

高 Tc 超伝導デバイス SIFIS/SIS 接合の特性解析

Analysis of High Tc Superconducting SIFIS/SIS Device

拓殖大学大学院 工学研究科 機械・電子システム工学専攻 吉森研究室

梁瀬 拓海

指導教員 教授 吉森 茂

キーワード：高 Tc 超伝導体, ジョセフソン効果, 磁性体, TDGL モデル, ルンゲ・クッタ法

1. まえがき

1911 年、Hg(水銀)を用いた実験でオランダ・ライデン大学の物理学者オネスによって発見された。その後 1962 年、イギリス・ケンブリッジ大学の物理学者であるブライアン・ジョセフソンによってジョセフソン効果が予言された。ジョセフソン接合は電磁波検出器に応用される一方、近年はジョセフソン効果を応用した SIFIS/SIS 接合が提案され、新しいタイプの電磁波検出用デバイスとしての応用が期待されている。

本研究の目的は、高 Tc 超伝導体でできた新しいタイプの超伝導デバイス SIFIS/SIS 接合の特性を詳細に解析し、電磁波検出器への応用について検討することである。

2. SIFIS/SIS の構造と等価回路

図 1 に SIFIS/SIS 接合の模式図を示す。1 枚の磁性体を 2 枚の絶縁体で挟み、さらにそれらを 2 枚の超伝導薄膜で挟み込んだ構造を SIFIS 構造と言い、絶縁体を 2 枚の超伝導薄膜で挟み込んだ構造を SIS 構造と言う。ここで S は超伝導体、I は絶縁体、F は磁性体を示す。

SIFIS 構造(インジェクタ接合)には時間依存の GL 理論から導かれる TDGL モデルを適用し、SIS 接合(アクセプタ接合)にはジョセフソン接合の簡便な解析モデルである RSJ モデルを適用して、解析のための方程式を誘導する。SIFIS/SIS 接合の等価回路を図 2 に示す。

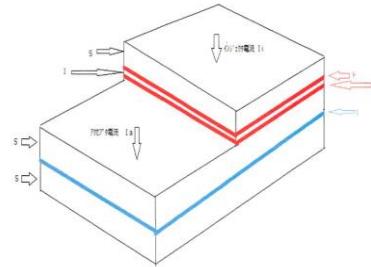


図 1. SIFIS/SIS 接合の模式図

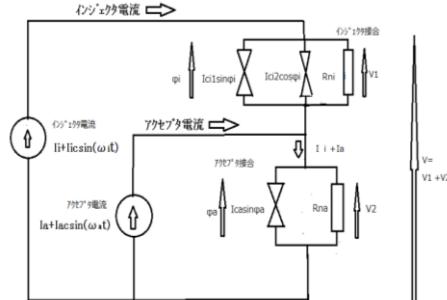


図 2. SIFIS/SIS 接合の等価回路

3. 解析方法

本研究では使用する高 Tc 超伝導体として、Bi-Sr-Ca-Cu-O (Bi2223) (臨界温度 $T_c = 110$ [K]) を仮定した。

アクセプタ接合に加える交流電流源の周波数を 1 [GHz] と仮定し、インジェクタ接合にも交流電流源を加えて、その周波数を変化させてアクセプタ接合両端の電圧波形を解析する。なお、アクセプタ接合の $I_c R_n$ 積は 77 [K] において 15 [mV] と仮定した。

インジェクタ接合及びアクセプタ接合の特性を解析するための理論式は、図 2 から次のようにになる。

- ・インジェクタ接合

$$I_i + I_{ic} \sin(\omega_i t) = I_{c1} \sin \varphi_i + I_{c2} \cos \varphi_i + \frac{V_1}{R_{ni}} \quad (1)$$

I_i : インジェクタ接合駆動用直流電流

I_{ic} : インジェクタ接合に加える電磁波の電流振幅

ω_i : インジェクタ接合に加える電磁波の角周波数

I_{c1} : インジェクタ接合の臨界電流

φ_i : インジェクタ接合両端の位相差

I_{c2} : インジェクタ接合の $\cos \varphi$ 項の電流振幅

V_1 : インジェクタ接合両端の電圧

V_{ni} : インジェクタ接合の正常抵抗

・アクセプタ接合

$$I_i + I_{ic} \sin(\omega_i t) + I_a + I_{ac} \sin(\omega_a t) = I_{ca} \sin \varphi_a + \frac{V_2}{R_{na}} \quad (2)$$

