

レーザによる混成IC化RCアクティブ フィルタの機能トリミング

正員 岩田 穆† 正員 中山 了†
非会員 斉藤 保直† 正員 丹生 和男†

Laser Functional Trimming for Hybrid Integrated RC Active Filters

Atsushi IWATA†, Satoshi NAKAYAMA†, Regular Members,
Yasunao SAITO†, Nonmember and Kazuo TANSHO†, Regular Members

あらまし 高精度を要求される薄膜混成IC化RCアクティブフィルタのトリミングの経済化を図るため、YAGレーザを用いた自動機能トリミング法を検討した。新しく自動レーザトリミング装置と機能トリミングのアルゴリズムを開発し、又、レーザ加工した薄膜抵抗の経時変化を測定し、高安定度の得られる加工条件とパターン設計条件を得た。

トリミング装置はQスイッチ付YAGレーザ、長焦点集光光学系、高精度XYステージ及び観察光学系から構成され、計算機制御される。本装置はビームスポット径15~25 μ m、位置精度 $\pm 1\mu$ mの性能をもつ。位相監視による機能トリミングアルゴリズムを発展させ、測定回数の減少とトリミング量の正確な計算による繰返しトリミング回数の減少を図り、更に任意の高次フィルタの自動機能トリミングを可能にした。本装置を用いると手動トリミングに比較して5~10倍の高速化が図れ、周波数 $\pm 0.1\%$ 、利得 ± 0.2 dBの高精度が得られることが分かった。

1. まえがき

高精度な混成ICを実現するため、トリミングにより素子製造偏差を吸収する必要がある。トリミングは個別工程であるので工数低減による経済効果が大きく、そのためには自動化が有効であると考えられる。

従来、素子値を測定し、これを設計値に合せる素子トリミングが多く用いられていたが、全素子をトリミングする必要があるので工数低減に不利であり、又、アクティブ素子の特性偏差を補償することが困難なため高精度を得るのに不利である。一方、利得、周波数などの回路機能を測定し、これを設計値に合せる機能トリミングはアクティブ素子の特性偏差を補償できるため高精度を得ることができる。又、少数の素子のトリミングで済むため、工数低減による経済化が期待で

きる。

小文ではタンタル薄膜混成IC化RCアクティブフィルタを対象としたYAGレーザによる自動機能トリミング法について述べる。YAGレーザを用いたトリミングはレーザ光源の普及と共に高速性、微細加工性および電気的絶縁性が優れていることから近年よく使用されるようになったが、厚膜トリミング用のものが多く、加工精度、機能の面で薄膜混成ICの機能トリミングに適用できる装置はないと考えられる。我々はYAGレーザ、高精度試料移動用ステージ及び観察集光光学系から構成される自動レーザトリミング装置を試作した⁽¹⁾。又、フィルタの位相特性を測定するトリミングアルゴリズム⁽²⁾を発展させ、測定回数を減少させ、2次フィルタの縦続接続による任意の高次フィルタの機能トリミングアルゴリズムを考案し、システムの制御プログラムを試作した⁽³⁾。次に、本システムの応用例としてトリミング条件およびトリミング精度、速度について述べる。

†電電公社武蔵野電気通信研究所、武蔵野市
Musashino Electrical Communication Laboratory, N.T.T.,
Musashino-shi, 180 Japan
論文番号：昭 52-597[C-116]

2 システム構成

機能トリミングの対象をRCアクティブフィルタにしぼり、測定機能を正弦波に対する振幅、位相とし、自動化システムを構成した。システムの構成図を図1に示す。主な装置は試作したYAGレーザトリミング装置、市販のネットワークアナライザ及び超小形コンピュータである。トリミング装置はコンピュータから転送される命令と移動量のデータに従い、XYステージ及びレーザビームのオンオフを制御する。スキャナはコンピュータからの命令により、4個までの2次回路ブロックを単体あるいは連続接続でアナライザに接続する。なお素子値トリミング用にRCメータも接続されている。機能トリミング用の混成ICのプロローブには接触抵抗の小さいIC用ソケットを加工して使用した。図2に試作したシステムの外観を示す。

