

研究

Ni-Zn フェライト薄膜を使用したインダクタ

山本 節夫, 原田 和宏, 山本 晋司, 栗巢 普揮, 松浦 満

山口大学工学部, 〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1.

Inductor using Ni-Zn Ferrite Thin Film

Setsuo Yamamoto, Kazuhiro Harada, Shinji Yamamoto, Hiroki Kurisu and Mitsuru Matsuura

Faculty of Engineering, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube 755-8611.

Received September 16, 2003

SYNOPSIS

Inductors with a Ni-Zn ferrite thin-film prepared by reactive ECR sputtering as a lower magnetic core and a Ni-Zn-Cu ferrite over coat layer as an upper magnetic core was designed using high frequency electromagnetic simulation based on FEM and fabricated in trial. The fabricated inductor with upper and lower magnetic cores showed higher inductance by about 25% than the inductor without magnetic core as predicted by simulation. High inductance value of the inductor with upper and lower magnetic cores was maintained up to high frequency of 1 GHz showing the effectiveness of the ferrite layers.

KEY WORDS

inductor, Ni-Zn ferrite thin-film, ECR sputtering, ferrite core

1 緒 言

近年, 携帯電話端末や無線LANなど, マイクロ波を利用した通信機器においては, 小型化・多機能化を実現するため, 通信用磁気デバイスの薄型化やMMIC(Microwave Monolithic Integrated Circuit)への磁気素子の集積化が必要になってきている。特に, 空芯型の薄膜インダクタをMMICに集積化しようとする, ICチップ上の占有面積が非常に大きくなってしまいうという問題がある。この問題は, 送受信部のシステム・オン・チップ化の要求が非常に高まっている中¹⁾, 集積化への妨げとなっている。

高周波用薄膜インダクタ用の開発にあたり, 多くの研究機関ではインダクタの磁気コア用薄膜材料としてCoNbZrなどの金属磁性薄膜を使用している²⁻⁴⁾。金属磁性薄膜は, 高い自然共鳴周波数をもつことや, 高飽和磁束密度であるために低周波域で高透磁率を得られやすいという利点があるものの, 電気抵抗率が10数 $\mu\Omega\text{cm}$ 程度と低く, 高周波域では渦電流の影響で透磁率が低下してしまう。また, 寄生容量によって共振周波数が低下してしまう。そこで, この問題を解決するために, 金属磁性薄膜を高抵抗化するためにグラニューレー系の金属薄膜を導入したり⁵⁾, 膜面内での渦電流の発生を抑えるために薄膜にスリットを刻んだりする⁶⁾などのことが試みられ

ているものの, 完全な解決策は見出されていない。フェライト薄膜は電気抵抗率が高いため, 渦電流による高周波での透磁率の低下を本質的に抑制でき, 高周波用磁気素子での磁気コアとしての応用が期待されるものの, 軟磁性特性に優れたフェライト薄膜を高速製造する技術はこれまで確立していなかった。

ところが最近, 筆者らは, 高密度・高活性なECR(電子サイクロトロン共鳴)マイクロ波プラズマを用いた反応性スパッタ法(以下では反応性ECRスパッタ法と呼ぶ)により, 低温で高速に軟磁性のNi-Znフェライト薄膜を作製する技術および製造装置を開発することに成功した⁷⁾。

本研究では, 反応性ECRスパッタ法で作製したNi-Znフェライト薄膜を磁気コアとして用いたインダクタを試作することを目的とした。まず, 高周波電磁界シミュレーションにより, インダクタの構造設計を行い, その結果に基づいてフォトリソグラフィ技術を用いてインダクタの試作を行った。

2 磁性薄膜インダクタの設計

2.1 インダクタの設計

携帯電話端末などの通信機器内のインピーダンスマッチング等の用途に使用することを念頭において, 1GHzで5nH以

上のインダクタンスを示し、高Qなインダクタの実現を目指した。インダクタの構造を設計するために、有限要素法に基づいた3次元高周波電磁界シミュレータ HFSS ver. 8.5 (Ansoft社)を使用した。設計の際に最適化した主なパラメータは、コイルの巻き線数、コイル中心部のスペース、コイルの厚み、コイル・層間絶縁層の材質、磁性コア層の厚みなどである。本研究で検討したインダクタの基本構造をFig.1に示す。コイルはCuによる2層円形スパイラル型であり、コイル層の下部あるいはコイルの上下に磁性層(Ni-Zn フェライトコア)を配置した構造となっている。占有面積は $240\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$ である。

