

電力用マイクロ磁気デバイスと超小型DC-DCコンバータの開発動向

エネルギー技術部長 三野 正人

Keyword : DC-DCコンバータ, マイクロ磁気, LSI, モノリシック化, パッケージレベルパワーグリッド, 集積化電源

1. はじめに

近年、スマートフォンや携帯情報端末などに代表される携帯用電子機器の普及が目を見張る勢いで進んでいる。これらの携帯用電子機器は、高性能・高機能はもとより、小形・軽量・薄形という携帯性の良さとともに、長時間動作（低消費電力）が製品の価値を左右する。

そのため、機器で使用されるLSIや機能部品では小形・高性能化と低消費電力化が急速に進展している。これらのLSIや機能部品への電力供給は、従来、1つの電源（DC-DCコンバータ）から供給する集中給電方式が主流であったが、現在では部品の近くにDC-DCコンバータを分散し、電圧を変換するとともに機器の動作状態に合わせて電力供給をON・OFFするパワーマネジメント機能による省電力化が図られている。したがって、電子回路基板には多数のDC-DCコンバータが搭載されており、DC-DCコンバータの小形化・高効率化がますます強く求められている。

DC-DCコンバータを構成する部品のうち、制御回路やスイッチなどの半導体素子については、古くから薄膜部品化・集積化による小形化・低消費電力化が進められているものの、磁性部品やコンデンサ部品などのエネルギーを蓄える部品の薄膜化・集積化は遅れていた。しかしながら、旧来のバルクの磁性体コアとマグネットワイヤで構成する磁性部品では、より一層の小形・薄形化の要望に応えるのは困難である。このような背景から生まれたのが、スパッタリングや精密印刷技術、微細加工技術によって作製される薄形磁心や薄膜・厚膜磁心を用いたマイクロ磁気デバイスである。電力用マイクロ磁気デバイスの研究のルーツは1970年代の欧米に見られるが^{1,2)}、現在に至る系統的な研究の端緒を切り拓いたのは1984年に報告された白江らによる研究成果といえる³⁾。以降、海外も含め数多くの研究機関において研究開発が進められており、磁性部品単体レベルの小形化から、周辺部品も含めた電源モジュールレベルの小形化へ、さらには、供給先となるLSIパッケージやLSIチップに電源回路を搭載する技術へと進化を続けている。

本稿では、DC-DCコンバータの構成要素のうち体積

占有率が大きく、小形化の障害となっている磁性部品にフォーカスし、日本発祥のマイクロ磁気デバイスならびにそれらを搭載した超小型DC-DCコンバータの研究開発動向について述べる。

2. DC-DCコンバータの概要と給電形態の変化

本章では、DC-DCコンバータの基本回路を示し、小形化への方向性を示すとともに、低電圧・大電流化が進むLSI向けの電力供給形態の変化について述べる。

DC-DCコンバータの基本回路の代表例として、非絶縁の降圧型スイッチングコンバータの概略構成を図1に例示する。図中のスイッチはONとOFFを繰り返しており、パルス状に流れる電流を出力側のインダクタとコンデンサで平滑して出力する。出力する電圧の制御はこのスイッチのON時間とOFF時間の比率を調整して行われている（PWM制御の場合）。

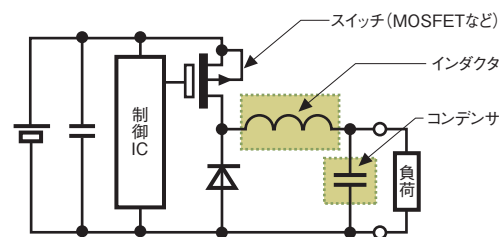


図1 非絶縁降圧コンバータの概略構成

したがって、スイッチング式DC-DCコンバータの小形化の方向性は、スイッチング周波数を高周波化してエネルギー部品であるコンデンサや磁性部品の必要容量を低減させることとなる。しかしながら、高周波化に伴ってスイッチング損失が増加するため、最適なスイッチング周波数は両者のトレードオフによって決定される。このスイッチング周波数は、以前は数100kHz程度であったが、現在では数MHz程度まで高周波化が進み、必要なインダクタンス値も一桁程度低下している。

