第3章 電力変換用マイクロ磁気デバイス

正 員 山 沢 清 人 (信州大学工学部電気電子工学科)

1. まえがき

半導体デバイスの高い集積度に比較して、磁気デバイスの集積化は遅れている。この状況は本来磁気と電気が相補な性質をもっていることからすると決して好ましいことではない。

磁気デバイスは半導体デバイスとは異なり、インパルスノイズに強く、高温・高湿・振動などの劣悪な使用環境に耐え、かつ多量の電気エネルギーの蓄積が容易であるなどの利点をもっている。これらの特徴を活かせば、高信頼性・高機能性の集積回路が開発できることになる。

更に、最近の高周波スイッチング技術の進展は極めて急速であり、スイッチング電源は小形・軽量化が図られつつあり⁽¹⁾⁽²⁾、信頼性を高める分散形電源システムも考えられている。

しかし、スイッチング電源をIC基板上に搭載できるようなマイクロパワーソースとするためには、スイッチング周波数の高周波化だけでなく、出力トランスの薄膜化を含めた磁気デバイスのマイクロ化を検討することが必要である。

「磁気工学におけるマイクロ化技術調査専門委員会(委員長:島田 寛東北大学教授)」では、3年間にわたって活発な調査・研究を行ってきた。本稿はこれらの成果⁽³⁾⁻⁽³¹⁾に基づいて電力変換用マイクロ磁気デバイスのなかでスイッチング電源に着目し、研究開発の現状と問題点を解説する。

2. マイクロトランス

スイッチング電源の主変圧器には磁気回路と巻線が薄膜化あるいはマイクロ化された高周波特性に優れたトランスが望ましい。現用のマイクロトランスにはアモルファス磁性薄帯と平面つづら折れコイルを積層し

図 1 積層マイクロトランス

図 2 積層マイクロトランスの特性

て構成した積層マイクロトランス⁽³⁾⁻⁽⁵⁾、基板上に磁性層、絶縁層、導体層を蒸着などの薄膜化技術で形成した薄膜トランス⁽⁶⁾⁻⁽¹⁵⁾、磁性細線と導線の織物構造をもつクロストランス⁽¹⁶⁾などがある。

2.1 積層マイクロトランス⁽³⁾⁻⁽⁵⁾

図1(a)と(b)には積層マイクロトランスのコイル形状とトランス構成を示す。このコイルは巻数が8で、つづら折れの回数は2であり、導線の幅と厚さは各々0.5 mmと35 μmである。磁性膜はスパッタ法で作製した厚さ12 μmのCo-Zr系アモルファス薄膜であり、一次、二次コイルを挟むように配置されている。図2(a)と(b)は、絶縁層の厚さdを変えた場合の、積層マイクロトランスの一次と二次の電圧式 $a = V_2/V_1$ と二次電流 I_2 の関係および負荷特性を示す。電圧比は絶縁層の厚さには依存せずほぼ $a = 0.9$ で、結合は良好である。一次側から二次側へのパワーの変換効率 $\eta = 80\%$ 以上となっている。

つづら折れ型積層マイクロトランスの特徴の一つにコイルの相対位置を変えることによるコイル間の磁氣的絶縁がある。図3(a)と(b)にはコイルの変位の方法と出力電圧の変位ピッチpの関係を示す。コイ

Micromagnetic Power Converters. By Kiyohito Yamasawa, Member (Dept. of Electrical & Electronic Engineering, Shinshu University).

キーワード: マイクロ磁心, 積層薄膜, ハイブリッド磁気 IC, マイクロスイッチングレギュレータ

図 3 磁氣的層間絶縁

ルを $p=3/8$ ずらすと、出力は 0 となり、二つのコイルは磁氣的に絶縁される。これは誘起電圧の位相がピッチによって周期的に変化するためである。この現象は多出力形スイッチング電源の構成に有用となる。

2.2 薄膜マイクロトランス

図 4 (a) には RF スパッタ法で形成した薄膜にイオンビームスパッタ法のパターニングを施して作製したねじ型薄膜トランスの構造を示す⁽¹²⁾。磁性層は CoZrRe 薄膜であり、中心部磁性層の厚さは $5\mu\text{m}$ で磁束のリターンパスとなる下部磁性層は $3\mu\text{m}$ 厚である。絶縁層は SiO_2 で、導線部は Cu 膜である。同図 (b) は、一次コイルと二次コイルの巻数比を $n=4$ とした場合の、電圧比 a と励磁周波数 f との関係を示

図 4 ねじ型薄膜トランス

図 5 スパイラル型蒸着マイクロトランス

す⁽¹³⁾。 $f=5\sim 20\text{ MHz}$ の高周波数領域で $a=1$ と比較的高い電圧比が得られている。

図 5 (a) はスパイラル型コイルとパーマロイ磁気層を蒸着法で形成したマイクロトランスの構造を示す。コイル間の漂遊容量を減らすために、(b) 図のように、一次と二次のコイルをずらした配置としてある。このトランスを $f=2.2\text{ MHz}$ の方形波で励磁すると、(c) 図に示す負荷特性が得られる。負荷時の電圧比は $a=0.5$ 前後で、一次と二次のエネルギー変換率は $\eta=12\%$ と低く、まだ十分な値ではない。

