

氏 名	こ ばやし ただ ゆき 小 林 忠 行
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	超電導弱結合電子素子に関する研究
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 穴山 武 東北大学教授 西沢 潤一 東北大学教授 沢田 康次

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

超電導弱結合電子素子の電子計算機への応用には従来半導体やクライオトロンで実現されているスイッチング方式を用いるものと磁束量子を情報担体とする方式が考えられている。後者の一方式として提案されている情報の伝送、伝送経路の制御、論理、増幅等の必要なすべての機能をジョセフソン線路のみに持たせる方法では、スイッチング時間が数 pS 程度で、かつその消費エネルギーが $10^{-18} \sim 10^{-21}$ J 程度の高性能の素子が期待できる。

磁束量子の伝搬する能動線路に関する研究は理論的・実験的になされているが、磁束量子の伝搬経路制御に関する研究は一部理論的になされているのみであり、この制御機能を有する分岐における磁束量子のふるまいについて実験的に解明することが必要とされる。本研究は超電導弱結合電子素子における磁束量子の伝搬経路制御に関する基礎的研究であり、近接効果素子を用いて

分岐を製作し、実験的に従来の理論の可否の検証と分岐の性質の解明を目的として行ったものである。

第2章 超電導弱結合電子素子の特性

ジョセフソン効果を示す各種超電導弱結合電子素子の特徴について比較検討した結果、近接効果素子は高温動作が可能であり、機械的・化学的に安定であり、完全平面性という形状的利点によって駆動電流の供給および集積化を容易にする等の特徴を有している。本素子は線路への応用も可能であり、磁束量子の伝搬および伝送経路制御に関する基礎的実験を可能にするものと考えられる。一般に超電導弱結合電子素子内を伝搬する磁束量子のふるまいは非線形波動方程式によって記述されるが、本素子のように容量Cの小さい素子では放物型非線形偏微分方程式によって記述され、磁束量子の伝搬速度を上昇させるには、素子の単位長さあたりのインダクタンスLとコンダクタンスGを小さくし、その臨界電流 J_C を大きくすることが導出される。印加電流 J_C 程度の時における近接効果素子内を伝搬する磁束量子の速度は $\sim 10^5$ m/secのオーダーであり、SIS接合素子に較べ遅いが、これは将来改善が見込める。本素子の等価回路および機械モデルは放物型非線形偏微分方程式から容易に求めることができる。

第3章 分岐

4個の弱結合電子素子の弱結合領域が一点で連結されている場合、各素子の位相差は結合点のまわりで次の量子条件を満たしなければならない。

$$\phi'_1 + \phi'_2 + \phi'_3 + \phi'_4 = 0 \quad (1)$$

ここで $\phi'_1, \phi'_2, \phi'_3, \phi'_4$ は各々近接効果素子 J_1, J_2, J_3, J_4 の結合点における位相差である。

前章で述べた放物型非線形偏微分方程式と量子条件(1)式より4つの近接効果素子によって構成された分岐の等価回路は図1(a)のように表示され、その結果分岐の機械モデルは図1(b)のように表現できる。等価回路における臨界電流 I_C 、インダクタンスL、抵抗R、位相差 ϕ 、電流 I_0 は機械モデル系の $mg/l, \phi_0/(2\pi K), \phi_0/(2\pi k)$ 、振り子の回転角 θ 、トルク T_0 に各々対応している。ここで ϕ_0 :磁束量子、 m :振り子のおもりの質量、 g :重力加速度、 l :振り子の長さ、 K :トルク定数、 k :ダンピング定数である(図中ダンピング定数に関する効果は省略)。結合点は量子条件を満たすようにディファレンシャル・ギアで構成できる。本章では、臨界電流の異なる近接効果素子によって構成された分岐において磁束量子の伝搬経路制御に関する特性を等価回路および機械モデルから検討した。

第4章 素子の製作とその測定方法

単一直線型近接効果素子には、機械的堅牢、化学的安定性より材料としてNb/Ta, Nb/Zrを用い、分岐には製作上の容易さからNb/Taを用いた。これらの材料は電子ビーム蒸着法によりガラス基板上に連続的に蒸着された。サブミクロンの弱結合領域を製作するためにフォトレジストを用い光学顕微鏡による投影法と陽極酸化法を使用した。分岐素子の弱結合領域近傍の顕微鏡写真を図2に示す。測定はロックイン・アンプを用いて各素子の dV/dI_0 (微分抵抗-電流) 特性を調べることにより行なった。

