宇宙用 MOSFET

丸山　篤(まるやま　あつし)　　小林　孝(こばやし　たかし)　　大賀　公二(おおが　こうじ)

1 まえがき

宇宙開発は日本においても着実にその歴史を刻んでいる。1992年9月の「ふわっと'92」，そして1994年2月，国産ロケット「H－II」の打上げ成功を契機に今後ますます宇宙開発の活発化が期待される。そのような状況下，宇宙ステーション計画は，米国航空宇宙局（NASA）が，日本，ロシア，欧州などの参加により，開発する国際的プロジェクト活動で，日本は，取付形実験モジュール（JEM：Japanese Experiment Module）をもって参加し，現在，宇宙開発事業団の下で基本設計が実施されており，1998年に初フライトが計画されている。そのなかで，JEM に使用される電力系に MOSFET（Metal－Oxide－Semiconductor Field－Effect Transistor）を用いた電子機器が検討されており，今回，宇宙開発事業団の委託テーマとして，上記，電力系に使用される宇宙用 MOSFET（150W クラス）の開発を実施した。その概要を以下に紹介する。

2 製品の概要

表1，表2 に今回開発した宇宙用 MOSFET "2SK2271" の定格特性仕様と代表的な電気的特性を示す。

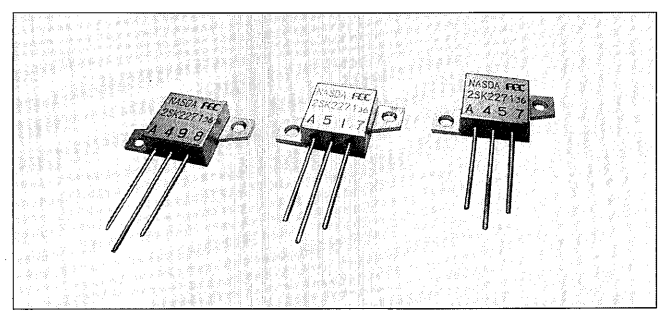
表1　絶対最大定格（T_a＝25℃）

項　　目	記　号	最大定格	単位
ドレーン－ソース間電圧	V_{DSS}	500	V
ゲート－ソース間電圧	V_{GS}	±20	V
ドレーン電流	I_D	13	A
ドレーン電流（パルス t_w＝1.4ms 単発パルス）	I_{DP}	52	A
最大損失電力（T_c≦75℃）	P_D	150	W
最大損失電力（T_a＝25℃ 自立状態）	P_D	5	W
チャネル部温度	T_{ch}	200	℃
保存温度	T_{stg}	－65～＋200	℃
熱抵抗	$R_{th\,(ch-c)}$	0.83	℃/W

表2　代表的な電気的特性（T_a＝25℃）

項　目	記　号	条　件	最小	最大	単位
ドレーン－ソース間降伏電圧	$V_{(BR)DSS}$	I_D＝1 mA, V_{GS}＝0 V	500	－	V
ゲート遮断電流	$\pm I_{GSS}$	V_{GS}＝±20V, V_{DS}＝0 V	－	100	nA
ドレーン遮断電流	I_{DSS}	V_{DS}＝400V, V_{GS}＝0 V	－	10	μA
ゲート－ソース間遮断電圧	$V_{GS\,(th)}$	V_{DS}＝V_{GS}, I_D＝1 mA	2.0	4.0	V
ドレーン－ソース間オン抵抗	$R_{DS\,(on)}$	V_{GS}＝10V, I_D＝8 A	－	0.35	Ω
順伝達コンダクタンス	g_{fs}	V_{DS}＝15V, I_D＝8 A	7	－	S
入力容量	C_{iss}	V_{GS}＝0 V, V_{DS}＝25V, f＝1 MHz	－	10,000	pF
出力容量	C_{oss}		－	500	pF
帰還容量	C_{rss}		－	100	pF
ターンオン時間	$t_{d\,(on)}$	V_{DD}＝250V, I_D≒13A（参考値）, R_G＝6.2Ω, R_D＝20Ω, V_{GS}＝10V, t_p＝5μs, f＝1 kHz	－	90	ns
	t_r		－	66	ns
ターンオフ時間	$t_{d\,(off)}$		－	200	ns
	t_f		－	60	ns
SEB を考慮したドレーン－ソース間降伏電圧		V_{GS}＝0 V	275	－	V
トータルドーズ耐性 1×10³Gy（Si）	$V_{(BR)DSS}$	I_D＝1 mA, V_{GS}＝0 V	450	－	V
	$V_{GS\,(th)}$	V_{DS}＝V_{GS}, I_D＝1 mA	0	－	V
	$\Delta V_{GS\,(th)}$		－	2.0	V

