

テラヘルツ帯量子カスケードレーザー

関根 徳彦・寶 迫 巖

Terahertz Quantum Cascade Lasers

Norihiko SEKINE and Iwao HOSAKO

Quantum cascade lasers (QCLs) have different structures and characteristics from those of conventional semiconductor lasers commonly used in the optical communication systems. Therefore, QCLs allow us to access wavelengths which couldn't be available in conventional lasers. In particular, terahertz QCLs (THz QCLs) have been paid much attention due to their potential applications in various fields, such as biosensing, imaging, and security. In this article, we report GaAs-based THz QCLs. Furthermore, we would like to show an application of the THz QCL to a THz real-time imaging system with microbolometer focal-plane arrays.

Key words: terahertz, quantum cascade lasers, intersubband transition, microbolometer

近年、テラヘルツ (terahertz または THz) 帯の技術が基礎研究から応用にまで広範な領域で注目を浴びており、それにともないさまざまなデバイス技術が現れてきた。なかでも光源デバイスは、重要性の高いものとして位置づけられている。というのも、そもそもテラヘルツ帯の電磁波は、室温において、黒体輻射としてすでに充満している状態にあり、何か特別な信号をみようにも、注目する信号は微弱であるために、この背景に埋もれてしまう。そのため、テラヘルツ帯の何らかの情報を得るには、その照明としての光源が必須となる。

そこで、テラヘルツ帯の光源に限ると、さらにパルス光源と CW 光源という 2 つに分類ができるであろう。パルス光源は、いわゆるテラヘルツ技術が立ち上がるきっかけとなった技術で、近赤外の超短パルスレーザーをトリガーとして用いた光伝導アンテナがその代表例である¹⁻³⁾。これにより、数 ps 程度の持続時間を有するテラヘルツ電磁波パルスが発生され、その帯域は数百 GHz から 10 数 THz に及ぶ⁴⁾。光伝導アンテナは室温で動作し、トリガーパルスを入射するのみでテラヘルツ電磁波を得られるということと、広帯域のスペクトルの振幅・位相情報が一度に

取得できるという特徴から、すぐに受け入れられ、基礎物性測定から錠剤検査という応用まで広範に利用されている⁵⁻⁷⁾。しかし、一般の利用を考えると、この方式は装置全体が大きすぎるために、また連続スペクトル情報が必要でない場面も多いため、コンパクトな CW 光源に対する要求が増してきた。コンパクトな CW 光源となると、半導体ベースのものが主流になっており、現在のところ、

- 量子カスケードレーザー⁸⁻¹⁰⁾
- 共鳴トンネルダイオード¹¹⁾
- 二次元プラズモン共鳴発振器¹²⁾
- p 型ゲルマニウムレーザー¹³⁾

などが研究されており、それぞれ一長一短がある。

本稿では、上記のデバイスのうち、量子カスケードレーザーについて紹介する。量子カスケードレーザーが、従来の半導体レーザーとどのように異なるのかを述べ、現在得られている性能や実用化へ向けた問題点、それに対する取り組み等を紹介する。さらに、量子カスケードレーザーを用いた応用例についても触れる。

(独)情報通信研究機構 (〒184-8795 小金井市貫井北町 4-2-1) E-mail: nsekine@nict.go.jp

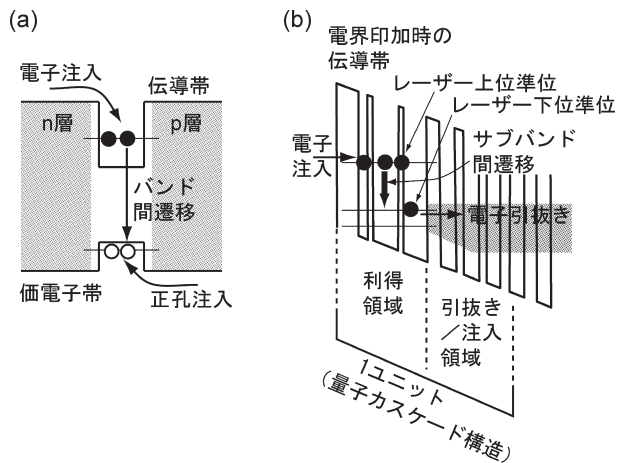


図1 レーザー活性層のエネルギーバンド構造。(a) 従来の半導体レーザーは電子-正孔のバンド間遷移により、(b) 量子カスケードレーザー (QCL) はサブバンド間遷移によりレーザー光を得る。

1. 量子カスケードレーザーとは

量子カスケードレーザー (quantum cascade laser, QCL) は半導体レーザーの一種であるが、従来の光通信やコンパクトディスクなどに利用されてきた半導体レーザーと、構造および発光機構・特性が大きく異なるレーザーであり、両者を比較すると理解しやすい。図1 (a) に、従来の半導体レーザー (以降、単に半導体レーザーとよぶ) のエネルギーバンド構造を示す。ここでは、例として単一量子井戸レーザーを示しており、半導体量子井戸活性層を、n型バリア層とp型バリア層で挟み込んでいる。一方、QCLの代表的なエネルギーバンド構造を図1 (b) に示す。QCLは、エネルギー障壁高さの異なる半導体材料をナノメートルオーダーの厚みで何層も積層した構造で構成されている。

半導体レーザーは、電子と正孔のバンド間遷移により発光を得る (図1 (a))。そのため、発光波長は、活性層に使用している半導体材料のバンドギャップエネルギー E_g (量子井戸レーザーの場合は、これに量子化エネルギー分を加えたもの) に支配される。一方、QCLは、図1 (b) にあるように、電子のみ (もしくは価電子帯を用いれば正孔のみ) を利用し、量子井戸を作製した際に現れる量子化準位間の遷移 (サブバンド間遷移) により発光を得る。

