ミリ波・サブミリ波検出器

藤 澤 和 男

大阪大学基礎工学部電気工学科 豊中市待兼山町 1-1

(1979年9月6日受理)

Josephson Junction Detectors for Millimeter and Submillimeter Waves

Kazuo FUJISAWA

Department of Electrical Engineering; Faculty of Engineering Science, Osaka Univ.
1-1 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka

(Received September 6, 1979)

Synopsis :

In this report, Josephson junction detectors for millimeter and submillimeter waves are surveyed. Emphasis is placed on heterodyne detectors (mixers). Others are briefly referred to, such as video detectors, bolometers, quasiparticle mixers and parametric amplifiers. Also, three kinds of Josephson junctions for detector use are mentioned and brief comments are given on them. These are tunnel junctions, thin film microbridges and point contacts.

Thermally cyclable oxide barrier tunnel junctions have been obtained and used as low noise quasiparticle mixers at 115 GHz. They have lower noise temperatures compared to Josephson effect mixers, but the receiver noise temperatures are not lowered owing to their lower conversion efficiencies. Thin film microbridges suffer from low junction resistances and also from heating effects caused by d.c. bias supply and r.f. incident power. There seems to exist many problems to be overcome in order to make good submillimeter wave detectors by tunnel junctions or microbridges.

Point contacts are now widely used as sensitive detectors for millimeter and submillimeter waves. Although there exist difficulties for making rugged and thermally cyclable point contacts, the techniques for making them have made considerable progress, and a new construction of detector mount has appeared, which brought a low noise mixer at 115 GHz thermally cyclable.

It is shown that the sensitivity of video detectors decreases as proportional to the inverse square of frequency. So, for submillimeter waves, video detectors are inferior to superconducting bolometers.

Recent progress in heterodyne detectors (fundamental and harmonic mixers) are touched on. They are superior to Schottky diode mixers in that they have much smaller NEP's and much higher conversion efficiencies (especially in harmonic mixers), and also in that they operate with much smaller LO power. Experimental curves of IF output power v.s. bias voltage are given for harmonic mixers with harmonic number $N=7$ and $N=10$. It is noted that harmonic mixers with even harmonic number are preferable, because they can operate at zero bias voltage. Among them, low even numbers 2 or 4 are recommended in regards

to good conversion efficiency.

By using Josephson junctions, a peculiar parametric operation is possible, namely doubly degenerate mode. This mode operates under zero d.c. bias by choosing pump frequency as $2\omega_p = \omega_s + \omega_i$, $\omega_p \sim \omega_s \sim \omega_i$. Zero bias operation allows the adoption of microbridge arrays. A parametric amplifier with 160 microbridge arrays was built at 33 GHz, and showed amplifier gain of 15 dB and noise temperature of 20 K.

1. まえがき

最近、電波天文やプラズマ計測の分野でミリ波・サブミリ波の高感度検出が必要とされているが、ジョゼフソン接合はそのような用途に最も適した素子の一つと言える。ジョゼフソン接合は、現在検出器として用いられているショットキーダイオードに比べてより高感度・低雑音であり、またミキサとした時の変換効率が高い。特にハーモニクミキサにした場合に有利である。なお、最近超伝導金属を用いたスーパーショットキーダイオードが開発され、また SIS のトンネル素子の準粒子電流の非線形性を利用する準粒子ミキサが研究され、共にジョゼフソン接合同程度の感度と低雑音特性を持つことが示されたが、いずれも変換効率の点でジョゼフソン接合より劣っており、また動作周波数も現在の所 100 GHz 帯までである。そこで依然としてジョゼフソン接合検出器に大きな期待が掛けられている。

本稿ではビデオ検出器とヘテロダイン検出器（ミキサ）を主に説明し、その他にボロメータと準粒子ミキサおよびパラメトリック増幅器について簡単に言及する。

2. 交流ジョゼフソン効果

ジョゼフソン接合による電磁波検出の基本原則となるのは交流ジョゼフソン効果であるので、これを簡単に説明する。

ジョゼフソン接合には 0 電圧において次式のような超伝導電流が流れる¹⁾²⁾。

$$I = I_c \sin \theta \quad (1)$$

ここで、 I_c は最大の 0 電圧電流で、臨界電流と呼ばれる。 θ は接合を形成する二つの超伝導体内の超伝導電子対の波動関数の位相差である。もし接合に電圧 V が印加されると、 θ は次式のような時間変化をする。

$$\hbar d\theta/dt = 2eV \quad (2)$$

そこで、直流電圧 V_0 が加えられている場合には、 $\theta = 2eV_0 t / \hbar + \theta_0 = \omega_0 t + \theta_0$ となり、角周波数 $\omega_0 = 2eV_0$

