複合多層構造磁性体を用いたマイクロ電源用マイクロインダクタ

Microinductors Using Composite Multilayer Magnetic Materials For Micropower Supplies

菅原英州・西村貴志・若生直樹・白川 究*・増本 健*

NEC トーキン株式会社 技術開発本部, 仙台市太白区郡山 6-7-1 (〒982-8510)

* (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)

E. Sugawara, T. Nishimura, N. Wako, K. Shirakawa*, and T. Masumoto*

Research & Development Unit, NEC Tokin Corporation, 6-7-1 Koriyama, Taihaku-ku, Sendai 982-8510, Japan

*Research Institute of Electric and Magnetic Materials, 2-1-1 Yagiya-Minami, Taihaku-ku, Sendai 982-0807, Japan

We performed this study to develop microinductors using CoFeSiB/SiO₂ multilayer film with a high quality factor. For a micro dc/dc convertor, efficiency and miniaturization must be improved by incorporating a microinductor. High Q values are compatible with high inductances of the inductors when a three-dimensional helical coil and the multilayer film are used. Furthermore, the decrease of inductor areas and thicknesses contributes to miniaturization, as the polyimide film is used as the substrate of the magnetic core. The microinductors obtained inductances of 3 to 15 μ H and quality factors of more than 40 at a frequency of 1 MHz, and displayed a current density of more than 100 A/mm². We have simulated the magnetic field strength in the magnetic cores using three-dimensional Maxwell simulation tools.

Key words: winding helical inductor, thin film magnetic core, micro power supply

1. はじめに

IT (Information Technology) 産業の高度化により 2010 年には電力エネルギー消費量が現在の 2 倍以上になると予想され、グローバルな電源市場を見ると、わずか 1 % の電源効率改善でも、その省資源、省エネルギー、環境問題に及ぼす影響は大きい。そのため、省エネルギーと小型化を目的としたマイクロ電源技術の開発では、低エネルギー駆動のパワーデバイス、磁気デバイス (インダクタ、トランス)、制御 IC などの小型集積化された高効率なデバイス開発が重要である。以上のような電源の高効率化及び集積回路内の電源分散化によるきめ細かな電力調整により、小型化、高効率化、更に省エネルギー化が要望されている。

本論文の目的は、Fig. 1 に示すような LSI 配線幅の縮小とそれに伴う LSI 動作電圧の低下に対応して、LSI を駆動するマイクロ電源の高効率化・小型化を達成するための高効率で極薄なマイクロインダクタの開発である。このマイクロインダクタは、連続成膜ができるフレキシブルなポリイミド基板両面に軟磁性多層膜を形成した複合多層構造磁性体を用いて、これまでにない極薄ヘリカルコイル構造を構成することを特徴としている。ここでは、高効率なマイクロインダクタの特性を説明し、インダクタ内部の磁界解析により、複合多層構造の影響、コイル構造の高効率化、及び直流重畳特性について考察する。

Fig. 1 Drive voltage and LSI line pattern width trends.

2. ポリイミド基板を用いた薄膜磁心

携帯電話等の Li 電池で駆動する LSI は Fig. 1 に示すようにその駆動電圧が年々低下する傾向にある。そのため、将来は Li 電池電圧 3.7~4 V から LSI 駆動電圧 1 V 以下に降圧して LSI に供給する必要がある。

電池駆動に用いられる降圧型電源回路は、その制御 IC 開発の進展に大きく影響を受け、制御 IC と高周波ダイオード等がワンチップ化され、マイクロ電源の部品点数は大幅に減少してきた。しかしながらフェライトを用いたインダクタはその薄型化と特性がトレードオフの関係にあり、十分な小型化・薄型化は計られなかった。

