

次世代パワー半導体のための実装技術



研究ノート

菅 沼 克 昭*

Packaging technology for next generation power devices

Key Words : die-attach, power semiconductor wide band gap, interconnection

1. 電力変換と環境

今日のエレクトロニクス物作りの移り変わりの激しさには、この産業に関わる者皆が驚いている。過去には日本が最も得意としたパソコン、スマホ、液晶テレビや太陽光発電が、瞬く間に生産拠点を海外へ移転してしまった。資金力さえあればどこでも作れるというデジタル機器の怖さがここにあるようだ。

一方で、幸いにも電力変換機器は、日本が誇る摺り合わせの技術として、今日も我々を支えている（図

1）。電力変換機器は、発電から送電ばかりでなく、情報から車まで全てのエレクトロニクス機器に必要な電気エネルギーを供給伝達する心臓である。ここに、今日の電力変換機器で失われている膨大なロスを削減するための高効率化が、世界の環境の将来を支える技術として期待されている。単純なリレー式のスイッチング機器だけでなく、パワー半導体技術の革新である。

例えば、情報機器を考えてみよう。家庭、学校や

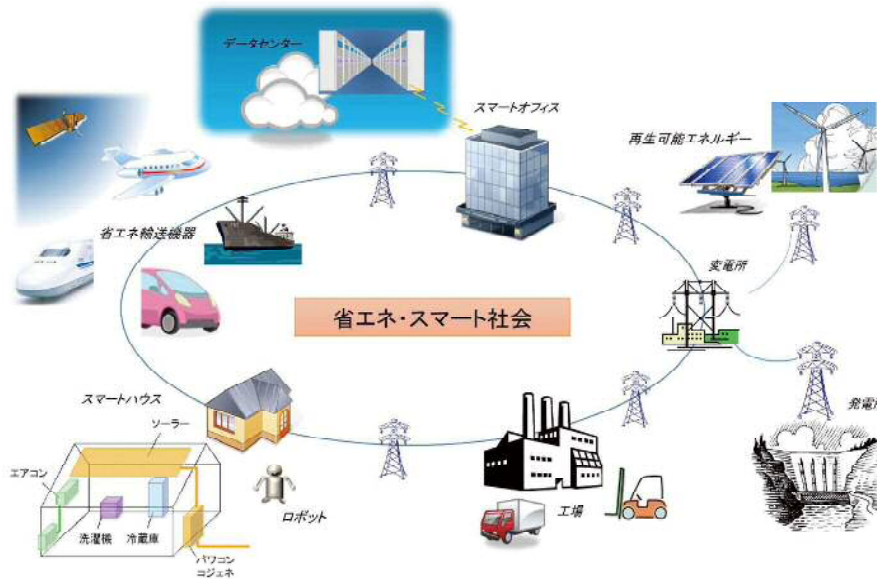


図1 パワー半導体が活躍する幅広いエネルギー変換分野.



* Katsuaki SUGANUMA

1955年1月生
 東北大学工学系大学院原子核専攻博士課程後期課程修了 (1982年)
 現在、大阪大学 産業科学研究所
 教授 工学博士 材料工学
 TEL : 06-6879-8520
 FAX : 06-6879-8522
 E-mail : suganuma@sanken.osaka-u.ac.jp

オフィスにおけるスマートフォンやノートパソコンなどのパーソナル情報機器の利用はもとより、ネットワークの先の分散基地局やクラウドサーバーでは、送電所からの電力を受けて多段のサーバーアレイが稼働している。今日のIoTの急激な展開は、我々身近な機器の増加に留まらず、クラウド機器の高度化と増加に伴って拍車を掛け、これに伴いエネルギー消費は鰻登りになっている。消費電力は2025年には2006

年時点の9倍、世界の全消費電力量の15%以上に膨れあがると言われる [1]。今後、IoTでトラフィックが桁違いに増える世界では、如何にクラウドのエネルギー消費を抑えるかが大きな課題となる。また、ドイツが推奨する Industry 4.0 では、正にこの点を捉えた情報トラフィック省エネ化の技術が、産業界の情報化推進で重要開発項目に挙げられている。また、自動車をはじめとする輸送システムも、エネルギー消費、CO₂排出では多大な影響を持つ。特に、CO₂排出削減のためには、燃焼エンジンの電動化は避けられない方向で、この1年で世界が大きく舵を切り始めている。もちろん自動車産業は、我が国の得意とする主要産業であるが、電動化に伴う省エネルギー化技術の革新は、今まで以上に強く望まれる。

2. パワー半導体はSiからワイドバンドギャップ・パワー半導体へ

パワー半導体の素子としては、長らくSi（シリコン）が主役を務めてきた。パワー半導体を用いたスイッチング電源のエネルギー変換効率は90%を越えているが、その1%の効率改善でも世界的には莫大な省エネルギーとなる。このエネルギー変換効率向上への期待から、パワー半導体の世界の市場は年々拡大している。