$/\hbar$ の交流の超伝導電流が流れる。ここで、 $f_0 = \omega_0 / 2\pi = 483.6 \text{ GHz/mV}$ はジョゼフソン周波数と呼ばれる。いま、 V_0 の他に交流電圧 $V_{rf} \cdot \cos(\omega_{rf} t)$ を印加すれば、 $\theta = \omega_0 t + (2eV_{rf}/\hbar\omega_{rf}) \cdot \sin(\omega_{rf} t) + \theta_0$ が得られ、式(1)に代入して次式が得られる。

$$I(t) = I_c \sin[\omega_0 t + (2eV_{rf}/\hbar\omega_{rf}) \sin \omega_{rf} t + \theta_0] \quad (3)$$

これをフーリエ・ベッセル級数に展開して次式を得る。

$$I(t) = I_c \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(2eV_{rf}/\hbar\omega_{rf}) \cos(\omega_0 + n\omega_{rf}) t \quad (4)$$

ここで、 $\theta_0 = \pi/2$ とおいている。上式において、 $\omega_0 = n\omega_{rf}$ 、すなわち、 $V_0 = n\omega_{rf}\hbar/2e$ を満足するバイアス電圧の所で直流成分を生ずる。そして、 $I-V$ 特性曲線上に図 1 に示すような定電圧ステップを生ずる。そのステップの大きさは次式で与えられる。

$$I_0 = I_c J_n(2eV_{rf}/\hbar\omega_{rf}) \quad (5)$$

ここで厳密に言えば、上式はスパイク状の電流の増加を $I-V$ 特性曲線上に生ずるものであるが、実際に観測されるのは図 1 のような定電圧ステップである。その理由は、次節で述べるように実際のジョゼフソン接合はここで述べたような電圧励振でなくて定電流源で励振されるからである。

図 1 マイクロ波入射時のポイントコンタクトの $I-V$ 特性

3. 実際のジョゼフソン接合とその等価回路

電磁波検出器用のジョゼフソン接合としては、トンネル接合とマイクロブリッジおよびポイントコンタクトの3種類がある。トンネル接合はPb合金やNbNなどの超伝導薄膜の間に、厚さが1～数十nmの酸化膜をサンドイッチ状に挟んで作られる。ミリ波・サブミリ波用のものは接合面積を $1\mu\text{m}^2$ 位にして接合容量 C を小さくする必要がある。そして電流密度として $J_c \sim 10^5 \text{A}/\text{cm}^2$ 程度が要求される。トンネル接合のシャ断周波数は $f_{\text{max}} = (2\pi RC)^{-1}$ で与えられる。DolanらはIn, AuおよびBiを含むPb合金の薄膜トンネル接合で、接合面積 $0.4\mu\text{m}^2$, $R \sim 50\Omega$, $J_c \sim 0.8 \times 10^4 \text{A}/\text{cm}^2$ の素子を作ったが、これは $f_{\text{max}} \sim 115 \text{GHz}$ を与える³⁾。この素子は室温と液体ヘリウム温度との間の100回以上の温度サイクルに耐え、室温で数ヶ月保存出来る程安定である。そして実際に115GHzにおいて準粒子ミキサとして使用された。しかし、このようなトンネル素子がサブミリ波帯まで用いられるようになるかどうかは今後の課題である。

