

称号及び氏名	博士（理学） 黒岩 宏一
学位授与の日付	平成 26 年 3 月 31 日
論文名	Study on Advanced Terahertz SIS Receivers for Radio Astronomy (電波天文学に用いるテラヘルツ SIS 受信機の高性能化に関する研究)
論文審査委員	主査 大西 利和 副査 小川 英夫 副査 久保田 佳基 副査 細越 裕子 副査 鶴澤 佳徳

論文要旨

1. イントロダクション

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) 計画は、日米欧 3 者が協力し南米チリ・アンデス山脈の標高 5000 m のアタカマ高地に 66 基の電波望遠鏡を設置する巨大電波干渉計プロジェクトである。観測周波数帯は 30-950 GHz で大気窓に対応した 10 個の周波数帯に分割され、各周波数帯のカートリッジ受信機でカバーする。日本は Band 4(125-163 GHz)、Band 8(385-500 GHz)、Band10(787-950 GHz)の 3 つの周波数帯の受信機開発を担当した。ALMA 望遠鏡の写真と仕様を図 1 に示す。信号の検出方法はヘテロダイン方式で、観測(RF)信号に近い局部発振(LO)信号をミキサーで混合し、その差周波(IF 信号)を取り出すことで検波する。このミキシングはミリ波テラヘルツ波で最も高感度である超伝導トンネル接合(SIS: Superconductor-Insulator-Superconductor)を用いた SIS ミキサーを使用している。LO 信号の高周波側・低周波側の 2 つのサイドバンドを重畳して受信する手法を DSB 型、高周波側・低周波側のサイドバンドを分離して独立に受信する手法を 2SB 型と呼ぶ(図 2)。DSB 受信機では観測する周波数帯だけでなく不要な周波数帯にも感度を持ってしまう。そのため大気電波吸収率の高いミリ波テラヘルツ帯では不要な周波数帯からも大気雑音温度が入り込み、輝線観測において観測効率が劣化する。そのため、観測しない(不要な)周波数帯からの大気雑音を排除する 2SB 受信機が望まれる。

ミリ波帯の 2SB 受信機では準光学方式、機械式同調方式、導波管方式が報告されている。準光学型、機械式同調型は必ず可動部分を伴い再現性や経年変化の問題があるため、導波管方式を用いた 2SB 受信機が主流である。導波管型 2SB 受信機の構成は、図 2 右に示すように 90 度ハイブリッドカップラーで RF 信号の位相を 90 度ずらして 2 つの SIS ミキサーに入力し、IF 出力でも同様に位相をずらして足し合わせることで両サイドバンドを分離する。



バンド	周波数[GHz]	受信機雑音温度[K]	担当	受信方式
3	84-116	37	カナダ	2SB
4	125-183	51	日本	2SB
6	211-275	83	アメリカ	2SB
7	275-370	147	フランス	2SB
8	385-500	196	日本	2SB
9	602-720	175	オランダ	DSB
10	787-950	230	日本	DSB

図1 上:ALMA 望遠鏡の写真。下:各バンドの仕様と担当国

ALMA においては Band 8 までが 2SB ミキサーが採用されているが Band 10 のようなテラヘルツ帯では 2SB ミキサーを構成する 90 度ハイブリッドカップラーの寸法が非常に小さく加工が困難で、更に金属導波管の損失が大きく受信機雑音温度が上昇するため DSB ミキサーが基本仕様となっている。また SIS ミキサー素子も小さく、ミキサーブロックに素子を組み込む際のズレが雑音温度性能に影響することが考えられるが、現在までに詳細な解析はされていない。更に 2SB ミキサーは 2 つの SIS ミキサーで構成されるため、292 個という大量の SIS ミキサー素子が必要となり、中心周波数を決める同調回路の詳細な設計手法の確立が必要となる。本研究ではテラヘルツ帯における低雑音 2SB ミキサーの実現のため、以下の要素技術の研究開発を行うことである。

- 1) ミキサーブロックに対する SIS ミキサー素子の設置条件の解明のため、Band 4 ミキサーを用いたスケールモデル実験
- 2) 従来の金属導波管より低損失性が期待される超伝導体を用いた導波管及びそれに適した導波管回路の開発
- 3) SIS ミキサー素子の中心周波数を決める同調回路の詳細な設計手法の確立

