

Title	磁性障壁層を持つミリ波サブミリ波ミキサー素子としての超伝導トンネル接合の作製
Author(s)	世古, 和幸
Citation	
Issue Date	2002-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	none
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/2109">http://hdl.handle.net/10119/2109</a>
Rights	
Description	Supervisor:今井 捷三, 材料科学研究科, 博士

# 磁性障壁層を持つミリ波サブミリ波ミキサー素子としての超伝導トンネル接合の作製

今井研究室 学籍番号 740009 世古和幸

## 1. 研究の背景

超伝導体を電極とした SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) トンネル接合素子は、電波天文観測において宇宙から到達するミリ波および低サブミリ波帯の高周波を検出するためのミキサー素子として量子限界に近い低雑音を実現し、高感度な検出を可能としている。SIS ミキサーでは Josephson の超伝導トンネル電流ではなく、準粒子のトンネル電流による強い非線形特性をミキシングに用いる。一方、Josephson 電流によってもたらされるノイズが検出感度を低下させる大きな原因の一つとなっている。一般に、Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb 構造の SIS ミキサーでは、接合に外部から磁場を印加することでこの電流を抑圧している。しかしながら、この方法では素子をより高い周波数領域でのサブミリ波帯で使用する目的で接合面積を小さくすると、空間的な制約により超伝導を壊すような高磁場が必要になるため Josephson 電流を完全に消去することは困難である。他方、外部磁場を用いずに接合の障壁層に磁性不純物を含む酸化物 (NiO<sub>x</sub>) を用いた点接触型 SIS 接合素子 (Nb-SnO<sub>x</sub>/NiO<sub>x</sub>/SnO<sub>x</sub>-Sn) で Josephson 電流が Intrinsic に完全に消去された報告がある [1]。このことは画期的ではあったが、点接触型接合は実用に供さないことや当時はまだそれほど高い領域のサブミリ波検出器の需要が無かったなどの点において磁性障壁接合の研究は下火になった。

## 2. 研究の目的

ミキサーおよび周辺技術の発達でより高周波数領域におけるサブミリ波検出器の需要が高まってきている。Intrinsic に Josephson 電流を消去することができれば、接合面積は微細加工が可能な限り小さくすることができると思われる。また、外部磁場を用いないため素子の集積化が容易になると予想され、その結果として観測時間の大幅な短縮に貢献できると考えられる。そこで、本研究では実用的な積層型接合で実用に供する素子特性 (電流電圧特性) を持つ磁性障壁 SIS 接合を実現させることを目的とした。実用に供するための素子特性の目標値は以下の通りであり、各パラメータの定義は図 1 に示す通りである。

### 素子特性の目標値

- ・ 最大直流ジョセフソン電流  $I_c$
- ・ ギャップ電圧以下におけるリーク電流  $R_{sg}/R_n > 10$
- ・ ギャップ電圧における立ち上がりの鋭さ  $R_n/r > 10$

- ・ 常伝導抵抗値  $R_n \leq 200 \Omega$
- ・ 規格化した素子の常伝導抵抗値  $R_n A < 100 \Omega \mu\text{m}^2$

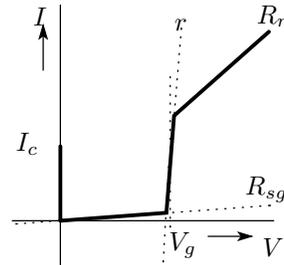


図 1. ジョセフソン接合のトンネルパラメータ

## 3. 実験方法および結果

基盤技術となる Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb 接合素子の作製には、上部下部電極および障壁層は全て DC マグネトロンスパッタ堆積法で同一真空内で成膜した (磁性障壁層の場合も同様)。素子作製プロセスでは SNIP (Self-aligned Niobium Isolation Process) 法 [2] を用いた。この方法は接合周囲を RIE (Reactive Ion Etching) でエッチングした後、スパッタ堆積法を用いて SiO<sub>2</sub> で埋め直し絶縁層を形成するプロセスである。このプロセスで酸化条件等の最適化を経て、実用レベルの電流電圧 (I-V) 特性を示す素子が作製できるに至った (図 2)。 $R_n A = 46.5 \Omega \mu\text{m}^2$ ,  $R_{sg}/R_n = 13.2$ ,  $R_n/r = 38.0$

