

論文内容の要旨

論文題目： Development of Terahertz Quantum Cascade Lasers and
Application to Heterodyne Receivers for Astronomical Observations

テラヘルツ帯量子カスケードレーザーの開発と
天文観測用ヘテロダイン受信機への応用

氏名： 芝 祥一

1. はじめに

周波数 0.1~10 THz の領域の電磁波はテラヘルツ波と呼ばれる。その発生・検出は技術的に困難であるため、天文学・宇宙物理学・大気科学等の分野において未開拓の領域として残されている。しかし、この帯域には基本的な分子・原子のスペクトルが数多く含まれており、それらの高感度・高周波数分解能観測が強く求められている。天文学・宇宙物理学では、星間分子雲の物理状態を調べる上で重要な C^+ 、 C 、 N^+ などの微細構造スペクトル線、星形成領域近傍での化学組成を調べる上で鍵となる CH 、 H_2D^+ 、 HD_2^+ 、 HDO 、 H_2O などの回転スペクトル線の観測が注目され、大気科学においてはオゾン層の破壊や回復のメカニズムを探る手がかりとなる OH 、 ClO などのスペクトル線の観測が待望されている。これらのスペクトル線を、ラインプロファイルまで詳細に分析するためには、ヘテロダイン法による高周波数分解能観測が必要となる。

しかし、ヘテロダイン法による天体スペクトル線観測は、これまで 1.9 THz 以下の周波数に限られている。ヘテロダイン検出では、高感度なミクサと、それを駆動するための局部発振器が必要となる。現在、テラヘルツ帯において最も高感度なミクサは超伝導ホットエレクトロンボロメータ (HEB) である。ところが、1.9 THz 以上の帯域では実用的な局部発振器が存在しないため、ヘテロダイン観測はほとんど行われていない。この状況を打破するため、この帯域における発振器として注目されているのが、量子カスケードレーザー (QCL) である。

テラヘルツ帯量子カスケードレーザー (THz-QCL) は、コンパクトで高出力、狭線幅の光源であり、ヘテロダイン受信機における局部発振器として要求される性能を満たすことができると期待される。これまでに、0.84~5.0 THz の帯域での発振が確認されており、連続発振における最高動作温度 117 K、最大出力 130 mW、発振線幅 6 kHz 以下の性能がそれぞれ報告されている。また、HEB ミクサと組み合わせて、ヘテロダイン受信機としての動作を実際に行った研究も報告されており、2.8 THz で受信機雑音温度 1400 K が得られている。しかし、QCL の局部発振器としての実績は限られており、依然として様々なアプローチが必要な段階である。そこで本研究では、QCL を局部発振器として用いて 1.9 THz 以上でのヘテロダイン受信機を実現することを目指し、その開発に取り組んだ。

2. 量子カスケードレーザー製作プロセスの改良

THz-QCL の開発は、情報通信研究機構 (NICT) において行った。NICT では既にパルス駆動での QCL の発振に成功していた。局部発振器として利用するためには、連続発振動作が必須となるが、それはまだ実現していなかった。そこで、本研究では、製作プロセスを改良することで連続発振させることを目指した。また、テラヘルツ帯 QCL に用いられる導波路には、SISP

(semi-insulating surface plasmon)型と metal-metal 型の主に 2 種類があるが、本研究においては長期的な運用の観点から、しきい値が低く連続発振に有利な metal-metal 型に着眼し、それを用いた QCL の開発を行った。

製作プロセスの改良にあたって特に重点をおいたのが、レーザー導波路のサイズである。導波路のサイズが大きいとジュール熱による発熱が大きくなるため、動作時の実効的なデバイスの温度が高くなり、連続発振しない。従来の製作プロセスでは導波路構造の形成にウェットエッチングを用いていたが、微細化に有利なドライエッチングの導入を行った。ドライエッチングによるプロセスでは、上部電極の Au をマスクとして GaAs/AlGaAs の活性層をエッチングする。ドライエッチングの導入にあたって、GaAs/AlGaAs のエッチング後に表面の形状が荒れる問題が発生した。これは、マスクに Au を用いた際に特有の現象であった。プロセス条件の最適化においては、特にエッチングガスとプロセス中の基板温度が表面形状に大きく影響を与えることが明らかになった。エッチングガスにはもともと Ar/Cl₂ を使用していたが、Ar が Au スパッタの原因となっていると考えられ、Cl₂/SiCl₄ ガスを使用することによって、表面の荒れを抑えることに成功した。また、プロセス中の基板温度については 100 °C から 200 °C へと上げることで、GaAs/AlGaAs においても良好な形状を作製することが可能となった。このような実験は困難を極めたが、最適化後のプロセス条件を適用することで、図 1 (右) に示すように、垂直なエッチング壁面形状が得られるようになり、安定的に QCL の製作を行うことが可能になった。

