

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360182

研究課題名(和文)超伝導光子検出器の多画素化のための広帯域・広ダイナミックレンジ読出回路

研究課題名(英文)Wide-band and Large Dynamic Range Multiplexer for Readout of Superconducting Photon Detector Array

研究代表者

神代 暁(Kohjiro, Satoshi)

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・研究グループ長

研究者番号：60356962

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円、(間接経費) 4,440,000円

研究成果の概要(和文)：ミリ波から線までの電磁波に対し既存技術を凌駕する低雑音性を持つ超伝導転移端検出器に、多画素化による受光面積増大・イメージング機能付与と、システムの小型化・低消費電力化の両立を図るには、極低温-室温間の信号配線数と室温からの流入熱の低減を可能とする極低温下の信号多重読出回路が必要である。本研究では、他方式に比べ機能的に優位な反面、研究が緒についたばかりのマイクロ波帯周波数多重回路に関し、多重化数増大の鍵となる、共振周波数実現精度の向上と、独自電極材料による低雑音化に成功した。また、主要雑音源の寄与度を明らかにし、既存技術導入により、従来型に匹敵する低雑音性実現の見通しを得た。

研究成果の概要(英文)：From millimeter wave to gamma ray, transition edge sensors (TES) exhibit extremely lower noise than conventional radiation detectors. To increase the detection efficiency and apply an imaging capability with keeping compact and low-power consumed TES systems, cryogenic multiplexers (MUX) are required to be investigated for their readout. Though the frequency-domain MUX in the microwave region has higher potential than other conventional schemes, its study has been recently started and not enough for practical applications. We have demonstrated the low-noise operation of the microwave MUX as well as realizing accurate device parameters for distinguishing pixels, where both are key technologies for successful applications. Furthermore, we have succeeded in the breakdown of system noise sources and predicted quantitatively that the noise of microwave MUX can be as low as that of the state-of-the-art conventional MUX only by introducing established technologies.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：周波数多重回路 SQUID 超伝導マイクロ波共振器 Transition Edge Sensor

1. 研究開始当初の背景

抵抗の急峻な温度依存性を利用する超伝導転移端検出器(Transition Edge Sensor; TES)は、半導体検出器に比べ桁以上優れたエネルギー分解能 δE のX線・線力ロリメータ量子効率 $\geq 98\%$ かつ応答時間 $\tau < 0.2 \mu\text{s}$ の近赤外光子計数器冷却半導体に比べ二桁以上小さな{等価雑音電力(Noise Equivalent Power; NEP) $[\text{W}/\text{Hz}]^2 \times \tau$ を持つボロメータとして機能することが実証されて来た。TES 実用化には、受光面積増大やイメージング機能付与が望まれる。単体のTESの受光面積増大は δE , NEP, τ の増大をもたらすため、大面積化は多画素化を意味する。標記応用の多くは0.3 K未満の動作温度を必要とするため、多画素化に伴う極低温-室温間の信号線数増大は、冷凍機負荷の増大を介して、システムの消費電力・体積・価格の増大をもたらす。この問題解決のため、複数画素の極低温下での多重読出法が研究されて来た。周波数多重方式(Frequency Domain Multiplexer; FDM)は、多重化数の増大に伴いSN比が低下しないという、時間多重方式にはない特長を持つ。FDMにおいて、超伝導力学的インダクタンス検出器(Microwave Kinetic Inductance Detectors; MKIDs)同様の $Q > 10^4$ を持ち画素毎に共振周波数 f_R が異なる数GHz帯超伝導薄膜共振器群を、無発熱モードの低雑音電流読出素子SQUID (Superconducting QUantum Interference Device; TES信号強度に応じた可変インダクタンスとして機能)で終端した読出回路が、米国標準研究所(NIST)で提案され、基本動作が実証された。従来TES読出に用いられたFDMの帯域幅 $\sim 5 \text{ MHz}$ の $\sim 5 \text{ GHz}$ への拡大により、1本の読出線への信号多重化数の2-3桁増大、すなわち同じ冷却能・体積・消費電力の冷凍機に実装可能な画素数の増大が、本方式のご利益である。一方、周波数軸上に各画素に対応する多数の f_R 群を精度良く配置し、低雑音かつ広ダイナミックレンジで動作させるためには、多くの課題が残されていた。

