

IGBT モジュール用超小型電流センサの開発 : 高精度センサ構造の提案と専用設計環境の構築

古賀 仁大* 中島 健太 大村 一郎 (九州工業大学)
附田 正則 (北九州市環境エレクトロニクス研究所)

Development of ultra-small current sensor for IGBT modules
: Proposal of high accuracy sensor structure and Construction of original design method
Masahiro Koga*, Kenta Nakashima, Ichiro Omura, (Kyushu Institute Technology)
Masanori Tsukuda, (City of kitakyushu)

Ultra-small sensor applied print-circuit-board (PCB) technology has been developed. The current sensor has been realized high accuracy and smaller and thinner by principle of Rogowski coil and application of PCB technology. To apply for various structures of IGBT modules, we developed a program that can analyze the characteristics of the arbitrary shape sensor in MATLAB, and design the sensor in a short-time.

キーワード : 超小型電流センサ, IGBT, IGBT モジュール, ロゴスキーコイル, 高信頼モジュール, 内蔵センサ
(Ultra-small current sensor, Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT modules, Rogowski coil, Highly reliable module, Built-in current sensing)

1. はじめに

パワーデバイス・モジュールは省エネルギー社会のキーデバイスとして需要が拡大しており、今まで以上の信頼性が求められる。パワーモジュールの高信頼化を実現するためにはモジュールの全電流だけでなく内部のチップに流れる電流分布を正確に計測する必要がある。

代表的な市販の電流センサとして CT(Current Transformer) やロゴスキーコイルがある。それらは広く内蔵センサとして大型のパワーエレクトロニクス機器に適用されるほか、実験用として使用されている。しかし、低インダクタンス化したパワーモジュール、特にロープロファイル・モジュールに入れるには大きすぎる⁽¹⁻²⁾。また、市販の電流センサは安価でないため、センサを多く利用すると高コスト化が問題になる (図 1 参照)。

そこで我々はプリント回路基板 (PCB) 技術を用いた薄く、小型で低コストの PCB ロゴスキーコイルを開発した⁽³⁻⁷⁾。PCB ロゴスキーコイルはチップやボンディングワイヤ周辺の限られた空間に挿入することができる。したがって、パワーモジュールやパッケージに組み込む内蔵センサとして電流のモニタリングや、モジュールの電流分布分析に使用することができる。

	Commercialized sensor 1 (Rogowski coil)	Commercialized sensor 2 (CT)
Size of the sensor	25 [mm] 1.7 [mm]	28 [mm] 16 [mm]
Flexibility of the sensor	Have some flexibility	Solid
Uniformity of sensitivity inside current	±3%	None data
Noise by outside current	None data	None data
Size of the amplifier	Need a large amplifier 18.3cm×9.3cm×3.2cm	Amplifier unnecessary
Cost	not inexpensive	not inexpensive

図 1 代表的な市販の電流センサ特性

Fig. 1. Features of the typical commercialized current sensor

2. オリジナルツールによる設計環境の構築

〈2・1〉 ロゴスキーコイル設計ツールの開発

PCB ロゴスキーコイルの設計をするにあたり、予めノイズや感度を推定し設計するためには電流経路とコイル間の相互インダクタンスを算出する必要がある。市販の電磁界解析ソフトはモデルを離散化し、行列式を計算、それを繰り返し行い一定の誤差の範囲に収まるまで計算を繰り返す。さまざまなモデルが正確に解析を行える一方で計算時間が長く短時間での設計には不向きである。そのため我々は予

めノイズや感度を推定するための設計ツールを MATLAB 上で開発した。計算速度は市販のツールと比べ少なくとも 100 倍以上高速で、市販のツールを使うと数日程度はかかる計算を 30 分で行うことができる。(図 2 参照)

