

ガスセンシング用低消費電力型 (< 1 W) 中赤外量子カスケードレーザ

Low Power Consumption (< 1 W) Mid-Infrared Quantum Cascade Laser for Gas Sensing

吉永 弘幸*

Hiroyuki Yoshinaga

辻 幸洋

Yukihiko Tsuji

森 大樹

Hiroki Mori

村田 誠

Makoto Murata

橋本 順一

Jun-ichi Hashimoto

勝山 造

Tsukuru Katsuyama

高速かつ高感度なガスセンシングを行うための中赤外用小型光源として量子カスケードレーザ (QCL) が注目されている。QCLは、発光層の超格子列の厚みや材料組成を変えることで、中赤外全域に亘って発振させることが可能であり、高速性にも優れている。QCLの実用化のためには、1 Wを切る低消費電力化が望ましいが、QCLはその発振原理上、電圧を低減させることは難しいため、低消費電力化のためには、閾値電流の低減が必須となる。そこで今回、我々は埋め込みヘテロ(BH)構造と端面高反射コーティングの組み合わせによる素子サイズの低減、及び独自の垂直遷移型活性層構造の採用によって、閾値電流を大幅に低減し、27°C、CW駆動で閾値消費電力0.52 Wの低消費電力型QCLを作製することに成功した。

Quantum cascade lasers (QCLs) are promising compact light sources for high-speed and high-sensitivity gas sensing in the mid-infrared region. A QCL has high-speed performance, and its lasing wavelength can cover the entire mid-infrared region by controlling the thickness and composition of the superlattice layers in the active layer. For the practical use of QCLs, their power consumption needs to be reduced to 1 W or lower. However, as reducing the operation voltage of a QCL is difficult due to its oscillation mechanism, the threshold current needs to be reduced to save the power consumption. For this purpose, we reduced the size of a QCL by adopting buried heterostructure, high-reflectivity facet coating, and our original vertical transition active layer. As a result, we reduced the threshold current and succeeded in developing a low power consumption QCL with a threshold power consumption as small as 0.52 W under continuous wave (CW) operation at 27 °C.

キーワード：量子カスケードレーザ、QCL、中赤外、ガスセンシング、低消費電力

1. 緒 言

波長3 μm~20 μmの中赤外領域には主要なガス分子の吸収帯が密集しており、センシング分野への応用が期待されている。また生体、金属等における、光吸収、発熱作用を用いた材料加工、医療加工（レーザー手術等）分野への展開や、更には大気に対する高い透過性（大気の窓）やアイセーフ性等の特長を生かして、空間通信、測距、暗視カメラといった方面の検討も本格化しつつある。

中赤外領域には、CO₂やNO_x、SO_x等の産業上や環境上の重要なガス分子の基準振動の吸収帯が多数存在している。基準振動による吸収は、近赤外領域に見られる倍音、結合音による吸収と比べて吸収係数が数桁大きいため、高感度なセンシングが可能である⁽¹⁾。こうした特長を活かすことで、環境ガスや産業ガスの計測、医療診断、ホームセキュリティ等の様々な分野において、従来困難であった、微量なガスの検知が可能で高感度センサーを実現することができるため、環境や安全、安心といった今世紀の重要産業分野の進展と共に、今後中赤外センサーの需要拡大が期待されている。

ガスセンシングの分野では、屋外に携帯しての計測や、

呼吸診断等における短時間計測が求められており、そのためセンサーの小型化や高速化が必要である。また今後の本格普及のためには低コスト化も必須である。そこで光源としては、小型、高速で、且つ大口径基板を用いた量産化によるコストダウンも見込める半導体レーザーが最適である。しかしながら、従来のpn接合型半導体レーザーではバンドギャップの制約上、中赤外波長の実現が困難であった。そこで、これに代わる半導体レーザーとして、量子カスケードレーザ (QCL) が開発された⁽²⁾。

