

平成 26 年 5 月 6 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2013

課題番号：25630171

研究課題名(和文) 直流電流駆動運動インダクタンス法を用いた高エネルギー分解能高精細イメージセンサ

研究課題名(英文) Superconducting image sensors based on current-biased kinetic inductance detectors

研究代表者

藤巻 朗 (FUJIMAKI, AKIRA)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20183931

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者らが提案した超伝導ナノワイヤ直流駆動運動インダクタンス検出器は、駆動が直流電流であること、また検出器自身の発熱が少ないことから、イメージセンサなどの多ピクセル化に適している。今回は多ピクセル化に向けて、超伝導検出器と超伝導信号処理回路を同一基板上に作製するモノリシックチップを構成した。検出器間は、低域過フィルタを検出器間に挟むこと、干渉を抑制した。光照射に応答した電圧変化を観測し、500個の検出器からなるリニアアレイ検出器が動作することを確認した。今後、イメージセンサとして、パラメータ等の最適化を行う予定である。

研究成果の概要(英文)：Current-biased kinetic inductance detectors (CB-KIDs) proposed by the authors have several features suitable for image sensors, though an operation of a single detector has been demonstrated so far. In this study, we tried to develop a monolithic chip on which a linear array composed of 500 CB-KIDs and a readout circuit based on the single flux quantum (SFQ) circuit are implemented. To suppress the interference between neighboring two detectors, we place low-pass filters between the detectors. When we apply an on-off modulated optical signal to the chip, a synchronized output signal is observed, suggesting that the linear array operates correctly. We will optimize circuit parameters for practical image sensors.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：超伝導検出器 単一磁束量子回路

1. 研究開始当初の背景

超伝導検出器は、超伝導転移端センサ (TES) の発明以来、約 15 年間で急速な進歩を遂げた。数 nm 厚の薄膜をサブミクロン線幅に加工した超伝導線による単一光子検出器 (SSPD) とともに、微小なエネルギーを持った粒子が入射することにより常伝導転移することを利用する。その優れたエネルギー分解能から、TES は既に X 線宇宙探索衛星に搭載されている。また、SSPD は、量子暗号通信への適用が図られている。さらに、粒子の照射により、超伝導電子数が減少することを共振回路の共振周波数の低下で検出するマイクロ波運動インダクタンス (MKID) 法が提案された。検出器出力の多重化 (周波数分割多重) が容易なことから、多検出器化にもっとも適すと考えられ、元素分析機器など各方面へ応用が図られている。

多検出器化は応用上強く求められるが、MKID 以外は、検出器の数だけ室温からのバイアス線が必要となり、熱や雑音の流入が問題となる。また自身が発熱することから、本質的に多検出器化に向かない。一方、MKID も含め、細線は長さ方向に対する空間分解能がない。加えて、MKID は応答時間が長いから、2 次元アレイにおいて、信号処理による粒子の入射位置特定支援が有効に行えない。

研究代表者らは、中性子検出器を研究開発の途上で、直流バイアス電流のもとで、粒子の到来を運動インダクタンスの変化として捉えられることを見出した。また、研究代表者が従前より取り組んできた単一磁束量子 (SFQ) 回路による時間-デジタル変換器を導入し、運動インダクタンスの変化量を読み出すことで、細線の 2 次元アレイであっても、粒子の入射場所を特定できることを見出した。これにより、超伝導検出器の高速性、高エネルギー分解能を生かした超伝導検出器によるイメージセンサが構築できるようになる。

2. 研究の目的

配線層が多層化・複雑化した半導体集積回路では、金属配線層間のマイクロショートなどの位置検出に、これまで以上に微小な光信号を高空間分解能で調べる必要が生じている。ここへの応用を念頭に、直流駆動運動インダクタンス法の光強度依存性、近傍に置く吸収体の効果などの基礎データとともに、複数の検出器を 1 つのバイアス線で駆動する際の隣接 2 検出器間の干渉抑制法を検討する。最終的には将来の 1 M ピクセル化の基礎となる 16x16 ピクセルの微弱光イメージセンサを目指す。

