

# 分布ブラッグ反射器 (DBR) を集積した 中赤外量子カスケードレーザ

Mid-infrared Quantum Cascade Laser Integrated with Distributed Bragg Reflector

橋本 順一\*  
Jun-ichi Hashimoto

吉永 弘幸  
Hiroyuki Yoshinaga

辻 幸洋  
Yukihiro Tsuji

森 大樹  
Hiroki Mori

村田 誠  
Makoto Murata

猪口 康博  
Yasuhiro Iguchi

我々は、中赤外量子カスケードレーザ (QCL) の閾値電流低減に必要な端面高反射化策として、半導体壁/空隙を周期的に配列した分布ブラッグ反射器 (DBR) を採用し、これを集積したFP型QCLの開発を行った。その結果、1ペアの $3\lambda/4$ 構造のDBR集積で、劈開端面の2倍以上の66%の端面反射率と11%の閾値電流低減が得られ、DBRがQCL端面の高反射率化に有効であることを実証した。また本DBRを集積した7  $\mu\text{m}$  帯FP型QCLにて、パルスで100  $^{\circ}\text{C}$ 、CWで15  $^{\circ}\text{C}$ までの発振に成功し、InP系のDBR集積QCLとしては、初めて動作に成功すると共に、センシングに必要なレベルの光出力 (数mW~数十mW) が得られた。本DBRは特に、低損失性が必要な前端面の高反射構造としての活用が期待される。

To achieve a high facet reflectivity needed for the threshold current reduction ( $I_{th}$ ) of a quantum cascade laser (QCL), we have developed an InP-based 7- $\mu\text{m}$  Fabry-Perot (FP) QCL integrated with a distributed bragg reflector (DBR). The DBR consists of semiconductor walls and air gaps which are alternately arranged by periodically etching the epitaxial layers of the air gap regions. The incorporation of a pair of  $3\lambda/4$  DBRs increased the facet reflectivity up to 66%, which was more than twice as high as that of a cleaved facet, and reduced  $I_{th}$  by 11%. This QCL succeeded in oscillation at 100 $^{\circ}\text{C}$  in pulse operation and at 15 $^{\circ}\text{C}$  in continuous wave operation, which is the first operation with an InP-based DBR-integrated QCL. It also achieved sufficient output for sensing (up to dozens of mW). The DBR is expected to be used as a low-loss reflector suitable for the front facet of QCLs.

キーワード：量子カスケードレーザ、QCL、分布ブラッグ反射器、DBR、端面反射

## 1. 緒 言

中赤外領域 (ex. 3~20  $\mu\text{m}$ ) は、 $\text{CO}_x$  や  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  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、吸収係数が桁大のため、これを利用することで、高感度 (ppb~ppt) のガス検知が可能な光学式ガスセンサーを実現できる<sup>(1)</sup>。

この様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。

周知のように、QCLはコア領域 (発光領域) が超格子\*1

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妙に活用することで、従来の半導体レーザでは困難だった、中赤外領域でのレーザ発振を可能にした。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。

さて、QCLガスセンサーの主用途としては、屋外での計測が考えられるが、屋外に携帯可能なレベルまで小型、軽量化するためには、電池駆動が必須である。従って、センサー全体の消費電力は5W程度に抑える必要があるものと予測され、そのため、光源に用いるQCLとしても、例えば1W程度以下の低消費電力動作が必須である。しかしながら、現状のQCLは、依然数Wレベルと消費電力大のものが多く、本用途への適用は困難なものが多い。

QCLの低消費電力化には、閾値電流低減が必須であり、そのためには、共振器端面の高反射化が有効である。表1には端面高反射化の各手法を比較した結果を示した。端面高

反射化の手法としては、端面への高反射膜コーティングが一般的であり、高反射膜としては誘電体多層膜や金属膜が用いられる。但し、誘電体多層膜は、中赤外では波長が数 $\mu\text{m}$ オーダーの厚い膜が必要なため、成膜が困難であり、そのため、中赤外では専ら、金属膜、特にAuが高反射膜として用いられている<sup>(4)、(8)</sup>。

図1の計算結果から判るように、Auは膜厚増加に伴い、急激に反射率が増加し、容易に100%近辺の高反射となるので、全反射膜としては好適であり、また100 nm程度の薄膜で高反射化できるため、成膜も容易である。従って、90%以上といった全反射に近い高反射率が必要な後端面の高反射化には適している。

