高電気抵抗 Fe-Hf-O 系薄膜リアクトルを用いた降圧型コンバータの動作特性

Operations of a Buck Converter Using a Microreactor with Highly Resistive Fe-Hf-O-Based Films

山沢清人・駒井栄一・早川康男*・畑内隆史*・牧野彰宏*

信州大学工学部, 長野市若里 500 番地 (〒380)

*アルプス電気(株)中央研究所, 長岡市東高見 1-3-5 (〒940)

K. Yamasawa, E. Komai, Y. Hayakawa,* T. Hatanai,* and A. Makino*

Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Shinshu Univ., 500 Wakasato, Nagano 380

*Central Research Laboratory, Alps Electric Co., Ltd., 1-3-5 Higashi-Takami, Nagaoka 940

A buck-converter using a multilayered micro-inductor with Fe(Co-Fe)-Hf-O-based soft magnetic films was investigated. Fe(Co-Fe)-Hf-O films have excellent frequency characteristics with a low loss factor in a frequency range exceeding 100 MHz owing to their high electrical resistivity. Consequently, a micro-inductor using these films exhibited maximum values of the quality factor (Q) of 12.0 at 5 MHz and 17.1 at 10 MHz for Fe-Hf-O and Co-Fe-Hf-O films, respectively. The highest output power, 1 W, and the highest efficiency, 70%, were simultaneously obtained for a buck-converter with Co-Fe-Hf-O films. These values are higher than those for a 1 MHz-driven converter using a Co-Ta-Hf amorphous alloy film. As the operation of the converter depends more strongly on the equivalent resistance (R) and Q values than the inductance (L), a Fe(Co-Fe)-Hf-O film reactor with a very small value of R is suitable for a micro dc-dc converter with higher switching.

Key words: high resistivity, high frequency, Fe-Hf-O films, Co-Fe-Hf-O films, micro inductor, dc-dc converter

1. はじめに

近年, 携帯通信機や, 携帯音響機器などに代表されるように, 電子機器の小型化・高性能化が急速に進み, 内蔵される電源に対しても小型化・軽量化への要求が強い. これらに用いられる電源としては, 効率がよくかつ駆動周波数を高くすることによってマイクロ化が比較的容易なスイッチング電源が注目されている. しかしながら, スwitching電源の構成部品の中で, トランジスタやダイオードなどの半導体素子は集積化が進んでいるのに対して, エネルギー蓄積素子であるインダクタやトランスの集積化は遅れている. このような背景の中で, 薄膜インダクタ・薄膜トランスなどのマイクロ磁気デバイス¹⁾を用いたマイクロ DC-DC コンバータの研究が盛んに行われ²⁾, 最近では薄膜インダクタを用いた超小型 DC-DC コンバータが相次いで発表され, 実用化されつつある^{3), 4)}. これらのコンバータのスイッチング周波数は数 MHz であるが, 将来的にはさらに高周波化されるものと考えられる.

スイッチング周波数の高周波化に伴って, 磁気素子においては, コアの鉄損が問題となる. この場合, コア材の電気抵抗を高めて渦電流による損失を抑えることが重要となってくる.

筆者らの内 2 名によって開発された Fe-Hf-O ($M = \text{Hf, Zr}$, 希土類) 膜^{5), 6)}は, 1 T 以上の高い飽和磁化 (I_s) と, 従来の合金系軟磁性薄膜に比べて約十倍以上の高い抵抗率 (ρ) を両立した材料であり, 100 MHz 以上まで高透磁率・低損失特性を示す. したがって, 高周波スイッチングコンバータ用薄膜磁気素子のコア材に適するものである.

以上の考えに基づき, 本報告ではこれら高抵抗軟磁性薄膜の中から Fe-Hf-O 膜およびより高周波特性に優れる Co-Fe-Hf-O 膜⁷⁾をコア材に用いた積層マイクロインダクタを作製し, この基礎特性およびこれらを搭載した DC-DC コンバータの動作特性について検討を行った結果を述べる.

2. Fe-Hf-O 膜と Co-Fe-Hf-O 膜の磁気特性

薄膜試料は, rf 反応性スパッタ法により $\text{Ar} + \text{O}_2$ の混合雰囲気中で作製した. 膜厚は約 $3 \mu\text{m}$ である. Fe-Hf-O 膜については無磁界中で成膜し, 真空中で静磁界中 (UFA; Uniaxial Field Annealing) あるいは回転磁界中 (RFA; Rotating Field Annealing) で熱処理を行った. Co-Fe-Hf-O 膜は静磁界を印加しながら成膜し, 熱処理は施していない.

