

高電気抵抗軟磁性膜を用いた高周波インダクタ

High-Frequency Inductor Using Highly Electrically Resistive Soft Magnetic Films

大沼 繁弘, 白川 究, 村上 進, 増本 健

(財) 電気磁気材料研究所, 仙台市太白区八木山南 2-1-1, (〒982-0807)

S. Ohnuma, K. Shirakawa, S. Murakami, and T. Masumoto

The Research Institute for Electric and Magnetic Materials, 2-1-1, Yagiyama-minami, Taihaku-ku, Sendai 982-0807

(1198 年 10 月 14 日受理, 1999 年 1 月 21 日)

We investigated the use of planar-type inductors containing Co based soft magnetic films, which have highly electrical resistivity, as magnetic cores. Inductors were fabricated by using an RF magnetron sputtering method and a lift-off technique. Realizing smaller magnetostriction composition in a magnetic core is a major factor in obtaining a high quality factor (Q) in an inductor. Multilayering a zero magnetostrictive Co-based film with SiO_2 film is an effective means of obtaining soft magnetic films at low substrate temperatures. A composite multilayered film consisting of thin and thick SiO_2 films proved to be an excellent soft magnetic film with very low eddy current loss and loss due to a resonance. The highest values of Q and the inductance of the inductor, which were obtained by using a composite multilayered film subjected to rotational field annealing, were 25.5 and 26 nH at 180 MHz, respectively.

Key words: planar inductor, high frequency, soft magnetic Co-based thin film with high electrical resistivity, large anisotropy field, multi-layered film, heat treatment

1. はじめに

近年の電子機器の小型化, 高周波化に伴い, これに使用されるインダクタやトランスなどの磁性部品を薄膜技術により素子化する試みがなされている^①. これらの高周波磁気デバイスに望まれる磁心材料には従来の軟磁性材料の低保磁力や零磁歪等の特性の外に, 高周波帯域での渦電流損失を軽減するために大きな電気比抵抗(ρ)を有することが求められる. このようなトレンドに呼応するかのように, グラニューラー構造を有し, 高電気比抵抗を示す Fe 基グラニューラー軟磁性膜が見い出され^②, 数々の合金組成の検討とともに高周波磁心材料としての応用化の検討も始まっている^③.

ただし, 動作周波数帯域が数百 MHz 以上になると, 渦電流損失のほかに自然共鳴(fr)に伴う損失の存在が無視出来なくなる. fr は飽和磁化(Bs)と異方性磁界(Hk)の大きさの積に依存するため, このような高い周波数帯域で用いる磁心材料には, Hk の小さな Fe 基高電気抵抗膜では十分に対応出来なくなる. それに対して Co-Al-O 系膜で代表される Co 基電気抵抗軟磁性膜は 10kG 以上の比較的大きな Bs と誘導磁気異方性に起因する 60Oe 以上の大きな Hk とを併せ持つ^④. そのために, 数百 MHz 以上の周波数帯域でも, まだ自然共鳴損失は小さく,

高周波磁心材料として極めて有望であると考えられる. また Co 基膜の磁歪が零近傍であるということも微細加工を必要とする上記の磁気素子の作製には有利であると考えられる.

ここでは, Co 基高電気抵抗軟磁性膜を用いて薄膜インダクタを作製した結果を示す. すなわち, 今回の実験では, インダクタのコイルの形状, 材質や厚さなどを一定とした場合の磁心の材料特性とインダクタ特性との関係を明らかにし, 磁心の材料特性を改善することにより, どれだけ大きな性能指数を示す高周波インダクタが得られるかを検討した. 具体的にはインダクタ特性に及ぼす磁心の磁歪の大きさの影響, 多層膜化や熱処理などの効果について検討した.

2. 実験方法

磁心は RF マグネトロンスパッタ装置を用い, ($\text{Ar}+\text{O}_2$) ガスの反応性スパッタ法により作製した. 基板には 0.5mm 厚のガラス板(Corning7059)を用いた. 用いたターゲットは $(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_{10-y}\text{Al}_y$ 合金ターゲットと CoFeAl 合金板に Pd チップを張り付けた複合ターゲットである. 膜に一軸磁気異方性を付与するために, 成膜中の基板に約 130 Oe の磁界を印加した. 多層膜を作製する際の間膜には SiO_2 膜を用いた.