マイクロブリッジはNbなどの蒸着膜に幅と長さが共に $1\mu\text{m}$ 位のくびれを作り弱結合を形成したものである。最近では電子ビーム露光でパターンを作り、イオンビームエッチングで加工する方法が用いられるようになった。CroizatらはSiの基板上に蒸着でつけたNb膜($T_c = 8.5 \text{K}$)をこのような方法で加工して $0.6 \times 0.6\mu\text{m}$ のくびれを作り、その部分にアルゴンイオンを打込んで T_c を6.5Kに下げた弱結合を作った。そして180GHzまでのジョゼフソン振動電流が存在していることを確かめた⁴⁾。このようなマイクロブリッジがサブミリ波帯で有用な検出器となるかどうかは将来の問題としても、その見通しは必ずしも楽観を許さないものがある。その理由の一つは、接合抵抗が小さいので電磁波との結合が弱いことである。この欠点は多数個を直列に接続するアレー構造にすることにより改善される余地がある。もう一つの理由として、マイクロブリッジがバイアス電力および高周波電力による加熱効果に弱いことがあげられる⁵⁾。これは薄膜構造のため、次に述べるポイントコンタクトに比べて熱伝導度が悪く、接合部の温度上昇を起し易いからである。信号波の周波数が高くなる程、高いバイアス電圧で動作させるのでバイアス電力は増加する。従ってマイクロブリッジをサブミリ波帯で使用する場合には、このバイアス電力による加熱効果が重大な障害を与える恐

れがある。

ポイントコンタクトはNbの針電極と平面電極とを接触させて接合を形成したもので、接合抵抗を数十オームと比較的高くできること、接合容量が小さいこと、および加熱効果に強いことなどの長所を持ち、性能的にはミリ波・サブミリ波検出器として最も優れている。ただ、欠点として機械的および熱的に安定な素子が作り難いことがあげられる。しかし、最近はその製作技術も進歩して来たので、サブミリ波帯まで用い得る安定な素子の実現も時間の問題のように思われる。Weitzらはまず 500Ω 以上の高抵抗の接合を作り、これに35Hzで振幅1Vの交流電圧を加えてburn-inのプロセスを行うことにより接合抵抗数十オームの安定な素子を得ている⁶⁾。我々の研究室では直径0.127mmのNb線の先端を化学エッチングで頂角 15° 位、曲率半径 $1\mu\text{m}$ 以内に尖らしたものを針電極として1K Ω 前後の高抵抗の接合を作り、これに数mA～数十mAの過大電流を流してburn-inのプロセスを行い、抵抗を数十オームに下げたものを用いている。このようにして作られた接合のI-V特性を図2に示すが、ギャップ電圧3mVの付近でギャップ構造が明瞭に認められる。このようなギャップ構造がはっきりと認められることがサブミリ波まで用い得る素子の一つの条件である。Weitzらはサブミリ波まで用い得る素子の定量的な条件として、 $S = R/r \geq 2$, $I_c R \geq 2 \text{mV}$ をあげている⁷⁾⁸⁾。トンネル素子の理論から $I_c R = \pi d/2e$ が結論されており、Nbに対しての理論値は2.2mVの数値を

図2 サブミリ波まで高感度なポイントコンタクトのI-V特性の一例

図3 ジョゼフソン接合のRSJモデルと定電流励振源

与える。我々の研究室でもこの二つの条件を満足する素子は比較的容易に作れるようになった。

その他、安定なポイントコンタクトを実現するためにはマウントの新しい構造を研究することも大切である。Taurらは115 GHzのミキサ用に新しい構造のポイントコンタクトを試作した⁹⁾。これは温度サイクルにも耐え、機械的にも丈夫で実用的なものと言える。

さて、これらのジョゼフソン接合はギャップ電圧附近の異状性を除いて、図3のような等価回路で表わされる。これがいわゆるRSJモデルで、抵抗 R は準粒子電流を流すためのものである。この等価回路は図3に示すように定電流源で給電される。RSJモデルはポイントコンタクトに対しては非常に良く合い、マイクロブリッジに対しても相当良く合う。トンネル接合に対しては並列に接合容量 C を接続して考える必要がある。このRSJモデルによる動作解析はごく限られた場合しかできないので、電子回路的なアナログシミュレータ¹⁰⁾¹¹⁾や、アナログ計算機¹²⁾により数値解析が行われている。

さてジョゼフソン接合の高周波動作を論ずる際には、電圧 $I_c R$ に対するジョゼフソン角周波数 $\omega_c = 2e \cdot I_c R / \hbar$ を特性角周波数として、規格化角周波数 $\Omega = \omega / \omega_c$ を定義して議論が進められる。この Ω の物理的意味について以下に説明したいが、そのためにまずジョゼフソン接合が呈する非線形インダクタンスを説明する。式(1)と(2)より、 $V = L(I) dI/dt$ の形の式が得られ、これより非線形インダクタンス L が次式のように導かれる。

$$L(I) = (\hbar/2eI_c) / \cos\theta = (\hbar/2e) / \sqrt{I_c^2 - I^2} \quad (6)$$