2. 研究の目的

従来の読出法を凌駕する多重化画素数とシステム簡素化両立の可能性を秘めながら、緒に付いたばかりのマイクロ波帯FDM研究における課題解決を図り、実用化の知見を得ることを本研究の目的とした。具体的には、 f_R の実現精度を、NISTが読出帯域のわずか30%(4.6-5.7 GHz帯)で得た $\pm 0.04\%$ に対し、全読出帯域(4-8 GHz帯)での改善を目指した。従来型読出法に劣る雑音の原因解明と改善を目標とした。提案当初は、NISTの提案したダイナミックレンジ拡大法(磁束変調法)が、1画素あたりの占有周波数帯を増大し、その結果、読出帯域幅あたりの多重化数を制約する欠点を克服できる方法を提案し

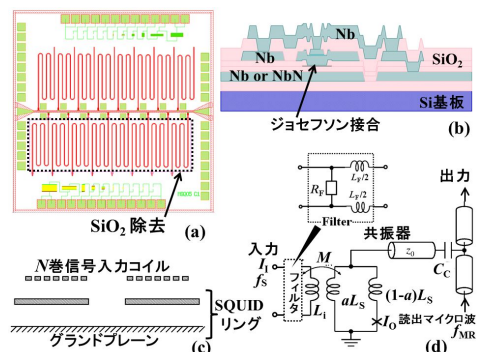


図1 設計・作製したチップの(a)上面 (b)断面 (c) SQUIDの断面 (d) 1チャンネルの等価回路

た。、を本報告で述べる。は、0.1 K付近での低温動作時に報告される余剰雑音抑制やチップ上の占有面積削減の観点では、磁束変調法に比べ不利なことが明らかになったため深入りせず、に注力した。

3. 研究の方法

周波数多重読出回路は、超伝導薄膜共振器群と、TES信号を讀出すSQUIDを、讀出用の超伝導コプレーナ線路と集積化したチップおよび室温エレクトロニクスから成る。本研究では、後者には市販のマイクロ波部品、任意波形発生器、およびデジタルオシロスコープを充当し、前者の設計・作製・特性評価を中心の研究を行った。

(1) 素子設計

図1(a)に設計した5 mm × 5 mmチップを、(d)に一画素讀出の等価回路を示す。共振周波数 f_R を20 MHzずつ離れた16個の1/4波長コプレーナ線路(CPW)共振器を、結合キャパシタ C_C を介して1本の讀出用CPWに接続した。共振器の逆端を、グランド電極に短絡したType-Aと、将来TESからの信号讀出に用いるためSQUIDに接続したType-Bの二種類を備えた。Type-Aは、 f_R の設計値と実験値を系統的に比較し、共振器パラメータの最適設計指針を求めるためのチップである。Type-Bは、入出力応答性や雑音特性を求めるためのチップである。

(2) 素子作製

図1(b)にチップの断面構造を示す。CPW電極を兼ねるグランド層(ニオブ(Nb)または窒化ニオブ(NbN)製)、ニオブ系(Nb/AlOx/Nb)ジョセフソン接合素子(寸法: $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 、臨界電流密度 $\approx 2.5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$)、Nb配線、SQUID入力コイルをシャントするマイクロ波のTESへの漏洩阻止フィルタ用パラジウム(Pd)抵抗、層間絶縁二酸化シリコン(SiO₂)から成る。確立されたNb集積回路作製技術とジョセフソン電圧標準用NbN成膜技術の融合によりチップを作製した。作製には、産総研の超伝導素子作製施設