一方、前端面としては、光源としての必要な光出力（ガス計測の場合、通常数mW）を得るためには、50~80%といった、前端面からの光の取出しを妨げない程度の、適度に高い端面反射率が望まれる。しかしながら、図1から判るように、Auコーティングの場合、この範囲の端面反射率を得るには10 nm以下の極薄膜のAu膜を用いる必要があり、膜厚や膜質の制御が困難なことに加えて、中赤外ではAuの光吸収が大のため、図1に示したように、10 nm程度の膜厚でも透過率が急減し、実用上必要な光出力を取り出せないこと等から、Au膜を前端面側の高反射膜として適用するのは困難であった。

そこで我々は、Auコーティングに代わる、前端面にも使用可能な端面高反射化の手法として、分布ブラッグ反射器(Distributed Bragg Reflector: DBR)を新規導入することとした。DBRは、共振器が延在する方向において、高屈折率部と低屈折率部が一定周期で、交互に配列された構造を有しており、これをQCLの端面に集積し、QCLの発振波

長でDBRのブラッグ反射が生じるよう、周期を最適に設定することで、発振波長域での端面高反射化を実現できる。

以上説明したAu膜とDBRの比較結果をまとめると、表1のようになる。Auコーティングは上記理由により、後端面の高反射(全反射)膜としては有効だが、前端面への適用は困難である。対してDBRは、散乱損や回折損等があるため、Auコーティング程の高反射化(> 90%)は難しいが、一方、DBRの周期等の調整により、例えば50~80%の中間的な反射率の実現は容易であり、且つ、Auに比べて吸収損も遥かに小さいため、前端面の高反射膜としては好適である。またDBRは、QCLチップの作製プロセスの一環として、オンウエハでの作製が可能のため、ウエハを劈開してチップを形成し、その端面にAuを成膜する必要がある、Auコーティングに比べて、製造プロセスを簡略化できる利点も大きい。

DBR導入による端面高反射化は、光通信用LDでは多くの報告例<sup>(10)~(12)</sup>があるが、QCLでは僅かであり<sup>(13)</sup>、特にInP系材料のQCLでは、我々の知る限り、報告例は皆無だった。そこで本研究では、その有効性の検証も含めて、7 $\mu\text{m}$ 帯InP系FP(Fabry Perot)型QCLへのDBR集積を試み、その結果、InP系DBR-QCLとしては、発振に初めて成功した<sup>(14)、(15)</sup>。

## 2. 素子構造

### 2-1 本体領域の構造

共振器が延在する方向における、DBR集積FP-QCLの本体領域のメサ導波路部の断面構造を図2に示す<sup>(14)、(15)</sup>。InP半導体基板に、n-InPバッファ層、AllnAs/GalnAs超格子から成る活性層と注入層を単位構造として、これを33段数積層したコア領域、n-InPクラッド層、及びn-GalnAsコンタクト層が順次積層されており、更にコンタクト層表面と基板裏面に電極が形成されている。

また電流狭窄には、上記半導体積層体からなるメサ導波路の両側を半絶縁性のInP電流ブロック層で埋め込んだ、

表1 端面高反射化手法の比較

端面高反射化法		誘電体多層膜	Au膜	DBR (分布ブラッグ反射器)
端面 反射率	> 90%	× (成膜上の負荷)	○ (特に後端面)	○
	50~80%		× (光吸収、膜厚制御)	○ (特に前端面)

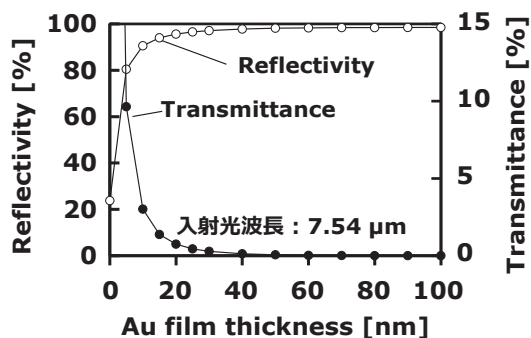


図1 Au膜厚と端面反射率、及び透過率との相関 (計算値)

