

ハイブリッド車用 IGBT 駆動 IC 「Fi007」

特集

西尾 実 (にしお みのる)

山崎 智幸 (やまざき ともゆき)

船越 孝章 (ふなこし たかあき)

1 まえがき

自動車業界では、地球温暖化防止に対する規制対策をさまざまな形で実現しようとしており、その方策の一つとして、ハイブリッド車による燃費改善 (CO₂ 排出量の削減) を進めている。現在主流となっているハイブリッド車の制御方法は、ガソリンエンジンと電気モータの2種類の動力源を組み合わせ、走行状態に応じて負荷分担を最適化することにより高効率化するものである。このシステムによる燃費改善効果は、地球温暖化防止に対する全世界的な関心の高まりとともに注目度が増し、さらに近年のガソリン価格の高騰が後押しするように、ハイブリッド車に対する世界的な需要が急増している。

ガソリンハイブリッドシステムでは、エンジンが発生する動力を電気エネルギーに変換し、バッテリーへの充電とモータ駆動をするための電力変換システムとして、インバータ、コンバータを用いている。これらの電力変換シ

ステムには小型化・高効率化が求められるため、主スイッチングデバイスとして、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) が一般的に用いられる。IGBT は、ECU (Electronic Control Unit) からの信号を受けてスイッチング動作するが、15V系 (バッファトランジスタを介した駆動の場合は16.5V系) で動作するゲートドライバや保護機能を ECU に持たせると ECU の肥大化につながるため好ましくない。また、ゲートドライバ保護回路などを個別部品で構成するとノイズによる誤動作やコストアップなどの問題があるため、IGBT の近くに専用 IC を搭載することが望ましい^{(1),(2)}。

本稿では、ガソリンハイブリッド車の電力変換システムに用いられる IGBT 駆動用に開発した IC 「Fi007」について紹介する。

2 特徴

2.1 基本性能

Fi007 の回路ブロック図を図1に、チップ写真を図2に示す。図2のチップは SSOP20 パッケージに搭載されている (図3)。図1に示す主な機能は以下の五つである。(2)~(5)の詳細は3章で述べる。

- (1) IGBT プリドライバ (図1の出力段回路部)
- (2) 過熱保護

図1 Fi007の回路ブロック図

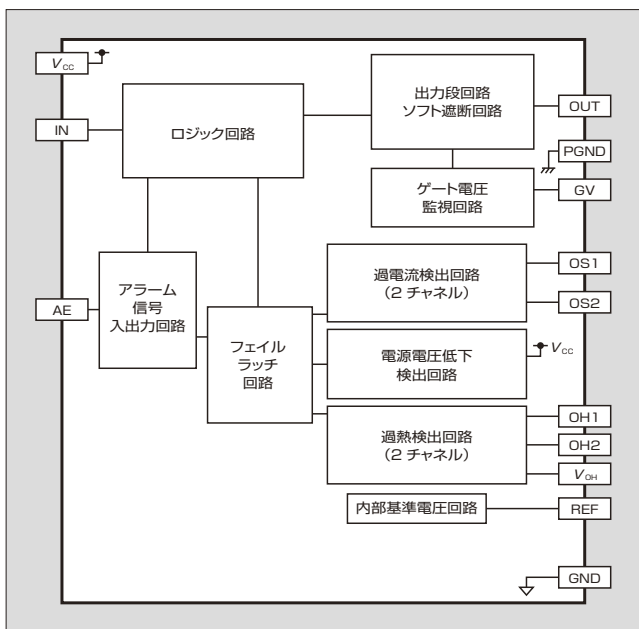
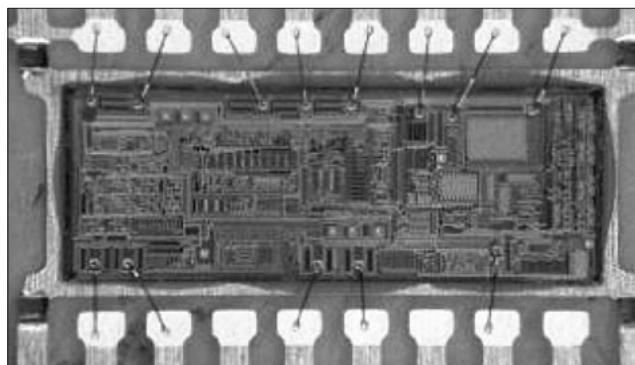