CRAVITY(<http://unit.aist.go.jp/rriif/openi/cravity/ja/index.html>)を利用し、確立された二オブ系超伝導集積回路作製技術を適用した。

(3) 特性評価

読出回路とTESは同一動作温度 T かつ近接配置が前提となる。高いエネルギー分解能を持つ光子計数器応用のためには、TESを0.1 K程度の温度で用いることが多い。一方、0.1 K冷却のマイクロ波帯超伝導共振器には、誘電体基板と電極界面に生じる電気双極子により、低周波帯で顕著となる余剰雑音の発生が数多く報告されている。この余剰雑音の原因解明と対策は、1節の で述べた応用上重要である。一方、1節の 、 で述べた数十kHz以上の高周波信号検出にとっては、この余剰雑音が抑制され白色雑音となる4 Kでの評価が重要である。また、 f_R 、共振 Q 値、SQUIDパラメータの制御性・再現性評価は、所有する機械式冷凍機で実現可能な4 Kで充分である。以上の理由から、本研究では、4 Kでのチップのマイクロ波透過特性の周波数依存性を基本とするチップ評価を行った。チップを収納し、4-8 GHz帯のマイクロ波信号と直流信号の出入れが可能なモジュールを設計し、チップ上の超伝導電極への磁束トラップによる特性劣化を避けるための磁気遮蔽筒内に配置した上で、4 K冷却ステージと充分な熱伝導を確保した。

4. 研究成果

(1) f_R を0.02%の精度で実現

設計通りの f_R の実現は、多重化画素数増大の鍵である。CPW共振器は図1(a)に示すように複数の屈曲部を持つ。線路中央の幾何学的長さから見積もった f_R ではなく、屈曲部長に補正を加えた f_R により、図2に示すように、読出全帯域である4-8 GHz帯において、実測値と設計値は $\pm 0.02\%$ 以内で一致を見た。

(2) $L_S < 10\text{pH}$ を高精度で実現するSQUID構造

TES信号強度測定のためには、SQUIDリング内磁束が印加磁束の一価関数となる条

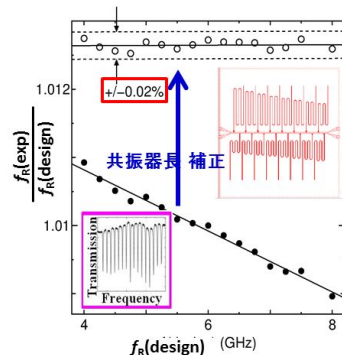


図2 16個の共振周波数の実測値と設計値の比の周波数依存性。CPW長に対する補正無 と有 。透過率の周波数依存性（挿入左図）。CPW終端は短絡（挿入右図）。

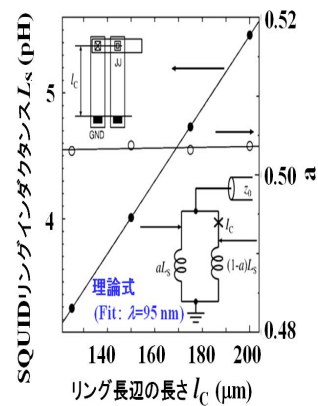


図3 SQUIDリングダクタンス L_S （形状は挿入左図）と左右の分配比 a （挿入右図）のリング長 l_C 依存性。 : 実験、直線：理論

件 $2\pi I_0 L_S / \Phi_0 < 1$ の満足が必要である。但し、 L_S はリングインダクタンス、 I_0 はジョセフソン接合の臨界電流、 Φ_0 は磁束量子である。同じ I_0 を仮定すると、生体磁界計測やTESの従来型読出用発熱型SQUID（最適条件 $2I_0 L_S / \Phi_0 \approx 1$ ）に比べ、 L_S を $1/\pi$ 以下に低減せねばならない。更に、低雑音化に資する読出マイクロ波パワー P_{MR} 増大への対応には、 I_0 大、すなわち L_S 小が望ましい。信号結合に寄与しない浮遊インダクタンス成分の L_S に占める比率が大きな平面型リング構造を採ったNISTの先行研究に対し、本研究では、この欠点を改善できるマイクロストリップ線路構造（図1(c)）のSQUIDリングとし、図3に示すように、リング長に対し線形性に優れ設計値と一致する L_S を実現した。

