



InAs量子カスケードレーザの研究

— マテリアルデザインとバンドストラクチャーエンジニアリングによる長波長光源の実現 —

大谷 啓太

東北大学 電気通信研究所 助手

量子カスケードレーザは活性領域のバンド構造を制御したレーザで、構造の設計次第で中赤外からテラヘルツ帯までの広い波長範囲の光を出すことが可能である。本研究では構造設計だけでなく材料設計の観点からも検討を進め、狭ギャップ半導体InAsを用いれば低消費電力化などの高性能化が可能であることを理論的に示した。また1000層以上の超格子構造における界面ボンドの組み合わせを制御することによって世界に先駆けてInAs量子カスケードレーザを実現した。

1. 研究の背景・目的

中赤外からテラヘルツ帯にわたる長波長領域は、近年ガスセンサなどの環境モニタリングや生体医療イメージング、又は麻薬、爆発物などといった薬物検出などへの応用展開が期待されている。この波長領域における光源は、ガスレーザやフェムト秒レーザなどを用いた大規模な装置が多く、実用性、簡便性に欠けるために一般レベルでのニーズを満たしているとは言い難いのが現状である。この波長領域における電流注入形の半導体レーザとしてⅢ-V族あるいはⅣ-VI族半導体を用いたレーザが存在するが、オージェ非放射再結合により温度特性が悪

く、又高温動作に耐えうる良質な結晶を製作することが難しいために室温・高出力動作が困難である。1994年にアメリカのベル研究所から発表された量子カスケードレーザは、サブバンド間光学遷移を用いることによって従来から長波長半導体レーザで問題となっていた温度特性を改善し、カスケード構造と呼ばれる特殊な構造を用いてフォトンエネルギーの小さな長波長領域においても高出力を可能とした半導体レーザである。しかしながらこのレーザにおいても用いた材料の性能のために非放射再結合時間が短く、閾値電流密度が高いという問題点がある。

2. 研究の成果

量子カスケードレーザでは量子閉じ込め効果により形成されるサブバンドと呼ばれる電子準位間の光学遷移を用いているため、発振波長、再結合時間、キャリア輸送過程などを構造設計により最適化することが可能であるが、極限の値は構成材料自身によって決まる。本研究ではこの事実をいち早く注目し、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を見出して、従来の量子カスケードレーザの材料よりも有効質量の軽いInAsを用いた量子カスケードレーザについて研究を進めてきた。以下にこれまでに得られた主な成果を示す。

● InAs量子カスケードレーザの閾値電流密度の理論的解析

InAsをベースとした量子カスケードレーザの性能を明らかにするために理論的検討を行い、InAsの軽い有効質量によりサブバンド間光学遷移における双極子モーメントが大きく、又縦光学フォノン散乱による非放射再結合時間が長いという優れた特徴を示すために閾値電流密度が従来の素子と比較して、1/6程度になることを明らかにした。

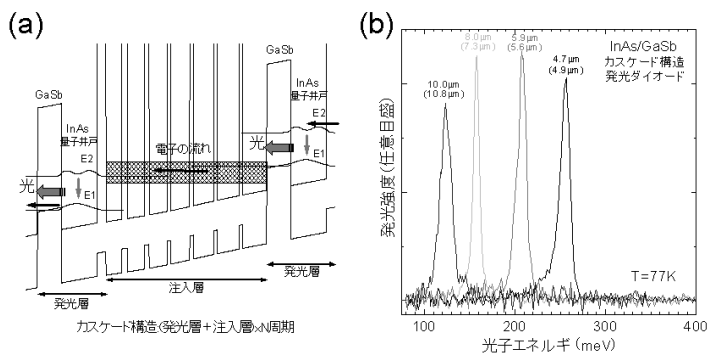


図1 (a) InAs/GaSb量子カスケード構造のバンドダイアグラム：量子カスケード構造は発光層と発光層の橋渡しの役目をする注入層から構成され、それらを複数(10-50周期)含む構造からなる。このカスケード構造に電圧を印加すると、電子の通り道に階段状のポテンシャルを作り出すことが可能となり、電子はその階段状のポテンシャルを駆け下りるたびに光を放出することができる。図では発光層がInAs量子井戸構造から構成されているが、デザインによりさまざまな構造で構成することが可能である。
(b) InAs井戸の厚さを変えて作製したInAs/GaSb量子カスケード構造発光ダイオードの発光スペクトル。括弧内の数字は設計値。

● InAs量子カスケード構造 発光ダイオードの作製

量子カスケードレーザの活性領域であるカスケード構造をデザインするために、バンド非放物線性及び空間電荷を考慮に入れたInAs量子カスケード構造設計プログラムを開発した。このプログラムを用いてInAs量子カスケード構造のデザインを行い、世界ではじめてInAs/GaSb及びInAs/AlSb量子カスケード構造発光ダイオードを実現した。

● InAs量子カスケードレーザの実現

分子線エピタキシによる結晶成長時に形成される界面ボンドを正確にコントロールして、井戸層のInAsと障壁層のAlSb、AlGaSbとの間の歪みを界面ボンドの歪みにより補償する技術を開発し、良質なInAs量子カスケード構造を成長することに成功した。この技術を用い、活性領域の総層数が1000層を超えるInAs/AlSb量子カスケードレーザを作製し、世界に先駆けて発振に成功した。活性領域ではツェナートンネル効果及び電子衝突電離を抑制するために従来の素子と比較して動作電界を小さくするなどの工夫を行なった。