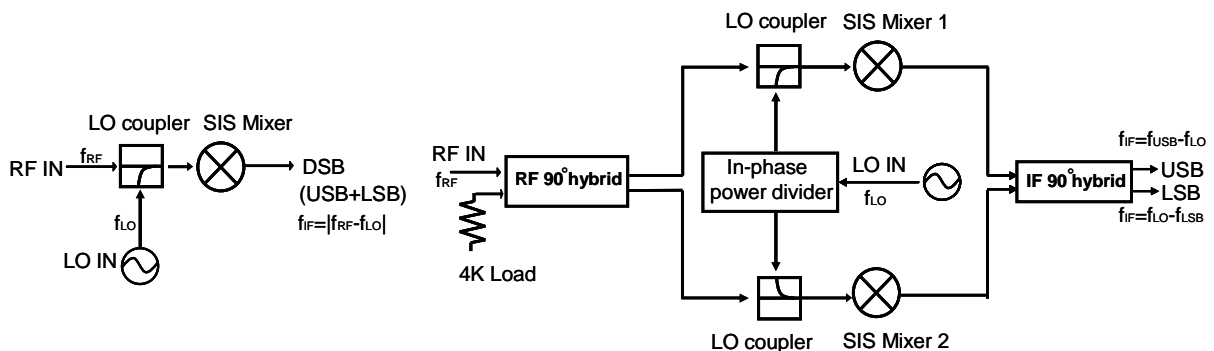


図2. 左:DSB ミキサー、右:2SB ミキサーのブロックダイアグラム。DSB ミキサーは USB と LSB が重畳して受信するのに対して、2SB ミキサーは USB と LSB に分離して受信できる。

2. 研究内容

2-1. ミキサーブロックに対する SIS ミキサー素子の設置条件の解明

テラヘルツ帯では導波管や SIS ミキサー素子の構造が非常に小さくなるため、ミスアライメントによる性能劣化が顕著になる。その中でミキサー素子は小さく、導波管ミキサーブロックに装填する際のズレにより給電部のインピーダンスが変化し、ミキサーの雑音温度の上昇が推測される。そのため、既に 2SB ミキサーが採用されているミリ波帯(Band 4) においてスケールモデル実験を行い、その給電部のインピーダンスを公差解析し、雑音特性を評価した。Band 4 はミキサーがテラヘルツ帯より大きく、公差解析する上でミキサーチップの位置を正確に把握することができるため有効である。Band 4 ミキサーを図 3 に示す。RF90 度ハイブリッドカプラーと 2 つの SIS ミキサーは 1 つの導波管ブロックに組み込まれている。また組み立ての簡便さとミキサーブロックの構成部品数を減らすため、素子は信号の進行方向に対して 90 度に置かれる。解析は 3 次元電磁界シミュレーター(HFSS)を使用した。チップと筐体が接触した時、マイクロストリップで構成されるチョークフィルターにおいて、高次モードが伝搬可能となる周波数が帯域内に存在することが分かった。これが給電部に影響しインピーダンスに飛びが発生し、雑音温度が上昇する。解決方法としてチップが筐体と接触した場合にも性能劣化しないよう再設計したところ、帯域にわたり雑音温度の上昇は無くなった。これはミスアライメントに強いロバストなスケールモデルができたと言える。本研究ではテラヘルツ帯でより顕著になるミスアライメント由来の性能劣化の問題に対して、ミスアライメントが生じても広帯域に動作する SIS ミキサー開発のための技術を構築することができた。

