

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

大谷啓太

東北大学電気通信研究所ナノ・スピン実験施設

1. 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、長波長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。具体的には低消費電力という面では低閾値電流密度化、高機能化という面では高温動作化、並びに従来のカスケードレーザーには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。

2. 研究成果

2-1) 低閾値電流密度化(低温)

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/cm^2)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(図 1)。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 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Sb}$ を障壁層に用いた。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 $10 \mu\text{m}$ 、周期数 36 周期)は 0.70 kA/cm^2 であり、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。又活性領域の周期数を 50 周期とした試料(発振波長 $10 \mu\text{m}$)で観測された閾値電流密度は 0.42 kA/cm^2 と、これまで報告されている量子カスケ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 2)。電流—光出力のスロープ効率の温度依存性から、キャリアの熱励起による発光層への注入効率の減少がこの素子の最高動作温度(270 K)を制限している要因であることがわかった。

2-2) 高温動作化

高温動作、室温低閾値発振のためには、熱励起によるキャリアのリークパスをなくすことが必要不可欠で構造内のサブバンドを正確に求める必要があり、実験結果を再現できる計算モデルの構築が重要である。そこで発光層に結合量子井戸を用い、光電流スペクトルを測定することで実験と理論の両面からサブバンドの評価を行った。結合量子井戸は、発光層の基本となる構造で、これを検討することで井戸間の結合の強さなど他の発光層でも重要となるパラメーターを抽出できる。結合・反結合サブバンドのエネルギーを中心に検討を行った結果、光電流スペクトルから得られるエネルギーは、障壁層を 1 原子

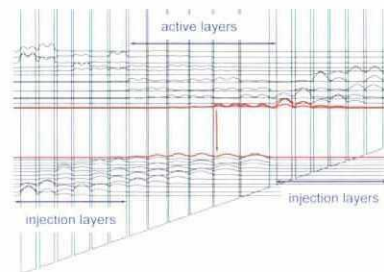


図 1 低閾値電流密度化に用いた InAs/AlGaSb 超格子量子カスケードレーザーのバンド計算図

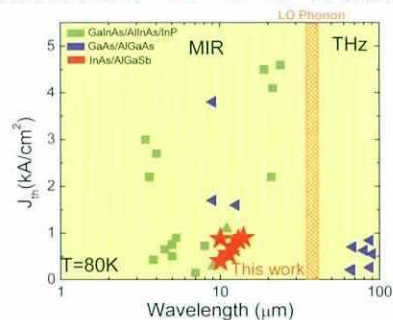


図 2 液体窒素温度における発振波長と各材料の最低閾値電流密度

層増大させた場合の多重バンド k-p 摂動による計算結果に近くなり、歪補償するために挿入している界面ボンドの寄与を考慮しなければならないことがわかった。次に注入層のドーピング濃度と閾値電流密度、最大光出力の関係について検討を行い、注入層のドーピング濃度をある範囲で増大させると、注入電流に対する光出力のダイナミックレンジは増大し、最高動作温度は上昇することがわかった。界面ボンドの効果を取り入れた計算プログラムを用いて設計し、注入層構造及びドーピング濃度、注入障壁の厚さなど最適化した結果、最高動作温度を 100 °C まで増大させることに成功した(波長 6.5 μm 、図 3)。又超格子構造を発光層に用いた構造では励起サブバンドと隣接する注入層第 2 ミニバンドとのエネルギー差を大きくすることで問題となっていたキャリアの熱励起を防ぎ、室温における閾値電流密度を 4.0 kA/cm^2 まで減少させると同時に、室温におけるパルスピーク出力を 100 mW 程度まで増大させることに成功した(波長 12 μm)。

2-3) 偏光制御された 2 波長同時発振 InAs/AlSb 量子カスケードレーザー

InAs は狭ギャップ半導体であるため、衝突電離や Zener トンネルなどの高電界効果が起こり易く、動作電界を高くすると活性領域内に正孔が発生する。正孔生成は導波路のコア領域からバンド間発光という形で検出されるが、もしこの発光がゲインを持てばバンド間とサブバンド間という選択則の異なる 2 つの遷移でレーザー発振が可能となる。我々はこれに注目し、注入層のドーピング濃度を変化させ動作電界を制御することによって、バンド間とサブバンド間遷移の両方で同時にレーザー発振させることに成功した(図 4)。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。

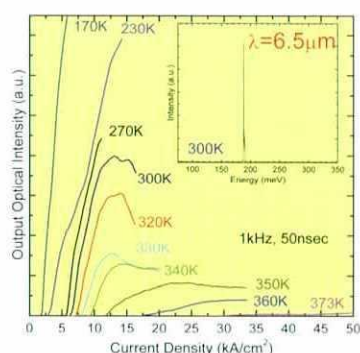


図 3 波長 6.5 μm InAs/AlSb 量子カスケードレーザーの発振スペクトルと電流—光出力特性

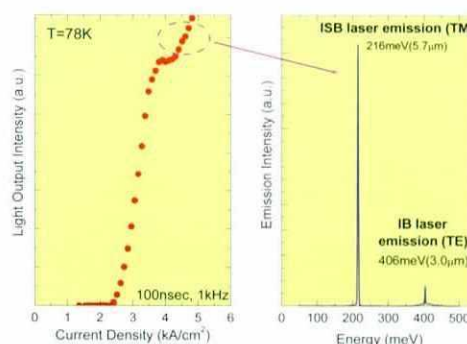


図 4 偏光の異なる 2 波長で同時発振する InAs/AlSb 量子カスケードレーザーの電流—光出力特性と発振スペクトル

3. 謝辞

さきがけ研究を進める上でご指導頂きました神谷武志研究総括、ならびにアドバイザーの先生方に深く感謝いたします。又日頃からご指導頂き、多大なるご協力とご助言を頂いた大野英男先生(東北大学電気通信研究所)に心から感謝いたします。

4. 発表(主な論文)

- (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.

5. その他

国際会議招待講演 4 件(SPIE photonics West 2006, ICO2005, QLEO/QELS2005, IPRM2005)、受賞 2 件(丸文研究奨励賞(平成 17 年 3 月、「InAs 量子カスケードレーザーの研究」)、文部科学大臣表彰若手科学者賞(平成 18 年 4 月、「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」))