

2-3 テラヘルツ帯超伝導発振器と検出器に関する研究

2-3 Research on Superconductive Oscillators and Detectors at Terahertz Frequency Regions

王 鎮 川上 彰 鵜澤佳徳

WANG Zhen, KAWAKAMI Akira, and UZAWA Yoshinori

要旨

未開拓周波数領域であるテラヘルツ帯発生・検出技術の研究開発は、次世代の超高速通信技術の確立において重要な研究課題である。また近年、地球環境計測や電波天文学などの分野からもこの周波数帯における高効率発振器や高感度検出器の必要性が高まっている。本研究では、テラヘルツ周波数領域での固体発振器と高感度検出器として超伝導ジョセフソンアレー発振器及び低雑音 SIS ミクサの設計、試作及び性能評価を行い、テラヘルツ帯における超伝導発振器と検出器の有効性を実証した。本文は、650 GHz と 1 THz 帯ジョセフソンアレー発振器の動作特性と発振出力の周波数依存性及び 800 GHz 帯 SIS ミクサの低雑音動作特性などについて述べる。

Development of generating and detecting technology in the THz frequency region is an important subject for high-speed telecommunication technology in the future. Recently, it is necessary to develop THz-band oscillators and detectors in the field of globe environment measurements and radio physics. We have developed superconducting Josephson array oscillators and low-noise SIS mixers for THz-band solid oscillator and highly sensitive detector. In this paper, we show oscillating properties and frequency dependence of output for 650 GHz and 1 THz Josephson array oscillator, and discuss low-noise properties of 800 GHz-band SIS mixers.

[キーワード]

テラヘルツ帯, 超伝導, ジョセフソン接合, アレー発振器, SIS ミクサ

Terahertz frequency, Superconductivity, Josephson junction, Array oscillator, SIS mixer

1 まえがき

テラヘルツ帯は電磁波と光の境界領域に位置しており、未開拓な周波数領域としてその発生や検出などの技術開発が待たれている。例えば、1 THz を超える周波数領域での発振器は、現在のところサブミリ波レーザーもしくは BWO (Backward Wave Oscillator) しかなく、半導体増倍器などに代表される高安定、長寿命の固体発振器は存在しない。また、検出器でも応答の遅い半導体ポロメータしか開発されておらず、地球環境計測や電波天文などの分野で高感度、高速なヘテロダイン検出素子の開発が必要とされ

ている。

二つの超伝導体が絶縁体や導体、あるいは超伝導体によって弱く結合されたジョセフソン接合は、波動関数の位相がそろったコヒーレント動作による強い非線形性をもたらす、超高周波、高速動作の電子デバイスとして期待されている。しかしながら、超伝導材料が多元素であることや、超伝導コヒーレンス長が短いことはその薄膜化、素子化技術には大きな困難をもたらしている。例えば、一価関数的な電流-位相関係を持つジョセフソン接合を作製する際に、接合部は超伝導コヒーレンス長 (数ナノメートル) 程度の大きさにしなければならないため、原子レベ

ルでの積層薄膜成長、ナノメートル界面制御技術やサブミクロン微細加工技術が要求される。さらに、超伝導転移温度(Tc)が高くなるに伴いコヒーレンス長は極端に短くなり、デバイス作製はますます困難となる。そのため、ジョセフソン効果の発見から30年余りの間に、完成された超伝導デバイス技術は鉛合金や金属ニオブ(Nb)などの超伝導材料を用いたトンネル接合のみであり、限られた分野で実用化されている。

本研究は、超伝導デバイスの優れた電磁特性を利用して超伝導ジョセフソンアレー発振器及び低雑音SISミキサの研究開発を行い、テラヘルツ帯周波数領域における超伝導デバイスの実用化を目指している。本論文では、テラヘルツ帯超伝導発振器と検出器の作製、650 GHzと1 THz帯ジョセフソンアレー発振器の動作特性及び800 GHz帯SISミキサの性能評価などについて述べる。

2 ジョセフソンアレー発振器

ジョセフソンアレー発振器は、超伝導ジョセフソン素子の有する交流ジョセフソン効果を利用した発振器で、印加直流電圧に比例した振動数(約484 GHz/mV)の高周波振動電流を発生することができる。しかし、ジョセフソン接合1個当たりの発振出力は数nW程度であり、また発振線幅も広いこと(数百MHz)が分かっている[1]。本研究では実用的な数 μ W以上の発振出力、発振線幅を得る一手段として、多数個の位相同期させたジョセフソン接合からなるジョセフソンアレー発振器の考案、試作及び性能評価を行った[2][3]。

2.1 薄膜抵抗付Nb/AlOx/Nb トンネル型ジョセフソン接合

ジョセフソンアレー発振器に用いられるジョセフソン接合としては、一般的に接合特性の均一性、再現性などに優れた薄膜抵抗付トンネル型ジョセフソン接合が用いられている。しかしこのような接合には、構造的に薄膜抵抗によるLCR共振回路が付加されるため、接合の出力インピーダンスは周波数依存性を示し、共振周波数以上においてその実数成分は急激に減少する

ことが分かってきた[5]。一般的な薄膜抵抗付ジョセフソン接合の場合、共振周波数は数百GHz付近にあり、SQUID磁束計など共振周波数以下の応用においては特に問題なかった。しかし、ジョセフソン発振器など高周波応用では、発振上限周波数や出力インピーダンスに影響するため、この共振特性の把握は極めて重要である。特にサブミリ波周波数領域で発振、動作するジョセフソン発振器には、優れた高周波特性を有する薄膜抵抗付トンネル型ジョセフソン接合の開発が必要であった。本研究では、THz帯で動作可能な薄膜抵抗付トンネル型ジョセフソン接合の接合構造を提案し、実際に作成したジョセフソン接合の高周波特性を計算機シミュレーションに基づいて評価している。

図1(a)に一般的な作成プロセスによる薄膜抵抗付ジョセフソン接合の顕微鏡写真を示す。このような接合は特性の均一性、再現性に優れ、単体のトンネル型接合に比べ高周波特性も改善されるが、付加された薄膜抵抗により寄生インダクタンス L_s が形成される。そのため、接合容量 C_j とともに共振構造を構成し、ジョセフソン接合の高周波応答は、この共振により制限を受ける。