Table 1 に本実験に用いる Fe-Hf-O 膜, Co-Fe-Hf-O 膜, および比較のため作製した Co-Ta-Hf 膜の諸元を示し, Fig. 1 には複素透磁率の実数部 μ' および性能係数 $Q (= \mu' / \mu'')$ の周波数依存性を示す. 静磁界中の熱処理により, 膜に異方性を付与したもののについては, 困難軸方向の測定結果のみを示した. 500 MHz までの透磁率は, $5 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ の短冊状の試料を用い, パラレルライン法⁸⁾により測定した. 便宜上, 各試料には #1 ~ #4 および #CO1, #CO2 の番号を付した. なお, #3 の試料および #CO2 の試料において, E, H で示したものはそれぞれ膜の容易軸方向, 困難軸方向で測定した値であることを示す. Table 1 からわかるように, Fe-Hf-O 膜および Co-Fe-Hf-O 膜はすべて 1 T 以上の I_s を有し, ρ の値は $5 \mu\Omega\text{m}$ 以上である. これらの膜はいずれも直径約 10 mm 以下の非常に微細な bcc 結晶相と, Hf と O を高濃度を含むアモルファス相から成る^{6), 7)}. これに対して, Co-Ta-Hf の I_s は 0.78 T, ρ は $1.8 \mu\Omega\text{m}$ であり, 膜の構造はアモルファス相単相であることを X 線回折により確認している. また Fig. 1 に示したように, as-depo. 状態の Fe-Hf-O の膜の μ' は 1 MHz において 400 程度である

Table 1 Properties of the Fe-Hf-O, the Co-Fe-Hf-O, and the Co-Ta-Hf films

No.	#1	#2	#3E	#3H	#4	#CO1	#CO2E	#CO2H
Films	Fe-Hf-O				Co-Fe-Hf-O	Co-Ta-Hf		
Annealed	As-depo.	RFA	UFA 573K×3.6ks		As-depo.	RFA	UFA 773K×7.2ks	
Axis		573K×7.2ks	Easy	Hard		773K×7.2ks	Easy	Hard
B _s (T)	1.08	1.30	1.30	1.30	1.09	0.79	0.76	0.76
H _c (A/m)	178	62	124	73	185	12	28	33
ρ (μΩ m)	10.0	5.0	5.0	5.0	17.0	1.7	1.8	1.8

Fig. 1 Frequency dependence of μ' and Q for magnetic films.

が、UFA, RFA などの熱処理を施すことにより、1000 以上に増加させることができ、かつ 100 MHz 付近まで一定な周波数特性を示す。Q 値においては、熱処理条件で顕著な差は見られないが、as-depo. の試料が最も大きな値となる。これは、as-depo. 試料の方が大きな ρ を有することに起因するものと思われる。また、非常に強い一軸異方性を持つ Co-Fe-Hf-O 膜は、 μ' の値は 140 であるが、 ρ も $17 \mu\Omega\text{m}$ と大きく、500 MHz 以上まで μ' の低下もなく、Q 値は 100 MHz においても 20 以上である。これに対して、Co-Ta-Hf 膜は Fe-Hf-O 膜、Co-Fe-Hf-O 膜に比べて保磁力 (H_c) が小さく、1 MHz 付近の低周波において 2000 以上の μ' を示すが、 ρ が小さいため、周波数の増加に伴って低下する。また、UFA を施し、膜に一軸の異方性を付与することにより、周波数特性は改善されるが、 μ' の値は 700 程度に低下する。いずれも Q 値としては、Fe(Co-Fe)-Hf-O 膜に比べると小さいことがわかる。

3. マイクロインダクタとその周波数特性

Fig. 2(a), (b) に本実験において使用したプレーナークoilと積層型マイクロインダクタの構成を示す。形状は Fig. 2(a) に示すようにミランダとスパイラルを複合化した形としており、

Fig. 2 Schematic illustration of planar coil (a) and structure of multilayered micro inductor (b).