(3) 共振 Q 値

図4に $P_{MR} = -93$ dBm時の二種類(Nb製、NbN製共振器)のチップの透過率の周波数依存性を示す。超伝導転移温度 $T_C = 9$ KのNb共振器の無負荷 Q 値 Q_1 は、共振器上部のスパッタ SiO_2 膜の有無によらず $1.3 \times 10^3 < Q_1 < 3.5 \times 10^3$ であるのに対し、 $T_C = 16$ KのNbN共振器では、 SiO_2 有の場合 $8.0 \times 10^3 < Q_1 < 1.3 \times 10^4$ 、

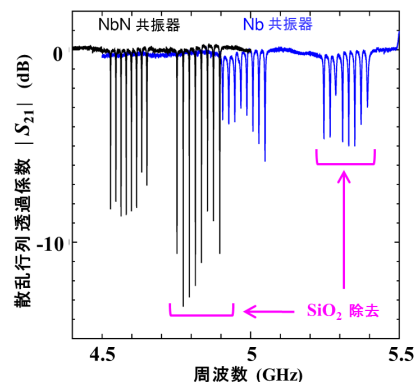


図4 チップのマイクロ波透過率 $|S_{21}|$ の周波数依存性；点線：Nb、実線：NbN

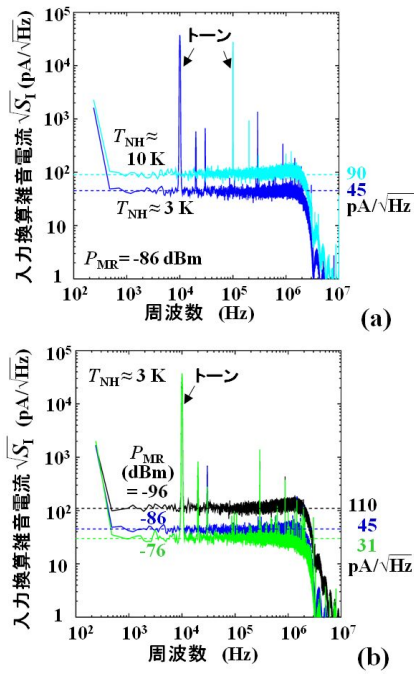


図5 入力換算雑音電流スペクトル密度の周波数依存性(a) HEMT 増幅器の雑音温度2種(b) マイクロ波読出電力3種

SiO₂ を除去した共振器は $1.0 \times 10^4 < Q_1 < 2.0 \times 10^4$ であった。これは二つのことを示す。4 K での励起準粒子数が少ないことを反映して NbN が Nb より Q_1 が高い。Nb は電極損失が Q_1 を支配するが、NbN は電極損失が小さいため、誘電損失の Q_1 への影響が見えている。この結果から、NbN 共振器上部の表面の SiO₂ 除去が高 Q_1 値を得る上で重要なことがわかった。

(4) 白色雑音スペクトル

NbN 製共振器に対し、SQUID 入力端に換算した雑音電流スペクトル密度の周波数依存性を図5に示す。(a)は二種類の HEMT 増幅器(雑音温度 $T_{NH} \approx 10$ K, 3 K)、(b)は三種類の P_{MR} に対する測定結果である。校正用に与えた 10 kHz または 100 kHz のトーンとその高調波以外は、0.6 kHz から 1 MHz までフラットな特性が得られている。図5(a)から、 $T_{NH} \approx 10$ K に対し Nb 共振器チップの値の 33-44%, 66-86% である $\sqrt{S_I} = 90$ pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、磁束換算で $\sqrt{S_\Phi} = 4.3$ $\mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ を得た。なお、 $\sqrt{S_I}$ と $\sqrt{S_\Phi}$ の改善度の差は、SQUID リングと入力コイル間の相互インダクタンス M の 52 pH から 99 pH への増大に起因する。低雑音($T_{NH} \approx 3$ K)仕様の HEMT 増幅器への交換 ($\sqrt{(4 \text{ K} + 10 \text{ K}) / (4 \text{ K} + 3 \text{ K})} = \sqrt{2}$ の改善)と、AD 変換器の折返雑音対策 ($\sqrt{2}$ の改善)により、 $\sqrt{S_I} = 45$ pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $\sqrt{S_\Phi} = 2.2$ $\mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ を得た。

