

同軸形厚膜抵抗減衰器の製造工程の改善

中島智也* 秋山正紀† 柴崎年彦‡ 原 一之§ 松田 勲¶ 木下照弘||

An Improvement of the Manufacturing Process of Thick Film Resistance Attenuation of Coaxial Type

Tomoya Nakajima* Akiyama Masanori† Toshihiko Shibazaki‡ Kazuyuki Hara§
Isao Matsuda¶ Teruhiro Kinoshita||

keywords : microwave,attenuator,frequency property,coaxial type,thick film resistance

1 はじめに

同軸形厚膜抵抗減衰器とは電気抵抗 R と同様にマイクロ波回路で減衰を与えるデバイスのことである [1]。抵抗減衰器の主な用途は、様々な高周波コンポーネントが組合わさった回路などで電力レベルの調整をするために挿入したり、あるいは検波器の入出力特性を受けることなく増幅器の利得を測定するために挿入するなど、抵抗減衰器(アッテネータ) [2][3] は高周波では欠かせない回路の一部となっている。

同軸形厚膜抵抗減衰器の構成は、同軸コネクタと、減衰量が一定な固定減衰器の素子を、一体化させたものである。固定減衰器には、アルミナ¹基盤上に電極成分と抵抗成分をペーストした素子を使用し、所望の特性が得られるよう電極成分の上に抵抗成分を十字形にペーストした厚膜パターンとなっている。アルミナ基盤を使用しているのは、減衰器の基盤として高耐熱性、ペーストとの密着性、化学安定性、高い比抵抗、熱伝導性、誘電率、機械的強度の特性などの点が優れているからである。

減衰器には厚膜抵抗と薄膜抵抗を用いる場合があるが、厚膜抵抗は薄膜抵抗に比べて、生産性の

向上、コストの低減などを考えた場合、数段優れている [1]。しかし厚膜抵抗の減衰器は、厚膜抵抗の厚みや形によって抵抗値が大幅に変化するので歩留りが悪く、所望の特性を得にくいことから、ばらつきの多い製品ができてしまうので生産効率が悪くなってしまふ。そこで、本報告では、厚膜抵抗の歩留りを改善し、ばらつきの少ない製品を製作するためには製造工程の中でどのような工夫を行っていけばよいのかを検討している。

2 原理

厚膜パターンを形成した減衰器を同軸線路に挿入した様子を図1に示す。中央には抵抗膜があり、左右の電極は入出力電極で、同軸線路内では内部導体に、また上下の共通電極(図4の *Earth*) は外部の導体に接続されている。

さて、実際にはこのような回路構成となっているが、測定値から減衰器の特性を計算するにあたり、等価的に置き換えた減衰器の回路構成は図2のようになる。この回路構成は抵抗減衰器で基本となる π 形の等価回路である。本来ならばリアクタンス成分についても考慮しなければならないが、減衰器の基盤となるアルミナ基盤の寸法は縦 $8[mm]$ × 横 $28[mm]$ と非常に小さく、高周波成分の影響をほとんど受けないのでリアクタンス成分は無視でき、純抵抗として扱うことができる。この回路の合成抵抗 R_0 と抵抗 R_a 、抵抗 R_b の関係

* 都立産技高専専攻科

† 株式会社サンケン(専攻科インターンシップ受入企業)