図1はQCLコア層の構造の1例を示した模式図である。図1に示すように、コア層は何れも半導体の超格子列で形成された発光遷移が生じる活性層と、活性層にキャリアを注入するための注入層から成る単位構造が数十周期にわたって多段接続された構造を有している。QCLは、活性層の伝導帯におけるサブバンド間のキャリア（電子）の光学遷移と、注入層のミニバンドにおけるトンネル効果による次段活性層へのキャリア輸送という、量子井戸構造の特徴を巧妙に応用することで、フォトンエネルギーの小さい中赤外領域でのレーザー発振を可能としたデバイスである。

活性層の超格子列の材料組成や厚さを適宜調整することで中赤外全域をカバーでき、緩和振動周波数が高く、高速性も優れている。1994年に実用的な構造での最初の発振に成功後⁽²⁾、技術的改良が進められ、現在までに室温CW動作^{(3)~(6)}やW級の高出力化^{(7)、(8)}が達成されている。またセンシング用途には、ターゲットガスの特定の吸収線を狙い撃ちする必要上、単一モード動作が可能な分布帰還(Distributed FeedBack: DFB)型のQCLも開発され^{(9)~(12)}、その応用範囲が拡大している。

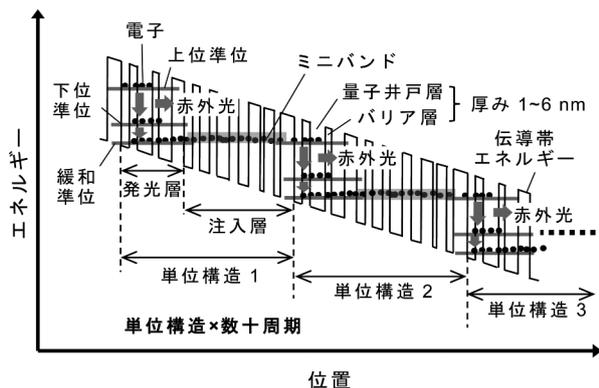


図1 QCLのバンド構造図

2. 動機

QCLの特性を向上させるためには、サブバンド間の遷移確率を高めると共に、非発光遷移による損失を低減する活性層構造設計が重要である。QCLにおける主要な非発光成分は縦光学フォノン(LOフォノン)散乱^{*1}であることが知られている。当社は、これまでにLOフォノン散乱の増大を抑制しつつ、発光遷移確率の選択的な増大による利得増加の効果が期待できる、独自の垂直遷移型活性層⁽¹³⁾を有するQCLの開発を進めてきた。この活性層の特徴としては、活性層内部の同一の量子井戸内で遷移させるため、隣接する異なる量子井戸間で遷移する対角遷移型に比べて、高い遷移確率が得られるという利点がある。

一方、ガスセンシング用途としてデバイス全体の視点から見ると、屋外でQCLを使用するためには、電池で駆動可能な低消費電力(<1 W)での動作と室温CW駆動の両立が必要となる。ところが、QCLはその動作原理から駆動時に6~10 V程度の高電圧を要するため、1 Wを切るような低消費電力化のためには閾値電流を低減させることが必須となる。この閾値電流低減のためには、以下の3点が重要と考えられる。

まず最も重要な活性層としては、上述したように高い発光効率をもつ活性層構造であること、二つ目は吸収や散乱

に起因する内部ロスが小さく、且つレーザ駆動時のコア層からの発熱をすばやく放熱可能な熱抵抗の低いデバイス構造であること、そして最後に、共振器端面での光の反射を増加して、共振器ロスを低減するための高反射(High Reflective: HR)端面構造であることが必要と考えられる。