図5(b)より、 P_{MR} 増大は低雑音化に寄与する。 $P_{MR} = -76$ dBm において $\sqrt{S_I} = 31$ pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $\sqrt{S_\Phi} = 1.5$ $\mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ を得た。NEP が $k_B T_{NH} / P_{MR}$ に比例する MKIDs 理論のアナロジーから、

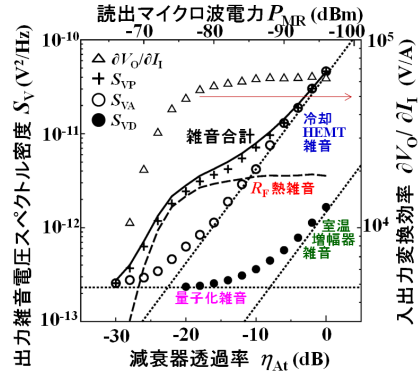


図6 出力電圧スペクトル密度(左)と変換効率(右)の減衰器透過率 η_{At} 依存性。マイクロ波電力 P_{MR} は $P_{MR} \times \eta_{At}$ 一定を満たす。点線: 個別雑音理論、破線: R_F 熱雑音理論、実線: 総合雑音理論、+、 \circ 、 \bullet : 雑音実測値、 \triangle : 変換効率実測値

$\sqrt{S_I}$ は $\sqrt{(k_B T_{NH} / P_{MR})}$ に比例することが期待されるが、実験結果はこれと定量的にずれる。

(5) 主要雑音源の同定

両者不一致の原因を探るため、 P_{MR} を 2 dB ずつ変えながら、システム出力電圧 V_O に重畳する雑音スペクトル密度 $S_V [V^2/\text{Hz}]$ を調べた結果を図6に示す。ここで、室温信号処理系の利得・雑音温度を一定とするため、 P_{MR} と室温処理系内の減衰器透過率 η_{At} の積を一定とした。また、SQUID 入力電流 I_1 (図1(d)) と同じ位相を持つ成分 S_{VP} (+印)、位相が $\pi/2$ ずれた成分 S_{VA} (印) および、室温エレクトロニクスに寄与する S_{VD} (印) の三成分に分離した。三本の点線は、これらの理論的依存性を示す。図6より、 P_{MR} 増大とともに以下の傾向となる。 $P_{MR} < -90$ dBm では S_{VP} 、 S_{VA} は理論通り減少する。 $-88 < P_{MR} < -76$ dBm では S_{VA} は冷却 HEMT 増幅器雑音の理論通り減少するが、 S_{VP} は理論からはずれ一定値に漸近する。 $P_{MR} > -76$ dBm で SQUID システムの変換効率 $\partial V_O / \partial I_1$ の低下に伴い S_{VP} は再び減少する。 S_{VD} は、HEMT 後段に位置する室温マイクロ波帯増幅器の雑音 (P_{MR} 増大に反比例して減少) と、デジタルオシロスコープの分解能の制約による量子化雑音 (P_{MR} に依らず一定) から成る。記述した S_{VP} と S_{VA} の差は、 I_1 のゆらぎに起因する雑音の存在を意味する。第一候補は、SQUID 入力コイル側に配置した読出マイクロ波の TES への流入阻止フィルタ内の抵抗 $R_F \approx 0.24$ Ω で発生する熱雑音電流 $\sqrt{(4k_B T / R_F)} \approx 31$ pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ である。この値は、図5(b)に示す到達値 $\sqrt{S_I} = 31$ pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ に一致する。第二候補は、ジョセフソン接合素子の抵抗成分 R_N である。Nb/AlOx/Nb 接合の $I_0 R_N$ 積 ≈ 2 mV と $I_0 \approx 10$ μA より $R_N \approx 200$ Ω と R_F より3桁高く見積もられ、その熱雑音電流は、図1(d)に示すように、相互インダクタンス M より1桁以上小さな自己インダクタンス L_S を介して SQUID リング内の雑音磁