‡ 都立産技高専品川キャンパス電子情報コース, 助教授

§ 都立産技高専品川キャンパス電子情報コース, 教授

¶ 都立産技高専品川キャンパス電子情報コース, 教授

|| 東京工芸大学工学部コンピュータ応用学科, 教授

平成 18 年 12 月 20 日受理

¹酸化アルミニウムのこと

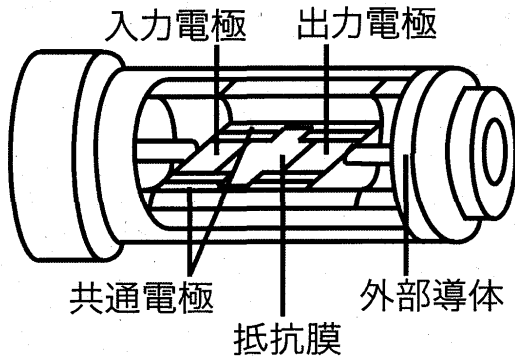


図 1: 同軸形厚膜抵抗減衰器の構造

式を以下の式 (1) ~ (6) に示す [4] (L : 減衰量 [dB], k^2 : 電力比 (入力電力/出力電力), α : dB を N_p に置き換えた減衰量 [N_p], $1[\text{dB}] = 8.686[N_p]$)。今回の製作では減衰器の減衰量を $L = 10[\text{dB}]$ とし、合成抵抗が同軸ケーブルの特性インピーダンス $R_0 = 50[\Omega]$ 系の特性になるように設計した。以下の式から求めた理論値を表 1 に示す。

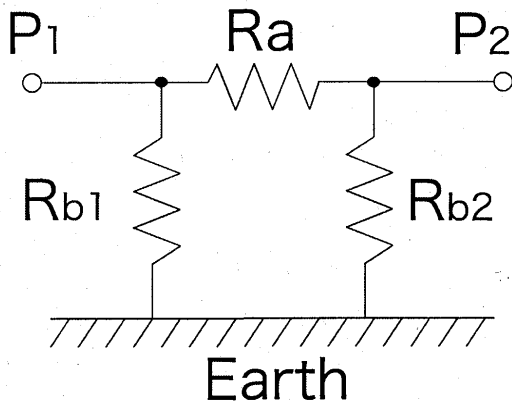


図 2: 減衰器の回路構成

$$R_a = R_0 \frac{k^2 - 1}{2k} \quad (1)$$

$$R_b = R_0 \frac{k - 1}{k + 1} \quad (2)$$

$$R_a = R_0 \sinh \alpha \quad (3)$$

$$R_b = R_0 \coth \alpha / 2 \quad (4)$$

$$L = 10 \log k^2 \quad (5)$$

$P_1 \rightarrow P_2 [\Omega]$	$P_1 \rightarrow E [\Omega]$	$P_2 \rightarrow E [\Omega]$	減衰量 $L[\text{dB}]$
51.95	61.11	61.11	10.00
$Z_0 [\Omega]$	$R_{b1} [\Omega]$	$R_{b2} [\Omega]$	$R_a [\Omega]$
50.00	96.25	96.25	71.15
$Z_{in} [\Omega]$	$Z_{out} [\Omega]$		
50.0	50.0		

表 1: 減衰器の理論値

3 製造工程

製造工程は、主に、(1) 印刷、(2) 焼成、(3) 測定、(4) 調整の 4 行程となる。印刷では、アルミナの電極基板にペースト状の抵抗成分を印刷し、焼成では、その基板を電気炉で焼いて、抵抗を定着させる。その後、測定では焼成された抵抗値を測定する。そして、所望の抵抗値が得られるように、抵抗の表面をヤスリで削って、調整する。調整が完了したら、同軸形のコネクタ回路の中に組み込んで図 1 の減衰器を構成し、ネットワークアナライザで、一定の減衰量が得られているか、いなかを、広帯域な周波数に渡って測定し、良好な減衰特性が得られれば製品の完成となる。

4 試作, 調整

実際に製造工程の手順をおって製作を試みる。はじめに、アルミナの基盤に電極部分にあたる銀を図 3 のような形にペーストする (図の白い部分はアルミナ基盤)。次に、図 3 に点線で示した十字形に電極部分の上から、厚膜抵抗にあたる抵抗成分を図 4 のようにペーストする。このとき銀と抵抗成分がまざらないように銀が乾いたことを確認したあとに抵抗成分のペーストを行う。実際の印刷工程では、厚膜抵抗を一様にペーストできるようにマスクを製作・工夫し、それを用いてペーストし、印刷した。