本研究の極薄マイクロインダクタはこのような携帯機器用の電源に応用され、必要な特性項目は、①薄い (300 μ m 以下)、②高インダクタンス (5~10 μ H 程度)、③高効率 (Q=10~60 @ 駆動周波数)、④省面積 (最大 4 mm×4 mm 程度)、⑤低 Rdc (1 Ω 以下)、⑥短工程、低コストである。これまでも各種の薄型マイクロインダクタ¹⁾が開発されているが、これらの特性を得るために本研究ではポリイミド基板の両面に磁性体を成膜した薄膜磁心に関して応用の可能性を検討した。

2.1 マイクロ電源に必要なインダクタ特性

電源のマイクロ化には駆動周波数の高周波化が効果的であり、インダクタ、キャパシタを小さくできる。しかしながら、高周波化によりインダクタの交流損失及び半導体素子のスイッチング損失が大きくなってしまふ²⁾。そこで、最適な駆動周波数の検討として、スイッチング周波数 f_s とインダクタンス値 L 、入力電圧 V_p 、出力電圧及び電流を V_o 、 I_o とすると、降圧形電源の最適駆動周波数は式(1)のように示される³⁾。

$$f_s = \frac{V_o}{2L I_o} \frac{1 - V_o/V_p}{L} \quad (1)$$

式(1)より、 $V_p=3V$ 、 $V_o=2V$ に設定すると、出力 $P_w(V_o I_o)=0.1W \sim 1.5W$ 時の f_s の L 値依存性はFig. 2の傾向を示す。

この結果より、 f_s 値以下の周波数帯域でスイッチング駆動が可能となる。電源全体の高効率とマイクロ化を両立するためには、低スイッチング周波数駆動で半導体及びインダクタの損失を低減させて、高効率高インダクタンス、更に良好な直流重畳特性を確保したマイクロインダクタを使用することが望ましい。しかしながら、高インダクタンスとマイクロ化はトレードオフの関係にあるため、小型でインダクタンス値が大きく、更に直流重畳特性に優れたインダクタの開発は十分検討されていない。

2.2 薄膜磁心インダクタの開発

このような要求項目を満足するために、本研究では以前から、高性能な磁性薄膜を用いた低 R_{dc} 、高効率($Q_{ind}=\omega L/R$)で小型な薄膜インダクタを検討してきた^{4), 5)}。

薄膜磁心の構造は、Fig. 3に示すように、12~25 μm の厚みを有するポリイミド基板上に薄膜磁性体をスパッタリング成膜し、その積層体に導体コイルをヘリカル状に巻いた数100 μm 厚みの磁心構造である。

代表的な多層膜の膜構造は

$$[Co_{79}Fe_{21}Si_{10}B_8(100nm)/SiO_2(50nm)] \times 30$$

であり、磁性層の厚みは3 μm 、絶縁層を含んだ磁心の全膜厚は4.5 μm である。25 μm 厚みのポリイミド基板は、Fig. 3からも解るように、成膜後も平坦性を保持し、磁心基板の積層加工及びコイル巻き線加工を施してインダクタ構造を形成することができる。

Fig. 4には上記長方形をした薄膜磁心多層膜のM-Hループを示した。軟磁気特性は、磁化困難軸方向のM-Hループから評価すると、異方性磁界が2.1 kA/m、保磁力が64 A/m、 $B_s=1.2$ Teslaの良好な一軸磁気異方性を示し、異方性磁界から計算される初透磁率は約460である。磁化容易軸のM-Hループは磁化困難軸より傾いているが、これは長方形の磁心形状から生じる反磁界の影響である。磁化困難軸方向の透磁率は、反磁界の影響を受け、反磁界係数の補正により測定値とほぼ同じ値となる。数MHzでの材料の

Fig. 2 Inductance dependence of switching frequency at power level of 0.1 W to 1.5 W.

Fig. 3 Photograph of composite multilayer magnetic cores prepared on turned polyimide planes.

Fig. 4 Magnetization curves of composite multilayer magnetic cores on polyimide substrates with easy- and hard-axis directions.