図1　宇宙用 MOSFET の外観



丸山　篤

昭和46年入社。半導体素子の開発設計に従事。現在，松本デバイス製作所第一開発部課長補佐。

小林　孝

平成2年入社。パワー MOSFET のデバイス開発，設計に従事。現在，松本デバイス製作所第一開発部。

大賀　公二

昭和63年入社。半導体素子の品質保証に従事。現在，松本デバイス製作所品質保証部。

また，外観を**図 1** に示す。なお，今回開発した製品は，チップ設計として民生用デバイスと同等以上の電気的特性をもち，さらに宇宙用デバイスとして要求される①トータルドーズ耐性および②シングルイベントバーンアウト（SEB）耐性の改善を実施し，パッケージ設計として，T_{ch} =200℃の実現に向け，材料選定・製造条件の確立を行った。

3 設計と特性

3.1 チップ設計

宇宙用 MOSFET のチップ設計に求められる要求項目をまとめると次の 4 項目となる。

(1) 民生用相当デバイス（2SK725）と同等以上の電気性能
(2) 広い温度範囲（−65～200℃）での安定性
(3) 高信頼性保証
(4) 耐放射線性（SEB 耐性，トータルドーズ耐性）の確保

ここでは，宇宙用 MOSFET に特有の要求性能である耐放射線性の改善技術開発について概説する。

SEB は近年発見された現象で，MOSFET のドレーンに高電圧が印加された状態で宇宙放射線に含まれる高エネルギー重粒子イオンが照射されると，MOSFET に寄生するバイポーラトランジスタが活性化されブレークダウンとなって焼損に至る現象である。

SEB 耐性の対策方法として，

(1) デバイス内部に生じる空乏層の電界強度の低減
(2) 寄生のバイポーラトランジスタ動作の抑制

が考えられるが，電界強度低減に有効な高抵抗結晶の適用はオン抵抗の上昇を招くため，採用を避け，寄生バイポーラトランジスタの動作を抑制するセル設計を取り入れた。

具体的には，**図 2** に示す寄生バイポーラトランジスタのベース抵抗 R_B の抵抗値を低下させる不純物濃度プロファイル条件を設定した。

トータルドーズは，放射線照射によるゲート酸化膜，フィールド酸化膜中に発生する固定電荷の蓄積と，界面準位の増加によって MOSFET の $V_{GS(th)}$や g_{fs} が変化する現象で，対策として以下のようなプロセス設計を行った。

(1) 熱酸化膜中の固定電荷トラップ密度低減のための酸化温度の低温化
(2) ドライ酸化プロセスによるトラップ密度の低減
(3) トラップ密度の増加抑制のため，ゲート酸化以降のプロセス温度低温化

