

準 1 接合 SQUID 比較器の高周波特性

松岡 宏弥[†] 宮嶋 茂之[‡] 藤巻 朗[‡]

[†]名古屋大学 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

E-mail: [†] matsuoka@super.nuqe.nagoya-u.ac.jp

あらまし 1-bit 比較器として動作する QOS 比較器の高周波特性について述べる。実験より得られた遷移曲線より、グレーゾーン幅は 20GHz で極小値となることがわかった。これより低い周波数では、遷移曲線にいくつかのステップが見られ、これは QOS にいくつかの動作モードが存在することを示唆している。これより高い周波数ではパルス間の斥力相互作用によりグレーゾーン幅が広がるのが数値解析によりわかった。

キーワード SFQ(single flux quantum), QOS(quasi-one-junction SQUID), グレーゾーン, 比較器

High frequency characteristic of quasi-one-junction SQUID comparator

Hiromi MATSUOKA[†] Shigeyuki MIYAJIMA[‡] and Akira FUJIMAKI[‡]

[†]Nagoya University Furo-Cho, Chikusa-Ku, Nagoya-City, Aichi

E-mail: [†] matsuoka@super.nuqe.nagoya-u.ac.jp

Abstract We describe high frequency characteristic of QOS (quasi-one-junction SQUID) working as a 1-bit comparator. In transition curves obtained experimentally, the width of gray zone takes minimum at 20GHz. Transition curves include several steps suggesting that there are some operation modes in QOS. The widths of gray zones become wide at frequencies higher than 20GHz. Numerical analysis shows that the cause of this is repulsive interaction between pulses.

Keyword SFQ(single flux quantum), QOS(quasi-one-junction SQUID), gray zone, comparator

1. はじめに

現在、微小エネルギーを高エネルギー分解能で検出する超伝導検出器が注目を浴びており、その分解能は半導体回路の 1 桁から 2 桁ほど優れているといわれている。その応用例として X 線回析や元素分析などが挙げられる。特に X 線検出器に関しては、すでにその性能は実用可能な段階にまで達している[1]。そして、現在ではイメージング等を目的とした超伝導検出器アレーの開発が進められている[2][3]。複数の検出器を並べ、室温の半導体回路へと接続する。このアレー化に伴い、問題となってくるのが信号線増加に伴う、熱流入や雑音流入である。これらは極低温化で動作する超伝導検出器の性能を劣化させる。現在では信号線の数を減らすためにマイクロ波領域での周波数分割多重化、SQUID を用いた時分割あるいはコード分割多重化の開発が進められている[4]。しかし、これらはいずれも扱う帯域が狭く、多重化できる信号数が限られているというのが現状である。そこで我々は複数の超伝導検出器と単一磁束量子 (SFQ) 回路を組み合わせた多次元センサシステムの開発を行っている[5-7]。SFQ 回路は 4.2K での動作、高速動作性、また時間分割多重化の

容易さにより 100-10000pixel の検出器アレーに耐えるシステムを構築することが可能である。そこで我々は多次元センサシステムの中で重要な回路の 1 つである QOS(quasi-one-junction SQUID)の開発を行った。この QOS は 1-bit 比較器として動作する。想定している検出器の出力信号の大きさは数 μA 程度であるため、QOS 比較器には高感度性が求められる。QOS の電流感度の評価のために QOS の出力が確率的に変化する領域(グレーゾーン)を用いる。これまでにこの評価は、低周波において行われてきた[8]。しかし、一般には、検出器との接続を考慮に入れ、高速で動作させる必要がある。そこで今回我々は QOS 比較器における高周波領域のグレーゾーンの大きさを実験およびシミュレーションから評価を行った。