計算速度を向上させるために 2 つの手法を取り入れている。1 つがログスキーコイルの簡易モデルを使った計算と もう 1 つは積分計算を省くために相互インダクタンスを距離の関数でテーブル (データベース) 化する事である。簡易モデルについては、図 3 に示すように実物のモデルには多くの配線が密集しあうため複雑な構造となっている。これを送りや返りの配線をなくし、ログスキーコイルの原理的的最小構成要素を簡易モデルとして計算を行う。ログスキーコイルの巻線はそれぞれ独立するが、巻線ごとの相互インダクタンスの和を求めることでログスキーコイルの相互インダクタンスが計算できる。計算にはノイマンの公式を用いており、電流経路がコイルの面に対して垂直という条件で固定している。これによりループの③の配線は電流経路に対して垂直になり、計算を省くことが可能となる。相互インダクタンスのテーブル化は MATLAB 上でのノイマンの公式に含まれる積分計算を減らすために行っている。ノイマンの公式では 2 つの導体をそれぞれ積分することで導体間の相互インダクタンスが求まる。電流経路とコイル基板の厚さは変わらないのでそれらの間の相互インダクタンスを距離ごとに予め計算することで、距離のテーブルとして表すことができる。このテーブルを利用して、相互インダクタンスの計算を省略することで計算を減らすことができる。

簡易モデルによりノイマンの公式を適用することが可能になり、計算量が減少した。さらに相互インダクタンスをテーブル化することで計算を削減し、計算速度は飛躍的に向上した。

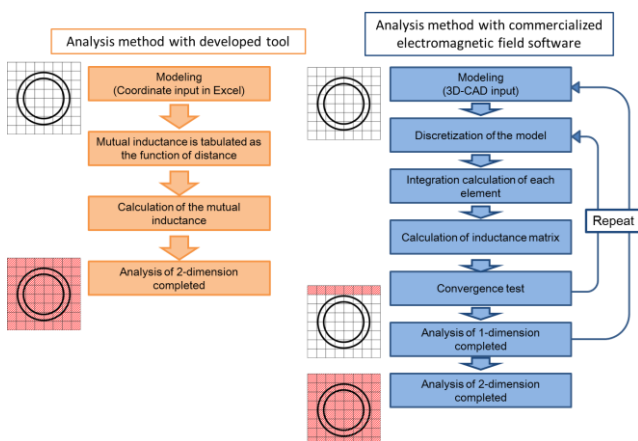


図 2 オリジナル設計ツールによる計算時間の短縮手法
Fig. 2. Shortening method of calculation time

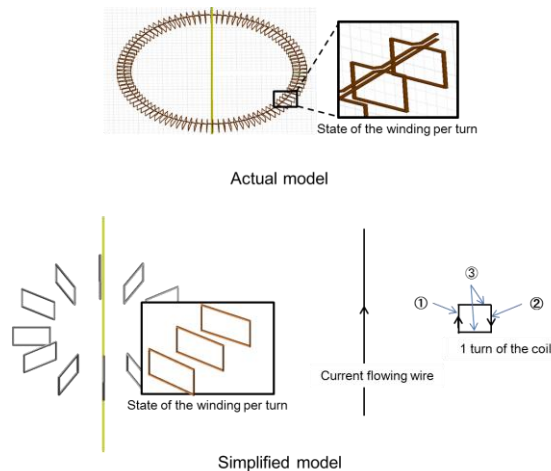


図 3 ログスキーコイルの簡易モデル
Fig. 3. Simplified model of Rogowski coil

〈2・2〉 設計ツールの評価と応用

設計ツールによって算出されるログスキーコイルと電流経路間の相互インダクタンス値は市販の電磁界解析ソフト Q3D との比較により妥当性を評価した。円形コイル、四角形コイルの評価では誤差の最大値は 5%であった (図 4 参照)。Q3D ではモデルを忠実に再現しており、簡易モデルにはないコイルの送りと返りの配線の影響が誤差として表れている。

実際に、開発した設計ツールによる解析結果を図 5 に示す。これは 30×30mm の面を 0.1mm 毎の電流経路の相互インダクタンス分布を示している。さらにログスキーコイルの座標入力によって計算を行っているため、どのような形状でも解析を行うことが可能である。この設計ツールによって予め任意形状のログスキーコイルのノイズや感度を推定できるようになった。

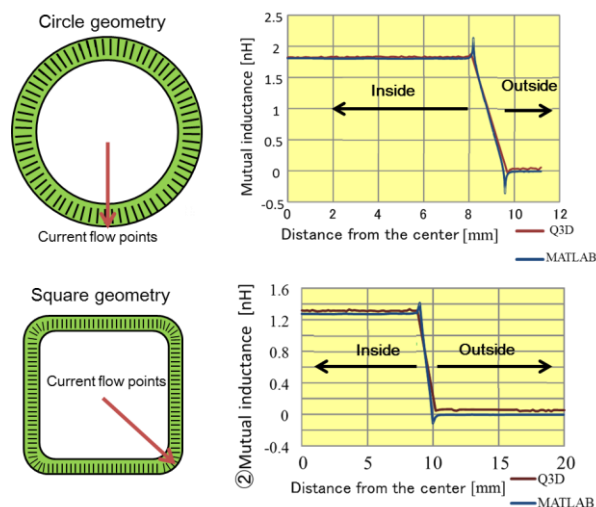


図 4 オリジナル設計ツールと市販の解析ソフトの相互インダクタンス比較

Fig. 4. Mutual inductance comparison with original tool and commercialized software

