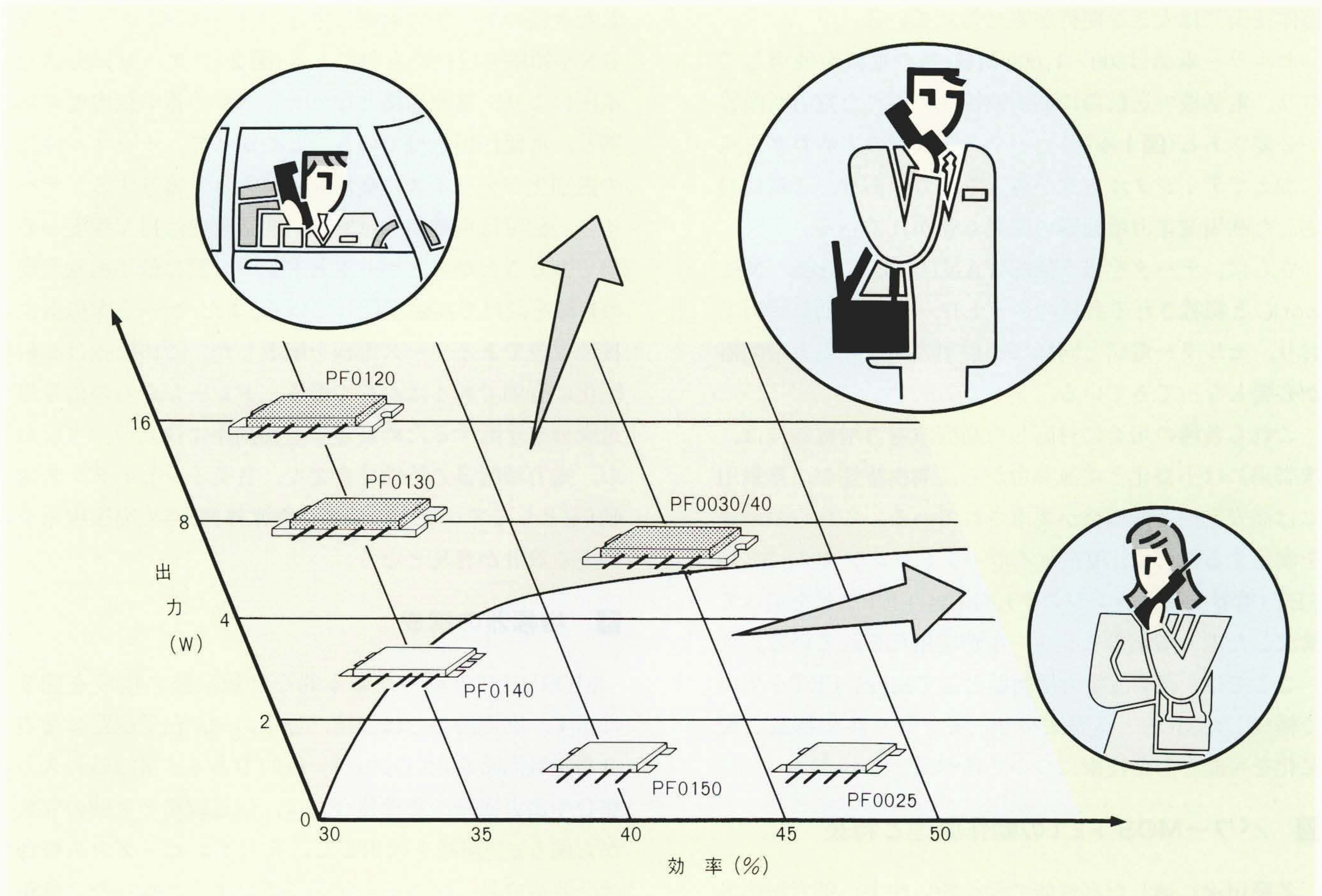


高周波電力増幅用MOS・パワーモジュール

MOS Radio-Frequency Power Modules

岡部健明* Takeaki Okabe

小林邦雄** Kunio Kobayashi



MOS・高周波パワーモジュール 自動車電話、携帯電話など移動通信機器無線部に使われ、高周波電力増幅を行う。携帯用では効率が、車載用では出力が重要特性である。

日立製作所では、セルラー電話機の送信部に用いる高周波電力増幅器として、MOS FET(電界効果トランジスタ)を採用した高周波パワーモジュールを製品化している。さらに欧州デジタルシステム対応品を開発してラインアップの充実化を図った。

欧州デジタルシステムでは、高出力電力および出力電力の高速制御特性、出力信号の低ひずみ特性などが鍵(かぎ)となる。MOS FETの高周波特性の改善と高出力化の実現、および増幅器の制御回路の改

良により、デジタル対応の高周波パワーモジュールを製品化した。これらの製品は大出力にもかかわらず効率が35~40%と高く、負荷変動に対する優れた安定性を兼ね備えているため、セットでの回路構成が簡単となる。

さらに、データ通信用として出力1.4 Wの製品を小型パッケージに搭載し、かつ溶融はんだのリフロー実装を可能とし、セットの高密度実装に寄与した。

* 日立製作所 半導体事業部 工学博士 ** 日立製作所 半導体事業部

1 はじめに

社会、経済の発展に伴って、移動通信システムの整備が精力的に進められている。特に、自動車電話、携帯電話などセルラー電話の普及は著しく、これらを支える半導体技術には大きな期待が寄せられている。

セルラー電話は800～1,000 MHz帯の電波を使用しており、電話機の送信部に高周波特性の優れた電力増幅器が必要である(図1参照)。その上、現行のアナログ方式に加えてデジタル方式が導入されつつあり、これに対応した高周波電力増幅器の開発も急がれている。

さらに、データを扱う無線WAN(Wide Area Network)と総称される各種のネットワークも稼動し始めており、セルラー電話と同様に送信用の高周波電力増幅器が必要となってきた。

これら各種の用途に対応した高周波電力増幅器には、携帯用には小型化と電池寿命から高効率特性が、車載用には高安定性と低価格が要求されている。これらの条件を満足するために、現在バイポーラトランジスタ、MOS FET(電界効果トランジスタ)、GaAs FETなどを用いて構成した電力増幅器モジュールが実用化されている。