3. 研究の方法

細線 (厚さ 10nm 程度、幅 1 μ m 以下の Nb) を図 1 中破線楕円内で示したように U 字型に形成する。最終的には、細線近傍には吸収体を配置し、光を熱に変換したのち、そ

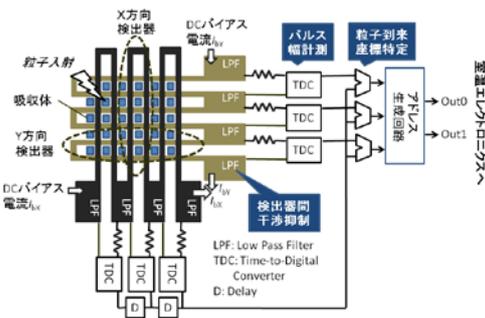


図 1 検出器チップのブロック図

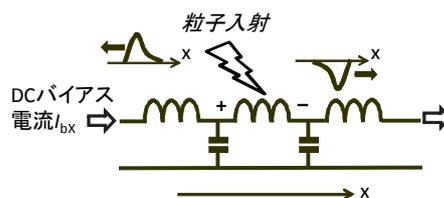


図 2 検出器の等価回路と運動インダクタンスの変化による電圧パルスの変搬

の熱を検出器で検出する。ただし、本研究の第一段階では直接光を照射することとし、吸収体は設けなかった。細線の下には層間絶縁層を介して接地面を設ける。

細線に直流バイアス電流を印加し、そこに光が照射されると、そのエネルギーにより近傍の細線の超伝導電子対密度が減少する。細線内部では、少なくなった電子対で同じ値の電流を流そうとするため、電子対の運動量が増加する。この運動量の増加が電気回路的には (運動) インダクタンスの増加として発現する。ファラデーの法則と同様、単位時間当たりの運動インダクタンスの増加が電圧として U 字の両端に発生する。これが、直流電流駆動運動インダクタンス法である。

図 2 が検出器の等価回路である。真ん中のインダクタンスの両端に発生した電圧は、正の振幅のパルスとしてバイアス電流の正側に、負の振幅のパルスとして負側に走行する。これらのパルスが隣の検出器に影響を与えないように、検出器と検出器の間には低域過フィルタを配置し、パルスを減衰させる。これにより、1 本のバイアス電流で非常に多くの検出器を駆動できるようになる。この手法による利点は、①NxN のマトリクスに対し出力端子数は 2N 個まで低減化。粒子数が少ない場合はアドレス生成回路により log₂N のオーダーまで低減化可能、②検出器の振幅をバイアス電流によって調整可、③LPF で信号を減衰させることで、検出器の立下り時間を 100ps 程度まで低減化。結果としてフレーム時間が大幅に短縮といった点が挙げられる。