フェライトコアの電磁気的特性としては、実際に筆者らが反応性ECRスパッタ法で製造できるNi-Znフェライト薄膜の特性、すなわち飽和磁化2600G、磁気共鳴半値幅(ΔH)250Oe、

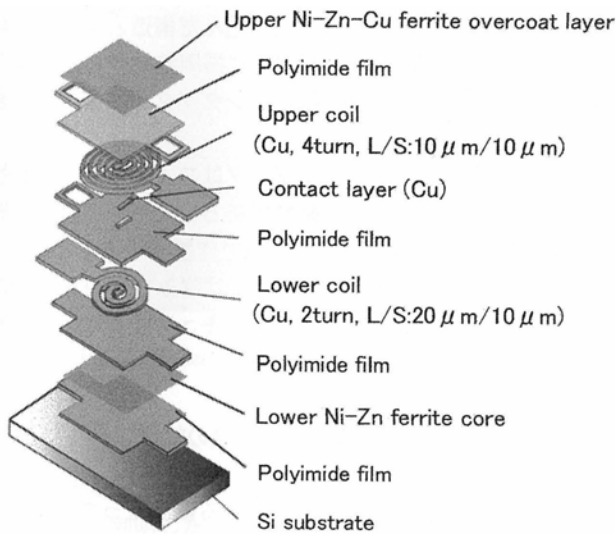


Fig.1 Basic structure of inductor.

比誘電率11.5、誘電体損失($\tan\delta$) 6.0×10^{-4} 、電気伝導率 $1.0 \times 10^{-5} \text{ S/m}$ と、Fig.2に示すB-Hループの初期磁化特性(実測データ)を与えた。コイルの材質としては、銅(電気伝導率は $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$)を想定した。磁性層を設けない空芯コイルの状態でも数nHのインダクタンスが実現できるように、コイルの内径は $60\mu\text{m}$ 、外径 $230\mu\text{m}$ 、総巻き線数は6ターンとし、これをFig.1のように、下部コイル4ターン、上部コイル2ターンに分けて配置した。

2.2 コイル下部にのみ磁性層を設けたインダクタの特性解析

最初に、インダクタのコイルの下側だけにフェライトコアを設けた構造について検討した。この場合のインダクタンスの周波数特性のシミュレーション結果をFig.3(a)に示す。図中では、下部磁性層の厚みを $1\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ まで変化させた場合について、インダクタンスの変化を調べた。下部磁性層の厚みを $1\mu\text{m}$ とした場合、1GHzにおいてインダクタンスは空芯コイル型に対して約9%ほど増加した。下部磁性層厚みが $10\mu\text{m}$ の場合には、約17%増加した。

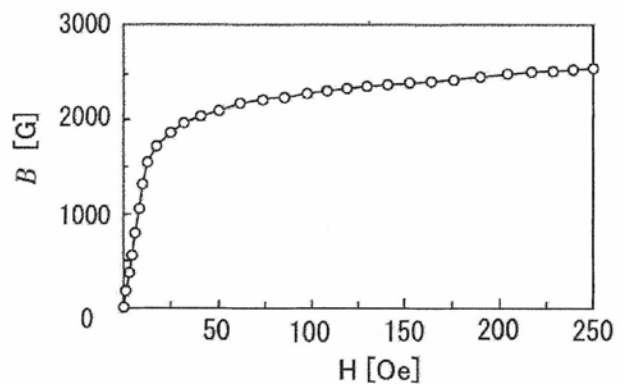


Fig.2 B-H loop of Ni-Zn ferrite thin-film.

