

低消費電力を目指した 高周波フロントエンド用個別半導体

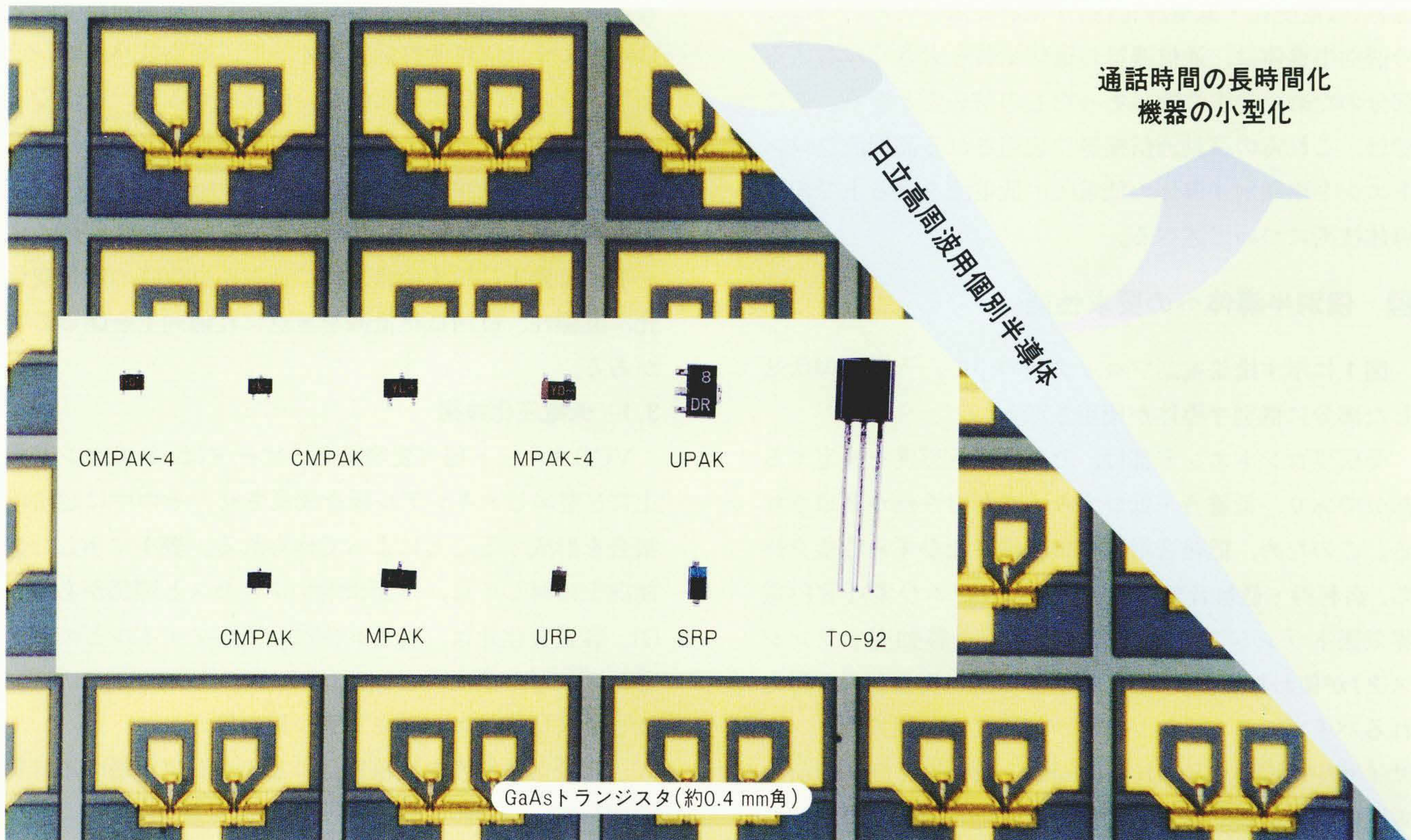
Discrete Semiconductors for High-Frequency
Front End Challenging to Lower Power Consumption

増田 章* Akira Masuda

工藤純久* Sumihisa Kudô

小栗啓志* Keiji Oguri

猪又藤彦* Fujihiko Inomata



移動通信機器を支える個別半導体 より小型化・軽量化・高周波化が進むコードレス電話や携帯電話などの高周波信号処理部は、ダイオード・トランジスタなどの個別半導体の性能向上により、高性能で使いやすくなっている。これらのチップ写真はGaAs HEMTと f_T 10 GHzバイポーラトランジスタであり、また面実装外形を含む各種のパッケージを準備している。

