

超伝導受信機を用いたテラヘルツ帯での高感度大気観測装置の開発

菊池 健一^{†,††} 神代 暁[†] 前澤 正明[†] 山田 隆宏[†] 大坪 史明^{††,†††}
佐藤 亮太^{††} 壺阪 和義^{††} 西堀 俊幸^{††} 水越 和夫^{††} 入交 芳久^{††††}
落合 啓^{††††} 尾関 博之^{††††}

† 産業技術総合研究所 〒 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1
†† 宇宙航空研究開発機構 〒 305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
††† エイ・イー・エス 〒 305-0032 茨城県つくば市竹園 1-6-1
†††† 情報通信研究機構 〒 184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1
††††† 東邦大学理学部 〒 274-8510 千葉県船橋市三山 2-2-1
E-mail: †kikuchi.kenichi@jaxa.jp

あらまし SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) ミクサを用いた超伝導ヘテロダイン受信機による, 大気中の微量分子気体を観測する装置の開発について紹介する. JEM/SMILES は成層圏中のオゾン破壊物質の宇宙からの高感度観測に成功している. また, 1 気圧下の分子輝線を測定できるような広帯域受信機の開発を進めている.
キーワード テラヘルツ, SIS ミクサ, 地球環境, 分光

Development of high-sensitive atmospheric observation instruments with superconducting receiver in terahertz frequencies

Kenichi KIKUCHI^{†,††}, Satoshi KOHJIRO[†], Masaaki MAEZAWA[†], Takahiro YAMADA[†], Fumiaki OHTSUBO^{††,†††}, Ryota SATOH^{††}, Kazuyoshi TSUBOSAKA^{††}, Toshiyuki NISHIBORI^{††}, Kazuo MIZUKOSHI^{††}, Yoshihisa IRIMAJIRI^{††††}, Satoshi OCHIAI^{††††}, and Hiroyuki OZEKI^{†††††}

† National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568 Japan
†† Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki, 305-8505 Japan
††† Advanced Engineering Services, 1-6-1 Takezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0032 Japan
†††† National Institute of Information and Communications Technology, 4-2-1, Nukui-kita, Koganei, Tokyo, 184-8795 Japan
††††† Faculty of Science, Toho-University, 2-2-1, Miyama, Funabashi, Tokyo, 274-8510 Japan
E-mail: †kikuchi.kenichi@jaxa.jp

Abstract Developments of heterodyne receivers with SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) mixers aiming to observe atmospheric minor species are introduced. The JEM/SMILES mission has succeeded in observing stratospheric ozone-depletion molecules from space. A broad-band SIS receiver enabling measurements of broadened molecular lines at the atmospheric pressure is also being developed.

Key words Terahertz, Superconductor-Insulator-Superconductor, Global Environment, Spectroscopy

1. はじめに

「電磁波の未開拓領域」などと呼ばれて久しいテラヘルツ帯であるが, この近年, デバイスの改良や測定技術の進展が著しく, 自然科学や環境計測, また安心・安全な社会を支える基盤

技術への応用といった幅広い利用を目指した研究が活発化している [1].

テラヘルツ帯 (0.1 ~ 10 THz) の光子のエネルギーは 0.4 ~ 40 meV ほど, ボルツマン定数で割ってやると 5 ~ 500 K ほどに相当する. このエネルギーは典型的な超伝導体のギャップエネ

ルギーに近く、この点において超伝導体を用いた検出器とテラヘルツ信号との組合せは相性が良いとも言える。観測対象に目を向けると、例えば比較的単純な気体分子の回転遷移がエネルギー的に対応する。すなわち、室温程度以下の環境と熱平衡にある気体分子は、励起光のようなものが無くとも、回転遷移による自発放出によってテラヘルツ帯に信号を放射していることになる [2]。

SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) ミクサを用いた超伝導ヘテロダイン受信機 (SIS 受信機) は、主に 1 THz 以下程度のテラヘルツ帯において量子限界に迫る究極の高感度分光観測を実現する手段として、電波天文や大気観測の分野が牽引してその技術を発展させてきた。これらの分野では多くの場合、微弱な信号を受動的に観測することが宿命づけられており、したがって「万難」を排して観測装置の高感度化を追求することが本質的であったということが、SIS 受信機の発展の背景にあると思われる。なお超伝導技術とは直接の関係は無いが、このような受信機は高い周波数安定性を備えた基準信号によって極めて優れた周波数分解能を実現できること、また黒体放射を用いた較正によって観測信号強度の絶対値を測定できること、といった特長も備えていることを付記しておく。