ここでは、高周波電力増幅器としてMOS FETを用いて構成したMOS・高周波パワーモジュールの特長と製品化を可能とした技術について述べる。

2 パワーMOS FETの動作原理と特長

各種用途に適した高性能でかつ使いやすい電力増幅器の実現には、使用デバイスの性能が大きく左右する。MOS FETは熱的安定性、電力制御が容易などの利点か

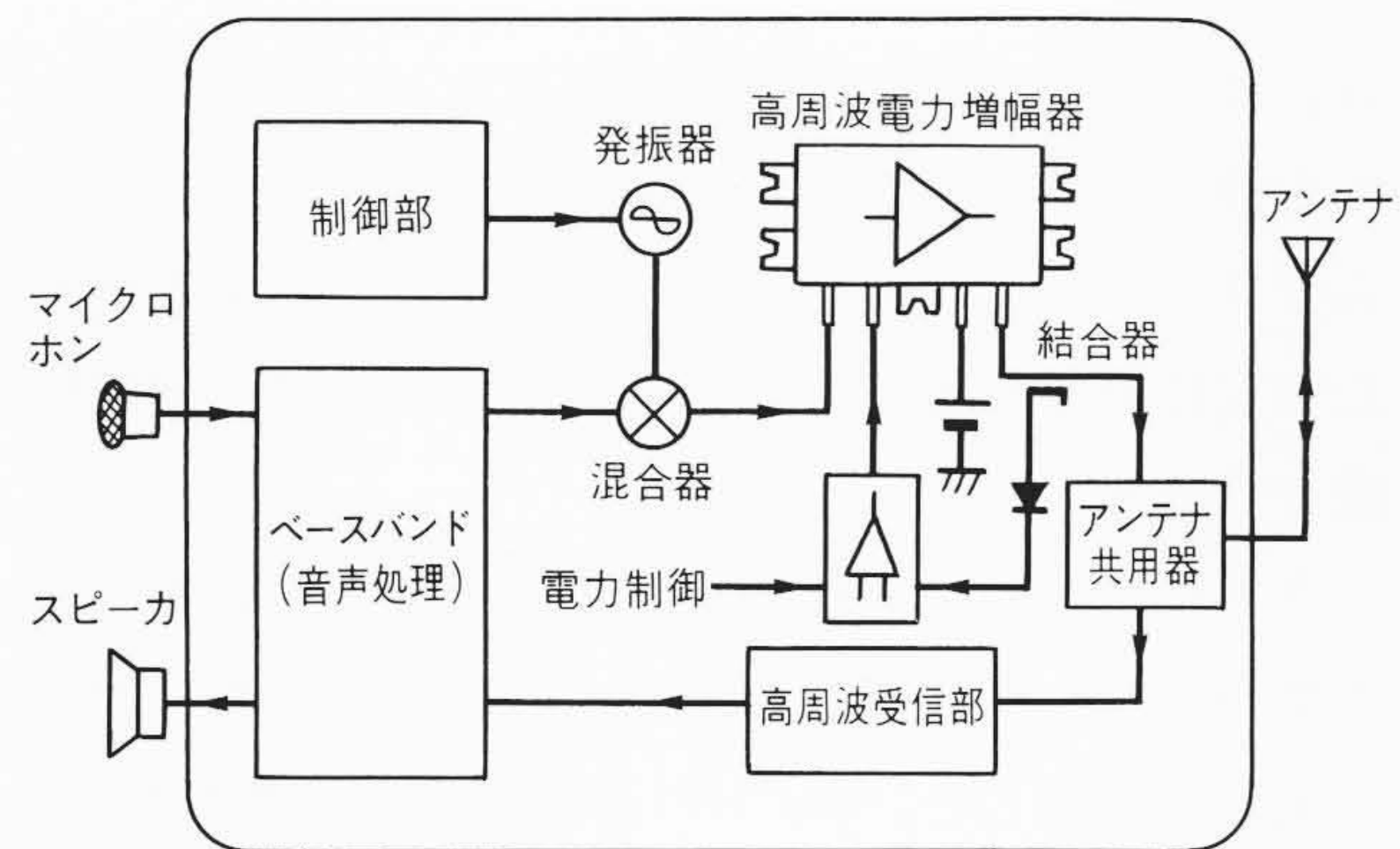


図1 携帯電話のブロック図 入力音声信号は混合器で、発振器からの高周波信号に変換され、電力増幅器、アンテナ共用器を通してアンテナから電波として放射される。送信電力は結合器によってモニタされ、電力増幅器への制御信号によって一定に保たれている。

らパワーデバイスとして用いられている。日立製作所は高周波で、電力増幅デバイスとしての性能を得るために次に述べるくふうをし、高周波パワーMOSとして実用化した^{2),3)}。

パワーMOS FETは、薄いシリコン酸化膜の上に形成した金属のゲートの両側に電子のソースとドレインとなるN型領域を設けたものである(図2)。ゲートに加えた電圧により、電流通路となるチャンネルの電気伝導度を制御し、増幅作用を得ている。したがって、チャンネル寸法の微細化がデバイスの高性能化に大きく寄与する。デバイスの耐圧は車載用では36 V、携帯用では14 V程度が必要であることから、ゲートとドレイン間に低不純物濃度のN層を設けて高耐圧化している。また、ゲート電極上に接地電位であるソース電極を配置した。この構造は高耐圧化に有効であるばかりでなく、ドレインからの信号帰還成分を遮断するため安定な増幅動作に役立つ。すなわち、電力増幅器の特性で重要な、負荷インピーダンス変動(主としてアンテナの破損や異常事態)時の発振現象を抑える設計が容易となる。

3 増幅器の構成

MOS FETを用いた基本的な増幅回路の構成を図3に示す。高周波帯では抵抗、容量のほか伝送線路による分布定数回路を用いるのが一般的である。増幅器の入力整合や出力回路の負荷整合には、伝送線路と2個の容量から成る π 型回路を採用した。入力インピーダンス整合は、並列容量の値とその接続位置によって行った。負荷条件の設定も同様であるが、必要な出力電力と利得の値によって回路定数は異なる。負荷条件設定(出力同調)時の入力電力依存性を図4に示す。低入力電力で同調した

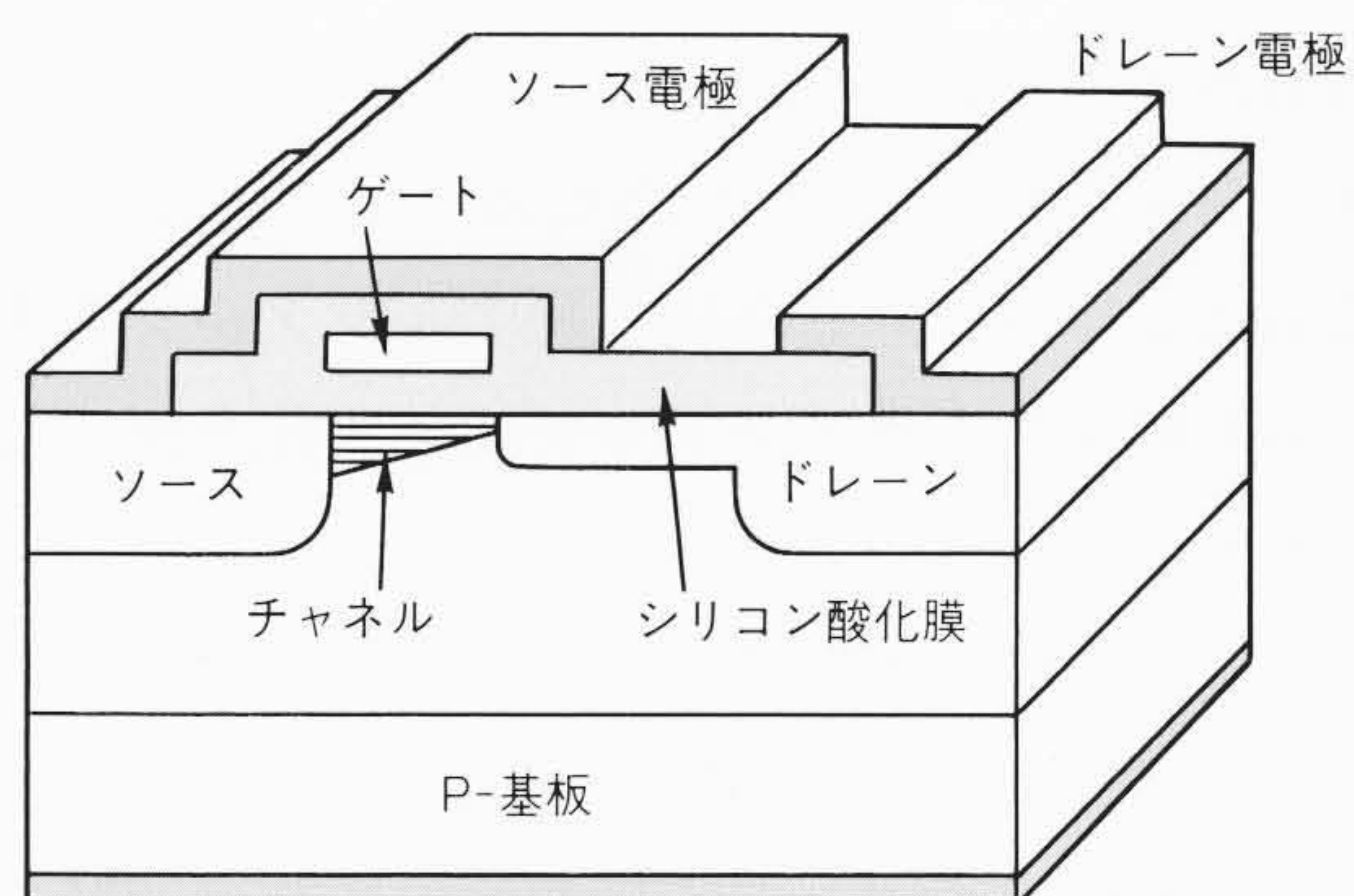


図2 パワーMOS FETの断面模型 ソース、ドレイン間に形成されたチャンネルを通して流れる電流を、ゲートに加えた電圧で制御し、増幅作用を得る。チャンネル寸法が短いほうが高周波特性がよい。

