環境，省エネを支えるパワー半導体モジュールの動向

後藤 友彰*

The Power Module Trend for Energy Saving Systems

Tomoaki GOTO*

* 富士電機株式会社電子デバイス事業本部松本工場技術統括部パッケージ実装技術部 (〒390-0821 長野県松本市筑摩4-18-1)

* Packaging Technology Department, Semiconductors Technology Division, Matsumoto Factory, Fuji Electric Co., Ltd. (4-18-1 Tsukama, Matsumoto-shi, Nagano 390-0821)

1. はじめに

近年，地球温暖化は最も大きな環境問題であり，その原因としてはCO₂など温室効果ガスの排出が考えられている。世界規模での地球温暖化による異常気象を防止するため，1997年に気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3，京都会議）において温室効果ガス削減の取り組みが議決された。日本国温室効果ガスインベントリ報告書¹⁾をもとに作成した京都議定書の排出基準に対する年度ごとの排出量の割合をFig. 1に示す。2012年度に1990年度排出量に対し-6%という京都議定書の目標に対し，実際の排出量は増加傾向にある。日本においてはオイルショック以降，1990年までにすでに省エネ活動を続けており，他国より厳しい目標値になっているともいわれているが，今後排出量を減少に転じ大幅な排出削減を行うためには抜本的な対策が必要となる。

各国で温暖化対策が進まないなか，2008年後半にリーマンショックを発端とする世界的経済危機が発生した。その中で米国ではオバマ政権下のグリーンニューディール政策として，環境対応をキーワードにした経済対策（再生可能エネルギー利用と省エネルギーの推進）を実施している。一方日本では，鳩山首相が09年の気象変動首脳会合で温暖化排出ガスの削減を2020年までに1990年度に対し25%実施することを表明した。それに従い自然を利用した再生可能エネルギーを2020年度までに一次エネルギー全供給量の10%に到達させることを閣議決定した²⁾。

この動きにより，従来の化石燃料に代わり風力発電や太陽光などの自然エネルギーが注目されるようになってきた。ところで風力発電や太陽光発電により発電された電気エネルギーは，必要とされる電流，電圧，および周波数にパワーエレクトロニクス技術を用いて変換される。このパワーエレクトロニクス技術は，エレクトロニクス制御による電気エネルギーのコントロールや変換，加えて他のエネルギー形態への変換技術であり，その適用分野は，前述の自然発電ば

Fig. 1 Trends in Greenhouse gases emissions in Japan

かりでなく，われわれの生活のほとんどの家電製品から自動車などの大衆消費材に適用されている。

パワーデバイス^{3)~5)}は，バルブデバイスともいわれ，何らかのスイッチ機能を持ち，パワーエレクトロニクス技術において最も基本的かつ重要な構成要素であり，自然エネルギー発電における電力変換，およびモータ制御におけるパワーデバイスの果たす役割は重要である。風力発電においては，発電した電力の変換機にパワーデバイスが使用されている。この風力発電におけるパワーデバイスは風力発電塔内の限られたスペースに設置されることが多く，そのためパワーデバイスを水冷することにより実装密度を上げ小型化を図っており，効率化とダウンサイジングが図られている⁶⁾。風力発電ユニット容量は2000年に0.6MWであったものが，2007年には約3倍の1.8MWに増大している。そのため使用しているパワーデバイスはさらなる高密度化，かつ大容量化が求められている。また，この風力発電機の大形化に伴い，設置場所が従来の陸上から海上に移動している。海上は安定した風が吹くため発電効率が優れる一方，保守作業が難しいため使用部品の高信頼性が要求される。また，電力輸送の効率化を図るため必然的に高電圧となり，そのためパワーデバイスの高耐圧化が進んでいる。

