

## 論文内容の要旨

論文題目「顕微光学測定によるリッジ型量子細線レーザーの光学特性と電子状態の研究」

氏名 渡邊 紳一

半導体量子細線レーザーは、一次元電子系の状態密度に起因する温度特性の改善や発振しきい値の低下などが理論的に予測され注目を集めている。また細線形状に依存する価電子帯バンド混合により発光に偏光特性が生じるため、形状による偏光制御も可能である。

本論文はリッジ型量子細線(QWR)レーザーについて顕微光学測定の立場からその発光・発振特性や電子状態の研究を行ったものである。測定および計算結果から一次元リッジ型QWRレーザー内部でおこる物理現象を明らかにし、結晶成長へのフィードバックを与えた。

第2章ではリッジ型量子細線レーザーの作製方法について詳しく述べる。リッジ型量子細線レーザー構造の断面透過電子顕微鏡(TEM)写真を図1に示す。ファセット結晶成長技術を用いて先の尖った尾根(リッジ)形状の構造を作製することができる。ポテンシャルの低いGaAs薄膜層(z方向の厚さ5nm)が $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ バリア層に挟まれ量子構造が形成される。量子構造としては、リッジの左右各斜面に側面量子井戸("Side-QW")が、そして二つのSide-QWの交線にあたる部分に量子細線("QWR")が形成される。QWR領域ではポテンシャルがSide-QWより低くなるために、キャリアの波動関数はQWR領域に局在化する。図1のy-z方向に二次元閉じ込めを受けたキャリアは、x方向にのみ運動することで一次元系が実現する。さらにこれらの量子構造を、屈折率の異なる $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ クラッド層で挟み込むことで導波路構造とし、 $300\mu\text{m}$ の長さで細線両端をへき開することでレーザー共振器構造にした。

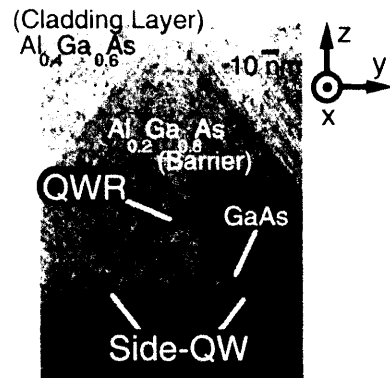


図1：リッジ型QWRレーザーの断面TEM写真

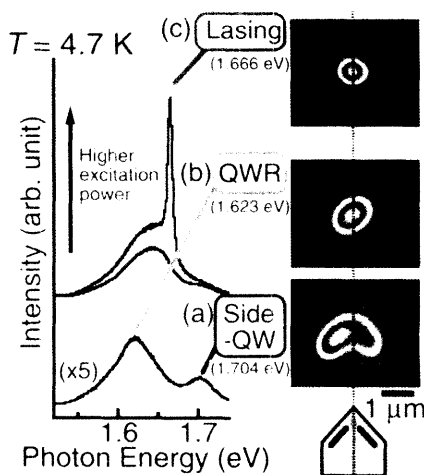


図2：リッジ型 QWR レーザーの発光・発振スペクトルとそのへき開面からのイメージ

第3章ではリッジ型量子細線レーザーの顕微光学測定による発振特性評価について述べる。パルスレーザーを用いてリッジ構造全体をストライプ状に光励起することで、リッジ型量子細線レーザーの発振を実現した。発振は低温(4.7 K)から室温(290 K)まですべての温度領域で確認され、その特性温度は 100K であると見積もられた。図2は温度 4.7 K における光弱・強・最強励起下でのリッジ型量子細線レーザーへき開面からの発光・発振スペクトルおよびその顕微波長・空間分解イメージである。光弱励起下では二つの発光ピーク(a)、(b)が確認でき、顕微発光イメージからそれらの発光起源が(a)Side-QW および、(b)QWR であることが明らかになった。励起強度を増すと、QWR の発光ピークが徐々に高エネルギー側にシフトし  $0.5 \text{ kW/cm}^2$  をしきい値として鋭いスペクトルピークが現れる。これはリッジ型量子細線構造からのレーザー発振光である。放出光強度の励起強度依存性や時間分解測定も発振の実現を示唆した。レーザー発振時のへき開面からの顕微放出光イメージ[図 2(c)]は QWR と同様円形のパターンをしており、発振が QWR 領域から放出されることが確かめられた。発振ピークが QWR 弱励起発光エネルギーと比較して高エネルギー側にシフトしていることから、QWR の励起状態間の遷移を起源とした発振であることが考察された。