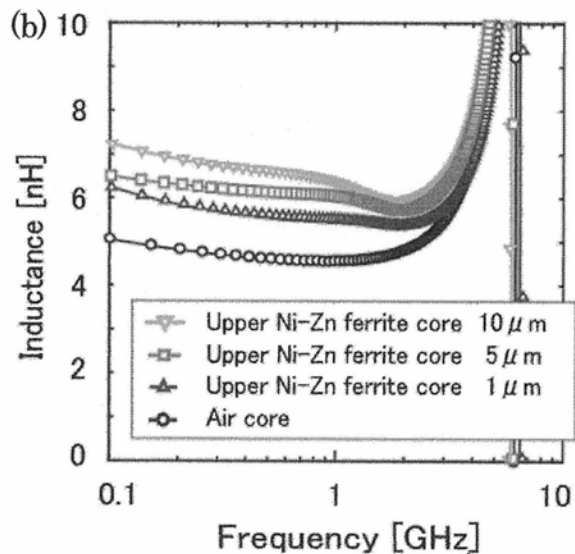
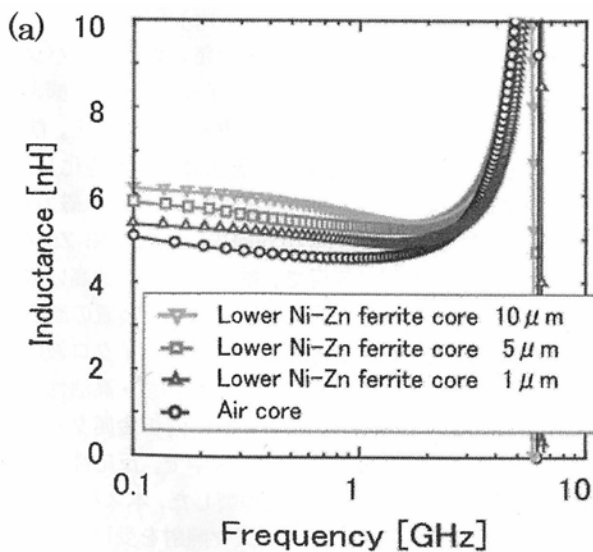


Fig.3 Simulated frequency characteristics of (a) inductance and (b) Quality factor of inductor with Ni-Zn ferrite core at bottom of coil. Thickness of lower Ni-Zn ferrite core was changed.

Fig.3(b)にはQ値の周波数特性を示す。下部磁性層厚が $1\mu\text{m}$ の場合、 1GHz において空芯コイル型に対して、Q値が約3%増加し、磁性層厚 $10\mu\text{m}$ の場合には、約10%増加する結果となった。

このように、大きなインダクタンスを得るには下部磁性層は厚いものが好ましいが、さらにその上にコイル層を精度良く形成することを考えると、コイルの下部はできるだけ平坦であることが必要とされる。また、反応性ECRスパッタ法の導入によってNi-Znフェライト薄膜の高速作製が可能になったとはいえ、現状では 14nm/min 程度の堆積速度であるため、スパッタ時間の点から、下部磁性層として使用するNi-Znフェライトの厚みとしては $1\mu\text{m}$ 厚が妥当であると考えた。

