薄膜インダクタを用いた LC フィルタの基礎特性

Basic Properties of an LC Filter Using a Thin-Film Inductor

山口正洋・石原邦彦・荒井賢一

東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980)

M. Yamaguchi, K. Ishihara and K. I. Arai

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980

This paper discusses the application of thin-film inductors to thin-film-based LC filters. We fabricated a monolithic thin-film LC filter by using the rf sputtering and dry-etching techniques. The filter consists of thin-film inductors and thin-film capacitors made on a common substrate. This filter was designed as a second-order low-pass filter having Chebyshev characteristics, with a cut-off frequency of 50 MHz. We developed a technique for measuring this two-port device at high frequencies, and then measured the frequency characteristics. Here, we discuss the merits of thin-film LC filters using soft magnetic thin films.

Key words: LC filter, thin-film inductor, thin-film capacitor, transmission measurement, two-port device

1. はじめに

磁気応用デバイスの超小形化および将来への集積化を目指したマイクロ磁気デバイスの研究が注目されているが、現在のところ薄膜インダクタ、あるいは薄膜トランスへの関心が高く、小容量電源への応用が主として議論されている^{1)~3)}。これに対し、今後の薄膜磁気デバイスの展開を考えた場合、磁気素子と他の受動素子との集積化は重要な位置を占めると考えられ、その代表例として薄膜インダクタと薄膜キャパシタとの集積化による LC フィルタの実現が期待される。

現在、小形かつ高性能な LC フィルタとしては、数 100 kHz から 10 MHz までの周波数帯で使用可能な積層チップ LC フィルタ⁴⁾、850 MHz 帯用多層薄膜空心 LC フィルタ⁵⁾などが報告され、また GHz 帯においてはマイクロストリップフィルタが使用されている。しかし 10 MHz から数 100 MHz 帯において、小形、高性能な LC フィルタは現在ほとんど存在せず、この周波数帯での高性能 LC フィルタの開発が望まれている。

以上のような観点に立ち、著者らは薄膜磁気デバイス

集積化の試みとして、10 MHz から数 100 MHz 帯で動作する薄膜 LC フィルタ作製について、その基礎的検討を行った。

一方、このような薄膜磁気デバイスの解析上、高周波インピーダンスや伝送特性の測定法とその妥当性を考察することは重要である。著者らはすでにインダクタのインピーダンス測定として、マイクロストリップ線路を用いた反射測定法を導入し検討を重ねてきたが、300 MHz 以上の周波数では測定誤差が避けられないことを明らかにしている⁶⁾。この問題に対し、ここではフィルタに関する検討に先立ち、新たに伝送特性を用いた高周波インピーダンス測定法とその測定限界についても考察を行った。

本論文は以上の結果をまとめて報告するものである。

2. 伝送特性を用いたインピーダンス測定法

2.1 測定原理および測定方法

Fig. 1(a) に 2 端子対回路のインピーダンス測定回路を示す。デバイスの各端子対は特性インピーダンス Z_0 (50 Ω) の線路に接続され、ネットワークアナライザ (HP8752A) によって伝送係数 S_{21} の測定が行われる。

インダクタは、Fig. 1(b) のように伝送線路に対して並列に接続した。これはインダクタと地導体面との間に並列に存在する漂遊容量のため、直列接続では測定誤差が大きくなるためである。素子のインピーダンス Z_r と伝送係数 S_{21} との間には、よく知られているように、次式のような関係がある。

$$S_{21} = \frac{2Z_r}{2Z_r + Z_0} \quad (1)$$

測定された伝送係数 S_{21} を (1) 式によりインピーダンスに変換し、その実部を抵抗、虚部を角周波数 ω で除した値をインダクタンスとした。なお検討の対象には、厚さ 1 mm のガラス基板上に作製した Cu 空心つづら折れコイルを使用した。

Fig. 1 Measurement circuits for transmission characteristics: (a) two-port network, (b) two-terminal device.

Fig. 2 Frequency characteristics of the thin-film inductor measured by transmission and reflection techniques.

