

# 磁束センサアレイを用いたパワーモジュール内電流の 可視化システムの開発

朝長 大貴\* 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)

大胡田 清一 (コペル電子株式会社)

野田 龍三 (株式会社シーディエヌ)

田代 勝治 (株式会社豊光社)

Power module current imaging system by magnetic flux sensor array

Hiroki Tomonaga\*, Ichiro Omura (Kyushu Institute of technology)

Masanori Tsukuda (City of kitakyushu)

Seiichi Okoda (COPER ELECTRONICS CO.)

Katsuji Tashiro (HOH KOH SYA Co.)

Power modules are required high reliability as energy saving technology. It is important to image current crowding which causes devices destruction. In this study, we developed the 16-channels micro magnetic flux sensor array and the amplifier to realize current imaging in power modules. We report the structure, flat sensitivity technology, noise reduction, data handling program and imaging tool on GUI.

**キーワード** : パワーモジュール, IGBT, 電流集中, 電流分布, 高信頼性, 磁束センサアレイ

(Power module, Insulated Gate Bipolar Transistor, Current crowding, Current distribution, High reliability, Magnetic flux sensor array)

## 1. はじめに

IGBT や Diode の並列チップ間の電流集中は高信頼性パワーエレクトロニクスシステムの実現の妨げとなっている。寄生インダクタンス<sup>(1)</sup>や個々のチップの特性、温度の不均衡<sup>(2)(3)</sup>が原因となり電流集中が起こると考えられている。IGBT や Diode の並列チップ間の電流集中は数々のシミュレーションにより解析されているが<sup>(4)(5)</sup>、高精度および高速での測定は実現されていない。例を挙げると、商品化されている CT センサ(ピアソン社)やログスキーコイルはセンサのサイズが大きく、ボンディングワイヤの電流を測定することは不可能である<sup>(6)~(8)</sup>。そこで、本研究で使用するマイクロフィルムセンサ<sup>(9)</sup>をアレイ化するのが有力な方法である<sup>(10)</sup>。しかしながら、センサの位置ずれやアンプ部品のばらつきなどによりチャンネルごとの特性が異なるため、マイクロフィルムセンサのアレイ化はチャンネルごとの特性の均一化が困難である。また、単一センサを用いたスキャ

ンによる測定方法<sup>(11)</sup>では、スキャンにかかる長い測定時間が要求される。

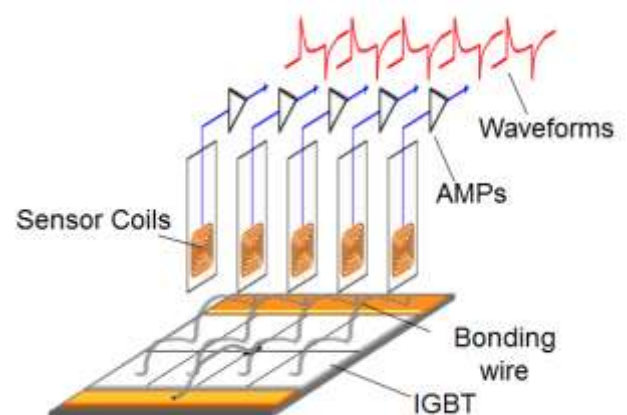


図 1 測定方法の外観

Fig. 1. Schematic view of proposed measurement method.

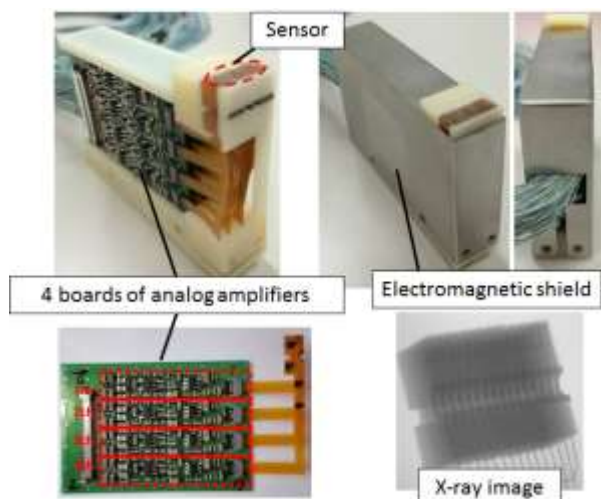


図2 16チャンネル磁束センサアレイの構造  
Fig. 2. 16-Channel sensor array configuration.