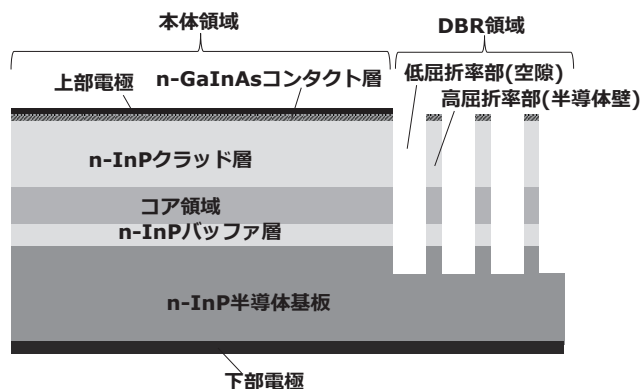


図2 DBR集積FP型QCLの素子構造

埋め込みヘテロ (Buried Heterostructure: BH) 構造を用いた。本構造は、高熱伝導、低光吸収のInPを用いることで、他の電流狭窄構造に比べて、素子放熱性の向上や内部ロスの低減といった改善が得られ、QCLの低消費電力化には最適な構造と思われる。

## 2-2 DBR構造

今回初導入したDBR構造<sup>(14),(15)</sup>も同じく図2に示した。図示のように、本体領域の端面近傍の半導体エピ層を周期的にドライエッチングすることで、図2に示すように半導体壁 (高屈折率部) / 空隙 (低屈折率部) のペアから成るDBR構造をQCLの端面に集積した。

DBRを用いて、端面を効率よく高反射化するためには、共振器が延在する方向における高屈折率部、及び低屈折率部の幅として、通常  $\lambda / (4n)$  または  $3\lambda / (4n)$  の幅 ( $\lambda$ : 真空中での発振波長、 $n$ : 低屈折率部または高屈折率部の屈折率) が多用される。そこで前者のDBRを  $\lambda/4$  構造、後者のDBRを  $3\lambda/4$  構造と名付け、2次元電磁界解析ソフトを用いて、各々の構造が1~2ペアの場合における、DBR集積端面反射率の波長依存性を計算し (但し、各DBRの高屈折率部 (半導体壁) と低屈折率部 (空隙) の幅は、表2に示した  $\lambda = 7.54 \mu\text{m}$  に対するものに固定して計算)、図3の結果を得た。

表2 計算に用いたDBR構造 ( $\lambda = 7.54 \mu\text{m}$  に対応)

DBR構造	$\lambda/4$	$3\lambda/4$
高屈折率部 (半導体壁) 幅 ( $\mu\text{m}$ )	0.6	1.8
低屈折率部 (空隙) 幅 ( $\mu\text{m}$ )	1.9	5.7

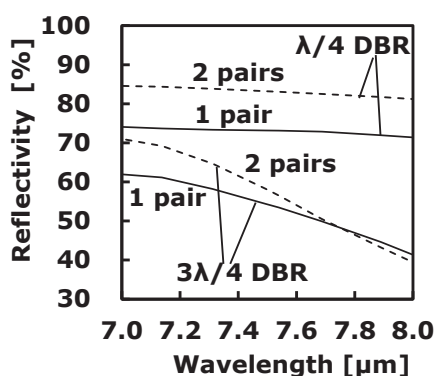


図3 DBR端面反射率の波長依存性 (計算値)

本結果から明らかなように、端面高反射化、及び反射率の波長依存性低減の点では  $\lambda/4$  構造の方が優れる。しかしながら、本構造では表2に示すように、半導体壁の幅がサブ  $\mu\text{m}$  と極薄となることに起因して、通常プロセスでの作製が困難化するデメリットがあり、これらの得失を整理す

ると表3のようになる。そこで今回は、DBR集積QCLの初試作ということで、本QCLの動作達成を最優先して、DBRとしては、作製の容易な  $3\lambda/4$  構造を採用した。

表3 DBR構造の得失比較

DBR構造	$\lambda/4$	$3\lambda/4$
反射率	高	中
反射率の波長依存性	小	大
作製難度	難	易

## 3. 作製プロセス

次に素子作製工程を説明する<sup>(14),(15)</sup>。結晶成長には有機金属気相成長法 (OMVPE) を用い、まず最初の成長にて、n-InP基板上にメサ導波路を構成する上記各半導体層を順次成長する。

次に、素子中央部において、少なくともコア領域までをエッチングして  $10 \mu\text{m}$  幅のメサ導波路を形成し、その後、メサ側壁を埋め込むようにInP電流ブロック層を成長して、BH構造を形成する。

