

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2009

課題番号：18080007

研究課題名（和文） 単一磁束量子局在電磁波集積回路プロセスに関する研究

研究課題名（英文） Study on Fabrication Process of Single-Flux-Quantum Localized Electro-Magnetic Wave Integrated Circuits

研究代表者

藤巻 朗 (FUJIMAKI AKIRA)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20183931

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学

キーワード：超伝導、単一磁束量子回路、ジョセフソン接合、二硼化マグネシウム

### 1. 研究計画の概要

単一磁束量子回路の低消費電力性と高速性に加え、我々は信号を空間的に局在した電磁波として集積回路内の導波路を光速で伝送させる技術を開発、これを局在電磁波集積回路とした。しかし、高速性の反面、占有面積が大きく、高集積化に対しての課題を残していた。本研究ではこの課題の克服に向けて、新しい材料を利用することでジョセフソン接合（以下、単に「接合」と書く）の高性能化（高速化、高インピーダンス化）を図り、現在の2-4倍の速度向上と1桁以上の高密度化を目指す。具体的な課題・計画は、以下の通りである。なお、(2)(3)は申請当初は無かった課題であるが領域の目標達成に向け、領域内会議により、新たに始めた課題である。

#### (1) セルフオーバーダンブ NbN 接合の開発

超伝導電極 (S) として Nb より臨界温度の高い NbN を用い、高速化と高インピーダンス化を図る。同時に超伝導ギャップ電圧以下でのトンネル抵抗値を大幅に低減化し、セルフオーバーダンブ特性（電流-電圧特性上にヒステリシスが見られない特性）を目指す。この特性では、外部シャント抵抗が不要になることから面積の低減化に貢献する。接合の構造としてはトンネル障壁層 (I) に AlN、常伝導近接効果層 (N) に NbN<sub>x</sub> を持った NbN/AlN/NbN<sub>x</sub>/NbN 構造を追究する。

H20年度までに、SIS構造の接合の最適化とSINS構造でのセルフオーバーダンブ特性の獲得を目指す。H21年度は、Nb接合よりも大きな特性電圧 (>1.5mV) を実証する。

#### (2) MgB<sub>2</sub> ジョセフソン接合の作製・評価

NbN よりも臨界温度の高い MgB<sub>2</sub> 薄膜を利用し、これまで報告されている値よりも大

きな特性電圧を目指す。薄膜、および三層構造は同じ A01 班に所属する農工大・内藤教授のグループが作製し、加工評価を我々が行う。(3) 局在電磁波集積回路応用システムの開発

局在電磁波集積回路の応用として、超伝導転移端センサを多数搭載したシステムの信号処理回路を開発する。具体的には、検出器からの信号をデジタル化し、他の信号と時分割多重化し出力する機能を持たせる。また、どれか1個の検出器に信号が到来した場合にその検出器を選択し、デジタル出力を室温へ送るイベント駆動 A/D 変換器を研究する。

### 2. 研究の進捗状況

上記の課題に対する進捗を以下に記す。

#### (1) セルフオーバーダンブ NbN 接合の開発

H20年度前半までは、AlN、NbN<sub>x</sub> を堆積する形で接合を形成した。SIS構造では超伝導ギャップ電圧の低下、リーク電流の増加など、必ずしも優れた特性は得られなかった。また、SINS構造においては、オーバーダンブ特性が得られたが、再現性が悪かった。これらは、不均一なトンネル障壁層や界面近傍での超伝導性劣化を反映しているもの考えられる。そこで、AlNの形成法を、Al薄膜を原子状窒素により窒化する方法に変更した。その結果、SIS構造の特性は大幅に改善された。今後、SINS構造の試験を進める。

#### (2) MgB<sub>2</sub> ジョセフソン接合の作製・評価

MgB<sub>2</sub> 接合でこれまでトンネル障壁層として使われてきた AlN は、被覆性が不十分で、臨界電流密度も小さかった。そこで、障壁高さが低く、MgB<sub>2</sub> の構成元素であるボロンに着目した。これまで MgB<sub>2</sub> に対する微細加工技術を確立したのち、MgB<sub>2</sub>/B/ MgB<sub>2</sub> 接合を

作製した。磁場特性、マイクロ波応答より、ジョセフソン接合の形成を確認した。臨界電流密度もこれまで報告された値の3倍ほど大きい。超伝導ギャップ構造も観測されている。しかしながら、ギャップ電圧の低下が観測されており、界面の制御が求められる。