導体幅は 0.4 mm である。マイクロインダクタは、上記コイルを上下から厚さ $50 \mu\text{m}$ の絶縁層を介してガラス基板上に成膜した磁性膜で挟みこんだ構造となっている。インダクタとして構成した場合の容易軸、困難軸であるが、(a) 図に示したプレーナークoil面内において、axis と矢印で示した方向を軸方向とし、この方向が UFA 処理を施した磁性膜の容易軸となるように設定した場合を容易軸方向励磁 (#3E, #CO2E)、困難軸方向となるように設定した場合を困難軸方向励磁 (#3H, #CO2H) とした。測定にはインピーダンスアナライザ (HP4291A) を用いた。

空心の等価インダクタンス (L) は、 $0.57 \mu\text{H}$ で 30 MHz 付近まで一定であり、130 MHz で共振を起こしている。また、等価抵抗 (R) は直流抵抗値 $R_{dc} = 0.86 \Omega$ から周波数の増加に伴って上昇するが、10 MHz においても 1Ω 程度であり、このコイルは 10 MHz 以下の周波数において十分使用可能であることがわかっている。

Fig. 3(a), (b), (c) に Fe-Hf-O 膜および Co-Fe-Hf-O 膜をコア材として用いたマイクロインダクタの L , R , および性能係数 $Q (= \omega L/R)$ の周波数依存性を、Fig 4(a), (b), (c) に Co-Ta-Hf 膜の結果を示す。Fe-Hf-O 膜を用いたインダクタの L は $0.6 \sim 0.7 \mu\text{H}$ であり、50 MHz 付近まではほぼ一定であることがわかる。また、最も μ' が小さい Co-Fe-Hf-O 膜を用いたインダクタの L は $0.6 \mu\text{H}$ であり、Fig. 1 に示した材料の周波数特性からは 100 MHz 以上の周波数領域までフラットであることが期待

Fig. 3 Frequency dependence of L , R , and Q for inductor utilizing the Fe-Hf-O and the Co-Fe-Hf-O films.

されるが、実際 90 MHz で共振を起こしている。これはコイルと磁性膜の間に生じる漂遊容量により、共振周波数が大きく低下したことが原因と考えられる。

また、 R は周波数の増加とともに大きくなるが、Fe-Hf-O 膜においては、熱処理条件などによる R の大きな差異は見られない。これに対して、Co-Fe-Hf-O 膜の場合は Fe-Hf-O 膜のそれに比べてほぼ全周波数領域において小さいことがわかる。これは Fig. 1 の周波数特性に示したように、低損失（高 Q ）であることを反映しているものと推察される。 Q については、Fe-Hf-O 膜の場合はいずれも 5 MHz 付近で最大となる。値としては RFA 処理を施した試料を用いた場合が最も大きく、12.0 である。Fig. 3(c) において、 L が最も小さい #3E (UFA 処理をした試料の容易軸方向) の場合が最も Q が小さくなっているが、いずれも 10 以上の高い値を示していることがわかる。さらに、最も R の小さい Co-Fe-Hf-O 膜を用いた場合は 10 MHz で最大となり、その値は 17.5 と Fe-Hf-O 膜に比べても非常に高いことがわかる。また、容易軸方向励磁と困難軸方向励磁の差が明らかではないが、これは Fig. 2(a) で示したようにコイルの形状がスパイラルとミランダの複合型であり、磁性膜の異方性に対して適切な励磁方向となっていないことが原因であると考えられる。

これらに対して、RFA を施した Co-Ta-Hf 膜の L は 1 MHz では $1.26 \mu\text{H}$ と大きい、周波数の増加とともに低下する。また、UFA を施して異方性を付与した #CO2E、#CO2H では $L = 0.6 \sim 0.7 \mu\text{H}$ であり、RFA 処理した膜に比べて小さくなるが、10 MHz 以上で徐々に低下していることがわかる。Fe-Hf-

Fig. 4 Frequency dependence of L , R , and Q for inductor utilizing the Co-Ta-Hf films.

O 膜と比較すると、20 MHz 以下の低周波領域においては L が高いものの、それ以上の周波数領域においては Fe-Hf-O 膜の方が高 L となっていることがわかる。 R については、RFA 処理した Co-Ta-Hf 膜が最も大きく、10 MHz では 20Ω を越えている。その結果 Q は小さく、1 MHz において 5 程度である。異方性を付与して損失を抑えた #CO2E、#CO2H は最大となる周波数が 3 MHz となり、値も 8~9 と比較的大きい値が得られるが、Fe-Hf-O 膜に比べて小さい。

以上の結果より、高い ρ を有し、低損失な Fe(Co-Fe)-Hf-O 膜をコアとして用いた積層マイクロインダクタは、5 MHz 以上の高周波領域において高い Q を示すことから、高周波数駆動のスイッチング電源への応用が期待できる。

