携帯機器用超小型 DC/DC コンバータ

Micro DC/DC Converter for Handy-type
Electronic Devices

溝口 徹彦*

1. はじめに

携帯電話やブック型パソコンに代表されるパーソナル携帯機器の市場が急速に拡大している。電池で駆動されるこれらの機器には従来から小型軽量であることに対する要求が強かったが、最近では激しい勢いで進展しているマルチメディア化に対応するため、通信機能や表示機能、あるいは画像情報の高速処理機能を付加するなど、より一層の高機能化が求められている。このためには、電池からの単一電圧をさまざまな搭載デバイスが必要とする複数の電圧に変換する必要がある、通常 DC/DC コンバータにより昇圧、降圧ないしは反転して各デバイスに電力を供給している。

このコンバータは、半導体スイッチ、制御用 IC、整流ダイオードなどの半導体素子、インダクタやトランスなどの磁気素子、コンデンサといった部品で構成されており、半導体スイッチのスイッチング周波数を高めることにより小型化が進められてきた。過去10年ほどの間にこの周波数は一桁程度上昇し、現在製品化されているコンバータでは数百 kHz 程度のものが普通に見られるようになってきている。しかし、電源部の占める容積（特に高さ）はまだ大きく、その他の回路部の集積度が進

むにつれて、より一層の小型・薄型化への要請が高まっている。

これにともない、従来の磁芯と巻線からなるバルク状磁気部品とは異なる薄膜インダクタや薄膜トランスといった薄膜磁気デバイスが電源小型化のキー技術として位置づけられ、各所で研究開発が推進されている¹⁾。その理由としては、薄膜磁気デバイスが本質的に薄型化に適していること、半導体作製技術と類似の技術で作製することができること、将来的に磁気部品と半導体素子とをモノリシックに集積化する道を開く可能性があることなどがあげられる。

以上の背景のもと、筆者らも数 W 級の電力を扱える薄膜インダクタの開発を数年前から始めるとともに、こ

Fig.1 Circuit diagram of 5 MHz switching DC/DC converter.

* Tetsuhiko Mizoguchi

(株)東芝 LSI 第一事業部 / LSI Division I, TOSHIBA Corporation.

Fig.2 Structure of thin film inductor.

れの MHz 駆動 DC/DC コンバータへの適用をめざして、半導体素子や実装方法など総合的な検討を続けてきた。その結果、厚み 2 mm 以下と薄型でありながら、数 W のハンドリングパワー、最大 80% 以上という高い変換効率をもつコンバータを構成することが可能となった²⁾。

本稿では、この超小型 DC/DC コンバータ技術の概要について紹介する。

2. コンバータ仕様と基本回路

今回検討した電源の用途として、リチウムイオン二次電池単セル動作の携帯機器を想定した。その電源仕様を入力電圧 4.2~3.0V (平均 3.6V)、出力電圧 4.7V、最大出力電流 600mA (最大出力約 3 W) とする。これを満たすための基本回路として、Fig.1 に示す昇圧チョッパ型 DC/DC コンバータ回路を採用し、スイッチング周波数は現在製品で用いられている数百 kHz より一桁高い 5 MHz に設定した。

3. 薄膜インダクタ

3.1 基本構造

上記コンバータ仕様を満足するには、薄膜インダクタとして、インダクタンス L は $1\mu\text{H}$ 程度、また電流容量 I_{max} は 1 A 以上を必要とする。さらに、コンバータ変換

効率の維持向上のために、 1Ω 程度のコイル直流抵抗 R_{DC} や 10 前後の性能指数 Q ($\omega L/R$; ここで ω は角周波数、 R は損失抵抗) が要求される。

一般に磁性体を高周波交番磁界のもとに置く場合、磁性体の磁化反転にともなうヒステリシス損失および渦電流損失を可能な限り低減する必要がある。後者による動的損失を低減するには、磁化過程を磁壁移動ではなく磁化回転で行わせるのが基本的に有効であるが、平面コイルを用いる薄膜インダクタにおいてこれを実現するのは一般的に困難である。

なぜなら、平面コイルで単位面積あたりのインダクタンスが最も大きいコイルパターンはスパイラル型であることがよく知られているが³⁾、このコイル形状では磁性体励磁方向が放射状となり、回転磁化過程のみを利用することができないからである。

この課題を解決するために考案した薄膜インダクタ構造を Fig.2 に示す⁴⁾。これは直列に接続された互いに逆巻の長方形スパイラルコイルの上下両面を絶縁膜を介して軟磁性膜によりサンドイッチした平面積層構造である。上下の磁性膜には長方形コイルの長軸方向に一軸磁気異方性が付与されており、コイルに流れる電流が発生する磁界は主として磁性膜の磁化困難軸方向となるので、実質的に回転磁化過程を実現することができる。

3.2 薄膜インダクタの設計

薄膜インダクタにおいて、コイルターン数、コイルラ

Tab.1 Typical specifications of newly developed thin film inductor.