薄膜インダクタの構造は Fig.1 に模式図で示すような下層コイル, 絶縁層, 磁性膜, 絶縁層, そして上部コイルの順で作製した 5 層構造からなる巻線コイル型になっている. コイル巾は 90 μm , コイル間距離は 20 μm , 巻数は 20 ターンである. 磁心のサイズは, 巾 300 μm , 長さ 2mm である. 薄膜インダクタはリソグラフィーでパターンニングし, リフトオフ法で作製した. Cu 膜厚は 6 μm である. インダクタの熱処理は 1kOe の磁界中, そして 10^{-6} Torr 以下の真空中で 100 $^{\circ}\text{C}$ ~300 $^{\circ}\text{C}$ まで行った.

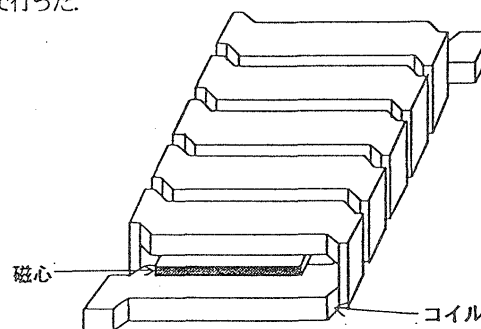


Fig.1 Schematic view of structure of thin film inductor with a Co-based granular film as a core material.

磁心の構造はX線回折法(XRD)により同定した。 ρ は直流4端子法で求めた。磁束密度Bs, 異方性磁界Hk, 保磁力Hcなどの磁気特性は振動磁力計(VSM)および交番力磁力計(AGFM)により求めた。インダクタ特性はネットワークアナライザ(HP-4195A, 4396A)で測定した。なお、これらの評価はすべて室温で行った。

3、実験結果と考察

3.1 磁歪の大きさの影響

Fig.2a には磁歪(λ)の大きさがほぼ 30×10^{-6} の高電気抵抗軟磁性($\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}$) Al_8O 膜を磁心に用いたインダクタの性能指数(Q)と周波数(f)との関係を示す。なお、この膜は磁心と同じ形状、サイズに微細化されても $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 角の通常実験で用いている試料の結果と同様の良好な軟磁性膜特有のM-Hループを示す。ところが、そのQ値は空心のみのインダクタのQのほぼ2倍程度にしか大きくならない。この値は種々の熱処理を施してもほとんど改善されない。

一方、Fig.2b には $\lambda=3 \times 10^{-6}$ の($\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}$) $\text{Al}_8\text{Pd}_{13}\text{O}$ 膜を磁心とするインダクタの結果を示す。Fig.2aの結果と比較すると明らかにQ $\cdot f$ 特性が著しく向上しており、約300MHz付近で $Q=11$ が実現する。この膜のM-Hループも($\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}$) Al_8O 膜の結果と同様に磁心の同じ微小の形状に加工しても良好な軟磁性膜特有のM-Hループを示す。

この2種類のインダクタの特性の違いの原因を明らかにするためにコイルに装着した状態での、すなわち、インダクタ

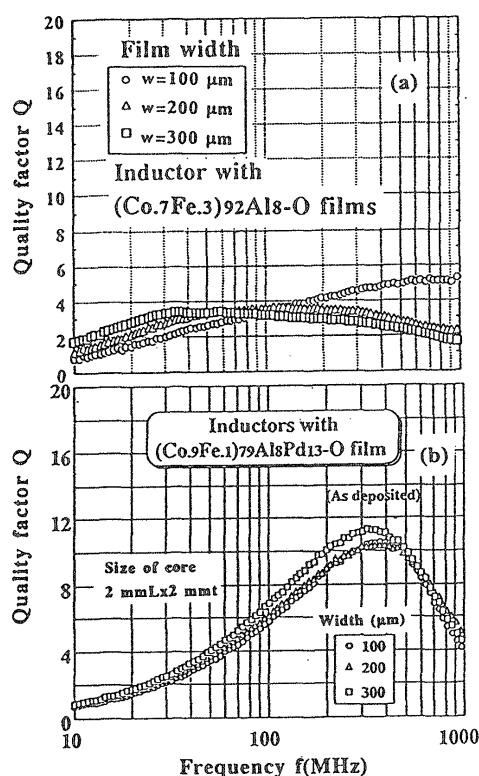


Fig.2 Frequency response of Q of inductors with (a) ($\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}$) Al_8O and (b) ($\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}$) $\text{Al}_8\text{Pd}_{13}\text{O}$ film.

