作が報告されている<sup>3, 4)</sup>。以上をまとめたものを表 2-I に示す。また InGaAs の三元基板を想定すると、深い量子井戸と高反射率を有する反射鏡 (InAlAs/InGaAs) が作製可能となり、従来の InP 基板では実現できない低閾値動作が可能となるとの設計もある。更に現実味ある設計として、GaAs に格子整合する InGaNaNs という材料系を用いることも提案されている。この材料系では既に端面発光レーザにおいて 1.19  $\mu$ m で室温連続動作が報告されており、あと数%程度 N 組成比を増やせば 1.3~1.6  $\mu$ m 帯が網羅できると考えられる<sup>5)</sup>。加えて GaAs 基板上ということが高反射率を有する AlAs/GaAs DBR 多層膜を用いることも可能となり将来の長波長面発光レーザとして期待される。

表 2-I: 長波長 (1.3~1.6  $\mu$ m) 面発光レーザの動向 (室温連続動作)

| Well layer<br>(Wavelength)      | I <sub>th</sub><br>(Area)              | P <sub>max</sub><br>( $\eta_d$ ) | Structure<br>and means                | Research                        |
|---------------------------------|--|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| InGaAsP 9QWs<br>(1.53 $\mu$ m)  | 30 mA<br>(15 $\mu$ m $\phi$ )          |                                  | Si/SiO <sub>2</sub> DBR               | Royal Inst. Tech. <sup>1)</sup> |
| InGaAsP 12QWs<br>(1.33 $\mu$ m) | 4.7 mA (20 °C)<br>(49 $\mu$ m $\phi$ ) |                                  | Si/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> DBR | Furukawa Lab. <sup>2)</sup>     |
| InGaAsP 9QWs<br>(1.55 $\mu$ m)  | 8.8 mA<br>(25 $\mu$ m $\phi$ )         | 7 $\mu$ W                        | wafer fusion                          | NTT Opt-ele. Lab. <sup>3)</sup> |
| InGaAsP 7QWs<br>(1.55 $\mu$ m)  | 0.8 mA<br>(2 $\mu$ m $\phi$ )          | 0.5 mW<br>(12 %)                 | wafer fusion<br>AlAs oxide            | UC Santa Barbara <sup>4)</sup>  |

I<sub>th</sub>···Threshold Current, P<sub>max</sub>···Maximum Output Power

### 2.3.2 中波長 (0.7~1.0 $\mu\text{m}$ ) 面発光レーザー

0.8~1.0  $\mu\text{m}$  帯の面発光レーザーは、近距離光ファイバーや空間通信用光源に、0.7  $\mu\text{m}$  帯は CD プレーヤーやレーザープリンタ用光源にそれぞれ向いている。この波長域のレーザーは GaAs 基板に格子整合する InGaAs, GaAs, AlGaAs を半導体材料として用いている。

InGaAs 活性層を有する面発光レーザーについては、GaAs 基板上ということから、前述した高反射率を有する AlAs/GaAs DBR 多層膜を用いることが可能で、またレーザーゲインも大きく、他の材料系と比べて極低閾値電流動作が実現可能と期待されている。低閾値化のためには、単純に素子サイズを小さくすることが考えられる。そこで素子サイズを小さくする方法としてドライエッチングによるメサ形成が行われてきた。しかしながら、ドライエッチングにより活性領域脇にダメージがはいることで、閾値電流密度の増大ひいては温度特性の劣化を招いていた。そこでメサ構造を用いずに電流狭窄を行う工夫として、近年 AlAs が酸化しやすいという特性を利用したものが用いられている。具体的には活性層近傍に積層した AlAs 層を水蒸気中で選択的に酸化させ、native oxide 層を作り電流の狭窄を行うという手法で、38  $\mu\text{A}$ 、70  $\mu\text{A}$  の極低閾値電流動作が得られている<sup>6,7)</sup>。さらに、反射鏡を構成する AlAs 層も部分的に酸化させて光導波の機能を持たせたもので、70  $\mu\text{A}$  の閾値電流動作が報告されている<sup>8)</sup>。加えて、反射鏡を構成する AlAs 層を全体的に酸化させて、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaAs の少ないペア数で非常に高反射率を有する反射鏡を形成した構造で、61%の高外部微分量子効率が得られており、高光出力動作が期待される<sup>9)</sup>。また電流密度という視点においては、23  $\mu\text{m}\phi$ の電流狭窄窓で 60 A/cm<sup>2</sup> の極低閾値電流密度が報告されており、100 °Cを越える高温動作の可能性がある<sup>10)</sup>。

GaAs、AlGaAs 活性層を有する面発光レーザーにおいても高反射率を有する AlAs/GaAs DBR 多層膜を用いることが可能ではあるが、活性層の Al 組成比が大きくなるにつれて DBR 多層膜での光吸収を避けるために、DBR 多層膜の媒質を GaAs から AlGaAs へと変化させていく必要がある。その結果、InGaAsP/InP 系と同様に屈折率差が小さくなり、高反射率反射鏡の形成が難しくなる、その上 Al 組成比が大きいと前述したように酸化されやすくなり、それが欠陥となることから急速劣化を示すようになる。さらに活性層の Al 組成比が高い (>0.3) と、深い量子井戸の形成が難しくなり、この材料系での短波長化は 0.7  $\mu\text{m}$  程度が限界となる。この材料系でも AlAs 層の酸化による電流狭窄窓が用いられており、GaAs 量子井戸活性層を有する面発光レーザーにおいてパルス動作で

はあるものの、470 nA という驚異的な極低閾値電流値が報告されている<sup>11)</sup>。また連続動作においても、17 mW の最高光出力、193  $\mu$ A の低閾値電流動作が得られている<sup>12)</sup>。GaAs 活性層では最高外部微分量子効率となる 40% も得られている<sup>13)</sup>。加えて、酸化による電流狭窄窓を用いてはいないが 130  $^{\circ}$ C での高温連続動作も報告されている<sup>14)</sup>。一方、AlGaAs 量子井戸を有する面発光レーザーは、0.78  $\mu$ m の波長で 1.1 mW の最高光出力、200  $\mu$ A の低閾値電流動作が得られている<sup>15)</sup>。以上をまとめたものを表 2-II に示す。

表 2-II: 中波長 (0.7~1.0  $\mu$ m) 面発光レーザーの動向 (室温連続動作)

| Well layer<br>(Wavelength)                    | $I_{th}$<br>(Area)                        | $P_{max}$<br>( $\eta_d$ ) | Structure<br>and means                                 | Research                                     |
|---|---|---------------------------|--|--|
| In <sub>0.2</sub> GaAs SQW<br>(0.99 $\mu$ m)  | 38 $\mu$ A<br>(3 $\mu$ m $\phi$ )         | (7%)                      | AlAs oxide<br>MgF/ZnSe DBR                             | Univ. of Texas <sup>6)</sup>                 |
| In <sub>0.2</sub> GaAs SQW<br>(0.98 $\mu$ m)  | 8.7 $\mu$ A<br>(9 $\mu$ m <sup>2</sup> )  | 0.16 mW<br>(10%)          | AlAs oxide   | UCLA <sup>7)</sup>                           |
| In <sub>0.2</sub> GaAs TQW<br>(0.989 $\mu$ m) | 70 $\mu$ A<br>(5 $\mu$ m $\phi$ )         | 1 mW                      | AlAs oxide   | Tokyo Inst. Tech. <sup>8)</sup>              |
| In <sub>0.2</sub> GaAs DQW<br>(0.994 $\mu$ m) | 160 $\mu$ A<br>(64 $\mu$ m <sup>2</sup> ) | (61%)                     | AlAs oxide<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GaAs DBR | UCLA <sup>9)</sup>                           |
| In <sub>0.18</sub> GaAs TQW<br>(0.99 $\mu$ m) | 250 $\mu$ A<br>(23 $\mu$ m $\phi$ )       | 1.2 mW<br>(43%)           | AlAs oxide   | UC Santa Barbara <sup>10)</sup>              |
| GaAs TQW<br>(0.84 $\mu$ m)                    | 470 nA<br>(2 $\mu$ m <sup>2</sup> )       | (5%)                      | AlAs oxide   | Sandia National<br>Laboratory <sup>11)</sup> |
| GaAs TQW<br>(0.85 $\mu$ m)                    | 193 $\mu$ A<br>(25 $\mu$ m <sup>2</sup> ) | 17 mW<br>(28%)            | AlAs oxide   | Hewlett-Packard<br>Laboratory <sup>12)</sup> |
| GaAs TQW<br>(0.83 $\mu$ m)                    | 730 $\mu$ A<br>(6 $\mu$ m $\phi$ )        | 8.5 mW<br>(40%)           | AlAs oxide   | Univ. of Ulm <sup>13)</sup>                  |
| GaAs 6QWs<br>(0.855 $\mu$ m)                  | 2.1 mA<br>(16 $\mu$ m $\phi$ )            | 4.2 mW<br>(12%)           | 130 $^{\circ}$ C operation                             | NTT Opto-ele.<br>Laboratory <sup>14)</sup>   |
| Al <sub>0.11</sub> GaAs TQW<br>(0.78 $\mu$ m) | 200 $\mu$ A<br>(12 $\mu$ m <sup>2</sup> ) | 1.1 mW<br>(30%)           | AlAs oxide   | Korea Inst. Tech. <sup>15)</sup>             |

$I_{th}$ ...Threshold Current,  $P_{max}$ ...Maximum Output Power

### 2.3.3 短波長 (<0.7 $\mu$ m) 面発光レーザー

0.7  $\mu$ m 以下の可視光面発光レーザーは、低価格プラスチックファイバーや画面表示用光源に、そして光記憶装置のより高面密度化への光源として期待されている。

この波長帯で、 $0.6\mu\text{m}$ 域では主に InAlGaP がその材料として用いられている。しかしながら、長波長帯のレーザと比較して p 型ドーパが難しいことや、元来光子エネルギーが大きいことから高反射率反射鏡の形成が困難であるなどの内在的な問題がある。また前節でも述べたように、Al 組成比が高いとそれによる特性の悪化を招くことになる。現在 InGaP 活性層を用いたもので、閾値電流  $0.66\text{ mA}$  ( $0.67\mu\text{m}$ )、 $1.4\text{ mA}$  ( $0.645\mu\text{m}$ ) の室温連続動作が報告されている<sup>16)</sup>。