場合は高利得が、高入力電力で同調した場合は高出力がそれぞれ得られることがわかる。

この基本ブロックを3段接続してモジュール化した(図5)。

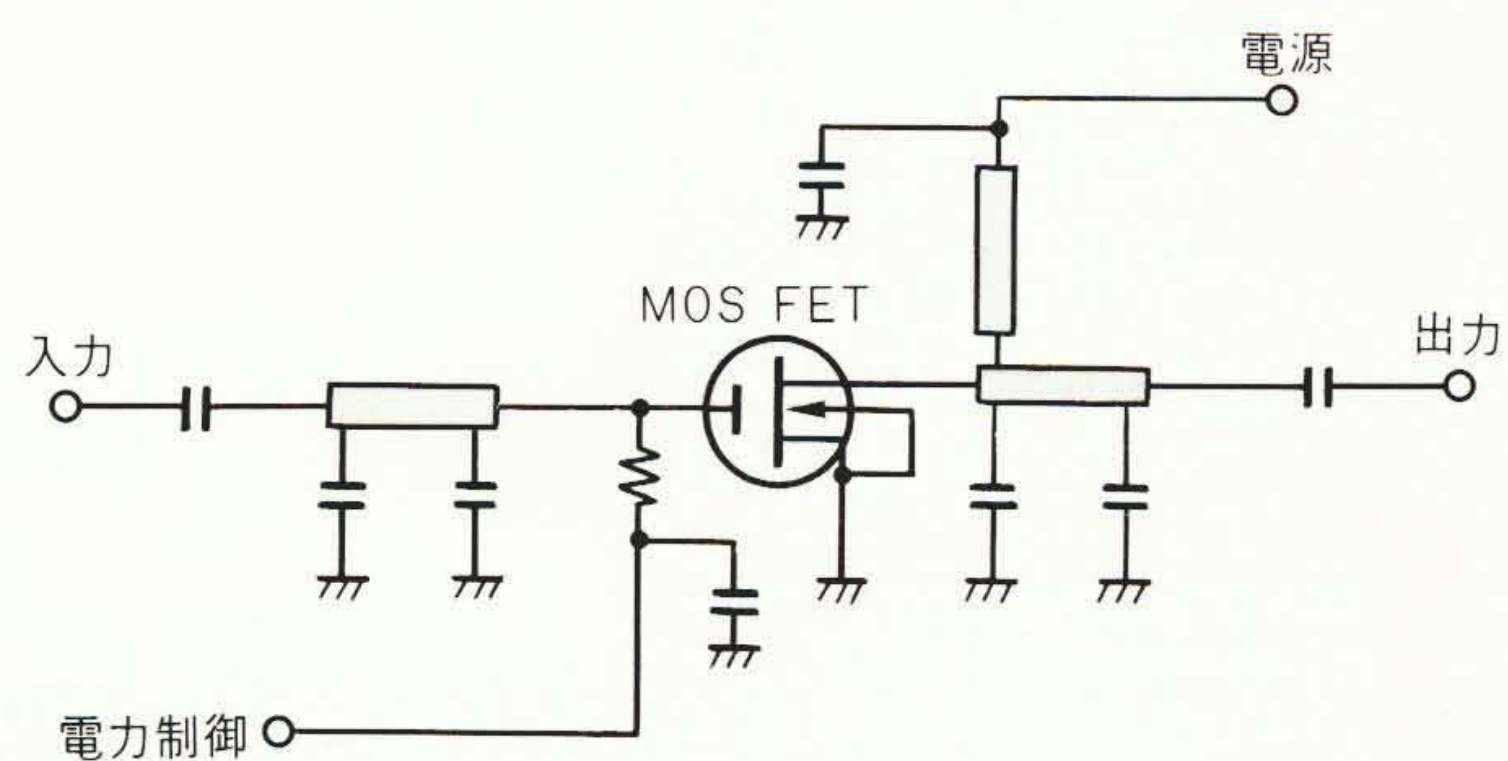
パッケージおよび組立後の基板パターンを図6に示す。パッケージは、高出力品には放熱特性に優れた銅フランジ付きとし、携帯用は金属カバーと表面実装外形を採用して、小型化の要求に対処した。同図に示した基板パターンは携帯用であり、微細線幅を採用して高密度化を図っている。小型パッケージは厚さ4 mm以下、体積1 cc以下とし、セットの高密度実装に適した設計となっている。

これらのパワーモジュールにはMOS FETの特長がそのまま生かされている。セット設計上での大きな利点と考えられる特長は次のとおりである。

- (1) 利得大：1～4 mWの入力電力で動作
- (2) 周辺回路を含めた電力増幅の構成が簡単
 - (a) 利得制御が数ボルトの電圧で可能
 - (b) GaAs FETで必要な負の電圧は不要
 - (c) 制御電圧0.5 V以下で主電流が遮断
 - (d) 電源、制御端子が各段とも共通化可能
- (3) 破壊耐量大
- (4) 熱的に安定

日立製作所は、これらの特長を持つMOS・高周波パワーモジュールを製品化し、新たにデジタル用の製品を加えて、ラインアップの充実を図った。以下、これらの製品について述べる。

アナログセルラー用に対応した製品を表1に示す。車載用モジュールでは、出力負荷の開放、短絡に相当する無限大の定在波比近くまで安定であり、使いやすくなっている。携帯用では金属カバーと表面実装形を採用しており、高密度実装に適した製品となっている。



注：□ (セラミック基板上の伝送線路)

