

4-4 テラヘルツ波高感度ヘテロダイン受信機の開発

4-4 Development of a Low Noise Heterodyne Receiver at Terahertz Frequency

入交芳久 川上 彰 落合 啓

Yoshihisa IRIMAJIRI, Akira KAWAKAMI, and Satoshi OCHIAI

テラヘルツ波は電波と光の境界に位置する電磁波で、まだ十分な開発・利用が進んでいない未開拓の周波数領域と言われている。テラヘルツ波の期待される応用としては、高速無線通信、セキュリティ、非破壊センシング、医療、環境計測、天体観測等がある。本稿では、その中で特に我々が開発を進めている、環境計測応用（地球大気観測）を目的とした高感度ヘテロダイン受信機の開発について紹介する。

Terahertz (THz) waves which is located between radio and optical waves are said to be unexplored frequency region. Expected applications of THz waves include high-speed wireless communications, security, non-destructive sensing, medical, environment measurements, astronomical observations, and so on. Among them, our recent development of a high-sensitive heterodyne receiver for the applications of Earth atmosphere is described in this article.

1 まえがき

図1に各周波数帯における電磁波の呼び方を示す。一般的にテラヘルツ波とは、電波と光の境界領域である、ミリ波、サブミリ波、遠赤外線を含んだ周波数(0.1~10 THz)の電磁波を呼ぶ。この周波数帯は、電波の領域から見ると周波数が高く(波長が短く)、導波管やホーンアンテナ等のサイズがとて小さくなることで加工がとて難しくなることや、また光の領域から見てもエネルギーが低くなるためにレーザー発振が難しくなること等から、いまだ十分な開発が進んでいない未開拓周波数領域と言われている。

テラヘルツ波の期待される応用としては、高速無線通信、セキュリティ、非破壊センシング、医療、環境計測、天体観測等がある。いずれの応用についても、基盤技術となるのは、テラヘルツ波の発生と検出であり、現在様々な開発が行われている。いくつか挙げるとすると、発生技術としては、分子ガスレーザー、テラ

ヘルツ量子カスケードレーザー(THz-QCL: THz Quantum Cascade Laser)[1]、共鳴トンネルダイオード(RTD: Resonant Tunneling Diode)[2]、マイクロ波の通倍・増幅発振器(AMC: Amplifier Multiplier Chain)等がある。検出技術としては、イメージングを行うテラヘルツカメラ、パワー測定を行うパイロ電気検出器、分光測定を行うテラヘルツ時間領域分光器(THz-TDS: Terahertz Time Domain Spectroscopy)[3]、フーリエ分光器(FTIR: Fourier Transform Infrared Spectrometer)、極低温の超伝導あるいは常温で動作するヘテロダイン検出器(SIS(Superconductor-Insulator-Superconductor)ミキサ、ホットエレクトロンボロメータミキサ(HEBM: Hot Electron Bolometer Mixer)、ショットキダイオードミキサ、超格子ハーモニックミキサ[4]等がある。これらの中で、本稿ではNICTで開発を行っている、超伝導を用いたテラヘルツ波高感度ヘテロダイン受信機について詳しく紹介する。

図2にヘテロダイン受信機概念図を示す。測定す



図1 各周波数帯における電磁波の呼び方

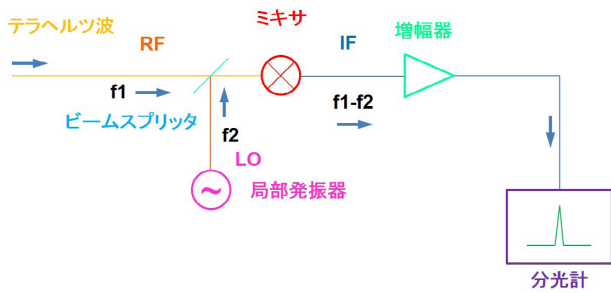


図2 ヘテロダイン受信機概念図

る周波数のテラヘルツ波の信号 (RF) に対して、(差周波がマイクロ波の周波数となるように設定した) ほぼ同じ周波数の信号を局部発振器 (LO) から発生し、それらの信号をミキサ導入し、ミキサの非線形特性を利用して中間周波数 (IF) 信号に周波数変換する。マイクロ波信号は容易に増幅することができるため、増幅後にマイクロ波の分光計でスペクトルを検出する。この方式は通信などで広く用いられているが、テラヘルツ波 (特に 1 THz を超えてくると) で動作する検出器は少ない。この検出器の開発において鍵となる技術は、LO として用いるテラヘルツ波高出力発振器と高感度ミキサであり、NICT ではこれらをデバイスから作製し、地球大気観測への応用を目的とした開発を行っている。

2 これまでの研究開発～サブミリ波における地球大気観測～

2.1 650 GHz 帯 SIS ミキサの開発

我々はこれまでもテラヘルツ波の高感度受信機開発を行い、大気観測への応用を行ってきた。受信機として用いたのは、650 GHz 帯における SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) ミキサと呼ばれる超伝導を利用した高感度ミキサである [5]。SIS ミキサと

は、ごく薄い絶縁体を超伝導体で挟んだジョセフソン接合を持ち、電流-電圧特性における強い非線形性を用いて周波数変換を行う検出器である。低雑音受信機として、天体からの微弱な電波を受信する電波望遠鏡に多く用いられている。特にアルマ望遠鏡 (アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計。南米チリの標高 5,000 m に設置された巨大電波望遠鏡。ALMA: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array[6]) においては、0.1 ~ 1 THz の周波数範囲をいくつかのバンドに分けてカバーする SIS ミキサが搭載されている。図 3 に NICT で開発された、650 GHz 帯 SIS デバイスと導波管型 (コルゲートホーン付き) ミキサマウントを示す。

2.2 気球搭載システム開発と大気球による実証実験

我々は 650 GHz 帯 SIS ミキサを搭載した、気球搭載型超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (BSMILES: Balloon-borne Superconducting Submillimeter-Wave Limb Emission Sounder)[7] [8] の開発を行い、2003、2004、2006 年に文部科学省宇宙科学研究所 (現宇宙航空研究開発機構 (JAXA))、三陸大気球観測所 (岩手県大船渡市。現在は大樹航空宇宙実験場 (北海道大樹町) に移設) において放球実験を行った。気球は高度約 34 km の成層圏に到達した後レベルフライトを行い、アンテナ仰角を変えながら大気のリム (縁) を観測し、大気中微量分子からの放射電波スペクトルを検出した。図 4 に BSMILES の外観と、2003 年の放球に用いられた B80 型気球 (容積 80,000 m³) を示す。図 5 には、2004 年の実験で観測された、オゾンやその同位体、HCl や HO₂ などの地球大気微量分子からの放射電波スペクトルを示す。仰角 (EL) の値が小さいほど、低高度を観測しているため、圧力広がりによりスペクトル線幅が広がっているのも観測されている。

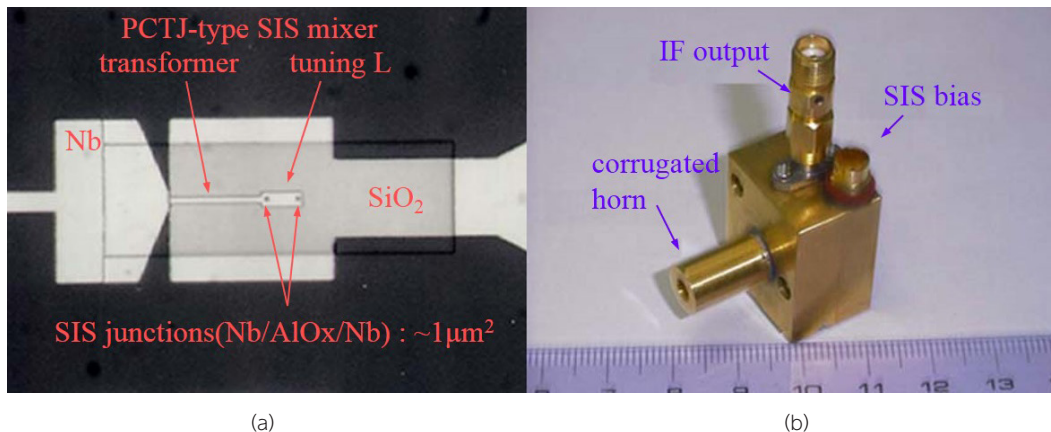


図3 (a) 650 GHz 帯 SIS デバイス (b) コルゲートホーン付き導波管型ミキサマウント



図4 (a) 2003年の実験において放球を待つBSMELES (b) 放球に用いられたB80型気球

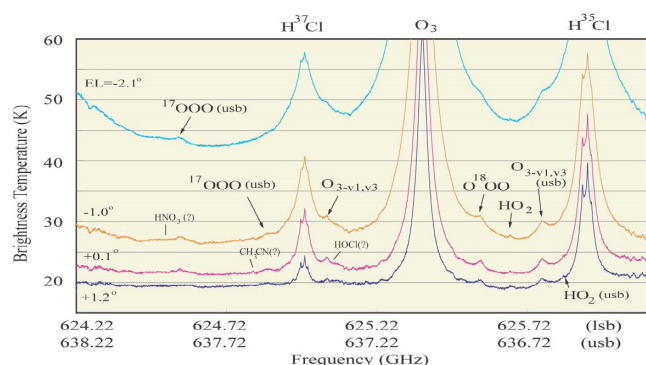


図5 2004年の実験で観測された、オゾンやその同位体、HCl、HO₂などの地球大気微量分子からの放射電波スペクトル。異なる観測高度では、圧力広がりによりスペクトル線幅が異なる。

