超伝導アンテナとフィルタのレーザトリミングによる特性改善

關谷 尚人^{*1,†}、小野 哲^{*1}、中島 健介^{*2}、齊藤 敦^{*1}、平野 悟^{*1}、大嶋 重利^{*1}

Improvement of Superconducting Antenna and Filter Properties using Laser Trimming

Naoto SEKIYA^{*1,†}, Satoshi ONO^{*1}, Kensuke NAKAJIMA^{*2}, Atsushi SAITO^{*1},
Satoru HIRANO^{*1} and Shigetoshi OHSHIMA^{*1}

Synopsis: Improvements in superconducting device characteristics using laser-etching trimming is examined. A KrF excimer laser (248 nm) was used. As an example, improving the bandwidth of a superconducting patch antenna with gap-coupled resonators and that insertion loss of a 3-pole hairpin-type superconducting filter were studied. We found that laser-etching trimming is quite useful for improving the antenna and filter properties; increasing the bandwidth and reducing return loss with the antenna, and reducing loss with the filter.

Keywords: superconductor, antenna, filter, trimming, laser, etching

1. はじめに

超伝導体はマイクロ波領域において常伝導金属に比べて表面抵抗が二桁近く小さいという特徴をもつ。このことから超伝導体を用いたマイクロ波デバイスへの応用研究が盛んに行われている。特に、フィルタ、アンテナ、位相器など受動デバイスの研究は盛んで、米国では超伝導フィルタが実用化され、中国でもフィールド試験が始まっている。しかし、これらマイクロ波デバイスを所望の特性を有するように試作する技術はいまだ十分解決しているとはいえない。例えば、フィルタでは最適なフィルタパターンを用いても、使用する基板の誘電率、厚みがその設計に用いた値とわずかでもずれていれば、フィルタ特性が大幅にずれてしまうからである。内田らは MgO 基板を使用した場合 ±0.05 誘電率がずれると中心周波数が 0.5 MHz ずれると報告している¹⁾。また、基板の厚み精度は更に厳しく、基板厚 0.5 mm で最適化されたフィルタの場合、2 μm の基板厚のばらつきにより中心周波数は 0.5 MHz ずれ、これを制御することは難しい。以上のことから、デバイス作製後

に周波数特性を調整する手法は必要不可欠である。フィルタの特性改善の方法としてトリミングとチューニングがあり様々な方法が考案されている。サファイア板を用いフィルタ全体の共振器のキャパシタンスを変化させ中心周波数や帯域幅を可変するチューニング方法²⁾³⁾。サファイアロッドとニッケルロッドを用いて個々の共振器のキャパシタンスやインダクタンスを調整するトリミング方法⁴⁾。しかし、デバイス作製後に直接デバイスパターンを加工することで特性改善する手法は少ない⁵⁾。そこで、我々はレーザエッチングを用いデバイス作製後にトリミングを行う手法について報告する。

本論文では、はじめに、ギャップ結合型共振器付き超伝導アンテナ⁶⁾を用いて、レーザエッチングの有効性を述べる。また、レーザエッチングによるトリミングの1手法として3段超伝導ヘアピンフィルタを用い、その有効性を検討した。

2. レーザエッチング装置

レーザエッチングにはエキシマレーザ(浜松ホトニクス製 C3470-XS)を用いた。封入ガスには KrF (248 nm)を使用している。レーザエッチングはエキシマレーザによる極めて高いエネルギーパルス光を試料に照射しエネルギーを与えることで試料の薄膜を離脱させ物理的にエッチングを行う方法である。Fig. 1 にレーザエッチング装置の概略図を示す。レーザ発振部で発振したエキシマレーザはマイクロステージ上の試料に照射される。発振するレーザのショッ

Received October 24, 2005

^{*1} 山形大学工学部

〒992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16

Faculty of Engineering, Yamagata University,

4-3-16, Jonan, Yonezawa, Yamagata 992-8510, Japan

^{*2} 弘前大学理工学部

〒036-8561 青森県弘前市文京町 3

Faculty of Engineering, Hirosaki University,

3, Bunkyocho, Hirosaki, Aomori 036-8561, Japan

† E-mail: g02234@dipfr.dip.yz.yamagata-u.ac.jp

Fig. 1 Schematic of the laser-etching system.