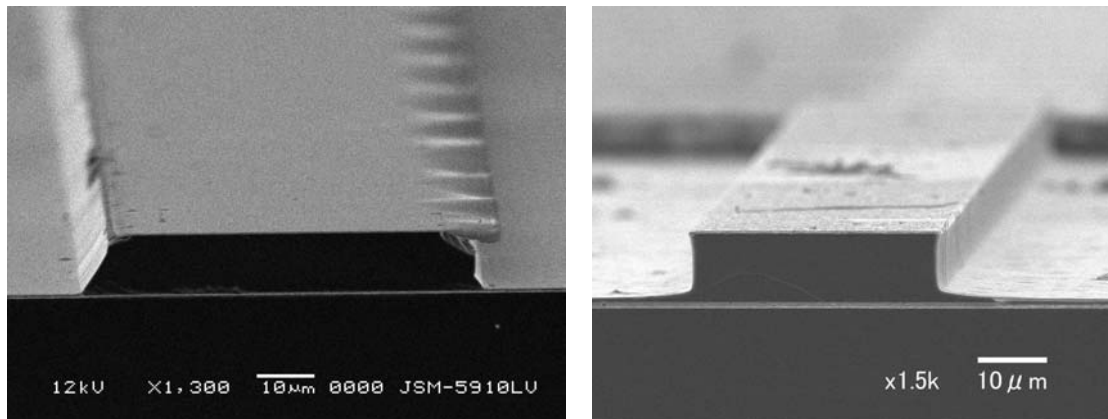


図 1. 製作した QCL 端面の画像。(左) ウェットプロセスで製作したメサ幅 70 μm のチップ。サイドエッチにより壁面に荒れがある。(右) ドライプロセスで製作したメサ幅 40 μm のチップ。

3. 量子カスケードレーザーの特性評価

製作した QCL は、液体ヘリウムによる冷却で 15 K 程度に冷却し、電流-電圧-光出力特性と、発振周波数の測定を行った。ウェットエッチングによって幅 70 μm の導波路を作製したチップでは、パルス駆動での発振を確認したが、連続発振に耐えることができなかった。それに対して、ドライエッチングを用いて幅 40 μm の導波路を作製したチップでは、想定したとおり連続発振が可能となった。図 2 は本研究で製作した THz-QCL について、動作時の温度を変化させながら電流-電圧-光出力特性を測定した結果である。発振周波数 3.1 THz において、最大で 34 μW 以上の出力を確認し、連続発振における動作温度は最高で 74 K だった。これは、国内で初めての THz-QCL の連続発振であり、独自に製作したデバイスで連続発振に成功した例はまだ世界的にも少ない。

測定中に電流-光出力特性にヒステリシスが見られることを見出した。これはパルス発振では見られておらず、これまでの連続発振の報告でも触れられていない。この現象について考察した結果、強結合 2 モード発振が起こり、光路中の大気による吸収の影響で一方のモードが検出できていない状態であることがわかった。このことは、連続発振ではバイアス電流の設定の仕方によって発振周波数が異なり得ることを意味する。従って、THz-QCL を実際に運用する上ではこの点に十分注意を払う必要があると考える。

発振周波数は、活性層の設計を参照した報告とほぼ同じ周波数となり、設計通りの動作をしてい

ることが確認できた。また、バイアスや温度といった動作条件を変更することで、発振モードが変化すること（図3）、および同一のモードでの発振であっても周波数がわずかにシフトすることを確認した。この周波数可変性は、位相ロックにより周波数安定化制御を行う際に重要となる。周波数安定化については、温度を固定して動作させた場合にバイアス電流を制御することで、十分に対応可能であることがわかった。周波数安定化は、ヘテロダイン受信機における局部発振器として重要な要素であり、その実現に向けた見通しをつけることができた。