第4章ではリッジ構造上部(Top-View)から同様に顕微放出光イメージを観察し、発振起源を推測すると同時に細線内部のキャリアの流れについても議論する。図3は、Top-View 観察した顕微放出光イメージである。横軸の  $x=0 \mu\text{m}$  が試料へき開面であり、 $x > 0$  領域に QWR が存在する。3つのイメージは図2と同様、弱励起時の(a)Side-QW および(b)QWR、そして(c)レーザー発振時の発振エネルギーでの Top-View イメージを表している。(a)と(b)については細線に沿った発光強度プロファイルも示す。図3から以下の3つの情報(I)-(III)を得ることができた。

(I) リッジ構造の構造ゆらぎについて；  
QWR と Side-QW の発光強度プロファイルを比較すると、QWR については  $x$  軸に沿って  $2\text{-}3 \mu\text{m}$  スケールで発光強度がゆらぐのに対し、Side-QW についてはこの測定の空間分解能である  $1 \mu\text{m}$  スケールでゆらぐ。QWR については  $z$ -方向の結晶成長膜厚ゆらぎの影響が少なく、 $x$ -方向の細線に沿って  $2\text{-}3 \mu\text{m}$  程度キャリアが移動できると考えてよい。一方で Side-QW については実効的なポテンシャル厚みが QWR に比べて薄いため、同じ膜厚ゆら

第3章ではリッジ型量子細線レーザーの顕微光学測定による発振特性評価について述べる。パルスレーザーを用いてリッジ構造全体をストライプ状に光励起することで、リッジ型量子細線レーザーの発振を実現した。発振は低温(4.7 K)から室温(290 K)まですべての温度領域で確認され、その特性温度は 100K であると見積もられた。図2は温度 4.7 K における光弱・強・最強励起下でのリッジ型量子細線レーザーへき開面からの発光・発振スペクトルおよびその顕微波長・空間分解イメージである。光弱励起下では二つの発光ピーク(a)、(b)が確認でき、顕微発光イメージからそれらの発光起源が(a)Side-QW および、(b)QWR であることが明らかになった。励起強度を増すと、QWR の発光ピークが徐々に高エネルギー側にシフトし  $0.5 \text{ kW/cm}^2$  をしきい値として鋭いスペクトルピークが現れる。これはリッジ型量子細線構造からのレーザー発振光である。放出光強度の励起強度依存性や時間分解測定も発振の実現を示唆した。レーザー発振時のへき開面からの顕微放出光イメージ[図 2(c)]は QWR と同様円形のパターンをしており、発振が QWR 領域から放出されることが確かめられた。発振ピークが QWR 弱励起発光エネルギーと比較して高エネルギー側にシフトしていることから、QWR の励起状態間の遷移を起源とした発振であることが考察された。

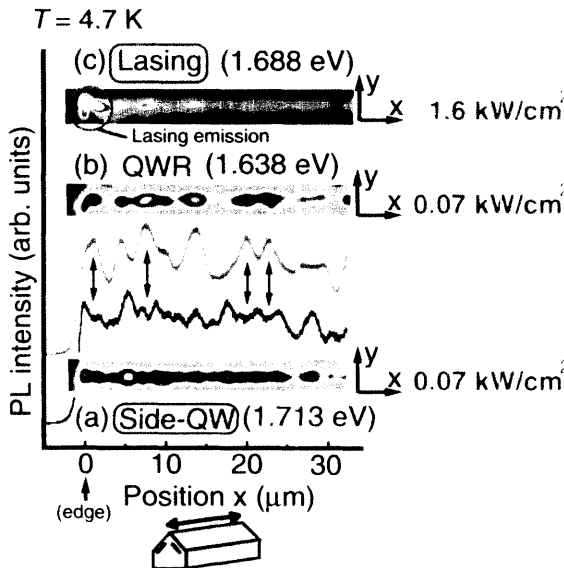


図3：リッジ型 QWR レーザーの Top-View イメージ測定

ぎでも大きなポテンシャル障壁となり、 $x$  方向へのキャリアの運動が妨げられると考えられる。(II) Side-QW から QWR へのキャリアの流れ込みについて；図 3(a),(b) 二つの Top-View イメージを比較すると、矢印領域では QWR の発光強度が強い一方で Side-QW の発光強度は弱いという相関がある。これは体積の大きい Side-QW で光吸収され生じたキャリアが QWR へと流れ込む効率に、膜厚ゆらぎによる場所依存性があるためと考えられる。(III) レーザー発振起源について；(b)と(c)の  $x > 0 \mu\text{m}$  での Top-View イメージが同一であることから発振起源が QWR であることが第 3 章に引き続き考察された。さらに(c)のイメージでは強いレーザー発振光がへき開面( $x=0 \mu\text{m}$ )で観測されるが、共振器内部( $x > 0 \mu\text{m}$ )ではレーザー光の散乱は確認されないため、光波長スケール( $\mu\text{m}$  オーダー)ではリッジ構造は一様であると考えられる。 $\mu\text{m}$ -スケールの構造一様性は反射 Top-View イメージでも観察された。