加えて、直流を交流に逆変換するインバータ制御方法として高い電流容量帯が必要とされているため、その意味からも高耐圧化が望まれている⁷⁾。

このような環境、省エネに対する市場要求に対応し、大電流パワーデバイスの小型、高効率化を進める上でのパワー半導体パッケージングに関する技術動向について報告する。

2. パワー半導体デバイス

現在、MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) や IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) などのパワー半導体デバイスが電力変換のスイッチングデバイスとして多く使用されている。Fig. 2 に IGBT チップの電流密度のトレンドを示す⁸⁾。パワー半導体デバイスは、通電時の定常損失とスイッチング損失を下げるために表面構造や厚さ方向の最適化が行われてきており^{9),10)}、その結果、電流密度 (A/cm^2) が大幅に大きくなっている。

また、RB-IGBT (Reverse Blocking IGBT) のように逆阻止をもたせたデバイスも実用化に至っている¹¹⁾。RB-IGBT は省エネルギー化対象として重要なインターネットデータセンター向けに用いられるアドバンスト NPC⁺ (Neutral Point Clamped) で実現した新 3 レベル高効率化 UPS⁺ (Uninterruptible Power Supply)^{12)~14)} に適用されている。

3. パワー半導体モジュール

パワー半導体モジュールの代表である IGBT モジュールについて述べる。IGBT チップとダイオードを搭載し、規定のケースに収めたものが IGBT モジュールと呼ばれている。IGBT モジュール構造の特徴は、以下 3 点である。

1. 複数の IGBT チップを搭載している
2. モジュール内部にて電気回路を形成
3. モジュール内部にて絶縁を確保

IGBT モジュールの一般的な構造を Fig. 3 に示す。IGBT モジュールは、複数の IGBT チップとダイオード、絶縁を有した電気回路基板（一般に DCB：Direct Copper Bonding 基板）、放熱用金属プレート（銅ベースなど）および、電流を外部へ導く端子が埋設された樹脂製のケースで構成されており、各構成部品は、はんだ付けや接着で接合されている。

IGBT モジュールにおいて大電流化、高効率化を達成する際の課題は、電流増大によるチップおよび回路部の温度上昇の抑制と信頼性確保である。

4. 大電流化に伴う IGBT チップ温度上昇

パワーモジュールにおける IGBT チップ温度（チップ温度上昇幅 ΔT_{j-c} ）は下記の式にて示される。

$$\Delta T_{j-c} = P \times R_{th(j-c)} \quad (1)$$

Fig. 2 Trends of IGBT chip

Fig. 3 Structure of IGBT module

P ：発生損失 [W], $R_{th(j-c)}$ ：チップ接合面から放熱面までの熱抵抗 [$^{\circ}C/W$]

$$P = I^2 \times R \quad (2)$$

I ：チップに流れる電流 [A], R ：チップの電気抵抗 [Ω]
式 (1), (2) より、電流量と IGBT チップ温度（温度上昇幅）の関係は下記の式にて表すことができる。

$$\Delta T_{j-c} = I^2 \times R \times R_{th(j-c)} \quad (3)$$

つまり、電流量が増大すると、IGBT チップの発熱量は式 (3) より、電流の 2 乗に比例して増加する。大電流化を実現するためには、チップ内部の抵抗 R 、および、IGBT チップ接合面から放熱経路の熱抵抗 $R_{th(j-c)}$ を低減する必要がある¹⁵⁾。

5. パワー半導体モジュールの高放熱化技術

5.1 IGBT モジュールの放熱経路

IGBT チップから発生した熱は、主に以下に示す経路で放熱される。

[IGBT モジュールの放熱経路]

IGBT チップ → チップ底面のはんだ → DCB 基板
→ DCB 下のはんだ → 銅ベース → グリース → 冷却材

これら放熱経路における各々の部材の熱抵抗 (R_{th}) を小さくすることが、大電流・パワーデバイスにおいて必要である。 R_{th} は下記の式にて表される。