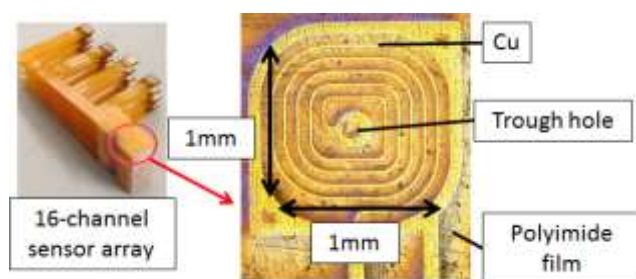


図3 コイルセンサの構造  
Fig. 3. Sensor coil structure.

本論文では、開発した磁束センサアレイ<sup>(12)</sup>について、センサアレイのチャンネルごとの特性均一化の方法<sup>(13)</sup>、電流分布の画像化、およびセンサアレイを用いた応用の一例として IGBT チップ実装工程での GO/NOGO 判断技術<sup>(14)</sup>について説明する。これらの技術を統合したシステムを用いることで、非破壊非接触による IGBT 並列チップ間の電流分布測定および不良チップ判断が可能となる。このシステムは、電流集中現象の実測による解析のみならず、IGBT のチップ実装工程でのスクリーニングシステムに応用できる。

## 2. 16 チャンネル磁束センサアレイ

### 〈2・1〉 磁束センサアレイ仕様

電流分布の測定方法は、磁束センサアレイを測定対象とするボンディングワイヤに近づけ磁束を取得し、積分アンプを通してデジタイザで多チャンネル同時にデータ収録をするといった方法である(図1参照)。

16 チャンネル磁束センサアレイはフィルムセンサ、アナログアンプ、シールドケース、同軸ケーブルで構成されている(図2参照)。センサについて、ポリイミドフィルム両面にスパイラルコイル(1.0mm ×1.0mm)を銅でパターン化し

ており、片面 5 ターンである(図3参照)。今回実験に用いたアンプを用いると、アンプを通したセンサの感度は、100mA/V である。積層された各々のフィルムセンサの位置合わせ誤差は約 20μm である。

### 〈2・2〉 デジタルキャリブレーションによるセンサ出力の均一化

アナログアンプに用いられる抵抗やコンデンサの特性にはばらつきがある。また、センサを積層させアレイ化する上で合わせや水平度のズレが生じる可能性がある。このため均一な感度を持った磁束センサアレイの実現は非常に困難である。部品選定やセンサアレイ作製法の観点からこの問題に対処するのはコストや時間がかかり非効率であるため、本研究ではソフトウェア LabVIEW によるデジタルキャリブレーションを行った。

デジタルキャリブレーションは、まず 1 本のワイヤ上にパルス電流を与えながら、磁束センサアレイを水平方向に移動させながら信号を取得する。センサ直下にワイヤがあると考えられる最大出力信号を利用し校正する。以下に出力信号の校正に用いる式を示す。

$$S(t) \propto \Delta A \cdot \left( V(t) + \frac{1}{\Delta CR} \int V(t) dt \right) \dots \dots \dots (1)$$