以上の対策に対する適正条件設定と，電気特性に対する最適化設計により目標性能を得ることが可能となった。

図 3 のゲート酸化膜断面図に，正電荷を持つ固定電荷と界面準位のモデルを示す。

3.2 パッケージ設計

パッケージ設計においては，以下の内容を考慮し材料選

図 2　宇宙用 MOSFET のセル断面構造図

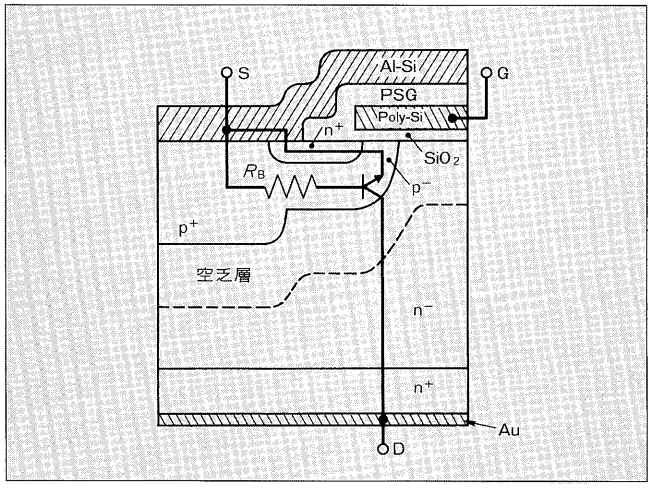


図 3　ゲート酸化膜断面図

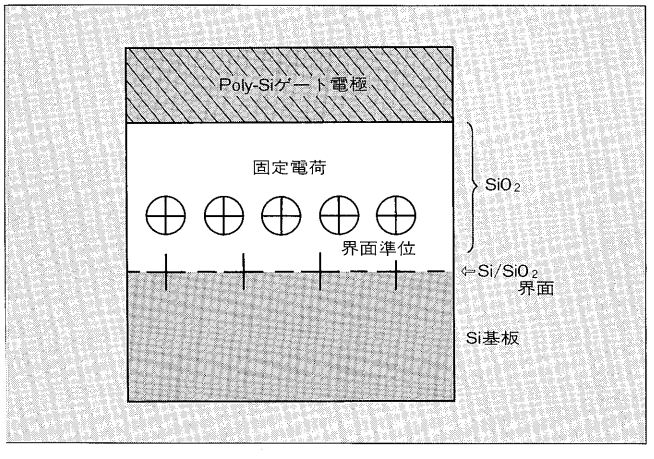


図 4　取付状態図

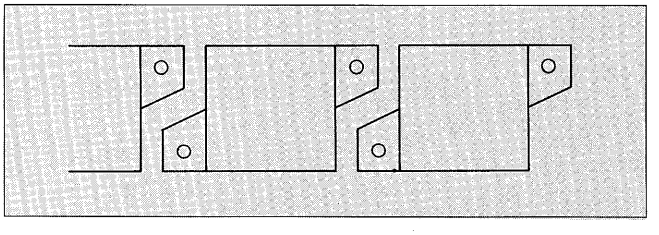


図 5　製品の外形寸法図

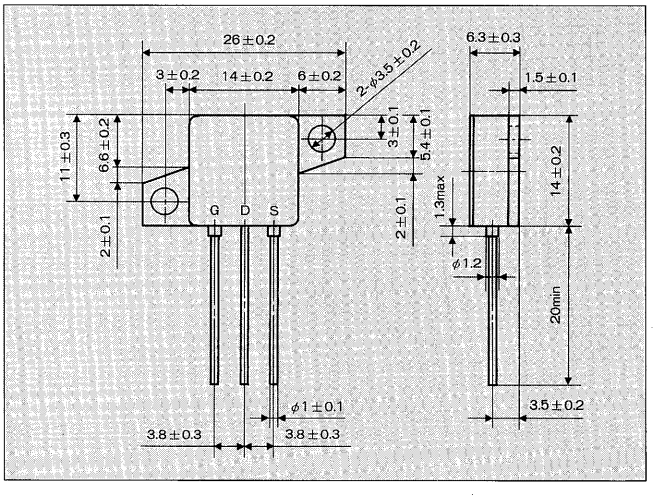