以下では SIS 受信機を用いた観測装置の具体例として、成層圏の微量分子からのテラヘルツ信号を宇宙から観測するミッションと、テラヘルツ帯の汎用計測装置への応用を目指した広帯域 SIS 受信機の開発について紹介する。

2. SIS 受信機

まずは、SIS 受信機について簡単におさらいしておく。図 1 はヘテロダイン受信機的主要構成要素を示したものである。ミクサは観測対象から放射される周波数 F_{RF} のテラヘルツ信号と、受信機が持つ局部発振器からの F_{LO} の信号をミキシングし、それらの差周波数に対応する GHz 程度のマイクロ波帯の中間周波数 (IF) F_{IF} の信号に変換する。変換された信号は後段のアンプで適当に増幅されるなどして、最終的には分光計において分光検出される。

観測対象の輝度温度 (信号強度の等しい黒体放射源の温度に換算したもの) が T_{sig} である場合、分光計で検出される電力

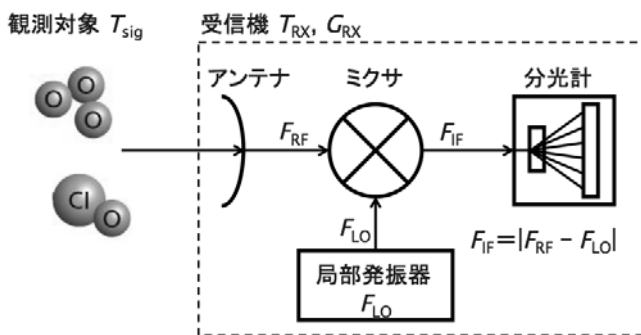


図 1 ヘテロダイン受信機の概観図。

Fig. 1 Schematic view of heterodyne receiver system.

P_{det} は以下のように表される。

$$P_{det} = (T_{sig} + T_{RX}) G_{RX} k B \quad (1)$$

ここに T_{RX} は受信機の入力換算雑音温度、 G_{RX} は受信機の利得、 k と B はそれぞれボルツマン定数と観測帯域幅を表す。 T_{RX} には不確定性原理から要請される量子限界 ($T_{RX} > h\nu/k$, h と ν はそれぞれプランク定数と周波数) の壁がある。 T_{RX} がどれほどこの限界に近いかがその受信機の検出感度の指標となり、半導体のミクサを用いた受信機では量子限界の数十~百倍程度、超伝導ミクサだとその十分の一程度というのが典型的である [1]。

入力換算雑音温度が T_{RX} の受信機のノイズ (検出されるスペクトルのゆらぎ) は一般に、ラジオメータ方程式 [3]

$$T_{\sigma} = \frac{T_{RX}}{\sqrt{B\tau}} \quad (2)$$

で表すことができる。 τ は積分時間である。すなわち、同じ大きさのノイズ T_{σ} を実現するためには、もしも T_{RX} を 1/2 にできれば、観測帯域幅あるいは積分時間は 1/4 で済むということになる。このように、受信機の T_{RX} を下げることは周波数分解能を上げたり短時間で変動する現象を観測する上でも重要である。

3. 宇宙からの地球大気観測

直接サンプリングによる測定 (*in situ* 測定) や地上に固定された装置による観測と比べ、宇宙から地球大気の遠隔観測を行うことの最大のメリットは、着目する分子種の全地球的な分布を調べられることにある。

全球に渡るグローバルなマップを描きつつ、現実的なサイズのアンテナで高い空間分解能を実現したいと考える場合、衛星の軌道高度はなるべく低い (観測対象に近い) ことが望ましい。たとえばアンテナの直径を 1 m、観測周波数を 1 THz (波長 0.3 mm) とすると回折限界は約 1 分角、すなわち 2000 km 離れた位置での空間分解能は約 0.7 km ということになる。しかし一方で、軌道が低いと対地速度が大きくなり、たとえば 400 km の低高度を周回する衛星では秒速 8 km ほどに達するので、

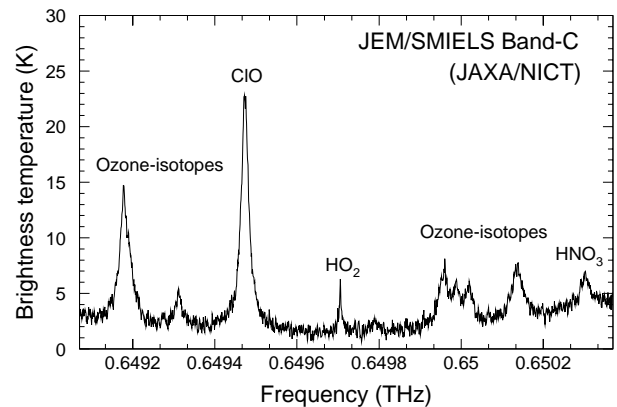


図 2 JEM/SMILES で観測したスペクトルの例。

Fig. 2 Example of observed spectrum of JEM/SMILES.

