

1. 研究課題名

光・電波境界領域における高機能・低消費電力量子カスケードレーザーの開発

2. 研究者氏名

大谷啓太(東北大学電気通信研究所ナノ・スピン実験施設)

3. 研究のねらい

量子カスケードレーザーは、バンド構造を制御した半導体レーザーで、発光層を多段につなげた活性領域を採用することによって光子エネルギーの小さな領域においても高出力が得られるため中赤外からテラヘルツ領域の小型高出力光源として期待されている。このレーザーは、通常の半導体レーザーと異なり、量子井戸構造のサブバンド間遷移を用いているため、発振波長、再結合時間などを構造設計により最適化できる利点があるが、それらの極限の値は構成材料自身によって決まる。特に閾値電流密度を決める利得係数は、有効質量が小さいほど大きくなる。我々はこれに注目し、従来材料と比較して高いポテンシャルを示す InAs/Al(Ga)Sb を用いて研究を進め、界面に形成されるボンドをコントロールすることによって InAs/AlSb 量子カスケードレーザーを実現するなどの成果を上げてきた。本研究では、この InAs/Al(Ga)Sb 量子カスケードレーザーを実用化に向けて高機能・低消費電力化することを目的として研究を進めた。まず低温で閾値電流密度を下げることから始め、次に活性領域内の各構造の機能を明確にし、最適化することで動作温度を向上させた。最後に高温動作化、室温高出力化を行うと同時に従来のカスケードレーザーにない機能を加えることを目指した。以下にその成果の概要を述べる。

4. 研究成果

4.1 低温低閾値電流密度化

本研究開始前の InAs/AlSb 量子カスケードレーザーでは、空間的に離れた波動関数間の光学遷移を用いていたために、振動子強度が小さく、閾値電流密度は高い値(5 kA/cm²)であった。又発振後の微分抵抗が高いために発光層と注入層の間のトンネルがオフしてしまい、最高動作温度も 140 K 程度と低い温度であった。そこで発振後の微分抵抗を小さくするために、振動子強度の大きい超格子構造を発光層に採用した。この構造では研究開始前の構造と比較して振動子強度が 5 倍程度になる。超格子構造中の井戸間の結合を強くし、Stark ladder 状態に遷移するのを防ぐために、AlSb と比較して伝導帯バンドオフセットエネルギーが半分程度となる Al_{0.2}Ga_{0.8}Sb を障壁層に用いた。又熱によるキャリアの再分布を防ぐために、注入層の基底サブバンドと発光層の基底サブバンドのエネルギー差を 80 meV とした。素子はすべて分子線エピタキシー法を用いて作製した。光閉じ込めには自由キャリアの屈折率分散を用いた導波構造を採用した。観測された液体窒素温度における閾値電流密度(パルス動作時、発振波長 10 μm、周期数 36)は 0.70 kA/cm² であり、従来素子と比較して閾値電流密度を 1/7 程度まで減少させることに成功した。レーザー発振は温度 270 K まで観測され、発光層の基底サブバンドへのキャリアの熱再分布を抑えることで、温度特性を大幅に向上させることに成功した。この素子の最高動作温度を制限している要因を調

べるために、閾値電流密度の温度依存性を測定したところ、温度 170 K 程度まで理論と良い一致を示したが、それ以上の温度では、理論値よりも大きな値となった。次にスロープ効率が励起サブバンドへの注入効率に比例することに注目し、スロープ効率の温度依存性を測定したところ、温度とともに注入効率は減少することわかり、隣接した注入層ミニバンドへのキャリアの熱励起がこの素子の最高動作温度を制限していることがわかった。又活性領域の繰返しが 50 周期のもので観測された閾値電流密度は 0.42 kA/cm^2 (パルス動作時) と、これまで報告されている量子カソードレーザーの最低閾値電流密度 (0.2 kA/cm^2) に近い値を実現した (図 1)。

