

## 論文内容の要旨

### 論文題目 「 電流注入型量子細線レーザー中の 非中性電子・正孔系における光学利得 」

(Optical gain due to charge-imbalanced electron-hole systems  
in current-injection quantum-wire lasers)

氏名 岡野真人

半導体量子細線レーザーは、バンド端における状態密度の先鋭化を反映し、優れたデバイス特性を示すことが期待され、また基礎物性物理の観点からも、強く相互作用する一次元系多体電子・正孔系の舞台として強い関心を集めてきた。劈開再成長法を用いて分子線エピタキシー法によって作製されるT型量子細線は、2000年頃に成長中断アニール法の開発により非常に均一性の高い試料が得られるようになった。その後、光励起によって詳細かつ系統的な計測が行われ、一次元中性電子・正孔系の光学応答においてはクーロン相互作用の強い影響が現れることが明らかになってきた。一方で、電流注入量子細線レーザーに関する報告例は少なく、詳細な物理計測はほとんどなされていなかった。

本論文は、高品質T型量子細線を用いて電流注入レーザーと変調ドープレーザーを作製し、詳細な物理計測を行ってキャリア注入過程と形成された非中性電子・正孔系の分布や光学利得スペクトルを調べ、一次元非中性電子・正孔系の光学利得の特徴を明らかにすることを目的としたものである。特に、静的遮蔽されたクーロン相互作用を取り入れた半導体ブロッホ方程式(SBE)によって計算された光学スペクトルとの比較を通して、一次元系の光学利得におけるクーロン相互作用の影響に対する普遍的な知見を得ることまでを目指した。

本研究では各々2種類の電流注入型レーザー試料(試料A,B)と光励起実験用レーザー試料(試料C,D)を劈開再成長法と成長中断アニール法を用いて作製した。図1に示したp型(001)量子井戸(ス

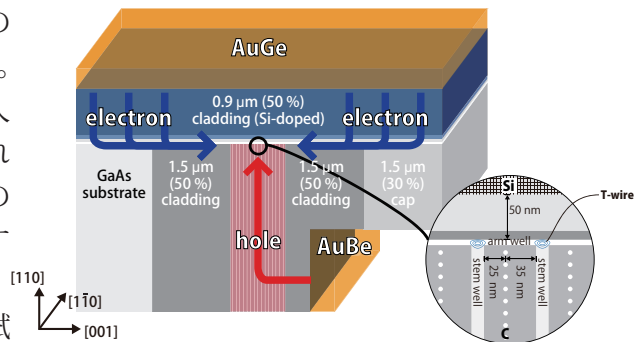


図1 p型ステム井戸とn型アーム井戸からなる電流注入T型量子細線レーザー試料構造(試料A)。

テム井戸)とn型(110)量子井戸(アーム井戸)からなる電流注入T型量子細線レーザー(試料A)においてはステム井戸から正孔が、アーム井戸から電子が細線へと注入される。T型量子細線においては図2に示すように、細線における電子と正孔の閉じ込めエネルギーが大きく異なる。そこで、キャリア注入やキャリア分布の影響を調べるために試料Aに対してドーピング構造を入れ替えた試料Bを作製した。また、電流注入ではキャリア密度を定量的に評価することは困難であるため、キャリア密度差が明らかかなn型変調ドーピング(試料D,  $n_e \sim 6 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ )と非ドーピング(試料C)の単一量子細線レーザーを作製し比較を行った。測定としては主に電流注入及び光励起増幅自然放出光(ASE)測定を行った。得られたスペクトルに対してCassidyの方法を用いて利得スペクトルを導出し、光学利得に関する系統的な研究を行った。また、SBE計算との比較から次元非中性電子・正孔系の光学利得へのクーロン相互作用の影響を議論した。これらの試料構造及び作製方法と各種測定方法、理論モデルに関しては2章で詳細を述べた。