機能トリミングでは測定および測定結果の処理に比較的時間を要するため、測定とトリミングを交互に行う方式とした。これにより、測定制御系の遅れによる誤差を取除くことが可能であるが生産性が低下するので、集光および観察光学系の改善、少ない測定回数でトリミング量を正確に計算するアルゴリズムの採用による繰返し回数の減少を図り、高速化をねらった。

3 レーザトリミング装置

レーザ装置の設計方針は以下のとおりである。

- (1) レーザ源には、スポット径、ビームオンオフ応答時間、出力安定性を考慮し、超音波Qスイッチ素子をもつYAGレーザを用い、単一横モード発振のビームを使用する。
- (2) 混成IC基板の平面度は最悪数十 μm 程度であ

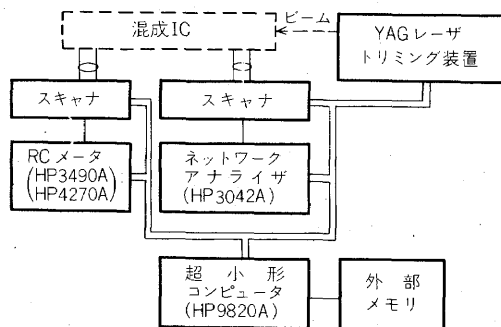


図1 自動レーザトリミングシステムの構成図
Fig.1-Block diagram of automatic laser trimming system.

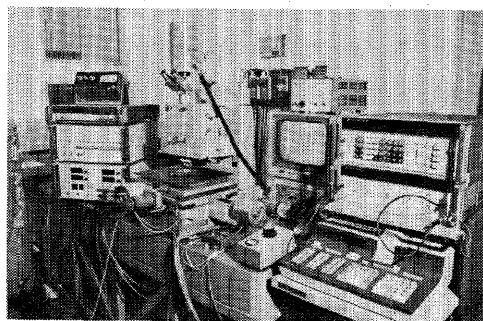


図2 自動レーザトリミングシステム
Fig.2-Automatic laser trimming system.

ることを考慮して焦点深度 $\pm 20\ \mu\text{m}$ をねらい、又、パターン幅 $30\sim 50\ \mu\text{m}$ の抵抗をトリミングするためスポット径 $15\sim 25\ \mu\text{m}$ をねらう。

(3) $30\sim 50\ \mu\text{m}$ のパターン幅の複数個の抵抗を交互にトリミングするのに必要なビーム位置精度 $\pm 1\ \mu\text{m}$ を達成するため、試料ステージを移動させる方法を採用し、移動速度を $1\ \text{mm}/\text{sec}$ と比較的低速に抑える。

(4) (3)による生産性の低下を防ぐため、混成ICでは一般にトリミングする抵抗が数個所に集中的に配置されることに着目し、双対物レンズ構成にして2本のビームを切換えて使用する。

(5) 装置装着時における試料とステージ座標軸の合せは自動化による大幅な高速化を経済的に実現する見通しがないので手動とし、双対物レンズ構成により比較的短時間で行えるようにする。

使用したレーザ源の主な仕様を表1に示す。

表1 YAGレーザの仕様

発振モード	単一横モード
Qスイッチ出力	2 kW
出力効率	0.4%
ビーム開き角	1 mrad
Qスイッチ応答	1 μsec

なお、エネルギー調整にはガラスフィルタを用い励起入力的一定にしてレーザ出力によるビーム特性の変化を取除いた。

3.1 観察および集光光学系

試料とステージの軸合せには光学系により試料を観察しながらステージを移動させて回転誤差を検出し、補正する方法がとられているが、熟練しても2~3分かかる。そこで図3に示すような双対物の観察光学系を用いて2個の合せマークあるいはパターンエッジを同時に観察できるようにした。その結果、軸合せに要