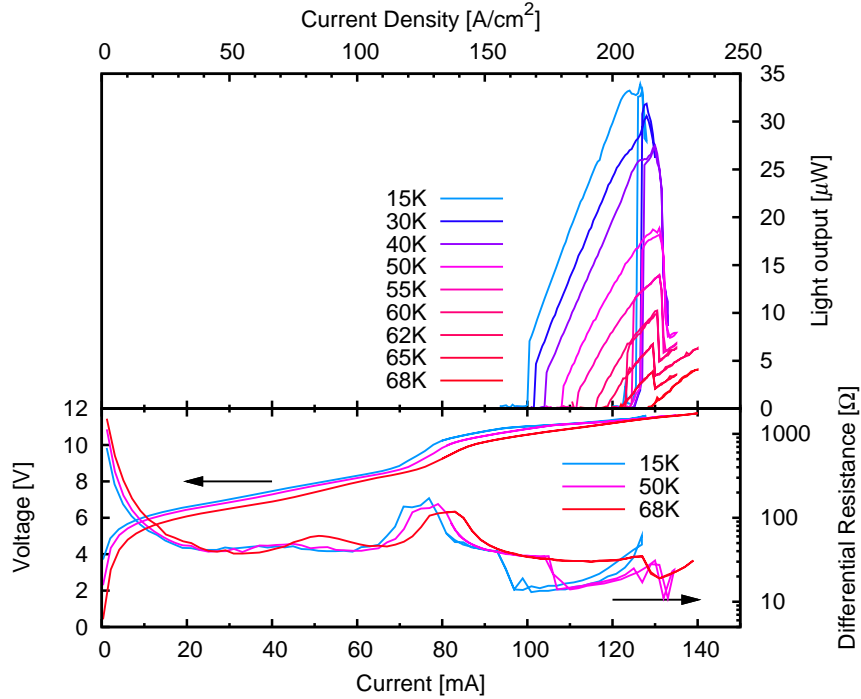


図2. 量子カスケードレーザーの連続発振での特性。上が電流-光出力特性、下が電流-電圧特性。動作温度の変化により特性が変化する。

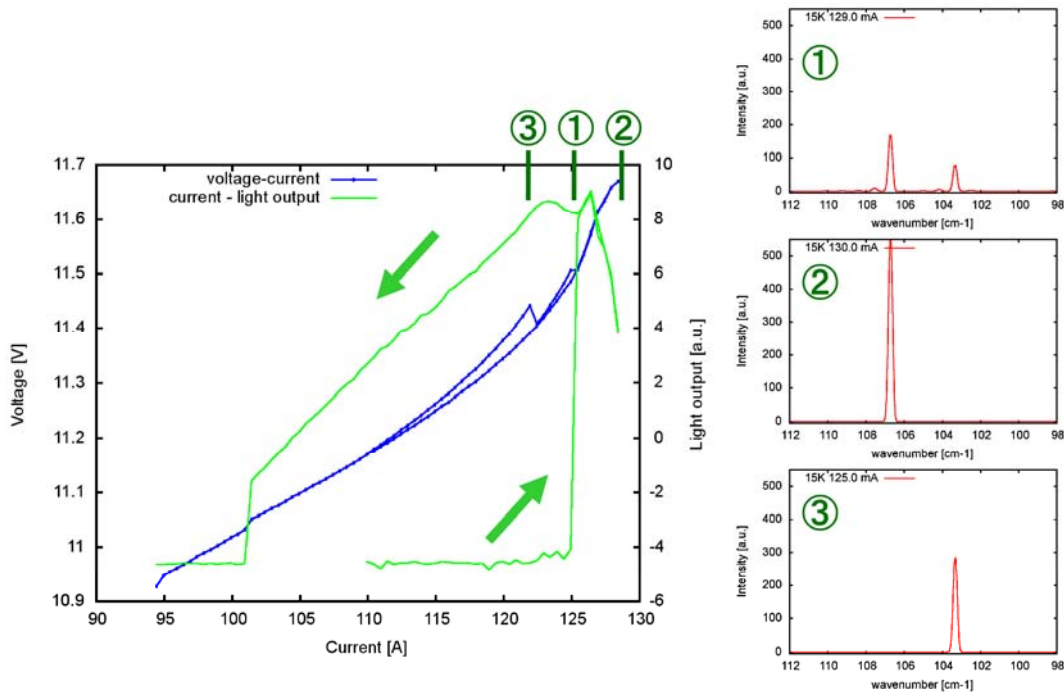


図3. 電流-光出力特性のヒステリシスと発振周波数の関係

熱輸送モデルを用いて活性層と基板の間に使用している金属界面の熱コンダクタンスを見積もったところ 0.05 W/cm K となった。これは他の報告 (0.1 W/cm K) よりも低い値であることから、使用する金属材料、もしくはウェハボンディングプロセスの改良によってより高温での動作が可能となることがわかった。このようにいくつかの改良の余地が残されていることから、本研究で開発した QCL は良質な THz 光源として相当な可能性を持つことが示された。