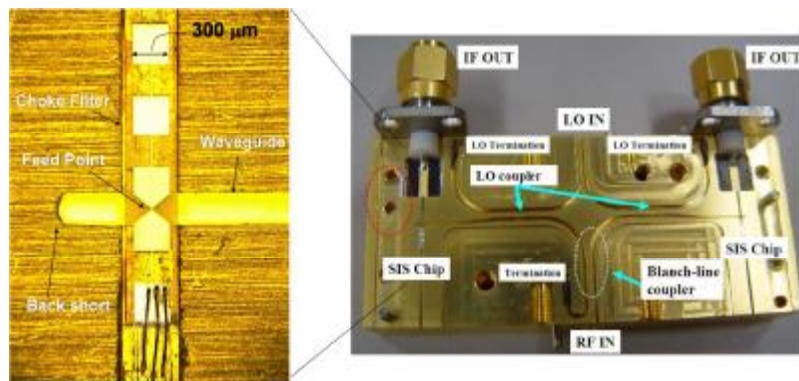


図 3 Band 4 SIS ミキサー素子とミキサーブロックの写真

2-2. 超伝導導波管の開発

2SB のミキサーブロックは RF90 度ハイブリッド、LO カプラー、SIS ミキサー素子を装填する溝で構成される。このミキサーブロックの導波管長はできるだけ短くし、導波管損失を最小にしなければならないが、ミキサーブロックの RF 入力部はホーンとの接続のためフランジ面(φ16mm)があり、また IF 出力部は同軸コネクタが組み込まれるため、導波管長は長くなる。更に従来の金属導波管の単位長さあたりの損失はテラヘルツ帯で大きく 2SB 受信機の雑音温度は大きく上昇する。導波管の損失は導体のジュール熱損失であるため、ギャップ周波数を 1.2 THz にもつ超伝導窒化ニオブチタン $Nb_{1-x}Ti_xN$ (以下 NbTiN と表記)を適用することで超低損失な導波管回路が期待できる。これまでに超伝導導波管の低損失性は理論的に示されているものの考察のみで、実際に作製・測定はなされていない。まず E 面(導波管の狭い面と平行)カットで 2 分割した銅導波管(0.152 mm×0.304 mm×25 mm)上に緩衝層として約 10 nm の AlN を堆積し、その上に反応性 DC スパッタ法により、厚さ 1 μm の NbTiN 薄膜を成膜した。作製した導波管の損失を測定した結果、

295K から 4K に冷却したときの改善率は銅導波管の約 1dB に比べ、NbTiN を用いた導波管の損失の改善率は約 4dB と冷却することで大きく改善され、超伝導導波管の動作を実証することができた(図 4 左)。しかし 4 K での損失は期待値(lossless)より大きく、逆に常温では NbTiN 薄膜の抵抗率を用いた計算値(約 14.6dB@870 GHz)より小さく、これは導波管内部全体が NbTiN 薄膜で十分に覆われていない可能性を示唆している。導波管側面を X 線回折で解析したところ、NbTiN 薄膜の付着はスパッタ方向に依存し導波管長辺面には付着していないことが分かった。これらの結果は導波管を H 面(導波管の広い面と平行、図 4 右に E 面導波管と H 面導波管のカット面を示す)カットにすることで NbTiN の付着面積を E 面導波管より増やし、更なる低損失化が可能となることを示している。

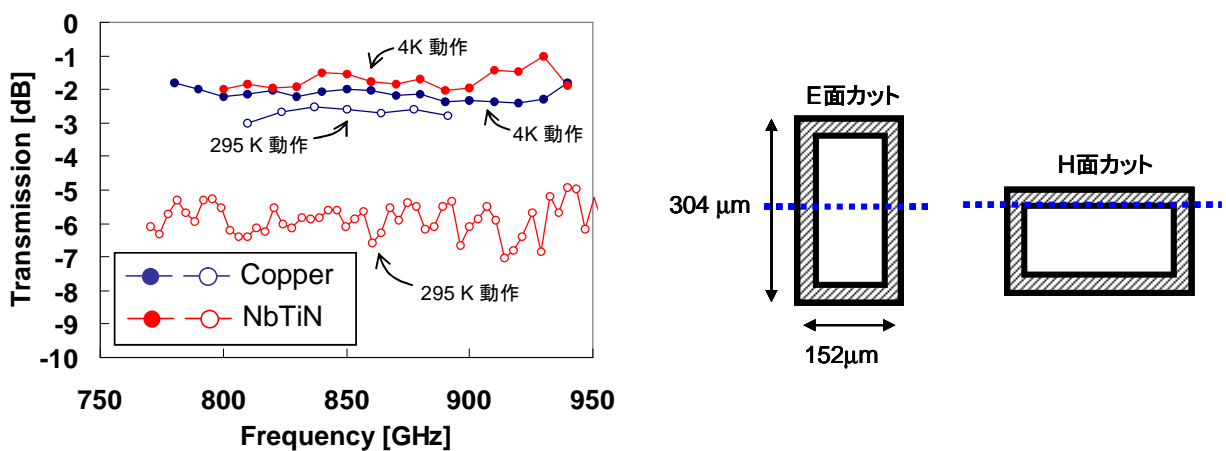


図 4 左図:超伝導導波管(赤線)と銅導波管(青線)の通過特性、
右図:E 面導波管と H 面導波管のカット面(青点線)