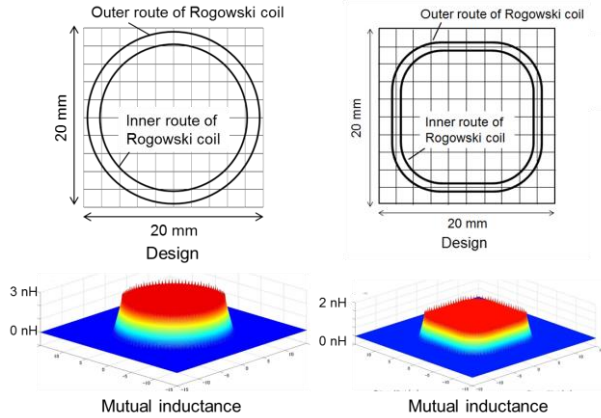


図 5 任意形状の電流路毎の相互インダクタンス分布
Fig. 5. Mutual inductance to current path for arbitrary geometries with original MATLAB based design tool

3. 新しいログスキコイルパターン

〈3・1〉 PCB 技術を用いたコイルパターンの提案

我々は、外部電流のノイズをキャンセルするため PCB 技術を用いたフィッシュボーンのコイルパターンを提案する。パターンは 4 層のプリント基板で、1 層目と 4 層目をスルーホールで貫通させることでコイルのメインパターンを構成している。

今回、ログスキコイルの外側と内側を流れる電流の感度評価のため、PCB 基板でフィッシュボーン、ノコギリ、三角、フィッシュボーンの戻り線なしの 4 つのコイルパターンを作製した (図 6 参照)。外部電流の影響は、提案するパターンおよび戻り線で不要な磁束を取り除くことによって低減される。提案しているフィッシュボーンパターンのコンセプトは PCB 技術により極限まで磁束が通過する不要なループを取り除くことである。一方、三角形やのこぎりコイルパターンは不要磁束を互いに相殺することで外部磁束の影響を減らしている。

作製したコイルは市販の電流センサプローブと比較しても十分小型かつ薄型である (図 7 参照)。センサータイプは、非クランプとクランプがある。

Pattern name	Fishbone	Saw	Triangle	Fishbone without return line
Pattern (3D)				
Pattern (2D-above)				

図 6 PCB を用い作成したコイルパターン

Fig. 6. Proposed fishbone pattern and typical coil pattern with PCB technology

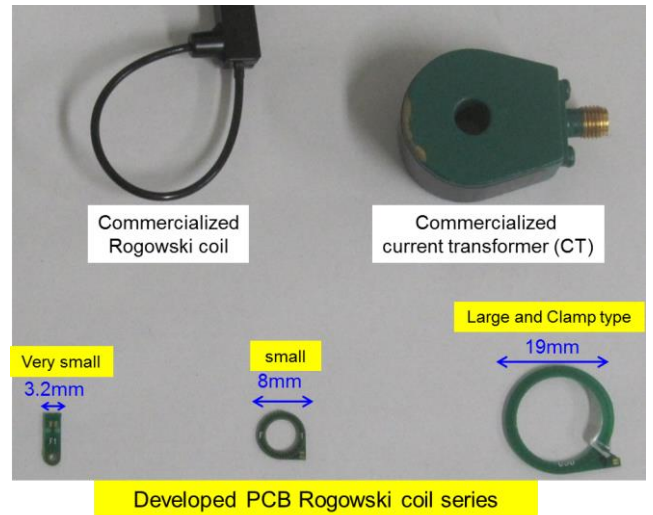


図 7 開発したコイルと市販のセンサ

Fig. 7. Developed PCB Rogowski coil and commercialized sensors/probes (The size is outer diameter of Rogowski coil)