図2 Fi007のチップ写真



西尾 実

半導体デバイスの開発に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社半導体事業本部自動車電装事業部電装技術部。



山崎 智幸

半導体デバイスの開発に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社半導体事業本部産業事業部技術部チームリーダー。工学博士。電気学会会員。



船越 孝章

ディスクリート半導体の組立技術開発に従事。現在、富士電機デバイステクノロジー株式会社電子デバイス研究所アセンブリ開発部。

- (3) 過電流保護
- (4) 電源電圧低下保護
- (5) ソフト遮断

(1)は、IGBT のゲート容量を充放電するためのドライブ

図3 Fi007の外観

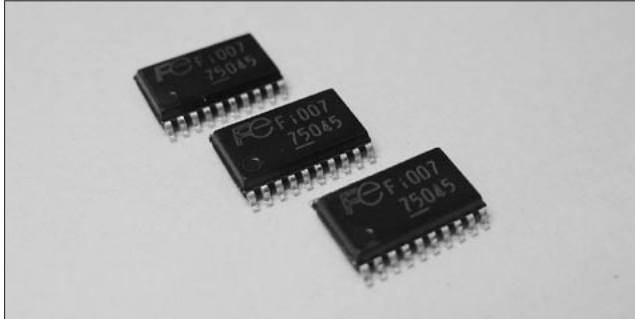


表1 Fi007絶対最大定格 (特記なき項目は $T_a = 25^\circ\text{C}$)

パラメータ	記号	条件	最小値	最大値	単位
電源電圧 (駆動系/制御系)	V_{CC}	DC	-0.3	20	V
入力周波数	f	—	—	20	kHz
AE端子電流	$I_{AE\max}$	DC	—	20	mA
IN端子電圧	$V_{IN\max}$	DC	GND-0.3	$V_{CC}+0.3$	V
OUT端子電圧	$V_{OUT\max}$	DC	PGND-0.3	$V_{CC}+0.3$	V
AE端子電圧	$V_{AE\max}$	DC	GND-0.3	$V_{CC}+0.3$	V
PGND-GND間電圧	$V_{dGND\max}$	DC	-0.2	0.2	V
GV端子電圧	$V_{GV\max}$	DC	PGND-0.3	$V_{CC}+0.3$	V
OS1, 2端子電圧	$V_{OS\max}$	DC	GND-0.3	$V_{CC}+0.3$	V
OH1, 2端子電圧	$V_{OH\max}$	DC	GND-0.3	$V_{CC}+0.3$	V
REF端子電圧	$V_{REF\max}$	DC	GND-0.3	$V_{REF}+0.3$	V
REF端子電流	$I_{REF\max}$	DC	0	150	μA
許容損失	P_D	DC	—	1.563	W
動作周囲温度	T_a	—	-40	125	$^\circ\text{C}$
接合部温度	T_j	—	-40	150	$^\circ\text{C}$
保存温度	T_{STG}	—	-40	150	$^\circ\text{C}$

表2 Fi007端子説明

端子記号	内容
VCC	制御電源
GND	制御回路用グラウンド
IN	制御信号入力
OUT	ドライバ出力
PGND	ドライバ回路用グラウンド
GV	シンク切替電圧検知入力
AE	アラーム出力/外部アラーム入力
OH1, OH2	過熱検出信号入力
REF	過熱検出用基準電圧出力
VOH	過熱検出しきい値電圧モニタ
OS1, OS2	過電流検出信号入力

機能であり、ノイズによる誤動作を防ぐため、しきい値にヒステリシスを付けかつ不感帯を設けている。

(2)~(4)の各保護機能は、IGBT のスイッチング時に発生するノイズによる誤動作を防ぐためにそれぞれ不感帯を設けている。また、過電流・過熱の両保護機能は二つのIGBT を同時に監視できる仕様であり、どちらか一方が異常状態になるとドライバ出力をオフし、IGBT の動作を停止させる。

異常時に保護機能が動作した場合は、アラーム信号を

表3 Fi007電気的特性 (特記なき項目は $V_{CC} = 16.5 \pm 2\text{V}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$)

