

# 高温 (200°C) 動作が可能な中赤外量子カスケードレーザ

Mid-infrared Quantum Cascade Laser Operable in High Temperature

吉永 弘幸\*  
Hiroyuki Yoshinaga

加藤 隆志  
Takashi Kato

辻 幸洋  
Yukihiro Tsuji

森 大樹  
Hiroki Mori

橋本 順一  
Jun-ichi Hashimoto

猪口 康博  
Yasuhiro Iguchi

量子カスケードレーザ (QCL) は、小型、高速、狭線幅等の優れた特長を持つことから中赤外ガスセンシング光源として期待されている。ガスセンシングへの実用化には、高感度センシングや複数ガス成分を一括で検知するために単一モード性やモードホップフリーな広帯域の波長可変幅がQCLに求められる。QCLの波長可変幅拡大には、動作温度を向上させることが有効である。そこで今回我々は独自の歪補償コアを設計し、さらに埋込ヘテロ (BH) 構造を導入することで、高温で動作する分布帰還型 (DFB)-QCLを開発した。その結果、パルス駆動において-40°Cから200°Cの範囲でモードホップのない単一モード発振が得られ、単一導波路のみで波長可変幅123 nmを実現することに成功した。今後、本QCLを光源に用いたガスセンシング手法の開発に取り組む。

A quantum cascade laser (QCL) is the most promising semiconductor laser for trace gas sensing in the mid-infrared region due to its excellent features such as a compact chip size, high-speed modulation, and a narrow linewidth. In practical gas-sensing, QCLs are required to achieve single-mode operation and wide-wavelength tuning without mode-hopping for high-sensitive and multiple gas detection. To obtain the wide tuning range of QCLs, increasing the operation temperature is effective. Therefore, we have developed a distributed feedback (DFB)-QCL that can operate at high temperature by introducing our original strain-compensated core-structure and buried-hetero waveguide structure. As a result, we have successfully achieved single-mode operation without mode-hopping between -40°C and 200°C under a pulse condition, leading to a wide tuning range of 123 nm with only a single-waveguide QCL. As a future challenge, we will develop a gas-sensing method using the above-mentioned DFB-QCLs as the light source.

キーワード：半導体レーザ、QCL、中赤外、ガス分析、高温動作

## 1. 緒言

中赤外領域 (ex. 3~20 μm) は、CO<sub>x</sub> や NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> 等の産業上や環境上の重要ガス分子の基準振動による光吸収線が多数存在し、分子の指紋領域と呼ばれる。基準振動による光吸収は、近赤外における倍音、結合音による光吸収と比べて、吸収係数が数桁大のため、これを利用することで、高感度 (ppb ~ ppt) のガス分析が可能な光学式ガスセンサーを実現できる<sup>(1)</sup>。

このような中赤外領域における新光源として近年注目されているものに量子カスケードレーザ (Quantum Cascade Laser: QCL)<sup>(2)</sup>がある。QCLは1994年に発明された中赤外での発振が可能な新型半導体レーザであり、小型、高速、狭線幅の中赤外光源として、近年開発が活発化している。これを光源に用いたガスセンサーは、上記QCLの特長に起因して小型、高速、高感度といった多くの優れた利点を有しており、今後工場におけるプロセスガス監視や排ガス計測、環境ガスモニター、呼気分析等の医療診断、危険物検知等の様々な分野における計測機器として、中心的な役割を果たすものと期待され、今後の急速な市場拡大が期待されている。

図1に示すように、QCLはコア領域 (発光領域) が超格子<sup>\*1</sup>で構成され、超格子中の活性層領域に形成された伝導帯サブバンド間におけるキャリア (電子) の光学遷移と、それに続く注入層領域におけるトンネル効果によるキャリア輸送という、量子井戸構造の機能を巧みに活用すること

