

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14736

研究課題名（和文）次世代ミリ波・サブミリ波観測を実現する超伝導多素子アレイの開発

研究課題名（英文）Development of large arrays of superconducting detector for millimeter and sub-millimeter wave observation

研究代表者

木内 健司 (Kiuchi, Kenji)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・助教

研究者番号：00791071

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：将来の大型宇宙観測・天文観測実験では、数10万-100万の超伝導検出器による観測が予定されている。そのためには、大型基板にして基板100枚以上の検出器を生産する必要がある。この課題を解決するため、本研究では外部の半導体・MEMS素子作製工場に生産委託する形で超伝導力学的インダクタンス検出器（MKIDs）を開発した。直径6インチ（150mm）基板および直径8インチ（200mm）基板を用いてMKIDsを作製・評価を行った。特に、8インチ基板は超伝導検出器に使われたシリコンウエハとしては最大規模である。これにより大型の検出器アレイの作製が可能になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導素子は宇宙・天文観測や素粒子実験のような物理実験のみならず、量子コンピュータや量子情報等幅広い用途があり近年開発が活発になっている。これまで、大学や研究機関の専用装置で作製される事が多かった超伝導検出器を、一般の半導体素子を作製する工場で作製可能にしたことで将来の大型物理実験に対応する作製能力を確保した。また、産業用途に向けて一般の半導体工場で超伝導素子が作製可能であることを示し、超伝導素子の作製が容易になった点において価値がある。

研究成果の概要（英文）：Next generation astronomical observation and/or cosmological observation will use 100,000 to 1,000,000 superconducting detectors. For this purpose, we have to fabricate superconducting detectors on more than 100 wafers. We have developed superconducting microwave kinetic inductance detectors (MKIDs) using commercial-class external foundries. MKIDs were fabricated on a 6-inch (150mm) silicon wafers and an 8-inch (200mm) silicon wafers. The 8-inch wafers are the largest class silicon wafer used for a superconducting detector. We established the fabrication method to fabricate a large superconducting detector arrays.

研究分野：宇宙観測

キーワード：宇宙観測 超伝導検出器 MKIDs 天文観測

### 1. 研究開始当初の背景

超伝導の物性を利用した超伝導検出器は検出可能なエネルギー閾値が低くかつ低雑音であるという特性があり、従来の検出器では困難だった物理現象を観測可能にしてきた。超伝導検出器のもう一つの利点として、半導体の作製技術により作製可能なため大型の検出器アレイが作製可能な事が挙げられる。実際に超伝導検出器は宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測実験等のミリ波・サブミリ波帯での宇宙・天文観測実験や暗探査実験にて急速に採用されており、その実験規模も加速度的に大型化している。図1は現行実験 (SimonsArray 実験) の焦点面と検出器モジュールである。望遠鏡あたり1万素子以上の超伝導検出器が搭載されている。次世代の CMB 観測実験 CMB-S4 では実に50万素子以上の超伝導検出器を用いる予定となっており、大型サブミリ波望遠鏡では100万素子が計画されている。大型実験に向けての課題は2つあり、1つは素子の多重化、もう一つは生産体制の確保である。超伝導検出器は典型的に 100 mK 程度の極低温で動作するため極低温冷凍機内で動作させる必要がある。この時、冷凍機への熱流入を抑えるために1対の配線に多数の検出器を接続する素子の多重化が必要不可欠である。これまで超伝導転移付近での急峻な抵抗変化を利用した超伝導転移端センサー (TES) が主流となっているが、多数の検出器を同時運用するためには専用の多重化素子が必要であり検出器アレイの複雑化している。またもう1つの課題である生産性においても多重化した TES は生産工程が特殊かつ多い。100以上の検出器アレイを作製しなければならない大規模実験において検出器の生産スケジュールが実験全体のスケジュールを左右してしまう状態となっている。

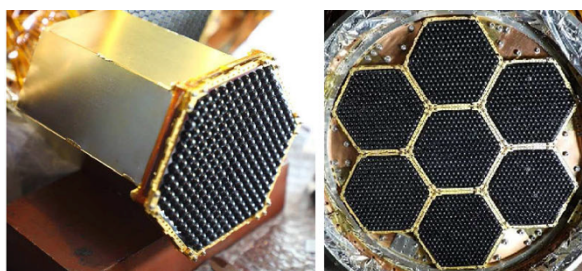


図1 SimonsArray 実験の検出器モジュールの写真(左)と焦点面の写真(右)。2022年現在最大級のサイズであり、1万素子以上の検出器が焦点面に搭載されている。CMB-S4ではこの約30倍の検出器が要求されている。[1]