化した後の、磁心のM-Hループを検討した (Fig.3) . Fig.3a に示す ($\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}$) $\text{Al}_8\text{Pd}_{13}\text{O}$ 膜を磁心とするインダクタのM-Hループは磁心のみのそれとほぼ同じ結果になっている。すなわち、容易磁化、困難磁化方向の双方のM-Hループとも傾いたループになっている。ここで、容易磁化方向のループの傾きは形状からの反磁界の影響であり、補正するとほぼ $1 \times 1 \text{ cm}^2$ の結果と同じ立ち上がったループとなる。困難磁化方向のループの傾きから求められるHkの値も磁心のみのそれとほぼ同じ値を示し、($\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}$) $\text{Al}_8\text{Pd}_{13}\text{O}$ 膜はコイルに装着されても大きな軸磁気異方性を維持していることを示唆している。

一方、($\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}$) Al_8O 膜を磁心とするインダクタの結果は($\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}$) $\text{Al}_8\text{Pd}_{13}\text{O}$ 膜のそれとは異なる (Fig.3b) . すなわち、($\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}$) Al_8O 膜は磁心のみの場合には困難磁化方向のM-Hループが大きく傾き、大きなHkを有していることを示すが、図から明らかなように、コイルに装着されると困難化方向のM-Hループの傾きがほとんどなくなってしまう。すなわち、このことは($\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}$) Al_8O 膜を磁心とするインダクタでは、磁心をコイルに装着することによってCo系高電気抵抗軟磁性膜の特徴の一つである大きなHkが消滅してしまうことを示している。磁心を挿入しても高周波帯域におけるインダクタの性能指数が向上しない原因はHkの消滅のためと考えられる。

コイルに装着した後の($\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}$) Al_8O と($\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}$) $\text{Al}_8\text{Pd}_{13}\text{O}$ 膜の困難化方向のM-Hカーブの大きな違いは磁心の磁歪の大きさに起因している。磁歪の大きさとインダクタ中の磁心の困難磁化方向のM-Hカーブの変化との関係を検討した結果、今回のコイルの形態の場合には、コイルに装着しても困難磁化方向のM-Hカーブがあまり変化しない磁心の磁歪の大きさは

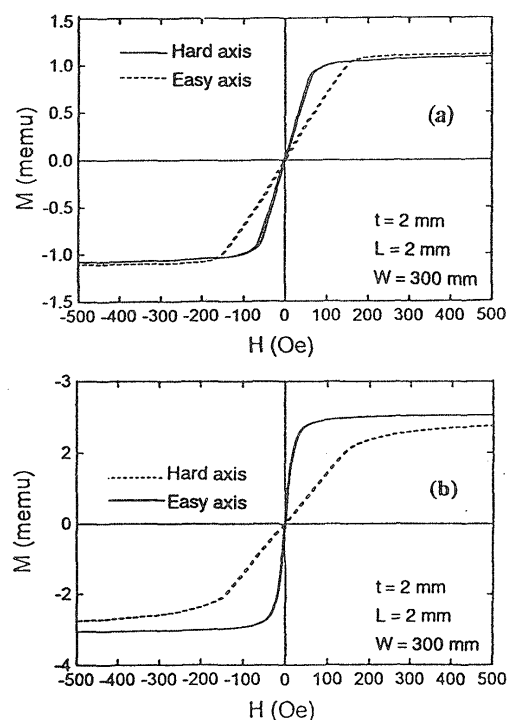


Fig.3 Magnetization curves of inductors with (a) ($\text{Co}_{0.9}\text{Fe}_{0.1}$) $\text{Al}_8\text{Pd}_{13}\text{O}$ film and (b) ($\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_{0.3}$) Al_8O .