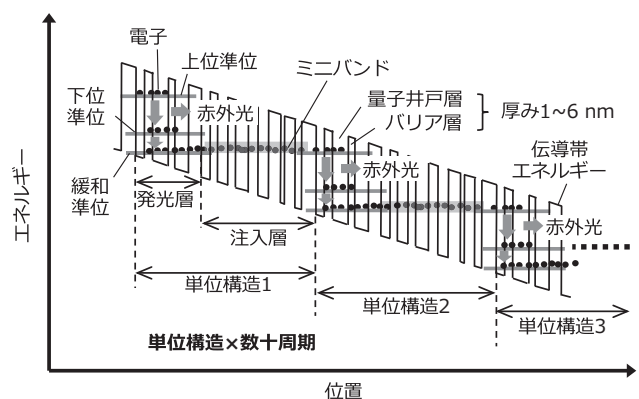


図1 QCLのバンド構造模式図

で、従来の半導体レーザーでは困難だった、中赤外領域でのレーザー発振を可能にした。

1994年に実用的な構造での最初の発振に成功後<sup>(2)</sup>、技術的改良が進み、現在までに室温CW動作<sup>(3)~(6)</sup>や、ガス検知に必要な、分布帰還 (DFB) 構造導入による単一モード化<sup>(7)~(9)</sup>等が達成され、既に製品化に至っている。

一方、ガスセンサー向けの光源には小型、低消費電力、単一モード性等に加えて複数ガス成分を一括検知するため、波長掃引幅の大きい光源も求められる。この波長広帯域化を実現するため、異なる発振波長をもつ導波路を複数集積したDFB-QCLアレーモジュールやMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 回折格子を外部共振器 (External Cavity) として有するEC-QCLモジュールが市販されている。しかしながら前者は導波路数が増加するに従って実装形態や素子駆動が複雑化してしまい、また後者は外部共振器を制御する機構も必要となることから比較的大型のパッケージサイズになってしまう。そこで今回我々は、最もシンプルな素子形態である単一導波路のDFB-QCL素子を高温動作化することで発振波長の広帯域化を目指した。

## 2. 高温動作に向けたコア設計

QCLの高温動作に向けては、まず発光するコアの量子井戸設計が非常に重要になる。前節で述べた通り、注入層から発光層へ電子を輸送して発光層内でレーザー上位準位からレーザー下位準位に遷移することで中赤外光が発生するが、レーザー上位準位からの漏れ電流を抑制するためのAlInAsバリア高さが十分でない場合、高温になるほど発光に寄与しない熱的漏れ電流の影響が大きくなり、結果として温度特性が悪くなる。このため、このAlInAsバリア高さを十分確保しつつ、高効率で発光するコア設計が重要となる。

図2に従来コア<sup>(10)</sup>と新規設計の温度特性改善コアの構造比較を示す。従来コアはInP基板に格子整合させたコアであり、AlInAsバリア高さは200 meVとなっている。波長7.4 μmに相当する遷移エネルギーは168 meVであること

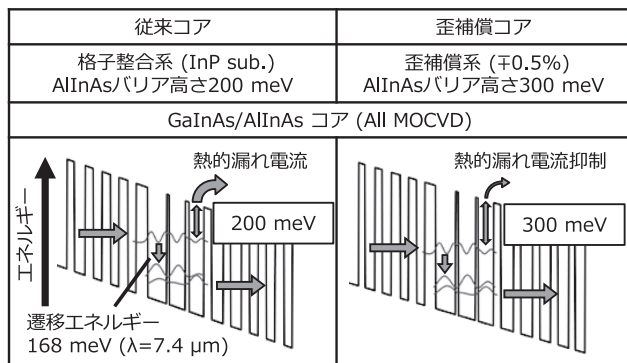


図2 コア構造比較

から、室温では良好な特性であっても高温では熱的な漏れ電流が懸念される。一方、新規設計したコアはAlInAs層に引っ張り歪+0.5%、GaInAs層に圧縮歪0.5%を入れた歪補償コアとしている。この歪補償導入により、AlInAsバリア高さが従来コアの200 meVから300 meVへと増え、熱的漏れ電流が抑制可能となる。さらに有機金属気相エピタキシャル成長法 (OMVPE) で結晶成長することを考慮してコア層に歪を入れても良好な結晶品質が得られるように設計膜厚の最適化も行い、バリア高さや結晶性の両立が可能コア設計とした。

