

SOI技術による機能安全対応車載電池監視用IC

Automotive Battery-Monitoring IC Compliant with Functional Safety using SOI Technology

藤井 圭一 小林 拓 井上 真幸 小林 仁
Keiichi Fujii Taku Kobayashi Masaki Inoue Hitoshi Kobayashi

要 旨

電気自動車／ハイブリッド自動車に搭載するリチウムイオン電池のバッテリーマネジメントシステムは、自動車機能安全の国際標準規格ISO26262への準拠が必須になりつつある。筆者らは、「機能集積化」と「機能安全」の両立を実現する0.15 μm SOI-BCDMOSプロセスを開発し、フェールオペレーション可能な次世代バッテリー監視ICに適用した。絶縁体による素子分離を行うSOIプロセスは、高温動作可能で、寄生素子による誤動作を発生させないという「本質的に安全な性質」を有する。本監視ICは機能ブロックを電氣的に独立して1チップ上に配置することで「機能安全設計」の有効性を高め、ISO26262のリスク指標ASIL-Cが要求する故障検出率を1チップで実現する。

Abstract

Battery-management systems of lithium-ion batteries used in electric / hybrid vehicles are increasingly required to be compliant with the international standard ISO 26262 concerning "Road vehicles functional safety". We developed a 0.15 μm SOI-BCDMOS process that achieves compatibility between "functional integration" and "functional safety". Using the proposed process, we developed a next-generation battery-monitoring IC capable of fail operation. The SOI process of element isolation using an insulator has an "intrinsically safe property" wherein it operates at high temperatures and does not cause malfunction due to a parasitic element. This monitoring IC enhances the effectiveness of "functional safety design" by arranging the functional blocks on a chip such that they are electrically independent of each other. Moreover, it realizes the diagnostics coverage required by the risk index ASIL-C of ISO 26262 on a single chip.

1. はじめに

地球温暖化を背景に、自動車の動力源は、100年以上続いた内燃機関（ガソリンエンジン）から電気モータへのパラダイムシフトが起きている。1990年台に初めて登場したハイブリッドカー（HEV, Hybrid Electric Vehicle）から始まり、プラグインハイブリッドカー（PHEV, Plug-in Hybrid Electric Vehicle）、電気自動車（EV, Electric Vehicle）の普及が加速度的に進むにつれ、リチウムイオン電池の重要性が高まっている。

リチウムイオン電池は、大容量の電気を蓄える高エネルギー密度という長所と、発火や破裂の危険性という短所の、2つの矛盾した特徴をもつ。それゆえ、電池の充電状態（SOC, State Of Charge）の制御により、過充電による異常発熱や破裂を防止し、過放電による電池の劣化を抑えて、安全な状態を制御・維持するバッテリーマネジメントシステム（BMS, Battery Management System）が必要である。

電池電圧を高精度に測定するバッテリー監視IC（BMIC, Battery Monitoring Integrated Circuit）と、それを制御するECU（Electric Control Unit）およびソフトウェアで構成されるBMSは、万一システム内に異常が生じても、リチウムイオン電池の過充電や過放電といった危険事象に至らないように、5.1節で述べる自動車機能安全の国際標準規格ISO26262[1]に準拠した開発を要求され、異

常検出や安全状態への遷移など、多くの機構を備える必要がある。その一方で、多数の部品点数で構成されているBMSは、BMICへの機能の集積化による合理化が強く求められている。

そこで、「機能安全」と「機能集積化」の両立を目的に、今後の「ディペンダブル（Dependable／頼りがいのある）」技術の進展も見据えた0.15 μm 120V SOI（Silicon On Insulator）BCDMOS（Bipolar-CMOS-LDMOS）^{（注1）}プロセスを新たに開発した。通常プロセスの課題である悪条件下での回路誤動作が発生せず、搭載素子の絶縁分離性能に優れたSOIプロセスを活用し、ISO26262のリスク指標であるASIL（Automotive Safety Integrity Level）のCに準拠できる車載リチウムイオン電池向けBMICを開発したので報告をする。

