

氏 名	ふじ 藤	まき 巻	あきら 朗
授 与 学 位	工	学	博 士
学位授与年月日	昭和 62 年 3 月 25 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) 電子工学専攻		
学 位 論 文 題 目	ジョセフソンサンプラーによるフラクソイド量子の 動的特性に関する研究		
指 導 教 官	東北大学教授 沢田 康次		
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 沢田 康次	東北大学教授 穴山 武	
	東北大学教授 御子柴宣夫	東北大学助教授 大矢銀一郎	

論 文 内 容 要 旨

超伝導閉ループ内では磁束が量子化されフラクソイド量子となる。超伝導位相モード論理回路はこのフラクソイド量子を情報担体とし、ジョセフソン素子を量子のゲートとした回路であり次のような特徴を有する。(1)信号の保持状態は量子力学的に安定な状態であり、信号保持によるエネルギーの散逸はない。(2)信号の伝搬は2つの量子状態間での遷移と見なすことができ、スイッチング速度は不確定性原理によって限界づけられる。以上より、位相モード回路によって回路構成をすると、超高速・高密度・低消費電力の計算機が実現されることが期待できる。また位相モード回路の最も基本となるジョセフソン線路内ではフラクソイド量子は sine-Gordon 方程式に従うソリトンとして振舞うことが知られており、位相モード回路開発はソリトンの工学的応用の第一歩とも言える。

このように開発意義の大きい位相モード回路であるが、情報担体のフラクソイド量子が持つエネルギーがあまりに小さすぎて直接観測できなかったのが原因でこれまで実験による研究はあまりなされていなかった。そこで本研究では、1量子ジョセフソンサンプラを新たに開発し高分解能でフラクソイド量子に伴う電流波形を観測することにより、フラクソイド量子の位相モード回路内における動的な振舞いを明らかにする。

本論文は全体で7章で構成されている。第1章は序論である。第2章では、位相モード回路の現状を把握するために実際に鉛合金法によってAND回路、FLIP-FLOP的な働きをする回路を試作した結果について報告する。実験の結果、位相モード回路の動作の検証はなされたが、動作がフラクソイド量子

1個によるものかどうか、スイッチング速度、フラクソイド量子の空間的な広がりは明らかにできなかった。これらの点を解明するためには高分解能の波形観測技術の確立が必要となってくる。

第3章では、第2章で判明した問題点を克服するための手段として用いた1量子ジョセフソンサンプラについて記述している。一般にジョセフソン接合はしきい値電流 I_0 を持つ非常に高速なコンパレータ（比較器）として働く。従ってこのコンパレータにインパルス状のサンプリングパルスと未知信号電流を加え、更に全電流がちょうど I_0 になるようにバイアス電流を設定することができる。すなわちサンプリングパルスの印加された“ある瞬間”の未知信号の大きさをバイアス電流値によって読みとることができる。未知信号波形は、サンプリングパルスの発生のタイミングをピコ秒オーダーで制御・走査することで再現される。ジョセフソンサンプラの分解能はサンプリングパルスのパルス幅に比例していることから、高分解能のジョセフソンサンプラを得るためには急峻なサンプリングパルスが必要となる。1量子ジョセフソンサンプラはDC-SQUIDがボルテックス遷移の際に発生する時間半値幅数ピコ秒のパルスをサンプリングパルスとしたもので、同じ臨界電流密度を持つ従来のジョセフソンサンプラに比べ約30%の分解能向上が期待できる。

第4章では実際に1量子ジョセフソンサンプラを試作し、DC-SQUIDの各遷移波形、すなわちボルテックス遷移、電圧遷移、セルフリセッティング発振を観測した結果を報告している。図1はこのうち電圧遷移波形をDC-SQUIDに印加するバイアス電流を変えて観測したものである。

低いバイアス電流の時はフラクソイド量子1個によるパルスが立上がり部に見出される。一方バイアス電流が高くなると通常の電圧遷移波形となる。この観測結果から電圧モード回路（ジョセフソン接合の零電圧状態と有限電圧状態を信号の“0”，“1”に対応づけて論理を構成する回路）と位相モード回路の性能比較が可能となる。まず信号レベルは位相モード回路、電圧モード回路とも 1.3Ω の抵抗を介して $90\mu\text{A}$ と低温環境を考えると十分な値であった。スイッチング時間は位相モード回路が $5\sim 10\text{ps}$ 、電圧モード回路が 15ps 以上となっており位相モード回路に優位性があった。また位相モード回路はフラクソイド量子のソリトン性からくる波形整形作用のためバイアス電流によって波高値に変化がなかったのに対し、電圧モード回路では立上がり時間に大きな変動が見られた。このような両者の違いはすべてスイッチングに介在するフラ