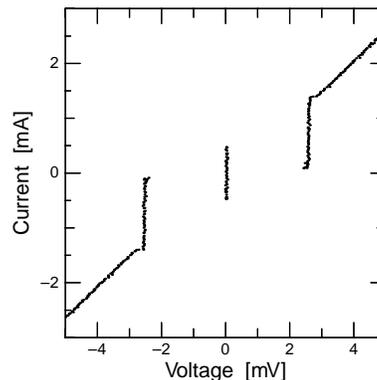


図 2. SNIP 法で得られた Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb(50/6/200nm) 接合素子の電流電圧特性。接合面積  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$

更に再現性の良い素子を作製するために Nb 膜の表面粗さとスパッタ成膜時のプラズマ投入電流値との関係に

ついて AFM を用いて調べた (図 3). これにより平坦な膜を得ることができたが、素子を作製した結果、Nb 膜の膜質の低下により電流電圧特性においてギャップ電圧が低い素子特性を示した. そのため、以降の Nb 膜の成膜条件は平坦性では十分ではないが実用レベルに達した成膜条件で固定することにした.

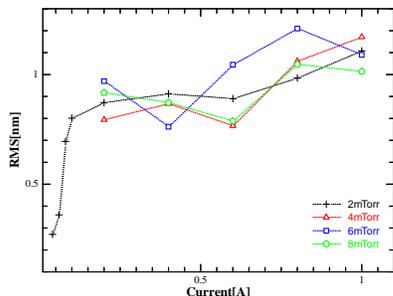


図 3. ガス圧, 電流値をパラメータとして成膜した Nb 膜表面の AFM 測定による RMS 値の分布図

磁性障壁層としては、Cr, Mn, Fe, Co, Ni 等の酸化物が考えられる. 本研究では、先に挙げた点接触型 SIS 接合の結果に基づき、Ni の酸化物  $\text{NiO}_x$  を障壁層として用いることにした. まずはじめに、Nb/ $\text{NiO}_x$ /Nb 接合素子を作製した.

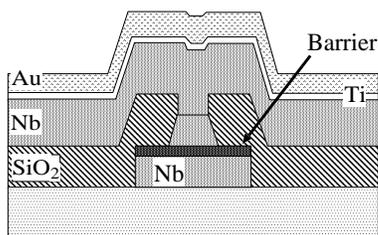


図 4. 作製した磁性バリア素子の断面模式図

最初は自然酸化法を用いて、 $\text{NiO}_x$  層を形成することを試みた. ところがこの方法では、0.5 ~ 2.0 nm 厚の Ni が Nb 表面を一様に被覆しているとは考えにくく、Ni 層の所々で Nb が露出しているものと考えられ、露出した Nb が絶縁物である  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  にはならず電極間のショートを生む結果となった. そこで、Ni の酸化に加えて露出した Nb も強制的に酸化する目的で、 $\text{O}_2$  プラズマ酸化法を用いた. その結果、図 5 に示すように Ni 堆積膜厚が 1.2 nm の素子でギャップ電圧が 2.4 ~ 2.5 mV の非線型な構造を持ち、接合面積に関係なく  $I_c$  が消去された I-V 特性を得ることができた.