薄膜抵抗付ジョセフソン接合の高周波特性を向上させるためには、 $L_s \cdot C_j$ 積を下げる必要がある。しかし、ジョセフソン発振器における発振出力は接合臨界電流に依存することから、発振出力を保持したままで接合臨界電流に比例する接合容量 C_j を減少させるには限界があり、寄生インダクタンス L_s の極小化が重要となる。寄生インダクタンス L_s は接合-コンタクトホール間距離に依存すると考えられるので、我々はこの距離(Inductive Length)を従来の約25 μ mから、現プロセスにおいて限界に近い1 μ mまで縮小することにより、寄生インダクタンスの極小化を試みた。図1(b)に寄生インダクタンスの極小化した素子の顕微鏡写真、(c)にその断面図を示す。また、共振構造を考慮した薄膜抵抗付ジョセフソン接合の等価回路(RLCSJ model)を図1(d)に示す。ここで I_c , R_s , R_g は各臨界電流、薄膜抵抗、トンネル接合におけるギャップ電圧内抵抗である。この接合は薄膜抵抗長を決定するリソグラフィー時にトンネル接合の一部を形成

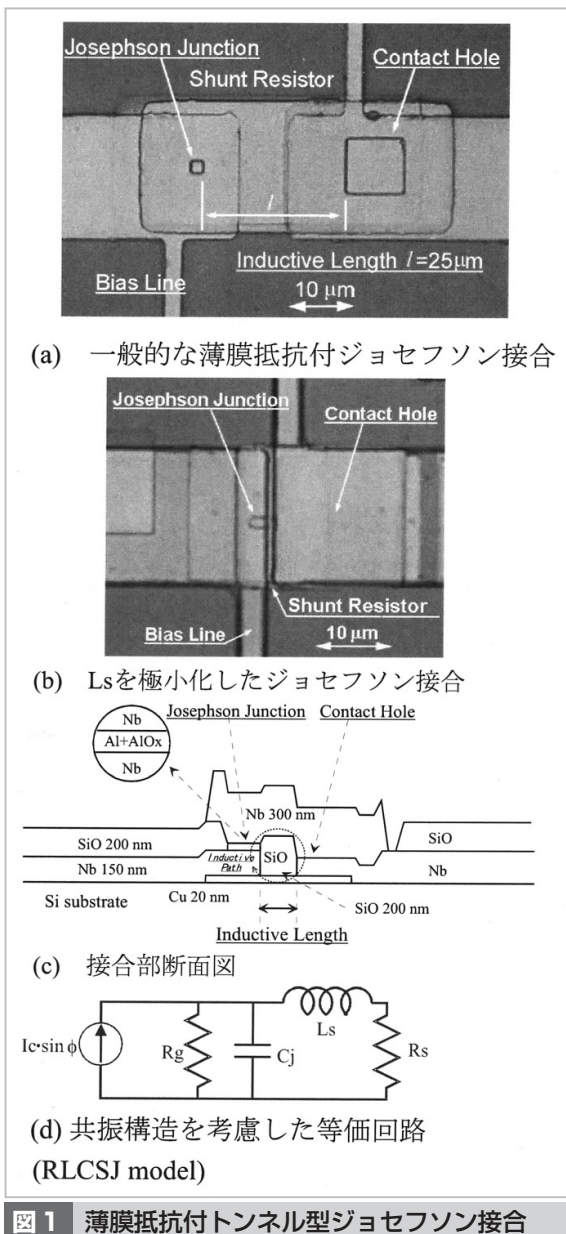


図1 薄膜抵抗付トンネル型ジョセフソン接合

することにより、接合-コンタクトホール間距離約 $1 \mu\text{m}$ を達成している。

図2に、図1(b)に示した薄膜抵抗付きジョセフソン接合の電流-電圧特性及び $(I-I_{\text{RSJ}})$ - V 特性を示す。電流-電圧特性上で明確ではないが、実測した接合パラメータから共振構造を有しない場合 (RSJ model) を計算し、共振による直流電流の増大分のみを示したものが $(I-I_{\text{RSJ}})$ - V 特性である。この特性から 1.3 mV 付近を中心に直流電流の増大が確認でき、約 630 GHz で共振していることが分かる。実測と RLCSJ モデルを用いたシミュレーションとの比較により、寄生インダクタンス L_s は約 100 fH であると見積もられた。

既に図1(a)の薄膜抵抗付ジョセフソン接合の寄生インダクタンス L_s は約 1 pH と見積もっており [2]、従来の $1/10$ に減少したことになる。

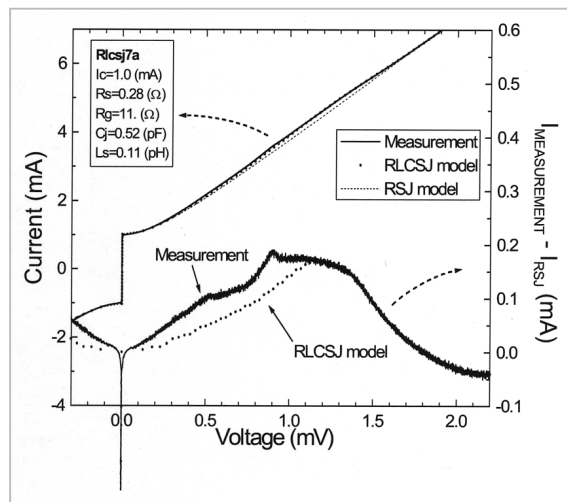


図2 薄膜抵抗付きジョセフソン接合の電流-電圧特性及び $(I-I_{\text{RSJ}})$ - V 特性

2.2 アレー発振器の設計と作製

開発したジョセフソンアレー発振器は、マイクロストリップ共振器及びジョセフソン接合から構成されている発振器と、整合負荷と電流検出用ジョセフソン接合からなる検出部で構成されている。図3に試作した 650 GHz 帯ジョセフソンアレー発振器の顕微鏡写真を示す。共振器を構成する幅 $20 \mu\text{m}$ の Nb マイクロストリップ線路は Nb グランドプレーン下、膜厚 $1 \mu\text{m}$ の SiO_2 誘電体薄膜下に形成されている。ここでマイクロストリップ線路、グランドプレーンの膜厚は共に磁場侵入長より充分厚い 150 nm とした。アレーを構成するジョセフソン接合はマイクロストリップライン内 $1/2$ 波長ごと、11 個配置している。今回 650 GHz と 1 THz の2種類の発振器設計周波数を設定しており、各線路内波長は約 $180 \mu\text{m}$ 、 $120 \mu\text{m}$ となる。また、マイクロストリップ線路の特性インピーダンスは約 8Ω である。