コードレス電話やセルラー電話に代表される移動通信機器は、高性能・小型化が進んでいる。これら移動通信機器の送受信性能を左右するのは、高周波信号処理部に使用される個別半導体である。今後さらに高い周波数への移行と低消費電力化の進む中で、より低電圧・低電流動作が可能な半導体が要求される。

日立製作所は、これらの移動通信機器のニーズに対応するため、微細加工技術をはじめ各種のプロセ

ス技術を活用し、さまざまな高性能個別半導体を開発している。利得帯域幅積11 GHzの低雑音シリコンバイポーラトランジスタ2SC4926をはじめ、低電圧動作対応の可変容量ダイオードHVVU358や新素材のGaAs(ガリウムヒ素)を用いた高電子移動度トランジスタ2SK2113などを開発し、低雑音で、より低消費電力化が可能なフロントエンドを構成できる高性能な高周波用個別半導体を製品化した。

* 日立製作所 半導体事業部

1 はじめに

近年の移動通信機器は、小型・軽量化による便利さから、われわれの生活の必需品となりつつあり、高性能化や通話チャネルの拡大によって高周波化・デジタル化に進みつつある。これらの機器の高周波信号処理部に使用されるフロントエンド用個別半導体には、より低消費電力(低電圧化・低電流化)動作化が要求される。特にこの個別半導体は、通信機器の通信品質を大きく左右する部分のため、要求性能にあったものが必要となる。ここでは、これらの移動通信機器に使用される高周波フロントエンド用個別半導体の低電圧・低電流を図る上での半導体技術について述べる。

2 個別半導体への要求性能

図1に示す携帯電話ブロック図の中で、うすく網伏せした部分に個別半導体が使用される。

受信フロントエンド部は、セット受信感度を決定する部分であり、低雑音・低ひずみ・高利得性能が要求される。このため、低雑音増幅器には優れたひずみ性能を持ち、高利得・低雑音であるGaAs(ガリウムヒ素)FET(電界効果トランジスタ)やHEMT(高電子移動度トランジスタ)が使われる。また、ミキサ部は高い変換利得が得られるバイポーラトランジスタが使われる。周波数シンセサイザや変調器のVCO(Voltage Controlled Oscillator: 電圧制御発振器)には、低周波雑音性能に優れたシリコンバイポーラトランジスタと可変容量ダイオードが使われる。また、セットの長時間通話化を図るためには、いかに消費電力(特に動作電流)を低減するかがポイントである。半導体性能と動作電圧および電流は相反関係にあり、高周波性能を悪化させずに動作電圧と電流を低減するた

めには、サブミクロン微細加工技術と極浅接合形成技術を活用し、素子そのものの性能向上を行う必要がある。

3 高周波ダイオード

移動通信機器用高周波ダイオードは、VCOユニットに使われる可変容量ダイオードがあげられる。VCOユニットは発振または受信周波数を外部電圧によって制御することができる周波数発振器である。この基本回路は図2に示すように、可変容量ダイオード、高周波バイポーラトランジスタ、誘電体共振器で構成されるが、なかでも可変容量ダイオードの性能が周波数特性などのセット性能を大きく左右する。また、セットの小型・軽量化(電池本数削減)、調整工程の省力化から、可変容量ダイオードには表1に示す項目、特に低電圧動作時の容量変化比、直線性、直列抵抗低減を重点に性能向上を図る必要がある。

3.1 低電圧化技術

VCOユニット用可変容量ダイオードは、シリコン基板上にN型エピタキシャル層を成長させ、その中に超階段接合を形成することによって作られる。表1に示した性能向上に対しては、下記に示すプロセスと関係がある。