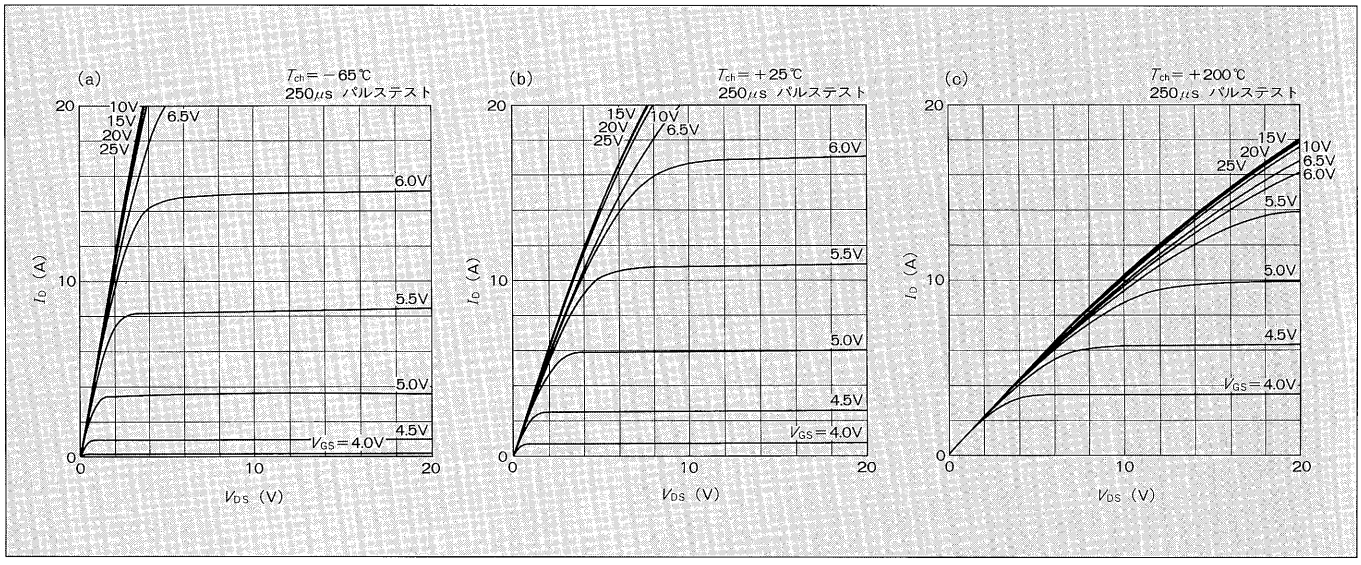


図6　出力特性（標準値）（V_{DS}–I_D 特性の温度依存性）



定・製造条件の設定を行った。

(1)　T_{ch}＝200℃達成のために Au–Si 接合とした。

(2)　冷却体への密着性を考慮し，2か所の取付穴を設けるとともに，取付穴位置を対角線対称とし，取付時の集積度向上が可能な形状を採用した（**図4**，**図5** 参照）。

(3)　リードフォーミング加工を実施可能なリード構造とした（ガラス気密封止部は Fe–Ni–Co の合金とし，リード部は銅線を使用した）。

図7　ゲートしきい値電圧 $V_{GS(th)}$ の温度依存性

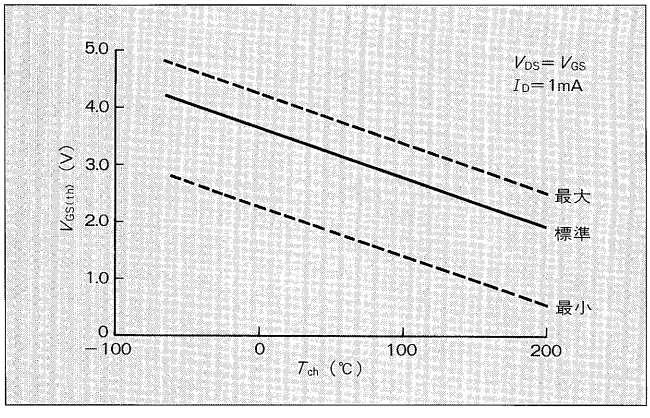
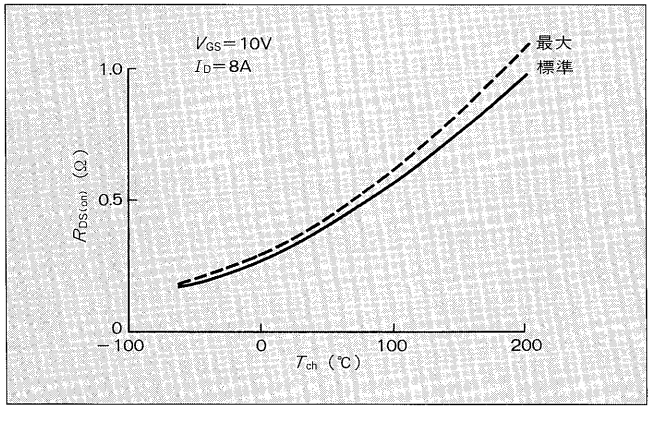


