

超伝導マイクロ波デバイス用小型冷凍機に要求される性能 Required performance for compact refrigerator for superconducting microwave devices

大嶋重利 (山形大学)
Shigetoshi OHSHIMA (Yamagata Univ.)

1. はじめに

酸化物超伝導体が発見された時、一番実用化に近いデバイスは「マイクロ波パッシブデバイス」と考えられた。それは、小型・高性能なデバイスが実現できること、デバイスに対応する小型冷凍機が作製できる可能性があったこと等による。ここでは、超伝導アンテナ・フィルタに使用した小型冷凍機を例に、冷凍能力や耐用年数、コールドヘッドの温度偏差等について述べ、冷凍機に要求される条件を示したい。

2. 超伝導アンテナ用冷凍機

電気的な小型アンテナは超伝導体を用いて初めて実現できる。安達らは液体ヘリウムで動作する鉛合金で小型アレーアンテナを作製し、高利得・高指向性アンテナを報告している[1]。酸化物超伝導体が発見されると、高利得なダイポールアンテナ、ヘリカルアンテナやパッチアンテナなどが検討された。超伝導アンテナ用小型冷凍機に関する検討例は少ないが、我々は Fig.1 で示すようなスターリング型小型冷凍機を開発し、超伝導アンテナの特性を評価した[2]。超伝導アンテナ用冷凍機の熱流入は、同軸ケーブルからの伝導熱、チャンバー外壁からくる輻射熱と開口部からの直接輻射熱である。総熱流入は 1W 以下であるので小型冷凍機でも十分動作温度を確保できる。問題となったのは、チャンバーの気密性保持であった。数か月間真空引き無し冷凍機を運転できる気密性を確保するには、オーリング無しのチャンバーを開発する必要があった。(Fig.1 (b)のチャンバー)

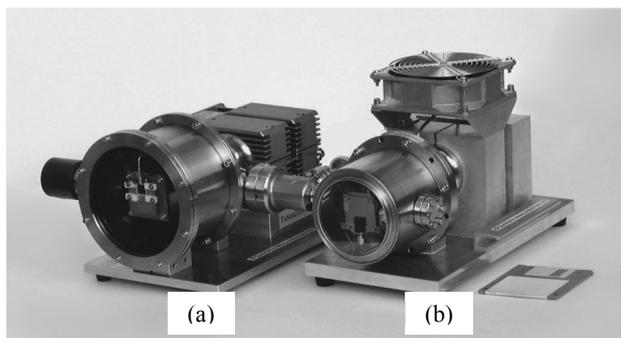


Fig.1 Pictures of mini-cryocooler for superconducting antenna. (a) with normal chamber, (b) with high airtight chamber

3. 超伝導フィルタ用冷凍機

移動体通信用超伝導フィルタは米国でいち早く実用化された。それは米国の第 2 世代移動体通信に於いて、通話品質の劣化が問題となり、それを解決できるのは超伝導フィルタだけであったからである。また、中国の清華大学の Cao 教授のグループも精力的に実用化研究をした。北京市内の移動体通信用の基地局に超伝導フィルタシステムを設置し、そのフィールド試験を実施した。その結果、超伝導フィルタの有効性を明確にできた。そのシステムの写真を Fig.2 に示す。超伝導フィ

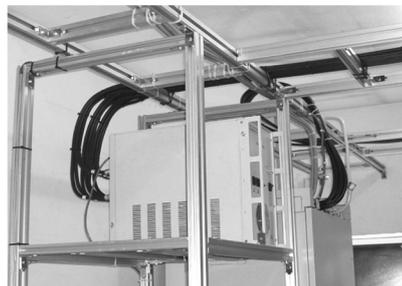


Fig.2 Picture of HTS filter system designed by Prof. Cao

ルタ用冷凍機では、熱流入は 0.5W 以下と小さく、冷凍能力は全く問題ないが、5万時間以上のメンテナンスフリー・再真空引き無しという過酷な条件が出されたが、それクリアし、実用化されている。我々も将来的な移動体通信の目玉になると予想されている、ソフトウェア無線用のチューナブル超伝導フィルタを検討した[3]。Fig.3 にその概要図を示す。ステッピングモーターでサファイアロッドを上下させフィルタの共振周波数を変化させるものである。このシステムで、500MHz のシフトを 1 秒以内で実現できた。

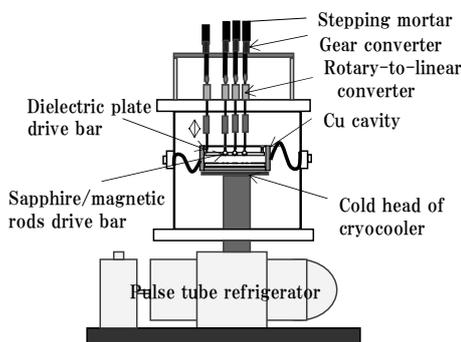


Fig.3. Schematic drawing of cryocooler system for a tunable superconducting filter

4. まとめ

超伝導マイクロ波デバイス用小型冷凍機は、デバイスごとに仕様は異なるが、主に次のような性能が要求されている。(1)冷凍能力 0.5~1W (at 70K) (2)温度安定性: $\pm 0.5K$ (at 70K) (3)耐用年数: メンテナンスフリー5万時間以上 (4)再真空引き無し期間: 5万時間以上。また、価格も重要な要素であり、高価格のために超伝導フィルタが実用化出来なかった例はいくつもあった。

参考文献

1. 安達等「超伝導ダイポールアレーアンテナ」電通学会論文誌, 63, 1980, 916-923
2. Ehata et al. "Development of a Miniaturized Cooling System for HTS Antenna" Advanced in Superconductivity, XII, (1999) 1066-1068.
3. Ohshima et al. "Development of High-Speed Mechanical Tuning System for HTS Filters" IEEE. Trans. Appl. Supercond. 19 (2009) 906.

