

車載用第2世代 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2A シリーズ」

2nd-Generation SJ-MOSFET for Automotive Applications “Super J MOS S2A Series”

田平 景輔 TABIRA, Keisuke

新村 康 NIIMURA, Yasushi

皆澤 宏 MINAZAWA, Hiroshi

ハイブリッド自動車などの環境対応車における燃費の向上や電力変換機器の小型化要求を受け、パワー MOSFET には小型で低損失、低ノイズの製品が求められている。富士電機は、スーパージャンクション構造を採用し、低オン抵抗と低スイッチング損失を実現した車載用「Super J MOS S1A シリーズ」を開発し、量産化してきた。今回、導通損失を低減し、かつスイッチング損失とターンオフスイッチング時の跳ね上がり電圧のトレードオフを改善した車載用第2世代 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2A シリーズ」を開発した。本製品の適用により、電力変換機器の高効率化や小型化に貢献できる。

There has been increasing demand for smaller power conversion equipment and better fuel efficiency in eco-friendly vehicles such as hybrid electric vehicles. Accordingly, power MOSFET products are being required to be compact, low loss and low noise. Fuji Electric has developed and launched the “Super J MOS S1A Series,” a product for automotive applications that adopt a superjunction structure characterized by their low on-state resistance and low switching loss. More recently, Fuji Electric has developed the 2nd-Generation SJ-MOSFET for automotive applications “Super J MOS S2A Series,” which reduces conduction loss while improving the trade-off between switching loss and jumping voltage during turn-off switching. The use of this product contributes to size reduction and enhanced efficiency of the power conversion equipment for automotive applications.

① まえがき

近年、自動車市場においては、厳しくなる環境規制やユーザの環境意識の高まりにより、ハイブリッド自動車 (HEV) やプラグインハイブリッド自動車 (P-HEV)、電気自動車 (EV) に代表される環境対応車に注目が集まっている。これらの車種に搭載されているバッテリーの電力を効率的に利用することが燃費の向上に直結するため、電力変換技術 (パワーエレクトロニクス) の重要性が増している。加えて自動車の車内空間を広くして搭乗者の快適性を向上するため、車載用の電力変換器には小型化の要求も強い。そのため、車載用 DC/DC コンバータや充電器などの電力変換機器には、小型で高効率、低ノイズが要求されている。これらの電力変換機器に使用されているパワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) などの半導体スイッチング素子にも、小型で低損失、低ノイズであることが求められている。

このような要求に応えるため、富士電機では 2011 年に、スーパージャンクション構造を採用し、低オン抵抗と低スイッチング損失を実現した第1世代「Super J MOS S1 シリーズ」^{(1)~(3)}を開発し、2014 年に車載用のディスクリート製品「Super J MOS S1A シリーズ」(S1A シリーズ)を開発し、製品化した。

本稿では、S1A シリーズと比較して導通損失を低減し、かつターンオフスイッチング時におけるドレイン-ソース間電圧 V_{DS} の跳ね上がり (V_{DS} サージ) を抑制した車載用第2世代 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2A シリーズ」(S2A シリーズ) について述べる。

② 設計コンセプト

図1に、車載用充電器の PFC 回路においてパワー MOSFET に発生する損失の内訳を示す。パワー MOSFET の発生損失は、導通損失 P_{on} ならびにターンオン損失 P_{ton} とターンオフ損失 P_{toff} からなるスイッチング損失に大別できる。電力変換機器の電力変換効率を向上させるためには、導通損失とスイッチング損失の両方を低減させる必要がある。導通損失の低減にはオン抵抗の低減が有効であり、スイッチング損失の低減にはスイッチング速度を高くすることが有効である。ただし、スイッチング損失低減のためにターンオフ側のスイッチング速度を高くすると、ターンオフスイッチング時の V_{DS} サージが大きくなるため、ゲート振動により誤オンするといった課題がある。

そこで、S2A シリーズは S1A シリーズよりも単位面積当たりのオン抵抗 $R_{on} \cdot A$ を低減して導通損失を低減させることと、スイッチング損失を増やさずに V_{DS} サージを抑制してトレードオフを改善することを目標としている。