第5章 実験結果および検討

単一直線型近接効果素子はマイクロ波の照射に対し100GHz程度の応答を示し、その特性も従来報告されているものと同じ特性を示した。分岐素子については細線分岐(SC-1)と loose coupling turning point を持った分岐(SD-1)の2種類の素子を調べた。SC-1の J_1 側に電流を流した時、流しえる最大超電導電流の外部磁場依存性は回折模様を示すことから有限電圧状態は磁束量子の運動によるものと考えられる。分岐を構成する近接効果素子の1つ(以下“支線”と記す)に電流 I_0 を流し増加させ、その他の支線が微分抵抗零状態より有限抵抗状態に転移する電流 I_{0c} の印加磁場中での測定から磁束量子の伝送経路順序を調べた(表1)。分岐SC-1の各支線の I_c の大小関係はその微分抵抗値、弱結合領域の幾何学的形状より $I_{c1} > I_{c3} > I_{c4} > I_{c2}$ であることが期待され、表1は I_{c2} と I_{c4} がほぼ等しいことを示しているものと考えられる。磁束量子は I_0 が直接供給されていない支線のうち I_c の最も小さい支線に伝搬しやすく、その伝搬経路は非可逆的な性質を示す。図3は6mGの印加磁場中で I_0 を J_1 側に、制御電流 I_1 を J_4 側に流した時の $I_{0c} - I_1$ 特性であり、その結果は I_1 の適当な値とその極性により磁束量子伝送経路の制御が可能であることを示している。 I_1 が比較的大きい値の場合、印加磁場極性と電流の方向に依存する負の電圧発生が観測され(図4では $20 < I_0 < 34 \mu A$ の範囲で J_4 に負の電圧が発生。図3にはN.V.で記す)、外部印加磁場による磁束量子が分岐内を伝搬し、その伝搬方向を印加磁場と電流の極性により制御できるという結果が得られた。素子SD-1の場合、 I_c はSC-1のそれに比べて大きい値であるため、large area junctionに似た $I_c - H$ 特性が得られ(I_0 を J_3 に流した時)、負の電圧発生は外部印加磁場の極性に依存しないが、磁束量子の伝送経路および I_1 によるその制御はSC-1と同様な特性であった。これらの実験結果は第3章で述べた機械モデルにより定性的に説明できる。本分岐素子は分岐内の磁束量子がマイクロ波とエネルギーの授受を行ない、磁束量子の同期伝搬、高周波検波の証明と高周波発振の間接的証明を意味するマイクロ波応答を示している。マイクロ波を印加した時の $dV/dI_0 - I_0$ 特性は水ポンプモデルで説明され、動的な磁束量子のふるまいは各支線のノーマル・コンダクタンスにより大きく

影響される。一支線から伝搬してきた磁束量子の他支線への分配は I_c とノーマル・コンダクタンスによって決定されるためその分配特性を電流印加により制御できる。

第6章 結 論

近接効果素子を用いて製作された分岐における磁束量子の伝送経路の基礎的研究を行なった結果、次のことが明らかになった。外部磁場印加のもとで分岐を構成する適当な支線に電流を供給した場合、磁束量子の伝送経路は分岐の I_c によって決定され、その I_c を変えることによりその経路は非可逆的にできる。制御電流を供給することにより磁束量子の伝送経路を制御することができ、その入出力分岐線の決定も可能である。磁束量子の分岐の伝搬特性もその制御電流により容易に変えることができる。loose coupling turning point を含む分岐は磁束量子の伝送経路を任意に制御し得る特性を持ち、分岐として製作容易の利点を有する。

		I_0 非駆動支線			
		J_1	J_2	J_3	J_4
I_0 駆動支線	J_1	(1)	1	3	1
	J_2	3	(1)	2	1
	J_3	3	1	(1)	1
	J_4	3	1	2	(1)