更に短波長域では、従来 ZnSe 系材料が用いられ、端面発光レーザにおいて、青緑色発光で 100 時間を越える室温連続動作が確認されている唯一の材料系である。しかしながら、面発光レーザにおいては、 $77\text{ K}$ におけるパルス動作しか報告されていない<sup>17)</sup>。

別の材料系として、近年盛んに研究がなされている GaN 系材料がある。GaN 系材料は緑色から紫外線域までをカバーする半導体レーザ材料として期待されているが、電子・正孔の有効質量が大きいため反転分布電流密度が大きくなり、その結果閾値電流密度が大きくなるとの計算結果もある<sup>18)</sup>。また、デバイス作製上必要となる、エッチングや電流狭窄技術が開発途上であり、さらに格子整合する基板が無く、格子定数の比較的近いサファイアや SiC は劈開に不向きであるという問題点もある。加えてバンドギャップが大きいため、動作電圧が長波長域のレーザと比較して大きくなってしまう。このような多くの問題があるものの、端面発光レーザにおいては、急激な進歩を見せ、InGaN 量子井戸を用いたもので 27 時間の室温連続発振が報告されている<sup>19)</sup>。しかしながら、面発光型では光励起による発振しか得られていない<sup>20)</sup>。劈開に不向きな基板を用いる場合、面発光型が有効となるので今後盛んに研究が行われるものと思われる。

また違ったアプローチとして、SHG (Second-Harmonic Generation) を用いた青色レーザがある。光学的に異方性のある基板上にレーザを作製すると、基本波の  $1/2$  波長の光が共振器内で発生する。この現象を用いた、(311)B 面 GaAs 基板上的 InGaAs 活性層を有する面発光レーザにおいて、 $482\text{ nm}$  の発振波長が報告されている<sup>21)</sup>。しかしながら、SHG 光出力は基本波出力の  $1/10^6$  程度しかなく、光出力増大が課題である。以上をまとめたものを表 2-III に示す。

表 2-III: 短波長 (<0.7  $\mu\text{m}$ ) 面発光レーザの動向

| Well layer<br>(Wavelength)                                | $I_{th}$ , $P_{th}$<br>(Area)                  | Structure<br>and means                 | Research                                     |
|---|--|--|--|
| InGaP 4QWs<br>(0.67 $\mu\text{m}$ )                       | 600 $\mu\text{A}$<br>(25 $\mu\text{m}^2$ )     | AlAs oxide                             | Sandia National<br>Laboratory <sup>16)</sup> |
| InGaP 4QWs<br>(0.645 $\mu\text{m}$ )                      | 1.4 mA<br>(4 $\mu\text{m}^2$ )                 | AlAs oxide                             | Sandia National<br>Laboratory <sup>16)</sup> |
| Cd <sub>0.2</sub> ZnSe 4QWs<br>(0.484 $\mu\text{m}$ )     | 3 mA (77 K, Pulsed)<br>(14 $\mu\text{m}\phi$ ) | SiO <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> DBR | Matsushita<br>Electric Ind. <sup>17)</sup>   |
| GaN bulk<br>(0.364 $\mu\text{m}$ )                        | 2.0 MW/cm <sup>2</sup>                         |  | Advanced Tech.<br>Materials <sup>20)</sup>   |
| In <sub>0.2</sub> GaAs QWs<br>(0.482 $\mu\text{m}$ (SHG)) | 28 mA (135 K)<br>(20 $\mu\text{m}\phi$ )       | proton implant<br>(311)B GaAs sub.     | Hewlett-Packard<br>Laboratory <sup>21)</sup> |

$I_{th}$ ...Threshold Current,  $P_{th}$ ...Threshold Input Power density

### 2.3.4 新構造の面発光レーザ

今まで紹介してきた面発光レーザを、光磁気ディスクやコヒーレントな通信用光源として用いる場合、偏光の制御が必要となってくる。この制御には、偏光が変化するときが発生する強いノイズを無くす目的もある。この制御のために、異方性の利得をもつ (311)A 面 GaAs 基板上への面発光レーザの作製が報告されている <sup>22)</sup>。この基板上では、[233] と [011] 方向に偏光があり、その光強度差は最大 12.7 dB と報告されている。

また、現在の多くの面発光レーザが、利得増大の目的から、活性層として 1 次元を量子化した量子井戸 (QW) 構造を用いている。そこで、更にもう 1 次元を量子化した量子細線 (QWR) 構造、そして 3 次元全てを量子化した量子箱 (QD) 構造を用いることで、より高利得を有する活性層が形成可能となり、ひいては低閾値電流化につながるようになる。まず前者であるが、量子細線は利得が大きだけでなく、強い偏光選択性があり有望である。しかしながら、量子細線はノコギリの刃状にエッチングした基板の V 溝とリッジ上に形成されるため、その活性層体積が小さくなってしまう。そこで、十分な利得を得るために、量子細線の配置の最適化と高密度化そしてサイズの均一化が重要となる。現在この構造での面発光レーザは報告されていないが、面発光 LED において強い偏光選択性が確認されている <sup>23)</sup>。次に量子箱構造であるが、この構造は量子細線以上の高利得に加えて島状の活性層となることから、劣化の一因である転位を含まない活性層

を形成できる可能性ももっている。現在この構造を用いたもので、閾値電流 32 mA の室温連続動作が報告されている<sup>24)</sup>。更なる低閾値発振には、量子細線と同様に量子箱の高密度化と均一化が必要である。またこの報告では第 2 準位発振であるので、これを基底準位で発振するように工夫する必要もある。

次は、本研究の目的と同じく、OEIC の実現と高機能化を目指し、安価で既に電子デバイスの集積化が進んだ Si 基板上に作製された面発光レーザについてである。Si 基板と格子整合する材料系に、直接遷移型で発光機能に優れたものが無いため、結晶成長により直接作製する以外の手法も行われてきた。その作製法は、大きく 3 つに別れる。1 つめは、粘着材料を用い、Si 基板と別の基板上で作製した面発光レーザを接合する手法、2 つめはその粘着材料を用いずに接合する手法、そして 3 つめは、本研究が用いた手法で、工夫することにより、Si 基板上に結晶成長で直接作製する手法である。まず、粘着材料を用いた接合については、その粘着材料として AnSn や Pd 等の金属が用いられ、比較的低温で手軽に接合できる利点がある。Si と面発光レーザを構成する材料系に熱膨張係数差がある場合、接合温度が高温であればあるほどその冷却過程で欠陥が生じるので、低温で可能なのは魅力的である。しかしながら、接合面に金属があることから接合面を通過して光が伝搬せずに、そこで吸収されてしまう割合が高く、垂直方向の光インターコネクションに向けた手法とは言えない。現在、GaAs 基板上に作製した面発光レーザと FSA (Fluidic Self-Assembly) 法を用いた、300 °C で 5 分の接合による素子で、閾値電流 78 mA の室温パルス動作が報告されている<sup>25)</sup>。次に粘着材料を用いない、「直接接合」と呼ばれる接合についてであるが、従来から InP と Si との接合が用いられてきた。しかしながら、低温 (400 °C 程度) 接合では接合力が弱く、温度を高くすれば強い接合が得られるものの前述したように欠陥が発生する問題があった。近年、加重により低温においても十分な接合力が得られるようになり、端面発光レーザでは室温連続発振が得られている<sup>26)</sup>。面発光型においては、InP 基板上に作製した面発光レーザとの 4 kg/cm<sup>2</sup> の加重と 400 °C の加熱による接合素子で、光励起による発振しか得られていない<sup>27)</sup>。最後に本研究が用いている結晶成長で直接 Si 基板上に作製する手法であるが、この場合一番問題となるのが、Si と面発光レーザの材料との格子定数差と熱膨張係数差に起因する欠陥である。通常成長は、非常に高温で行われるため成長後の冷却過程で熱膨張係数差による応力を受ける、それが格子定数差により Si 基板と成長層界面に発生した転位を

活性層まで延びる貫通転位とし、また動作中の急速劣化の引き金ともなる。しかしながら、モノリシックに作製できることや、はじめから Si 基板を用いることからコスト的にも有利である。現在、転位密度を下げる様々な試みにより、表 1-I に示したように、長寿命なものも報告されている。面発光レーザにおいては、閾値電流 125 mA のパルス動作が報告されているが、本研究では更に低閾値化を実現しており、連続発振については本研究の成果が世界初である、詳細については第 5 章で述べる<sup>28)</sup>。以上をまとめたものを表 2-IV に示す。

表 2-IV: 新構造の面発光レーザ

| Well layer<br>(Wavelength)              | $I_{th}$ , $P_{th}$<br>(Area)                 | Structure<br>and means                                 | Research                                   |
|---|---|--|--|
| $In_{0.2}GaAs$ DQW<br>( $0.967 \mu m$ ) | 1.8 mA<br>( $1102 \mu m^2$ )                  | (311)A GaAs sub.<br>post etch.                         | ATR <sup>22)</sup>                         |
| $In_{0.2}GaAs$ QWRs<br>—                | —<br>—  | 40 nm × 15 nm QWR<br>LED structure                     | Tokyo Inst.<br>Tech. <sup>23)</sup>        |
| $In_{0.5}GaAs$ QDs<br>( $0.96 \mu m$ )  | 32 mA<br>( $625 \mu m^2$ )                    | 28 nm $\phi$ × 3 nm-<br>$2 \times 10^{10} cm^{-2}$ QDs | NEC Opto-ele.<br>Laboratory <sup>24)</sup> |
| $In_{0.2}GaAs$ TQW<br>( $0.98 \mu m$ )  | 75 mA (Pulsed)<br>( $1600 \mu m^2$ )          | CrAu solder bonding<br>to Si sub., FSA                 | UC Berkeley <sup>25)</sup>                 |
| InGaAs 12QWs<br>( $1.587 \mu m$ )       | 1.6 kW/cm <sup>2</sup><br>( $15 \mu m \phi$ ) | Direct bonding<br>to Si sub.                           | Oki Opto-ele.<br>Laboratory <sup>27)</sup> |
| GaAs 0.8 $\mu m$<br>( $0.88 \mu m$ )    | 125 mA (Pulsed)<br>( $15 \mu m \phi$ )        | Lattice-mismatched-<br>epitaxial growth on Si Sub.     | AT&T<br>Bell Lab. <sup>28)</sup>           |