0.1W, 4K GM 冷凍機を用いた単一磁束量子デジタル回路システム Single-Flux-Quantum Digital Circuit System Using a 0.1-W, 4-K GM Cryocooler

田中 雅光¹, 近藤 直生¹, 佐野 京佑¹, 山下 太郎^{1,2}, 藤巻 朗¹ (¹名大, ²JST さきがけ)

TANAKA Masamitsu¹, KONDO Naoki¹, SANO Kyosuke¹, YAMASHITA Taro^{1,2}, FUJIMAKI Akira¹ (¹Nagoya Univ., ²JST-PRESTO)

E-mail: masami_t@ieec.org

1. はじめに

単一磁束量子 (SFQ) 回路をはじめとする超伝導デジタル回路の研究開発が進んでいる。超伝導回路の動作電圧は、半導体より3桁低いmVのオーダーであるため、これが直接低消費電力性に結びつく。集積回路チップの電力密度が小さいことは、高周波動作を追求する上で必要不可欠な特徴である。一方、冷却に必要な電力も含めた消費電力と高速性の議論では、現行技術に対して従来のSFQ回路の優位性は十分とは言えなかった。近年、SFQ回路の低消費電力化・高エネルギー効率化に関する研究が進化した [1]。回路の駆動電流を制御するために使用していた抵抗を低減あるいは排除することにより、1, 2桁の低電力化が可能である。あるいは、断熱動作や可逆演算のアイデアを取り入れることで、究極的な低エネルギー動作が可能であることが示されている [2]。

超伝導集積回路の消費電力が非常に小さく抑えられるようになると、SFQ回路の動作温度である4Kステージへの熱流入や、集積回路以外での発熱をいかに抑えるかが重要となる。室温エレクトロニクスとの広帯域な信号アクセスの確保や、大きな駆動電流の供給が大きな課題となる。我々は、0.1Wの冷凍能力を持つ4K-GM冷凍機を用い、ケーブルでの熱流入やジュール発熱を抑える工夫を施した冷凍機システムをこれまでに設計、構築している [3]。本稿では、SFQ回路を動作させることを目標に行った、実測による性能評価試験の結果を報告する。

2. 冷凍機システムの構成

Fig. 1 に冷凍機の4Kステージ付近の設計を示す。数千接合規模の低エネルギー SFQ 回路を想定し、高周波信号線10本、大電流 (> 100mA) バイアスツイスト線5対、小電流バイアスツイスト線11対、ヒーターツイスト線2対、温度センサ用ケーブル2対が60Kステージから接続されている。4Kステージ上では、大電流の供給による発熱が問題となるため、同軸ケーブル以外の配線にはNbTi線を用いている。ジュール熱の発生源としては、コネクタや集積回路チップとホルダー間の接触抵抗が残る。

熱流入の抑制と広帯域信号アクセスを両立させるため、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) 薄膜を加工した、特性インピーダンス50Ωのコプレーナ型導波路を用いる。熱流入は基板を介して起こる。今回使用した基板は、大きさ40mm×40mm、厚さ0.25mmで、熱伝導率の低いYSZ (熱伝導率1.8 W/m/K) である。熱流入は基板1枚当たり29mWと見積もっている。YBCOと4K、60Kステージとの間はボンディングで結線する。1枚の配線基板には、11本の導波路が構成され、バイアス線も含むすべての配線に適用されている。冷凍機システムでは、計3枚の配線基板を用いるが、熱流入の合計は冷却能力以下に抑制できている。

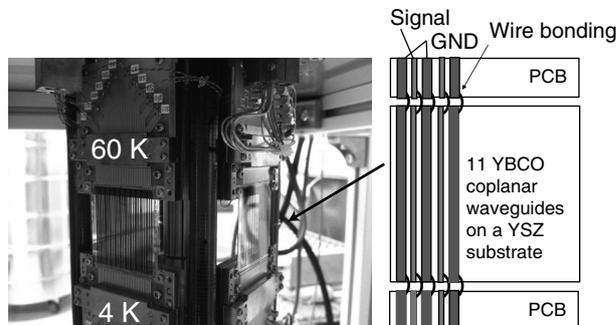


Fig. 1 Photo of the inside of GM cryocooler and design of YBCO coplanar waveguides on YSZ substrate.

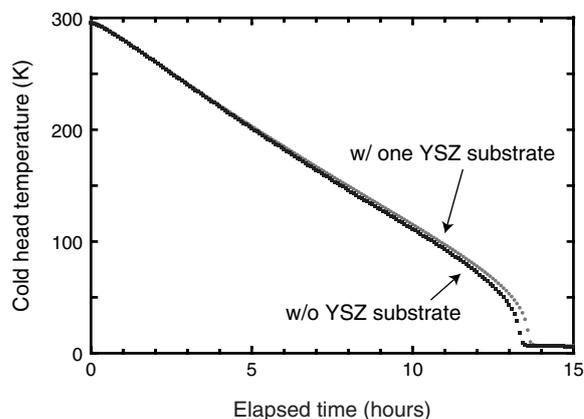


Fig. 2 Cooling test results without and with a YSZ substrate.

3. 冷却試験結果

YBCOとYSZ基板による熱流抑制効果を確認するため、今回は配線基板を3箇所のうち1箇所に取り付けて冷却し、取り付ける前と比較した。Fig. 2に室温から冷却した際の経過時間とコールドヘッドの温度変化を計測した結果を示す。およそ13時間後の到達温度はいずれも約5.9Kであり、熱流入が十分に抑制されていることを示唆している (4Kまで冷えなかった原因は別に見つかっている)。

また、大電流線に100mAを流した際も温度上昇は確認されなかったことから、超伝導線によるジュール熱の発生も抑えられていると考えられ、本システムで大規模なSFQ回路の動作も可能となる見通しを得た。

参考文献

1. 田中雅光ほか, 低温工学 52 (2017) 323.
2. 山栄大樹ほか, 2018年応用物理学会秋季学術講演会.
3. 藤巻朗, 2014年春季低温工学・超伝導学会.

謝辞

本研究の一部は、科研費 (JP18H05211, JP18H01498) の助成を受けて実施したものである。

超伝導ナノワイヤ単一光子検出器システム

Superconducting Nanowire Single-Photon Detector System

寺井 弘高, 三木 茂人, 宮嶋 茂之, 藪野 正裕, 知名 史博(情通機構)

TERAI Hiroataka, MIKI Shigehito, MIYAJIMA Shigeyuki, YABUNO Masahiro, CHINA Fumihiro (NICT)

E-mail: terai@nict.go.jp

1. はじめに

超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (Superconducting Nanowire Single-Photon Detector: SSPD) は、深紫外から中赤外という広い波長帯域に感度を持ち、高検出効率、高カウントレート、低ダークカウントレート(ノイズ)、低ジッタ(出力信号の時間揺らぎ)という優れた特長を有しているため、現在幅広く利用されている光電子増倍管(Photo multiplier Tube: PMT)やアバランシェフォトダイオード(Avalanche Photo Diode: APD)に替わる高性能な光子検出器として注目を集めている。本講演では、情報通信研究機構(NICT)における SSPD システムの開発状況を紹介しますとともに、さらなる高性能化や応用分野の拡大を目指した最近の研究開発への取り組みについて紹介します。

