

車載電池監視システムの小型化に貢献する 高耐圧半導体リレー

High-Voltage Semiconductor Relays for Downsizing of Automotive BMS

齋藤 圭太 SAITO Keita 塩谷 敏男 SHIOTANI Toshio

近年、地球温暖化と大気汚染への対策として、HEV（ハイブリッド電気自動車）やBEV（バッテリー電気自動車）に代表される環境対応車の導入が加速している。その航続距離延伸を担う電池監視システム（BMS）には、電圧検出や地絡検出に用いる半導体リレーなどの半導体部品が多数使用されており、性能向上に加えて小型化が要求されている。

東芝デバイス&ストレージ（株）は、電界強度分布の最適化により小型化したMOSFET（金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ）を、従来製品の3/4のサイズに小型化したパッケージに搭載した車載用高耐圧フォトリレーを開発している。この開発品の信頼性を、1,000サイクルの温度サイクル試験及び1,000 hの高温高湿逆バイアス試験によって検証し、問題ないことを確認した。また、受光素子のレイアウトを最適化して最小開放電圧を従来製品の1.9倍に高めたフォトカプラーを開発・製品化し、半導体リレーの小型化・軽量化・低コスト化に寄与した。

The increased momentum toward mitigating global warming caused by air pollution has led to the rapid introduction of environmentally-friendly vehicles as typified by hybrid electric vehicles (HEVs) and battery electric vehicles (BEVs), worldwide. As the battery monitoring system (BMS) plays a key role in expanding the cruising range of these vehicles, there is an urgent need for improving the performance of multiple semiconductor devices used in BMS, such as semiconductor relays necessary for battery voltage monitoring and ground fault detection circuits, as well as reducing the size of packages in order to downsize BMS.

Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation has developed photorelay and photocoupler products as part of efforts to expand its lineup of semiconductor relays for BMS. The new photorelay products feature a package design that is three-quarters the size of conventional products thanks to the use of a metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) chip miniaturized by optimizing the electric field strength distribution. We have confirmed that the products offer sufficient reliability through thermal cycle testing lasting 1 000 cycles, and high-temperature/high-humidity testing lasting 1 000 hours. The new photocoupler products deliver 1.9 times higher minimum open circuit voltage compared with conventional products, resulting in low-cost, compact, lightweight semiconductor relays.

1. まえがき

地球温暖化と大気汚染に端を発した環境意識の高まりとともに、様々な国と地域で自動車に対する環境規制が強化されている。これらの環境規制をクリアする一つの形として、各自動車メーカーは、HEVやBEVなどの環境対応車の開発を進め、その車種は増加を続けている。一方、市場環境としても、ガソリン価格の高騰や環境対応車に対する税優遇に加え、高級自動車メーカーの参入による環境対応車のイメージアップが、ユーザーの環境対応車志向を後押ししている。これらの相乗効果により、環境対応車は着実に販売台数を伸ばしている。最新の販売台数予測では、環境対応車は2025年には年間3,000万台を超え、2030年には年間5,000万台を超えるとされている⁽¹⁾。

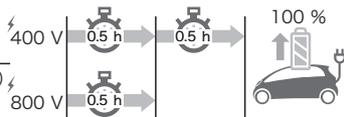
環境対応車に求められる性能として、充電1回当たりの航続可能距離があり、この性能を左右する重要部品が、走行用バッテリーである。環境対応車には、走行用バッテリー

の効率的利用を目的としてBMSが搭載されている。このBMS内には、システム内の信号通信を担うアイソレーターや、メカニカルリレー（以下、メカリレーと略記）の溶着検出やBMS回路の地絡検出などを担う半導体リレーなどの半導体部品が多数使用されている。

東芝デバイス&ストレージ（株）は、これらの半導体部品を開発・商品化し、BMSの性能、ひいては環境対応車の環境性能向上に貢献している。BMSに用いる高耐圧半導体リレーには、性能向上に加えて小型化が求められる。現在、従来のSO16L-Tパッケージに対してサイズを3/4に小型化した車載BMS用高耐圧フォトリレーを開発している。また、最小開放電圧を従来製品の1.9倍に高め半導体リレーの小型化に寄与するフォトカプラーを開発した。