$S(t)$ 、 $V(t)$ 、 $t$ 、 $\Delta A$ 、 $\Delta CR$  はそれぞれ磁束信号、出力電圧、

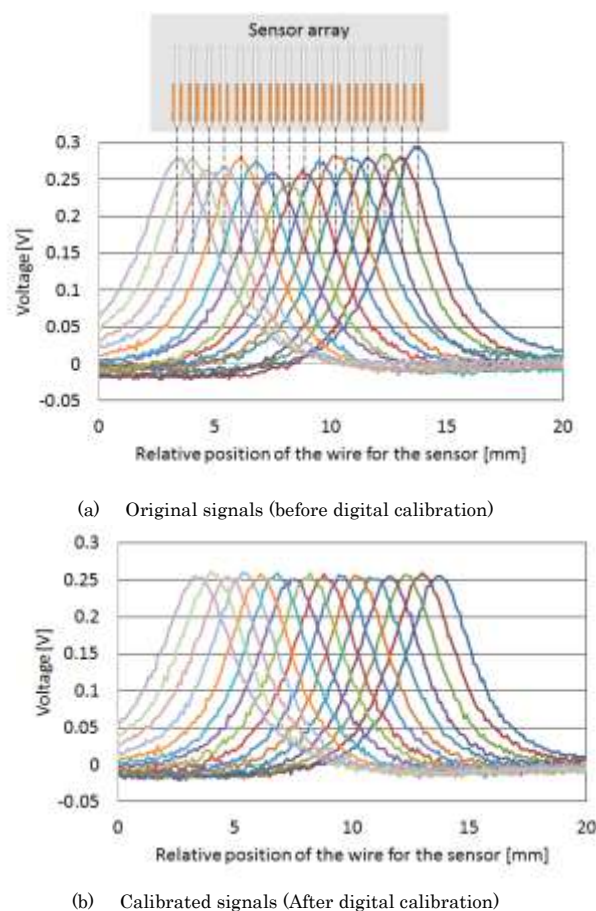
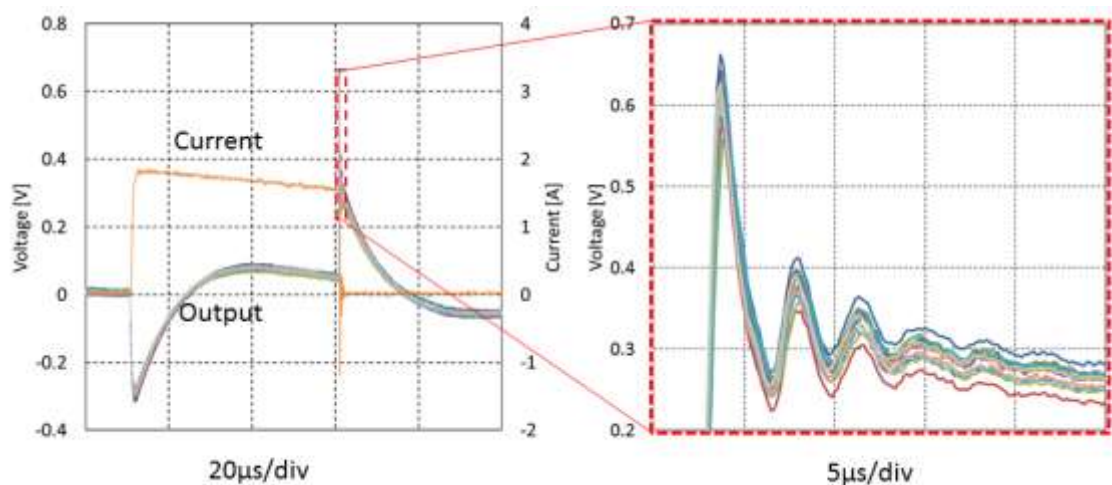
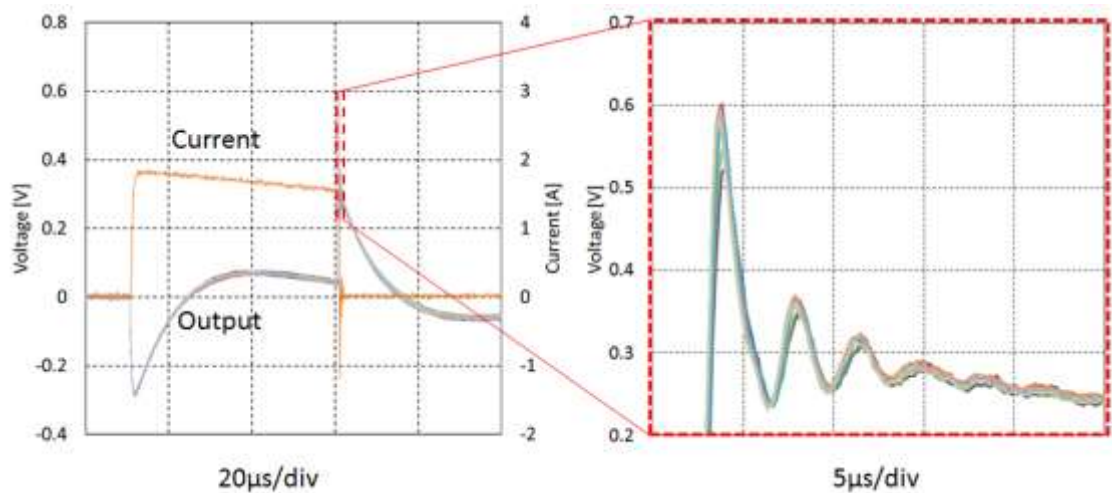


