

第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュール「Dual XT」

7th-Generation “X Series” IGBT Module “Dual XT”

吉田 健一 YOSHIDA, Kenichi

吉渡 新一 YOSHIWATARI, Shinichi

川畑 潤也 KAWABATA, Junya

電力変換装置に対する小型化，低損失化，高信頼性化の要求に応えるため，第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュールの系列において定格電流を拡大した「Dual XT」(Xシリーズ Dual XT)を開発した。Xシリーズ Dual XTは，半導体チップの特性の改善によって電力損失が低減するとともに，パッケージ構造の改善によってパッケージ通電能力が向上した。また， ΔT_j パワーサイクル耐量の向上と絶縁用シリコンゲルの耐熱性の向上により，連続動作時接合温度 $T_{jop}=175^\circ\text{C}$ を実現した。このパッケージサイズで業界初となる1,200 V/800 A 定格の製品である。

Power conversion equipment has been increasingly required to exhibit compactness, low loss and high reliability, and it is against this backdrop that Fuji Electric developed the 7th-generation “X Series” IGBT module “Dual XT” (X Series Dual XT) as a module that expands rated current. The X Series Dual XT has reduced power loss through semiconductor chip characteristic enhancement, while also improving the package current-carrying capability through package structure enhancement. In addition, by improving the ΔT_j power cycle capability and the heat resistance of the insulation-use silicone gel, the module achieves a junction temperature of $T_{jop}=175^\circ\text{C}$ under continuous operation. It is also the industry’s first module in this package size that has a 1,200-V/800-A rating.

1 まえがき

近年，地球温暖化防止の観点から，エネルギー効率の改善とCO₂排出量の削減が求められており，太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギー分野の需要が伸びている。この分野では特に電力変換装置の大容量化が進み，大容量 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールのニーズが拡大している。

電力変換装置に対する小型化，低損失化，高信頼性化の要求に応えるため，第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュールの系列において定格電流を拡大した「Dual XT」(Xシリーズ Dual XT)を開発した。

2 製品ラインアップ

Xシリーズ Dual XTの外観と内部を図1に，製品系列を表1に示す。ソルダーピンタイプ (M254, M285) とプレスフィットピンタイプ (M282, M286) の合計4種

表1 Xシリーズ Dual XT の製品系列

製品型式	ピンタイプ	定格電圧 (V)	定格電流 (A)	パッケージ型式	絶縁基板
2MBI225XNA120-50	ソルダーピンタイプ	1,200	225	M254	Al ₂ O ₃
2MBI300XNA120-50			300		
2MBI450XNA120-50			450	M285	
2MBI600XNE120-50			600		
2MBI800XNE120-50			800		
2MBI225XNB120-50	プレスフィットピンタイプ		225	M282	Al ₂ O ₃
2MBI300XNB120-50			300		
2MBI450XNB120-50			450	M286	
2MBI600XNF120-50			600		
2MBI800XNF120-50			800		
2MBI225XNA170-50	ソルダーピンタイプ	1,700	225	M254	Al ₂ O ₃
2MBI300XNA170-50			300		
2MBI450XNA170-50			450	M285	
2MBI600XNE170-50			600		
2MBI225XNB170-50			225		
2MBI300XNB170-50	300				
2MBI450XNB170-50	450				
2MBI600XNF170-50	600		M286		
2MBI600XNF170-50	600				