ここでは、まずBMSに求められる性能やBMSにおける半導体部品の機能・要求について示し、それに対応した当社の技術開発内容について述べる。

①充電時間短縮

$$\text{充電時間 (h)} = \frac{\text{電池容量 (Wh)}}{\text{電圧 (V)} \times \text{電流 (A)}}$$


②航続距離延伸

電流低下による効果
・モーターの小型、軽量化(細巻線化)
・ケーブル発熱減=冷却機構簡素化

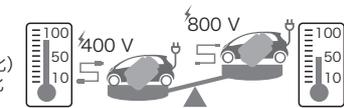


図1. 走行用バッテリー高電圧化のメリット

バッテリー電圧を高めることにより、充電時間の短縮や、車体の軽量化による充電1回当たりの航続可能距離の延伸などの効果が得られる。

Advantages of high-voltage batteries used in EVs

2. BMSの概要

2.1 BMSに求められる性能⁽²⁾

環境対応車の走行用バッテリーとして現在主流となっているリチウムイオンバッテリーは、充電時に材料が不安定化しやすい特徴がある。そのため、充電時には、数十mV以内の極めて高精度の電圧制御が必要となる。

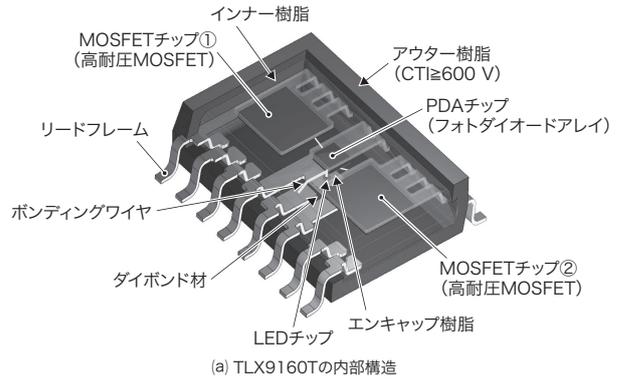
また、環境対応車の走行用バッテリーの電圧は、充電1回当たりの航続可能距離の延伸や、充電可能時間の短縮のために、従来の400V以下から自家用車は最大800V程度まで高まる傾向にある(図1)。更に、トラックやバスなどの商用車については最大1,000Vが想定される。そのため、感電防止など安全への意識が高まっており、高電圧バッテリーと人体との絶縁状態を維持するため、高電圧ブロックの地絡検出が重要となる。

これらを解決する手段として、充放電の制御やバッテリーの状態を監視するBMSが必要となる。

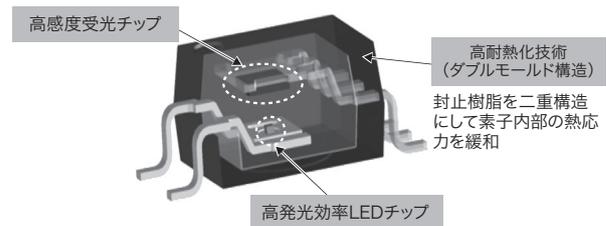
2.2 BMSにおけるフォトリレー、フォトカプラーの機能

リチウムイオンバッテリーは電気残量(充電率)が少ないときは内部抵抗が高い⁽³⁾。この状態ですぐに本充電を行うと多くの発熱を伴い、充電の際の安全性低下、及びバッテリー寿命の低下を招く。そのため、充電前にBMS内の電流センサーでバッテリーに流れる電流をチェックし、充電率が低いと判断した場合は最初に低電流で予備充電を行い、一定充電率に達したところで本充電に切り替える。フォトリレーは、この切り替えや、バッテリーの異常時・充電終了時の充電シャットダウンに使用するメカリレーの溶着検出、BMS回路における高電圧ブロックの地絡検出などに使用される。

また、フォトカプラーは、BMS内の高電圧ブロックと、低電圧ブロックの電気絶縁を図りながら信号通信を可能とするアイソレーターとしての機能のほか、高耐圧パワーMOSFETと組み合わせてメカリレーに代替する半導体リレーとしても