Table 1. Characteristics of ceramics use

Ceramics	Thermal conductivity	Thermal expansion	Ceramic thickness
Alumina	20 W/mK	7 ppm/K	0.25–0.32 mm
Aluminium nitride	170 W/mK	4 ppm/K	0.635 mm
Silicon nitride	70 W/mK	3 ppm/K	0.32–0.635 mm
Metal base copper	310 W/mK	16 ppm/K	base thickness 3 mm

Fig. 4 Experimental results of the transient thermal impedance characteristics

$$R_{th} = t / (\lambda \times S) \quad (4)$$

t : 厚み, λ : 熱伝導率, S : 面積

熱抵抗 R_{th} は式 (4) から熱伝導率に反比例していることがわかる。つまり熱伝導率の低い物質で IGBT モジュールを構成するとチップの温度上昇につながる。

5.2 セラミックス絶縁基板による高放熱化

DCB 基板の選定指標として、熱特性を Table 1 に示す。代表的な DCB 基板の絶縁層として用いられているセラミックス材の熱伝導率は 20~170 W/mK である。セラミックス材の分類としては、アルミナ (Al_2O_3)、窒化アルミニウム (AlN)、窒化珪素 (Si_3N_4) が代表的である。アルミナは高強度で安価であるが、窒化アルミニウム、窒化珪素と比較し熱伝導率が劣る。Fig. 4 に、アルミナ基板および、窒化珪素基板を使用した場合の過渡熱抵抗比較結果を示す。

一方、熱膨張係数については窒化アルミニウム、窒化珪素と比較しアルミナは最も銅ベースに近い。そのため、製品稼動時における温度変化によってアルミナ基板と銅ベース間に発生する応力は窒化アルミニウム、窒化珪素基板と比較して小さくなり、高信頼化が可能である。

また、窒化アルミニウムは、高熱伝導率であるが強度が弱いため、セラミックス基板厚みが他の材質と比較し $t=0.635$ mm と厚くなってしまう。結果的には、窒化珪素 (Si_3N_4) において $t=0.32$ mm を用いた場合と、ほぼ同じ熱特性となる。

そのため、製品に要求される信頼性、熱特性を考慮し放熱性を優先する製品においては窒化アルミニウム、窒化珪素基板を適用し¹⁶⁾、信頼性を優先する製品においてはアル

Fig. 5 Relation between chip spacing and max junction temperature

Fig. 6 3D contours and diagonal lines for different spacing silicon layout of 0.5 mm and 4.0 mm

ミナ基板を使用している^{17),18)}。

5.3 チップ搭載位置の最適化

パワーモジュールでは、1つのパッケージに複数個の IGBT が搭載されており、大電流通電時には、チップから放熱される熱による相互熱干渉の影響を考慮する必要がある。ここでは、チップ間隔がチップ温度に及ぼす影響について調査した一例を示す。

調査方法は、三次元 FEM 解析モデルを用いて定常熱解析を実施した。Fig. 5 は、チップ間隔とチップ最高温度の関係を調査した結果であり、チップ間隔が狭いほどチップ温度が上昇している。

チップの近接搭載がチップ表面の温度分布に及ぼす影響を Fig. 6 に示す。チップ間隔が 0.5 mm および 2 mm の場合は、最高温度点の場所がチップ中央から近接するチップに近い端部に移動し、さらなる温度上昇を発生させる。これはチップ温度と高密度実装がトレードオフの関係であることを示している。チップ表面の温度分布に偏りがあると熱暴走や信頼性が低下する恐れがあるため、チップ表面の温度はできるだけ均一であることが望ましい。チップ間隔が 4 mm 以上離れるとチップ中央が最高温度となり、各チップの熱干渉を小さくできる。このため、放熱源を離す設計が高密度実装において効果的である¹⁵⁾。

6. IGBT モジュールの絶縁設計技術

熱抵抗 R_{th} は式(4)から部材の厚さに比例することがわかる。絶縁耐圧が確保できれば低熱伝導率のセラミックス厚さを薄くすることでチップ温度上昇を抑制したモジュールの構成が可能である。またパワーエレクトロニクス装置の高耐圧化のトレンドに伴い、絶縁設計が重要となっている。