2.3 クロストランス

アモルファス強磁性繊維と導電性繊維とを織物状に組み合わせて構成したクロストランスは、通常の巻線配置では線間に大きな漂遊容量が発生する。しかし、巻線を群構造化すると漂遊容量の低減ができ、 $f=1\text{ MHz}$ の高周波励磁で一次・二次のエネルギー変換効率 $\eta=90\%$ の実用レベルの値を得ている⁽¹⁶⁾。

3. スイッチング電源

主変圧器にマイクロトランスを用いるスイッチング電源としては、積層マイクロトランスの利用^{(4)(5)(17)~(19)}とクロストランスの利用⁽²⁸⁾が現在では報告されている。このなかで、クロストランス型は DC-DC コンバータとして実用に供されている⁽¹²⁾。

3.1 積層マイクロスイッチングレギュレータ

図 6 マイクロスイッチングレギュレータ

表 1 マイクロスイッチングレギュレータの損失

回路素子名	損失[W]	割合[%]
積層マイクロ磁心	0.57	18.4
FET	2.11	68.1
FET ドライバ	0.18	5.8
方形波発生回路	0.08	2.6
一次側その他	0.02	0.6
可飽和リアクトル	0.01	0.3
ダイオード	0.03	1.0
二次側その他	0.10	3.2
合 計	3.10	100.0

図7 積層2出力形マイクロスイッチングレギュレータ

図8 異なる周波数で駆動される2出力型積層マイクロコンバータ

図6 (a) と (b) は積層マイクロトランス#1を主変圧器とする一次側磁気増幅器制御方式のスイッチングレギュレータの回路構成と負荷特性を示す⁽⁵⁾。# L_s は制御用磁気増幅器であり、アモルファス磁性薄帯を用いた薄形磁心で構成される。出力は良好な定電圧性を示し、最大効率 $\eta=32\%$ 程度となっている。表1には損失とその割合を示す。マイクロトランスのエネルギー変換効率は $\eta=73.5\%$ と高いため、回路全体に占めるトランスの損失の割合は18.4%と低いが、FETの損失は回路全体の2/3以上となっている。

3.2 多層多出力形マイクロスイッチング電源

図7 (a) は積層マイクロトランス#2の二次巻線 N_{2a} と N_{2b} をピッチ $p=3/8$ ずらして配置した1入力・2出力形スイッチング電源の回路構成を示す。出力電圧は二次側の磁気増幅器# L_s で制御される。同図 (b) は負荷特性である。 a -回路の出力を変化させているにもかかわらず、 b -回路の出力電圧 V_{ob} はその影響を受けずに一定となり、効率は1入力・1出力の場合と同程度である。

図8は主変圧器#3を共用して異なる周波数で駆動される2出力形積層マイクロコンバータである。駆動周波数は a -回路が $f_a=1\text{MHz}$ で、 b -回路が $f_b=3\text{MHz}$ である。 a -回路の負荷を変えても b -回路の出力に変動が現れない。また、 $p=0$ の場合と比較して効率が増加している。

3.3 マイクロスイッチング電源の応用と問題点

マイクロスイッチング電源はIC基板搭載形の小型電源として有用な用途をもつものと期待される。更に、磁氣的結合であるための入出力が電氣的に絶縁され、かつ適宜な距離のエネルギーの授受ができ、小形・軽量であるなどの特徴より、生体内部のような特殊な空間に良質な電気エネルギーの伝送を行う電源に応用することも考えられる⁽²²⁾。

最後に問題点について簡単に述べる。マイクロスイッチング電源は駆動周波数の高周波化によって磁気回路の小形化を図っている。高周波駆動によって主変圧器を構成する磁性材料の損失が増加するが、これとともに制御用磁気増幅器磁心の損失も増大する⁽²³⁾⁽²⁴⁾。この問題を解決するためには数10MHzの高周波領域でも損失が少なく、ヒステリシスループの角形性が良好な磁性材料を開発することが大切となり、現在各方面で多大の努力がなされている^{(25)~(31)}。

4. む す び

以上、電力変換用マイクロ磁気デバイスとして主にマイクロスイッチング電源の現状と問題点について簡単に説明した。マイクロスイッチング電源は磁気と半導体のハイブリッド化という将来の問題を有し、今後新分野の応用が期待される。

(平成3年3月18日受付)

