積層基板構造による小型広帯域コイルの検討

鈴木 洋一朗^{*1,*4}, 河野 秀一^{*2}, 片岡 良平^{*3}, 木村 友則^{*3}, 桑野 博喜^{*5}

Study of compact and broad spectrum coil by the laminated substrates structure

Youichirou SUZUKI^{*1,*4}, Shuichi KOUNO^{*2}, Ryohei KATAOKA^{*3},
Tomonori KIMURA^{*3} and Hiroki KUWANO^{*5}^{*1,*2} NIPPON SOKEN, INC. 14 Iwaya, Shimohasumi-cho, Nishio-shi, Aichi 445-0012, Japan^{*3} DENSO CORPORATION 1-1, Showa-cho, Kariya-shi, Aichi 448-8661, Japan^{*4,*5} Department of Nanomechanics, School of Engineering, Tohoku University
6-6-01 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 980-8579, Japan

Received 25 December 2014

Abstract

We develop compact and broad spectrum coil for application of the current sensor. We propose the laminated substrates type coil using PALAP (Patterned prepreg Lay up Process) substrates excellent in high frequency characteristics and miniaturization, and we verify that frequency band of 1.2GHz and thickness of 0.7mm could achieve with a prototype.

Key words : Current sensor, Broad spectrum, Laminated substrate, PALAP, Electromagnetic induction, Rogowski coil, Car electronics, Energy harvester

1. 緒 言

近年、自動車の電動化が進展し、インバータや DC-DC コンバータ等パワーエレクトロニクス製品の研究開発が活発に進められている。上記パワーエレクトロニクス製品の開発においては、更なる小型、軽量化を実現するため、スイッチング損失低減に向けた高速スイッチング技術がキー技術となっている。スイッチング素子においても、従来の IGBT や MOS に比べ高速スイッチングが期待できる GaN, SiC, SJ-MOS 等次世代素子の開発が進められている。

しかしながら、スイッチング速度向上の背反として、高周波リンギングの発生によるノイズの増大を招くこととなり、高効率化と低ノイズ化を両立できるスイッチング技術の開発が求められている。

上記高効率および低ノイズスイッチング技術の開発においては、スイッチング時に発生する高周波リンギング電流を高精度に計測評価する技術、また将来的には上記電流をセンシングしスイッチング制御に反映することも必要となってくる。パワエレ回路の大電流を捉える方法として、ロゴスキーコイル式の電流センサが提案されている(石山, 2002)(岡田, 井上, 2002)。しかしながら、次世代の高速スイッチング素子においては、発生するリンギングの周波数成分も高周波化しており、周波数帯域が十分に得られないことが課題となっている(Oates, et al., 2002)(Qing, et al., 2006)。本研究では、リンギング電流を高精度に計測することを目的とし、市販の広帯域電流プローブ(ピアソン社製, 2877)では周波数帯域が 200MHz までであるのに対し、将来のスイッチングデバイスの高速化に向けて、1GHz 以上の広帯域化を目指す。また、パワエレ回路では大電流を流すため、回路配線が持つインダクタンス成分が無視できず、極力短く配線設計することが必要となる。しかしながら、電流センサを挿入するためには一定の配線長が必要となり、そのサイズが大きな場合には、センサ挿入用の追加配線によりイ

No.14-00696 [DOI: 10.1299/transjsme.14-00696], J-STAGE Advance Publication date : 6 July, 2015

^{*1} 正員, (株) 日本自動車部品総合研究所 (〒444-0012 愛知県西尾市下羽角町岩谷 14)^{*2} (株) 日本自動車部品総合研究所^{*3} (株) デンソー (〒448-8661 愛知県刈谷市昭和町 1-1)^{*4} 正員, 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)^{*5} 正員, フェロー, 東北大学大学院工学研究科

E-mail of corresponding author: youichirou_suzuki@soken1.denso.co.jp

ンダクタンス成分の増大を招き、実回路と異なる高周波電流を計測評価せざるを得ない。また、センシング素子として回路と一体に組み込む場合にも、大型化することが課題となっている。

上記センサの課題に対して、計測周波数の広帯域化、小型化（プローブ厚みの薄型化）の観点から、積層基板構造によるコイルの開発に取り組んだ。基板には、高周波特性に優れており、且つ薄型化も実現できる PALAP（Patterned prepreg Lay up Process）基板（片岡他，2005）（Hayashi, et al., 2004）（矢崎他，2005）を用いて積層基板構造を形成した。また、PALAP 基板は電子部品の内蔵が可能であることから、センサ出力を後処理する回路（増幅回路や積分回路など）も一体で作りこめるため、素子、回路全体を見たときの小型化においても有効である。