図3 基本増幅回路 入力および出力同調は、伝送線路と容量から成る π 型回路構成とした。電力制御電圧は抵抗を通してMOS FETのゲートに供給している。

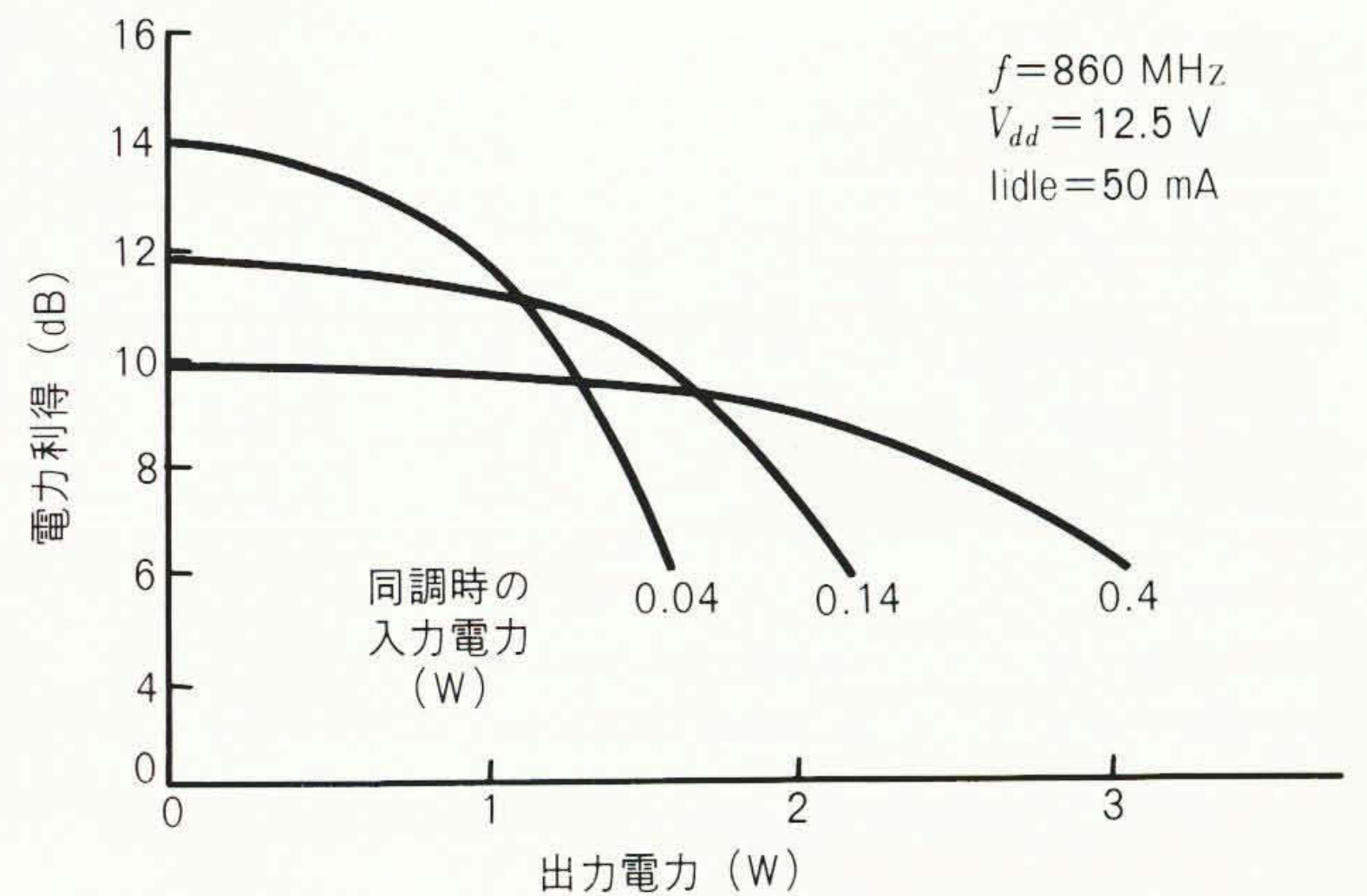


図4 電力利得対出力電力の同調時の入力電力依存性 回路の調整により、高利得特性または高出力特性を持つように構成できる。前者は初段に、後者は出力段の回路に適している。

