

パワーモジュール用PCB 超小型電流センサ：専用設計ツールの開発とセンサ試作実証

著者	古賀 仁大, 中島 健太, 大村 一郎, 附田 正則
雑誌名	電気学会研究会資料. MD, モータドライブ研究会
巻	MD-16
ページ	MD-16-022
発行年	2016-01
その他のタイトル	PCB base novel ultra-small current sensor: design tool and application
URL	http://hdl.handle.net/10228/5780

パワーモジュール用 PCB 超小型電流センサ： 専用設計ツールの開発とセンサ試作実証

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)

PCB base novel ultra-small current sensor: design tool and application
Masahiro Koga*, Kenta Nakashima, Ichiro Omura, (Kyushu Institute Technology)
Masanori Tsukuda, (City of kitakyushu)

Ultra-small sensor with print-circuit-board (PCB) technology has been developed. The current sensor has been realized high accuracy with smaller size than commercialized Rogowski coils. We developed an in-house special high speed design tool on MATLAB so that we can design arbitrary shape sensor for IGBT module current monitoring.

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などがある。それらは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、それらのセンサは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

ルに入れるにはサイズが大きすぎる⁽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。

2. アプリケーションに応じた高精度設計

〈2・1〉 設計プログラムによる形状設計環境の構築

PCB ロゴスキーコイルを設計するにあたり、予めノイズや感度を推定し設計するためには電流経路 (導線) 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。

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 つがロゴ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















	Commercialized sensor 1 (Rogowski coil)	Commercialized sensor 2 (CT)
Size of the sensor	 25 1.7 [mm]	 28 16 [mm]
Flexibility of the sensor	 Have some flexibility	 Solid
High frequency characteristic	 ~30MHz	 ~70MHz
Uniformity of sensitivity inside current	 ±3%	 None data
Noise by outside current	 None data	 None data
Size of the amplifier	 Need a large amplifier (8.3cm×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

離の関数でテーブル（データベース）化する事である。複雑な構造を持つログスキーコイルを理論的に当てはめて計算する事は困難であるため、送りや戻りの配線が物理的に距離を持たないログスキーコイルの原理的構成要素の簡易モデルを使い計算を行う（図2参照）。それぞれの巻線は独立するが、ログスキーコイルの巻線毎の起電力の和はコイル全体の起電力とみなすことができ、ログスキーコイルと導線間の相互インダクタンスは各巻線と導線間の相互インダクタンスの総和で算出できる。巻線と導線間の相互インダクタンスはベクトルポテンシャルを応用したノイマンの公式を用いて算出している。この公式を用いるのは、巻線に入り込む磁束の角度を考える必要がなく計算式が煩雑にならない事と電流経路(導線)がログスキーコイルに対して垂直に入るという条件を定めることで計算が簡略されるためである。これらの条件により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できるため、巻線と導線間の相互インダクタンスは2つの導体間の相互インダクタンスの計算により求めることができる。

