

学位論文題名

ミリ波のジョセフソン電圧標準への応用に関する研究

学位論文内容の要旨

本研究は、通産省工業技術院電子技術総合研究所において、1990年1月1日から稼働した日本の国家標準としての第二世代ジョセフソン電圧標準システムの研究開発に際して、主としてミリ波系の技術開発を担当して得た成果、およびそれに基づき開発した産業用ジョセフソン電圧標準システムの成果をまとめたものである。

超伝導状態にあるジョセフソン接合にミリ波を照射した時に発生する n 次のジョセフソン電圧 V_n とミリ波周波数 f (GHz) の間には、次のような関係がある。

$$V_n = n f \cdot K_{J-90}$$

ここで n はジョセフソン電圧の次数(整数)である。 K_{J-90} は、国際単位系(SI)に整合した電気量の標準に使用するジョセフソン定数である。この関係から明らかのように、ジョセフソン電圧の精度と照射ミリ波周波数の精度は1対1に対応するので、CsまたはRb原子周波数標準を基準にして位相同期法によりミリは周波数を安定化する必要がある。第二世代の電圧標準ではさらに高精度とするため、標準電池の出力電圧と等価の1.018Vを直接校正することを目指していた。

従来は9.4GHzのガン発振器の周波数を 5×10^{-8} 程度までしか安定化できず、新世代のジョセフソン標準としては少なくとも 1×10^{-10} 以上の周波数安定化が望まれていた。本研究では位相同期系を構成する個々の要素の動作特性を綿密に解析し、系の動作が最適になるように位相補償と利得補償を施し、周波数安定度を 3×10^{-11} にまで向上させた。従来より3桁もの周波数安定化を実現した意義は大きく、この方式は日本の国家標準のみならず、国際度量衡標準局(BIPM)や米国、カナダ、フランス等多くの国立標準研究機関の採用するところとなっている。

さらに、標準電池の出力電圧を直接校正するに足るジョセフソン電圧を発生させるためにガン発振器から液体ヘリウム中にあるジョセフソン接合アレーに至るミリ波経路の伝送損失低減を誘電体導波管の改善により実現した。

本研究のもう一つの成果は産業用ジョセフソン電圧標準の技術基盤の確立である。標準電池を媒体とする現在のトレーサビリティ体系のもとでは産業界に供給される電圧標準の精度は2ppmであり、近年の工業製品の高精度化に対して障害となっていた。

このような状況を打破するために、その技術的困難さ故に国家標準として実験室内使用の域を出なかったジョセフソン電圧標準システムを、産業界の生産現場において使用可能にする必要があった。

このような観点から、産業界の環境下でも十分に動作するジョセフソン電圧標準システムを製作し、実際に精密電子測定機器の工場に設置して二年間以上の長期試験運用を実施した。その結果、国家標準と同等の精度である0.01ppmでの校正精度が得られ、かつ長期間精度の変動がないことを確認した。従来の産業用電圧標準より100倍以上の高精度化を実現したので、今後の工業製品の高精度の技術的基盤を確立したといえる。

本論文の構成は、国家標準としてのジョセフソン電圧標準システムのミリ波系の性能を向上させた内容の第一部と、その成果を応用して産業用ジョセフソン電圧標準システムの技術基盤を確立した第二部からなる。

第一部第1章では、ジョセフソン電圧標準の原理と第二世代電圧標準システムを実現するための条件を明らかにしている。第2章では、第1章の条件から、ミリ波周波数の安定度を大幅に向上させる位相同期法と、金属導波管に代り伝送損失を低減する誘電体導波管の改良について詳しく述べる。また、周波数安定化スペクトラムと周波数揺らぎの二面からジョセフソン電圧揺らぎへの影響を評価している。

第3章は、ジョセフソン接合単体について、不安定動作状態（カオス）と自己共振状態を避け、次に導波管を伝搬してきた電磁波をストリップラインモードに変換しストリップライン上部電極に接合を直列接続してアレーを形成する設計法と製作法を述べている。

第二部第1章では、産業用ジョセフソン電圧標準システムを実現する上で、ノイズを低減する技術および産業界の劣悪な電磁環境化でも稼働を可能にする雑音除去技術について述べている。

第2章では、産業用ジョセフソン電圧標準システムの開発と、それを二年以上にわたり、産業界の生産現場で試験運用した結果について述べている。

第3章では、ジョセフソン電圧標準が（S I）国際単位系に整合のとれた電圧標準であること、国際度量衡標準局（B I P M）から国家標準および産業界に至るまで統一的な量子標準が実現したことについて述べている。

第4章は結言で、本論文のまとめと、開発された産業用ジョセフソン電圧標準システムの社会的意義と今後の課題について考察している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 中 山 恒 義
副 査 教 授 阿 部 寛
副 査 教 授 大 場 良 次

学 位 論 文 題 名

ミリ波のジョセフソン電圧標準への応用に関する研究

本研究は、ジョセフソン電圧標準システムにおけるミリ波系の性能を著しく向上させることにより、日本の国家標準および国際度量衡局等の校正精度の向上に寄与し、そしてその成果を応用して精度限界に直面していた産業界の電圧標準の精度を従来より100倍以上向上させる技術基盤を確立したものである。

ジョセフソン接合にミリ波を照射したときに発生するジョセフソン電圧の精度はミリ波周波数の精度に対応するが、従来の周波数安定化方式では 5×10^{-8} 程度の周波数安定度しか得られず、度量衡に関する国際会議においても問題になっていた。本論文ではミリ波周波数の周波数安定系を構成する要素について綿密な解析を加え、位相補償と利得補償を施して系の応答を最適化することにより、94GHzのミリ波周波数に対し 3×10^{-11} の安定度を実現した。また、金属導波管にかわる誘電体導波管の改善により、ミリ波伝送線路の伝送損失の低減によりジョセフソン接合アレーへ照射する電力量を増加させ、ジョセフソン電圧を高め1.018Vの直接校正を可能にした。

またこれらの技術を産業界の環境においても利用できるようにするため、産業用ジョセフソン電圧標準システムを開発し、実際に生産現場に設置して長期試験運用した結果、国家標準と同等の精度で運用できることを確認

した。標準電池を媒体とする今日の電圧標準の精度は2ppmであり、高精度工業製品の生産上の障害となっていたが、本システムの実現により生産現場においても0.01ppmの精度での校正が可能になり、工業製品の高精度化に寄与する技術基盤を確立したことになる。主要な成果は以下の点に要約される。

- (1) ジョセフソン電圧標準システムのミリ波周波数(94GHz)の安定度を、従来より3桁向上させ、 3×10^{-11} にした。この方式は日本の国家標準や国際度量衡標準局(BIPM)、米国、フランス、カナダ等の国家標準研究機関にも採用されている。
- (2) 94GHzにおける金属導波管の伝送損失11dB/2.5mを、誘電体導波管の改善により、3dB/2.5mに低減させることによりジョセフソン接合アレーへ照射する電力量を増加させ、発生するジョセフソン電圧を高め1.018Vの直接校正を可能にした。
- (3) 産業界の環境下でも使用可能なジョセフソン電圧標準システムを開発した。
- (4) 産業用ジョセフソン電圧標準システムを2年間以上にわたり試験運用した結果、国家標準と同等の精度での校正が可能であり、かつ長期間精度の劣化がないことを確認した。このことにより、産業用電圧標準の精度は100倍以上向上した。

以上のように、本論文は国家標準レベルでの電圧標準の高精度化に貢献し、かつ産業界での実用を可能にし、応用物理学の発展に寄与するところが大きい。よって、本論文は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。