テーマ解説

超伝導共振器を用いた超高感度光子センサー

—ミリ波からガンマ線まで—

成瀬 雅人^{*1,†}, 安藤 友彦^{*1}, 久保田 立記^{*1}, 桑田 正博^{*1}, 田井野 徹^{*1}, 明連 広昭^{*1}

High Sensitivity Photon Sensors Relying on Superconducting Micro Resonators

—From millimeter-wave to gamma-ray—

Masato NARUSE^{*1,†}, Tomohiko ANDO^{*1}, Ritsuki KUBOTA^{*1}, Masahiro KUWATA^{*1},
Tohru TAINO^{*1} and Hiroaki MYOREN^{*1}

Synopsis: This paper reports how the superconducting micro-resonators work as high-sensitivity photon detectors, from millimeter-wave signals to high-energy particles. The resonators are called microwave kinetic inductance detectors and are suitable for use in a large format array. The resonators are easily fabricated applying a few photolithographic processes, and the resonator yield is more than 90%. Hundreds of superconducting resonators can be biased with a single readout line, enabling them to be read out together with frequency multiplexing. We introduce the recent progress of scientific projects relying on this technique, and summarize our results for millimeter-wave astronomy and a high-energy particle detection system. The device was made using epitaxial aluminum on a silicon wafer and its noise was as low as the background limit, approximately 6×10^{-18} W/Hz^{1/2} in the millimeter-wave range. For high-energy particle detection, we investigated two materials: niobium and a high-temperature superconductor, YBa₂Cu₃O_{7-δ}. The niobium-based device detected the alpha line (5.4 MeV) events. The pulse decay time was approximately 5 μs and energy resolution was approximately 1 MeV.

Keywords: kinetic inductance detectors, gamma-ray detectors, millimeter-wave sensing, superconducting resonators

(Some figures in this article may appear in colour only in the electronic version)

1. はじめに

半導体検出器によく用いられるシリコンのギャップエネルギーは eV のオーダーであるのに対して、超伝導検出器の材料としてよく用いられるニオブやアルミニウムの超伝導ギャップエネルギーは meV のオーダーであり、電子（準粒子）を励起するのに必要なエネルギーは超伝導体のほうが約 1000 分の 1 程度も小さい。また、金属の温度が下がるにつれてだらだらと抵抗値が下がるのではなく、転移温度付近で急激に抵抗値が変化するのも特徴である。一方で超伝導状態にするためには極低温（典型的な動作温度は 4.2 K から 100 mK 程度）まで冷却をしなければならぬというのは欠点でもあるが、動作温度が低いため熱雑音

を抑制できるとも言える。これらの性質を利用して超伝導検出器は半導体検出器では達成し得ない高感度を実現してきた。具体的には超伝導トンネル接合(SIS)を用いた直接検出器¹⁾やミリ波サブミリ波帯の SIS ミクスア^{2,3)}、超伝導転移端センサー(TES)⁴⁾、光学インダクタンス検出器(Microwave Kinetic Inductance Detectors: MKID)⁵⁾などがあげられる。本稿では、その中でも比較的新しい技術である MKID について取り上げる。

本稿では、MKID の動作原理を概説したあと、世界の応用例を紹介し最後に我々の研究グループで行っているミリ波天文学用の検出器開発及び、放射線検出器開発について触れる。

2. 光学インダクタンス検出器 (MKID)

2.1 動作原理

MKID は共振 Q 値 $10^4 \sim 10^6$ 程度を持つ低損失な超伝導共振器であり、光子などのエネルギーが共振器に入射することで生じる共振周波数の変化を読み取ることで信号の強度

Received December 10, 2018

^{*1} 埼玉大学大学院理工学研究科

〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

Saitama University, 255, Shimo-Okubo, Sakura, Saitama,
338-8570, Japan

[†] E-mail: naruse@super.ees.saitama-u.ac.jp

DOI: 10.2221/jcsj.54.174

Fig. 1 (a) Micrograph of a quarter-wave resonator made from a superconducting transmission line. (b) The equivalent circuits of a microwave kinetic inductance detector. (c) Schematic diagram of a lumped element kinetic inductance detector. (d) Micrograph of three kinetic inductance detectors overlaid with the equivalent circuits. The resonant frequencies are designed to be different from each other. (e) The resonant spectrum of the three detectors shown in (d).