$I_{th}$  ··· Threshold Current,  $P_{th}$  ··· Threshold Input Power Density



## 2.4 面発光レーザの動作原理

この節では、面発光レーザの動作原理を端面発光レーザと比較しながら検討し、面発光レーザ特有の反射鏡の特性や閾値電流密度の計算法について述べる。

### 2.4.1 発振条件

半導体レーザの基本構造は、活性層を有する p-n 接合ダイオードである。つまり幾つかの条件が揃ってはじめてレーザ発振に至るわけである。それは大きく分けて、1. キャリアの反転分布、2. キャリア及び光の閉じ込め効果、3. 光共振器である。反転分布については、一般的な端面発光レーザと何ら変わりはないので説明を省く。本研究の面発光レーザにおいて重要なのは、特に光共振器についてである。通常、半導体中に反転分布を起こしただけでは、光の増幅はあるもののレーザ発振は起こらない。レーザ発振を起こさせるためには、電磁波の発振器と同様に帰還作用を持った共振器が必要となる。半導体レーザの場合、2枚の反射鏡を向かい合わせた、いわゆるファブリ・ペロー共振器が用いられ、端面発光型では劈開面が利用される。また、閾値電流密度を下げるため、キャリアを活性層に集中させ、且つ光を損失無く反射鏡まで導く必要がある。このため、活性層を両側から挟むように、活性層よりもバンドギャップが大きく屈折率の小さいクラッド層と呼ばれるキャリア閉じ込め・光導波層が形成される。さらに、前節でも述べたように、利得増大の目的から現在は、活性層として量子井戸が用いられている。この場合、図 2.1 より、端面発光レーザの発振条件は次式となる。

$$N_w \Gamma_w g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \quad (2.1)$$

ただし、

$$\Gamma_w = 0.3 \times \frac{L_w}{L_0} \quad (2.2)$$

ここで、 $N_w$ は量子井戸数、 $\Gamma_w$ は光閉じ込め係数、 $\alpha_i$ は内部損失、 $L$ は共振器長、 $R$ は反射率 (GaAs の劈開面では約 0.32)、 $L_w$ は量子井戸幅そして  $L_0$ はクラッド層間の距離である。つまり、モード利得と呼ばれる式 (2.1) の左辺  $N_w \Gamma_w g_{th}$  が、式 (2.1) の右辺で示される内部損失+反射損失を上回ったときレーザ発振が起きるわけである。今まで定義な

しに用いてきたが、閾値電流（密度）とは、このレーザが発振が開始するときの注入電流（密度）のことである。一方、図 2.1 の右側に示されている面発光レーザの場合、発振条件は端面発光よりもやや複雑である。それは、端面発光レーザのように、導波路全てが利得を持っていないためである。面発光レーザの場合、発振条件は次式となる。

$$N_w \xi_L g_{th} = N_w \xi_L \alpha_{ac} + (1 - N_w \xi_L) \alpha_{ex} + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \quad (2.3)$$

ただし、

$$\xi_L = \frac{L_w}{L}, R = \sqrt{R_1 R_2} \quad (2.4)$$

ここで、 $\xi_L$  は面発光レーザにおける光閉じ込め係数、 $\alpha_{ac}$  は活性層における吸収損失、 $\alpha_{ex}$  はそれ以外の領域での損失、 $R_1$ 、 $R_2$  はそれぞれ基板側、光出射側（基板側から光出射するタイプもあるが、本研究のタイプを採用して定義する）の反射鏡反射率である。面発光レーザはその構造から、共振器長が発振波長の数倍程度と端面発光レーザの数百分の一の長さしかない、そのため式 (2.3) の右辺第 3 項で示される反射損失が非常に大きくなる、そこで閾値電流密度を小さくするために反射率を高くし  $\ln \frac{1}{R}$  を小さくする必要がある。ここで、面発光レーザの発振に必要な利得  $g_{th}$  の概算を行う。各パラメータとして表 2-V の値を用いた、共振器長は GaAs 量子井戸を仮定し、発振波長の 3 倍程度とした、また各損失は Si 基板上での場合を想定した。この計算結果を図 2.2 に示す。端面発光レーザの場合、レーザ発振に必要な利得は  $3500 \text{ cm}^{-1}$  (SQW)、 $1500 \text{ cm}^{-1}$  (TQW) である、面発光レーザでこの程度の値とするには、図 2.2 より 99% 以上の反射率を有する反射鏡が必要となる。逆に言えば反射鏡の反射率によって閾値電流密度が決まることになる。

表 2-V: 計算に用いた各パラメータ（面発光レーザ）

| $L_w$ (nm) | $\alpha_{ac}$ ( $\text{cm}^{-1}$ ) | $\alpha_{ex}$ ( $\text{cm}^{-1}$ ) | $L$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| 9          | 30                                 | 30                                 | 0.7                   |

## 2.4.2 反射鏡の反射率と特性

そこで次に反射鏡について述べることにする。前述したように通常の端面発光レーザが劈開面を反射鏡として利用するのに対し、面発光レーザは基板に平行に活性層を挟んで、基板側と光出射側にそれぞれ反射鏡を設ける必要がある。その種類は、多層膜反射鏡、金属薄膜反射鏡そしてそれらを組み合わせた複合反射鏡にわかれる。

多層膜反射鏡は2.3節で紹介した多くの面発光レーザで用いられている。その構造は、屈折率の違う2種類の層を交互に積み重ねたもので、屈折率の違いによる反射を利用したものである。固定端と自由端の反射を繰り返し、定在波が立つように、各層の膜厚は発振波長を $\lambda$ 、屈折率を $n$ とすると $\lambda/4n$ となっている。この反射鏡の反射率は特性マトリックス法で求められる<sup>29)</sup>。N層の多層膜を考える場合、それぞれの層を $i=0\sim N+1$ 番目の層と考える ( $i=0$ は光の入射側、 $i=N+1$ は光の出射側)。  $n_i$ 、 $d_i$ を $i$ 番目の層の屈折率、膜厚とすると、特性行列 $U_i$ は、以下のようになる。

$$U_i = B_i M_i B_i^{-1} \quad (2.5)$$

ただし、

$$B_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ n_i & -n_i \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$M_i = \begin{bmatrix} \exp\left(j\frac{2\pi n_i d_i}{\lambda}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-j\frac{2\pi n_i d_i}{\lambda}\right) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

式(2.5)、(2.6)そして(2.7)より、

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = B_0^{-1} U_0 U_1 \cdots U_{N-1} U_N B_{N+1} \quad (2.8)$$

この行列要素より、多層膜反射鏡の反射率 $R$ 、透過率 $T$ が求められ、

$$R = \left| \frac{S_{21}}{S_{11}} \right|^2 \quad (2.9)$$

$$T = \frac{n_{N+1}}{n_0} \cdot \frac{1}{|S_{11}|^2} \quad (2.10)$$

となる。多層膜反射鏡の反射率は2媒質の屈折率差とそのペア数に依存する。ここで、誘電体を用いた $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  DBR、 $\text{ZnS}/\text{MgF}_2$  DBR、半導体を用いた $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$

DBR (屈折率からみれば、 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ ではなくGaAsを用いるべきだが、GaAs活性層を想定すると吸収のない $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ を用いた方が高い反射率となるので)、そして $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ を酸化させて作製する $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  DBRについてペア数に対する反射率の変化を求めた。ただし、入射側をGaAsとし、出射側を空気とし、評価する波長を860 nmとした、また屈折率は付録Aの値を用いた。図2.3より、屈折率差が大きい組み合わせほど、少ないペア数で高反射率が達成できることがわかる。また少ないペア数で済むということは、各層間での回折損や散乱損が小さく計算値により近い値が実際に得られることになる。次に、設計中心波長を860 nmとしたとき、その反射率が約99.9%となるペア数( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  5ペア、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  7ペア、 $\text{ZnS}/\text{MgF}_2$  7ペア、 $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  21ペア)のときの反射鏡の反射率の波長依存性を求めると、図2.4となる。この図から、屈折率差が大きい組み合わせほど、高反射率を有する波長域が広いことがわかる。このことは、ある特定の波長の光のみを反射させるには、屈折率差が小さい方が向いており、逆に出来るだけ広い波長域を反射させるには、屈折率差が大きい組み合わせが向いていることを示している。

金属薄膜反射鏡は形成が簡単なわりに高反射率が得られ、多層膜反射鏡で誘電体を用いた場合は不可能であった電流が流せるという特徴も持っている。しかしながら、GaAs活性層を想定した場合、この波長帯で金属反射鏡において光の吸収が生じる。つまり、反射率と透過率をたしても1とならなくなる。そこでAu反射鏡を用いた場合の、Auの膜厚に対する反射率と透過率を求めると、図2.5となる。ただし、評価する波長を860 nmとし、屈折率は付録Aの値を用いた。膜厚が80 nm以上になると反射率が94%程度で飽和し、透過率が0となってしまうことがわかる。つまり、金属薄膜反射鏡には、反射鏡としての臨界膜厚が存在することになる。

複合反射鏡は、金属薄膜と多層膜反射鏡を組み合わせたもので、最も簡単な構造は、金属と屈折率の小さい誘電体を組み合わせたもので、例えばAu薄膜と $\text{MgF}_2$ 層を組み合わせた複合反射鏡である。Au反射鏡と $\text{Au}+\text{MgF}_2(\lambda/4n)$ 一定)複合反射鏡における反射率と透過率の関係を比較すると図2.6となる。ただし、評価する波長を860 nmとし、屈折率は付録Aの値を用いた。図より、透過率を一定とするなら、誘電体 $\text{MgF}_2$ 層を併用した反射鏡の方が常に高い反射率を有しており、最高反射率も5%程度大きい値を示す。つまり、金属薄膜に誘電体を1層加えるだけで、飛躍的に反射率が増し、さらに多

