

リアルタイム・モニタリング技術 パワー半導体の高信頼化を促進する

九州工業大学 大学院工学研究院 電気電子工学研究系 助教 渡邊 晃彦
 九州工業大学 大学院工学研究院 電気電子工学研究系 教授 大村 一郎
 九州工業大学 次世代パワーエレクトロニクス研究センター センター長 大村 一郎



1 はじめに
 21世紀は電気の時代である。最終エネルギーのうち電力で消費されるエネルギーの割合は、現在の25%から、今世紀半ばには50%を超えると予想され、電力利用での省エネがCO₂削減のカギとなっている。今後さらに動力、照明、熱源、情報通信といった分野での負荷の多様化と発電・蓄電設備の分散化が進み、より広域での電力ネットワークの活用が重要になってくる。パワーエレクトロニクスは電力の高効率利用を可能にする技術であり、エアコンのインバータをはじめ、ハイブリッド自動車のパワートレイン、風力発電や太陽光発電のパワーコンディショナーに用いられている。また1000 km以上の距離を送電できる高圧直流送電(HVDC)など電力ネットワークの構築にも欠かせない技術となっている(図1)。

パワーエレクトロニクスのキーコン

ポーメントであるパワー半導体(図2)は、電流-電圧を所定の目的に合わせて変換する能力を有した電子デバイスであり、その性能がパワーエレクトロニクスによる省エネルギー効果を大きく左右する。このため、日本のみならず欧州や米国で盛んに研究がすすめられており、2010年代に入ってアジアの新興国も競争に加わってきている。厳しい競争の中で、特に日本と欧州の製品は信頼性の面で抜きん出ており、インフラ系や自動車などへの応用でしのぎを削っている。今後欧州に対する競争力を強化するためには国内製品の高信頼化を可能にする技術の開発が必要である。本稿では九州工業大学次世代パワーエレクトロニクス研究センターが中心となりパワー半導体の高信頼化のために進めている観測システムの開発について紹介する。

2 パワー半導体と信頼性の課題

デジタルLSIのロードマップであるムーアの法則と同様に、Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) をはじめとするパワー半導体はチップ面積を縮小することで量産性を向上させ、省エネルギー製品の普及に伴う莫大な需要に応じてきた。図3は600-1200 VクラスIGBTの電流密度の推移を表して

著者略歴

【渡邊晃彦】(写真上)
 1999年 九州工業大学大学院工学研究科博士後期課程 電気工学専攻 単位取得退学
 1999年 博士(工学)取得(九州工業大学)
 1999年 松下電器産業株式会社 委託社員
 財団法人ファインセラミックスセンター 研究員
 2003年 九州工業大学工学部 電気 教務職員
 2007年 九州工業大学工学研究院電気電子工学研究系 助教

【大村一郎】(写真下)
 1987年 大阪大学大学院 理学研究科 博士前期修了
 1987年 株式会社東芝入社研究開発センター(当時総合研究所)入社
 高耐圧IGBTとパワー半導体の研究
 1996~1998年 スイス連邦工科大学 客員研究員
 株式会社東芝セミコンダクター社
 高耐圧IGBT、次世代パワー半導体の開発・研究
 2001年 スイス連邦工科大学(工学博士)
 2008年 九州工業大学大学院工学研究院電気電子工学研究系教授就任
 2012年 九州工業大学次世代パワーエレクトロニクス研究センター センター長就任(兼任)