そこでまず活性層としては、高利得が期待できる、上記垂直遷移型活性層構造を用いた。次にデバイス構造としては、我々は従来、メサ導波路をドライエッチングで形成し、その側面上に誘電体絶縁膜を成膜して電流狭窄したダブルチャンネル(Double Channel: DC)構造⁽¹⁴⁾を用いてきた。本構造は、半導体層成長が1回で済み、作製が容易である反面、絶縁膜狭窄のため放熱性が悪く、さらに導波損が大きい。そのため、上記閾値電流低減のための要件を満たさない。そこで我々はこれに代わる新規構造として、7 μm帯QCLに対して、半絶縁性InPでメサ導波路側部を埋め込んで電流狭窄する、埋め込みヘテロ(Buried Heterostructure: BH)構造を適用した。BH構造では電流狭窄として低損失で高熱伝導の半導体層を用いるため、放熱性が高く、且つ内部ロスが低い導波路構造の実現が可能である。また、エピソードダウン実装する際に、メサ導波路の両側面にある半絶縁性InPによってメサ導波路を保護できるため、実装ダメージによる素子特性劣化も回避できる。さらに、中赤外の波長帯ではHR膜となるAuをQCL端面にコーティングすることによって共振器ロスの低減も試み、これらを組み合わせることで閾値電流低減を図り、低消費電力化を試みた。

3. 作製プロセス

n-InP基板上に有機金属気相エピタキシャル成長法^{*2}を用いて、コア層、n-InPクラッド層、及びn-GaInAsコンタクト層を成長した後、フォトリソグラフィによって幅10 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。さらに2回目のエピタキシャル成長にて、メサ導波路の両側面にFeドープした半絶縁性InPを埋め込み、BH構造を形成した。

コア層は、活性層と注入層からなる単位構造が33段積層されており、何れの層もAllnAs/GaInAsの超格子列で形成されている。コア構造としては、上記高利得が期待できる当社独自の垂直遷移型のコア構造を用いた。

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。最後に、バー化した後、閾値電流を低減させるために高反射膜となるAuコーティングを行った。コーティング膜の構成としては、Auを直接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、下地絶縁膜としてまずアルミナ膜を端面にコーティングした後、Au高反射膜をその上にコーティングした。Au膜厚としては後述のように、後端面側は閾値電流低減のためには極力高反射であることが望ましいため、100%の全反射に近い高反射が得られる厚膜とし、一方前端面側は、光出力が得られる程度の高反射率として、70%程度の反射率を採用することとした。

また、今回はBH構造導入による特性改善を検証するための比較サンプルとして、DC構造の素子も作製した。本QCLは電流狭窄部以外の構造は上記BH型と同一である。後述するAuコーティング技術開発にも、作製が容易で条件出しを簡略化できるDC構造の素子を用いた。

4. 実験結果

4-1 端面高反射膜コーティング

上記アルミナ/AuのHRコーティング膜に関し、波長7 μm帯におけるAu膜厚に対する端面反射率の計算結果を図2に示す。図2から明らかなように、Au膜厚が50 nm程度以上で端面反射率は100%近くにまで達し、飽和する。従って、まず後端面側としては、100%近傍の反射を得るために十分な膜厚として、100 nm程度の厚膜を用いることとし、実測においても、これに近い反射率が得られることを確認した。一方、前端面側を上記70%程度の反射率とするためには、図2の計算結果によると数nmの非常に薄いAu膜を用いる必要があり、さらに膜厚に対する反射率変化が非常に大きいことが判る。そこで我々は、このような薄膜を形成するためのAuの成膜条件を調整し、再現性の高い成膜方法を確立した。

実際に前端面側が狙い通りの反射率となっていることを確認するため、DC構造のサンプルを使って上記端面Auコーティングによる閾値電流低減の検証実験を行った。共振器長(L)、0.5、1.0、2.0 mmのサンプルに、それぞれ前端面約70%、後端面約100%の反射率となるように厚みを調整したAuを成膜し、室温パルス駆動における閾値電