(a) TLX9160Tの内部構造



内製の高出力LEDチップと高感度受光チップの組み合わせにより、素子駆動を低消費電力化

(b) パッケージ SO16L-Tに適用した高耐熱化・低消費電力化技術

LED:発光ダイオード PDA:フォトダイオードアレイ
CTI:Comparative Tracking Index

図2. 1,500Vフォトリレーの内部構造とパッケージに適用した高耐熱化・低消費電力化技術

当社のフォトリレーは、ダブルモールド構造により高耐熱化を図り、高発光効率の受光チップにより低消費電力化を実現していることが特長である。

Internal structure of 1,500 V photorelay product with high heat resistance and low power consumption

用いられる。

3. フォトリレーの小型化技術

3.1 フォトリレーの市場要求と当社の開発状況

走行用バッテリーの高電圧化に応じて、絶縁耐圧(BVS: 入出力間の絶縁耐量を保証する電圧定格)、阻止電圧(V_{off} : オフ状態でリレー出力端子間に印加できる電圧定格)が高いフォトリレーの市場要求が増加している。当社は、これらの市場要求に応えるため、パワーデバイスの設計・プロセス技術を用いて電圧印加時のチップ内部の電界強度分布を適正化した1,500V系MOSFETチップを開発し、これを適用した1,500Vの V_{off} を持つフォトリレー TLX9160Tを既に開発、製品提供している。また、20年以上の自動車応用ビジネスにより培った高耐熱化技術であるダブルモールド構造(二重構造の封止樹脂で素子内部の熱応力を緩和)をベースに、安全規格IEC 60664-1(国際電気標準会議規格 60664-1)の汚染度2及び材料グレードIに基づき設計したパッケージSO16L-Tを開発した。TLX9160TはパッケージSO16L-Tをフォトリレーとして初めて採用し、2021

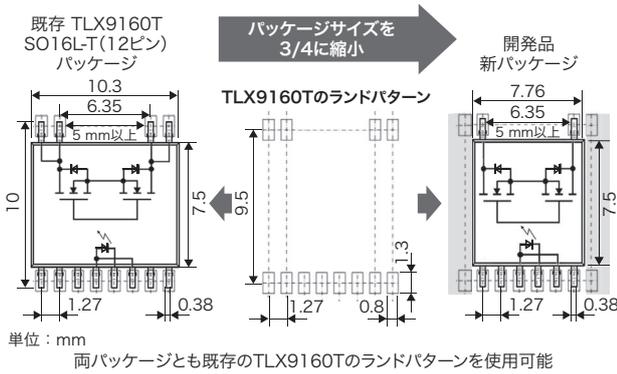


図3. 従来パッケージと新パッケージの実装面積比較

新パッケージは、従来パッケージSO16L-Tのランドパターンの兼用が可能であり、かつ実装面積を削減した。

Comparison of external dimensions of conventional and new packages

表1. 従来フォトリレーと新フォトリレーの特性比較

Rated specifications of new photorelay product compared with conventional product

項目	TLX9160T (1,500 V)	開発品 (900 V)
パッケージ	SO16L-T (12ピン)	新パッケージ
AEC-Q101	準拠	準拠
保存温度	-55 ~ 150 °C	-55 ~ 150 °C
動作温度	-40 ~ 125 °C	-40 ~ 125 °C
V_{off} ($T_a=25^\circ\text{C}$)	1,500 V 双方向	900 V 双方向
動作電圧 ($T_a=25^\circ\text{C}$)	1,000 V	900 V
CTI	>600 (材料グループ1)	>600 (材料グループ1)
ピン間沿面距離* (2次側)	5 mm以上 1,000 Vを満足	4.5 mm以上 900 Vを満足

* IEC60664-1のtable F.4で規定されている動作電圧1,000 V、CTI>600、汚損度2での沿面距離
 T_a : 周囲温度

年から量産化している(図2)。

一方、現在の環境対応車の走行用バッテリー電圧は、高性能化を目指した800 V系と従来電圧の400 V系が共存している。そのため、BMSに使用されるフォトリレーには、それぞれのバッテリー電圧に見合った、性能と小型化が求められる。そのような市場要求に応えるため、今回、400 V系システム用に V_{off} が900 VのMOSFETチップを開発した。また、従来のSO16L-Tパッケージに対しサイズを3/4とし、機器全体の小型化に貢献する新パッケージを開発している。従来パッケージに対して実装面積を削減しながら、ランドパターンを兼用できる(図3)。この新パッケージに開発したMOSFETチップを搭載した新たな車載BMS用高耐圧フォトリレーは、2024年度中の製品化を予定している。従来フォトリレーと新フォトリレーの特性を、表1に比較して示す。