2. 6 チャンネル SSPD システム

SSPD の動作原理は、非常に薄く(～5 nm)、細く(～100 nm)加工した超伝導ナノワイヤの超伝導状態を光子1個のエネルギーで壊すという至ってシンプルなものであり、超伝導現象を利用した他の光子検出器(転移端センサ: TES、マイクロ波カイネティックインダクタンス検出器: MKID 等)では、大掛かりな冷凍機(希釈冷凍機、断熱消磁冷凍機等)を利用して100 mK以下の動作温度まで冷却する必要があるのに対して、SSPD は2 K以上という比較的高い動作温度で動作するという特長がある。また、SSPD は消費電力が nW レベルと極めて小さいため、Gifford-McMahon (GM) 冷凍機の中では最も冷却能力の小さい0.1 W GM 冷凍機で冷却可能である。このことは、冷却のコスト、システムの小型化、取り扱いの簡便性という観点で重要である。

Fig. 1 に NICT で開発した6チャンネル SSPD システムの外観、仕様・性能を示す。6個の SSPD が0.1 W GM 冷凍機(住友重機械工業 RDK-101D)に搭載されており、この冷凍機は AC100V 電源で動作し、水冷不要であるため、家庭用電源があればどこでも利用できる点が大きな特徴となっている。SSPD の性能としては、1550 nm の光波長の光子に対して1秒間に10 カウント以下のダークカウントレートで80%以上のシステム検出効率が実現されている[1-2]。



	Specification & performance
System DE ($\lambda=1550\text{nm}$)	80% @1550nm
Dark CR (c/s)	~ 10 cps
Timing jitter	~ 40 ps
# of channel	6
Gate operating	Not required
Refrigerator	Air cooling compact GM (Sumitomo RDK-101D)
Driving voltage and power consumption	AC 100V・Max. 1.2 kW
Liquid helium	Not required

Fig. 1 6-channel SSPD system developed in NICT and its specification.

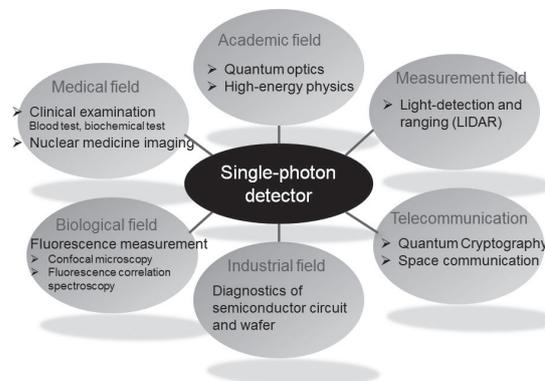


Fig. 2 Application field of single-photon detector

3. SSPD システムの応用展開

NICT で開発した SSPD システムは共同研究を通じて、すでに数多くの研究機関に提供されており、様々な成果の創出に貢献している[3-4]。Fig. 2 に光子検出器の応用分野をまとめた。SSPD の応用は量子情報分野を中心に進んでいるが、最近では長距離宇宙通信における大容量光リンクや蛍光顕微鏡等のライフサイエンスへの応用も進んでいる[5-6]。SSPD をより幅広い分野に応用展開していくためには、様々な光波長で高い検出効率を実現すると同時に、高計数率、低暗計数率、低ジッタという検出効率以外の SSPD の特長も活かしつつ、他の競合する光子検出器と性能を差別化していく必要があり、その際にユーザーの要求をどれだけの確に捉えて研究開発を進めていくかが重要になると考えている。

4. まとめ

本稿では NICT で開発しているマルチチャンネル SSPD システムについて紹介した。GM 冷凍機にマルチチャンネルの SSPD を搭載した小型かつ取り扱いの簡便な光子検出システムとして、PMT や APD 等の他の光子検出器を大きく凌駕する性能を実現しているものの、新規ユーザーにとっては冷却という心理的障壁はまだ高いと思われる。この心理的障壁を取り除くためには、冷却コストもさることながら、システムの小型化が非常に重要と考えられる。NICT では住友重機械工業(株)と共同で GM 冷凍機のさらなる小型化に取り組んでいるところであり、さらなる性能の改善も含めて、SSPD システムのより幅広い分野での応用展開に取り組んでいきたい。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費(JP18H05245, JP26249054, JP25286077, JP20360165)及び公益財団法人光科学 技術研究振興財団の助成を受けたものである。

参考文献

1. S. Miki et al., Opt. Express 21 (2013) p. 10208.
2. S. Miki et al., Opt. Express 25 (2017) p. 6769.
3. M. Sasaki et al., Opt. Express 19 (2011) p. 10387,
4. T. Kobayashi et al., Nat. Photonics 10 (2016) p. 441.
5. M. E. Grein et al., Int. Conf. on Space Optical System and Applications, IEEE, Piscataway, New Jersey (2011) p.78.
6. J. Yamamoto et al., Opt. Express 23 (2015) p. 32633.

断熱消磁冷凍機(ADR)を用いた超伝導転移端検出器(TES)測定と 冷凍機トラブル修理・改良

ADR-based Characterization of Transition Edge Sensors (TES) and Solutions for Associated Machine Troubles

佐藤 昭, 平山 文紀, 入松川 知也, 山森 弘毅, 永沢 秀一, 神代 暁, 福田 大治(産総研); 中島 裕貴(東大)
SATO Akira, HIRAYAMA Fuminori, IRIMATSUGAWA Tomoya, YAMAMORI Hirotake, NAGASAWA Shuichi,
KOHJIRO Satoshi, FUKUDA Daiji(AIST); NAKASHIMA Yuki(U.Tokyo)
E-mail : akira.sato@aist.go.jp

1. はじめに

近赤外からγ線に及ぶ広い波長範囲において、半導体等既存検出器より高いエネルギー分解能を有する単一光子検出器として働く超伝導転移端検出器(TES)の多画素化に関する研究[1]が盛んである。約0.1Kで動作するTESは、宇宙におけるX線天文観測用分光器や、電子顕微鏡付属の元素分析器等への応用を持つ[1]ため、我々は、連続的に冷却出来るが、無重力環境での動作に支障があり、冷却に時間のかかる希釈冷凍機よりも、これらの欠点を克服できる断熱消磁冷凍機(ADR)を主に用いて、検出器と読出回路の研究開発[2, 3]を行っている。本講演では、特性評価実験に際して経験した冷凍機トラブルとその対策を報告する。

2. TES 多画素化の研究

TESは光子吸収体の温度上昇を、超伝導-常伝導相転移に伴う急激な抵抗変化を利用して検出するカロリメーターである。高いエネルギー分解能を実現しようとする受光面積が小さくなり、必要とする光子計数を稼ぐには長時間の計測が必要となる。そのためエネルギー分解能を犠牲にせず、計数率増大を図る多画素化の研究が行われている。