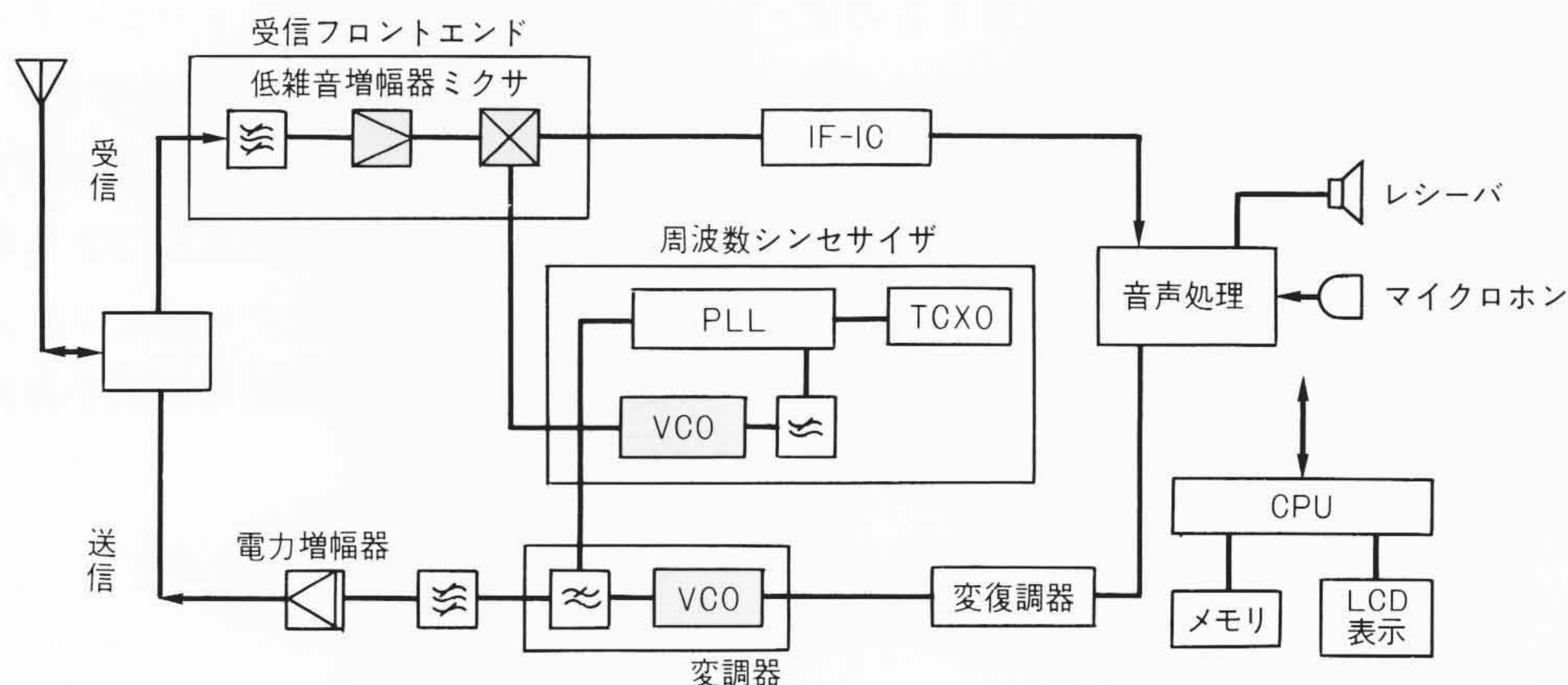
- (1) 容量変化比は、N型不純物のプロファイルとエピタキシャル層の濃度
- (2) 直列抵抗はエピタキシャル層の厚さ
- (3) 容量電圧特性の直線性はエピタキシャル層の不純物濃度分布

これらの項目は、プロセス設計上それぞれ相反する要素となる。例えば、容量変化比を高くするには、容量電圧特性を急峻(しゅん)にする必要があるが、反面、容量電圧特性の直線性が悪くなる。低電圧動作のより高周波化に対応するため、低容量化と使用電圧(通常4～6Vの範

注: 略語説明など

PLL (Phase Locked Loop)
VCO (Voltage Controlled Oscillator)
TCXO (Temperature Compensated Crystal Oscillator)
LCD (Liquid Crystal Display)
□部は、個別半導体使用部分を示す。