もう1つの計算速度向上の手法であ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

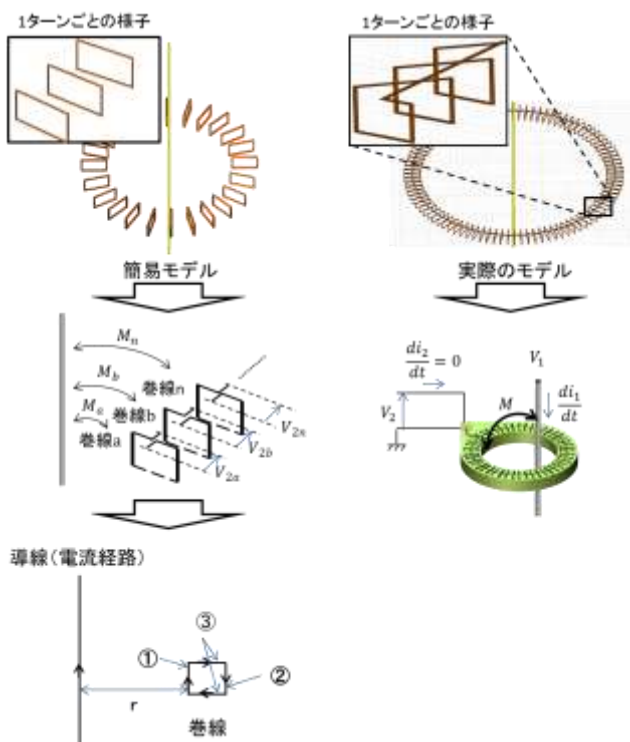


図2 簡易モデルでのログスキーコイルの相互インダクタンス算出方法

Fig. 2. Mutual inductance calculation method of Rogowski coil with simplified model

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でき計算量が減少し、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ている。計算速度は飛躍的に向上し、多くの点での相互インダクタンスを計算し感度分布として表すことができる（図3参照）。この設計ツールのおかげでこれまでよりフレキシブルなPCBログスキーコイルの形状設計が可能になる。

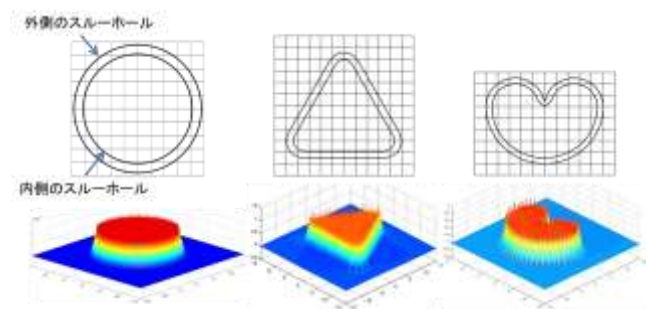


図3 任意形状の電流路毎の相互インダクタンス分布
Fig. 3. Mutual inductance to current path for arbitrary geometries with original MATLAB based design tool

〈2・2〉 高精度センサのための新コイル構造提案

PCB ログスキーコイルが外部ノイズからの影響を減らし、設計通りに機能するために4層のPCB基板を使うコイルパターンを提案した(図4参照)。一般的にログスキーコイルのコイルパターンとして、三角形やのこぎり刃のような巻き方が考えられる。これらのパターンは磁束の通過するループに加え、不要な磁束の通過するループを持つ構造である。そのため、設計ツールによって設計されるPCBログスキーコイルにこのコイルパターンを適用すると設計通りに機能しない可能性がある。

そこで設計ツールに用いる簡易モデルに近づけるコイル構造を4層PCB基板によって実現した。このパターンをフィッシュボーンパターンとする。フィッシュボーンパターンの特徴は限りなく不要な磁束の通過するループを削減していること、厚さの異なる4層の基板により送りと戻りのラインを限りなく近づける事である。このようにすることで設計ツールの簡易モデルとの差異を少なくし設計精度を向上させ、さらにセンサとしての精度を向上させることができる。