さらに、2009年にはオゾンやオゾン破壊に関連する微量分子の観測を目的として、650 GHz帯 SIS ミキサを宇宙用4 K 機械式冷凍機に搭載した、国際宇宙ステーション日本実験モジュール(きぼう)搭載超伝導サブミリ波リム放射サウンダ(JEM/SMILES: Japanese Experiment Module/Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder) (図6)がNICT、JAXAにより開発され、HII-BロケットによりHTV (H-II Transfer Vehicle)で打ち上げられた後、約半年間の観測を行った[9][10]。

3 更に高周波へ

3.1 国内外におけるテラヘルツ波受信機システムの開発現状

更に高周波のテラヘルツ波には、地球の超高層大気や風等を測るのに必要な酸素原子のスペクトルが2.06 THzや4.75 THzにある。また、天体(星生成領域)観測に重要な分子スペクトルも数多く存在し、世界的

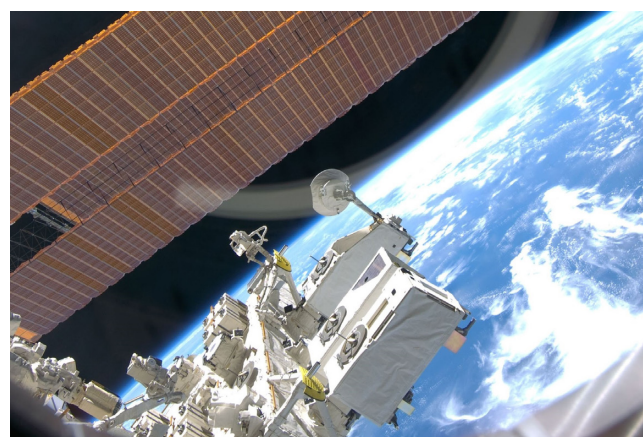


図6 JEM/SMILESは2009年にHII-BロケットによりHTV (H-II Transfer Vehicle)で打ち上げられ、約半年間の観測を行った。写真は国際宇宙ステーション日本実験モジュール(きぼう)ばく露部に取付けられた、手前から2台目がSMILES。

にも開発が進んでいる。例えば、ドイツ(DLR)とNASAで開発実験が行われているSOFIA (The Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy)は、ボーイング747-SPに口径2.7 mのアンテナとテラヘルツ波(1.9~2.5 THzや4.75 THz等)受信機を搭載した成層圏を飛行する天文台であり、開発と並行して観測も行われている[11]。また、アリゾナ大学とNASAで開発が進められているGUSTO (Galactic/Extragalactic ULDB Spectroscopic Terahertz Observatory)は、2021年打ち上げ予定の天体観測用南極周回気球システムであり、オランダ(SRON、デルフト大学)で開発されている4.75 THz帯受信機等が搭載される[12]。NASAでは2016年に南極においてSTO-2 (Stratospheric observatory)の気球実験を行い、南極周回軌道を21日間フライトし、1.46 THz、1.9 THzでの我々の銀河の観測に成功している[13]。さらにNASAにおける将来の大型衛星計画として検討が

4 衛星センサによる宇宙からの地球環境観測

行われている OST (The Origins Space Telescope) の搭載機器のひとつである HERO (Heterodyne Receiver for OST) は約 0.5 ~ 2.7 THz のマルチビーム受信機で構成される [14]。NICT においても、テラヘルツ波 (0.6、0.7、1.83、2.06 THz 帯) で地球大気を観測する衛星システム (SMILES-2) [15] の検討が進められており、そのためのテラヘルツ波受信機の開発も行われている。

3.2 ホットエレクトロンボロメータミキサ

テラヘルツ波における高感度ヘテロダイン受信機として、SIS ミキサを 2 で紹介したが、0.7 THz を超える周波数では、入射する電磁波の光子エネルギーにより超伝導特性が破壊されてしまうため性能が劣化し始める。特に 1.5 THz を超える周波数においては、SIS ミキサに変わる受信機として、ホットエレクトロンボロメータミキサ (HEBM: Hot Electron Bolometer Mixer) と呼ばれる受信機が開発・利用されている。その構造・動作原理を図 7 (a) に示す。心臓部となるのは超伝導薄膜であり、NbN 等の超伝導材料が用いられる。ここにテラヘルツ波が入射されると、そのエネルギーを吸収してホットエレクトロンが生じる。その領域はホットスポットと呼ばれ、超伝導状態が破壊された領域である。入射テラヘルツ波のエネルギーが少ない場合は、超伝導薄膜の一部が常伝導状態となった超伝導・常伝導の混在状態となり、入射エネルギーの増加に伴いホットスポットの領域も拡大し、十分強いエネルギーが入射すると完全に常伝導状態になる (図 7 (b))。テラヘルツ波の入射により、一部の超伝導が破壊されるということは、その分抵抗が生じるということであり (図 7 (b))、このことにより、このデバイスはテラヘルツ波のパワーを検出するボロメータとして利用できると言える。

しかし HEBM は単にボロメータとしてだけでなく、

ミキサとしても動作することが特徴である。今ここに、2つの僅かに周波数の異なる (例えば周波数差が 1 ~ 3 GHz 程度) テラヘルツ波 (RF と LO) が入射した場合、それらの差周波であるギガヘルツのホットスポット領域の変化に追従できるほどの高速応答特性を持つため、IF 信号を波として検出することができる。HEBM をミキサとして動作させる時には、LO 信号の入射により一部超伝導が壊れた状態に (ポンピング) しておき、そこに RF 信号を入射することでテラヘルツ波のスペクトルを検出する。より周波数の安定した LO 信号を用いることが、高い周波数分解能の測定にとっては重要となる。ホットエレクトロンは、拡散冷却やフォノン冷却により、両側の電極や基板に熱が逃げることにより冷却されるが、冷却効率を上げることにより受信機の IF 帯域を広くすることができる。一般的には HEBM の IF 帯域は 3 GHz 程度であるが、様々な工夫により広帯域化も進んでいる [16]-[19]。また、HEBM のデバイス自体には周波数の限界がないが、更なる高周波化のためにはアンテナや局部発振器の開発が重要となる。

NICT では、機構内のクリーンルームにおいて HEBM デバイスの作製、受信機の組立て、性能測定を行っている。図 8 に作製したデバイスの共焦点レーザー走査型顕微鏡 (CLSM: Confocal Laser Scanning Microscopy) によるデバイス中心部及び全体図、ミキサマウントの写真を示す。超伝導薄膜は、図 8 (a) のログスパイラルアンテナの中心部にある (図では右上の拡大図の縦の黒い線の箇所であるが、倍率がまだ十分でないため確認するのは難しい)。超伝導薄膜のサイズは、例えば長さ $0.2 \mu\text{m}$ × 幅 $2 \mu\text{m}$ × 厚さ 3nm 程度である (設計によって長さや幅、厚みは変わる)。拡散冷却の効率を高めるために長さ $0.1 \mu\text{m}$ のデバイスも作製される。ログスパイラルアンテナは、インピーダンスが周波数によらず一定であるため広帯域で

