

## 短ミリ波帯低雑音受信器の開発

小川 英夫\*・福井 康雄\*

天体観測装置の重要な役割は、できるかぎり微弱な信号を検出することにある。電波天文学の分野では、地球大気も含めた観測システム自体で発生する雑音を抑制することが、微弱信号検出のための最も有効な方法である。近年進歩の著しい短ミリ波帯（周波数 80 GHz~300 GHz）の場合には、受信器前置部の雑音（熱雑音と散射雑音）に加えて、地球中性大気の熱雑音が主に効いている。ごく最近実用段階に入ってきた超伝導型ミクサーを用いた受信器の雑音は、量子限界 ( $T \sim h\nu/k$ ) に迫りつつあり、受信器雑音が大气雑音を下回るのも夢ではない。このような超低雑音化は、将来の宇宙空間からの電波観測の必要性を強く刺激するものであり、星間分子・原子の分光観測の新しいエポックを期待させる。

本稿では、これまで諸外国に遅れをとってきた日本における低雑音受信器の開発状況を、名大理学部での最近の成果に焦点をあてて紹介したい。名大では、日本では唯一、本格的な 15 K 冷却低雑音受信器が開発され、4 m 短ミリ波望遠鏡に搭載して星間分子スペクトル観測に威力を発揮している。

### 短ミリ波帯受信器の雑音

よい低雑音増幅器のない短ミリ波帯では、図1のように、初段にミクサーを用いるヘテロダイン受信器が使われる。受信器雑音は、等価雑音温度として次の式で表される。

$$T_{rec} = T_{mix} + T_{IF} \times L_{mix}$$

(受信器雑音温度) = (ミクサー雑音温度) + (中間周波増幅器雑音温度) × (ミクサー変換損失)

中間周波増幅器は非常に低雑音のものが 1~2 GHz 帯では実現されているので、ミクサーの性能をよくすることがシステム雑音を減らすためには重要である。観測データの雑音ゆらぎは、次の式のように、受信器雑音温度に

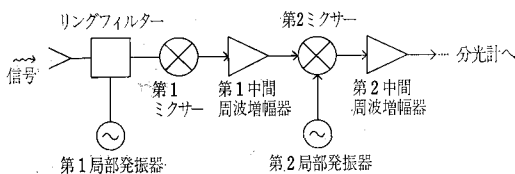


図1 ヘテロダイン受信器の構成

大気等の影響も加えたシステム雑音温度に比例し、積分時間の平方根に反比例する。

$$\Delta T_{rms} \propto T_{sys} / \sqrt{\tau}$$

(雑音温度ゆらぎ) (システム雑音温度) (積分時間)

したがって、所期のゆらぎを得るために要する積分時間は、受信器雑音温度の自乗に比例することになる。

ここ 15 年の間に、世界の最先端は常温半導体ミクサー期、15 K 冷却半導体ミクサー期を経て、超伝導ミクサーへと展開してきた (表1)。1970 年頃比べると、現代の受信器雑音温度は、約 10 分の 1 に下げられている。

表1 電波天文用短ミリ波受信器の変遷

年代	ミクサーのタイプ	受信器雑音温度 (DSB)
1965 年~	常温半導体ミクサー	~1000 K
1974 年~	15 K 冷却半導体ミクサー	1000~100 K
1982 年~	超伝導 (SIS) ミクサー	100~ K

これは、積分時間が 100 分の 1 に短縮されたことを意味する。ミクサーとしての性能の良し悪しは、素子の電流電圧特性の非線型性の度合に關係する。半導体ミクサーの場合は、半導体と金属との接合部に形成されるショットキー障壁によって非線型性が生まれる。一方、超伝導ミクサーは量子効果が顕わになる極低温でのトンネル効果を利用しているために、半導体ミクサー以上の強い非線形が現われる。これが、超伝導ミクサーがより高感度の受信器として期待されてきた由縁である。現在実用化されている超伝導ミクサーは、薄い (数 10 Å) 絶縁膜を電子が通るトンネル効果を利用しており、SIS\*\* 素子と呼ばれている。

このような世界的な動向に対して、日本では 1970 年頃電信電話公社の電気通信研究所で通信への応用を目的とした常温半導体ミクサーの開発研究が行なわれた。当時の受信器雑音温度は 3000 K 程度 (90 GHz 帯) であり、東京天文台で天文観測に用いられた。しかし、1970 年代半ばのミリ波から光通信への方向変換に伴って電々公社でのミクサー開発は停止し、天文研究者が自らの手で開発を手がける必要に迫られた。その後、1983 年に至るまで、日本での短ミリ波帯ミクサーの開発は残念ながら順調にすすまず、世界の第一線の電波天文台の活躍を悔きりして見る状況であった。