図1 携帯電話システムブロック図 高周波信号処理部(受信フロントエンド、VCO部)に要求性能に合った個別半導体(ダイオード・トランジスタ)が使用される。



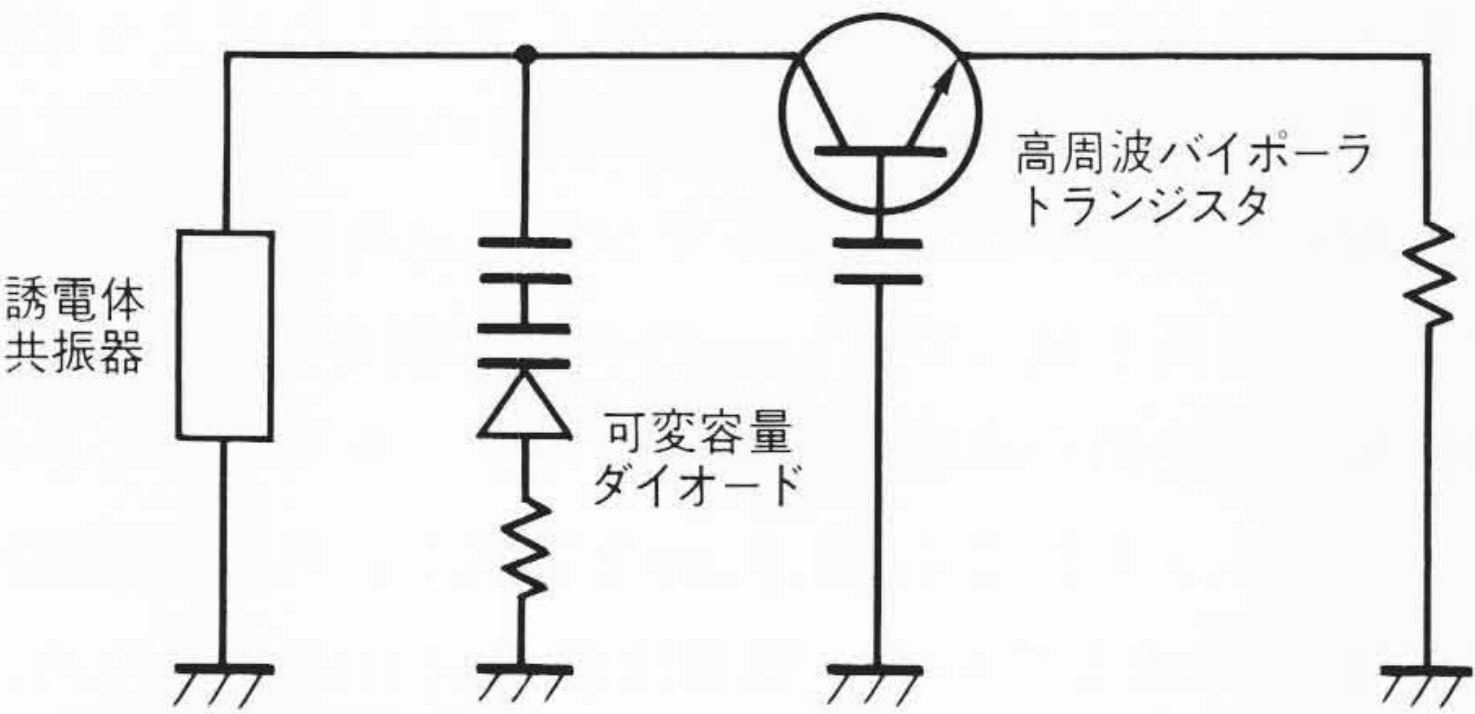


図2 VCO(電圧制御発振)ユニット基本回路 VCOユニットには、可変容量ダイオードと高周波バイポーラトランジスタが使われる。セット周波数特性を大きく左右するため、高性能な個別半導体が必要となる。

用)に合わせてN型エピタキシャル層の濃度・厚さと超階段接合濃度などのプロセスパラメータをCAD技術を用いて最適化する。これにより、低電圧動作で高容量変化比、低直列抵抗・直線性を持つ可変容量ダイオードが実現できる。

3.2 製品ラインアップ

自動車電話、携帯電話、コードレス電話などの移動通信のVCOユニットに最適な低電圧で、高容量変化比の性能を持つラインアップの充実を図っている。現在、小型面実装対応の小型レジソパッケージ(URP外形)で250

表1 低電圧動作可変容量ダイオードの必要性能 機器の小型・軽量化に伴い、VCO用可変容量ダイオードには低電圧動作が必要となり、高性能化が要求される。

機器の技術動向		可変容量ダイオードの必要性能
小型化 軽量化 (電池本数削減)	低電圧電源化	低電圧範囲での高容量変化比化 (n 比の向上)
	低消費電力化	直列抵抗の低減
工数低減	発振周波数の無調整化	容量電圧特性の直線性向上