束に変換される。よって、 R_N の熱雑音の寄与は R_F の寄与の $1/300 (\approx 1/\sqrt{1000} \times 1/10)$ 以下である。以上から、図 5 (b) に示す到達値 $\sqrt{S_I}=31$ pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ は、 R_F の熱雑音に支配されると考えられる。

(6) 国外先行研究との雑音の比較

米国 NIST の Mates 等は、0.1 K 以下で動作するマイクロ波 SQUID の雑音スペクトルを 200 kHz 以下で測定している。2008 年に、 $\sqrt{S_\Phi}=0.17 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}} @ 100 \text{ kHz}$ と極めて低い磁束雑音を報告したが、入力信号との結合が弱く ($M=5 \text{ pH}$)、電流雑音に換算すると $\sqrt{S_I}=70$ pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ であった。2012 年に、 $M=88 \text{ pH}$ の実用的結合構造に対し $\sqrt{S_I}=40$ pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $\sqrt{S_\Phi}=1.7 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}} @ 100 \text{ kHz}$ を報告した。私達の値 $\sqrt{S_I}=31$ pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ は、これらより良い。

(7) 雑音低減の今後の指針と到達見通し

R_F の熱雑音は入力コイル経由で SQUID に直接結合し、 P_{MR} 大の領域で支配要因となるため、その低減がまず重要である。次に、HEMT 増幅器の雑音は、 M 増大と増幅器の低 T_{NH} 化により低減できる。中程度の P_{MR} の領域では、 R_F の熱雑音に次ぎ、出力信号記録に用いるデジタルオシロスコープ内臓 AD 変換器の量子化雑音が支配要因となる。図 7 に、図 6 の S_V を SQUID 入力電流に換算した $\sqrt{S_I}$ と、標記の改善 (矢印(a)-(d)) により期待される雑音低減をまとめる。

(a) 0.1 K 動作 TES 用の読出回路チップを 0.1 K ステージに置けば、 R_F の熱雑音は $1/\sqrt{40}$ ゆえ白色雑音が支配的な周波数帯で $\sqrt{S_I} \approx 5$ pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ を期待できる。低周波域で顕著になることが懸念される 3(3)節で述べた余剰雑音は、2 節で述べた磁束変調法による低減が実証されており、改善度は今後の研究に委ねられる。4 K 動作 TES 用の場合、 R_F に直列容量 C_F を挿入し、遮断周波数 $f_{CF} = 1/(2\pi C_F R_F)$ が $f_S \ll f_{CF} \ll f_R$ を満足すれば、フィルタ本来の目的と信号周波数帯の雑音遮断を両立する。 $f_R \approx 4 \text{ MHz}$ 、 $R_F \approx 0.2 \Omega$ の基で $C_F > 200 \text{ pF}$ が必要となる。プラズマ励起化学気相成長アモルファスシリコン (比誘電率 11, 厚み 25 nm) 膜を極低温チップ上の LC フィルタに適用する例が報告されており、この技術を用いれば、標記 C_F は一辺 220 μm の正方形として実現できる。この寸法は、一画素あたりの CPW 共振器長 $\approx 5 \text{ mm}$ より遥かに短く、共振器終端 SQUID の長辺にほぼ等しい程度なので、 C_F 追加は画素毎の占有面積を増やさない。 C_F により SQUID と結合する雑音電流の減衰率 [dB] は $20 \times \log_{10}\{(f_S + f_{CF})/f_S\}$ すなわち、 $f_{CF}=1 \text{ GHz}$ 、 $f_S=1 \text{ MHz}$ の基で 60 dB となる。