次に、850 度の電気炉で印刷した基盤を 20 分程度焼いて、焼成する。焼成中の電気炉の温度変化を図 5 に示す。図では、横軸が電気炉の電源投入時間 (分) であり、縦軸が電気炉の温度 (度) である。図のように、電源投入後約 1 時間で電気

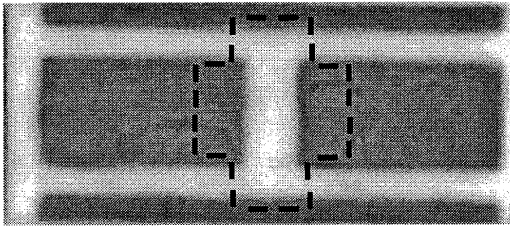


図 3: 銀をペーストした基盤

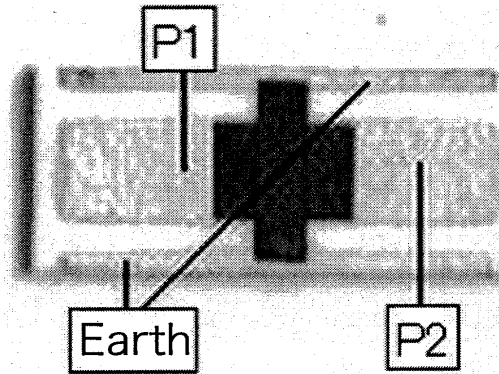


図 4: 抵抗をペーストした基盤

炉が 850 度となったところで、20 分間一定温度保ち、焼き固める。その後、電気炉の電源を切り、炉の温度変化に従って、徐々に冷まして行く。ここで、焼いたあとにすぐに取り出すなどして急激に冷却してしまうと、回路基盤が壊れてしまうので、すぐに冷ますのではなく徐々に基盤の温度が冷めるようにしなければならない。

焼成後、図 2 の等価回路に従って、電極 P_1 - 電極 P_2 間、電極 P_1 - $Earth$ 極間、電極 P_2 - $Earth$ 極間の抵抗値を測定する。測定値から減衰量 L 、抵抗 $R_{b1}, R_{b2}, R_a, Z_{in}, Z_{out}$ を計算する。そして、厚膜抵抗を削って調整を行う。

ここで、調整前の抵抗値は、所望の特性より低くなるようにあらかじめ製作した。

抵抗の寸法と抵抗値の関係は、よく知られているように、次式 (6) で与えられる。

$$R = \frac{\rho \cdot l}{d \cdot w} \quad (6)$$

式 (6) における各パラメータは、 $\rho[\Omega \cdot m]$ が抵抗率であり、 $l[m]$ が伝搬方向の抵抗膜の長さ、 $d[m]$ が抵抗膜の厚み、 $w[m]$ が抵抗膜の幅であるが、

抵抗率が一定とすれば、抵抗値を可変させるには l, d, w の各パラメータを操作する必要がある。このうち焼成後に調整する場合には、厚みのパラメータ d を可変させるのが容易である。しかしながら、式 (6) に示すように厚み d は分母にあるので、少しの変化が抵抗値を大きく左右する。このため、調整前の抵抗値を所望の特性より低くし、厚みを少しずつ削って、抵抗値を増加させる方法が一番良いと判断したためである。