このような違いのため、QCLは次のような特徴をもつ。

- (1) 発光波長が自由に設計可能：QCLはサブバンド間遷移で発光を得るため、その発光波長はサブバンド間エネルギー間隔で決まる。サブバンド間エネルギーの大きさは量子井戸幅によって任意に変えることができるため、発光波長に関して構成材料による制限がない

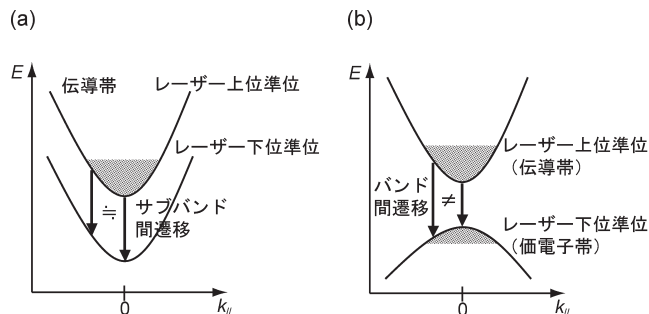


図2 利得領域における量子井戸面に平行な方向のエネルギー分散曲線。(a) QCLは k_{\parallel} によらず遷移エネルギーはほぼ一定。(b) 半導体レーザーでは k_{\parallel} が大きくなると遷移エネルギーも増大する。

(実際には、高エネルギー側は、異種材料のバンドオフセットエネルギーで制限される)。

- (2) 大きな量子効率を実現できる：QCLの活性層は、図1 (b) のようにレーザー上位準位と下位準位の間のサブバンド間遷移により発光を得る利得領域と、レーザー下位準位に緩和したキャリアを次の領域に引き渡すキャリア引き抜き/注入領域を1ユニットとして、これを多段に接続した構成をとる。そのため、QCLでは一度発光遷移を起こしたキャリアは、次のユニットに移動後に再度発光に関与するという、キャリアリサイクリング効果の恩恵を受けることができ、接続したユニットの段数に比例した大きな量子効率を得られる。
- (3) 高い光学利得・狭い光学利得幅：QCLと半導体レーザーは、それぞれサブバンド間遷移・バンド間遷移で発光を得ると述べたが、これに起因するもう1つ重要な違いがある。図1は、量子井戸の面内に垂直な方向のエネルギーバンド構造であるが、レーザーの上位・下位準位のみ注目して面内に平行な方向のエネルギー分散関係を書くと図2のようになる。比較のために半導体レーザーのほうから先に述べると、図2 (b) に示されるように、電子が詰まっている伝導帯と正孔の詰まっている価電子帯の分散曲線の曲率の符号は互いに異なる。そのため、 $k=0$ における遷移エネルギー $E_{k=0}$ と $k \neq 0$ における $E_{k \neq 0}$ は異なる。このように遷移エネルギーが k に依存するため、利得スペクトルはステップ関数的になる。一方、QCLの場合は図2 (a) のように、2つの準位の分散曲線は共に伝導帯 (または価電子帯) となるため同じ曲率の符号をもつ。すると、分散曲線の非放物線性を無視すれば、 E_k は k によらず一定となるため ($=E$)、利得スペクトルはデルタ関数的、すなわち原子的なものにな

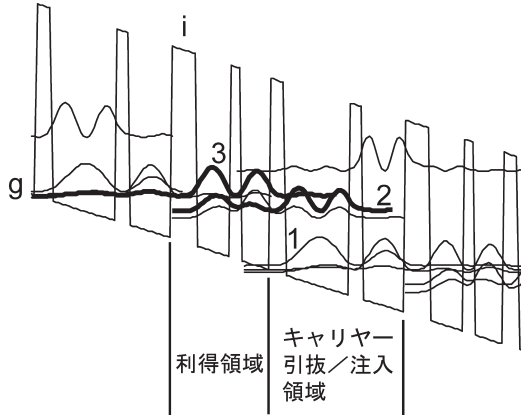


図3 THz QCLのエネルギーバンド図の一例。iは注入障壁層。gは引き抜き/注入領域の最低エネルギー準位。3, 2はそれぞれレーザー上位, 下位準位。1はLOフォノンによるキャリアー引き抜き準位。

る。そのため、注入されたキャリアーは発光過程において、すべてエネルギー E の遷移に利用され、結果として高い光学利得が得られる。また、利得スペクトルがデルタ関数的であるという本質的な特徴のために、狭い線幅も期待できる。

2. テラヘルツ帯量子カスケードレーザー

2.1 動作原理

THz QCL に採用されている代表的な構造はいくつかあるが、そのうちの一例を図3に示す。活性層を構成するユニットが利得領域と引き抜き/注入領域からなることは先に述べたが、ここではもう少し詳細に述べる。利得領域では、発光を得るためのレーザー上位準位 (3) と下位準位 (2) があり、このエネルギー差 E_{32} で発振周波数が決まる。準位3にキャリアー (この場合は電子) を注入しなければならないが、これは前段の引き抜き/注入領域の最低エネルギー準位 (g) にいる電子が、注入障壁層 (図中に i と示した半導体層) とよばれる厚みを調整した薄膜をトンネルすることにより注入される。レーザー発振を得るためには、準位3と2の間で反転分布が形成されていなければならないが、半導体レーザーのときと同様に、キャリアー数とフォトン数に関するレート方程式を書くとき3準位モデルが適用でき、適度な近似の結果得られる反転分布条件は、

$$\tau_{32} > \tau_2 \quad (1)$$

となる。

上記反転分布条件を満たすために、QCLでは、レーザー下位準位2の下にさらにもう1つ準位(1)を配置している。そして、これら2つの準位間のエネルギー差 E_{21} を縦