図4 ターンオフ時の各センサ信号

Fig. 4. The spatial signal distribution just after turn-off.



(a) Original signals (before digital calibration)



(b) Calibrated signals (after digital calibration)

図5 キャリブレーション前と後の信号波形

Fig. 5. Signal waveform before/after digital calibration.

時間、ゲイン、CR 時定数である。この式に基づく校正をデジタル的に行うことで、出力のばらつきを減らすことができた(図 4、5 参照)。

### 〈2・3〉 ノイズシールド

IGBT チップのボンディングワイヤ周辺は、バスバーや電極端子などボンディングワイヤ以外を流れる電流の影響が大きい。そのため、アンプ基板に直接影響する磁界などノイズ要因を遮蔽するシールドケースを用いた。ノイズシールドの効果について、アンプの入力端子をショートし、シールドケースを用いた場合と用いない場合で対照実験を行った。図 6 はノイズシールドの効果を明確に示している。ノイズシールドを用いることにより、外部から直接アンプ基板に影響するノイズを 9 割削減した。

## 3. 電流分布の可視化

### 〈3・1〉 電流分布可視化の方法

コイルセンサは外部磁束の影響を直接受けてしまうた

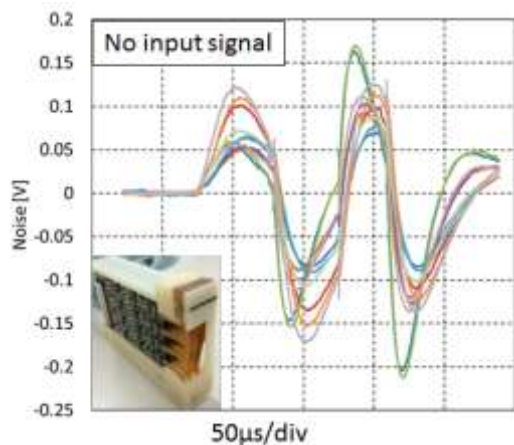
め、その影響を受けない測定方法が必要である。センサに影響するボンディングワイヤの磁束と外部配線による磁束は分離できないため、例えばアンプ基板のようなシールドを用いる方法は採用できない。

そこで外部電流による磁束ノイズをキャンセルするために、センサをワイヤから 0.5mm 離した場合と 1.5mm 離した場合の 2 つのデータの差分信号を利用する(図 7 参照)。遠方の電流が原因となる磁束ノイズは高さによって変わらずほぼ等しい。一方で近接しているボンディングワイヤに流れる電流が発生させる磁束は大きく変動する。