する時間は熟練しなくても～10 secに短縮できた。更に対物レンズ間の距離を合せマークに合せて可変できる機能と、加工時に広い視野が必要な場合に一方のみ観察できる機能をもたせた。又、レーザビームの焦点と観察光学系の焦点を合わせるため他の光学系と独立に可動するリレーレンズを用いた。これにより観察像のピント合せによりビームスポットの照準を合わせる事ができるようになり、操作性が向上した。

一方、集光光学系は図3に示すように観察光学系の双対物レンズを共用し、2本のビームを得られるようにした。レーザビームをハーフミラーによって分割し、ミラー系を用いて各々集光レンズに投入させる、ビーム光路途中に設けたシャッタの開閉によりビームの選択切替を行う。機能トリミングでは比較的離れた複数個の抵抗を交互にトリミングすることがあり、この間の移動時間が実質のトリミング時間より長くなる。双対物レンズで2本のビームを切替使用することによりステージ移動距離を最小限にでき、トリミング時間の短縮を図ることができた。微細なスポット径と深い

焦点深度という相反する条件を満足させるため、レーザ源から集光レンズまでの光路長を約2mとし、ビームの集光性を高めた上で焦点距離15～25mmの比較的長焦点の集光レンズを採用した⁽⁴⁾。

図4は焦点を中心にして前後に焦点はずししたときの加工幅の実験値である。焦点距離 $f=16.5\text{mm}$ のレンズでは加工幅が $16\pm 1\mu\text{m}$ にはいる焦点はずし距離は約 $\pm 10\mu\text{m}$ であるが、 $f=26.5\text{mm}$ では加工幅が $24\pm 1\mu\text{m}$ にはいる焦点はずし距離は $\pm 20\mu\text{m}$ であり、 $40\mu\text{m}$ 程度の基板のうねりに対して加工幅の広がりは $1\mu\text{m}$ 以下にできた。

3.2 ステージ系

$\pm 1\mu\text{m}$ の位置精度を得るため、ステージ駆動にはパルスモータを用い、クローズドループ位置決め制御方式を採用した。始動および停止時のハンチング防止のため、移動速度を3段階に変更できるようにした。始動時は0.4 sec間だけ 0.3mm/sec とし、停止点の $6\mu\text{m}$ 前で 1mm/sec から 0.3mm/sec とし、更に $1\mu\text{m}$ 前で 0.1mm/sec にすることにより、全範囲で滑らかに始動停止させることができた。トリミング時の位置ずれは次の方法で測定した。まず金属薄膜を蒸着したガラスプレート上に#形のパターンを描く。次に、トリミングを模擬した細かい移動を繰返した後、前記の#形パターンの中央部に十字線を描き、両者の相対位置を比較する。その結果は、図5に示すようにほぼ $\pm 1\mu\text{m}$ 以内にあり、設計仕様を満足させることができた。

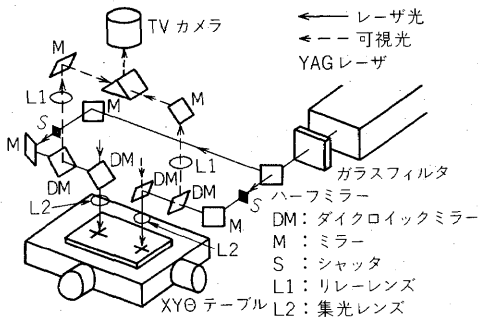


図3 観察集光光学系の構成
Fig.3-Schematic diagram of the observation and focusing optics.

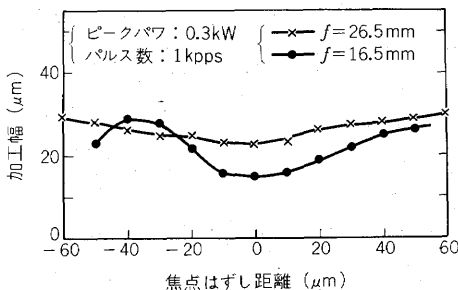


図4 焦点はずし距離と加工幅の関係
Fig.4-Relations between defocusing distance and cutting width.