発振器の右端は $1/4$ 波長スタブを有し、ジョセフソンアレーは設計周波数において高周波的にグランドとショートする。また、他端には幅 $5 \mu\text{m}$ 、特性インピーダンス 32Ω の Nb マイクロストリップラインを介して検出器が接続されている。発振器と検出部とを接続する線路インピーダンスの不整合が、負荷側のインピーダンスの

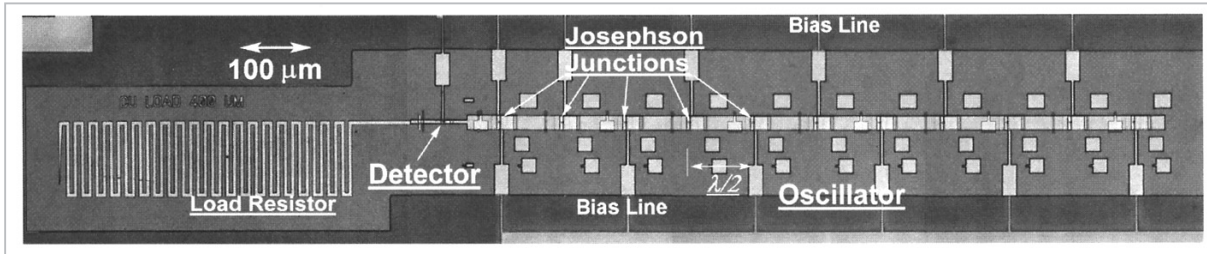


図3 650 GHz帯ジョセフソンアレー発振器

変動による発振器への影響を小さくしている。また検出器は、特性インピーダンスが幅5 μmのNb線路と同じCuマイクロストリップラインによる整合負荷及び発振出力検出用ジョセフソン素子から構成されている。発振器からの発振出力は、インピーダンスの不整合を用いた結合部及び検出用ジョセフソン接合を通過し、Cuマイクロストリップラインに伝搬する。伝搬した信号は、長さ400 μmのCuライン内を往復する間に、約-40dB以上減衰するようにCu表面抵抗を設定しており、Cuマイクロストリップラインは整合負荷と見なすことができる。

DCバイアスラインは4 μmと20 μmの幅のマイクロストリップラインをλ/4ごと繰り返したローパスフィルターを構成している。そのためDCバイアスラインは高インピーダンスになり、設計周波数において無視することができる。これによりアレーを構成する各ジョセフソン接合は高周波的には直列に、またDCバイアス印加時には並列に接続されることになる。

2.3 発振器の性能評価

図4に650 GHz帯ジョセフソンアレー発振器の電流-電圧特性を示す。発振器は11個の接合を並列に観測しているため、1個接合当たりの臨界電流Icは約2.1mA、また接合面積は約4 μm²で、面積から見積もられる接合容量Cjは0.5 pFであった。寄生インダクタンスLsを100 fHとすると、接合部共振周波数は約700 GHzとなり、発振器設計周波数において充分動作するものと考えられる。電流-電圧特性上約1.3 mVの電圧位置にマイクロストリップ共振器の設計共振による電流ステップ(Fundamental step)を観測することができる。この電流ステップ内においては11個のジョセフソン接合は位相同期状態にあると考えられ、最大発振出力はこのステップ内に電流

バイアスしたときに得られると予想される。

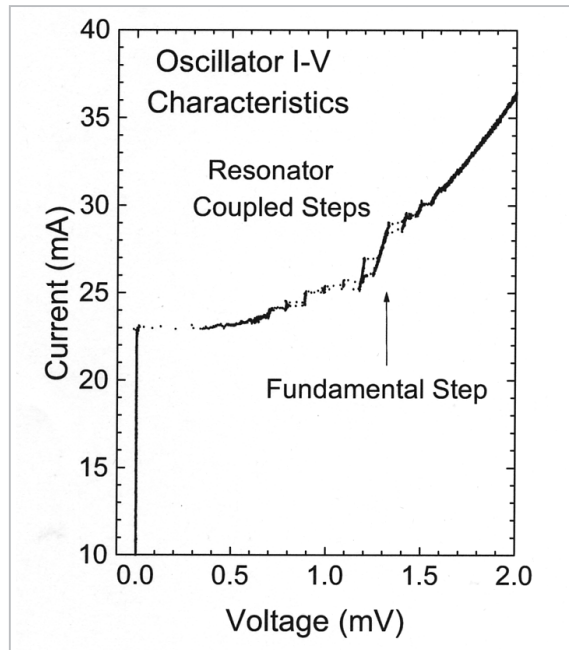


図4 650 GHz帯ジョセフソンアレー発振器の電流-電圧特性

図5に発振器にDCバイアスを印加した時の検出器ジョセフソン接合の電流-電圧特性を示す。発振器にDCバイアスを印加、発振させることにより、検出器ジョセフソンの臨界電流が抑圧され、電磁波誘起ステップ(シャピロステップ)が観測された。図中のシミュレーションは実測された検出用ジョセフソン接合のパラメータを用いて計算した結果である。実際の電流-電圧特性とシミュレーションとの比較により、ジョセフソン接合を流れる高周波電流Irfを導出でき、発振周波数478 GHz及び625 GHzにおいて0.8 × Ic、0.7 × Icが得られた。ここでIcは検出用ジョセフソン接合の臨界電流である。