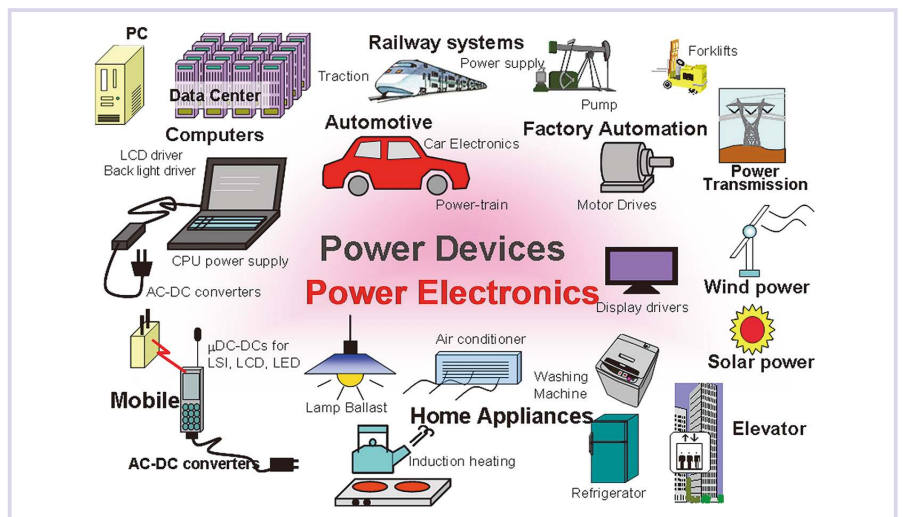


図1 パワーエレクトロニクスおよびパワー半導体の応用

いる。30年間で1平方センチメートル当たりの電流密度は飛躍的に伸びており、近い将来500 A/cm²まで到達する。この値は、図4に示す一般大衆車型ハイブリッド自動車や電気自動車に搭載されるモータ駆動用のインバータ回路がIGBTチップ総面積10平方センチメートル以下で実現できることを示しており、圧倒的な小型化と低コスト化が期待できる。その一方でデバイス内部の電流密度や電界が高くなり、故障のリスクが高まってきている。量産性の向上と低故障率という、相反する要求を突き付けられ、パワー半導体の信頼性確保はますます厳しくなっている¹⁾。



図2 (a) パワー半導体 (電鉄用, 鉄鋼用, 風力発電用IGBT)

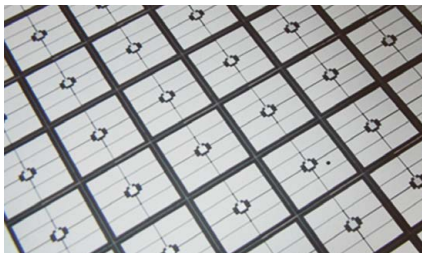


図2 (b) パワー半導体 (IGBT) チップの例

3 リアルタイム・モニタリングによる高信頼化の新しい流れ

パワー半導体の故障は①MP (Mission Profile) と呼ばれる印加ストレス、②チップやパッケージの構造、③デバイス内に用いられる材料等の3つの要因が関係している。これに対し、信頼性を確保するために①過去の故障から得られた知見の活用、②加速試験による故障の再現と故障率推定、③FA (Failure Analysis) 等のオプザベーションによる故障原因分析を駆使して対策を施している²⁾。ところが先に述べた様に、近年デバイス内の電流密度や内部電界が高くなり、絶縁や配線構造等の複雑化が進み、今までの方法では十分な信頼性の確保が非常に困難になってきている。

リアルタイム・モニタリングは、故障のトリガとなる現象を時間及び空間的にマイクロなレベルで観測するツールで

ある。すなわち、デバイスの内部の構造変化、電流や電磁界、温度分布などの時間変化を高い空間分解能で取得するものであり、故障に至るメカニズムを可視化することを目的としている。例えばFAに代表される今までの分析では、故障が起きたデバイスを開封しスタティックに観察することにより故障要因を探るのに対し、リアルタイム・モニタリングでは、故障に至る前に故障を引き起こす可能性があるマイクロな現象をダイナミックに時系列観測する。

リアルタイム・モニタリングは、局所的に加わるストレス等と故障を引き起こすマイクロな現象とを関連付けることにより、図5に示すように、材料物性とデバイス内部での劣化現象との関連性や、シミュレーションではモデル化できていない現象の抽出で威力を発揮する。材料開発への明確なスペックの提示と新しい評価方法の提案、高精度なシミュレーションモデルの開発への道を開くものである。

