ウェハプローブを用いた薄膜インダクタの高周波インピーダンス測定

Measurement of the High-Frequency Impedance of Thin-Film Inductors by Means of a Waferprobe

山口正洋・高橋祐一*・荒井賢一・菊地新喜*

東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (980-8577)

*東北学院大学工学部, 多賀城市中央 1-13-1 (985-8537)

M. Yamaguchi, Y. Takahashi,* K. I. Arai, and S. Kikuchi*

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577

*Dept. of Electrical Engineering, Tohoku Gakuin Univ., 13-1 Chuo 1-chome, Tagajo 985-8537

This paper discusses measurement of the impedance of thin-film inductors up to the GHz frequency range. We made thin-film inductors based on the silicon process, and investigated a technique for measuring their high-frequency impedance by means of a waferprobe. A waferprobe with precise dimensions permits impedance matching between the inductor and the measurement instrument. We improved the reading of the measurement data and measured the inductance of thin-film inductors accurately up to the GHz frequency range.

Key words: measurement of the impedance, thin-film inductors, GHz frequency range, semiconductor process, high-frequency impedance waferprobe

1. はじめに

近年、半導体集積回路技術の飛躍的な進歩に伴い電子機器の小形化、薄形化が急速に進展している。これらの機器における磁気素子の小形化は、ICやLSIなどに比べ遅れをとっているのが現状であり、マイクロ磁気デバイス^{1), 2)}を用いてまずエネルギー源としての電池の電圧をデバイスの必要とする電圧に変換するためのDC-DCコンバータ技術³⁾が進歩している。最近では携帯機器への応用を前提にGHz帯で動作するインダクタの研究開発も始められている^{4), 5)}。GHzで動作する薄膜インダクタは、携帯機器などでは回路の入出力インピーダンス整合用としてたいへん重要視される。通常インピーダンスを50Ωにマッチングするので、望まれるインダクタンスの値はたかだか数10nH⁶⁾である。また外形寸法は1mm×1mm以下⁶⁾であることなど、現在実用化段階にある電源用薄膜インダクタとは諸元がかなり異なり、そのインピーダンス測定法⁷⁾は必ずしも十分に議論されていない。

我々はこれまで、マイクロストリップ線路の終端にボンディングワイヤで試料を接続し、反射測定により500MHz程度までの周波数において信頼性の高いインピーダンス測定を行ってきた⁸⁾。しかし、ボンディングワイヤ自体のインダクタンスが数nHあり、GHz帯においては測定を行う試料とインダクタンスが近い値であるという問題がある。そこでボンディングワイヤのインピーダンスの影響が除去可能なウェハプローブによる測定の検討を行った。薄膜インダクタは半導体プロセスに基づき、インダクタンスが10nHのものを試作した。

2. インピーダンス測定法

ネットワークアナライザ(HP8720D)にウェハプローブ(Pico-probe GT-1000)を接続し、100MHzから3GHzの範囲で反射係数 s_{11} の測定を行いインピーダンスを求めた。特性インピーダンス Z_0 を有する線路に負荷インピーダンス Z_r を接続した場合 Z_r は(1)式のように表されることが知られている。

$$Z_r = Z_0(1 + s_{11}) / (1 - s_{11}) \quad (1)$$

ここで、線路インピーダンス Z_0 は50Ωとした。 Z_r の実部を抵抗とし、虚部を角周波数で除した値をインダクタンスと定義した。

$$Z_r = R + j\omega L \quad (2)$$

Fig. 1はウェハプローブによる測定状況を説明したものであり、プローブ先端をインダクタのパッドに接触させて測定を行う。OPEN, SHORT, LOADの校正をプローブ先端で行う校正治具も用意されている。校正点の数は有限(HP8720Dでは1601点)であり、校正周波数は機器側で自動的に設定され例えば926.488MHzといった具合に、周波数の数値に端数が含まれる場合が多い。