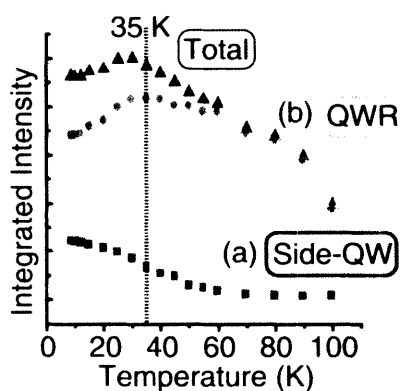


図 4：弱励起発光強度の温度依存性

第 5 章では第 4 章の Side-QW から QWR へのキャリアの流れ込みに関する考察を深め、両者の弱励起発光強度の温度依存性を測定した。その結果、図 4 に示すように、35 K 以下の温度領域では温度上昇に伴い Side-QW (■) の発光強度が減り、QWR (●) の発光強度が増える傾向がみられた。これは温度上昇に伴いキャリアの拡散長が増え、Side-QW 領域で局在発光したキャリアが QWR へと流れ込んで発光するためと考えられる。また総発光強度 (▲) に変化がないことから流れ込み時のロスが少ないことが推測される。一方 35 K よりも高い温度では、温度上昇に伴い Side-QW、QWR ともに積分発

光強度が単調に減少した。これは拡散長がさらに増えたことで QWR 内部のキャリアが細線に沿って運動し、非発光中心など他の状態に流れ込む確率が大きくなるためと考えられる。

第 6 章では顕微偏光発光測定系を用いリッジ型量子細線レーザー構造のへき開面から放出される発光・発振光の偏光依存性を測定した。励起強度の異なる (a)-(c) からなる図 5 は、リッジ構造をストライプ励起したときのへき開面からの発光・発振スペクトルとそのピーク強度の偏光角度依存性(極線プロット)である。最も弱励起の QWR 基底状態間の遷移発光[図 5(a)]は、へき開面内で +45 度の偏光角度成分を多く持つ。励起強度を増すと、QWR ピーク発光は縦偏光成分(0 度)が強くなり[(b)], さらに励起強度を増したときのレーザー発振光は +35 度の直線偏光となる[(c)]。励起強度による偏光角度の変化は、遷移に寄与する電子状態が QWR 基底状態から励起状態へ移り変わることが原因であると考察した。

第 7・8 章では、第 6 章の発光・発振偏光依存性と、数値計算した電子・ホール波動関数との対応関係を考察した。第 7 章では準備として、電子・ホー

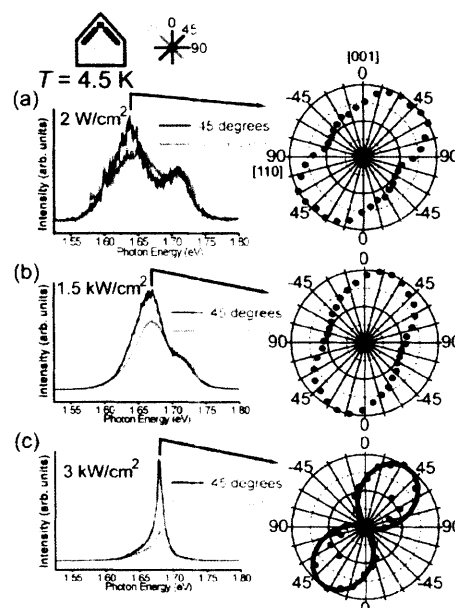


図 5：ストライプ励起時における QWR 発光・発振強度のへき開面内偏光依存性

ルの波動関数と、バンド間遷移の直線偏光依存性との対応を包絡線関数の重なりで表現する方法を提案した。図6のようにホールの包絡線関数は  $p_x, p_y, p_z$ -軌道プロット関数を基底に取り、スピンアップ・ダウンを含めて6成分で表示した。例えば  $x$ -直線偏光の遷移確率を考えるとときには、ホール6成分の包絡線関数のうち二つ ( $\phi_{x,\uparrow}^v, \phi_{x,\downarrow}^v$ ) と電子の包絡線関数との重なり積分を考えればよい。このように包絡線関数の重なり積分を通して  $x-, y-, z$ -直線偏光遷移確率を理解できる。第7章では付録BからDと合わせてその理論的枠組を詳しく述べ、簡単なリッジポテンシャルモデルに適用した。