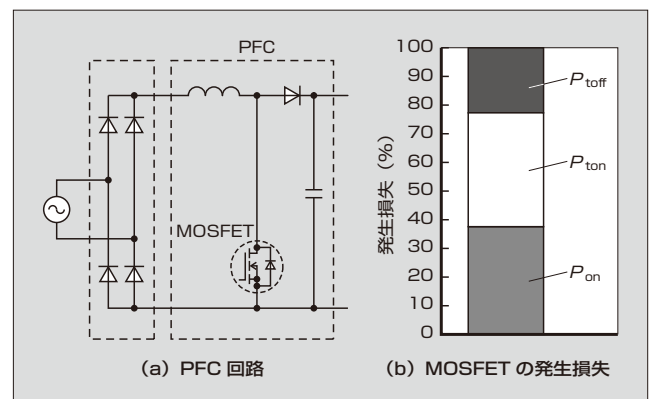


図1 充電器の PFC 回路部における MOSFET の発生損失

3 特徴

3.1 導通損失の低減

導通損失の低減にはオン抵抗の低減が有効であるため、S2A シリーズは $R_{on} \cdot A$ の低減に取り組んでいる。

S1A シリーズと S2A シリーズに適用しているスーパージャンクション構造は、ドリフト層である n 形領域と p 形領域を交互に配置することで、ドリフト層全体で耐圧を確保する構造となっている。このため、従来のプレーナ型と耐圧が同じであってもドリフト層の n 形領域の不純物濃度を高くすることができ、 $R_{on} \cdot A$ を大幅に低減することができる (図 2)。

S2A シリーズでは S1A シリーズと比較して、不純物拡散プロセスにおける技術の向上により、n 形領域の不純物濃度を高く保つことでドリフト層の抵抗値を低減して $R_{on} \cdot A$ のさらなる低減を可能にした^(9),10)。図 3 に、600 V 耐圧の S1A シリーズと S2A シリーズの $R_{on} \cdot A$ の比較を示す。S2A シリーズの $R_{on} \cdot A$ は $15 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ であり、S1A シリーズの $20 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ に対して 25% 低減している。

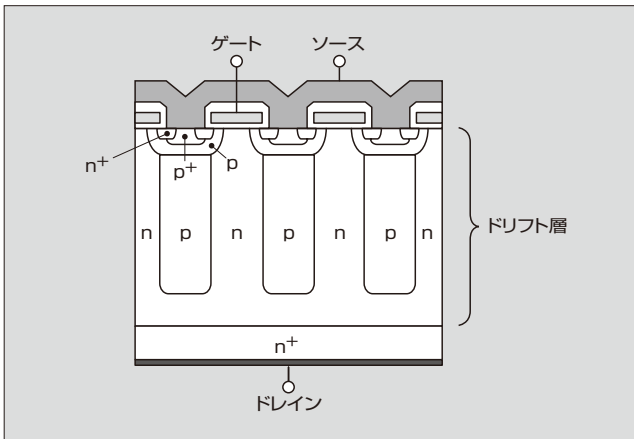


図 2 スーパージャンクション構造

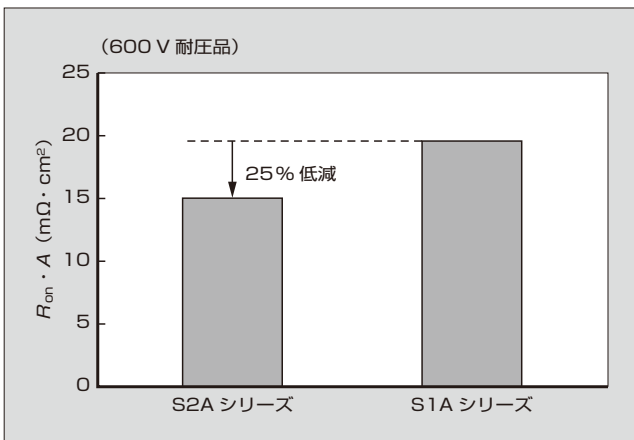


図 3 単位面積当たりのオン抵抗 $R_{on} \cdot A$

3.2 V_{DS} サージの抑制

2章で述べたように、スイッチング損失低減と V_{DS} サージ抑制にはトレードオフの関係があり、この関係を改善することが課題である。S2A シリーズでは、スイッチング損失を増やさずに V_{DS} サージを抑制し、トレードオフを改善している。

電源基板の回路パターン設計を行う場合、従来の電源基板のパターン設計の流用や、部品レイアウトなどの制約から理想的な回路パターンにできないことが多い。その場合、使用する MOSFET を置き換えるだけでは、回路上のインダクタンスが大きくなり、かつ駆動条件や回路定数が適切でない場合、 V_{DS} サージが大きくなるため、スイッチング時のゲート振動によって誤オンが発生することがある。

例として、チョップ回路を用いて、S1A シリーズと S2A シリーズを比較した。比較しやすいように、この回路は駆動条件や回路定数を、使用する MOSFET に合わせた最適化を行っていない。図 4 に、それぞれのターンオフスイッチング波形を示す。S1A シリーズでは、 V_{DS} サージが大きくなって誤オンが発生している [図 4 (a)]。