を検出する(**Fig. 1**)。一つ一つの検出器に異なる共振周波数を割り当てることで、検出器の読出信号を周波数方向に多重化できるため、これまで超伝導検出器全般の課題であったアレイ数をわずかに数本の読出線を用いて 10000 素子規模まで拡大可能であるのが特徴である。また検出器を構成する超伝導材料の転移温度の 5 分の 1 から 10 分の 1 の温度で動作させるため、TES のように厳格な温度制御をしなくても性能を発揮でき、高い歩留まりを期待できるのも利点である。

MKID に印加する読み出し信号の強度は -70 ~ -50 dBm と非常に小さいため、MKID からの信号を AD 変換する前に低雑音なアンプが必要となる。

$$\text{NEP} \propto S_{\theta}(\omega) \left(\frac{\eta \tau_0}{\Delta} \frac{\partial \theta}{\partial N_{\text{qp}}} \right)^{-2} (1 + \omega^2 \tau_0^2) \quad (1)$$

S_{θ} は雑音パワースペクトル、 η は変換効率、 τ_0 は準粒子寿命、 Δ が超伝導ギャップエネルギー、 N_{qp} は準粒子数、 ω は読出しの周波数である。式(1)中 $S_{\theta}(\omega)$ は、共振器固有の雑音の他、アンプの雑音も含むため、MKID の共振周波数は、雑音温度が数ケルビン程度の高性能な冷却アンプが手に入りやすい 1-10 GHz のマイクロ波に設定するのが一般的である。

2.2 2 種類の共振方法

マイクロ波共振器の構成方法として、コプレーナ線路(CPW)やマイクロストリップ線路などの伝送線路を共振周波数の 1/4 波長や半波長の長さにして読出線にぶら下げる方法と集中定数回路型(Lumped Element Kinetic Inductance Detector: LeKID)⁶⁾の 2 通りがある(**Fig. 1**)。いずれのタイプにしても、等価回路は LC 共振回路として表され、信号の

Fig. 2 (Left) The density of states of the quasiparticle in a superconductor taking into account for effects of complex superconducting gap energy: where, d is the ratio of the imaginary part of the gap energy to the real part of the gap. The intra gap states increase with the imaginary part of the gap energy. (Right) The temperature dependence of the internal quality factors of the superconducting resonator made from a niobium nitride film. The quality factor expectation using the Mattis-Bardeen theory (black) is expanded at 0 K, but the modified theory that includes the effect of complex gap energy (green) is in good agreement with the measurements (blue dots).

入射によって超伝導体に存在するクーパ対の慣性力に由来する力学インダクタンスが変化し、共振周波数がずれる。

1/4 波長の線路長をもつ伝送線路型は、電流密度が最大となる短絡端で感度が最大となるため、その部分に平面アンテナを配置することで最大の検出効率を期待できるためミリ波・サブミリ波帯⁷⁻⁹⁾で使用されることが多い。一方で、集中定数型はインダクタンス部分でほぼ同一の感度を持つため、マイクロレンズと結合させて光赤外領域¹⁰⁾や、吸収帯を取り付けて X 線¹¹⁾やガンマ線¹²⁾、ニュートリノをはじめとした高エネルギー粒子探索実験¹³⁾などに用いられることが多い。

2.3 表面インピーダンスの温度変化

MKID は超伝導膜伝送線を使った回路であり、その性質は(2)式のように超伝導薄膜の表面抵抗 R と表面インダクタンス L によって説明できる。しかしながら、超伝導膜の表面インピーダンスの理論計算として広く使われてきた Mattis-Bardeen 方程式¹⁴⁾では、極低温において実験値とは大きく異なる。

$$Q \propto L/R \quad (2)$$

式(2)で与えられるように理想的な超伝導体では、温度が下がるにつれて表面抵抗がゼロに近づいていくので Q 値は発散するが、実際には残留抵抗が存在し、おおよそ超伝導転移温度の 10 分 1 程度で頭打ちとなる(**Fig. 2**)。これを説明する方法の一つとして、国立天文台の野口らによって複素数化した超伝導ギャップエネルギーを用いて表面インピーダンスを計算することで実験値をうまく説明できることが示唆されている(**Fig. 2**)¹⁵⁾。ギャップエネルギーの虚数部が大きくなると、ギャップエネルギーの内側に存在する状態密度も大きくなる。ギャップ内部の状態が存在することで、転移温度よりも十分に低い温度であっても残留電

Fig. 3 (Left) IQ graph of the transmission loss (S_{21}) passing through the superconducting resonator. The raw resonance circle (red) and normalized circle (blue), and signal fluctuations at the resonant frequency (yellow). The phase noise is much larger than the amplitude noise. (Right) The normalized frequency noise spectra of the resonators made from the epitaxial niobium nitride film on a MgO wafer (red), and polycrystal films on quartz (green) and silicon (blue): where, S_f is frequency noise at the resonant frequency and f_0 is the resonant frequency. The noise does not depend on the quality of the superconducting films but depends on the material of the wafers.

