

低温検出器読み出し用マイクロ波 SQUID の試作・評価

Microwave SQUID for low-temperature detector readout

産総研¹, 超電導工研² °平山文紀¹, 神代暁¹, 福田大治¹, 山森弘毅¹, 佐藤泰¹, 山田隆宏¹,
永沢秀一², 日高睦夫²

AIST¹, SRL², °Fuminori Hirayama¹, Satoshi Kohjiro¹, Daiji Fukuda¹, Hirotake Yamamori¹,
Yasushi Sato¹, Takahiro Yamada¹, Shuichi Nagasawa², Mutsuo Hidaka²

E-mail: f.hirayama@aist.go.jp

はじめに 多画素の超伝導転移端検出器(TES)の読み出し回路として、TES 電流による SQUID の応答をマイクロ波帯で周波数分割多重化する方式が提案されている[1]。この方式では、SQUID で終端された複数の共振器を1本のフィードラインに並列接続し、フィードラインの透過率をマイクロ波で読み出す。これにより周波数帯域を従来の数 MHz から数 GHz に拡大するとともに、高精度の共振器を SQUID チップ上に集積可能なため他方式に比べ多くの画素の多重化が期待できる。集積されるコプレーナ線路共振器について、その共振周波数を4-8 GHz の範囲全域で制御性良く作製できることを報告した[2]。今回実際に共振器と組み合わせた SQUID を試作し評価を行ったので報告する。

設計・作製 本報告で採用した SQUID は、図1に示すように1接合を含むループで共振器短絡端に置かれる。磁場印加による遮蔽電流により接合の等価インダクタンスが変化し、これを共振周波数の変化として読み出す。パラメータ $\lambda = 2\pi L_S I_C / \Phi_0 < 1$ とすることで印加磁場に対しヒステリシスを持たない応答となり、またパラメータ a を変えることで SQUID と共振器の結合強度、したがって共振周波数変化幅を調整できる。また、接合は抵抗シャントが不要であり消費電力が極めて小さくなる。 λ の表式から、 L_S は同一の I_C を持つ dc SQUID ($2L_S I_C / \Phi_0 \sim 1$) に比べ数分の1程度の小さな値が求められる。本報告では λ が十分小さい (< 0.2) 回路パラメータとして、 $I_C = 10 \mu\text{A}$, $L_S = 3\text{-}6 \text{ pH}$, また5 GHz 付近の共振周波数に1 MHz 程度の周波数変化を与えるべく $a = 0.5$ と設定した。小さなインダクタンスを精度良く実現するため、先行研究[1]とは異なり、グラウンドプレーン上のマイクロストリップ線を SQUID コイルとするグラジオメータ構成とし、実効12ターンの入力コイルおよび2ターンの磁場バイアスコイルを積層した。共振周波数20 MHz 間隔の16素子を、1本のフィードラインに接続した5 mm 角チップとした。作製には AIST-SRL Nb 超伝導プロセス ($J_C = 250 \text{ A/cm}^2$) を用いた。測定は機械式冷凍機クライオスタットを用いて4 K にて行った。SQUID チップへのマイクロ波入力

は1素子あたり-80 dBm とし、出力を低温アンプ、室温アンプで増幅して測定した。

結果・考察 まず SQUID コイルに直接注入した電流による共振周波数変化の Φ_0 周期より L_S 抽出を行い、マイクロストリップ型コイルのインダクタンスが設計どおり実現できることを確認した。次に図2(a)に示す共振周波数変化を持つ素子について、単一周波数のマイクロ波に対する透過波の複素振幅の変化量を SQUID 入力電流に対してプロットすると、dc SQUID における入出力 (Φ - V) 特性に相当する図2(b)が得られる。この特性の感度の高い、傾斜の急峻な部分での小信号応答から入力電流、磁束換算でそれぞれ $270 \text{ pA/Hz}^{0.5}$, $6.5 \mu\Phi_0/\text{Hz}^{0.5}$ の雑音が見積もられた。この雑音は、マイクロ波強度によらず一定の電圧雑音として出力に現れることから SQUID チップより後段で付加されたと考えられ、量的には低温アンプの雑音とほぼ一致する。市販低温アンプ使用での雑音改善は3 dB 程度が限度と考えられ、それ以外の方法として、1)共振の Q 値を上げ電圧変調振幅を拡大する、2)入力するマイクロ波強度を増大し出力を増加させる事が考えられる。前者について、現在のプロセスでは共振器全体をスパッタ SiO_2 膜が覆っており、その誘電体損失が Q 値を劣化させていると推測される。この SiO_2 膜を除去するプロセスとすることで、4 K において6 dB 程度の変調振幅の拡大が期待できる。一方入力できるマイクロ波強度は、ジョセフソン接合に流れるマイクロ波電流が I_C より十分小さいという条件に制限される。図1(a)の回路ではパラメータ a を変えることで共振周波数変化幅を一定としたまま L_S , I_C を変える自由度があり、例えば図2の素子から L_S , I_C をそれぞれ2倍とすることで8 dB 程度のマイクロ波強度増大が可能と考えられる。今後これらの改善を行った素子を試作し、低雑音の電流読み出しが可能であることを確認する予定である。

[1] J. A. B. Mates, *et al.*, Appl. Phys. Lett. 92, 023514 (2008)

[2] 第59 回応用物理学関係連合講演会 17a-B1-9 (2012春)

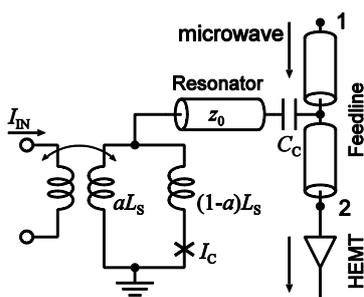


図1 1チャンネル読み出し回路

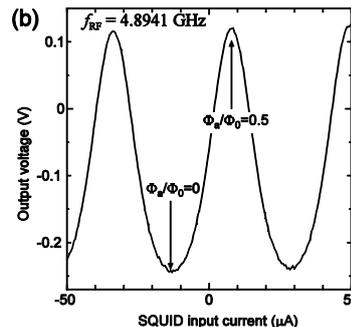
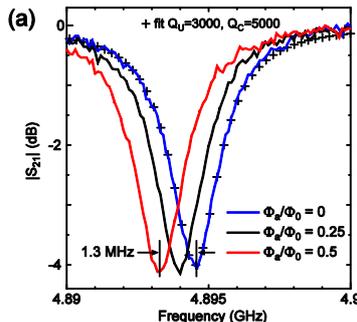


図2 (a)入力電流(磁場)によるマイクロ波透過特性変化 (b)SQUID 入出力特性