一方、DC-DCコンバータの供給先となるLSIでは、微細化により動作電圧が1V程度に低下している。この低電圧化による電圧マージンの減少や、高集積化による大

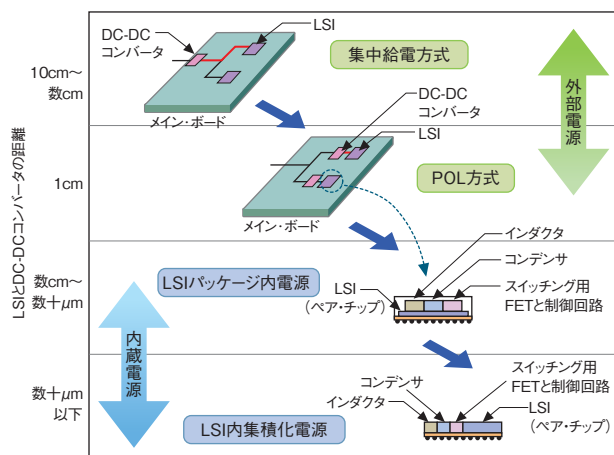


図2 LSIとDC-DCコンバータの距離と給電方式⁴⁾

電流化に伴って増加する配線抵抗による電圧降下やインダクタンス成分による電圧変動の課題が顕在化したため、電源をLSIの近くに配置して配線長を削減した分散給電方式 (POL: Point of Load) が広く用いられるようになってきている。

図2は、LSIと電源間の距離と給電形態のトレンドを示したものである⁴⁾。LSIの低電圧・大電流・高速化に伴う配線長削減の課題に対して、以前の集中電源方式から電源をLSIの直近に配置するPOL方式へ、さらには、LSIのパッケージ内に電源を実装する方式、その先の技術としてLSIチップ内へ電源が集積化されていくトレンドが示されている。

3. マイクロ磁気デバイスと超小型DC-DCコンバータの開発事例

本章では、スイッチング電源向けに開発された電力用マイクロ磁気デバイスと、これらを搭載したDC-DCコンバータの開発事例について紹介する。

はじめに、薄膜磁気ヘッドの製造技術 (ドライプロセス) を用いて作製した事例⁵⁾、続けて薄膜コイルの弱点であるコイル抵抗の削減手段として湿式めっき厚膜プロセスを導入した事例⁷⁾、基板として高比抵抗のフェライト基板を使用し巻線を湿式めっきにより直接形成することで低背丈化とコイル抵抗の削減を両立した事例⁸⁾、最後に多層プロセス技術を用いたインダクタ内蔵フェライト基板の事例⁹⁾をそれぞれ紹介する。

3.1 長円形スパイラル形インダクタ搭載電源

図3は、コイルの外側に磁性体を配置する外鉄形インダクタで長方形の磁性膜と長円形スパイラルコイルで構成する長円形スパイラル形薄膜インダクタの試作例である。チップサイズは5.5×4.0mmである。導体幅は100 μ m、線間隔は20 μ m、各層の厚さは、磁性層15 μ m (7層膜)、導体層は15 μ mである。この長円形スパイラル形薄膜インダクタは、矩形磁性膜と平面コイルとを組み合わせた

