

# パワーMOS FETの特徴とスイッチング電源への応用

## 1. まえがき

近年、電子機器は、軽薄短小化、省エネ化が図られコストダウンが進展しています。

電子機器ブロックの中で、その電源部の占める割合は、スペース、重量の点で最も大きく、電源部の改善が重要な課題となっています。

このような動向にあって、これまで電源はシリーズレギュレータからスイッチングレギュレータへ移行してきましたが、さらに軽薄短小、高性能化の動向の中でこれに対応したデバイスが要求されています。パワーMOS FETは、スイッチングレギュレータのこれらのニーズに最も適したデバイスとして注目され、すでに実用化がはじまっています。新規の装置設計は従来のバイポーラトランジスタに替りすべてパワーMOS FETで行うところもでてきており、ますますその普及が期待されています。

本資料では、パワーMOS FETの特徴、構造、定格、特性とバイポーラトランジスタからパワーMOS FETへの置き替え回路の例および注意事項について述べます。

## 2. 特 徴

### ①高利得

○電圧ドライブ形デバイスであるため、CMOS等のICによる直接大電力制御が可能です。

### ②高速スイッチング、低損失

○高速スイッチング、低オン抵抗、並列動作が容易です。

○スイッチング速度がバイポーラトランジスタの1/10~1/100であり、スイッチング損失を低減できます。

○オン時には抵抗特性となるため、小電流域においては、バイポーラトランジスタより低損失化が可能です。

○オン抵抗の正の温度係数特性により並列動作が容易であり、この場合の個々の損失は、並列数Nに対して $1/N^2$ になります。

### ③大SOA

○バイポーラトランジスタのようにセカンダリブレイクダウンがないため、電圧、電流の値は、ほぼ定格電力(一定)の範囲で許容されます。

○サステインエネルギーがバイポーラトランジスタに対して約1000倍大きく、スイッチングレギュレータの製造工程や市場での故障を低減できます。

以上の応用ニーズ面での特徴の他に、デバイスとして次のような特徴があります。

### ①確立された基本設計

理論解析が確立しており、理論と実際がよく一致します。

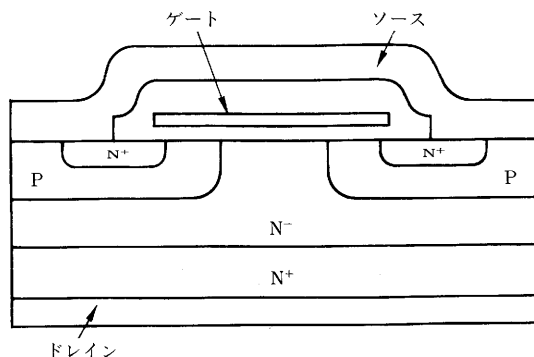
したがって、CADが容易で設計シミュレーションが容易です。

### ②最新の製造プロセス

最新の半導体技術を駆使し、MOS LSI技術の庇護下にあります(CVD技術イオン注入技術、微細加工技術等)。したがって、今後とも性能改善が期待でき、また再現性の良い安定したプロセス条件が得やすく、均一な品質と高信頼性が得られます。

### 3. 構 造

図1 パワー-MOS FETの構造



パワー-MOS FETは大電流を扱うため、FETセルを数千~数万、1チップ上に並列に形成したもので、当社では、図1の縦形二重拡散構造 (DMOS FET=Double diffused MOS FET) を主に採用しています。これは次のような理由によるものです。

#### ①容易な高耐圧化

DMOS FETのオン時およびオフ時の動作を図2および図3に示します。

DMOS FETは、シリコン酸化膜を介してゲート電極がドレイン部N<sup>-</sup>層上をおおっているため、セルよりのびた空乏層は低い電圧でとなりのセルどうし結合し、電位面はチップの表面に平行なプレーンジャンクションとなります。耐圧はセル部でなく多数のセルを囲む外周構造により決まるため、バイポーラトランジスタで採用されている図4のようなガードリング等の既存の構造が適用でき、高耐圧化が容易という利点があります。

図2 オンの状態

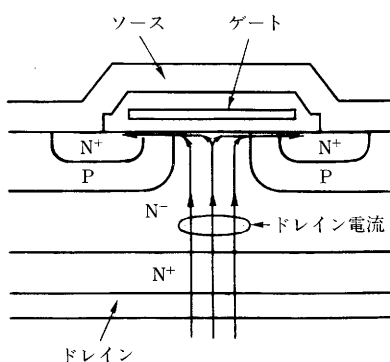


図3 オフの状態

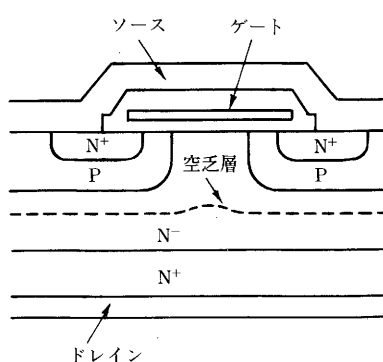
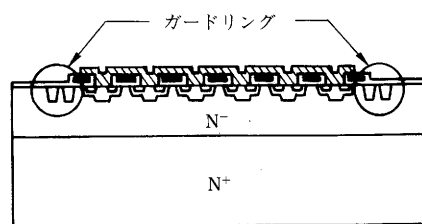


