

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04598

研究課題名（和文）人工周期構造線路を利用するマイクロ波帯進行波型超伝導パラメトリック増幅器の研究

研究課題名（英文）Traveling-wave-type superconducting parametric amplifier using artificial periodic transmission line in the microwave range

研究代表者

武田 正典（Takeda, Masanori）

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：80470061

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：周期的にスタブを配置したFishbone型超伝導伝送線路（FTTL）を用いるマイクロ波帯進行波型超伝導パラメトリック増幅器に関する研究を行った。FTTLの解析手法を確立し、スタブ長により特性インピーダンス及び実効波長が可変できることを示した。また、FTTLのメアンダ構造として曲げ部分にCPWを用いるハイブリッド型FTTL線路が有用であることを示した。FTTL型超伝導パラメトリック増幅器の利得解析を行い、FTTLを用いることで従来のCPW型超伝導パラメトリック増幅器の1/3程度の線路長で同等の利得性能が得られることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

進行波型超伝導パラメトリック増幅器はマイクロ波帯において極低消費電力かつ広帯域動作可能な冷却低雑音増幅器であり、電波天文観測や量子計測分野への応用が期待されている。この増幅器は単なる超伝導伝送線路であり構造は単純であるが、高利得を得るためには線路長を非常に長くする必要があり作製が困難であった。本研究では、周期構造線路であるFishbone超伝導伝送線路を用いることで、従来の増幅器よりも作製が容易かつ小型にできることを示した。

研究成果の概要（英文）：We have studied a microwave-band traveling-wave superconducting parametric amplifier using a Fishbone-type superconducting transmission line (FTTL) with periodically arranged stubs. We established an analysis method for FTTL and showed that the characteristic impedance and effective wavelength can be varied by changing the stub length. In addition, it was shown that a hybrid FTTL line using CPW in the bending part is useful as a meander structure of FTTL. A gain analysis of FTTL-type superconducting parametric amplifier was performed, and it was shown that the same gain performance as that of conventional CPW-type superconducting parametric amplifier can be obtained with a line length of about 1/3 by using FTTL.

研究分野：超伝導エレクトロニクス

キーワード：超伝導 パラメトリック増幅 カイネティックインダクタンス 周期構造線路 NbTiN薄膜

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超伝導伝送線路のカイネティックインダクタンスの電流非線形性を利用した進行波型カイネティックインダクタンス超伝導パラメトリック増幅器 (KITWPA) はマイクロ波帯で優れた増幅器性能 (広帯域, 極低雑音, 高ダイナミックレンジ) を有し, かつ極低消費電力で動作可能なことから, 電波天文観測や量子計測分野において開発が盛んに進められている. KITWPA において高利得を得るためには, ①ポンプ波と信号波の相互作用距離を長くする, すなわち非常に長い超伝導伝送線路を作製すること, ②カイネティックインダクタンスを大きくするため超伝導伝送線路を細線にすることが必要である. 従来の KITWPA では超伝導体として NbTiN 薄膜を用いた超伝導コプレーナ線路 (CPW) が用いられているが, 利得 10 dB 程度を得るために必要な線路長は約 1 m であり, このように長く細い線路を欠陥なく均一に作製することは非常に困難である. また, CPW では中心導体幅を細くすると特性インピーダンスは高くなり, 50 Ω 系の外部回路と整合を取ることが困難になる. 以上の理由から, KITWPA において 50 Ω の特性インピーダンスを有し, かつ物理的に短い線路長でも高利得が得られる超伝導伝送線路が望まれている.

2. 研究の目的

周期構造線路では, 周期構造の単位構造や寸法によってインダクタンスやキャパシタンスを可変できる. 図 1 に示す魚骨型伝送線路 (FTTL: Fishbone-Type Transmission Line) は CPW と同様に単層膜で作製可能な周期構造線路である. FTTL は CPW と比較して構造は複雑であるが, 設計の自由度を利用して線路インピーダンスや実効波長を可変できる. すなわち, スタブ長 (d) を変えることで, 高カイネティックインダクタンスを有する細線を用いても整合が容易な 50 Ω 系伝送線路を実現可能である. また, CPW よりも実効波長を短くすることも可能である. 本研究では, 周期構造線路である FTTL を用いた KITWPA の開発を行い, 従来よりも短い線路長で高利得動作が可能な KITWPA の実現を目指す.