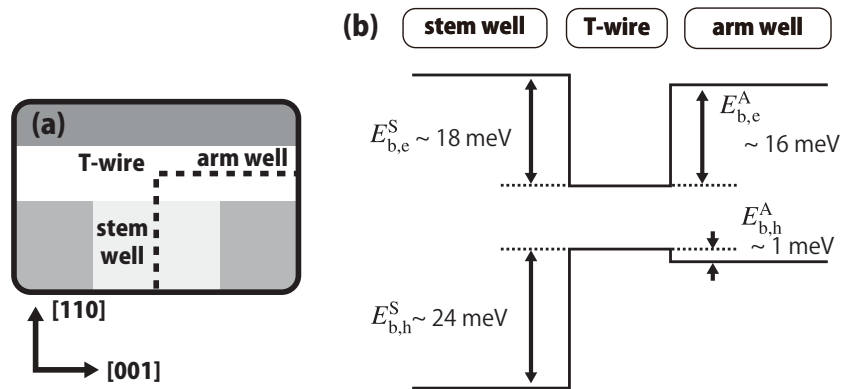


図2 (a) T型量子細線周辺の断面図。(b) (a)の点線に沿ったエネルギーバンド図

第3章では、電流注入レーザー試料Aのキャリア注入・非中性キャリア分布と利得特性に関して述べた。試料Aにおいては、電流注入T型量子細線レーザーの最高温度である110 K及び最広温度範囲5 - 110 Kでのレーザー発振が達成された。一方で、外部微分量子効率率は1%未満の低い値であった。顕微ASEイメージ測定から、この原因はステム井戸から注入される正孔がアーム井戸にまで広く分布してしまっていることだとわかった。そして、細線部に正孔過剰の非中性電子・正孔系が形成されていることが明らかになった。

図3に試料Aの5 Kでの(a)光励起ASE実験及び(b)電流注入ASE実験から得られた利得スペクトルを示す。導波路と垂直方向に出てくる自然放出光強度が等しいもの同士を示した。(a)においては電子と正孔の密度が等しく増加していくのに伴い、比較的シャープな利得ピークが増大する様子が観測された。(b)においては正孔が少し過剰な状態で電子と正孔のキャリア密度が増加していくのに伴い、低エネルギー側に裾を持った利得ピークが生じた後に、ブロードな利得ピークが増大していく様子が観測された。電流注入時の利得ピークは光励起時に比べ $\sim 6.5 \text{ meV}$ 低エネルギー側に現れたが、

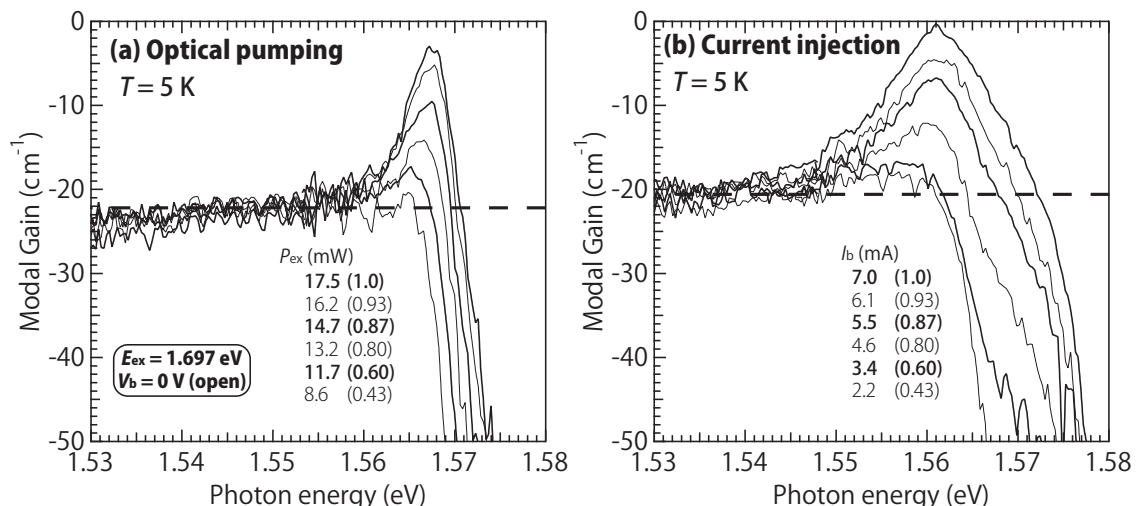


図3 試料Aの(a)光励起ASE実験及び(b)電流注入ASE実験における利得スペクトル(5 K)。励起強度・電流の横に示したのは自然放出光強度を規格化した値。

これは正孔が過剰に注入されていることによってバンドギャップ縮小効果 (BGR) が大きくなっているためだと考えられる。ピーク形状に関して、電流注入時の高エネルギー側の裾の広がり、電子と正孔のフェルミ波数が異なることを反映していると考えられる。また、電流注入時の低エネルギー側の裾の広がり、過剰注入された正孔によって多体効果の影響が大きくなったことを示唆している。

第4章では、n型STEM井戸とp型アーム井戸からなる電流注入T型量子細線レーザー (試料B) の利得測定実験について述べた。試料BではSTEM井戸から注入される電子の閉じ込めが強いため、電子が非常に過剰な非中性電子・正孔系が形成されていることを示す結果を得た。