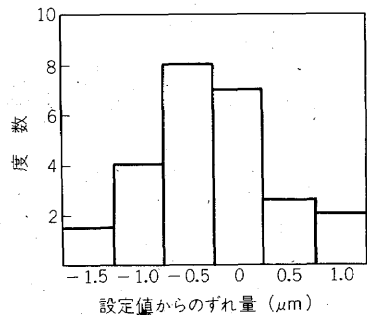


図5 XYステージの位置精度
Fig.5-Positioning accuracy of X-Y stages.

4. 機能トリミングアルゴリズム

2次フィルタの特性を決めるのは(1)伝送極周波数、(2)伝送極のQ、(3)減衰極の周波数、(4)利得、である。以下各項目について測定回数とトリミング繰返し回数を

減少させるのに適したアルゴリズムを述べ、これらから2次フィルタの連続接続で構成される高次フィルタのトリミングアルゴリズムを導く。

4.1 伝送極周波数

2次伝達関数の伝送極周波数(f_p)における位相(θ_p)は簡単な計算によりLPFで $\theta_p = -90^\circ$, BPFで $\theta_p = 0^\circ$, HPFで $\theta_p = 90^\circ$ である。又、 $\Delta\theta/\Delta f$ (群遅延時間)は f/Q のみに依存し、ほぼ $-110^\circ Q/f$ である。従って、 f_p における位相(θ)を測定しながら、 θ が θ_p となるまで指定された抵抗をトリミングすることにより f_p が合せられる。このときトリミング量は式(1)で計算される。

$$\frac{\Delta R}{R} \Big|_{f_p} = \frac{S_\theta^f}{S_R^f} (\theta - \theta_p) \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここで} \quad S_\theta^f &= \Delta\theta / (f \Delta\theta) = -1/110^\circ Q \\ S_R^f &= (\Delta f / f) \cdot (R / \Delta R) \end{aligned} \right\} (2)$$

よく使われるRCアクティブフィルタでは f_p が2個の抵抗 R_1, R_2 で決まり $f_p \propto (R_1 R_2)^{-1/2}$ であるので、 $S_R^f = -1/2$ となる。また式(2)より f_p のトリミング精度は式(3)となる。

$$\left| \frac{\Delta f_p}{f_p} \right| = \frac{1}{110^\circ Q} |\Delta\theta| \quad (3)$$

位相を $\pm 1^\circ$ の精度で測定することは容易であるので $\Delta\theta = \pm 1^\circ$ 、 $Q = 20$ とすると式(3)から $|\Delta f_p / f_p| = 0.045\%$ の高精度が得られる。この精度は薄膜抵抗の温度係数と同じオーダーであるので、素子トリミングで行うと $\pm 1^\circ\text{C}$ 以下の温度制御が必要となる。し

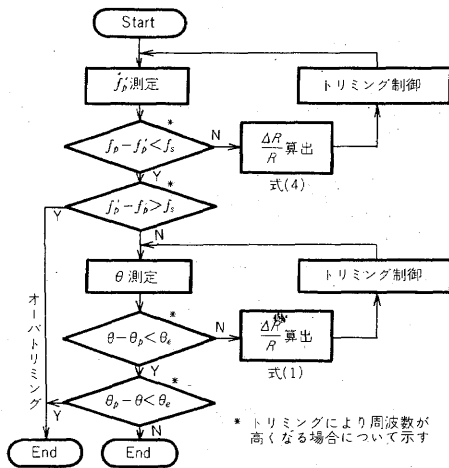


図6 伝送極周波数トリミングアルゴリズム
Fig.6-Transmission pole frequency trimming algorithm.