ト数や試料の X-Y 方向の移動はオペレーションコンピュータにより制御される。マイクロステージ上の試料はステージ上部の CCD カメラを通してモニター画面に表示される。レーザによるエッチング状況はこのモニターを通して確認できる。封入ガスの波長から原理的には 248 nm という微細加工が可能であるが、本装置では、可変アパーチャと呼ばれるレーザ照射領域を決定するスリットによりエッチング可能な幅は約 1 μm である。

エキシマレーザエッチング装置の利点は 1 μm という高精細なパターンをエッチング可能であるということである。一般的にパターン幅が 20 μm 以下の微細パターンのエッチングには高価なクロムマスクが必要であるがそれを必要としない。また、マスクを必要としないために、レジストを塗布する必要もないため大変簡便であることがわかる。さらに、大気中で加工可能であるという大きな利点も持つ。

しかしながら、レーザを用いたエッチングのため、広範囲を一度にエッチングするには向かない。そこで、デバイスのトリミングなどのデバイスの微調整という 2 次的エッチング方法としての使用が期待できる。

3. ギャップ結合型共振器付き超伝導アンテナを用いたレーザエッチングの検討

3.1 ギャップ結合型共振器付き超伝導アンテナ

はじめに、ギャップ結合型共振器付き超伝導アンテナ (Gap-Coupled Resonators Antenna: GCRA) について述べる。

Fig. 2 に GCRA の概略図を示す。一般的な 1 素子パッチアンテナの両側にパッチ型の共振器を配した構造をしており、左右の共振器のサイズをわずかにずらすことで共振周波数をずらし帯域幅を向上させるアンテナである⁷⁾。Fig. 3 に 1 素子超伝導アンテナと超伝導 GCRA の電磁解析シミュレータによるリターンロス (R.L.) 特性を示す。このアンテナの特徴として帯域内に二つの共振をもたせることで帯域幅を 1 素子アンテナより広げている。有効帯域幅を定在波比 $\text{SWR} \leq 2$ とすると、リターンロスでは $\text{R.L.} \leq$

Fig. 2 Configuration of GCRA

Table 1 Overall dimensions of GCRA

Parameters	Dimension[mm]
Wmsl	0.50
W ₁	3.55
W ₂	3.64
W ₃	3.46
L	3.64
g	0.35

Fig. 3 Simulated return loss variation with a frequency of GCRA and a single element antenna.

-9.5 dB となり 1 素子に対して GCRA は約 2.5 倍帯域幅が広がる。このときの、サイズを Table 1 に示す。基板には $\text{r-Al}_2\text{O}_3$ を用いた。

3.2 実験方法

GCRA の特性は左右の共振器の幅 W_1 、 W_3 と左右の共振器と中央のメインパッチとの間のギャップ幅 g に大きく依存する⁵⁾。そこで、Fig. 3 のギャップ部分をレーザエッチングで削っていくことで、ギャップ幅 g を広げる。同時に左右の共振器の幅 W_1 、 W_3 を狭くしていくことでアンテナ特性が変化し特性を改善できるか実験的に検討を行った。レーザエッチングによる特性の変化を測定するために、ギャップ幅 $g = 0.025 \text{ mm}$ とし、Table 1 で得られた値より 0.010 mm 小さくした。小さくなった 0.010 mm を左右の共振器の幅 W_1 、 W_3 に付加し、 $W_1 = 3.560 \text{ mm}$ 、 $W_3 = 3.470 \text{ mm}$ とした。この部分をレーザエッチングで 0.010

mm ずつ削っていき特性の変化を評価した。GCRA の試作には $20 \times 20 \times 0.5$ mm の R 面サファイア基板上に誘導結合スパッタリング装置により成膜した膜厚 300 nm の YBCO 薄膜を使用した。グランド面には金を使用した。GCRA パターンはフォトリソグラフィとドライエッチングを用いてパターンニングを行った。冷却には GM 型冷凍器を使用した。測定にはベクトルネットワークアナライザ (Wilton 360) を用い、電波暗室内でアンテナのリターンロス特性を測定し評価した。