検出用ジョセフソン接合から見た負荷インピーダンスは、設計周波数以外では若干の周波数依存性を示すことから、発振出力を評価するた

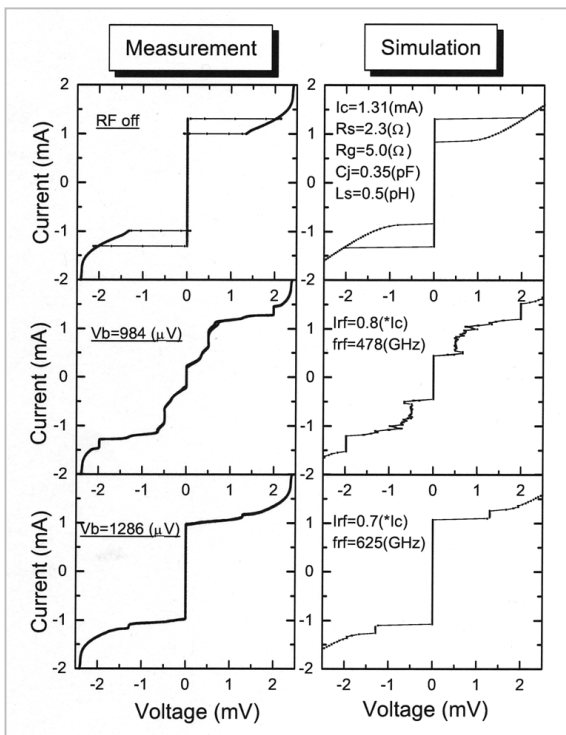


図5 検出器ジョセフソン接合の電流-電圧特性

めには負荷周波数依存性を考慮する必要がある。見積もられた高周波電流 I_{rf} から、負荷周波数依存性を考慮することにより、検出部で消費したジョセフソン発振器の発振出力を得ることができる。図6に発振出力の周波数依存性を示す。発振出力は発振器電流-電圧特性上電流ステップに相当する電圧間隔で離散的に450~900 GHzの周波数領域で観測され、設計周波数付近である625 GHzにおいて約 $10 \mu\text{W}$ の発振出力が観測された。

発振出力の周波数特性から、得られた発振出力は約700GHz付近から急激に減少していることが分かる。また、図4において700 GHzに相当する1.45 mV以上ではResonator coupled stepが不明瞭になって減衰していることが分かる。この周波数は超伝導材料であるNbのエネルギーギャップ周波数に相当し、700 GHz以上ではNbの超伝導電子対の破壊により、Nb薄膜の表面抵抗損が増大することが予想される。したがって、マイクロストリップ共振器の抵抗損の増大が発振出力の減少をもたらした主因と考えられる。今後、発振器を構成するマイクロストリップ共振器に、Nbより高いエネルギーギャップを有するNbN、Nb₃GeもしくはTHz帯で有利となるAl、

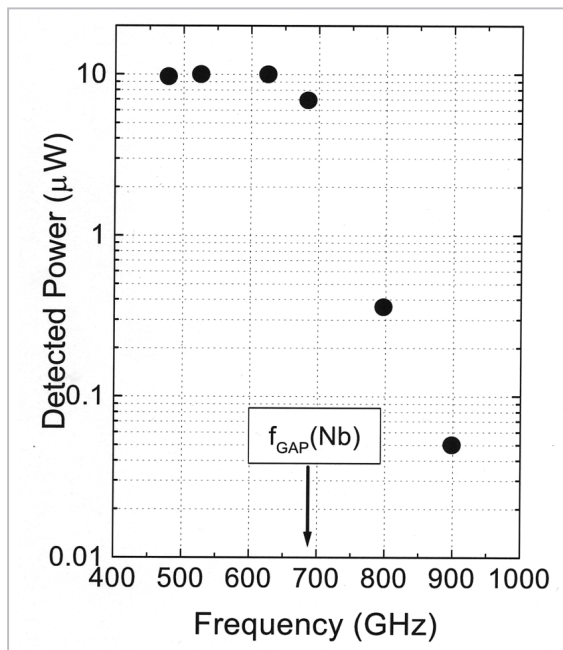


図6 発振出力の周波数依存性

Au等高純度金属薄膜を用いて、表面抵抗損の低減を図ることにより、実用的な発振出力を有するTHz帯ジョセフソン発振器を構築することは可能であると考えている。

図7に試作した1 THzジョセフソンアレー発振器の電流-電圧特性を示す。発振器を構成する

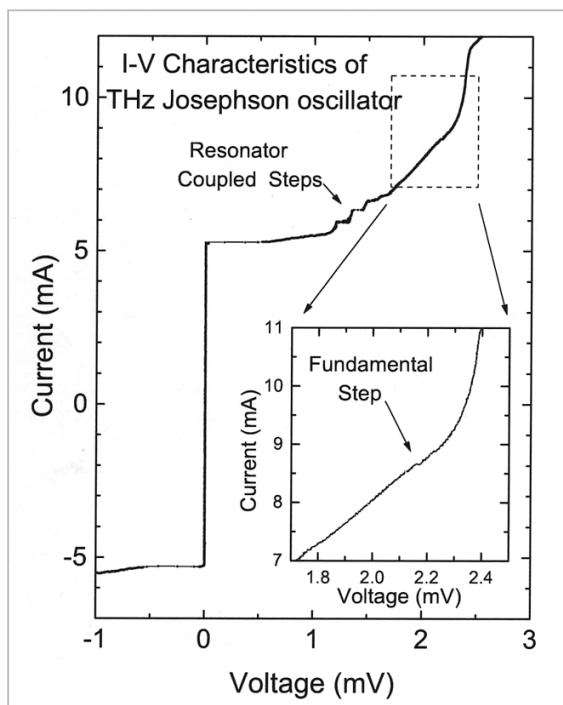


図7 1 THzジョセフソンアレー発振器の電流-電圧特性

ジョセフソン接合の接合面積は約 $1 \mu\text{m}^2$ としており、接合臨界電流密度約 $50 \text{ kA}/\text{cm}^2$ から、接合容量 C_j は 0.12 pF と見積もられる[8]。そこで寄生インダクタンスを 100 fH と仮定した場合、接合部共振周波数は約 1.4 THz となり、この接合は設計周波数において十分な出力インピーダンスを持つと考えられる。電流-電圧特性上約 2.1 mV において電流ステップ (Fundamental step) がわずかながら確認できる。このステップ付近、電圧 2.06 mV に DC バイアスをしたときの検出器電流-電圧特性を図8に示す。電流-電圧特性上 2.06 mV の電圧位置に明確なシャピロステップが確認できる。この電圧位置は 1 THz に相当し、発振器からの 1 THz 発振出力を検出器において確認したことを意味している。シャピロステップのシミュレーションとの比較により、検出用ジョセフソン接合を流れた 1 THz 高周波電流 I_{rf} は $0.1 \times I_c$ と求められ、検出部 C_u 整合抵抗で消費した発振出力は約 50 nW と見積もられた。 1 THz を超えたジョセフソン発振器の発振報告はなく、本論文による報告がジョセフソン発振器として最も高い周波数での発振報告である。