かし、機能トリミングでは R と C の温度係数相殺により $50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 以下に安定化した周波数を直接トリミングするので、上記の温度制御は不要になる。

図6に伝送極周波数トリミングのアルゴリズムを示す。演算増幅器1個で2次フィルタを実現する回路構成では f_p と Q の独立な調整はできない場合が多く、 f_p のトリミングにより Q は変化する。式(2)で S_θ^f を求めるのに現在の f_p における $\Delta\theta/\Delta f$ を求める必要がある。現在の f_p を求めるには多数の周波数における位相を測定する必要があり時間がかかる。そこで f_p が目的値より f_s 以上ずれている場合は位相が θ_p となる周波数(f_p')を2点の周波数における位相の測定から求め、式(4)によりトリミング量を計算する。

$$\frac{\Delta R}{R} \Big|_{f_p} = \frac{1}{S_R^f} \frac{f_p - f_p'}{f_p} \quad (4)$$

誤差が f_s 以下になったら Q の変化を無視して式(1)によりトリミング量を求める。なお、混成ICの製造偏差によりオーバートリミングになることを防ぐため、適当な安全係数をかける必要がある。又、 f_p と Q の独立性の高い場合は f_s を大きくした方が測定回数が少なく能率が良い。

4.2 伝送極のQ

図7に Q トリミングアルゴリズムを示す。 f_p における $\Delta\theta/\Delta f$ を測定し式(2)により Q を求める。トリミング量は式(5)により求められる。

$$\frac{\Delta R}{R} \Big|_Q = -S_Q^R \frac{Q - Q_p}{Q_p} \quad (5)$$

ここで Q_p は目的とする Q 、 $S_Q^R = (\Delta R/R) \cdot (Q/\Delta Q)$ である。この方法は Q の測定精度が低いので粗

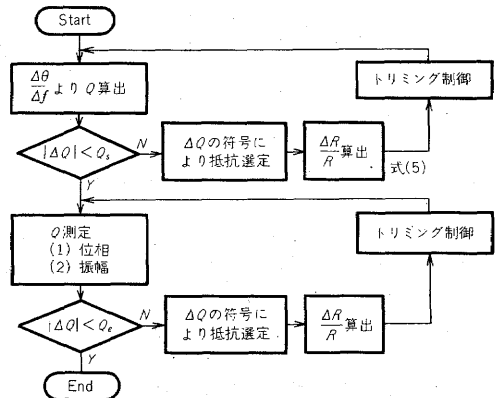


図7 伝送極Qのトリミングアルゴリズム
Fig.7-Transmission pole Q trimming algorithm.

調に用いる。Qの誤差が Q_0 以下になると高精度を得るため次の2つの微調方法のいずれかをとる。

(1) $f_p(1+1/2Q)$ あるいは $f_p(1-1/2Q)$ における位相を測定しながら $\theta_p - 45^\circ$ あるいは $\theta_p + 45^\circ$ となるまで指定された抵抗をトリミングする。

(2) 適当に選んだ2点の周波数における振幅の差を測定しながらこれが設計値となるまで指定された抵抗をトリミングする。第1の周波数は f_p あるいは通過域の規準周波数、第2の周波数は f_p から $f_p/2Q$ 程度ずれた周波数あるいは通過域の端の周波数とする。

Qは2個の抵抗の比で決められることが多いので、Qの誤差の符号により一方のトリミングすべき抵抗を選定する機能が必要である。上記2方法の選択はQの大きさ、周波数規格から判断する。後述する高次フィルタの機能トリミングでは(2)の方法をとった。

4.3 減衰極周波数

減衰極をさむ2点の周波数における振幅を測定して内そうにより求める。必要精度により繰返しが必要である。求めた周波数誤差からトリミング量を求める。

4.4 利得

フィルタに縦続接続された抵抗減衰器あるいは平坦増幅器により調整する。指定された周波数(例えば通過域の基準周波数)における振幅を測定し、誤差からトリミング量を算出する。

