

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2009

課題番号：18080002

研究課題名（和文）

単一磁束量子による高スループット微細超伝導配線

研究課題名（英文）

Sub-micron superconducting PTLs for SFQ logic circuits

研究代表者

明連 広昭 (MYOREN HIROAKI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：20219827

研究成果の概要（和文）：

絶縁層に比誘電率の大きなアルミナを用いたマイクロストリップ線路を設計・作製し、マイクロストリップ線路の線路幅と負荷 Q 値の関係を調べ、負荷 Q 値は 100 程度で線路幅の減少とともに緩やかに減少することがわかった。

有機溶媒を用いた非水めっき法による Nb 薄膜の堆積に関する研究を行い、NbCl₅ と TCMCl を含む ACN 溶液を液体窒素冷却により精製しためっき浴から連続な金属光沢のある薄膜が得られることを見出した。この薄膜の X 線回折パターンは Nb(110)に対応するピークが存在し、室温における非水めっき法により Nb 金属薄膜の堆積の可能性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：

We have designed and fabricated sub-micron-wide microstrip lines (MSLs) for SFQ circuits. We adopted Al₂O₃ as the insulator of MSLs to realize characteristic impedance of 10 Ω which is equivalent to one of future SFQ VLSI circuits. To evaluate propagation characteristics of MSLs, we measured loaded quality factors of resonance Q_L . In this measurement, we obtained fundamental resonance peaks around 6 GHz against a design value 5 GHz for each MSL and respective Q_L is about 100.

For the high-density SFQ VLSI circuits, three-dimensional (3-D) integration will be needed. We are trying an Nb electrodeposition from non-aqueous electrolytes, which is suitable for making 3-D wiring through substrates. For the Nb electrodeposition from non-aqueous electrolytes, relatively smooth, metallic colored Nb compound films were obtained from solutions containing LiNbCl₆.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	35,600,000	0	35,600,000
2007年度	7,300,000	0	7,300,000
2008年度	4,300,000	0	4,300,000
2009年度	4,300,000	0	4,300,000
年度			
総計	51,500,000	0	51,500,000

研究分野：超伝導エレクトロニクス

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：単一磁束量子論理、マイクロストリップ線路、電子ビーム描画、非水めっき法

1. 研究開始当初の背景

単一磁束量子を情報単位とした論理回路において、今後、超伝導ジョセフソン接合の臨界電流密度を上昇することによる、セルサイズの縮小化に伴う集積度の上昇と200GHzに迫るクロック速度での動作が可能になると考えられる。局在電磁波としての単一磁束量子の伝送は、磁束量子を光速の数分の一程度の速度で伝搬するとともに電流バイアスも必要ない超伝導伝送線路によって行われると考えられる。集積回路に用いられるジョセフソン接合の臨界電流密度が100kA/cm²を超えるようになると、単位セルの大きさは数μm角サイズとなり、超伝導伝送線路の線幅は2~3μmからサブμm、特性インピーダンスは11Ω程度となることが予測される。

2. 研究の目的

我々は、現在用いられているSFQ論理回路用のセルライブラリの基本セルサイズが40x40 μm²であるのに対して、将来高い臨界電流密度を持つトンネル接合技術を用いて、たとえば4x8 μm²のセルサイズが実現された場合の受動配線技術を検討した。SFQ論理回路用の受動配線の特性インピーダンスZ₀は、用いられるトンネル接合技術に応じて2~10Ω程度と小さく、半導体集積回路の場合(Z₀=50Ω)に比べて配線の占める面積が大きくなる傾向がある。そこで、層間絶縁膜にSiO₂(ε_s=3.9)に比べて比誘電率の大きなAl₂O₃(ε_s=8.5)を用いてサブミクロン幅の受動線路を設計し、試作および特性の評価を行うことを第一の目的とした。

一方、SFQ論理回路用のLSIチップを組み合わせてシステムを構成する場合はリップチップボンディングが一般に用いられている。我々は、さらに集積度やチップ間の配線による遅延が小さいことが期待される3次元実装を実現するために、基板に形成した貫通孔にNb配線を形成する技術を検討した。その一つのアプローチとして、有機溶剤を用いた非水めっき法によるNb薄膜の析出方法を確立することを第二の目的とした。