3 テラヘルツ帯高感度 SIS ミキサ

超伝導体-絶縁体-超伝導体 (SIS) トンネル接合を用いたミキサは、ミリ波からサブミリ波帯にかけて量子雑音限界に迫る極低雑音特性を示すことから、電波天文学や地球環境計測などの分野で広く利用されている[4]。SIS 接合は構造上、大きな静電容量を持っており、接合単体では高周波信号を短絡する。したがって、入力信号を接合に効率良く結合させるためには、接合サイズを小さくし、さらに接合容量を除去するための同調回路を集積化する必要がある。このとき従来の同調回路では原理的に、同調できる比帯域幅 $\Delta f/f_0$ が接合の $1/\omega C_j R_N$ で制限される[5]。ここで ω は角周波数、 C_j は接合の静電容量、 R_N は正常抵抗である。したがって、比帯域 20% を確保するにはその中心周波数で $\omega C_j R_N$ 積が 5 程度必要である。 $\omega C_j R_N$ 積は接合の臨界電流密度 J_c に強く依存しており、

$$J_c = \omega C_j I_c R_N / (\omega C_j R_N) \quad (1)$$

で関係付けられている[5]。ここで C_s は接合の単位面積当たりの静電容量、 I_c は臨界電流である。例えば、単位面積当たりの接合容量を $100 \text{ f}/\mu\text{m}^2$

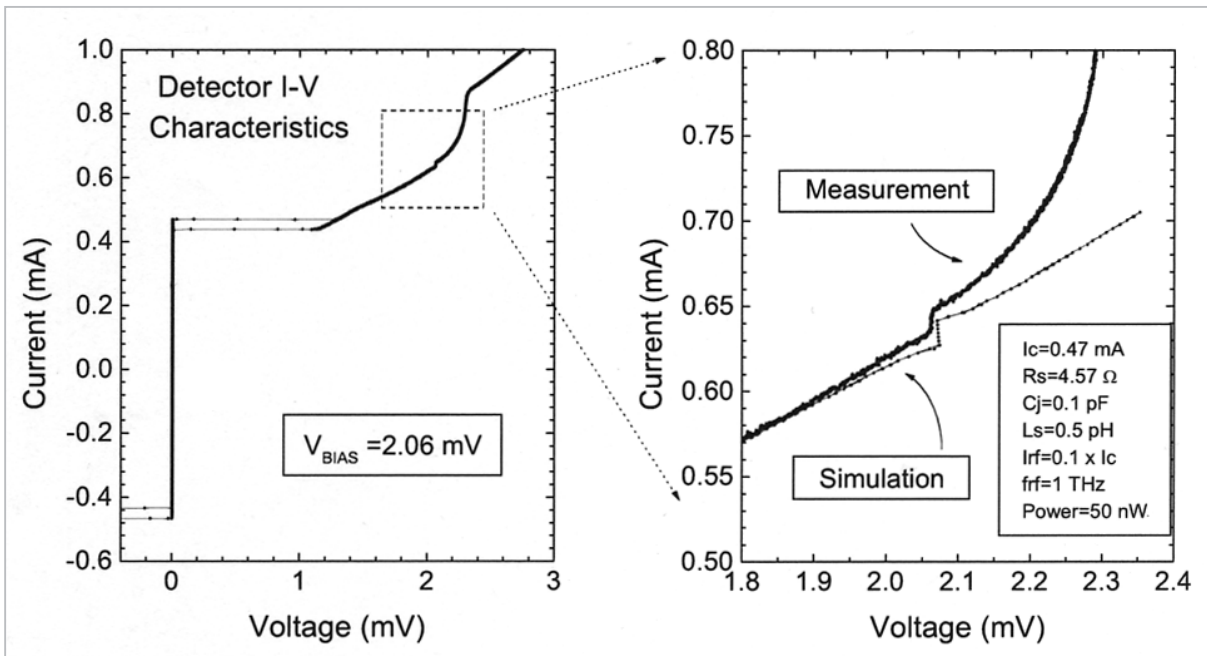


図8 ジョセフソン発振による 1 THz シャピロステップ

と仮定すると1 THz周波数ではNb接合を用いると約20 kA/cm²、NbN接合では約40 kA/cm²の高臨界電流密度が必要となる。現在の接合作製技術では、接合の臨界電流密度が高くなるほど、接合の電気的特性が劣化する傾向にあり、サブギャップリーク電流などにより雑音温度の増大をもたらす原因となる。さらに1 THzのような波長が極端に短い超高周波領域では同調回路も短くなり、従来の設計手法によるスケールダウンが困難になるほか、接合サイズもサブμm²程度にする必要があるため、低雑音かつ広帯域特性を有するSISミキサの実現は難しかった[6]。

我々はこれまでテラヘルツ帯において比較的大きなSIS接合を用いた同調回路として、SIS接合を分布定数線路として扱い、細長い接合で共振器を構成することによって、接合自身で容易に接合容量を同調できるSISミキサを開発してきた[7]。しかしながら、動作帯域幅は従来と同様に大凡 $1/\omega C_J R_N$ で制限され、広帯域動作には高臨界電流密度の接合が必要であった。本研究では、分布定数型トンネル接合の性質に着目し、複数の共振回路を用いることによって $1/\omega C_J R_N$ より広い比帯域を達成する同調回路を開発した。