4.5 高次フィルタ

前述の各アルゴリズムの組合せで任意の高次フィルタの機能トリミングが可能である。図8に一般的なアルゴリズムを示す。よく使われる回路構成⁽⁷⁾の場合、Qは f_p と独立に調整できるが、 f_p はQと独立に調整できない。又、減衰極周波数は並列T形回路の定数で決まるので機能トリミングに適さない。そこで減衰極周波数を素子トリミングした後 f_p 、Qの順でトリミングする。

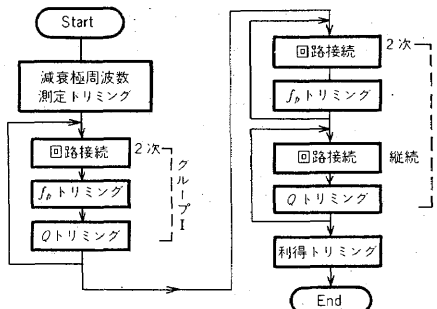


図8 高次フィルタトリミングアルゴリズム

Fig.8-Higher order filter trimming algorithm.

グする。

まず、各2次回路を2つのグループに分ける。グループIは比較的Qが低くQを変化させたとき通過域で振幅変化にピークの生じないものであり、グループIIは比較的Qが高くピークの生じるものである。 f_p とグループIの回路のQを2次回路単体でトリミングし、その後、グループIIの回路のQを全回路縦続接続してトリミングする。このときQトリミングのアルゴリズムとしては2点の周波数における振幅差を測定する方法をとり、第1の周波数は通過域の基準周波数に、第2の周波数は通過域規格の端の周波数とする。最後に利得をトリミングする。この方法により各2次回路の誤差、縦続接続による誤差を吸収して全体の特性を高精度かつ高能率にトリミングすることができる。

本アルゴリズムの収束性について述べる。減衰極周波数は一般に ϕ オーダの誤差を許すことができるので、この状態で f_p とQを設計値どおりとしてトリミングした場合、通過域で2dB以上のリップルを生じる欠点がある。これを防ぐ一方法として減衰極周波数の誤差分だけ伝送極周波数をずらしてトリミングする方法を考えた。この方法によりリップルを0.2dB以下にでき、収束性を改善できた。このため図8では減衰極周波数の測定を行っている。

4.6 制御プログラム

前述のアルゴリズムに基づいてシステムの制御プログラムを作成した。 f_p 、Qなどのトリミングを各々サブルーチンとし、フィルタに応じて主プログラムを作成するようにした。

図9に抵抗パターンとデータを示す。次章で述べるように抵抗の経時変化を小さくするため、粗調用ははしご形調整片と微調用連続形調整片を併用した。はしご形調整片は抵抗変化率(L_i)の大きい順に1~10個用意し、各々に調整片番号(i)を付与している。これを

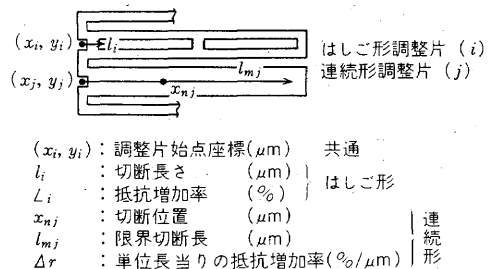


図9 抵抗パターンと座標データ

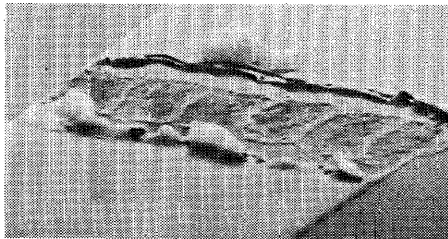
Fig.9-Resistor pattern for trimming and geometric data.