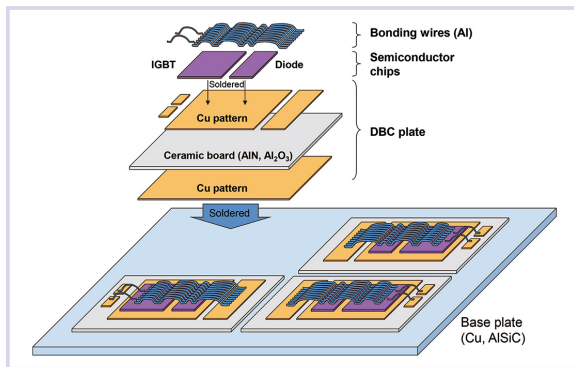


図2 (c) パワー半導体 (IGBT) の実装例

4 リアルタイム・モニタリングシステムの開発

パワー半導体の内部で起こる故障現象を時系列で可視化するシステムを紹介する。

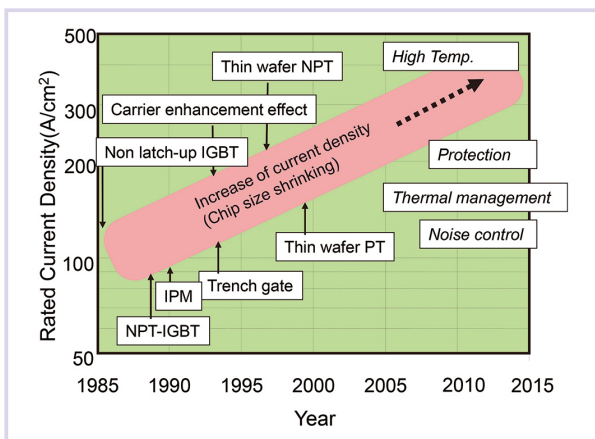


図3 パワー半導体 (IGBT) の電流密度向上

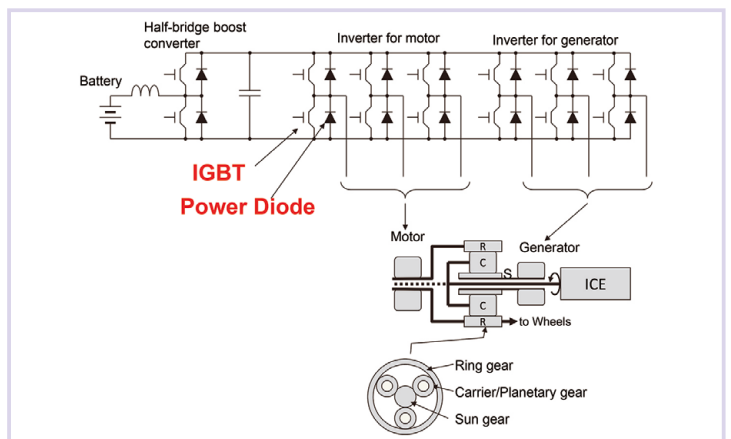


図4 ハイブリッド自動車の回路構成例

4.1 リアルタイム故障モニタリング^{3,4)}

パワー半導体モジュールの大電流ストレスによる故障を高精度に可視化するツールであり、モジュールの故障メカニズムをミクロなレベルで解析する。

システム構成

①走査型超音波探傷装置をベースに、②500 Aパワーストレス用電源、③冷却装置（水冷）、④温度計測系、⑤全体制御機能用GUIプログラム（LabVIEW）より構成される（図6）。

超音波探傷装置は反射エコーの時間

差から、デバイス内の各レイヤーの状態を同時に画像化することができる装置である。特に、超音波の進行経路にボイドや剥離があるとクリアに観察できる。このような超音波探傷の特性は積層構造を持つパワー半導体内で故障の原因となるボイドやクラック、剥離を強力に検出できるので、一般に出荷前検査などで用いられている。本システムはパワー半導体に加速試験である通電パワーサイクル試験⁵⁾を行いながら、同時に超音波探傷装置により内部構造の変化をモニタリ