子が生じ、これが内部抵抗の原因になると考えられる。ギャップ内に状態が存在することは、マイクロ波によって電子が励起されるという報告¹⁶⁾とも矛盾しない。

さらに動作温度を下げていくと、 Q 値が減少するケースにおいては、ギャップエネルギーの複素数化に加えて、残留電子が近藤効果によって散乱されるモデルで説明できるとの報告¹⁷⁾もある。

共振 Q 値は次章で示す誘電体の 2 準位系による誘電損失で制限されているとの報告¹⁸⁾もあるが、一方で共振 Q 値が頭打ちになる温度と、準粒子寿命が頭打ちになる温度がほぼ一致する実験結果もあり超伝導体の物性にも依存していることも示唆されている。そうであるならば、ギャップエネルギーの虚数部を小さくしなければならないことになる。虚数部の大きさは膜の品質（欠陥や不純物など）に関連していると考えられるが、超伝導薄膜の品質を上げていく方法(3.3 章)の他、TiN などの常伝導抵抗値が高い材質を使うことで 10^6 の Q 値が達成されている¹⁹⁾が、いまだ決定的な解決策は示されていない。

2.4 誘電体の 2 準位系による影響

カリフォルニア工科大学の Gao によって、誘電体の 2 準位系(Two Level Systems: TLS)によって、共振器の透過スペクトル(S_{21})の位相方向に超過雑音が生じる(Fig. 3)との報告がなされた。さらに理想的な超伝導体を仮定すると共振周波数が温度に対して単調に減少するが、TLS の影響によってある温度で共振周波数がピーク値を持つのも特徴の一つであるが、以下では雑音に焦点をあてて TLS の影響を説明していく。

TLS による位相雑音は、MKID に印可するマイクロ波の電場強度を TLS を有する誘電体体積で積分した以下式で経験的に求められる²⁰⁾。

Fig. 4 (Left) A micrograph of a kinetic inductance detector coupled to a double slot antenna for millimeter wave astronomy. Inset shows a 9-pixel lens for the camera. (Right) The spectrum of the optical noise equivalent power of the detector.

$$S_{\theta} \propto \int_V \epsilon |E(r)|^2 dr \quad (3)$$

ϵ は誘電体の比誘電率、 $E(r)$ は電界強度である。また、動作温度に対しては、 -2 乗で減少していくことが知られている。

これらを踏まえ、TLS 雑音を低下させるために CPW を用いた 1/4 波長伝送線路型の共振器では、開放端付近の線路幅を太くする、開放端付近の CPW の信号線とグラウンドの間に存在する基板を除去する²¹⁾などが有効だと報告されている。集中定数型では、キャパシタンス部分ではなくインダクタンス部分のみに誘電体を堆積させる方法などが実施されている²²⁾。

3. ミリ波天文学用検出器の開発

3.1 世界の開発状況

MKID を用いたミリ波天文学の地上観測例としては A-MKID²³⁾、NIKA^{24,25)}、DESHIMA²⁶⁾、TSUKUBA camera²⁷⁾、Groundbird²⁸⁾などが推進されている。A-MKID では 1000 素子規模のアンテナ結合型検出器を、NIKA 及び NIKA2 では最大で 3000 素子規模の LeKID アレイを、DESHIMA は平面アンテナは 1 素子ではあるがその後ろに 64ch のオンチップフィルターバンクを搭載した世界初のオンチップフィルターバンク観測を行った。GroundBIRD は小口径かつ高速で回転する望遠鏡を用いて地上で宇宙背景放射観測を行う計画で、1 つのアンテナに比帯域 15% 程度の 3 バンドのオンチップフィルターを組み合わせて分光観測を行い、MKID の素子数は 500 程度である。筑波大学は南極でのテラヘルツ波望遠鏡のテストパイロットとして、100 素子規模のレンズアンテナ結合型のカメラを野辺山電波望遠鏡に搭載し試験観測に成功している。