層膜反射鏡と併用すれば、手軽に高反射率反射鏡が得られることになる。

### 2.4.3 閾値電流密度

反射鏡の反射率の見積もりと同時に重要なのが、閾値電流密度の見積もりである。量子井戸の利得計算は、様々な方法により行われてきた<sup>30) - 34)</sup>。ここでは、実験により得られた値を用いて、利係数得  $G_0$  と反転分布電流密度  $J_0$  を求め、これらの値から閾値電流密度を見積もることにする。一般に電流注入による量子井戸レーザにおける  $G_0$  と  $J_0$  の関係は次式で与えられる<sup>35)</sup>。

$$G = G_0 \left( 1 + \ln \frac{J}{J_0} \right) \quad (2.11)$$

ここで、 $G$  は量子井戸利得、 $J$  は量子井戸 1 個当たりの注入電流密度である。つまりこの式に、レーザ発振が得られたときの閾値電流密度とその試料のレーザ発振に必要な利得の値を代入すれば  $G_0$  と  $J_0$  が得られるわけである。具体的には、本研究室で作製された、Si 基板上の端面発光レーザの値を用いた。式 (2.1)、(2.2) を用いて  $g_{th}$  を計算し  $G$  に代入し、測定により得られた閾値電流密度  $J_{th}$  を  $N_w \cdot J$  とし同じく代入した。ただし、計算には表 2-VI の値を用いた。得られた値をプロットすると、図 2.7 となる。これらの値を次式でフィッティングすると、

$$g_{th} = G_0 \left( 1 + \ln \frac{J_{th}}{N_w J_0} \right) \quad (2.12)$$

$G_0 = 1216 \text{ cm}^{-1}$ 、 $J_0 = 362.5 \text{ A/cm}^{-2}$  が得られる。次に式 (2.3)、(2.4) を式 (2.12) に代入し、 $J_{th}$  について解くと次式となる。

$$J_{th} = N_w J_0 \times \exp \left[ \frac{1}{N_w L_w G_0} \left\{ N_w L_w \alpha_{ac} + (L - N_w L_w) \alpha_{ex} + \frac{1}{2} \ln \frac{1}{R_1 R_2} - 1 \right\} \right] \quad (2.13)$$

上式に先程求めた  $G_0$ 、 $J_0$  の値と表 2-V の値を代入すれば、ある決まった量子井戸数のときの反射鏡反射率 ( $R_1$ 、 $R_2$ ) と閾値電流密度  $J_{th}$  の関係が得られることになる。井戸数 1、3、5、10 のときの閾値電流密度の反射鏡反射率依存性を図 2.8 に示す。図より反射鏡の反射率によって、低閾値電流をとる量子井戸数が違い、最適井戸数が存在することがわかる。この図より、反射率が低い場合、井戸数を多くすれば低閾値となるように考えられるが、この計算は全ての量子井戸に均等にキャリアが分布していることを前提と

しているので、井戸数が多くなると計算からずれる恐れがある。また、以前に本研究室でこの方法と違う理論式から導き出された値と比較すると、図 2.8 の値は数倍大きい。これは、以前用いられた方法が、Si 基板を想定していないためで、第 3 章で述べる欠陥等の影響により、 $G_0$  が小さくなり、 $J_0$  が大きくなったと考えられ、更に発熱の影響も考えられる。一方で、図 2.7 を見ればわかるように、SQW のレーザでばらつきが大きく、フィッティング直線が必ずしも妥当であるとは言い切れず、信頼性を高めるには、より多くの測定点と更に量子井戸数を増やした端面発光レーザについて測定を行う必要がある。

表 2-VI: 計算に用いた各パラメータ (端面発光レーザ)

| $L_w$ (nm) | $N_w\Gamma_w$ (Nw=1) | $N_w\Gamma_w$ (Nw=2) | $N_w\Gamma_w$ (Nw=3) | $\alpha_i$ (cm <sup>-1</sup> ) | R    |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|------|
| 9          | 0.018                | 0.036                | 0.051                | 30                             | 0.32 |

#### 2.4.4 外部微分量子効率

半導体レーザの特性を評価する上で、外部微分量子効率も重要である。面発光レーザの場合、外部微分量子効率 $\eta_d$ は次式で求められる。

$$\eta_d = \eta_i \frac{\ln \frac{1}{R_2}}{2N_w L_w \alpha_{ac} + 2(L - N_w L_w) \alpha_{ex} + \ln \frac{1}{R_1 R_2}} \quad (2.14)$$

ここで、 $\eta_i$ は内部微分量子効率である。しかしながら、実際の測定から求められる外部微分量子効率は、片方の反射鏡を透過してきた光を測定することになる。つまり、端面発光レーザの場合、同反射率の反射鏡であるので測定値に補正は必要ないが、反射率の違う 2 枚の反射鏡をもつ面発光レーザにおいては、補正が必要となる。次式によって、反射率  $R_2$  の反射鏡を透過してきた光から求めた外部微分量子効率 $\eta_{d2}$ を正味の外部微分量子効率 $\eta_d$ に変換できる<sup>36)</sup>。

$$\eta_{d2} = \eta_d \frac{1 - R_2}{(1 - R_2) + (1 - R_1) \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}} \quad (2.15)$$

ここで、面発光レーザの外部微分量子効率の概算値を求めることにする。現実にはあり得ないが、計算簡単化のために  $R_1 = 1$  という仮定を用いた。その結果、式 (2.15) より  $\eta_{d2} = \eta_d$  となる、表 2-V の値を用い、内部微分量子効率 $\eta_i = 1$  とすると、式 (2.14) より光出射側反射鏡反射率  $R_2$  をパラメータとして、図 2.9 が得られる。比較のために、吸収

のある反射鏡を用いた場合の外部微分量子効率も求めた。例として Au 薄膜反射鏡を考え、評価する波長は 860 nm とした。計算結果より、99% といった高反射率にもかかわらず 70% 程度以上の外部微分量子効率を持つことがわかる。一方の Au 薄膜反射鏡においては、吸収があるぶん効率も比較して悪く、図 2.5 からわかるように、反射率が飽和する領域では数% 程度の外部微分量子効率しか持たないことがわかる。

また、外部微分量子効率の定義 (式 (2.16)) より、注入電流密度を一定とした場合、反射鏡の反射率の最適化によって最大光出力を得られる反射率が存在する事になる<sup>37)</sup>。この計算でも、計算簡単化のために  $R_1 = 1$  という仮定を用いた。式 (2.15) に式 (2.16) を代入して導出される式 (2.17) より求められる。

$$\eta_d = \frac{\Delta P}{\Delta J} \times \frac{e\lambda}{hc} = \frac{P}{J_i - J_{th}} \times \frac{e\lambda}{hc} \quad (2.16)$$

$$P = (J_i - J_{th}) \cdot \frac{hc}{e\lambda} \cdot \eta_i \frac{\ln \frac{1}{R_2}}{2N_w L_w \alpha_{ac} + 2(L - N_w L_w) \alpha_{ex} + \ln \frac{1}{R_1 R_2}} \quad (2.17)$$

ここで、 $J_i$  は注入電流密度、 $h$  はプランク定数、 $c$  は光の速さ、 $e$  は電気素量である。この式を用いて、反射率  $R_2$  をパラメータとして、ある一定の注入電流密度  $J_i$  における光出力  $P$  を求め、図 2.10 に示す。ただし、閾値電流値以下の電流注入時における光出力は考えないことにした、また  $J_{th}$  は式 (2.13) に反射率を代入して得られる値を用い、発振波長  $\lambda$  を 860 nm、内部微分量子効率  $\eta_i$  を 1、そして量子井戸数  $N_w$  を 10 とした、それ以外の値は表 2-V の値を用いた。図 2.10 より、明らかに光出力を最大にする反射率の最適値が存在することになる、ただし熱による影響は考慮していない。

