

氏 名	なか じま こう じ 中 島 康 治
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 53 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	ジョセフソン能動伝送線路に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 小野寺 大
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 小野寺 大 東北大学教授 佐藤利三郎 東北大学教授 穴山 武 東北大学教授 沢田 康次

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

情報処理装置に対する高性能化などの要求から, 超伝導電子素子に関する研究が各方面で活発に進められており, 特に最近ではジョセフソン接合内の磁束量子を情報担体とする試みが広く注目を集めている。本研究においてはジョセフソン能動伝送線路内の磁束量子の挙動を解析し, それに基づいて磁束量子を情報担体としてとらえ, 巨視的量子化を利用しあらゆる情報処理を行うというまったく新しい電子回路方式を提案し, 論理演算記憶回路の構成の可能性を考察する。

### 第 2 章 ジョセフソン接合

ジョセフソン接合の振舞いの物理的な概念を明確にするために, 空間に関して 0 次元, 1 次元, 2 次元の新しい機械モデルを提案し, 種々の動作について考察した。接合の I - V 特性について

は0次元のモデルで議論し、有限電圧状態に対して数値計算により相平面を求めた。外部磁場と接合の臨界電流の特性については1次元のモデルにより実験を行いフラウンホッフのパターンを求め、さらに接合長により本パターンが変形することを確かめた。接合内の磁束量子、磁束量子列、微小振動についても機械線路によりその状態を観察した。

### 第3章 ジョセフソン接合伝送線路

初めにジョセフソン能動伝送線路を記述するmodified sine-Gordon方程式に近似的に従う機械線路を製作し、その機械線路上で磁束量子に相当するキクの能動伝送に関する実験を行った。その結果1キクよりなるパルスの伝送は安定な一定速度で行え、その速度は線路の損失と印加トルクにより制御できることがわかった。限界速度に近い領域においては多数の対キクの生成する現象が観察された。複数のキクよりなるパルスの伝送においては、結合した同極性キクの伝搬という状態があることが観察された。キク列の衝突においては、すべてのキクが対で消滅する場合と、一部のキクが対消滅し他が透過伝搬を行う場合と、すべてのキクが透過伝搬を行う場合があることが明らかとなった。不均質部分をもつ線路においてはキクの保持が可能であること、保持キクと伝搬キクの相互作用により種々の状態が観察され論理機能動作の可能性があることが示された。次にmodified sine-Gordon方程式の数値解析を行い、磁束量子を示す解であるソリトンの振舞いについて調べ、機械線路における実験結果と比較検討した。数値解析により得られた結果を以下にまとめると、1) ソリトンの加速度は損失項とバイアス項の値により安定大幅に制御しうる、2) 限界速度付近で伝搬しているソリトンの後方において、多くの互いに逆極性のソリトン対の生成する現象が起こる、3) ソリトンの速度とバイアス値の関係は機械線路における結果と定性的に一致する、4) 3階の微分項をもつ方程式で得られるソリトンの速度は、3階の微分項をもたない方程式で得られるソリトンの限界速度を越えることがある、5) 複数のソリトンが結合して安定に伝搬する場合が存在し、この結合は伝搬ソリトンの後方に形成される細波構造により引き起こされる、6) 細波構造は数値計算の際の刻みに多少依存し、これはショック波の後方の振動と多くの点で類似している、7) 互いに逆極性の複数のソリトンを衝突させた場合は、損失項、バイアス項、ソリトンの個数、同極性のソリトンの間隔などの条件により、衝突消滅、透過伝搬の個数の比が種々の値をとるが、衝突時にはどの場合でも消費されるエネルギーが増大することが電力平衡方程式を用いて知ることができる、8) 線路の開放終端においては、ソリトンは損失とバイアスの値により消滅する場合と極性を反転されて反射される場合がある、などである。数値解析の場合方程式を差分化するが、それは微小面積のジョセフソン接合を超伝導線で接続した線路を表すという物理的意味も持っているから、差分化の程度を示す量である $A_J$ をパラメーターとした数値解析を行った。

