

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 (共通)

科学研究費助成事業

研究成果報告書



平成 2 9 年 6 月 1 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2011～2015

課題番号：23226019

研究課題名(和文)百万画素サブミクロン分解能中性子ラジオグラフィのための固体超伝導検出器システム

研究課題名(英文)All Solid State Superconducting System for Neutron Radiography with One Million Pixels and Submicron Resolution

研究代表者

石田 武和(Ishida, Takekazu)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00159732

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 165,100,000円

研究成果の概要(和文)：直列接続の電流バイアス運動インダクタンス検出器(CB-KID)の各CH出力から中性子飛来番地をエンコードするSFQ回路を完成し動作を確認した。さらに、X1000CH、Y1000CHの100万画素配列とSFQ読出回路の中性子イメージングチップを完成させたが、J-PARCの過大ノイズ環境では回路が動作せず想定外となった。新たに、膜厚40nm、サブミクロン線幅0.9μmのNbナノ細線(全長150m)を22mm角チップの15mm角有感域にXY直交配置した遅延時間型CB-KID方式で位置同定を創出し、当初計画の100万画素級中性子イメージングに成功し、当初計画を超える波長分散型ラジオグラフィを実現した。

研究成果の概要(英文)：We developed a serial current-biased kinetic inductance detector (CB-KID) with an SFQ encoder providing neutron event address. We confirmed its proper operation with the aid of pulsed laser irradiation experiments instead of neutron irradiation. We also fabricated a mega-pixel chip consisting of 1000-CH-X-CB-KIDs and 1000-CH-Y-CB-KIDs on a monolithic Si chip. However, we recognized that the overwhelming excess noise, particularly appeared in J-PARC facility, prevented our device from operating the ultimate CB-KID chip with SFQ readout circuits in a proper manner. Alternatively, we proposed a new idea of a delay-line CB-KID system consisting of two submicrometer (0.9 μm) wires (40-nm thick, 150-m long) on a 22mmx22mm chip. We finally fulfilled megapixel-class imaging of 225-mm² active area by using a submicrometer Nb nanowire at the pulsed neutron facility J-PARC. The wave-length-selective neutron radiography, achieved by us, is apparently beyond the scope of our original proposal.

研究分野：超伝導物性、ナノ構造超伝導

キーワード：中性子 ラジオグラフィ MgB₂超伝導体 単一磁束量子素子 遅延時間型超伝導検出器 ギンツブルク
・ランダウ理論 Nb超伝導体 ボロン10

1. 研究開始当初の背景

(1) 中性子によるイメージング技術(ラジオグラフィ)では、従来技術では困難であった物質中における水素などの軽元素の位置や磁気構造などの観察が可能となる。パルス中性子源 J-PARC の共用が開始され、最先端の研究を支援できるツールとして、科学界や産業界から高空間分解能観測の要求があった。しかし、従来技術で、空間分解能の向上、画素数の増加、フレーム時間の短縮を同時に達成することは極めて困難であった。

(2) 研究チームは、超伝導検出器や単一磁束量子回路に関して豊富な経験を積み上げており、 MgB_2 ナノワイヤ型超伝導中性子検出器の開発にも世界初で成功していた。これらの背景のもとに本研究計画が立案された。

2. 研究の目的

(1) 研究チームの先行研究である MgB_2 超伝導ナノワイヤ中性子検出器、高感度・高速・多重読出の単一磁束量子(SFQ)回路、超伝導非平衡素過程のシミュレーション、超伝導集積回路の製作技術等の独自技術、高品質 MgB_2 薄膜の形成技術を融合・発展させる形で、「百万画素サブミクロン分解能中性子ラジオグラフィのための固体超伝導検出器システム」の開発を目的とした。