図4 パワー-MOS FETのガードリング構造



#### ②低R<sub>DS(on)</sub>

DMOS FETは縦形構造で基本的にオン抵抗が小さいことに加えて、セルの形成についてもIC、LSI技術の適用が可能であり、セルサイズの微小化により低オン抵抗化をはかることができます。

#### ③大サステインエネルギー耐量

前述したようにDMOS FETのオフ時には、多数のセル部はガードリングに囲まれたプレーンジャンクションとなります。このためドレインソース間の耐圧特性は電流集中の起らない降伏を生じ、チップ全体で均一な電力を生ずるため高サステインエネルギー耐量が得られます。

以上のようにDMOS FETは、MOS FETの中でもスイッチング素子のニーズに合った最適な構造と考えられます。世界のパワー-MOS FETメーカーのほとんどがこの構造を採用するようになったこともこれを裏づけています。

#### 4. 定格と特性

パワーMOS FETは、バイポーラトランジスタに比べて多くのすぐれた点があります。

ここでは、パワーMOS FETのサステイン電圧、SOA 定格、スイッチング特性について、バイポーラトランジスタと比較して説明します。

##### 4.1 $V_{DS(sus)}$

DMOS FETでは、前述のようにセル部に特別な高耐圧構造を付加しなくても、セルの外周部で耐圧が決まり、ブレイクダウン電流は、低電流域ではほとんどこの外周部に、高電流域においてはチップ全面に流れるアバランシェブレイクダウン特性となり、図5に示すように急峻な $V_{DS}-I_{DS}$ 特性を示します。このようにアバランシェダイオードとしてチップ全面にブレイクダウン電流が流れ、セル部に電流集中することはありません。

これに対しバイポーラトランジスタでは、 $h_{FE}$ が正の温度係数を有しているためブレイクダウン電流が流れると増幅され、局部的に電流集中を生ずる、いわゆるセカンダリブレイクダウン現象があります。図6にバイポーラトランジスタのサステイン電圧・電流を示します。パワーMOS FETは以上のような二次降伏がないのが大きな特徴です。

パワーMOS FETのサステインエネルギー耐量は、同一チップサイズの同等耐圧のバイポーラトランジスタと比較しておよそ1 000倍大きくなります（図7参照）。

表1に2SK854と2SC2335のサステイン耐量の実験結果を示します。

図5 パワーMOS FETのサステイン電圧  
(2SK854の例)

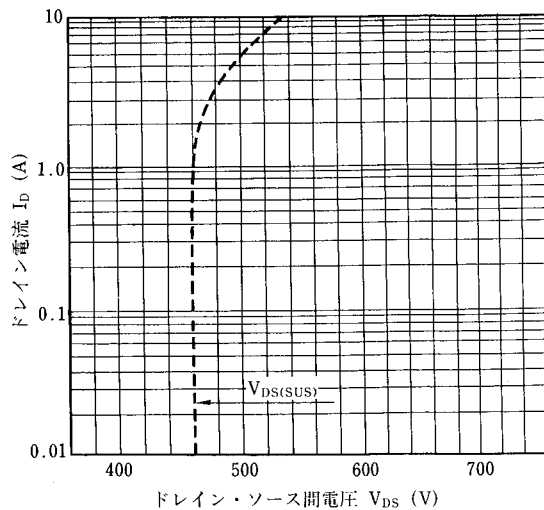


図6 バイポーラトランジスタのサステイン電圧  
(2SC2335の例)

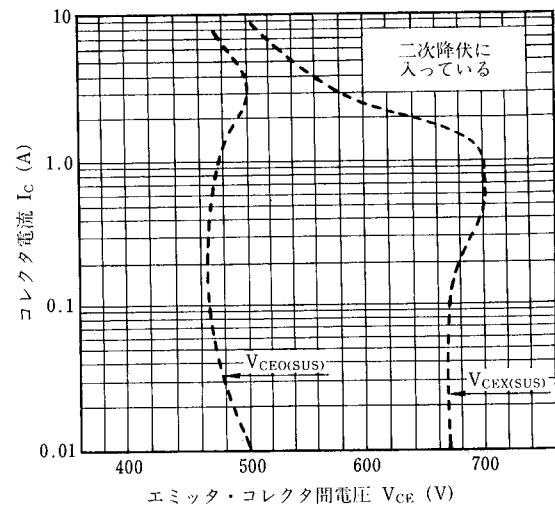


図7 サステインエネルギー耐量試験回路

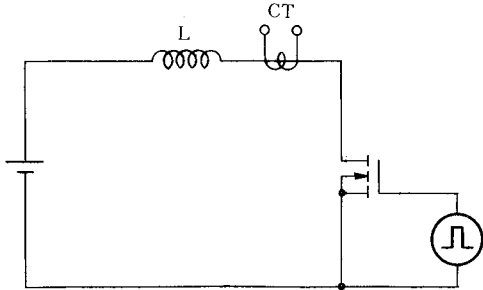


表1 サステインエネルギーの比較

品名	サンプル	サステインエネルギー (mJ)	L (図7参照)	
2SK854	NO. 1	450	40 mH	
	NO. 2	500		
2SC2335	NO. 1	$V_{CE0(sus)}$	1.3	100 $\mu$ H
		$V_{CEX(sus)}$	0.14	
	NO. 2	$V_{CE0(sus)}$	3.2	
		$V_{CEX(sus)}$	0.2	