観測の積分時間もなるべく短くしなければならない。式 (2) より、短時間の観測でもノイズを低く抑えられる SIS 受信機の特長は、衛星搭載の観測装置としても適しているといえる。

超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (JEM/SMILES) [4] は宇宙航空研究開発機構と情報通信研究機構が開発し、世界に先駆けて宇宙から SIS 受信機で地球大気を観測するミッションとして 2009 年 9 月に打ち上げられた。現在も国際宇宙ステーション (ISS) の日本実験棟船外実験プラットフォームから観測を継続している。JEM/SMILES は 0.64 THz 帯の SIS 受信機を搭載しており、主として成層圏オゾンおよびオゾン破壊関連物質の精密測定を通して成層圏化学のサイエンスを推進するという役割を果たす一方で、超伝導デバイスや機械式 4 K 級冷凍機の宇宙実証といったエンジニアリング的な目的を併せ持っている。

図 2 は JEM/SMILES が実際に観測したスペクトルの例である。観測を開始した 2009 年 10 月以来、入力換算雑音温度は 400 K 以下程度で安定している。JEM/SMILES の 1 観測点あたりの積分時間は 0.5 秒、分光計の 1 チャンネルの帯域幅 (正確にはノイズ等価幅) は約 2 MHz であるので、観測スペクトルに現れるノイズの大きさは式 (2) から約 0.4 K と計算されるが^(注1)、実際の観測データからもこの予想と矛盾無い値が得られている。

JEM/SMILES に搭載されている SIS デバイスは、国立天文台野辺山宇宙電波観測所のクリーンルームで製作された。製作プロセスは [5] に詳しい。デバイスの中心である SIS 接合部の断面は Nb/Al-AIOx/Nb の三層構造をしており (図 3)、電流密度は約 6 kA/cm²、また接合部の面積はおよそ 1 × 1 μm² である。JEM/SMILES の SIS デバイスでは 2 個の SIS 接合を並列に配置した parallel-connected twin junctions [6] と呼ばれる回路を採用することによってテラヘルツ信号とのインピーダンス整合をとっており、バックショートを経験的に調整するような機構を排除している。

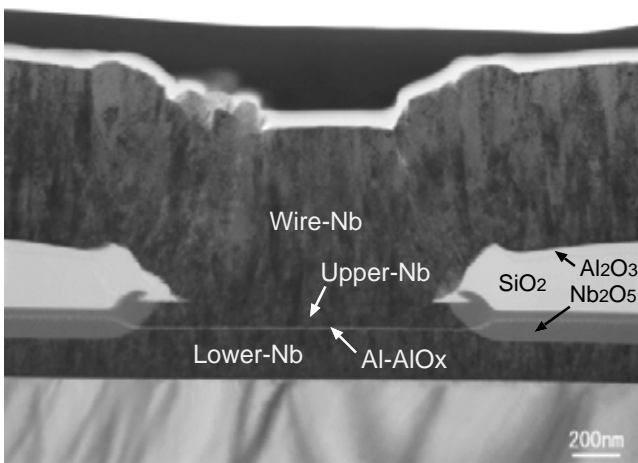


図 3 JEM/SMILES 搭載の SIS 接合の断面画像。

Fig. 3 Cross-sectional image of SIS Junction for JEM/SMILES.