本研究では、電流センサのスペック（周波数帯域 1GHz 以上、センサ挿入部 5mm 以下）を満たす積層基板構造による小型広帯域コイルを試作し、厚み 0.7mm、周波数帯域 1.2GHz が得られることを検証した。

2. ロゴスキーコイルの構造と原理

ロゴスキーコイルの構造を図 2 に示す。ロゴスキーコイルは環状体(通常は空芯)に導体を均一に巻いたコイルと、コイルの中を通過して巻き戻される戻り線から構成されるもので、このコイルの内側を貫通する交流電流 I を磁束変化として検出する(磁束変化を打ち消す起電力が発生)。上記コイルは外部磁界に対して 1 ターンのループアンテナとなるが、戻り線を追加することで外部磁界の影響をキャンセルできる特長を持つため、外乱(外部磁界)の影響を受けず高精度な電流計測が可能となる(伊藤, 1967)(木下, 1973)。

Fig. 1 Conventional Rogowski-coil

$$e_s = \frac{\pi r^2 \mu_0 N}{l} \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

$$L = \frac{\pi r^2 \mu_0 N^2}{l} \quad (2)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

r : コイル半径[m]

N : コイルの巻き数

l : コイルの周回長[m]

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}]$$

図1において、ログスキーコイルの起電力 e_s [V] は、コイルの半径 r 、巻き数 N 、周回長 l とすると式(1)で算出できる。電流変化率に比例した起電力が得られ、積分処理することで電流値が求められるが、本論文では積分処理の具体的な手法については検討の対象外とし、ログスキーコイルの広帯域化の検討を行った結果を述べる。またコイルの自己インダクタンス L [H] は式(2)で算出できる。周波数帯域を向上させるためには自己インダクタンス L とコイルの寄生容量 C によって式(3)で算出できる共振周波数 f_c [Hz] を上げることが必要である。

3. 積層基板構造による小型広帯域ログスキーコイル

本研究で検討した積層基板型ログスキーコイルの構造を図2に示す。任意の2層に基板パターンによって基板平面方向に放射状のラインを、またこれら2層の間の1層に同様に円周状のラインを形成し、これらの基板パターンを基板厚み方向にビア接続することでログスキーコイルを形成する。また、コイル外側を囲むように外部電界シールドを形成している。シールド面は上面、底面、外周及び内周の側面に形成するが、コイル内周の側面のシールド面については、コイル内側の電流から発生する磁界を検出できるように、コイル一周にわたるスリットを形成している。

また、本研究では基板に PALAP 基板を用いることを提案する。PALAP 基板の特長として、①低誘電率 ($\epsilon = 3.0$ at 1MHz~10GHz)、低誘電損失 ($\tan \delta = 0.003$ at 1MHz~75GHz) である、②基板厚みが極薄 (50um/層) であり、また、熱可塑性樹脂を用いているため可とう性を持つ、③連続ビアにより基板厚み方向に導体面が作製可能である、④基板内にコンデンサやダイオードなど回路部品内蔵実装が可能であることが挙げられる。①、②の特長を活かして積層基板型ログスキーコイルの高周波化、薄型化を実現している。また、③の特長を活かして基板厚み方向の外部電界シールド面を形成しており、外来ノイズの混入を防止し電流センサの精度確保が期待できる。また、④の特長を活かして電流センサのアンプ回路等の周辺回路部品を内蔵実装できるため、周辺回路含めて小型化が期待できる。よって、提案する PALAP 基板を用いた積層基板構造のコイルは、主に広帯域特性と小型化（プローブ厚みの薄型化）の2点で優れており、これを量産に適した低コストな製造方法にて実現することができる。

Fig. 2 The structure of laminated substrates type Rogowski-coil

4. 積層基板型ログスキーコイルの設計

ログスキーコイルの高周波化においては、上記の通り自己インダクタンス L と容量 C を低減することが必要となる。自己インダクタンス L の低減については、巻き数の減少、コイル径の減少、コイル線幅の増大が有効であ

る．巻き数及びコイル径の減少については感度の低下が背反となるが，本研究ではパワエレ回路の比較的大電流の計測を対象としているため許容している．また，容量 C の低減については，コイルとシールド面間やコイルと戻り線間の結合容量が支配的であり，基板厚み方向の結合距離の増大や結合面積(コイル線幅)の減少が有効である．今回のログスキーコイルは自己インダクタンス L の低減を目的に，巻き数を減らしているため，コイルの分布容量については，上記結合容量に対し十分小さく，影響は無視できると考える．

今回，ログスキーコイル全体を PALAP 基板 14 層で厚み 0.7mm とし， 1. 結合容量が最小となるようコイルを形成する層を決定， 2. 高周波特性が最適となるようコイルの線幅を決定するといった手順でログスキーコイルの高周波化を検討した．