〈3・2〉 外部ノイズと感度の評価

ノイズや感度は直径 9mm の PCB ログスキコイルを用いすべての方向によって評価を行った (図 8 参照)。図 8 に示す (a) ~ (d) はコイルの外側を流れる電流による影響の評価であり、(e) は PCB ログスキコイルの内側の電流による評価である。すべての評価は内側の中心を流れる電流で得た出力に対してそれぞれどの程度の出力があるかの比で表される。また、外側の電流の評価ではコイルと導線の間には厚さ 0.1mm の絶縁シートをはさみ密着させて測定した。

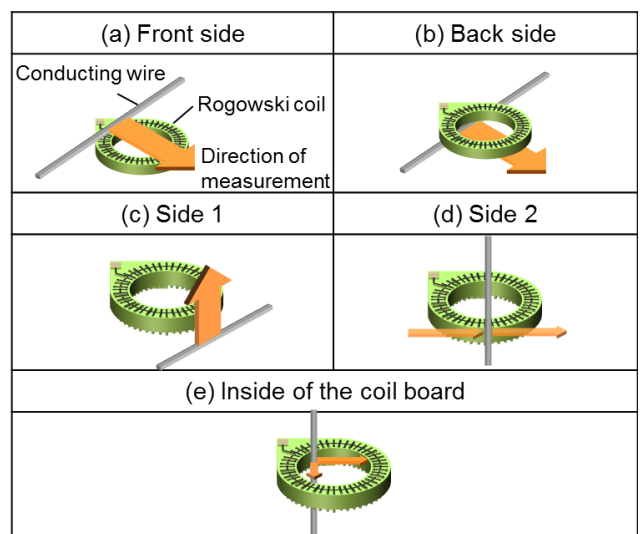
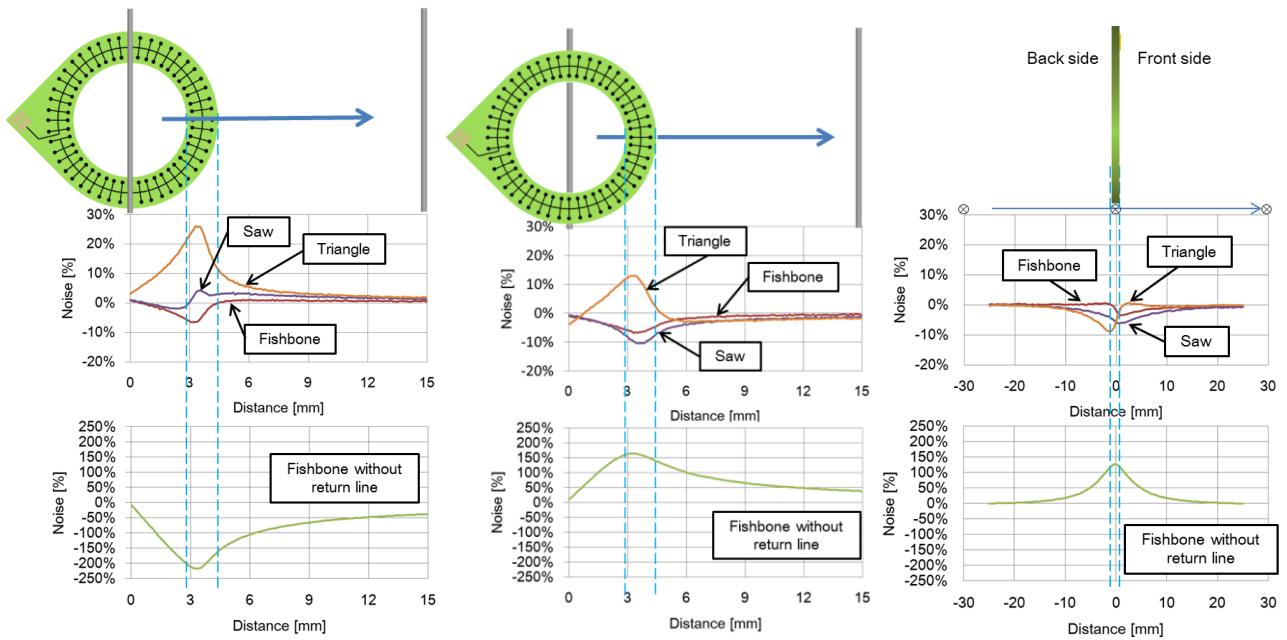