それによるとソリトンは線路定数を調節することにより小さな領域に閉じ込めることができると、ソリトンの伝搬には常に細波が伴うため速度を上げるにはバイアスばかりでなく、細波による不安定を抑えるため損失をも大きくする必要があるので、それと関連し伝搬に関しては  $1/A_J - r$  (バイアス) 平面上に伝搬禁止領域、伝搬領域、伝搬不安定領域の3領域が存在することが分った。この結果は  $1/A_J$  を伝搬媒質の周期とみなせるから、その周期に依存してある範囲のエネルギーをもつソリトンのみが安定に伝搬しうることを示し、半導体のバンド構造と似た特性とみることもできる。次に実際の長いジョセフソン接合において磁束量子列の伝搬に関する測定を行った。この伝搬状態は接合の電圧  $V$  と外部磁場  $H_a$  の特性図 1 により明確に示され、その特性からは磁束量子の伝搬速度が得られ、また伝搬速度の限界値が接合の共鳴直流電流との関係により、やはりその特性図から得られる。実験で得られたこの限界速度の値は、 $\text{Sn}-\text{SnO}_x-\text{Sn}$  接合において  $2.1 \sim 3.4 \times 10^7 \text{ m/s}$ 、 $\text{Nb}-\text{NbO}_x-\text{Sn}$  接合において  $1.3 \sim 1.8 \times 10^7 \text{ m/s}$  であった。

#### 第 4 章 線路分岐

ジョセフソン線路について T, S 2 種類の分岐を考案し、分岐点における位相差の境界条件を求め、その境界条件によって機械線路における分岐を考案するとともに数値解析により分岐の動作特性を求めた。差分された方程式で記述される線路においても分岐点における位相差の従う方程式を求め、動作特性の数値解析を行った。これらの解析によりソリトンの伝搬に関する分岐の特性として、T 分岐については伝搬ソリトンの停止と通過の2種の特性を、S 分岐については伝搬ソリトンの停止や選択的な伝搬など5種の特性を得た。これらの特性はジョセフソン能動伝送線路のみにより、磁束量子を情報担体として、情報担体の増幅、伝送、伝送経路の制御が可能であることを示している。またソリトン列の分岐における動作を解析し、パラメータ-共振と関係があると思われる特性を得た。

#### 第 5 章 論理演算記憶回路

Modified sine-Gordon 方程式により表せる線路としてジョセフソン接合伝送線路と機械伝送線路を基本とし、超伝導弱結合伝送線路をも合わせて考え、磁束量子(機械線路においてはキルク)を情報担体とした論理演算記憶回路の設計を行い、並びに計算機実験によりそれらの機能を確認した。これらの回路は情報担体としての磁束量子の粒子性により従来の半導体などを用いた論理演算回路とは異なった新しい回路構成となっており、1例として  $n$  ビット加算回路を図 2 に示す。ジョセフソン線路による基本論理回路は多くとも数枚の真空蒸着による超伝導薄膜により作り出せる。しかし現実的には所望の部分へのバイアス電流の供給方法や、一様なそして安定な超伝導薄膜と絶縁層を作り出す技術に関する今後の研究が必要である。集中定数化した線路の

使用は現実的な面において、現在広く行われている微小面積の接合を製作する技術が転用できることや、線路の結合、分岐の構成が容易になるなどの利点がある。超伝導弱結合伝送線路による回路は電子ビームあるいはフォトエッチングなどの方法により、すべて同一超伝導薄膜の表面上に製作可能であり完全な平面構成となるため、本回路の製作は従来の多層構造を必要とするICの製作に比べて簡略である。また回路を能動化するバイアス電流の印加は回路を構成する超伝導膜に均一に電流を流すことにより回路各部への個別的な印加は必要とせず極めて容易になる可能性があり、本線路による回路は将来的に期待される。回路の演算時間、消費電力については用いる線路により差異はあるが、全加算器1けたの演算時間が約数10ps、その場合の消費電力が、演算動作において磁束量子の対消滅が行われる場合は $10^{-17}$ J以下、対消滅が行われない場合は $10^{-18}$ J以下と見込まれる。

## 第6章 sine-Gordon型方程式とGinzburg-Landau方程式

情報処理に関し2次元平面はより高度の可能性を有する形状であると考えられるため、磁束量子を情報担体として用いる方式を2次元空間へ拡張することを考え、簡単化された時間依存性をもつGinzburg-Landau方程式の数値解析を行った。初めに2次元空間における方程式の解析の準備として、1次元化されたG-L方程式を含む、1次元空間におけるsine-Gordon型方程式について、粒子的な孤立解の一般的な安定性に関して非線形ポテンシャル内の粒子列モデルによる直観的概念と数値計算により議論した。この安定性の条件を2次元の複素数場へ拡張してG-L方程式による磁束量子vortexの安定性を考察し、1vortex解は時間発展に対して安定であること、vortexの相互作用に関しては、同極性のものは反撥し合い、異極性のものは吸引し合いについては対で消滅するという1次元の場合の結果と基本的には同一の特性を示すことが明らかとなり、2次元空間の磁束量子を用いる論理演算の基礎的可能性が示された。