3.2 アンテナ結合型検出器

ミリ波の高感度カメラを開発するに当たって、ダブルスロットアンテナと CPW による 1/4 波長伝送線路の組み合わせは非常に相性が良い(Fig. 4)。ダブルスロットアンテナだけでは、ビームが広すぎるため、背面に集光レンズを取り付けるのが一般的である。この方式の利点は、アンテナも検出器も同一の単層超伝導膜で構成できるため製造プロセスが容易で高い歩留まりが期待できるだけでなく、

1/4 共振器の電流密度が高い、すなわち感度が高い短絡端にアンテナを配置すれば高い効率も期待できることである。ただし、単層膜の場合は効率が 5-10%程度と低く⁹⁾、これはミリ波信号で励起された準粒子が、電流密度の高い短絡端近辺から拡散してしまうためだと考えられている。準粒子の拡散を防ぐために、CPW の信号線のうち短絡端付近をギャップエネルギーの低いアルミなどで構成し、その他の部分はギャップの大きい NbTiN などにする事で、光学効率を 80%程度まで高めることができるとの報告²⁹⁾がある。

3.3 MBE によるアルミ膜の高品質化

式(1)のように MKID の性能は準粒子寿命が長く、式(4)に示すように応答性は共振の Q 値が高いほど良くなる³⁰⁾。

$$\frac{\partial \theta}{\partial N_{qp}} \propto \alpha \frac{Q}{V} \quad (4)$$

α は kinetic inductance fraction, V は共振器の準粒子生成部の体積である。そこで、本研究では高感度化を目標として、超伝導薄膜の品質と準粒子寿命の関係性の解明並びに検出器感度を制限していた超伝導共振回路の Q 値頭打ちの原因追究を行った。

BCS (Bardeen, Cooper, Schrieffer) 理論から導かれる準粒子寿命は温度が低くなるにつれて指数関数的に増加する³¹⁾が、超伝導 Al 膜の場合には、超伝導転移温度の 1/6-1/8 の温度で頭打ちになることが報告されている³²⁾。この準粒子寿命の頭打ちの原因として、磁性不純物・外部磁場・超伝導薄膜内の Grain Boundary や結晶欠陥などがあげられる。Al 膜に、同量の磁性不純物 Mn と Al を打ち込んで準粒子寿命を比較した実験では、Mn の方がその効果は若干大きいものの、Al を打ち込んだ場合であっても寿命が 1/10 程度まで低下することが報告されている³³⁾。この結果から示唆されるのは、準粒子寿命は不純物濃度の他、超伝導膜の質にも強く依存するということである。そこで、低温でのマイクロ波における誘電損失が小さい($\tan \delta < 10^{-4}$)、Si 基板上に結晶成長する Al を使って超伝導の膜質が準粒子寿命に与える影響を調べた。

国立天文台のクリーンルーム内にある分子線エピタキシー(MBE)装置を用いて Si(111)基板上に単結晶 Al(111)を 100 nm 堆積し、電子線ビーム(EB)で蒸着した 150 nm 厚の Al 膜とその性能を比較した。MBE 膜の残留抵抗比は 20 であり、EB 膜は 10 であった。双方の膜を 0.1 K 希釈冷凍機で冷却し、測定をしたところ準粒子寿命は 450 μ s, Q 値は 500000 でほぼ等価であった³⁴⁾。研究の範囲内では、高品質 Al 膜によって超伝導共振器の検出器性能向上は見られなかった。また、RRR が向上しても準粒子寿命が変わらないという事実は、常伝導体における電子の散乱機構と超伝導準粒子の散乱機構が違うことを示唆していると考えられる。また、迷光対策などの測定環境改善を行い、超伝導共振器の形状・共振の Q 値を変化させながら検出器としての

Fig. 5 Noise equivalent power spectra of a MKID fabricated with a single crystal aluminum film by molecular beam epitaxy methods.