約 5×10^6 以下であることを見出した。磁歪の大きさがこの範囲内にあれば、コイルに装着した磁心の M-H 特性に多少の劣化が観察されても、インダクタの作製後に 200~300℃ の静磁界中熱処理を施すことによって改善する。また、同程度の負の磁歪の値を示す膜を磁心とするインダクタでも、静磁界中熱処理によって M-H 特性は改善する。

以上の結果から明らかなようにインダクタのような高周波磁気デバイスでも、従来の磁気ヘッドなどと同様に磁心の磁歪の絶対値が零に近いことが望ましいことを示唆している。これは作製プロセスで発生するいろいろな応力や熱の歪がインダクタの磁心の磁区構造に大きな影響を与えているためと考えられる。

3-2) 多層膜化の効果

前節で述べたように優れたインダクタ特性を得るためには磁心の磁歪の絶対値が小さいことが必要であることを示した。現状の薄膜インダクタなどの磁気デバイスは、実験方法の項で示したようにリフトオフ法で作製するために、磁性膜をパターニングされたポリマー上に成膜する⁽⁵⁾。その際の膜表面の温度はポリマーの硬化温度(約 100℃)以下でなければならない。しかし、低基板温度の場合、零磁歪近傍の高 Co 基高電気抵抗膜では良好な軟磁性膜を得ることはかなり難しい⁽⁶⁾。そのために、従来は前節で示した CoFeAlPd-O 膜のように Pd などの元素を添加することにより、軟磁性化を試みてきた⁽⁷⁾。

今回、インダクタ用磁心としての十分な軟磁性特性を示す膜を室温で得るために、我々は零磁歪を示す Co-Fe-Al-O 膜を SiO₂ 膜による多層膜化を試みた。一般に、磁性膜の多層膜化は 2 つの目的、すなわち、1) 静磁結合により軟磁性化の促進や異方性分散の低減、2) 磁性膜の薄膜化による渦電流損失の減少で行う⁽⁸⁾。

一般に、軟磁性多層膜では中間絶縁層が薄いほど優れた軟磁性膜が得られる。しかし中間絶縁層が薄すぎると、その中に発生するピンホールやその他の原因で、多層膜化し、薄く

なった一層の磁性層の膜厚から推定されるほど渦電流損失は小さくならないことが知られている⁽⁹⁾。一方、多層膜中の絶縁層の膜厚を十分に厚くすると渦電流損失は小さくなるが、静磁結合が弱くなるため、軟磁性特性に悪影響を及ぼしたり、異方性の分散が小さくならなかったりする。今回、磁心の多層膜化において、我々は軟磁性化と渦電流損失の低減の双方の効果を実現することを目的に Fig.4 に示すような複合多層膜を作製し、磁心として用いた。すなわち、薄い SiO₂ からなる多層膜の部分は軟磁性化の役割を扱い、かつその多層膜の 1 つの集合体の厚さは 100MHz 以上での渦電流損失がまだ現れない厚さになるように配慮した。ただし、SiO₂ の膜厚を 30Å 以下にすると約 200℃ 以上の熱処理温度で SiO₂ が拡散し、多層構造が壊れ、磁心に垂直磁化成分が現れてしまうため、膜厚が 50Å 以上の SiO₂ 膜を用いた。また厚い SiO₂ の膜厚は渦電流損失の軽減が現われる十分な膜厚、すなわち、0.3 ~ 1.0μm とした。種々の膜厚の SiO₂ と Co-Fe-Al-O 膜とを組み合わせさせた多層膜を作製した結果、検討したいずれの組み合わせの複合多層膜も単純な多層膜の結果と比較するとインダクタ特性は向上する。Fig.5 にはその一例として $[\{\text{CoFeAl}(500\text{Å})/\text{SiO}_2(100\text{Å})\} \times 10 + \text{SiO}_2(0.3\mu\text{m})] \times 3$ の組み合わせの複合多層膜を磁心に用いたインダクタの結果を示す。磁心の H_k が約 700e と大きいために L は 19nH とそれほど大きくならないが、Q=25 が 280MHz で実現できた。