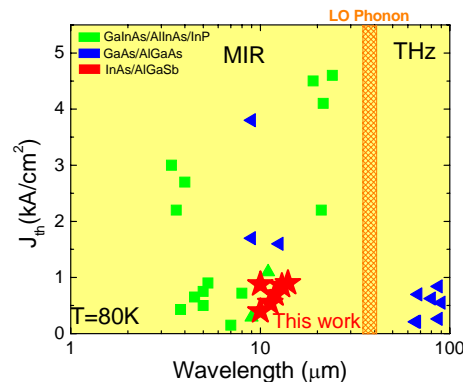


図 1 各材料における発振波長と最低閾値電流密度 (低温) の関係

4.2 結合量子井戸をベースとした活性領域構造の最適化

さらに低消費電力化、並びに高温動作などの高機能化のためには、熱励起によるキャリアのリークパスを無くすと同時に、発光層及び注入層のサブバンド構造を正確に把握し、動作時にそれらがどのように機能するかを明確にする必要がある。そこで発光層として結合量子井戸をモデルにとり、注入層及び発光層のサブバンド構造が素子の光学特性にどのように影響を及ぼすかについて検討を行った。結合量子井戸は、これまでに提案されている発光層の基本となる構造で、反転分布を形成する上で必要最低限の条件を満たす上、井戸間の結合の強さなど他の発光層でも重要なパラメータを抽出することができる。具体的には、(1)反転分布形成に重要である発光層の中央障壁の厚さ、(2)高光出力を得るために重要な発光層注入障壁の厚さと注入層のドーピング濃度、(3)動作電界を決める注入層構造について調べた (図 2)。(1)の発光層中央障壁では、井戸間の結合の強さを与えると同時に反転分布形成にも重要な結合・反結合サブバンドのエネルギー差を、光電流スペクトルの測定から求め、理論計算と比較を行った。比較検討の結果、歪補償のために挿入している Al-As 界面ボンドの寄与を AlAs 層が 1 原子層存在するとして計算を行うモデルが実験結果と良い一致をすることがわかった。(2)の発光層注入障壁の厚さに関しては、注入障壁の厚さによってレーザーの諸特性がどのように変化するかが調べた結果、最適な厚さが存在することがわかった。又その最適な厚さを与える指針として、注入層から発光層へのトンネル時間と励起サブバンド寿命との比に注目する方法を提案した。さらに光出力を増大させ、注入電流に対する光出力の

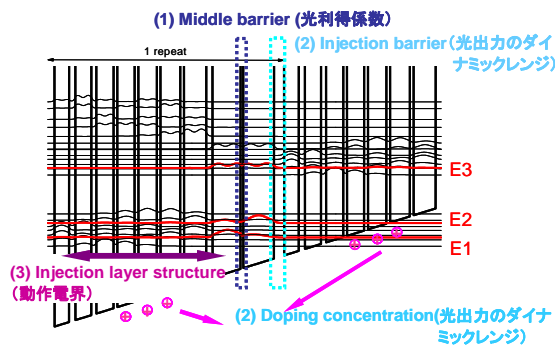


図 2 結合量子井戸構造と特性を大きく左右する構造パラメータ

ダイナミックレンジを増大させるために、注入層ドーピング濃度に注目した。注入層のドーピング濃度がレーザーの諸特性にどのように影響を及ぼすかについて検討を行ったところ、ドーピング濃度を増大させると、自由キャリア吸収による内部損失が増加し閾値電流密度は増大するが、最大光出力を与える電流値はそれ以上に増大するため、結果としてダイナミックレンジはドーピング濃度に比例して増加することがわかった。(3)の注入層構造と動作電界の関係では、注入層が作る擬似電界強度に注目し検討を進めたところ、オン電圧は注入層のデザインに大きく依存し、発光層のゲインが動作電界に敏感な構造の場合には注入層の詳細なデザインが必要となることがわかった。以上を元に、結合量子井戸を発光層に用いた構造で注入層構造や発光層井戸の厚さなどを中心に構造最適化を進めたところ、波長 5.5-6.5 μm の領域で室温以上の温度でレーザー発振に成功した。中でも波長 6.3 μm で観測された最高動作温度は 373 K と InAs 量子カスケードレーザーの最高温度を大幅に更新した。

4.3 室温低閾値電流密度化、及び高出力化

4.1 及び 4.2 で得られた知見を元に低温で低閾値電流密度化に成功した超格子構造を用いて、室温低閾値電流密度化、高出力化を目標に研究を進めた。素子のデザインには、界面ボンドを取り入れた計算モデルを用いた。注入層基底サブバンドからキャリアの熱再分布を抑えるために、動作時に注入層基底サブバンドと発光層基底サブバンドのエネルギー差を従来素子に比べ大きくなるよう注入層構造を改良した。同時に発光層の励起サブバンドと隣接する注入層の第 2 ミニバンドとのエネルギー差を大きくして、キャリアが熱活性型フォノン散乱により発光層から漏れるのを防いだ。注入層のドーピング濃度が $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の試料で観測された温度 300 K における閾値電流密度は 4.0 kA/cm^2 (発振波長 12 μm 、パルス動作時)であり、室温低閾値電流密度化に成功した。又閾値電流密度の特性温度 T_0 (200-300 K) は 153 K であり、従来素子 (108 K) と比較して大幅改善することに成功した。注入層のドーピング濃度が $7.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の試料では 340 K まで発振が観測され、室温における最大ピーク光出力も 100 mW を超えて高出力化に成功した。