4. 超伝導 HEB ミクサを用いた 3 THz 帯ヘテロダイン受信機の構築

上述のように開発した QCL を局部発振器として適用し、東京大学で独自に開発した準光学型超伝導 HEB ミクサを用いた 3 THz 帯ヘテロダイン受信機を構築した。HEB ミクサは、Si 基板上に成膜した NbTiN 薄膜を用いて製作しており、テラヘルツ波との結合にはツインスロットアンテナを用いている。QCL と HEB ミクサはそれぞれ別々の液体ヘリウムデュワーに搭載し、局部発振信号の結合にはワイヤグリッドを用いた。位相敏感検波を利用した Y-factor 法で雑音温度の測定を行ったところ、最高で 0.15 dB の Y-factor を得た。これは受信機雑音温度 5600 K (DSB) に相当し、さらにビームスプリッター等の光学系による損失を考慮すると受信機雑音温度は 2100 K であった。これは THz 帯の HEB ミクサ受信機としてほぼ世界的な水準を達成している (図 4)。HEB ミクサが 2.5 THz 帯に最適化されたものであることを考えると、容易に一層の低雑音化が可能と見られる。また、これまで THz 帯 HEB ミクサには NbN 薄膜が用いられてきたが、取扱いの容易な NbTiN 薄膜を用いてもほぼ同等な性能を得られることが示された。

QCL の THz 帯受信機の局部発振器としての応用を考えた場合、周波数安定化に課題が残っているが、その実現にあたっては HEB ミクサとの組み合わせが重要である。これを独自の試行で達成したことは意義が大きい。本研究により、THz 帯高感度ヘテロダイン受信機の実現に向けての主要なハードルをすべて克服でき、テラヘルツ帯天体・地球大気観測の新たな可能性を開拓することができた。

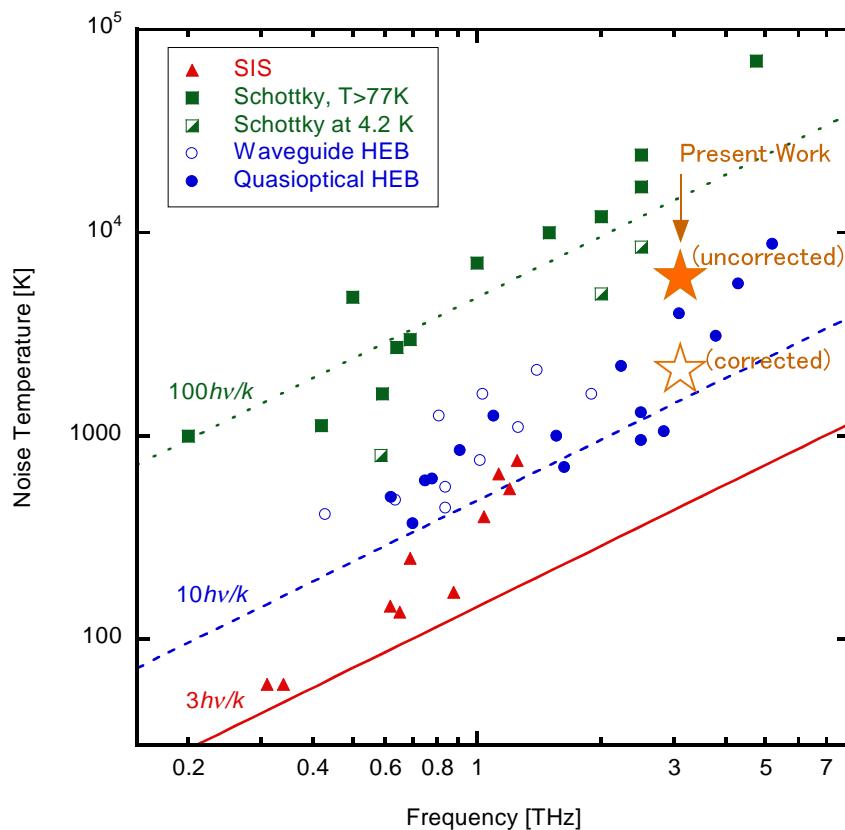


図 4. これまでに報告されているヘテロダイン受信機の受信機雑音温度と周波数の関係。本研究の値を星印で示す。