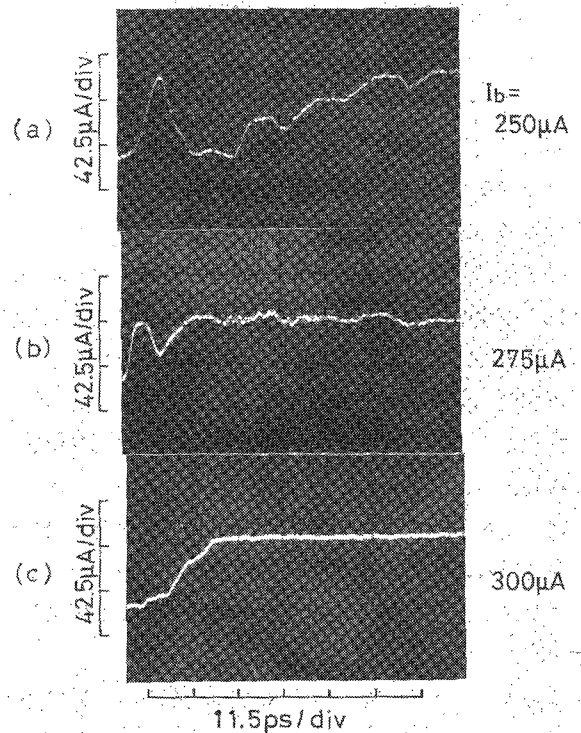


図1 DC-SQUIDの電圧遷移波形

クソイド量子の数によるもので、1個のフラクソイド量子を使っているということから位相モード回路の方が優れていると判断できる。また1量子ジョセフソンサンプラの性能は時間分解能5 ps，電流感度5 μA と見積もられる。この値は同程度の臨界電流密度を持つジョセフソンサンプラの中では最も優れたものである。

第5章では、位相モードの最も基本となるジョセフソン線路の動特性、すなわちフラクソン（ジョセフソン線路中でのフラクソイド量子の呼称）の挙動を解明している。図2はフラクソンの伝搬波形の線路バイアス電流依存性を示したものである。波形からフラクソンのソリトン性が見出される。同様な実験では線路バイアス電流の増加に伴うフラクソンのローレンツ収縮も観測されている。図2において線路バイアス電流が7.0 mAの時に終端（開放端）での反射が観測されている。開放端は方程式上では終端部においてフラクソン-反フラクソンの衝突が起こったものと等価である。すなわち線路バイアス電流が低い場合は衝突によるロス開放端でのフラクソンの消滅が起こり、ある値以上に線路バイアスが高くなると反フラクソンとなって入射方向と逆方向へ反射していく。実験結果は定量的にこのような理論を裏付けている。図3は1つのフラクソンを2つのフラクソンに分割（増幅）するファンアウト回路を用いてフラクソンの伝搬速度を観測した結果である。図中の最初のパルスが270 μm のジョセフソン線路を伝搬してきたフラクソン、2つ目のパルスが810 μm の線路を伝搬してきたフラクソンである。線路長さ及び2つのパルスの時間差よりフラクソンの速度は $3.4 \times 10^7 \text{ m/s}$ と測定され、光速の58%の速度で伝搬していることが明らかとなった。また、線路バイアス電流の増加に伴うフラクソンの伝搬速度の増大が実験的に確認されている。

第6章では、フラクソン-反フラクソンの衝突・対消滅の様子を新たな装置によって観測した結果を示す。ジョセフソン線路の両端からフラクソン、反フラクソンを導入するタイミングをピコ秒オーダーで制御することで線路上の任意の部分で2量子を衝突させることができる。これを利用して線路中央に設けたジョセフソンサンプラにより電流をモニターすると、線路内でのフラクソンの空間分布が明らかとなる。また同時に通常のジョセフソンサンプラによる時間掃引を行うことで時空間波形観測が可能となる。図4は、2量子の対消滅の様子を示したものである。対消滅の過程はブリーザーディケイによること、フラクソンが200 μm の大きさを占めていること、また静止時に比べ約70%

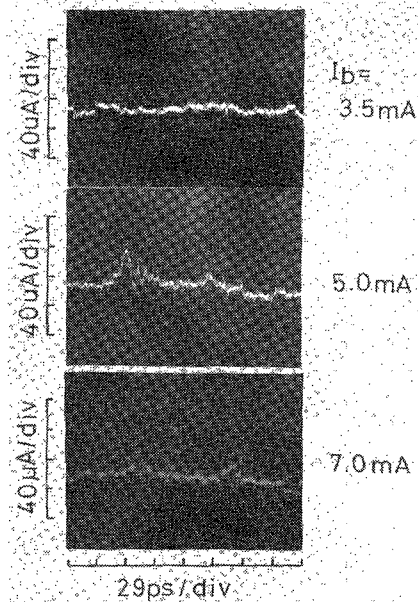


図2 線路バイアス電流によるフラクソン伝搬波形の変化（終端反射）

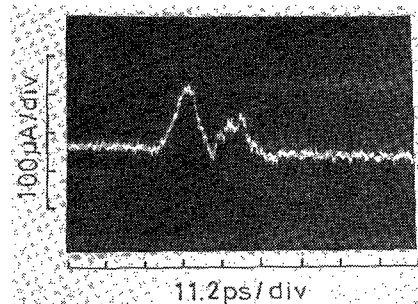


図3 ファンアウト回路出力波形観測例

にローレンツ収縮していることが見出される。現実的物理系におけるソリトン相互作用の時空間観測は初めてのものであり、この結果はソリトン物理の発展にも大きく貢献するものと考えられる。