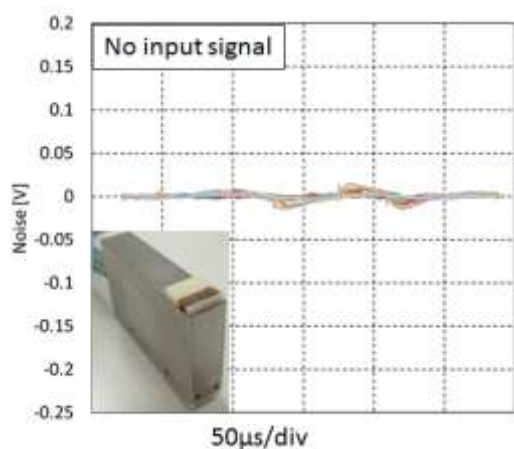
### 〈3・2〉 電流分布の可視化デモンストレーション

16 チャンネル磁束センサアレイでボンディングワイヤが 2 本、4 本、8 本と異なる IGBT を測定した。測定方法は L 負荷のダブルパルス試験で、電圧 100V 電流 100A である。測定結果を図 8 に示した。ボンディングワイヤが 2 本、4 本の場合に電流経路に相当する電流分布を確認できた。ボンディングワイヤが 8 本の場合には、各ワイヤの間隔が狭いた





(a) Noise influence



(b) Reduction of noise influence

図6 シールドケースによるノイズ低減  
Fig. 6. Noise reduction by shield case.

め磁束信号は連続して見られた。

#### 4. DBC 基板上 IGBT の GO/NOGO 判断技術

DBC 基板上 IGBT の GO/NOGO 判断を行うために IGBT のサンプルを測定した。判断基準は、標準サンプルの波形を一定数測定し、その結果の平均波形と測定物の波形との差を用いる。

DBC 基板上 IGBT の GO/NOGO 判断には 6 つのステップに分かれている(図 9 参照)。まず、ボンディングワイヤ上の磁束を測定する(Step1)。次に測定した磁束データから正常品サンプルの標準値を引く(Step2)。その後、差分データを時間で積分し(Step3)、チップごとにその和をとる(Step4)。最後に、チップごとの和が基準値と比較する(Step5)。和が基準値より小さければ“GO”と判断し、基準値より大きければ“NO GO”と判断する(Step6)。GO/NOGO 判断は、並列チップで同時に行い、複数の IGBT チップに対してどれか一つでも“NO GO”と判断された場合は、基盤全体が“NO GO”となる。

この判定フローで IGBT メーカー2 社のチップ評価を行

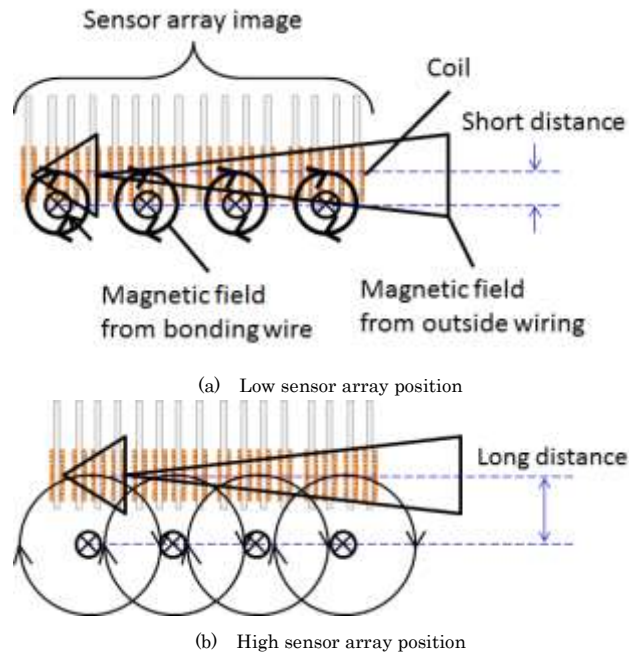


図7 高さ差分によるノイズ除去

Fig. 7. Noise cancel method by differential signal from high/low sensor array position.