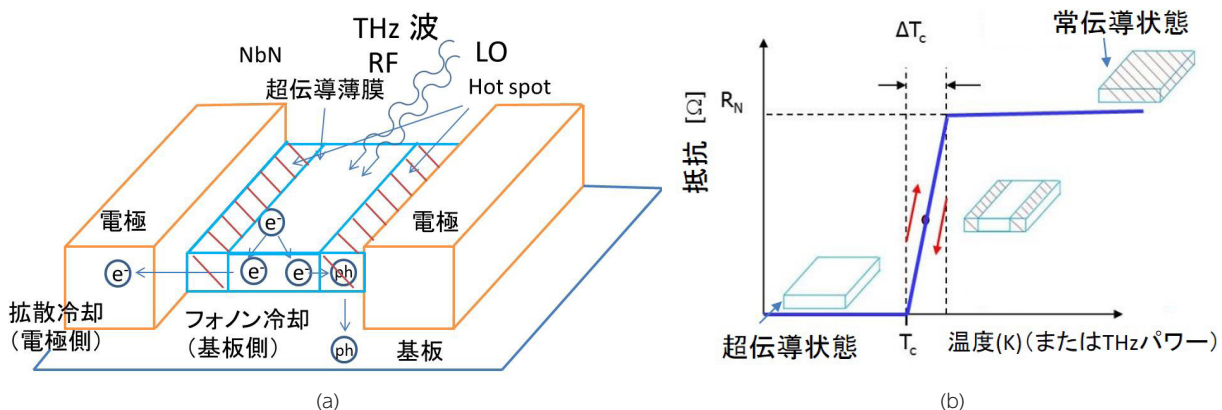


図 7 (a) HEBM の構造、動作原理。(b) 入射テラヘルツ波により抵抗が生じ、超伝導状態から常伝導状態へと変化する。

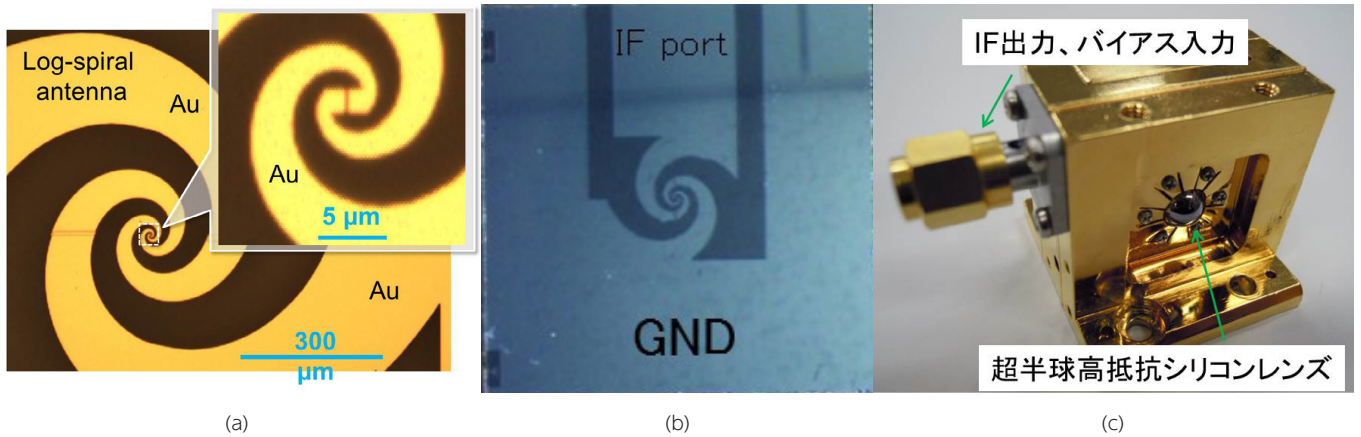


図8 (a) 共焦点レーザ走査型顕微鏡(CLSM)によるHEBMデバイスの中心部。(b) デバイスの全体(サイズは4 mm × 4 mm)。(c) 準光学型ミキサマウントの写真。

あり、かつ設計も簡単なため広く用いられる。高周波になるほどに中心部の細かい構造が重要になってくる。デバイスはミキサマウントに組み込まれ、IF 出力ポート(兼バイアス供給ポート)はアルミ線のワイヤボンディングでIF基板と接続される。デバイスは、曲面部の表面に測定周波数に応じた厚みの無反射コーティングを施した超半球・高抵抗(10 kΩ・cm)シリコンレンズに取り付けられる。ミキサからのIF出力の取り出しやバイアス入力、マウントに取り付けられたSMAコネクタを通して行われる。このように平面(ログスパイラル)アンテナとレンズを組み合わせたタイプのミキサを準光学型ミキサと呼ぶ。HEBMは静電気(サージノイズ)により大変壊れやすいため、ノイズカットフィルタを挿入するなどの対策が不可欠となる。

HEBMを動作させるためには、4 Kに冷却して超伝導状態にする必要がある。冷却系としては、液体ヘリウムのデュワーや機械式冷凍機を用いる。図9に機

械式パルスチューブ型4 K冷凍機とクライオスタット内に設置したHEBM受信機システムを示す。クライオスタット側面の信号窓からRFとLO信号がHEBMに導入され、IF信号は約10 Kに冷却された低雑音増幅器(LNA: Low Noise Amplifier)と、クライオスタットの外の常温増幅器で増幅され、分光計に入る。バイアスティーを介してHEBMにバイアスが供給される。前述のように、ノイズ(特にバイアス電源の主電源を入れた時に発生するサージノイズ)をカットするためのフィルタを挿入している。図10にHEBMの電流-電圧特性を示す。バイアスゼロでは、ほぼ抵抗ゼロで超伝導電流が流れるが、電圧を上げていくと、図7(b)に示したのと同じ原理で、超伝導から常伝導へと変化していき、高いバイアスをかけると、抵抗(斜めの直線)の特性を示す。デバイスの常伝導抵抗は、スパイラルアンテナのインピーダンス(80 Ω)に合うように作製される。

