

# 論文審査の結果の要旨

氏名 芝 祥一

本論文は 7 章からなる。第 1 章はイントロダクションであり、テラヘルツ (THz) 帯の電磁波技術およびその天文学・宇宙物理学・大気科学への応用が解説されている。特に、THz 帯で有望なミキサである超伝導ホットエレクトロンボロメータ (HEB) とそれを駆動するための局部発振器となる量子カスケードレーザー (QCL) について詳しく記述されている。QCL は量子井戸構造サブバンド間遷移を用いたレーザーで、広い範囲で発振波長を選択できるというサブバンド間光学遷移の特徴を持つほか、発光層が多段につながったカスケード構造によって高出力化が可能である。また、コンパクトであるうえに発振線幅が狭いという特長も兼ね備えており、THz 帯の局部発振器として期待されている。QCL と HEB を組み合わせた受信機の天文学・宇宙物理学への応用としては、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ある。また、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期待されていることが解説されている。

第 2 章では、情報通信研究機構 (NICT) における THz-QCL の製作プロセスについて解説されており、続く第 3 章で製作された QCL の特性が解説されている。NICT では既にパルス駆動での QCL の発振に成功していたが、局部発振器に必須の連続発振動作は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によって連続発振を可能とすることを目標とし、それが達成された。その開発過程が第 4 章に記述されている。製作プロセスの改良において重点をおいたのがレーザー導波路のサイズの最適化である。最終的に、それまで 70 ミクロンあった導波路の幅を、微細化に有利なドライエッチングによるプロセスで 40 ミクロンに製作したところ、冷却性能が向上して、連続発振が実現した。ドライエッチングの導入にあたっては、Au マスクを使用した際の表面荒れをエッチングガスの変更によって抑えたり、プロセス中の基板温度を上げる等の工夫をしたことが成功につながった。以上の QCL 製作プロセスの改良は、論文提出者が精力的に行った研究であり、高く評価できる。

第 5 章では、開発された QCL の特性評価が行われている。基本性能として、設計通りの発振周波数 3.1THz において最大で  $34 \mu W$  以上の出力が確認され、

連続発振できる最高動作温度は 74K であった。これは国内で初めての THz-QCL の連続発振であり、世界的にも数少ない研究成果である。この特性評価において、電流－光出力ヒステリシスが見出されたが、これは考察の結果、強結合 2 モード発振によるものと考えられるので、運用時の注意点であることがわかった。

第 6 章では、天文学などへの応用として重要な受信機システムが記述されている。具体的には、本研究で開発された QCL と局部発振器を、論文提出者が所属する研究室において開発・製作された超伝導 HEB ミキサと組み合わせた 3THz 帯の受信機を構築し、その雑音温度を計測した。HEB ミキサは通常の NbN 薄膜ではなく、加工特性の良い NbTiN 薄膜で製作されており、ツインスロットアンテナによって THz 波と結合するものである。この受信機の雑音温度を、位相敏感検波を利用した Y-factor 法で測定したところ、最高で 0.15dB の Y-factor を得た。これは受信機雑音温度 5600K (DSB) に相当し、ビームスプリッター等の光学損失を考慮すれば、2100K と換算される。これは THz 帯の受信機として世界最高レベルにあり、使用した HEB ミキサが 2.5THz に最適化されていることを考えれば、一層の低雑音化は可能であると予想される。

最終の第 7 章では、本研究のまとめと将来の展望が示されている。いよいよ始まるミリ波サブミリ波干渉計 ALMA 等の観測に必要とされる高性能 THz 帯受信機の可能性が本研究により飛躍的に高まったと評価でき、宇宙物理学に貢献したと認められる。なお、本論文は入交芳久、関根徳彦、寶迫巖、山倉鉄矢、小山知記、前澤裕之、山本智との共同研究であるが、論文提出者が主体となって開発及び解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。