

# 宇宙用 p チャネルパワー MOSFET

## P-Channel Power MOSFETs for Space Applications

井上 正範 Masanori Inoue

北村 明夫 Akio Kitamura

立道 秀平 Shuhei Tatemichi

宇宙用パワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor) の製品群に、新たに p チャネルパワー MOSFET 系列を追加した。既に製品化している n チャネルパワー MOSFET と合わせて用途に応じて使い分けることで部品点数を削減でき、システム全体としての信頼性の向上が可能である。n チャネルパワー MOSFET と同様に擬平面接合技術を用い、ドリフト層の比抵抗を低くすることでオン抵抗を抑えた。また、全ての拡散層形成後にゲート酸化膜を形成する低温プロセスを適用し、TID (Total Ionizing Dose) 耐量を確保した。

Fuji Electric has added a family of p-channel power MOSFETs to its lineup of power MOSFETs for space applications. Depending on the application, designers can now choose between the existing n-channel power MOSFETs and the new chips, allowing them to reduce the system part count and achieve higher system reliability. Like the n-channel power MOSFETs, the new chips use quasi-plane junction technology to lower the resistance of the drift layer, thus lowering the on-resistance. A low-temperature process is used to form gate oxide films in all diffusion layers, achieving high total ionizing dose (TID) tolerance.

### 1 まえがき

通信衛星、気象衛星、GPS、地球観測などの宇宙利用の恩恵が私たちの生活の中に浸透していることは周知のことである。人工衛星に搭載されている電子機器やスイッチング電源には、宇宙空間での限られた電力を有効に利用するための高効率化や、システムとしての信頼性を確保するための部品点数削減が求められている。また、電力変換のキーデバイスとなるパワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor) には、低損失に加え、宇宙環境では電離放射線<sup>(1)</sup>や高エネルギー荷電粒子(重粒子)に対する耐性<sup>(2)</sup>などの高信頼性が必須の要求事項である。

富士電機では、これまでに n チャネルの宇宙用高信頼性パワー MOSFET を開発し、製品化<sup>(3)</sup>してきている。今回、新たに p チャネルの宇宙用パワー MOSFET をラインアップに加えた。p チャネルパワー MOSFET は、n チャネルパワー MOSFET に比べると原理的にオン抵抗が 2~3 倍大きくなってしまふデメリットがあるものの、極性が逆であるために、ハイサイドスイッチなどの回路では構成がシンプルにできる。このため部品点数が削減でき、システム全体としての信頼性の向上、小型化、軽量化が可能になるメリットがある。宇宙用 n チャネルパワー MOSFET で培った技術を基に宇宙用 p チャネルパワー MOSFET を開発し、製品化した。その製品の特徴および技術について紹介する。

### 2 製品の特徴

表 1 に宇宙用 p チャネルパワー MOSFET の製品一覧を、表 2 に一般パワー MOSFET と宇宙用 MOSFET の要求項

目に対する特性の違いを示す。一般パワー MOSFET レベルの低オン抵抗を維持したまま、宇宙環境に耐えられる性能を実現した。

#### 2.1 電離放射線耐量 (TID 耐量)

人工衛星などの軌道上は、電離放射線が存在する環境である。一般的に地上で使われているパワー MOSFET を電離放射線の環境下で使用すると、耐圧低下やパワー MOSFET のオン-オフ制御を行うゲートのしきい値電圧  $V_{th}$  シフトが発生する。電離放射線に対する市場要求は静止軌道上での 10 年分の被ばく量に相当する 1,000 Gy であり、今回開発した p チャネルパワー MOSFET はその要求を満たす耐量を確保した。電離放射線耐量の評価は、実際に電離放射線を製品に照射して特性の変動を評価する。特に電離放射線の影響を受けやすいブレイクダウン電圧  $BV_{DSS}$  と  $V_{th}$  の評価結果を、図 1 に示す。 $BV_{DSS}$  は全く変動しない。 $V_{th}$  についても規格範囲内のシフト量に抑えられている。