3. 研究の方法

(1) マイクロストリップライン

図1にマイクロストリップラインの概略図を示す。ここで、d₁, d₂は信号ラインと接地導体の厚み、λ_{L1}, λ_{L2}は信号ラインと接地導体の磁場新入長、Wを信号ラインの幅、dを絶縁層の厚みとすると、このマイクロストリップ

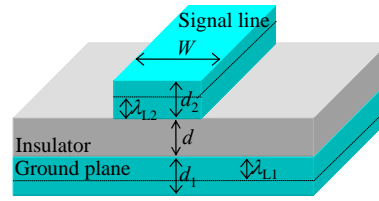


図1 マイクロストリップラインの概略図

ラインの特性インピーダンスは

$$Z_0 = \frac{\zeta_0}{K_f} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_s}} \frac{d}{W}$$

$$\times \left[1 + \frac{\alpha_1 \lambda_{L1}}{d} \coth\left(\frac{d_1}{\lambda_{L1}}\right) + \frac{\alpha_2 \lambda_{L2}}{d} \coth\left(\frac{d_2}{\lambda_{L2}}\right) + \frac{\beta \lambda_{L1}}{d} \operatorname{cosech}\left(\frac{d_1}{\lambda_{L1}}\right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

で与えられる。ここで、ζ₀は真空の特性インピーダンス、ε_sは絶縁層の比誘電率、K_fはフリンジ係数、α₁, α₂, βはW/dに依存したパラメータである。この式から明らかのように、絶縁層の厚みdをある程度の値に保ったまま信号ラインの幅Wを小さくするためには図2に示すように絶縁層の比誘電率ε_sを大きくすることが有効である。

我々は、図3示すマイクロストリップ線路を共振器とする透過型の共振器を設計し、電子線描画法と通常の写真リソグラフィ法を組み合わせて設計した共振器を作製した。外部の特性インピーダンス50Ωの信号線との接続のために特性インピーダンス50Ωのコプレーナ線路を両端の接続部分に設置した構造とした。マイクロストリップ線路の線幅W依存性を調べるため、W=1~5μmとした。この透過型共振器では、両端の特性インピーダンス50Ωのコプレーナ線路に対してマイクロストリップ線路の特性インピーダンスが十分に小さくなるように設計した。マイクロス

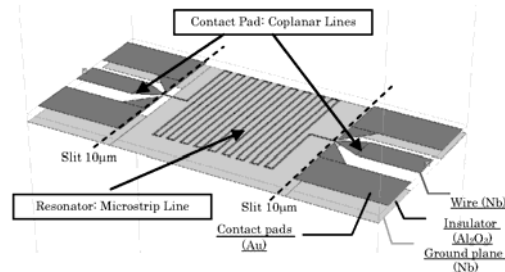


図3 透過型共振器の概略図。共振器は、一組のコプレーナ線路の間に、10μmのギャップを設けてマイクロストリップ線路による共振構造を設けた。

トリップ線路の長さを l とすると、基本共振周波数

$$f_r = \frac{1}{2l\sqrt{LC}}$$

の整数倍の周波数 f_0 に共振ピークが現れる。ここで、 L, C はマイクロストリップ線路の単位長さ当たりのインダクタンスと容量である。共振ピークの幅より負荷 Q 値

$$Q_L = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$

が得られる。我々は、 L および C を超伝導マイクロストリップ線路シミュレーションソフト *sline* を用いて計算し、基本共振周波数 $f_r=5\text{GHz}$ に対して線路長 $l=4760\mu\text{m}$ を得た。

(2)有機溶媒を用いた非水めっき法による Nb 堆積

我々は、SFQ 論理回路の 3 次元実装を実現する方法として、基板に貫通孔を形成し、その側壁に Nb 超伝導薄膜を堆積する方法を検討した。貫通孔の側壁への Nb 薄膜の堆積方法としては近年半導体の 3 次元実装技術として注目されているめっき法を検討した。