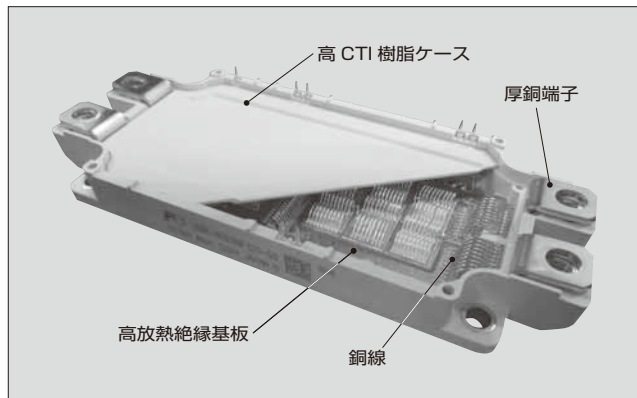


図1 Xシリーズ Dual XTの外観と内部

類のパッケージをラインアップした。M285パッケージとM286パッケージは，定格電流の拡大と信頼性の向上を図るため，出力端子の厚銅化，高放熱絶縁基板を採用するとともに，銅線接合技術，高CTI (Comparative Tracking Index) 樹脂ケースなどの新パッケージ技術を適用している。新技術の適用により，このパッケージサイズでは業界初となる1,200 V/800 A 定格の製品を実現した。

3 特性

エネルギー変換効率を向上する上で IGBT モジュールの電力損失の改善が重要であり、その電力損失は IGBT や FWD (Free Wheeling Diode) といった半導体チップの特性によって決定される。

3.1 IGBT 特性の改善

Xシリーズ Dual XT の IGBT では、ドリフト層の厚さを薄くすることにより、コレクター-エミッタ間飽和電圧を低減した。また、フィールドストップ (FS) 層を最適化することによって、ドリフト層を薄くした場合に起こり得るターンオフ時の電圧振動や耐圧の低下を抑制した。

これにより、Xシリーズ Dual XT の IGBT では、図 2 に示すように、従来製品「Vシリーズ」Dual XT に対して飽和電圧で約 0.4 V 低減、ターンオフ損失で約 7% 低減と大幅に特性を改善した。

3.2 FWD 特性の改善

Xシリーズ Dual XT の FWD では、ドリフト層の厚さを薄くすることにより、アノード-カソード間順方向電圧を低減した。また、ローカルライフタイムの最適化により、図 3 に示すように、従来製品と比較して逆回復波形をよりソフトなものにした。さらに、逆回復時のピーク電流とテール電流の削減によって逆回復損失を大幅に低減した⁽¹⁾。

これにより、図 4 に示すように Xシリーズ Dual XT の FWD では、従来製品に対して順方向電圧で約 0.1 V 低減、逆回復損失で約 9% 低減と大幅に特性を改善した。

3.3 電力損失比較

図 5 に電力損失を計算した結果を示す。3.1 節、3.2 節にて述べた改善によって、Xシリーズ Dual XT は電力損失を従来製品に対して、キャリア周波数 1 kHz で約 12% 低減した。

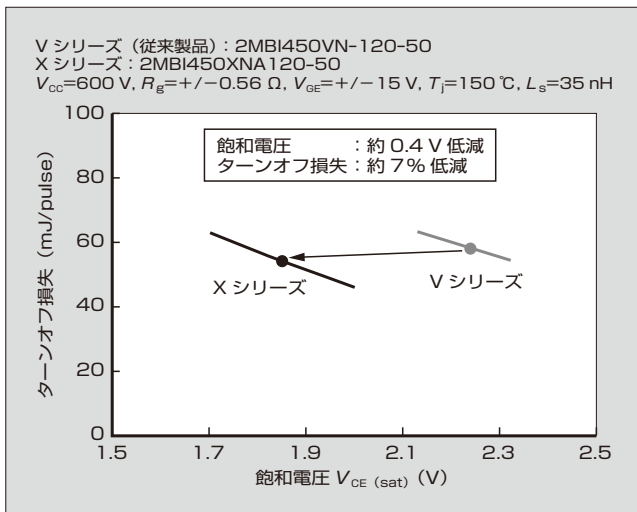


図2 トレードオフ特性 (IGBT)