#### 2.2 重粒子耐量 (SEE 耐量)

宇宙空間には、太陽風や超新星爆発などによって放出された重粒子が飛び交っている。たった 1 個の重粒子がバイアス印加されている MOSFET に入射したことがきっかけとなって特性劣化や永久破壊に至る現象は、総称してシングルイベントエフェクト (SEE: Single Event Effect) と呼ばれている。質量の大きい重粒子ほど宇宙空間での飛来確率は低いが、大きなエネルギーを持ち MOSFET への影響度合いは大きい。重粒子が MOSFET に与えるエネルギーの大きさは LET (Linear Energy Transfer) で表す。また、SEE 耐量は重粒子入射時のパワー MOSFET のバイアス状態にも依存性があり、 $V_{DS}$ 、 $V_{GS}$  が高いほど損傷

表 1 製品一覧

型 式	$V_{DS}$ (V)	$I_D$ (A)	$I_D$ (Pulse) (A)	$R_{DS(on)}$ max.*1 ( $\Omega$ )	$P_D$ *2 (W)	$V_{GS}$ (V)	$V_{GS(th)}$ (V)	$Q_g$ max. (nC)	放射 レベル (krad)	SEE *3 LET MeV/ (mg/cm <sup>2</sup> )	パッケージ タイプ	質量 (g)
JAXA R 2SJ1 A01	-100	-42	-168	0.045	250	$\pm 20$	-2.5 ~ -4.5	230	100	37	TO-254	9.3
JAXA R 2SJ1 A02	-100	-25	-100	0.097	125	$\pm 20$	-2.5 ~ -4.5	95	100	37	TO-254	9.3
JAXA R 2SJ1 A03	-100	-11	-44	0.226	62.5	$\pm 20$	-2.5 ~ -4.5	40	100	37	TO-254	9.3
JAXA R 2SJ1 A04	-100	-42	-168	0.038	250	$\pm 20$	-2.5 ~ -4.5	230	100	37	SMD-2	3.3
JAXA R 2SJ1 A05	-100	-29	-116	0.09	150	$\pm 20$	-2.5 ~ -4.5	95	100	37	SMD-1	2.6
JAXA R 2SJ1 A06	-100	-13	-52	0.219	70	$\pm 20$	-2.5 ~ -4.5	40	100	37	SMD-0.5	1.0
JAXA R 2SJ1 A07	-200	-35	-140	0.091	250	$\pm 20$	-2.5 ~ -4.5	230	100	37	TO-254	9.3
JAXA R 2SJ1 A08	-200	-16	-64	0.21	125	$\pm 20$	-2.5 ~ -4.5	95	100	37	TO-254	9.3
JAXA R 2SJ1 A09	-200	-7.5	-30	0.487	62.5	$\pm 20$	-2.5 ~ -4.5	40	100	37	TO-254	9.3
JAXA R 2SJ1 A10	-200	-37	-148	0.084	250	$\pm 20$	-2.5 ~ -4.5	230	100	37	SMD-2	3.3
JAXA R 2SJ1 A11	-200	-18	-72	0.203	150	$\pm 20$	-2.5 ~ -4.5	95	100	37	SMD-1	2.6
JAXA R 2SJ1 A12	-200	-8.5	-34	0.48	70	$\pm 20$	-2.5 ~ -4.5	40	100	37	SMD-0.5	1.0

\*1  $R_{DS(on)}$  :  $V_{GS} = -12V$ , \*2  $P_D$  :  $T_C = 250^\circ C$   
 \*3 SEE : Kr, Energy : 520 MeV, Range : 63  $\mu m$ ,  $V_{DS} = \text{rated } V_{DS}$ ,  $V_{GS} = +5V$

表 2 宇宙用途でのパワー MOSFET への要求

要求項目		一般用MOSFET	宇宙用MOSFET
電離放射線耐量 (TID耐量)		×	◎
重粒子耐量 (SEE耐量)		×	◎
長期信頼性		○	◎
電気特性	耐 圧	200V	200V
	オン抵抗	◎	◎

TID : Total Ionizing Dose      ◎ : 要求を十分に満たす  
 SEE : Single Event Effect    ○ : 要求を満たす  
    × : 要求に未達