用語	記号	内容	値	単位
電源特性				
電源電流	I_{CCL}	ターンオン時電源電流	2	mA
	I_{CCH}	ターンオフ時電源電流	2	mA
消費電力	P_t	20kHzスイッチング時消費電力	50	mW
制御信号入力				
入力ローレベルしきい値電圧	V_{INHL}	ターンオン入力しきい値電圧	1.5	V
入力ハイレベルしきい値電圧	V_{INLH}	ターンオフ入力しきい値電圧	2.1	V
入力電圧ヒステリシス	ΔV_{INLH}	$V_{INHL} - V_{INLH}$	0.6	V
ターンオン遅延時間	t_{dLH}	ターンオン入力からドライバ出力オンまでの遅れ時間	1	μs
ターンオフ遅延時間	t_{dHL}	ターンオフ入力からドライバ出力オフまでの遅れ時間	0.6	μs
遅延時間差	Δt_d	$t_{dLH} - t_{dHL}$	0.4	μs
外部アラーム				
外部アラーム入力電圧	V_{AEIN}	外部アラーム入力しきい値電圧	2	V
ヒステリシス	V_{AEHYS}	外部アラーム入力しきい値ヒステリシス電圧	0.8	V
アラーム入力遅れ時間	t_{dOUTAE}	外部アラーム入力からソフト遮断までの遅れ時間	9.5	μs
(保護特性) 電源電圧低下保護				
電源電圧低下保護	V_{UV}	電源電圧低下検出しきい値電圧	11.7	V
リセットヒステリシス	V_{UVHYS}	電源電圧低下検出しきい値ヒステリシス電圧	0.5	V
電源電圧低下検出・遮断遅れ時間	t_{dAUV}	電源電圧低下検出からアラーム出力までの遅れ時間	20	μs
(保護特性) 過電流保護				
過電流検出電圧	V_{OC}	過電流検出しきい値電圧	1	V
過電流検出遅れ時間	t_{dAOC}	過電流検出からアラーム出力までの遅れ時間	4.3	μs
(保護特性) 過熱保護				
過熱保護検出電圧	V_{OH}	過熱検出しきい値電圧	1.5	V
過熱保護検出電圧ヒステリシス	V_{OHHYS}	過熱検出しきい値ヒステリシス電圧	80	mV
IGBT過熱検出・遮断遅れ時間	t_{dAOH}	過熱検出からアラーム出力までの遅れ時間	600	μs
アラーム出力				
アラーム保持時間	t_{ALM}	アラーム出力ラッチ時間	8	ms

ECU に出力し、IC から見た負荷としての IGBT の状態を ECU に伝達することができる。逆に、ECU からシステムの異常を示す信号を受け取ることによってドライバ出力をオフし、IGBT の動作を停止させることもできる。

2.2 主要特性

表 1、表 2、表 3 に、Fi007 の絶対最大定格、端子説明および代表的な電気的特性を示す。電源電圧定格は、IGBT 駆動に必要な 20V としている。定格動作周囲温度は、ECU に対する過酷な条件の一つと考えられる $T_a = -40 \sim +125^\circ\text{C}$ を保証し、定格接合部温度は、 $T_j = -40 \sim +150^\circ\text{C}$ を保証している。

出力電圧およびアラーム出力は、自動車の起動や停止時に発生し得るバッテリー電圧変動に対しても、安定した出力信号を供給できる。特に精度の要求される内部基準電圧 (V_{REF}) と温度検出用電流 (I_{OH}) は、補正回路により特性ばらつきを低減している。

2.3 パッケージ

パッケージは、図 3 に示す SSOP20 を採用した。アウターリードのはんだめっきには、鉛フリー対応の SnAg めっきを用いている。

3 機能

3.1 過熱保護

IGBT が異常な温度環境にさらされたり、異常動作によって温度が上がったりした場合、システムの焼損を防ぐために IGBT の動作を停止させる必要がある。Fi007 は、IGBT チップ上に設置された温度検出用のダイオードに I_{OH} を供給し、ダイオードの順方向電圧値 (V_{OH} と定義) を監視して、過熱発生時にドライバ出力をオフにすることで、IGBT の動作を停止させることができる。このとき、AE 端子からは ECU へアラーム信号が出力される。過熱保護に関するタイムチャートを図 4 に示す。過熱保護状態は、 t_{ALM} 期間継続し、過熱保護状態から復帰し、かつ IC の PWM (Pulse Width Modulation) 入力 (V_{IN}) がオフに反転した時点で解除される。