切断する場合には、トリミング量 $\Delta R/R \geq \sum L_i$ となる最小の i の組を選びこれを切断する。連続調整片は限界切断長まで徐々にトリミングしていく。

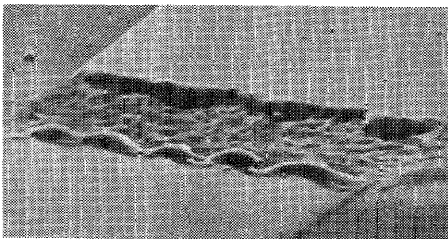
市販のネットワークアナライザにより振幅、位相の測定が可能であるが、ソフトウェア的には次の点に注意した。複数回同じ測定を繰返し、平均処理、比較処理を行い信頼度の高いデータを得る。これにより回路の雑音による誤差、フィルタの応答時間による誤差を取り除くことができ、又、混成ICの発振、接触不良による不安定性を検出できる。

5. 応用例

窒化タンタル薄膜抵抗のトリミング条件と経時変化特性については既に報告されている⁽⁵⁾。本装置においても実験により、レーザビークパワー 0.8 kW 以下、パルス数 1,000 pps、残り線幅 50 μm 以上の条件でトリミングすると化成トリミングに比較して同等以上の安定性が得られることを確認した⁽⁶⁾。図10にレーザトリミングした抵抗の電子顕微鏡写真を示す。パルス数 100 pps ではビームは約 10 μm おきに照射されるため、ビームの重なり量は小さく高パワー密度のところで爆発的に抵抗膜が除去されている。一方、パルス数 1,000 pps ではビームは約 1 μm おきに照射されるため、ビームの重なり量は大きく低パワー密度のところで抵抗膜が溶融、凝集して、滑らかな切り口が得



ピークパワー 0.3kW, パルス数 100pps



ピークパワー 0.3kW, パルス数 1000pps

図10 トリミング部の電子顕微鏡写真 ($\times 1,500$)

Fig.10-Scanning electron micrographs of laser trimmed resistors.

られる。抵抗値の安定性は後者の方が優れている。図11に 150°C、2,000 時間放置の抵抗変化率と残り線幅の関係を示す。残り線幅 50 μm 以上が好ましいことが分かった。

又、経時変化試験から 50 μm 線幅の場合、20 年間常温放置の抵抗変化率を 0.03% 程度以下にするためには、トリミング長の抵抗全長に対する割合いを 5% 以下とする必要があることが分かった。高抵抗の場合には図9に示すはしご形の調整片を用いることによりこの条件を満足させた。

これらの条件を考慮し、本システムを用いて交換機用押しボタンダイヤル信号受信器のRCアクティブフィルタを機能トリミングした。例として Sallen and Key の回路⁽⁷⁾を用いた6次帯域消去フィルタについて述べる。図12に単位2次フィルタの回路を示す。同図で、 $C_1=C_2=C_3/2$ 、 $R_1=R_2=2R_3$ 、 $\rho=2R_1/R_4$ 、 $r=2C_4/C_1$ とすると

$$f_p = \frac{1}{R_1 C_1} \sqrt{\frac{1+\rho}{1+r}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{(1+r)(1+\rho)}}{4+r+\rho-4k}$$

$$k = 1 + R_5/R_6 : \text{閉ループ利得}$$

となる。容量は微調に適さないし、 $R_1 \sim R_3$ は減衰極周波数を決めているので、 f_p トリミングには ρ すなわち R_4 を調節し、 Q トリミングには k すなわち R_5 あるいは R_6 を調節する。図8に示す方法でトリミングした後の減衰量周波数特性と初期規格を図13に示す。

周波数 $\pm 0.1\%$ 、利得 $\pm 0.2 \text{ dB}$ のトリミング精度が得られた。トリミングに要する時間はトリミング前の特性偏差 10% 程度の場合、1~3分/2次フィルタ

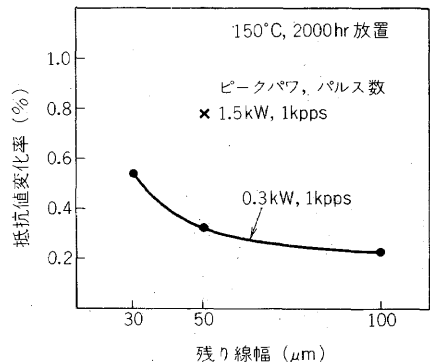


図11 抵抗値変化率と残り線幅の関係
Fig.11-Relations between resistance changes and residual width.