#### 4.2 SOA定格

バイポーラトランジスタは、前述のように $h_{FE}$ が正の温度係数を有していることからチップの局所的な温度上昇により電流集中し、ついには熱暴走を起こすこととなります。この現象はチップのホットスポットで象徴され、セカンダリブレイクダウンによる高電圧領域での許容損失低下に結びついています。

一方、パワーMOS FETはオン抵抗が正の温度係数を有すること、図8に示す伝達特性が大電流領域にて負の温度依存性を示していることから、電流集中や熱暴走が起こらず等電力線によるSOA定格になります。

SOA実力値を図9に示します。

図10は2SK854のSOA定格の例です。図に示すようにパワーMOS FETは電流集中を起こしにくいいため、許容できる電力損失内で電流定格を延長できます。

図8 伝達特性 (2SK735)

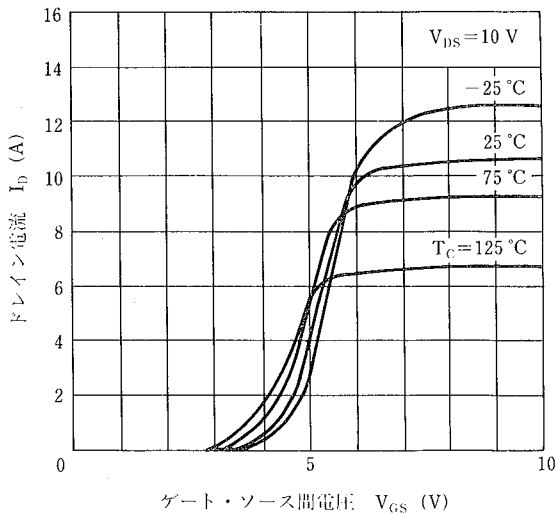


図9 SOAの実力値 (2SK735の例)

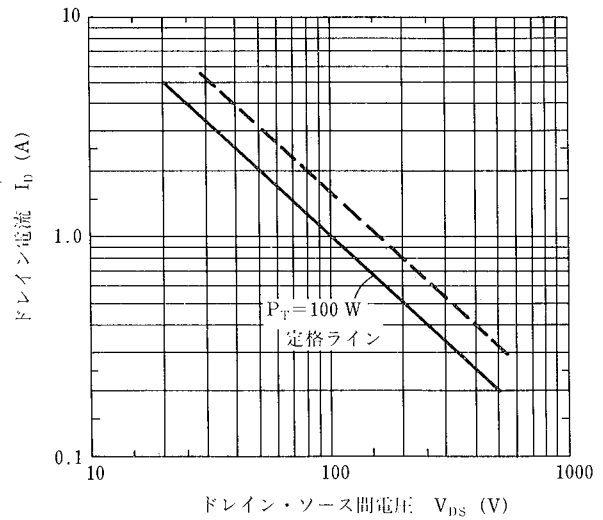
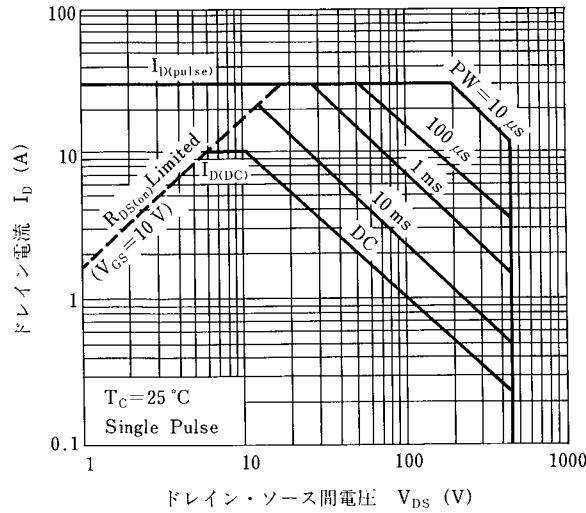


図10 パルスSOA定格 (2SK735の例)



#### 4.3 スイッチング特性

パワーMOS FETは、動作に単一の極性のキャリアのみ関与するデバイスであるため、動作に2つの極性のキャリアの関与するデバイスであるバイポーラトランジスタに比べて、高速スイッチングが可能です。しかし、図11のようにMOS FETの構造上、入力容量 $C_{iss}$ 、出力容量 $C_{oss}$ 、帰還容量 $C_{rss}$ が付加されているため、スイッチング時間は、これらの容量を駆動するインピーダンスにより決まります。