ングするものである。空間分解能は μm レベル、走査スピードは、小さいパッケージのデバイスで数秒、大きなもので1分～数分に一枚画像を取得することができる。得られたデータは画像処理により様々なインデックスに分解され

適用例

パワーサイクル（500 A）試験下のIGBTモジュール内部のリアルタイムモニタリングを行った（図7）。超音波はベースプレート側（裏側）から入射している。欠陥“A”の様にストレス印加前から存在するボイド等に対し、矢印“B”“C”で示した画像変化はパワーサイクルの過程で発生している。画像による解析からボンディングワイヤ接合部分の局所的な発熱により、はんだ接合層に劣化が起きていることがわかる。本システムの開発により故障原因の発生位置や発生時期および進行を時系列で捉えることが可能になった。

4.2 リアルタイム高速温度モニタリング^{6,7)}

パワー半導体の故障を引き起こす大電流通電では、チップ内部温度は μs で数百 $^{\circ}\text{C}$ 上昇する。本システムは、デバイス断面の温度変化を μs レベルで捉えアニメーション化することを目的としている。

システム構成

①高速赤外線センサとカセグレン光学系による微小領域（ $\sim 50\ \mu\text{m}$ ）の高

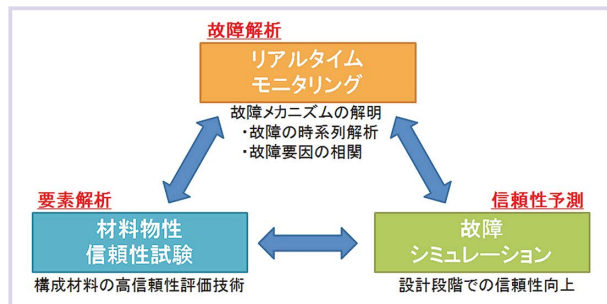


図5 リアルタイム・モニタリングをベースとしたパワー半導体の高信頼化

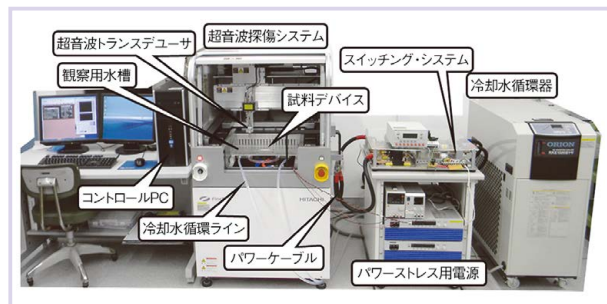


図6 リアルタイム故障モニタリングシステム

ングするものである。空間分解能は μm レベル、走査スピードは、小さいパッケージのデバイスで数秒、大きなもので1分～数分に一枚画像を取得することができる。得られたデータは画像処理により様々なインデックスに分解され