MHz～3GHzをカバーする5品種の品ぞろえがある(表2、図3参照)。

4 高周波バイポーラトランジスタ

高周波バイポーラトランジスタは、低周波数領域の雑音特性に優れ、また伝達特性が指数関数で近似できるため、非直線性を利用した動作に適している。このため、移動通信機器ではVCOユニットの局部発振回路や周波数変換回路に使用される。高周波バイポーラトランジスタの構造は、シリコン基板上にN-P-N型不純物層を形成して作られる。特に高周波領域で使用するため、図4に示す微細なエミッタとベース電極が、ストライプ状に交

表2 低電圧可変容量ダイオードラインアップ コードレス電話の251～322MHz帯からデジタルコードレス電話などの準マイクロ波1～3GHzまでをカバーする製品を品ぞろえしている。

使用周波数と低電圧動作可変容量ダイオードラインアップ			
251～322 MHz	335.4～470 MHz	770～960 MHz	1～3 GHz
コードレス電話 ページャ船舶電話	コードレス電話 タクシー無線	自動車電話 携帯電話 MCA	デジタルコードレス 海事衛星通信 GPS
HVU350			HVU355
HVU351			
HVU357	HVU358		

●電気的特性($T_a=25^{\circ}\text{C}$)と特長

製品名	HVU350	HVU351	HVU357	HVU358	HVU355
外形	URP	URP	URP	URP	URP
端子間容量 C (pF)	$C_1=15.0\sim17.5$ $C_4=5.3\sim6.3$	$C_2=14.0\sim16.0$ $C_{10}=5.0\sim6.5$	$C_1=19.5\sim23.5$ $C_2=14.3\sim17.6$	$C_1=19.0\sim21.0$ $C_4=8.5\sim10.0$	$C_1=6.4\sim7.4$ $C_4=2.75\sim3.25$
容量変化比	$C_1/C_4\geq 2.8$	$C_2/C_{10}\geq 2.0$	$C_1/C_2\geq 1.3$	$C_1/C_4\geq 2.0$	$C_1/C_4\geq 2.0$
直列抵抗 r_s	0.50 Ω Max.	0.35 Ω Max.	0.35 Ω Max.	0.42 Ω Max.	0.60 Ω Max.
逆電圧 V_R	15 V Min.	10 V Min.	10 V Min.	15 V Min.	10 V Min.
特長	高容量変化比	低直列抵抗	高容量変化比 (低電圧領域) 低直列抵抗	高容量変化比 C-Vカーブ直線性良	低端子間容量 低リアクタンス C-Aカーブ直線性良

注：略語説明 MCA(Multi Channel Access), GPS(Global Pointing System)