最適解を探った結果、 6×10^{-18} W/Hz^{1/2} の検出器感度を実現した(Fig. 5)。

4. 放射線検出器の開発

4.1 高エネルギー検出器

超伝導共振器を用いた高エネルギー検出器は、高感度かつ大規模アレイ化によって広い検出面積と高い位置分解能を期待できることから、X 線検出器、暗黒物質探索などさまざまな応用先があげられている。検出方法としては、高エネルギー粒子を直接検出器が吸収する方法と、一度吸収体でエネルギーを熱やフォノンに変換してからそれらを検出する方法がある。また、検出対象のエネルギーが大きい場合ミリ波検出器などで用いられる転移温度が低い超伝導材料のほか、高温超伝導体も用いられている。本稿ではその双方を用いた放射線検出器の開発状況を報告する。

4.2 YBCO 膜を用いた超伝導共振器

高温超伝導体を用いた MKID の開発例としては、YBCO を用いたテラヘルツ波検出器³⁵⁾などがある。高温超伝導体を用いることの利点は検出器の動作温度をあげてより簡便な測定システムの構築を可能とすることだが、従来用いられてきた転移温度の低い超伝導体と比べギャップエネルギーが大きいため、ミリ波帯などの低い周波数領域では使用できないほか感度も転移温度が低い材料には劣る点は受け入れなければならない。

我々は、機械式冷凍機で持続可能な 4.2 K 以上での動作を可能とするため、90 K 程度の超伝導転移温度を持つ YBCO(YBa₂Cu₃O_{7- δ})を使った放射線検出器の開発を行ってきた。MgO 基板上の YBCO 薄膜の上に、in-situ で Au 薄膜が成膜されたものを使用した。デバイス上の Au 膜は剝離するが、in-situ で Au を成膜することにより YBCO 膜との間の接触抵抗を減らし、共振特性を測定するマイクロ波帯の透過特性が向上する。MKID 作製時には、YBCO 薄膜へのダメージを低減するために、Au 膜、YBCO 膜ともウェットエッチングでパターンニングした。また、パターニ

Fig. 6 Resonant spectrum of a YBCO resonator measured at 4 K. The quality factor is approximately 15000. Inset shows the test chip installed into a sample holder made from copper.

ング後の YBCO 薄膜の超伝導転移温度は約 90 K であり、特性の劣化は見られなかった。MKID の共振特性をネットワークアナライザを用いて共振が見え始める前の 80 K から 0.5 K まで測定したところ、温度が下降するに連れて、共振 Q 値が上昇するとともに共振周波数が高くなることを確認できた。0.5 K では MKID11 個中 10 個が動作しており、共振 Q 値は最高で約 15000 程度であった(**Fig. 6**)。

これを用いて動作温度 0.1 K や 4.2 K でアルファ線源、ガンマ線源(コバルト 60, セシウム 137)を用いて放射線を照射したが明確な信号は得られなかった。アルファ線の実験では、基板裏面からアルファ線を照射したため、基板裏面表層でほとんどのアルファ線が吸収され、吸収によって発生した基板中のフォノンが超伝導膜内の準粒子を励起することで、アルファ線を検出するデバイス構造になっている。後述のニオブ共振器を用いた同様の実験では共振 Q 値 20000 程度でもアルファ線の信号を確認できていることから、YBCO 共振器で信号を確認できない原因とその対策案を以下のように検討している。まず、YBCO 膜と MgO 基板の間での音響インピーダンス不整合が考えられる。今回の実験で用いた YBCO 膜は CERACO 社から購入したが、基板と超伝導膜の間に不要な誘電体雑音の発生やフォノンの伝達効率低下を防げると考え、バッファ層が不要な MgO 基板を選択した。しかし、YBCO 膜と基板間の熱伝達抵抗は基板やバッファ層の違いによる差は小さいとの報告³⁶⁾があり、基板の種類によってフォノンが準粒子を励起する効率に大きな違いは生じないと考え。次に、YBCO 膜内で励起された準粒子寿命はピコ秒程度であるとの報告³⁷⁾があり、マイクロ秒程度である共振器の緩和時間よりも著しく短い。よって仮に共振器内に大量の準粒子が励起されたとしてもすぐに準粒子が再結合してしまうため、準粒子数増加に伴うインダクタンスの変化に共振器が追従できず、検出信号が小さいという可能性もありえる。しかしながら、上述の通りアルファ線エネルギーを一度フォノンに落としておりフォノンのエネルギー緩和時間は、