Nb アルカリフッ化物の熔融液からの Nb 金属のめっき法は非常に効率的な方法としてよく知られている。しかし、この方法では熔融液を得るために 700°C 以上の温度を維持しなければならない。これに対して、室温で Nb 金属のめっきを行うことのできる、有機溶媒を用いた非水めっき法による Nb 薄膜の堆積が報告された。この方法では、六フッ化リチウムニオブ (LiNbF_6) を含む有機溶媒が用いられた。この溶液はフッ素を含むため、Si 基板を激しく浸食する。これを防ぐために、我々は六塩化リチウムニオブ (LiNbCl_6) を用いた。めっき浴に用いる有機溶媒として、ポリプロピレンカーボネート (propylene carbonate; PC) とアセトニトリル (acetonitrile; ACN) を用いた。表 1 は、めっき浴の組成条件を示す。この溶媒をスターラーで 1 日攪拌し、その後液体窒素で 1 時間冷却したのち 1 時間かけて室温に温めた。再度液体窒素で 1 時間冷却した後 2 時間かけて室温に温め、最終的にこの溶液の上澄み液をめっき浴とした。めっきを行う前に雰囲気ガスを 10 分間窒素置換した。図 4 は、測定に用いた電気化学測定機器を示す。めっき浴は、作用電極、対極、参照電極を有する三電極方式の電気化学セルを用いた。

4. 研究成果

(1) マイクロストリップライン

図 5 は、作製した透過型共振器の光学顕微鏡写真を示す。マイクロストリップ線路の幅

表 1 めっき浴の組成条件

NbCl ₅	8.0×10^{-2} mol/l
LiCl	2.4×10^{-1} mol/l
PC あるいは ACN	150 ml

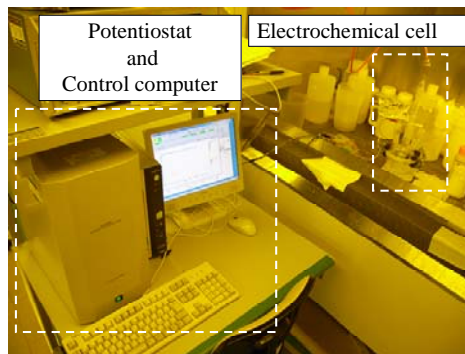


図 4 実験に用いた電気化学測定機器。

は $1\mu\text{m}$ である。信号線と共振器はエアコプレーナプローブによって接続された。接触抵抗を低減するためにコプレーナ線路の接触部分には真空蒸着法とリフトオフ法を用いて Au のコンタクトパッドを形成した。

作製した透過型共振器の高周波透過特性は、素子を液体ヘリウム温度に冷却し $1\sim 40\text{GHz}$ の範囲でネットワークアナライザを用いて測定した。図 6 はマイクロストリップ線の幅 $W=2\mu\text{m}$ の素子の透過特性の測定結果である。測定により得られた基本共振周波数 f_r はおよそ 6GHz であり、設計値の 5GHz よりも大きくなった。これは、rf スパッタ法によって堆積した絶縁層の AlO_x の比誘電率が $\epsilon_r=8.5$ よりも小さかったためであると考えら

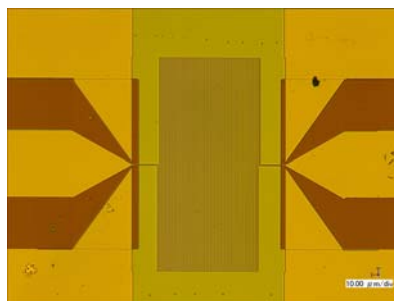


図 5 作製した透過型共振器の光学顕微鏡写真。マイクロストリップ線路の幅は $1\mu\text{m}$ 。

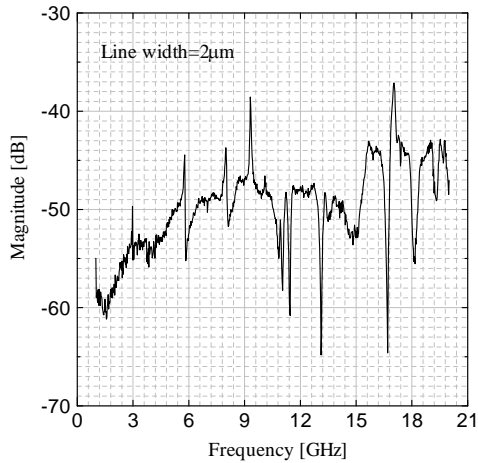


図 6 透過型共振器の透過特性の一例。マイクロストリップ線路の幅は $W=2\mu\text{m}$ 。

れる。図 7 は、基本共振周波数 $f_r \sim 6\text{GHz}$ における負荷 Q 値 Q_L のマイクロストリップ線路幅 W の依存性を示している。負荷 Q 値は $Q_L \sim 30-100$ であった。マイクロストリップ線路幅 W の減少とともに Q_L の減少が観測された。この減少による SFQ パルス伝送に対する影響は未知である。そのため、SFQ パルスを用いたリング発振器中にサブミクロン幅のマイクロストリップ線路を挿入した回路を用いて実際の SFQ パルス伝送実験を行っている。