### (3) 局在電磁波集積回路応用システムの開発

これまで、検出器出力をデジタル化するための単一磁束量子 A/D 変換器をイベント駆動で動作させることに成功している。これにより、出力のあった検出器のみを選択し、信号を出力に送ることができるようになった。また、時分割多重化にも成功している。

### 3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。

[理由]NbN 接合は、まだ十分に満足できる特性ではないものの、世界で初めてセルフオーバーダンブ特性を得ることに成功している。また、MgB<sub>2</sub> 接合、応用システムのいずれも世界で初めての試みに成功している。以上より、上記のように自己評価する。

### 4. 今後の研究の推進方策

H21 年度は最終年度に当たるため、NbN 接合については、トグルフリップフロップによって高速性と省面積性の実証を目指す。MgB<sub>2</sub> 接合については、界面の制御を進め、より高い臨界電流密度を目指す。また応用システムについては、検出器からの信号を実際に受けることのできるシステムの実証を目指す。いずれもこれまでの研究の方向性を着実に遂行する内容となる。

### 5. 代表的な研究成果

[雑誌論文] (計 2 件)

1. R. Kanada, Y. Nagai, H. Akaike, A. Fujimaki, „Self-shunted NbN junctions with NbN<sub>x</sub>/AlN/NbN<sub>x</sub> multilayered barriers for 4 K operation,“ IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有り, *in press*.
2. A. Bozbey, S. Miyajima, H. Akaike, A. Fujimaki, “Single-flux-quantum circuit based readout system for detector arrays by using time to digital conversion,“ IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有り, *in press*.

[学会発表] (計 10 件)

1. 東陽介, 宮嶋茂之, 藤巻朗, “イベント駆動型セレクタを組み込んだ超伝導アナログ-デジタル変換器の開発”, 2009 年春季第 56 回応用物理学関係連合講演会, 31p-ZQ-14, 筑波大学, 2009 年 3 月 30 日
2. 宮嶋茂之, 東陽介, 藤巻朗, “4K における QOS 比較器の感度の評価”, 2009 年春季第 56 回応用物理学関係連合講演会,

31p-ZQ-13, 筑波大学, 2009 年 3 月 30 日

3. Ali Bozbey, 赤池宏之, 藤巻朗, “TES アレーに向けた読出し回路と実装方法の検討”, 2008 年秋季第 69 回応用物理学学術講演会, 4p-F-8, 中部大学, 2008 年 9 月 5 日
4. 長井友樹, 金田亮平, 赤池宏之, 藤巻朗, “NbN セルフオーバーダンブ接合へ向けた MgO 基板前処理の検討”, 2008 年秋季第 69 回応用物理学学術講演会, 4p-F-4, 中部大学, 2008 年 9 月 5 日
5. A. Bozbey, S. Miyajima, H. Akaike, A. Fujimaki, “Design of Single-flux-quantum circuit based read-out electronics for X-Ray sensitive TES arrays,” International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2008), Antalya, August 31, 2008.
6. A. Bozbey, S. Miyajima, H. Akaike, A. Fujimaki, “Design of single-flux-quantum circuit based read-out electronics for X-ray sensitive small-pixel TES arrays,” Eighth Int'l Workshop on Low Temperature Electronics (WOLTE2008), Jena, June 24, 2008.
7. 金田亮平, 長井友樹, 赤池宏之, 藤巻朗, “NbN/AlN/NbN<sub>x</sub>/NbN オーバーダンブ接合に向けた AlN 障壁層の特性評価”, 第 55 回応用物理学関係連合講演会 4a-ZH-4, 日本大学, 2008 年 3 月 28 日
8. A. Fujimaki, R. Kanada, Y. Nagai, H. Akaike, “Self-shunted NbN Josephson Junctions with AlN/NbN<sub>x</sub> Barriers,” 2008 Superconducting SFQ VLSI Workshop A1-2, March 17, 2008, Yokohama.
9. 赤池宏之, 金田亮平, 長井友樹, 藤巻朗, “窒化ニオブ電極を用いたオーバーダンブ型ジョセフソン接合の開発”, 電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会 SCE 2007-27, 機会振興会館, 2008 年 1 月 25 日
10. 金田亮平, 長井友樹, 赤池宏之, 藤巻朗, “NbN/NbN<sub>x</sub>/AlN/NbN<sub>x</sub>/NbN オーバーダンブ接合に向けた常伝導 NbN<sub>x</sub> 層の特性評価”, 第 68 回応用物理学学術講演会 28a-NA-2, 北海道工業大学, 2007 年 9 月 4 日