また、車載用の電力変換器はエンジンルームに搭載されるため高温で使用されるケースが多く、さらに、しきい値電圧 $V_{GS(th)}$ は負の温度特性を持っているため、ゲート振動の影響を受けやすく、誤オンしやすいことが想定される。誤オンの抑制には、 $V_{GS(th)}$ を上げることが考えられるが、一方で、 $V_{GS(th)}$ を上げるだけではターンオフスイッチング時の V_{DS} サージが大きくなるため、ゲート振動による誤オンの発生が懸念される。

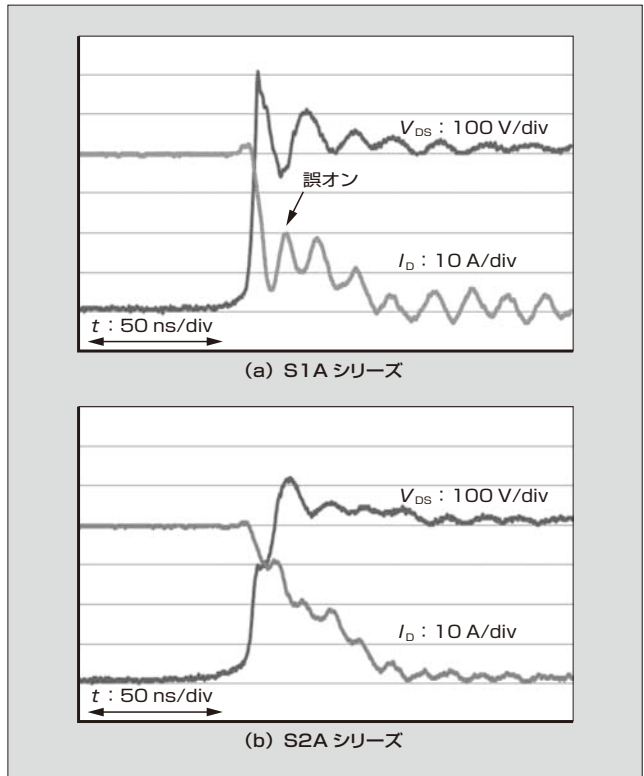


図 4 ターンオフスイッチング波形 (外付けゲート抵抗 $R_g: 2 \Omega$)

そこで S2A シリーズでは、 $V_{GS(th)}$ の最適化やゲート抵抗 R_g のチップへの内蔵化などの対策を行うことで、 $V_{GS(th)}$ を上げつつ、誤オンの発生を防ぐために V_{DS} サージを抑制している [図 4 (b)]。

図 5 に、チョッパ回路を使って評価した外付けゲート抵抗 R_g と V_{DS} サージの特性を示す。 R_g が小さい場合、S2A シリーズは S1A シリーズに対して V_{DS} サージの抑制効果が見られている。また、図 6 に示すように同一の V_{DS} サージにおいて、S2A シリーズは S1A シリーズよりもターンオフスイッチング損失 E_{toff} が小さく、 E_{toff} と V_{DS} サージのトレードオフが改善している。

これまで示したように、 V_{DS} サージを抑制したことにより、今まで使用していた MOSFET から新しい MOSFET に置き換えたときに、顧客による回路パターンの変更や、部品定数の大幅な変更をする必要がなくなり、容易に高効率の電源が設計できるようになる。

また、素子耐圧の選択の可能性が広がり、今までよりも耐圧の低い素子、すなわちオン抵抗の低い素子が見えるという効果もある。そこで、S2A シリーズは S1A シリーズの 600 V 耐圧および 650 V 耐圧に加えて、500 V 耐圧と 400 V 耐圧も製品化し系列に加えている。