続いて、フォトリソグラフィとドライエッチングを用いて、一方の端面領域を上記  $3\lambda / (4n)$  幅で周期的にエッチングして、半導体壁 / 空隙のペア (ペア数: 1または2) から成るDBR構造を集積し、最後に上下に電極を形成した。また、他方の端面には、へき開 (Cleaved: CL) 端面またはエッチング (Etched: ET) 端面を用い、更に必要に応じて、高反射 (HR) 膜としてAuコーティングを後端面に施した。

実際に作製したDBR構造 (2ペアの  $3\lambda/4$  構造) を図4に示す。高屈折率部の半導体壁が、高アスペクト比 ( $> 4$ ) で、基板に対して垂直性良くエッチングされており、エッチング面の凹凸も  $100 \text{ nm}$  程度以下に収まっており、  $7 \mu\text{m}$  帯の発振波長から見れば、充分平坦なエッチング面の形成に成功した。

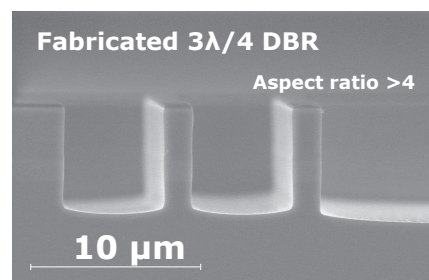


図4 DBR構造断面SEM<sup>\*2</sup>写真

## 4. 素子特性

### 4-1 DBRの端面反射特性

最初に、今回作製したDRR端面の反射率評価を行った<sup>(14),(15)</sup>。以下その手法について説明する。本評価のため、(1) 両端面ともCL端面 (CL/CL) のQCL1に加えて、(2) 前端面がCL端面/後端面がDBR (3λ/4構造、1ペア)集積端面 (CL/DBR) のQCL2、(3) 前端面がCL端面/後端面がDBRと同じドライエッチング条件で形成されたET端面 (CL/ET) のQCL3の3種類のQCLをInP基板上に一括形成した。なおこれらのQCLは、上記説明の、同一のBH構造を有しており、端面構造以外の構造上の違いはない。

上記QCL1~QCL3に関し、閾値電流密度 ( $J_{th}$ ) の共振器長 ( $L$ ) の逆数 ( $1/L$ ) に対する依存性を、室温、パルス条件にて測定し、**図5**の結果が得られた。但し、本図に示した各直線は、各QCLの測定データを、最小二乗法により直線近似したものである。

ここで、QCLの共振器長 ( $L$ ) と閾値電流密度 ( $J_{th}$ ) には次の関係式が成り立つ<sup>(16)</sup>。

$$J_{th} = \frac{\alpha_w}{\Gamma g} - \frac{\ln(R_f R_r)}{2\Gamma g L}$$

(但し、 $\alpha_w$ : 内部損、 $\Gamma$ : コア領域の光閉じ込め係数、 $g$ : 光学利得、 $R_f$ : 前端面反射率、 $R_r$ : 後端面反射率)

そこでまず、QCL1において、 $R_f$ 、 $R_r$ として、CL端面の反射率 (=28 %) を仮定し、且つ上式の関係を用いれば、**図5**におけるQCL1の直線の傾きから $\Gamma g$ が、また $y$ 切片から $\alpha_w$ が求められる。次にQCL2もQCL1と同一構造のため、同じ $\Gamma g$ を有すると仮定でき、また $R_r$ はCL端面のため、上記同様28 %と仮定すれば、上記同様、QCL2の近似直線の傾きから $R_f$ 、即ちDBR端面の反射率が、 $y$ 切片から、QCL2の $\alpha_w$ が求められる。同様にしてQCL3についても、ET端面の反射率や $\alpha_w$ を算出できる。この様にして算出した各後端面の反射率 $R_r$ や内部損 $\alpha_w$ の結果を**表4**にまとめた。