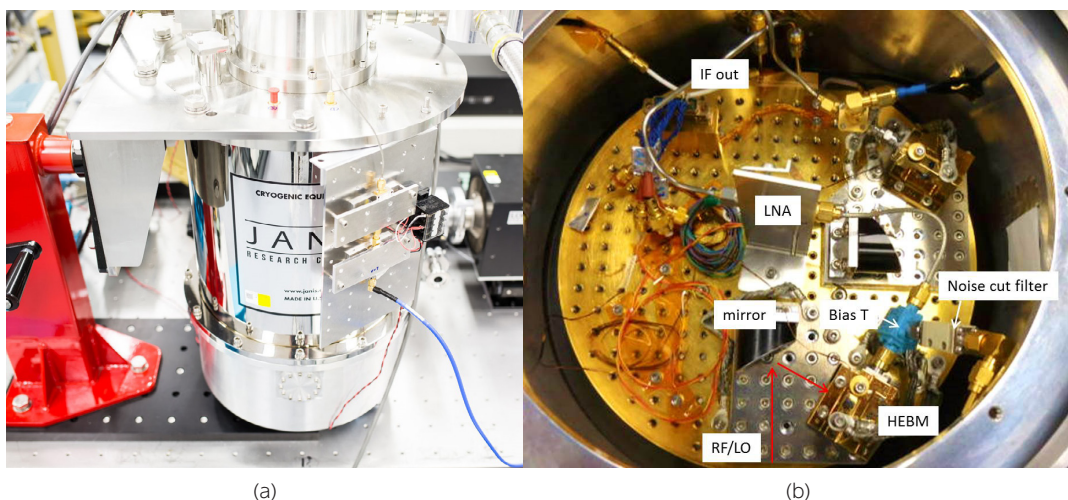


図9 (a) 機械式パルスチューブ型4 K冷凍機 (b) クライオスタット内に設置されたHEBM受信機システム

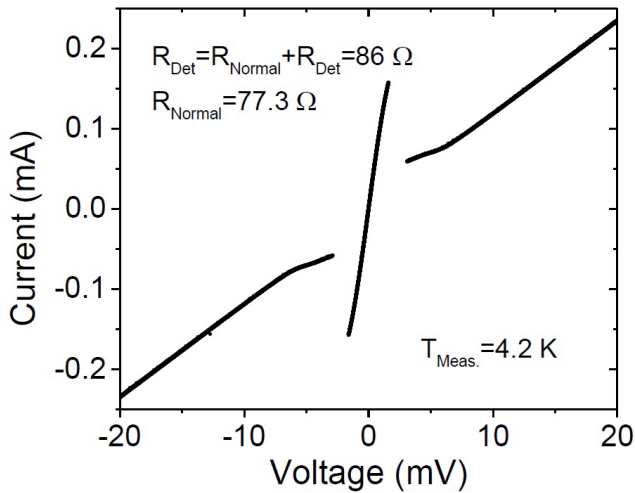


図 10 HEBM の電流-電圧特性

3.3 テラヘルツ波ヘテロダイン受信機用局部発振器

HEBM をミキサとして動作させるためには局部発振器 (LO) が必要であるが、要求される仕様としては、出力約 10 μ W 以上のコヒーレントな連続発振 (CW) 光源であること、周波数可変でかつ安定していること、コンパクト、低消費電力であることなどがある。我々が LO として用いているのは、マイクロ波の増幅・逡倍によるテラヘルツ波発振器 (AMC source: Amplifier/Multiplier Chain source) とテラヘルツ量子カスケードレーザ (THz-QCL) である。AMC 発振器は常温動作する周波数安定な光源であり、周波数は現状では 2 THz において約 20 μ W であるが、3 THz では約 1 μ W なので LO としては若干出力が足りないため、今後の開発が期待される。THz-QCL とは化合物半導体 (GaAs/AlGaAs) を用いた超格子と呼ばれる構造を持つ物質により、サブバンド間のキャリア遷移によるテラヘルツ波を発生するデバイスである。さらに、同じユニットを多数積層することで、1つのキャリアがユニット間を遷移しながら (滝 (カスケード)

のように落ちながら) 発振を繰り返すため高出力が得られる特徴を持つ [20]。THz-QCL は、同じ材質で構造を変えることにより 2 ~ 5 THz の周波数範囲内の任意の周波数で発振させることができるレーザで、冷却 (10 ~ 50 K) することにより CW 発振で 100 μ W 以上 (~ 10 mW) の出力がある。今後の開発として、高温 (液体窒素温度 77 K やペルチェ冷却) 動作での高出力発振や広い周波数可変性能等が期待される。フリーランでは周波数が安定していないので、高精度分光に応用するには位相ロックが必要である。THz-QCL も NICT 内のクリーンルームでのデバイス作製、マウント、性能測定を行っている。図 11 に作製された THz-QCL デバイスの走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) 写真とチップキャリアに装着されたデバイスを示す。図 11 (a) に示す高さ 10 μ m 幅 40 μ m の活性層 (active region) は多層構造から成り、活性層の上下を金で挟んだメタル-メタル導波路構造を持つ。図 11 (b) に示すデバイスサイズは、長さ 1.5 mm、幅 500 μ m であり、均等にバイアスを供給するために複数の金線がボンディングされている。

THz-QCL を冷却するために用いられるのは、フロー型の液体ヘリウムクライオスタット (約 10 K まで冷却可)、または機械式冷凍機 (約 45 K まで冷却) である。図 12 (a) にクライオスタット内に取り付けられた THz-QCL を、図 12 (b) に機械式スターリング冷凍機を示す。冷凍機の冷凍能力は 11 W /77 K である。

図 13 (a) に 3.1 THz で発振する THz-QCL の動作温度 25 K における電流-電圧特性と電流-出力特性を (出力は CW 発振で約 100 μ W)、図 13 (b) に発振周波数のバイアス電流依存特性を示す。NICT では 3.1 THz と 3.8 THz で CW 発振するデバイスの作製に成功している。出力は動作温度依存があり、高温になるほどに低下していく。発振周波数も温度やバイアスによって変わる。このデバイスの発振周波数のバイ

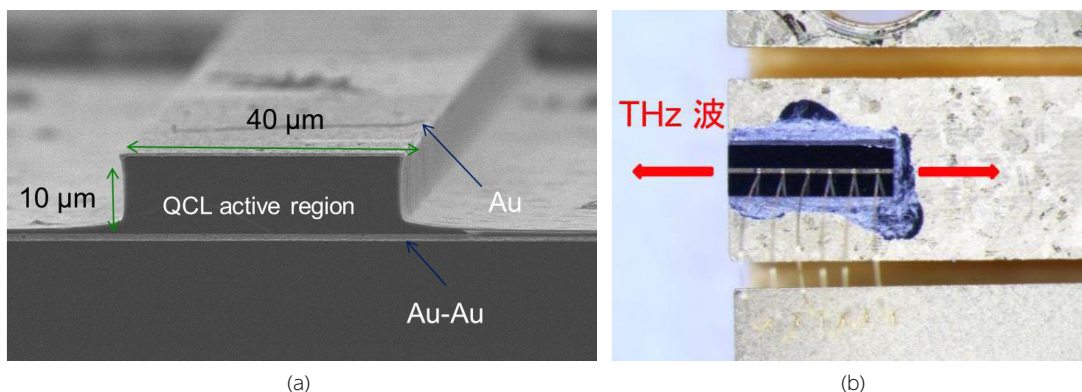


図 11 (a) 作製された THz-QCL デバイスの走査型電子顕微鏡 (SEM) (b) チップキャリアに装着されたデバイス (長さ 1.5 mm、幅 500 μ m)。均等にバイアスするために複数の金線がワイヤボンディングされている。

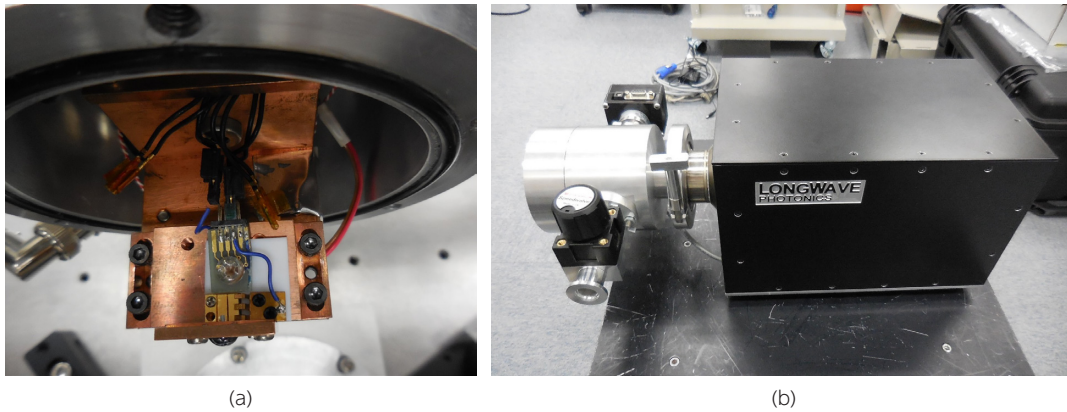


図 12 (a) クライオスタット内に取り付けられた THz-QCL (b) 冷凍能力 11 W/77 K の機械式スターリング冷凍機

アスによる変化は約 24 MHz/mA である。この特性を使って THz-QCL の位相ロックを行うことができる。(5.1 参照)

THz-QCL は、現在、世界的にも様々な開発が行われている新しい技術である。今後取り組むべき課題としては、前述した高温動作(液体窒素温度(77 K)あるいはペルチェ冷却)、高出力、広域に渡って電氣的に周波数可変であることのほか、広い帯域での発振(1~7 THz)、良好なビームパターン、高い周波数の絶対精度(数 GHz 程度)、位相ロックとその長期安定、機械振動のデバイスへの影響の低減、戻り光を少なくすること等が挙げられる。ビームパターンは LO 信号のミキサへのカップリングの向上という意味において、ヘテロダイン受信機への応用では高出力化と同等に重要である。

4 テラヘルツ波ヘテロダイン受信機システム

THz-QCL を LO とした HEBM によるヘテロダイン受信機を構成した。図 14 に受信機システムの写真を示す。ビームスプリッタには反射率が 5~10 % の

誘電体フィルム(例えば厚み 4~6 μm のポリエチレン)等が用いられる。冷凍機の真空窓には 1 mm 厚の高密度ポリエチレン(HDPE: High Density Polyethylene)が使われている。THz-TDS によって測定された 2~3 THz における透過率は約 80~90 % である。図 15 に、テラヘルツ波が入射したときの HEBM の電圧-電流特性の変化を示す。3.2 でも述べたように、テラヘルツ波の入射に伴い、超伝導状態から超伝導と常伝導の混在状態を経て、常伝導状態になる様子が見られる。このことは HEBM デバイスがテラヘルツ波を検出(ボロメータとしての応答)していることを示している。ミキサとして最適(最も低雑音)な LO パワー注入量は図 15 において電流-電圧特性がほぼ直線に近いが若干非線形の残った(緑の線)程度で、バイアスは約 0.5 mV の固定バイアスで使用する [21]。