光学 (longitudinal optical, LO) フォノンエネルギー (E_{LO}) より若干大きく設定することにより、LOフォノン散乱を利用して短いレーザー下位準位寿命 τ_2 を実現している。LOフォノン散乱は、(バルクを仮定すると) その $E-k$ 分散曲線に k 依存性があまりなく、 $E=E_{LO}$ となる。そのため、エネルギー間隔が E_{LO} を超えると、LOフォノン散乱が支配的になる。一方、 E_{32} は E_{LO} よりも小さいために散乱機構としては効かなくなるため、散乱時間を長くすることができ、式(1)が満たされる。

2.2 テラヘルツ帯レーザー発振の困難と解決のための工夫

はじめて発振に成功した中赤外 (MIR) 領域では高性能化が進んでいる QCL も、発光周波数がテラヘルツ領域になると、テラヘルツ領域特有の性質によりレーザー発振が困難になる。

- (1) 大きな導波路損：レーザー導波路において、光の損失につながるものには、吸収損失・散乱損失・ミラー損失などがあるが、このうち吸収損失は導波路内に存在するキャリアーによる吸収 (自由キャリアー吸収) に起因する。自由キャリアー吸収による吸収係数 α は、

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \propto \lambda^2 \quad (2)$$

と表され、その大きさは波長 λ に対し2乗に比例する (k : 複素屈折率の虚部)。テラヘルツ光 ($\lambda \sim$ 数百 μm) は MIR 光に対して波長が10倍程度長いので、この波長依存性により、同じ導波路構造を用いた場合、MIR 領域では問題なかった吸収損失がテラヘルツ領域では顕著に現れてくる。このため、活性層のドーピング濃度制御に格段の注意が必要となり、また導波路構造自体も工夫が必要になる。

- (2) 低いキャリアー注入効率：テラヘルツ光はエネルギーでみた場合、数～数十 meV の範囲であるため、上下のレーザー準位間隔もそれに従って狭くなる。すると、量子化準位のエネルギー広がりが発光エネルギーに近くなるために、キャリアー注入領域からレーザー上位準位に選択的にキャリアーを注入することが困難になる (レーザー下位準位その他の準位へのトンネルリークが増加する)。そのため、利得を得るために必要な反転分布を形成することが困難になり、各準位の結合の強さを制御する注入障壁層などの設計が重要になる。

- (3) 支配的キャリアー緩和機構の変化：MIR-QCLでは、発光準位におけるキャリアーの非発光緩和機構としては、LOフォノン散乱が支配的だったが、これは

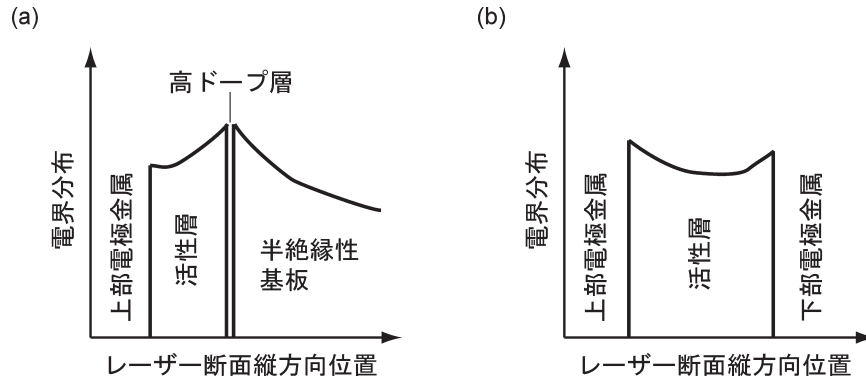


図4 THz QCL に用いられる導波路構造による光電界のモードプロファイル。(a) SISP (semi-insulating surface plasmon) 導波路構造, (b) metal-metal (MM) 導波路構造。

発光エネルギーが E_{L0} (GaAs で 36 meV) よりも大きいためであり, これをうまく利用することにより反転分布を形成していた。一方, THz QCL では, 発光エネルギーが E_{L0} よりも小さくなるため, LO フォノン散乱が効かなくなる。このような領域では, キャリヤー注入による電子-電子散乱, 異種材料の界面の不完全性による界面ラフネス散乱などが無視できなくなり, これも QC 構造の設計を困難にする。

上記の困難にもかかわらず, いくつかのグループは, それぞれ独特の工夫により THz QCL の発振に成功している⁸⁻¹⁰⁾。代表的な活性層構造はおもに 3 つに分類され, はじめて THz QCL の発振に成功した構造は, chirped superlattice 型とよばれる⁸⁾。これは, 動作電界を印加した際に, 超格子のミニバンドがフラットバンドになるように量子井戸層, バリヤー層の厚みを徐々に変えた超格子構造で, 発光遷移はミニバンド間で起こる。上位ミニバンドの底から下位ミニバンドの頂上に遷移したキャリアは, 高速なミニバンド内緩和により下位ミニバンドの底に移動し, 次段の上位ミニバンドに注入される。次は, bound-to-continuum 型とよばれる⁹⁾。先の構造と比較すると, 下位準位のキャリア引き抜きにはミニバンド内緩和を利用している点では同じだが, レーザー上位準位がミニバンドではなく離散準位である点が異なる。上位準位の離散化により, 前段からのキャリアの注入効率が大きくなるようにしている。3 番目は, 共鳴 LO フォノン引き抜き型とよばれるもので¹⁰⁾。2 章 1 節の説明に用いた構造である。先の 2 つではキャリア引き抜きにミニバンド内緩和を用いたが, これは LO フォノン散乱を利用している。LO フォノン散乱自体は先に述べたとおり高速の緩和現象なので下位準位のキャリア寿命低減にはよいが, THz QCL の場合, レーザー上位準位とキャリア引き抜き準位の間隔もやはり E_{L0} に近いので, 上位準位のキャリア寿命も同