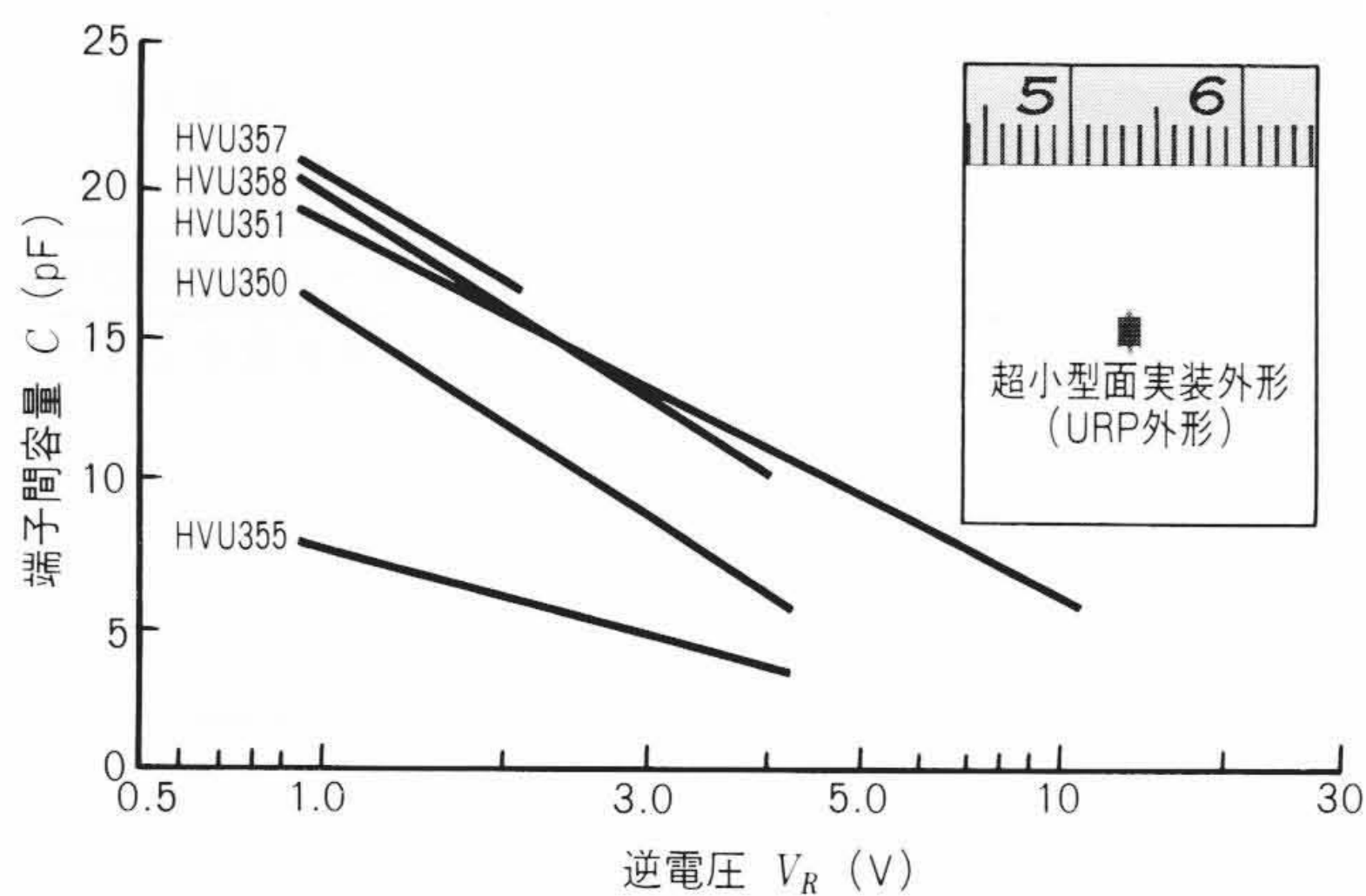


図3 低電圧動作可変容量ダイオード電圧特性と外形

機器の最大使用電圧範囲で良好な容量変化比と直線性を実現した。また、小型化対応のため超小型面実装外形のシリーズを品ぞろえした。

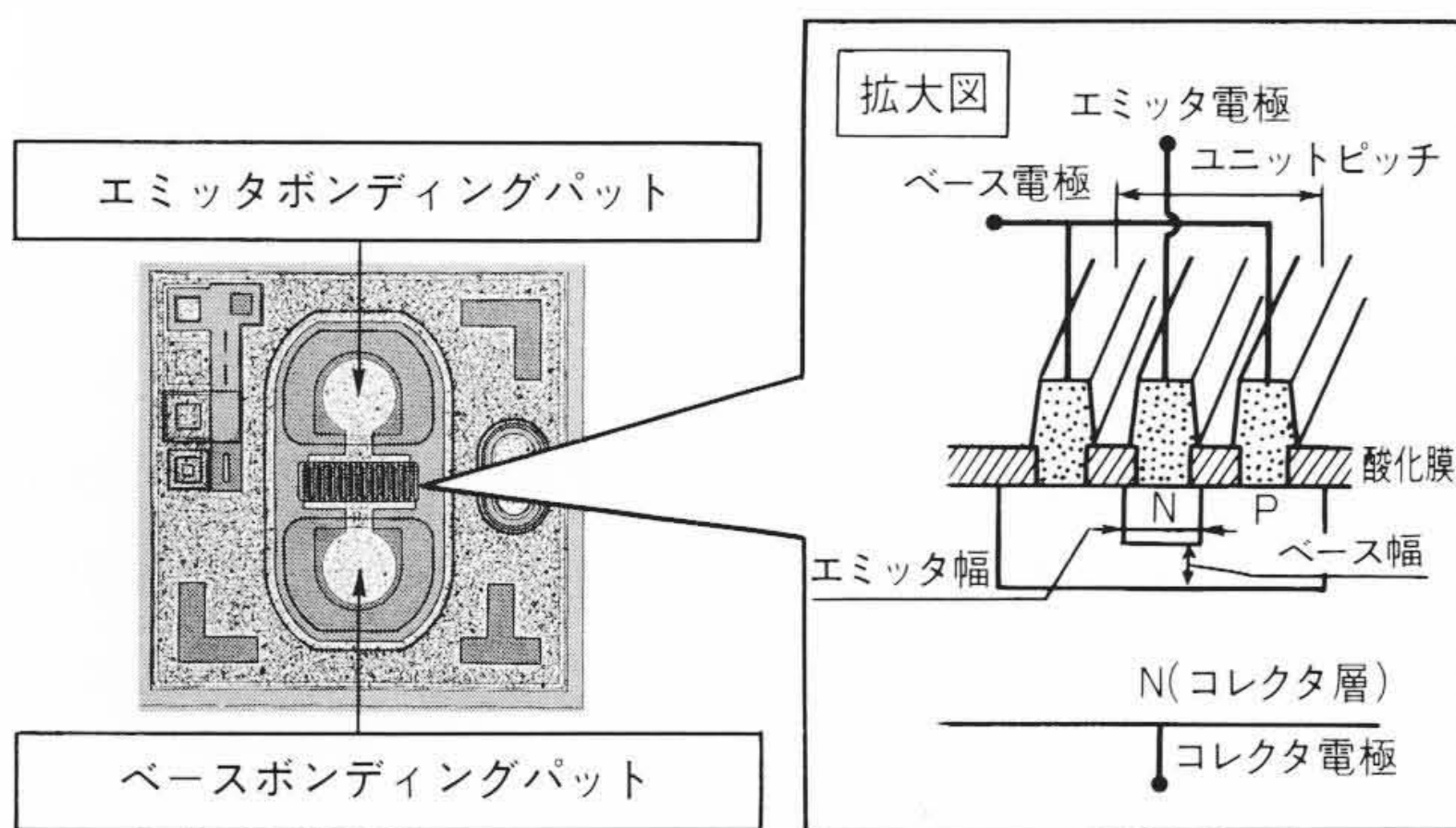


図4 高周波バイポーラトランジスタ構造とチップ写真

高周波領域で動作するため、微細なエミッタとベース電極がストライプ状に交互配線した素子構造を持つ。

互に複数配列した素子構造となる。高周波バイポーラトランジスタの性能を表すパラメータには利得帯域幅積 f_T があり、低電圧・低電流動作の場合、この利得帯域幅積が低下することにより、各種の高周波性能が劣化する。

4.1 低電圧・低電流動作技術

高周波バイポーラトランジスタの低電圧・低電流動作時では、下記の項目が変化して高周波性能を低下させる。

- (1) 各端子電圧の低下により、接合部の容量が増加して周波数特性を低下させる。