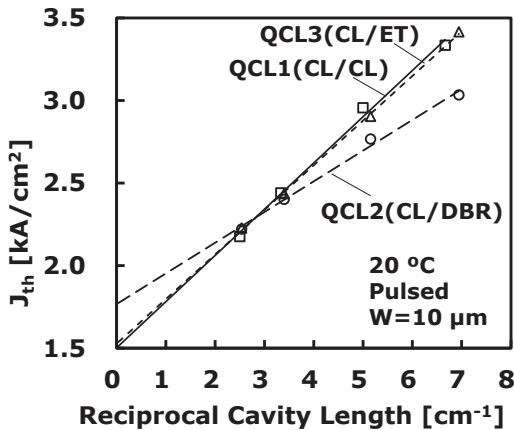


図5 閾値電流密度 ( $J_{th}$ ) の共振器長依存性

表4 試作QCLの後端面反射率と内部損

QCL	後端面	後端面反射率 ( $R_r$ ) (%)	内部損 ( $\alpha_w$ ) ( $\text{cm}^{-1}$ )
QCL1	CL	28 (仮定値)	6.8
QCL2	DBR	66	8.0
QCL3	ET	31	6.9

まずQCL3のエッチング (ET) 端面と劈開 (CL) 端面の比較では、両者同等の反射率となっており、本結果と**図4**の観察結果を総合すれば、今回用いたドライエッチングにより、劈開端面と同等の垂直性や平坦性を有するエッチング端面が形成されたものと判断できる。

次に、QCL2のDBR端面の反射率は66 %と、CL端面の倍以上の値となっており、本結果より、想定通り、DBRがQCL端面の高反射率化に有効であることが実証できた。上記垂直性や平坦性に優れたエッチング面の形成により、DBRの半導体壁におけるブラッグ反射が効果的に生じた結果、このような高反射が得られたものと推定される。なお、1ペアの3λ/4構造のDBRにおける、端面反射率の実測値 (66 %) と、**図3**の計算結果 (55 %) との間には、有意な差が見られるが、これは計算モデルと実際のDBRにおける、周期やエッチング深さ等の構造的なパラメータの違いや、屈折率等の光学定数の誤差に起因するものと思われるので、今後これらの誤差を補正して、端面反射率の計算精度を高めたい。

次に内部損 ( $\alpha_w$ ) については、まずQCL1とQCL3の比較から、エッチング端面の場合でも損失増加は見られず、低ロスでの端面エッチングを実現できているものと判断される。一方、QCL2では $1\text{cm}^{-1}$ 程度の $\alpha_w$ の増加が認められるが、これはDBR構造付加時の散乱や回折等に起因するロスの増加によるものと推定している。

### 4-2 DBR端面集積QCLの発振特性

上記検討から、DBR集積による端面の有意な高反射化を確認したため、次にDBRを端面集積したQCLの発振特性を評価した<sup>(14),(15)</sup>。まず**図6**は、共に共振器長 ( $L$ ) 2 mm、×

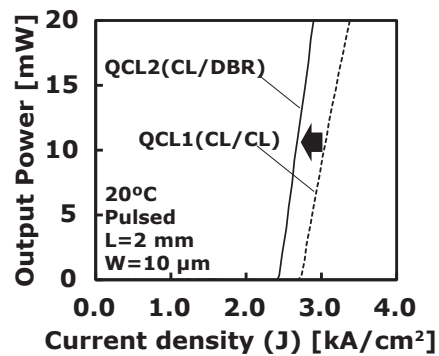


図6 DBR導入前後での閾値電流密度-光出力特性比較

サ幅 (W) 10  $\mu\text{m}$  の、上記 QCL1 と QCL2 のチップの、20  $^{\circ}\text{C}$ 、パルス条件における電流密度-光出力特性を比較した結果を示す。QCL2 は QCL1 に比べて、 $J_{\text{th}}$  が 2.7  $\rightarrow$  2.4  $\text{kA}/\text{cm}^2$  と 11% 低減され、スロープ効率が 0.16  $\rightarrow$  0.23  $\text{W}/\text{A}$  と 44% 増加する等、後端面に DBR を付加して高反射化したことによる特性改善を確認できる。

次に閾値電流 ( $I_{\text{th}}$ ) の更なる低減のため、前端面への上記 1 ペアの  $3\lambda/4$  構造の DBR (推定反射率 66%) の集積に加えて、後端面を Au で高反射 (HR) コート (推定反射率  $\sim$  100%) した、DBR/HR QCL チップ ( $L=2\text{ mm}$ ,  $W=10\text{ }\mu\text{m}$ ) を作製し、そのパルス、及び CW 駆動における電流-光出力特性の温度依存性を測定した。その結果、**図7**、**図8** の特性が得られた。