Fig. 2に示したスミスチャートはネットワークアナライザの測定状況を説明したものである。(a)の測定法では一測定の周波数を500MHzごとに分割して校正点の数を増やし、校正周波数以外の周波数(例えば900.000MHzのように端数のない周波数)でデータを読み出す場合の読み出し精度の低下に配慮した。これは著者らが従来マイクロストリップ線路を用いてインピーダンス測定を行っていたのと同様の方法である。Fig. 2(a)は測定を最外周から時計回りに100~500MHz①, 500MHz②~1GHz①のように分割して行ったことを説明している。その結果インダクタンスについては後述の計算値とほぼ一致する測定値が得られた。しかし500MHzごとにプローブを試料に再接触させるために、周波数を分割している点で抵抗の値に不連続が生じた。これは接触抵抗の再現性が乏しいためと思われる。そこで(b)のように、測定データは校正周波数そのもので読み出すとともに、測定周波数範囲を分割せず、1回の測定で100MHz~3GHzの全域を測定し、プローブと試料の接触を一度だけに改めた。Fig. 3にこの測定方法で同一試料について測定を5回行い、再現性について調べた結果を示した。インダクタンスの再現性は良く、抵抗については低周波では接触抵抗によると思われるばらつきが見られる。このように

プローブの再接触は不要となり測定方法は改善されたが、接触抵抗の再現性そのものが改善されたわけではない。しかし、1 GHz 以上では表皮効果などによる交流抵抗が増大し、接触抵抗のばらつきをマスクする結果となったため、本研究で試作したインダクタについては特性比較は可能である。

3. 薄膜インダクタの作製プロセス

今回、試作した薄膜インダクタの作製プロセスを Fig. 4 に示す。

まず Si 基板には半導体素子の集積化をめざす意味で、Si 基板を用いた。まず Si 基板上に基板とコイル間の絶縁層となる SiO_2 層を形成する。コイル電流による磁界で SiO_2 基板に生じる渦電流を抑えるためには $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上の SiO_2 層を形成す

Fig. 1 Schematic view of a waferprobe.

Fig. 2 Chart of measurements made by a network analyzer.

Fig. 3 Reproduction of measurement by means of a waferprobe.

る必要がある⁹⁾。しかし、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上の膜厚では一般に用いられるウェット熱酸化のみの形成では、応力でクラックが入るおそれがあるためにウェット熱酸化による SiO_2 厚を $0.7\text{ }\mu\text{m}$ としそれ以上は常圧 CVD により SiO_2 をさらに堆積させる方法を行った。

次いで Al-Si 導体膜をスパッタ成膜し、ウェットエッチングによりコイルの形状をパターニングし、完成する。薄膜インダクタは形状による比較を行うために縦と横の比率を変えた 3 種類の薄膜インダクタを 1 枚のウェハ上に試作した。

Table 1 は今回試作した薄膜インダクタの外径寸法である。

コイルの線幅 w_c と線間隔 d_c はすべてのコイルにおいて $11\text{ }\mu\text{m}$ 、導体の厚さ t_c は 1 枚のウェハ内であるので、成膜時の導体膜の均一性の点から正方形のスパイラルコイルが $1.8\text{ }\mu\text{m}$ 、長方形のスパイラルコイルは $2.0\text{ }\mu\text{m}$ である。ターン数はいずれも 5 ターンで、最長の縦の長さ l_0 が $370\text{ }\mu\text{m}$ に対して横の長さ l_0 は縦の長さとの比率が $1:1$, $1:2$, $1:3$ となるように $370\text{ }\mu\text{m}$, $740\text{ }\mu\text{m}$, $1110\text{ }\mu\text{m}$ とした。Fig. 5 は薄膜インダクタの完成図である。

4. 測定結果

Fig. 6 は正方形スパイラルコイルの測定値と設計値の比較を示したものである。ただし、今回の測定において電極部分の静電容量は考慮していない。設計値のインダクタンスは Greenhouse の式¹⁰⁾ から求めた。インダクタンスについてはばらつきはみられるものの測定値は設計値によく一致しており、低周波から GHz まで約 10 nH を示している。共振周波数は 2.5 GHz と設計値に比べ周波数が低い GHz まで信頼性のある値が得られたことを示している。抵抗については測定値と設計値は大きなずれが生じている。プローブの接触具合などの影響に

1) Cleaning

2) Wet thermal oxidation

3) SiO2 CVD

4) Al-Si sputtering

5) Resist coating

6) Resist patterning

7) Al-Si etching

8) Resist etching

Fig. 4 Fabrication process for the thin-film inductor.