2-3. H 面カット導波管によるカップラー

RF90度ハイブリッドカップラーとしてALMAで採用されているブランチラインカップラーはE面カットで作製され、H面カットでは作製できない。またブランチ幅が0.1管内波長(Band10の周波数帯で $\sim 45\mu\text{m}$)であり、テラヘルツ帯では構造が小さく加工が困難となる(図5左)。そこでH面で加工でき、更に構造が簡便なショートスロットハイブリッドカップラー(SSHC)を提案した(図5右)。広帯域なSSHCは現在までに10 GHz帯までに開発がなされているがミリ波テラヘルツ波領域では開発されていない。そこで加工の容易さと広帯域特性に重点をおき、テラヘルツ用SSHCを開発した。10GHz帯のSSHCは曲線テーパを用いて導波管入力部と結合部の整合をとり広帯域特性を得ている[Hino 2000]。本研究ではテラヘルツ帯の加工精度の観点から直線テーパを用いて整合をとり広帯域な設計を行った。まずスケールモデルとして100 GHz帯で作製したカップラーの基本性能を測定した結果、出力ポートの強度不平衡が1.5 dB以内、位相不平衡 5度以内が得られた。テラヘルツ帯2SBミキサではこの設計値が適用できることを確認した。

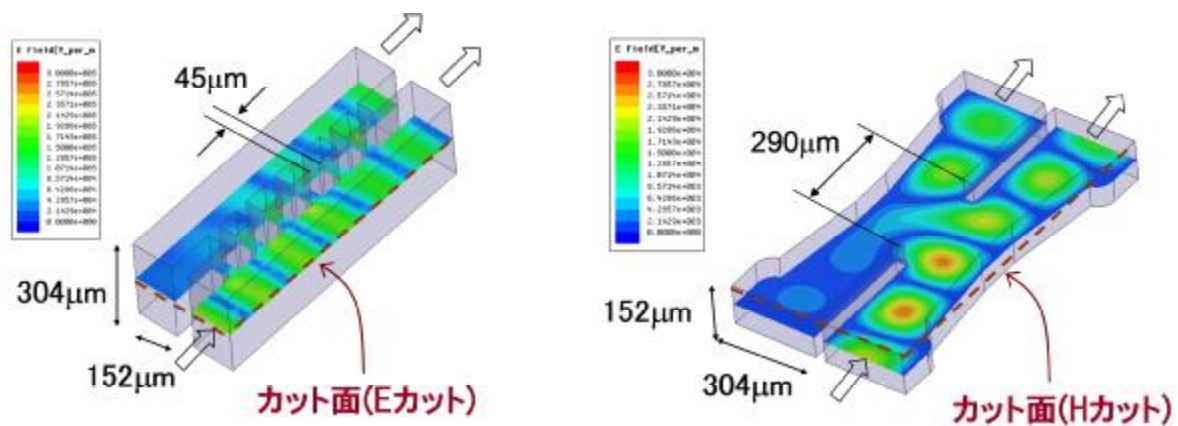


図5 左図:ブランチラインカップラー、右図:ショートスロットハイブリッドカップラーの電界分布。
寸法は Band 10 の標準導波管サイズ(152 μm \times 304 μm)と結合部の長さを示す。

2-4. 性能が揃う SIS ミキサー開発のための SIS ミキサーの詳細な設計方法の確立

天文学の要請から SIS ミキサーには広帯域動作が求められており、これまでに SIS 接合の臨界電流密度 J_c が $10\text{kA}/\text{cm}^2$ において比帯域 20% の低雑音性が実証されている [Uzawa 2013], [Kojima 2010]。しかし、この電流密度の制約から設計マージンが狭く、帯域内で低雑音動作をかつろうじて満たすに留まっている。2SB ミキサーは 292 個の大量の SIS ミキサーが必要となり、その実現には SIS ミキサーの中心周波数を決める同調回路の詳細な設計手法の確立が求められる。