(b) SQUID リング上の巻数 N のスパイラル状入力コイルは、SQUID から結合するマイクロ波に対しマイクロストリップ線路を構成する (図 1 (c)) ので、コイル全長が半波長となる周波数で共振し、系の損失がこの部分に支配される恐れがある。これが上限値 $N \approx 30$,

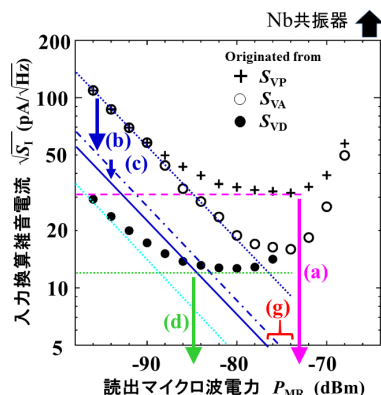


図 7 SQUID 入力換算電流雑音の読出マイクロ波パワー依存性 $S_{VP}:I_1$ と同相成分、 $S_{VA}:I_1$ と直交位成分、 S_{VD} :室温エレクトロニクス起因。(a)-(d)で示す更なる改善 (本文参照) により領域(g)で従来型多重読出回路に遜色ない $\sqrt{S_I} \leq 5$ pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ が期待される。

$M \approx 210 \text{ pH}$ を決める。 $\sqrt{S_I}$ は M に反比例するので、現状 ($N=14$, $M=99 \text{ pH}$) に対しファクタ 2 の改善が見込める。

(c) 研究段階の InP 製 4-8 GHz 帯冷却 HEMT 増幅器では $T_N \approx 1 \text{ K}$ と利得 $G_H \approx 44 \text{ dB}$ が報告されており、現増幅器との置換により、読出回路 0.1 K 動作時で $\sqrt{\{(4 \text{ K} + 3 \text{ K})/(0.1 \text{ K} + 1 \text{ K})\}} = 2.5$ 、4 K 動作時に $\sqrt{\{(4 \text{ K} + 3 \text{ K})/(4 \text{ K} + 1 \text{ K})\}} = 1.2$ の改善度を期待できる。また、CPW 線路を使う進行波型超伝導パラメトリック増幅器では約 30%の比帯域ながら $T_N \approx 1 \text{ K}$ と $G_H \approx 10 \text{ dB}$ が報告されており、これをチップと現増幅器の間に挿入する改善策も考えられる。

(d) 量子化雑音の低減は、AD 変換器の分解能を現デジタルオシロの 8 ビット (仕様値) から、FPGA ベースの市販信号処理ボードの 12 ビットへの増加により、 $2^{(12-8)}=16$ の改善度を見込める。

図 7 より、既存技術に基く上記(a)-(d)の改善により、 $-78 \leq P_{MR} \leq -76 \text{ dBm}$ の領域 (g) で $\sqrt{S_I} \leq 5$ pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ が期待できる。この $\sqrt{S_I}$ と $M=210 \text{ pH}$ の基での磁束換算値 $\sqrt{S_\Phi} \leq 0.51 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ は、従来型 DC-SQUID による読出回路での報告値に匹敵し、本方式が従来法に比べ白色雑音の低さでは劣らないことを意味する。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件 ; いずれも査読有)

S. Kohjiro, F. Hirayama, H. Yamamori, S. Nagasawa, D. Fukuda, M. Hidaka, White noise of Nb-based microwave SQUID multiplexers with NbN coplanar resonators for readout of transition edge sensors, J. Appl. Phys., vol. 115, 2014, pp. 223902, doi:10.1063/1.4882118.