多画素化による配線数の増加は熱流入を増大させ、冷凍機の巨大化を招く。我々は複数画素の出力を1本の配線で済ませる多重読出回路の開発を行うことで、小型の冷凍機でも高エネルギー分解能の測定を短時間に行えるシステムの開発を目指している。

3. ADRのトラブル

我々が用いているADRは、今はもう存在しないVeriCold社製である。技術はEntropy社に引き継がれているが、本機に関する修理依頼が出来ず、ほぼ手探りの状態で修理を行ってきた。いろいろなトラブルを経験したが、本講演では以下の3つについて報告する。

3-1. ヒートスイッチ用ウォームギヤ不良

ウォームギヤの歯飛びが起り、ヒートスイッチの開閉に支障が出てきた。

これはウォームギヤ回転軸の摩耗により、軸の遊びが大きくなり、ウォームホイールとの隙間が拡大し、歯飛びが起こるようになった為である。このADRでは、室温部分のフランジに設置されたステッピングモーターから、4Kプレートへ伸びた回転軸によりヒートスイッチの開閉を行っている。回転方向の変換とヒートスイッチのセルフロック機構の為にウォームギヤが利用されている。軸のホルダーを作り直す事で解決したが、同じ物を作っても定期的に壊れることが予想されたため、摩耗対策と回転軸の固定方法に改善を施した。

3-2. クエンチ頻発

断熱消磁用の6Tマグネットにクエンチが度々起こるようになり必要とする温度に冷やすことが出来なくなってきた。

この原因は明確には分からないが、マグネットと4Kプレートとの熱接触不良やマグネット自体の温度一様性のムラに依ることが推測された為、ヒート・リンクを追加することで解決した。

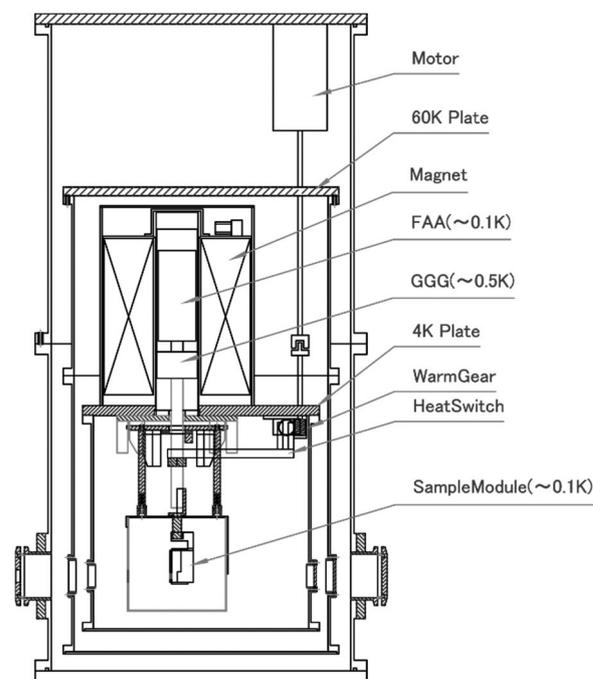


Fig.1 Schematic diagram of VeriCold ADR.

3-3. 徐々に冷えなくなってきた

断熱消磁を行った後の~0.1K保持時間が徐々に短くなり、実験に支障が出てきた。

これはマグネット・ボア内の0.5Kシールドがマグネットに取り付けられた4Kシールドに接触していたことが原因だった。4Kシールドは押さえつけられているだけで位置が一意的に決まらない構造であったため、次第にずれて0.5Kシールドと接触していた。

修理後、0.1K保持時間はトラブル以前の正常時の5.5時間から8時間に伸びた。

謝辞

本研究は、JST-CREST(課題番号:JPMJCR17N4)の支援を受けたものである。本実験で使用しているチップは、産総研の共用施設CRAVITY(Clean Room for Analogue digital superconductivity)[4]で作製された。

参考文献

1. J. N. Ullom, and D. A. Bennett, *Supercond. Sci. Technol.* **28**, 084003, (2015).
2. 神代 暁, 日本原子力学会誌, Vol.60, No.7, 398(2018).
3. S. Kohjiro, F. Hirayama, *Supercond. Sci. Technol.* **31**, 035005(2018).
4. <https://unit.aist.go.jp/neri/cravity/ja/index.html>

超伝導量子コンピュータのための希釈冷凍機システム

Dilution refrigerators for superconducting quantum computers

猪股 邦宏 (産総研)

INOMATA Kunihiko (AIST)

E-mail: kunihiko.inomata@aist.go.jp

1. はじめに

超伝導回路から構成される超伝導量子ビットは、固体素子ベースの量子コンピュータの構成要素として最も有望な素子である[1]。一方、その遷移エネルギーは数 GHz のマイクロ波帯域(温度換算で数百 mK)であるため、熱ノイズによる誤動作や素子の初期化のためには数十 mK という実験環境が要求される。従って、このような極低温環境を容易に実現することが可能な $^3\text{He}/^4\text{He}$ 希釈冷凍機は、この分野の研究には欠くことができない実験装置の一つとなっている。

量子ビットの状態読み出しを含めた制御は、回路 QED のアーキテクチャに倣ってマイクロ波を介して行われるため[2]、室温部から希釈冷凍機ベース温度まで制御用のセミリジッド同軸線路の敷設が必須となる。また、量子コンピュータ実現のためには、量子ビットの高集積化が重要となるが、高集積化に伴う制御用同軸線路の本数増加は希釈冷凍機内部への過剰な熱流入をもたらすため、希釈冷凍機の冷却能力との兼ね合いを慎重に考慮する必要がある。本講演では、超伝導量子コンピュータを動作させるために適した希釈冷凍機システムのセットアップ方法、特に、マイクロ波入力用同軸線路の敷設方法や量子ビットからの微弱な信号を室温部へ導くための出力線路の構成方法などについて議論する。

2. 極低温用マイクロ波同軸線路

希釈冷凍機ベース温度プレートに設置された超伝導量子コンピュータ(量子ビット)を制御しその状態を読み出すためには、それぞれ独立に室温部から制御用同軸線路と出力用同軸線路を敷設する必要がある。前者の材質としては SUS (ステンレス)(外部導体)-SUS(内部導体)や SUS よりも若干導電率に優れた CuNi(キュプロニッケル)-CuNi のセミリジッド同軸線路が使用される。室温や各温度プレートからの熱流入を抑えるために、制御用同軸線路の材質は SUS や CuNi といった導電率に乏しい(=熱伝導率が低い)ものが選択される。一方、後者の材質としては、量子ビットからの微弱な信号を減衰させることなく室温部へ導くために、室温から4K プレートまでは内部導体に銀メッキが施された SUS-SUS、もしくは CuNi-CuNi セミリジッド同軸線路が用いられ、4K 以下の温度領域では NbTi-NbTi 超伝導セミリジッド同軸線路を使用するのが一般的である。極低温環境で使用可能なこれらの同軸線路は、市販されており容易に入手可能である[3]。