しやすい。

これらを踏まえて一般的に SEE 耐量は、LET の大きさと  $V_{DS}$ ,  $V_{GS}$  の使用可能エリアで表現される (図 2)。このパワー MOSFET の LET が 37 MeV / (mg/cm<sup>2</sup>) における値を示している。実際には、 $V_{GS}$  を +5V 以上の逆バイアスで使用することはないため、実使用範囲では定格  $V_{DS}$  までの耐量がある。この LET 値の重粒子が MOSFET に入射する確率は、およそ 200 年に 1 回程度 (軌道高度

=550 km, 軌道傾斜角 =31° での試算) であり、重粒子に対して極めて高い信頼性を持っている。

### 2.3 長期信頼性

パッケージには、金属のハーメチックシールパッケージ (気密性パッケージ) を使用して長期信頼性を確保している。パッケージのフレーム (MOSFET チップが搭載される部分) には、シリコン (MOSFET チップの素材) と熱膨張係数が非常に近い CuW (銅タングステン) を採用して温度サイクル耐性を向上させている。また、ハーメチックシールパッケージ内は中空にし (図 3)、ドライ窒素を封入して外因的な劣化モードからパワー MOSFET チップを保護している。

### ③ 宇宙用 MOSFET に適用した技術

既に製品化している第 2 世代宇宙用 n チャネルパワー MOSFET で開発した技術を、p チャネルにも適用した。

特集

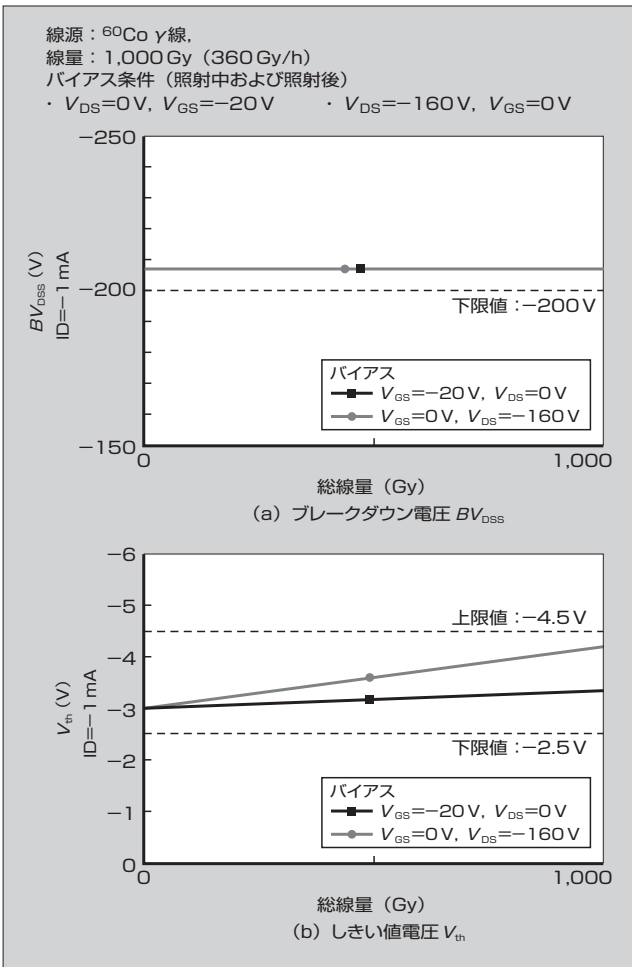


図1 電離放射線耐量 (TID 耐量)

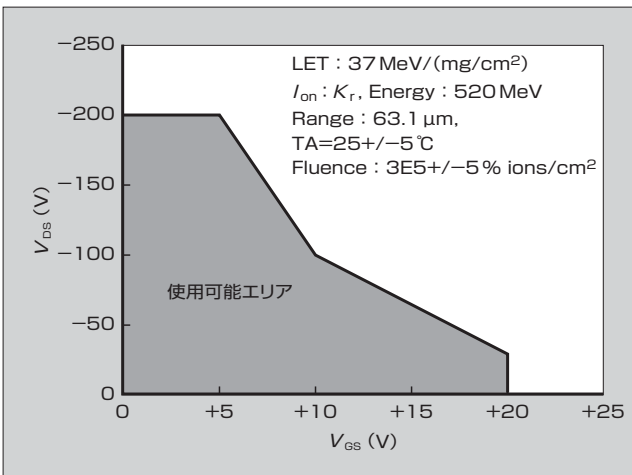


図2 重粒子耐量 (SEE 耐量)