2. QOS 比較器

2.1. QOS 比較器

我々が設計した QOS 比較器の等価回路図を図 1 に示す。等価回路内には超伝導検出器と接続させることを想定した回路も含まれている。QOS への入力を磁気結

合において行っている。基本的な動作は以下の通りである。検出器に電流変化が生じたとき、QOS に電流が流れ、QOS 全体の臨界電流値が変化する。検出器の入力電流がある場合、サンプリングパルスを入力すると、IG がスイッチするためパルスが出力される。その後 IQ がスイッチし、磁束はエスケープされる。また、検出器の電流変化がない場合は、IE がエスケープ接合としてスイッチするため、パルスは出力されない。このようにして、この回路は 1-bit 比較器として動作する。

また、できるだけ QOS 比較器の感度を向上させるために、磁気結合部分のインダクタンス L1 および L2 の値は 1nH としている。

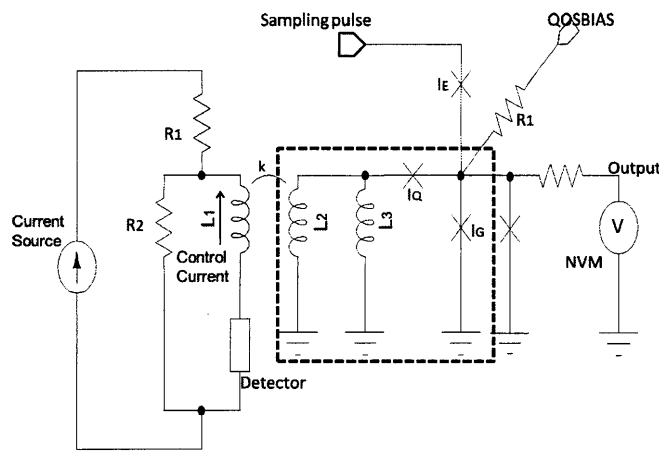


図 1.QOS 比較器の等価回路図。点線で囲まれた部分が QOS を構成している。QOS 比較器の電流感度を評価するため検出器を模擬して、1Ωの抵抗を挿入している。回路パラメータの値は、 $L1=L2=1\text{nH}$, $L3=11\text{pH}$, $R1=1\text{k}\Omega$, $R2=0.12\Omega$, $R3=10\text{k}\Omega$, $IE=45\mu\text{A}$, $IG=90\mu\text{A}$, $IQ=30\mu\text{A}$ 。

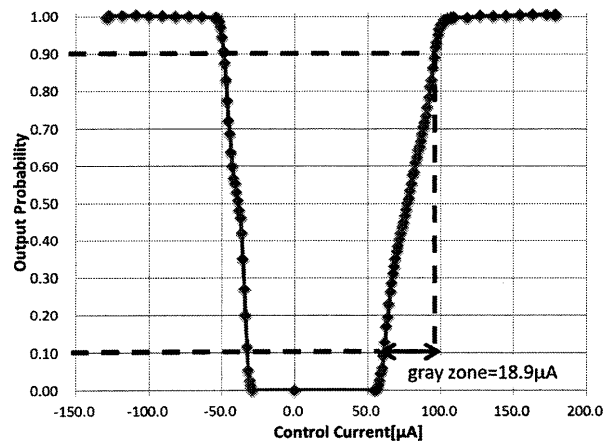


図 2.横軸に制御電流、縦軸に出力確率をとった QOS 比較器の遷移曲線。この遷移曲線より得られたグレーゾーン幅は $18.9\mu\text{A}$ である。

2.2. グレーゾーン

我々は QOS 比較器の電流感度としてグレーゾーンを用いている。ジョセフソン接合では並列に接続されたシャント抵抗に発生する熱雑音が発生する。理想的な状態でもこの熱雑音により接合に流れる電流が揺らぐため、QOS は出力が確率的になる。実際には様々な原因で電流はばらつく。グレーゾーンとはこの出力が確率的となる部分のことである。QOS への制御電流を変化させ、出力確率を算出すると図 2 のような遷移曲線が得られる。この遷移曲線より、出力確率が 0.1~0.9 の幅をグレーゾーンの幅として算出する。