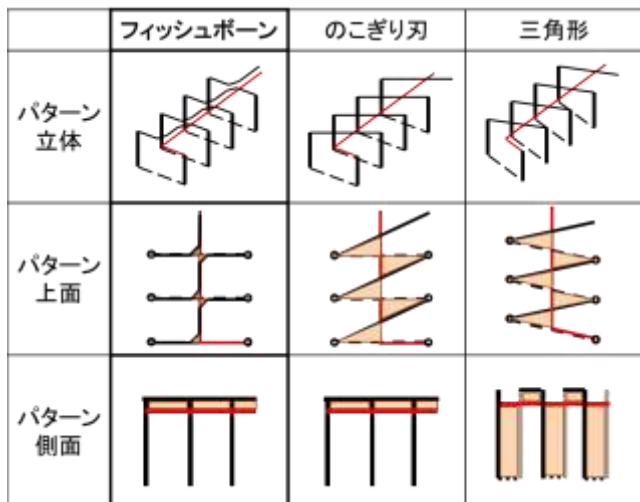


図4 新構造のフィッシュボーンパターンと一般的なログスキーコイルのパターン

Fig. 4. Proposed fishbone pattern and typical coil pattern with PCB technology

3. 実測による評価及び実証実験

設計ツールを用いて円形と四角形の形状のPCBログスキーコイルを作製した(図5参照)。大きさは最小のもので幅(コイル直径)3.2mm、長さ10mm、厚さ0.6mmであり、市販のセンサと比較しても非常に小さく作製できる。作製したコイルを用いてコイルパターンの評価、感度分布を実測と設計ツールの評価、電流計測の実証実験を行った。

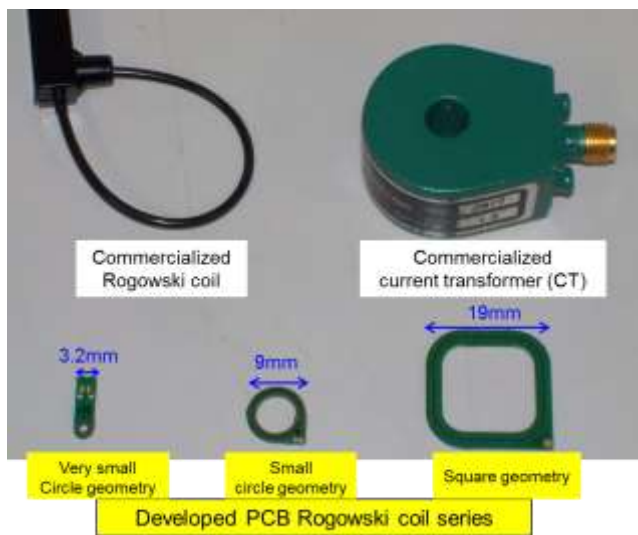


図5 作製したPCBログスキーコイルと市販のセンサ
Fig. 5. Developed PCB Rogowski coil and commercialized sensors/probes (The size is outer diameter of Rogowski coil)

〈3・1〉コイルパターンの違いによる外部ノイズ及び感度均一性の評価

外部ノイズ、感度均一性の評価は直径9mmのPCBログスキーコイルを用い、コイル面に対して垂直、平行流れる電流とすべての電流方向について評価を行った。それぞれの評価ではコイルと導線の間に厚さ0.1mmの絶縁シートをはさみ密着させ、連続で移動させ測定した。外部ノイズはコイルの中心を流れる電流から得られる出力に対する出力比で示して、感度均一性はコイルの中心を流れる電流から得られる出力との差分を比率で示し、それぞれ0%に近いほど性能がよい。測定した中で最も比率の高かった値をその方向での最大ノイズ、最大の感度ばらつきとして表に示した(図6参照)。

提案したフィッシュボーンパターンの最大のノイズは7%であり、測定した5項目中4項目で最も低いノイズであることから、他のパターンに比べ外部ノイズを最も低減していることが実験的に示された。のこぎりパターンは表面の測定ではフィッシュボーンより良い結果となっている。これは、のこぎりパターンにある不要な磁束のループによりノイズ同士が相殺されているためであり、一方で裏面の測定では2倍近いノイズを計測している。三角形パターンは他の2パターンに比べ不要な磁束の通過するループの面積が大きいため最もノイズを拾っていることがわかる。また、コイルに対して垂直に流れる電流からのノイズは、どのパターンも1%程度であり、この方向のノイズはパターンによらないことが分かった。さらにフィ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。

パターン名	フィッシュボーン	のこぎり	三角形
表面	7%	6%	26%
裏面	6%	11%	14%
側面1	4%	6%	8%
側面2	1%	1%	1%
感度均一性	1%	1%	1%

図6 コイルパターンの外部ノイズ、感度均一性の評価結果
Fig. 6. Experimental evaluation of noise and flat sensitivity for difference coil pattern