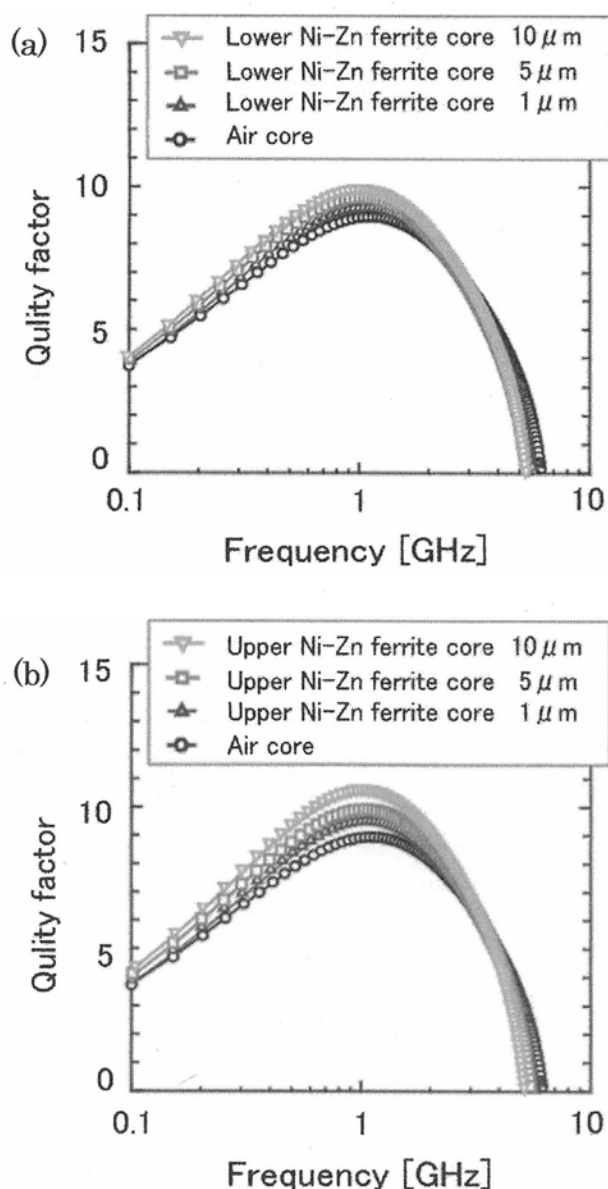


Fig.4 Simulated frequency characteristics of (a) inductance and (b) Quality factor of inductor with Ni-Zn ferrite core at top and bottom of coil. Thickness of upper Ni-Zn ferrite core was changed.

2.3 コイルの上下ともに磁性層を設けたインダクタの特性解析

次に、インダクタのコイルの上下両側にフェライト磁性層を設けた構造について検討した。インダクタンスの周波数特性をFig.4(a)に示す。この時、下部磁性層の厚みは前述の理由により $1\mu\text{m}$ に固定した。上部磁性層の厚みを $1\mu\text{m}$ とした場合には、インダクタンスは 1GHz において、上部磁性層が無い場合と比べて約20%増加し、上部磁性層厚み $10\mu\text{m}$ の場合には、約30%増加した。

Fig.4(b)にQ値の周波数特性を示す。上部磁性層の厚みが $1\mu\text{m}$ の場合、 1GHz において空芯コイル型に対して、Q値が約7%増加し、上部磁性層厚が $10\mu\text{m}$ の場合には、約20%増加する結果となった。

いずれの解析結果でも、空芯コイル型に比べて共振周波数の大幅な低下は見られず、 5GHz 程度の高い共振周波数であった。以上のシミュレーション結果より、コイルの上下を磁性層(軟磁性のフェライトコア)で挟み込んだ構造とすることによって、空芯タイプのものに比べ、共振周波数やQ値を低下させることなく、最大で30%ほどインダクタンスを増加できる見通しを得た。

そこで、実際に試作するインダクタはコイルの上下に磁性層を配置した構造とし、下部磁性であるフェライトコアの厚みは $1\mu\text{m}$ で、これはECRスパッタ法で作製することとし、上部磁性層となるフェライトコアとしては厚み $10\mu\text{m}$ 程度のNi-Zn-Cuフェライトペーストを塗布してキュアすることで作製することにした。

3 磁性薄膜インダクタの試作

3.1 フォトマスクの作製

Fig.1の構造のインダクタを試作するにあたって、7枚のフォトマスクが必要であった。これらのフォトマスクは、電子ビーム描画装置(エリオニクス社: ELS-3700)を用いた電子ビームリソグラフィによって作製した。

3.2 下部磁性層(Ni-Znフェライト薄膜)の作製

筆者らは、(株)島津製作所と共同開発したECRスパッタ装置(SLC-75ES)を用い、スパッタ・ターゲットの構造、酸素ガスの導入位置、マイクロ波投入電力、ターゲット電圧、酸素ガス分圧などのプロセスパラメータを注意深く最適化した結果、飽和磁化が 2600G 、比透磁率(μ_i)が 46.7 で、保磁力が 15Oe と低く、スピネル構造の(400)が優先配向したNi-Znフェライト薄膜を 200°C 以下の低温で、酸化物としては高い成膜速度 14nm/min で作製できる^{5,6}。そのスパッタ装置の断面構造をFig.5に示す。 875G の磁場と 2.45GHz のマイクロ波の組み合わせによってECR現象を利用して、高密度・高活性なプラズマを生成する。ターゲットにはNi-Zn-Feの金属ターゲットを使用し、アルゴンと酸素の混合ガス中で、反応性スパッタによってNi-Znフェライト薄膜を作製した。本スパッタ法では、薄膜形成中に基板は大量のプラズマ照射を受けるために、酸化度の高い薄膜を低い基板温度でも作製できるという特長があるものの、リフトオフ法によるフェライト薄膜のパターン

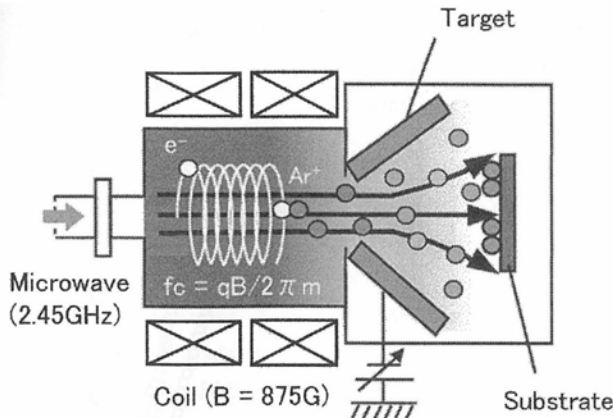


Fig.5 Structure of ECR sputtering apparatus.

