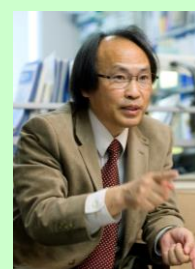


## 百万画素サブミクロン分解能中性子ラジオグラフィのための 固体超伝導検出器システム

All Solid State Superconducting System for Neutron  
Radiography with One Million Pixels and Submicron  
Resolution

石田 武和 (ISHIDA TAKEKAZU)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授



### 研究の概要

超伝導薄膜を微細加工した超伝導ナノワイヤ検出器と中性子反応層 ( $^{10}\text{B}$ ) と組み合わせた高感度高速読出のための多重化単一磁束量子 (SFQ) 回路を組み合わせ、中性子検出とイメージングができる新しいシステムを構築し、学術基盤と産業化基盤技術としての中性子ラジオグラフィにおいて、サブミクロン分解能・100万画素・フレーム時間短縮を同時に達成する我が国のオリジナルな研究開発計画である

研究分野：超伝導物性、ナノ構造超伝導

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：中性子ラジオグラフィ、 $\text{MgB}_2$  ナノ細線、Nb ナノ細線、単一磁束量子素子

### 1. 研究開始当初の背景

21世紀の学術・産業を支える基幹技術として、サブミクロン分解能を持つ大画素中性子ラジオグラフィが求められています。

### 2. 研究の目的

本研究では、中性子イメージングを使い、次世代の科学や技術として貢献するためにオンリーワン技術を複数使ってサブミクロン分解能、100万画素、1msの高フレームレート、全固体モノシリック素子の開発を目指します。独創性はどこにあるかというと、超伝導体 ( $\text{MgB}_2$ 、Nb) による直線状超伝導ナノ細線配列を形成することで、 $^{10}\text{B}$  ( $\text{MgB}_2$  細線、Nb 細線の場合は  $^{10}\text{B}$  反応層) と中性子の核反応熱を運動インダクタンスの変化  $\Delta L_K$  として検出する方式を採用した点にあります。X方向とY方向の検出を同時に行うことで、単一磁束量子(SFQ)回路により  $\Delta L_K$  の高感度検出と高速超低電力大容量読出しで2次元画素システムを実現させる計画です。

### 3. 研究の方法

超伝導ナノ細線を産総研 CARVITY の微細加工技術で実現し、 $N \times N$  の多素子中性子検

出器アレイを実現します。図1に示すように、一次元のリニアアレイを直交して並べ、ボロンの核反応で出てくるアルファ線とリシウム線が180度異なる方向に放出される2つの荷電粒子をX方向のリニアアレイとY方向のリニアアレイで同時計測します。これにより  $N^2$  の画素が  $2N$  個の素子で実現できます。加えて、検出器と

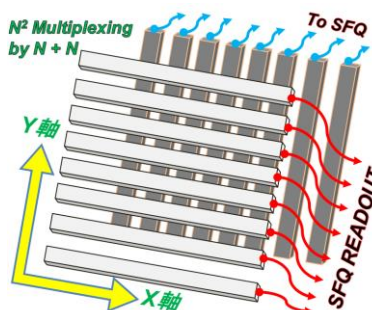


図1：超伝導ナノ細線検出器の多重化はX方向一次元アレイ検出器とY方向アレイ検出器の同時計測をSFQ回路で実現します。

SFQ読み出し回路をワンチップ化します。

超伝導ナノ細線検出器は、4Kで動作できる電流バイアス運動インダクタンス検出器(CB-KID)を提案しました[1,2,3]。我々が、新規に発明した検出器は、1nsと高速で動作しますので、100GHz動作のSFQ回路による新しい全固体超伝導検出器として、J-PARCでの実証実験で、サブミクロン分解能の革新的中性子ラジオグラフィとして完成させます。

## 4. これまでの成果

CB-KID方式のMgB<sub>2</sub>検出器を作製し、従来のMgB<sub>2</sub>検出器が転移点近傍でしか動作しなかったのに対して、4 Kを含むT<sub>c</sub>以下のすべての温度で動作することを実証しました[2,3,4]。

平成26年2月にJ-PARCの運転が再開され、3月にBL10でビームタイムが得られました。計画的に準備して来たNb細線と<sup>10</sup>B膜のCB-KID中性子検出器で中性子の検出に成功しました。図2に検出器チップと中性子信号を示します。

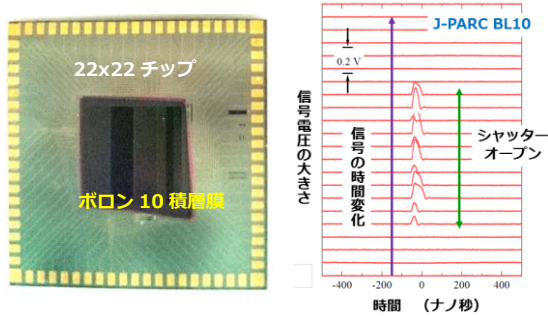


図2：22mmx22mm シリコン基板に形成された中性子検出器チップ(Nb細線0.6μm、1μm、3μmの線幅)の写真。中央部に200nm厚ボロン10膜を積層。右は、J-PARCのBL10で中性子シャッターの開閉と信号発生が同期します。