2. 安全設計とディペンダビリティ

2.1 安全設計の基本的な考え方

「安全なシステム」を実現するには、次に示す順序で「安全設計」を考えることが重要である。

- (1) 本質安全（＝絶対安全）
- (2) フェールセーフ設計

（注1） CMOS：Complementary Metal Oxide Semiconductor
LDMOS：Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor

(3) 機能安全 (=制御安全)

(4) フォールトトレラント設計 (ディペンダビリティ)

「本質安全」とは、「システム」や「もの」に本質的に危険性がない状態である。「本質安全」と「機能安全」は、自動車道路と鉄道線路の交差における、立体交差と踏切の違いで表現される場合が多い。立体交差は本質的に事故が発生しない「本質安全」のシステムであり、踏切は制御により事故の発生を防ぐ「機能安全」のシステムである。安全設計では、第一に「本質安全」を意識した技術選択が重要である。

またリチウムイオン電池を使用するシステムの安全設計では、発火や破裂の可能性がある「本質的な危険性」を制御によって安全を担保するシステムとなる。したがって、「機能安全」の考え方が重要であり、BMSやBMICの安全設計に対してISO26262への準拠が要求される。

2.2 ディペンダビリティ

自動運転やADAS (Advanced Driver Assistance System, 先進運転支援システム) 技術が進むにつれ、ディペンダビリティの考え方が議論されている。

ディペンダビリティとは、JIS規格Z8115[2]において「アベイラビリティ性能およびこれに影響を与える要因、すなわち信頼性性能、保全性性能および保全支援能力を記述するのに用いられる包括的な用語」とされる。

自動車においては、下位のシステムで故障があっても、上位のシステム、例えば運転手 (人そのもの) や自動運転システムが、安全な状態で運転を継続あるいは停止できるようにする、フェールオペレーションやフォールトトレラント設計などに対する用語として使われる。

BMSにおいても、「ディペンダブル」技術の実装が必要になっている。

2.3 BMICの開発目標

このような安全設計の考え方を踏まえ、今後の「ディペンダブル」技術の進展を見据えた、車載対応の0.15 μm 120 V SOI-BCDMOSプロセスを開発し、ISO26262 ASIL-Cに準拠するBMICに適用する。

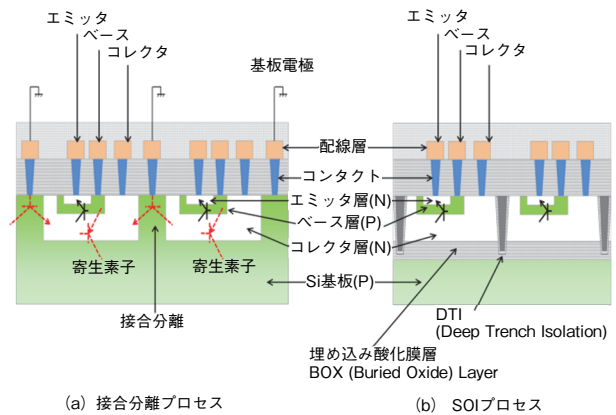
3. SOIの開発

3.1 SOIプロセスとは

半導体集積回路 (IC, Integrated Circuit) において、トランジスタ、抵抗、容量などの複数の回路素子間の電気的絶縁状態 (素子分離, Isolation) を維持する接合分離は、現在のプレーナ型シリコン集積回路の基本となる技術である。接合分離は、第1図 (a) のようにpn接合に逆バイ

アスを印加した状態にして素子分離を行う方法であり、現在も広く使用されている。

一方、1970年代からは複数素子間の素子分離を絶縁体で行う研究が進み、第1図 (b) のようなシリコンウエハ内部にSiO₂層を形成したSOI技術を使用した集積回路も実用化された。



第1図 接合分離プロセスとSOIプロセスの比較 (NPNトランジスタの例)

Fig. 1 Comparison of junction isolation process and SOI process

SOIプロセス技術では、1970年代後半に、酸素をイオン注入することでシリコンウエハにSiO₂層を埋め込むSIMOX (Separation by Implantation of Oxygen) 技術が発表され実用化が進んだ。1990年代後半に張り合わせ技術が登場すると、高品質なSOIウエハが供給できるようになり、車載用ICへ応用されるようになった。