〈3・2〉設計プログラムの感度分布評価

ここでは四角形のPCBログスキーコイルを用いて感度分布の実測を行い、設計ツールで行った感度分布のシミュレーションと比較した。設計ツールの整合性を確認するために、四角形のPCBログスキーコイルの巻線の間隔のパラメ

ータを3パターン作製し、それぞれ測定した(図7参照)。感度分布とは3章1節の側面2の評価を分布化したものがコイル外部の感度分布、感度均一性の評価を分布化したものがコイル内部の感度分布としたものである。感度分布は絶対値で表示しており、すべてで0%から3%までの同じ色軸で表している。

実測、シミュレーションの感度分布をそれぞれ図8、9に示す。コイル内部の感度分布特性において、四角形のロゴスキーコイルは直線部分とコーナー部分の巻線の間隔を等しくした方が最も感度均一性が高いことが実測、シミュレーションともに示された。それぞれのパターンで実測とシミュレーションの感度分布を比較すると、隅の感度のばらつき傾向や、ばらつきの割合が一致しており、設計ツールの精度が非常に高いことがわかる。実測の感度分布では左上隅の分布がほかの三隅に比べ異なった分布になっているが、これは取り出し口の影響を受けるためである。コイル外部での感度分布でも実測とシミュレーションで同様の感度のばらつきを示しているが、実測値はシミュレーション値に対して低くなっている。これはコイル外部での信号が微弱なため測定できていない可能性がある。これらのことからコイル外部の感度分布でも設計ツールは感度ばらつき傾向が把握できる程度の精度はあるといえる。

このように設計ツールによる感度分布のシミュレーションは実測と同様の感度分布を表し、精度が高いことを実証した。設計ツールを用いることで形状の違いによる感度のばらつきを推定することができ、形状設計に非常に有意である事が示された。