図12、図13にスイッチング時間の試験回路、定義例を、表2に2SK854、2SK735のスイッチング関連特性を示します。

図14、図15は、スイッチング時間の電流および温度依存性についてバイポーラトランジスタとパワーMOS FETを比較したものです。パワーMOS FETのスイッチング時間は温度依存性がないので、回路設計が容易です。

図11 パワーMOS FETの寄生容量

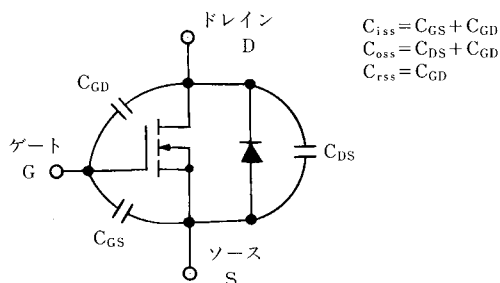


図12 スイッチングタイム試験回路例

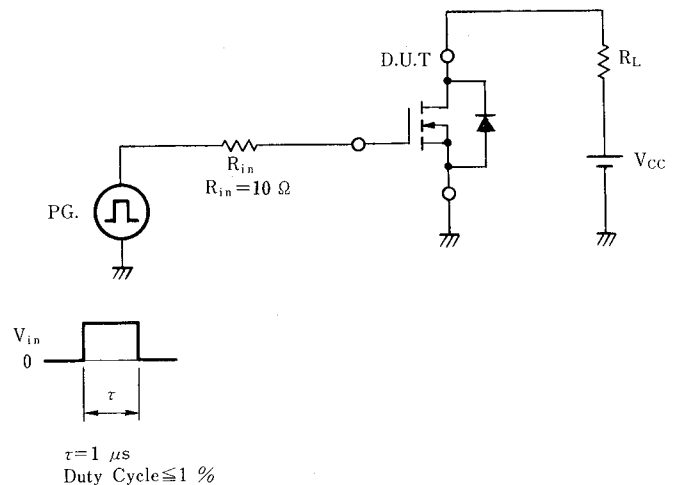


図13 スイッチングタイムの定義例

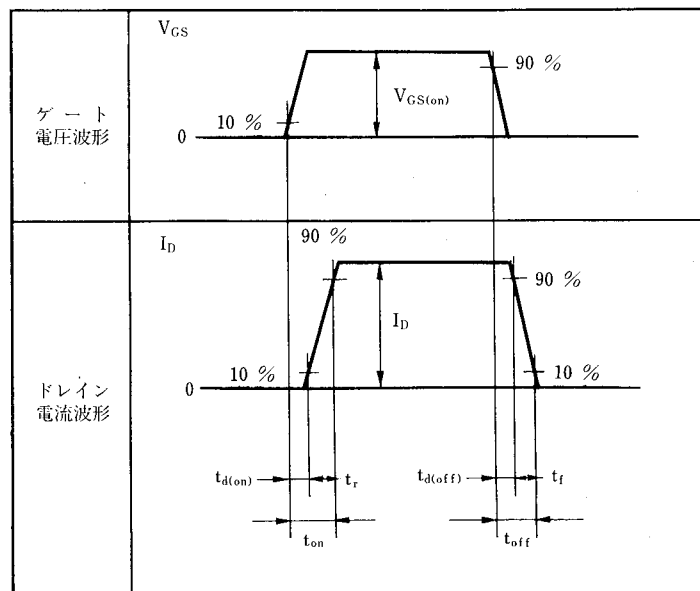


表2 2SK854 (5 A, 450 V, TO-220)

2SK735 (10A, 450 V, MP-88) のスイッチング関連特性

項 目	略 号	標 準 特 性		単 位	条 件
		2SK854	2SK735		
入 力 容 量	$C_{iss}$	700	1270	pF	$V_{DS} = 10 \text{ V}$
出 力 容 量	$C_{oss}$	220	320	pF	$V_{GS} = 0$
帰 還 容 量	$C_{rss}$	75	70	pF	$f = 1 \text{ MHz}$
オン時遅延時間	$t_{d(on)}$	6	15	ns	$V_{DD} \doteq 150 \text{ V}$ $V_{GS(on)} = 10 \text{ V}$
立ち上がり時間	$t_r$	15	20	ns	$R_{in} = 10 \Omega$
オフ時遅延時間	$t_{d(off)}$	30	60	ns	2SK854 : $I_D = 2.5 \text{ A}$ , $R_L = 60 \Omega$
下 降 時 間	$t_f$	7	30	ns	2SK735 : $I_D = 5 \text{ A}$ , $R_L = 30 \Omega$