神代暁、平山文紀、福田大治、山森弘毅、

永沢秀一、日高睦夫、マイクロ波共振に基づく超伝導転移端検出器の周波数多重読出回路、低温工学、49 巻 7 号、2014、採択通知受理

F. Hirayama, S. Kohjiro, D. Fukuda, H. Yamamori, S. Nagasawa, M. Hidaka, Microwave SQUID multiplexer for TES readout, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, 2013, pp. 2500405, doi:10.1109/TASC.2012.2237474.

〔学会発表〕(計 9 件)

神代暁、平山文紀、山森弘毅、永沢秀一、福田大治、日高睦夫、 TES のマイクロ波帯周波数多重読出；白色雑音の改善、電子情報通信学会総合大会、2014 年 3 月 20 日、新潟大

平山文紀、神代暁、福田大治、山森弘毅、佐藤泰、山田隆宏、永沢秀一、日高睦夫、 複数 SQUID を用いた高速な線形化読み出し方式、第 61 回応用物理学会春季学術講演会、2014 年 3 月 18 日、青山学院大(神奈川)

神代暁、平山文紀、福田大治、山森弘毅、永沢秀一、日高睦夫、 マイクロ波共振に基づく周波数多重読出、未踏科学技術協会第 83 回ワークショップ、2014 年 3 月 10 日、全日通ビル(東京)

平山文紀、神代暁、福田大治、山森弘毅、佐藤泰、山田隆宏、永沢秀一、日高睦夫、 NbN 薄膜共振器を用いたマイクロ波 SQUID の検討、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、2013 年 9 月 17 日、同志社大(京都)

S. Kohjiro, F. Hirayama, D. Fukuda, H. Yamamori, S. Nagasawa, M. Hidaka, Y. Sato, and T. Yamada, Basic Study on Microwave SQUID Multiplexers for TES Readout、15th International Workshop on Low Temperature Detectors, 2013 年 6 月 24 日、カリフォルニア工科大(米国)

平山文紀、神代暁、福田大治、山森弘毅、佐藤泰、山田隆宏、永沢秀一、日高睦夫、 低温検出器読み出し用マイクロ波 SQUID の試作・評価、第 60 回応用物理学会春季学術講演会、2013 年 3 月 27 日、神奈川工科大(神奈川)

平山文紀、神代暁、福田大治、山森弘毅、佐藤泰、山田隆宏、永沢秀一、日高睦夫、 極低温検出器アレイ読み出しのためのマイクロ波 SQUID マルチプレクサ、電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会、2012 年 10 月 25 日、東京

F. Hirayama, S. Kohjiro, D. Fukuda, H. Yamamori, S. Nagasawa, M. Hidaka, Microwave SQUID Multiplexer for TES Readout, Applied Superconductivity Conference, 2012 年 10 月 09 日、米国オレゴン州ポートラン

ド

平山文紀、神代暁、福田大治、山森弘毅、永沢秀一、日高睦夫、 マイクロ波多重読み出し回路用共振器の特性評価、第 59 回応用物理学関係連合講演会、2012 年 3 月 17 日、早稲田大(東京)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 超伝導電流計

発明者: 平山文紀、神代暁、福田大治、山森弘毅

権利者: 出願段階につき未定

種類: 特許

番号: 特願 2012-235758

出願年月日: 2012/10/25

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神代 暁 (KOHJIRO Satoshi)

産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・研究グループ長

研究者番号: 60356962

(2) 研究分担者

・平山 文紀 (HIRAYAMA Fuminori)

産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・主任研究員

研究者番号: 10357866

・福田 大治 (FUKUDA Daiji)

産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号: 90312991

・山森 弘毅 (YAMAMORI Hirotake)

産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・主任研究員

研究者番号: 00358293

・日高 睦夫 (HIDAKA Mutsuo)

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

・佐藤 泰 (SATO Yasushi)

産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号: 90357153

・山田 隆宏 (YAMADA Takahiro)

産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・主任研究員

研究者番号: 00377871