共振器の応答時間と同程度から長いと考えるとフォノンにエネルギーが保存される間は、絶えず準粒子が励起されるため準粒子寿命の短さの影響は相殺できると考える。実際にシリコン基板上のニオブ膜で作成したデバイスでは、信号の緩和時間は準粒子寿命や共振器の応答時間よりも十分に長い 20 μ s 程度であり、フォノンを媒介にすることで短い準粒子寿命の影響を抑えることができています。最後に、大まかな推定ではあるが、共振器の応答性(1 準粒子あたりの共振周波数の変化)とギャップエネルギーの大きさをニオブ共振器と比較すると、YBCO 共振器は応答性が 2-2.5 倍程度高いものの、転移温度が 10 倍程度高いためギャップエネルギーも 10 倍程度大きいとすれば、得られる信号はニオブ共振器の 4 分の 1 程度しかない可能性がある。YBCO 膜を堆積させた MgO 基板と同程度の厚みの基板を用いた場合では、ニオブ共振器での信号雑音比は 6 程度あり YBCO 共振器を用いた場合は信号雑音比が 1.5 程度となり、信号が雑音に埋もれてしまっている可能性がある。

以上から、今後は、デバイスをウェットエッチングからイオンミリングに変更することで共振器を構成する伝送路の細線化し、応答信号を増大させる方法を検討していく。

4.3 ニオブ共振器を用いた放射線検出器

現在の放射線量検査の課題として、放射線検出器の高精度化、高感度化などが挙げられる。食物中の放射線量推定に使われる検出器の例としてシンチレーション検出器と半導体検出器がある。前者は高効率かつ広い検出面積を持つが位置分解能が低く、後者は高いエネルギー分解能を有するが検出面積が小さい。両者のメリットを兼ね備えるデバイスの開発により、食物中に含まれる放射性物質の空間分布を測定することができる。放射線検出において、高位置分解能、高エネルギー分解能を実現するデバイスとして超伝導検出器を採用した。本研究では集中定数型力学インダクタンス検出器(Lumped Element Kinetic Inductance Detector: LEKID)⁶⁾を採用した。これは LC 共振器を等価的な電気回路で表した超伝導共振器であり、大まかな動作原理は先に述べた MKID と同じである。概念図は Fig. 1 に示してある。LEKID はインダクタンス部分の電流密度が一様であり、導波管の短絡部に電流が集中する MKID に対し感度の高い面積が広い利点がある。

国立天文台先端技術センターにあるスパッタ装置で高抵抗シリコン基板上にニオブを 100 nm 堆積させた。直接描画装置でマスクパターンの描画を行い、CF₄ ガスによるドライエッチングでパターンニングを行った。12*20 mm 角基板に 96 素子を配置し、85 素子の動作を確認した(**Fig. 7**)。また基板裏面に鉛の吸収帯を取り付けセシウム 137 からのガンマ線(662 keV)を放射したところ、エネルギー分解能は 3.8 keV、信号の緩和時間は 3.6 μ s であった¹²⁾。

また、500 μ m 厚のシリコン基板上に 10 mm 角で別のデ

Fig. 7 (Top) The S_{21} spectra of 96-pixel gamma ray camera made from a niobium film on a silicon substrate. (Bottom left) Alpha line signals detected with the Nb MKID. Fifty events are plotted in color and the averaged signal is showed in black. (Bottom right) The energy histogram from the alpha line events.

バイスを用い吸収体は取り付けず、基板裏面からアメリシウム-241 から放射されるアルファ線を照射したところ、立ち上がり時間は $5 \mu\text{s}$ 、立ち下がり時間は $20 \mu\text{s}$ 程度、信号雑音比は 6 程度であった。さらに、基板厚を $200 \mu\text{m}$ のシリコン基板上に作成したニオブ共振器では、立ち上がり時間が $0.5 \mu\text{s}$ 、立ち下がり時間は $5 \mu\text{s}$ 、信号雑音比は 6 から 10 程度まで改善したが、エネルギー分解能は $1 \text{ MeV}@5.49 \text{ MeV}$ と悪いためその原因を探っている (Fig. 7)。応答時間及び信号雑音比の改善は基板を薄くすることでアルファ線の大部分を吸収している基板裏面表層から共振器までの距離が短くなったことでフォノン拡散を抑制できたためだと考えている。現在はデバイス直下のシリコン基板をボッシュ法等で $20 \mu\text{m}$ 程度の厚さまで除去することで、応答速度は保ったまま信号雑音比やエネルギー分解能の向上を目指している。