3.2 過電流保護

IGBT に過電流が流れた場合、IGBT の焼損を防ぐために通電電流を遮断する必要がある。Fi007 は、電流をセンシングするための小さな IGBT がメインの IGBT に埋め込まれており、そこに流れた電流値を、検出抵抗によって変換された電圧値として監視し、過電流発生時にドライバ出力をオフにすることで IGBT の動作を停止させることができる。このとき、AE 端子からは ECU へアラーム信号が出力される。過電流保護に関するタイムチャートを図 5 に示す。過電流保護状態は、 t_{ALM} 期間継続し、過電流保護状態から復帰し、かつ IC の PWM 入力 (V_{IN}) がオフに反転した時点で解除される。

図 4 過熱保護動作タイミングチャート

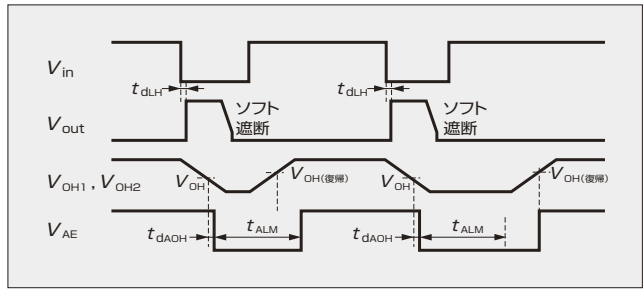
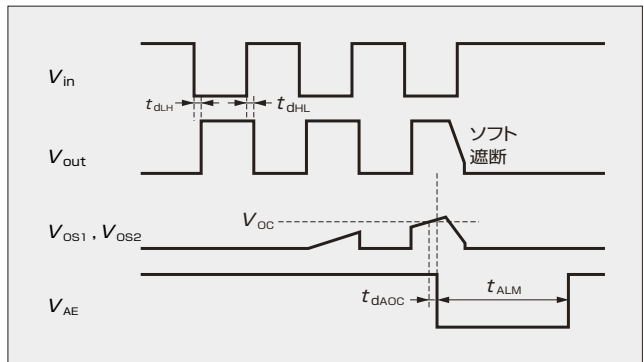


図 5 過電流保護動作タイミングチャート



3.3 電源電圧低下保護

ドライバ IC の電源電圧が低下した場合、IGBT はゲート電圧不足となり動作損失が急増するため、運転を継続するとチップの温度上昇により素子破壊に至る可能性がある。したがって、Fi007 では電源電圧が 11.7V (代表値) を下回ると、IGBT の動作を止める機能を持っている。電源電圧低下保護状態は、 t_{ALM} 期間継続し、 V_{CC} が復帰し、かつ IC の PWM 入力 (V_{IN}) がオフに反転した時点で解除される。

3.4 ソフト遮断

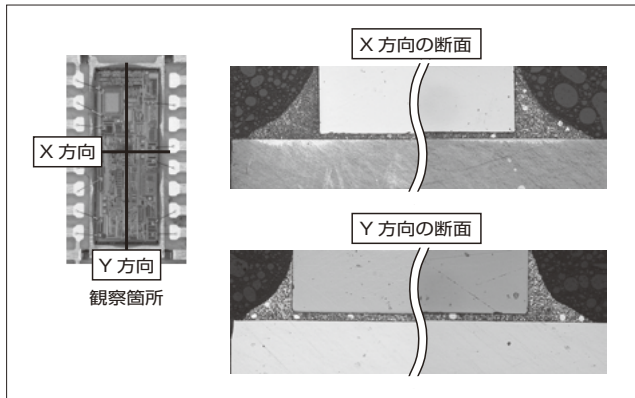
異常発生時に上述の保護機能が働き、出力電流を通常スイッチング時のゲートインピーダンスで遮断すると、配線インダクタンスによるサージ電圧が過大に発生し、IGBT が過電圧破壊する可能性があるため、高ゲートインピーダンスで緩やかに遮断する必要がある。Fi007 は、過熱保護・過電流保護・電源電圧低下保護の各機能が働く場合、もしくは、外部からアラーム信号が入力された場合に、IGBT をソフト遮断するための出力端子電流の切替機能を有する。

4 パッケージング技術

4.1 ダイ・アタッチ材の最適化

Fi007 は、必要端子数の制約と実装効率 (チップサイズと ECU 基板への実装面積の比) の向上との両立を考慮し、チップ占有率を可能な限り大きくすることのできる 20 端子の SSOP パッケージを採用した。このチップサイズが大きな本製品においても、電装市場で求められる温度サイ