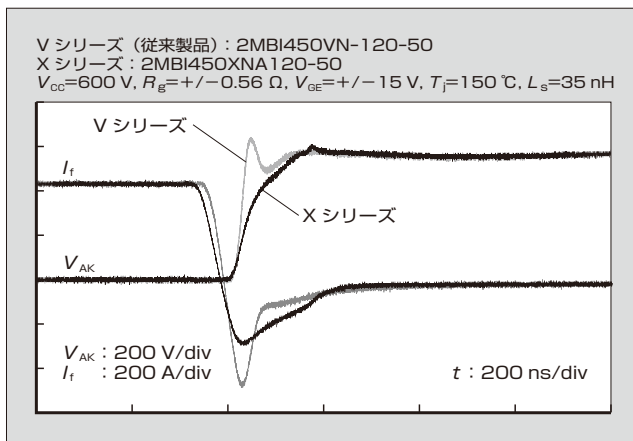


図3 逆回復波形

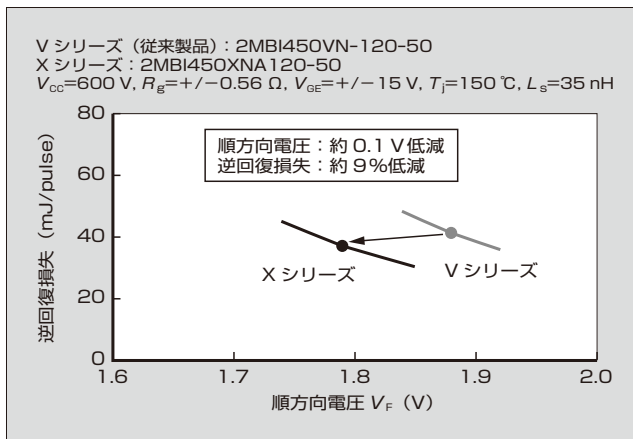


図4 トレードオフ特性 (FWD)

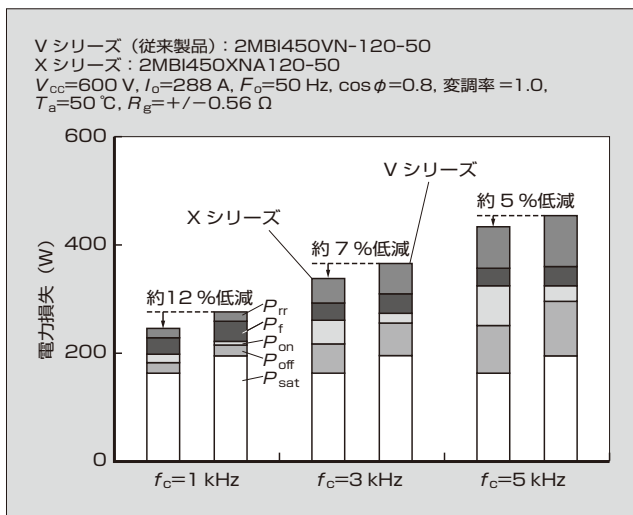


図5 電力損失

4 パッケージ技術

表 2 に、Xシリーズ Dual XT (M285, M286) のパッケージ構造における特徴を示す。新パッケージ構造では、装置の小型化に寄与するために、パッケージサイズを維持したまま出力電流の増大を図った。これを実現するために

表2 Xシリーズ Dual XT (M285, M286) のパッケージ構造における特徴

項目	Xシリーズ Dual XT	Vシリーズ Dual XT (従来製品)	
搭載チップ	Xシリーズ	Vシリーズ	
定格電圧	1,200 V	1,200 V	
最大定格電流	800 A	600 A	
絶縁基板	AlN	Si ₃ N ₄	
出力端子の銅厚	2.0 mm	1.5 mm	
ワイヤ 接合	出力端子	銅	アルミニウム
	絶縁基板間	銅	アルミニウム
T _{jop}	175℃	150℃	
ケース樹脂材料	高CTI樹脂	従来樹脂	
シリコーンゲル	高耐熱ゲル (-40~+175℃)	従来ゲル (-40~+150℃)	