本研究では、運動インダクタンス検出器の直列化と、それを具現化するための回路設計を行う。また、検出器の電圧を高速で読み出

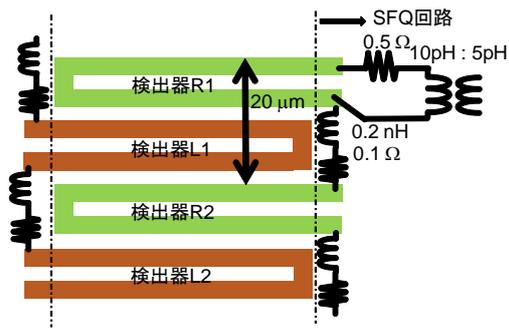


図 3 隣り合う検出器への干渉の抑制法と読出し回路との接続方法

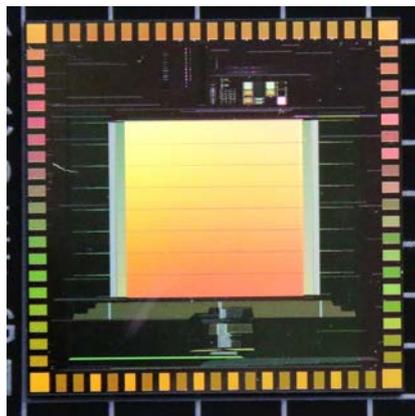


図 4 検出器と読出し SFQ 回路を一体化したモノリシックイメージセンサ

すために必要な SFQ 回路の設計と試作を行う。

4. 研究成果

電流バイアス運動インダクタンス検出器を多元化するには、目的欄でも述べたように、隣接する 2 つの検出器に対し、直流バイアス電流は共有化し、信号であるパルスは読出し SFQ 回路側に伝わるようにする必要がある。また、検出器の直列接続は、各検出器は接地面とは違う電位にあることを意味し、各検出器と読出し回路は、磁気的な相互結合などを利用する必要がある。

一方、この検出器の構造は、マイクロストリップ線構造をしている。超伝導体を使っていることを考えると、この構造は共振器を構成していることになる。ある検出器から隣接する検出器への信号伝搬の抑制は、反射を誘発していることとなり、長い時間信号が減衰しない、すなわち応答時間が長くなることを生み出しかねない。

これら相異なる要求を満たすために、回路自由度が非常に高い SFQ 回路と検出器を一体化したモノリシックチップの構成を目指した。このモノリシックチップは、これまで超伝導検出器では前例がなく、極めて挑戦的な課題である。

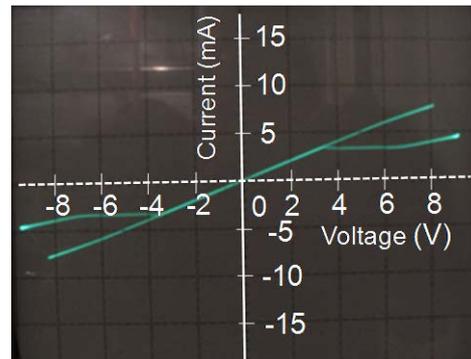


図 5 500 個直列接続したの電流バイアス運動インダクタンス検出器の電流-電圧特性。測定温度は 4K。

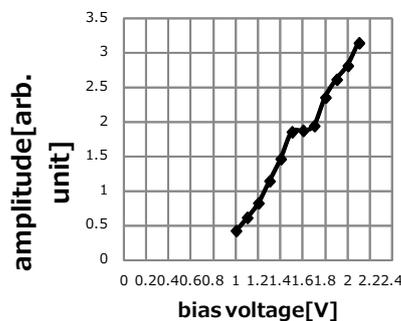


図 6 図 5 に示したリニアアレイ検出器に通信波長帯の光を照射した結果。光を ON/OFF 変調を掛けた場合の検出器の電圧の変化をロックイン増幅器で検出した (縦軸)。検出器に流す電流値 (電圧値/250 Ω) の増加に伴って電圧が上昇する。

図 3 は、検出器間の接続、ならびに読出し回路との接続方法を示した模式図である。検出器間には、遮断周波数 80MHz の LR 低域過フィルタを配置した。また、検出器両端の電圧は抵抗と変成器を通して読出し SFQ 回路に接続される。その際の遮断周波数を約 800MHz とすることで、高周波成分を多く持つ信号のエネルギーの多くは、読出し回路側に伝わるようにした。さらに、もともと Nb 薄膜だけで構成されていた検出器を常伝導体である Mo と積層し、Nb/Mo に 2 層構造とした。表皮効果により、高周波成分は Mo 抵抗層を流れるようになり、検出器の Q 値は低下する。これにより、検出器の応答時間は、ナノ秒オーダーまで短縮化されていると考えている。

図 4 は、実際に作製したモノリシックイメージセンサである。500 個の検出器によるリニアアレイが 2 つ配置されている。図 5 は、1 つのリニアアレイの 4K での電流-電圧特性である。500 この検出器の特性は、非常によく揃っている。臨界電流値は 7mA とほぼ設計値通りであった。

図 6 は、このリニアアレイ検出器に、通信

波長帯の光を照射した結果である。光は On/Off 変調しており、検出器両端の変化をロックイン増幅器で検出した。バイアス電流を変化させたところ、電流の変化に比例する形で電圧が増加した。この結果は、光照射によってインダクタンスが変化したことを示唆するものである。