\* 名大理 Hideo Ogawa and Yasuo Fukui: Development of Low-Noise Receivers at Shorter-Millimeter Wavelengths

\*\* Superconductor-insulator-superconductor の頭文字

開発の準備

名大理学部では、1981年に4m短ミリ波望遠鏡（天文月報 1984年10月号 河鱈他参照）を作る計画をたて、同時に搭載用受信器の開発に着手した。当時既にSISミキサが有望視されていたので、時代遅れになる恐れのある半導体ミキサで開発を始めるか否かは一考を要した。私たちは、半導体ミキサを選んだ。その理由は、一つには、4m鏡の観測開始に間に合わせるためには、SISミキサでは時間がかかりすぎると予想されたためであり、また、半導体ミキサ作りで培われた経験は必ずSISミキサの開発にも生かせるであろうと予想したからである。実際、1985年の時点でSISミキサ受信器を実用化したグループは例外なくよい15K冷却半導体ミキサを製確した実績を持っている。これらのグループは、コロンビア大学、ベル研、カルテック、IRAM（ヨーロッパミリ波天文台）などである。1981年の時点では、日本の半導体ミキサ作りの技術は電々公社電気通信研究所で開発されたものであった。この技術は常温ミキサのためのものであり、15K冷却ミキサに適用するには色々問題があったため、自前の開発が必要であった。

半導体ミキサの構造と製作プロセス

短ミリ波帯のミキサ作りの難しい点は、マイクロンオーダーの微小な形状が性能に決定的な影響を及ぼす点にある。ミキサの構造を概念的に図2に示した。先端を1マイクロン以下に尖らせた針（ウィスカー）をGaAs半導体に圧着した接合部分がショットキー障壁を形成し、検波特性を持つ。電波望遠鏡で集められた電波は、導波管の中に導かれ、この接合部に照射されて検波される。接合部の構造的な安定性が、ミキサの安定性を支配する。この安定性は、機械的な衝撃だけでなく、温度サイクル（300K ⇄ 15K）に対するものが問題となる。いくつかの因子が関連するが、例えばウィスカーの先端の形状と圧着の際の圧力などが重要である。圧力が強すぎるとウィスカーの先端がすべって接合がとれてしまうし、一方、圧力が弱すぎても接合はずれやすい。先端が尖りすぎ