は、通電時におけるパッケージ内の半導体チップを含む通電部分の発熱とパッケージの放熱性の両方を改善することが必要である。

4.1 AlN 絶縁基板による熱抵抗の低減

Xシリーズ Dual XT (M285, M286) では、半導体チップで発生した熱を効率よく放熱するために、AlN基板⁽²⁾を用いた高放熱絶縁基板を新規に開発した。

図6にジャンクション-ケース間の熱抵抗を示す。AlN絶縁基板を適用した半導体チップは、一般的に広く使用されているAl₂O₃絶縁基板を用いた場合に比べて、同一チップサイズで熱抵抗が約45%低減する。

4.2 銅線によるパッケージ内部の発熱低減

従来製品は、パッケージ内部の主回路配線にアルミニウム線を採用している。しかし、アルミニウム線は通電時の発熱が多く、従来製品の最大定格電流は600Aが限界であった。そこで、Xシリーズ Dual XT (M285, M286) は、主回路配線に銅線を採用した。表3に示すように、銅はアルミニウムに比べて抵抗率が40%低く、熱伝導率が77%高い。通電時のパッケージ内の発熱の抑制と放熱の

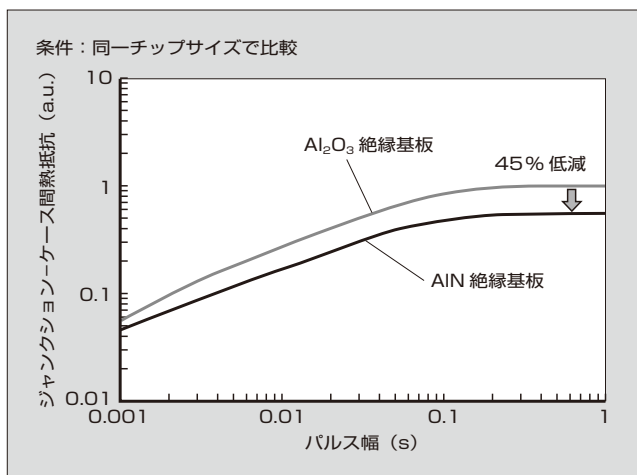


図6 ジャンクション-ケース間熱抵抗

表3 配線材料の物性

材料	抵抗率 (10 ⁻⁸ Ω・m)	熱伝導率 [W/(m・K)]
アルミニウム	2.5	220
銅	1.5	390
銅線効果	40%低減	77%向上

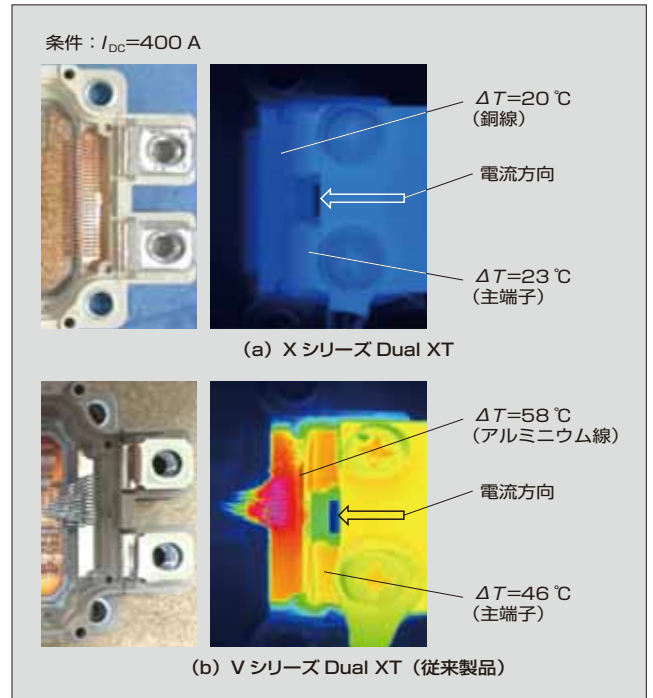


図7 パッケージの発熱の評価結果

改善により、温度上昇が劇的に改善した。また、従来製品の端子-絶縁基板間のアルミニウム線は密集している。Xシリーズ Dual XTはさらなる配線の低抵抗化を図るために、絶縁基板のレイアウトを一新することで銅線を一直線に配列できるようにし、かつ、本数を増やした。