5. まとめ

超伝導共振器の性質を利用した高感度検出器について概説した。この検出器を用いれば、共振器を構成する超伝導材料のギャップエネルギーよりも大きなエネルギーをもつ光子を検出することできるため、ミリ波から放射線までの幅広い周波数領域で応用できる。また、超伝導膜の品質や誘電体内に存在する 2 準位系が検出器の性能に与える影響について述べた。最後に筆者らが開発するミリ波天文学用カメラや放射線検出器の開発状況を報告した。

本研究は国立天文台 (現 宇宙航空研究開発機構) 関本裕太郎教授、野口卓教授、筑波大学 新田冬夢助教、理化学研究所 大谷知行チームリーダー、美馬寛博士との共同研究の内容を含んでいます。またデバイス作成プロセスの一部は国立天文台 先端技術センターの設備を利用させていただきました。NbN 膜は情報通信研究機構 川上彰博士に堆積していただきました。この研究の一部は JSPS 科研費 25706029 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) M. Kurakado: "Possibility of high resolution detectors using superconducting tunnel junctions," Nucl. Instr. Meth. Phys. Research **196** (1982) 275-277
- 2) J. Tucker: "Quantum limited detection in tunnel junction mixers." IEEE J. Quantum Elec. **15** (1979) 1234-1258
- 3) S.M.X. Claude, et al. "Design of a sideband-separating balanced SIS mixer based on waveguide hybrids." ALMA Memo 316 (2000)
- 4) K. D. Irwin: "An application of electrothermal feedback for high resolution cryogenic particle detection," Appl. Phys. Lett. **66** (1995) 1998-2000
- 5) P.K. Day, et al.: "A broadband superconducting detector suitable for use in large arrays," Nature **425** (2003) 817-821
- 6) S. Doyle, et al.: "Lumped element kinetic inductance detectors." J. Low Temp. Phys. **151** (2008) 530-536
- 7) P. K. Day, et al.: "Antenna-coupled microwave kinetic inductance detectors." Nucl. Instr. Meth. Phys. Research **559** (2006) 561-563
- 8) A. Baryshev, et al.: "Progress in antenna coupled kinetic inductance detectors," IEEE Trans. Tera. Sci. Technol. **1** (2011) 112-123
- 9) M. Naruse, et al.: "Optical efficiencies of lens-antenna coupled kinetic inductance detectors at 220 GHz," IEEE Trans. Tera. Sci. Technol. **3** (2013) 180-186
- 10) B. A. Mazin, et al.: "A superconducting focal plane array for ultraviolet, optical, and near-infrared astrophysics." Optics express **20** (2012) 1503-1511
- 11) A. Miceli, et al.: "Towards X-ray thermal kinetic inductance detectors," J. Low Temp. Phys. **176** (2014) 497-503
- 12) M. Naruse, et al.: "Absorber-coupled lumped element kinetic inductance detectors for gamma-rays," Physica C: Superconductivity and its Applications **541** (2017) 36-39
- 13) M. Faverzani, et al.: "Developments of microresonators detectors for neutrino physics in Milan," J. Low Temp. Phys. **167** (2012) 1041-1047
- 14) D. C. Mattis and J. Bardeen: "Theory of the anomalous skin effect in normal and superconducting metals." Physical Review **111** (1958) 412
- 15) T. Noguchi, M. Naruse and Y. Sekimoto: "Contribution of quasiparticles in the subgap states to the surface impedance of superconductors," IEEE Trans. Appl. Supercond. **23** (2013) 1501404
- 16) P. J. De Visser, et al.: "Microwave-induced excess quasiparticles in superconducting resonators measured through correlated conductivity fluctuations," Appl. Phys. Lett. **100** (2012) 162601