図6 ヒートサイクル (-40 ~ +150 °C) 3,000 サイクル後の Ag ペーストクラック調査結果



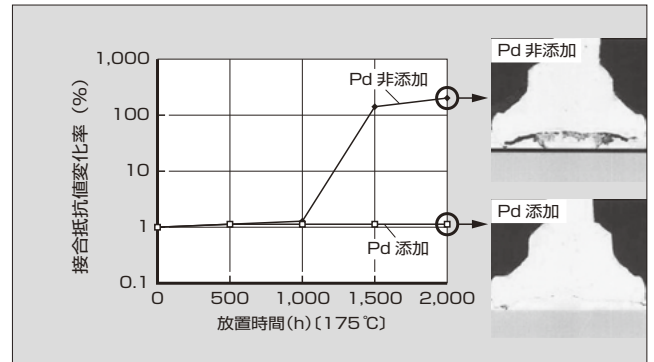
クル耐量 -40 ~ +150 °C で 500 サイクル, -40 ~ +105 °C では 3,000 サイクルを保証するためには, ダイ・アタッチ材のクラック抑制が課題となる。またアセンブリの観点ではダイ・アタッチ後のバイメタル効果によるダイパッドの反りをいかに低減するかも重要な課題である。本製品では, ダイ・アタッチ材として一般的な Ag (銀) ペーストを採用したが, ダイパッド反りを減らすために, 上記温度サイクル耐量およびダイパッドの反り量と Ag ペーストの内部応力 (線膨張係数 $\alpha \times$ 弾性率 E) の関係を三次元シミュレーションおよび実験により解析し, Ag ペースト厚の最適化を図った。また後述する Au (金) 線による結線時の接合性にも着目し, 硬化時のアウトガスによる接合面への汚染抑制も配慮し, 内部応力とアウトガス量の両面から材料の最適化を実施した。図6に, ヒートサイクル (-40 ~ +150 °C) 3,000 サイクル後の Ag ペーストの断面観察結果を示す。クラックの進行は確認されず要求仕様を十分満足する高い信頼性を持ったパッケージ開発が実現できた。

4.2 Au 線材料の最適化

Fi007 は, チップ上のワイヤボンディングパッド面積縮小によるチップサイズ低減を目的として, チップとリードフレームをつなぐ結線材として Au 線を採用している。

Au 線は, Al (アルミニウム) 線と比較すると, 電気伝導率が高い反面, 高温状態に長時間さらすとチップの Al 膜との接合部に合金層が成長し (通称パープルブレイク), 電気伝導率を下げる⁽³⁾ことがある。一般に, 150 °C を超える高温環境下ではこの合金層成長が著しく加速される。特に車載用途では, 今後, 搭載環境の高温化が進み 150 °C を超

図7 Au 線 Pd 添加有無の違いによる接続抵抗値変化率と, 175 °C ・ 2,000 時間放置後の断面写真



えた温度環境でもデバイスが破壊もしくは劣化しないことが求められてくるものと思われる。

Fi007 では, Au 線に Pd (パラジウム) を微量含有させた合金線を導入した。Pd 含有による合金層形成の抑制は広く知られているが, 含有量が増加すると硬度が高くなる性質があり, ボンディング時のクレータリング発生などのリスクも伴うことになる。そのため, ボンディング性と合金層抑制の両面から最適含有量を求めた。その結果, 175 °C で 2,000 時間放置しても, Au 線とチップ Al パッドとの電気的抵抗値の変動は 10 % 以下に抑えることができ (図7), かつ安定したボンディング性が確保できた。

5 あとがき

本稿では, ハイブリッド車用 IGBT 駆動 IC 「Fi007」について紹介した。富士電機では, Fi007 以外にも多くの自動車用半導体製品を扱っている。今後も, 市場のニーズを的確に把握しながら, システムに適合する高信頼性製品を提供し, 自動車産業の発展に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 山口厚司ほか, 中・大容量 R シリーズ IGBT-IPM, 富士時報, vol.71, no.2, 1998, p.101-105.
- (2) Kajiwara, T. et al. New Intelligent Power Multi-Chips Modules With Junction Temperature Detecting Function. ISPSD. 1998, p.281-284.
- (3) 安食恒雄, 半導体デバイスの信頼性技術, 日科技連, p.130-131.