数値化される。パワーサイクル試験では強力な電源でパワーストレスを与えると同時に急速に冷却する必要があるが、ここでも超音波探傷の特長が生かされている。超

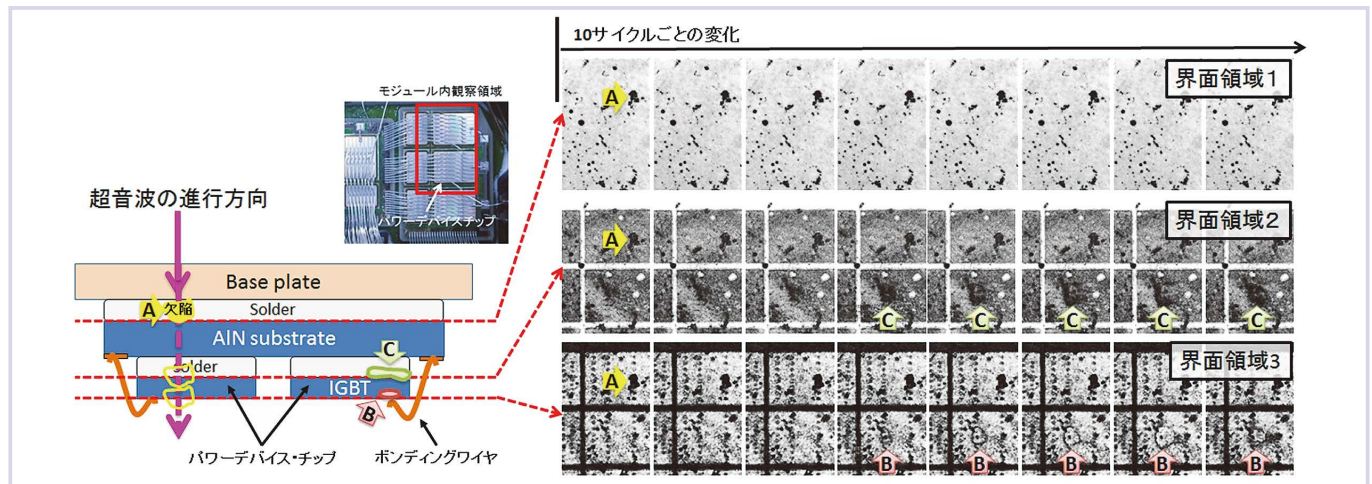


図7 リアルタイム故障モニタリングシステムにより得られた時系列画像

速赤外線検出 (<1 μs), ②サンプル上の評価領域を確認するための可視光CCD顕微鏡, ③フォーカシング用レーザー変位計, ④パワー回路, ⑤XYZ高精度三軸ロボットで構成される。サンプルのセッティング後は, すべてLabVIEWのGUI上でマウス操作のみで行う。

適用例

パワーダイオードをスイッチングした時のデバイス内の温度分布変化の観察例を図8に示す。赤外線センサで測定した温度分布画像は, 観察領域の光学写真に重畳して出力される。大電流

をデバイスに与えた時の急峻な温度変化を画像として捉えている。デバイスの赤外線による温度分布測定では, 異なる材料での赤外線放射率の違いを考慮した補正が必要であり, 正確な温度分布を得るための補正方法についても研究を行っている⁸⁾。

4.3 リアルタイム電流分布モニタリング⁹⁾

パワー半導体の主要な故障原因である, 電流集中現象を高速に観測する。電流分布は配線の変更などに影響を受けるが, 本システムはデバイス構成に変更を加えずに電流集中

現象を可視化することを目的としている。

システム構成

①開発した超小型磁界センサ (1.5 mm角), ②パワー半導体をスイッチングするパワー回路およびゲート駆動回路, ③ボンディングワイヤの高さや形状を3D情報として取得するレーザー変位計, ④XYZ回転の四軸ロボットより構成される。上記はLabVIEW上で操作し, データも画像化する。

専用開発した超小型磁界センサによりチップに流れる電流分布の可視化を可能とした。開発した超小型磁界センサは, 1.5 mm×1.5 mmのコイルをプリント基板の技術を用いてポリイミドフィルム上に形成したもので, 電流により発生する磁界を検出し画像化する。

適用例

IGBTチップ上のボンディングワイヤ近傍の磁束を計測することで, チップ電流分布を可視化した (図9)。レーザー変位計で表面形状を測定したデータから正確な電流センサのスキャンコースを割り出し, チップ全体の電流分布の推定が可能となった。本技術はIGBTモジュール製品出荷前の検査装置¹⁰⁾や埋込み型センサ¹¹⁾などへの応用に展開している。

5 まとめ

高効率電力利用のキー技術であるパワー半導体は, 現在ではおびただしい数が社会に導入されている。その一方でチップの電流密度や内部電界が高くなり信頼性の確保が非常に困難になってきている。今回紹介したリアルタイムモニタリング技術は, 故障に至るメカニズムを時間及び空間的にマイクロなレベルで可視化する。本技術は新たな故障解析技術としてパワーデバイスの高信頼化に向けた材料研究やシミュレーションの高度化に道を開くものである。