Double rectangular spiral coil				FeCoBC magnetic film		Design values		
Turns N	Thickness t_c	Line/space	Size	Thickness t_m	Size			
3×2	50 μm	35 μm (×4 lines)/50 μm	4.75×6.20mm ²	1.5 μm ×4 layers	5.35×6.40mm ²	0.33 μH	0.19 Ω	1.6A

(a) Frequency dependence of inductance and quality factor.

(b) Superimposed DC current characteristic.

Fig.3 Characteristic of thin film inductor.

イン／スペース、あるいは磁性膜の厚み、磁性膜間ギャップといった各種構造パラメータと諸特性との関係を明らかにすることは素子設計上極めて重要である。このような目的のために種々の解析がなされているが、ここでは磁気回路を伝送線路に置き換えた解析モデル⁵⁾に基づく素子内磁束密度分布の解析手法を採用して、構造パラメータの最適化を図ることとした⁶⁾。その際、使用する材料やプロセス上の制約条件を考慮してこれらのパラメータを選択することになるが、コイル直流抵抗を 1Ω レベルまで低下させるには、材料として比抵抗の小さい Cu を、また膜厚も数 $10\mu\text{m}$ レベルを採用する必要がある。必然的にギャップ長 g はこれ以上に大きくなるので、これによる L の低下を防ぐために磁性膜の厚みを増すこととなる。このような事情を考慮して設計した結果を Tab.1 に示す。ここで、磁性膜磁気特性は、筆者らが開発した FeCoBC アモルファス磁性膜⁷⁾が持つ飽和磁束密度 1.6T 、異方性磁界 1.2kA/m を用いた。

3.3 薄膜インダクタの特性⁸⁾

実際に作製した薄膜インダクタの特性を Fig.3 に示す。インダクタンス L は $0.3\mu\text{H}$ 、周波数に対してはほぼフラ

ットであり、また、性能指数 Q は $2\sim 3\text{MHz}$ において最大値 8 、コンバータの想定スイッチング周波数である 5MHz では 6.5 をとる。また、インダクタンス L の直流重畳特性において、 6dB 低下する電流値は 1.6A であった。これらは、設計値とほぼ一致する。

4. MHz 駆動 DC/DC コンバータ

スイッチング周波数 5MHz のコンバータを構成するにあたり、これに必要な半導体素子として高速 PWM 制御 IC やスイッチング素子を新たに開発した⁹⁾。また、これらを薄膜インダクタや 1608 タイプの積層セラミックコンデンサ (容量 $1\mu\text{F}$) とともに一つの基板上に実装する手法も検討した。

4.1 PWM 制御 IC

Bi-CMOS プロセスにより、MHz 以上の高周波域で PWM 制御可能な制御 IC を開発した。アナログ部はバイポーラにより、また FET のドライバ部は CMOS により構成されている。これは設定可能周波数が 8MHz までと高速であり、デューティ比の上限は 85% と高く設計してある。 4.7V のレファレンス電圧に対して、出力側からフィードバックをかけ、デューティ比を制御して出力電圧をコントロールする。また、ドライバは 500pF の負荷容量を 8MHz で駆動することが可能である。

4.2 スwitchング素子

スイッチング素子として要求される高速性、低 ON 抵抗を両立させる素子として、横型 N-ch MOSFET を開発した。その入力容量は約 70pF 、ON 抵抗は 0.7Ω 、また V_{th} は 1.8V 、定格電流 1A である。そのスイッチング時間は 10ns とこれまでのパワー用スイッチング素子として広く使われている縦型 FET に比べて一桁小さく、高周波化にともなうスイッチングロスの増大を抑制できるようになった。

Fig.4 Cross-sectional view of adopted MCP.

4.3 整流ダイオード

整流ダイオードとしては、順電圧降下 V_f が 0.37V (1 A 定格時) と ON 抵抗が小さく、また逆回復時間が短いショットキーバリアダイオードを採用した。

4.4 電源実装

薄膜インダクタを搭載する DC/DC コンバータの実装には MCP (Multi Chip Package) 技術を採用した¹⁰⁾。これは 1 チップ化がむずかしい異種デバイスを 1 パッケージ上に混載させることを目的に発展してきた技術であり、各種半導体素子や薄膜インダクタなどの複合部品で構成される DC/DC コンバータの実装に適した技術である。

Fig.4 に今回採用した MCP の断面模式図を示す。プリント基板周辺部に Au めっきしたスルーホールを形成し、これを半分に切断しためっき面を外部端子として利用することにより、リードフレームを使用しない端子構

Fig.5 Photograph of assembled micro DC/DC converter.

Fig.6 Input voltage versus output voltage of the micro DC/DC converter.

Fig.7 Output current versus efficiency of the micro DC/DC converter.