そこで図3の接合の等価回路は抵抗 R とリアクタンス ωL との並列回路になり、接合に流入する高周波電流は R とリアクタンス ωL に分流して流れる。

さて

$$\Omega = \omega / \omega_c = \omega L(I) / R \cdot \sqrt{1 - (I/I_c)^2} \quad (7)$$

と書けるから、 Ω は R を流れる準粒子電流とインダクタンスを流れる超伝導電流の比を与えることが分る。そこで、 $\Omega > 1$ に対しては R を流れる準粒子電流が支配的となり、ジョゼフソン効果の影響が小さくなって検出器の感度が低下する。また図3の電流励振モデルは定電圧モデルと実質的にあまり変わらず、解析は楽になる。

以上述べたことから、検出器は $\Omega < 1$ の範囲で動作させることが望ましく、そのためには $I_c R$ 積を出来るだけ大きく取る必要がある。前出のサブミリ波まで用い得る素子の条件として、 $I_c R \geq 2 \text{ mV}$ が出されていることは、このことから容易に理解できる。 $I_c R$ 積を大きくするためには、エネルギーギャップの大きい材料(高い T_c の材料)を用いる必要があり、Nbはこの意味で適当な材料である。表1には各種の超伝導材料とその諸定数を示す。表中の $f_R = 2\Delta/\hbar$ はリーデル周波数と呼ばれ、ギャップエネルギーと等しいエネルギーを持つフォトンの周波数である。従って $f > f_R$ の周波数を持つフォトンとは超伝導電子対と衝突すると電子対をこわして超伝導性を失わせる。表中の f_D はデバイ周波数で、格子のフォノンの周波数である。超伝導電子対が格子フォノンを媒介として形成されていることを考えると、 f_D はジョゼフソン接合の上限周波数に関係ありそうである。しかし現実にはNbのポイントコンタクトで f_D をはるかに越える8THzまで定電圧ステップが観測されている¹³⁾。またNbのポイントコンタクトで31.5 THzの二つのCO₂レーザの周波数混合が成功している¹⁴⁾。この周波数はリーデル周波数の約45倍であり、この実験の物理機構に熱的な効果も関与しているのではないかと疑われているもの

表1 各種超伝導材料の諸定数

材 料	T_c (K)	2Δ (meV)	f_c (GHz)	f_R (GHz)	f_D (GHz)
In	3.405	1.05	400	250	2,300
Sn	3.721	1.15	440	280	3,400
V	5.43	1.6	610	390	8,650
Pb	7.23	2.6	990	630	1,870
Nb	9.25	~3.0	1,140	720	5,850
NbN	16.0	4.83*	1,800	1,140	—
Nb ₃ Sn	~18	5.45*	2,100	1,330	—
Nb ₃ Ge	~21	6.35*	2,400	1,520	—

* $2\Delta = 3.5kT_c$ からの計算値

の、正に驚くべき実験結果である。

4. ビデオ検出器

ジョゼフソン接合に電磁波が入射すると、図1あるいは図4に示すように $I-V$ 特性が変化する。そこで入射波を低周波でオン・オフして矩形波変調をしてやれば、図4に示すように矩形波の出力電圧が得られ、これをロックインアンプで増幅して整流することにより、信号電力に比例する直流の出力電圧が得られる。

さて、接合の両端に現われる出力電圧 δV は、電流の変化分を δI_0 、特性曲線の傾斜を R_D^{-1} として、図4より次のように書ける。 $\delta V = \delta I_0 R_D = \gamma I_{cF} R_D$ 。ここで γ は接合により定まる定数である。入射波電力は $P_{IF} = \frac{1}{2} R_{IF} I_{IF}^2 \approx \frac{1}{2} R I_{IF}^2$ で与えられるから、 δV と P_{IF} の比として sensitivity S が次式のように定義される。

$$S = \delta V / P_{IF} \approx 2\gamma I_c R_D / R \quad (8)$$

$\Omega \gg 1$ に対しては δI_0 として、式(5)のベッセル関数表示を用いて、 $\delta I_0 = I_c [1 - J_0(I_{IF}/I_c \Omega)] \approx I_{IF}^2 / 4 I_c \Omega^2$ の近似式が用いられ、次式が得られる。

$$S \approx R_D / 2 I_c R \Omega^2 \quad (\Omega \gg 1) \quad (9)$$

この結果は $\Omega \leq 1$ の場合にも有効であることが示されている¹⁵⁾。このようにジョゼフソン接合を用いるビデオ検出器の感度が周波数の2乗に逆比例して低下することは一つの大きな欠点で、サブミリ波帯では後述のボロメータよりも感度が悪くなる。