## 第7章 結 論

ジョセフソン能動伝送線路内の磁束量子の挙動について、機械線路によるモデル実験、数値計算、基礎実験などにより、伝搬特性、相互作用、伝搬媒質の周期性の影響、実際の磁束量子列の伝搬速度とその限界値などに関する結果を得た。線路分岐の数値解析により本線路のみにより情報担体の増幅、伝送、伝送経路の制御が可能であることが明らかとなったため、各種論理演算記憶回路の設計を行い、計算機実験によりその機能を確認した。最後に2次元空間への拡張を考え、簡単化された時間依存性をもつG-L方程式の数値解析を行った。

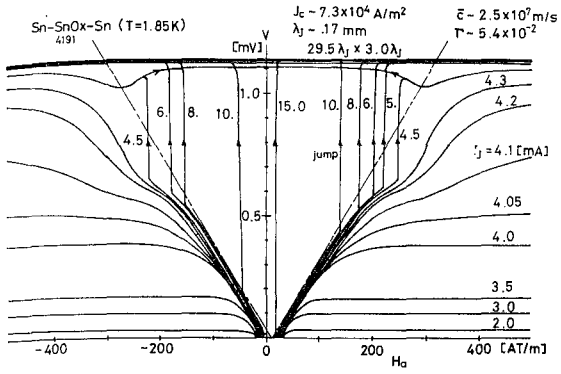


図1 接合電圧と外部磁場の特性

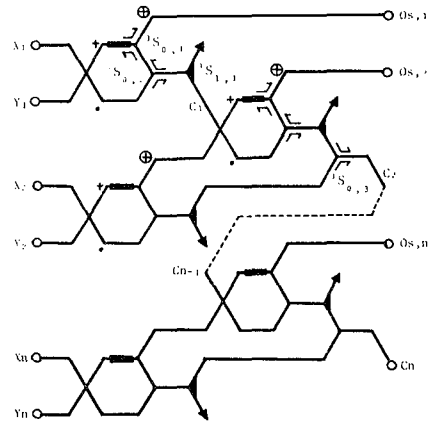


図2 nビット加算回路

## 審査結果の要旨

磁束量子を情報担体とする超伝導電子素子はデジタル情報の理想的な処理機能、高速動作、小型、低電力消費などの特長をもつことから、大型計算機用回路素子としての研究が進められているが、本超伝導素子のみで計算機に必要なとする情報の伝送、および処理をおこないうる効率的な回路方式はまだ見出されていない。

本論文は著者がこの問題の解決のために、ジョセフソン能動伝送線路に着目し、本線路と著者の考案した情報担体の伝送経路の制御及び増巾が可能である線路分岐とを組合せることにより、磁束量子による一貫した情報処理が可能である新しい高性能のデジタル情報処理電子回路が期待しうることを理論的に示した研究成果をまとめたもので、全文7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章ではジョセフソン接合の新しい機械モデルを提案し、製作することで、接合内での磁束量子、磁束量子列の伝搬、微小振動の物理的概念を明確にしている。

第3章ではジョセフソン能動伝送線路内の磁束の挙動を明らかにするため、Modified sine-Gordon 方程式の計算機による数値解析と、能動化した機械モデルの線路により、磁束量子の加速、伝搬、衝突状態などの結果をうると共に、Sn-SnOx-Sn 接合で磁束量子が光の約1/10の速度で伝搬しうることを実験的に示し、本線路の高速情報処理回路に有望であることを述べている。

第4章では、ジョセフソン線路の分岐素子を提案し、分岐点における超伝導電子の巨視的波動関数の境界条件を求めることで数値解析をおこない、本分岐により情報担体の増巾、伝送、伝送経路の制御が可能であることを明らかにしている。

第5章では、第3、第4章で得られた結果に基づき、積層構造を必要とせず、1枚の超伝導薄膜上に製作しうる完全平面構造の論理、演算、記憶などの電子回路の設計をおこない、計算機実験により、それらの機能を確認している。これは大きな成果といえる。

第6章では、磁束量子を情報担体とする回路方式を線路より面に拡張する基礎として、Ginzburg-Landau 方程式の数値解析をおこない、面上での磁束の安定性、反発、吸引消滅の現象を明らかにし、より高性能のデジタル情報処理回路の可能性について新しい知見を与えている。第7章は結論である。

以上要するに本論文は、ジョセフソン能動伝送線路、およびその分岐とにより高性能の情報処理電子回路構成について理論的にその可能性を与えたもので、この成果は電子工学に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。