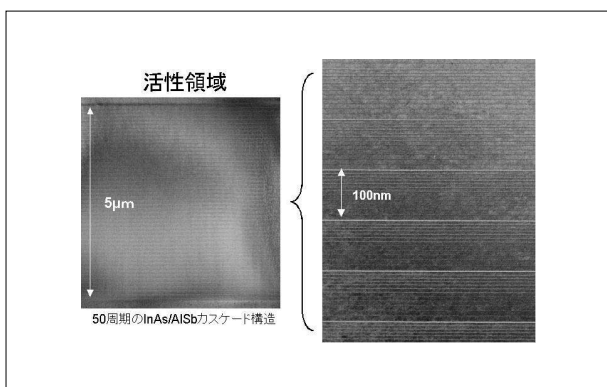


図2 作製したInAs/AlSb量子カスケードレーザの活性領域における断面透過型電子顕微鏡像。活性領域は50周期（総層数は1200層）の注入層及び発光層からなり、これらの層を構成するInAs井戸の厚さは数nm程度、AlSb障壁の厚さは1nm以下となっている。

● InAs量子カスケードレーザの 低閾値電流密度化

大きな利得係数を持つInAs/AlGaSb超格子活性構造を活性層に用いることで、低閾値電流密度化を実現した。観測された最も低い閾値電流密度は動作波長10 μ m、カスケード構造の周期数が50周期（総層数1200層）のもので0.42kA/cm²であった。この電流密度はこれまで報告されている量子カスケードレーザの閾値電流密度の最も低いものの一つである。またInAs/AlGaSb超格子構造を用いて波長14 μ mまで長波長化することに成功した。

3.今後の展開

現在までに発振に成功しているInAs量子カスケードレーザは20-50周期の量子カスケード構造からなり、観測された閾値電流密度は最も低いもので0.42kA/cm²、最高動作温度は270K、発振波長は4-14 μ mの領域である。閾値電流密度に関してはこれまで報告されている最低閾値電流密度に近い値で動作することがわかり、InAsの高いポテンシャルを示す段階に至っている。今後材料の性能をさらに引き出すとともに

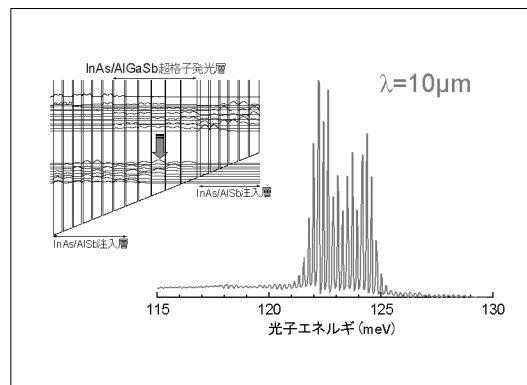


図3 低閾値密度InAs/AlGaSb超格子量子カスケードレーザのバンドダイアグラムと発振スペクトル。発振波長は10 μ mで設計値とほぼ一致している。

構造でも独自性を発揮して、室温・低消費電力で動作する量子カスケードレーザの実現を目指したい。このレーザの主な応用分野として近年の大気汚染などの危惧から関心が高まっている環境計測分野と生体・医療分野がある。環境計測分野ではダイオキシシンなどの有毒物質の吸収帯が量子カスケードレーザの動作波長域にあるため有毒物質ハンディセンサへの応用が考えられる。また医療分野ではこの波長領域の光が皮膚がんなどの癌細胞の診断に応用できることが近年示されており、高齢化社会に向けて新しい診断法の確立に役立つと考えている。以上に述べた分野にとどまらず、安価で小型・高性能量子カスケードレーザがさまざまな新しい応用分野を切り開き活躍することを期待している。

補足説明

※1 サブバンド
量子構造のサイズを小さくして電子を平均自由行程以下に閉じ込めると自由反射運動が起こり、電子のエネルギーは離散的な値をとる。この離散的なエネルギー準位のことをサブバンドと呼ぶ。

References (参考文献)

- [1] 大谷啓太、大野英男、“タイプII InAs/GaSb/AlSbヘテロ構造量子井戸サブバンド間の電流注入発光”、固体物理、Vol. 34、699 (1999)。
- [2] K. Ohtani and H. Ohno, "Intersubband electroluminescence in InAs/GaSb/AlSb type-II cascade structures", Appl. Phys. Lett. 74, 1409 (1999)。
- [3] K. Ohtani and H. Ohno, "An InAs-based intersubband quantum cascade laser", Jpn. J. Appl. Phys. 41, L1279 (Express Letters) (2002)。
- [4] K. Ohtani and H. Ohno, "InAs/AlSb quantum cascade lasers operating at 10 μ m", Appl. Phys. Lett. 82, 1003 (2003)。
- [5] K. Ohtani, K. Fujita and H. Ohno, "A low threshold current density InAs/AlGaSb superlattice quantum cascade laser operating at 14 μ m", Jpn. J. Appl. Phys. 43, L879 (Express Letters) (2004)。