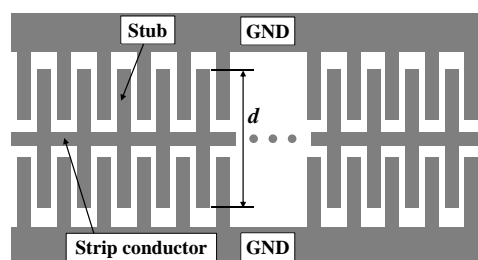


図 1 魚骨型伝送線路 (FTTL)

3. 研究の方法

KITWPA を設計するには, KITWPA で用いる超伝導伝送線路の単位長さ当たりのインダクタンス及びキャパシタンスの値を知る必要がある. そのため, 超伝導 FTTL の線路パラメータを得るための解析手法を確立する. また, その解析結果を用いて超伝導 FTTL 半波長共振器を設計・作製し, 共振器特性を測定する. 共振器特性から, 超伝導 FTTL のカイネティックインダクタンス及び伝送損失を評価する. また KITWPA に必要な線路長を小面積に配置するためには, FTTL のメアング化が不可欠である. そのため, FTTL を曲げることによって生じる損失を伝送実験及び共振器実験から評価し, 最適なメアング構造を決定する. FTTL 型 KITWPA の利得解析を行い, 従来の CPW 型 KITWPA よりも短い線路長で高利得が得られることを明らかにする. また, 温度 4 K での動作を目指しており, 超伝導体として比較的転移温度が高い窒化ニオブチタン (NbTiN) 薄膜を用いて研究を行う.

4. 研究成果

(1) FTTL の解析

FTTL の単位構造及び解析で用いた等価回路を図 2 に示す. FTTL の詳細な等価回路は, 中央導体のインダクタンス, 中央導体-GND 間のキャパシタンスに加えて, スタブのインダクタンス及びスタブ-GND 間のキャパシタンスで記述されるが, 直列インダクタンス成分と並列インダクタンス成分に整理すると図 2 のような π 型等価回路に簡略化できる. FTTL の単位構造の ABCD パラメータが分かれば, π 型等価回路の ABCD パラメータを用いて単位構造のインダクタンス L 及びキャパシタンス C を求めることができる. そこで, FTTL の単位構造の S パラメータを電磁界シミュレータで計算し, 得られた S パラメータを ABCD パラメータに変換した. 図 3 にスタブ長 l に対する FTTL の特性インピーダンス Z_0 及び実効波長 λ_g を示す. ただし, $b = g = w = 4 \mu\text{m}$, 周波数は 3 GHz に設定した. スタブ長が長くなるにつれ, 特性インピーダ