絶縁破壊耐圧は、最大電界強度に依存するため電界シミュレーションを用いて絶縁設計を行っている¹⁹⁾。Fig. 7にDCB基板断面部の電界シミュレーション解析結果を示す。これらのシミュレーションを用い電界強度を低くする構成を採用することにより、セラミックス絶縁層の薄膜化や、高耐圧に対応したIGBTモジュール構造を可能としている。

7. IGBT モジュールの高信頼性化技術

IGBTモジュールは、各部材の熱膨張係数差により発生する熱応力により、主に、接合部が破壊する。大電流化に伴い4章で述べたように、発熱量が増大するため、IGBTモジュールの高信頼性化においては、接合部の信頼性を向上させることが必要である。特に、IGBTモジュールにおける発熱部はIGBTチップと電気回路部であることから放熱経路と、電流経路となる端子接合部の信頼性を確保することが重要となる。

大電流用パワーモジュールでは高い信頼性が要求されるが、ここでは信頼性向上の試みとして、はんだレス接合である超音波端子接合法による銅端子-銅パターン直接接合^{20),21)}について説明する。Fig. 8(a)に超音波端子接合の外観写真を示す。従来の端子はんだ接合構造においては、はんだ材と銅材の熱膨張係数差により、はんだ層に応力が集中する。このため、はんだ層にクラックが発生して接合が劣化していた。Fig. 8(b)に温度サイクル試験（試験条件 $-40^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 繰り返し）後の端子断面写真、Fig. 8(c)に温度サイクル試験前後の引っ張り強度試験の比較結果を示す。従来のはんだ接合では、300サイクル後には、初期に比べ約50%の耐量劣化が確認された。これに対して超音波接合では、温度サイクル試験前後で耐量劣化がほぼ見られず、接合面も初期から変化していない。本製品で採用した超音波端子接合法は、銅端子-銅パターン直接接合を実施することで、接合面での熱膨張係数差をなくし、著しい温度サイクル耐量の改善を達成した。

8. 今後の課題と展望

スマートグリッドに代表される環境、省エネルギー向けシステムにおいて装置の小型化、低損失化がより進む方向である。コアとなるパワー半導体が今後とも重要となり、電力密度、電圧、周波数限界を含めて適用範囲を拡大していくことが見込まれる。

Fig. 7 Simulation results of electric field for IGBT module structure (Cross section of DCB)

Fig. 8 Ultrasonic welding technology for IGBT module (a) Outside view, (b) Cross-section of joint layer after thermal cycling test, (c) Tensile strength of terminal after thermal cycling test

半導体デバイスはシリコンデバイスの薄膜化や高精細化により低損失化が進み、より高電流密度での使用が予想される。またSiCなどのワイドバンドギャップ素子の導入により、電力密度、電圧、周波数域の拡大が見込まれる。これらの状況においてパワー半導体モジュールは、より高放熱、高耐圧化が進むとともに、EV、EHV用途に代表されるように小型化（高電流密度化）、軽量化が重要となると考えている。

今日の大きな社会ニーズである環境、省エネルギーに因るためにパワー半導体の開発を進め、社会貢献していく所存である。

(2011.5.12-受理)