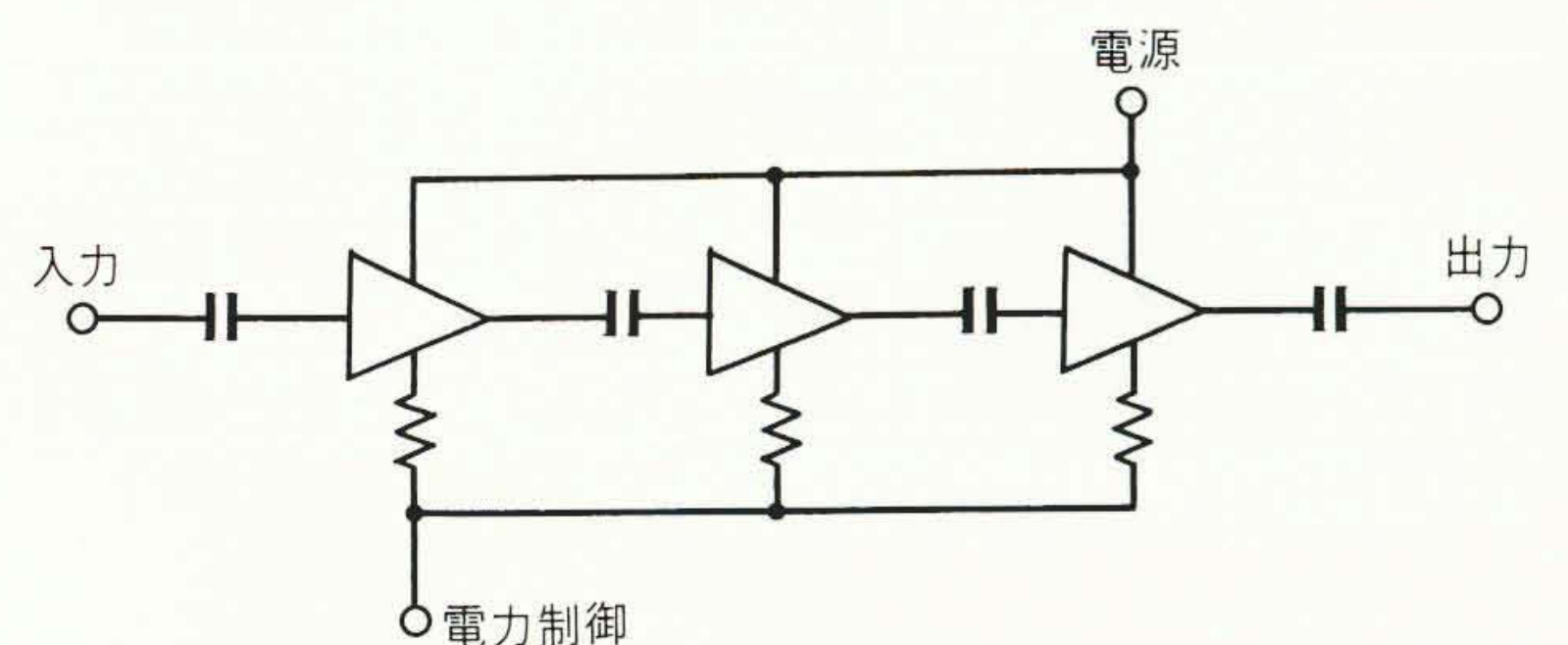


図5 高周波パワーモジュールのブロック図 電源、電力制御端子は3段とも共通化しているため、回路の構成が簡単化される。

型 名	寸 法 (mm) (幅×奥行き×高さ)
B2, B3	60.5×12.7×5
C	45×12×6.5
G	34×11.4×4
E	22×12×3.7

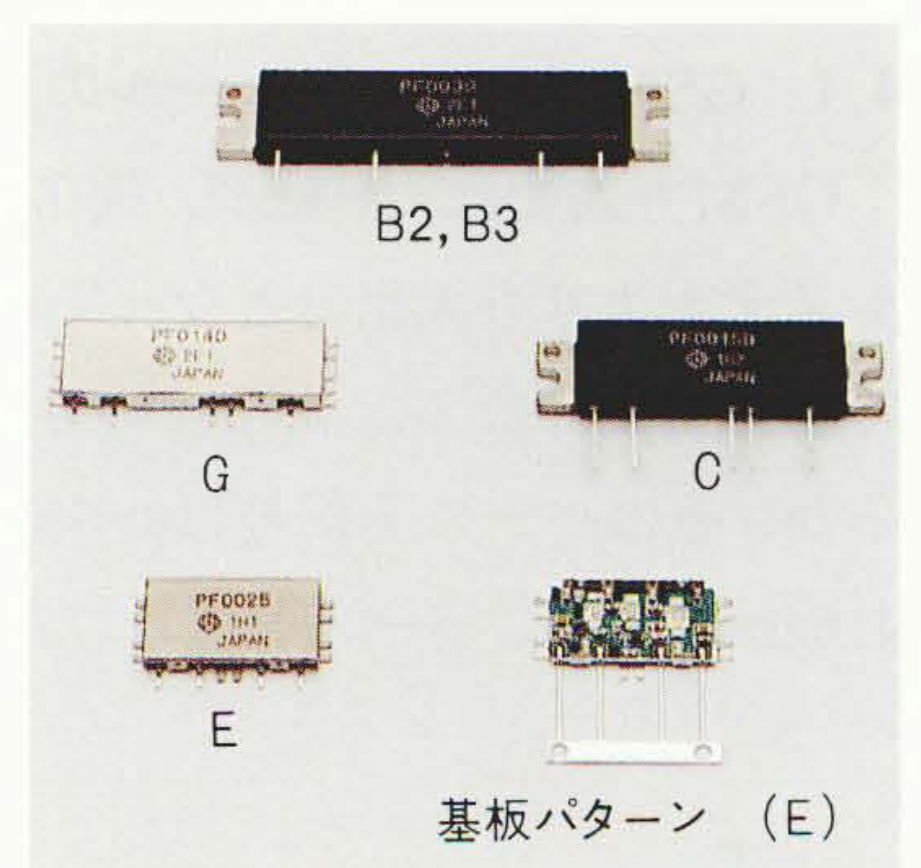


図6 パッケージ外形とモジュール基板パターン 車載用の高出力品は銅フランジによって放熱効果を高め(B2, B3), 携帯用には小型化のため、金属カバーと表面実装外形を採用している(E, G)。また、携帯用でも高出力品には銅フランジが使われている(C)。

GSM(欧州デジタルセルラー)用およびデータ通信用の製品を表2に示す。GSM用ではセット出力規格がクラス2からクラス5の4品種を製品化した。データ通信用は、セルラーネットワークを利用するものについてはセルラー電話用が適用できるので、セルラー以外の周波数を利用する専用品としてPF1010Aを製品化した。この製品

表1 アナログセルラー用パワーモジュール製品 車載用, 携帯用とも各システムに対応した製品がある。

システム		AMPS	NMT900	E-TACS	パッケージ
周 波 数 (MHz)		824～849	890～915	872～905	
用 途	車載用	PF0030	PF0031	PF0032	B 2
		PF0040	—	PF0042	B 3
	携帯用	PF0025	PF0026	PF0027	E

注：略語説明
AMPS(Advanced Mobile Phone System, 北米中心)
NMT(Nordic Mobile Telephone, 北欧三国中心)
E-TACS(Extended Total Access Communication System, 英国中心)

表2 GSM(デジタルセルラー)およびデータ通信用パワーモジュール製品 GSM用では, クラス2からクラス5に対応した特長のある製品がそろえられている。

システム		製品名	周波数 (MHz)	定格出力(W)・ 電源電圧(V)	パッケ ージ
GSM	クラス 2	PF0120	890～915	12・12.5	B 2
	クラス 3	PF0130		10・12.5	B 2
	クラス 4	PF0140		3.2・6.0	G
	クラス 5	PF0150		1.2・6.0	E
データ通信		PF1010A	806～824	1.2・6.0	E

注：略語説明 GSM(Group Special Mobile)

の特長は実装にはんだリフローの適用を可能としたことであり, 実装の高密度化と作業効率の向上に寄与できる。

4 デジタルセルラー用パワーモジュールの特性

4.1 GSMパワーモジュールの要求性能

GSM方式では, 車載型, 携帯型とも, 従来のアナログシステムよりも大出力となっているので, 大出力の電力増幅器が必要となる。また, 時分割多重方式を採用しているが, そのバースト信号はパルス幅540μs, 繰り返し周期4.6msである。バースト信号の立上り, 立下り時に発生す

表3 GSM用パワーモジュールの電気的特性(PF0120) 出力電力は13.5W(最小)と, クラス2の仕様を十分満足する。

項目	単位	最小	標準	最大	測定条件
ドレイン遮断電流	μA	—	—	500	$V_{dd}=17V, V_{apc}=0V$
総合効率	%	30	38	—	標準条件
第二次高周波ひずみ	dB	—	-45	-35	
第三次高周波ひずみ	dB	—	-55	-45	
入力電圧定在波比	—	—	1.5	3	
出力電力	W	13.5	—	—	$V_{apc}=7.5V$
	W	7.5	—	—	$V_{dd}=10.8V, V_{apc}=7.5V, T_c=75^{\circ}C$
アイソレーション	dBm	—	-50	-40	$V_{apc}=0.5V$
スイッチング時間	μs	—	1.5	2.5	標準条件
負荷変動試験	—	異常発振のないこと			$R_g=50\Omega, t=20s, VSWR(出力)=20:1, 全位相$

注：標準条件 $V_{dd}=12.5V, P_{in}=4mW, P_o=12W(V_{apc}$ によって制御), $T_c=25^{\circ}C, RL=Rg=50\Omega$

る不要なスパイク雑音を抑制するためには出力電力の高速制御が必要なので, 2~3μs以下のスイッチング特性が要求されている。MOS FETではゲートバイアス電圧で出力電力を制御できるため, ゲートバイアス回路の時定数を小さく設定することによって高速制御を実現した。

4.2 車載用

車載用は実用性を考えクラス2対応の電力増幅器(PF0120)をモジュール化した(表3)。電源電圧12.5V, 入力電力4mWに対し規格出力は12W, 最大出力13.5Wとなっている。パッケージは放熱のよい銅フランジ付きを採用し, ヒートシンクに直接取り付ける構造となっている。入力電力4mW一定時の出力電力, および変換効率(以下, 効率と略す。)の制御電圧 V_{apc} 依存性を図7に示す。出力電力は制御電圧に従って増加する。効率も制御電圧とともに高くなるが, 最大値を示したあと緩やか