3.3 GCRsA 試作とレーザエッチング

Fig. 4 にレーザエッチングにより各パラメータが変化したときの GCRA のリターンロス特性を示す。測定温度は 30 K である。Fig. 4 より、レーザエッチングにより、低周波側の共振はギャップ幅が広がったことで減少し改善されている。また、左右の共振器のサイズ W_1 、 W_3 が小さくなることで高周波側の共振周波数が高周波にシフトすることがわかる。ギャップを 0.010 mm 削りシミュレーションと同サイズになったとき ($g = 0.035$ mm、 $W_1 = 3.550$ mm、 $W_3 = 3.460$ mm) 設計どおりの特性を得られていないことがわかる。これは $r\text{-Al}_2\text{O}_3$ 基板を使用しておりシミュレータでは $r\text{-Al}_2\text{O}_3$ 基板のもつ異方性を考慮できないためだと考えられる。このことからさらにレーザエッチングにより削ることで 2 つの共振をもつアンテナに改善できたことを確認できた。しかし、エッチングによって左右の共振器が小さくなったために、二つの共振間隔が広がってしまい有効帯域幅が狭くなっている。今後、 $g = 0.055$ mm、 $W_1 = 3.550$ mm、 $W_3 = 3.460$ mm で GCRA を試作することで所望の特性のアンテナが得られるであろう。

Fig. 4 The experimental variations of R.L. with frequency.

次に、Fig. 5 にレーザエッチングによって加工したギャップ幅 g の 1000 倍の顕微鏡写真を示す。Fig. 5(a)は $g = 0.025$ mm から 0.010 mm エッチングを行った $g = 0.035$ mm のときの写真である。Fig. 5(b)は $g = 0.025$ mm から 0.020 mm エッチングを行った $g = 0.045$ mm のときの写真である。(a)、(b)ともに上部がドライエッチングによるものであり、下部がレーザエッチングによるものである。エッチング精度は Fig. 5 からわかるようにほぼ正確に 0.010 mm のエッチングができていていることがわかる。また、ドライエッチングのカットの荒さに比べレーザエッチングのカット面の方が平坦であることもわかる。しかし、下部のレーザエッチングでは、薄膜表面が変色してしまう。これは、レーザ強度がガウス分布的であり、目的のエッチング場所の周囲に弱いレーザが照射され表面がわずかにエッチングされたためだと思われる。この、表面の変色による影響については 4.3 段チェビシェフ型ヘアピン共振器フィルタを用いたレーザエッチングの検討で議論する。

Fig. 5 (a) Scanning microscopy images of gap width $g = 0.035$ mm. (b) Scanning microscopy images of gap width $g = 0.045$ mm.

以上より、レーザエッチングによるアンテナ特性のトリミングの有効性を示した。また、1枚のアンテナによりサイズを変えることでデバイスの基礎特性の評価も可能であることから、使用する薄膜を減らすことも可能であり大変有用である。さらに、シミュレーションなどで考慮できないパラメータは実験でしか得ることができず、形状を変更させながら1から試作プロセスを繰り返さなければならない点を考慮するとレーザエッチングには大きなメリットがある。

4. 3段チェビシェフ型ヘアピン共振器フィルタを用いたレーザエッチングの検討

4.1 実験方法

Fig. 6 に今回試作した3段チェビシェフ型ヘアピン共振器フィルタを示す。中心周波数が2 GHz になるように設計を行った。フィルタにおけるレーザエッチングトリミングの有効性を確認するために、本実験では、特性の変化が分かりやすいように1番目の共振器長だけを設計値より0.030 mm 長くして試作を行い、この共振器をレーザエッチングで0.010 mm ずつ削ることで特性の変化をみながら評価を行った。測定にはベクトルネットワークアナライザ(Agilent E8358)を用い、フィルタの評価は通過特性(S_{21})の周波数依存性を用いた。フィルタの試作は基板を $25 \times 5 \times 0.5$ mm のR面サファイア基板を使用したこと以外、上記 GCRA と同様の薄膜、膜厚、パターニング方法である。

文献1)をもとに誘電率が ± 0.01 、基板厚が ± 0.005 mm 設計値よりずれていた場合の中心周波数のずれとそれを修正するために必要な共振器の長さを計算した。その結果、最大で中心周波数は ± 20 MHz 設計値からずれ、それを所望の設計値に修正するためには最大で ± 0.060 mm 共振器長を修正しなければならない。このことから今回使用し

Fig. 6 Configuration of 3-pole chebyshev-type hairpin resonator filter with trimming position.

た $+0.030$ mm という値は前もって共振器長を長く設計するのに十分に可能性のある長さである。

4.2 実験結果

Fig. 7 (a)と(b)に今回試作した3段ヘアピン型フィルタの通過特性 S_{21} の結果を示す。測定温度は30 K である。通過帯域内の損失が約3 dB 近くあるのは、グランド面に金薄膜を用いたために、その損失があらわれているためである。グランド面に金薄膜を用いた場合、2-3 dB の損失が生じることは、以前の論文で報告されている⁸⁾。Fig. 7 (a)よりトリミングによるフィルタの帯域外スカート特性は大きく変化していないことがわかる。しかし、トリミングによって帯域内の通過特性は大きく変化しており、帯域内の通過特性の変化がフィルタ特性として大変重要である。そ

(a)

(b)

Fig. 7 Transmission characteristics S_{21} of before and after trimming of various trim lengths.