### 2. 研究の目的

超伝導体内のクーパー対が持つ慣性に由来する力学的インダクタンスを利用した力学的インダクタンス検出器 (MKIDs) を開発する。MKIDs は超伝導共振器を高性能なセンサーとして用いる検出器で、共振器の共振周波数を素子毎に変えることで別素子を必要とせず多重化が可能である。1対の配線で1000素子程度を読み出し可能なため多重化に適した検出器である。また、構造がシンプルのため生産性も高いだけでなく、TES と同等レベルの感度を達成可能である。本研究では、超伝導検出器を外部の半導体作製工場に生産委託することで大型の検出器アレイを作製可能にするとともに、その生産能力を確保する。これまで超伝導検出器の作製は研究所や大学等の研究機関による作製が主であったが、研究用との設備の生産能力は十分とは言えず実験の計画を満たすことができない。一方で生産性の高い設備を整備するためには高額な費用がかかるため困難である。そこで、外部の生産工場に委託する事でこれを解決する。MKIDs は構造がシンプルで特殊な工程もなく一般的な半導体製造工程で作製可能であるため、これを生かして半導体の生産工場に生産委託することで生産能力を確保する。加えて、研究用途の生産設備は小口径基板を用いており、大型の検出器アレイを作製できなかったが、量産用の設備を利用することで6インチ以上の大口径基板を用いた大型の検出器アレイを作製可能にする。

### 3. 研究の方法

外部の半導体生産工場として微小電気機械システム (MEMS) を生産する企業を選定し、直径6インチおよび直径8インチの大型シリコン基板を用いた MKIDs を開発した。超伝導体として超伝導転移温度が 1.2 K のアルミニウムを用い、加工条件を探索した。MKIDs は電磁界シミュレーションソフトウェア SONNET を用いて設計した。設計と加工条件をもとに MKIDs を作製し測定した。

MKIDs は超伝導転移温度の低いすなわち超伝導バンドギャップの小さい超伝導体を有感部分に、それ以外の部分に超伝導転移温度の高い超伝導体を用いることで検出器感度を大幅に向上できる。このため、アルミニウムに加えて、超伝導転移温度 9.2K のニオブと同じく 15K の窒化ニオブチタンの加工条件を探索し、MKIDs を作製した。これらによって、宇宙・天文観測実験に耐えうる感度を有する MKIDs の作製技術を民間企業の半導体生産工場で確立した。

#### 4. 研究成果

超伝導素子を作製可能な半導体工場として、微小機械システム (MEMS) の生産を主とするメムスコア社と産業技術総合研究所 MNOIC を選定し、設計をもとにアルミニウムを超伝導体として用いた MKIDs を作製した。作製した MKIDs 基板が図 2 である。6 インチ基板は現行実験と同等サイズであり、8 インチ基板はそれを上回るサイズである。

作製した MKIDs は図 3 のように銅製の治具を用いて検出器モジュールとし、動作温度である 100 mK まで冷却可能な希釈冷凍機を用いて冷却し測定を行った。

作製した MKIDs は良好な電気特性を示しており、設計通りに動作していることを確認した。特に作製した  $\lambda/4$  共振器とその共振周波数の関係を示した物が図 4 である。共振周波数のばらつきは 2 MHz 程度であった。これは、現行の読み出し装置で動作可能な周波数帯域 (4 GHz) において多重度 1,000 程度を実現可能な値であり良好といえる。

以上により外部の半導体製造工場で超伝導共振器の作製が可能であり、その特性も超伝導素子専用の作製装置群で作製した MKIDs と遜色ないことを明らかにした。これによって将来の大規模実験に向けた生産能力を確保でき、同時に大型基板の利用が可能になったことにより大型検出器アレイの作製を可能にした。

更に、より低ノイズな MKIDs の作製を目指して、アルミニウムに加えてニオブと窒化ニオブチタンを用いた MKIDs を作製するため加工条件を探索して最適化した。最適化した加工条件を用いニオブおよび窒化ニオブチタンの MKIDs を作製し、これらが MKIDs として動作していることを確認し特性を評価した。窒化ニオブチタン製の MKIDs は想定どおり良好なノイズ特性を示した。今後、より詳細な評価を行い論文として発表予定である。

今後は、実際の実験に用いるためミリ波・サブミリ波回路の開発を行い統合することで次世代実験向け超伝導検出器の開発を行う。本研究はその礎として有望な知見を蓄積するとともに、産学連携による超伝導検出器開発の可能性をひらいた。

#### 参考文献

- [1] Westbrook, B., Ade, P.A.R., Aguilar, M. *et al.* The POLARBEAR-2 and Simons Array Focal Plane Fabrication Status. *J Low Temp Phys* **193**, 758–770 (2018).