実際の使用例としては、Ulrich が Nb と Sn のポイ

図4 ビデオ検出原理図

ントコンタクトを用い、太陽や月や金星などから来る宇宙電波の連続スペクトルを 300 GHz 付近で観測している¹⁶⁾。

5. ヘテロダイン検出器 (ミキサ)

ジョゼフソン接合ミキサ (J.J. ミキサ) は高感度・低雑音という点で最も重要なデバイスである。J.J. ミキサの特有な方式として、外部の局発源を用いずにバイアス電圧によるジョゼフソン発振を局発源として用いる方式がある¹⁷⁾。これは着想としては大変面白いが、何分ジョゼフソン発振は出力が微弱で、またスペクトルの線幅が 100 MHz 位あり¹⁸⁾¹⁹⁾、高性能の検出器を作ることは無理である。そこで、本稿では外部の局発源を用いるミキサについてのみ述べる。

ジョゼフソン接合に電流振幅 I_{L0} の局発波を加えれば、 $I-V$ 特性は図4に示すように変化する。この時更に微小振幅 I_s の信号波を加えると、局発波による電流の変化分はビート周波数 $\omega_{IF} = \omega_s - N\omega_{L0}$ で振幅変調されることになり、 $V_{IF} = R_D I_s [\partial I / \partial I_{L0}]_0$ のような IF 出力電圧を生ずる。そこで次式のような IF 出力を生ずる。

$$P_{IF} = C_{IF} \cdot (R_D/8) \cdot [\partial I / \partial I_{L0}]_0^2 I_s^2 \quad (10)$$

ここで、 C_{IF} は接合の IF 回路に対する結合係数である。この P_{IF} と有能信号電力の値 $[P_s]_{avail} = R_s I_s^2 / 8$ との比でもってミキサの変換効率 η が定義される。

$$\eta = P_{IF} / [P_s]_{avail} = C_{IF} \cdot (R_D/R_s) \cdot [\partial I / \partial I_{L0}]_0^2 \equiv C_{IF} \alpha^2 R_D / R \quad (11)$$

ここで α^2 は結合パラメータで、 P_{L0} 、 Ω_{L0} 、 R_s/R 、 I_0 などの関数である。アナログ解析の結果によれば、基本波混合 ($N=1$) の場合には、バイアス点を 0 電圧と第一の定電圧ステップとの中間に選び、0 電圧ステップの値がほぼ $\frac{1}{2} I_c$ になるような局発電力を加えた時、 α^2 の最大値が得られる²⁰⁾²¹⁾。

ミキサの雑音は極めて重要な問題である。ジョゼフソン接合から発生する雑音は抵抗の熱雑音と、準粒子トンネル電流および超伝導電子対トンネル電流のショット雑音²²⁾²³⁾が主で、これらが強い非線形性のために複雑に関係してミキサ雑音を発生する。雑音源としての接合は、抵抗 R_D と雑音電流源 I_N の並列回路で表わされ、雑音パラメータ β^2 が次のように定義される²⁴⁾。

$$\beta^2 = \langle I_N^2 \rangle / (4kTB/R) \quad (12)$$

β^2 は接合より発生する雑音電流の二乗平均値が抵抗 R より発生する熱雑音電流の二乗平均値の何倍になっ

いるかを示す量である。そして接合の等価雑音温度 T_N が次式で定義される。

$$T_N = \langle I_N^2 \rangle / (4kBR_D) = \beta^2 \cdot R_D / R \cdot T \quad (13)$$

これを用いてミキサの雑音温度 T_M が次式で与えられる。

$$T_M = C_{IF} T_N / \eta = \beta^2 / \alpha^2 \cdot T \quad (14)$$

そして、受信機全体の等価雑音温度が次式で与えられる。

$$T_R = T_M + T_{IF} / \eta \quad (15)$$

ここで、 T_{IF} は中間周波増幅器の雑音温度である。また、ミキサの感度を表わす量として、雑音等価電力 NEP が用いられる。これはバンド幅 1 Hz について、雑音出力と信号の検出力とが等しくなる時の入力換算信号電力の値である。すなわち $NEP = k T_R$ である。