様に短くなってしまい, 反転分布ができなくなってしまう恐れがある。そこで本構造では, これを避けるため, レーザー下位準位に遷移したキャリアを共鳴トンネルにより空間的に引き抜き/注入領域に移動し, そこで LO フォノン散乱により緩和させる構成をとっている。これによりレーザー上位準位と引き抜き準位の波動関数の重なりを低減できるため, レーザー上位準位の LO フォノン散乱確率が小さくなり, 反転分布が形成される。

一方, 導波路構造にもテラヘルツ光の波長が長いことを利用したものが提案されている。図 4 に, おもに利用されている 2 つの導波路構造を示す¹⁴⁾。レーザー素子で用いられる電極金属およびそのコンタクト層として用いられる高濃度にドーブした半導体では, テラヘルツ光に対して $\lambda_p < \lambda$ (λ_p : プラズマ波長) となり, 誘電率の実部が負になる。このことは屈折率が虚数となることを意味するので, テラヘルツ光が上記の材料に入ると, 大きな減衰を受けると同時に界面に閉じ込めモード (界面プラズモン) が励起される。THz QCL の導波路では, このプラズモンモードを利用している。図 4 (a) は, semi-insulating surface plasmon (SISP) 導波路とよばれるもので, 上面を電極金属, 下面を高濃度ドーブ層で光を活性層に閉じ込めている。この場合, 高濃度ドーブ層で形成されるプラズモンモードは基板側にもひろがるので, 基板での吸収を避けるために, 半絶縁性基板を用いている。一方, 図 4 (b) は metal-metal (MM) 導波路とよばれ, 上面・下面の両方も電極金属で挟む構成となる。この場合, 両端の金属部分には光が伝播できず, その間の活性層のみに光が閉じ込められるので, 光閉じ込め率はほぼ 1 となり, 高い光閉じ込め率が可能となる。

2.3 THz QCL の特性

以上で述べた特徴を踏まえて, われわれのグループで作製した THz QCL を紹介する。レーザー構造は, 半絶縁

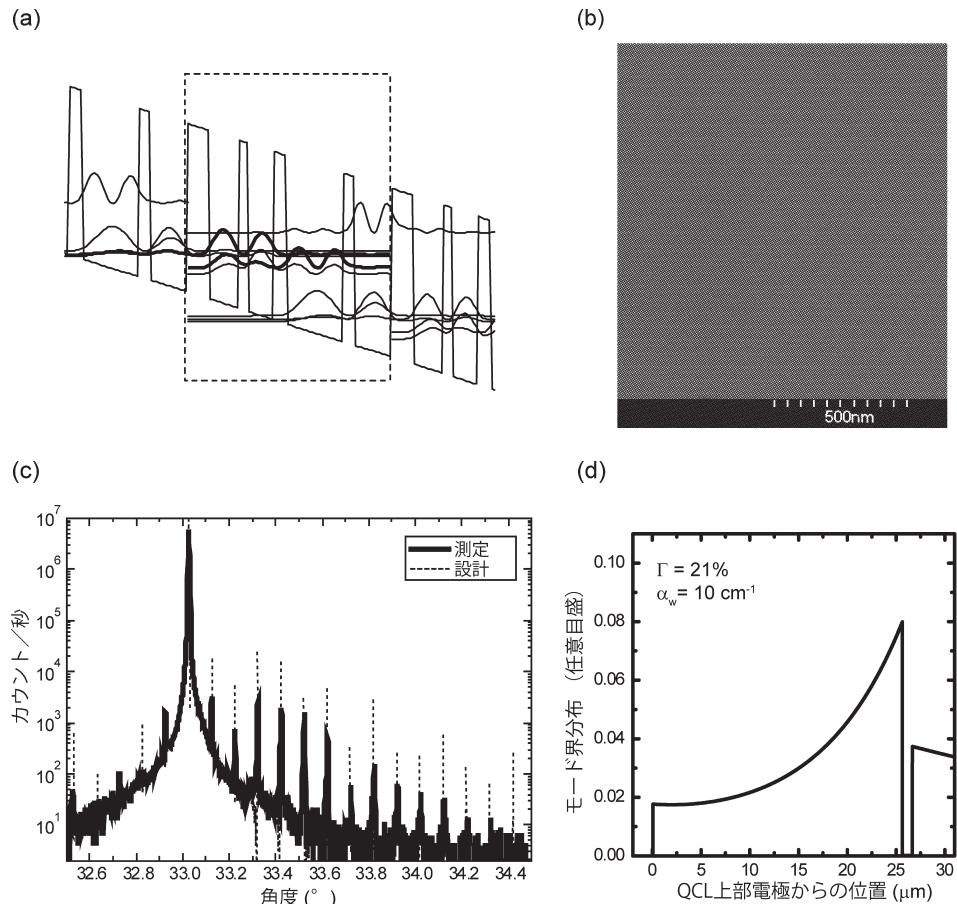


図5 (a) 作製した THz QCL の活性層構造. 各層の膜厚は点線内左より 5.4/7.8/2.4/6.5/3.8/14.9/3.0/9.5 (単位は nm. 太字は $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ でその他は GaAs. 下線は Si をドーピングした). (b) 活性層の断面 SEM 像. (c) THz QCL ウェハの X 線回折スペクトル. (d) SISP 導波路に閉じ込められた テラヘルツ 光のモードプロファイル. 閉じ込め率 $\Gamma=21\%$, 導波路損 $\alpha_w=10\text{ cm}^{-1}$.

