

X 線検出用 TES 読み出しのためのマイクロ波 SQUID マルチプレクサ

Microwave SQUID Multiplexer for X-ray Microcalorimeter Arrays

中島 裕貴^{1,2}, 〇平山 文紀², 神代 暁², 山森 弘毅², 入松川 知也^{2,3}, 永沢 秀一²,

日高 睦夫², 山崎 典子¹, 満田 和久¹ (1. 宇宙研, 2. 産総研, 3. 東大工)

Y. Nakashima¹, 〇F. Hirayama², S. Kohjiro², H. Yamamori², T. Irimsugawa^{2,3}, S. Nagasawa²,

M. Hidaka², N. Y. Yamasaki¹, K. Mitsuda¹ (1. ISAS/JAXA, 2. AIST, 3. The Univ. of Tokyo)

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

はじめに 極低温環境に置かれた超伝導転移端検出器 (Transition Edge Sensor, TES)からの信号を周波数分割多重化して読み出す回路として、rf SQUID のインダクタンス変化を共振周波数 f_R の変化 Δf_R として測定するマイクロ波 SQUID システムを開発している。これまで、出力線形化のためのランプ磁束変調回路を含む室温デジタル回路ユニットを構築し、SQUID マルチプレクサチップの評価、隣接チャネルへの漏話の抑制等を報告してきた。また、実際に γ 線検出用 TES を用いたパルスの検出に成功している[1]。現在のマルチプレクサチップと測定系は、立ち上がり時定数 τ_{rise} が数百マイクロ秒の γ 線用 TES 読み出しを想定しており、60 kHz サンプリングとなっている。一方、よりエネルギーの低い X 線検出に適する数マイクロ秒以下の τ_{rise} を持つ TES の読み出しには、より高いサンプリングレート f_s が求められる。本研究では、 f_s とエネルギー分解能 ΔE の関係を明らかにし、必要な f_s を実現可能なマルチプレクサチップの設計、試作を行ったので報告する。

設計・試作 TES からの電流パルスは早い立ち上がり時定数と比較的遅い立ち下がり時定数を持つパルスであり、高い分解能を得るためには立ち上がり部分の波形を精度よく取得する必要がある。ここでは従来の測定系により取得した 6 keV 光子によるパルスの波高値および雑音をもとに、 τ_{rise} を変えたパルスを想定し、いくつかの f_s における ΔE をシミュレートした。立ち下がり時定数は 60 μs 固定とした。結果を図 1 に示す。 τ_{rise} がサンプリング間隔と同程度以下では ΔE が急激に劣化するが、 f_s を現在の 4 倍の 480 kHz とすれば、 $\tau_{rise}=5 \mu s$ のパルスに対しても $\Delta E \leq 10$ eV が得ら

れることが分かった。

ランプ磁束変調法では、検出したい信号に磁束換算で 1 磁束量子 (Φ_0) を超える振幅の鋸歯状波を加え、SQUID の周期応答の位相から信号を復調する。したがって鋸歯状波の 1 サイクルが 1 サンプリングに相当する。このことから共振器は鋸歯状波周波数 $\times$ 変調磁束振幅 / Φ_0 よりも広い共振器帯域 BW を持つ必要がある。実際の SQUID の周期応答は正弦波ではなく高調波成分を持つため、必要な BW を決めるためには回路シミュレーションが必要となる。一方、マイクロ波複素電圧変化は $\Delta f_R / BW$ の関数であるため、高い S/N 比を保つには BW と同時に Δf_R も増大させる必要がある。ここでは、共振周波数の最大遷移幅を BW と等しくする回路パラメータとし、シミュレーションを行った結果を図 2 に示す。縦軸は 1 次元化した出力の振幅 (dc SQUID の出力電圧振幅に相当) の大きさを規格化したもので S/N 比がこれに比例する。シミュレーションに用いたパラメータは、 $f_R = 5.0$ GHz、SQUID ループインダクタンス 10.0 pH、ジョセフソン接合臨界電流 10 μA 、ランプ磁束変調幅 $3 \Phi_0$ である。この結果より、上記条件では共振器帯域を 3 MHz 以上にすれば鋸歯状波周波数、すなわち $f_s = 480$ kHz において十分 (減衰 3dB 以下) な応答が得られることが分かった。

これらの結果をもとにレイアウトを作成、チップの試作を行った。今後室温エレクトロニクスを高速化し、動作実証を行っていく予定である。

謝辞 本研究で用いた素子は、産総研のクリーンルーム CRAVITY において作製された。本研究の一部は、科研費 JP15H02251 の支援を受けた。

参考文献

[1] 入松川他、第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (2017) TBD.

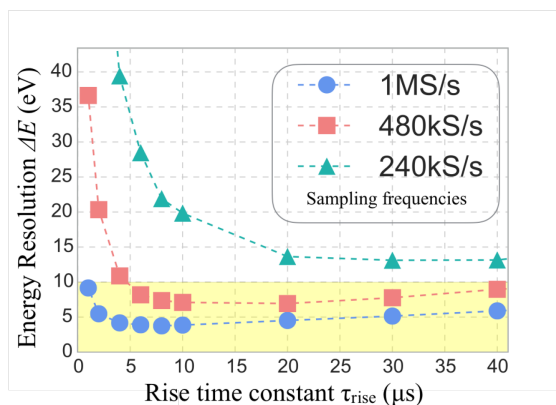


図 1 パルス立ち上がり時定数と分解能の関係

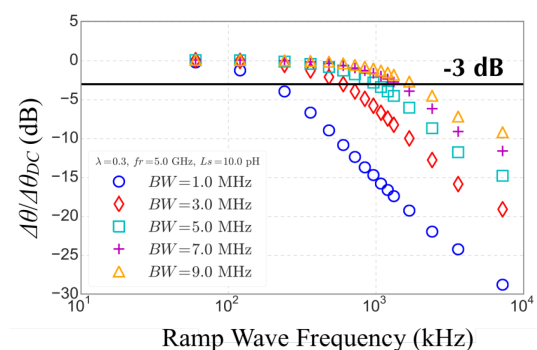


図2 鋸歯状波周波数と SQUID 出力振幅の関係