表1. SC-1における磁束量子伝搬経路順位

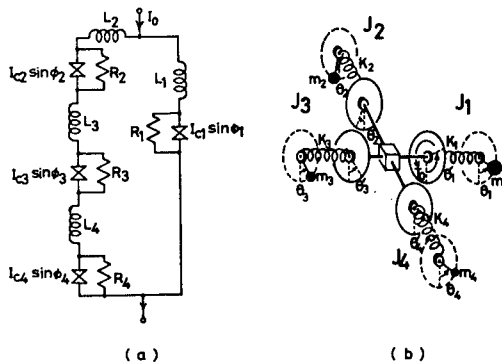


図1. 分岐の(a)等価回路と(b)その機械モデル

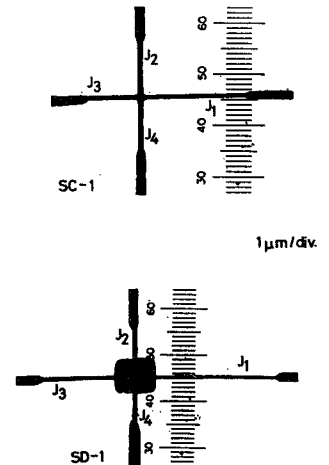


図2. 分岐素子の弱結合領域近傍の顕微鏡写真

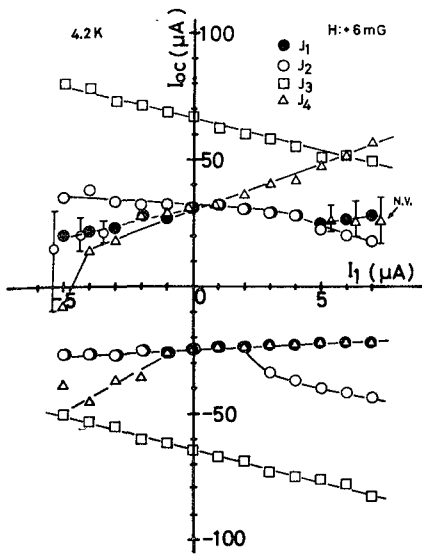


図3. SC-1の J_1 に I_0 , J_4 に I_1 を流した時の $I_{oc} - I_1$ 特性

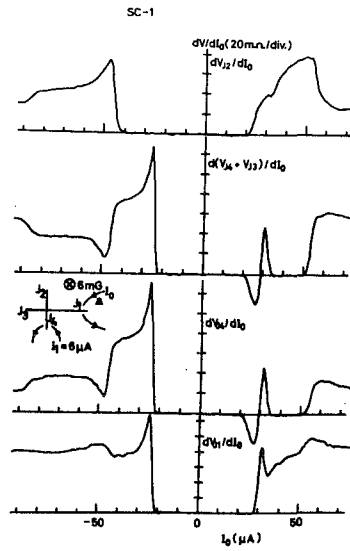


図4. $I_1 = 6 \mu A$ における各支線の $dV/dI_0 - I_0$ 特性

審査結果の要旨

ジョセフソン能動線路と、その線路分岐とにより、磁束量子を情報担体とする高性能の超電導デジタル情報処理回路を構成しうる可能性が理論的に示されているが、磁束量子を所望の能動線路に伝搬させるための線路分岐については、製作の困難性からその機能の実験的検証はまだおこなわれていない。

著者はジョセフソン効果を示す素子素子のうちで近接効果を利用した超電導弱結合素子が比較的製作が容易であり、特性が極めて安定であることに着目し、本弱結合構造の線路分岐の製作を試み、成功した。本論文はこの弱結合線路分岐電子素子の磁束量子伝搬特性についての実験的研究の成果をまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、近接効果を利用する弱結合素子を放物型非線形偏微分方程式により解析したその等価回路を示すことにより、本素子の特徴を明らかにすると共に、高周波特性の改善法など新しい知見を与えている。

第3章では、第2章で述べた弱結合構造を用いた線路分岐について理論解析をおこない、さらにその挙動の物理的概念を明確にするための機械モデルを提案することにより、本線路分岐の磁束量子伝搬特性、その伝搬経路の制御可能性、分岐端の磁束量子の非可逆的伝搬特性を詳細に説明し、その期待される機能を明らかにしている。

第4章では、顕微鏡を利用する光学パターン縮尺法によるフォトリソグラフ面への露光と、陽極酸化法とにより0.5 μ m程度までの弱結合線路分岐の製作に成功したことを述べている。

第5章は製作した線路分岐の測定結果を述べており、本分岐が約100GHzまでの高周波応答をもつ電子素子であり、直流制御電流の印加により、あるいは素子の臨界電流値を製作時に調整することで、磁束量子を所望の経路に伝送しうることを、またその磁束量子の分岐への伝搬特性も制御可能なこと、さらに磁束量子の入出力端を他の分岐端より制御決定しうることを明確に示している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、超電導線路分岐素子がデジタル回路素子、またマイクロ波素子として期待しうる特性をもつものであることを実証したもので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。