

# 液体ヘリウムを必要としないジョセフソン電圧標準素子の開発

## Development of Josephson junctions for liquid-helium free voltage standard system

エレクトロニクス研究部門  
Nanoelectronics Research Institute

### 概要

産業技術の発展に伴って、簡便なジョセフソン電圧標準システムへの要望が高まっている。しかし、現在のシステムではジョセフソン素子を液体ヘリウムによって冷却する必要があり、そのコストが普及の拡大を妨げている。この問題を克服するために、窒化ニオブ(NbN)を素材とする電圧標準用ジョセフソン素子の開発を行っている。NbNは15Kを越える臨界温度( $T_c$ )を有しており、反応性スパッタリングによって特に基板加熱を加えなくとも高品質な薄膜を作製することができる。最近、10Kで動作させることのできるNbNジョセフソン素子(NbN/TiN/NbN素子)を開発することに成功した。この素子を用いることにより、液体ヘリウムフリー・ジョセフソン電圧標準システムを数年以内に実現させる予定である。

### Abstract

With the progress of industrial technologies, need for portable Josephson voltage standard system is increasing. However, widespread use of Josephson voltage standard system is prevented by the necessity of liquid helium in the operation of the system. To overcome the problem, we have been developing niobium nitride(NbN)-based Josephson junctions for voltage standard system. NbN is known as a superconductor having a critical temperature over 15K and its high-quality thin films can be prepared by reactive sputtering without using substrate heating. We recently succeeded to develop NbN-based Josephson junctions (NbN/TiN/NbN junction) which can be operated at 10K. Using this junction, we will construct a liquid-helium-free Josephson voltage standard system within a few years.

### 1.はじめに

図1に模式的に示すように、ジョセフソン素子(二端子素子)にマイクロ波を照射すると電圧  $V_n$  が発生する。そのとき、 $V_n$  は(1)式で記述される<sup>1)</sup>。

$$V_n = nf/K_{J-90} \text{ ----- (1)}$$

ここで、 $n$  は整数、 $f$  はマイクロ波の周波数、 $K_{J-90}$  は1990年から世界中で統一的使用されているジョセフソン定数の協定値( $=2e/h=483,597.9\text{GHz/V}$ )である。 $h$  はプランク定数、 $e$  は単位電荷である。

(1)式から分かるように、 $V_n$  はマイクロ波の周波数  $f$  によって決まり、ジョセフソン素子の材料、構造、寸法、温度などに依存しない。マイクロ波の周波数は非常に高い精度( $\sim 1 \times 10^{-10}$ )で決定することができるため、 $V_n$  も高い精度で決定することができる。これが、ジョセフソン電圧標準の原理である。

現在世界で30カ国以上の国々で、電圧の一次標準

(国家標準)を決めるために、ジョセフソン電圧標準が用いられている。しかし、それらの国々のほとんどは先進国であり、開発途上国では、ジョセフソン電圧

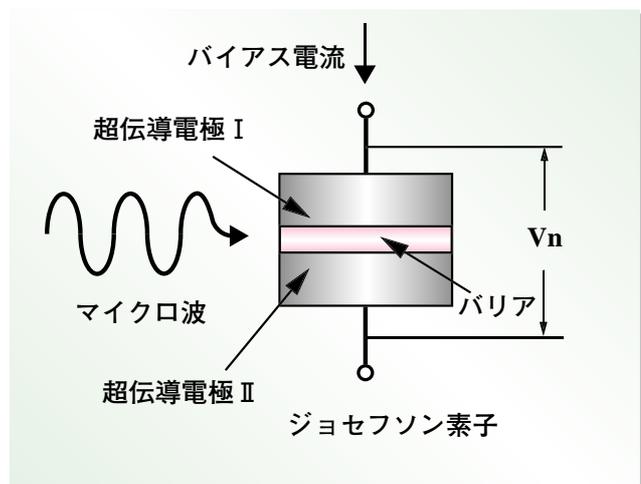


図1 ジョセフソン電圧標準の原理

標準はあまり普及していない。その最大の理由は、ジョセフソン素子を冷却するために高価な液体ヘリウムが必要なことにある。液体ヘリウムの価格は場所や年によって異なるが、1リッターあたり千円から数千円する。このため、システムの維持費用は年間百万円から数百万円に達する。