4. 降圧型 DC-DC コンバータの動作特性

Fig. 5 に降圧型 DC-DC コンバータの主回路構成を示す。主スイッチには MOS-FET (K346)、フライホイールダイオード D_f にはショットキーバリアダイオード (HRP22)、平滑用コンデンサ C_o には積層セラミックコンデンサを用いた。また、スイッチング周波数 f は 1 MHz、オン時比率 $D = 0.5$ 、入力電圧 $V_1 = 7 \text{ V}$ とした。

Fig. 6(a), (b), (c) には降圧型 DC-DC コンバータの出力電圧 (V_o)、出力電力 (P_o)、効率 (η) の出力電流 (I_o) 依存性を示す。コアとして使用した試料は #3E、#3H、#4、#CO1 である。 V_o は I_o の増加とともに低下し、50 mA 以下の I_o では大きな差異は見られないが、それ以上の I_o において違いが見られ、#4 の試料が最も V_o が大きく、#CO1 が最も小さい結果となっている。

Fig. 5 Circuit diagram of the buck-converter.

Fig. 6 Load characteristics of the buck-converter.

したがって、 P_o としてはCo-Fe-Hf-O膜を用いた場合が最も高出力となっているが、 $I_o=200$ mAまではFe-Hf-O膜と顕著な差はない。両者とも200 mA以上の I_o で1 W以上の出力が得られている。 η もCo-Fe-Hf-O膜を用いたものが最も大き

く出力特性としては1 W, $\eta=70\%$ が $I_o=200$ mAにおいて得られている。

Co-Ta-Hf膜と比較すると、Fe-Hf-O膜あるいはCo-Fe-Hf-O膜の方が高 I_o 側で高出力、高効率となり、出力で最大0.5 W, 効率で最大18%程度の差が認められる。高効率は、Fig. 3およびFig. 4において示したように、Co-Fe-Hf-O膜を用いたリアクトルの方がCo-Ta-Hf膜を用いたリアクトルに比べて Q が高く、 R が低いことにより、出力を大きくした時の入力増加が小さくてすむためと考えられる。

また、出力も L の大きいCo-Ta-Hf膜より L の小さいCo-Fe-Hf-O膜で大きくなっている。この原因としては入力電圧を一定としてコンバータを動作させていることが考えられ、以前報告されている薄膜インダクタを使用したコンバータでの実験、および計算結果と良く一致している⁸⁾。

5. まとめ

以上より、リアクトルの損失を小さくできる高抵抗Fe-Hf-O系あるいはCo-Fe-Hf-O系薄膜は、マイクロDC-DCコンバータ用のコア材として有望であると考えられる。また、リアクトルの Q は10 MHz付近で最大となっているが、本実験ではスイッチング周波数は1 MHzに設定しているため、この膜の低損失特性を十分引き出せているとはいえない。スイッチングをより高周波に設定することによって、特性を低下させることなくさらなる小型化が可能となるものと考えられる。

文 献

- 1) 白江公輔, 荒井賢一, 島田 寛編著: マイクロ磁気デバイスのすべて (工業調査会, 東京, 1992).
- 2) 山沢清人: 日本応用磁気学会誌, **17**, 656 (1993).
- 3) 三野正人, 塚本一男, 柳沢圭一, 田子章男, 谷内利明: 電気学会マグネティックス研究資料, MAG-95-127 (1995).
- 4) 東海陽一, 佐藤敏郎, 行木幹雄: 電気学会全国大会講演論文集[4], 東京, 1996, pp. 4-150 (電気学会, 1996).
- 5) 牧野彰宏, 早川康男: 日本金属学会誌, **57**, 1301 (1993).
- 6) 早川康男, 長谷川直也, 牧野彰宏, 三谷誠司, 藤森啓安: 日本応用磁気学会誌, **20**, 425 (1996).
- 7) 大湊久美子, 長谷川直也, 早川康男, 牧野彰宏: 日本金属学会春期大会講演概要, 千葉, 1996, p. 191 (日本金属学会, 1996).
- 8) 木村卓也, 三寺正雄, 寺坂正二, 野瀬正照, 松本文夫, 松本英敏, 藤森啓安, 増本 健: 日本応用磁気学会誌, **17**, 497 (1993).
- 9) 西島健一, 日高将人, 斎藤 明, 山沢清人: 電子情報通信学会論文誌, **J78-C-II**, 339 (1995).

1996年10月15日受理, 1997年1月16日採録