Siパワー半導体による電力変換システムで失われるエネルギーは、SiC/GaNワイドバンドギャップパワー半導体の導入で大幅に改善される。表1にワイドバンドギャップ半導体の特徴をSiと比較して示した。SiCやGaNは、バンドギャップが広く熱伝導に優れることから、耐圧に優れ、高温まで動作が可能になる。オン抵抗は小さくでき、より高周波駆動を実現にするので、機器の小型化が可能になる。図2をご覧ください [2]。従来のSiを使ったIGBTの電力変換ロスが、SiとSiCをハイブリッドにすることで

表1 ワイドバンドギャップ・パワー半導体の特徴

	Si	SiC	GaN
バンドギャップ (eV)	1.12	3.26	3.39
キャリア移動度 (cm ² /V·s)	1350	~700	900~1500
絶縁耐圧 (MV/cm)	0.3	2.8	3.3
熱伝導率 (W/m K)	160	490	2.1

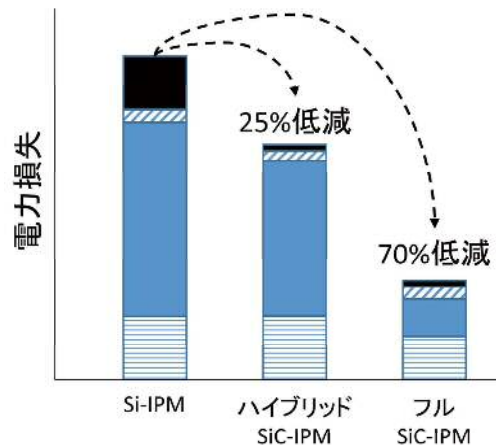


図2 SiC化によるIGBT電力変換の損失低減効果 [3]。定格1200V/75A、上からFWD (Free Wheeling Diode) スwitching損失、FWD定常損失、トランジスタ部のswitching損失、トランジスタ定常損失の順。

25%の低減、オールSiCにすると70%低減できる。この期待に伴って、SiCとGaNのパワー半導体の市場規模は図3に示すように急激な成長を見せ、2020年には700億円規模に成長すると期待される [3]。一方、GaNパワー半導体の市場規模は、2012年ではほぼゼロであるが、2020年までに急成長を遂げ1200億円程度になると見込まれる。この様に、Siパワー半導体の市場が更に拡大するとともに、その性能限界を超える新たなワイドバンドギャップ半導体が台頭し、省エネルギー技術の主役として一大パワー半導体市場を形成すると期待される。

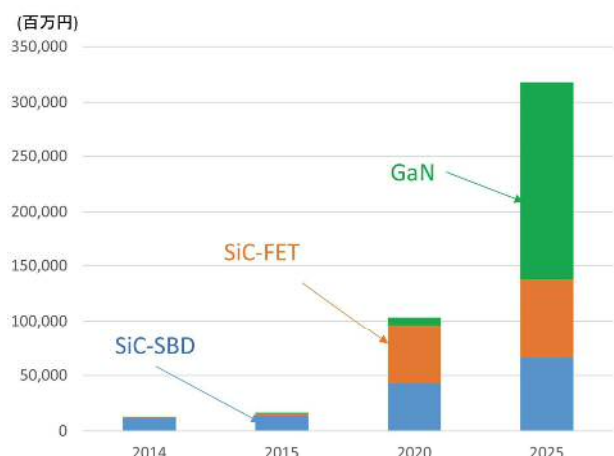


図3 ワイドバンドギャップ・パワー半導体の市場成長予測 [4]。

3. 新実装技術でボトルネックの解消

一般的なパワー半導体の縦型実装構造を図4に示す [4]。SiやSiCのデバイス表面に配線が形成され、

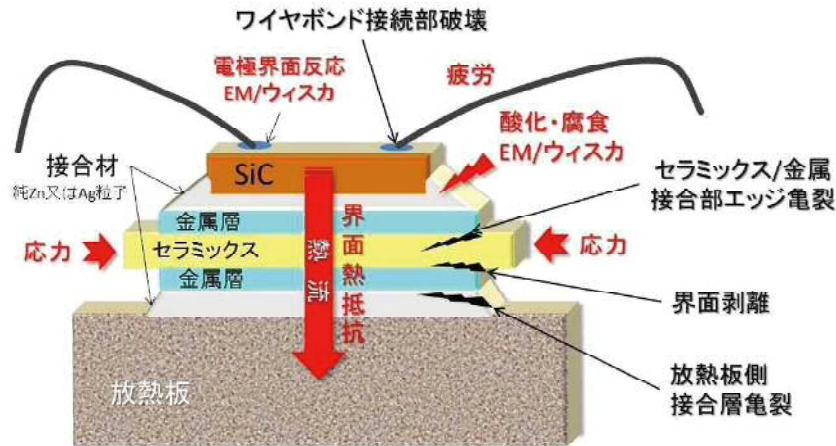


図4 パワー半導体の基本的な実装構造と主な劣化因子 [5].