造にしてある。

薄膜インダクタならびに全ての半導体部品はベアチップで、コンデンサやチップ抵抗とともに基板上 Ag ペーストによりマウント接続した。薄膜インダクタが持つ特徴の一つは、このように実装時に半導体ベアチップと同様に扱うことができる点にある。各デバイス間の電気接続は $30\mu\text{m}$ 径の Au ワイヤによるワイヤボンディングにより行い、その後基板片面を樹脂封止した。その際、封止樹脂材料や加熱条件等を最適化することにより、基板反りの問題を解決している。結果として、わずか $9.3 \times 25 \times 2\text{mm}$ の中に、インダクタ素子や平滑用コンデンサまで含めたコンバータを構成できた (Fig.5 参照)。この MCP のセット基板への実装ははんだ印刷、リフロー処理により、他の部品と同時にできる。

4.5 超小型 DC/DC コンバータの諸特性¹¹⁾

このようにして作製した DC/DC コンバータの制御特性を Fig.6 に示す。3 V から 4.2V までの入力電圧変動に対して $\pm 3\%$ 以下の出力電圧変化におさまっており、制御性は非常に優れたものである。

Fig.7 には出力電流－変換効率特性を示した。リチウムイオン二次電池の平均電圧 3.6V に対して、 300mA 出力時の効率は 81% という高い値が得られている。その際、リップルノイズは 2% 以下の 80mV_{p-p} と十分小さい値にとどめることができた。

5. ま と め

電池駆動の携帯機器に用いられる、出力容量が数 W までの比較的小容量の DC/DC コンバータについて、薄膜インダクタを用いるとともに、動作周波数を MHz

まで高めることにより、これを超小型化できることを示した。また、ここでは誌面の都合上述べなかったが、今回紹介した回路を基本に、さらに回路方式を工夫することにより、マルチ出力コンバータの構成も可能である。このような超小型電源が、今後の携帯機器の小型軽量化、さらには高機能化に大きく貢献することを期待している。

参 考 文 献

- 1) 展望「薄膜集積化を目指すマイクロ磁気素子」, 日本応用磁気学会誌, 17, (1993), 641~671.
- 2) T. Sato, T. Inoue, H. Tomita, S. Yatabe, K. Nishijima, Y. Tokai, M. Nameki, N. Saito and T. Mizoguchi: "5 MHz Switching Micro DC-DC Converter Using Planar Inductor", to be published in the proceedings of Intelec'96 Conference.
- 3) K. Kawabe, H. Koyama and K. Shirae: "Planar Inductor", IEEE Trans. Magn. MAG-20, (1984), 1804~1806.
- 4) T. Sato, H. Tomita, A. Sawabe, T. Inoue, T. Mizoguchi and M. Sahashi: "A Magnetic Thin Film Inductor and its Application to a MHz Switching DC/DC Converter", IEEE Trans. Magn., MAG-30, (1994), 217~223.
- 5) R. E. Jones Jr: "Analysis of the Efficiency and Inductance of Multiturn Thin Film Magnetic Recording Heads", IEEE Trans. Magn., MAG-14, (1978), 509~511.
- 6) 佐藤敏郎, 井上哲夫, 富田 宏, 溝口徹彦: "電解メッキ Cu

コイルと FeCoBC 系ヘテロアモルファス磁性膜を用いたプレーナインダクタの試作", 電気学会マグネティクス研究会資料, MAG-96 (1996), 9~17.

- 7) H. Tomita, T. Inoue and T. Mizoguchi: "Hetero-Amorphous FeCoBC Soft Magnetic Thin Films with Uniaxial Magnetic Anisotropy and Large Magnetostriction", to be published in IEEE Trans. Magn., MAG-32, in September in 1996.
- 8) 佐藤敏郎, 溝口徹彦: "電源用薄膜インダクタ・トランス", 日本応用磁気学会第96回研究会資料, 96, (1996), 25~30.
- 9) 東海陽一, 佐藤敏郎, 行木幹雄: "磁性薄膜インダクタを搭載した 1 M-8 MHz DC/DC コンバータ", 平成 8 年電気学会全国大会予稿集, (1996), 810.
- 10) 日経マイクロデバイス, "低コスト化と小型化を両立させたマルチチップ・パッケージを開発", 12月号, (1995), 200~201.
- 11) 東海陽一, 井上哲夫, 溝口徹彦, 佐藤敏郎: "薄膜インダクタを用いた超小型 DC/DC コンバータ", 電気学会マグネティクス研究会資料に掲載予定 (1996).

〔執筆者紹介〕

溝口徹彦 (みぞぐち てつひこ)

1979年, 京都大学・大学院工学研究科金属加工学修了。同年, ㈱東芝入社。以来, 磁性材料, 磁気部品の研究開発に従事。現在, LSI 第一事業部 LSI 技術第七部主査, 日本応用磁気学会会員。

SHM 出版物のご案内

ISHM Proceedings

			会員価格	一般価格
1996(Mineapolis, Minnesota)	A4 版	610 頁	9,000 円	10,800 円
(価格は送料込みです)				

ISHM USA 会誌

			会員価格	一般価格
1996 No.4	(July/August)	52 頁	1,000 円	1,000 円
1996 No.5	(September/October)	104 頁	1,000 円	1,000 円
(価格は送料込みです)				

SHM 会誌

		会員価格	一般価格
SHM 会誌 (各号)	B5 版	1,500 円	1,500 円
(価格は送料込みです)			

お申込み・お問合せは SHM 事務局までファクシミリでご連絡ください。

FAX 番号: 03-5802-5367