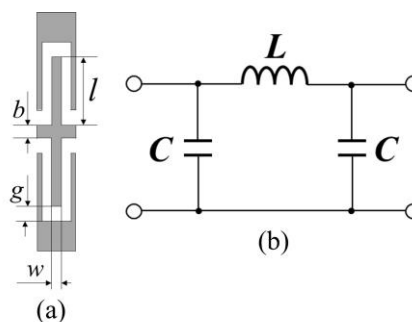


図 2 (a)FTTL の単位構造, (b)単位構造の等価回路

ンスは小さく、また実効波長は短くなることが分かった。

(2) FTTL 半波長共振器の作製及び評価

FTTL の解析結果の妥当性を実証するため、また FTTL のカイネティックインダクタンスを評価するため、FTTL を用いた半波長超伝導共振器（以下、FTTL 共振器）を設計した。設計した FTTL 共振器の寸法は、 $b=g=w=4\ \mu\text{m}$ 、 $l=30\ \mu\text{m}$ 、共振器長 $8.4\ \text{mm}$ であり、FTTL 共振器は入出力ポートと容量的に結合させてある。FTTL 共振器は、サファイア基板上の NbTiN 薄膜を用いて作製した。作製した FTTL 共振器は機械式冷凍機にて温度 $4\ \text{K}$ まで冷却され、ベクトルネットワークアナライザを用いて S パラメータを測定した。膜厚 $260\ \text{nm}$ の NbTiN 薄膜で作製した FTTL 共振器の S パラメータ S_{21} を図 4 に示す。ベクトルネットワークアナライザの入力パワーを $-45\ \text{dBm}$ として測定している。また、冷凍機内にあるケーブルの損失は測定結果から取り除いてある。図 4 から、この共振器の共振周波数は $2.84\ \text{GHz}$ であることが分かる。一方、解析から求めた共振周波数は $3.15\ \text{GHz}$ であり、測定結果と概ね一致している。比較のため、FTTL 共振器と同じ膜厚、同じ中心導体幅を有する CPW 半波長共振器（共振器長 $21\ \text{mm}$ ）を設計、作製した。測定した CPW 半波長共振器の共振周波数は $2.59\ \text{GHz}$ であった。また、図 4 から見積もった無負荷 Q 値は $85,586$ であった。一方、CPW 半波長共振器の Q 値は $59,678$ と FTTL 共振器と同程度であり、この結果から伝搬損失において FTTL と CPW は同等であることが分かった。図 5 に共振器実験から見積もった FTTL と CPW の実効波長の周波数依存性を示す。FTTL の実効波長は CPW の実効波長の $1/2$ 程度になることが分かる。ところで、解析結果にはカイネティックインダクタンスは含まれておらず、解析結果と測定結果の差異はカイネティックインダクタンスによる影響と言える。したがって、異なる膜厚 ($10\ \text{nm}\sim 260\ \text{nm}$) の NbTiN 薄膜を用いて FTTL 共振器を作製し、解析結果と測定結果を比較することによって NbTiN 薄膜のカイネティックインダクタンスを評価した。図 6 に FTTL 共振器を用いて測定した NbTiN 薄膜のカイネティックインダクタンスとその近似曲線を示す。図には文献[1]-[3]のカイネティックインダクタンスも併せて示した。本測定結果は文献値ともよく一致しており、本研究を通して超伝導 FTTL の解析手法を確立したとともに、NbTiN 薄膜のカイネティックインダクタンスの膜厚依存性を明らかにした。

(3) FTTL のメアンダ構造の検討

KITWPA において必要な線路長を小面積に配置するためには、FTTL のメアンダ化が不可欠である。そのため、FTTL を曲げることによって生じる損失等を共振器実験から評価し、最適なメアンダ構造を検討した。本研究では図 7 に示す 2 つのタイプの FTTL のメアンダ構造を検討した。一つ目は図 7(a) に示す非対称 FTTL である。非対称 FTTL では、中央導体の上下にあるスタブを片側だけに

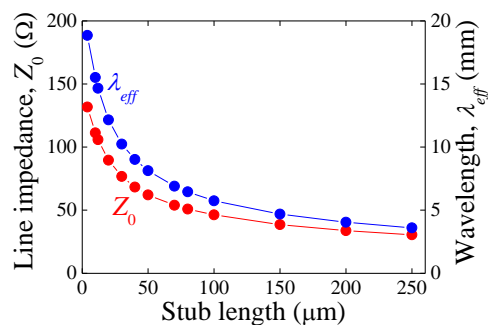


図 3 スタブ長に対する FTTL の特性インピーダンス及び実効波長

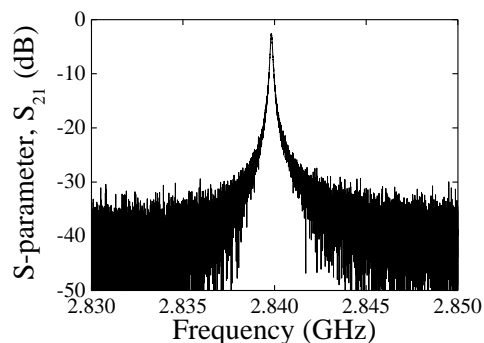


図 4 FTTL 半波長 NbTiN 薄膜共振器 (NbTiN 薄膜の膜厚 $260\ \text{nm}$)