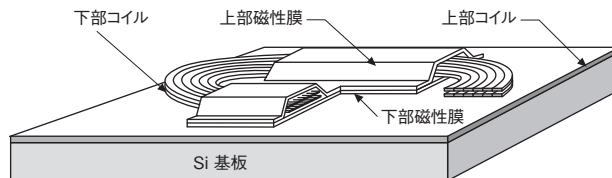


図3 長円形スパイラル形薄膜インダクタの構造模式図⁵⁾

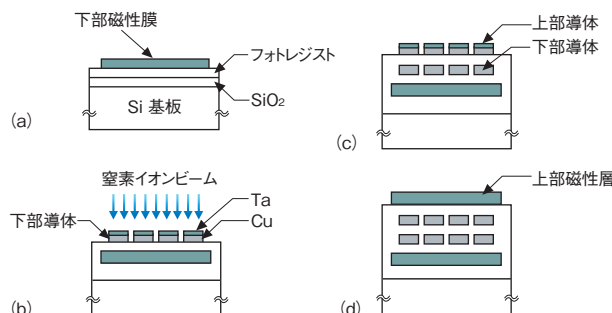


図4 薄膜インダクタの製造プロセス概略⁵⁾

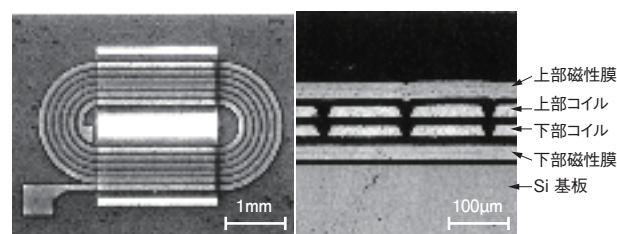


図5 薄膜インダクタの平面写真 (左) と断面写真 (右)⁵⁾

構造を持つため、磁性膜に一軸異方性を誘導させることによる磁性膜損失の低減と、スルーホール数が少ない平面コイル採用によるコイル抵抗の低減を両立できる特徴がある。

図4に製造プロセス概略図を示す。薄膜インダクタの作製には薄膜磁気ヘッドの製造プロセスの一つであるドライプロセス⁶⁾を使用し、成膜ならびにエッチングにはイオンビームスパッタリング装置を使用している。基板にはSiウエハ、磁性膜にはCo系アモルファスを、コイルはCuを、層間絶縁膜はフォトリソグを使用している。図5に製造過程 (下部コイル形成後) の平面写真と断面写真をそれぞれ示す。基板上に約0.1mmの厚さでインダクタが形成されている。

表1に作製した薄膜インダクタの主な仕様と特性値を示す。インダクタンス値は1MHzにおいて3.2 μ Hである。

図6は、作製した薄膜インダクタを搭載したハイブリ

表1 薄膜インダクタの主な仕様と特性⁵⁾

仕様	構造	長円形スパイラル
	導体材料	Cu
	磁性材料	Co系アモルファス
	チップサイズ (mm)	5.5×4.0×0.4
特性	インダクタンス	3.2 μ H
	直流抵抗	1.5 Ω
	等価直列抵抗	4.7 Ω @1MHz
	Q	4.2@1MHz

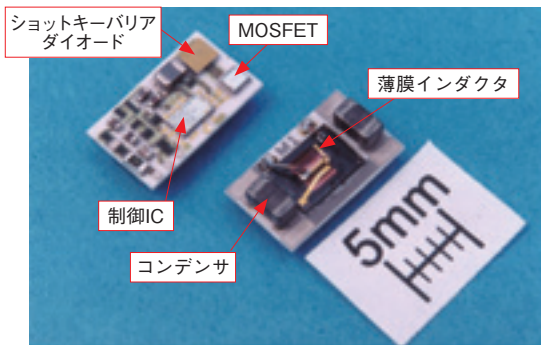


図6 薄膜インダクタを搭載したコンバータ⁵⁾

ッド形コンバータの写真である。多層セラミック基板の裏面に制御ICとMOSFETスイッチ、ショットキーバリアダイオードなどの半導体部品を搭載し、表面に上述の薄膜インダクタと入出力コンデンサを搭載した。コンバータのサイズは10×6×3mmである。

コンバータの入力電圧範囲4.0～6.0V、出力電圧を3.3Vとした場合の最大変換効率として85%、最大出力電力として1Wが得られている⁵⁾。

3.2 ダブルスパイラル薄膜インダクタ搭載電源

図7は、長方形ダブルスパイラルインダクタの試作例である。外鉄形で一軸異方性を導入した長方形の磁性膜と互いに逆巻のスパイラルコイルを並べて配置することにより相互インダクタンスを正とした構造を持ち、サイズは5.4×6.4mmである。