図8　ドレーン－ソース間オン抵抗 $R_{DS(on)}$ 温度依存性



3.3　特　性

今回開発した宇宙用 MOSFET の特性を**図6**～**図10**に示す。

図9　スイッチング特性例

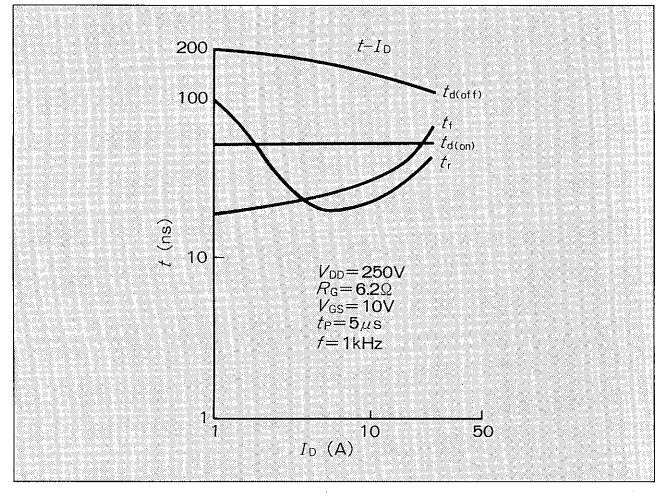


図10　安全動作領域

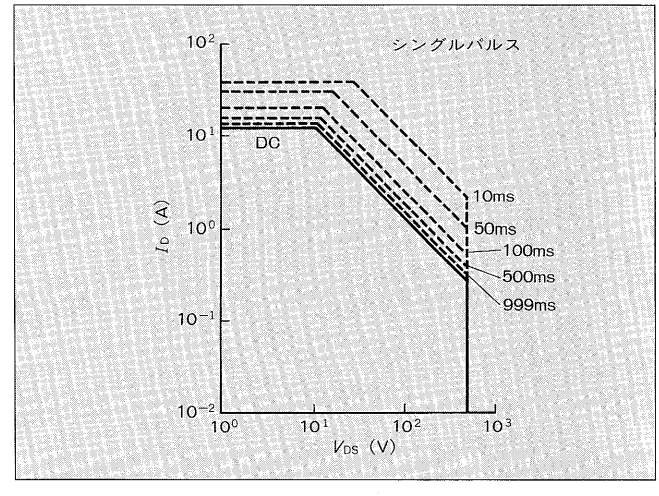
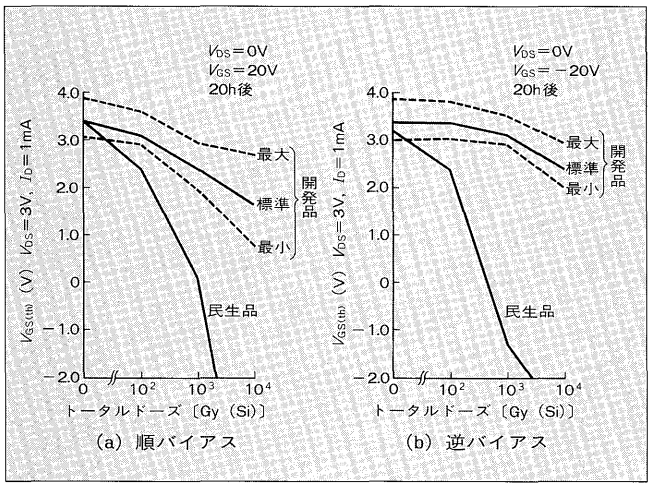


図11　トータルドーズ耐性



4　宇宙用デバイスとしての性能

人工衛星や宇宙ステーションに使用される半導体製品は，宇宙空間に存在する放射線による誤動作や劣化に対する耐放射線性が要求される。放射線に対する耐久性を向上させるための開発を実施した結果，民生用 MOSFET と比較し，大幅な改善が図れた。