(2) 有機溶媒を用いた非水めっき法による Nb 堆積

表 2 は成膜条件を示す。基板(作用電極)に印加する電圧は、リニアスイープボルトシメ

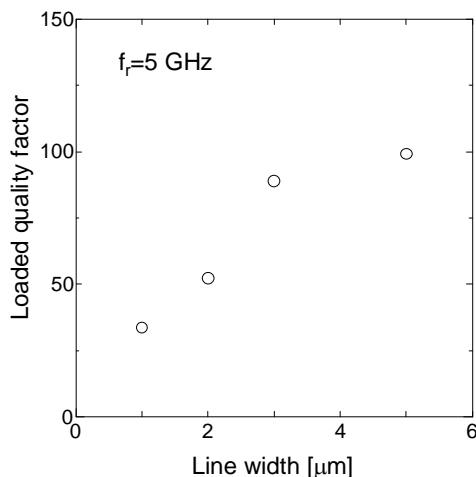


図 7 基本共振周波数 $f_r \sim 6\text{GHz}$ における負荷 Q 値 Q_L のマイクロストリップ線路幅 W の依存性。

表 2 成膜条件

作用電極 (基板)	Si(380mm)/Ti(20nm)/Pt(100nm)
対極	Pt wire
参照電極	Ag/AgCl 電極
温度	室温
めっき時間	10 min.

トリー (Linear Sweep Voltametry: LSV) 法によって決定した。LSV 法では、還元反応に対応して電流ピークが観測される。自然電位から -5V まで電位を直線的に掃引した結果、 -0.02V 付近、 -0.8V 付近および -2.8V 付近に電流ピークが観測された。薄膜の堆積状況との比較から、 -2.8V 付近のピークが Nb の還元反応に関係していることがわかった。

液体窒素冷却によって精製されためっき浴を用い、定電位 (-2.6V) を印加してめっきを行った結果、不連続ではあるが広範囲に析出物が得られた。この試料に対してエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDX) や X 線光電子分光法 (XPS) を用いてめっき膜中の構成元素や Nb の価数状態などを調べた。その結果、めっき膜中の構成元素は炭素、酸素、塩素およびニオブであることが確認された。また、Nb 3d(5/2) に対応する XPS スペクトルから、Nb の価数は 3 価程度であることがわかった。

表 1 に示す組成のめっき浴から得られた薄膜のめっき前とめっき後の X 線回折パターンから、めっき後には $33 \sim 34^\circ$ 付近にピークが観測された。この角度付近には、Nb 化合物の回折線が多く存在するが、塩化リチウムの回折線が強く表れる角度でもある。したがって、これらのピークを Nb 化合物と断定することはできない。そこで、以降では Li を含まない組成のめっき浴の検討を行った。

連続膜の堆積と塩化リチウムの共析の懸念を取るため、試薬を LiCl からテトラメチルアンモニウムクロリド (TMACl) に変更した。表 3 は Li を含まないめっき浴の組成条件を示す。有機溶媒には PC および ACN を用いたが、PC を溶媒として用いた場合には溶液の精製が不可能であったため、ACN を

表 3 Li を含まないめっき浴の組成条件

NbCl ₅	$8.0 \times 10^{-2} \text{ mol/l}$
TMACl	$2.4 \times 10^{-1} \text{ mol/l}$
ACN	150 ml

溶媒として用い、液体窒素冷却により精製しためっき浴を用いた。LSV 法による測定の結果 3つのピークが観測され、そのうち 1~2V 付近のピークが還元電位に対応したピークであると考えられた。そこで、定電位(-1.6V)でめっきを行ったところ、基板の広範囲に亘り連続的な金属光沢を持つ薄膜が得られた。図 9 は、Li を含まないめっき浴から得られた薄膜の X 線回折パターンである。明瞭に Nb(110)の回折角度にピークが存在している。さらに、試薬のモル濃度比を変えて膜中の Nb の原子数濃度を調べた結果を図 10 に示す。試薬中の NbCl₅濃度が 28.6%の時に X 線回折パターンの Nb(110)ピークが最も明瞭になり、Nb の濃度も最大となることがわかった。