半導体で発生する熱を下方向へ逃すダイアタッチが為される。この熱との戦いが、次世代半導体実現の鍵を握っている。

ここで、筆者が少しだけ自負できる研究として、世界初のAl張りセラミックス絶縁基板（所謂DBA: Direct Bond Aluminum）の開発に触れよう [5]。Al板のセラミックスへの接合に高圧鋳造を適用したもので、この技術開発の裏には筆者のTEM観察好きであった経緯があるのだが、これは紙面の関係で割愛する。それまでの常識であったCu張り基板（DBC）が車載機器で割れる課題を解決したのがDBA技術であり、世界初のハイブリッド自動車に搭載された。その時も125℃までの耐熱性を実現する「熱応力の緩和」が鍵であった。これが、今度はさらに高温を発する次世代半導体であるので、過去の常識が通じない接合構造、冷却構造が必要とされる。その理想の動作温度は、250℃と言われる。

筆者の提案は、はんだを捨てAg粒子を低温で焼結して接合する新しい「焼結接合」であった（図5）

[6]。実は、焼結接合自体は35年前に提案している [7]。今回新たにAg焼結ダイアタッチとして、信頼性や優れた熱伝導を実現する技術を提案したわけだ。うれしいことに、今日、次世代半導体の高機能接合技術として、世界中がこの方向に向いている。

一方、パワー半導体は各種機器の電力変換を司る心臓と言ったが、未だにこれを安全安心に用いるために共通化された信頼性評価技術と基準が無い。また、個々の製品の性能で優劣が付けられず、優良品と粗悪品を区別する方法が無い状況である。Siパワー半導体でさえ市場故障が頻発しているので、更に電力密度が増加するSiCやGaNに対しては、信頼性を証明したデファクト基準が無い状況では少々心許ない。パワー半導体の信頼性評価においては、多くの項目を考慮しなくてはならない。ダイアタッチ部位の疲労破壊、セラミックス絶縁基板や接合界面の劣化、ワイヤボンド接続界面の疲労劣化、大電流密度で引き起こされるエレクトロマイグレーションなど、これまで未経験の環境に曝される機器の劣

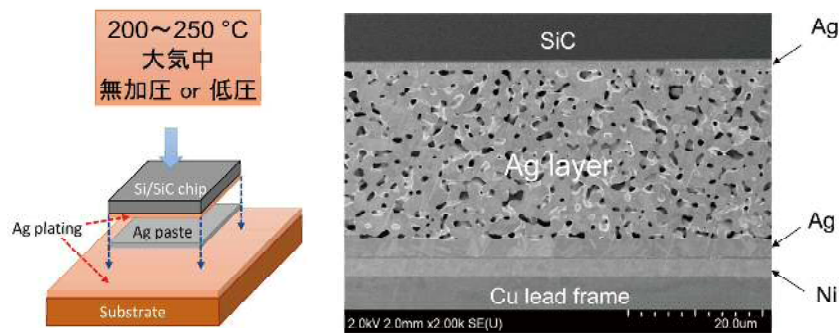


図5 Ag焼結接合の模式図を典型的な断面組織。

化事象を把握し、寿命を正確に予測しなければならない。少々手前みそとなるが、基礎からしっかりと取り組み理解し、我が国が得意なすり合わせ技術を駆使して次世代機器を作り出す。大学と産業界が強く連携できるところが、これを実現するものと期待している。

参考文献

1. 経済産業省グリーンIT推進協議会資料より、(2008)
2. 大月高実、井上貴公、玉木恒次、大開美子：三菱電機技報、Vol.88、No.5(2014), 27-30.
3. 富士経済資料より、<https://www.fuji-keizai.co.jp/market/12098.html>
4. 菅沼克昭編著、「SiC/GaNパワー半導体の実装と信頼性評価技術」、日刊工業新聞社、(2014).
5. X. S. Ning, K. Suganuma: Mat. Res. Soc. Symp. Proc., vol.445 (1997), pp.101.
6. K. Suganuma, S. Sakamoto, N. Kagami, D. Wakuda, K. -S. Kim, M. Nogi: Microelectron. Reliab., 52[2](2012), 375.
7. K. Suganuma, T. Okamoto, M. Shimada, M. Koizumi: J. Amer. Ceram. Soc., 66 (1983), c117.