3. 実験

3.1. 遷移曲線

高速試験において、制御電源は外部の直流電流源を用いた。この直流電流源からの制御電流をある値に固定し、その状態でサンプリングパルスを入力する。IG のスイッチング確率は平均電圧法で求めた。電圧はナノボルトメータにより測定した。またサンプリングパルスにはリング発振器を用いて、周波数は 15GHz、18GHz、20GHz、25GHz、30GHz、35GHz で行った。サンプリングパルスの周波数と出力の周波数より出力確率を算出し、遷移曲線を得ている。

また、高速での評価と比較するため、今回低速試験も行った。低速試験は LabVIEW を用いて自動制御で行った。1つの制御電流に対して 2500 回の試行を行い、出力の確率をとった。出力は SFQ/DC コンバータの出力を観測した。サンプリングパルスは 1kHz とした。

本回路は ISTE の標準 2 プロセスを用いて作製した [9]。作製された QOS 比較器のチップ写真を図 3 に示す。

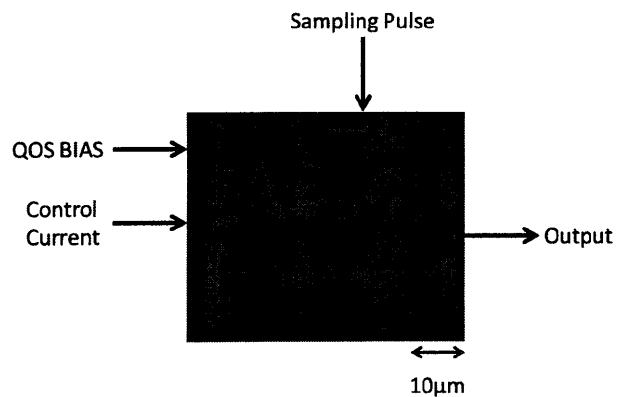


図 3.QOS 比較器のチップ写真

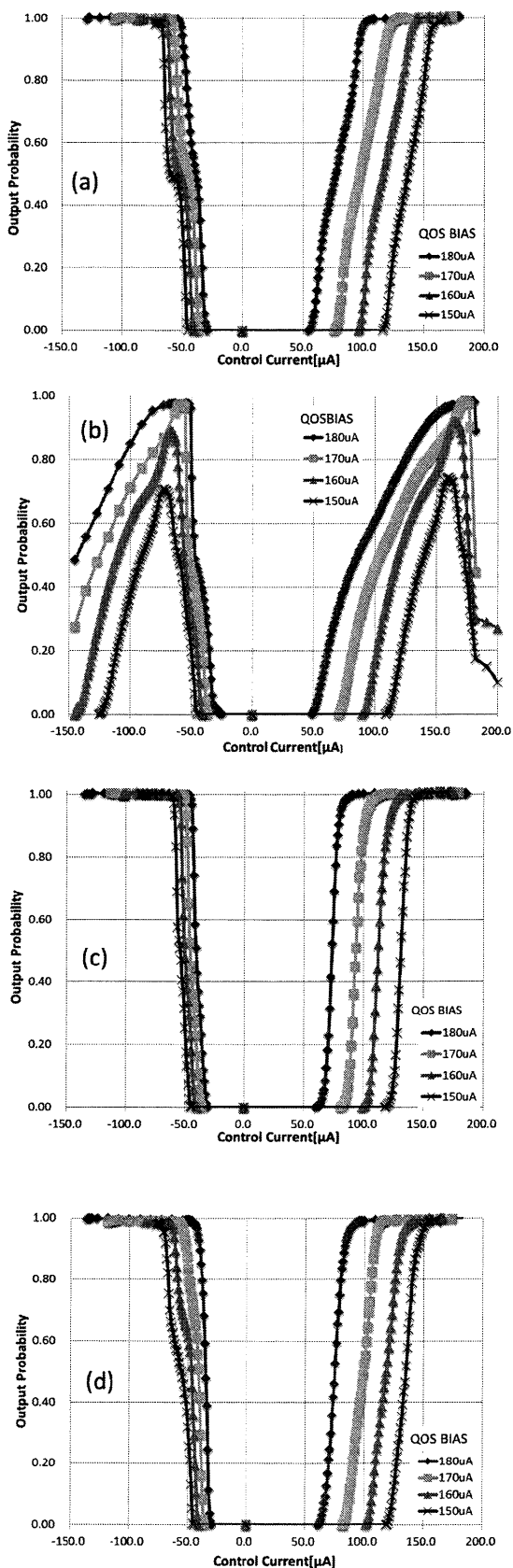


図 4. 実験から得られた遷移曲線。サンプリングパルスの周波数はそれぞれ(a)15GHz、(b)18GHz、(c)20GHz、(d)30GHz。

図 4 に実験により得られた遷移曲線の一部を示す。周波数により遷移の仕方が異なることがわかる。20GHz より低い周波数において遷移の途中にいくつかのステップが見られた。これは QOS にいくつかの動作モードが存在していることを示唆している。