## 3. 作製プロセス

n-InP基板上にOMVPEを用いて、歪補償コア層35段、n-GaInAs回折格子層を順にエピタキシャル成長した後、フォトリソグラフィとドライエッチングにより回折格子を形成した。さらにフォトリソグラフィによって幅5 μm前後の導波路パターンを形成し、これをマスクとして、コアを含むエピタキシャル層をドライエッチングによってエッチングし、メサ導波路を作製した。続いて3回目のエピタキシャル成長にて、メサ導波路の両側面に電流狭窄のためFeドープした半絶縁性InPを埋め込み、埋め込みヘテロ (BH) 構造を形成した。

BH構造を形成した後、ウェハ全面に絶縁膜によるパッシベーションを行い、n-GaInAsコンタクト層直上のみ絶縁膜を開口して、オーミック電極を真空蒸着法により成膜した。さらにその直上に厚いAuメッキ層を付加して上面電極を形成した後、ウェハ裏面を研磨して減厚し、裏面電極を形成した。次にバー化した後、閾値電流を低減させるために素子後端面に高反射 (HR) 膜となるAuコーティングを行った。Auを直接素子にコーティングすると端面での電気的なショートが生じ動作不良となるため、下地絶縁膜としてアルミナ膜を用いた。最後に素子をチップ毎に分割し、CマウントにQCL素子をエピアップ実装した。

## 4. 実験結果

### 4-1 コアの温度特性評価

まず初めに、歪補償コアが高温域で十分発光するかを確認するため、コアからの自然放出光を測定することが可能なElectro-Luminescence (EL) 測定を行った。EL測定用にメサ幅 (L) と共振器長 (W) を最適化したFabry-Perot (FP) 型素子を作製し、さらにレーザー発振前の微弱な自然放出光を検出するためロックインアンプを付加したフーリエ変換赤外分光法 (FT-IR) を用い、素子を200°Cに温調した状態でパルス駆動 (パルス幅125 ns、パルス周期80 kHz) にてEL測定を実施した。測定結果を図3に示す。

図3から明らかなように、波長7 μm帯において歪補償コアのEL強度は従来コアに対して約6倍に改善しており、高

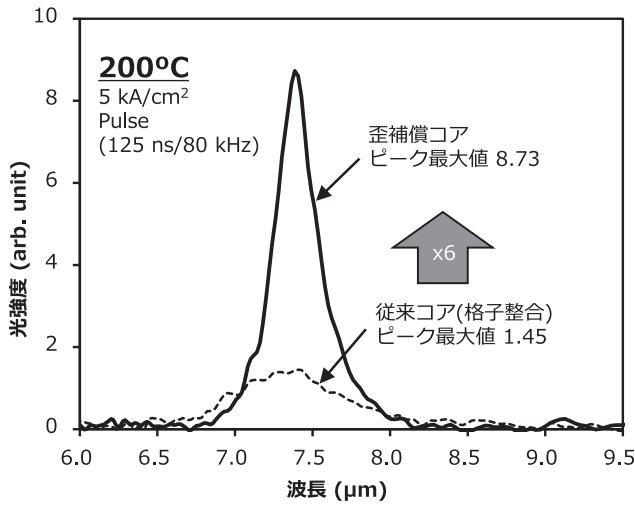


図3 EL測定結果 (200°C)

温の200°Cにおいて大幅にEL強度が向上していることからレーザの温度特性も改善が期待できる結果である。

次に、歪補償コアを有するFP素子を試作し、レーザの温度特性を従来コアと比較した。両コア構造ともメサ幅7 μm、共振器長2 mmの同一サイズ素子を試作し、パルス駆動における閾値電流密度 ( $J_{th}$ ) の温度依存性を比較した。結果を図4に示す。従来コアは、室温 (20°C) では歪補償コアに比べて  $J_{th}$  は小さくなっているが、これはコア段数が52段と歪補償コアの35段に比べて多段であることと、室温付近では熱による漏れ電流の影響が小さいことが原因と考えられる。一方、60°Cを超えると従来コアは徐々に  $J_{th}$  が増大していくが、歪補償コアは  $J_{th}$  の上昇は抑えられており、50°C ~ 100°C の特性温度 ( $T_0$ ) と最高発振温度 ( $T_{max}$ ) をそれぞれ比較すると、従来コアの  $T_0 = 91$  K、 $T_{max} = 100$ °C に対し