3.1 ミキサ設計

分布定数型2接合同調回路を有するミキサとして、入力光学系に無反射層付きMgO超半球レンズとツインスロットアンテナから成る準光学型ミキサの設計を行った。図9(a)に作製したミキサチップの顕微鏡写真を、(b)にその同調回路部の拡大写真を示す。ツインスロットアンテナの給電点はコプレナー導波路を用いて中心に配置した。中心周波数を870 GHzとして設計しており、その付近でのアンテナインピーダンスは約65 Ωとなる[8][9]。同調回路は一方のコプレナー導波路の中心導体をグランドプレーンとして集積化されており、同調回路にはアンテナインピーダンスと整合させるための1/4波長インピーダンストランスフォーマーが付いている。ミキサは単結晶MgO基板を用いたエピタキシャルNbN/MgO/NbN技術で作製されており、同調回路はNbN/MgO/NbNトンネル接合とNbN/MgO/NbNマイクロストリップ線路で構成されている[10][11]。

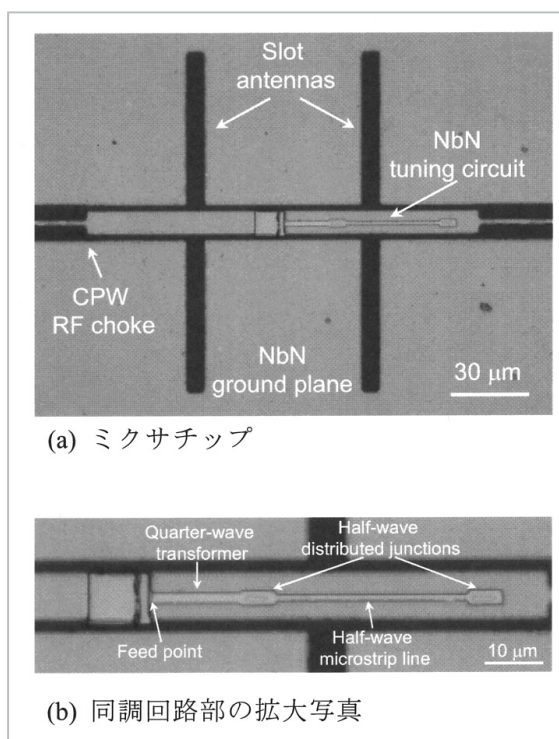


図9 作製したミキサチップの光学顕微鏡写真

同調回路の設計は簡易回路モデルでの解析結果を利用し、中心周波数に対して比帯域20% (174 GHz)、反射損失-10 dB以下で行った。設計で用いたパラメータを表1に示す。これらは主に実測値に基づいているが、エピタキシャルNbN/MgO/NbN接合の単位面積当たりの静電容量に関してはエピタキシャル成長のNbN/AlN/NbN接合と同じと仮定した[12]。同調回路の設計に必要な超伝導マイクロストリップ線路及びSIS接合伝送線路の特性インピーダンスと伝搬定数の計算方法は参考文献[13]に詳しく記述されている。

表1 設計パラメータ

NbN gap frequency	1.4 THz
normal state conductivity	$1.5 \times 10^6 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$
upper electrode thickness	400 nm
lower electrode thickness	200 nm
MgO insulator thickness	200 nm
dielectric constant	9.6
NbN/MgO/NbN $J_C R_N A$ product	3.5 mV
specific capacitance	$71 J_C^{0.16} \text{ fF}/\mu\text{m}^2$
MgO barrier thickness	1 nm

まず、設計条件を満たすために必要なSIS接合の最低臨界電流密度の値を図10に示すように、

中心周波数870 GHzにおいて幅1 μm を持つ SIS 伝送線路の $\alpha_j d_j$ の値を臨界電流密度に対してプロットした。この図から $\alpha_j d_j = 0.12$ を満たす臨界電流密度として約 16 kA/cm^2 ($C_s=110 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$) が得られる。従来の設計手法では 40 kA/cm^2 程度必要だったことを考えると新しい同調回路では半分以下で良いことになる。

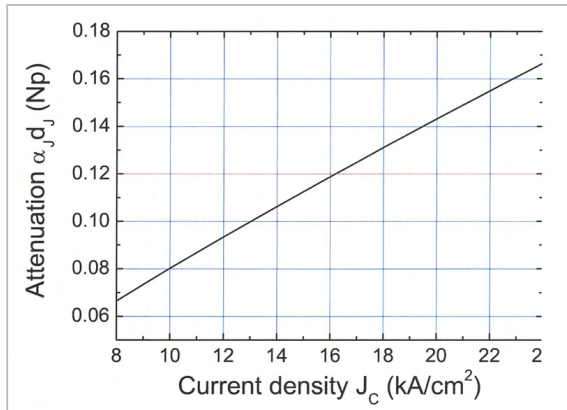


図 10 SIS 伝送線路における伝搬特性の臨界電流密度依存性

図 11 は、設計した回路概略図とアンテナインピーダンスを一定値の 65Ω としたときの反射損失特性である。また、回路の各点から負荷側を見たときのインピーダンス軌跡も示している。これらは 65Ω で規格化されている。設計原理どおりに、終端に置かれた半波長接合の周波数依存性を持つリアクタンス成分を同調回路によってよく補償されていることが分かる。同調回路には $1/4$ 波長インピーダンストランスフォーマーが付いているため、その効果によって比帯域は設計値より広く、20%以上が得られた。従来の同

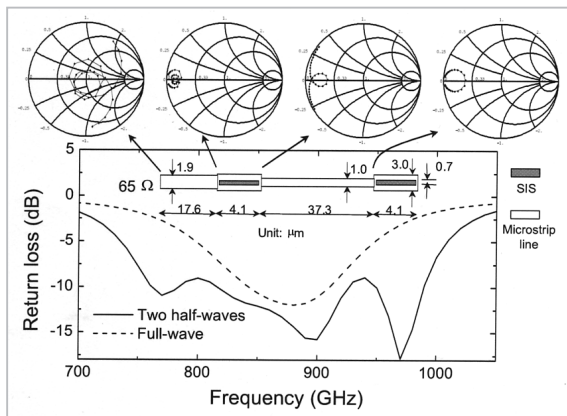


図 11 同調回路の概略図と反射損失特性

調回路と比較するために、同じ臨界電流密度で 2 接合同調回路と合計の接合長が同じとなる $1/4$ 波長インピーダンストランスフォーマー付き全波長接合の反射損失特性を計算した。図 11 の破線で示すように比帯域は大幅に狭く、分布定数型 2 接合同調回路が臨界電流密度を低くするのに有効な手段であることが分かる。