本章では TID 耐量, 低オン抵抗の技術について紹介する。

### 3.1 低温プロセスの適用<sup>(4)</sup>

$V_{\text{th}}$  シフトは, 電離放射線によって酸化膜に電荷がトラップされるために起こる現象である。

MOSFET に電離放射線が照射されると, 酸化膜に電子と正孔が誘起される。そのうち, 特に正孔が酸化膜中にトラップされ, 正電荷の固定電荷が形成されて  $V_{\text{th}}$  シフトと

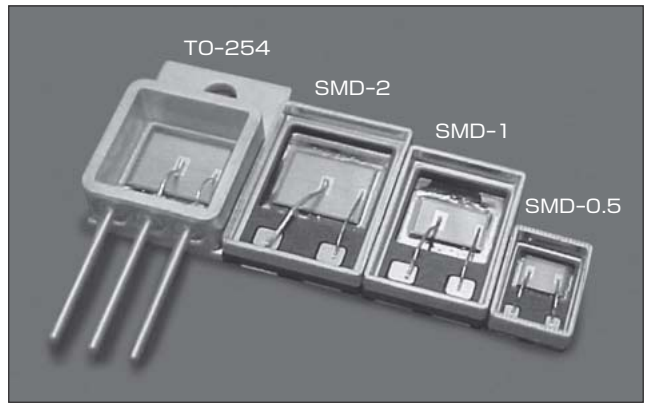


図3 宇宙用パワー MOSFET の内部構造

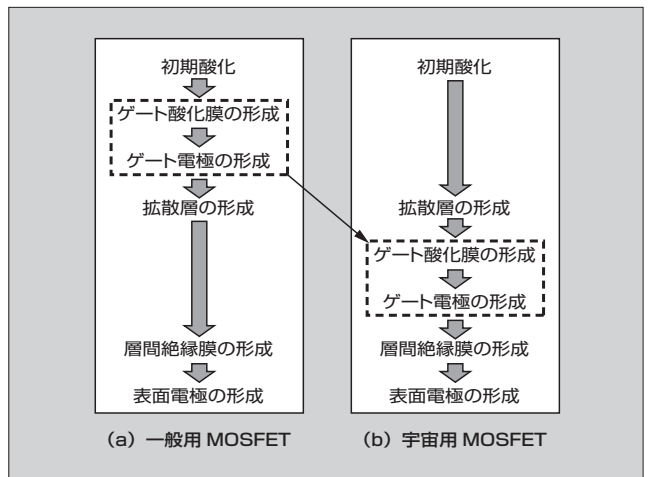


図4 一般用 MOSFET と宇宙用 MOSFET のプロセスフロー

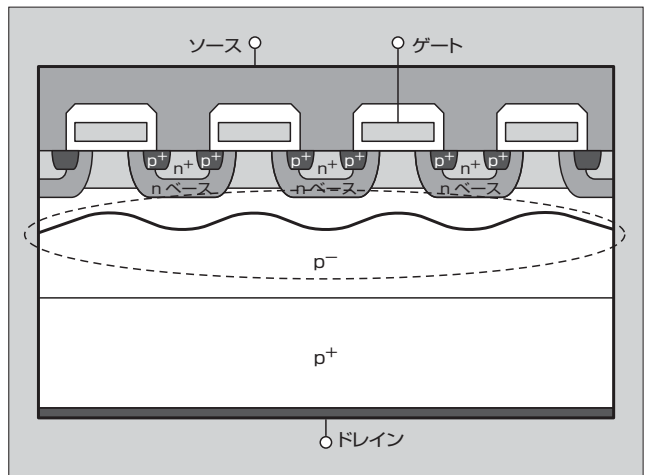


図5 宇宙用 p チャネルパワー MOSFET の活性部断面図

して電気特性に表れる。

過去の研究により, 高温の熱履歴にさらされた酸化膜ほどトラップ量が多くなることが分かっている。一般的な MOSFET は, ゲート電極 (ゲート酸化膜も形成されている) をセルフアラインのマスクとして使用することで効率的な製造工程で安定した電気特性を得ている。しかし, このプロセスでは, ゲート酸化膜が拡散層形成工程での高温の熱履歴を受けるため, トラップの多い酸化膜になってし