導体は湿式めっきによるCu厚膜、磁性体にはFeCoBC系のヘテロアモルファス磁性膜を使用している。磁性層の厚さは6 μ m(4層膜)、導体層50 μ mである。インダクタンス値は0.3 μ H、直流抵抗は0.19 Ω である。

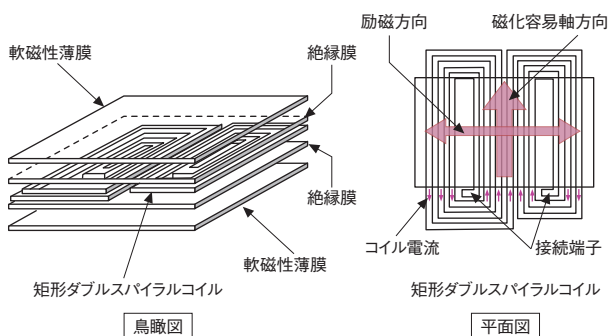


図7 ダブルスパイラル薄膜インダクタの構造模式図⁷⁾

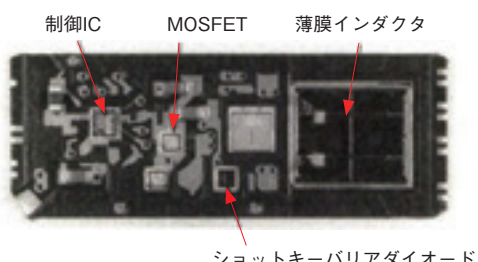


図8 ダブルスパイラル薄膜インダクタ搭載電源⁷⁾

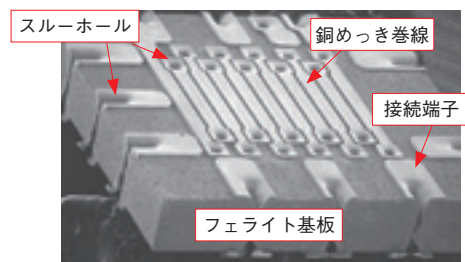
図8は、ダブルスパイラルインダクタを搭載したコンバータの写真である。スイッチング周波数5MHzの昇圧形コンバータ(13×14×2mm)に実装し、入力電圧4.2V、出力電圧4.7V、出力電力2Wの場合に86%の電力変換効率を達成している⁷⁾。

3.3 フェライトインダクタ搭載電源

図9は、0.5mm厚のNiZnフェライト基板を用いた薄形インダクタの写真である。あらかじめNiZn基板にスルーホールを作成したフェライトウェハ上に電解めっきで巻線構造を形成し、マイクロインダクタが完成する。高比抵抗のNiZnウェハを用いることにより、直接巻線を形成できることから、小形・低背文化と低抵抗化を同時に実現できている。3.5×3.5×0.6mmのサイズで直流のコイル抵抗は0.20 Ω と低く、2MHzにおけるインダクタンス値は1.64 μ H、等価直列抵抗は0.84 Ω である。

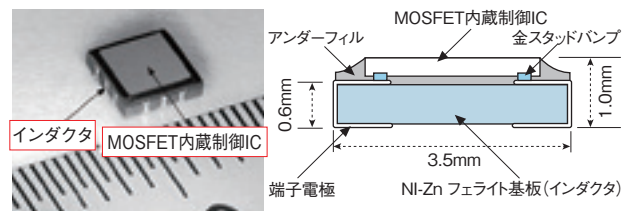
図10は、フェライトインダクタ上に制御回路と半導体スイッチを含むLSIチップを搭載したコンバータの写真と構造模式図を示す。コンバータモジュールの厚さとして1.0mmの低背文化を実現している。