図14 スイッチング速度の比較

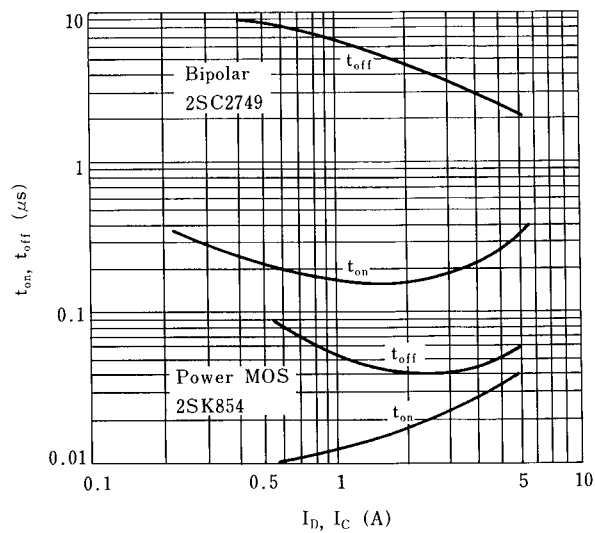
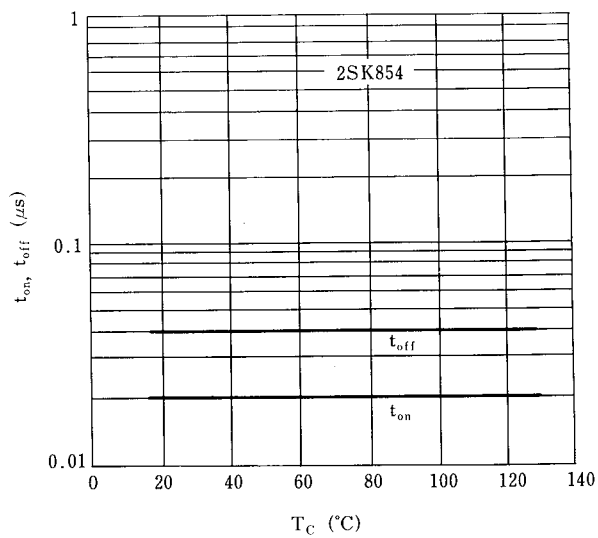
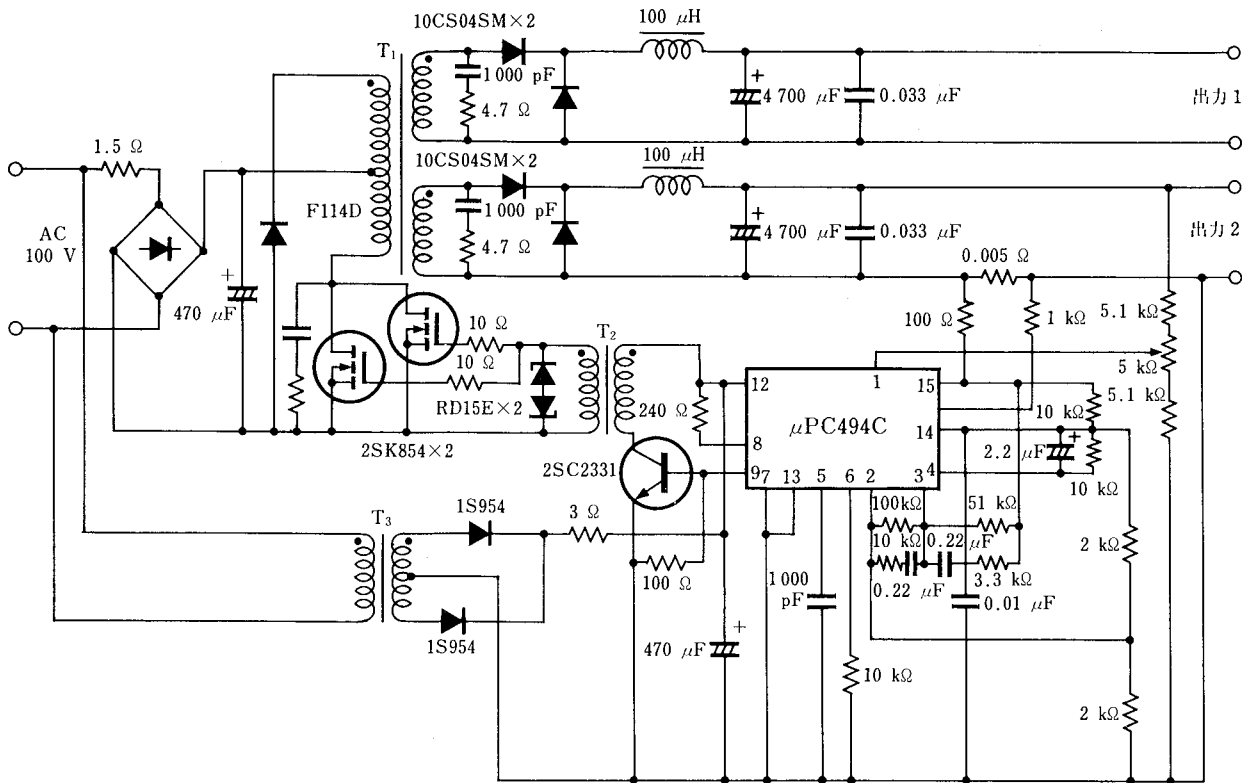