(2) 超伝導ナノワイヤ内(あるいは、積層した転換層内)の同位体 ^{10}B と中性子の核反応熱を運動インダクタンスの変化 ΔL_k として一次元配列 1000 画素検出系で検出する。この方式を電流バイアス運動インダクタンス検出器(CB-KID)と名付けた。一次元画素検出系を 2 式、X 方向と Y 方向に直交配置させて XY イベントを同時計測することで 100 万画素デバイスとして機能させることを目指す。

(3) ナノワイヤ線幅で検出器の空間分解能が決まることからサブミクロン分解能が期待でき、大画素化が可能となる。また、小さな運動インダクタンスの変化 ΔL_k を感度良く測定するために、SFQ 回路により ΔL_k の高感度検出、高速、超低電力、大容量読出を行い、高フレームレートを実現する。

3. 研究の方法

(1) MgB_2 薄膜の高品質化、微細加工技術の高度化、一次元リニア N アレイを 2 式直交配置することで $N \times N$ の多素子中性子検出器アレイを具体化する。 ^{10}B の核反応で 180 度異なる方向に放出される 2 つの荷電粒子(アルファ線、リチウム線)を熱源として X 方向検出器と Y 方向検出器で同時計測する。このやり方では、 N^2 の画素が $2N$ 個の素子で実現できる。検出器と SFQ の測定系をワンチップ化し、世界初の全固体超伝導中性子検出器チップの実現を目指した。

(2) MgB_2 を用いた大規模超伝導検出器を実現するために共蒸着法を用いて MgB_2 薄膜を 3 インチ基板に成膜するために、基板全体に均一に温度加熱ができるようなカーボンヒ

ーターの設置を行い、成膜条件の最適化を行った。また、中性子反応層として、 ^{10}B 単相膜の成膜条件を探索した。さらには、超高真空 MBE 法を用いて基板加熱をしないでエピタキシャル MgB_2 膜を形成する技術も開発した。その後 MgB_2 薄膜方式では検出器チップは困難なハイブリッド方式となると判断した。そのため、Nb 薄膜ベースの方式でモノリシックチップ素子実現へ方針転換した。

(3) 超伝導検出器を多素子化すれば、室温から低温ステージへ電流供給ケーブル数、出力ケーブル数、熱流入が増える。解決策として 1000 個の検出器素子を直列接続し、検出器ユニット出力を磁気結合した SQUID(QOS と言う)で読み出した。隣の検出器への信号クロストークを検出器間に低域透過フィルタ(LPF)を挿入して抑制した。設計意図は、図 1 に示すように、検出器からの高速信号は LPF を通過させず、QOS 読出回路側に伝搬させる。チップ設計のため、等価回路を用いて SPICE シミュレーションを行った。ここで検出器は π 型モデルの伝送線路であり、QOS 読出回路は検出器の負荷と扱った。1000 個の CB-KID を直列接続し、その 250 番目の CB-KID で電圧パルスを発生させ、読出回路の入力インダクタンスに流れる電流と他チャンネル(CH)へのクロストークを評価した。

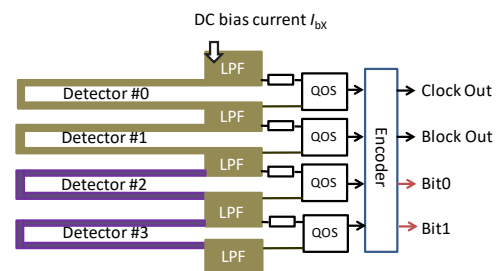


図 1 : 2 ビット SFQ エンコーダ付き 4 直列 CB-KID のブロック図。

(4) 100mm^2 の有感領域で数十 ns に 1 個の中性子を検出されるとすれば、単一磁束量子(SFQ)回路の超高速動作で十分に処理できる。粒子が到来した検出器のアドレスを最初に生成し、それを時分割多重化して出力する。具体的には、QOS の後段にエンコーダを配置し、さらに時分割多重化回路を配置する。1000 個の検出器を想定すると、アドレス情報は 10 ビットとなる。検出器チップの出力は、アドレス情報が数十 ns 間隔で室温に送られ、FPGA によって各アドレスに何個の中性子が来たかを計数し、最終的にイメージ画像を表示する。そのため、4 個の CB-KID と 2 ビットエンコーダからなるテスト用の Nb 集積回路を超伝導ファンドリー(CRAVITY)で試作し、光照射励起で直列接続の CB-KID 検出器を駆動し、CH ごとの読出検証を行った。さらに、X 方向と Y 方向の 4×4 アレイ検出器チップ、 8×8 アレイ検出器チップを試作して評価した。最終的には、X 方向、Y 方向に各 1000 個検出器を並べた百万画素チップ