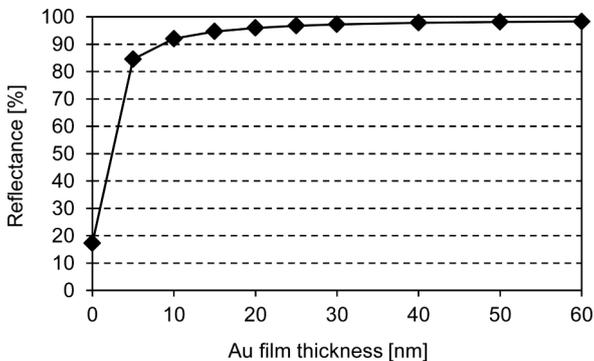


図2 Au膜厚に対する反射率計算結果(波長7μm帯)

流を測定した。図3は本サンプルの導波損及び光学利得の実測値を基に算出した、各共振器長における前端面反射率に対する閾値電流の計算曲線と実測値をプロットしたものである。計算曲線は後端面の反射率を上記のように100%としている。アンコートの場合の反射率30%から前端面反射率が大きくなるに従い、閾値電流は減少していく。全ての共振器長において前端面反射率が70%のところで実測値と計算結果が一致しており、この結果から設計通りの前端面反射率が得られていることを確認した。

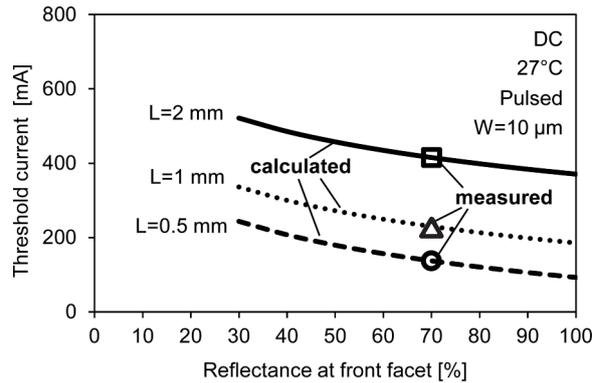


図3 前端面反射率に対する閾値電流の計算結果と実測値(後端面反射率を100%として計算)

4-2 BH構造導入による特性改善

BH構造導入によるQCL素子特性の改善を確認するため、まず内部ロスの低減を検証した。共振器長3 mm(アンコート)のBH構造QCLとDC構造QCLの室温パルス駆動における閾値電流のメサ幅依存性を比較した結果を図4に示す。DC構造ではメサ幅7 μmまでしか発振していないが、BH構造ではメサ幅5 μmまで発振が得られており、狭メサ化による閾値電流の低減も得られ、狙い通り、BH構造が閾値電流低減に有効であることを確認した。DC構造からBH構造に変更することで、特に狭メサ領域における電流狭窄部での光吸収が減り、内部ロスが有意に低減されたため、このような5 μmレベルの非常に狭いメサ構造でも発振が可能になったものと推定される。

次にBH構造導入による熱抵抗低減の検証を行った。図5に共振器長3 mm、メサ幅10 μmのBH構造QCLとDC構造QCLの熱抵抗比較を示す。BH構造は、DC構造に比べて何れの温度においても熱抵抗が約35%低減しており、電流狭窄層を絶縁膜から熱伝導の良い半導体層に変更することで、狙い通り、放熱性が向上していることを実証した。これにより、CW駆動時にQCLコアから発する熱をヒートシンク等に、よりすばやく放熱可能になるため、温度特性が向上すると考えられる。

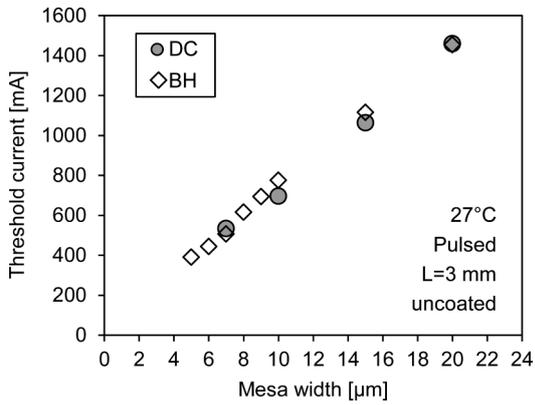


図4 閾値電流のメサ幅依存性 (アンコート)