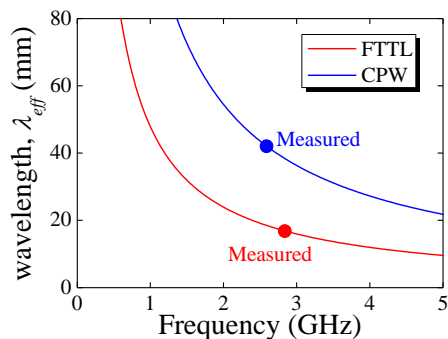


図 5 FTTL 及び CPW の実効波長の周波数依存性

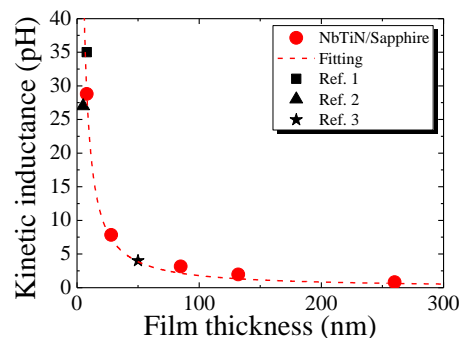


図 6 サファイア基板上 NbTiN 薄膜のカイネティックインダクタンス

配置することで、スタブ同士が接触することなく一様に曲げることが可能になる。また FTTL 同様、非対称 FTTL もスタブ長によって特性インピーダンス及び実効波長を変えることができる。二つ目は図 7 (b)に示す曲げ部分のみ CPW を用いたハイブリッド型 FTTL である。メアンダ構造の非対称 FTTL 及びハイブリッド型 FTTL の半波長共振器を設計・作製し、共振器実験により Q 値を評価した。非対称 FTTL 共振器においても共振特性は確認でき、その共振周波数は解析結果と良い一致を示した。しかしながら、曲げを有していないストレートの FTTL 半波長共振器の無負荷 Q 値が 85,587 に対し、非対称 FTTL 共振器の無負荷 Q 値は 14,011 であることから、非対称 FTTL の伝送損失、特に通常の FTTL と比較して放射損が大きいと云える。一方、メアンダ構造ハイブリッド型 FTTL 共振器の無負荷 Q 値は 74,577 であり、ストレートの FTTL 共振器の無負荷 Q 値と同程度であった。また、ハイブリッド型 FTTL をメアンダ構造にするにあたり、線路間隔や FTTL-CPW の接続部の導体幅について実験的に検討した。その結果、ハイブリッド型 FTTL において、線路間隔を広く、CPW と FTTL の導体幅を等しく、また CPW の占める割合を小さくすることで、伝搬損失を増大させることなくメアンダ構造にできることが分かった。