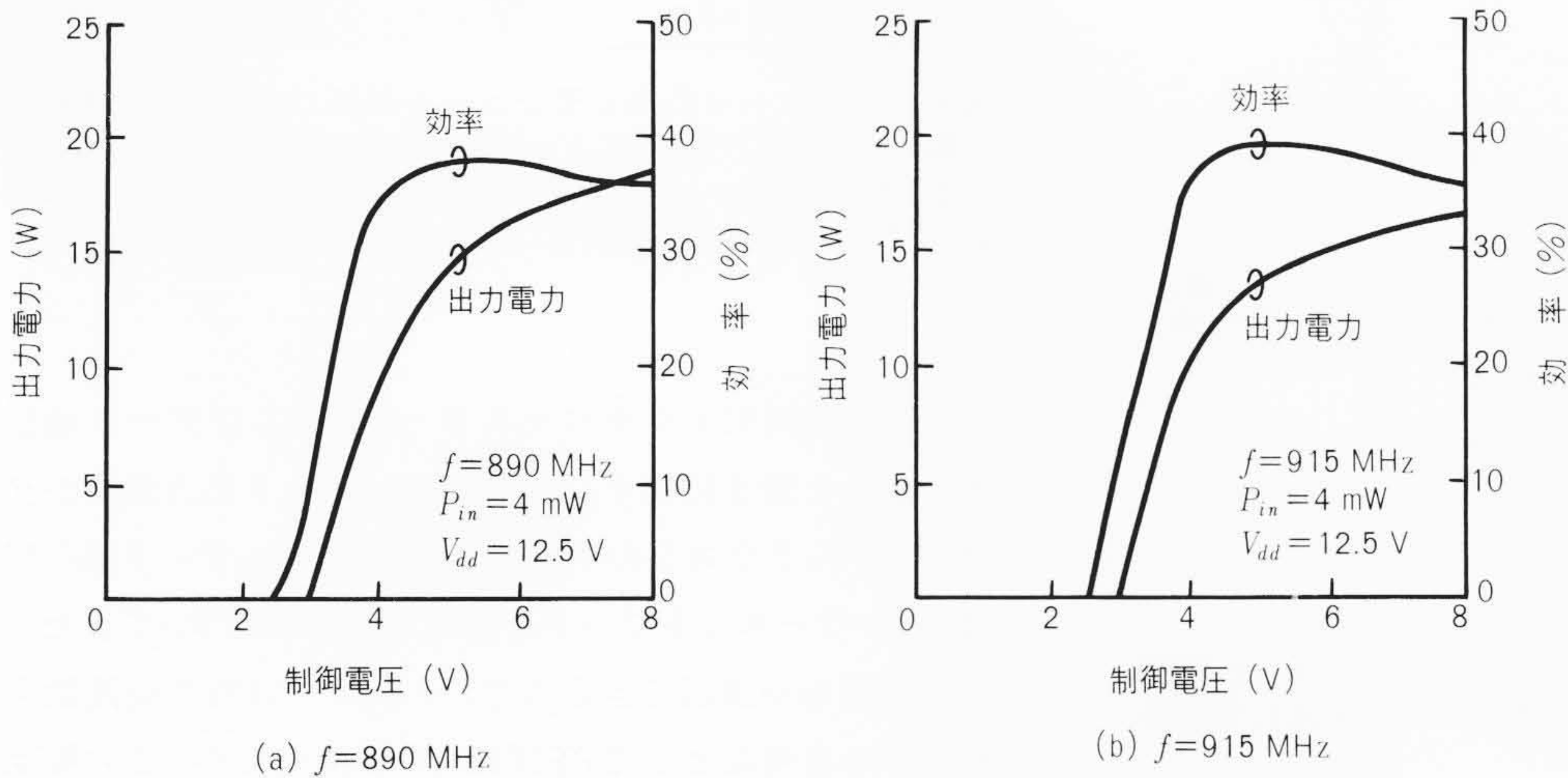


図7 出力電力, 効率の制御電圧依存性 (PF0120) 制御電圧の増加とともに出力電力は増加するが, 効率は増加したあと緩やかに減少する。通常は効率最大値の左側で動作させる。最大効率は40%近くに達する。

に減少する。これは、増幅器の動作点に関連し、制御電圧を大きくすると直流成分が増加し、その結果効率が低下するからである。大出力電力での効率低下はMOS FETでの発熱を増加させ、素子の温度上昇を招く。特に、大出力で動作させる場合は放熱設計に注意を要するが、GSMではデューティ $\frac{1}{8}$ 動作なので、従来のアナログシステムよりは熱の影響は少ない。

デジタルシステムでは、ひずみ特性に起因する有害電波の広がりを少なくして隣接チャネルとの干渉を防止しなければならない。GSMで採用しているGMSK (Gaussian filtered Minimum Shift Keying) 変調波に対する出力のスペクトラムを図8に示す。変調波をパワーモジュールで増幅し、送信帯域通過フィルタを通したあ

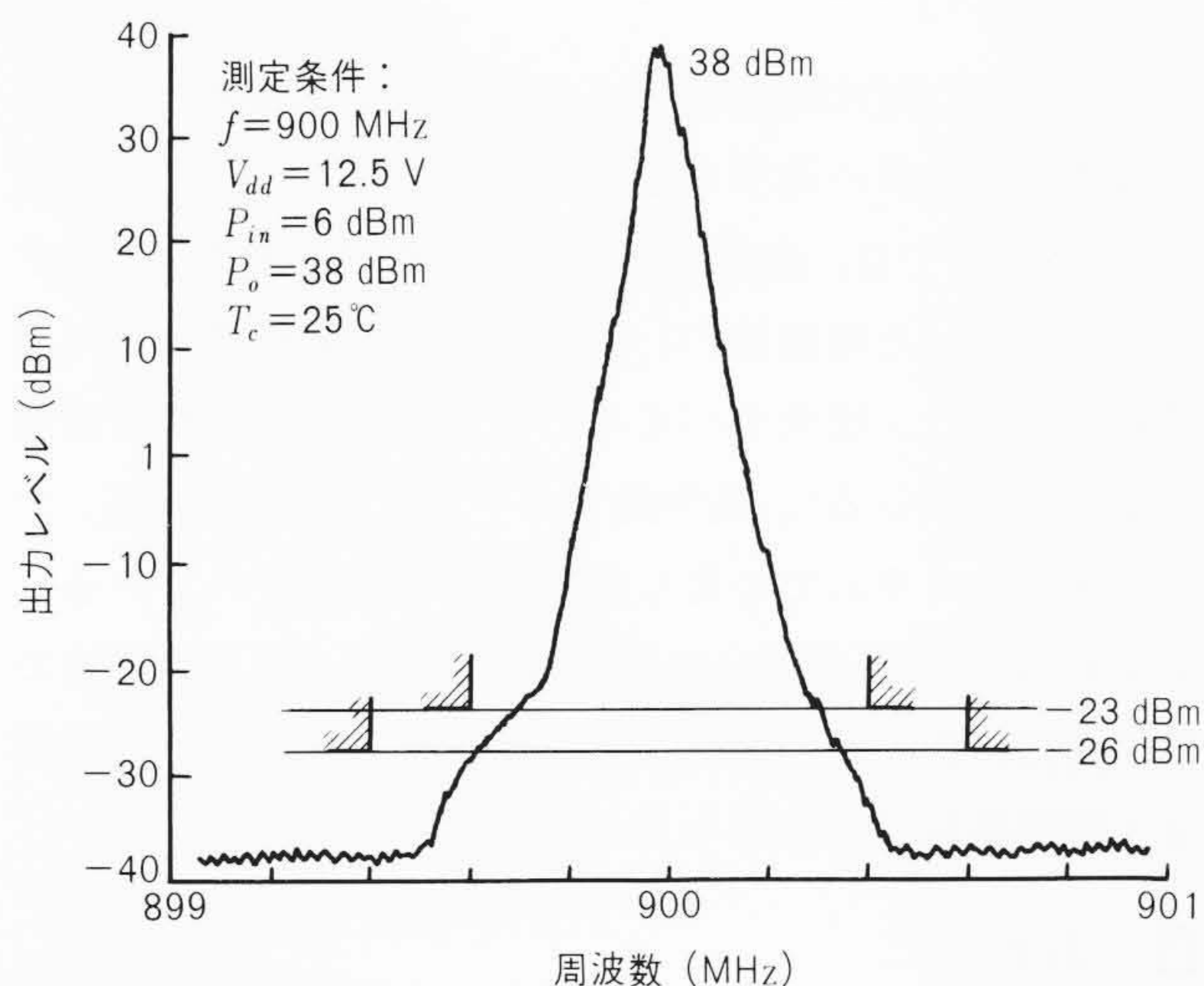


図8 GMSK (Gaussian filtered Minimum Shift Keying) 変調波の周波数スペクトラム サイドバンド(400 kHz離調)の電力がシステム仕様である-23 dBm以下に抑えられている。

と周波数スペクトラムを測定した。同図から、400 kHzおよび600 kHz離調点での電力が、おのおの-23 dBm、-26 dBm以下とシステム仕様を明らかに満足していることがわかる。