(a) Frequency range from 1.8 GHz to 2.2 GHz, (b) Frequency range from 1.985 GHz to 2.020 GHz.

こで、Fig. 7(b)に通過帯域内の拡大図を示す。trim 0.00 mm から 0.03 mm 削って設計値と同じサイズになったとき通過特性が大きく改善されていることがわかる。次に、設計値より共振器長をさらに削ることで特性が改善されるかエッチングを行った。trim 0.04 mm で通過特性は最大値となった。trim 0.05 mm では最大値から減少したが trim 0.03 mm より全体として通過特性は向上した。この結果から、設計値より短くすることで更に特性の改善が考えられるが trim 0.04 mm と trim 0.05 mm は通過特性が向上すると同時にリップルが大きくなっていることがわかる。フィルタの特性としては、帯域内の通過特性がより平坦になることが望まれることから、フィルタ特性として最もよいのは trim 0.03 mm のときであり、すべての共振器長がそろったときだと言える。

今回は1個の共振器長だけを長くしたが、すべての共振器長がそれぞれずれていた場合には帯域内通過特性は大幅に劣化すると考えられる。そこで、0.001 mm のオーダーで共振器サイズをそろえられれば大幅な通過特性の改善につながると考えられる。

最後に、レーザエッチングによる薄膜表面の変色について検討を行った。Fig. 5 (a)より薄膜表面が変色している部分は 0.005 mm 程度である。そのレーザエッチングによる変色部分を超伝導薄膜の表面抵抗が劣化していると仮定し、変色部分の表面抵抗値を変化させシミュレーションを行った。その結果、銅を用いた場合、通過特性にほとんど変化がなく、絶縁体を仮定した場合でも通過特性におけるリップルがわずかに変化しただけであった。この理由として、0.005 mm は一つの共振器の約 0.18%の長さであり、一つの共振器のわずかな変化では全体の特性に大きく影響しないためだと考えられる。しかし、この検討では実際に超伝導薄膜が劣化しているかについては正確に評価できない。また、さらに高周波化が進めば、フィルタの共振器サイズは縮小するため、0.005 mm の薄膜状態の重要性は増加する。このことから、今後、加工前後の臨界温度や臨界電流密度から薄膜表面の変色による超伝導特性への影響の詳細な検討が必要である。

以上より、レーザエッチングによって共振器長を削ることで特性を改善できることを明らかにした。今後、一つの共振器ではなくフィルタを構成するすべての共振器長をあらかじめ長めに作っておき、レーザエッチングですべての共振器長を調節することで所望の中心周波数をもつフィルタにトリミングできると考えられる。

5. まとめ

レーザエッチングによって広帯域ギャップ結合型共振器付き超伝導アンテナ(GCRA)と3段chebyshev型ヘアピンフィルタのトリミングを行い、トリミング前後の特性を

比較した。GCRA では、ギャップ結合している左右の共振器を 0.010 mm ずつ削ることでトリミングを行った。その結果リターンロス特性が改善でき、また、そのことによって帯域幅の向上につながることを明らかにした。また、フィルタでは、共振器長を 0.010 mm ずつエッチングすることでトリミングを行った。その結果、帯域内における通過特性が向上し、リップルを減少できることを明らかにした。今後、他のトリミングと組み合わせることで、より所望の特性をもつアンテナやフィルタの試作が期待できる。