ジョセフソン電圧標準の普及を拡大するためには、液体ヘリウムを使用しないシステムの開発が必要である。もし、液体ヘリウムフリー・ジョセフソン電圧標準システムが開発されれば、標準研究機関のみならず、民間企業の工場などにおいてジョセフソン電圧標準システムが高精度電圧発生器として使用されることが予想される。

## 2. NbN/TiN/NbN素子の作製

図2に、今回開発した液体ヘリウムフリー電圧標準用ジョセフソン素子(NbN/TiN/NbN素子)の断面構造を模式的に示す。この素子は、下部NbN膜(300nm)、TiNバリア(30-50nm)および上部NbN膜(300nm)から成る。これらの窒化物膜は全て専用の真空装置内において反応性スパッタリングによって作製される。

NbNは15Kを越える臨界温度( $T_c$ )を有する超伝導体であり、反応性スパッタリングによって特に基板加熱を加えなくとも高品質な薄膜を作製することができる。TiNをバリアの材料として採用した理由は、(i)金属的な性質を有していること、および(ii)NbNに極めて近い格子定数を有していることにある。前者の性質のために、NbN/TiN/NbN素子はヒステリシスのない電流-電圧( $I-V$ )特性を示す(3.参照)。後者の性質は、NbN膜とTiN膜の界面を結晶学的に良い状態に保って素子を作製することを可能にする。その結果として、素子の良好な電気的特性が得られる。



図2 今回開発したジョセフソン素子の構造(模式図)

## 3. NbN/TiN/NbN素子の $I-V$ 特性

図3に、100個直列に接続されたNbN/TiN/NbN素子の10Kにおける $I-V$ 特性を示す。この例のようにNbN/TiN/NbN素子の $I-V$ 特性にはヒステリシスは見られない。これに対し、現在ほとんど全てのジョセフソン電圧標準システムに用いられているNb/AIO<sub>x</sub>/Nb素子の $I-V$ 特性には大きなヒステリシスが存在する。その原因は、Nb/AIO<sub>x</sub>/Nb素子が大きな静電容量をもつことにある。それに対し、NbN/TiN/NbN素子ではTiN膜が金属的な性質をもつために電荷が電極に蓄積されにくく、その結果としてヒステリシスは現れない。

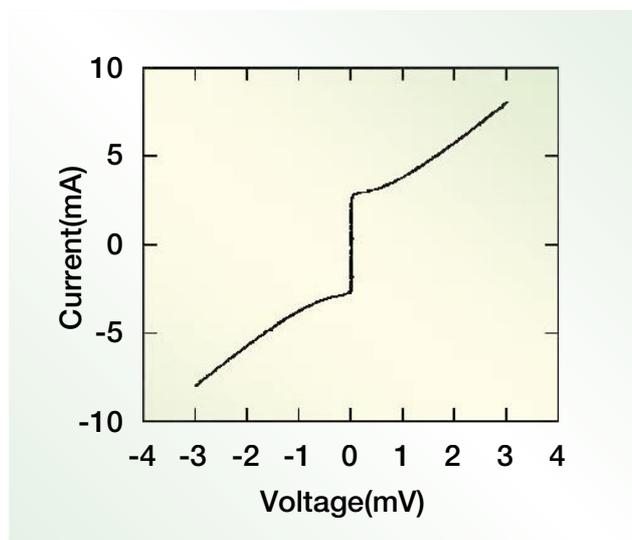


図3 100個直列に接続されたNbN/TiN/NbN素子の $I-V$ 特性(@10K)

## 4. 定電圧ステップの観測

図4に、128個、256個、512個、1024個および2048個のNbN/TiN/NbN素子を直列に接続したアレイに、10GHzのマイクロ波を照射し測定された $I-V$ 特性を示す。図4の枠外に示した数字は、バイアス電流を供給した素子の数を表す。測定温度は10Kである。6mAから8mAの間に明瞭な定電圧ステップが見られる。この実験結果は、NbN/TiN/NbN素子を、10Kにおいて電圧標準に使用することが可能であることを示している。