図4に5Kでの試料Bにおける電流注入実験から得られた利得スペクトルを示す。低電流領域 ( $I_b = 0.2 - 500 \mu A$ ) では、電流の増加に伴って吸収端がブルーシフトしていくものの利得がほとんど生じなかった。さらに電流を上げていくと  $I_b = 1.1 \text{ mA}$  で利得ピーク現れ、 $2.0 \text{ mA}$  で利得が飽和することがわかった。低電流領域において、吸収端のブルーシフトは多数キャリアのフェルミエネルギーの増加を反映し、利得が発生していないことは少数キャリアの正孔がほとんど注入されていないことを反映している。また、 $I_b = 1.1 \text{ mA}$  における利得ピークの出現は少数キャリアである正孔が状態を占有し始めたことを、 $2.0 \text{ mA}$  での利得の飽和は正孔密度がそれ以上増加しなくなったことを示している。

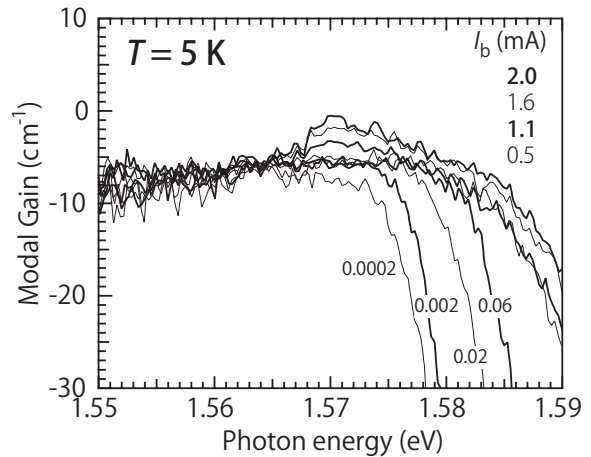


図4 試料Bでの電流注入実験における利得スペクトル (5 K)。

試料Aと試料Bにおける利得スペクトルの電流依存性は、細線における閉じ込めエネルギーの違いから理解された。正孔過剰である試料Aにおいては利得が生じ始めるまでは吸収端のシフトが殆ど起こらないが、これは細線における正孔の閉じ込めエネルギーが  $\sim 1 \text{ meV}$  と小さいことを反映している。一方、電子の閉じ込めエネルギーは  $\sim 16 \text{ meV}$  なので、電子は単独でも  $\sim 1.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$  の密度まで細線に注入できる。そのため、試料Bでは電気的非中性が試料Aよりも強い。順バイアスを増しても細線部はn型領域内に位置し、正孔密度があまり高密度にならないため、利得が飽和すると考えられる。

第5章では、電子が過剰に注入される試料Bにおいて、バイアス電圧を変化させることで電子密度を系統的に変化させ、光励起ASE実験によって光学利得に有利な条件を探った。

図5に5Kでの各バイアス電圧印加下における利得ピーク値の光励起強度依存性を示す。中性系を形成する両電極間を開放した状態 ( $V_b = \text{open}$ ) と  $V_b = 1 \text{ V}$  が非常に似た依存性を示した。電子が少し過剰に注入されていると考えられる  $2 \text{ V}$  は  $1 \text{ V}$

に比べて  $1/4$  以下の閾値励起強度を示した。  $3 \text{ V}$  においては強いバイアス電圧による電荷分離の影響が大きくなるため、閾値が増加することが明らかになった。また、アーム井戸とドーピング層のセットバック長が異なる試料B\*においてもバイアス電圧を印加して光励起実験を行ったところ、非ドーパ試料の  $1/5$  程度である  $\sim 1 \text{ mW}$  という低閾値での発振が観測された。温度依存性の実験などから、利得は電子が少し注入された条件での荷電励起状態に由来している可能性が示唆された。