参 考 文 献

- 1) T. Uchida, M. Suto, H. Mikami, M. Takeda, M. Kusunoki, A. Saito, M. Masashi, S. Ohshima, "Improvement of superconducting filter properties using sapphire rod trimming," TEION KOGAKU **39** (2004) 18-25 (in Japanese)
内田 貴ら:「サファイアロッドトリミングによる超伝導フィルタの特性改善」, 低温工学 **39** (2004) 18-25
- 2) H. Fuke, Y. Terashima, F. Aiga, M. Yamazaki, H. Kayano, T. Hashimoto, "High- T_c superconducting sharp skirt tunable filters," IEICE Trans. Electron. **E85-C** (2002) 704-707
- 3) F. Aiga, Y. Terashima, M. Yamazaki, H. Fuke, H. Kayano, R. Kato, T. Hashimoto, "Bandwidth tujable high- T_c superconducting filter," Physica C **383** (2002) 43-47
- 4) F. Aita, N. Sekiya, S. Ono, A. Saito, S. Hirano, S. Ohshima, "Improvement of filter properties using sapphire and nickel rod trimmers," to be published in IEICE Trans. Electron. 2006
- 5) G. Tsuzuki, B. A. Willemsen, "Design of high performance planar bandpass filters," 18th International Symposium on Superconductivity (2005) 140
- 6) N. Sekiya, A. Kubota, S. Hirano, A. Saito, S. Ohshima, "Broad-Band superconducting microstrip antenna using additional gap-couple resonators," IEICE Technical Report **SCE2005-14** (2005) 11-16 (in Japanese).
關谷 尚人ら:「ギャップ結合型共振器を用いた広帯域 超伝導マイクロストリップアンテナの検討」, 信学技報, **SCE2005-14** (2005) 11-16
- 7) N. Sekiya, A. Kubota, S. Hirano, A. Saito, S. Ohshima, "Broad-Band superconducting microstrip antenna using additional gap-couple resonators," 18th International Symposium on Superconductivity (2005) 142
- 8) K. Ehata, M. Kusunoki, S. Ohshima, "Design, fabrication, and characterization of patch antenna using superconducting thin film," Electronics and Communications in Japan, Part2, **82** (1999) 915-923

關 谷 尚 人 昭和 52 年 9 月 23 日生. 平成 13 年山形大学工学部電子情報工学科卒業. 平成 15 年年同大学院理工学研究科博士前期課程(電子情報工学専攻)修了. 現在、同大学院理工学研究科博士後期課程(システム情報工学専攻)在学中. 主に HTS デバイスの設計・試作・評価に従事

小 野 哲 昭和 58 年 2 月 7 日生. 平成 17 年山形大学工学部電気電子工学科卒業. 同年同大学院理工学研究科博士前期課程(電気電子工学専攻)在学中. 現在、主に HTS フィルタの設計・試作・評価に従事

中 島 健 介 昭和 31 年 12 月 20 日生. 昭和 54 年日本大学理工学部卒業. サンケン電気(株)を経て昭和 56 年長岡技術科学大学勤務. 大助手を経て平成 3 年東北大学電気通信研究所助手. 平成 5 年同助教授. 平成 15 年弘前大学理工学部教授. 現在に至る. 主として超伝導エレクトロニクスの研究に従事. 低温工学協会, 応用物理学会, 電子情報通信学会, 応用磁学会会員, 日本セラミックス協会. 工学博士.

齊 藤 敦 昭和 47 年 1 月 1 日生. 平成 6 年長岡技術科学大学電子機器工学科卒業. 平成 8 年同大学院博士前期課程(電気電子工学専攻)修了. 平成 11 年同大学院博士後期課程(エネルギー・環境工学専攻)修了. 同年同大学電気系助手. 平成 13 年通信総合研究所(現情報通信研究機構)関西先端研究センター専攻研究員. 平成 15 年山形大学工学部電気電子工学科助手. 一貫して超伝導薄膜及

びデバイスの研究に従事. 低温工学協会, 応用物理学会, 電子情報通信学会. 博士(工学).

平 野 悟 昭和 38 年 12 月 31 日生. 昭和 61 年北海道大学理学部物理学科卒業. 平成 12 年同大学院工学研究科博士後期課程(システム情報工学専攻)修了. 平成 13 年(財)国際超伝導産業技術研究センター 超伝導工学研究所 主任研究員. 平成 16 年 11 月より山形大学工学部電気電子工学科助教授. 主に超伝導エレクトロニクスの研究に従事. 米国物理学会, 電子情報通信学会会員. 工学博士.

大 嶋 重 利 昭和 24 年 6 月 13 日生. 昭和 48 年東北大学工学部卒業. 昭和 53 年同大学院工学研究科博士後期課程(電気通信工学)修了. 昭和 53 年東北大工学部に勤務. 昭和 64 年から山形大学工学部に勤務し, 現在に至る. 主に, 超伝導エレクトロニクス, 特にフィルタやアンテナなどのパッシブデバイスの開発や, 表面抵抗測定システムの開発等に従事. 低温工学協会, 応用物理学会, 電子情報通信学会, 電気学会, 応用磁気学会会員. 工学博士