このほか読出し回路についても、要素回路の動作実証に成功している。今後、パラメータの最適化等を進めることで、イメージセンサが実現できるものと考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① T. Ishida, N. Yoshioka, Y. Narukami, H. Shishido, S. Miyajima, A. Fujimaki, S. Miki, Z. Wang, M. Hidaka, "Toward Mega-pixel Neutron Imager Using Current-Biased Kinetic Inductance Detectors of Nb Nanowires with ^{10}B Converter," *J. Low Temp. Phys.*, 査読有, 2014, DOI:10.1007/s10909-014-1159-8
- ② S. Miyajima, K. Ito, Y. Kita, T. Ishida, A. Fujimaki, "Current Sensitivity Enhancement of a Quasi-One-Junction SQUID Comparator as an Input Circuit of SFQ Readout Circuit for a Superconducting Detector," *J. Low Temp. Phys.*, 査読有, 2014, DOI:10.1007/s10909-014-1119-3
- ③ S. Miyajima, T. Kusumoto, K. Ito, Y. Akita, I. Yagi, N. Yoshioka, T. Ishida, S. Miki, Z. Wang, A. Fujimaki, "High-Throughput RSFQ Signal Processor for Neutron Diffraction System with Multiple MgB_2 Detectors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 査読有, Vol. 23, No. 3, 1800503, 2013
DOI:10.1109/TASC.2013.2238985

[学会発表] (計 9 件)

- ① A. Fujimaki, N. Yoshikawa, M. Hidaka, "Research trend of superconductor digital electronics in Japan," 14th International Superconductive Electronics Conference (ISEC2013), Boston, MA. USA. 2013 年 7 月
- ② S. Miyajima, T. Ortlev, H. Toepfer, A. Bozbey, A. Fujimaki, M. Tanaka, "Microampere Gray Zone Width with Enlarged Operating Margin in Quasi-One-Junction SQUID Comparators," 11th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2013), Genova, Italy, 2013 年 9 月
- ③ T. Ishida, N. Yoshioka, Y. Narukami, I. Yagi, Y. Kodama, H. Shishido, S. Miyajima,

A. Fujimaki, "Mega-pixel Neutron Radiography with High Spatial Resolution by Current-Biased Kinetic Inductance Detectors of Nb with ^{10}B Converter," 11th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2013), Genova, Italy, 2013 年 9 月

- ④ K. Ito, G. Yu, Y. Kita, M. Tanaka, A. Fujimaki, "Demonstration of address generation circuits based on RSFQ time-to-digital converter for the imaging applications of superconducting detectors array," 26th International Superconductivity Symposium (ISS2013), Tokyo, Japan, 2013 年 11 月
- ⑤ Y. Kita, M. Tanaka, A. Fujimaki, "Experimental Evaluation of Effect of Noise Reduction Technique in Low Critical Current RSFQ Circuits," 6th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2013), Tsukuba Japan, 2013 年 11 月
- ⑥ G. Yu, K. Ito, T. Ishida, A. Fujimaki, "High-Frequency Response Characteristics of the Neutron Detector with the One-Way Traffic Structure," 6th Superconducting SFQ VLSI Workshop (SSV 2013), Tsukuba Japan, 2013 年 11 月
- ⑦ Y. Kita, K. Ito, G. Yu, M. Hidaka, T. Ishida, A. Fujimaki, "Design of Readout Circuit and Address Generation Circuit for Neutron Detectors," Superconducting SFQ VLSI Workshop for Young Scientists (SSV 2014-YS), Nagoya Japan, 2014 年 3 月
- ⑧ 藤巻朗、「超伝導デジタル回路の最前線」、CRAVITY シンポジウム、つくば、2014 年 3 月 (招待講演)
- ⑨ 藤巻朗、「単一磁束量子読出し回路による中性子検出器」、電子情報通信学会 2014 年総合大会、新潟、2014 年 3 月 (招待講演)

[図書] (計 0 件)

該当なし

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

該当なし

○取得状況 (計 0 件)

該当なし

[その他]

<http://www.super.nuqe.nagoya-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 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