文 献

- (1) 難波江：「高周波スイッチング技術の産業応用」電気学会誌107, 638 (昭62-7)
- (2) K. Harada & T. Nabeshima "Applications of magnetic amplifiers to high-frequency dc-to-dc converter" *Proc. IEEE*, 76, 353 (1988-4)
- (3) 山沢・佐藤・岩田・松田：「積層マイクロ磁心の基礎特性」電気学会マグネティックス研究会資料MAG-85-71 (昭60-7)
- (4) K. Yamasawa, K. Maruyama, I. Hirohama, & P. P. Biringer: "High-frequency operation of a planar-type microtransformer and its application to multilayered switching regulators." *IEEE Trans. Magnetics*, MAG-26, 3, 1204 (1990-5).
- (5) 中島・廣瀬・山沢：「積層マイクロスイッチングレギュレータの特性改良に関する実験的考察」信学会通信電源技術研究会資料PE90-54 (平2-12)
- (6) 北地・原嶋・胡桃沢・山沢：「蒸着積層マイクロ磁心の基礎特性」電気学会マグネティックス研究会資料MAG-88-77 (昭63-4)

- (7) 胡桃沢・原嶋・北地・山沢：「パーマロイ積層磁心の高周波特性」同上 MAG-88-135 (昭 63-6)
- (8) 夏井・高山・山沢：「蒸着による巻線型薄膜磁心の作成とその基礎特性」同上 MAG-89-129 (平元-6)
- (9) 夏井・城野・山沢：「蒸着積層マイクロ磁心の基礎特性」同上 MAG-90-126 (平 2-9)
- (10) 夏井・城野・山沢：「マイクロスイッチング電源用蒸着積層磁心の特性」同上 MAG-90-184 (平 2-12)
- (11) 大城・辻本・白江：「高周波用磁性薄膜トランスの基礎特性」同上 MAG-88-164 (昭 63-10)
- (12) 田子・柳沢・谷内・三野：「ドライブプロセスによる薄膜トランスの作製」同上 MAG-90-45 (平 2-3)
- (13) 三野・谷内・田子・柳沢：「ドライブプロセスによる薄膜トランスの特性」同上 MAG-90-114 (平 2-9)
- (14) 石橋・白川・鳥生・村上：「リング結合磁心型インダクタ・トランスの改良」同上 MAG-90-123 (平 2-9)
- (15) 山口・大沼・今川・鳥生・松木・村上：「スパイラル形薄膜トランスの作製と特性」同上 MAG-91-62 (平 3-2)
- (16) 宮沢・松木・山口・村上・山本：「等価回路を用いたクロストランスの動作解析」同上 MAG-88-133 (昭 63-6)
- (17) 長尾・丸山・山沢：「MHz 帯駆動型多層マイクロスイッチングレギュレータの基礎特性」同上 MAG-88-106 (昭 63-4)
- (18) 廣瀬・丸山・山沢・長尾：「磁気増幅器制御型マイクロスイッチングレギュレータの MHz 帯における動作特性」同上 MAG-89-131 (平元-6)
- (19) 丸山・廣瀬・山沢・長尾：「積層多出力型マイクロスイッチングレギュレータの基礎特性」同上 MAG-89-132 (平元-6)
- (20) 山本・松本・松木・村上：「クロスインダクタを用いた薄形 DC-DC コンバータ」同上 MAG-89-133 (平元-6)
- (21) ユニチカ(株)：カタログ「アモルファス超薄型 DC-DC コンバータ」(平元)
- (22) 高山・杉野・山沢：「スイッチング型バイオリモートパワーサプライの動作特性」電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-90-186 (平 2-12)
- (23) 二宮・松本・原田：「可飽和磁心における過電流の異常上昇について」同上 MAG-88-234 (昭 63-12)
- (24) 榊・関口：「高周波磁気増幅器用磁心の制御磁化特性と等価渦電流抵抗との関係」同上 MAG-90-120 (平 2-9)
- (25) 八木・佐藤・榊・沢・猪俣：「極薄・超低損失アモルファス薄帯磁心」同上 MAG-88-212 (昭 63-12)
- (26) 八木・沢：「アモルファス超薄帯の高周波磁気特性」同上 MAG-90-118 (平 2-9)
- (27) 山田・大塚・庄司・大槻：「高周波電源用 Mn-Zn フェライトの焼結体組織と物性」同上 MAG-91-80 (平 3-2)
- (28) 奥野・小林・榊：「低損失 CoZrMo 薄膜磁心の作成」同上 MAG-89-135 (平元-6)
- (29) 奥野・桐田・榊：「CoZrMo スパッタ巻磁心の損失」同上 MAG-90-38 (平 2-3)
- (30) 山内・吉沢：「Fe 基超微結晶軟磁性材料」日本応用磁気学会誌 14, 5, 684 (平 2-11)
- (31) 村上・松本・西野・熊野：「高周波パワートランス用材料の鉄損評価装置」電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-88-219 (昭 63-12)

山 沢 清 人 (正員)

昭和 45 年 3 月東北大学大学院工学研究科修士課程終了。同年東北大学工学部助手。54 年信州大学工学部助教授となり、現在に至る。工学博士。主としてマイクロ磁気デバイスの電力変換への応用、磁気アクチュエータの動作解析などの研究に従事。電子情報通信学会、計測自動制御学会、日本応用磁気学会、IEEE 正会員。