った。測定対象はパワー半導体メーカーの IGBT チップの標準品、ボンディングワイヤを曲げたもの、ボンディングワイヤを切断したもの、スイッチングのタイミングを変えたものである(図 10 参照)。これらの条件で IGBT チップを複数評価し、標準品・異常品で偏差値を比較した(図 11)。図 11 は標準品に対して欠陥を加えたものの偏差値が非常に大きいことから、この測定技術はこれらの欠陥を反映できる。このことから IGBT チップ実装工程でのスクリーニング試験に応用できると考えられる。

#### 5. 結論

小型フィルムセンサ、アナログアンプ、ノイズシールドで構成されている 16 チャンネル磁束センサアレイを開発した。デジタルキャリブレーションを行うことで個々のセンサや素子の特性を均一にし、シールドケースでアンプ基板上に直接影響するノイズを軽減した。電流分布の可視化は高さの違いによる差分信号を利用することで可能となった。また、IGBT モジュールの GO/NOGO 判断方法の 1 例として、標準サンプルとの差分信号と統計処理を利用する方法を提案した。本成果は IGBT の電流集中による故障原因の解明やスクリーニングによる信頼性向上に応用可能である。

#### 文 献

- (1) K. Xing, F.C. Lee, D. Boroyevich : “Extraction of parasitics within wire-bond IGBT modules”, Proc APEC '98, pp. 497- 503(1998)

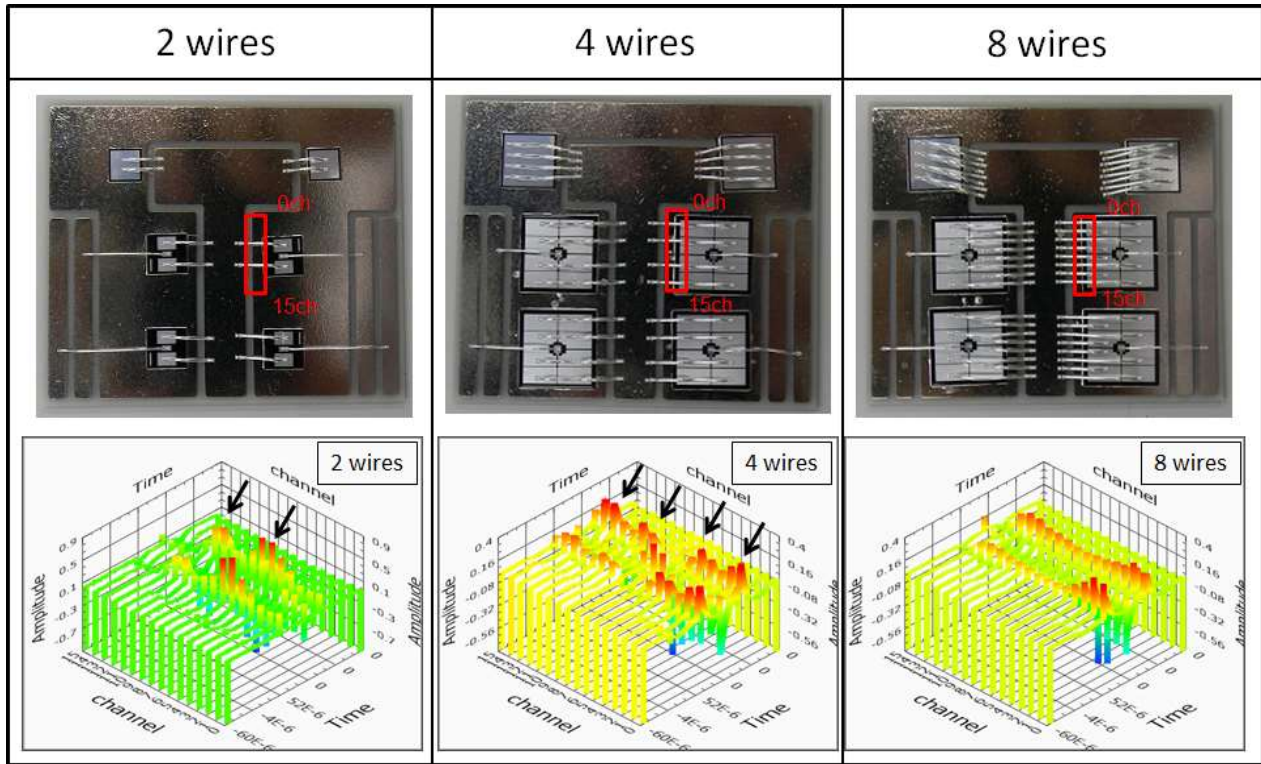


図 8 ボンディングワイヤ 2 本、4 本、8 本での電流分布デモンストレーション

Fig. 8. Demonstration of current distribution imaging with 2, 4 and 8 bonding wires.