第8章前半では様々なリッジ形状モデルに対して電子・ホールの波動関数を計算し、リッジ形状に依存する遷移の偏光特性を考察した。その結果、尖ったリッジ構造では Side-QW 領域にホールの波動関数がしみだし異なる量子数間の遷移 ( $e1-h2$  など) で縦偏光成分が強くなること、非対称なポテンシャルでは波動関数の偏りが原因で片側の井戸と平行な偏光成分が大きくなることなどがシミュレートされた。第8章後半では TEM 写真からかたどったポテンシャルの波動関数を計算し、第6章の実験で得られた

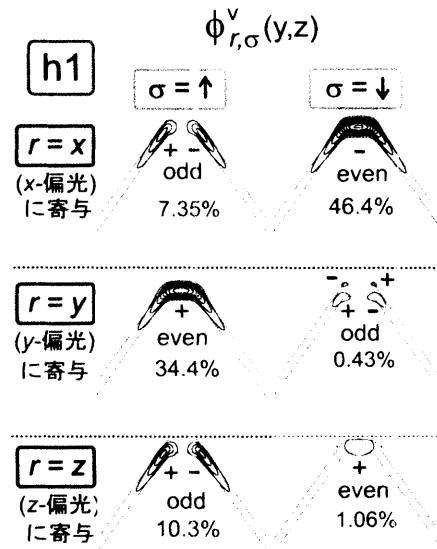


図6：ホール包絡線関数の6成分表示

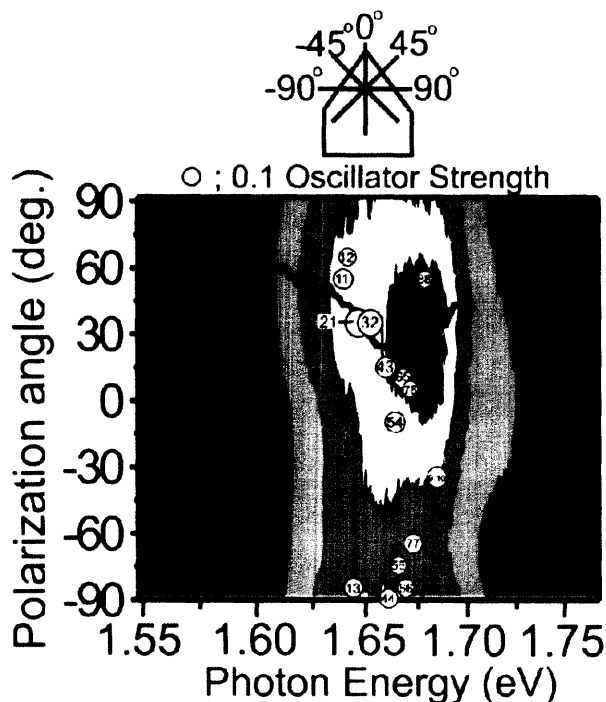


図7：第6章のQWR発光偏光依存性（等高線図および黒実線）と第8章の数値計算（白丸）との対応

た遷移の偏光依存性を理解した。図7には数値計算で得られた遷移エネルギー（横軸成分）および最も振動子強度の大きい偏光角度（縦軸成分）を白丸で示している。振動子強度の大きさは白丸の面積に比例する。白丸中の数字は例えば"32"とあるものは  $e3-h2$  遷移に対応する。白丸の下の3次元等高線図は、実験で得られたへき開面点励起発光強度のエネルギー・偏光角度依存性を表している。黒実線は各発光エネルギーで最も強い偏光成分を持つ角度を示す。基底状態間の遷移 ( $e1-h1$ ) では波動関数の偏りが原因で偏光角度が傾くことが計算され、第6章の実験結果と一致した。また励起状態の発光については、黒実線の偏光分布と、数値計算結果で得られた  $e3-h2$  遷移など一つ異なる量子数間の遷移偏光成分が一致し、励起状態間の遷移で縦偏光を生じる理由が考察できた。

最後に第9章で本論文をまとめる。