効率 Q_{mat} は、Landau・Lifschitz・Gilbert 方程式による透磁率 μ' , μ'' の計算値と高周波帯域からの測定値の外挿により 100 を越えていることが判明している。

3. 薄膜磁心巻線インダクタ

薄膜磁心巻線インダクタは、ポリイミド上に両面成膜した薄膜磁性体を積層磁心に用い、平角又は通常の丸線を Fig. 5 の様に 1 層～3 層巻線したヘリカルコイル構造である。その寸法の 1 例として、面積を小さくすることを目指して、 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 1.1\text{ mm}$ のような小型のマイクロインダクタを構成した。このインダクタは、導体コイル $80\text{ }\mu\text{m} \times 160\text{ }\mu\text{m}$ の平角ホルマル線を 36 ターン巻線し、 $L=4\text{ }\mu\text{H}$, $R_{\text{dc}}=0.5\text{ }\Omega$, $R_{\text{ac}}=1\text{ }\Omega @ 1\text{ MHz}$, $Q=30$ のインダクタ特性を示した。

Fig. 5 に示した開磁路型薄膜巻線インダクタの L 値の概略は以下に表される。

薄膜磁性体寸法 (厚さ t_m , 幅 w_m , 長さ l_m)

$$L = \mu_0 \cdot \mu_s \cdot t_m \cdot w_m \cdot N^2 / [l_m \cdot \{1 + N_d(\mu_s - 1)\}] \quad (2)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率 ($1 \times 10^{-6} \text{ H/m}$)

μ_s は薄膜軟磁性材料の透磁率

N は巻数, N_d は反磁界係数

この式(2)より、 L 値の増加を計るには、 μ_0 を除く分子項について、反磁界係数を考慮して大きくする必要がある。更に、面積の拡大、閉磁路化することで数倍のインダクタンス向上が図れる。極薄化は、薄膜磁性体の特徴であり、導体の R_{dc} 増加を押さえながら面積を広げ、素子高さを薄くすることで、フェライト等では構成できない薄いインダクタ素子構造が可能となる。

数 MHz で駆動するマイクロ電源は、高効率特性を得るため、低渦電流損失で高 μ , 高 Q 値を示す薄膜軟磁性体と、低 R_{dc} な導体コイルが必要とされる。

本研究で用いた薄膜磁性体は、 $25\text{ }\mu\text{m}$ 厚のポリイミド絶縁体を挟んで $4.5\text{ }\mu\text{m}$ 厚み磁性体を積層配置した複合多層構造⁶⁾であり、多層膜間の相互作用が低下する構造である。そのため、本研究の複合多層磁心は数 MHz の周波数帯で高インダクタンス値で高効率を示す。

Fig. 6 には複合多層薄膜磁心の高効率高インダクタンスの 1 例として、 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 1.2\text{ mm}$ の寸法で、40 ターン薄膜磁心巻線インダクタの L 値と Q 値の周波数特性を示した。周波数 1 MHz での L 値は $15.3\text{ }\mu\text{H}$, 効率 Q 値は 40 を示し、直流抵抗 R_{dc} は $0.5\text{ }\Omega$ の高特性を得た。Fig. 7 には良好な直流重畳特性の一例として、 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 1.1\text{ mm}$ 寸法のマイクロインダクタにおける直流重畳特性測定結果を示した。1 アンペアという大きな直流重畳電流でも、インダクタンス値の減少は見られなかった。この良好な重畳

Fig. 5 Photograph of microinductor having composite multilayer magnetic cores with inductor dimensions of $2 \times 2 \times 1.1\text{ mm}^3$.

Fig. 6 Frequency characteristics of inductance L of helical inductor using composite multilayer magnetic core with inductor dimensions of $4 \times 4 \times 1.2\text{ mm}^3$.

Fig. 7 Properties of dc-biased inductances of microinductors using composite multilayer magnetic core with inductor dimensions of $2 \times 2 \times 1.1\text{ mm}^3$.

Fig. 8 Analysis model to solve three-dimensional eddy current problems, having 44 thin film magnetic cores with inductor dimensions of $2000 \times 300 \times 3\text{ }\mu\text{m}^3$.