2.2 測定結果

Fig. 2 に伝送測定および従来の反射測定⁹⁾の2通りによって、インピーダンスを測定した結果を示した。500 MHz以上の周波数特性を見た場合、反射測定ではインダクタンスの共振特性が正確に得られていないが、伝送測定では計算値^{7),8)}と良く一致した特性が得られていることがわかる。一方50 MHz以下においては、伝送測定の場合、計算値から大きくずれてしまう。

低周波領域における誤差の原因は、測定される S_{21} の位相の確度に起因している。測定に使用したインダクタの、低周波におけるインダクタンスおよび抵抗値はそれぞれ37 nH, 74 Ω であるが、この場合の S_{21} の位相の計算結果をFig. 3に示す。図中には抵抗値を変数とした場合の計算結果も併せて示した。抵抗値が74 Ω の場合、位相は10 MHz付近において数100 mdeg.となり測定器の測定限界に達することがわかる。これに対しFig. 3は、抵抗が小さくなるほど位相は1 MHzから1 GHzの

Fig. 3 Calculated frequency characteristics of the phase of the transmission coefficient, S_{21} .

Fig. 4 Electric circuit of a second-order LC filter.

広範囲で大きな値となることを示しており、抵抗が10 Ω 以下の素子では低周波から高周波まで精度の高い測定が可能であると考えられる。

今回作製したフィルタの測定では上記の検討を踏まえた伝送測定により特性評価を行った。

3. LCフィルタの作製と特性

3.1 設計および作製

Fig. 4にフィルタの回路構成を示す。フィルタの特性としてはチェビシェフ特性を有する2次の低域通過フィルタとし、遮断周波数50 MHz、通過域内における最大振幅0.0436 dBとして設計を行った。インダクタンスおよびキャパシタンスの値は図中に示したとおりである。

インダクタの構造は単位面積当たりのインダクタンスが高いスパイラル形を使用した。設計には1ターンごとのインダクタンス、抵抗および漂遊容量を考慮した梯子形等価回路^{9)~11)}を用いた。薄膜インダクタにおける磁性膜の効果を検討するため、まず空心インダクタによるLCフィルタを作製した。この際、インダクタの外径を小形にすること、また遮断周波数の10倍の500 MHzまで L の値が一定となるよう漂遊容量の小さい寸法とすることを設計指針とした。これよりスパイラルの外径は2 mm、ターン数9回、また導体の幅、間隔および膜

Fig. 5 Upper view and cross-sectional view of the filter.

Fig. 6 SEM observation of the filter.

厚はそれぞれ $40\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, $6\mu\text{m}$ とした。

薄膜キャパシタは上部電極、誘電体および下部電極の3層によって構成される。誘電体材料としては高周波損失が少なく、高耐電圧で、誘電率の再現性がよく、また作製が容易であることから、RF スパッタリングにより形成される SiO_2 膜¹²⁾を用いた。ただし誘電率は比較的低い ($\epsilon_r=4$)。設計膜厚は耐電圧等を考慮して $1\mu\text{m}$ とし、この結果電極一辺の設計長さは 0.99mm となった。

Fig. 5 に設計したフィルタの全体図および断面構造を示す。薄膜インダクタは薄膜キャパシタの上部電極と接続された構造となり、フィルタは同一基板上に同時に作製される。フィルタ全体の大きさは電極部分を含めて約 $3\text{mm} \times 4.5\text{mm}$ である。素子の作製はすべて RF スパッタリングおよびドライエッチングを用いて行った。

Fig. 7 Frequency characteristics of the filter.

Fig. 8 Equivalent circuit of the filter, including the bonding wire.

Fig. 6 は作製したフィルタの SEM 写真を示したものであり、素子が設計どおり精度良く作製されていることが確認された。測定は、マイクロストリップ線路を用いた治具に直径 $25\mu\text{m}$ の Al 製ボンディングワイヤによって接続し、ネットワークアナライザ (HP8752A) を用いて行った。

3.2 測定結果

試作したフィルタの利得の周波数特性を Fig. 7 に示す。破線はインダクタの周波数特性を含めたフィルタの計算値を示したものである。通過域における挿入損失は約 0.49dB であり、実験値は、 200MHz 付近まで計算値と良く一致していることがわかる。しかし、約 450MHz において減衰極の存在がみられ、何らかの共振が生じていることがわかる。以下この原因について検討を行った。

まず、フィルタのインダクタの部分のみを分離し、その周波数特性を測定したところ自己共振周波数は 800MHz を越えるため、フィルタの減衰極の存在を説明することはできなかった。

次に、フィルタの伝送測定では、ボンディングワイヤをフィルタへの入力、出力および地導体面への接続の計3箇所を使用しているため、そのインダクタンスが減衰

Fig. 9 Frequency characteristics of the filter using soft magnetic thin films.