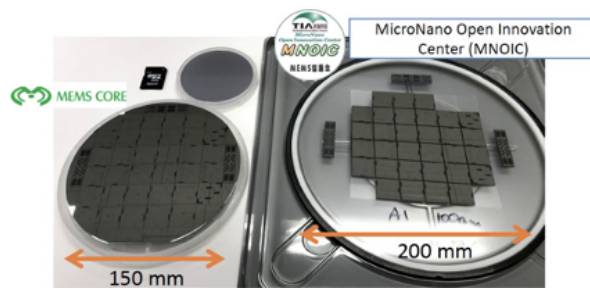


図 2 (左) メムスコア社に委託し作製した直径 6 インチの MKIDs 基板と (右) MNOIC に委託し生産した直径 8 インチの MKIDs 基板。

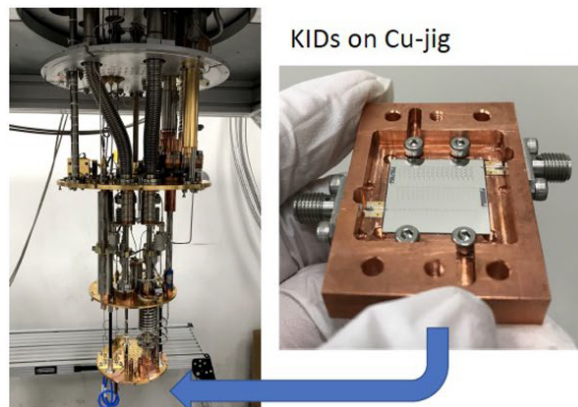


図 4 MKIDs の運転温度は 100 mK である。希釈冷凍機 (左) に検出器モジュールに組み立てた MKIDs (右) を取り付け測定を行った。

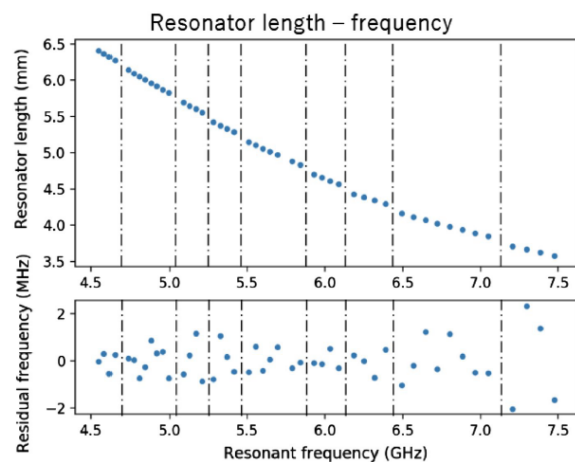


図 3 作製した MKIDs の共振周波数と  $\lambda/4$  共振器長さの対応関係。計算通りの共振周波数に共振器が測定されていることがわかる。ばらつきは 2 MHz 程度の幅に収まっており、高い多重度を実現可能であることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kiuchi K., Oguri S., Mima S., Otani C., Kusaka A.	4. 巻 200
2. 論文標題 Development of Large Array of Kinetic Inductance Detectors Using Commercial-Class External Foundries	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 353 ~ 362
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-020-02453-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 K. Kiuchi, S. Oguri, S. Mima, C. Otani, A. Kusaka
2. 発表標題 Development of large array of Kinetic Inductance Detectors Using Commercial-Class External Foundries
3. 学会等名 18th International Workshop on Low Temperature Detector（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 寺崎友規、木内健司
2. 発表標題 単一光子検出用集中定数型力学的インダクタンス検出器の設計
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Terasaki, K. Kiuchi, S. Honda, S. Oguri, Y. Nishinomiya, A. Kusaka
2. 発表標題 Development of Al/Nb hybrid Lumped-Element Kinetic Inductance Detectors for infrared photon detection
3. 学会等名 19th International Workshop on Low Temperature Detectors
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺崎友規、木内健司
2. 発表標題 単一光子検出用集中定数型力学的インダクタンス検出器の開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------