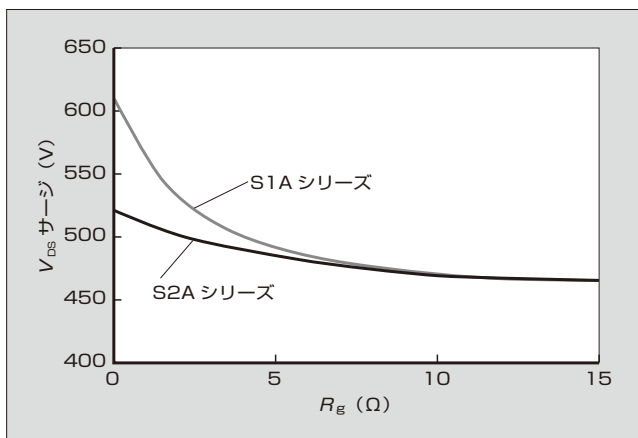


図 5 外付けゲート抵抗 R_g と V_{DS} サージの特性

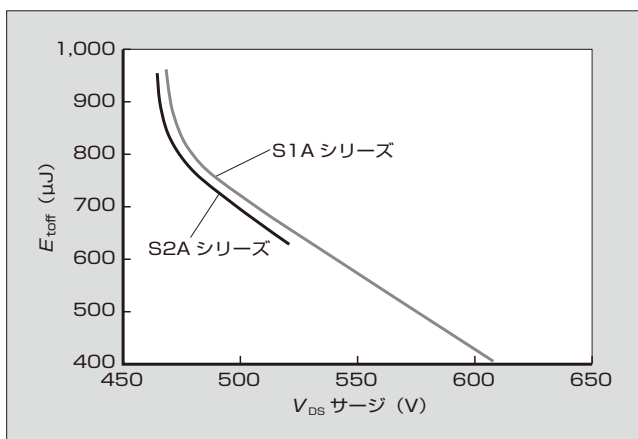


図 6 ターンオフスイッチング損失 E_{toff} と V_{DS} サージのトレードオフ特性

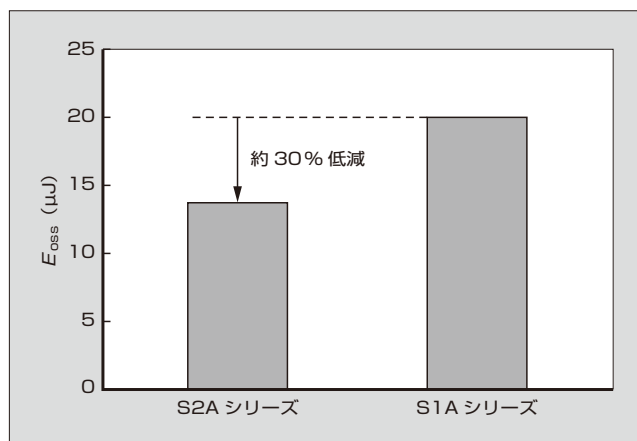


図 7 充放電時に発生する損失 E_{oss}

3.3 軽負荷時の損失低減

バッテリーの寿命を延ばすため、車載用 DC/DC コンバータは生涯動作の大部分が軽負荷で駆動される。そのため、軽負荷時の損失低減が燃費向上に大きく貢献する。DC/DC コンバータが軽負荷で動作しているときには MOSFET に流れる電流が小さいため、出力容量 C_{oss} の充放電時に発生する損失 E_{oss} の占める割合が大きい。そこで、S2A シリーズは、表面構造を最適化してトータルゲート電荷量 Q_G を低減し、S1A シリーズに対して E_{oss} を約 30% 低減した (図 7)。

S2A シリーズは、 E_{toff} と V_{DS} サージのトレードオフの改善や E_{oss} の低減により、スイッチング損失を低減した。これにより、電力変換回路を従来よりも高周波で駆動できるのでトランスが小型になり、電力変換装置の小型化につながる。

3.4 車載品質

車載製品は温度変化に対する高い耐量が求められる。S1A シリーズと S2A シリーズは、チップの厚さの最適化、組立時のチップ下のはんだ付け条件の最適化、モールド樹脂とリードフレームの密着性の向上などに取り組み、同一パッケージで同一チップサイズの民生品と比較してヒートサイクル耐量を大幅に改善した (図 8)。