ミキサの性能評価として、受信機雑音温度や IF 帯域の測定がある。受信機雑音温度として、3 THz 帯 HEBM 受信機で約 1,200 K (DSB)、2 THz 帯で約 810 K (DSB) が得られている。ヘテロダイン検出器の雑音温度は、位相と振幅を同時に決められないという不確

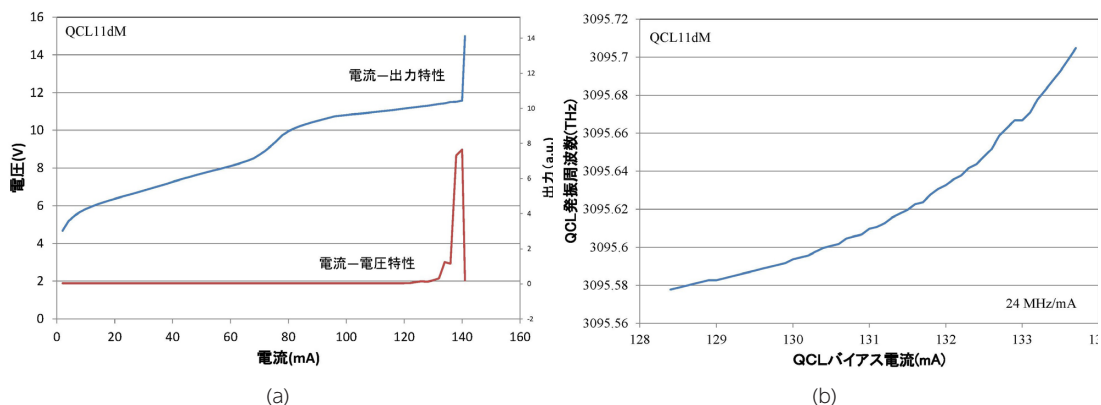


図 13 (a) 3.1 THz で発振する THz-QCL の動作温度 25 K における電流-電圧特性と電流-出力特性。出力は CW 発振で約 $100 \mu\text{W}$ (b) 発振周波数のバイアス電流特性(約 24 MHz/mA)

定性原理により、フォトン1個程度の揺らぎ以下には下げることができない。そのエネルギーを温度で表した値 hf/k_B (h : プランク定数、 f : 周波数、 k_B : ボルツマン定数) を基準にすると、上記受信機雑音温度は共に hf/k_B の約8倍となる。これらの値は、世界トップレベルの性能である [22]。

IF 帯域の広帯域化は、HEBM の重要な開発課題のひとつである。3.2 でも述べたように、ホットエレクトロンの冷却効率を上げることが、IF の広帯域化に必要である。NICT においては独自のアイデアで、電極下の超伝導状態を磁性体(ニッケル)により抑圧することで拡散冷却の効率を上げて約 6.9 GHz の広帯域化に成功した [19]。更に広帯域とする開発も進められている。

ヘテロダイン受信機の動作確認として、THz 信号のビート検出を行った。図 14 のように RF 信号源として 3 THz 帯の AMC 発振器を用いた。図 16 (a) に検出されたビート信号を示す。RF 周波数は 14.742682 GHz の 216 通倍の 3184.4193 GHz で IF 周波数が 400 MHz で受かっており、周波数掃引から RF に対して THz-QCL は LSB (Lower side band) であることから、

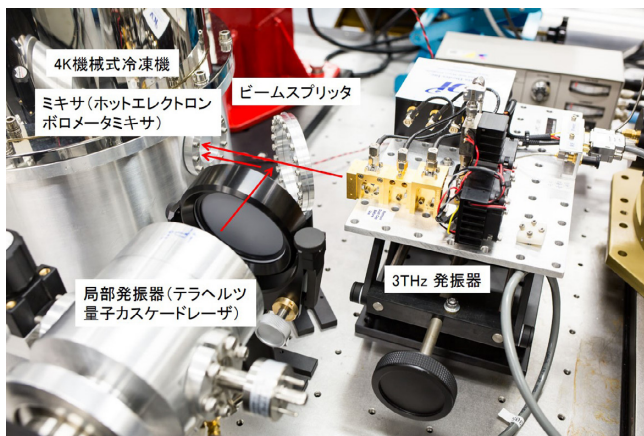


図 14 テラヘルツ波ヘテロダイン受信機の構成写真

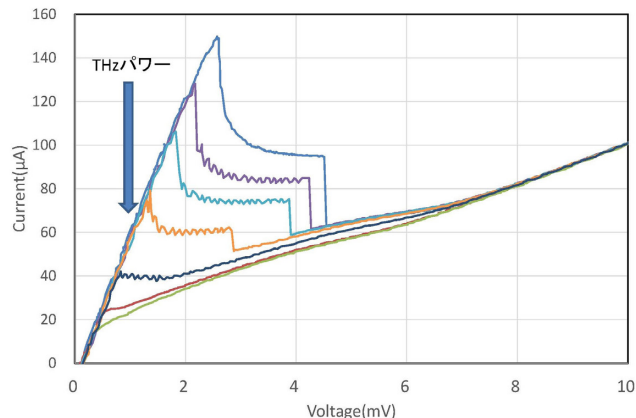


図 15 テラヘルツ波が入射したときの HEBM の電圧-電流特性の変化。緑の線辺りが HEBM に対する最適 LO 注入パワーとなる。

THz-QCL 周波数は 3184.8193 GHz であることが分かる。この測定から、THz-QCL の発振周波数を正確に測ることも利用できることが言える。さらに、このビート信号は IF 周波数が約 14.5 GHz まで受かることが分かった(図 16 (b))。アンプの帯域外であるのでゲインは大きく落ちている(ノイズフロアレベルが -80 dBm)ことや、前述の IF 帯域は、定義として 3 dB ゲインが落ちる幅としているので IF 帯域幅を表すものではないが、レーザの周波数測定等には有用である。

1 で紹介したテラヘルツ時間領域分光器 (THz-TDS) やフーリエ分光計 (FTIR) もテラヘルツ波のスペクトルを検出する有用な方法であるが、このテラヘルツヘテロダイン受信機との違いを比較すると、前者は数 THz にわたる広帯域なスペクトルを一度に測定できるという特徴があり、一方後者については、帯域は狭い(数 GHz)が、高い周波数分解能で高感度にかつ実時間測定ができるという特徴がある。HEBM は広く一般的にテラヘルツ波の電波スペクトルを検出することのできる基盤技術と言える。

5 応用

5.1 THz-QCL の位相ロック

THz-QCL は狭線幅 (10 ~ 100 kHz) の光源と言われるが [23]、バイアス等のノイズによりフリーランでは 1 ~ 2 MHz 程度以上の周波数ジッターがあることが図 16 (a) のスペクトルでも観測されている。我々はヘテロダイン受信機を用いて、THz-QCL に位相ロックをかけることに成功した。図 17 に位相ロックシステムを示す。4 で述べたように参照信号とのビートを HEBM で検出し、同じ周波数(ここでは 400 MHz)のマイクロ波参照信号と共に位相ロック回路に入力し、中に組み込まれたミキサでエラー成分を抽出し、それを元のバイアスと加算し、THz-QCL にフィードバックする。図 13 (b) に示したように、THz-QCL の周波数はバイアスで制御できるため、その特性を利用して周波数を安定化させている。

図 18 に位相ロックをかける前 (a) と後 (b) のビート信号と、位相ロックを掛けた時の信号を分解能帯域幅 (RBW : Resolution Band Width) を 1 Hz で測定した時の信号 (c) を示す。RBW 1 Hz でも分解されていないことから、スペクトルの線幅は 1 Hz 以下であると言える。ただし、これは位相ロック回路が参照信号に追従する精度を示しており、実際の 3 THz の信号の周波数安定度は、位相ロックに使われるマイクロ波参照信号(例えば水晶発振器)の精度で決まる [24]。THz-QCL に位相ロックをかけることで、より高い周