IG は IE に比べ臨界電流値が大きく、負荷が接続されているため、スイッチしにくい接合となっている。このため、入力電流、バイアス電流、サンプリングパルスの周波数により、QOS を構成している IG、IE、IQ の接合のスイッチの順番が異なってくる。考えられる動作モードとしては、IG、IQ、IE の 3 つの接合の同時スイッチや、また、IG のスイッチでパルスが出力された後、IG-IQ-L3 のループや、IG-IE を含むループに磁束が保持されるような状態が存在する。この磁束の保持は、次のサンプリングパルスにより、エスケープされる。QOS には、これらの動作モードが存在し、実際の実験では複雑な振る舞いをしていると考えられる。

また、18GHz ではバイアスマージンが狭く、バイアス値の低いところでは、出力確率が 1 に満たず、グレーゾーン幅の算出ができなかった。この理由は現在解析中であるが、これは、 $L2 = \ln H$ という大きなインダクタンスが影響している可能性を考えている。

3.2. グレーゾーンの評価

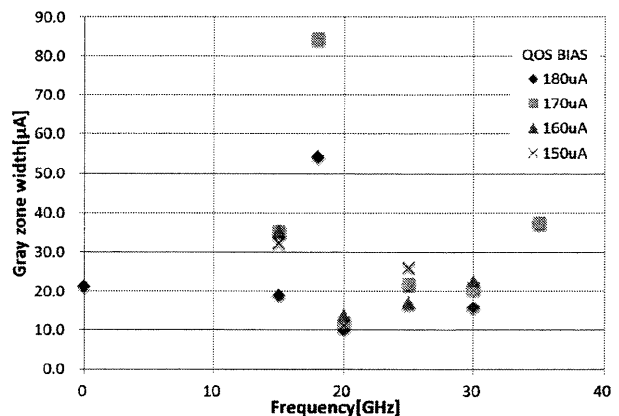


図 5. 実験から得られたグレーゾーン幅の周波数依存性。

図 5 にグレーゾーンの幅の周波数依存性を示す。20GHz で極小値となり、これより高い周波数ではグレーゾーン幅は大きな値となっている。図 3 より 20GHz における遷移曲線では低周波において見られていたステップが消え、グレーゾーンの幅が極小値となった。また、18GHz においてグレーゾーン幅が極大値となっている。これは回路内のどこかで共振が起こり、グレーゾーンの幅が極大値となったと考えられる。