スイッチング周波数1.8MHz、入力電圧3.6V、出力電圧3V、出力電流300mAの条件で92%という高い変換効



出典：「電気学会論文誌D」

図9 フェライトインダクタの写真⁸⁾



出典：「電気学会論文誌D」

図10 コンバータモジュールの外観写真(左)と構造模式図(右)⁸⁾



出典：村田製作所資料

図11 インダクタ内蔵フェライト基板を用いたコンバータ写真(左)と構造模式図(右)⁹⁾

率を達成している⁸⁾。

図11は、多層プロセス技術によりインダクタを形成したフェライト基板に電源ICとコンデンサを実装した厚さ1mm程度の電源モジュールの実用化例である。インダクタ内蔵基板のサイズは2.5×2.0×0.6mmであり、電源IC、コンデンサを搭載した状態でも厚さは1.1mmである。スイッチング周波数は6MHzと高く、入力電圧は2.7～5.5V、出力電圧は1.2～3.3V(固定)であり、最大出力電流は600mA、最大効率は90%である⁹⁾。

4. 磁気デバイスの集積化事例

第3章では、マイクロ磁気デバイスとそれらを搭載した超小型DC-DCコンバータについて述べたが、これら薄膜形成プロセスや厚膜形成プロセスで作製されるマイクロ磁気デバイスの最終目標は、電源用制御ICや供給先となるLSIとのワンチップ集積化である。

磁気デバイスと半導体との集積化は部品点数の削減と小形化、配線長削減による効果が期待できるだけでなく、LSIへの電源回路搭載によりLSIの動作状態に合わせた電圧制御や電圧変動に対する制御性の向上につながると期待されている⁴⁾。本章では、磁気デバイスの半導体への集積化事例について紹介する。

はじめに、電源のワンチップ化を目指して検討されたショットキーバリアダイオード上への薄膜トランス集積化事例¹⁰⁾、続いて電源制御IC上への薄膜インダクタ集積化事例¹¹⁾を、さらに究極のPOLを目指したLSIパッケージ内¹³⁾、LSIオンチップ電源¹⁵⁾の開発事例をそれぞれ紹介する。

4.1 ダイオードと薄膜トランスとの集積化事例

図12は、ワンチップ電源への第一ステップとして作製した整流ダイオード一体形薄膜トランスの写真である。

ショットキーバリアダイオードを作り込んだSiウエハ上に、3.1節と同様のドライプロセスを使用して巻線形のトランスを直接形成・一体化している。サイズは5×5mm、厚さはダイオード付基板を含めて0.4mmである。ダイオード上への磁気デバイス形成プロセスの前後

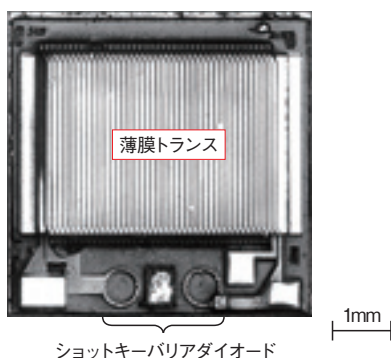
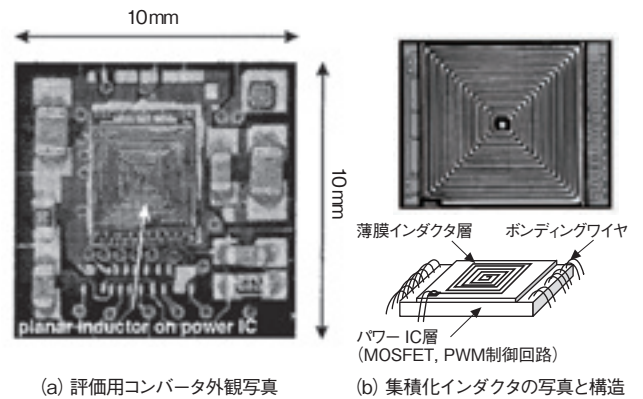
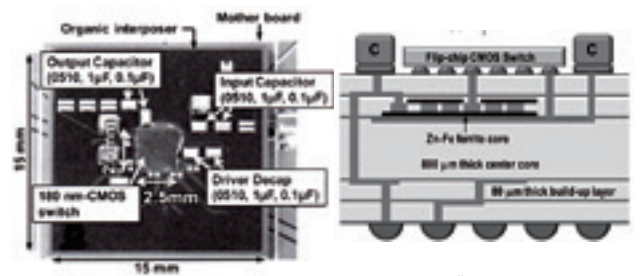