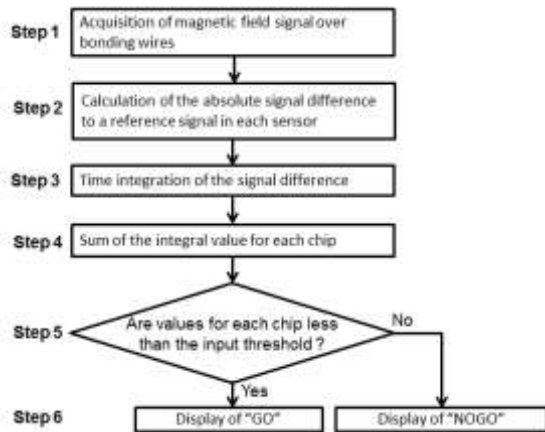


図 9 GO / NO GO 判断の流れ

Fig. 9. GO/NOGO judgment procedure.

- (2) M. Riccio, L. Rossi, A. Irace, E. Napoli, G. Breglio, P. Spirito, R. Tagami, Y. Mizuno: "Analysis of large area trench-IGBT current distribution under UIS test with the aid of lock-in thermography", Microelectronics Reliability, Vol.50, pp. 1725- 1730(2010)
- (3) Yohei Iwahashi ,Yoshihito Mizuno, Masafumi Hara, Ryuzo Tagami, Masanori Ishigaki: "Analysis of current distribution on IGBT under unclamped inductive", Microelectronics Reliability, Vol.52, pp. 2430- 2433(2012)
- (4) T. Shoji, M. Ishiko, T. Fukami, T. Ueta, K. Hamada: "Investigations on current filamentation of IGBTs under unclamped inductive switching conditions", Proc. Of ISPSD'05, pp. 227- 230(2005)
- (5) S. Milady, D. Silber, F. Pfirsch, F.-J.: "Niedernostheide, Simulation studies and modeling of short circuit current oscillations in IGBTs", Proc ISPSD'09, pp. 37- 40(2009)
- (6) Pearson ELECTRONICS Wideband Current Monitors, <http://www.pearsonelectronics.com/>.
- (7) D.A. Ward, J. Exon, T. La: "Using Rogowski coils for transient current measurements", Eng. Sci. Educ. J. pp.105- 113 (1993)
- (8) W.F. Ray, C.R. Hewson: "High performance Rogowski current transducers", Conference record of the 2000 IEEE, Vol. 5, pp. 3083- 3090(2000)
- (9) Yuya Kasho, Hidetoshi Hirai, Masanori Tsukuda, Ichiro Omura: "Tiny-scale "stealth" current sensor to probe power semiconductor device failure", Microelectronics Reliability, Vol.51, pp.1689- 1692(2011)
- (10) H. Hirai, Y. Kasho, M. Tsukuda, I. Omura: "Bonding wire current measurement with tiny filmcurrent sensors", Proc. of ISPSD 2012, pp. 287- 290(2012)
- (11) H. Shiratsuchi, K. Matsushita, I. Omura: "IGBT chip current imaging system by scanning local magnetic field", Microelectronics Reliability, Vol.53, pp.1409- 1412 (2013)
- (12) Masanori Tsukuda, Seiichi Okoda, Ryuzo Noda, Katsuji Tashiro and Ichiro Omura: "High-throughput DBC-assembled IGBT screening for power module", International Conference on Integrated Power Electronics Systems(2014)
- (13) H. Tomonaga, M. Tsukuda, S. Okoda, R. Noda, K. Tashiro and I. Omura: "16-Channel micro magnetic flux sensor array for IGBT current distribution measurement", Microelectronics Reliability (2015)
- (14) M. Tsukuda, H. Tomonaga, S. Okoda, R. Noda, K. Tashiro and I. Omura : "High-throughput and full automatic DBC-module screening tester for high power IGBT", Microelectronics Reliability(2015)