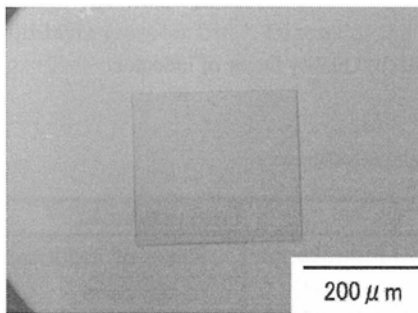


Fig.6 Patterned Ni-Zn ferrite thin-film pattern.

形成への使用を試みたところ、イオン照射の影響によってレジストが変形し、リフトオフ法でのパターニングが不可能であることが判明した。そこで、フェライト薄膜のパターニングには、Ti 薄膜をマスクとしたドライエッチング法⁷⁾を採用した。この方法は、Ni-Zn フェライト薄膜上にスパッタ率が低い Ti 薄膜のパターンを作製し、そのパターンをマスク材として Ni-Zn フェライト薄膜と同時にエッチングしていく方法である。また、エッチングには ECR マイクロ波イオン源を用いたイオンビームエッチング装置(エリオニクス社: EIS-200ER)を使用した。以上の方法でパターニングした Ni-Zn フェライト薄膜を Fig.6 に示す。うまくエッチングできていることがわかる。

3.3 コイルの作製

下部磁性層となる厚み $1\mu\text{m}$ のフェライト薄膜を前節 3.2 で述べた方法でパターニングした後、その上に、リフトオフ法を用いて以下の方法で薄膜コイルを作製した。

Si 基板の上に、フォトリソをスピコートで均一に塗布し、マスクアライナ(カール・ズース社: MJB-3)を用い、g 線露光によってフォトマスクのパターンを転写した。現像を行った後、スパッタ装置(アネルバ社: SPF-530H)を用いて Cu 薄膜の形成を行った。その後、レジストを除去し、パターンを基板上に形成した。リフトオフ法によるパターニングを

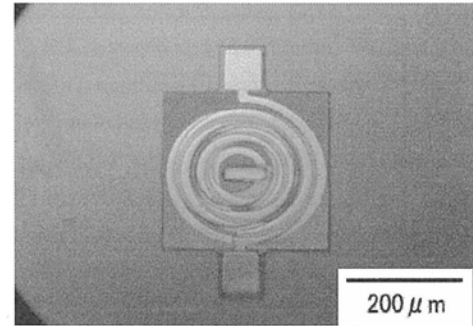


Fig.7 photograph of inductor. Upper Ni-Zn-Cu ferrite core is removed to show inside of inductor.

成功させるためには、(1)レジストをオーバーハング形状にすること、(2)薄膜形成時にレジストが熱ダメージによって変形あるいは硬化しないようにすることが重要である。(1)については、露光時間・現像時間・プリベーク温度などを最適化することで対応した。(2)については、マグネトロンスパッタ法を使用することで、プラズマをターゲット近傍に局在化させ、基板へのダメージを軽減すること、および、基板を加熱せずに室温成膜とすることで対応した。ただし、室温成膜としたことによって、上下コイル層となる Cu 薄膜の密着性が悪化したが、これについては下地層として Ti 薄膜を導入することで密着性を改善した。これら一連のプロセスを繰り返して、コイル層を完成させた。層間絶縁層としては、感光性ポリイミド(東レ社: フォトニス UR-3100E)を用いた。この感光性ポリイミドのパターニングには、スピコートによる均一塗布後、Dip 法を用い、現像時間、及びキュア温度等を変化させることで剥離・亀裂が生じない条件を探索し、可能な限り低温 (250°C) で作製した。