図 8 全方向からのノイズや感度の評価方法

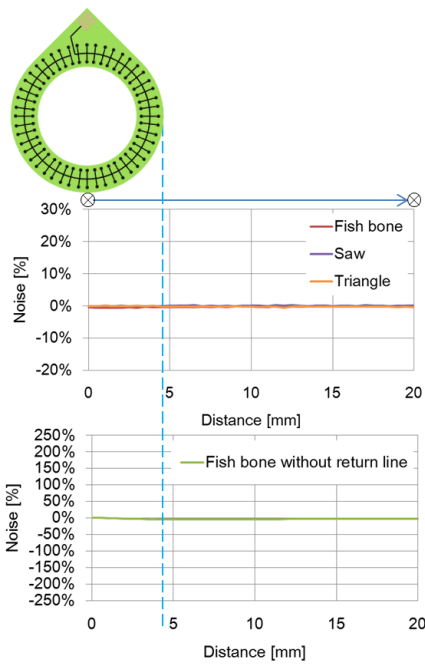
Fig. 8. Noise and sensitivity evaluation methods by every direction scanning



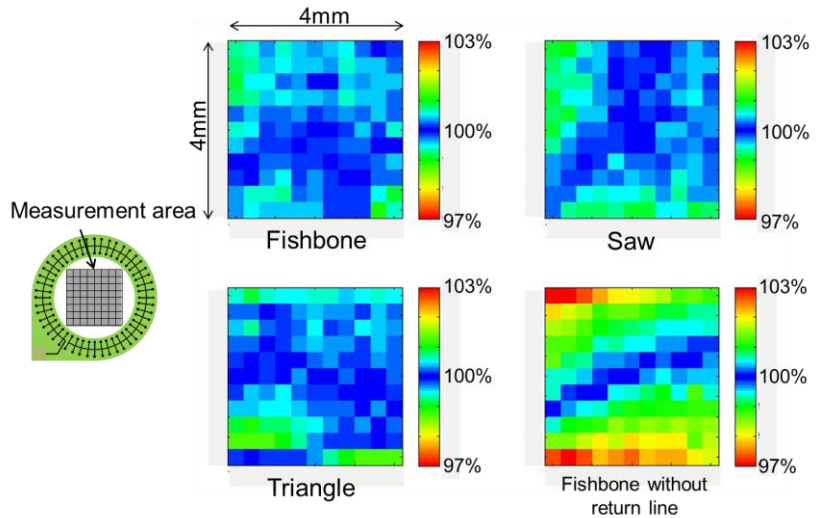
(a) Noise of the front side path

(b) Noise of the back side path

(c) Noise of the side path 1



(d) Noise of the side path2



(e) Experimental evaluation of sensitivity in the hole

図 9 開発したコイルと市販のセンサ

Fig. 9. Experimental evaluation of noise and sensitivity of in the hole (Central signal is 100 %)

この評価によってフィッシュボーンパターンコイルは他のパターンに比べ、外部電流によるノイズを最もキャンセルしていることが分かった (図 9 参照)。それぞれの評価は以下の通りである。表面、裏面での評価は戻り線の直上でノイズのピークを示した (図 9- (a), (b) 参照)。これは送りと戻り線のループがコイル基板に対して垂直な磁束の影響を受けるためである。それに加え、三角形パターンは基板に平行な磁束の影響も受けるため、ほかのパターンに比べノイズが増大している。また、ノコギリパターンの巻

線では戻り線を中心として両側にできるループが互いに磁束の影響を打ち消すことでノイズを低減している。しかし電流経路が戻り線の直上に位置した時、それらのループは磁束の影響を強めあいノイズを増大させる。結果として、図 9 (a) では行き返りのループの影響と巻線のループの影響が相殺してノコギリパターンは 4%の最小のノイズとなっているが、(b) ではこれらが相乗して影響するため、10%のノイズとなった。一方で、フィッシュボーンパターンは図 9 (a), (b) とともに 7%のノイズで、(b), (c) ではそれ

ぞれ 7%、3%と最小のノイズだった。不要な磁束の影響が少ない側面の電流経路 2 は他の 3 つの電流経路に比べノイズは非常に小さく、図 9 (d) に示すように戻り線を持つすべてのパターンで 0.7%以下のノイズであった。しかし、実験では電流経路がコイル基板に対して完全に垂直ではなく不要な磁束の影響を受けるため、戻り線のないパターンは 7%のノイズを示している。それぞれのコイルパターンにおける、最大のノイズはフィッシュボーンパターンが 7%、ノコギリパターンが 10%、三角形パターンが 26%、戻り線なしが 218%であった。提案したフッシュボーンパターンでは PCB 技術の進展によりさらなるノイズの低減が見込まれる。電流経路がコイルの内側を通過するときの評価では、感度のばらつきは-1.1%~0.7%であり、市販のログスキーコイルと同等またはそれ以上の均一性があることを実証した。