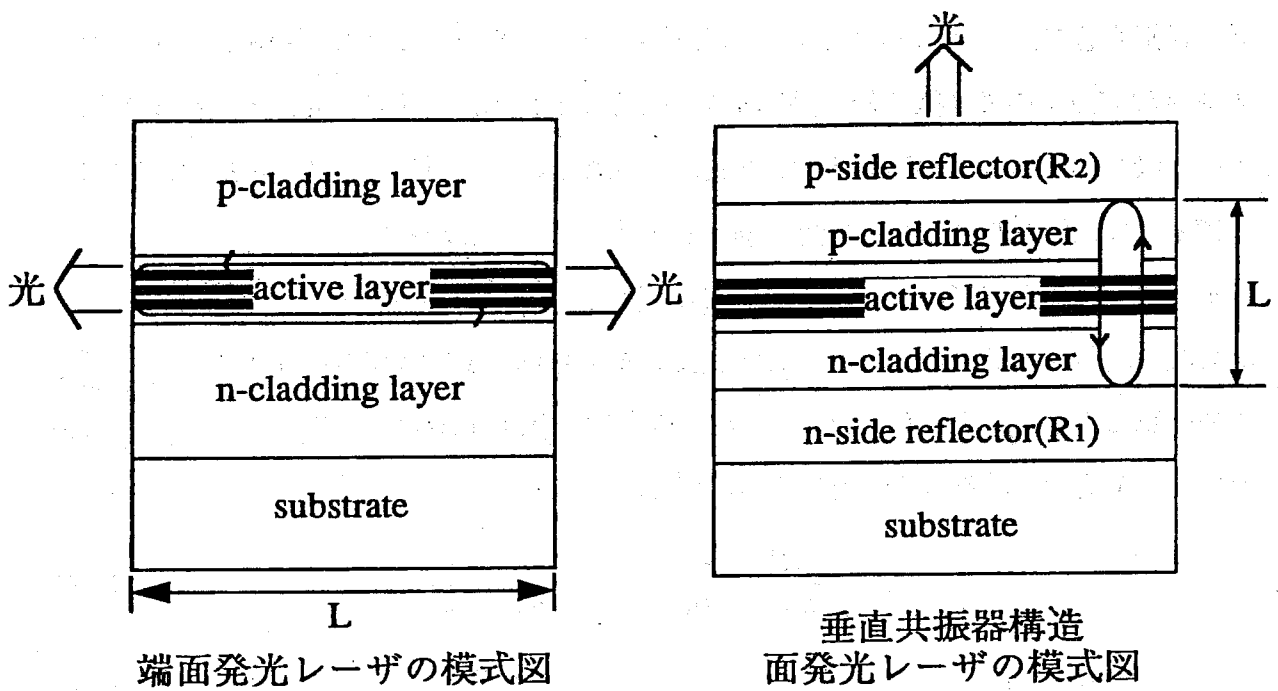


図 2.1: 端面発光レーザと面発光レーザの模式図

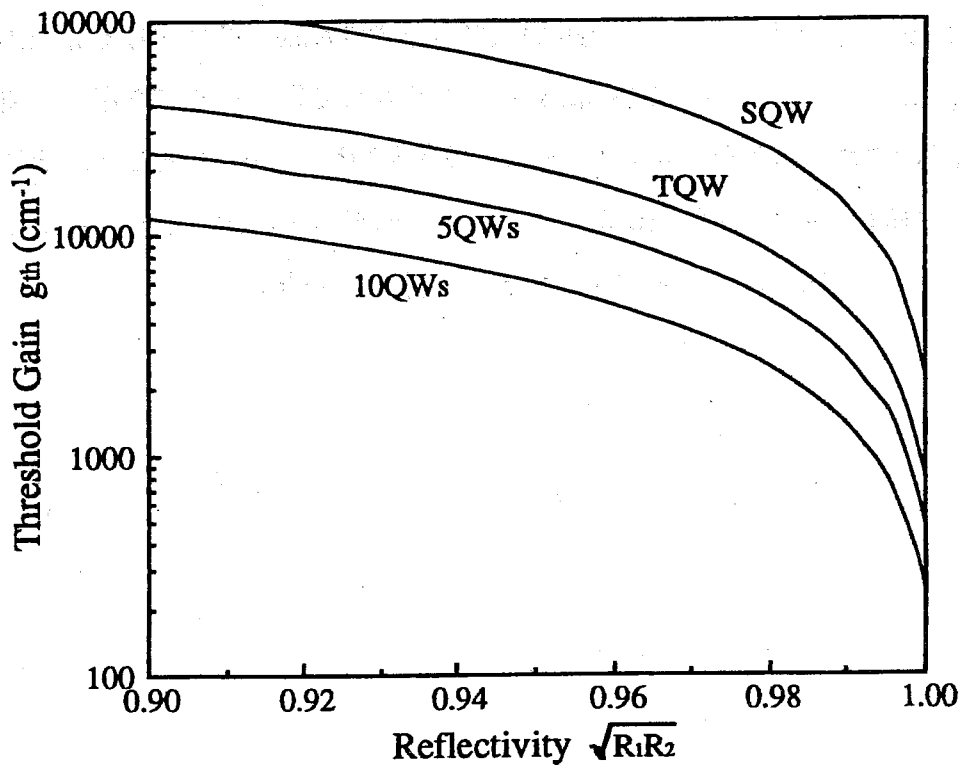


図 2.2: 閾値利得の反射率依存特性



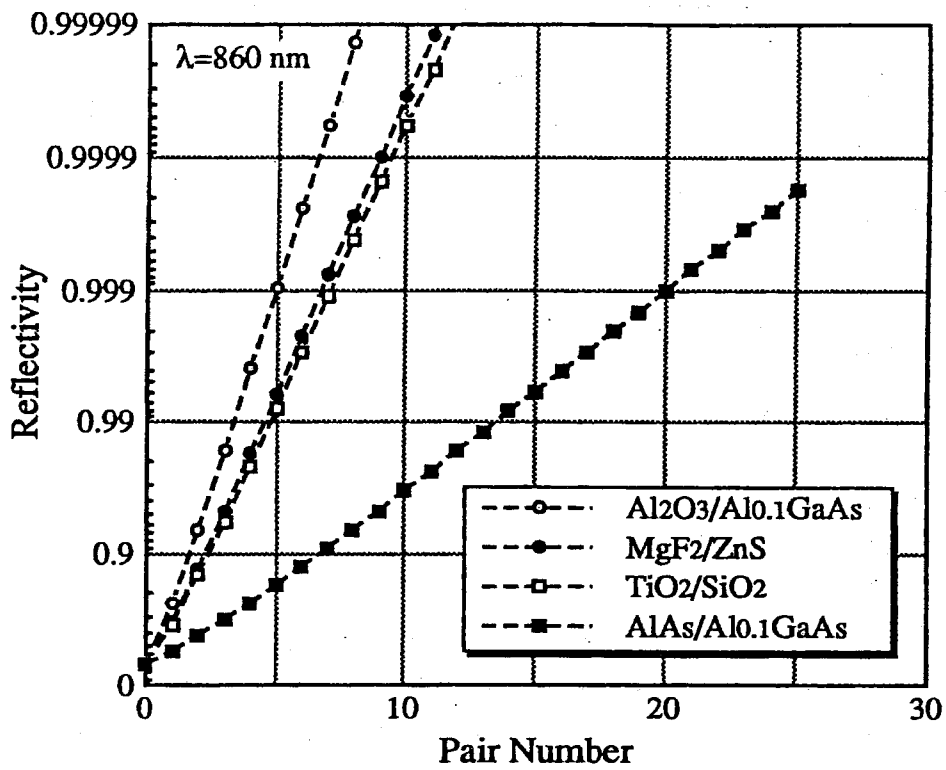


図 2.3: 反射率 (多層膜反射鏡) のペア数依存特性

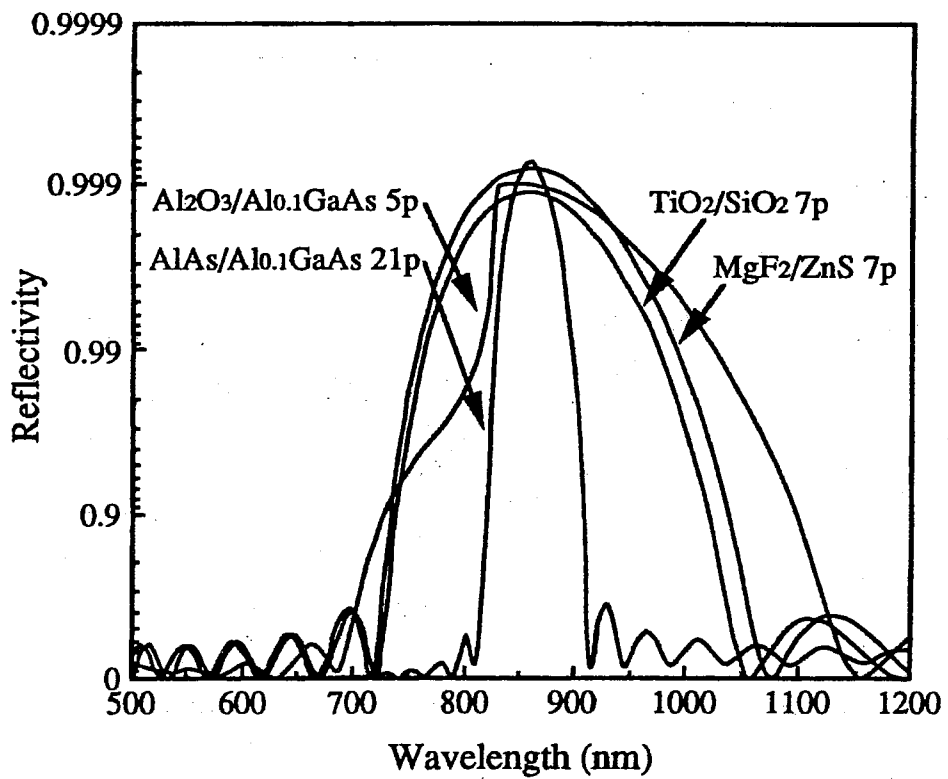


図 2.4: 多層膜反射鏡の反射率特性

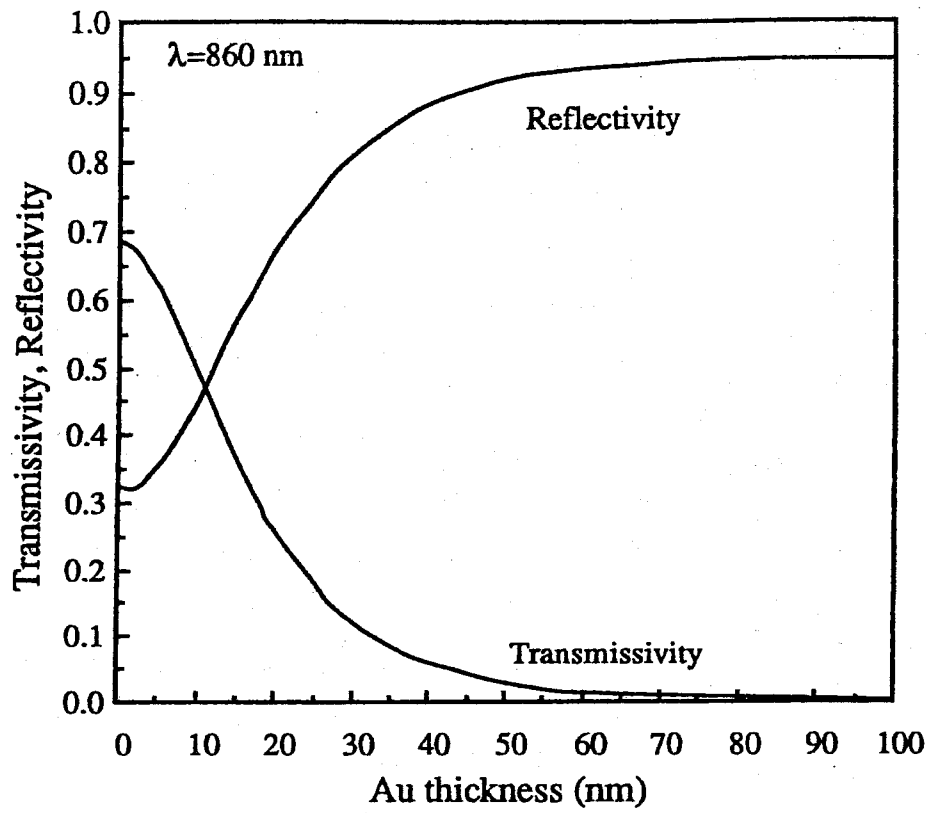