3.4 上部磁性層の作製

上部磁性層は厚く ($10\mu\text{m}$) する必要があるため、Ni-Zn-Cu フェライトペーストを塗布し、キュアする方法で作製した。フェライトペーストの材料としては、Ni-Zn-Cu フェライト粉末(戸田工業(株)製 未造粒)を用いた。なお、ここで未造粒粉末を用いた理由は、ペースト状にする際に造粒粉末を用いると、溶媒に有機物を用いているため、フェライト粉末と溶媒とがうまく混合しないためである。溶媒としては、テルピネオールを、結合材にはエチルセルロース樹脂を用いた。そしてこれらをジルコニアボールとポットミルを用いて粉碎・混合することで Ni-Zn-Cu フェライトペーストを作製した。

この Ni-Zn-Cu フェライトペーストを、均一な厚みに塗布するためにスピコート法を用いた。その後、ベーク炉を用い 100°C でキュア処理して、上部磁性層を完成させた。以上の方法で作製した上部磁性層(Ni-Zn-Cu フェライトコア)の磁気特性は、飽和磁化 2800G 、保磁力 5Oe 、初透磁率 20 であった。

Fig.7 に試作したインダクタの写真を示す。ただし、この写真は上部コイル・下部コイル・下部磁性層の構造がわかるよ

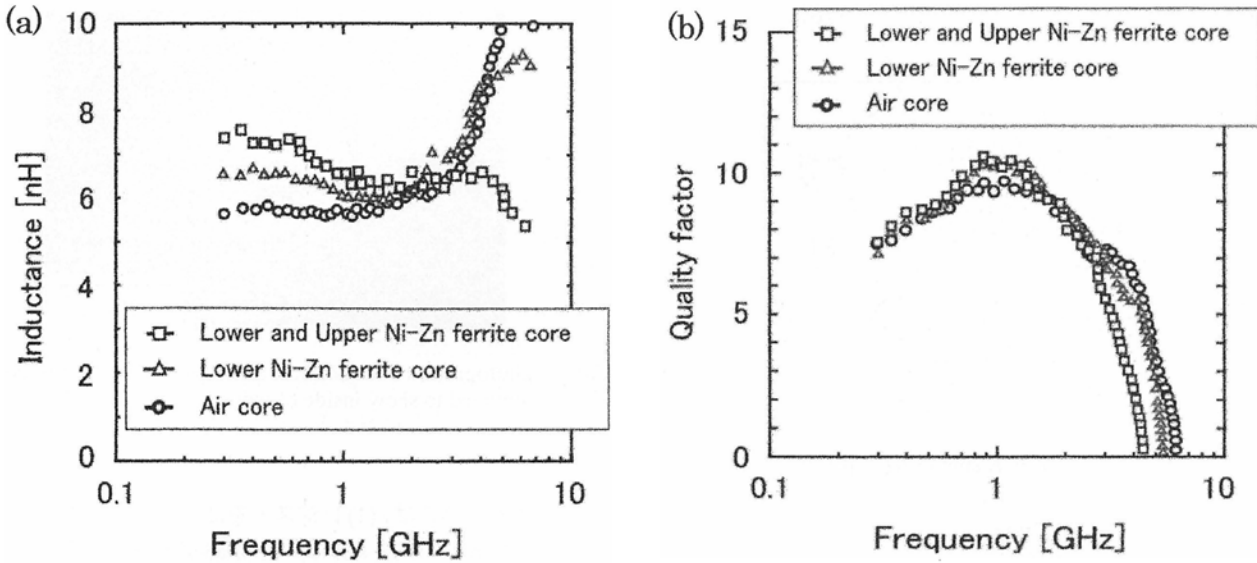


Fig.8 Measured frequency characteristics of (a) inductance and (b) Quality factor of inductor.

Table 1 Comparison of inductance with and without ferrite core.