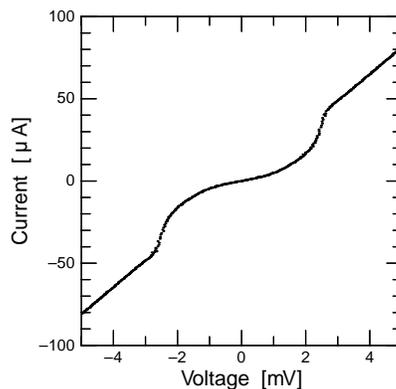


図 5. プラズマ酸化  $\text{NiO}_x$  による Nb/ $\text{NiO}_x$ /Nb (50/1.2/100nm) 接合素子の電流電圧特性. 接合面積  $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$

しかしながら、 $R_n A$  が数  $\text{k}\Omega\mu\text{m}^2$  以上と非常に高く、 $R_{sg}/R_n$  は 1.5 ~ 2.0、 $R_n/r$  は 1.7 ~ 4.5 と満足のできる結果ではなかった. その後、露出 Nb をプラズマ酸化した接合では素子特性の向上は難しいと考え、 $\text{AlO}_x$  バッファ層を挿入した素子を作製したが、 $R_n A$  の値は逆に高くなった. これは、Ni 層のみならず Al 層もプラズマ酸化によって酸化した結果であると考えられる.

Nb 膜上に堆積させた Ni 膜の Nb 膜表面被覆性を調べるために AFM (Atomic Force Microscopy) による観察を行なった. 図 6 は Si 基板の上に堆積させた Nb 単層膜の表面像で、楕円状の柱状成長をしているのがわかる. 図 7 は Nb 上に Ni を堆積させた場合の AFM 像で、楕円状構造が観察されない. Ni 膜は 1.5 nm 厚しか堆積していないので、Ni の Nb 膜表面の濡れ性が良ければ楕円状構造が観察されるはずであるから、そうでないことから Ni は Nb 上で凝集しており Ni 膜厚に分布がある (ばらつきがある) ということがいえる.

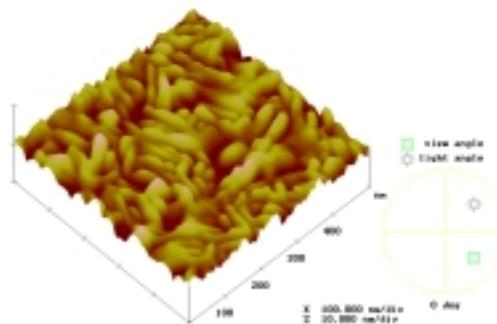


図 6. 素子作製に用いている成膜条件 Ar ガス圧 8 mTorr, スパッタ電流値 0.4 A で成膜した Nb 薄膜表面の AFM 像 (膜厚約 200nm)

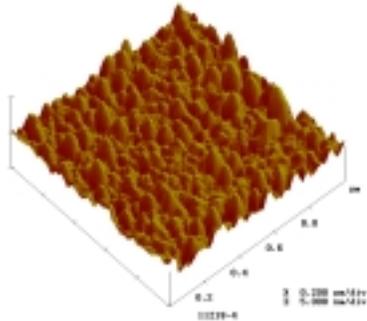


図 7. Ni/Nb=1.5 nm/100 nm の AFM 像. Nb の成膜条件は図 6 と同様.

ここで、原点に立ち返り Al バッファ層を挿入し、自然酸化法で酸素圧を高くして Nb/NiO<sub>x</sub>/Al/Nb 接合素子を作製した. 図 8 に代表的な I-V 特性を示す. 図に示すようにギャップ電圧  $V_g$  のところの電流の立ち上がりは鋭くなり、 $I_c$  が抑圧されていて、且つ  $R_n A$  が 200~300  $\Omega\mu\text{m}^2$  と低くなり、 $R_{sq}/R_n$  の値も一番良いもので 3.2 と改善された.