図 2.5: 反射率・透過率 (Au 薄膜反射鏡) の膜厚依存特性

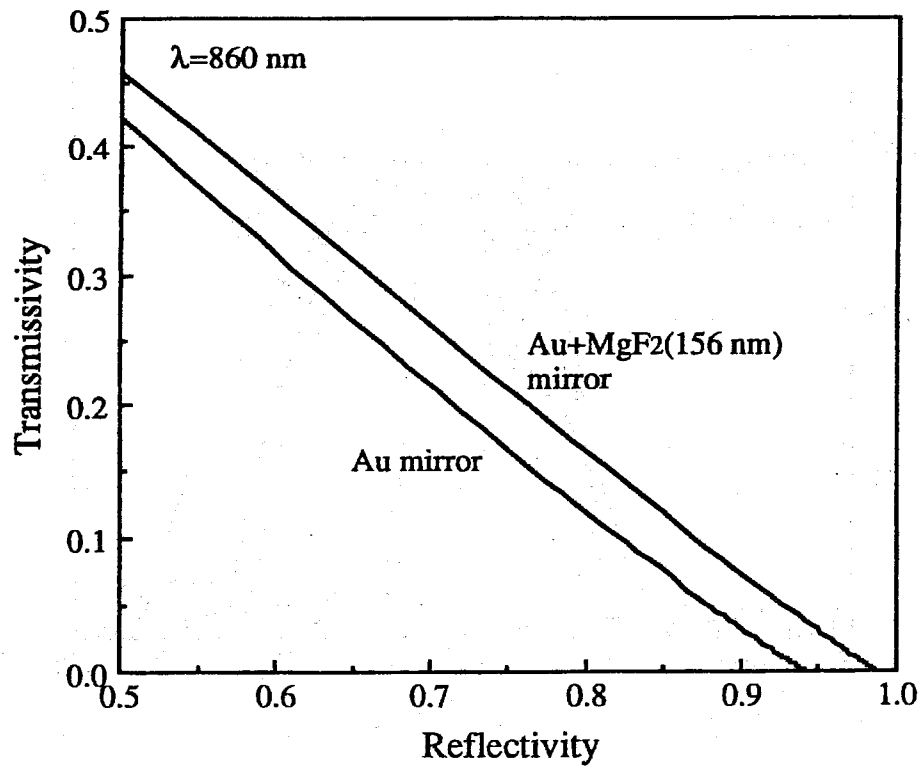


図 2.6: 反射率と透過率の関係

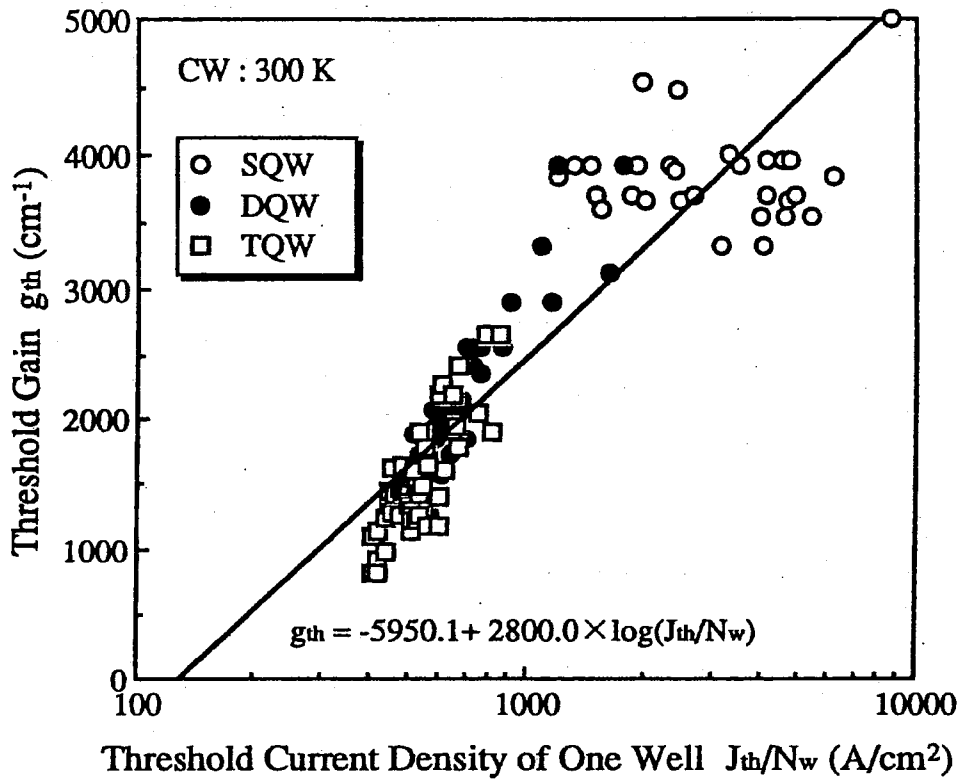


図 2.7: 閾値利得と規格化閾値電流密度の関係 (端面発光レーザ)

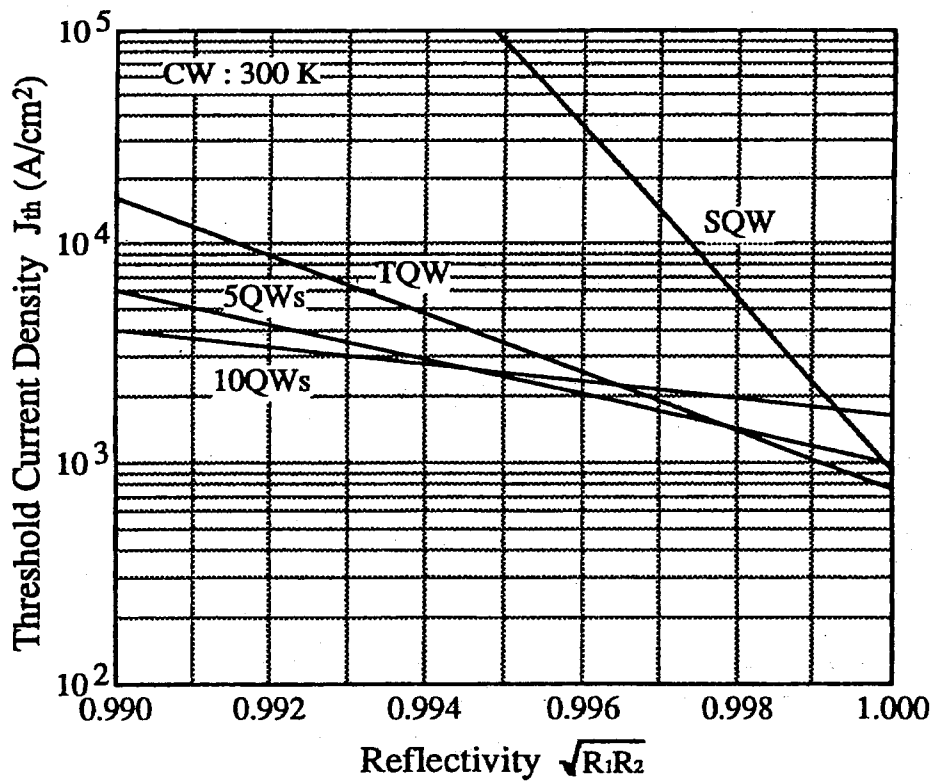


図 2.8: 閾値電流密度の反射率依存特性

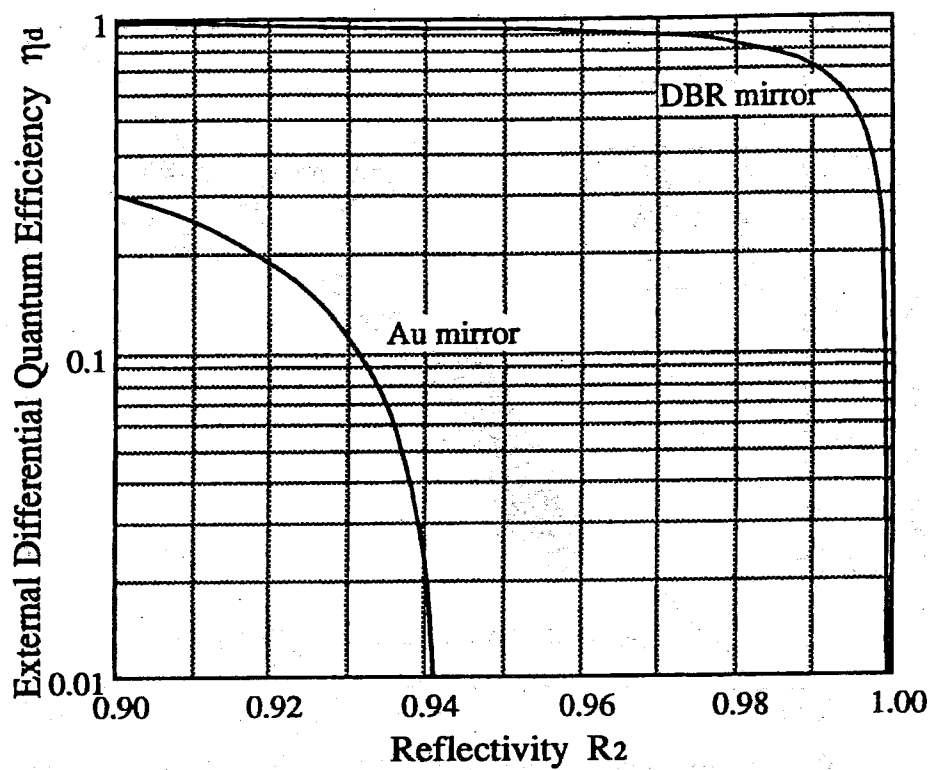


図 2.9: 外部微分量子効率の反射率依存特性 ( $R_1=1, \eta_i=1$ )