3. 極低温用マイクロ波同軸線路のセットアップ

使用する同軸線路の材質に固有な熱伝導率、線路の形状(長さと断面積)から、同軸線路を伝って冷凍機内部へ流入する熱負荷を計算し、合計の熱流入量が希釈冷凍機各温度プレートの冷却能力を上回らないよう、敷設する同軸線路の本数を決定した。

Fig. (left)は BlueFors 社製希釈冷凍機 LD250[4]内部に敷設した測定線路の模式図である。それぞれ用途に応じて、超伝導量子ビット制御・読み出し用マイクロ波を導入するための制御用線路(合計 23 ポート)、量子ビットからの微弱な信号を室温部へ導くための出力用線路(合計 4 ポート)、ジョセフソンパラメトリック増幅器(JPA)を駆動するためのポンプ用線路(合計 3 ポート)の全 3 種類・合計 30 ポートを準備した。制御用線路(RT-Base)とポンプ用線路(RT-4K)には ϕ 1.19 の CuNi-

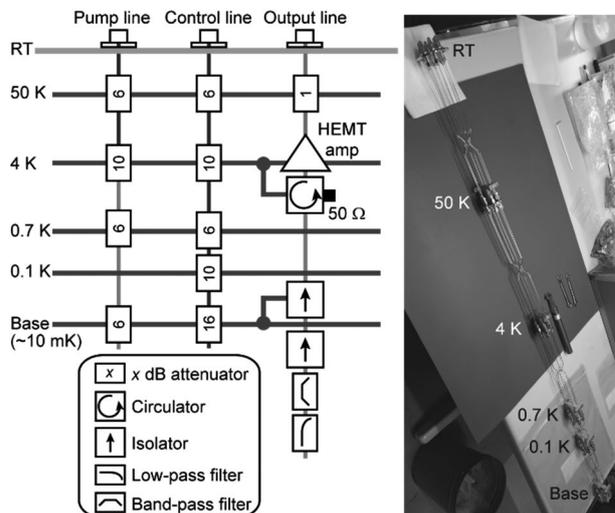


Fig. Schematic of the cabling configuration inside the dilution refrigerator (left) and photograph of the six RF-control-line assembly (right).

CuNi 同軸線路、また、ポンプ用線路と出力用線路(いずれも 4K-Base)には ϕ 2.19 の NbTi-NbTi 同軸線路、出力用線路(RT-4K)には内部導体に銀メッキが施された CuNi-CuNi 同軸線路がそれぞれ使用されている。制御用線路とポンプ用線路には、冷凍機内部プレートの温度勾配に応じた減衰器が取り付けられており、特にポンプラインにおいては、JPA 駆動のために大きなマイクロ波パワーの信号が必要となるため、4K 以下を NbTi 線路で結線し、0.1K プレート上における減衰器を省いている。一方、制御用線路は、ケーブルの損失も含めて合計約 60 dB の減衰を実現している。これにより、室温部からの黒体輻射(量子ビットエネルギーに近い 6 GHz 換算で 10^3 程度)をベース温度において 10^{-3} のレベルまで落としている[5]。出力用線路には 4K プレートに設置された極低温増幅器(HEMT 増幅器)からの輻射を抑制するために、マイクロ波サーキュレータやアイソレータ、帯域通過型・低域通過型フィルタが接続される。

Fig. (right)は実際にアセンブルした制御用線路インサートの写真である。写真のように機械的捻れが生じないよう室温でアセンブルされた 6 本の制御用線路は、希釈冷凍機 RT プレートから Base プレートまで一直線に貫通した NW40 ポートに挿入され、各温度プレートと無酸素銅製の減衰器ホルダーが互いに十分熱接触することで希釈冷凍機内部に組み込まれる。

参考文献

1. M. H. Devoret & R. J. Schoelkopf, Science 339, 1169-1174 (2013).
2. A. Wallraff et al., Nature 431, 162-167 (2004).
3. Coax CO., LTD. <http://www.coax.co.jp/en/cryogenic>
4. BlueFors Cryogenics, <https://www.bluefors.com/>
5. S. Krinner et al., arXiv:1806.07862.

小型2KGM 冷凍システムの開発 Development of 2KGM Cooling System

李 瑞, 許 名堯, 平塚 善勝, 包 乾(住友重機械工業)

LI Rui, XU Mingyao, HIRATSUKA Yoshikatsu, BAO Qian (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.)

E-mail: rui.li@shi-g.com

1. はじめに

量子暗号通信、非破壊検査など新しい分野において、超電導デバイスの応用が期待されている。近年超電導デバイスの小型化と高性能化が進められる一方で、これらデバイスのための冷却装置や冷却技術が十分に研究開発されているとは言い難い。本講演では、弊社でここ数年において進められている超電導デバイス冷却のための小型2KGM 冷凍システムに関する研究開発成果を報告し、今後の課題及び開発方向等の検討を行う。

2. 小型化の目標

弊社における小型2KGM 冷凍システムの研究開発は2012年より着手したものであり、小型化の目標は table. 1 に示した通りである。また本研究の成果の一部は今まで複数回にわたって既に本学会において発表してきた。^{1), 2), 3), 4), 5)}

Table 1. Specification of Compact 2KGM Cooling System

No.	Items	Specifications
1	Cooling Capacity at the First Cold Stage	1W at 60K
2	Cooling Capacity at the Second Cold Stage	20mW at 2.3K
3	Length of the Expander	< 300mm
4	Volume of the Compressor	< 35 Litter

3. 膨張機及び圧縮機の小型化

本研究における膨張機の小型化では、単に寸法的に短縮するだけでなく、より高効率な膨張機を追求することにより、十分な冷凍能力の確保と小型化実現の両立を目指した。

一方、圧縮機の小型化においては、あらゆる方策を検討し、最終的には、オイル潤滑を使わない圧縮方式(リニア圧縮方式)を採用した。

Fig.1(a)には開発した小型膨張機の試作機を示し、Fig.1(b)にはリニア圧縮機概念図を示している。

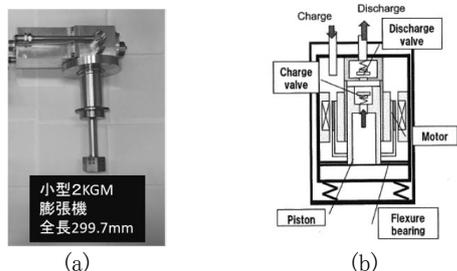


Fig.1 (a) The expander of compact 2KGM cryocooler, and (b) the diagram of linear compressor for the compact 2KGM cryocooler.