4・1 コイル形成層の検討

結合容量 C が最小となり共振周波数を最も向上できるコイル形成層をシミュレーション (CST 社製の MW STUDIO を解析ソフトとして使用) にて検討した．なお， S パラメータ通過特性 (s_{21} :Port1→Port2) にて周波数特性を評価しており，上記通過特性が周波数に対して比例関係にある範囲がセンシング可能な帯域となる．シミュレーション構成(コイル全体および断面)を図 3, 4 に示す．図 3 に記載のシミュレーション構成は，第 5 章の図 8 にあるネットワークアナライザを用いた 2 ポート測定を模擬した構成 (Port1 が 50Ω 終端させたマイクロストリップラインに被測定電流を供給する入力ポートに相当，Port2 がログスキーコイルの出力ポートに相当し，もう片側は 50Ω 終端) である．コイル形成層を (a)～(c) の 3 通りとした時の， S パラメータ通過特性(s_{21})のシミュレーション結果を図 5 に示す．

(a) の構成においては，シールド面とコイル間の距離が近いいため，上記間での結合容量 C が大きく，共振点が 1.9GHz 付近に出ている．(b) の構成においては，シールド面とコイル間の距離が増大し，共振点が 3GHz まで向上している．(c) の構成においては，シールド面とコイル間の距離が更に増大するが，一方でコイルと戻り線間の距離が小さく，共振点が 1.4GHz 付近に出ている．これらの結果より，(b) の構成が結合容量を最も小さく，共振周波数を向上できる構成と考える．

Fig. 3 Whole diagram of simulation

Fig. 4 Cross section diagram of simulation

Fig. 5 s_{21} result of simulation when coil position changed

4・2 コイル線幅の検討

上記(b)の構成において、コイル線幅の周波数特性への影響をシミュレーションにて検証し、最適となるコイル線幅を検討した。コイル線幅を 0.2mm～0.6mm と変えた時の S パラメータ通過特性(s_{21})のシミュレーション結果を図 6 に示す。コイルの線幅を太くすると、コイルの自己インダクタンス L は小さくなるが、コイルとシールド面の結合面積が大きくなり、結合容量 C が大きくなる。

コイル線幅 0.2mm 及び 0.4mm においては、コイル線幅が細く、自己インダクタンス L が増大するためにコイルのインピーダンスが増大し、高周波域における感度が低下する。一方、コイル線幅 0.5mm 及び 0.6mm においては、コイル線幅が太く、結合容量 C が増大するためにコイルのインピーダンスが低下し、高周波域における感度が増大する。コイル線幅 0.45mm において、感度の高周波数特性が最も高周波域まで比例関係を持っており、最適な線幅と考える。

Fig. 6 s_{21} result of simulation when coil line width changed

5. 積層基板型ロゴスキーコイルの試作・評価

試作した積層基板型ロゴスキーコイル式電流センサの概観写真を図7に示す。PALAP 基板 14 層の積層構造とし、厚み 0.7mm、ロゴスキーコイル部のサイズが 10mm×10mm となっている。戻り線側を 50Ω 終端、コイル側をオシロスコープに接続して計測する。ロゴスキーコイル部からの取り出し線はマイクロストリップライン構造によって特性インピーダンスが 50Ω となるよう設計している。

試作品の周波数特性を S パラメータ通過特性 (s_{21}) にて実測評価した。測定構成を図8に示す。試作品評価用基板として、試作したマイクロストリップライン基板を用いている。センサ挿入部として 2mm のスリットを設けており、ロゴスキーコイルにバスバーを通してマイクロストリップライン基板に接続する構成で評価した。

Fig. 7 Picture of Rogowski-coil prototype

Fig. 8 Measurement composition of S_{21} characteristics of Rogowski-coil

Sパラメータ通過特性(s_{21})の実測結果を図9に示す. 今回試作した PALAP 基板製の積層基板型ロゴスキーコイルでは, 1.2GHz まで良好な直線性(誤差 $\pm 5\%$ 以内の周波数範囲)を持つことが確認でき, 目標帯域とした 1GHz 以上を達成している. 本試作品により, 市販の広帯域電流プローブ(ピアソン社製, 2877)の周波数帯域 200MHz では計測できない, 帯域 1.2GHz までの高周波電流がセンシング可能と考える. なお, 30MHz 以下の周波数帯では Sパラメータ通過特性(s_{21})の測定値にばらつきが見られるが, これは計測器の計測限界領域であり, ノイズフロアの影響を受けているためと考える.