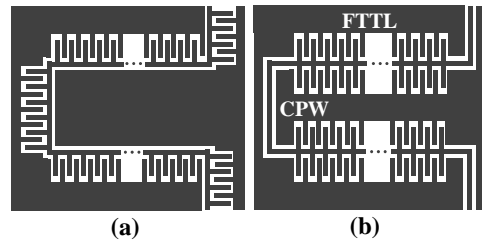


図 7 本研究において検討した FTTL のメアンダ構造 (a)非対称 FTTL, (b)ハイブリッド型 FTTL

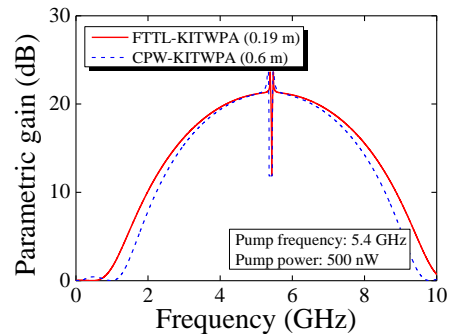


図 8 本研究において検討した FTTL のメアンダ構造 (a)非対称 FTTL, (b)ハイブリッド型 FTTL

(4) FTTL 型 KITWPA の利得解析

中心導体幅 $4 \mu\text{m}$ 、スタブ長 $83 \mu\text{m}$ 、線路長 0.19 m の FTTL のパラメトリック利得の解析を行った。NbTiN 薄膜の膜厚は 30 nm を仮定しており、FTTL の特性インピーダンスは 50Ω になっている。ポンプ周波数は 5 GHz 、ポンプパワーを 500 nW とした。図 8 にパラメトリック利得を示す。周波数 $2 \text{ GHz} \sim 9 \text{ GHz}$ において 10 dB 以上の利得、ポンプ周波数付近で約 20 dB の利得が得られた。これは全長 0.6 m を有する従来の CPW 型 KITWPA と同等の利得性能である。以上より、FTTL を使用することで入出力端での整合を取りつつ、従来の CPW 型 KITWPA の $1/3$ 程度の線路長で同等の利得性能を有する KITWPA を実現できることが分かった。

参考文献

- [1] N. Samkharadze, et al., Phys. Rev. Appl., 044004 (2016).
- [2] S. Miki, et al., Appl. Phys. Express, 075002 (2009).
- [3] M. Xu, et al., Appl. Phys. Lett., 192601 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Y. Uzawa, M. Kroug, T. Kojima, M. Takeda, K. Makise, S. Ezaki, W. Shan, A. Miyachi, Y. Fujii, H. Terai	4. 巻 E104-C
2. 論文標題 Development of Superconducting Devices Supporting Radio Astronomy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Electron.	6. 最初と最後の頁 411-421
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transele.2020SUI0003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Nakagawa, M. Takeda, A. Saito, H. Terai	4. 巻 59
2. 論文標題 Transmission properties of fishbone-type superconducting transmission lines	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 110904
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abf65	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 小松源、武田正典、寺井弘高	4. 巻 30
2. 論文標題 超伝導共振器を利用した窒化ニオブチタン薄膜のカイネティックインダクタンス評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本赤外線学会誌	6. 最初と最後の頁 43-48
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 A. Saito, F. Shimada, T. Sato, K. Kiyooka, M. Shibata, S. Ono, M. Takeda, Y. Narita, K. Nakajima
2. 発表標題 Design and Fabrication of Microwave Transmitting Antenna Using HTS Thick Disk for Wireless Power Transfer
3. 学会等名 The 34th International Symposium on Superconductivity (ISS2021)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大鶴宏希、中川洸希、齊藤敦、寺井弘高、武田正典
2. 発表標題 メアンダ構造を有するFishbone型超伝導伝送線路の共振器特性
3. 学会等名 日本赤外線学会第30回研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池野芳、武田正典
2. 発表標題 モード解析法を用いた進行波型超伝導パラメトリック増幅器の利得計算
3. 学会等名 日本赤外線学会第30回研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大鶴宏希、中川洸希、齊藤敦、寺井弘高、武田正典
2. 発表標題 超伝導Fishbone型伝送線路のメアンダ化に関する検討
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川洸希、齊藤敦、寺井弘高、武田正典
2. 発表標題 Fishbone型伝送線路のカイネティックインダクタンスの評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沓間弘樹、C.W. Sandbo Chang、武田正典、寺井弘高、浦出芳郎、玉手修平、竹田悠大河、中村泰信
2. 発表標題 力学的インダクタンス進行波型パラメトリック増幅器に向けた窒化ニオブチタン薄膜の評価
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤光一、武田正典、寺井弘高、沓間弘樹、C.W. Sandbo Chang、中村泰信
2. 発表標題 超伝導力学インダクタンス進行波型パラメトリック増幅器の有限温度マイクロ波表面抵抗を考慮した利得解析
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤光一、武田正典、寺井弘高、沓間弘樹、C.W. Sandbo、中村泰信
2. 発表標題 超伝導力学インダクタンス進行波型パラメトリック増幅器の温度4K動作に向けた検討
3. 学会等名 第31回日本赤外線学会研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------