図12 整流ダイオード一体形薄膜トランスの平面写真¹⁰⁾



(a) 評価用コンバータ外観写真 (b) 集積化インダクタの写真と構造
出典：電子情報通信学会技術研究報告
図13 薄膜インダクタ搭載ワンチップコンバータ¹¹⁾



出典：J. Magn. Soc. Jpn
図14 インターポーザ内蔵電源の写真(左)と断面構造(右)¹³⁾

で特性劣化が見られないことを確認するとともに、スイッチング周波数15MHzの一石フォワード形コンバータに集積化チップを実装し、正常な動作を確認している¹⁰⁾。

4.2 電源用ICとインダクタとの集積化事例

図13は、電源用制御回路とMOSFETを集積化した電源用IC上に薄膜インダクタを直接形成・一体化したワンチップ電源の第1号である。5×4mmの半導体チップ上に3×3mmのスパイラル形薄膜インダクタを形成している。このワンチップ電源はスイッチング周波数3MHz、入力電圧4V、出力電圧3V、出力電力1Wにおいて変換効率82%が得られている¹¹⁾。

4.3 LSIパッケージへの集積化例

LSIへのオンチップ集積化の前段階として、LSIパッケージ内に集積化電源回路を搭載する研究開発が進められている¹²⁾。

図14は、フェライトインダクタを内蔵した有機インターポーザ^{注)}表面に180nm-CMOSスイッチを実装したコンバータの写真と断面構造図である。スイッチング周波数50MHz、入力電圧2V、出力電圧0.855V、出力電流1Aにおいて変換効率68%が得られている¹³⁾。

4.4 LSIオンチップ電源の研究開発例

LSIへのオンチップ集積化を目指し、90nm-CMOSプロセスを用いたスイッチング周波数233MHzの4相スイッチングコンバータチップが発表されている。入力電圧

1.4V, 出力電圧1.1V, 出力電流0.4Aにおいて変換効率83.2%が得られている。スイッチング周波数を数百MHzまで高め、4相化によりインダクタンス値を低減し、6.8nHの空心インダクタをLSIパッケージ上に搭載している¹⁴⁾。

さらに、90nm-CMOSプロセスを用いて7層のメタルプロセスの最上部に数百 μ m角の4ターンの外鉄形スパイラルインダクタを形成した例が報告されている。CoZrTa磁性膜でコイルを囲むことにより、単位面積当たりのインダクタンス値が空心の場合に比べて1桁以上増大することが示されている¹⁵⁾。

5. おわりに

これからも生活に欠かせないものとして携帯情報端末は進化を続け、小さく・軽く・長時間使用への要求がやむことはない。そのニーズに応えるために、素子の低消費電力化、バッテリーの高エネルギー密度化とともにDC-DCコンバータの重要性はますます高まると想定される。これまでのパッシブな安定化電源としての機能だけでなく、今後は供給先となるLSIの動作状態と連携したアクティブな制御機能も求められており、電源回路はワンチップ化、LSIへのオンチップ化へと進化し続けると考えられる。

[注記]

注) インターポーザ：半導体チップとパッケージ基板の間に挿入し、半導体チップの微細パターンとパッケージ基板の粗パターンのピッチを変換する役割を担う

[参考文献]