4. シミュレーション

4.1. 遷移曲線

シミュレーションで用いた等価回路を図 6 に示す。シミュレーションはノイズ成分を含めたシミュレータ (jsim_n) とノイズ成分を含めないシミュレータ (jsim) で行った。シミュレーションノイズ成分として、熱雑音を仮定し、次式の熱雑音電流の値を入力した。

$$Ri^2 = 4k_B B T$$

ここで、 k_B はボルツマン定数、 B は帯域幅、 $T=4.2K$ である。

熱雑音は、図 1 内において QOS を構成している接合 IG、IQ、IE のシャント抵抗で発生しているものとした。また、QOS への入力は磁気結合ではなく、直接入力で行っている。サンプリングパルスの周波数は、5GHz、10GHz、15GHz、20GHz、25GHz、30GHz、35GHz、40GHz で、試行回数はそれぞれ 500 回行い、出力確率を算出した。ジョセフソン接合はスイッチすると位相が 2π 変化する。IG の位相変化と IS の位相変化より出力確率を算出した。

シミュレーションにより得られた遷移曲線の一部を図 7、8 に示す。ノイズを含めないシミュレーションにおける遷移曲線では、制御電流が正の側つまり立ち上がり時、急峻に立ち上がり、グレーゾーンは見られなかった。また、負の側、つまり立ち下りにおいては、出力確率が 0.5 でプラトーがみられ、グレーゾーン幅が広がっていた。これに対し、ノイズを含めたシミュレーションでは、立ち下りに対し、立ち上りのほうがグレーゾーン幅は広がっていた。これより、制御電流が正の側のほうが雑音の影響が大きく出ていると考えられる。

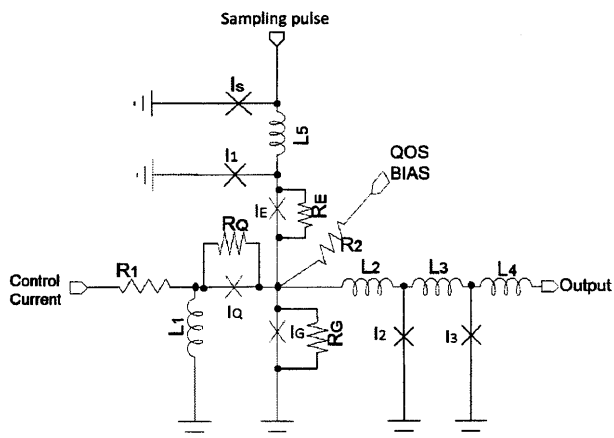


図 6.シミュレーションで用いた QOS の等価回路図。回路パラメータの値は、 $L1=11pH$, $L2=9pH$, $L3=6.6pH$, $L4=2pH$, $L5=2pH$, $IE=45\mu A$, $IG=90\mu A$, $IQ=30\mu A$, $IS=216\mu A$, $I1=216\mu A$, $I2=110\mu A$, $I3=156\mu A$, $R1=10k\Omega$, $R2=1k\Omega$, $RE=8.30\Omega$, $RG=4.15\Omega$, $RQ=12.45\Omega$ 。

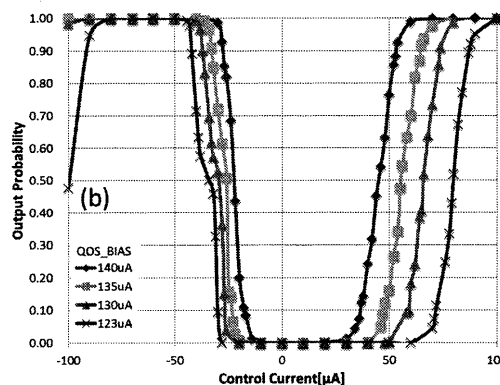
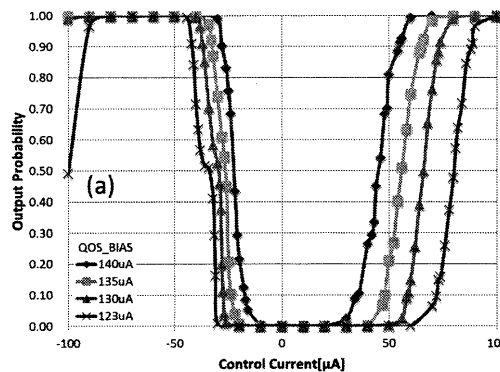