の設計、試作、評価を行った。

(5) 当初計画にはなかった中性子イメージング法である遅延時間型 CB-KID のための中性子検出器素子(NW05)のデバイス構造を図2に示す。このデバイスでは、Nb ナノワイヤであるNW1およびNW2の膜厚 40 nm、線幅 $0.9\mu\text{m}$ である。膜厚 300 nm のグランドプレーン層とナノ細線の下層(NW1)と上層(NW2)があり、NW1 層は平坦化をしており、超伝導マイクロストリップラインの整合インピーダンスが 50 オームの減衰の少ない設計としている。最大の特徴は、線幅サブミクロンを実現していることにある。 ^{10}B は XY 間の挿入層ではなく XY の上側に積層しているため、一つの荷電粒子が NW1 層と NW2 層を突き抜けてメゾ励起を引き起こすと想定している。有感面積 225mm^2 に対して、線路長は 150m に達する。遅延時間型 CB-KID を利用してイメージングを行うために、ファンドリーでの素子作り、専用高速読出回路、データ処理ソフトの開発を行った。

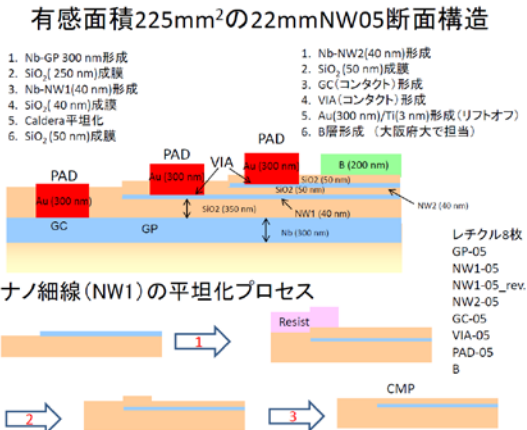


図2 : NW05 素子断面構造の CRAFTY の多層 Nb プロセス図。

(6) 理論グループでは、検出器性能向上の鍵を握る運動インダクタンスの理解を深めるため、超伝導状態のダイナミクスを理解するためギンツブルク・ランダウ理論及び準粒子を扱う微視的理論の手法の精度を上げて研究を進める。また、超伝導ストリップラインでの信号発生と信号伝搬を説明するために、現象論的位相モデルで信号発生と伝搬の物理を理解して、CB-KID の動作原理を与える。

4. 研究成果

(1) 本研究で電流バイアス運動インダクタンス検出器(CB-KID)の原理を図3に示す。運動インダクタンスの時間変化を検出器両端の過渡電圧信号として測定する。これは、競合技術であるマイクロ波運動インダクタンス検出器 MKID が運動インダクタンス L_k が直接共振周波数に直接効くことを観測するのに対して、電流バイアス運動インダクタンス検出器 CB-KID では $d\Delta L_k/dt$ と時間微分に依存する。すなわち、CB-KID の過渡応答は、クーパー対が壊れる短い時間応答のみが計

測対象となり、準粒子再結合過程は十分に遅く信号として観測されない。従って、CB-KID は MKID と較べて非常に高速で動作できるのである。超伝導単一光子検出器 SNSPD と類似するが、CB-KID は臨界電流 I_c よりずっと小さなバイアス電流でも動作でき、グランドプレーンのある超伝導ストリップラインを長距離に亘り信号が伝搬できることを特徴としており、方式が異なる。