性 GaAs 基板上に分子線エピタキシー (molecular beam epitaxy, MBE) 法により GaAs/ $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ の共鳴 LO フォノン引き抜き型 QC 構造 (図 5 (a)) を 480 周期成長させ、その上下を Si ドープ GaAs コンタクト層で挟んだ構造となっている。図 5 (b) は成長した QCL 構造の断面 SEM 像であり、周期構造ができていことがわかる。また、より詳細な評価のために X 線回折評価を行い、設計値に対して 2% 以内の誤差でできていることを確認した (図 5 (c))。このエピウェハーに対し、通常のウェットプロセスにより、メサ幅 $200\ \mu\text{m}$ 、共振器長 3 mm のファブリ-ペロー型導波路を作製した。レーザー端面は、出射端面をへき開面、後端面には高反射膜を施している。導波路は、図 5 (d) に示すように SISP 導波路構造とした。

図 6 に、レーザー特性を評価した結果を示す。図 6 (a) は、パルス駆動下における電流-電圧 (I - V)、電流-光出力 (I - L) 特性であり、電流パルスは、幅 200 ns、繰り返し周波数 400 Hz としている。また、光出力は Si ボロメ

ーター検出器を用いており、測定温度は 39 K とした。これを見ると、 1 kA/cm^2 を下回る閾値電流密度でレーザー発振しており、出力は 30 mW にせまるピークパワーが得られている (I - L 特性中にキックがみられるが、これは測定光路中 (レーザー-検出器間) に存在する大気吸収によるものである)。また、閾値電圧をみると、約 28 V と半導体レーザー ($\sim 1\text{ V}$) と比較すると非常に大きい。これは QCL の特徴であり、QC 構造のユニットを何段も繋げることにより、全体の電圧降下が接続段数分大きくなっているためである。挿入図は、バイアス電流を 5.1 A としたときの発振スペクトルであり、3.1 THz で発振していることがわかる。出力の飽和は、 I - V 特性中に負性微分抵抗がみえることからわかるように、QC 構造中の準位間の結合が解け、キャリアの注入が設計どおりにいなくなったためである。図 6 (b) に、THz QCL 発振閾値の温度特性を示す。この試料では、最高動作温度は 123 K であり、特性温度 (T_0) は発振停止直前で 113 K とな

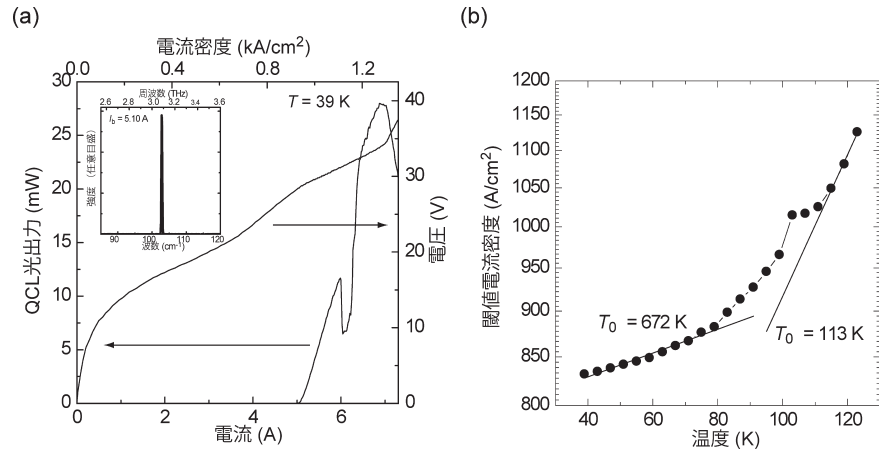


図6 THz QCL のレーザー特性. (a) L - I - V 特性. 約 5 A に閾値をもち、30 mW 近い出力が得られている. 挿入図はレーザー発振直後のスペクトル. (b) 閾値電流密度の温度依存性. 123 K まで発振が確認され、発振停止直前の特性温度 (T_0) は 113 K である.

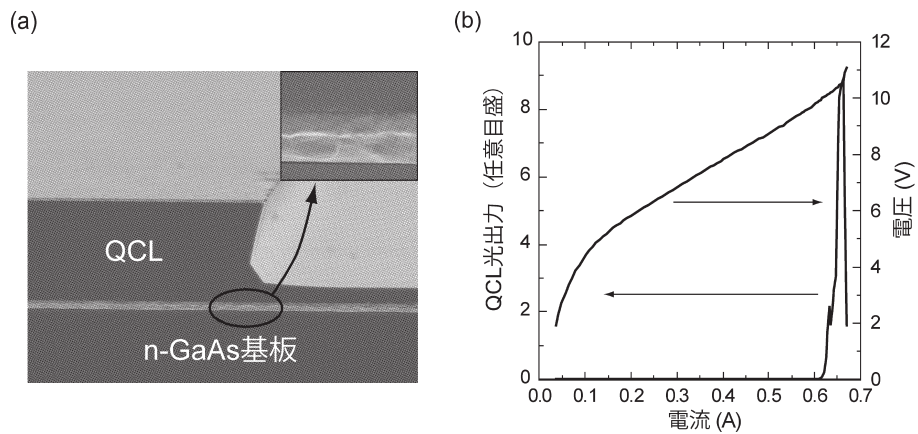


図7 (a) 金属導波路構造の断面 SEM 写真. 挿入図は金属貼り合わせ部の拡大図. (b) MM 導波路を有する THz QCL の L - I - V 特性.