3.2 ミクサの性能評価

作製したミクサの性能評価は準光学受信機システムによって行われた[14]。ミクサチップは半径 3 mm の MgO 超半球レンズの裏面に取り付けられ、無酸素銅製のミクサブロックに納められている。レンズ表面における反射損失を低減するため、レンズには厚さ 50 μm の Kapton-JP ポリイミドフィルムによる無反射層が取り付けられている。これにより、中心周波数約 800 GHz、反射損失 -10 dB 以下の比帯域約 75% を実現しており、同調回路の帯域より十分広い。平行ビームとなるように非軸パラボラを適切な位置に配置し、入力光学系を構成した。

ミクサからの中間周波数 (IF) 信号は平衡回路で取り出され、180 度ハイブリッドカップラーを介して 1.25-1.75 GHz 帯冷却 HEMT アンプで増幅される。更に室温アンプで増幅された後、1.5 GHz \pm 250 MHz のバンドパスフィルターを介して検波される。ミクサブロック、非軸パラボラ、バイアスティー、HEMT アンプ、ハイブリッドカップラーはすべて 4.2 K のデュワー冷却面に取り付けられている。局部発振波 (LO) 源は後方波発振器 (BWO) を使用した。LO と RF 信号は厚さ 9 μm のマイラーフィルムにより結合し、厚さ 0.5 mm のテフロン真空窓、77 K 及び 4.2 K に冷却された薄い Zitex シートを通して準光学ミクサに入射される。雑音温度評価は標準的な Y-factor 法により行った。すなわち、電波吸収体を室温 (295 K) と液体窒素 (77 K) に浸したときの黒体輻射を RF 信号源とし、受信機に入力する。この二つの入力に対する受信機からの IF 出力の比 P_{295}/P_{77} を Y-factor として次式を使って受信機の雑音温度を求める。

$$R_{RX} = \frac{295 - Y \cdot 77}{Y - 1} \quad (2)$$

3.3 ミクサ雑音特性

図12に分布定数型2接合同調回路を用いた受信機の代表的なヘテロダイン応答特性を示す。接合の臨界電流密度は、同じ基板上に作製された大面積の接合を用いて測定したところ、約6.7 kA/cm²であった。低臨界電流密度接合であるため、LOを入力しないときのI-V特性は、サブギャップリーク電流の小さな高品質なものとなっており、サブギャップ抵抗と正常抵抗の比は約12と大きい。超伝導材料がNbNであるため、ギャップ電圧は約5.5 mV (1.34 THzに相当)と大きく、従来のNbの約2倍である。ギャップ電圧ではSIS接合特有の急峻な準粒子電流の立ち上がりを示しており、理想に近いI-V特性であると言える。LO周波数690 GHzを入力したときにはギャップ電圧の約半分の位置に第1次光子誘起トンネリングステップが明瞭にI-V特性上に現れている。

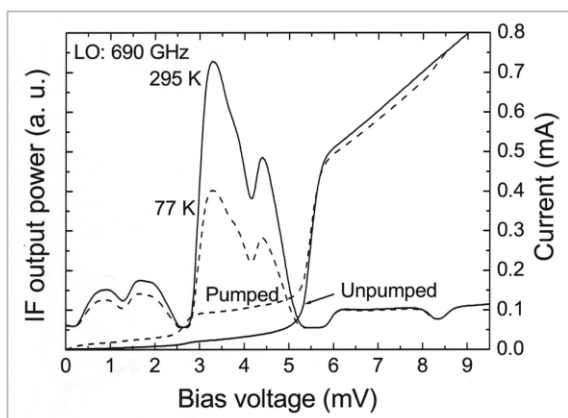


図12 ヘテロダイン応答特性

臨界電流密度が設計値より低かったにもかかわらず、受信機は295 Kと77 Kの黒体輻射入力に対して大きなIF出力比を示し、約3.2 mVのバイアス電圧値において最大のY-factorの1.81が得られた。これは(2)式により、両側波帯(DSB)受信機雑音温度として192 Kであり、量子雑音 hf/k_B の約5.8倍に相当する。この値はこの周波数帯で世界的にも最高性能に匹敵し、低臨界電流密度接合による高品質なI-V特性を利用した結果であると言える。

図13に同様の方法で測定した受信機雑音温度の周波数依存性を示す。675-810 GHzにおいて量子雑音の9倍(最小雑音温度の1.5倍)以下の受

信機雑音温度を示した。比帯域は約18%となり、表1のパラメータを用いた $\omega C_J R_N$ 積が750 GHzにおいて約23であることを考えると、非常に広帯域である。従来の同調回路と比較するために、同一基板上に作製した全波長接合ミクサの受信機雑音温度特性測定結果も図中に示している。2の設計で予測したとおりに従来の同調回路の帯域は狭く、提案した分布定数型2接合同調回路が、同じ臨界電流密度の接合で広帯域動作が可能であることを実証した。したがって、本同調方法は接合の臨界電流密度を下げる有効な手段であると言える。

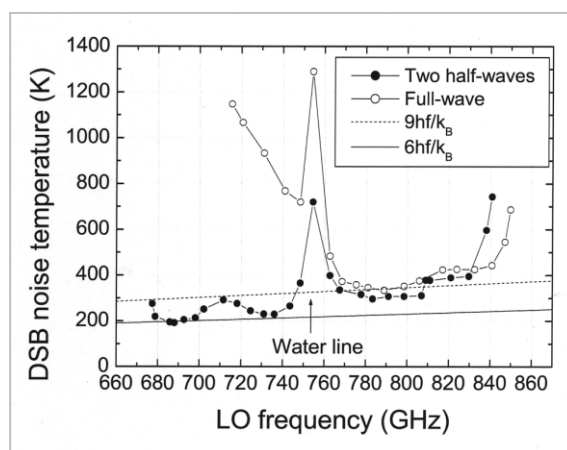


図13 受信機雑音温度の周波数依存性

しかしながら、実際の動作中心周波数が設計中心周波数よりも2接合同調回路で約14%程度、全波長同調回路でも7%程度低くなっており、設計パラメータの設定には問題があったと考えられる。全波長同調回路の中心周波数は、主に分布定数型SIS接合伝送線路部の共振周波数で決まるため、接合線路自体の位相速度が設計値より遅かったと結論できる。また、2接合同調回路も動作周波数が低くなっていることから、マイクロストリップ線路部の位相速度も設計値より遅かったと考えられる。もう一つの原因としてNbNの磁場侵入長がMattis-Bardeen理論により計算された設計値よりも大きい可能性がある。我々は今、これらについての詳しい評価を進めており、同調回路の再設計を行う予定である[15]-[17]。