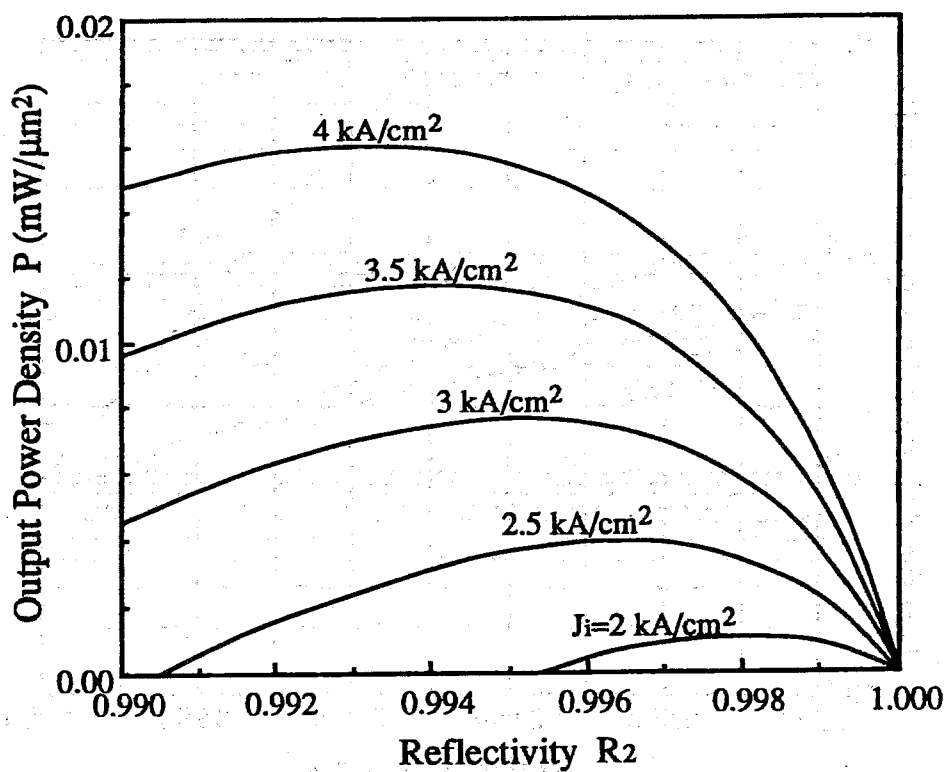


図 2.10: 光出力密度の反射率依存特性 ( $N_w=10, R_1=1, \eta_i=1$ )

## 参考文献

- 1) K. Streubel, S. Rapp, J. Andre and J. Wallin: *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 1121(1996).
- 2) S. Uchiyama, N. Yokouchi and T. Ninomiya: *Electron. Lett.*, **32**, 1011(1996).
- 3) Y. Ohiso, C. Amamo, Y. Itoh, K. Tateno, T. Tadokoro, H. Takenouchi and T. Kurokawa: *Electron. Lett.*, **32**, 1483(1996).
- 4) N. M. Margalit, D. I. Babic, K. Streubel, R. P. Mirin, R. L. Naone, J. E. Bowers and E. L. Hu: *Electron. Lett.*, **32**, 1675(1996).
- 5) M. Kondow, K. Nakahara, T. Kitatani, Y. Yazawa and K. Uomi: *OECC'96*, 18D-3-2(1996).
- 6) D. L. Huffaker, L. A. Graham, H. Deng and D. G. Deppe: *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 974(1996).
- 7) G. M. Yang, M. H. MacDougall and P. D. Dapkus: *Electron. Lett.*, **31**, 886(1995).
- 8) Y. Hayashi, T. Mukaiharu, N. Hatori, N. Ohnoki, A. Matsutani, F. Koyama and K. Iga: *Electron. Lett.*, **31**, 560(1995).
- 9) M. H. MacDougall, G. M. Yang, A. E. Bond, C. K. Lin, D. Tishinin and P. D. Dapkus: *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 310(1996).
- 10) B. J. Thibeault, E. R. Hegblom, P. D. Floyd, R. Naone, Y. Akulova and L. A. Coldren: *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 593(1996).

- 11) K. D. Choquette, H. Q. Hou, K. L. Lear, H. C. Chui, K. M. Geib, A. Mar and B. E. Hammons: *Electron. Lett.*, **32**, 459(1996).
- 12) R. P. Schneider, Jr., M. R. T. Tan, S. W. Corzine and S. Y. Wang: *Electron. Lett.*, **32**, 1300(1996).
- 13) B. Weigl, G. Reiner, M. Grabherr and K. J. Ebeling: *Electron. Lett.*, **32**, 1784(1996).
- 14) Y. Oshino, K. Tateno, Y. Kohama, A. Wakatsuki, H. Tsunetsugu and T. Kurokawa: *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 1115(1996).
- 15) H.-E. Shin, Y.-G. Ju, J.-H. Shin, J.-H. Ser, T. Kim, E.-K. Lee, I. Kim and Y.-H. Lee: *Electron. Lett.*, **32**, 1287(1996).
- 16) K. D. Choquette, R. P. Schneider, M. H. Crawford, K. M. Geib, and J. J. Figiel: *Electron. Lett.*, **31**, 1145(1995).
- 17) T. Yokogawa, S. Yoshii, A. Tsujimura, Y. Sasai and J. Merz: *SSDM'95*, S-V-4, 674(1995).
- 18) M.Suzuki and T.Uenoyama: 第 57 回応用物理学会予稿集, 258(1996).
- 19) S. Nakamura *et al.*: *LEOS Annual Meeting'96*, PDP1.1(1996).
- 20) J. M. Redwing, D. A. S. Loeber, N. G. Anderson, M. A. Tischler and J. S. Flynn: *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 1(1996).
- 21) N. Yamada, Y. Kaneko, S. Nakagawa, D. E. Mars, T. Takeuchi and N. Mikoshiba: *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 1895(1996).
- 22) M. Takahashi, P. Vaccaro, k. Fujita, T. Watanabe, T. Mukaiharu, F. Koyama and K. Iga: *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 737(1996).
- 23) N. Hatori, T. Mukaiharu, Y. Hayashi, N. Ohnoki, F. Koyama and K. Iga: *SSDM'95*, S-VI-9, 794(1995).

- 24) H. Saito, K. Nishi, I. Ogura, S. Sugou and Y. Sugimoto: *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 3140(1996).
- 25) J. K. Tu, J. J. Talghader, M. A. Hadley and J. S. Smith: *Electron. Lett.*, **31**, 1448(1995).
- 26) H. Wada and T. Kamijoh: *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 173(1996).
- 27) H. Wada, T. Takamori and T. Kamijoh: *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 1426(1996).
- 28) D. G. Deppe, N. Chand, J. P. van der Ziel and G. J. Zydzik: *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 740(1990).
- 29) 伊賀、小山: 面発光レーザ (オーム社)
- 30) N. K. Dutta: *J. Appl. Phys.*, **53**, 7211(1982).
- 31) N. K. Dutta: *IEEE J. Quantum Electron.*, **19**, 1011(1983).
- 32) D. Kasemset, C. Hong, N. B. Patel and P. D. Dapkus: *IEEE J. Quantum Electron.*, **19**, 1025(1983).
- 33) A. Sugimura: *IEEE J. Quantum Electron.*, **20**, 336(1983).
- 34) Y. Arakawa and A. Yariv: *IEEE J. Quantum Electron.*, **22**, 1887(1986).
- 35) T. Namegaya, N. Matsumoto, N. Yamanaka, N. Iwai, H. Nakayama and A. Kasukawa: *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 1887(1994).
- 36) G. M. Yang, M. H. Macdougall, V. Pudikov and P. D. Dapkus: *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **7**, 1228(1995).
- 37) Y. Ohiso, K. Tateno, Y. Kohama, A. Wakatsuki, H. Tsunetsugu and T. Kurokawa: *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 1115(1996).

## 第3章

# 結晶成長法と格子不整合系の問題点

### 3.1 結晶成長法

この節では、半導体レーザを作製するための基礎技術として、良質な半導体結晶を得るための結晶成長法について述べる。近年は、特性向上のために量子効果を用いた半導体レーザが主流で、100原子層程度の超薄膜結晶を作製可能な制御性が要求されている。特に面発光レーザにおいては、基板と平行な反射鏡を形成するため、各成長層及び表裏面の平坦性が重要となってくる。そのため、従来より用いられてきた液相成長 (LPE: Liquid Phase Epitaxy) 法から、層厚制御性に優れた有機金属気相成長 (MOCVD: Metalorganic Chemical Vapor Deposition) 法、分子線エピタキシャル (MBE: Molecular Beam Epitaxy) 法、あるいはこれらの長所を兼ね備えた化学ビーム成長 (CBE: Chemical Beam Epitaxy) 法へと移行してきている。次項において、MOCVD 法、MBE 法そして CBE 法の成長機構及びその特徴について述べる。

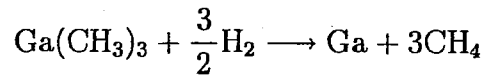
#### 3.1.1 有機金属気相成長 (MOCVD) 法

本研究でも用いている MOCVD 法は、Al、Ga、In などの III 族元素を基板まで輸送するのに蒸気圧の高いアルキル化合物を用いることを特徴としている。これらの有機化合物は水素をふくむ雰囲気の中で熱分解して金属を析出し、残されたメチル基、エチル基などはメタン、エタンなどの気体になる。V 族元素は  $\text{AsH}_3$ 、 $\text{PH}_3$  などの水素化物を用いるのが一般的であるが、これらの気体は毒性が強いので有機化合物の形を用いる場合もある。これらの III 族元素と V 族元素を  $500\sim 800^\circ\text{C}$  の温度で熱分解して、III-V 族の半導体を成長させる。反応系は通常 1 気圧であるが、気体輸送の途中で錯体などの中間生成

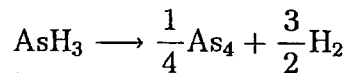


物を作る可能性のある InP 系の成長などでは、輸送速度を高めて錯体の生成率を減らす  
目的で 0.1 気圧程度の減圧成長法を用いることがある。

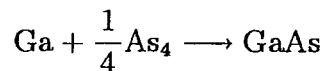
例えば、 $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$  (トリメチルガリウム、TMG) と  $\text{AsH}_3$  (アルシン) を用いた GaAs  
成長の場合の反応過程は、まず、



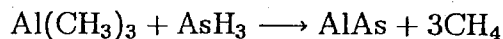
の熱分解反応で生成した Ga 原子が



の反応によって生成した As 分子で被覆された GaAs 結晶表面に達するとただちに



の反応によって GaAs の析出が起こる。同様に  $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$  (トリメチルアルミニウム、  
TMA) と  $\text{AsH}_3$  の反応により、



AlAs が得られる。この 2 つを合わせると  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  が得られることになる。 $\text{AsH}_3$  を  
多めに流しておけば、成長速度は TMG、TMA の流量で決まる。従って、マスフローコ  
ントローラ (MFC) でこれらの流量を精密に制御してやれば、成長速度の再現性が良く  
なる。また、n 型成長層を得るためには、ドーパントとして  $\text{H}_2\text{Se}$  (セレン化水素) ある  
いは  $\text{H}_2\text{S}$  (硫化水素) を反応炉中に導入すればよい、同様に p 型の場合は、 $\text{Zn}(\text{CH}_3)_2$   
(ジメチルジンク、DMZ) あるいは  $\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$  (ジエチルジンク、DEZ) が用いられる  
のが普通である。