極に影響を及ぼしている可能性がある。ボンディングワイヤの特性を含めたフィルタの等価回路を Fig. 8 に示す。Fig. 7 における点線はこの解析の結果を示したものであり、計算値は実験値と非常に良く一致していることがわかる。3箇所ボンディングワイヤそれぞれについて減衰極への影響の程度を検討した結果、薄膜キャパシタのCと地導体面へのボンディングワイヤのLとのLC直列共振が原因であることがわかった。すなわち、この部分におけるボンディングワイヤのインダクタンスは約4 nHであるが、これより薄膜キャパシタとの直列共振周波数を計算すると432 MHzとなり、フィルタの減衰極を説明することができる。キャパシタを含む回路の測定においてはボンディングワイヤの影響に十分な注意が必要であることがわかった。

以上、薄膜空心インダクタと薄膜キャパシタとの集積化によるLCフィルタの作製を行い、実験結果の解析が十分可能であることを明らかにした。次に薄膜インダクタとしてパーマロイ薄膜を用いたサンドイッチ構造インダクタ¹³⁾でフィルタの設計を行った。ここでは空心インダクタを用いた場合に比較して磁性薄膜を使用することによる効果を明白にするため、インダクタの形状は空心の場合と同じスパイラル形、またコイルの導体幅および導体膜厚を同寸法として固定し、スパイラルの外径、ターン数、コイルの導体間隔および磁性膜の膜厚を変化させることによって所定のインダクタンスが得られるように設計した。この結果インダクタの占有面積は空心の64%まで小形化できた。この設計に基づいて作製したフィルタの測定結果を示したものがFig. 9である。実験値は計算値と良く一致し良好な結果を示している。この場合の挿入損失は、空心インダクタを用いた場合に比較して0.49 dBから0.31 dBへと大きく低減された。以上のように磁性膜使用により、形状の小形化と挿入損失の低減が可能であることが明らかになった。

4. ま と め

薄膜インダクタと薄膜キャパシタとの集積化によるLCフィルタの設計および作製について検討を行った。ここでは2端子対回路の高周波での伝送測定法についても検討を加え、高精度での測定が可能であることを確認した。

またフィルタ作製では、薄膜インダクタおよび薄膜キャパシタの設計から解析まで検討を行い、同一基板上に同時に作製することによって小形のフィルタが得られた。フィルタの特性は計算値と良く一致したものが得られたが、キャパシタを含む回路の測定には、ボンディングワイヤの影響についても十分な注意を要することがわかった。

一方パーマロイ薄膜を用いたサンドイッチ構造インダクタでフィルタを構成した場合には、インダクタの占有面積を64%へ、またフィルタの挿入損失を63%へ低減させるという結果が得られ、磁性膜の使用によって小形、高性能なフィルタの実現が可能であることが明らかになった。

謝 辞 本研究にご協力頂いた東北大学電気通信研究所中村研究室、工学部機械電子工学科江刺研究室、ヤマハ(株)基礎研究所、松下電工(株)の皆様に感謝します。

文 献

- 1) K. Kawabe, H. Koyama and K. Shirae: *IEEE Trans. Magn.*, **20**, 1804 (1984).
- 2) K. Yamasawa, K. Maruyama, I. Hirohama and P. P. Biringer: *IEEE Trans. Magn.*, **26**, 1204 (1990).
- 3) M. Mino, T. Yachi, A. Tago, K. Yanagisawa and K. Sakakibara: *IEEE Trans. Magn.*, **28**, 1969 (1992).
- 4) M. Takaya and A. Fujisawa: *IEEE Denshi Tokyo*, **30**, 62 (1991).
- 5) T. Nishikawa: *IEICE Trans.*, **E74**, 1556 (1991).
- 6) K. I. Arai, M. Yamaguchi and H. Ohzeki: *IEEE Trans. Magn.*, **28**, 2175 (1992).
- 7) F. E. Terman: *Radio Engineering Handbook*, McGraw-Hill, New York (1943).
- 8) H. M. Greenhouse: *IEEE Trans. Parts, Hybrids, and Packaging*, **PHP-10**, 101 (1974).
- 9) 大城 理: 大阪大学学位論文 (1990).
- 10) M. Yamaguchi, M. Matsumoto, H. Ohzeki and K. I. Arai: *IEEE Trans. Magn.*, **27**, 5274 (1991).
- 11) M. Yamaguchi, S. Arakawa, H. Ohzeki, Y. Hayashi and K. I. Arai: *IEEE Trans. Magn.*, **28**, 3015 (1992).
- 12) 前田 稔, 生島一郎: 電子通信学会マイクロ波研究会資料, MW72-3 (1972).
- 13) 大城 理, 辻本浩章, 白江公輔: 日本応用磁気学会誌, **14**, 411 (1990).

1992年11月18日受理, 1993年2月2日採録