(注1): 生の大気観測観測データからスペクトルを計算する際に、較正観測データからのエラーの伝搬などがあるので、スペクトルのノイズはこれよりも大きくなる。

優れた低雑音性能を実現すると同時に、JEM/SMILES の SIS ミキサには宇宙で使用されるコンポーネントとしての高い信頼性や、打ち上げ時も含めた宇宙環境への適合性が要求される。しかし SIS ミキサはもちろんのこと、超伝導デバイスを宇宙で使用した例はこれまでにほとんど存在しない。JEM/SMILES の開発では手探りともいえる状態から基礎的なデータを収集して、それに基づく方針で工程の管理や製造後の評価手法を検討し、また放射線、熱サイクル、電磁適合性、振動・衝撃といった環境試験をクリアしていった [7]。JEM/SMILES での実績が将来の衛星ミッションで何らかの一助にでもなれば幸いである。

4. 実験室での分光計測

冒頭でも述べたように、近年のテラヘルツ関連技術の進展には目覚ましいものがあるが、様々な応用利用の道が模索される一方で、その基盤となるべき高精度で汎用性のある計測技術の確立は立ち後れている。SIS 受信機の持つ高感度、高周波数分解能といった特長は、基盤技術を支える要素として相応しい。

SIS 受信機をテラヘルツ帯の汎用型計測器として実現する上で克服すべき課題はいろいろあるが、その一つは帯域の狭さである。テラヘルツ帯の SIS デバイスでは一般に、SIS 接合やチョーク回路などの寄生容量が IF 信号に無視できない影響を与えるため、IF の帯域幅はせいぜい数 GHz 程度、比帯域で 1 % のオーダーに限られてしまう。これを克服するような構造の SIS デバイスも提案されているが [8]、比較的安易に帯域を広げるには、局部発振器の周波数を走査してしまえばよい。この方法では「瞬時帯域」は IF 帯域に制限されるが、低雑音のミキサと組み合わせて周波数走査を高速に行うことができれば、準リアルタイム的に広帯域の測定を行うことができる。

これを実現するには当然ながら、広い周波数帯を走査できるテラヘルツ信号源と、その帯域に整合した SIS ミキサが必要である。幸いにも信号源の発展は著しく、現在ではオクターブの帯域幅を実現するものも比較的容易に入手できる。残る問題は SIS ミキサの入力帯域である。産業技術総合研究所では、導波管による帯域制限を排除するために信号の入力部を準光学レンズと同相給電型ツイスロットアンテナとし、さらに 8 個の SIS 接合を並列に配置することによって実効的な共振周波数帯域を広げた SIS ミキサを開発し、この SIS ミキサを搭載した受信機を用いて 0.2 – 0.5 THz に渡って優れた雑音性能を得られることを示した (図 4) [9]。受信機のバックエンドの分光計は測定

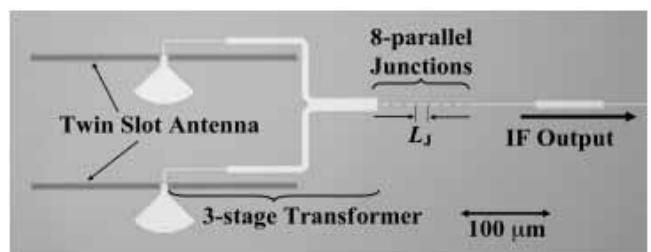


図 4 広帯域 SIS デバイスの写真。

Fig. 4 Photograph of broad-band SIS device.

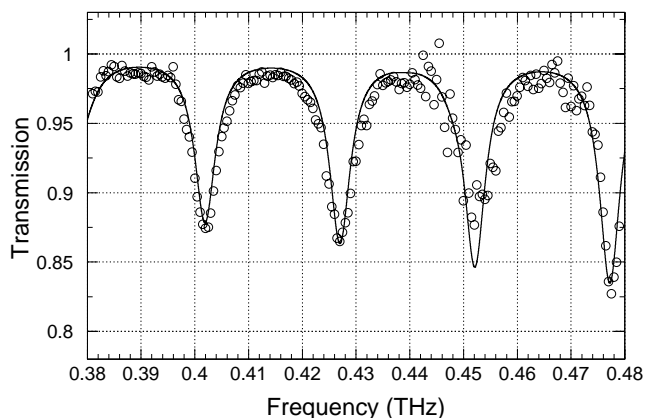


図 5 亜酸化窒素の吸収スペクトルの測定結果 (白丸) . 実線はモデル .
Fig. 5 Measured absorption spectrum of nitrous oxide (open circle) and model (solid line).

対象によって切替える . 最近では 1 GHz 帯域を 60 kHz の分解能で高速フーリエ変換するような分光計が市販されており , それを組み合わせることで 6 桁を越える「周波数ダイナミックレンジ」を実現している .