よるものが大きいと考えており現在検討中である。

Fig. 7 にそれぞれのインダクタのインピーダンスの測定結果を示す。

インダクタンスはサイズに伴って大きくなっており、基本となる正方形スパイラルコイルについては 100 MHz から 1 GHz にかけて 12 nH 程度を示しており、設計における値の 10 nH

Table 1 Size of thin-film inductors

Type		1:1	1:2	1:3
Conductor	Width w_c [μm]	11	11	11
	Thickness t_c [μm]	1.8	2.0	2.0
	Space d_c [μm]	11	11	11
	Coil turn n	5	5	5
	Length l_o [μm]	370	370	370
	Breadth l'_o [μm]	370	740	1110
Substrate	Thickness d_g [mm]	0.6	0.6	0.6
	n 形

370 μm 1:1

(a) Type 1 : 1 thin-film inductor

740 μm 1:2

(b) Type 1 : 2 thin-film inductor

1110 μm 1:3

(c) Type 1 : 3 thin-film inductor

Fig. 5 Completed thin-film inductors.

にほぼ一致した値が得られている。また縦と横の長さの比率が 1 : 2, 1 : 3 のインダクタンスについてはそれぞれ 22 nH, 29 nH の値が得られた。またインダクタンスの大きいものほど共振周波数が低く、抵抗においてはコイル長の長いものほど大きいという理論的に予想される傾向が定性的に得られた。

5. ま と め

半導体プロセスに基づいて GHz 帯で動作する 10 nH 程度の空心薄膜インダクタを試作した。

Fig. 6 Frequency characteristics of the thin-film inductor.

Fig. 7 Comparison of the three types of fabricated inductors.

空心薄膜インダクタの測定をウェハプローブによるインピーダンスの測定を行った結果、校正で決定された反射点と測定点のずれが生じることで共振周波数のずれが現れることを示した。

測定を 100 MHz から 5 GHz まで一括で行うように改善することで、3 種類のインダクタンス、抵抗の比較を行った結果、形状による定性的な傾向が得られることを示した。

インダクタンスにおいてはウェハプローブによる測定で GHz 帯において 10 nH 程度の測定ができるようになったと考えられる。今後この測定法に基づいて磁性薄膜インダクタを測定する予定である。

文 献

- 1) K. Kawabe, H. Koyama, and K. Shirae: *IEEE Trans. Magn.*, **20**, 1804 (1984).
- 2) M. Yamaguchi, M. Matsumoto, H. Ohzeki, and K.I. Arai: *IEEE Trans. Magn.*, **26**, 2014 (1990).
- 3) 佐藤敏郎, 井上哲夫, 富田 宏, 谷田部 茂, 溝口徹彦: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-96-123 (1996).
- 4) 斉藤貴伸, 筒井和久, 矢萩慎一郎, 松倉祐輔, 遠藤 浩, 恵下 隆, 彦坂康己: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-97-8 (1997).
- 5) 西原宏幸, 山口正洋, 荒井賢一, 江刺正喜: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-97-123 (1997).
- 6) 権田俊一: 薄膜作製応用ハンドブック, 第 3 章, pp. 934-935 (エヌ・ティ・エス, 1995).
- 7) K.I. Arai, M. Yamaguchi, and H. Ohzeki: *IEEE Trans. Magn.*, **28**, 2175 (1992).
- 8) M. Yamaguchi, M. Matsumoto, H. Ohzeki, and K.I. Arai: *IEEE Trans. Magn.*, **27**, 5274 (1991).
- 9) 田邊信二, 白木康博, 高田政宏, 山口正洋, 荒井賢一: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-98-16 (1998. 2 発表予定).
- 10) H.M. Greenhouse: *IEEE Trans. Parts, Hybrids and Packaging*, **10**, 101 (1974).

1997 年 10 月 29 日受理, 1998 年 2 月 2 日採録