MOCVD 法は、次に述べる MBE 法に比べると成長パラメータが装置に依存し、また  
成長過程をその場観察する手段が発達していない等の問題点がある。しかし、成長法名  
が示すように、全ての原料がガスのため MFC で容易に制御でき、原料ガスの選択の自  
由度も大きい。また、装置の構成が簡単であることも特徴である。

### 3.1.2 分子線エピタキシャル (MBE) 法

MBE 法は本質的には真空蒸着技術であるが、 $10^{-11}$  torr 以下の超高真空を用いることと、蒸着の結果、単結晶ができることの2点が際立っている。クヌーセンセルと呼ばれる蒸発源セルを加熱することによって発生する分子線が、加熱された単結晶基板と相互作用することによって単結晶膜が形成される。蒸発源セルは複数個用意され、それぞれには成長しようとする薄膜の構成元素や化合物またはドーパント元素が充填される。個々の蒸発源セルと基板の間には機械的に動くシャッタ板が設けられ、その開閉により必要な分子線だけが基板に到達して、他の分子線は遮断される。このシャッタの開閉の組み合わせにより、基板上に組成やドーパントの異なる薄膜を積層可能となる。例えば、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  層を成長する場合、Ga と Al のセルは  $1000^\circ\text{C}$  程度に加熱され、As のセルは  $300^\circ\text{C}$  程度に加熱される。この時、Ga と Al は原子状になって蒸発するが、As は分子状の  $\text{As}_4$  あるいは  $\text{As}_2$  になって蒸発する。このとき蒸発する Ga と Al の量の比を制御すれば組成  $x$  が決まり、成長速度はこれらの蒸発量から決まる。また n 型成長層を得るためには、Si や Sn などを同時に蒸発させる必要があり、p 型の場合には、Be や Mg などを蒸発させる必要がある。基板温度は一般に高い方が良質の膜が得られるが、高すぎると白濁する、また III、V 族のフラックス比によっても発光機能という観点での膜質が左右される。

MBE 法は、成長速度を毎秒 1 原子層程度まで小さくでき、シャッタの開閉によって急峻な組成変化やドーパント変化が可能であり、薄膜や多層膜の成長に向いている。また、基板温度が MOCVD 法に比べて低く、機械的なマスクで成長表面に任意の形状をもった単結晶を作製可能である。そして、成長表面を解析する各種の超高真空表面解析装置 (RHEED 等) を併用することにより、成長表面の結晶構造や化学構造をその場観察することができる。しかしながら、オーバルディフェクトと呼ばれる表面欠陥の存在や、高蒸気圧の元素 (V 族元素) を 2 種類以上必要とする混晶 ( $\text{InGaAsP}/\text{InP}$  系) の成長が難しいなどの問題点もある。

### 3.1.3 化学ビーム成長 (CBE) 法

CBE 法は、前項で述べた MBE 法の欠点を補うために、V 族原料にガスを使用するという考えに始まっている。つまり V 族ガスがあらかじめ熱分解され、例えば  $\text{As}_2$  と  $\text{P}_2$  の

形で導入できる CBE 法では、ガスの流量制御も容易である。しかも  $10^{-4}$  torr 以下の低圧下で成長を行うため、3 元や 4 元の混晶を原子層オーダーで制御性良く成長することができる。また原料ガスの交換も容易にでき、ガスの種類によっては成長の選択性が現れたり、反応性の高いガスによる低温成長の可能性もある。具体的には、MBE 法で用いられる固体金属材料用クヌーセンセルの代わりに、Ⅲ 族有機金属原料用として低温ガスセル、Ⅴ 族有機金属原料用として高温ガスセルが用いられる。ドーパント材料として固体金属を用いる場合は、クヌーセンセルも同時に用いられる。ガスを使う性質上、MBE 法のようにシャッタによる分子線の開閉は難しくなるが、ガス供給系と成長間に高い差圧があることで分子流の流速が非常に速くなり、急速なバルブの開閉により同様の効果が得られる。このように CBE 法は MOCVD 法のようにガスを用いることから、MFC による流量制御や原料の選択の自由度も大きい。また、高真空を用いることから MBE 法のように原子オーダーの膜厚制御性やその場観察も可能となる。CBE 法はまだ開発途上であるが、今後この成長法が確立されれば半導体レーザを作製する上で非常に有効な手段となるであろう。

### 3.2 格子不整合系結晶成長の問題点

この節では、基板に対して格子定数の異なる半導体材料をヘテロ結晶成長する場合の問題点とその軽減法について述べる。以下では、本研究のように、MOCVD 法を用いて Si 基板上に GaAs 系半導体を結晶成長した場合について述べる。Si と GaAs には有極性 (GaAs) と無極性 (Si) に起因する逆位相粒 (APD: Antiphase domain) の発生、格子不整合 (4.1%) 及び熱膨張係数差 (2.5 倍) に起因する転位などの高密度格子欠陥の発生という問題がある。前者は積層欠陥になると考えられるが、 $2^\circ$  程度のオフ角を有する基板を使用することにより、完全に抑制されている。後者は容易に解決する問題ではなく、多くの研究が行なわれてきた。転位密度の低減化には、転位の発生機構を明らかにすることも重要である。次項では転位の発生機構と本研究でも用いた転位低減技術について述べる。

### 3.2.1 転位の発生機構

ここでは、格子不整合系ヘテロ結晶成長において転位が発生するメカニズムを成長初期過程、成長途上及び成長後の冷却過程の3段階に別けて解説する。

まず成長初期は三次元成長モードであると考えられる。これは、系全体のエネルギーの最小化と格子不整合に起因して起こる。低温では微小な島が高密度で、高温では大きな島が低密度で表面に形成される。島が十分小さい場合には、島の内部には欠陥は発生しない。つまり、エピ層の厚さが臨界の値より薄い間は、格子歪みは、成長膜厚に応じて弾性的に蓄積される、しかし、島が十分大きくなり、臨界膜厚以上の厚さに達すると島の内部のヘテロ界面でミスフィット転位が発生し、格子歪みが緩和される。また同時に積層欠陥及び双晶も発生する。

成長の初期過程では、格子歪みは必ずしも100%緩和されているとは限らない。したがって、成長途上でも系の残留応力をエネルギー源として、以下に述べるような機構により新たな欠陥が形成される。それは基板からエピ層に伝播する貫通転位のエピ層中での湾曲またはすべり運動である。エピ層中の残留応力により、基板から伝播してきた貫通転位が湾曲またはすべり運動を起こし、その結果ヘテロ界面にミスフィット転位成分を形成する。また貫通転位同士のエピ層中での反応の結果、新たに転位が生成される可能性もある。

すでに述べたように、GaAsとSiとの間の格子不整合の大部分は、高温における成長時に緩和されると考えられる。しかし、成長終了後の冷却過程においても、両者の熱膨張係数差により、系に格子歪みが蓄積され欠陥が新たに発生する。この格子歪みの大きさは成長温度に依存する。したがって、冷却過程中、結晶の温度が転位のすべり運動を起こさせるのに十分高い間は、新たな転位の発生が予想される。

### 3.2.2 転位低減技術

ここでは、本研究でも用いた種々の転位の低減方法について述べる。

まず「二段階成長法」について述べる。当初、GaAs/Si成長において、低温では良好な単結晶成長が困難、高温では三次元成長が起こり表面モロロジーが悪化、転位密度が $10^8\text{cm}^{-2}$ 等の問題があった。そこで、これらの問題を解決するため、提案されたのがこの方法である。まず第一ステップでは、薄いGaAsバッファ層を低温(400~450℃)で成

長する。続く第二ステップでは、厚い GaAs を高温 (700~750 °C) で成長する。この第二ステップの初期に、格子不整合による歪みは、ヘテロ界面でのミスフィット転位の形成により緩和されると考えられる。実際は、表面モロロジーはかなり改善され、ヘテロ界面にミスフィット転位が均一に形成されたものの、転位密度自体の大幅な低減化は得られていない。しかし、その後の低減化工程 (後述) への準備工程として用いられている。

次に「歪み超格子の導入」について述べる。この方法は、GaAs の成長を一旦中断して、歪み超格子を成長し、再度 GaAs を成長する方法である。この方法により以下の現象が起こると考えられる。まずエピ層中に発生した貫通転位が、歪み超格子の界面に蓄積されている格子歪みにより湾曲する。そして湾曲した転位の貫通転位部の多くが互いに反応し、全体として閉ループが形成され、エピ層上部へ貫通転位が伝播しなくなる。この手法で重要なのは、系に与える歪みの大きさで、歪みが小さいと貫通転位が十分に湾曲しないし、逆に大きすぎると超格子界面に余分なミスフィット転位を発生させてしまう。つまり歪み超格子の材料及びその構造の最適化が必要である。二段階成長法の場合と比較して、InGaAs/GaAsP 超格子のもので 1/2 倍、InGaAs/GaAs 超格子のもので 1/3 倍の転位密度低減化が報告されている。

続いて「その場熱処理法」について述べる。金属材料と同様に、半導体材料においても、高温熱処理により転位の運動を促進させ、反応により転位が消滅する確率を高めることができる。成長中の熱処理には、成長中に基板の温度を成長温度より高い温度に何回か上げる方法 (単純熱処理法) と成長中に基板の温度を成長温度から高温に上げたあと低温に下げ、再び成長温度に戻す、或いは何回か繰り返す方法 (熱サイクル法) がある。この方法単独でも、二段階成長法の場合と比較して数十倍程度の低減効果があると報告されているが、前述した歪み超格子と組み合わせて用いると二桁程度の大きな転位低減効果があると報告されている。

最後に「成長後熱処理法」について述べる。この方法は、成長後に試料を炉から取り出した後、再度熱処理を施す方法である。その転位低減メカニズムは、その場熱処理法と同じである。二段階成長後、800 °C 30 分の熱処理を 2 回施した結果、二段階成長法の場合と比較して 1/2 倍程度の転位低減が報告されているが、その場熱処理法程の効果は得られていない。

## 参考文献

- 1) 伊賀、小山: 面発光レーザ (オーム社)
- 2) 岡本: 超格子構造の光物性と応用 (コロナ社)
- 3) 中嶋: 半導体レーザ入門 (秋葉出版)
- 4) 上田: 応用物理学会誌 **61** 126(1992).