J.J. ミキサの特長は前にも述べたように、高感度、低雑音および高い変換効率であって、この特長を生か

表 2 J.J. 基本波ミキサ

f_s	T	η	T_M	P_{LO}
(GHz)	(K)		(K)	(nW)
36 ²⁵⁾	1.4	1.35	54	~1
130 ²⁶⁾	4.2	0.3	180	
115 ²⁷⁾	6.0	1.0	120	~3
300 ²⁷⁾	4.2	0.11	223	
450 ²⁸⁾	4.2	0.32*	350~ 1,000	30~ 1,000

* 反射損失を差引いた固有の値

してミリ波・サブミリ波帯で電波天文用のミキサの開発研究が行われている。接合としてはポイントコンタクトが殆んどである。表 2 に基本波ミキサの主なものを示す^{9)25)~28)}。

次に $N > 1$ のハーモニックミキサについて述べる。これには二つの使用目的があって、その一つはサブミリ波レーザの周波数精密測定である。これはジョゼフソン接合の強い非線形性を利用して非常に高次の周波数通倍混合を行い、サブミリ波レーザ周波数をマイクロ波帯あるいはミリ波帯の局発源の周波数と関係づけ、その周波数を知らうとするものである。McDonald らは 9.5 GHz の局発波と 3.8 THz の水蒸気レーザとの間の 401 倍の周波数通倍混合に成功している²⁹⁾。また Blaney らは 1.08 GHz の局発波と 891 GHz の HCN レーザとの間の 825 倍の周波数通倍混合の実験を行っている³⁰⁾。彼等はまた 16.20 GHz の局発波と水蒸気レーザの 2.53 THz の発振線との間に 156 倍の周波数通倍混合の実験を行っている³¹⁾。

ハーモニックミキサのもう一つの使用目的として、

表 3 J.J. ハーモニックミキサ

f_s	N	T	η	T_M	P_{LO}
(GHz)		(K)	(dB)	(K)	(nW)
36 ³²⁾	4	4.2	-3	400	
70 ³³⁾	7	4.2	-11		~60
100 ³⁴⁾	10	4.2	-18		~40
452 ²⁸⁾	6	4.2	-12* ~-13*	3,000 ~5,000	

* 反射損失を差引いた固有の値

図 5 J.J. ハーモニックミキサの IF 出力特性

発振源の得やすいミリ波帯の局発源を用いてサブミリ波の高感度ヘテロダイン検出を行うものがある。ここでは基本波ミキサの場合と同じく、雑音特性や変換効率などが問題となる。ハーモニクミキサの動作については未解明の点が多く残されており、実験例もそれ程多くない。これまでに実験された主なデータを表3に示す。^{28)32)~34)} 同表から分るように、ハーモニクミキサとしては相当変換効率がよいのが特長である。同表の中の二つは我々の研究室のデータであるが³³⁾³⁴⁾、変換効率はショットキーダイオードを用いたものに比べて20 dB程大きかった。この二つの実験結果を図5に示すが、Nが奇数の場合と偶数の場合とで、IF出力最大のバイアス動作点が異なることに気付く。すなわちNが奇数の場合には基本波混合の時と同じく、0電圧と第一の定電圧ステップとの中間にバイアス動作点を選ぶことによりIF出力最大が得られるが、Nが偶数の場合にはバイアス動作点を0電圧の所にとり、0電圧ステップが消滅するまで局発電力を加えた状態でIF出力最大が得られる。バイアス電圧0で動作できることは、バイアス電力0で動作できることであり、非常に好ましい特長である。そこでNを小さな偶数、すなわち2とか4とかに選ぶことは、変換効率もそれ程小さくならず、賢明な選択と言える。

6. その他の検出器

6.1 超伝導ボロメータ

これはジョゼフソン接合の臨界電流 I_c が素子温度の関数であることを利用するもので、Clarkeらは 4×4 mmのサファイヤ板の上にPb/Cu-Al/PbのSNSトンネル接合を作り、サファイヤ板の裏面にBiの蒸着膜をつけて電磁波吸収体としたものを作った³⁵⁾。そして、鉛被覆のナイロン線でサファイヤ板を吊し、リード線の役割を果たすと共に、熱絶縁を良くしている。このボロメータの特長は非常に広帯域な周波数特性を持ち、サブミリ波帯でも十分高感度であることである。 $NEP=1.7 \times 10^{-15}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、時定数=83 msであり、半導体ボロメータの最高感度のものとはほぼ同じ性能を持つが、時定数は相当大きい。