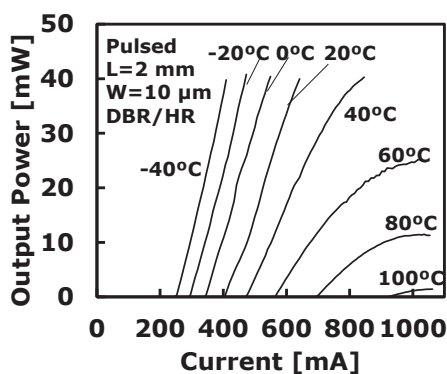


図7 DBR-QCLの電流-光出力特性 (パルス)

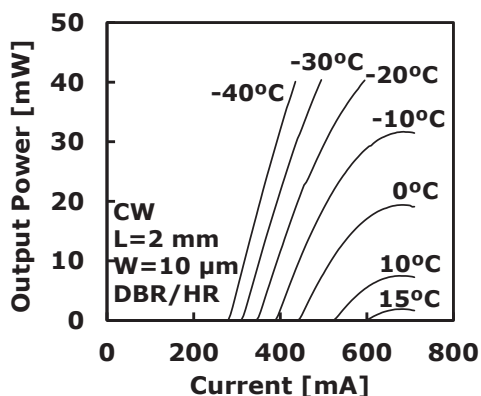


図8 DBR-QCLの電流-光出力特性 (CW)

**図7** に示す通り、パルス駆動では測定限界の 100  $^{\circ}\text{C}$  まで発振し、40  $^{\circ}\text{C}$  までは測定限界の 40  $\text{mW}$  までの出力が得られた。20  $^{\circ}\text{C}$  における  $I_{\text{th}}$  ( $J_{\text{th}}$ ) と、(-40  $\sim$  60  $^{\circ}\text{C}$ ) 間の特性温度 ( $T_0$ ) は、各々 405  $\text{mA}$  (2.025  $\text{kA}/\text{cm}^2$ )、126  $\text{K}$  であった。また、上記のように、40  $\text{mW}$  超の光出力が得られていることから、当初の期待通り、DBR 構造は、中赤外

領域で低損失な高反射端面構造として機能しうることを確認した。

次に**図8**を見るに、CWでも15  $^{\circ}\text{C}$ までの室温発振に成功し、15  $^{\circ}\text{C}$ における $I_{\text{th}}$  ( $J_{\text{th}}$ )は600  $\text{mA}$  (3  $\text{kA}/\text{cm}^2$ )であった。また15  $^{\circ}\text{C}$ でも約1.9  $\text{mW}$ のガス検知に使用可能な出力を得た。本結果は、我々の知る限り、InP系DBR-QCLにおける、初の動作報告と思われる。

上記のように、CWでの動作は15  $^{\circ}\text{C}$ が上限であったが、実用化に向けては、より高温での動作が望まれる。パルス駆動時との最高発振温度の差から考えて、CWにおけるより高温での動作のためには、CW駆動時の素子内部の温度上昇の抑制が必要と思われる。そのための方策として、今後狭メサ化やエピダウン実装等による素子放熱性改善や、コア構造、ドーパ量等の素子構造最適化による閾値電流の更なる低減等の改善策を検討する。

最後に、**図9**は上記DBR/HR QCLにおける、10  $^{\circ}\text{C}$ 、CW駆動時の発振スペクトルを示す。略設計通りの7.46  $\mu\text{m}$ 帯をメインピークとする、2モードでの発振が得られた。しかしながら、ガスセンシングへの応用には、単一モード動作が必須であるため、今後は、DFB-QCLへのDBR構造の適用を検討したい。

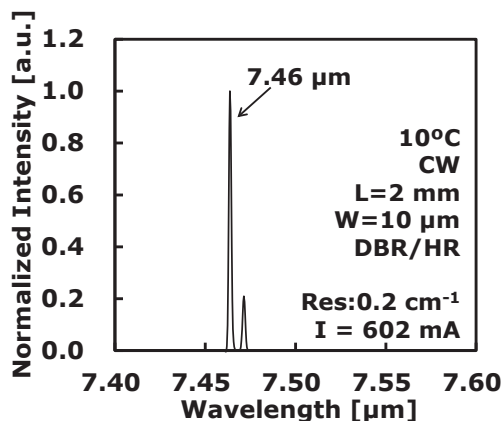


図9 DBR-QCLの発振スペクトラム (CW)