図 10 に実際に作製し、実験的な評価によって実証された PCB ログスキーコイルの特性を示す。市販の最小サイズの電流センサと比較して面積比で 1/8 程の非常に小さなサイズの PCB ログスキーコイルを作製した。PCB ログスキーコイルは固形ながら設計がフレキシブルに行えるため、市販のログスキーコイル同様に被測定物の形状の制約を受けることなく使用可能である。また、PCB 基板にいくつものログスキーコイルを作製するため、PCB ログスキーコイルの 1 つあたりの作製コストを抑える事ができ、市販の電流センサと比較して安価に作製できる。またフィッシュボーンパターンにより外部電流のノイズを最大 7%までに抑えられることと、市販のログスキーコイルと同等以上の感度均一性を示す事が判明した。







Size of the sensor		0.3cm × 0.3cm × 0.06cm
Flexibility of the sensor		Solid but designing is flexible
Uniformity of sensitivity inside current		±1% (circle geometry)
Noise by outside current		Maximum 7%
Size of the amplifier		Under development
Cost		inexpensive

図 10 開発した PCB ログスキーコイルの特性
Fig. 10. The feature of the developed sensor

4. モジュール電流の測定による実証

作製した PCB ログスキーコイルを使い、電流計測の実証実験を行った。DCB 基板に対して IGBT チップを並列に実装し、チップのボンディングワイヤに直径 10.4mm の PCB ログスキーコイルを通して電流を測定した (図 11 参照)。また、比較のためにチップに流れる全電流を CT で測定し

た。スイッチング回路は 5 Ω の抵抗負荷と 180 V の直流電圧で構成される。チップの電流波形はゲート抵抗 R_G の値によって変わり、ゲート抵抗が同じ場合と違う場合の 2 条件で実験を行った。

ゲート抵抗が同じ場合、2つの PCB ログスキーコイルの出力波形は同じ結果を示した (図 12 参照)。ゲート抵抗が異なる場合、ターンオフ時の電流がゲート抵抗の大きいチップに集中している事を確認した (図 13 参照)。並列に接続されたそれぞれのチップに流れる電流の和は CT で計測した全電流と等しかった。さらに直径 3.2mm の PCB ログスキーコイルでも電流計測を実証した (図 14 参照)。PCB ログスキーコイルを TO-220 パッケージのソースターミナルに通している。このような小さな PCB ログスキーコイルにおいても市販の電流センサと同じ波形が得られた。

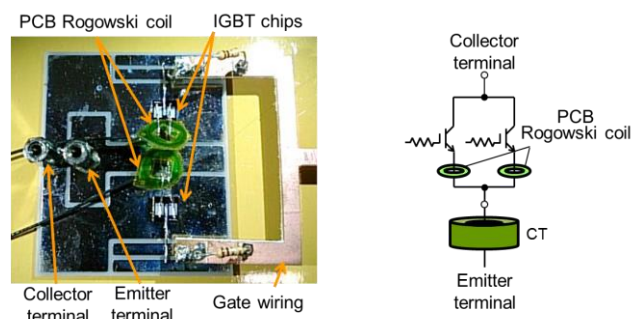


図 11 IGBT チップと PCB ログスキーコイルの回路構成⁽⁸⁾

Fig. 11. Setup of parallel IGBT chips with position of PCB Rogowski coil and CT for circuit