この高耐圧フォトリレーの実現のために考慮する特性及び

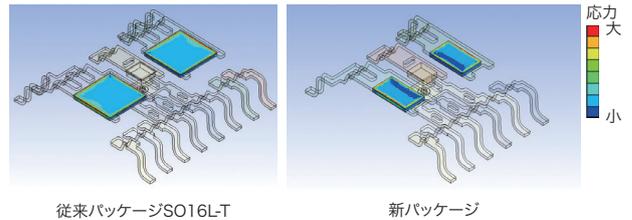


図4. 従来パッケージと新パッケージの応力シミュレーション比較

新パッケージは、従来パッケージSO16L-Tに対して同等以下に応力が抑えられている。

Comparison of results of stress simulations of conventional and new packages

実施した信頼性評価について、以下で述べる。

3.2 パッケージサイズ小型化に伴う応力変化を考慮した温度サイクル試験耐性の確保

小型化した新パッケージが、局所的なひずみを持つデザインになると、パッケージクラックや内部のチップクラックの懸念が生じることから、応力変化を考慮する必要がある。そのため、フレームのマウントベッドサイズ、チップの搭載位置、樹脂厚などの内部構造を最適化し、応力を平均化したデザインを検討した。新パッケージと従来パッケージSO16L-Tとの応力を比較した結果を図4に示す。チップとベッドサイズ、更なる位置関係を最適化することにより、従来パッケージと比較し、小型化した新パッケージは同等以下に応力が抑えられており、局所的なひずみも小さいデザインであることが分かる。また、熱応力耐性を検証するために実施する信頼性試験の一つである-55 ~ 150 °Cの温度サイクル試験についても1,000サイクルまで問題ないことを確認済みである。これは、車載用電子部品信頼性規格(AEC (Automotive Electronics Council)-Q101)の規定を満足する結果である。

3.3 チップサイズを縮小したMOSFETの主要特性及び高温高湿逆バイアス試験耐性の確保

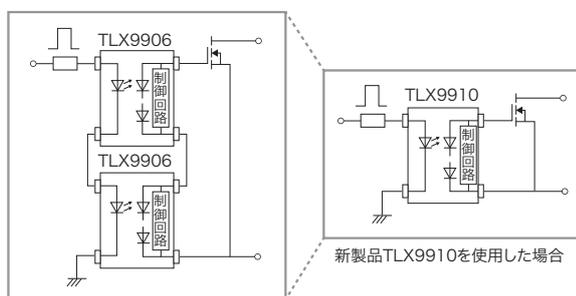
パッケージサイズを小型化するためには、MOSFETチップサイズの縮小が必要となる。MOSFETチップサイズ変更にあたり考慮する必要があるのが、 V_{off} 、オン抵抗、アバランシェ耐量といった主要特性の確保である。縮小にあたっては、MOSFETのFET面積とチップ端部の終端長を考慮する必要がある。FET面積はオン抵抗に直結し、終端長は V_{off} に影響を与える。高抵抗のウエハーを用いて必要とされる耐圧を確保するため、ドリフト層の不純物濃度と厚さを調整し、MOSFET全体の電界強度分布を最適化する必要がある。この最適化とFET面積部の設計により電流密度が決まり、製品として求められるオン抵抗とするために必要な面

積が決まる。FET面積サイズが決まれば、終端長を短くすることでチップの縮小が可能となる。しかし、 V_{off} を確保し、かつアバランシェ耐量を備えたMOSFETとするには、一定の終端長を確保する必要がある。開発品の終端部には高耐圧品の電界緩和を可能とする多段のGR（ガードリング）構造を採用し、MOSFETの電界分布を最適化することによりチップサイズを縮小できた。多段のGR構造は、信頼性試験における実力も向上させることができ、85℃、85%の高温高湿逆バイアス試験において1,000 hまで問題ないことを確認済みである。