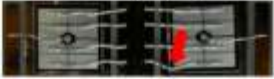





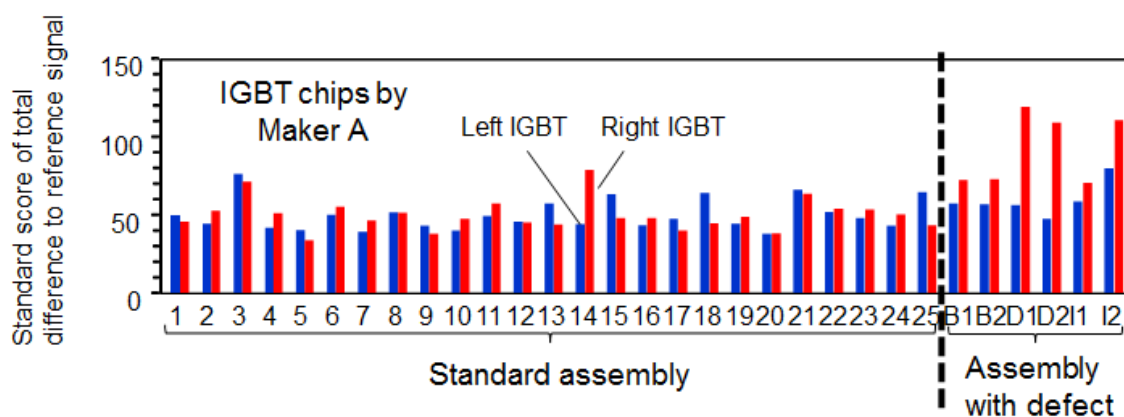
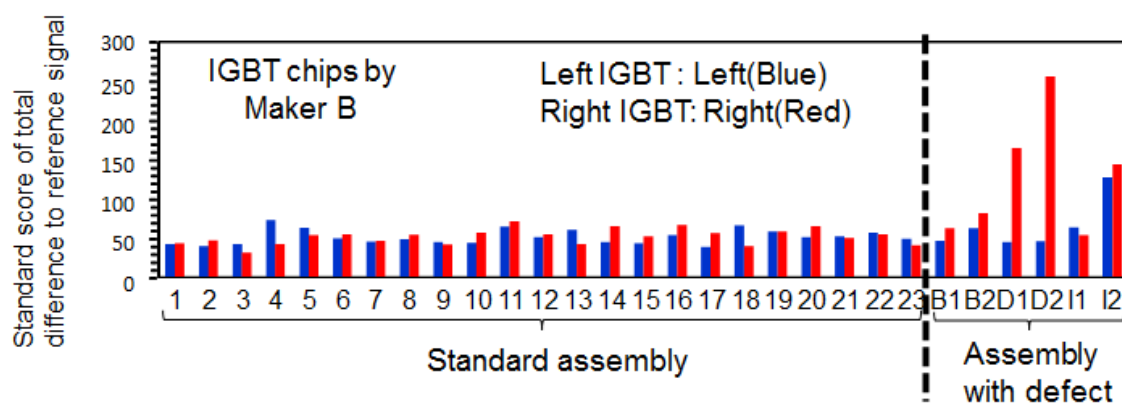
Sample category	Configuration of parallel IGBT		
Standard assembling	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <span>Left chip</span> <span>Right chip</span> </div> 		
Assembling with defect	Bending 1 (B1)	Disconnection 1 (D1)	Imbalanced $R_G$ of 5 % (I1)
			
	Bending 2 (B2)	Disconnection 2 (D2)	Imbalanced $R_G$ of 25 % (I2)
			

図 10 評価に用いた IGBT チップ  
Fig. 10. IGBT chips for the evaluation.



(a) Standard score in statistics for parallel IGBT chips of maker A



(b) Standard score in statistics for parallel IGBT chips of maker B

図 11 IGBT 並列チップに対する統計処理の偏差値

Fig. 11. Standard score in statistics for parallel IGBT chips.