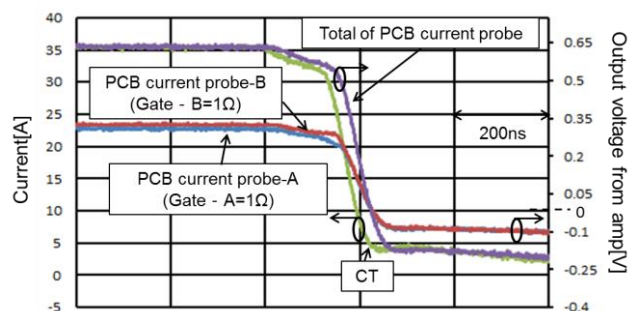


図 12 ゲート抵抗が等しいときの電流波形⁽⁸⁾

Fig. 12. Current and signal waveforms under balanced R_G of parallel IGBT

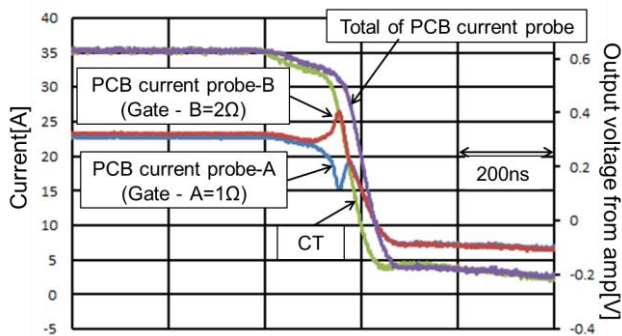


図 13 ゲート抵抗が異なる時の電流波形⁽⁸⁾

Fig. 13. Current and signal waveforms under unbalanced R_G of parallel IGBT

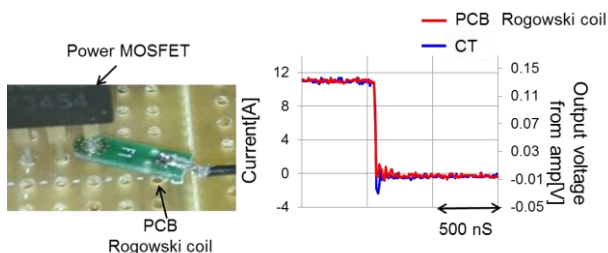


図 14 直径 3.2mm の小型ロゴスキーコイルの実証実験

Fig. 14. Demonstration with very small Rogowski coil

5. 結論

我々は新しい設計ツールを開発し、任意形状のロゴスキーコイルの設計を可能にした。さらに高精度のコイルの設計を可能にするため、PCB 技術を使ったフィッシュボーンコイルパターンを提案した。開発されたコイルは、提案されたコイルパターンがコイル面内で均一な感度分布を持ち、ノイズを低減することが実験によって実証された。面内での感度の均一性は市販の電流プローブ/センサと比較しても同等かそれ以上の精度を持つことを示した。開発した設計ツール、PCB 技術を用いたフィッシュボーンパターンで作製するロゴスキーコイルはパワーモジュールやパッケージに組み込む内蔵センサとして電流のモニタリングや、モジュールの電流分布分析に使用することができる。

文 献

- (1) <http://www.pearsonelectronics.com/>
- (2) C. R. Hewson, W. F. Ray and R. M. Davis, "Verification of Rogowski Current Transducer's Ability to Measure Fast Switching Transients", Twenty-First Annual IEEE, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006.
- (3) L. Dalessandro, N. Karrer, M. Ciappa, A. Castellazzi, W. Fichtner, "Online and Offline Isolated Current Monitoring of Parallel Switched High-Voltage Multi-Chip IGBT Modules", IEEE, Power Electronics Specialists Conference, Pages 2600-2606, 2008.
- (4) D. Gerber, T. Guillod, and J. Biela, "IGBT gate-drive with PCB Rogowski coil for improved short circuit detection and current

turn-off capability", Pulsed Power Conference, IEEE, Pages 1359 - 1364, 2011.

- (5) A. Ahmed, L. Coulbeck, A. Castellazzi and C. M. Johnson, "Design and test of a PCB Rogowski coil for very high dI/dt detection", 15th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, 2012.
- (6) T. Guillod, D. Gerber and J. Biela, "Design of a PCB Rogowski Coil based on the PEEC Method", 7th International Conference on, Integrated Power Electronics Systems, Pages 1-6, 2012.
- (7) D.Kawase, M.Inaba, K.Horiuchi, K.Saito, " High voltage module with low internal inductance for next chip generation - next High Power Density Dual (nHPD2)", Proceedings of PCIM Europe, pp. 217-223, 2015)
- (8) 山口治之, 附田正則, 渡邊晃彦, 大村一郎, "IGBT モジュール高信頼化に向けたチップ間電流不均衡計測技術の開発", "電気学会研究会資料 "電子デバイス 半導体電力変換 合同研究会"", EDD-14-67, SPC-14-129, pp. 5-8,2014