図 7.ノイズ成分を含んだシミュレーションより得られた遷移曲線。サンプリングパルスの周波数はそれぞれ(a)15GHz、(b)20GHz。

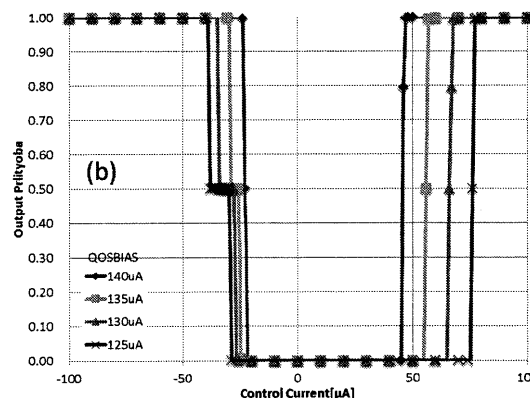
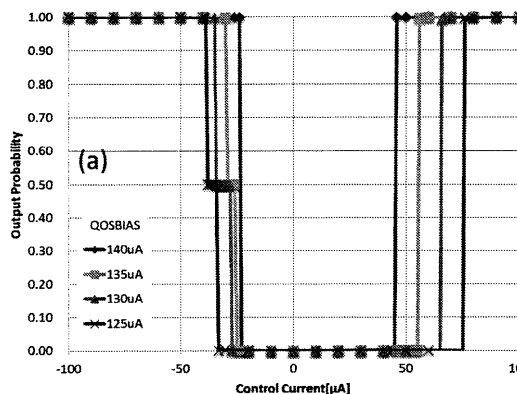


図 8.ノイズ成分を含めないシミュレーションより得られた遷移曲線。サンプリングパルスの周波数は、(a)15GHz、(b)20GHz。

4.2. グレーゾーンの評価

図9にグレーゾーン幅の周波数依存性を示す。グレーゾーン幅は、20GHzから増加しているのがわかる。これより高い周波数では接合がスイッチし、パルスを出した後、安定状態に戻るまでに、次のパルスが来てしまい、出力に影響が出てしまっていた。

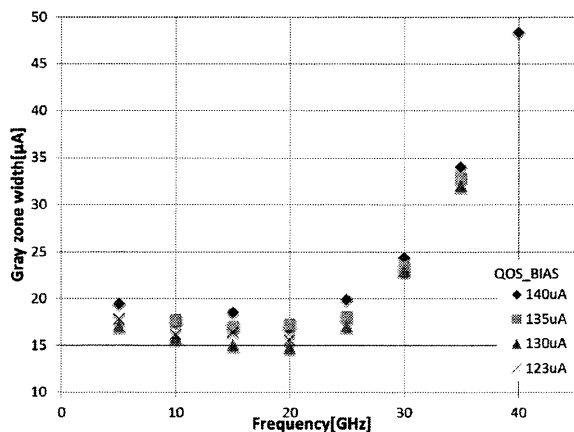


図9.シミュレーションより得られたグレーゾーン幅の周波数依存性。

5. 比較

実験及びノイズを含んだシミュレーションより得られた遷移曲線では、どちらも、立ち下がり、出力確率が0.5の付近にプラトーな領域が見られた。数値解析において、この領域ではIQが位相差 π の変化でスイッチしていた。これが実際の実験でも起こっていると考えられる。

また、立ち上がりのほうが、立下りよりもグレーゾーン幅は大きな値となっており、この結果は実験とノイズを含んだシミュレーションとで一致していた。しかし、ノイズを含まないシミュレーションでは立下りのときのほうがグレーゾーン幅は広がっている。これより、熱雑音は制御電流が正のときのほうが負の時よりも、大きく影響すると考えられる。