文献

- 1) Z. Shen, I. Omura, Proceedings of the IEEE 95 (4), pp. 778-789, (2007)
- 2) N. Seliger, E. Wolfgang, G. Lefranc, H. Berg, T. Licht, Microelectronics Reliability 42, pp. 1597-1604, (2002)
- 3) A. Watanabe, M. Tsukuda, I. Omura, Proc. of 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD), pp. 338-341, (2014)
- 4) A. Watanabe, M. Tsukuda, I. Omura, Microelectronics Reliability 53, pp.1692-1696 (2013)
- 5) J. Lutz, H. Schlangenotto, U. Scheuermann, R. D. Doncker, "Semiconductor Power Devices", Springer, (2011)
- 6) 中道聡, 藤本宏海, 大村一郎, 電気学会電子デバイス/半導体電力変換合同研究会, EDD-10-116, SPC-10-173, (2010)
- 7) 藤本宏海, 中道聡, 大村一郎, 電気学会電子デバイス/半導体電力変換合同研究会, EDD-11-068, SPC-11-160, (2011)
- 8) N. Hirata, A. Watanabe, I. Omura, Extended abstracts of the 2014 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp. 1016-1017, (2014)
- 9) H. Shiratsuchi, K. Matsushita, I. Omura, Microelectronics Reliability 53, pp. 1409-1412, (2013)
- 10) M. Tsukuda, S. Okoda, R. Noda, K. Tashiro, I. Omura, Proc. of 8th International Conference on Integrated Power Systems (CIPS), pp.1-6, (2014)
- 11) 山口治之, 附田正則, 渡邊晃彦, 大村一郎, 電気学会電子デバイス/半導体電力変換合同研究会, EDD-14-067, SPC-14-129, (2014)

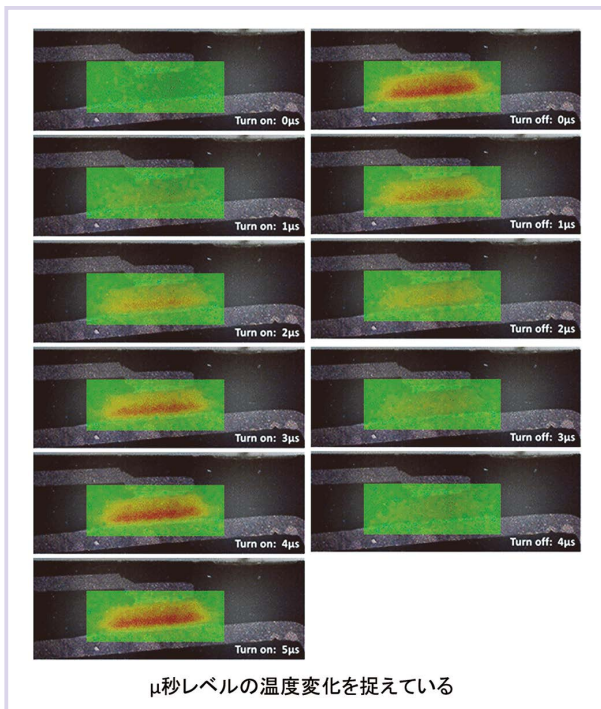


図8 リアルタイム高速温度モニタリングシステムにより得られた時系列画像

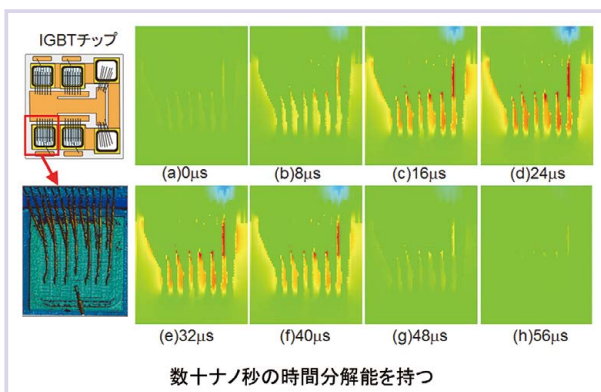


図9 リアルタイム電流分布モニタリングシステムにより得られた時系列画像