3-3) 熱処理の効果

作製プロセスで入る歪の緩和と異方性磁界の制御を目的に磁界中熱処理を試みた。Co 基高電気抵抗軟磁性膜の H_k は磁場中誘導磁気異方性であるために磁界中熱処理は効果的であると考えられる⁽¹⁰⁾。具体的には回転磁界中熱処理(RFA)と静磁界中熱処理(UFA)の 2 種類を、またはそれらの組み合わせた処理を 100℃~300℃ の範囲で施した。静磁界中熱処理を施すと 150℃ 付近からインダクタの Qf 特性が向上し始める。これはインダクタの作製過程でインダクタ中の磁心に入る歪が熱処理により減少し、インダクタンス L が増大するため($Q = \omega L/R$,

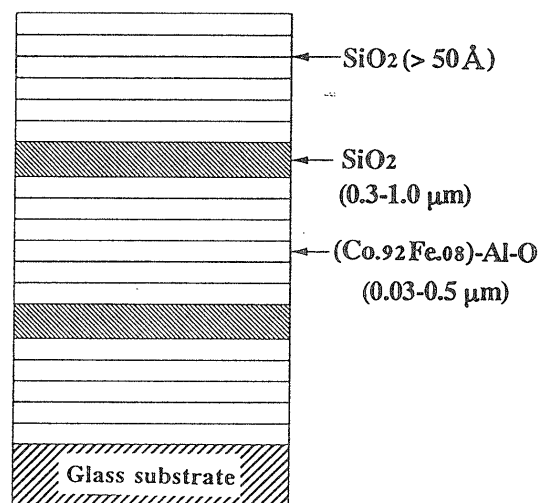


Fig.4 Schematic view of a composite multilayered film

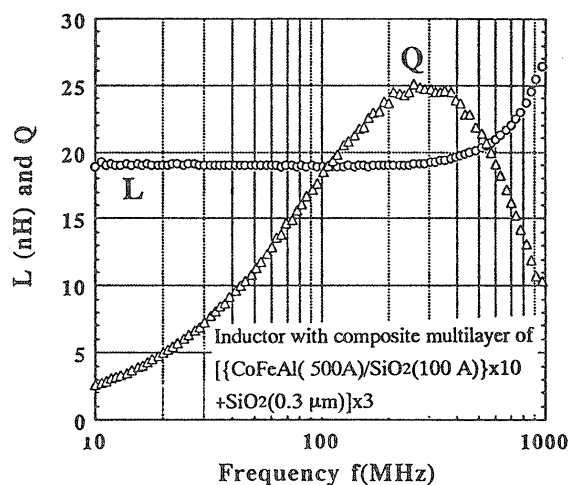


Fig.5 Frequency response of Q and L of an inductor with multilayers as amagnetic core.

$\omega=2\pi f$, f :周波数)と考えられる。ただし、静磁界中熱処理に伴う磁心の H_k の変化は極めて小さいことから、 L の向上はそれほど大きくない。また、Co 基高電気抵抗軟磁性膜に回転磁界中熱処理を施すと H_k は 140℃付近から小さくなり始め、240℃付近ではほぼ零になることが報告されている⁹⁰⁾。この結果を反映して、インダクタに 140℃以上で RFA を施すと、 L は大きくなる。ただし、RFA の場合には熱処理温度が高くなると、損失等価抵抗 R も大きくなるために Q_{max} と Q_{max} を示す周波数(f_{Qmax})は小さくなる。適度な熱処理を施した一例として Fig. 6 には Fig. 5 のインダクタに 160℃で 1kOe の RFA を施した場合の L, Q 特性の結果を示す。図から明らかなように、 L, Q 特性は共に改善し、180MHz で $Q=25.5$, $L=26$ nH を示すインダクタを得ることが出来た。このように、RFA や UFA によって H_k の制御や構造緩和が出来るため、これらの2種類の熱処理を組み合わせることによって同じ構成のインダクタでもかなりの範囲で $Q, L, f(Q_{max})$ の値を変えることが出来る。この結果は熱処理条件を選択することによって高周波磁気デバイスの仕様に応じた最適のインダクタを提供できることを意味し、実用上極めて有利な結果と言える。