最後に、調整後の減衰器を同軸形コネクタに挿入した完成形を図 6 に示す。

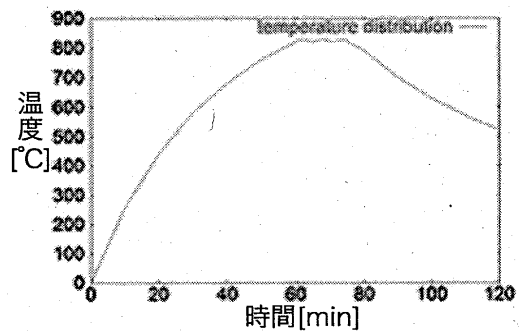


図 5: 焼成経過

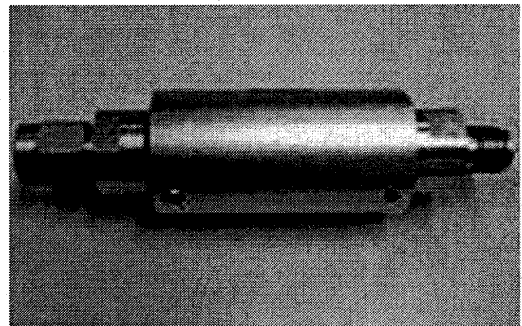


図 6: 同軸形厚膜抵抗減衰器

なお、抵抗減衰器に要求される条件としては、以下の点が挙げられる。

- VSWR が小さいこと²
- 減衰量が経年変化しないこと
- 広帯域で動作可能なこと

- 用途に応じた耐電力であること

減衰量の偏差について 10[GHz] 程度までのマイクロ波領域で使用する場合は、10 ~ 30[dB] のもので $\pm 0.2 \sim \pm 0.5$ 位は許容される。

5 測定結果

焼成後の調整を行う前に測定した抵抗減衰器の特性値と調整後の抵抗減衰器の特性値を表 2 と表 3 に示す。

$P_1 \rightarrow P_2$ [Ω]	$P_1 \rightarrow E$ [Ω]	$P_2 \rightarrow E$ [Ω]	減衰量 L [dB]
22.79	33.30	26.53	10.27
24.40	26.59	35.46	10.37
30.74	33.98	41.96	10.10
28.44	35.32	37.18	9.98
29.39	36.56	38.41	9.91
Z_0 [Ω]	R_{b1} [Ω]	R_{b2} [Ω]	R_a [Ω]
22.94	36.74	62.02	29.63
24.11	83.37	34.10	30.42
30.13	84.53	46.02	39.78
28.37	64.62	52.60	37.15
29.37	66.46	54.68	38.42
Z_{in} [Ω]	Z_{out} [Ω]		
27.9	22.4		
22.0	31.5		
28.0	36.3		
29.1	31.8		
30.1	32.7		

表 2: 調整前の特性値

調整前では各々の減衰器の合成抵抗は 30[Ω] 前後であったのが、調整後には減衰量が 10[dB] から誤差 2[%] のまま、合成抵抗は 50[Ω] から誤差 4[%] に抑えられていることが確認できる。しかしそれぞれの抵抗値や左右のばらつき具合に関してみると、ほとんどの特性値は誤差 10[%] 程度に抑えられたが、理論値と誤差が大きくなってしまったケースもあった。次に試作した 5 つの減衰器の周波数特性のグラフを図 7 に示す。測定は DC から 20[GHz] まで掃引可能なスカラーネットワークアナライザを用いて測定した。試作した抵抗減衰器は 0.5 ~ 15[GHz] の周波数帯までの帯域では、減衰量 L が 10[dB] と一定で動作している。したがって 0.5 ~ 15[GHz] 帯までの広帯域で

²VSWR は電圧定在波比のこと。高周波の伝送路における進行波と反射波の関係、高周波電圧の反射の度合いを示す [5]。

$P_1 \rightarrow P_2$ [Ω]	$P_1 \rightarrow E$ [Ω]	$P_2 \rightarrow E$ [Ω]	減衰量 L [dB]
51.82	64.25	60.86	9.80
51.58	56.19	65.42	9.98
51.90	63.29	66.85	9.81
51.92	61.75	61.62	9.92
51.24	61.27	59.99	9.95
Z_0 [Ω]	R_{b1} [Ω]	R_{b2} [Ω]	R_a [Ω]
50.70	92.85	106.10	70.16
49.71	115.89	80.73	69.87
51.98	125.57	94.83	67.94
50.29	97.15	97.71	70.79
49.50	98.16	93.28	69.93
Z_{in} [Ω]	Z_{out} [Ω]		
52.2	49.1		
45.6	53.9		
49.5	55.9		
50.3	50.2		
49.0	50.1		