図11に，トータルドーズ耐性試験後の民生品と今回の開発品のゲートーソース間遮断電圧 $V_{GS(th)}$ を比較した結果例を示す。

また，SEB 耐性においても大幅な改善が図れた。

5　品質・信頼性

特殊な使用環境条件，故障発生時の影響度の大きさから，宇宙用部品の品質・信頼性に対する要求は非常に高い。その要求事項を満足させるために，**図12**に示す評価を行った。

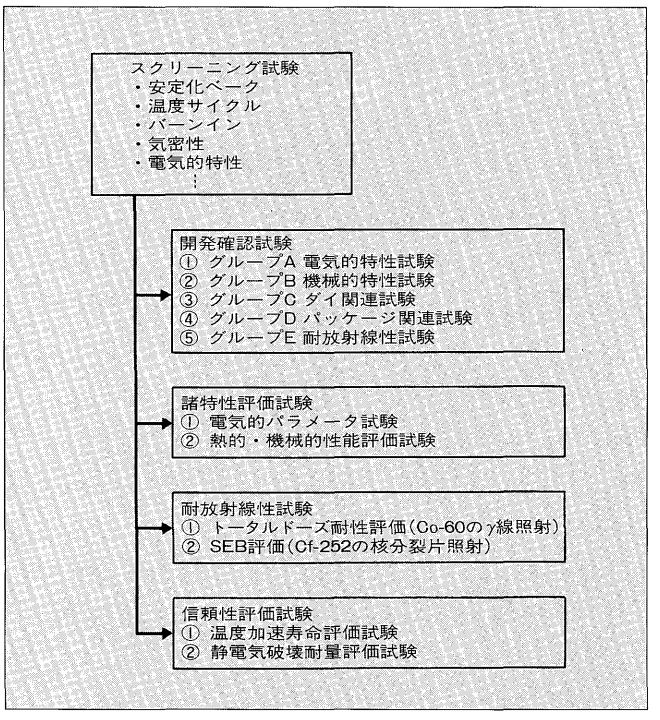
これらの評価試験で得られた結果から，宇宙用としての要求を十分に満足するものであることを確認し，個別仕様書，適用データシートなどの作成に反映した。

さらに，開発時に得られた品質・信頼性水準を維持し，安定供給を確保するために，信頼性保証プログラムを設定した。このプログラムは，宇宙開発用高信頼性保証個別半導体デバイス共通仕様書（NASDA-QTS-19500A）の要求に基づいて，信頼性保証プログラム計画書と製品の製造に関する文書から構成されるもので，それによって信頼性保証活動が効率的に運用されるものである。

6　あとがき

以上，宇宙用 MOSFET の開発の狙いと製品の紹介を行った。

図12　開発時における各種評価試験



本製品は今後，宇宙用半導体として，特に JEM 用として多数の使用が期待されている。

富士電機における宇宙用半導体は，ロケット用，人工衛星用などとして，現在トランジスタ 3 機種が認定されており，本開発により 4 機種になる予定である。

今後は，宇宙用という特殊環境下における技術課題を解決し，さらなる製品の性能・品質・信頼性向上に注力する所存である。

なお，本開発は，宇宙開発事業団委託業務による成果であり，本開発業務の推進にあたり，ご指導，ご鞭撻いただいた宇宙開発事業団殿ならびに関係各位に深く感謝申し上げる次第である。

参考文献

(1)　宇宙開発事業団，富士電機（株）：宇宙用共通部品の開発（3－6）パワー MOSFET（150W クラス）の開発　成果報告書（1993）

(2)　五家建夫ほか：パワー MOSFET の耐放射線性試験，電子情報通信学会誌

(3)　梨山勇：宇宙空間での誤動作対策，電磁環境工学情報 EMC, No.58（1993）

(4)　菅野徹ほか：宇宙用パワー MOSFET のシングルイベント耐性の評価について，電子情報通信学会誌（1993-12）

e-Front runners

＊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。