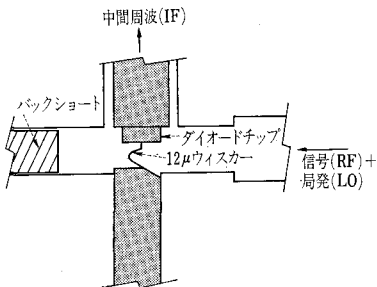


図2 半導体ミキサの構造

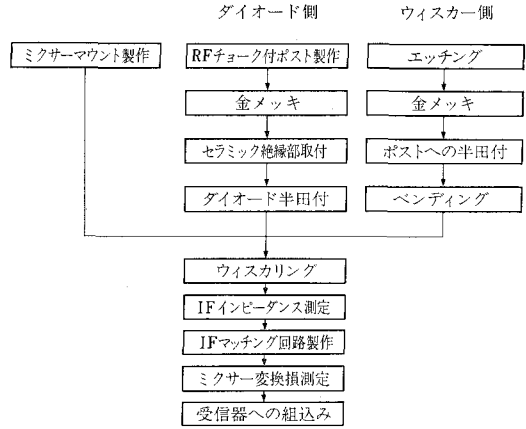


図3 半導体ミキサ製作プロセス

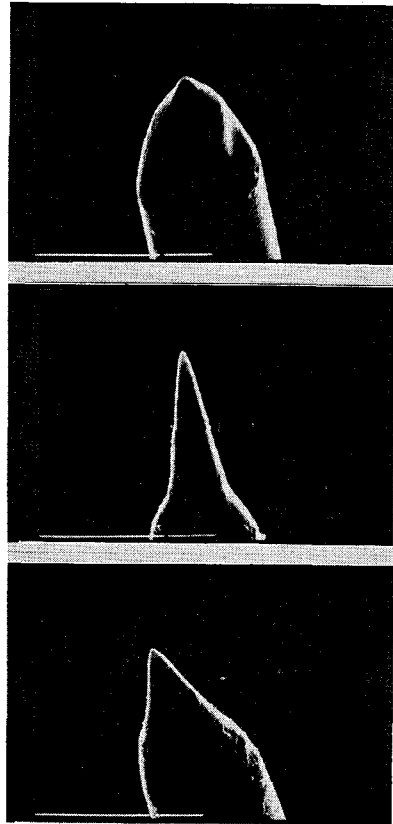


図4 エッチングしたウィスカーの電子顕微鏡 (SEM) 写真。根本のリン青銅の直径は12マイクロンである。  
(上: 太すぎ 中: とがりすぎ 下: 最適)

ていると圧着の際、曲がりやすくなるし、尖り方が足りないと電気性能が悪くなる。構造は単純だが、その詳細は実に制御しにくい。

図3におおよその制作プロセスを示した。半導体側は、ポストに200マイクロン角のGaAs結晶が半田付け

してある。ウィスカー側は、電界エッチングで尖らせた直径 12 ミクロンのリン青銅の針金である。ウィスカーの先端は、1 本ずつ電子顕微鏡で検査し、よいものを用いる。図 4 によい例と悪い例を示した。よいものについては、適当な弾力をもたせるためにポストに半田付した後、曲げ整形を行う。最後に、両ポストをミクサマウントに上下から挿入し接合させる。これらのプロセスは、全て顕微鏡下でマイクロマニピュレータを用いて行なう細かい作業である。出来上がったミクサは、15 K クライオスタットにくみこんで、ヘリウムガス閉サイクル冷却器で冷却する。

名大での開発

開発はまず、①専用ジグの完備、②精密な金属工作技術の確立、③部品の精度の徹底した管理、を目標としてスタートした。図 3 に示した各工程に各々専用ジグを用いて流れ作業化し、経験の少ない学生でも比較的楽に扱えるようにした。ジグ類の使い勝手の良し悪しは、作業が細かいだけに本質的に重要である。また、実験の過程でミクサの構造の改良が必要になることは必至なので、名大理学部金属工作室に依頼してこの種の精密な機械加工に初めてトライしてもらった。その結果は良好で、あまり上等ではない工作機械（施盤、フライス）を上手に使いこなしてよい精度の加工がスピーディに行なえるようになった。

一方、ミクサマウントは従来のスタイルを止めて、分割数を多くしたコンパクトなものを設計した。その特徴はウィスカーと半導体の接合部が外側に露出できることである（図 5）。この設計の採用によって、最終的な接合部の調整が確実にできるようになった。他方ウィスカー先端部の電解エッチングは、経験の蓄積を要するプロセスであり、電解液の組成、電流量の多少と尖り具合の関係などを試行錯誤の後に理解し、1 年あまりで 60% 位の分止りでよいウィスカーを得ることができるようになった。当初はウィスカリングの仕方が不十分であったために冷却する途中で接合がとれてしまうというトラブ

RF チョーク（第一中間周波取出し）

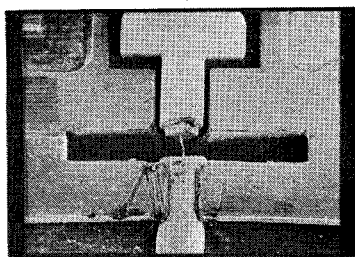
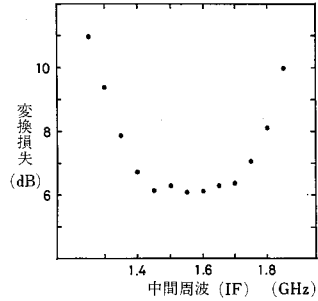
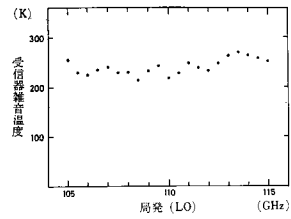


図 5 ミクサの拡大写真



(a)



(b)

図 6 (a) ミクサーの変換損と (b) 受信器雑音温度(DSB). 共に 250 MHz 帯域で測定したものである。

ルに悩まされた。やがて、わずかな半導体面の傾きやウィスカー先端の状態の違いがミクサの冷却時の安定性に効いていることがわかって、一層の注意を払うようになり、1983 年 3 月によく 1 号機の開発に成功した。この 1 号機は、直ちに 4 m 鏡に搭載され、観測の能率が 1 桁以上向上した。図 6 にこのミクサの雑音温度  $T_R$  と変換損失を示した。 $T_R$  (DSB) は 200~250 K の範囲にあり、世界の代表的な冷却半導体ミクサ受信器と比べて、遜色のない性能が達成されている。この後も、2 号機、3 号機の開発をすすめ、ミクサマウントの構造などに種々の改良を加えて、経験の蓄積を計っている。