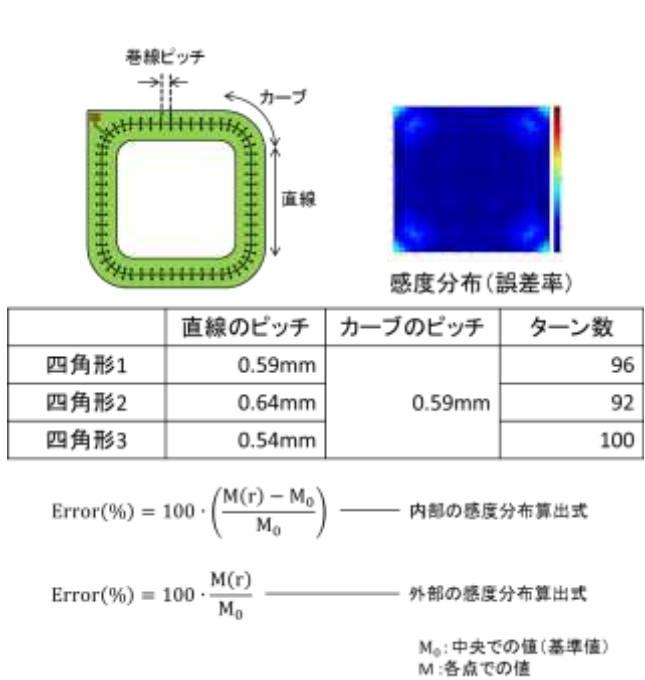


図7 感度分布の評価方法

Fig. 7. Evaluation method of sensitivity distribution

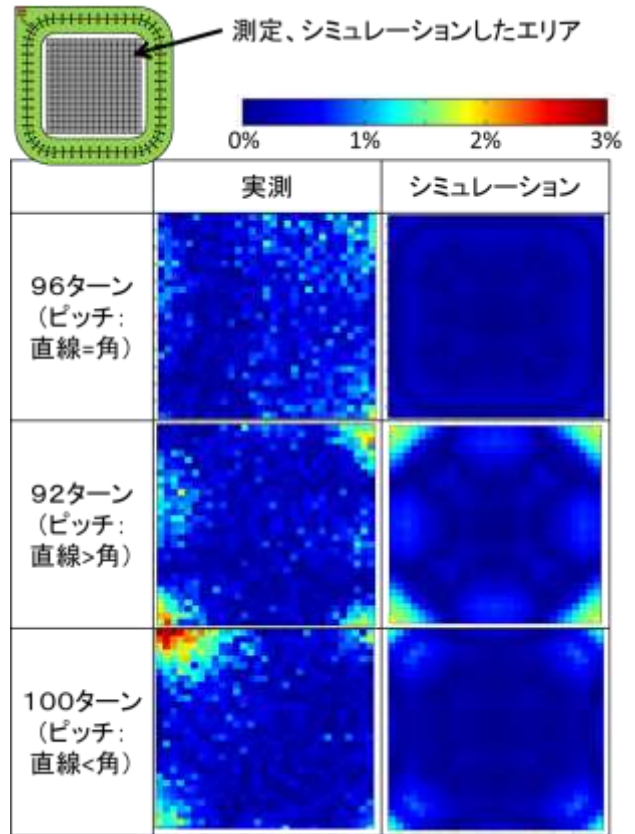


図8 四角形の内部感度分布

Fig. 8. Internal sensitivity distribution of the square geometry

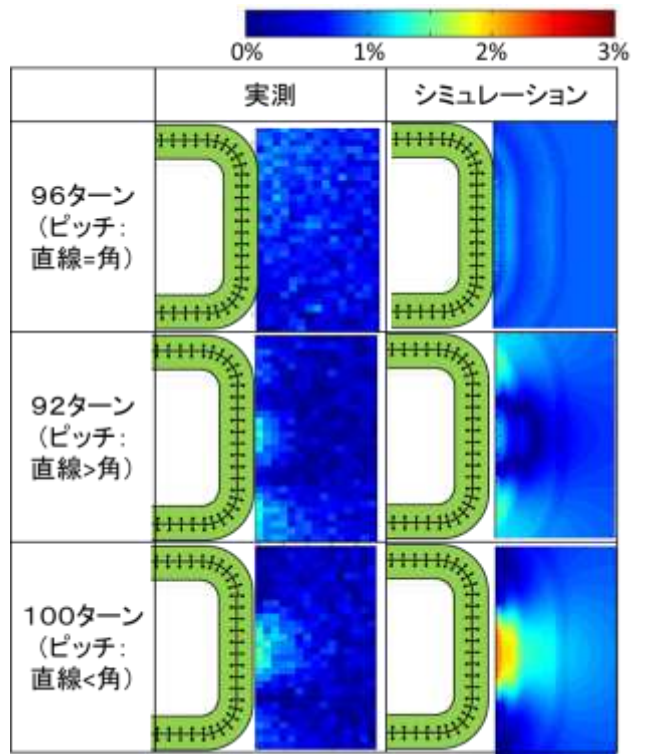


図9 四角形の外部感度分布

Fig. 9. Outside sensitivity distribution of the square

geometry

〈3・3〉チップ電流の測定による実証実験

作製した PCB ロゴ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 ロゴスキーコイルを通して電流を測定した (図 10 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 $5\ \Omega$ 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 ロゴスキーコイルの出力波形は同じ結果を示した (図 11 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 12 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 ロゴスキーコイルでも電流計測を実証した (図 13 参照)。PCB ロゴスキーコイルを 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 ロゴ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 14 に実際に作製し、実験的な評価によって実証された PCB ロゴ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 ロゴスキーコイルを作製した。PCB ロゴ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、市販のロゴ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ゴスキーコイルを作製するため、PCB ロゴスキーコイルの 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、市販のロゴ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。