4. フォトカプラーを用いた半導体リレーの小型化技術

フォトリレーはパッケージ内に搭載できるMOSFETチップサイズに制約があり、BMSで要求される性能を持つ高耐圧パワーMOSFETを搭載できない場合がある。その場合に、ディスクリートデバイスの高耐圧パワーMOSFETとフォトボルタック出力フォトカプラーを組み合わせることで、メカリレーの代わりになる半導体リレーを構成できる。当社従来

項目	TLX9906 (従来品)	TLX9910 (新製品)
パッケージ	SO6 (4.55×3.7×2.1 mm)	SO6 (4.55×3.7×2.1 mm)
保存温度	-55 ~ 150℃	-55 ~ 135℃
動作温度	-40 ~ 125℃	-40 ~ 125℃
V_{oc} ($T_a=25℃$)	最小7V, 設計上数値9V (入力順電流 $I_f=10$ mA)	最小13.5V, 設計上数値17.5V ($I_f=10$ mA)
I_{sc} ($T_a=25℃$)	最小12 μ A, 設計上数値30 μ A ($I_f=10$ mA)	最小8 μ A, 設計上数値18 μ A ($I_f=10$ mA)
トリガーLED電流 ($T_a=25℃$)	最大3 mA ($V_{oc} \geq 5$ V)	最大3 mA ($V_{oc} \geq 10$ V)
準拠基準	IATF16949, AEC-Q101	IATF16949, AEC-Q101



従来品TLX9906を使用した場合
 I_f : 入力順電流 IATF: 国際自動車産業特別委員会規格

図5. 半導体リレー用フォトボルタック出力フォトカプラーの従来品と新製品の比較

最小の V_{oc} を向上させた新製品のTLX9910は、TLX9906が直列2個接続して駆動していた高耐圧パワーMOSFETのゲートを1個で駆動でき、車載機器用半導体リレーの部品点数削減に貢献できる。

Rated specifications of new photovoltaic-output photocoupler product compared with conventional product

製品のフォトカプラー TLX9906の場合、開放電圧(V_{oc})が最小7Vのため、高耐圧パワーMOSFETの駆動に必要なゲート電圧10V以上に達しない。そのため製品2個を直列接続して使用する必要があった。

これを解決するために、新製品のフォトカプラーに搭載する受光チップの設計を変更することで開放電圧を増加させた。また、短絡電流(I_{sc})が減少してMOSFETのターンオン時間が増加する課題に対し、パッケージ内部の発光素子-受光素子間距離の見直し、及び受光チップ内の受光素子レイアウトの最適化を図った。これにより、 I_{sc} の減少を最小に抑えつつ最小の V_{oc} を従来製品に対し1.9倍の13.5Vとした新製品TLX9910を開発し、商品化した。新製品は製品1個で高耐圧パワーMOSFETのゲートを駆動でき、部品点数の削減が図れる。これにより、車載機器の小型化・軽量化・低コスト化につなげることができる(図5)。

5. あとがき

環境対応車の走行用バッテリー電圧は、高性能化を目指した800V系と従来電圧の400V系が共存しており、BMSに採用する半導体部品には、それぞれのバッテリー電圧に見合った性能が求められている。当社は、今後もBMS応用の様々なニーズに応えるフォトリレー、フォトボルタック出力フォトカプラーを提供し、自動車業界の発展に貢献していく。

文献

- (1) Global data. "Global Hybrid & Electric Vehicle Forecast - Quarter 2, 2023". <<https://www.globaldata.com/industries-we-cover/automotive/global-hybrid-electric-vehicle-module/>>, (accessed 2024-06-05).
- (2) 塩谷敏男, ほか. エコカー用の電池監視システムの性能向上に寄与する半導体デバイス技術. 東芝レビュー. 2018, 73, 6, p.31-35. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2018/06/73_06pdf/a08.pdf>, (参照 2024-06-05).
- (3) 廣田幸嗣, ほか. 電気自動車工学. 第2版, 森北出版, 2017, 248p.



齋藤 圭太 SAITO Keita
東芝デバイス&ストレージ(株)
半導体事業部 オプトデバイス開発部
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.



塩谷 敏男 SHIOTANI Toshio
東芝デバイス&ストレージ(株)
半導体事業部 半導体応用技術センター
Toshiba Electronic Devices & Storage Corp.