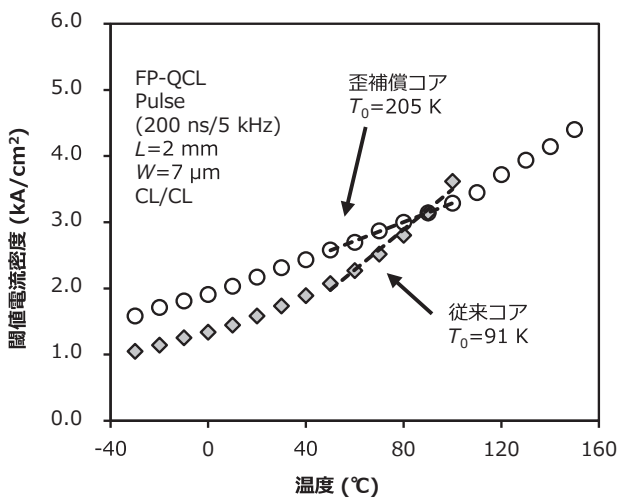


図4 従来コアと歪補償コアにおける閾値電流密度の温度依存性比較

て、歪補償コアは  $T_0 = 205$  K、 $T_{max} = 150$ °C と大幅に改善していることがわかる。以上のEL測定、及びFP-QCLの  $J_{th}$  温度依存性の結果から、新規設計した歪補償コアは従来コアに対して大幅に温度特性が改善することが確認できた。

#### 4-2 DFB-QCL特性

ガスセンシングへの実用化には、ターゲットガスの波長をピンポイントで狙い撃ちする必要があるため、単一モード性を有するDFB-QCLが必須となる。そこで次に上記の歪補償コアを搭載したDFB-QCLを試作した。DFB-QCLはFP-QCLと異なり、コアの利得帯域とは別に素子内の回折格子周期により発振波長の設計が可能 (ディチューニング) である。従って今回は、図3の利得帯域を参考に、7.4 ~ 7.5 μm の波長域で発振するように回折格子周期を設計したDFB-QCLを試作した。素子構造は、メサ幅7 μm、共振器長1 mmのBH構造とし、後端面のみをHRコートした。パルス駆動 (パルス幅200 ns、パルス周期5 kHz) におけるI-L-V温度特性を図5に示す (I-Vは20°Cのみ)。

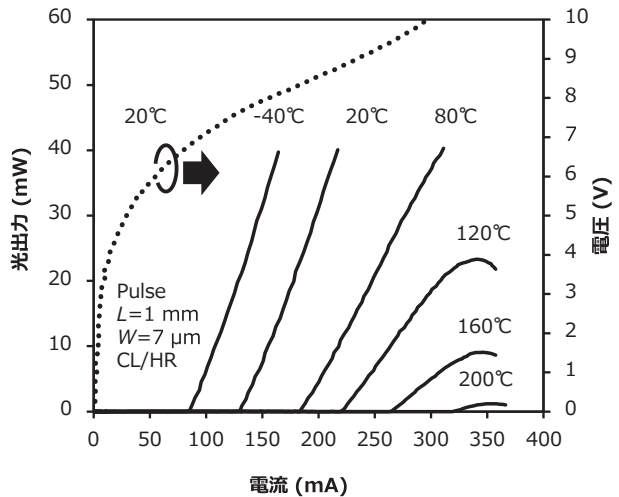


図5 DFB-QCL素子のI-L-V特性

図5からわかるように200°Cまでのパルス発振に成功しており、我々の知る限り、200°CはDFB-QCLとしては世界最高のパルス発振温度である。また20°Cにおける閾値電流 ( $I_{th}$ )、閾値電圧 ( $V_{th}$ ) はそれぞれ131 mA、7.7 Vであり、このときの閾値消費電力 ( $P_{th}$ ) は1.0 Wと低消費電力で動作していること、さらに200°CにおいてもミリWの光出力が得られることも確認できた。