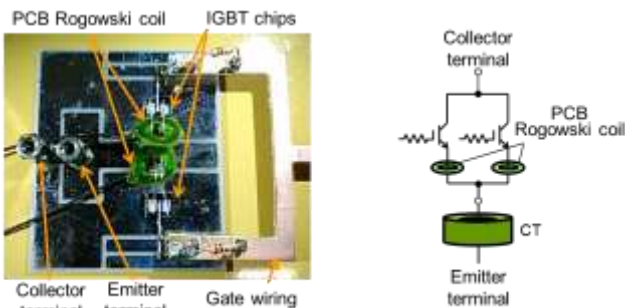


図 10 IGBT チップと PCB ロゴスキーコイルの回路構成 (8)

Fig. 10. Setup of parallel IGBT chips with position of PCB Rogowski coil and CT for circuit

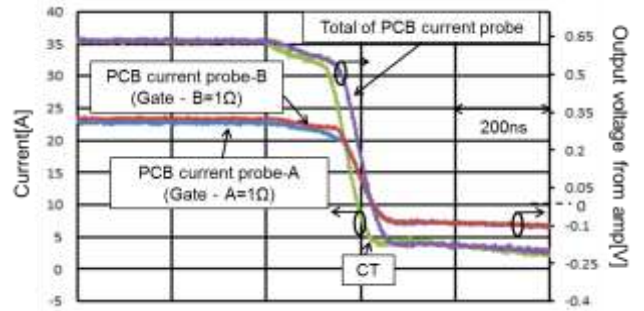


図 11 ゲート抵抗が等しいときの電流波形(8)

Fig. 11. Current and signal waveforms under balanced R_G of parallel IGBT

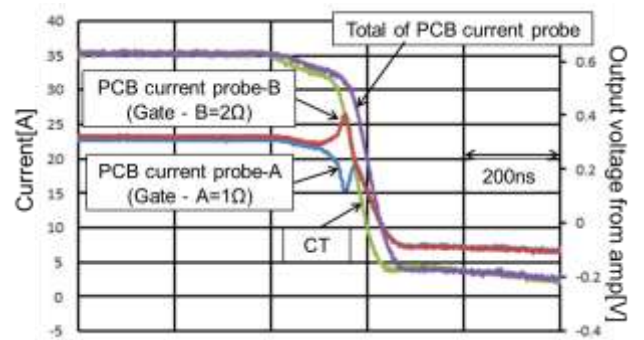


図 12 ゲート抵抗が異なる時の電流波形(8)

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

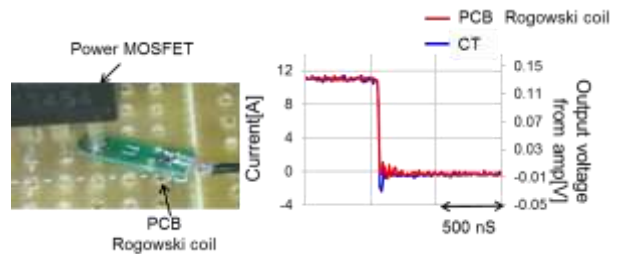


図 13 直径 3.2mm の小型ロゴスキーコイルの実証実験
Fig. 13. Demonstration with very small Rogowski coil

Size of the sensor	😊	$0.3\text{cm} \times 0.3\text{cm} \times 0.06\text{cm}$
Flexibility of the sensor	😊	Solid but designing is flexible
Uniformity of sensitivity inside current	😊	$\pm 1\%$ (circle geometry)
Noise by outside current	😊	Maximum 7%
Size of the amplifier	?	Under development
Cost	😊	inexpensive

図 14 開発した PCB ロゴスキーコイルの特性
Fig. 14. The feature of the developed sensor

4. 結論

我々は新しい設計ツールを開発し、任意形状のログスキーコイルの設計を可能にした。さらに設計精度向上のために PCB 技術を使ったフィッシュボーンパターンを提案した。設計ツールによる感度分布シミュレーションは実測の感度分布と比較して非常に高い精度である事が確認された。このように高い精度で任意形状設計が可能になったことでパワーモジュール/モジュールの様々な構造に対応する PCB ログスキーコイルを作製することができる。作製するログ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