3.2 SOIプロセスと車載用ICの安全設計

車載用ICは、エンジンルームなどの高温環境 (150°C ~ 205°C)、イグニッションノイズなどのノイズ印加、ハーネス (接続ケーブル) のインダクタ成分による負電圧入力が発生など、民生用ICと比較して非常に厳しい環境で使用する。車載用ICは、そのような環境下で常に正常動作し不安全状態にならない必要がある。

通常の接合分離のICは、接合温度が170°Cを超過すると、pn接合分離部のリーク電流が加速度的に増加し素子分離が維持できず、回路誤動作を引き起こす不安定な状態に陥りやすい。またウエハの基板電位より低い電圧が印加された場合にも、pn接合分離部が一時的に順バイアスとなり、分離部が寄生素子として動作し、ラッチアップや回路誤動作を引き起こす可能性がある。

一方、SOI技術は、高温状態や負電圧印加が発生する使用環境においても素子分離は維持され、回路的に意図しない寄生素子による誤動作の発生を防止できる「本質的に安全」なプロセス技術であると考えられる。

さらに、SOI技術は、複数の電氣的に独立した機能ブロックをシリコン上に構成でき、「機能集積化と機能安全」を両立させる製品設計を可能にする。

3.3 微細SOIプロセスの開発

当社では、1999年よりSOIプロセスの開発に着手し、2003年に0.6 μm SOI HVMOSプロセスを採用したプラズマディスプレイパネル (PDP) 用スキャンドライバICを量産化した。さらに、PDPの大画面化に伴い、高耐圧化を進め、0.6 μm 190V IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) +HVMOSプロセスを開発し、2016年まで量産した。2008年～2010年当時、当社は世界で最大のSOIウェハ消費する半導体メーカーであった^(注2)。今回は、それらの蓄積された技術成果を車載半導体に適用し、「機能集積化と機能安全」を両立し、「本質的に安全」な車載プロセスを開発する。

現在においても、多くの車載用アナログICには、0.5 μm～1.0 μmのデザインルールが使用されており、プロセスの微細化が進んでいない。しかしながら、機能安全要求の高まりや、車載用アナログICにおける「機能集積化」の加速を考慮し、車載用ICの品質基準である、第1表のAEC-Q100 Grade0[3]に適合する、0.15 μm 120 V SOI-BCDMOSプロセスを開発した。

第1表 AEC-Q100の要求

Table 1 Compliance with AEC-Q100C

グレード	Grade0	Grade1	Grade2	Grade3
使用温度範囲(Ta)	-40℃～+150℃	-40℃～+125℃	-40℃～+105℃	-40℃～+105℃
上記を満たせる接合温度(Tj)のプロセス保証値	Tjmax ≥ 175℃	Tjmax ≥ 150℃	Tjmax ≥ 125℃	

高耐圧のSOI-BCDMOSプロセスでは、張り合わせ技術を用いたSOIウェハを使用する。素子領域は、SOIウェハ内の埋め込み酸化膜 (BOX, Buried OXide) 層と、BOX層に到達する深い溝 (Deep Trench) により素子分離を行うDeep Trench Isolation (DTI) 技術により形成される。

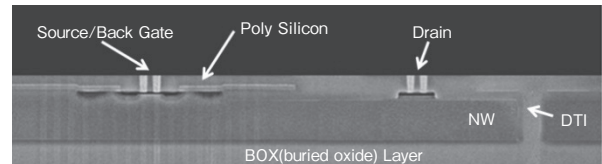
Deep Trenchの表面は絶縁体である酸化膜 (SiO₂) で覆われ、SOIウェハ上に形成された素子は、基板や素子の電位関係によらず、絶縁体により電氣的に分離できる。

0.15 μm 120 V SOI-BCDMOSプロセスでは、より結晶欠陥の少ないスマートカット^(注3) 技術による張り合わせウ

(注2) MEMS用途のSOIウェハを除く集積回路用SOIウェハの年間使用枚数で当時世界1位。当社調べ。

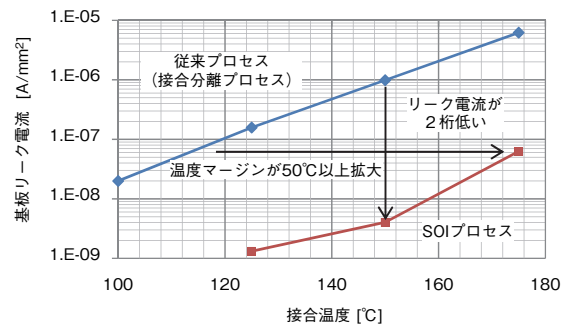
(注3) スマートカットおよびSmart Cutは、Soitec Corp.の登録商標または商標。