次に図6に上記素子を同一パルス条件で駆動した場合の発振スペクトルの温度依存性を示す。FT-IRでの測定条件は、QCL駆動電流 ( $I_{op}$ ) は  $I_{th} \times 1.1$ 、測定分解能 ( $Res$ ) は  $0.4$   $cm^{-1}$  とした。図6から、-40°C ~ 200°C の温度範囲でモードホップすることなく単一モード発振 (サイドモード抑圧比

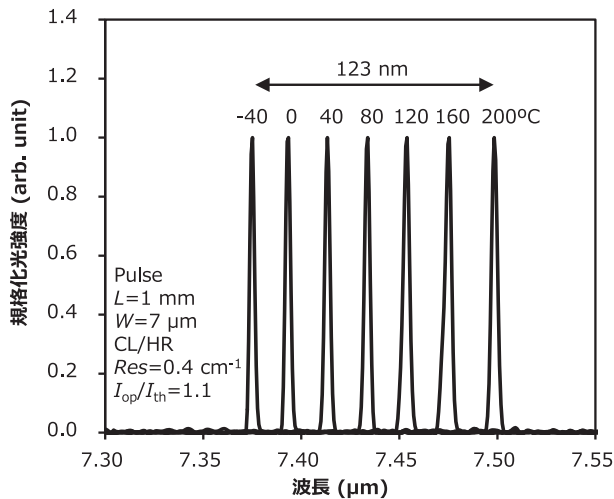


図6 DFB-QCL素子の発振スペクトル

SMSR > 20 dB) していることが確認できた。温度に対する波長変動量は0.514 nm/Kであり、上記温度範囲において合計123 nmの波長可変幅が得られている。

次に、センシング応用を見据えて、ビーム品質を確認するため上記DFB-QCLのFFP (Far Field Pattern) 評価を行った。結果を図7に示す。測定電流は十分光出力が得られるように、20°C、300 mAとした。

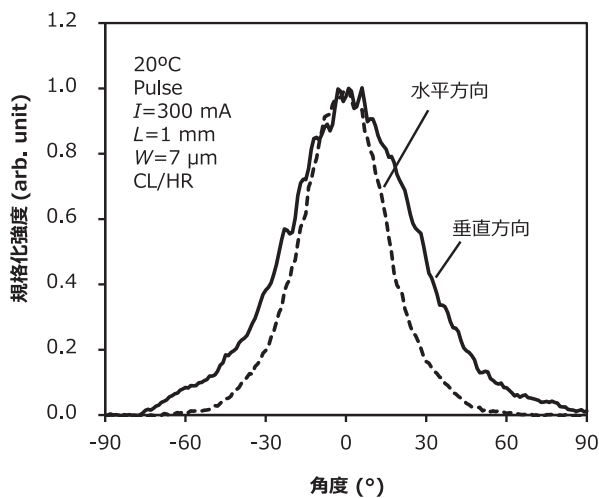


図7 DFB-QCL素子のFFP測定結果

水平方向 (破線)、垂直方向 (実線) の半値全幅 (FWHM) はそれぞれ、36度と56度であった。いずれも単峰性ピークであることから、レンズで集光あるいはコリメートさせやすいと考えられる。

以上の結果から、今回新規設計した歪補償コアを導入することで、7 μm帯の波長域において単一導波路のDFB-QCLで200°Cまでの高温発振に成功し、-40°C~200°Cまでの温度範囲で123 nmの波長可変幅が得られることを実証した。試作したDFB-QCLは温度特性に優れており駆動も容易なこと、さらにビーム品質としても使いやすい単峰性であることから、今後、本DFB-QCLを使用したセンシング実験を進め、その応用可能性に関して検証していく。

## 5. 結 言

今回我々は電流ブロック層のバリア高さと結晶性を両立した独自の歪補償コア構造を新規開発し、さらに埋込ヘテロ (BH) 構造を導入することで、従来コアに対して6倍のEL強度が得られ、FP-QCLの特性温度 ( $T_0$ ) も大幅に改善することを確認した。次にガスセンシングに必須となる、単一モード性を有するDFB-QCLに上記コアを導入した結果、パルス駆動において-40°Cから200°Cの範囲でモードホップのない単一モード発振が得られた。200°Cでのパルス発振はDFB-QCLとしては我々の知る限り、世界最高温度と思われる。また単一導波路のみで波長可変幅123 nmを実現することにも成功した。本研究成果は、今後のQCLを活用したセンシングにおいて有用になると考えられる。