6.2 準粒子ミキサ

これはSISのトンネル素子のギャップ電圧附近での準粒子電流の立上りによるI-V特性の強い非線形性を利用したミキサで、J.J.ミキサよりもむしろ低雑音である。RichardsらはPb-In-Au合金の薄膜素子を用いて36 GHz帯のミキサを作り、 $R=100 \Omega$ の素子

で $\eta \sim 0.16$ 、 $T_M \leq 14$ K (SSB)のデータを得ている³⁶⁾。またDolanらは3節で説明したSISの素子で実験し、115 GHzにおいて $T_M < 100$ Kを得ている³⁾。いずれも同じ周波数帯のJ.J.ミキサよりも低雑音である。しかし変換効率はJ.J.ミキサよりも低いので、式(15)で与えられる受信機の雑音温度 T_R はそれ程低くならない。この準粒子ミキサが真価を発揮できるのは、 $T_{IF} \sim 1$ K位の低雑音のIF増幅器が実現した後のことである。

6.3 パラメトリック増幅器

ジョゼフソン接合は式(6)で与えられる非線形インダクタンスを持つので、これを用いてパラメトリック増幅器を作ることができる。ジョゼフソン接合の特異な性質として、 $L(I) = L(-I)$ の関係が成立するから、0電圧の点で動作させると次式を満足する二重縮退モードの動作が可能になる。

$$2\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad \omega_p \approx \omega_s \approx \omega_i \quad (16)$$

ここで、 ω_p はポンプ周波数、 ω_i はアイドラ周波数である。この4光子動作は、バイアス電圧0で動作できること、および信号波と同程度の周波数のポンプ源を用い得ることの2点で大きな長所を持つ。無バイアスで使用できることは、多数個の素子の直列接続のアレー構造の採用を可能にする。Parrishらはストリップ線路のストリップ導体を厚さ $0.1 \mu\text{m}$ の錫の蒸着膜で作り、その上に80個のくびれを直列に作ったマイクロブリッジアレーを作り実験した。そして、10 GHz帯において増幅利得12 dB、バンド幅1 GHz、増幅器の雑音温度20 K以下のデータを得た³⁷⁾。バラクタダイオードを用いるパラメトリック増幅器に比べてバンド幅が非常に広いことが特長である。更に彼等は同じような構造で160個のマイクロブリッジアレーを作り、33 GHz帯で増幅利得15 dB、バンド幅3.4 GHz、雑音温度20 Kのデータを得た³⁸⁾。くびれの部分の長さは $0.5 \mu\text{m}$ 、幅は $1.2 \mu\text{m}$ 、相互間隔は $2.8 \mu\text{m}$ である。また、Taurらはポイントコンタクトでパラメトリック増幅器を試作し、36 GHz帯で増幅利得11 dB、等価雑音温度50 K以下(推定)のデータを得た³⁹⁾。

7. あとがき

本稿ではJ.J.ミキサを中心にできるだけ広く最近の進歩にふれるようにしたが、限られた紙面と著者の非力もあって述べ足りぬ所も多かった。文献40)以下に解説的な著書と論文のリストをあげているので、足りない所は各自補って頂きたいと思う。