ェハに、エピタキシャル層を成長させさらなる高品質化を実現したSOIウェハを採用した。また、DTIの絶縁体膜厚を600 nm以上に設定し、素子分離の耐圧を300 V以上確保する技術を開発し、独自の汚染制御技術との組み合わせで、信頼性の高いSOIプロセスを開発した。分離構造の断面SEM (Scanning Electron Microscope, 走査型電子顕微鏡) 写真を第2図に示す。



第2図 SOIプロセスの分離構造 断面SEM写真
Fig. 2 SEM image of cross-sectional structure of SOI process

開発したSOIプロセスでは、基板へのリーク電流を2桁低下させ、温度上昇によるリーク電流増で起こる回路誤動作に対する温度マージンを50℃以上拡大した。第3図は、SOIプロセスと従来プロセスの基板リーク電流評価の結果で、第2表はSOIプロセスの主要特性を示す。



第3図 従来プロセス (接合分離プロセス) とSOIプロセスの基板リーク電流の比較

Fig. 3 Comparison of leakage current to substrate of conventional (Junction Isolation) process and SOI process

第2表 開発したSOIプロセス

Table 2 Developed SOI process

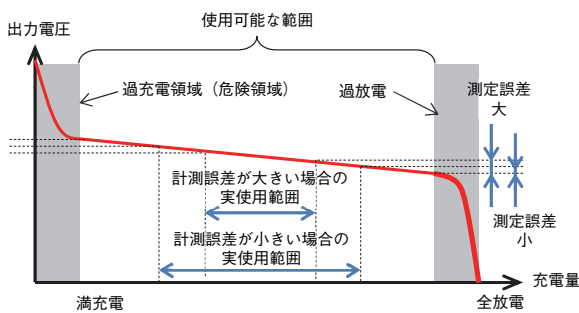
デザインルール / プロセス種別	0.15 μm / SOI-BCDMOS
素子分離の耐圧	> 300 V
主要素子	CMOS(1.8 V/5 V), 120 V n-LDMOS, 120 V p-LDMOS, High R, Supper High R, MIM-Cap, eFuse
動作保証温度範囲 (Tj)	-40℃～175℃ (AEC-Q100 Grade0 対応)
目標初期不良率	< 0.5FIT, 0.5 ppm

4. SOIプロセスによるBMICの開発

4.1 開発するBMICの目標性能

電池の充電状態 (SOC) や電池の劣化 (健康) 状態 (SOH, State Of Health) を正確に把握するには、リチウムイオン電池セルの出力電圧を高精度に測定する必要がある。

リチウムイオン電池の出力電圧と充電量は、第4図のようなグラフの特性になることが知られており、使用範囲内の出力電圧変化が極めて小さい。したがって、BMICの電圧測定誤差が大きくなると、リチウムイオン電池の使用範囲は狭くなる。EV/PHEV向けリチウムイオン電池では、BMICの測定精度の向上により、1回の充電での航続距離を延長できる。従来のBMICが、温度範囲-30℃～65℃での計測誤差が±5 mV未満に対して、温度範囲を-40℃～105℃に拡張し、計測誤差半減を目標とした。



第4図 リチウムイオン電池の放電特性と計測誤差の影響
Fig. 4 Effect of discharge characteristic and measurement error in lithium-ion battery

4.2 開発したBMICの性能

個々の電池セルの出力電圧の絶対値を高精度に測定するため、車載用BMICには、高精度・高安定基準バイアス源^(注4)、高精度AD (Analog-Digital) コンバータ^(注5)、マルチプレクサ (アナログスイッチ)^(注6)などのアナログ回路を搭載している。高精度絶対値測定で最も重要な回路は、電圧測定の基準となる高精度・高安定基準バイアス源である。筆者らは、独自の3次の温度係数をもつ高精度バンドギャップレファレンス回路を開発した。さらに出荷検査工程での温度変動特性の調整 (トリミング) で、高精度・高安定な絶対電圧基準を実現する。第5図 (a) に示したとおり、接合分離プロセスを活用した従来のBMICでは、高温時に測定誤差が大きくなる問題が