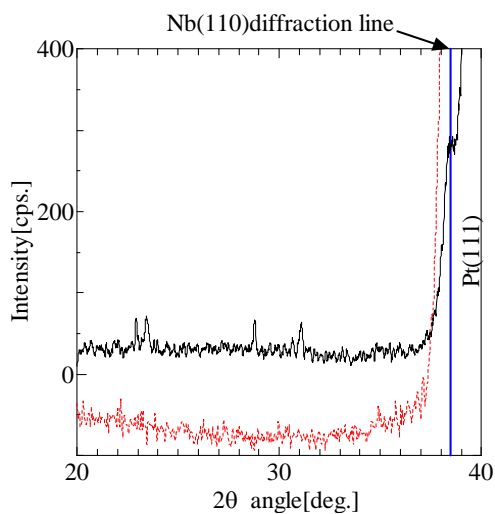


図 9 リチウムを含まないめっき浴から得られた薄膜の X 線回折パターン。

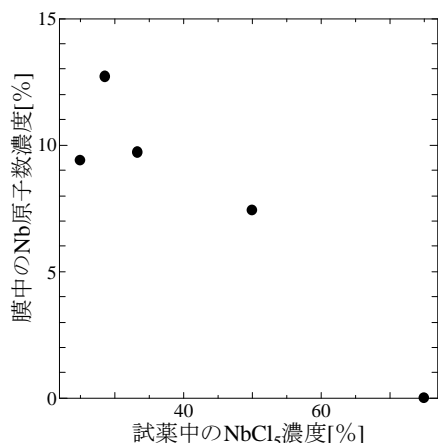


図 10 試薬中の NbCl₅ 濃度に対する膜中の Nb 原子数濃度の変化。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- (1) H. Myoren, Y. Yoshizawa, T. Taino, and S. Takada, "SFQ Multiplexed Signal Processing Circuits for Superconducting Tunnel Junction Photon Detector Arrays," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.19, pp.413-416, 2009.
- (2) H. Myoren, Y. Mada, T. Taino, and S. Takada, "Superconducting NbN Nanowire Photo Switches for Generating Single Flux Quantum Pulses," J. Phys.: Conf. Ser., Vol. 97, 012329, pp.1-6, 2008.
- (3) H. Myoren, N. Kishita, T. Taino, and S. Takada, "Minimization of Parasitic Inductances in SFQ Circuits using Over- and Under-Ground Planes," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 17, pp.462-465, 2007.

[学会発表] (計 24 件)

- (1) 明連広昭, 王元勇, 照井晃介, 田井野徹, "広いダイナミックレンジを持つデジタル DROS の設計," 2010 年電子情報通信学会総合大会, 東北大学, C-8-1, 2010 年 3 月 16 日.
- (2) H. Myoren, Y. Suzukawa, M. Miyamoto, T. Taino, "Interconnect Wires for SFQ VLSIs," Superconducting SFQ VLSI Workshop Proceedings, Nagoya, January 13, A01-3, pp.36-37, 2010.
- (3) H. Myoren, H. Yamamoto, N. Kashiwazaki, Y. Matsui, T. Taino, G.Pepe, "Optical Interface for SFQ LSI using NbN/NiCu Parallel Nanowire Photo Switches", EUCAS2009, Dresden, September 13-17, P-572, 2009.
- (4) Y. Suzukawa, T. Taino, H. Myoren, "Propagation Property of Sub-Micron-Wide Superconducting Microstrip Lines for SFQ Circuits", Superconducting SFQ VLSI Workshop, June 15-17, Fukuoka, P2, 2009.
- (5) H. Myoren, S. Iino, T. Taino, "On-Chip SFQ Flux-Locked Loop Circuits for Digital DROS Sensors", Superconducting SFQ VLSI Workshop, June 15-17, Fukuoka, O7, 2009.
- (6) 飯野智, 田井野徹, 明連広昭, "SFQ 論理による磁束ロック回路を用いたデジタル DROS," 2009 年電子情報通信学会総合大会, 愛媛大学, C-8-12, 2009 年 3 月 20 日.
- (7) 明連広昭, 松井雄二, 田井野徹, "SFQ 光インターフェイス用先頭信号検出回路の高速動作," 2009 年電子情報通信学会総合大会, 愛媛大学, C-8-15, 2009 年 3 月 20 日.
- (8) H. Myoren, and T. Taino, "Superconducting