- 17) T. Noguchi, A. Dominjon and Y. Sekimoto: "Analysis of characteristics of Al MKID resonators," IEEE Trans. Appl. Supercond. **28** (2018) 1-6
- 18) R. Barends, et al.: "Minimal resonator loss for circuit quantum electrodynamics," Appl. Phys. Lett. **97** (2010) 023508
- 19) M. R. Vissers, et al.: "Low loss superconducting titanium nitride coplanar waveguide resonators," Appl. Phys. Lett. **97** (2010) 232509
- 20) J. Gao: The physics of superconducting microwave resonators. Diss. California Institute of Technology, 2008
- 21) R. Barends, et al.: "Reduced frequency noise in superconducting resonators," Appl. Phys. Lett. **97** (2010) 033507
- 22) A. L. Hornsby, et al.: "Initial investigation into the susceptibility of antenna-coupled LEKIDs to two level system affects," arXiv preprint arXiv:1801.07920 (2018)
- 23) K. K. Davis, et al.: "Complex field mapping of large direct detector focal plane arrays," IEEE Trans. Tera. Sci. Technol. (2018) 10.1109/TTHZ.2018.2883820
- 24) A. Monfardini, et al.: "NIKA: A millimeter-wave kinetic inductance camera," Astronomy & Astrophysics **521** (2010) A29
- 25) A. Catalano, et al.: "The NIKA2 instrument at 30-m IRAM telescope: performance and results," J. Low Temp. Phys. **193** (2018) 916-922
- 26) A. Endo, et al.: "Design of an integrated filterbank for DESHIMA: On-chip submillimeter imaging spectrograph based on superconducting resonators," J. Low Temp. Phys. **167** (2012) 341-346
- 27) T. Nitta, et al.: "Close-packed silicon lens antennas for millimeter-wave MKID camera," J. Low Temp. Phys. **176** (2014) 684-690
- 28) O. Tajima, et al.: "GroundBIRD: an experiment for CMB polarization measurements at a large angular scale from the ground," Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI. **8452** (2012) 84521M
- 29) R. M. J. Janssen, et al.: "High optical efficiency and photon noise limited sensitivity of microwave kinetic inductance detectors using phase readout," Appl. Phys. Lett. **103** (2013) 203503
- 30) B. A. Mazin, et al.: "Position sensitive x-ray spectrophotometer using microwave kinetic inductance detectors," Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 222507
- 31) S. B. Kaplan, et al.: "Quasiparticle and phonon lifetimes in superconductors," Physical Rev. B **14** (1976) 4854
- 32) J. Baselmans, et al.: "Noise and sensitivity of aluminum kinetic inductance detectors for sub-mm astronomy," J. Low Temp. Phys. **151** (2008) 524-529
- 33) R. Barends, et al.: "Quasiparticle relaxation in optically excited high-Q superconducting resonators," Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 257002
- 34) M. Naruse, et al.: "Development of crystal Al MKIDs by molecular beam epitaxy," J. Low Temp. Phys. **167** (2012) 373-378
- 35) K. Sato, et al.: "Evaluation of YBa₂Cu₃O_{7-δ}-based microwave kinetic inductance detectors with rewound spiral resonators," J. Phys.: Conference Series. **1054** (2018) 012053
- 36) R. S. Prasher and P. E. Phelan: "Review of thermal boundary resistance of high-temperature superconductors," J. Supercond. **10** (1997) 473
- 37) M. Tonouchi, et al.: "Ultrashort electromagnetic pulse radiation from YBCO thin films excited by femtosecond optical pulse," Jpn. J. Appl. Phys. **35** (5R) (1996) 2624

成瀬 雅人

1983 年 5 月生。2007 年京都大学理学部理学科卒業。2009 年東京大学大学院理学系研究科修士課程（天文学専攻）修了、2012 年同大学大学院理学系研究科博士課程（天文学専攻）修了。2012 年 4 月埼玉大学大学院理工学研究科 助教。超伝導検出器開発に従事。応用物理学会、電子情報通信学会、日本天文学会会員。博士（理学）。

安藤 友彦

埼玉大学大学院理工学研究科電気電子システム工学コース在学。

久保田 立記

2018 年埼玉大学大学院理工学研究科電気電子システム工学コース博士前期課程修了。

桑田 正博

埼玉大学大学院理工学研究科電気電子システム工学コース在学。

田井野 徹

1996 年長岡技術科学大学工学部卒業。1999 年九州大学大学院工学研究科博士前期課程修了、2002 年同大学院工学研究科博士後期課程修了。2002 年埼玉大学大学院理工学研究科 助教、2009 年同大学院 准教授。日本原子力学会、応用物理学会、電子情報通信学会、エレクトロニクス実装学会会員。博士（工学）。

明連 広昭

1985 年広島大学工学部卒業、1987 年広島大学大学院工学研究科博士前期課程修了。1989 年同大学工学部助手、1992 年東北大学電気通信研究所助手、1998 年埼玉大学助教授、2009 年同大学大学院 教授。1993 年日本学術振興会第 146 委員会受賞。応用物理学会、電子情報通信学会会員。博士（工学）。