4 まとめ

ジョセフソンアレー発振器に用いる薄膜抵抗付ジョセフソン接合の高周波特性を改善する目的で、寄生インダクタンス L_s を極小化したジョセフソン接合構造を考案、計算機シミュレーションに基づいた解析により寄生インダクタンス L_s を約100 fHまで極小化することに成功した。この接合を用いて650 GHz帯及び1 THz帯ジョセフソンアレー発振器を試作し、625 GHzにおいて約10 μ W、1 THzにおいて約50 nWの発振出力を検出した。今後、マイクロストリップ共振器に用いる薄膜材料をTHz帯において、より低損失の材料に変えることにより、実用的な発振

出力を持つTHzジョセフソン発振器の構築が可能であることを示した。

テラヘルツ帯で低雑音かつ広帯域特性を有するSISミキサを実現するため、高品質な I - V 特性を持つ低臨界電流密度接合を用いた分布定数型2接合同調回路を提案・開発した。実際にエピタキシャルNbN/MgO/NbN技術を用いてall-NbNミキサを作製し、性能評価を行い、800 GHz帯において低雑音、広帯域特性を示した。本同調回路によって原理的にNbNのギャップ周波数である約1.4 THzまで低雑音かつ広帯域動作が可能であり、テラヘルツ帯における高性能ミキサの実現に大きく貢献すると思われる。

参考文献

- 1 原宏, "超電導エレクトロニクス", p.128, オーム社, 1985.
- 2 A. Kawakami and Z. Wang, "Josephson Array Oscillator Using Resonant Effects in Shunted tunnel Junctions", IEICE Trans. Electron., Vol. E79-C, No. 9, pp. 1242-1246, Sep. 1996.
- 3 A. Kawakami, Y. Uzawa, and Z. Wang, "Josephson Array Oscillators with Microstrip Resonators," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 7, pp. 3126-3129, Jun. 1997.
- 4 J. Carlstrom and J. Zmuidzinas, "Millimeter and submillimeter techniques", in Review of Radio Science 1993-1996, W. Ross Stone, Ed. Oxford: The Oxford University Press, 1996.
- 5 S.-C. Shi and T. Noguchi, "Low-noise superconducting receivers for millimeter and submillimeter wavelengths", IEICE Trans. Electron., Vol. E83-C, pp.1584-1594, 1998.
- 6 B. D. Jackson, G. de Lange, W. Laauwen, J. R. Gao, N. N. Josad, and T. M. Klapwijk, "NbTiN/SiO₂/NbTiN and NbTiN/SiO₂/Al tuning circuits for 1 THz waveguide SIS mixers", in Proceeding of the 11th International Symposium on Space Terahertz Technology, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 1-3 May 2000 (unpublished).
- 7 Y. Uzawa, A. Kawakami, S. Miki, and Z. Wang, "Performance of all-NbN quasi-optical SIS mixers for the terahertz band", IEEE. Trans. Appl. Supercond., Vol. 11, pp. 183-186, 2001.
- 8 J. Zmuidzinas, N. G. Ugras, D. Miller, M. Gaidis, H. G. LeDuc, "Low-noise slot antenna SIS mixers", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 5, pp. 3053-3056, 1995.
- 9 M. Gaidis, H. G. LeDuc, M. Bin, D. Miller, J. A. Stern and J. Zmuidzinas, "Characterization of low-noise quasi-optical SIS mixers for the submillimeter band", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 44, pp.1130-1139, 1996.
- 10 A. Kawakami, Z. Wang, and S. Miki, "Low-loss epitaxial NbN/MgO/NbN trilayers for THz applications", IEEE. Trans. Appl. Supercond., Vol. 11, pp. 80-83, 2001.
- 11 A. Kawakami, Z. Wang, and S. Miki, "Fabrication and characterization of epitaxial NbN/MgO/NbN Josephson tunnel junctions", J. Appl. Phys., Vol. 90, pp. 4796-4799, 2001.
- 12 Z. Wang, Y. Uzawa, and A. Kawakami, "High current density NbN/AlN/NbN tunnel junctions for submillimeter wave SIS mixers", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 7, pp. 2797-2800, 1997.
- 13 Y. Uzawa and Z. Wang, "Studies of High Temperature Superconductor", ed. A. V. Narliker (Nova Science,

Hauppauge, NY, 2002) Vol. 43, Chap. 9, p. 255.

- 14 Y. Uzawa, Z. Wang, and A. Kawakami, "Performance of quasi-optical SIS mixer with NbN/AlN/NbN tunnel junctions and NbN tuning circuit at 760 GHz", Appl. Supercond., Vol. 6, pp. 456-470, 1998.
- 15 A. Kawakami, Y. Uzawa, and Z. Wang, "Specific capacitance of epitaxial NbN/MgO/NbN tunnel junctions for THz applications", to be published in Appl. Phys. Lett.
- 16 川上彰, 鵜澤佳徳, 王鎮, "NbN/MgO/NbN 接合の接合容量及び NbN 薄膜磁場侵入長の評価", 第 64 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集 31a-A-5, No.1, p.213, 2003.
- 17 鵜澤佳徳, 武田正典, 川上彰, 王鎮, "2つの1波長接合を用いた SIS ミキサ一同調回路", 第 64 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集 31a-A-7, No.1, p.214, 2003.



王 鎮 (Wang Zhen)

基礎先端部門超伝導エレクトロニクス
グループリーダー 工学博士
超伝導エレクトロニクス



川上 彰

基礎先端部門超伝導エレクトロニクス
グループ主任研究員 博士(工学)
超伝導エレクトロニクス、素子作成技術



鵜澤佳徳

基礎先端部門超伝導エレクトロニクス
グループ主任研究員 博士(工学)
サブミリ波帯超伝導受信機技術の開発