4.3 携帯用

携帯用モジュール(PF0140)の電気的特性を表4に示す。セット出力2 Wに対し、このモジュールでは4.2 W(標準), 3.6 W(最小)の出力を、総合効率では最低30%を保証している。出力および効率の制御電圧依存性を図9に示す。出力は制御電圧とともに増加するが、効率の最大値付近では3.6~4.2 W程度となっている。ただし、これらの測定は300 ms以下の時間で行い、デバイスの温度上昇を低く抑えた。このデバイスはデューティ $\frac{1}{8}$ で使用するGSM用に設計されているため、直流動作では温度上昇が大きくなり、デバイスの破壊を引き起こすおそれがある。

表4 GSMパワーモジュールの電気的特性(PF0140) 出力電力は3.6 W(最小)と、クラス4の仕様を十分満足する。

項目	単位	最小	標準	最大	測定条件
ドレーン遮断電流	μA	—	—	100	$V_{dd}=12\text{ V}$, $V_{apc}=0\text{ V}$
総合効率	%	30	35	—	標準条件
第二次高周波ひずみ	dB	—	-45	-30	
第三次高周波ひずみ	dB	—	-45	-30	
入力電圧定在波比	—	—	2	3	
出力電力	W	3.6	4.2	—	$V_{apc}=4\text{ V}$
	W	2.0	2.4	—	$V_{dd}=5.4\text{ V}$, $V_{apc}=4\text{ V}$, $T_c=80^\circ\text{C}$
アイソレーション	dBm	—	-45	-40	$V_{apc}=0.5\text{ V}$
スイッチング時間	μs	—	1.2	2	標準条件
負荷変動試験	—	異常発振のないこと			$V_{dd}=7.5\text{ V}$, $P_{out}\leq 3.2\text{ W}$, $R_g=50\ \Omega$, $t=20\text{ s}$, VSWR(出力)=20:1, 全位相

注：標準条件 $V_{dd}=6\text{ V}$, $P_{in}=2\text{ mW}$, $P_o=3.2\text{ W}$ (V_{apc} によって制御), $T_c=25^\circ\text{C}$, $RL=R_g=50\ \Omega$