## 5. プログラマブル電圧標準への適用

NbN/TiN/NbN素子は、図5に示す「プログラマブル電圧標準」と呼ばれる電圧標準方式に適用することができる。プログラマブル電圧標準は、従来のジョ

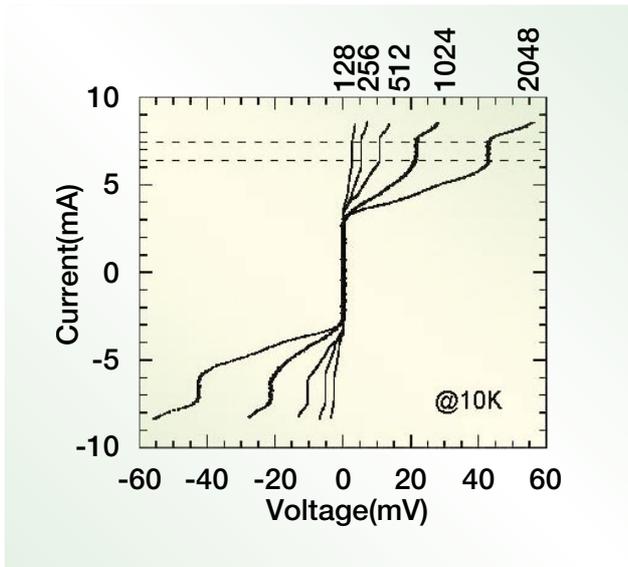


図4 マイクロ波を照射されたNbN/TiN/NbN素子アレイのI-V特性

セフソン電圧標準の欠点を克服するために、NIST (National Institute of Standards and Technology) のHamiltonらが1995年に考案した電圧標準方式である<sup>2)</sup>。

プログラマブル方式では、I-V特性にヒステリシスのない素子が用いられる。したがって、素子に流すバイアス電流の値を決めると素子の両端に現れる電圧の値は一意に決定される。このため、図5の各セグメントのスイッチを切り換えることによって素子の両端に発生する電圧の値を短時間で(<1ms)有限値からゼロに(あるいはその逆に)切り換えることができる。それに対し、従来のシステムでは、電圧の値を変化させるのに数十秒ないし数分の時間を要する。

プログラマブル方式のもう一つの実用上大きな利点は、雑音に対して高い耐性が得られることである。従来の方式では、カオス(無秩序な状態)の発生を避けるために、素子の臨界電流密度(単位面積あたりに流すことのできる超伝導電流)を $10\text{kA}/\text{cm}^2$ 以上に設定することはできなかった。この制約のために、定電圧ステップ(=一定の電圧を得るために許されるバイアス電流の変動幅)は、通常 $100\mu\text{A}$ 以下に制限されていた。その結果として、システムは外来ノイズの影響を受け易く、それを避けるために高価なシールド設備を必要としている。

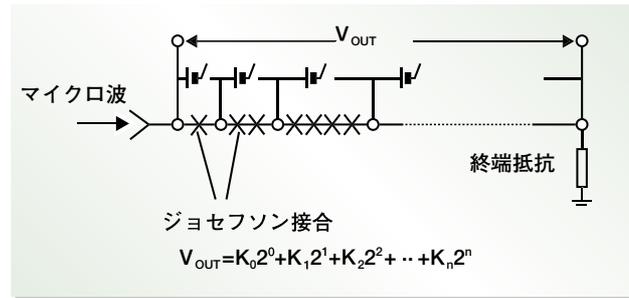


図5 プログラマブル電圧標準

それに対し、ヒステリシスのないI-V特性をもつ素子を使用するプログラマブル電圧標準ではカオスが発生しにくく、素子の臨界電流密度を高い値(数 $10\text{kA}/\text{cm}^2$ )に設定することが可能である。その結果として $1\text{mA}$ を越える定電圧ステップが得られる(図4参照)。つまり、ノイズに対する高い安定性が得られる。

結論として、今回開発したNbN/TiN/NbN素子を用いることにより、液体ヘリウムを必要としないだけでなく、高速応答性と耐雑音性を兼ね備えた電圧標準システムを確立することができる。

## 6. まとめ

今後10年以内に現在のジョセフソン電圧標準システムは全てプログラマブル電圧標準システムに置き換わることが予想される。それと同時に、液体ヘリウムを必要としないシステムを実現することができれば、開発途上国や産業界へのジョセフソン電圧標準システムの普及を一段と加速することができる。この観点から、NbN/TiN/NbN素子を用いた1Vプログラマブル電圧標準システムの開発を今後数年以内に実現することを計画している。さらに、より適用範囲の広い10V電圧標準システムの開発を近い将来行うことを計画している。

### <参考文献>

- 1) M.T. Levinsen et al., Appl. Phys. Lett., 31, 776 (1977).
- 2) C.A. Hamilton et al., IEEE Trans. Instrum. Meas., 44, 223 (1995).