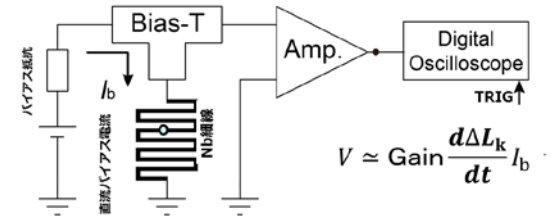


図3 : CB-KID の原理図。超伝導クーパー対の運動エネルギーに起因する運動インダクタンスの時間微分を素子端の過渡電圧信号を増幅して検出する方式である。

(2) 本研究では、図4に示した Nb ベースの電流バイアス運動インダクタンス検出器 (CB-KID) で図5に示した J-PARC パルス中性子スペクトル観測にも成功した。

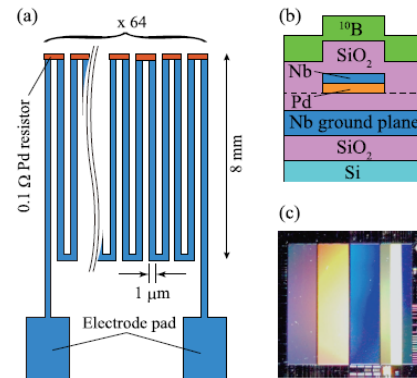


図4:(a) Nb系のCB-KID検出器の模式図。(b) CB-KID素子の断面図。(c) 異なるメンド周期を有するCB-KID検出器の写真。

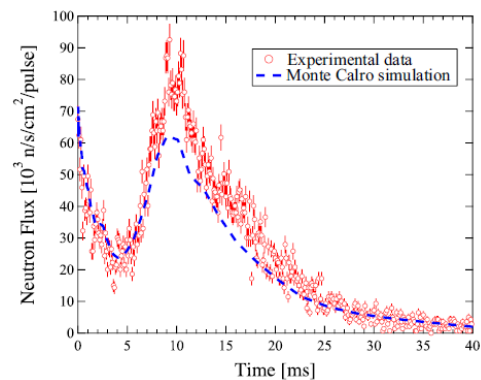


図5 : CB-KID 検出器が捉えた J-PARC のパルス中性子スペクトル(o)とシミュレーション値(破線)は良い一致を示した。

(3) CB-KID アレイと SFQ 回路による個別読出方法の解析で成果を挙げた。等価回路による解析結果例を図 6 に示す。クロストーク I_{+1st} の振幅は、粒子を検出した検出器の出力電流 I_{Firing} の振幅の $1/500$ 程度にまで抑制されている。出力電流振幅は $40 \mu A$ 程度と見込まれることから、クロストーク電流振幅は $0.1 \mu A$ 以下となり、QOS の読出し限界 $0.8 \mu A$ を下回ることから、クロストークが無視できると判断できた。

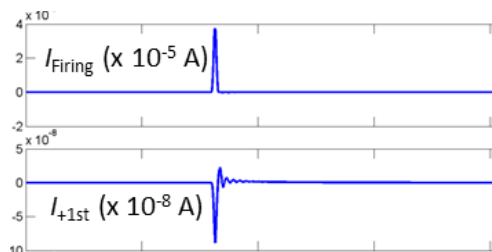


図 6 : 1000 直列 CB-KID の等価回路シミュレーションによる電流パルス波形。

(4) 図 7 は、X 方向、Y 方向にそれぞれ 4 個の CB-KID を配置し、各方向に 2 ビットエンコーダを配置した 4x4 検出器チップの顕微鏡写真である。ここで CB-KID は直列接続されており、X 方向、Y 方向とも、1 本のバイアス電流供給リードで駆動されている。一方、位置の特定は、SFQ エンコーダ回路によって行われ、粒子(あるいは、光励起)の到来位置(照射位置)は、X 方向の 2 ビットアドレスデータと Y 方向の 2 ビットアドレスデータで表現される。たとえば、図 7 で光照射の個所(X 方向 : ch1、Y 方向 : ch1)は(01, 01)となる。なお、X 方向と Y 方向の検出器が同時イベントで応答していることを保証する必要がある。このため、各エンコーダに、どこかの検出器に粒子が到来したことを検出するブロックアウト出力を設け、X 方向、Y 方向のコインシデンス(同時性)検証が行える工夫を行っている。