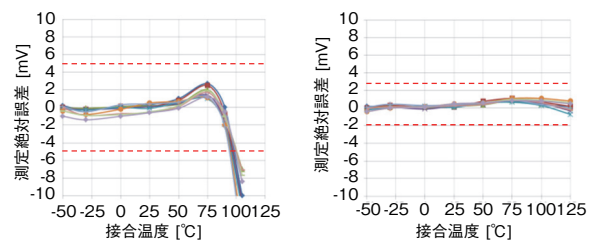
(注4) 電圧測定の基準値となる極めて高精度で変動の少ない定電圧発生回路。

(注5) アナログ値をデジタル値に変換する変換回路。

(注6) 複数の入力信号から1つの信号を選択し出力するための切り替え回路。

あった。高温時にリチウムイオン電池の測定誤差が大きくなると、BMSが不安全状態となる危険性がある。この原因は、pn接合分離部の基板へのリーク電流であり、SOIプロセスにより改善できると考えた。開発したSOIプロセスでの計測精度の温度変動特性を第5図 (b) に示す。

SOIプロセスの適用で、高温時にも測定誤差が悪化せず、従来プロセスと比較し広い温度範囲で絶対計測誤差±2.5 mV以下を実現した。



(a) 従来 BMIC (接合分離プロセス) (b) 今回 BMIC (SOI プロセス)

第5図 開発したBMICの測定絶対誤差

Fig. 5 Absolute measurement error of developed BMIC

5. BMICの機能安全設計

5.1 ISO26262の安全要求

BMSでは、自動車機能安全の国際標準規格ISO26262のリスク指標であるASILの、CもしくはDへの適合が要求される。このASILは、ISO26262の要求に従って、システムの安全目標とともに設定する安全指標であり、主に最上位のシステムを開発する自動車メーカーが、下位のシステムに対してASILランク決定をする。ASILランクは、システムの潜在リスクの大きさを表すA～Dの4段階の指標となっており、D>C>B>Aの順に潜在リスクが大きいことを意味する。

ISO26262に準拠した設計では、設計上の工夫や安全メカニズムの搭載で、潜在リスクを社会的に許容可能な水準まで低減させる必要がある。そこで、第3表に示したISO26262規格で定められた故障検知率を満足するようシステムの設計を行う。また、最上位のシステムの構成要素となる下位のシステムでも、安全目標と分解 (decomposition) されたASILランクに適合させる。つま

第3表 ISO26262 目標故障検知率および目標FIT値

Table 3 Target failure metric value of ISO26262

ASILランク	ASIL-A	ASIL-B	ASIL-C	ASIL-D
目標故障検知率	SPFM	>90 %	>97 %	>99 %
	LFM	>60 %	>80 %	>90 %
目標FIT値	1000<FIT	<100FIT	<100FIT	<10FIT

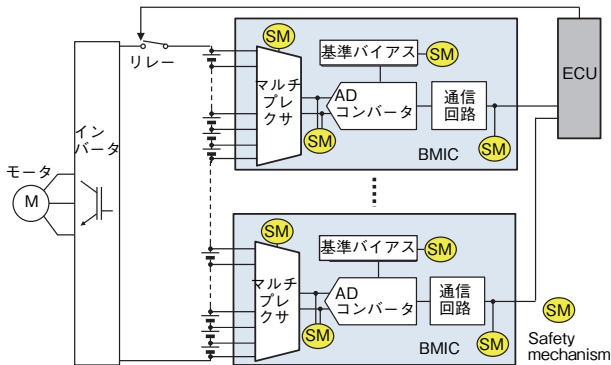
SPFM : Single Point Fault Metric

LFM : Latent Fault Metric

り、BMSに要求されるASILランクに適合できるよう分解されたASILランクにBMICが適合しなければならない。

5.2 従来のBMICの安全設計

従来のBMSとBMICの構成を第6図に示す。



第6図 従来のBMICの概略ブロック図

Fig. 6 Schematic of conventional BMIC

BMICは、入力されたリチウム電池セルの出力電圧をADコンバータによりデジタル値に変換し、ECUに送信する。ECUは、個々のセル電圧が、正常か異常を判断して、充放電スイッチを制御する。