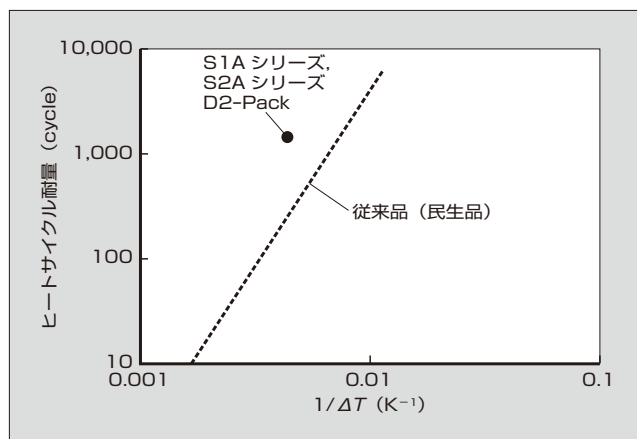


図 8 ヒートサイクル耐量

表1 「Super J MOS S2A シリーズ」の製品系列と主要特性

V_{DS}	$R_{DS(on)max.}$	I_D	FRED	TO-247	T-Pack (D2-Pack)
400V	60mΩ	42A	○	—	FMC40N060S2FDA
500V	71mΩ	39A	○	FMY50N071S2FDA	FMC50N071S2FDA
600V	25.4mΩ	95A		FMY60N025S2A	—
	40mΩ	66A		FMY60N040S2A	—
	70mΩ	39A		FMY60N070S2A	—
	79mΩ	37A		FMY60N079S2A	FMC60N079S2A
	81mΩ	36A	○	FMY60N081S2FDA	FMC60N081S2FDA
	88mΩ	33A		FMY60N088S2A	FMC60N088S2A
	99mΩ	29A		FMY60N099S2A	FMC60N099S2A
	105mΩ	28A	○	FMY60N105S2FDA	FMC60N105S2FDA
	125mΩ	23A		FMY60N125S2A	FMC60N125S2A
	133mΩ	22A	○	FMY60N133S2FDA	FMC60N133S2FDA
160mΩ	18A		FMY60N160S2A	FMC60N160S2A	

4 製品系列と特性

表1にS2Aシリーズの製品系列と主要特性を示す。これまで述べてきたオン抵抗特性やスイッチング特性の改善に併せて、車載用ディスクリート製品の信頼性保証のスタンダードである AEC Q101 規格についても全製品系列について保証している。

TO-247 パッケージを使った S1A シリーズでは 600V 耐圧でオン抵抗の最小値が 40mΩ であったが、S2A シリーズでは 25.4mΩ が可能である。また、小型 SMD (Surface Mount Device) の T-Pack (D2-Pack) でも S1A シリーズでは 600V 耐圧で 145mΩ であったが、S2A シリーズでは 79mΩ が可能であり、パッケージサイズの面から電力変換機器の小型化に寄与できる。

TO-247 パッケージでオン抵抗が 25.4~160mΩ、T-Pack でオン抵抗が 81~160mΩ の製品を系列化する。また、S2A シリーズよりも内蔵ダイオードを高速化した FRED (Fast Recovery Diode) タイプである「Super J MOS S2FDA シリーズ」も併せて製品化した。

5 あとがき

車載用第2世代 SJ-MOSFET 「Super J MOS S2A シリーズ」は、低損失と V_{DS} サージ抑制を両立した製品であり、電力変換機器の高効率化・小型化に大きく貢献できる。

今後は、市場ニーズのさらなる高度化に応えるために、耐圧系列の拡大や、スーパージャンクション構造のいっそ

うの微細化などにより、チップの小型化やオン抵抗の低減などを進め、高性能、高品質の車載用ディスクリート製品を開発していく所存である。

参考文献

- 田村隆博ほか. 低損失SJ-MOSFET 「Super-JMOS」. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.340-343.
- Tamura, T. et al. “Reduction of Turn-off Loss in 600V-class Superjunction MOSFET by Surface Design”, PCIM Asia 2011, p.102-107.
- Watanabe, S. et al. “A Low Switching Loss Superjunction MOSFET (Super J-MOS) by Optimizing Surface Design”, PCIM Asia 2012, p.160-165.
- Fujihira, T. “Theory of Semiconductor Superjunction Devices”, Jpn. J. Appl. Phys., 1997, vol.36, p.6254-6262.
- Deboy, G. et al. “A New Generation of High Voltage MOSFETs Breaks the Limit Line of Silicon”, Proc. IEDM, 1998, p.683-685.
- Onishi, Y. et al. 24m・cm² 680V Silicon Superjunction MOSFET”, Proc. ISPSD’02, 2002, p.241-244.
- Saito, W. et al. “A 15.5m・cm²-680V Superjunction MOSFET Reduced On-Resistance by Lateral Pitch Narrowing”, Proc. ISPSD’06, 2006, p.293-296.
- 大西泰彦ほか. Superjunction MOSFET. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.389-392.
- 渡邊壮太ほか. 第2世代「Super J MOS S2シリーズ」. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.292-295.
- Sakata, T. et al. “A Low-Switching Noise and High-Efficiency Superjunction MOSFET, Super J MOS® S2”, PCIM Asia 2015, p.419-426.



田平 景輔

ディスクリートパワー MOSFET 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ディスクリート・IC 技術部。



新村 康

パワー半導体デバイスの開発・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開発統括部デバイス開発部。



皆澤 宏

分析評価技術の開発、磁気記録媒体の開発、SJ-MOSFET のチッププロセス開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部プロセス開発部主査。日本物理学会会員。



*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。