参 考 文 献

- 1) B. D. Josephson : Phys. Lett. 1 (1962) 251
- 2) L. Solymar : "Superconductive Tunneling and Applications," Chapman & Hall, London (1972)
- 3) G. J. Dolan, T. G. Phillips, & D. P. Woody : Appl. Phys. Lett. 34 (1979) 347
- 4) P. Crozat, G. Vernet, & R. Adde : Appl. Phys. Lett. 32 (1978) 506
- 5) W. J. Skocpol, M. R. Beasley, & M. Tinkham : J. Appl. Phys. 45 (1974) 4054
- 6) D. A. Weitz, W. J. Skocpol, & M. Tinkham : Appl. Phys. Lett. 31 (1977) 227
- 7) D. A. Weitz, W. J. Skocpol, & M. Tinkham : Phys. Rev. Lett. 40 (1978) 253
- 8) D. A. Weitz, W. J. Skocpol, & M. Tinkham : J. Appl. Phys. 49 (1978) 4873
- 9) Y. Taur & A. R. Kerr : Appl. Phys. Lett. 32 (1978) 775
- 10) C. A. Hamilton : J. Appl. Phys. 44 (1973) 2371
- 11) J. H. Magerlein : Rev. Sci. Instrum. 49 (1978) 486
- 12) P. H. Russer & H. Bayegan : Proc. IEEE 61 (1973) 46
- 13) D. G. McDonald, V. E. Kose, K. M. Evenson, J. S. Wells, & J. D. Cupp : Appl. Phys. Lett. 15 (1969) 121
- 14) D. G. McDonald, F. R. Petersen, J. D. Cupp, B. L. Danielson, & E. G. Johnson : Appl. Phys. Lett. 24 (1974) 335
- 15) H. Kanter & F. L. Vernon : J. Appl. Phys. 43 (1972) 3174
- 16) B. T. Ulrich : Rev. Phys. Appl. 9 (1974) 111
- 17) G. Vernet, J. C. Henaux, & R. Adde : IEEE Trans. on MTT MTT-25 (1977) 473
- 18) G. Vernet & R. Adde : Appl. Phys. Lett. 19 (1971) 195
- 19) G. Varmazis, R. D. Sandell, A. K. Jain, & J. E. Lukens : Appl. Phys. Lett. 33 (1978) 357
- 20) P. H. Russer : J. Appl. Phys. 43 (1972) 2008
- 21) F. Auracher & T. Van Duzer : Proc. Appl. Superconductivity Conf. (1972)
- 22) A. J. Dahm, A. Denenstein, D. N. Langenberg, W. H. Parker, D. Rogovin, & D. J. Scalapino : Phys. Rev. Lett. 22 (1969) 1416
- 23) M. J. Stephen : Phys. Rev. 182 (1969) 531
- 24) J. H. Claassen, Y. Taur, & P. L. Richards : Appl. Phys. Lett. 25 (1974) 759
- 25) Y. Taur, J. H. Claassen, & P. L. Richards : IEEE Trans. on MTT MTT-22 (1974) 1005
- 26) J. H. Claassen & P. L. Richards : J. Appl. Phys. 49 (1978) 4130
- 27) J. Edrich, D. B. Sullivan, & D. G. McDonald : IEEE Trans. on MTT MTT-25 (1977) 476
- 28) T. G. Blaney : "A Theoretical and Experimental Study of Josephson Frequency Mixers for Heterodyne Reception in The Submillimeter Wavelength Range," NPL S. I. No. 89/0382 (1978)
- 29) D. G. McDonald, A. S. Risley, J. D. Cupp, K. M. Evenson, & J. R. Ashley : Appl. Phys. Lett. 20 (1972) 296
- 30) T. G. Blaney & D. J. E. Knight : J. Phys. D 7 (1974) 1882
- 31) T. G. Blaney, N. R. Cross, & D. J. E. Knight : J. Phys. D 9 (1976) 2175
- 32) Y. Taur, J. H. Claassen, & P. L. Richards : Rev. Phys. Appl. 9 (1974) 263
- 33) 藤家, 藤澤, 信学技報 ED-78-110 (1979)
- 34) 広崎, 喜多, 藤澤 : 26回応物講演会予稿集 (1979) 358
- 35) J. Clarke, G. I. Hoffer, P. L. Richards, & N. Y. Yeh : J. Appl. Phys. 48 (1977) 4865
- 36) P. L. Richards & T. M. Shen : Appl. Phys. Lett. 34 (1979) 345
- 37) P. T. Parrish & R. Y. Chiao : Appl. Phys. Lett. 25 (1974) 627
- 38) R. Y. Chiao & P. T. Parrish : J. Appl. Phys. 47 (1976) 2639
- 39) Y. Taur & P. L. Richards : J. Appl. Phys. 48 (1977) 1321
- 40) R. K. Willardson : "Semiconductors and Semimetals. Vol. 12 Infrared Detectors II," Academic Press (1977)
- 41) 「ジョゼフソン効果 (基礎と応用)」, 電気学会 (1978)
- 42) 太田, 応用物理 46 (1977) 1026