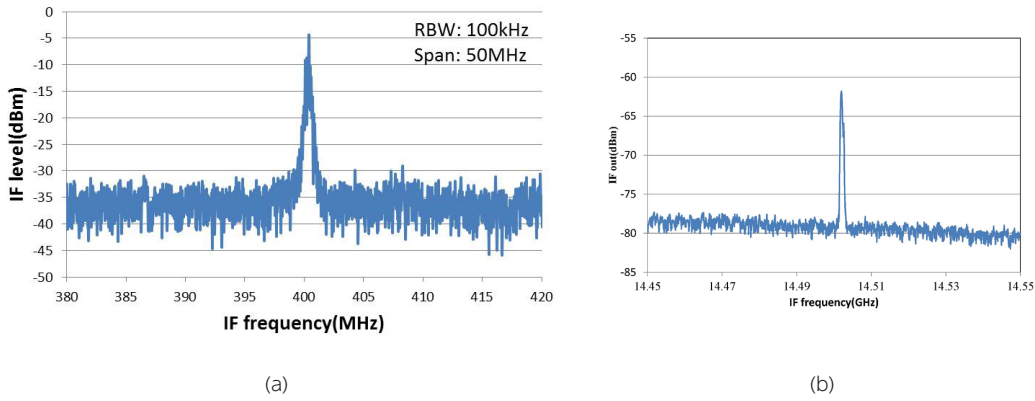


図 16 (a) 検出されたビート信号。RF : 14.742682 GHz × 216 = 3184.4193 GHz、IF : 400 MHz と LSB であることから、THz-QCL 周波数は 3184.8193 GHz と測定できる。(b) IF 周波数が約 14.5 GHz でもビート信号が検出されている。

波数精度の分光測定が可能となる。

さらに我々は、複数の THz-QCL を同時に位相ロックすることにも成功した。参照信号として光コム of 3 本のモードをフォトミキサ (UTC-PD : Uni-Traveling Carrier Photodiode) に導入することで 2 周波の THz 波を同時に発生させ、それぞれに対応する THz-QCL とのビートを 1 台の HEBM で検出し、2 台の位相ロックシステムを用いて位相ロックをかけることに成功した [25]。

THz-QCL の位相ロックには、現状では長期間維持することができないという課題があるが、例えば飛翔体を用いた長期運用システムへの応用のためには重要である。その原因として、発振周波数が時間と共にゆっくりとシフトしていくことがある。このことは、フリーランでの発振周波数を測定することでも確認されている。位相ロックバイアスをモニターして、ある閾値に到達したら(すなわち、ある程度周波数が最初の値から外れたら)、THz-QCL のバイアスを若干変えることで周波数を戻すという制御を行うことで、これまでよりも長時間(約 48 時間)位相ロックを維持することに成功した [26]。更なる長時間位相ロックの実現や、また位相ロックが外れたことを自動検出し元に戻すシステムの開発にも取り組んでいきたい。

5.2 ガスセルを用いた受信機動作実証

開発した受信機が、実際に分子から放射される電波を受信できることを確認するために、ガスセルを用いた実験を行った。図 19 に実験系を示す。写真では、2 THz 帯の AMC 発振器を用いているが、2 THz 帯や 3.7 THz 帯の位相ロックをかけた THz-QCL も用いた [27]。図 20 に、測定された分子からの放射電波スペクトルを示す。測定分子として、テラヘルツ波に多くのスペクトルを持つエタノール (CH₃OH) や水 (H₂O)、水の同位体 (HDO, D₂O) を用いた。ガスセル

内に圧力約 50 Pa (100 Pa) (常温) で分子ガスを封入した状態と、ガスの含まれない(窒素ガスを約 10⁴ Pa 封入した)状態における信号を、液体窒素温度の電波吸収体をバックグラウンドとして HEBM で測定し、それらの差分を取ることでスペクトルを検出した。検出にはデジタル分光計 (XFFTS: eXtended bandwidth Fast Fourier Transform Spectrometer) (サンプリング 5 GS/s、AD 10 bit、帯域 2.5 GHz、約 32,000 チャンネル) を用いた。DSB (Double Side Band) で受信しているため、LO に対して LSB (Lower Side Band) と USB (Upper Side Band) 側にある両方のスペクトルが、折り返されて観測 IF 帯域内に検出されている。測定されたデータの周波数は、JPL カタログ [28] や、HITRAN (high-resolution transmission molecular absorption database) [29] のデータベースによって一致することを確認した。図 20 (a) と (b) には、ガスの圧力を変えた測定を示す。(b) の方の圧力が高いため、圧力広がりにより線幅が広がっているのが分かる。

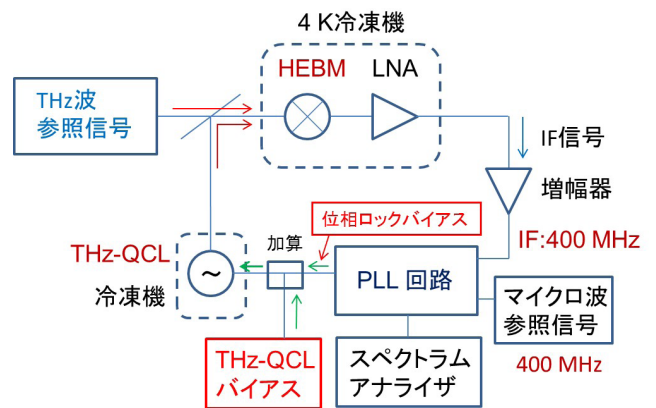


図 17 THz-QCL の位相ロックシステム。THz-QCL と THz 波参照信号のビートを HEBM で検出し、それを同じ周波数のマイクロ波参照信号を用いて、エラー成分を抽出し、THz-QCL のバイアスにフィードバックをかけて位相ロックする。

4 衛星センサによる宇宙からの地球環境観測

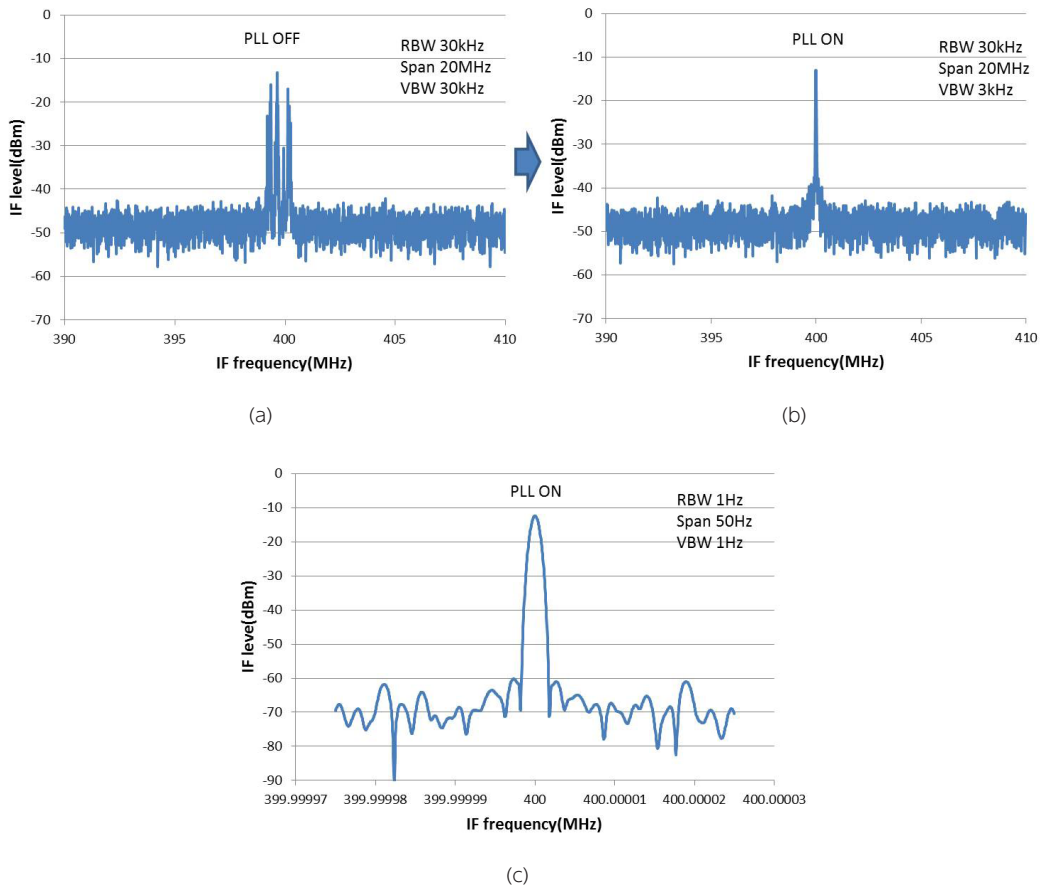


図 18 (a) 位相ロックが OFF (b) ON の時のビート信号 (c) 位相ロックが ON の時のビート信号を RBW 1 Hz で測定したもの

6 将来に向けて

現在我々は、1.83 THz の OH と 2.06 THz の酸素原子の高精度スペクトル観測を目的とした、2 THz 帯 HEBM の開発を行っている。LO には 2 THz 帯 AMC 発振器を用いる。これまでの開発では、前述のように準光学型受信機において低雑音特性と高 IF 帯域特性が達成されている。準光学型受信機は設計、製作が比較的容易であるため先行して開発が行われたが、現在は、実際の観測応用を考慮して、ビームパターン特性に優れたコルゲートホーン付→コルゲートホーン（またはスプリングプロファイルホーン [30]）付導波型管 HEBM の開発も進めている。メンブレン型と呼ばれる新たなタイプのデバイス [31] の設計・製作や高精度のミキサブロックの作成（導波管サイズは $130 \mu\text{m} \times 65 \mu\text{m}$ (WR051)）が必要になる。また、2 THz 帯におけるビームパターン（振幅、位相）測定も進めている [32]。