特性は、複合多層磁心内部の磁性層が外層磁性層でシールドされる複合多層構造に起因すると考えられる。

これらの結果より、高 Q・高 L・高直流重畳特性は薄膜磁性体と巻線構造を用いて得られたもので、複合多層構造薄膜磁性体を用いたマイクロインダクタのポテンシャルの高さを示している。

4. 3次元モデルの交流磁界解析

本研究では、インダクタンスの直流重畳特性において、電流依存性が 1 A までほとんど一定という良好な特性結果が得られた。この直流重畳特性結果を考察するために、本研究では、有限要素法 3D 交流磁界解析モデルを使って薄膜磁心の内部磁束分布を計算し、コイルの発生磁界により複合多層構造薄膜磁心間の相互作用、磁界分布、磁束集中など、どのように励磁されているかを考察した。

4.1 3D 磁界解析モデル

磁界解析したインダクタ 3D 解析モデルを Fig. 8 に示す。本モデルの薄膜磁心は、長さ $2000\text{ }\mu\text{m}$ × 幅 $300\text{ }\mu\text{m}$ × 厚み $3\text{ }\mu\text{m}$ からなる磁性体を $50\text{ }\mu\text{m}$ のスペースで 2 列に配置し、全厚み $616\text{ }\mu\text{m}$ 、2 列×22 層の複合多層構造である。

磁性体の特性は、1MHz での透磁率を $\mu' = 400$ 、 $\mu'' = 4$ に設定し、磁心の比抵抗は多層膜の経験値である $500\text{ }\mu\Omega\text{cm}$ を用いている。ポリイミド絶縁層はモデルの容量を低減するため、空気層とした。

導体コイルは 20 ターンの巻線構造で、導体厚みは $25\text{ }\mu\text{m}$ 、導体ライン幅は $55\text{ }\mu\text{m}$ 、導体間スペースは $30\text{ }\mu\text{m}$ 、モデル厚みは $670\text{ }\mu\text{m}$ 、導体の直列抵抗は $R_{dc} = 0.5\text{ }\Omega$ である。本 3 次元モデルは計算容量縮小の為に、実験モデル $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ の幅寸法を 3 分の 1 に縮小している。導体コイルには 1 MHz、200 mA の電流を流した。

4.2 磁界解析結果

3 次元磁界解析はアンソフトジャパン社の 3D_maxwell シミュレーションソフトを用いた。メッシュサイズは 32 万メッシュで、計算に使用したメモリーサイズは 1900 Mb 程度である。計算により得られたインダクタンス値は $L = 0.5\text{ }\mu\text{H}$ であった。

磁界分布は Fig. 8 に示した解析モデルの磁性体中心部分 X、Y、Z 方向について計算した。Fig. 9 はマイクロインダクタ磁性層中心部分の X 方向（幅 $300\text{ }\mu\text{m}$ 方向）における磁界分布で、磁性層内とその周辺の磁界強度である。発生磁界は磁性体内が 900 G と大きい、コイルと磁性体間は微弱で、コイル導体内には 25 G 程度の磁束が発生している。200 mA で励磁された磁性体は飽和磁化量の 12,000 G には達していない。

Fig. 10 にはマイクロインダクタ中心部分の磁性層内 Y 方向

Fig. 9 Field strength through X-direction magnetic core at center of microinductor driven by ac current of 200 mA and 1 MHz.

Fig. 10 Field strength through Y-direction magnetic core at center of microinductor driven by ac current of 200 mA and 1 MHz.

Fig. 11 Field strength through Z-direction magnetic core at center of microinductor driven by ac current of 200 mA and 1 MHz.