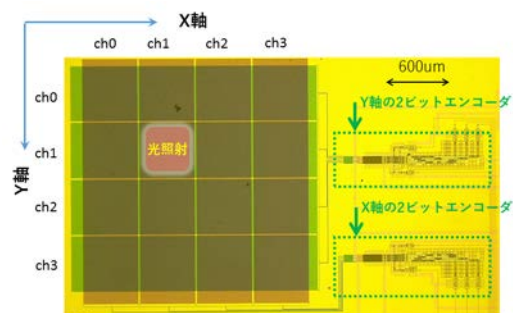


図 7 : 4x4 検出器チップの顕微鏡写真。

図 8 は、(01, 01) に光を照射した場合、対応する個所で出力が出ることが示しており、動作は完全に検証できた。加えて、8x8 検出器チップの正常動作も確認したが、エンコーダの動作マージンが小さいと評価されたことから、さらなる設計最適化が望ましい。

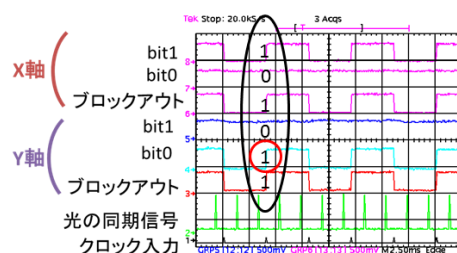


図 8 : 4x4 検出器チップの動作波形。(01, 01)の部分にレーザーが照射されて、対応するバイナリデータが正しく出力できている。

(5) 目標としてきた百万画素の素子製作を成功させ、完成チップの写真を図 9 に示した。1000x1000 検出器チップ(22mm 角)の世界最大級の大規模 SFQ チップが製作できた。

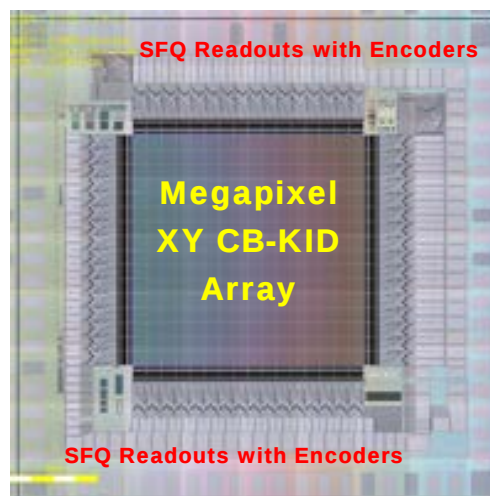


図 9 : 百万画素のピクセルを持つ大規模 SFQ 回路装備の CB-KID の XY アレイ素子。

(6) 超伝導単一磁束(SFQ)回路は、ジョセフソン接合を基本要素とする超伝導集積回路であるため、微小電圧で動作する。大型施設 J-PARC では通常研究機関の実験室と比べると桁違いの電磁波ノイズ強度であった。電磁波ノイズ耐性を考えた SFQ 設計の努力も及ばず、施設側のインフラ対応を期待したい。

(7) 当初計画の方式で大画素 SFQ チップを完成させたが、通常の実験室環境で動作しても、J-PARC の強い電磁波ノイズ環境では安定して動作できない事態に直面した。そこで、信号パルスが線路両端への到来する時間差から信号発生位置を同定する手法を新たに考案した。極低温技術で問題になるリード線本数も新方法ではわずか 4 本の読出線でよい。遅延時間型 CB-KID では、図 2(前出)で、積層された ^{10}B 変換層で中性子が荷電粒子に変換され、荷電粒子が X 検出器と Y 検出器に同時にメゾ励起(ホットスポット)で 2 組 4 種の電磁波が発生し 4 つの電極に向けて伝搬する。