4.4 短波長化と偏光制御された 2 波長発振量子カスケードレーザー

本研究で注目した InAs/AlSb 量子カスケードレーザーは伝導帯バンド不連続エネルギーが大きく、波長 3 μm までの短波長化に有利な材料である。一般的に量子カスケードレーザーでは発振波長を短波長化すると動作電界が増大する。したがって InAs では短波長化する場合、GaAs などの他の材料と比較してバンドギャップエネルギーが小さいために、Zener トンネル効果や衝突電子電離などの高電界効果が起こる確率が増大する。そこで素子の動作電界を小さくする方法として、注入層のドーピング濃度を増大させて活性領域内のフェルミ準位を増加する方法に注目し、その効果を検証した。検討に用いた構造は InAs/AlSb 結合量子井戸を発光層に持つ構造 (設計発振波長は 5 μm) で、注入層のドーピング濃度のみを変えた試料 ($2.5, 7.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) を作製した。電流—電圧特性からドーピング濃度が高い試料では、低い試料と比較して、オン電圧が低くなっており低電界で動作していることがわかった。次にエレクトロルミネッセンスの測定を行ったところ、ドーピング濃度の低い試料では、注入電流を増大させていくとサブバンド間発光強度が飽和し、InAs のバン

ド端からの発光が観測された。これは高電界により活性領域内で形成されたホールが導波路領域まで移動して、電子と再結合していることを示している。一方でドーピング濃度の高い試料では、注入電流を増大させても InAs のバンド端発光は観測されないことから、注入層のドーピング濃度を増大させることで動作電界を減少させ、高電界効果を抑制できることがわかった。現在までにこの手法を用いて発振波長 4 μm までの短波長化に成

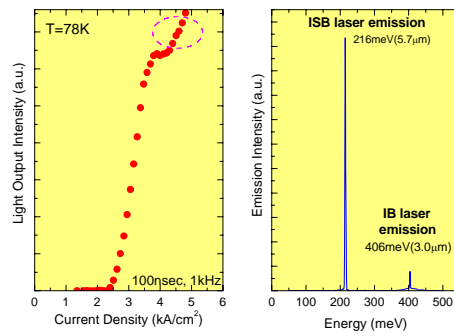


図 3 2 波長発振 InAs/AlSb 量子カスケードレーザーの電流—光出力と発振スペクトル

功している。又 InAs 量子カスケードレーザーでは、サブバンド間だけではなくバンド間でも光利得を持つ。そこで注入層のドーピング濃度を $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ と変えず、発振波長を長波長化して動作電界を下げた試料を作製し、電流—光出力特性の評価を行った。電流—光出力特性は途中で小さな kink を示し、その付近でのレーザー発振スペクトルを測定すると、サブバンド間とバンド間の両方の遷移でレーザー発振が観測された(図 3)。2 波長で同時発振する量子カスケードレーザーはこれまでに報告されているが、本レーザーでは異なった光学遷移を用いているために 2 つの波長で偏光方向が異なっているのが特徴的である。この結果は InAs をベースとした量子カスケードレーザーが発振波長の多色化に加え、偏光の自由度というこれまでの量子カスケードレーザーにない機能を有していることを示している。

5. 自己評価

さきがけ研究開始以前の InAs 量子カスケードレーザーでは、発振波長 10 μm で温度 140 K 程度までしか動作せず、又閾値電流密度も 5 kA/cm^2 程度の高い電流密度であったが、3 年間の研究期間を経て、消費電力という観点では、低温でこれまで報告されている閾値電流密度の中で最低の電流密度に近い値を実現すると同時に室温においても 4 kA/cm^2 程度の閾値電流密度を実現した。又高機能という観点では、動作波長域を 4-14 μm という広い波長範囲に拡大させ、最高動作温度を 100 $^{\circ}\text{C}$ まで増大させることに成功した。以上のことから当初の目標の 1 つは達成できたと考えられる。さらに発振波長の多色化に加え、偏光の自由度というこれまでの量子カスケードレーザーにない機能を付加できる可能性を見出すことができたことは今後の発展につながる成果であると考えている。しかしながら研究開始時に期間中研究実験棟の移設で研究が中断されることを認識していたにもかかわらず、最終的に時間がなくなってしまい、当初目標に掲げていたテラヘルツ領域でのレーザー発振が実現できなかったことは、研究の進め方という点で大きな反省点である。全体として大きなブレークスルーとなる成果を挙げることはできなかったが、バンド構造エンジニアリングにマテリアルデザインという新しい概念を加えた本研究を遂行し、地道にかつ着実に特性を向上させ実用化の域に近づけたという点で、この分野の今後の発展に貢献できる成果であると考えている。