4. 冷凍能力の試験結果

Fig. 2 に試作した小型2KGM 膨張機の冷凍能力線図を示した。無負荷時の最低到達温度は、一段ステージで 35.2K、二段ステージで 2.10K であり、開発目標である一段冷凍能力

1W at 60K, 二段冷凍能力 20mW at 2.3K を達成している。

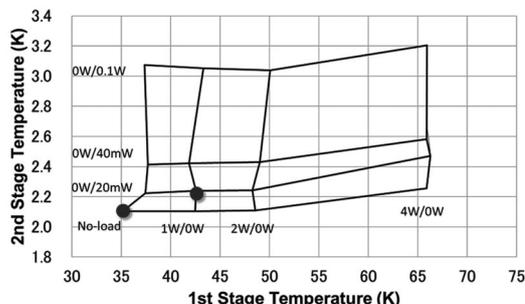


Fig.2 The cooling power load map of the compact 2KGM expander.

5. まとめ

超電導デバイスの冷却を目指した、小型2KGM 冷凍システムの研究開発において、従来の4KGM 冷凍機に比べ数多くの新しい技術にチャレンジしてきた。その結果、冷凍能力は当初の開発目標を達成し、当初の小型化目標もおおむね達成した。しかし、システムの信頼性や性能の安定性などに関しては、現在引き続き検証中である。

謝辞

本研究成果は、独立行政法人情報通信研究機構(NICT)の委託研究(光・量子情報通信用超伝導単一光子検出システムの小型化技術に関する研究開発)により得られたものである。

参考文献

- 許名堯、他、「小型2KGM 冷凍機の研究開発」第89回2014年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 1D - a03, p.43.
- 包 乾、他、「小型2KGM 冷凍機の実験性能検証」第89回2014年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 1D - a04, p.44.
- 平塚善勝、「小型2KGM 冷凍システム用リニア圧縮機の要素技術開発 - 一次試作設計検討 -」第90回2014年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 1D - a08, p.63.
- 包 乾、他、「小型2KGM 冷凍機試作機の開発」第91回2015年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2D - a02, p.97.
- 平塚善勝、他、「小型2KGM 冷凍システム用リニア圧縮機の要素技術開発 - 2K 膨張機との接続試験結果 -」第92回2015年秋季低温工学・超電導学会講演概要集 3D - a06, p.234.

低温検出器用の希釈冷凍機開発

Development of The Dilution Refrigerator for Low Temperature Detectors

伊藤 琢司, 山中 良浩, 梅野 高裕 (大陽日酸)

ITO Takuji, YAMANAKA Yoshihiro, UMENO Takahiro (TAIYO NIPPON SANSCO Corp.)

E-mail: U04200@tn-sanso.co.jp

1. はじめに

TES は超伝導転移端の抵抗変化を利用した低温検出器の一つで、100mK 以下の超低温状態にすることで高いエネルギー分解能を得られる。その冷却手段として希釈冷凍機や核断熱消磁冷凍機が用いられる。当社では低温検出器の冷却ニーズに対応した希釈冷凍機を開発を行ってきた。本発表では低温検出器用の希釈冷凍機の開発概要について紹介する。

2. 無冷媒分離型希釈冷凍機

近年の冷却システムは液体ヘリウムの代わりに機械式冷凍機(GM、パルスチューブ)を利用した無冷媒希釈冷凍機が主流となっており、当社も無冷媒型の e-Dilution®を販売している。無冷媒型は取り扱いが容易である反面、機械式冷凍機が発する振動が、低温検出器の動作に悪影響を及ぼすことがあり、冷却システムの振動対策が課題となっていた。

そこで振動源の機械式冷凍機を分離した超低振動型の無冷媒分離型希釈冷凍機(Split-e-Dilution)を開発した。Fig.1 に Split-e-Dilution の写真を示す。Split-e-Dilution の特徴は希釈冷凍機本体(DR Unit)と GM 冷凍機を内蔵した予冷ユニット(GM Cryocooler Unit)を別の真空容器に設け、各々を Flexible Hose を介して接続したことにある。これにより GM 冷凍機から発する振動は Flexible Hose によって減衰され、DR Unit 内のコールドヘッドに設置された TES 動作への悪影響を低減できる。さらに Fig.1 に示す装置は電子顕微鏡(STEM)への搭載を目的として DR Unit をコンパクトに設計している。

3. 冷却結果

Fig.2 に Split-e-Dilution の冷却曲線を示す。最低到達温度は混合器(MC)で 56 mK、コールドヘッド(Coldhead)で 68 mK を得られた。またコールドヘッド部のヒーターによる温度コントロール試験では 100 mK で温度安定度 $\pm 4.2 \mu\text{K}$ であった。講演では振動の測定結果等も紹介する。