- Photon Detectors for Frontier Photonics,” The 1st International Forum on Frontier Photonics, March 5-6, Saitama University, O-1, 2009.
- (9) 明連広昭, “単一磁束量子論理によるFLL回路を用いたデジタルDROSの構成,” 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, 東北大学, 2008年12月18日.
- (10) 王元勇, 田井野徹, 明連広昭, “上部・下部グランド層構造を持つSFQ回路の電流分布,” 2008年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 明治大学, C-8-2, 2008年9月19日.
- (11) 飯野智, 田井野徹, 明連広昭, “デジタルDROS用SFQ D/A Converterの設計,” 2008年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 明治大学, C-8-5, 2008年9月19日.
- (12) 松井雄二, 田井野徹, 明連広昭, “終端信号検出回路を用いたSFQ発生回路の設計,” 2008年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 明治大学, C-8-6, 2008年9月19日.
- (13) H. Myoren, Y. Yoshizawa, T. Taino, and S. Takada, “SFQ Multiplexed Signal Processing Circuits for Superconducting Tunnel Junction Photon Detectors,” Ext. Abs. International Superconductive Electronics Conference 2008, Seattle, August 17-22, 3EP09, 2008.
- (14) 明連広昭, 吉澤有, 田井野徹, 高田進, “超伝導トンネル接合素子アレイ用MUXの高速動作,” 2008年電子情報通信学会総合大会講演論文集, 北九州学園都市, C-8-9, 2008年3月20日.
- (15) H. Myoren, “Preparation of Sub-micron-wide Microstrip Line for SFQ Circuits,” Program and Abs. Superconducting SFQ VLSI Workshop SSV 2008, Yokohama, March 17, A1-4, pp.13-14, 2008.
- (16) H. Myoren, “Large array system by using superconducting tunnel junctions,” The Third CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity 2007-Superconducting Sensors, Sakai, October 21-22, pp.16-17, 2007.
- (17) H. Myoren, Y. Mada, T. Taino, and S. Takada, “Superconducting NbN Nanowire Photo Switches for Generating Single Flux Quantum Pulses,” EXT. Abs. 8th European Conference on Applied Superconductivity, Brussels, September 16-20, 0723, 2007.
- (18) 松井雄二, 田井野徹, 明連広昭, 高田進, “光インターフェース用SFQ発生回路の設計,” 2007年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, 鳥取大学, C-8-3, 2007年9月11日.
- (19) 吉澤有, 田井野徹, 明連広昭, 高田進, “超

- 伝導トンネル接合素子アレイ用MUXの設計,” 2007年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, 鳥取大学, C-8-4, 2007年9月11日.
- (20) 飯野智, 田井野徹, 明連広昭, 高田進, “デジタルDROS用SFQアップダウン回路の設計,” 2007年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, 鳥取大学, C-8-5, 2007年9月11日.
- (21) H. Myoren, N. Kishita, Y. Yoshizawa, T. Taino, and S. Takada, “Magnetic Shield for SFQ Digital Circuits using Over- and Under Ground Planes Connecting with Wall Structures,” Ext. Abs. International Superconductive Electronics Conference 2007, Washington D.C., June 10-17, P-B11, 2007.
- (22) 吉澤有, 木下憲昭, 田井野徹, 明連広昭, 高田進, “SFQ論理回路における上部・下部グランド層のシールド効果,” 2007年電子情報通信学会総合大会論文集, 名城大学, C-8-3, 2007年3月22日.
- (23) 木下憲昭, 田井野徹, 明連広昭, 高田進, “単一磁束量子論理ゲート設計における上部・下部グランド層の効果,” 2006年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, 金沢大学, C-8-3, 2006年9月21日.
- (24) H. Myoren, N. Kishita, T. Taino, and S. Takada, “Minimization of Parasitic Inductances in SFQ Circuits using Over- and Under-Ground Planes,” Abstract of 2006 Applied Superconductivity Conference (ASC2006), Seattle, Washington, August 30, 2006, 3EH03.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.yoshilab.dnj.ynu.ac.jp/tokutei/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

明連 広昭 (MYOREN HIROAKI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：20219827

(2) 研究分担者

田井野 徹 (TAINO TOHRU)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：40359592

(3) 研究協力者 なし