表 3: 調整後の特性値

動作が可能なが確認できる。しかし 15[GHz] より周波数が高くなると、高周波成分の影響が無視できなくなってしまう。5 つの基盤のうちのひとつでは 18[GHz] の領域で急激に減衰量が大きくなる共振も起きていることが確認される。

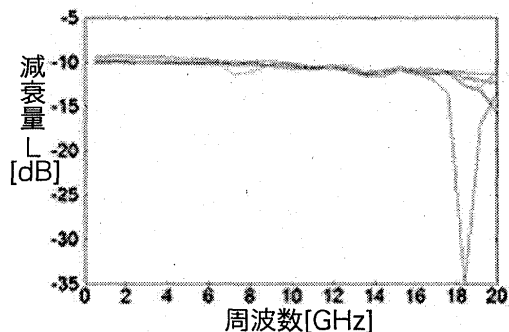


図 7: 周波数特性

また、周波数が高くなるに従って、減衰量が増加してしまったり、高周波成分が強くなってくると徐々に減衰量が安定なくなるといった結果となった。これは、15[GHz] 以上では波長が短くなって、基板の構造サイズと同程度になるためであり、より高い周波数で製作する場合には、無視したリアクタンス成分を考慮する必要があると考えられる。

6 まとめ

本報告では、同軸形厚膜抵抗減衰器において、厚膜抵抗のばらつきの少ない製品を製作するために、製造工程での工夫を検討した。厚膜抵抗の減衰器を製造するにあたり、ばらつきの少ない製品を製作するためには、印刷工程が重要であったので、今回は厚膜抵抗を一様にペーストできる工夫を行ったところ、安定した抵抗値が得れるようになった。なお、本論で触れなかったが、厚膜抵抗が基盤の中心からずれてしまうと左右の抵抗値にばらつきが生じ、所望の特性を得ることが困難であった。このことから正確に厚膜が基盤の中心にくるようにマスク掛けを設定し、ムラが出ないようにペーストすることが重要となってくる。そこで抵抗を一定厚みにペーストする際の位置決め用の治具を製作する必要があるが、今回は時間の関係でそこまでの工夫に至らなかったため、今後の課題としたい。

次に調整工程では、厚膜抵抗を削る際に、わずかな厚みで抵抗値が大幅に変化してしまうので、少しずつ厚膜抵抗を削っていく必要があった。また調整と測定を何度も繰り返すことが必要であり、調整前の抵抗値を所望の特性より低くなるようにあらかじめ製作することで調整が容易になることを確認できた。これらの点をふまえて製作を行っていけばばらつきの少ない製品を製作できる。今回は手作業で削りだしたが、今後の工夫としては、 $x-y$ ステージなどで削り位置を調整固定し、小さなヤスリの先端をモータ駆動にして、削る位置に当てる構造の機器を製作すれば、より調整作業が容易になり、調整時間が短縮できる。

謝辞

本報告の内容は、都立産技高専専攻科のインターンシップでの検討課題である。短い期間に熱心にご指導を頂いた秋山正紀氏をはじめ、株式会社サンケン（神田）のスタッフの方々に深謝いたします。

また、インターンシップ派遣にあたりお世話になった都立産技高専品川キャンパス電子情報コース井上徹教授に感謝します。

参考文献

- [1] 新谷正彦、篠原秀一:”同軸形厚膜抵抗減衰器の製造上の問題点”, 安立テクニカル,33号,p.96-105(1975-06)
- [2] 吉田武:”改訂高周波回路設計ノウハウ”,CQ出版,p.199-207(1992-06)
- [3] G. R. Jessop 編, 関根慶太郎 訳:”RSGB VHF/UHF MANUAL 日本語版”,CQ出版,p.508-510(1985-04)
- [4] 山本博、大川澄雄:”改版高周波測定”, コロナ社,p.213-217(1998-11)
- [5] F R コナー 原著 荒木純道 訳:”光・電波伝送入門”, 森北出版,p.34-35(2005-03)