4. おわりに

低振動を目的とした split-e-Dilution を開発し、TES や STEM

の安定動作を確認した。今後はさらなる小型化、低ノイズの開発を進めていく。

謝辞

本内容の一部は JST 先端計測分析技術・機器開発プログラム「超伝導検出器を用いた分析電子顕微鏡の開発」で実施したものである。

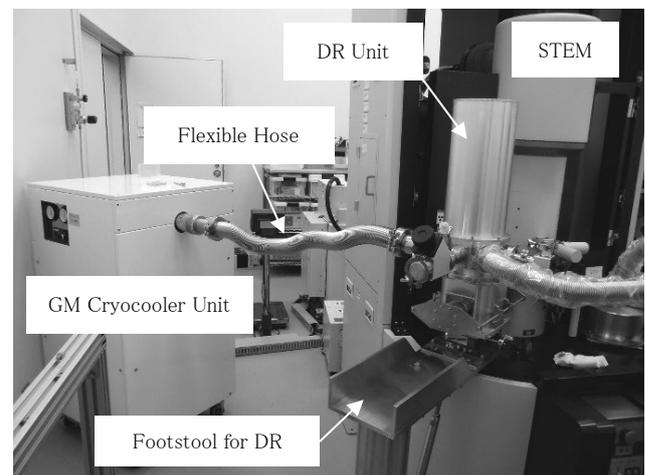


Fig.1: Split-e-Dilution

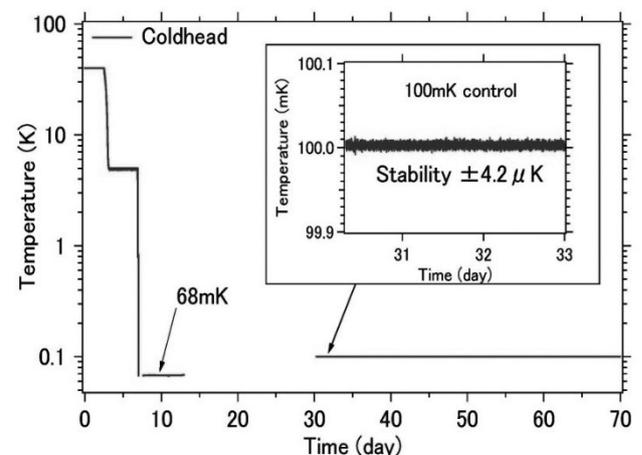


Fig.2: Cooling curve of Split-e-Dilution

単一磁束量子回路を用いたリングオシレータの発振周期の実測と ピコ秒分解能遅延測定回路の性能評価

Measurement of the oscillation period of a ring oscillator using single-flux-quantum circuits and evaluation of a time-to-digital converter with picosecond resolution

冨塚 裕真(横浜国大); 全 伸幸(産総研); 山梨 裕希, 吉川 信行(横浜国大)

TOMITSUKA Yuma (Yokohama Nat. Univ.); ZEN Nobuyuki (AIST);

YAMANASHI Yuki, YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Nat. Univ.)

E-mail: tomitsuka-yuma-sr@ynu.jp

1. はじめに

超伝導体を検出器に用いることで、従来の MCP 検出器では検出が難しかった高分子の検出が実現されている [1]。本研究では検出システムを進展させ、細胞内分子のイメージングをすることを目標としている。検出器は 1 本の超伝導ストリップ線をミランダ状に構成しており、分子が衝突した時に両端から検出信号が出力される。この 2 信号の到達時間差から分子の衝突位置を特定することができる。よって検出信号読み出し回路の時間分解能が高いほど、細かい空間分解能でのイメージングを実現できる。そこで、我々は超伝導検出器と同様の極低温環境で動作する単一磁束量子 (SFQ, Single Flux Quantum) 回路で構成される高時間分解能を実現可能な二重発振器型の遅延測定回路 (TDC, Time-to-Digital Converter) [2]に注目した。先行研究 [2]では、本 TDC を用いて 4 ps の分解能での時間測定が実現されている。

今回、改良を行った TDC についてリングオシレータ (RO, Ring Oscillator) の発振周期を実測し、性能評価を行ったので報告する。

2. 二重発振器遅延測定回路

Fig.1 に二重発振器型 TDC の構成を示す。発振周期が僅かに異なる2つ RO の利用により、本 TDC の時間分解能は発振器の周期ではなく、一致検出器 (CD, Coincidence Detector) が入力される 2 信号について、どの程度の時間差を同時とみなすかによって決定される。そのため、数 ps 程度の極めて高い時間分解能を実現できる。RO1, RO2 の発振周期、発振回数をそれぞれ T_1 , T_2 , M , N とした時、入力される 2 信号の時間差は以下 (1)式により計算される。

$$T_D = (M-1) \times T_1 - (N-1) \times T_2 \quad (1)$$

3. RO の発振周期の実測と本 TDC の性能評価

我々はこれまで、RO の周期について、シミュレーションで計算した値を (1)式に代入して、TDC で測定された時間差を求めていた。今回、より正確に時間差を測定するため RO 内のジョセフソン接合 (JJ, Josephson Junction) に発生する電圧値 V_{RO} をモニタし、以下 (2)式から RO の周期を求めた。ここで Φ_0 は磁束量子の磁束の大きさを表す。

$$T = \Phi_0 / V_{RO} \quad (2)$$

RO1 内の JJ に生じる電圧値を測定した波形を Fig.2 に示す。input, reset はそれぞれ RO の発振開始、停止を行う信号である。Fig.2 において、RO1 内の JJ に生じる電圧値は 68 μ V であり、この値を (2)式に代入して RO1 の周期を 30.4 ps と求めた。同様の測定を RO2 内の JJ についても行い、RO2 の発振周期を求めた。

入力した 2 信号の時間差を横軸に、本 TDC で実測された時間差を縦軸としたグラフを Fig.3 に示す。図中の Measurement は、実測した RO の周期を用いて、(1)式から計算した時間差を示している。測定結果において各データ点とフィッティングラインとのずれから 2 ps 程度の分解能での時間測定が実現できたことを確認した。

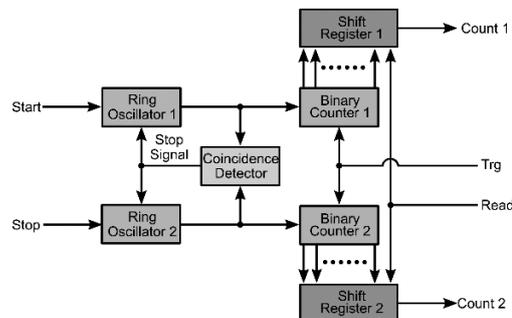


Fig.1 Block diagram of double oscillator TDC

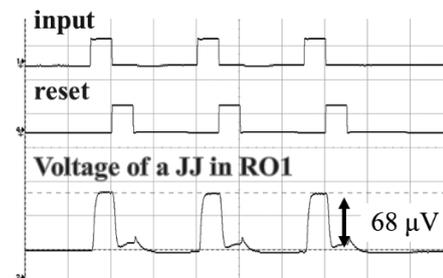


Fig.2 Waveform of voltage of a Josephson Junction in RO1

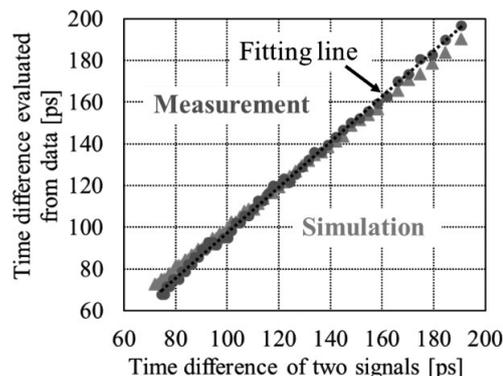


Fig.3 Input time differences vs. measured and simulated time differences

謝辞

本研究に使用された回路は、(独)産業技術総合研究所 (AIST)の超伝導クリーンルーム(CRAVITY)において、AIST-ADP2 プロセスを用いて作製された。

参考文献

1. A. Casaburi, et al., "Subnanosecond time response of large-area superconducting stripline detectors for keV molecular ions," Appl. Phys. Lett. Vol. **94**, (2009) p.212502
2. K. Nakamiya et al., "Improvement of time resolution of the double oscillator time-to-digital converter using SFQ circuits," Phys. C Supercond. Appl., Vol. **463-465**, (2007) pp. 1088-1091

単一磁束量子論理に基づく浮動小数点型除算器の設計と測定

Design and Measurement of Single Flux Quantum Floating-Point Divider

真田 燿嘉(横浜国大); 山梨 裕希(横浜国大); 吉川 信行(横浜国大)

SANADA Akiyoshi (Yokohama Nat'l Univ.); YAMANASHI Yuki (Yokohama Nat'l Univ.);

YOSHIKAWA Nobuyuki (Yokohama Nat'l Univ.)