(8) 実証のために、5mm 厚の B_4C 板で検出器の前面を部分的に覆った。また、板には目印の 3mmφ の穴を設けた。そして、XY の 4 つの信号を計測し、その時間差から構成したのが図 10 の中性子イメージであり、実際に

遅延時間型 CB-KID が実用的な方法であると実証できた。この検証では、遅延時間型 CB-KID の出力完全波形をストレージに保存して、実験後の画像化解析により再現した。

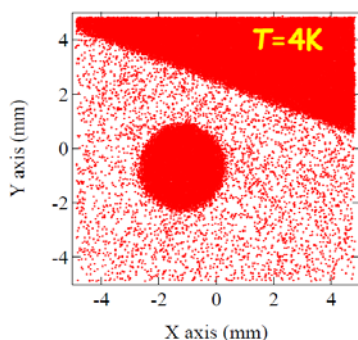


図 10 : 遅延時間型 CB-KID によるラジオグラフィ実証実験で、 B_4C の吸収板エッジと孔(3mm ϕ)を正確に再現した。

(9) 基盤研究(S)を延長した 6 年目によりやうく J-PARC のマシンタイムが確保できた。パルス的に飛来するミュオンで検出実績のある KALLIOPE 回路の開発者(小嶋)の協力を得て遅延時間型 CB-KID で間断なく連続的に飛来する中性子を常時検出できる読出回路の KALLIOPE-DC 版を新たに開発し、2016 年 5 月の実験で完璧に動作実証ができた。中性子検出イベントを 1ns のサンプリング時間で、4 秒の長さに亘りパルス到達時間がモニターできるシステムであり、高速データ読出技術、データ収録プログラム、XY 同時判定位置決め処理プログラムを完成させた。

(10) 高分解能を実証するために 100 $\mu m\phi$ の ^{10}B ドット(50 μm 厚)アレイを遅延時間型 CB-KID に密着設置して、中性子ラジオグラフィに挑戦した。図 11 (a)では中性子の時間スペクトルを正確に再現し、図 11 (b)~(f)で計画になかった波長分散中性子イメージングを実現した。共鳴吸収元素分析や Bragg エッジなどを利用した材料のひずみ研究などへの応用に道を拓く大きな成果となった。

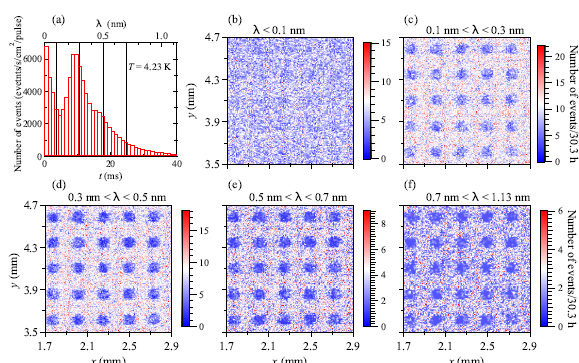


図 11 : 遅延時間型 CB-KID による(a) 中性子の時間スペクトル、(b)~(f) は中性子波長分散型中性子イメージング画像。

(11) 図 12 に遅延時間型 CB-KID で波長を区別しないで示した ^{10}B ドットアレイのイメ

ージング画像(上)を示した。100 μm のドットパターンが明確に見える。また、図 12 の下図には、中性子強度のライン・プロファイルを示している。この検証で約 20 μm の空間分解能があることが分かった。当初の研究計画通り、Nb サブミクロン細線による 100 万画素級素子の作製に成功した。