今回はコイルの形状、巻数、厚さなどは一定とし、磁心の特性のみを変化させ、インダクタ特性の検討を行った。今回の知見を基に今後はコイルの検討を行えば、さらなる特性の向上が期待される。なお、今回得られたインダクタは薄膜コンデンサーやチップコンデンサーなどと組み合わせることに

よって、例えばページャー用フィルターなどの高周波フィルターとして優れた磁気素子になるものと推察される。

4. まとめ

Co 基高電気抵抗軟磁性膜を磁心とするインダクタの試作を検討し、以下の結果を得ることが出来た。

- 1, 磁心の磁歪の大きさはインダクタの特性を大きく左右し、その絶対値が小さいほど、大きな性能指数を示すインダクタが得られる。今回のインダクタにおける磁心としての磁歪の大きさの許容範囲は約 5×10^{-6} 以下である。
- 2, SiO_2 膜で多層膜化すると、100℃以下の基板温度でも優れた軟磁気特性を示す零磁歪の Co 基高電気抵抗膜が実現出来る。
- 3, 薄い SiO_2 膜と厚い SiO_2 膜とを組み合わせた複合多層膜は軟磁性化の促進と渦電流損失の低減の双方を実現し、これを磁心としたインダクタは高周波帯域で優れた性能指数を示す。
- 4, 複合多層膜を磁心とするインダクタに磁界中熱処理を施すとインダクタ特性は改善し、180MHz で $Q=25.5$, $L=26$ nH を示すインダクタを得ることが出来た。

謝辞：磁気測定に協力してくれた電気磁気材料研究所の岩佐忠義、小林伸聖の両氏に、また有意義な議論をしていただいた東北大、金研の藤森啓文教授に深謝します。

文献

- 1) M. Mino, K. Tsukamoto, K. Yamagisawa, A. Tago and T. Yachi: APEC Record, 422(1996)
- 2) H. Karamon, T. Masumoto and Y. Makino: J. Appl. Phys., 57, 3527 (1985)
- 3) 山沢, 駒井, 早川, 畑内, 牧野: 日本応用磁気学会誌: 21, 677 (1997)
- 4) 大沼, 三谷, 藤森, 増本: 日本応用磁気学会誌: 20, 489 (1996)
- 5) 田子, 柳沢, 谷内, 三野: 電気学会マグネテックス研究会資料 MAG-90-45, 103(1990)
- 6) 大沼, 小林, 増本, 藤森: 日本金属学会講演概要 (第23回) 401 (1998)
- 7) S. Ohnuma, H. Fujimori, S. Mitani, and T. Masumoto, J. Appl. Phys. 79, 5130 (1996)
- 8) H. Fujimori, N. S. Kazama, K. Hirose, J. Zhang, H. Morita, I. Sato and H. Sugawara: J. Appl. Phys., 55, 1769 (1984)
- 9) 田邊, 大路: 電気学会マグネテックス研究会資料 MAG-93-116 (1993)
- 10) 大沼, 三谷, 藤森, 増本: 日本応用磁気学会誌, 19, 425(1995)

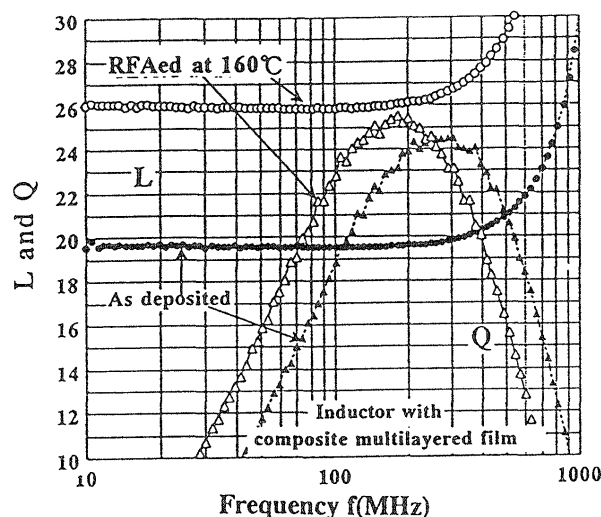


Fig. 6 Frequency characteristics of Q and L of an inductor with composite multilayers treated by RFA at 160℃