## 用語集

### ※1 超格子

2種類の極薄い (厚さ数nm程度以下) 半導体層を交互に多数 (数十~数百) 積層した構造から成り、本構造では各半導体層の量子準位が結合した多数のサブバンド準位が伝導帯中に形成される。このサブバンド間の発光遷移を利用して、発振する半導体レーザーがQCLである。

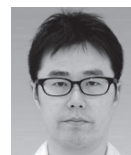


参 考 文 献

- (1) Mid-Infrared Lasers Market Review and Forecast 2014, Strategies Unlimited (2014)
- (2) J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, A. Y. Cho, "Quantum Cascade Laser," Science, vol. 264, No. 5158, pp. 553-556 (1994)
- (3) M. Beck, D. Hofstetter, T. Aellen, J. Faist, U. Oesterle, M. Illegems, E. Gini, H. Melchior, "Continuous Wave Operation of a Mid-Infrared Semiconductor Laser at Room Temperature," Science, vol. 295, No. 5553, pp. 301-305 (2002)
- (4) J. S. Yu, S. Slivken, A. Evans, L. Doris and M. Razeghi, "High-power continuous-wave operation of a 6  $\mu\text{m}$  quantum-cascade laser at room temperature," Appl. Phys. Lett., vol. 83, No. 13, pp. 2503-2505 (2003)
- (5) M. Troccoli, S. Corzine, D. Bour, J. Zhu, O. Assayag, L. Diehl, B. G. Lee, G. Höfler and F. Capasso, "Room temperature continuous-wave operation of quantum-cascade lasers grown by metal organic vapor phase epitaxy," Electron. Lett., vol. 41, No.19, pp. 1059-1060 (2005)
- (6) K. Fujita, S. Furuta, A. Sugiyama, T. Ochiai, T. Edamura, N. Akikusa, M. Yamanishi, and H. Kan, "Room temperature, continuouswave operation of quantum cascade lasers with single phonon resonance-continuum depopulation structures grown by metal organic vapor-phase epitaxy," Appl. Phys. Lett., vol. 91, 141121 (2007)
- (7) J. Faist, C. Gmachl, F. Capasso, C. Sirtori, D. L. Sivco, J. N. Baillargeon, and A. Y. Cho, "Distributed feedback quantum cascade Lasers," Appl. Phys. Lett., vol. 70, pp. 2670-2672(1997)
- (8) J. S. Yu, S. Slivken, S. R. Darvish, A. Evans, B. Gokden, and M. Razeghi, "High-power, room-temperature, and continuouswave operation of distributed-feedback quantum-cascade lasers at  $\lambda \sim 4.8 \mu\text{m}$ ," Appl. Phys. Lett., vol. 87, 041104 (2005)
- (9) 枝村忠孝、秋草直大、杉山厚志、落合隆英、山西正道、上原喜代治、菅博文、「シングルモードDFB量子カスケードレーザの分光分析への応用」、信学技報、vol. 105、LQE2005-119 (2005)
- (10) J. Hashimoto, H. Yoshinaga, H. Mori, Y. Tsuji, M. Murata, K. Kato, M. Ekawa, Y. Iguchi, and T. Katsuyama, "Low power-consumption mid-infrared distributed feedback quantum cascade laser for gas-sensing application," Electron. Lett. 53(8), 549-551 (2017)

執 筆 者

吉永 弘幸\* : 伝送デバイス研究所 主席

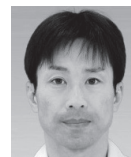


加藤 隆志 : 伝送デバイス研究所 主幹  
博士 (工学)

辻 幸洋 : 伝送デバイス研究所 主席



森 大樹 : 伝送デバイス研究所 主査



橋本 順一 : 伝送デバイス研究所 グループ長  
博士 (工学)



猪口 康博 : 伝送デバイス研究所 部長  
博士 (工学)



\*主執筆者