パッケージの発熱の評価結果を図7に示す。従来製品のパッケージにおける配線の温度上昇がΔT=58℃であるのに対して、Xシリーズ Dual XT (M285, M286) のパッケージではΔT=20℃と半分以下に改善した。

4.3 出力端子の厚銅化によるパッケージ主端子の発熱低減

Xシリーズ Dual XT (M285, M286) は、出力端子の厚みを従来製品の1.5mmから2.0mmに厚くし、さらに、端子形状を最適化して発熱を低減した。図7に示すように、従来製品のパッケージにおける主端子の温度上昇がΔT=46℃であるのに対して、Xシリーズ Dual XT (M285, M286) のパッケージではΔT=23℃と半分に改善した。

4.4 連続動作時接合温度 T_{jop} の拡大

Xシリーズ Dual XTではさらに高い出力電流を達成するために、連続動作時接合温度 T_{jop} を従来製品の150℃から175℃に拡大した。T_{jop} を拡大するためには、大きな温

度変化に対する耐量 (ΔT_j パワーサイクル耐量) の向上や、高温での長期信頼性 (絶縁用シリコンゲルの耐熱性) の改善が必要である。

図8に ΔT_j パワーサイクル耐量を示す。従来製品では $T_{jmax}=150^\circ\text{C}$ に対して 175°C に温度を上げると、 ΔT_j パワーサイクル耐量が劇的に低下する。これに対して、Xシリーズ Dual XT でははんだ材の新規開発と半導体チップ上の新配線接合技術の適用により、 $T_{jmax}=175^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T_j=50^\circ\text{C}$ の条件で従来製品に比べて約2倍となる耐量の向上を実現した。

この結果、Xシリーズ Dual XT の ΔT_j パワーサイクル耐量は、 $T_{jmax}=175^\circ\text{C}$ 動作においても従来製品の $T_{jmax}=150^\circ\text{C}$ 動作を超える耐量を実現した。

IGBTモジュールの内部には、絶縁性能を確保するためにシリコンゲルが使用されている。図9に、シリコンゲル自体の温度と寿命の関係を示す。従来のシリコンゲルは、 150°C では10年以上の寿命があるが、 175°C では寿命は約2年に低下する。これに対して、Xシリーズ Dual XT は、新シリコンゲルを採用することによって 175°C でも10年以上の寿命があり、 150°C における従来製品と