図15 スイッチング速度の温度特性



5. スイッチング電源への応用

図16 2SK854 を用いたセカンダリ方式の電源



(2SK854×2をバイポーラトランジスタ(2SC2751)に置き換えた場合)

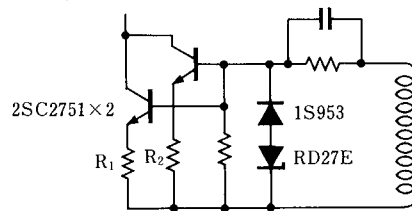


図16は、パワー-MOS FET 2SK854 を用いたセカンダリ方式の電源回路で、出力容量 100 W、スイッチング周波数 80 kHz を得ております。

図16のスイッチング電源回路において、パワー-MOS FET 2SK854 (450 V/5 A, MP-25) を用いた場合と、電流定格で1ランク上のバイポーラトランジスタ 2SC2751 (400 V/10 A, MP-80) に置き換えた場合の動作波形、素子の温度上昇を比較したものを写真1、および表3に示します。表3からわかるようにパワー-MOS FETは、バイポーラトランジスタと比べスイッチングスピードが1桁程度速いため、スイッチング損失が減少し全体の電力損失が低減できます。また、バイポーラトランジスタを図16のように並列接続で使用した場合は、エミッタにバラスト抵抗 ( $R_1$ ,  $R_2$ ) を接続し電流バランスをとりますが、パワー-MOS FETでは、オン抵抗が正の温度特性を有するため、電流抑制作用が起り電流バランスを保つので、バラスト抵抗が不要となり並列接続が容易にできます。

以上の特徴より、回路の高周波化、簡略化および小形化が可能となります。



表3 80kHz スイッチングレギュレータにおけるスイッチングタイムとケース温度上昇比較

品 名		2SC2751 (バイポーラトランジスタ)	2SK854 (パワー MOS FET)
パ ッ ケ ー ジ		MP-80	TO-220
ス イ ッ チ ン グ タ イ ム	$t_r$	0.26 $\mu s$	0.05 $\mu s$
	$t_f$	0.30 $\mu s$	0.08 $\mu s$
ケ ー ス 温 度 上 昇 $\Delta T_c$		56 $^{\circ}C$	21 $^{\circ}C$