BMSの安全目標を「リチウムイオン電池の過充電と過放電を防止する」と設定した場合、BMICに求める役割、つまりBMICの安全目標は、「電池電圧を正しく測定しECUに正しく伝える」と定義できる。

BMICは、自身の安全目標が守れているかを確認するため、自己診断機能や安全メカニズムを搭載している。例えば、入力回路の異常の検出や、ADコンバータ動作の診断機能、通信異常を検出する機能などを有する。しかし、機能安全要求が高まるにつれ、BMSにはASIL-CまたはASIL-Dが要求され、従来構成のBMIC単独では、必要な故障検知率を満たせない。そこで、BMICを2個使用して別々に測定した電池セルの電圧値を比較する方法や、別の二次保護用ICを用いてBMICの測定値の確からしさを担保するなど、冗長構成にする必要がある。

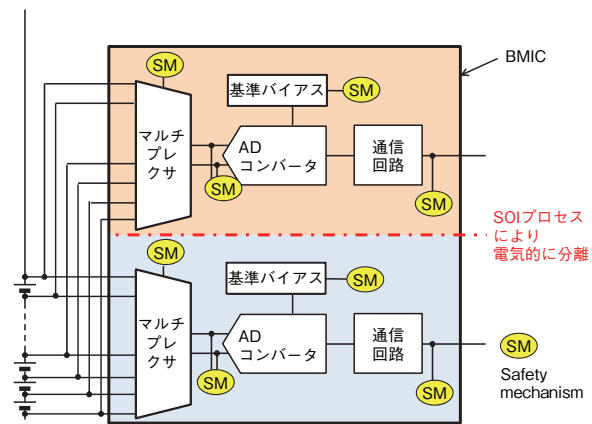
当社の従来のBMICにおいても、主に測定を行う計測ICと、計測ICの測定精度を監視し二次保護の役割を担う監視ICの2ICで、BMSを構成していた。上位のシステムがASIL-Cであっても、2IC構成による二重化により、ASIL要求を分解でき、個々のICへの要求をASIL-BやASIL-Aに下げることができる。

しかし、二重化による部品点数、実装面積の増加は、システムコストの増大を招くだけでなく、逆に部品故障や実装不良による故障率の増加を招いてしまう。

5.3 開発したBMICの安全設計

本開発では、素子や機能ブロックを電気的に分離できるSOIプロセスの構造的な特徴を活用し、1チップ上での二重化、冗長化を行う。またASIL-Cに準拠し、ASIL-Dへの対応も検討できる仕様とした。

開発したBMICのブロック図を第7図に示す。このBMICは、従来の2つのICを1チップ上に配置した構成であり、2つの機能ブロックが電気的に独立するように設計した。ISO26262規格[1]には、ASILの分解に対し、“evidence for sufficient independence of the elements after decomposition shall be made available”，「デコンポジション後の十分な独立性の証拠が利用可能でなければならない」との要求がある。



第7図 SOIプロセスで開発したBMICの概略ブロック図

Fig. 7 Schematic of BMIC developed by SOI process

2つのICの機能を1チップICに統合した場合、実際には個別の機能ブロックごとにはASILを分解しない。しかし、統合したICに要求する高いASILランクを満たすには、各機能ブロック間での従属故障がなく独立していることが重要である。SOIプロセスは構造上、電気的に独立した機能ブロックを構成できる。その利点は、故障検知率のメトリクス計算へ反映され、BMIC単独でのASIL-CまたはASIL-Dへの適合を実現する。機能の独立性は、完全な二重化による冗長にも、主機能の対する安全メカニズムの適用にも有効に機能し、より高いレベルでの機能安全を実現する。