- 1) N. Saleh and A. Qureshi : Permalloy Thin-Film Inductors, Electronics Letters, Vol.6, No.26, pp.850~852, 1970.12
- 2) R. F. Soohoo : Magnetic thin film inductors for integrated circuit applications, IEEE Trans. Magn., Vol.MAG-15, No.6, pp.1803~1805, 1979.11
- 3) K. Kawabe, H. Koyama and K. Shirae : Planar Inductor, IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-20, No.5, pp.1804~1806, 1984.9
- 4) 大石基之, 進藤智則 : 電源もチップに載る, 日経エレクトロニクス, pp.81~101, 2005.8
- 5) M. Mino, K. Tsukamoto, K. Yanagisawa, A. Tago, and T. Yachi : A Compact Buck-Converter Using a Thin-Film Inductor, in Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp.422~426, 1996.3
- 6) 田子章男, 柳沢佳一, 谷内利明, 三野正人 : ドライブプロセスによる薄膜トランスの作製, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-90-45, pp.103~112, 1990.3
- 7) 佐藤敏郎, 溝口徹彦 : プレーナインダクタの開発と小型電源への応用, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-97-4, pp.15~20, 1997.1
- 8) 片山靖, 江戸雅晴, 伝田俊男, 川島鉄也, 二宮保 : モバイル機器用CMOS DC-DCコンバータの最適設計手法, 電気学会論文誌D, 124, No.10, pp.1043~1052, 2004
- 9) 村田製作所資料 : <http://www.murata.com/ja-jp/about/newsroom/news/product/power/2012/0215>, 2012.2.15
- 10) M. Mino, T. Yachi, A. Tago, K. Yanagisawa, and K. Sakakibara : Planar Microtransformer With Monolithically-Integrated Rectifier Diodes For Micro-Switching Converters, IEEE Trans. Magn., Vol.32, No.2, pp.291~296, 1996.3
- 11) 片山靖, 菅原聡, 中澤治雄, 黒木一男 : 薄膜インダクタとパワー半導体を集積したモノリシックDC/DCコンバータ, 信学技報, EE-99-32, pp.23~28, 1999.11
- 12) T. Sato, M. Sonehara, H. Kobayashi, F. Sato, K. Hagita, R. Takeda, N. Matsushita, T. Fujii, S. Nakazawa, H. Shimizu, K. Kobayashi, Y. Shinozuka, H. Fuketa, K. Ishida, M. Takamiya, and T. Sakurai : Magnetic core power inductor embedded in glass/epoxy interposer toward power supply integrated in LSI Package, invited, The 3rd International Workshop on Power Supply on chip (PowerSoC2012), San Francisco, USA, S-7-2, 2012.11
- 13) K. Hagita, Y. Yazaki, Y. Kondo, M. Sonehara, T. Sato, T. Fujii, K. Kobayashi, S. Nakazawa, H. Shimizu, T. Watanabe, Y. Seino, N. Matsushita, Y. Yanagihara, T. Someya, H. Fuketa, M. Takamiya, and T. Sakurai : CMOS Switch Buck DC-DC Converter Fabricated in Organic Interposer with Embedded Zn-Fe Ferrite Core Inductor, J. Magn. Soc. Jpn., 39, 71-79, 2015
- 14) P. Hazucha, G. Schrom, J. Hahn, B. A. Bloechel, P. Hack, G. E. Dermer, S. Narendra, D. Gardner, T. Karnik, V. De, and S. Borkar : A 233-MHz 80%-87% Efficient Four-Phase DC-DC Converter Utilizing Air-Core Inductors on Package, IEEE J. Solid-State Circuit, 40, pp.838~845, 2005.4
- 15) D. S. Gardner, G. Schrom, F. Paillet, B. Jamieson, T. Karnik, and S. Borkar : Review of On-Chip Inductor Structures With Magnetic Films, IEEE Trans. Magn., 45, pp.4760~4766, 2009.10



みの まさと
三野 正人

エネルギー技術部長
情報通信用電源システム, 再生可能エネルギーシステム, ICT-空調-給電統合制御システムの技術評価・コンサルティング業務に従事
電気学会, 電気設備学会, 日本金属学会, IEEE会員

Synopsis

Trends in the Development of Micro-magnetic Devices for Power Supplies and Micro DC-DC Converters

Masato MINO

With the recent spread of mobile electronic devices and wearable devices, the adoption of ultra-compact power supply devices (DC-DC converters) is significantly contributing to the downsizing of devices.

This paper presents trends in the development of micro-magnetic devices for power supplies aimed at the downsizing of DC-DC converters and the micro DC-DC converters in which they are used.

Firstly, the paper presents an overview of DC-DC converters and then goes on to talk about trends in power supply systems in electronic devices that are changing according to LSI miniaturization and low-voltage operations.

After presenting examples of the development of micro DC-DC converters, the paper finally discusses trends in the development of LSI-mounted power supply circuit, in other words “on-chip power supplies”.