写真1

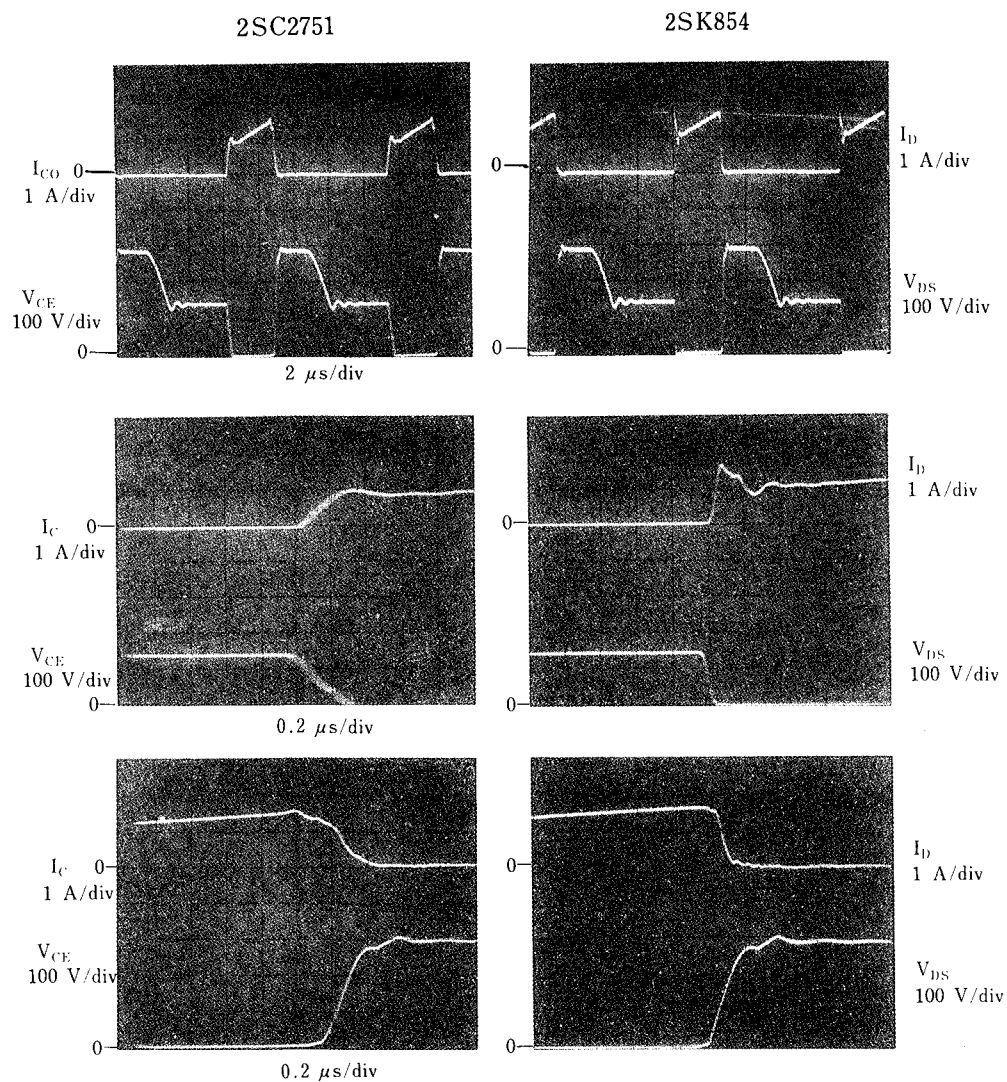


図17 2SK821を用いたプライマリ方式の電源

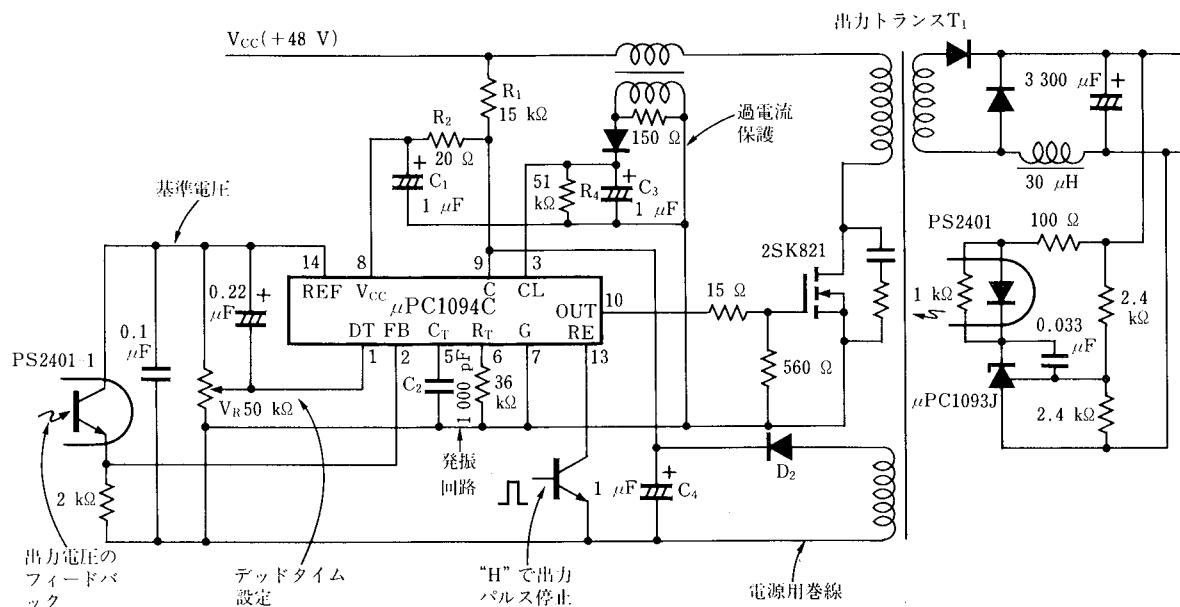


図17は、2SK821を用いたプライマリ方式の電源回路で、出力容量 100 W、スイッチング周波数は 200 kHz を得ております。スイッチングレギュレータの小形化、ローコスト化の動向を進展させるためにスイッチング周波数の向上は不可欠であり、今後は図17に示すような方式が主流になるものと思われます。その中でメインスイッチング素子は高速スイッチング動作が可能なパワー MOS FET が以下に示すような特徴を発揮し使用されるものと思われます。

- ① 電圧制御形素子であり、図17の方式のようにコントロール IC から直接駆動ができ、駆動回路の簡素化が図れ駆動電力が少なくて済みます。
- ② 多数キャリアデバイスであり、バイポーラトランジスタのように蓄積効果がなく、高速スイッチングが可能です。
- ③ オン抵抗が正の温度係数を有しており、2次降伏現象がなく、並列接続が容易にできます。

特に図2に示す電源のようにスイッチング周波数が 100 kHz を超えるものは、パワー MOS FET の独壇場といえます。

## 6. 使用上の注意

パワーMOS FETのオン抵抗は、耐圧が高いほど大きく（およそ耐圧の2乗に比例する）なります。このため耐圧は、オン抵抗が極力小さくなるような分布に設計されていますので、耐圧マージンは図5、図6の比較でわかるようにパワーMOS FETのほうが少なくなっています。バイポーラトランジスタでは $V_{CEX}$ が定格値のおよそ1.5倍程度まであるため高電圧が $V_{CEX}$ に達せず破壊をまぬがれるケースがあります。この点、パワーMOS FETは降伏電流の集中がなく、サステインエネルギー耐量が大きいとはいえ、降伏時の電力損失が容易に定格を越え破壊することがあるので十分注意する必要があります。