り、100 K を超える値が得られている.

以上は、SISP 導波路を用いたが、MM 導波路も魅力的な導波路構造である. というのも、光閉じ込め率が 1 に近いいため、 Γ/α で定義される figure of merit が SISP 導波路のときよりも大きくなり、低閾値が期待できる. また、これに伴い狭メサ幅・短共振器長が可能となるため、消費電力の低減にも有利である. そこで、われわれのグループでも MM 導波路型 THz QCL を作製した.

MM 導波路作製については、先と同様に MBE 法により結晶成長を行った THz QCL エピウェハーと n-GaAs 基板双方の表面に Au を蒸着し、Au どうしで thermocompression による貼り合わせを行った. THz QCL における貼り合わせでは In-Au bonding が広く利用されているが¹⁵⁾、取り扱いの簡便さからわれわれは Au-Au bonding を採用した. 貼り合わせ後、エピ側の基板を除去し、ウェットプロセスで作製したメサ構造の断面 SEM 像を図 7

(a) に示す. 挿入図の拡大画像からもわかるように、void のない良好な貼り合わせ界面が得られていることがわかる. 本貼り合わせ技術を用いて、メサ幅 $\sim 100 \mu\text{m}$ 、共振器長 $\sim 2 \text{ mm}$ のレーザー構造を作製し、 L - I - V 特性を測定したところ、レーザー発振を得ることができ、 $T = 15 \text{ K}$ で約 0.3 kA/cm^2 の閾値電流密度であった (図 7 (b)). 消費電力をみても、先の SISP 構造のものと比較して閾値で 20 分の 1 程度に低減させることに成功した.

MM 導波路はこのように閾値、消費電力の点で有利であるが、テラヘルツ領域の周波数に対して共振器端面での外部とのインピーダンス不整合が大きい (すなわち、端面反射率が高い) ため、レーザー光の外部取り出し効率が下がってしまう. そのため、THz QCL の高出力化については少々不利になるが、これを解決するためのさまざまな工夫が提案されている¹⁶⁻¹⁹⁾.

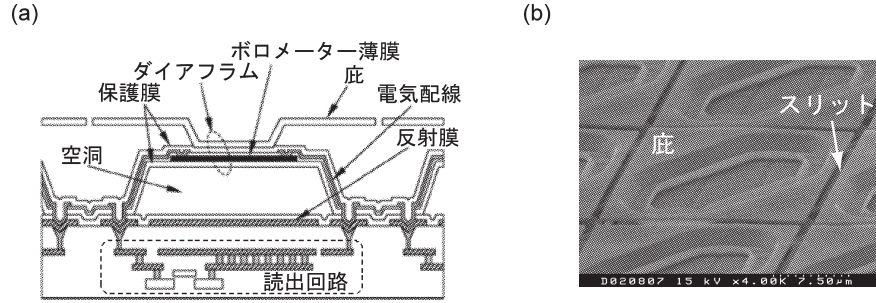


図8 非冷却マイクロボロメーターアレイ. (a) マイクロボロメーター素子の断面図. ダイアフラム部でテラヘルツ光を検知する. (b) 素子のSEM写真. 底を設けることにより被覆率を上げ、感度を向上させている.

3. THz QCLの応用例—テラヘルツ帯画像計測システム

前章では、THz QCLはどのような構造で、またどのような特性をもつレーザーかということ述べたが、ここでは応用例として、テラヘルツ帯画像計測システムについて紹介する。

画像計測に関して一番簡単な系として思い浮かぶのは、測定したい波長域に感度をもつカメラを用意して対象物を観察する、いわゆるパッシブイメージングだが、テラヘルツ帯だとそれほど簡単ではない。というのも、冒頭で述べたように、われわれを取り巻く環境は、常に300 Kの黒体輻射で充満しており、テラヘルツ帯のカメラを覗くと対象物は輻射で埋もれてしまうためである。そこで、別途照明を用意して対象物に照射し、そこから得られる信号（反射光や透過光など）をカメラで観察する、いわゆるアクティブイメージングがテラヘルツ帯の画像計測では有効と考えられる。前章までに照明となるTHz QCLについて述べたので、次節でテラヘルツ帯カメラとして開発している非冷却ボロメーターアレイについて紹介し、さらにこれら2つを組み合わせた計測システムで画像を計測した結果について述べる。

3.1 ボロメーター型非冷却テラヘルツアレイセンサー

テラヘルツ帯の受光素子として、従来はSiボロメーター、Ge:Ga素子、パイロエレクトリック素子、サーモパイル素子などが用いられてきたが、これらは単一もしくは数個のアレイ素子での利用にとどまっていた。一方、MIR領域では、MEMS技術を利用したマイクロボロメーターアレイが開発されており、非冷却カメラとしてすでに実用化されている。ボロメーター素子自身はテラヘルツ帯まで感度を有するため、構造などを工夫することによりテラヘルツ帯で動作する非冷却ボロメーターカメラを作製した。

使用したボロメーターセンサーは320×240の酸化バナ

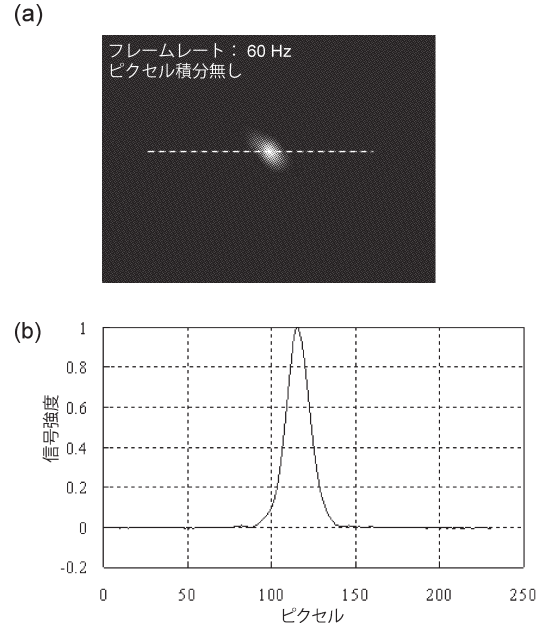


図9 (a) テラヘルツカメラを用いて測定したTHz QCLのリアルタイムイメージ. 60 Hzのフレームレートで画像が取得できている. (b) (a)中の点線に沿って切り出した規格化強度プロファイル.