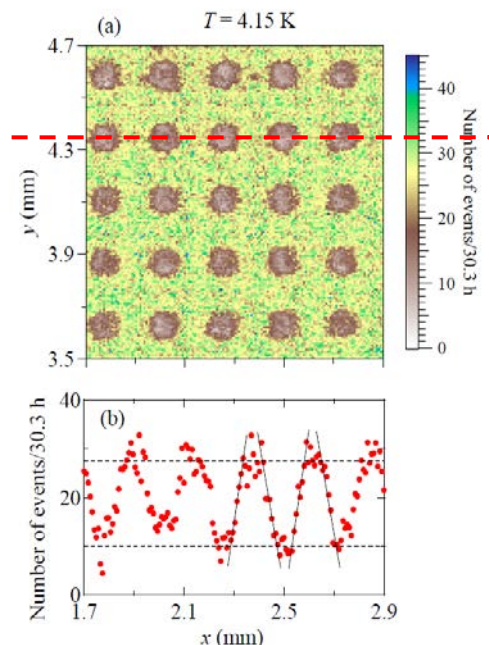


図 12 : ^{10}B ドットアレイのラジオグラフィ画像(上図)と中性子強度をライン・プロファイル(下図；上図の破線位置に対応)で示した。

(12) KALLIOPE-DC の時間デジタル計測回路(TDC)のサンプリング時間 1ns での連続測定機能を使ったが、今後は、KEK の研究協力でサンプリング時間 25ps の TDC に基づいた次世代 KALLIOPE-II を開発することで、中性子ラジオグラフィの世界を大画面中性子顕微鏡の世界を切り拓く未踏の最高性能ツールとすれば、我が国の共用施設 J-PARC の高度利用につながる。

(13) J-PARC のマシンタイムは厳しい英文国際公募で審査され、初期にはマシンタイムの確保が難しかったが、基盤研究(S)完成期には審査により年間 20 日~30 日の配分を受け、CB-KID 研究の認知度を裏付けた。J-PARC の中性子は 3×10^7 n/cm 2 /sec の大強度へと増強されても、検出効率数十%で計測できれば、CB-KID 方式が高度に利用されることとなり、チャレンジすべき課題となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 65 件)

① S. Miyajima, H. Shishido, Y. Narukami, N. Yoshioka, A. Fujimaki, M. Hidaka, K. Oikawa, M. Harada, T. Oku, M. Arai, T. Ishida, "Neutron flux spectrum revealed by Nb-based current-biased kinetic inductance detector with a ^{10}B conversion layer", Nucl. Instrum. & Meth. Phys. Res. A842, 71-75 (2017). (査読あり)

② 石田武和、“超伝導中性子検出器”、日本中性子科学会誌「波紋」、Vol.26, No.4, pp. 178-181 (2016). (編集委員査読あり)

③ 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. 176, 216-221 (2014). (査読あり)

[学会発表] (計 207 件)

① T. Ishida, N. Yoshioka, Y. Narukami, A. Nomura, H. Shishido, S. Miyajima, A. Fujimaki, S. Miki, Z. Wang, M. Hidaka, “Mega-pixel neutron radiography with high spatial resolution by current-biased kinetic inductance detectors of Nb with ^{10}B converter”, The 11th European Conference on Applied Superconductivity 203, Sep. 15-19, 2013 (Genova, Italy)

○出願状況(計 2 件)

① 名称: 測温抵抗体及び温度計
発明者: 四谷 任、田中 峰雄、石田 武和
権利者: 大阪府立大学
種類: 特願 番号: 2011-102416
出願年月日: 2011 年 4 月 28 日
国内外の別: 国内

② 名称: 測温抵抗体及び温度計
発明者: 四谷 任、田中 峰雄、石田 武和
権利者: 大阪府立大学
種類: PTC/JP 番号: 2012/57016
出願年月日: 2012 年 3 月 19 日
国内外の別: PTC 出願

○取得状況(計 1 件)

① 特許第 5846574 号 「中性子検出装置」
2011 年 9 月 1 日出願 (2015 年 12 月 4 日登録)
発明者氏名: 石田 武和(大阪府立大学教授)、藤巻 朗(名古屋大学教授)