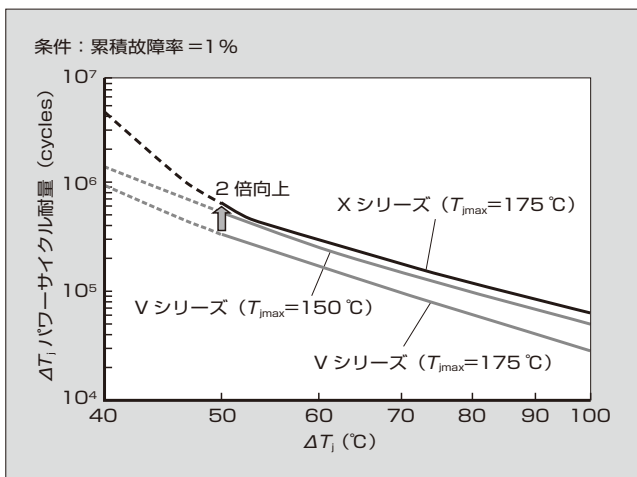


図8 ΔT_j パワーサイクル耐量

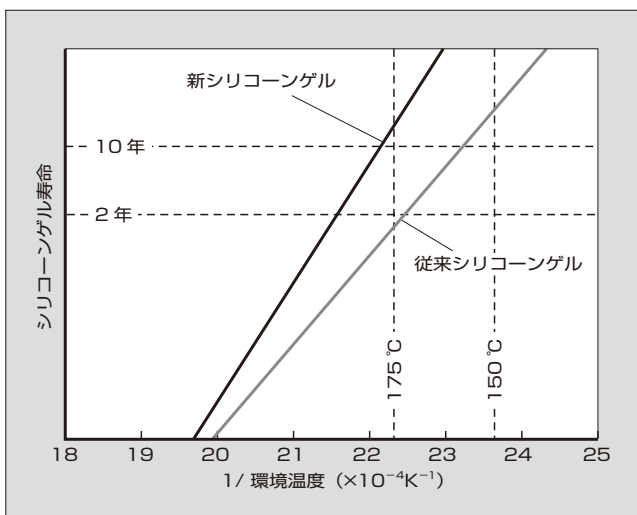


図9 シリコンゲル自体の温度と寿命の関係

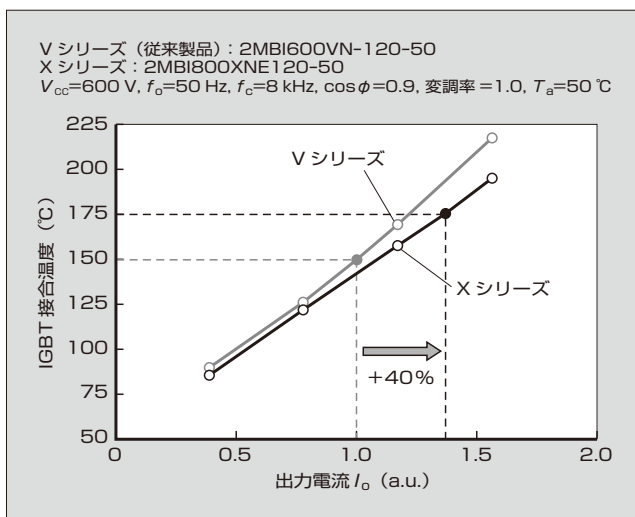


図10 インバータ出力電流とIGBT接合温度

同等のシリコンゲルの寿命を確保した。

5 まとめ

Xシリーズ Dual XT では、半導体チップの特性の改善による電力損失の低減、パッケージ構造の改善によるパッケージ通電能力の向上、および ΔT_j パワーサイクル耐量の向上と絶縁用シリコンゲルの耐熱性の向上により $T_{jop}=175^\circ\text{C}$ を実現した。これにより、インバータなどのIGBTモジュールを適用する製品において目標としていたエネルギー変換効率の向上や実動作時の出力電流の向上を実現できる。

図10に、改善効果の例として、インバータ出力電流とIGBT接合温度の関係を示す。Xシリーズ Dual XT の適用によって、従来製品の場合に比べて出力電流が40%向上した⁽⁴⁾。

6 あとがき

第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュール「Dual XT」は、半導体チップの大幅な特性の改善と新パッケージ技術により業界初の800A定格を実現した。今後も、新技術を適用した製品を提供することにより、各種電力変換装置の小型化や高効率化、高信頼性化に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) Onozawa, Y. et al. "Development of the 1200 V FZ-Diode with soft Recovery Characteristics by the New Local Lifetime Control Technique". Proceeding of ISPSD 2008, p.80-83.
- (2) Momose, F. et al. "The New High Power Density Package Technology for the 7th Generation IGBT Module", PCIM Europe 2015.
- (3) 川畑潤也ほか. 第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュール. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.254-258.

- (4) Takahashi, M. et al. “Extended Power Rating of 1200 V IGBT Module with 7G RC-IGBT Chip Technologies”, Proceeding of PCIM Europe 2016.



吉田 健一

IGBTモジュールの開発設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部モジュール技術部。



吉渡 新一

IGBTモジュールの開発設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部モジュール技術部チームリーダー。



川畑 潤也

IGBTモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部モジュール技術部。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。