

論文審査の結果の要旨

氏名 渡邊 紳一

半導体量子細線レーザーは、1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、細線形状による偏光制御などの可能性があるため、現在注目されている素子である。この論文ではリッジ型量子細線レーザーの発光・発振特性と電子状態を顕微光学測定と理論計算によって研究した。その結果、リッジ型量子細線における電子とホールとの閉じこめ、細線の不均一性、発振に関与する電子とホールの状態と偏光特性について詳しい知見を得ることができ、レーザーに最適な細線構造とその結晶成長について有用な情報を与えることができた。

リッジ型量子細線はファセット結晶成長技術を用いて量子井戸を先の尖ったリッジ形状に成長して作製する。実験に用いたのは薄い GaAs 井戸層を $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 障壁層で挟んだ構造であり、リッジの左右斜面の GaAs に側面量子井戸が、それが交差する部分の GaAs に量子細線が形成される。さらに全体を $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ クラッド層で挟み光導波路構造とし、細線両端をへき開することで共振器構造とした。側面量子井戸での吸収に対応したエネルギーのパルスレーザーにより励起し、低温から室温までのすべての温度範囲でレーザー発振を実現した。

まず、へき開面からの空間分解顕微発光スペクトルにより、細線と側面量子井戸からの発光を明確に分離し、レーザー発振が細線部分で起こっていることを確認した。発振エネルギーは弱励起の発光ピークに比べて多少高エネルギー側に移動している。次に、リッジ構造上部の顕微発光スペクトルから、細線での発光強度のゆらぎが量子井戸の発光のゆらぎに比べて振幅が大きく特性距離も大きいことを示した。これから、細線部分の電子と正孔の方が井戸の部分よりも拡散しやすいことが結論できる。さらに、側面量子井戸の発光強度は温度とともに単調に減少するのに対し、細線からの発光強度は 35 K 以下では温度とともに増大し、高温では減少することを観測した。リッジ型量子細線は線状のパターン基盤を用いて結晶成長するために、パターンのゆらぎに付随して構造ゆらぎが生じる。高温での発光強度の減少の原因として、このような構造ゆらぎに起因して生じる非発光中心へ電子とホールが流れ込む確率が増加することを可能性の一つとしてあげている。

この論文の中心となるのは、へき開面からの顕微発光偏光スペクトルの測定とその理論解析である。偏光状態を測定するためには測定系の偏光依存性を完全に除去する必要がある。この論文では測定系の光学部品として偏光に依存しないものを利用するなど

測定系そのものの偏光依存性を注意深く取り除き顕微発光の偏光測定を行った。最も弱励起の場合、細線部分の発光はリッジの成長方向からほぼ 45 度傾いた偏光角成分を多く持つ。励起強度を増すと上向き成分の発光が増加し、さらに励起強度を増し発振が起こったときには 35 度傾いた直線偏光となる。

理論解析では、電子に対して通常の有効質量近似、ホールに対して重い正孔と軽い正孔を考慮した 4 行 4 列の Luttinger ハミルトニアンを用い、有限要素法を用いて具体的な計算を行った。実際のリッジ構造は結晶成長条件から左右に多少非対称となるが、計算ではその効果も取り入れた。計算結果によると、この非対称性は電子よりも正孔に対して大きい。これは、実際の閉じこめポテンシャルの空間変化がそれほど大きくなく、また正孔の質量に異方性があるために正孔の細線への閉じこめが電子に比べて小さいためである。得られた電子と正孔の波動関数から発光の偏光方向を計算し、基底状態間の発光の偏光が垂直方向から大きくずれ、励起状態が関与すると垂直方向成分が増えることを明らかにした。これは顕微発光偏光スペクトルの観測結果と半定量的に一致する結果である。

以上、この論文では、リッジ型量子細線レーザーの発光・発振特性と電子状態を主に顕微光学測定と理論計算により研究し、電子とホールの閉じこめ、細線の不均一性、発振に関与する電子とホールの状態と偏光について詳しい知見を得ることができ、さらに最適な細線構造とその結晶成長について貴重な情報を与えることができた。このように、本論文は博士(理学)の学位論文としてふさわしい内容をもつものとして審査員全員が合格と判定した。

なお、本論文の主たる業績は、秋山英文助教授らとの共著の形ですでに公表され、また公表予定であるが、実際の実験の遂行や結果の解析などにおいて学位申請者の寄与が重要であると認められた。