Core	FEM simulation		Trial products	
	Inductance (nH)	Ratio of inductance to air core	Inductance (nH)	Ratio of inductance to air core
Air core	5.0	1.0	6.0	1.0
Lower Ni-Zn ferrite core	5.5	1.1	6.8	1.1
Lower and Upper Ni-Zn ferrite core	7.6	1.5	8.0	1.3

うに、上部コアを付ける前の状態のものである。実際に試作したインダクタは、この上に上部磁性層(Ni-Zn-Cu フェライトコア)が覆った構造になっている。全体のサイズは $240\mu\text{m} \times 250\mu\text{m} \times 570\mu\text{m}$ である。

4 試作品の評価

試作したインダクタの高周波領域での電気特性は、ピコプローブ(GGB社: picoprobe)を装備したマイクロ波テストテーブル(NPS社: GT-1000R)を用い、ネットワークアナライザ(Agilent Technologies社: E8357A)によって評価した。低周波帯域でのインダクタンスの測定には、LCRメータを用いた。インダクタンスおよびQ値の周波数特性の測定結果を、Fig.8 (a)と(b)に示す。またTable 1には、低周波域における各構造でのインダクタンスを示した。コイルの上下に磁性層を配置したインダクタに加えて、比較のために、コイルの下部にのみ磁性層を設けたインダクタおよび磁性層を全く持たない空芯型のインダクタについても評価し、比較検討した。

1GHz付近までの周波数においては、3次元高周波電磁界シミュレーションにより予想される設計値とほぼ一致し、空芯コイル型に対するインダクタンスの増加比率においてもほぼ

予想どおりの結果が得られた。ただし、1GHz以上の周波数領域ではシミュレーション結果と実測値には大きな差異が認められる。このことは、電磁界解析シミュレーションではNi-Zn薄膜の透磁率の周波数依存性は考慮されていなかったが、実際に反応性ECRスパッタ法で作製したNi-Znフェライト薄膜の使用周波数が1GHz程度までであるということに起因していると思われる。各構造での共振周波数においても、空芯型インダクタと比較すると、顕著な低下は見られなかった。

すなわち、Ni-Znフェライト薄膜を使用したインダクタでは、空芯インダクタに比べ、1GHzまでにおいて、共振周波数を大幅に低下させることなく、インダクタンスが約25%増加し、Q値は約15%増加することがわかり、Ni-Znフェライト薄膜を磁気コアとして使用することの有効性が実証された。

5 結論

反応性ECRスパッタ法で作製されるNi-Znフェライト薄膜を下部磁性層として使用したインダクタの作製を試みた。コイルの下部にNi-Znフェライト薄膜を設け、コイルの上部をNi-Zn-Cuフェライトコアで覆った構造のインダクタでは、空芯コイル型のインダクタと比べて約25%高いインダクタンス

を実現できた。このインダクタンスの増加は1GHz程度まで確認された。本研究によって、フェライトを磁気コアとして用いた高周波インダクタの可能性が示された。

文 献

- 1) Y.Konishi and K.Honjyo: "Jituyou maikuroha gijutu kouza-syuseki kairo to ouyou- dai 6 kan", Nikkan kougyou sinbunsha, (2002)137-160.
- 2) M.Baba, K.Suezawa, T.Moizumi, M.Yamaguchi, K.I.Arai, A.Haga, Y.Shimada, S.Tanabe and K.Itoh: "RF Integrated Inductor Using a Bidirectional Micro-patterned Magnetic Thin Film", Transactions of The Magnetics Society of Japan, 25(2001) 1091-1094.
- 3) R.Kondou, K.Ikeda, K.Kobayashi, K.Ohta and M.Fujimoto (Taiyo Yuden Co., Ltd.): "RF thin film inductor with CoFeSiO/SiO₂ multi-layer granular film", Digests of the 26th annual conference on magnetism in Japan, (2002)202.
- 4) K.Ikeda, K.Kobayashi and M.Fujimoto: "Magnetic property of CoFeSiO/SiO₂ multi-layer granular films for GHz band", Digests of the 26th annual conference on magnetism in Japan, (2002)464.
- 5) S.Yamamoto, H.Wada, H.Kurisu, M.Matsuura and Y.Shimosato: "Low-Temperature Sputter-Deposition of Ni-Zn Ferrite Thin Films Using Electron-Cyclotron-Resonance Microwave Plasma", Transactions of The Magnetics Society of Japan, 27(2003)363-366.
- 6) S.Yamamoto, H.Wada, H.Kurisu and M.Matsuura: "High Rate Deposition of Co-Cr Perpendicular Magnetic Anisotropy Films by ECR sputtering", J. Mag. Mag. Materials, 235(2001)133-137.
- 7) T.Mizumoto and Y.Naito: "Ar Sputter-Etching of YIG and Ta₂O₅ and Fabrication of Artificial Anisotropic Waveguides with YIG Thin Films", The Transactions of The IECE of Japan, E67(1984) 84-87.