ジウム (VOx) マイクロボロメーターであり、10 μm帯カメラと同様のものである(図8)²⁰⁾. この素子のテラヘルツ帯の感度を上げるために、図8(b)の底に金属薄膜を蒸着し、テラヘルツ光の吸収率増加を図った。また、センサーのパッケージ窓には従来Geが用いられていたが、テラヘルツ帯の透過率の高い高抵抗Siに無反射コートをしたものを用いた。このテラヘルツ帯カメラを用いて、図6で述べたTHz QCLのビームを測定した結果を図9に示す。図9はTHz QCL出力を放物面鏡でテラヘルツ帯カメラに集光した画像であるが、ここからNEP (noise equivalent power, 雑音等価電力) が40 pW程度の特性向上を得られたことがわかった(改善前は~300 pW)。このボロメーター素子のサイズは23.5 μmでTHz QCLの波長と比較し

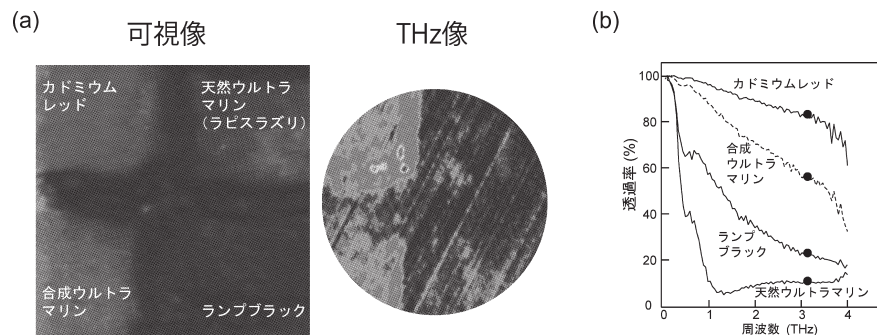


図10 THz QCL とテラヘルツカメラを用いたテラヘルツ画像計測システムによる測定例。(a) 可視光像とテラヘルツ光透過像。同じ青 (右上と左下のウルトラマリン) でもテラヘルツ光透過像では顔料の種類 (天然か人工か) に応じて異なる画像となる。(b) 測定に用いた顔料のテラヘルツ帯透過スペクトル。●は THz QCL 発振周波数 (~3.1 THz) に対応した透過率を示す。

て小さいため、画素積分などの技術を用いることにより、波長で決まる分解能を劣化させることなく感度向上を実現させることができ、NEP をさらに1桁以上改善可能であることもわかっている。

3.2 画像計測システムによる測定例

照明である THz QCL とテラヘルツ帯カメラをシステム化することにより、リアルタイムでテラヘルツ帯の透過・反射像を取得することが可能となる。図10(a)は、テラヘルツ光に対して透明な基板の上に顔料を塗布した試料を、透過配置で測定したものである^{21,22)}。比較のために、可視領域で見た像 (以降可視像とよぶ) も示している。これを見ると、テラヘルツ光透過像 (以降テラヘルツ像とよぶ) は、可視像とは異なり、同じ青 (天然ウルトラマリンと人工ウルトラマリン) でもテラヘルツ像では、人工ウルトラマリンのほうがテラヘルツ光をよく透過するという結果となっている。これは、顔料のスペクトルを反映したもものになっている (図10(b))。そのため、可視像とテラヘルツ像を比較することにより、顔料の同定が可能になる。古典絵画の分野においては、時代により使用顔料が異なるため、絵画がどれくらいの時期に描かれたものかを推定することも可能であることを示唆している。まさに、テラヘルツ帯の特徴をうまく利用した例といえよう。

本稿では、半導体のコンパクトなテラヘルツ光源であるテラヘルツ帯量子カスケードレーザー (THz QCL) について述べた。THz QCL は、世界的にみてもまだまだ十分な性能を有しているとはいいがたく、今後の発展が期待されるデバイスである。

THz QCL の応用については、THz QCL の半導体ベースやコンパクト性を生かしたもののへの適用が期待され、先に述べた可搬性の画像計測システムやオフィス内・家庭内

など短距離かつ高速大容量無線通信などへの応用が挙げられる。さらに、タンパク質など生物物質においてもテラヘルツ帯のスペクトル構造が観測できるため、抗原抗体反応において従来行われてきた ELISA (enzyme-linked immunosorbent assay) による抗体検出が、テラヘルツ光によるラベルフリー検出により低コストでリアルタイムにできるようになり、全数検査を行うことも可能になると考えられる。

これらの応用を考えると、THz QCL はペルチェ素子などによる電子冷却ですむ温度範囲で、10 mW オーダーの出力はほしいところである。この要求を満たす特性が、どのような QCL 構造で実現できるのか、今後の展開が期待される。