第7章では本研究の結論を述べている。以上要するに本研究は高分解能ジョセフソンサンプルによりフラクソンを直視することで、フラクソンの速度、波形、ソリトンの性質及び2量子相互作用を解明した。この結果は位相モード回路の実用化・ソリトンの工学応用に大きな貢献をしたものと考えられる。

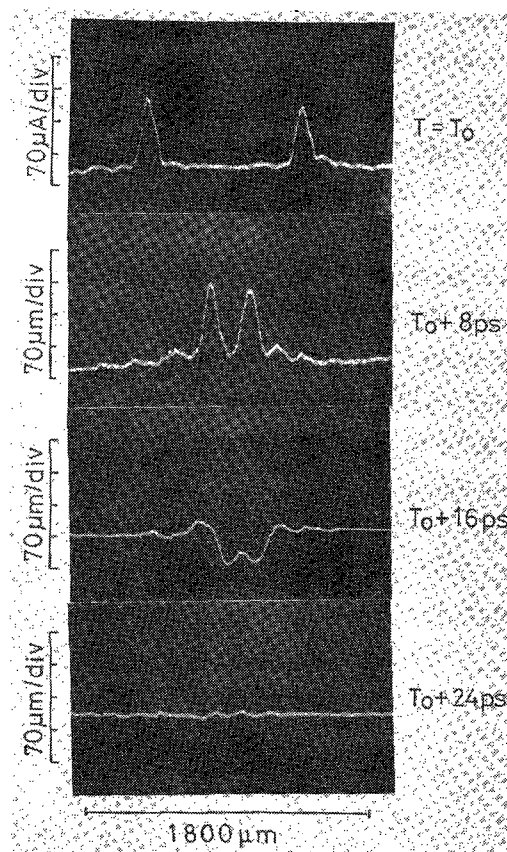


図4 線路内電圧の時空間波形観測例

審査結果の要旨

超伝導ジョセフソン接合素子は、その電流が臨界値以上で端子間に電位差が生じること、その遷移時間が数ピコ秒、消費電力が数マイクロワットと従来のものに比べて高速低消費電力であるために、将来の論理演算素子として注目されてきた。この零電圧から電圧状態への遷移を用いる方式は電圧モード方式とよばれる。一方、ジョセフソン接合を含む超伝導閉ループはその中の磁束を量子化する。接合電流によるこの磁束量子の制御と超伝導線路分岐部での磁束量子間相互作用を基礎にした量子演算回路、即ち回路のどの部分にも DC 電圧を生じることなく量子状態の位相変化によって演算する回路を作ることが出来る。この方式を位相モード方式と呼ぶ。位相モード方式は電圧モード方式に比べて消費電力は更に小さく数々の利点をもっていて、量子計算機のプロトタイプと考えられるにもかかわらず、その動作を確認する手段がなかったために開発が遅れていた。

著者は、DC SQUID から放出される磁束量子にともなう電流パルスをサンプリングパルスとして、未知のピコ秒パルスの波形を測定するジョセフソンサンプラを製作し、位相モード演算回路中の量子の振舞いを直接観測し、位相モード計算機の論理演算に必要なとされる量子の性質を研究した。本論文はこれらの成果をまとめたもので全編 7 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、位相モード電子計算機回路の重要性と、磁束量子直接観測の必要性を記している。

第 3 章では、ジョセフソンサンプラの原理、第 4 章はその製作と得られた特性について述べている。著者は、高い分解能を持つサンプラを製作するために、そのパルス幅を極限まで短縮する回路設計を行った。製作されたサンプラの実測によるとパルス幅は 5 ピコ秒以下であり、これを用いて DC SQUID の電圧モード・位相モードのスイッチ波形・セルフリセッティング発振を初めて観察することが出来たのは評価出来る。

第 5 章では、超伝導線路を伝搬する磁束量子の波形、入力特性、反射特性、ファンアウト動作、伝搬速度を測定した結果について述べている。

第 6 章では、サンプラに工夫をこらして磁束量子とその反量子の衝突波形の時間変化を観測することに成功したことを記している。磁束量子はサインゴールドン方程式に従うソリトンの一つであるが、以前にマイクロな系でソリトンの衝突が直接観測された例はなく、この成果はそれ自身大きく評価される。

第 7 章は結論である。

以上要するに本論文は、創意ある工夫をこらしてジョセフソンサンプラを製作し、磁束量子の挙動に関して数々の新しい観測を行い、超伝導量子計算機製作に必要な基礎的知識を飛躍的に発展させたもので、電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

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。