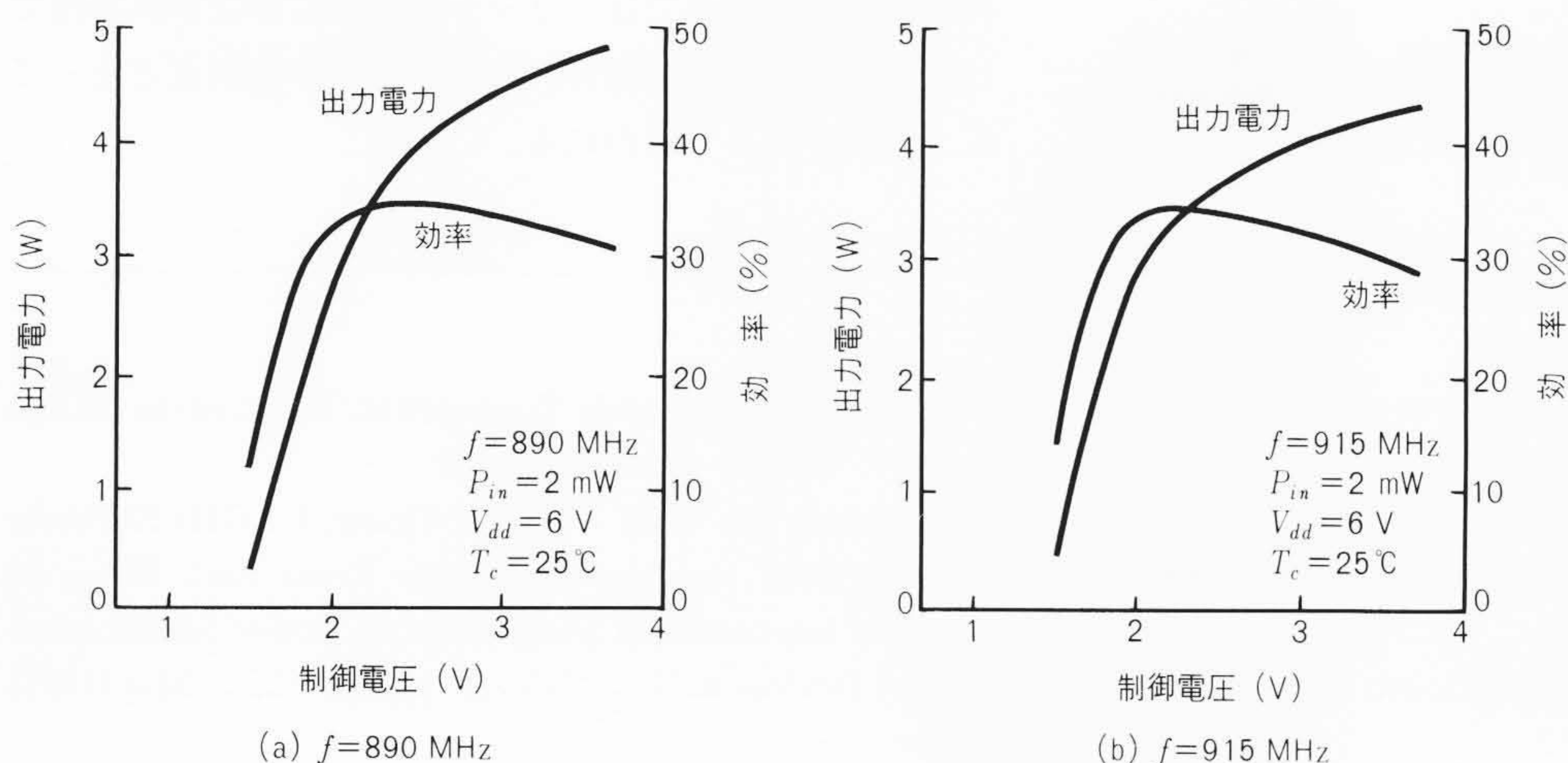


図9 出力電力、効率の制御電圧依存性(PF0140) 制御電圧の増加とともに出力も増加し、最大効率時に約3.6 Wが得られている。

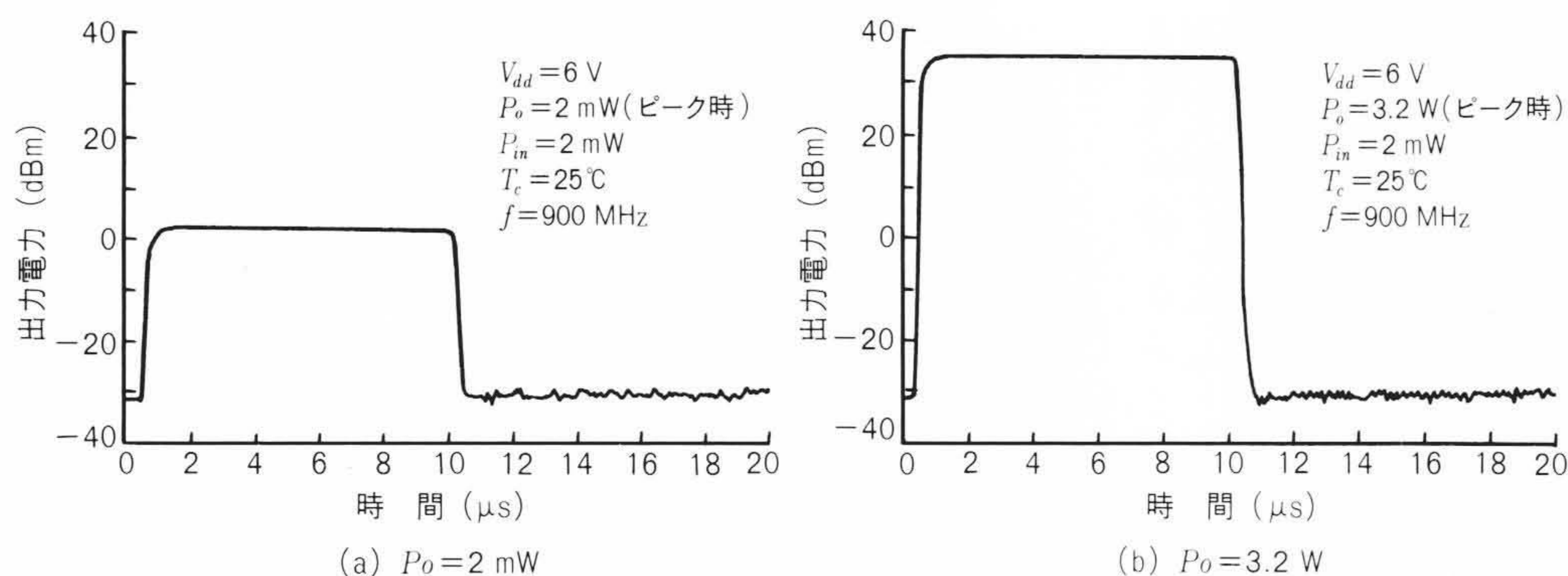


図10 出力電力の制御電圧応答波形(PF0140) オン, オフ時間とも遅延時間を含んで1.5 μs以下と高速応答性を示している。

あるので測定には注意を要する。

制御電圧波形に対する高周波出力の検波波形の応答特性を図10に示す。出力 2 mWと3.2 Wの場合について測定した。両者ともオンの時間は0.4~0.6 μsの遅延時間を含んで1.5 μs以下、オフ時間は0.9~1.2 μs以下である。これは、ゲートバイアス回路の時定数を小さくすることで実現した。

出力電力のケース温度依存性を図11に示す。同図では

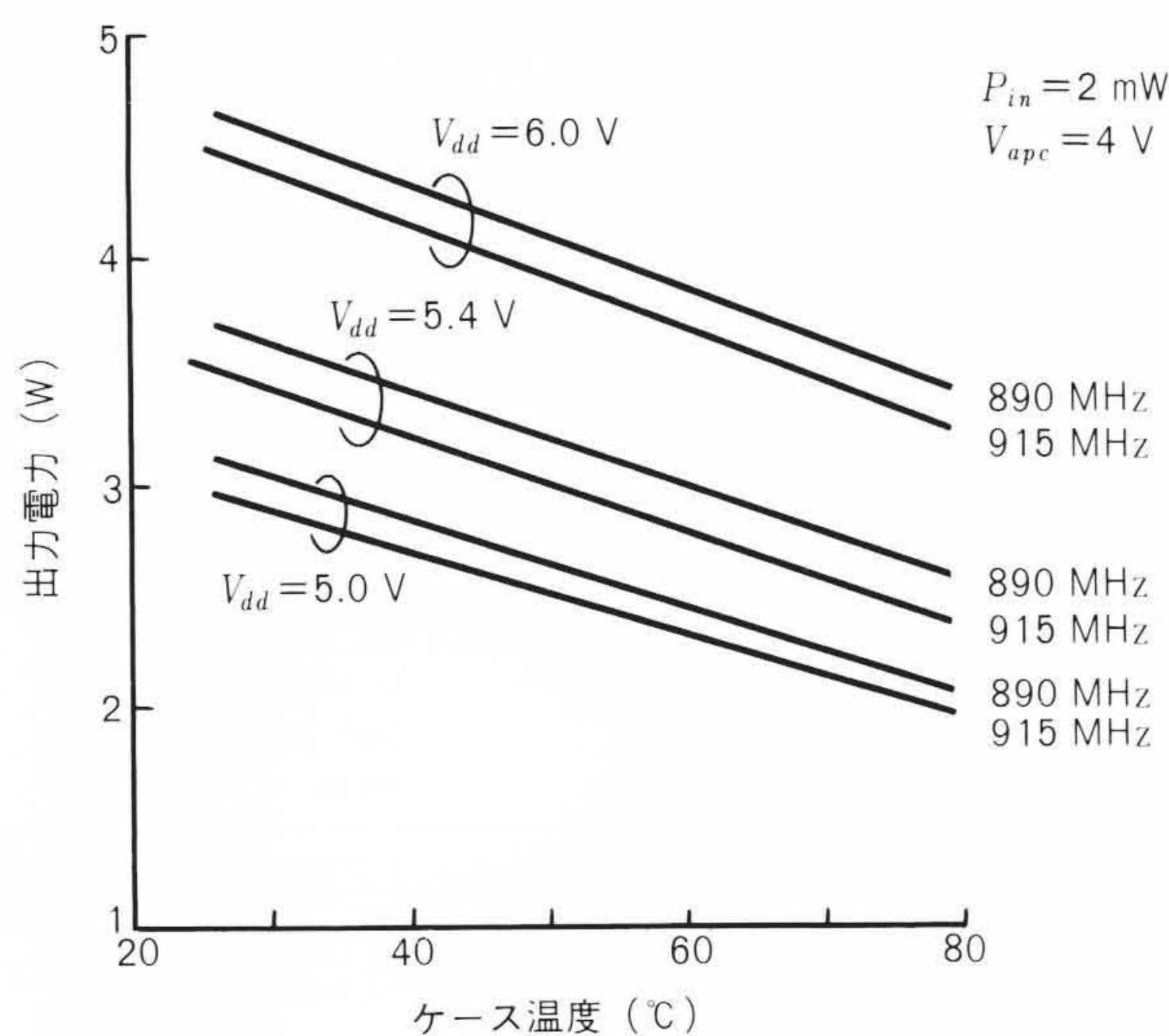


図11 出力電力のケース温度依存性(PF0140) 電源電圧の低下とケース温度の上昇によって出力電力は低下するが、最悪条件(5.4 V, 80 °C)でも2.2 W以上の出力が得られる。

電源電圧6.0 V, 5.4 Vおよび5.0 V時の出力をプロットしてある。電源電圧5.4 V以上では、 $T_c = 80^\circ\text{C}$ でも余裕を持って出力 2 Wが得られることがわかる。

5 今後の開発

パワーMOSの性能は主として加工寸法に依存する。これは半導体技術の進歩に追随している。チャネル寸法0.8 μmの試作品では、遮断周波数 5 GHzが得られた。このデバイスを用いた増幅器の1.5 GHzでの変換利得は55%が得られており、従来デバイスの42%に比べて大幅な改善が認められている⁴⁾。高性能デバイスは、低電圧特性、デジタルシステムで必要な線形特性も改善されている。すなわち、パワーMOSの高性能化に伴い、電力増幅器の効率改善、低電圧動作、デジタルシステム対応の高性能・線形増幅器の実現などが期待される。

6 おわりに

以上述べたようにMOSパワーモジュールは、周辺部品の削減、周辺回路の簡単化など、セットの低コスト化に非常に有効である。携帯用ではGaAs FETを用いた電力増幅器よりも効率が若干低い、セット全体としてのコスト・性能比の点ではメリットがある。デジタル用では高出力特性および制御の高速性が大きな利点となって広く使用されると思われる。

参考文献

- 1) 日立データシート集：高周波パワーモジュール, ADJ-210-003(H) (1992-6)
- 2) 勝枝, 外：UHF帯大電力MOS FET, 電子情報通信学会論文誌, C-II, Vol. J72-C-II, No.12, 1074~1081 (1989-12)
- 3) Ito H., et al.: Extremely High Efficient UHF Power

MOSFET for Handy Transmitter, Proc. of the IEDM, 4.7, pp.95~98, Dec. (1983)

- 4) Yoshida I., et al.: High Efficient 1.5 GHz Si Power MOSFET for Digital Cellular Front End, Proc. of 1992 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, Tokyo, pp.156~157, May (1991)