SIS ミクサの開発

半導体ミクサで培われた技術を生かして、目下、私たちはより低雑音の SIS ミクサの開発に着手している。SIS ミクサによれば、 $T_R$  (DSB)=50~100 K が実現できる見込みであり、更に大きな飛躍が可能になる。この開発は、山形大学工学部の奥山克郎氏との共同研究としてすすめられており、1985 年中に 1 号機を実現することを目指している。奥山氏は IRAM において鉛を用いた SIS 素子の製作実験を行ない、大変よい結果が得られている。図 7 に、測定された I~V 特性などを示した。この方法で作られた SIS 接合を用いた受信器は、現時点で 150 GHz 帯で最も低雑音のものである。

私たちの SIS 接合製作法の特徴は、物理的なマスクを用いて金属膜の蒸着を行なう点にある。他の方法とし

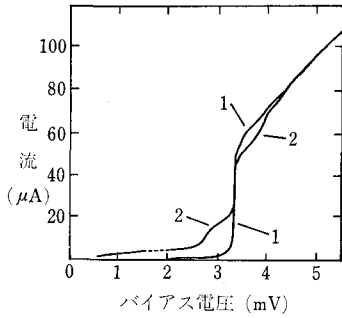


図 7 SIS 素子の電圧電流特性  
(1: 局発 (LO) をかけない時 2: かけた時)

て、光レジストを塗布して露光・現像する化学的プロセスもあるが、不純物の混入などの問題がある。物理的マスクによる方法は、簡潔であり、かつ主要な装備が真空蒸着装置のみで、全体として安価に素子づくりができる。

また、金属材料としては、鉛ビスマス合金 (PbBi) を用いる予定である。この合金の取り扱いにくい点として、室温と 4K との間の温度サイクルに対してやや不安定で、ひげ結晶 (ヒルロック) と呼ばれる構造が成長し

て素子を破壊してしまうことがあげられる。私たちは、PbBi の蒸着の際、蒸気の一部をイオン化することによって、PbBi の基板に対する付着度を高めてグレインサイズを小さくし、ひげ結晶の成長を抑えることを計画している。

最近 4 年間の名大理学部での開発研究によって、日本でも本格的な短ミリ波帯ミキサが実用段階に入った。引き続き開発が始められた SIS ミキサが 1、2 年内に実現されれば、日本での超低雑音分子分光観測で世界をリードすることも不可能ではない。

ここに述べてある受信器系の開発には、名大大学院の諏訪いずみ、水野亮の両氏の貢献が大である。

ミキサマウント等の微細加工に関しては、名古屋大学理学部金属工作室、15K クライオスタットに関しては、同物理金属工作室の方々によって製作されたものであり、ここで謝意を表する。

本研究は、文部省科学研究費 (課題番号 58420004, 58840004, 59420002) の援助のもとに行なわれた。

天体観測雑誌

# 天文ガイド

7月号 定価420円<sup>80</sup> 6月5日発売

オーストラリアのアリススプリングスからのレポート

## 大型望遠鏡を気球につんで

オーストラリア、そのほかいくつかを紹介

## ハレー彗星観測ツアーの企画

足踏式の大変便利で使いやすい

## 電動鏡筒開閉式シャッターの自作

30cm級から小口径までいろいろ紹介します

## 台湾の自作望遠鏡

- 新しい望遠鏡光学系 ● 7月の星空
- 天文学とコンピュータ…など情報満載

いよいよ夏空。ハレー彗星が大型望遠鏡で明るく見える日が近づいてきました。観測準備はもう整いましたか？ 万全の準備で、やってくるハレー彗星をむかえましょう。

# 天文年鑑1985

- 携帯に便利なハンディー・B 6判 定価500円

# ワイド版天文年鑑1985

- 大きく見やすいワイド・B 5判 定価1000円

# 切りぬく本 万能星座早見'85'86年版

- 企画・構成 / 藤井旭 定価690円

# 切りとる本 天体観測野帖'84秋~'86夏

- 企画・構成 / 藤井旭 定価690円

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5  
電03(292)1221 振替東京7-128