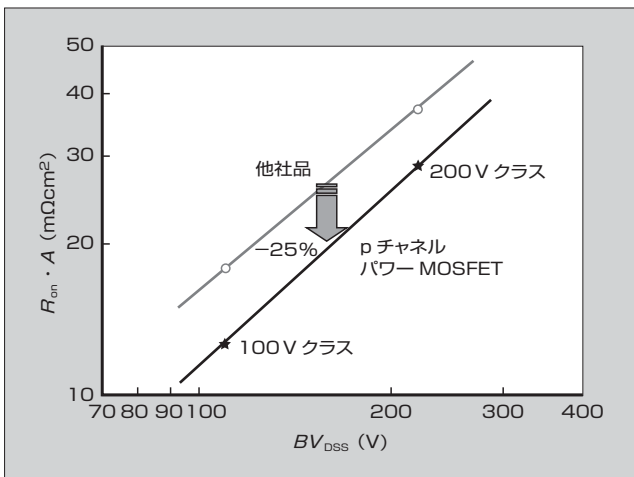


図6  $BV_{DSS}$ - $R_{on} \cdot A$  のトレードオフ

まう。

そこで宇宙用の MOSFET には、全ての拡散層形成後にゲート酸化膜を形成するプロセスフローを適用した(図4)。このプロセスの適用で、ゲート酸化膜への熱履歴を低温化させて、TID 耐量 1,000 Gy を確保した。

3.2 低オン抵抗技術

富士電機の一般向け MOSFET で採用している擬平面接合 (QPJ: Quasi-Planer-Junction) 技術<sup>(5)</sup>を本 MOSFET にも適用した。

QPJ 技術は n ベースを稠密 (ちゆうみつ) に配置し、さらに n ベース間隔を極小化することで電界を平坦 (へいたん) 化し平面 pn 接合に近い耐圧を得る (図5)。これによりドリフト層の比抵抗を低くし、オン抵抗を低減させる技術である。

この QPJ 技術により、他社品に比べ単位面積当たりのオン抵抗を 25% 低減した (図6)。

4 あとがき

本稿では、宇宙用 p チャンネルパワー MOSFET について紹介した。電離放射線耐性や重粒子耐性などの耐宇宙環境性能を持ち、かつ一般パワー MOSFET レベルの低オン抵

抗が実現できた。

今後、さらなるオン抵抗の低減や SEE 耐量の向上を図り、国内外の宇宙開発の発展に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) Gover, J. E. "Basic Radiation Effects in Electronics Technology," Colorado Springs, CO, Proc. 1984 IEEE NSREC Tutorial Short Course on Radiation Effects, July 22, 1984
- (2) Waskiewicz, A. E. et al. "Burnout of Power MOSFET with Heavy Ions of Californium-252," IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 1986, vol.NS-33, no.6, p.1710-1713.
- (3) 井上正範ほか. 第2世代宇宙用高信頼性パワー MOSFET. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.393-397.
- (4) 小林孝. 特許: MOS型半導体素子の製造方法. 特開平6-244428.
- (5) 山田忠則ほか. 低損失・超高速パワー MOSFET [Super FAP-Gシリーズ]. 富士時報. 2001, vol.74, no2, p.114-117.



井上 正範

パワー半導体素子の開発・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松本工場技術統括部ディスクリート・IC 技術部。



北村 明夫

パワー半導体素子の開発・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松本工場技術統括部ディスクリート・IC 技術部マネージャー。



立道 秀平

パワー半導体素子の開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所 Si デバイス開発センターデバイス開発部。博士(工学)。応用物理学会会員。





\*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。