(長さ 2000 μm 方向)における磁界分布を示した。この結果より 2000 μm 長さの磁性体内では 300 G から 900 G の磁界分布を生じている。磁性層からはずれた場所の漏洩磁界強度は 20 G 程度に減少する。

次に、マイクロインダクタの Z 方向 (厚さ 616 μm 方向)の磁界強度分布を Fig. 11 に示した。インダクタ中心部分は 900 G の磁界強度であるが、コイルに近い磁性体は 2 倍の 1800 G 程度に励磁されている。

Z 方向の 3 次元磁界計算結果から、複合多層磁心はインダクタ中心部の磁性体に誘起される磁界強度が弱く、コイルに近い磁性体は磁界強度が大きい。これは 3 μm 厚みの磁性体間を 25 μm の絶縁体で分断した複合多層構造の効果であると考えられる。その為、磁性体はコイルからの励磁磁界の増加に伴い、コイルに近い磁性体から飽和し、コイル中心部の磁性体は飽和しにくい。この構造は直流重畳特性にも好影響をもたすと考えられ、Fig. 7 に示したような 1 アンペア程度までの良好な直流重畳特性を説明することができる。

5. まとめ

薄膜磁心巻線ヘリカルインダクタの薄型化と高効率化を計ることを目的として、薄膜磁性体をフレキシブルなポリイミド基板上に成膜し、極薄な薄膜磁心を形成した。この磁心を積層して複合多層構造体を構成し、ヘリカルコイル構造からなる薄型高効率マイクロインダクタを開発した。

更に、マイクロインダクタ内部の磁心構造について磁界解析し、磁性体内部の X,Y,Z 方向の磁界分布を計算し、コイルの発生磁界により複合多層構造薄膜磁心がどのように励磁されているかを、磁界分布、磁束集中について考察した。

(1) CoFeSiB/SiO₂ 多層膜は、ポリイミド基板両面に 4.5 μm 成膜し、保磁力 64 A/m(0.8 Oe)の良好な軟磁気特性と異方性磁界 2.1 kA/m(26 Oe)、の良好な軟磁気特性を得た。

(2) CoFeSiB/SiO₂ 多層膜とポリイミドフィルム絶縁体から構成される、複合多層磁心を用いたマイクロインダクタは、高周波 1MHz でのインダクタンス値 15 μH 、効率 40 の良好なインダクタ特性と直流重畳電流 1 A までインダクタンスが一定な良好な直流重畳特性を示した。

(3) 複合多層磁心の磁界解析から、コイルからの発生磁界の増加に伴い、その多層構造に起因してコイルに近い磁性体から飽和する。しかし、コイル中心部は飽和しにくいので、直流重畳特性に良好な影響を与えていると考えられる。

この結果よりインダクタ内部への磁界集中は発生しておらず、良好な特性を有するマイクロインダクタを形成できる。更に、最薄な薄膜磁心を用いて極薄マイクロインダクタを構成できる。

謝辞

本研究は東北経済産業局主幹の地域新生コンソーシアム研究開発プロジェクト「省エネルギー型マイクロ電源の開発」に基づいて行われました。各種議論に加わって頂いた、東北大学電気通信研究所の中村慶久教授、山口正洋助教授、島津武仁助教授、東北大学大学院工学研究科の松木英敏教授 (プロジェクトリーダー)、佐藤文博先生、他関係各位に感謝申し上げます。

文献

- 1) 1 例として、(株)アモルファス・電子デバイス研究所報告書『アモルファス磁性材料とマイクロ磁気デバイスの新展開』平成 6 年 3 月。
- 2) 渡良田,酒井,谷内,塚本;電子情報通信学会技術研究報告, EE98-51(1998)15.
- 3) 中澤,江戸,片山,鶴頭,菅原,林,黒木,米澤,松崎;電気学会マグネティックス研究会資料,MAG-99-41(1999).
- 4) 白川 究,大沼繁弘,菅原英州,三寺正雄,増本 健: 金属, 67(1997)379.
- 5) 菅原英州,猪 義博,三野正人,白川 究,増本 健: 電気学会マグネティックス研究会資料,MAG-00-147 (2000).
- 6) 菅原英州,李 衛東,大槻悦夫,白川 究,増本 健:日本機械学会 IIP2000 情報・知能・精密機械部門講演会講演論文集,105(2000).

2002 年 10 月 7 日受理, 2003 年 1 月 17 日採録