I_a : アクセプタ接合駆動用直流電流

I_{ac} : アクセプタ接合に加える電磁波の電流振幅

ω_a : アクセプタ接合に加える電磁波の角周波数

I_{ca} : アクセプタ接合の臨界電流

φ_a : アクセプタ接合両端の位相差

V_2 : アクセプタ接合両端の電圧

V_{na} : アクセプタ接合の正常抵抗

次に、式(1)と式(2)を I_{c1} で規格化して無次元化すると式(1)' と式(2)' のようになる。この式にルンゲ・クッタ法を適用して数値解析を行った。

$$\frac{d\varphi_i}{d\theta} = \frac{i_i + i_{ic} \sin(\theta) - \sin(\varphi_i)}{\alpha - \beta \cos(\varphi_i)} \quad (1),$$

$$\frac{d\varphi_a}{d\theta} = \frac{R_{na}}{R_{ni}} * \frac{i_i + i_a + i_{ic} \sin(\theta) + i_{ac} \sin\left(\frac{\omega_a}{\omega_i} \theta\right) - i_{ca} \sin(\varphi_a)}{\alpha} \quad (2),$$

4. 解析結果と考察

TDGL モデルには、クーパー対と準粒子との干渉に対応して $\cos \phi$ 項が現れる。ここでは、最初に $\cos \phi$ 項の係数である β の値によるアクセプタ接合両端の電圧 V_a の時間変化を解析例として示す。 $\beta = 0$ 、 $fi=3$ [GHz]、 $\beta = -1$ 、 $fi=3$ [GHz] の場合の数値解析結果が図 3 と図 4 である。

$\beta = 0$ は RSJ モデルに対応しているが、図 3 と図 4

を比べれば、アクセプタ接合の特性が全く異なることが分かる。

インジェクタ接合に磁性体を使用すると TDGL モデルを適用する必要が生じ、その結果、アクセプタ接合の特性は大きく変化する。

5. まとめと今後の課題

本研究では、新しいタイプの超伝導デバイス SIFIS/SIS 接合の特性について、ルンゲ・クッタ法による数値解析を行った。この超伝導デバイスを電磁波検出器に応用した場合、どのような特性を示すかについて理論解析によって明らかにすることが今後の課題である。

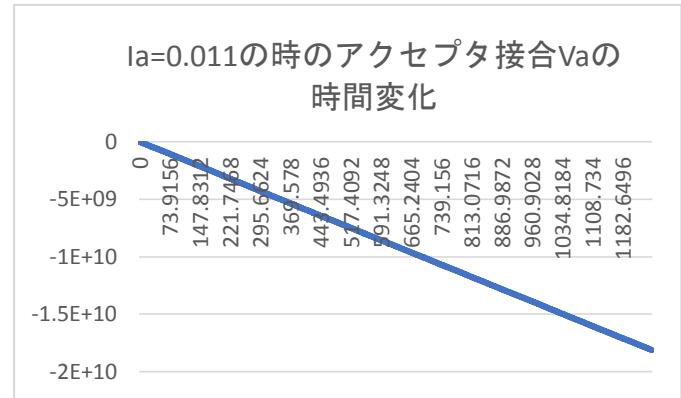


図 3 $\beta = 0$ 、 $fi = 3$ [GHz] の場合

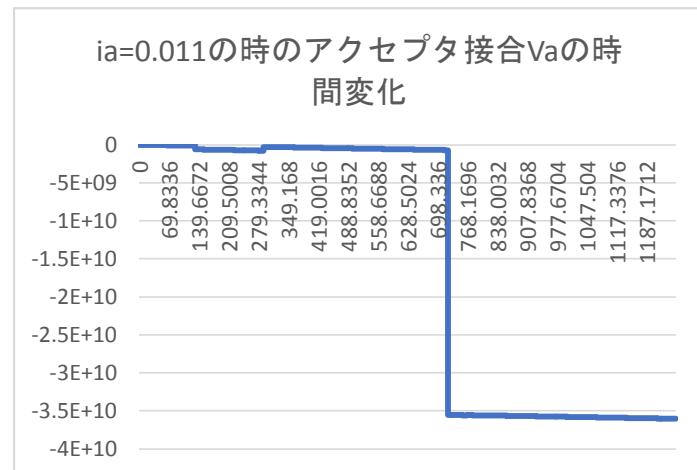


図 4 $\beta = -1$ 、 $fi = 3$ [GHz] の場合