本研究を進めるにあたり、プロセスその他に関して、情報通信研究機構フォトニックデバイスラボを利用させていただきました。また、THz QCL 評価その他についてお世話になりました東京大学生産技術研究所の平川教授に感謝いたします。応用例においては、テラヘルツ帯非冷却マイクロプロメーターアレイに関し NEC 誘導光電事業部の小田直樹氏に、顔料を用いた試料に関して情報通信研究機構の福永香氏に感謝いたします。

文 献

- 1) D. H. Auston: "Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon," *Appl. Phys. Lett.*, **26** (1975) 101-103.
- 2) D. H. Auston: *Picosecond Optoelectronic Devices*, ed. C. H. Lee (Academic Press, New York, 1984) pp. 73-117.
- 3) D. H. Auston, K. P. Cheung and P. R. Smith: "Picosecond photoconducting Hertzian dipoles," *Appl. Phys. Lett.*, **45** (1984) 284-286.
- 4) Y. C. Shen, P. C. Upadhyaya, E. H. Linfield, H. E. Beere and A. G. Davies: "Ultrabroadband terahertz radiation from low-temperature-grown GaAs photoconductive emitters," *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 3117-3119.

- 5) R. Nishikiori, M. Yamaguchi, K. Takano, T. Enatsu, M. Tani, U. Chandimal de Silva, N. Kawashita, T. Takagi, S. Morimoto, M. Hangyo and M. Kawase: "Application of partial least square on quantitative analysis of L-, D-, and DL-tartaric acid by terahertz absorption spectra," *Chem. Pharm. Bull.*, **56** (2008) 305-307.
- 6) H. G. Roskos, M. C. Nuss, J. Shah, K. Leo, D. A. B. Miller, A. M. Fox, S. Schmitt-Rink and K. Köhler: "Coherent submillimeter-wave emission from charge oscillations in a double-well potential," *Phys. Rev. Lett.*, **68** (1992) 2216-2219.
- 7) <http://teraview.com/home/>
- 8) R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. Beere, E. Linfield, A. Davies, D. Ritchie, R. Lotti and F. Rossi: "Terahertz semiconductor-heterostructure laser," *Nature*, **417** (2002) 156-159.
- 9) G. Scalari, L. Ajili, J. Faist, H. Beere, E. Linfield, D. Ritchie and G. Davies: "Far-infrared ($\lambda = 78 \mu\text{m}$) bound-to-continuum quantum-cascade lasers operating up to 90 K," *Appl. Phys. Lett.*, **82** (2003) 3165-3167.
- 10) B. Williams, H. Callebaut, S. Kumar and Q. Hu: "3.4-THz quantum cascade laser based on longitudinal-optical-phonon scattering for depopulation," *Appl. Phys. Lett.*, **82** (2003) 1015-1017.
- 11) N. Orihashi, S. Hattori, S. Suzuki and M. Asada: "Experimental and theoretical characteristics of sub-terahertz and terahertz oscillations of resonant tunneling diodes integrated with slot antennas," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) 7809-7815.
- 12) Y. M. Meziani, H. Handa, W. Knap, T. Otsuji, E. Sano, V. V. Popov, G. M. Tsymbalov, D. Coquillat and F. Teppé: "Room temperature terahertz emission from grating coupled two-dimensional plasmons," *Appl. Phys. Lett.*, **92** (2008) 201108.
- 13) E. Gornik and A. A. Andronov: *Optical and Quantum Electronics. Special Issue on Far-infrared Semiconductor Lasers 23* (Chapman and Hall, 1991).
- 14) B. S. Williams, S. Kumar, H. Callebaut, Q. Hu and J. L. Reno: "Terahertz quantum-cascade laser operating up to 137 K," *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 5142-5144.
- 15) B. S. Williams, S. Kumar, H. Callebaut, Q. Hu and J. L. Reno: "Terahertz quantum-cascade laser at $\sim 100 \mu\text{m}$ using metal waveguide for mode confinement," *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 2124-2126.
- 16) O. Demichel, L. Mahler, T. Losco, C. Mauro, R. Green, J. Xu, A. Tredicucci and F. Beltram: "Surface plasmon photonic structures in terahertz quantum cascade lasers," *Opt. Express*, **14** (2006) 5335-5345.
- 17) S. Kumar, B. S. Williams, Q. Qin, A. W. M. Lee, Q. Hu and J. L. Reno: "Surface-emitting distributed feedback terahertz quantum-cascade lasers in metal-metal waveguides," *Opt. Express*, **15** (2006) 113-128.
- 18) M. I. Amanti, M. Fischer, C. Walther, G. Scalari and J. Faist: "Horn antennas for terahertz quantum cascade lasers," *Electron. Lett.*, **43** (2007) 573-574.
- 19) A. W. M. Lee, Q. Qin, S. Kumar, B. S. Williams, Q. Hu and J. L. Reno: "High-power and high-temperature THz quantum-cascade lasers based on lens-coupled metal-metal waveguides," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 2840-2842.
- 20) N. Oda, H. Yoneyama, T. Sasaki, M. Sano, S. Kurashina, I. Hosako, N. Sekine, T. Sudoh and T. Irie: "Detection of terahertz radiation from quantum cascade laser, using vanadium oxide microbolometer focal plane arrays," *Proc. SPIE*, **6940** (2007) 69402Y.
- 21) K. Fukunaga, Y. Ogawa, S. Hayashi and I. Hosako: "Terahertz spectroscopy for art conservation," *IEICE Electron. Express*, **4** (2007) 258-263.
- 22) K. Fukunaga, N. Sekine, I. Hosako, N. Oda, H. Yoneyama and T. Sudoh: "Real-time terahertz imaging for art conservation science," *J. Eur. Opt. Soc. Rapid Publ.*, **3** (2008) 08027.

(2008年8月21日受理)