E-mail: sanada-akiyoshi-sk@ynu.jp

1. はじめに

単一磁束量子(SFQ)論理回路[1]は、半導体集積回路と比較し1/1000程度の消費電力、数十GHzの高速動作といった特徴を持っており、半導体集積回路に代わる次世代の High Performance Computing (HPC) 分野における有力な候補と考えられている。

HPC 分野において Graphics Processing Unit (GPU) を積極的に用いる General-Purpose computing on GPU (GPGPU) は、その計算能力及び低消費電力性から一般的な手法となってきた[2]。高い演算能力が求められるGPUにおいて、浮動小数点演算は重要な役割を担っている。浮動小数点演算において、四則演算のうち、除算は最も複雑かつ長い演算時間を要する演算である。

本研究では、将来の超伝導 GPGPU に向けた、効率的に除算を実行するための除算専用のハードウェアについて調査検討を行い、浮動小数点 SFQ 除算回路の設計をし、その測定を行った。

除算を実行するアルゴリズムはいくつか知られているが、本研究では単純な乗算を繰り返し実行することで除算を実行する Goldschmidt アルゴリズム[3]と呼ばれるアルゴリズムを採用した。独立した乗算を繰り返し実行するこのアルゴリズムはパイプライン化に適しており、ラッチ機能を有する SFQ 論理回路に適していると考えられる。

2. 除算回路の構成と設計

浮動小数点除算回路全体の構成図を Fig. 1 に示す。浮動小数点除算は符号部を演算する Exclusive or ゲート、指数部を演算する指数部演算回路、仮数部を演算する仮数部演算回路、仮数部回路にオーバーフローが生じた際に正規化を行う正規化回路により構成できる。仮数部の除算は、Goldschmidt アルゴリズムに基づき SFQ 論理回路により Fig. 2 のように構成をおこなった。ルックアップテーブル、乗算器、レジスタ及び2の補数変換回路により構成される。まず最初に除算器に除数 d 及び被除数 z が入力される。除数 d はルックアップテーブルに入力され、そこから得られた値及び d 、 z が順に乗算器に入力され乗算結果 d_1, z_1 が得られ、順にレジスタに保持される。次にレジスタにクロックを入力しデータを読み出し、乗算器へ d_1, z_1 の入力を行い、乗算結果 d_2, z_2 を得る。これを繰り返していくと z_i は求める精度の除算結果となる。Fig. 2 に従い、入力 4-bit、出力の精度が 8-bit の除算器の設計を行った所、接合数は、入力用のレジスタやクロックジェネレータを除くと 4740、それらを含んで 7481 であった。設計した仮数部演算回路のレイアウトを Fig. 4 に示す。Fig. 3 は指数部演算回路の構成図を示す。指数部は、指数部の減算及び減算結果に対するバイアスの加算、仮数部の演算結果に応じて正規化の際に必要な+1 の加算から構成される。指数部のビット数が 5-bit の場合を想定して設計を行い、接合数は 785 であった。測定結果などの詳細は当日発表する。

参考文献

1. K. K. Likharev, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 1 (1991) pp. 1-28
2. S. Matsuoka, et al.: Invited Talk, NVIDIA NVISION Conf., San Jose, CA, (2008).
3. R. Goldschmidt, Master thesis, MIT, (1964).

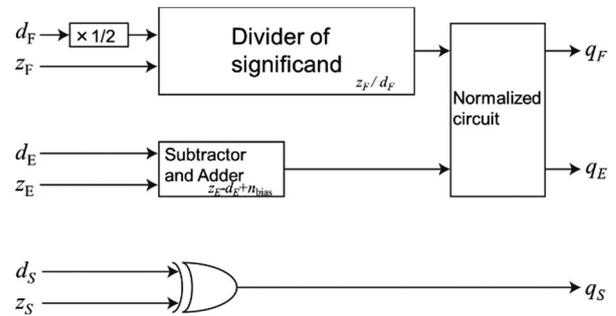


Fig. 1 Overall flow of floating-point number division

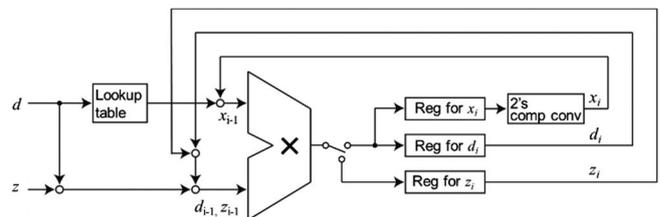


Fig. 2 Configuration of Goldschmidt's SFQ divide for significand

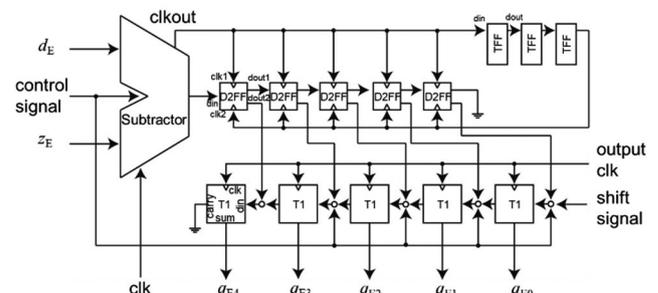


Fig. 3 Configuration of exponent unit

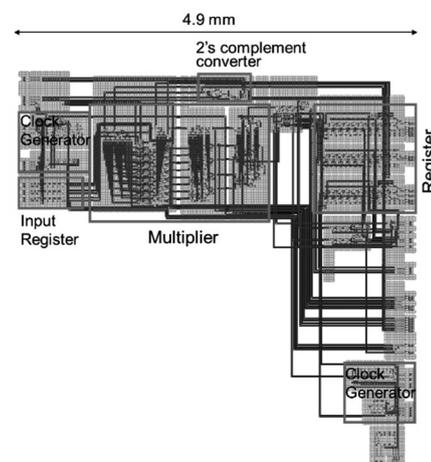


Fig. 4 Layout of designed Goldschmidt's SFQ divider