図 5 はこの広帯域 SIS 受信機を応用した一つの例として , ガスセルに封入した大気圧の亜酸化窒素の吸収スペクトルを 0.38 – 0.48 THz の帯域で測定した結果である . 亜酸化窒素は「21 世紀のオゾン層破壊物質」とも言われており [10] , その基礎的な分光パラメータを実験室で確認することには大気科学上の意義もある . 一般に , 大気圧下の気体分子のスペクトルは数 GHz 程度に広がるため , スペクトルのプロファイル全体を俯瞰するにはこのような広帯域受信機による測定が不可欠である .

図 5 に示した結果は , 実験室内で 20 cm 長のガスセル中の亜酸化窒素分子からの自発放射 (吸収) を受動的に観測したものであるが , 実用的な応用の一つとして , この広帯域 SIS ミクサとテラヘルツ送信機を併用した能動的な分光法によって , 災害時に発生する有毒ガスの遠隔計測を行うための研究開発も進めている [11] .

5. おわりに

高感度の大気観測装置として SIS 受信機はすでに多くの成功を収めているが , 発展のベクトルはまだ無数に考えられる . ひとつには , 微細加工技術や発振器の進歩と相俟って , 高周波化を目指した研究が世界各地で行われている .

従来の SIS デバイスでは Nb が広く使われているが , そのギャップ周波数である 700 GHz を越えると急激に雑音性能が劣化する . これを克服し , 1 THz を越えるような周波数帯での高感度観測を実現するために , NbN や NbTiN といったギャップ周波数の高い材料を用いた SIS ミクサや , あるいは HEB (Hot Electron Bolometer) といった新しい超伝導デバイスの開発が進められている ([12] など) . このような受信機が広く使われるようになると , 例えば OH ラジカル (1.8 THz) などの , 地球

大気化学の反応機構で重要な役割を果たしている分子種の理解に進展が期待できる .

この研究の一部は , 独立行政法人情報通信研究機構の委託研究「ICT による安全・安心を実現するためのテラヘルツ波技術の研究開発」として行われた .

文 献

- [1] テラヘルツテクノロジー動向調査委員会 , テラヘルツ技術 , オーム社 , 東京 , 2006.
- [2] 日本分光学会 , 電波を用いる分光 —地球 (惑星) 大気 , 宇宙を探る— , 講談社 , 東京 , 2009.
- [3] R. H. Dicke, The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies, Review of Scientific Instruments 17, 268, 1946
- [4] SMILES Science Team, SMILES Mission Team, JEM/SMILES Mission Plan (version 2.1), 2002. (available at <http://smiles.tksk.jaxa.jp>)
- [5] T. Noguchi, A. Sakamoto, S. Ochiai, Fabrication of sub-micron SIS junctions, Technical Report of IEICE, SCE93-64, 43, 1994.
- [6] T. Noguchi, S. -C. Shi, J. Inatani, An SIS Mixer Using Two Junctions Connected in Parallel, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 5, 2228, 1995
- [7] K. Kikuchi, Y. Fujii, W. -L. Shan, J. Inatani, Repeatability and Reliability of the 640 GHz SIS Mixer for JEM/SMILES, Proceedings on 14th International Symposium on Space Terahertz Technology, 442, 2003
- [8] A. R. Kerr, S. -K. Pan, A. W. Lichtenberger, H. H. Huang, A Tuneless SIS Mixer for 200 – 280 GHz with Low Output Capacitance and Inductance, Proceedings on 9th International Symposium on Space Terahertz Technology, 195, 1998
- [9] S. Kohjiro, K. Kikuchi, M. Maezawa, T. Furuta, A. Wakatsuki, H. Ito, N. Shimizu, T. Nagatsuma, Y. Kado, A 0.2-0.5 THz Single-band Heterodyne Receiver Based on a Photonic Local Oscillator and a Superconductor-Insulator-Superconductor Mixer, Applied Physics Letters 93, 093508, 2008.
- [10] A. R. Ravishankara, J. S. Daniel, R. W. Portmann, Nitrous Oxide (N₂O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century, Science 326, 123, 2009.
- [11] K. H. Oh, N. Shimizu, S. Kohjiro, K. Kikuchi, A. Wakatsuki, N. Kukutsu, Y. Kado, High-sweeping-speed Optically Synchronized Dual-channel Terahertz-signal Generator for Driving a Superconducting Tunneling Mixer and its Application to Active Gas Sensing, Optics Express 17, 18455, 2009
- [12] H. Maezawa, T. Sato, T. Noguchi, Process Simulation of Reactive DC Magnetron Sputtering for Thin Film Deposition of Niobium-Titanium Nitride, IEEE Transaction on Applied Superconductivity 15, 3520, 2005