文 献

- 1) National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan 2010, Greenhouse Gas Inventory Office of Japan (GIO), CGER, NIES, Ministry of the Environment, Japan, April 2010
- 2) 地球温暖化対策基本法案
- 3) B. J. Baliga, M. S. Adler, P. V. Gray, R. Love, and N. Zommer: "The Insulated Gate Rectifier," IEEE IEDM Tech., Dig., pp. 264-267, 1982
- 4) J. P. Russell, A. M. Goodman, L. A. Goodman, and J. M. Neilson: "The COMFET: A New High Conductance MOS Gated Device," De IEEE Electron Device Letter, EDL-4, pp. 63-65, 1983
- 5) 関 康和: "IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)の開発経緯," T. IEE Japan, Vol. **122-C**, pp. 1074-1076, 2002
- 6) 安保達明, 左右田学: "大容量風力発電とパワーエレクトロニクス," IEEJ Journal, Vol. **129**, No. 5, pp. 291-294, 2009
- 7) Y. Abe, K. Maruyama, Y. Matsumoto, K. Sasagawa, and K. Matsuse: "Performance Evaluation of an Auxiliary Power Supply System for Railways with Series Connection of IGBTs," IEEJ Trans. IA, Vol. **127**, pp. 241-246, 2007
- 8) 高橋孝太, 他: "IGBT モジュール「Vシリーズ」の系列化," 富士時報, Vol. **82**, No. 6, pp. 380-384, 2009
- 9) T. Laska, et al.: "The Field Stop IGBT (FS IGBT)—A New Power Device Concept with a Great Improvement Potential," Proc. ISPSD 2000., pp. 355-358
- 10) M. Otsuki, et al.: "The 6th Generation 1200 V Advanced Trench FS-IGBT Chip Technologies Achieving Low Noise and Improved Performance," PCIM Europe 2007
- 11) 関 康和, 他: "パワー半導体の現状と展望," 富士時報, Vol. **82**, No. 6, pp. 358-361, 2009
- 12) K. Komatsu, et al.: "New IGBT Modules for Advanced Neutral-Point-Clamped 3-Level Power Converters," IPEC-Sapporo, 2010, June, pp. 523-527, 2010
- 13) 小松康佑, 他: "アドバンストNPC回路用IGBTモジュール," 富士時報, Vol. **83**, No. 6, pp. 362-365, 2010
- 14) I. Sato, et al.: "Technologies for Practical Motor Drive Systems with Matrix Converter," Proceeding of PCIM'08 Europe, 2008
- 15) Y. Nishimura, T. Nishizawa, E. Mochizuki, T. Goto, Y. Takahashi, and S. Hashimoto: "Development of a New-Generation RoHS IGBT Module Structure for Power Management," Trans. JIEP, Vol. **1**, No. 1, pp. 44-47, 2008
- 16) 古閑丈晴, 他: "3.3kV IGBT モジュール," 富士時報, Vol. **80**, No. 6 pp. 397-401, 2007
- 17) 両角 朗, 他: "電気自動車用高信頼性モジュール技術," 富士時報, Vol. **76**, No. 10, pp. 630-633, 2003
- 18) 西浦 彰, 他: "ハイブリット車用IGBTモジュール," 富士時報, Vol. **79**, No. 5, pp. 350-353, 2006
- 19) 西村孝司, 他: "3レベルインバータ対応大容量IGBTの系列化—高絶縁パッケージ—," 富士時報, Vol. **83**, No. 6, pp. 370-374, 2010
- 20) 木戸和優, 他: "IGBTモジュール用超音波接合技術の開発(第一報)," Mate2010 予稿集, pp. 335-338, 2010
- 21) 木戸和優, 他: "IGBTモジュール用超音波接合技術の開発(第二報)," Mate2011 予稿集, pp. 197-200, 2011

＋用語解説

アドバンストNPC：RB-IGBTを中性点クランプに使用し、双方向スイッチとして活用したNPC。出力電圧ステップをマルチレベル化したNPCインバータは、使用する半導体数が増加し構成が複雑になる。導通ロスやコストの面から数百kVA以下の中小容量装置の適用が困難であった。RB-IGBTを用いることで装置内半導体数や回路の複雑化をさけることができる。

新3レベル高効率UPS：出力電圧ステップ数をマルチレベル化した回路をもつUPS。マルチレベル化により(1)従来電力回路にて一般的な2レベル方式を、3レベル化することにより正弦波に近い波形が出力できる。(2)電圧変形を制御するスイッチング損失の低減。(3)高調波フィルタ回路容量が半減、(4)電磁ノイズが半減、する効果をもつ。