- 文書による当社の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。
- 本資料に記載された製品の使用もしくは本資料に記載の情報の使用に際して、当社は当社もしくは第三者の知的所有権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。上記使用に起因する第三者所有の権利にかかわる問題が発生した場合、当社はその責を負うものではありませんのでご了承ください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体製品はある確率で故障が発生します。当社半導体製品の故障により結果として、人身事故、火災事故、社会的な損害等を生じさせない冗長設計、延焼対策設計、誤動作防止設計等安全設計に十分ご注意願います。
- 当社は、当社製品の品質水準を「標準水準」、【特別水準】およびお客様に品質保証プログラムを指定して頂く「特定水準」に分類しております。また、各品質水準は以下に示す用途に製品が使われることを意図しておりますので、当社製品の品質水準をご確認の上ご使用願います。  
 標準水準：コンピュータ、OA機器、通信機器、計測機器、AV機器、家電、工作機械、パーソナル機器、産業用ロボット  
 特別水準：輸送機器（自動車、列車、船舶等）、交通用信号機器、防災/防犯装置、各種安全装置、生命維持を直接の目的としない医療機器  
 特定水準：航空機器、航空宇宙機器、海底中継機器、原子力制御システム、生命維持のための医療機器、生命維持のための装置またはシステム等  
 当社製品のデータ・シート/データ・ブック等の資料で、特に品質水準の表示がない場合は標準水準製品であることを表します。当社製品を上記の「標準水準」の用途以外でご使用をお考えのお客様は、必ず事前に当社販売窓口までご相談頂きますようお願い致します。
- この製品は耐放射線設計をしておりません。

M4 94.11

本製品は外国為替および外国貿易管理法の規定により戦略物資等（または役務）に該当しますので、日本国外に輸出する場合には、同法に基づき日本国政府の輸出許可が必要です。

- 文書による当社の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。
- この製品を使用したことにより、第三者の工業所有権等にかかわる問題が発生した場合、当社製品の構造製法に直接かかわるもの以外につきましては、当社はその責を負いませんのでご了承ください。

## NEC 日本電気株式会社

本 社 東京都港区芝五丁目33番1号(日本電気本社ビル) 〒108 東 京(03)454-1111

半 導 体 休 息 日 東京都港区芝五丁目29番11号(日本電気住生ビル) 〒108 東 京(03)456-6111

第一、第二 販売事業部

---

関 西 支 社 大阪市北区堂島浜一丁目2番6号(新大阪ビル) 〒530 大 阪(06)348-1461

半 導 体 販 売 部 大 阪(06)348-1466

---

中 部 支 社 名古屋市中区栄四丁目15番32号(日建住生ビル) 〒460 名 古 屋(052)262-3611

電 子 デ バ イ ス 販 売 部

北 海 道 支 社 札幌(011)231-0161

東 北 支 社 仙台(022)261-5511

郡 山 支 社 郡山(0249)23-5511

わ け 支 社 いわき(0246)21-5511

新 水 支 社 新潟(025)247-6101

土 浦 支 社 土浦(0292)26-1717

神 奈 川 支 社 横浜(045)324-5511

群 馬 支 社 高崎(0273)26-1255

太 田 支 社 太田(0276)46-4011

宇 都 宮 支 社 宇都宮(0286)21-2281

長 野 支 社 長野(0262)35-1444

上 野 支 社 上野(0263)35-1666

松 本 支 社 松本(0266)53-5350

諏 訪 支 社 諏訪(0552)24-4141

甲 府 支 社 甲府

沖 立 支 社 札幌(011)231-0161

繩 川 支 社 仙台(022)261-5511

支 社 郡山(0249)23-5511

支 社 新潟(025)247-6101

支 社 土浦(0292)26-1717

支 社 横浜(045)324-5511

支 社 高崎(0273)26-1255

支 社 太田(0276)46-4011

支 社 宇都宮(0286)21-2281

支 社 長野(0262)35-1444

支 社 松本(0263)35-1666

支 社 諏訪(0266)53-5350

支 社 甲府(0552)24-4141

支 社 北九州(093)541-2887

支 社 那覇(0988)66-5611

支 社 静葉(0425)26-0911

支 社 静葉(0472)27-5441

支 社 静葉(0542)55-2211

支 社 静葉(0534)52-2711

支 社 静葉(0762)23-1621

支 社 静葉(0764)31-8461

支 社 静葉(075)221-8511

支 社 静葉(078)332-3311

支 社 静葉(082)247-4111

支 社 静葉(0862)25-4455

支 社 静葉(0878)22-4141

支 社 静葉(0899)45-4111

支 社 静葉(092)271-7700

支 社 静葉(093)541-2887

(技術お問い合わせ先)

半導体応用技術本部	川崎市幸区塚越三丁目484番地(川崎技術センター)	〒210 川 崎(044)533-1111
半導体市場開発本部第一応用技術部	東京都港区芝五丁目29番11号(日本電気住生ビル)	〒108 東 京(03)456-6111
半導体市場開発本部第二応用技術部	大阪市北区堂島浜一丁目2番6号(新大阪ビル)	〒530 大 阪(06)348-1477