## 5. 結 言

今回我々は、閾値電流低減 (低消費電力化) のための新規端面高反射化の手法としてDBR構造を採用し、これを端面に集積した7  $\mu\text{m}$ 帯FP-QCLを試作した。DBRとしては、QCL端面領域の半導体エピ層をドライエッチングして形成した、半導体壁 (高屈折率部) / 空隙 (低屈折率部) から成る周期構造を用いた。実際に作製した1ペアの $3\lambda/4$ 構造のDBRにて、端面反射率66%と、劈開端面の2倍以上の反射率が得られ、DBRがQCL端面の高反射率化に有効であることを実証した。

次に上記DBRを前端面に集積し、更に後端面をAuコーティングで高反射化したチップにおいて、パルスでは100℃まで、CWでも15℃までの発振が得られ、InP系DBR-QCLとしては、初めて動作に成功した。また本QCLにおいて、ガス検知等のセンシングに必要な数〜数十mWの光出力が得られ、当初の期待通り、DBRが前端面側に使用可能な、低損失の高反射構造として使用可能であることを実証した。

なお、今回は3λ/4構造採用で66%の端面反射率となったが、これに限定されるものではなく、DBRの周期や高屈折率部/低屈折率部のデューティ比、ペア数等を適宜変えることで、端面反射率を例えば50~80%の範囲で、任意の値に設定できる。従って、DBRは個々のニーズに合わせて、QCL特性が最適となるよう、端面反射率を制御する手法として、実用上有益と思われる。

今後は、CW駆動時の高温動作化のため、素子構造の最適化や実装方法の改善を図ると共に、単一モード動作が必須なガスセンシング等への応用に向けて、DBRを集積したDFB-QCLの開発に取り組む。

## 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がQCLである。

### ※2 SEM

Scanning Electron Microscope : 走査型電子顕微鏡。

## 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. Ilegems, 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 μm 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, 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) 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 continuous-wave operation of distributed-feedback quantum-cascade lasers at λ~4.8 μm," *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) T. Baba, M. Hamasaki, N. Watanabe, P. Kaewplung, A. Matsutani, T. Mukaiyama, F. Koyama, and K. Iga, "A Novel Short-Cavity Laser with Deep-Grating Distributed Bragg Reflectors," *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 35, Part 1, No. 2B, pp. 1390-1394 (1996)
- (11) M. M. Raj, J. Wiedmann, S. Toyoshima, Y. Saka, K. Ebihara and S. Arai, "High-Reflectivity Semiconductor/Benzocyclobutene Bragg Reflector Mirrors for GaInAsP/InP Lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 40, pp. 2269-2277 (2001)
- (12) M. Kamp, J. Hofmann, A. Forchel, and S. Lourdudoss, "Ultrashort InGaAsP/InP lasers with deeply etched Bragg mirrors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, No. 26, pp. 4074-4075 (2001)
- (13) S. Golka, M. Austerer, C. Pflügl, A. M. Andrews, T. Roch, W. Schrenk, and G. Strasser, "GaAs/AlGaAs quantum cascade lasers with dry etched semiconductor-air Bragg reflectors," *J. of Modern Optics* vol. 52, No. 16, pp. 2303-2308 (2005)
- (14) H. Yoshinaga, J. Hashimoto, H. Mori, Y. Tsuji, M. Murata, M. Ekawa, and T. Katsuyama, "Mid-infrared quantum cascade laser integrated with distributed Bragg reflector," in *Proc. SPIE Photonics West*, 9755-101 (2016)
- (15) 橋本順一, 吉永弘幸, 森大樹, 辻幸洋, 塩崎学, 村田誠, 江川満, 猪口康博, 勝山造, 「分布反射器 (DBR) を集積した中赤外量子カスケードレーザの開発」, 信学技報, LQE2016-27 (2016)
- (16) C. Sirtori, J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho, "Pulsed and Continuous-Wave Operation of Long Wavelength Infrared (λ = 9.3 μm) Quantum Cascade Lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 33, No.1, pp.89-93 (1997)

執筆者

---

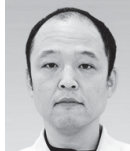
橋本 順一\* : 伝送デバイス研究所 グループ長  
博士 (工学)



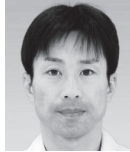
吉永 弘幸 : 伝送デバイス研究所 主査



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



村田 誠 : 伝送デバイス研究所  
博士 (理学)



猪口 康博 : 伝送デバイス研究所 部長  
博士 (工学)



---

\*主執筆者