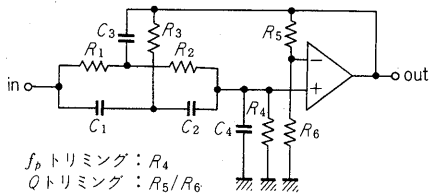


図12 単位2次フィルタ
Fig.12-2nd order filter section
(Sallen and Keys circuit).

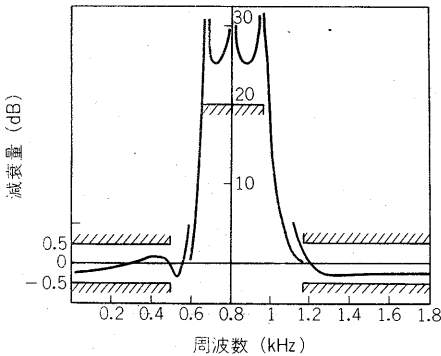


図13 帯域消去フィルタの周波数特性
(機能トリミング後)
Fig.13-Frequency characteristics of
BEF (after trimming).

であった。これは手動による機能トリミングに要する時間の1/5~1/10と考えられる。更に高速化を図るためには制御用コンピュータに高速なものを用い、ステージの速度を上げることが必要である。又、今後の問題は初期位置合せの自動化、パターンデータ作成の自動化である。

6. むすび

混成IC化RCアクティブフィルタの調整工数低減のため、YAGレーザによる自動トリミングシステムを試作し、トリミング条件、パターン設計条件を検討した。以下に得られた結果をまとめる。

(1) 位置精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ 、加工線幅 $1.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 、加工速度 1 mm/sec の特性をもつ自動YAGレーザトリミング装置を実現した。

(2) 測定回数、トリミング繰返し回数の少ないトリミングアルゴリズムを考案し高速化を図り、又、任意の高次フィルタの自動機能トリミングを可能にしシステムの融通性を高めた。

(3) 抵抗値の経時変化試験により安定性の得られるトリミング条件、トリミング長割合を求めた。

この自動トリミングを混成IC化RCアクティブフィルタに適用し、手動に比較して5~10倍の高速性と周波数 $\pm 0.1\%$ 、利得 $\pm 0.2 \text{ dB}$ の高精度が得られることを確認した。

謝辞 本研究を進めるに当り御指導頂いた武蔵野通研 工務部木鉛調査役、電子回路研究室有吉室長、道券調査員、横須賀通研、有線伝送研究室黒沢調査員に感謝致します。御協力頂いた関係各社の各位に感謝致します。

文 献

- (1) 中山、斉藤、岩田、黒沢：“薄膜混成IC用レーザトリミング装置”，第6回半導体、集積回路技術シンポジウム，電気化学協会（1974）。
- (2) G. Hurtig and E. J. Swenson：“An overview of laser functional trimming techniques”，Proc.1974 ECC, p.240.
- (3) 岩田、丹生、斉藤：“RCアクティブフィルタの自動トリミングシステム”，信学会回路とシステム理論研資，CST74-44（1974）。
- (4) 高本、中山：“光偏向による加工の基本特性—レーザによる薄膜加工の研究（第4報）—”，精密機械，38,7, p.599（1972）。
- (5) B.A.Unger and M.I.Cohen：“Laser trimming of thin film resistors”，1968 ECC, p.304.
- (6) 丹生、道券：“レーザ加工薄膜素子の安定性”，信学会電子部品・材料研資，CPM76-68（1976）。
- (7) G.S.Moschytz and W.Thelen：“Design of hybrid integrated filter building blocks”，IEEE J., SC-5,3, p.99（1970）。

（昭和52年1月31日受付）