SIS 接合は $10\text{kA}/\text{cm}^2$ のような高い臨界電流密度を得るため絶縁層は非常に薄く、Nb/ AlO_x /Nb 接合を用いた場合、その静電容量は約 $90\text{fF}/\mu\text{m}^2$ で接合容量によって信号の大部分が短絡し効率的なミキシングができない。そこで伝送線路による同調回路を形成し、誘導性負荷により接合容量を除去している。同調回路の等価回路を図 6 下に示す。Band 4 などのミリ波帯では全 Nb ミキサーが使用されているが、Nb のギャップ周波数は 0.7THz であるため、Band 10 においては約 1.2THz にギャップ周波数がある NbTiN を用いた NbTiN/ SiO_2 /Al マイクロストリップラインを伝送線路として使用している。この超伝導マイクロストリップラインをモデリングするためには、超伝導体の表面インピーダンスが必要となるが、これには Mattis-Bardeen 理論に基づいた複素導電率から算出していた。また接合の物理サイズを考慮に入れた同調回路は解析的に解くことが困難である。そこでテラヘルツ時間領域分光法により測定した NbTiN 薄膜の複素導電率を用いて表面インピーダンスを求め、更に電磁界シミュレーターにより導出した表面インピーダンスを取り入れた電磁界モデルを立てることで、同調回路の設計精度を高めた。同調回路の電磁界モデルを図 6 右上に示す。このモデルを用いた同調回路の解析結果と 73 台の Band10 カートリッジ受信機の雑音温度はよく一致しており、かつ 146 個の SIS ミキサーは低雑音動作していることを確認した。これは当設計手法が妥当であることを示しており、292 個の SIS ミキサーを要する 2SB ミキサーにおいても、SIS ミキサーは用意可能であると言える。

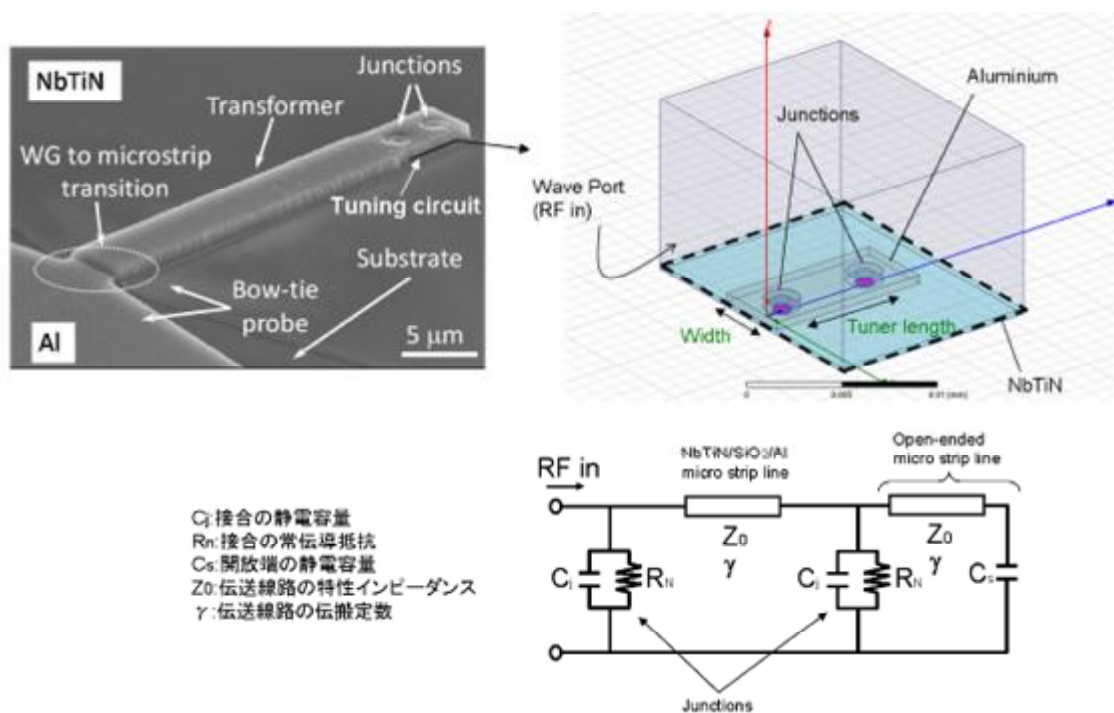


図 6 左上:Band 10 SIS ミキサー素子の導波管-マイクロストリップ変換、インピーダンス変換、同調回路部の写真。右上:同調回路の電磁界モデル。下:同調回路の等価回路。