6. 研究総括の見解

レーザー光源は小型、高効率、高輝度などの特徴を持つため、広くエネルギー、情報、計測の各方面への応用が展開されてきたが、これまで波長5ミクロンから100ミクロン(テラヘルツ領域)に亘る中赤外ないし遠赤外領域での小型コヒーレント光源で確立したものはない。半導体量子井戸はしご構造でのバンド内遷移を利用した量子カスケードレーザーはこの要求に応える可能性があるため、世界各国で競って開発の努力がなされている。厳密な構造設計と精密な結晶成長条件制御を組み合わせることで低消費電力、高機能の中赤外光源を実現することを研究の狙いとしている。

主たる成果は次の3点である。1)レーザー発振閾値電流密度の大幅な低減(波長 10 ミクロンレーザーにおいて77Kで0.4kA/cm²)； 2)注入層の構造およびドーピング量を最適設計することによって高温動作が優れたレーザーを作製した(波長 6.5 ミクロンのレーザーで最高動作温度 373K を実現)； 3)バンド内発光とバンド間発光を同時にレーザー発振させる 2 波長同時発振レーザーの実現(波長 3 ミクロンと波長 7 ミクロン)。本研究によって InAs/AlGaSb 系の量子カスケードレーザーの性能を顕著に高めることができたことは大きなインパクトがある。実際に、レーザー性能評価の主要な指標(最高動作温度、温度上昇による電流密度増大のめやすである特性温度 T_0 、導波路損失)のいずれにおいても先行する材料系である GaAs/AlGaAs 系および GaInAs/AlInAs 系に匹敵する水準まで高めることができた。InAs/AlGaSb 系レーザーはさらに長波長動作の可能性も持っており、今後の展開が期待できる。

研究の成果は 3 篇の原著論文、1 件の特出願、8 件の学会招待講演にまとめられている。また、平成 17 年度丸文研究奨励賞および平成 18 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞している。当初の目標であるテラヘルツ領域レーザー実現には至らなかったものの、InAs/AlGaSb 系のレーザーを世界最高峰の水準まで発展させた功績は大きく、全体として予想の水準を越える優れた研究と判断する。

7. 主な論文等

論文(3 件):

- (1) “Mid-infrared InAs/AlGaSb superlattice quantum cascade lasers”, K. Ohtani, K. Fujita, and H. Ohno, Appl. Phys. Lett., Vol. 87, pp. 211113 (1)-(3), 2005.
- (2) “InAs quantum cascade lasers based on coupled quantum well structures”, K. Ohtani, K. Fujita, and H. Ohno, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 44, No. 4B, pp. 2572-2574, 2005.
- (3) “A low threshold current density InAs/AlGaSb superlattice quantum cascade laser operating at 14 μm ”, K. Ohtani, K. Fujita, and H. Ohno, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 43, pp. L879-L881 (Express Letter), 2004.

特許出願:

研究期間累積件数 1 件

招待講演(8件):

- (1) “Recent research progress of InAs-based quantum cascade lasers”, K. Ohtani and H. Ohno, SPIE Photonics WEST, San Jose, California USA, January 21-26, 2006.
- (2) “Mid-infrared InAs/AlGaSb superlattice quantum cascade lasers”, K. Ohtani and H. Ohno, 20th Congress of the international commission for optics, challenging optics in science and technology, Changchun, China, August 21-26, 2005.
- (3) “InAs/AlSb quantum cascade lasers”, K. Ohtani and H. Ohno, CLEO/QELS2005, Baltimore, Maryland USA, May 22-27, 2005.
- (4) “Mid-infrared InAs-based quantum cascade lasers”, K. Ohtani and H. Ohno, The 17th Indium Phosphide and Related Materials Conference (IPRM2005), Glasgow, UK, May 8-12, 2005.
- (5) ”InAs をベースとした量子カスケードレーザー“、大谷啓太、第 25 回電子・材料シンポジウム、伊豆長岡、2006 年 7 月

受賞(2件):

- (1)平成 18 年度科学技術分野文部科学大臣表彰若手科学者賞、”半導体工学分野における量子カスケードレーザーの研究“、2006 年 4 月
- (2)第 8 回丸文研究奨励賞、“InAs 量子カスケードレーザーの研究”、2005 年 3 月