開発したBMICでは、入力端子、マルチプレクサ、ADコンバータ、基準バイアス、通信回路など全て二重化しており、安全メカニズムも含めて電気回路的、デバイス構造的に独立性を有する。通信回路については、測定電圧値を上位システムに伝達する主機能に加え、測定電圧値が適正範囲に入っているかどうかを伝える副機能を備えている。このようにディペンダビリティの観点からも

SOIプロセスは有効で、IC内の一部の機能が故障しても、電氣的に独立した冗長機能でフェールオペレーションを継続できる。

それに対し、従来の接合分離プロセスでは、1チップ上での二重化、冗長化を実施しても、それぞれの機能ブロックの電氣的な独立性の証拠提示が難しい。機能ブロックを電氣的に分離するpn接合分離部は、その電位関係が崩れると寄生素子として動作する。よって隣接する他のブロックが従属故障を引き起こす可能性を否定できず、ASIL-Cなどの高い機能安全要求への適合は難しくなる。

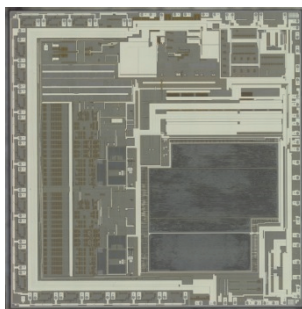
5.4 開発成果

開発したBMICは、二重化を構成する機能ブロックを、回路的、構造的に全て分離独立した設計を実施し、ASIL-Cが要求する故障検知率を達成した。また、1つのICで測定できる直列セル数を2倍化し、計測絶対精度誤差およびその保証温度範囲も大幅に改善した。そのBMICの特徴を第4表に、チップ写真を第8図に示す。

第4表 今回開発したBMICの特徴（従来製品との対比）

Table 4 Results of developed BMIC
(Comparison with conventional products)

	今回開発製品	従来製品
対応直列セル数	20 Cell	10 Cell
計測絶対精度誤差	± 2.5 mV (-40℃～105℃)	± 5.0mV (-30℃～65℃)
ADコンバータ方式	16 bit Incremental-Cyclic	16 bit Delta-Sigma
デージ通信方式	非同期差動電流モード	非同期差動電流モード
機能安全	ISO26262準拠 ASIL-C	ISO26262準拠 ASIL-B



第8図 開発したBMICのチップ写真

Fig. 8 IC die photograph of developed BMIC

6. まとめ

「本質的に安全で」かつ「機能集積化と機能安全を両立する」SOIプロセスを適用し、ASIL-Cが要求する故障検出率を1チップで実現する車載リチウムイオン電池用次世代BMICを開発した。今後は、自動運転の普及を見据え、リチウムイオン電池の故障予兆検知や劣化診断が可能な技術開発を行っていく。同時に本SOIプロセスを車載用電源ICやドライバICなどの別製品へ展開し、従来にはない機能統合と、フェールオペレーション（デイペンダブル）可能なソリューションを提案していく。

参考文献

- [1] Road vehicles – Functional safety, ISO 26262 Standard, 2011.
- [2] JIS Z8115:2000, デイペンダビリティ（信頼性）用語, (社)日本工業標準調査会, 平成12年10月20日改正.
- [3] Failure mechanism based stress test qualification for integrated circuit component technical, AEC - Q100 -Rev-H, 2014.
- [4] 畑村 洋太郎, 失敗学のすすめ, 講談社文庫, 2005.

執筆者紹介



藤井 圭一 Keiichi Fujii
パナソニック セミコンダクターソリューションズ(株) 半導体ビジネスユニット
Semiconductor Business Unit,
Panasonic Semiconductor Solutions Co., Ltd.



小林 拓 Taku Kobayashi
パナソニック セミコンダクターソリューションズ(株) 半導体ビジネスユニット
Semiconductor Business Unit,
Panasonic Semiconductor Solutions Co., Ltd.



井上 真幸 Masaki Inoue
パナソニック セミコンダクターソリューションズ(株) 半導体ビジネスユニット
Semiconductor Business Unit,
Panasonic Semiconductor Solutions Co., Ltd.



小林 仁 Hitoshi Kobayashi
パナソニック セミコンダクターソリューションズ(株) 半導体ビジネスユニット
Semiconductor Business Unit,
Panasonic Semiconductor Solutions Co., Ltd.