3. まとめ

1) Band4 2SB ミキサーを用いたスケールモデル実験により、素子の設置条件でチョークフィルタの高次モードが帯域内に存在する条件を電磁界解析で発見し、これが SIS ミキサーの給電点のインピーダンスに飛びを発生させることを確認した。また SIS ミキサーの雑音特性に劣化が生じることを実験的にも確認した。これに対して、SIS ミキサー素子が筐体と接触した場合にも性能劣化しないよう再設計し、ミスアライメントに強い設計が可能であることを示した。テラヘルツ帯においても、同様の設計を施すことでミスアライメントが生じても広帯域に動作する SIS ミキサーを開発が可能となる。

2) 先行研究では理論的考察のみであった超伝導導波管を実際に作製し、その低損失性を世界に先駆けて実証した。また反応性 DC スパッタで作製する超伝導導波管は H 面カットが優位であることが分かった。

更に H 面カットで作製できる RF90 度ハイブリッドにショートスロットハイブリッドカップラーを提案し、100GHz 帯において動作を実証した。この設計値をテラヘルツに適用し、また超伝導導波管を用いることで低雑音な 2SB ミキサーが実現する見通しを得た。

3) Band 10 の SIS 素子の同調回路を、NbTiN の表面インピーダンスの実測値と電磁界シミュレーターを用いてモデリングし、従来にない極めて高い精度の設計方法を確立した。解析結果はカートリッジ受信機の雑音温度の周波数特性とよく一致しており、当設計手法の妥当性を確認した。これにより大量の SIS ミキサーを必要とする 2SB ミキサーにおいても、SIS ミキサーが準備可能である。

以上の成果によりテラヘルツ 2SB ミキサーの要素技術は確立され、低雑音動作の実現に向け明るい見通しを得た。

審査結果要旨

世界最大の電波望遠鏡 **ALMA** (アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計) は今年、本格的な観測に入ろうとしている。**ALMA** の観測周波数は **0.084-0.950 THz** と広範囲にわたっている。最高周波数帯であるバンド **10 (0.787-0.950 THz)** での観測は **0.01** 秒角という高空間分解能を可能とするものであり、未だ確認されていない地球型惑星、宇宙最古の原始銀河の検出等多くの天文学的成果が期待される。

現在バンド **10** に用いられている観測方法は **DSB** (両側波帯) 方式といわれるもので、超伝導 (**SIS**) ミクサの **2** つの **IF** (中間周波) 出力の **USB** (上側波帯) と **LSB** (下側波帯) の信号を分離せずに受信するものである。当方式は大気雑音の増加を招き、大気変動に弱いという弱点がある。本研究は当周波数帯では実現が困難であった **2** つの **IF** を分離して受信する **2SB** (両側波帯分離) ミクサの要素技術構築を目的として実施したものである。

2SB ミクサには利得位相の揃った **2** つの **DSB** ミクサ、**RF 90°** ハイブリッド導波管回路、**IF** 回路が必要であり、テラヘルツ帯では **SIS** 素子の設計精度向上、低損失かつ加工が容易で簡便な構造の導波管 (**152 μm × 304 μm**) 回路の実現が課題となっていた。

本研究では、**SIS** 素子については同調回路の設計精度を上げるために、従来理論式により決定していた信号線材料である超伝導物質 **Nb_{1-x}Ti_xN** の複素導電率を実測し、これを素子設計に反映することでミクサ性能の均質化に成功した。さらに **SIS** 素子を実装する導波管マウントについては不要な電波伝搬モードを発生する可能性があることをつきとめ、それらの発生しない条件をシミュレーションで明らかにし、実験で確認した。

また導波管回路には通常オーミックな損失が存在し、雑音温度を上昇させる。本研究では超伝導の低損失性に着目し導波管の低損失化を図った。先行研究では超伝導導波管の理論的提案はなされてはいたが実証例はなく、本研究でその有効性を世界で初めて実証した。さらに超伝導導波管の低損失性を活かし、加工の容易な構造で実現できる導波管回路として **H** 面分割型の **90°** ハイブリッドの開発にも成功した。

以上のように本研究はテラヘルツ領域における **2SB** 方式の **SIS** ミクサを実現するための要素技術を構築したことは傑出した成果であり、高く評価できる。

これらの成果はこれからの電波天文学ばかりでなく分子分光、プラズマ診断、リモートセンシング、通信等幅広い応用が期待される。

本委員会は本論文を学位論文として十分な内容を有しているものとして判断した。