[その他]

ホームページ等

① 産総研超伝導計測信号処理グループホームページ
https://unit.aist.go.jp/neri/intra/ja/teams/07_sscg/ja/index.html

② ナノファブリケーション研究所ホームページ
http://osakafu-u.ac.jp/academics/orp/21c/nano_fabrication

③ 大阪府立大学大学院工学研究科電子物理工学分野石田研究室 科学研究費補助金 基盤研究(S)ホームページ
<http://www.pe.osakafu-u.ac.jp/pe1/kiban-s/kiban-s.html>

④ 基盤研究(S)とナノファブリケーション研究所のパンフレット 1000 部配布。電子パンフレットは以下で公開。
http://www.osakafu-u.ac.jp/opu_common/book/nanofabrication2014/

6. 研究組織

(1)研究代表者

石田 武和 (ISHIDA, Takekazu)
大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授
研究者番号: 00159732

(2)研究分担者

藤巻 朗 (FUJIMAKI, Akira)
名古屋大学・工学研究科・教授
研究者番号: 20183931

町田 昌彦 (MACHIDA, Masahiko)
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究主席
研究者番号: 60360434

四谷 任 (YOTSUYA, Tsutomu)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・客員研究員
研究者番号: 70393296 (平成 28 年 3 月まで)

王 鎮 (WANG, Zhen)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・客員研究員
研究者番号: 70359090 (平成 25 年 6 月まで)

三木 茂人 (MIKI, Shigehito)

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究所
フロンティア創造総合研究室・主任研究員
研究者番号: 30398424 (平成 25 年 7 月より)

日高 睦夫 (HIDAKA, Mutsuo)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・上級主任研究員

研究者番号: 20500672 (平成 24 年度より)

前澤 正明 (MAEZAWA, Masaaki)

独立行政法人産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・研究員
研究者番号: 40357976 (平成 24 年度のみ)

(3)連携研究者

篠原 武尚 (SHINOHARA, Takenao)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン 研究員
研究者番号: 90425629 (平成 26 年度まで)

穴戸 寛明 (SHISHIDO, Hiroaki)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授
研究者番号: 80549585 (平成 24 年度より)

前澤 正明 (MAEZAWA, Masaaki)

独立行政法人産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・研究員
研究者番号: 40357976 (平成 25 年度より)

曾山 和彦 (SOYAMA, Kazuhiko)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・副ディビジョン長
研究者番号: 90343912 (平成 25 年度より)

三木 茂人 (MIKI, Shigehito)

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究所
フロンティア創造総合研究室・主任研究員
研究者番号: 30398424 (平成 25 年度 4 月～6 月)

王 鎮 (WANG, Zhen)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・客員研究員
研究者番号: 70359090 (平成 25 年度 7 月より)

及川 健一 (OIKAWA, Kenichi)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・研究員
研究者番号: 80391332 (平成 26 年度より)

原田 正英 (HARADA, Masahide)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター・研究主幹
研究者番号: 50354733 (平成 26 年度より)

宮嶋 茂之 (MIYAJIMA, Shigeyuki)

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究所・研究員
研究者番号: 50708055 (平成 26 年度より)

田中 雅光 (TANAKA, Masamitsu)

名古屋大学・工学研究科・特任講師
研究者番号: 10377864 (平成 26 年度より)

小林 恵太 (KOBAYASHI, Keita)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・任期付研究員
研究者番号: 00468860 (平成 26 年度より)

太田 幸宏 (OTA, Yukihiro)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・任期付研究員
研究者番号: 60386597 (平成 26 年度より)

(4)研究協力者

新井 正敏 (ARAI, Masatoshi)

(前職) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン・ディビジョン長
研究者番号: 30175955

小嶋 健児 (KOJIMA, Kenji)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准教授
研究者番号: 10301748 (平成 27 年度より)