20GHzよりも低い周波数において、シミュレーションで得られた遷移曲線にはステップがみられなかった。この原因として、今回行ったシミュレーションにおける等価回路には、図1における $L1=1nH$ という大きなインダクタンスや、浮遊インダクタンスなどが考慮されていないことが挙げられる。実際の実験ではこれらの影響が出ていると推測できる。今後、実際の実験に沿った数値解析をする必要がある。

6. 結論

我々は今回1-bit比較器として動作するQOS比較器の高周波特性について、実験およびシミュレーションを行い、評価した。実験結果とシミュレーションでは、どちらも20GHz付近でグレーゾーン幅は極小値となった。これより低い周波数では、実験により得られた遷移曲線にはいくつものステップがみられた。これはQOSにいくつもの動作モードが存在していると考えられる。しかし、この動作はシミュレーションでは見られなかった。これは実際の実験とシミュレーションで回路が異なるためと考えられ、今後、実際の実験に沿った数値解析を行う必要がある。また、20GHzより高い周波数では、パルス間の斥力相互作用が原因でグレーゾーン幅が広がっていることがわかった。引き続き、実験、及び数値解析を進め、複数の動作モードが出現する条件を明確にし、周波数依存性がなく、高い電流感度(小さいグレーゾーン幅)が得られる条件を採策する。

7. 謝辞

この開発は、科学研究費補助金基盤研究(S)(課題番号23226019)による成果である。また本研究に用いた回路の作製には、産業技術総合研究所が一部寄与している。

文 献

- [1] S.R. Bandler, R.P. Brekosky, A.-D. Brown, J.A. Chevervenak, E. Figueroa-Feliciano, F.M. Finkbeiner, N. Iyomoto, R.L. Kelley, C.A. Kilbourne, f.s. Porter, J. Sadleir and S.J. Smith, "Performance of TES X-ray Microcalorimeters with a Novel Absorber Design," in *Plastics*, 2nd ed. Vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp. 15-64.
- [2] K. D. Irwin "SQUID multiplexers for transition-edge sensors," *Physica C*, vol. 368, pp. 203-210, 2002.
- [3] J. Beyer, P. A. J. de Korte, C.D. Reintsema, S. W. Nam, M. Mac Intosh, G. C. Hilton, L. R. Vale and K. D. Irwin, "performance of 32-Channel Time-Division SQUID Multiplexer for Cryogenic Detector Arrays," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, pp.649-652, 2003.
- [4] K. D. Irwin, M. D. Niemack, J. Beyer, H. M. Cho, W. B. Doriese, G. C. Hilton, C. D. Reintsema, D. R. Schmidt, J. N. Ullom, and L. R. Vale, "Code-division multiplexing of superconducting transition-edge sensor arrays," *Supercond. Sci Technol.* 23, 034004(2010)
- [5] A. Bozbey, S. Miyajima, H. Akaike and A. Fujimaki, "Single-flux- quantum circuit based readout system for detector arrays by using time to digital conversion," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, pp.509-513, 2009.
- [6] Y. Higashi, S. Miyajima, I. Nakanishi and A.

Fujimaki, "Delta Analog- to- Digital Converters with Event-Driven Decimation Filters for a Detector Arrays." International Superconductive Electronics Conference 2009 (ISEC2009) SP-P14 Fukuoka, Japan, June 16-19, 2009.

- [7] I. Nakanishi, Y. Higashi, S. Miyajima, and A. Fujimaki, "SFQ single Processing for a Superconductive Neutron Detector Arrays, International Superconductive Electronics Conference 2009 (ISEC2009) SP-P15, Fukuoka, Japan, June 16-19, 2009.
- [8] S. Miyajima, Y. Higashi, I. Nakanishi and A. Fujimaki, "Analysis of gray zone in QOSs." The Institute of Electronics, Information And Communication Engineers 2009 (IEICE2009)
- [9] S. Nagasawa, Y. Hashimoto, H. Numata, and S. Tahara, "A 380ps, 9.5mW Josephson 4Kbit RAM operated at high bit yield," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol5, pp. 2447-2452, 1995