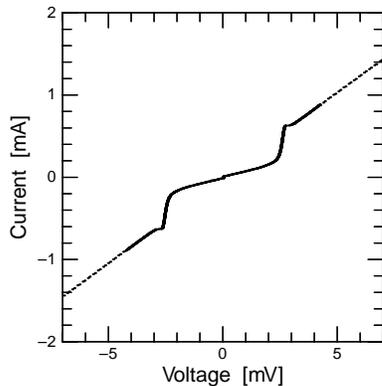


図 8. 熱酸化 NiO<sub>x</sub> による Nb/NiO<sub>x</sub>/Al/Nb (50/0.5/6/100nm) 接合素子の電流電圧特性. 接合面積 10 $\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$

#### 4. 考察とまとめ

接合界面がクリアでなくて、Nb の低級酸化物等により N (常伝導) 層がある場合について半導体モデルによる状態密度を用いて考察しておく. 界面に N 層があったり、不純物準位が存在すると図 9 のようになると考えられる. 図のようにギャップの裾野が広がっているとバイアス電圧が低い場合でも、電流が流れ始める. 図 9(a) のように片側だけの S 層が N 層の衣をかぶっている場合、SIN 接合的な振る舞いをすると考えられる. 一方、図 9(b) のように両方の電極に N 層の衣がかぶった場合、接合特性はサブギャップ電流が NIN 接合のよう

に直線的になると考えられる. プラズマ酸化で作った接合の I-V 特性はサブギャップ電流リークが曲線的であったので、図 9(a) のケースが当てはまると考えられる.

熱酸化法を用いた素子の場合、Al 膜を Ni 膜が完全には覆っていないと考えられるが、露出した Al は障壁層を形成し Ni 下部にまで酸化が及ぶ結果、超伝導体と磁性バリアを直接接しない効果が生まれて、結果的にごくわずかな Ni で  $I_c$  が消去されることが証明された.

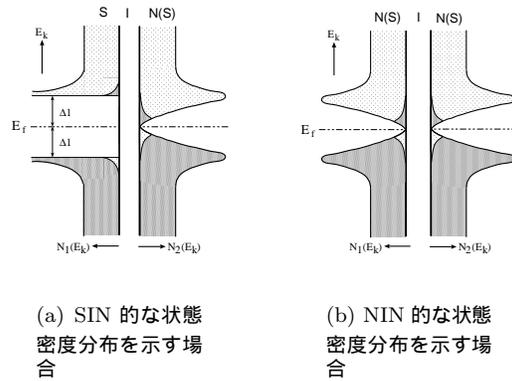


図 9. 接合界面がクリアでなく N 層が存在する場合の状態密度の想像図

本研究における成果は、磁性障壁 SIS 接合素子を積層型で実現し Josephson のトンネル電流を外部磁場の印加無しに Intrinsic に消去することに成功したことと、素子構造に Al バッファ層を加えることで改良を施した結果、素子の I-V 特性を実用レベルにより近づけることに成功したことにある.

点接触型磁性バリア接合が報告されてから、現在までの間に 積層型の Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb 接合の進歩は目を見張るものがあり、既にいろいろな方面で応用がなされ実用化している. そのような状況で、磁性バリア素子を作製しても、その I-V 特性において Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb 接合に近い性能を出さない限り、実用化は難しいとされ不可能とさえ思われていた. しかし、本研究での結果が示すようにジョセフソン電流の消去には、ごくわずかな Ni が障壁層に不純物として含まれていれば良いことがわかることから、さらなる特性改善が期待できると考えている. 高性能な磁性バリア素子が実現したならば、FFO(Flux Flow Oscillator) との組み合わせで、ミキサ素子を高密度に集積でき、このことは電波天文ではリアルタイムの画像解析を可能とし、その他の微弱な高周波を観測する手段としてもその応用範囲が広がることが期待できる.

#### 参考文献

- [1] S.Imai, S.Morita, A.Ishikawa, Y.Takeuti, N.Mikoshihba, IEEE Trans. on. Magn., MAG-21, 906 (1985)
- [2] A.Shoji, S.Kosaka, F.Shinoki, M.Aoyagi and H.Hayakawa, Appl. Phys. Lett., 41, 1097(1982)