さらには、サンプリング時間を短くしても数回の中性子パルスをカバーする長時間時系列測定を行い、統計処理をして図3に示す時間スペクトルを導出し、中性子の輸送シミュレーションと良く一致することを見事に実証しました。

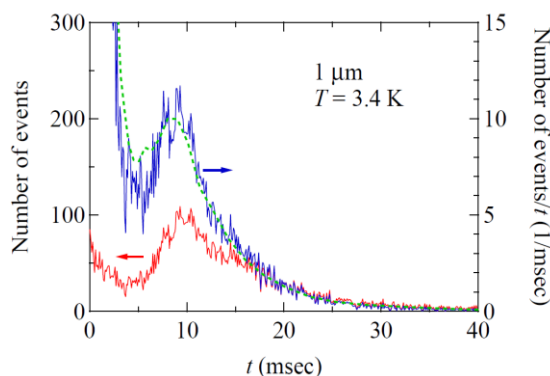


図3：CB-KID検出器で測定したJ-PARCの中性子時間スペクトル(周期40ms; 0.1ms間隔のヒストグラム)。反応断面積が中性子速度に逆比例する効果を補正した曲線は、中性子輸送シミュレーション(破線)と良い一致を示しています。

CB-KID検出器の読み出し回路に関しても、最終形式の一次元版を設計・試作をして、準単一接合SQUID(QOS)以外の純粋なデジタル回路で最も動作確認が難しいと思われた4ビットエンコーダと6ビットエンコーダ要素回路の2進カウンタに関しては、平成26

年3月に動作確認に成功しました。

## 5. 今後の計画

CB-KID検出器の読み出し回路[5]は3万個のジョセフソン接合規模に、2次元では6万接合の規模の設計となりますが、名古屋大学が設計を、産総研(CRAVITY)が製作を担当します。どのアドレスに何個の中性子が来たかを計数し、強度分布をできて、データが蓄積できる高速の室温エレクトロニクスを準備してJ-PARCで中性子照射実証試験を行います。

## 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1. "Toward Mega-pixel Neutron Imager Using Current-Biased Kinetic Inductance Detectors of Nb Nanowires with 10B Converter", T. Ishida, N. Yoshioka, Y. Narukami, H. Shishido, S. Miyajima, A. Fujimaki, S. Miki, Z. Wang, M. Hidaka, J Low Temp. Phys., in press. DOI 10.1007/s10909-014-1159-8.
2. "Four-Channel Current-Biased Kinetic Inductance Detectors Using MgB<sub>2</sub> Nanowires for Sensing Pulsed Laser Irradiation", N. Yoshioka, Y. Narukami, S. Miyajima, H. Shishido, A. Fujimaki, S. Miki, Z. Wang, T. Ishida, J Low Temp. Phys., in press. DOI 10.1007/s10909-014-1135-3.
3. "Current-biased kinetic inductance detector using MgB<sub>2</sub> nanowires for detecting neutrons", N. Yoshioka, I. Yagi, H. Shishido, T. Yotsuya, S. Miyajima, A. Fujimaki, S. Miki, Z. Wang, and T. Ishida : IEEE Transactions on Applied Superconductivity **23** (2013) 6423257.
4. "Current-biased transition edge detector of MgB<sub>2</sub> nanowires for neutrons: Imaging by scanning laser", I. Yagi, N. Yoshioka, H. Shishido, T. Yotsuya, S. Miki, Z. Wang, and T. Ishida : IEEE Transactions on Applied Superconductivity **23** (2013) 6416937.
5. "Current Sensitivity Enhancement of a Quasi-One-Junction SQUID Comparator as an Input Circuit of SFQ Readout Circuit for a Superconducting Detector", S. Miyajima, K. Ito, Y. Kita, T. Ishida, A. Fujimaki, J Low Temp. Phys., in press. DOI: 10.1007/s10909-014-1119-3.
6. 穴戸寛明, 二神敦, 川井一樹, 野口悟, 四谷任, 石田武和 第11回低温工学・超伝導若手合同講演会「信賞貴」(大阪, 2012/12)、及び、大阪府立大学学長表彰。
7. 三木茂人 「通信波長帯超伝導ナノワイヤ単一光子検出器の研究」平成24年度文部科学大臣表彰若手科学賞(2012.4月)。
8. 吉岡直人, 八木行太郎, 鳴神吉人, 児玉陽平, 穴戸寛明, 宮嶋茂之, 藤巻朗, 三木茂人, 王鎮, 町田昌彦, 石田武和, 電流バイアス運動インダクタンス法による MgB<sub>2</sub> 超伝導中性子検出器の開発 第11回低温工学・超伝導若手合同講演会(低温工学協会関西支部, 大阪)「低温工学・超伝導関西若手奨励賞」(大阪, 2012/12)、及び、大阪府立大学学長表彰。
9. 吉岡直人, 鳴神吉人, 野村晃大, 宮嶋茂之, 穴戸寛明, 藤巻朗, 三木茂人, 王鎮, 町田昌彦, 石田武和 アレイ化 MgB<sub>2</sub> 超伝導中性子検出器の開発 第12回低温工学・超伝導若手合同講演会(低温工学協会関西支部, 大阪)「低温工学・超伝導関西若手奨励賞」(大阪, 2013/12)、及び、大阪府立大学学長表彰。

## 7. ホームページ等

<http://www.pe.osakafu-u.ac.jp/pe1/kiban-s/kiban-s.html>