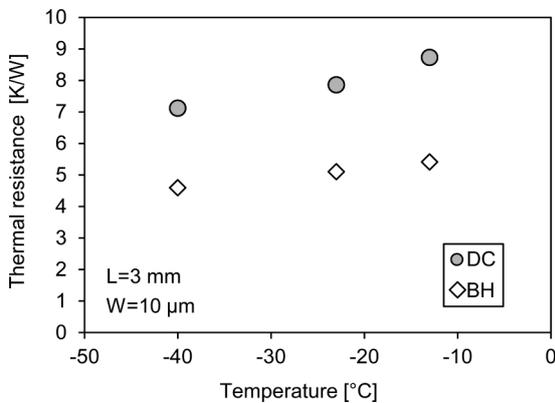


図5 BH構造とDC構造の熱抵抗比較

4-3 BH型QCLの低消費電力化の検討

次にBH構造QCLにおいて、短共振器化、狭メサ化、及びHRコーティングを組み合わせ、閾値電流がどの程度まで低減するか検証を行った。図6には、今回試作した中で最小の閾値電流が得られた、5 μmの最小メサ幅と0.5

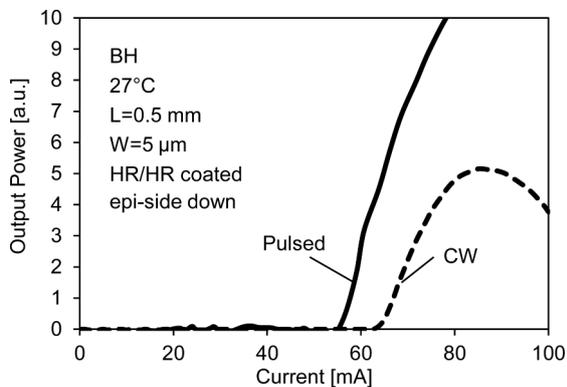


図6 BH構造のI-L特性 (HRコート)

mmの最短共振器長を有し、両端面にHRコーティングを施したBH構造QCLチップをエピサイドダウン実装したサンプルのI-L特性を示した。BH構造化によって発振可能な最小メサ幅が狭くなったことと、両端面をHRコーティングして短共振器でも発振可能になったことにより素子サイズの有意な低減が図れ、その結果、パルス駆動時の閾値電流が、従来のDC構造における最小値の130 mAに対し、BH構造では57.4 mAと大幅に低減した。

また、BH構造化によってメサ幅が狭くなり、発熱源であるコア体積を縮小できたことに加えて、熱抵抗が低減したことによって、図6に示すように、DC構造では達成できなかった27°CにおけるCW発振にも成功し、閾値電流は27°Cで65 mAであった。閾値消費電力としても、27°Cにおいてパルス、CWでそれぞれ0.42 W、0.52 Wであり、1 Wを切る低消費電力QCLの作製に成功した。

最後に、図7に27°C、CW駆動における、共振器長0.5 mm、メサ幅5 μmのBH構造QCLの発振スペクトルを示す。測定にはFT-IRを用い、測定条件は分解能0.2 cm⁻¹、測定時電流は光出力が最大となる87 mAとした。発振波長としては略設計通りの7.41 μmが得られ、注入電流やチップ温度などQCLの駆動条件を変えることで、発振波長はチューニング可能である。この波長帯のターゲットガスとしては、メタンや硫化水素などが挙げられる。これらのガスセンシングには、単一モードで発振するDFB型QCLが必須であると考えられるため、今回の低消費電力化技術をベースとして今後は、DFB型QCLの開発を行っていく。