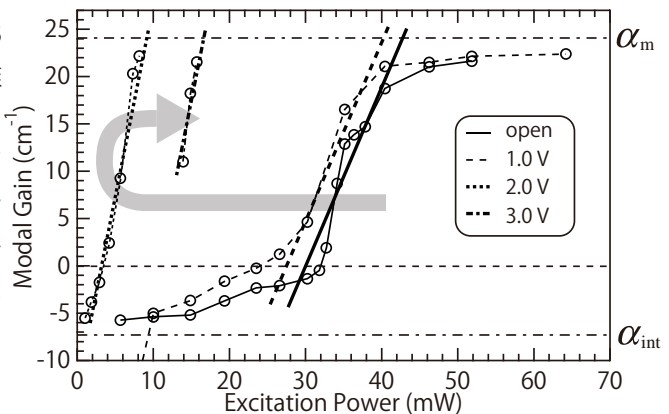


図5 試料Bの各バイアス電圧印加下における光励起実験から得られた利得ピーク値の光励起強度依存性 (5K)。

第6章では、試料 C,D に対して光励起 ASE 実験を行い、電子過剰の非中性電子・正孔系における利得特性をより定量的に調べた結果を述べた。図 6(a), (b) に試料 C,D における利得スペクトルの光励起強度依存性をそれぞれ示す。(a) の試料 C では弱励起で 1.582 eV に強い励起子吸収が観測され、励起強度の増加に伴って徐々に吸収ピークが小さくなっていき、その低エネルギー側に利得ピークが現れ増大した。(b) の試料 D においては弱励起の状態 ( $P_{ex} = 1.8$  mW) で既に利得が生じており、比較的にブロード且つ対称な形状を持った利得ピークが増大した。(a) と (b) の発振閾値を比較すると試料 D は試料 C の約半分の値を示し、電子過剰の非中性電子・正孔系においては確かに閾値が減少することが明らかになった。

実験結果を SBE による計算結果と比較した。計算された中性及び非中性電子・正孔系における利得スペクトルを図 6(c), (d) にそれぞれ示す。(a) と (c) を比較すると、吸収の低エネルギー側の裾から利得が生じること、利得ピークが低エネルギー側に裾を持つ非対称な形状であることがよく再現された。(b) と (d) に関しても、利得ピークが比較的に対称な形状を持つことがよく再現された。また、非中性電子・正孔系において閾値が減少することも再現できた。

第7章では SBE によって様々な条件下における一次元電子・正孔系の光学利得スペクトルを計算し、光学利得へのクーロン相互作用の影響を明らかにした。一次元系においてはバンド端で利得の抑制が起こり、各キャリアのフェルミ波数に対応する遷移エネルギー (中性電子・正孔系におけるフェルミ端) において利得と吸収の増強が起こることが明らかになった。またクーロンポテンシャルを静的遮蔽されたものから接触型に変更して行った SBE 計算から、クーロン増強因子の概形は状態密度の形状と電子正孔間クーロン相互作用の短距離部分の強さで理解することができ、バンド端での利得の抑制は一次元系特有の現象であることが明らかになった。

第8章では、本研究で得られた知見をまとめ、今後の課題と展望を記した。

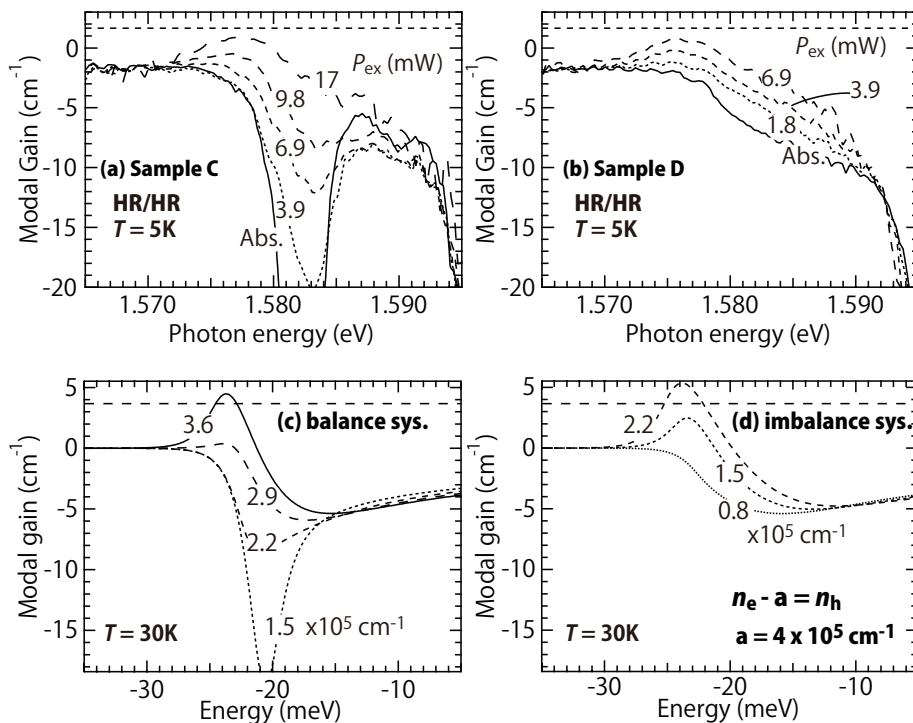


図6 (a) 非ドーブ (試料 C) 及び (b) n 型変調ドーブ単一量子細線レーザー (試料 D) の利得スペクトルの光励起強度依存性。SBE 計算による (c) 中性及び (d) 非中性電子・正孔系における利得スペクトルのキャリア密度依存性。