更に高い周波数には、4.75 THz に酸素原子のスペクトルが存在する。地球大気の観測や天体観測にとって重要な分子であり、前述の SOFIA、GUSTO、OST/HERO でも開発が進んでいる。NICT において

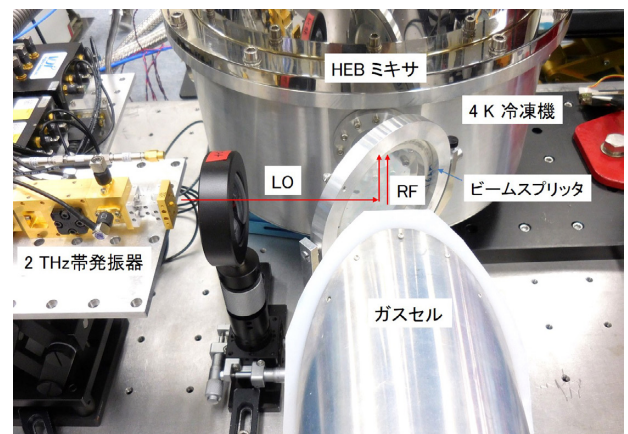


図 19 ガスセルを用いた実験系

も、将来的には 4.7 THz 帯 THz-QCL の製作及び HEBM の開発も検討したいと考えている。

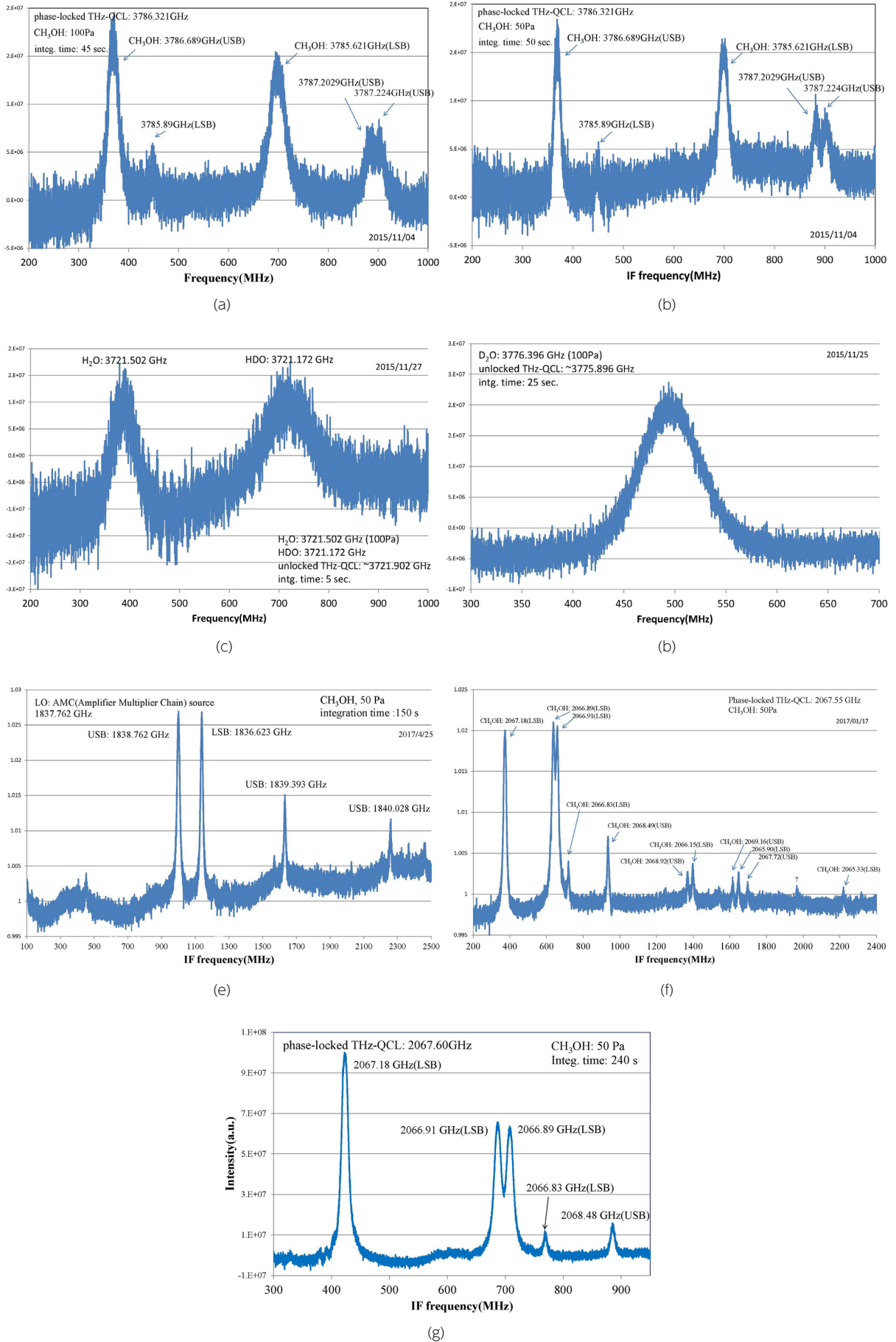


図 20 (a)、(b)、3.7 THz 帯で検出されたメタノール分子のスペクトル。LO に位相ロックした THz-QCL を用いた。(a) は圧力 50 Pa、(b) は 100 Pa。(c)、H₂O と HDO、(d)、D₂O、(e)、(f)、(g)、1.8 THz、2 THz 帯で測定されたメタノール分子スペクトル。LO には 2 THz AMC 発振器、位相ロックした THz-QCL が使われた。