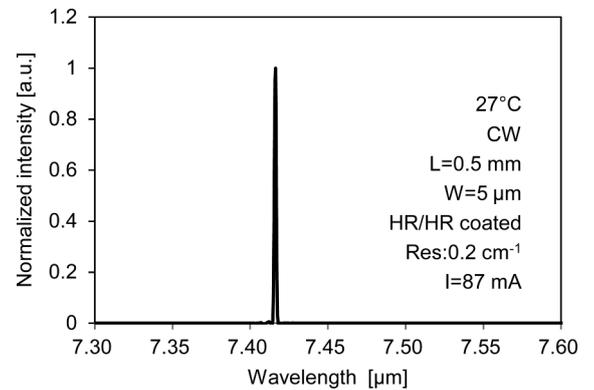


図7 BH構造QCLの発振スペクトル (27°C)

5. 結 言

ガスセンシング用小型光源向けに低消費電力型中赤外QCLの開発を行った。低消費電力化のために閾値電流低減に取り組み、低損失、高熱伝導のBH構造と端面高反射コーティングの組み合わせによる素子サイズの低減、及び独自の垂直遷移型活性層構造の採用によって、27°C、CW

駆動において閾値消費電力0.52 Wの低消費電力型QCLの開発に成功した。今後は、ターゲットガスの吸収波長に合わせこむため、単一モード発振が可能なDFB型QCLの開発を進めていく。

用語集

※1 縦光学 (LO) フォノン散乱

結晶の格子振動で電気分極が振動し (光学フォノン) 外部の電磁波 (赤外光) と相互作用すること。

※2 有機金属気相エピタキシャル成長法

有機金属とガスを原料として、半導体基板の結晶面に揃えて原子を配列した結晶層を成長する方法。

参考文献

- (1) Mid-IR Lasers Market Review and Forecast 2010, Strategies unlimited (2010)
- (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 μ m quantum-cascade laser at room temperature", Appl. Phys. Lett., vol. 83, 2503 (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, continuous-wave 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) Y. Bai, S. R. Darvish, S. Slivken, W. Zhang, A. Evans, J. Nguyen, and M. Razeghi, "Room temperature continuous wave operation of quantum cascade lasers with watt-level optical power", Appl. Phys. Lett., vol. 92, 101105 (2008)
- (8) Y. Bai, S. Slivken, S. R. Darvish, and M. Razeghi, "Room temperature continuous wave operation of quantum cascade lasers with 12.5 % wall plug efficiency", Appl. Phys. Lett., vol. 93, 021103 (2008)
- (9) 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, 2670 (1997)
- (10) S. Blaser, D. A. Yarekha, L. Hvozdar, Y. Bonetti, A. Muller, M. Giovannini and J. Faist, "Room-temperature, continuous-wave, single-mode quantum-cascade lasers at $\lambda \approx 5.4 \mu\text{m}$ ", Appl. Phys. Lett., vol. 86, 041109 (2005)
- (11) J. S. Yu, S. Slivken, S. R. Darvish, A. Evans, B. Gokden, and M. Razeghi, "High-power, room- temperature, and continuous-wave operation of distributed-feedback quantum-cascade lasers at $\lambda \sim 4.8 \mu\text{m}$ ", Appl. Phys. Lett., vol. 87, 041104 (2005)

- (12) 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、pp.29-32 (2005)
- (13) 橋本順一、辻幸洋、稲田博史、三浦貴光、村田誠、吉永弘幸、八木英樹、加藤隆志、村田道夫、勝山造、「中赤外垂直遷移型DFB量子カスケードレーザ(QCL)の試作」、信学技報、vol. 111、LQE2011-152、pp.109-113 (2012)
- (14) J. S. Yu, S. Slivken, A. Evans, J. David, and M. Razeghi, "Very high average power at room temperature from $\lambda \approx 5.9\text{-}\mu\text{m}$ quantum-cascade lasers", Appl. Phys. Lett., vol. 82, 3397 (2003)

執筆者

吉永 弘幸* : 伝送デバイス研究所 主査



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
工学博士



辻 幸洋 : 伝送デバイス研究所 主査



村田 誠 : 伝送デバイス研究所
博士 (理学)



勝山 造 : シニアスペシャリスト
伝送デバイス研究所 部長
工学博士



*主執筆者