Fig. 9 Measurement result of s_{21} characteristics

6. 結言

本研究では、電流センサへの応用を想定し、PALAP 基板を用いた積層基板構造の小型広帯域コイルを検討した。電流センサのスペックとしてパワーエレクトロニクス回路のスイッチング時に発生する高周波リンギング電流を高精度にセンシングする(周波数帯域 1GHz, センサ挿入部 5mm 以下)ことを考え、高周波化、薄型化を狙った積層基板型広帯域ロゴスキーコイルを開発した。基板については、高周波特性に優れた PALAP 基板を用いることを提案し、高帯域化のためのコイル構造として、コイルを形成する層と結合容量との関係、またコイル線幅と周波数特性との関係をシミュレーション検討により、最適な高周波特性を持つコイル構造を決定した。積層基板型ロゴスキーコイル試作により、厚み 0.7mm, 帯域 1.2GHz が得られることを明らかにした。また、本研究で提案する積層基板型コイルの応用展開として、近年注目が高まるエネルギーハーベスト技術において、電磁誘導型の振動発電素子にも適用できると考える。電磁誘導型の振動発電素子ではコイルの体格が大きくなることが課題の一つとなっているため、小型コイルを適用し、また、整流回路などの周辺回路も一体化することで、素子および回路全体の小型化が期待できると考える。

文 献

- Hayashi, A., Nakagoshi, M., Murai, T., Sera, N., Ogihara, C., Oikawa, R., Suzuki, K., Kataoka, R. and Ozaki, Y., A new FCBGA packaging technology based on the PALAP process, The 7th VLSI Packaging Workshop of Japan, Session 5.3(2004).
- 石山泰士, 平型 IGBT 素子内部電流の測定, 平成 14 年電気学会全国大会 4-010(2002).
- 伊藤秀夫, 電子回路変成器, 誠文堂新光社(1967), pp.31-65.
- 片岡良平, 近藤宏司, 鈴木克信, PALAP 基板による半導体パッケージ技術の開発, デンソーテクニカルレビュー Vol.10 No.2 (2005), pp.77-84.
- 木下隆博, 電気数学Ⅲ, オーム社(1973), p.59.
- Oates, C.D.M., Burnett, A.J. and James, C., The design of high performance Rogowskicoils, Proceedings of the International Conference on Power Electronics, Machines and Drives(2002), pp.568-573.
- 岡田章, 井上悟, プリント基板型ロゴスキーコイル電流センサの開発, 平成 14 年電気学会基礎・材料・共通部門大会論文集(2002), p.431.
- Qing, C., Hong-bin, L., Ming-ming, Z. and Yan-bin, L., Design and characteristics of two Rogowski coils based on printed circuit board, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.55, No.3(2006), pp.939-943.
- 矢崎芳太郎, 横地智宏, 片岡良平, 近藤宏司, 鈴木克信, 固層拡散接合を適用した PALAP 多層基板の開発, デンソーテクニカルレビュー Vol.10 No.2(2005), pp.85-89.

References

- Hayashi, A., Nakagoshi, M., Murai, T., Sera, N., Ogihara, C., Oikawa, R., Suzuki, K., Kataoka, R. and Ozaki, Y., A new FCBGA packaging technology based on the PALAP process, The 7th VLSI Packaging Workshop of Japan, Session 5.3(2004).
- Ishiyama, Y., Mesurment of Current in flat-packaged IGBT device, The Institute of Electrical Engineers of Japan 4-010(2002) (in Japanese).
- Ito, H., Electronic circuit transformer, Seibundo shinkosha(1967), pp.31-65 (in Japanese).
- Kataoka, R., Kondo, K. and Suzuki, K., Semiconductor packaging technology based on the PALAP process, Denso technical review Vol.10 No.2 (2005), pp.77-84 (in Japanese).
- Kinoshita, T., Electric mathematics, Ohmsha(1973), p.59 (in Japanese).
- Oates, C.D.M., Burnett, A.J. and James, C., The design of high performance Rogowskicoils, Proceedings of the International Conference on Power Electronics, Machines and Drives(2002), pp.568-573.
- Okada, A. and Inoue, S., Development of Rogowski coil current sensor using printed circuit board, Proceeding of Annual Conference of Fundamentals and Materials Society, IEE Japan(2002), p.431 (in Japanese).
- Qing, C., Hong-bin, L., Ming-ming, Z. and Yan-bin, L., Design and characteristics of two Rogowski coils based on printed circuit board, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.55, No.3(2006), pp.939-943.
- Yazaki, Y., Yokochi, T., Kataoka, R., Kondo, K. and Suzuki, K., A new Sn/Ag sintering alloy diffusion bonding technology for the PALAP process, Denso technical review Vol.10 No.2 (2005), pp.85-89 (in Japanese).