【参考文献】

- 1 枝村, 藤田, 秋草, 山西, “THz 量子カスケードレーザー,” テラヘルツテクノロジーフォーラム, テラヘルツ基礎講座, <http://www.terahertzjapan.com/lecture/lecture20.pdf>, 2011.
- 2 浅田, 鈴木, “テラヘルツ帯発振を可能にする共鳴トンネルダイオードの構造と物理,” レーザ研究, vol.45, no.12, pp.741-745, 2017.
- 3 深澤, “テラヘルツ時間領域分光法と分析化学,” <http://www.jsac.or.jp/bunseki/pdf/bunseki2005/tenbou200506.pdf>
- 4 D. G. Paveliev et al., “Experimental study of frequency multipliers based on a GaAs/AlAs semiconductor superlattices in the terahertz frequency range,” *Semicond.*, vol.46, no.1, pp.121-125, 2012.
- 5 Y. Irimajiri, T. Noguchi, S.-C. Shi, T. Manabe, S. Ochiai, and H. Masuko, “A 650-GHz band SIS receiver for balloon-borne limb-emission sounder,” *Int. J. of Infrared and Millimeter Waves*, vol.21, no.4, pp.519-526, April 2000.
- 6 アルマ望遠鏡とは, <https://alma-telescope.jp/about>, 2011.
- 7 Y. Irimajiri, T. Manabe, S. Ochiai, H. Masuko, T. Yamagami, Y. Saito, N. Izutsu, T. Kawasaki, M. Namiki, and I. Murata, “BSMILES — a balloon-borne superconducting submillimeter-wave limb-emission sounder for stratospheric measurements,” *Geoscience and Remote Sensing Letters*, pp.3(1):88-92, 2006.
- 8 S. Ochiai, S. Tsujimaru, Y. Irimajiri, and T. Manabe, “Stratospheric ozone and ClO measurement using Balloon-Borne submillimeter limb sounder,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol.43, pp.1258-1265, no.6, June 2005.
- 9 K. Kikuchi, T. Nishibori, S. Ochiai, H. Ozeki, Y. Irimajiri, Y. Kasai, M. Koike, T. Manabe, K. Mizukoshi, Y. Murayama, T. Nagahama, T. Sano, R. Sato, M. Seta, C. Takahashi, M. Takayanagi, H. Masuko, J. Inatani, M. Suzuki, and M. Shiotani, “Overview and early results of the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES),” *J. Geophys. Res.*, 115, D23306, 2010. doi:10.1029/2010JD014379.
- 10 J. Inatani, H. Ozeki, R. Satoh, T. Nishibori, N. Ikeda, Y. Fujii, T. Nakajima, Y. Iida, T. Iida, K. Kikuchi, T. Miura, H. Masuko, T. Manabe, S. Ochiai, M. Seta, Y. Irimajiri, Y. Kasai, M. Suzuki, T. Shirai, S. Tsujimaru, K. Shibasaki, and M. Shiotani, “Submillimeter Limb-emission Sounder JEM/SMILES aboard the Space Station,” SPIE’s Second International Asia-Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment, and Space, Oct. pp.9-12, 2000.
- 11 R.D. Gehrz, E.E. Becklin, I. de Pater, D.F. Lester, T.L. Roellig, and C.E. Woodward, “A new window on the cosmos: The Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA),” *Advances in Space Research* vol.44, Issue 4, pp.413-432, Aug. 2009.
- 12 B. Mirzaei, J. R. G. Silva, D. Hayton, W. Laauwen, Y. Gan, Q. Hu, C. Groppi, and J. R. Gao, “Prototype 4.7 THz array local oscillator for GUSTO,” in *Proc 29th International Symposium on Space THz Technology (ISSTT2018)*, Pasadena, CA, USA, March pp.26-28, 2018.
- 13 C. Walker, C. Kulesa, P. Bernasconi, H. Eaton, N. Rolander, C. Groppi, J. Kloosterman, T. Cottam, D. Lesser, C. Martin, A. Stark, D. Neufeld, C. Lisse, D. Hollenbach, J. Kawamura, P. Goldsmith, W. Langer, H. Yorke, J. Sterne, A. Skalare, I. Mehdi, S. Weinreb, J. Kooi, J. Stutzki, U. Graf, M. Brasse, C. Honingh, R. Simon, M. Akyilmaz, P. Puetz, and M. Wolfire, “The Stratospheric THz Observatory (STO),” *Proc. SPIE 7733, 77330N*, 2010.
- 14 M. C. Wiedner, A. Baryshev, V. Belitsky, V. Desmaris, A. DiGiorgio, J.-D. Gallego, M. Gerin, P. Goldsmith, F. Helmich, W. Jellema, A. Laurens, I. Mehd, C. Risacher, HERO technical team, HERO science team, the heterodyne receiver roadmap team and the OST STD T and OST Study Team, “The Origins Space Telescope and the Heterodyne Receiver HERO,” in *Proc. 30th International Symposium on Space THz Technology (ISSTT2019)*, Goteburg, Sweden, April pp.14-17, 2019.
- 15 S. Ochiai, P. Barron, T. Nishibori, and Y. Irimajiri, “SMILES-2 mission for temperature, wind, and composition in the whole atmosphere,” *SOLA 13A*, pp.13-18, Sept. 2017. DOI: 10.2151/sola.13A-003.
- 16 N. J. Rommelfanger, B. Bumble, and B. S. Karasik, “Bandwidth Measurements of NbN HEB Devices with GaN Buffer Layers,” in *Proc. 29th International Symposium on Space THz Technology (ISSTT2018)*, Pasadena, CA, USA, March pp.26-28, 2018.
- 17 S. Antipov, A. Trifonov, S. Krause, D. Meledin, V. Desmaris, V. Belitsky, and G. Goltsman, “Gain bandwidth of NbN HEB mixers on GaN buffer layer operating at 2 THz local oscillator frequency,” in *Proc. 28th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT2017)*, Cologne, Germany, March pp.13-15, 2017.
- 18 N. Acharya, U. Ul-Haq, and S. Cherednichenko, “Wide bandwidth measurements of microwave and millimeter wave impedance in MgB₂ HEB mixers,” in *Proc. 28th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT2017)*, Cologne, Germany, March pp.13-15, 2017.
- 19 A. Kawakami, Y. Irimajiri, T. Yamashita, S. Ochiai, Y. Uzawa, “Broadening the IF band of a THz hot electron bolometer mixer by using a magnetic thin film,” *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol.8, no.6, pp.647-653, Nov. 2018.
- 20 関根徳彦, 寶迫巖, “GaAs 系量子カスケードレーザー,” 情報通信研究機構季報 テラヘルツ技術特集, vol.54, no.1, pp.9-18, 2008.
- 21 Y. Irimajiri, M. Kumagai, I. Morohashi, A. Kawakami, N. Sekine, S. Nagano, S. Ochiai, S. Tanaka, Y. Hanado, Y. Uzawa, and I. Hosako, “Development of a Superconducting Low-Noise 3.1-THz Hot Electron Bolometer Receiver,” *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol.5, no.6, pp.1154-1159, Nov. 2015.
- 22 A. Shurakov, Y. Lobanov, and G. Goltsman, “Superconducting hot-electron bolometer: from the discovery of hot-electron phenomena to practical applications,” *Superconductor Science and Technology*, vol.29, no.2, 2015.
- 23 A. Barkan et al., “Linewidth and tuning characteristics of terahertz quantum cascade lasers,” *Opt. Lett.*, vol.29, no.6, pp. 575-577, 2004.
- 24 Y. Irimajiri, M. Kumagai, I. Morohashi, A. Kawakami, N. Sekine, S. Nagano, S. Ochiai, S. Tanaka, Y. Hanado, Y. Uzawa, and I. Hosako, “Precise Evaluation of a Phase-Locked THz Quantum Cascade Laser,” *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol.6, Issue 1, pp.115-120, 2016.
- 25 Y. Irimajiri, I. Morohashi, M. Kumagai, S. Ochiai, A. Kawakami, S. Nagano, Y. Uzawa, and I. Hosako, “Simultaneous phase-locking of two THz-QCLs using an HEBM and a comb generator,” in *Proc. 28th International Symposium on Space THz Technology (ISSTT2017)*, 2017.
- 26 Y. Irimajiri, “Long term stabilization of phase-locking of a THz-QCL,” in *Proc. 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz2018)*, 2018.
- 27 Y. Irimajiri, M. Kumagai, I. Morohashi, A. Kawakami, S. Nagano, N. Sekine, S. Ochiai, S. Tanaka, Y. Hanado, Y. Uzawa, and I. Hosako, “Gas cell measurement of methanol using a phase-locked THz-QCL and an HEBM at 3.7-THz band,” in *Proc. 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz2016)*, 2016.
- 28 JPL catalog, <https://spec.jpl.nasa.gov/ftp/pub/catalog/catform.html>
- 29 HITRAN, <https://hitran.org/>
- 30 瀧川 道生, 阿戸 弘人, 稲沢 良夫, 米田 尚史, 出口 博之 “理想 HE11 モードを実現するモード合成比を用いたスプラインプロファイルホーンとコルゲートホーンの比較検討”, 信学技報, 117, pp.269 -274, 2017.
- 31 P. P. Muñoz, S. Bedorf, M. Brandt, T. Tils, N. Honingh, and K. Jacobs, “THz Waveguide Mixers With NbTiN HEBs on Silicon Nitride Membranes,” *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol.16, no.11, Nov. 2006.
- 32 Y. Irimajiri, A. Gonzalez, S. Ochiai, A. Kawakami, and Y. Uzawa, “Beam pattern measurements of a quasi-optical HEB mixer at 2 THz,” in *Proc. 29th International Symposium on Space THz Technology (ISSTT2018)*, 2018.



入交芳久 (いりまじり よしひさ)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
主任研究員
博士(理学)
テラヘルツ波における送受信機システム開発



川上 彰 (かわかみ あきら)

未来 ICT 研究所
フロンティア創造総合研究室
主任研究員
博士(工学)
超高周波超伝導デバイスの開発



落合 啓 (おちあい さとし)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
総括研究員
博士(工学)
マイクロ波リモートセンシング