- (2) 動作電流が減少するため、利得帯域幅積が低下する。このため、微細加工技術を用い、エミッタ・ベースパターンの微細化と配列ピッチを低減し、各接合部の横方向の容量低減と極浅接合形成技術を用いて、各接合部の縦方向の容量低減を行う。また、利得帯域幅積向上は電子がエミッタからコレクタへ達するまでの走行時間を短くすることであり、極浅接合形成技術を用い、ベース幅を

性能悪化をもたらさない範囲で狭くすることによって実現できる。ベース幅と利得帯域幅積の関係を図5に示す。現在の技術では、浅いイオン打ち込み技術と短時間アニール技術を使って $0.1\mu\text{m}$ のベース幅を実現し、電子線直接描画技術や高精度縮小アライナーを用いることにより、エミッタ加工寸法 $0.8\mu\text{m}$ を実現し、利得帯域幅積 11GHz を達成している。低電流動作に対応するためには、いかに低いコレクタ電流値での利得帯域幅積を向上させるかが重要となる。利得帯域幅積のコレクタ電流特性を、エミッタ面積をパラメータにした場合の関係を図6に示す。 W_E (エミッタ面積) を小さくすることによって、低電流領域での利得帯域幅積の向上が可能となるが、反面、入力インピーダンスが増加して雑音指数の悪化や静電気に対する耐量が低下するため、エミッタ面積を含む素子パターンの最適設計を行って高性能化を実現する。

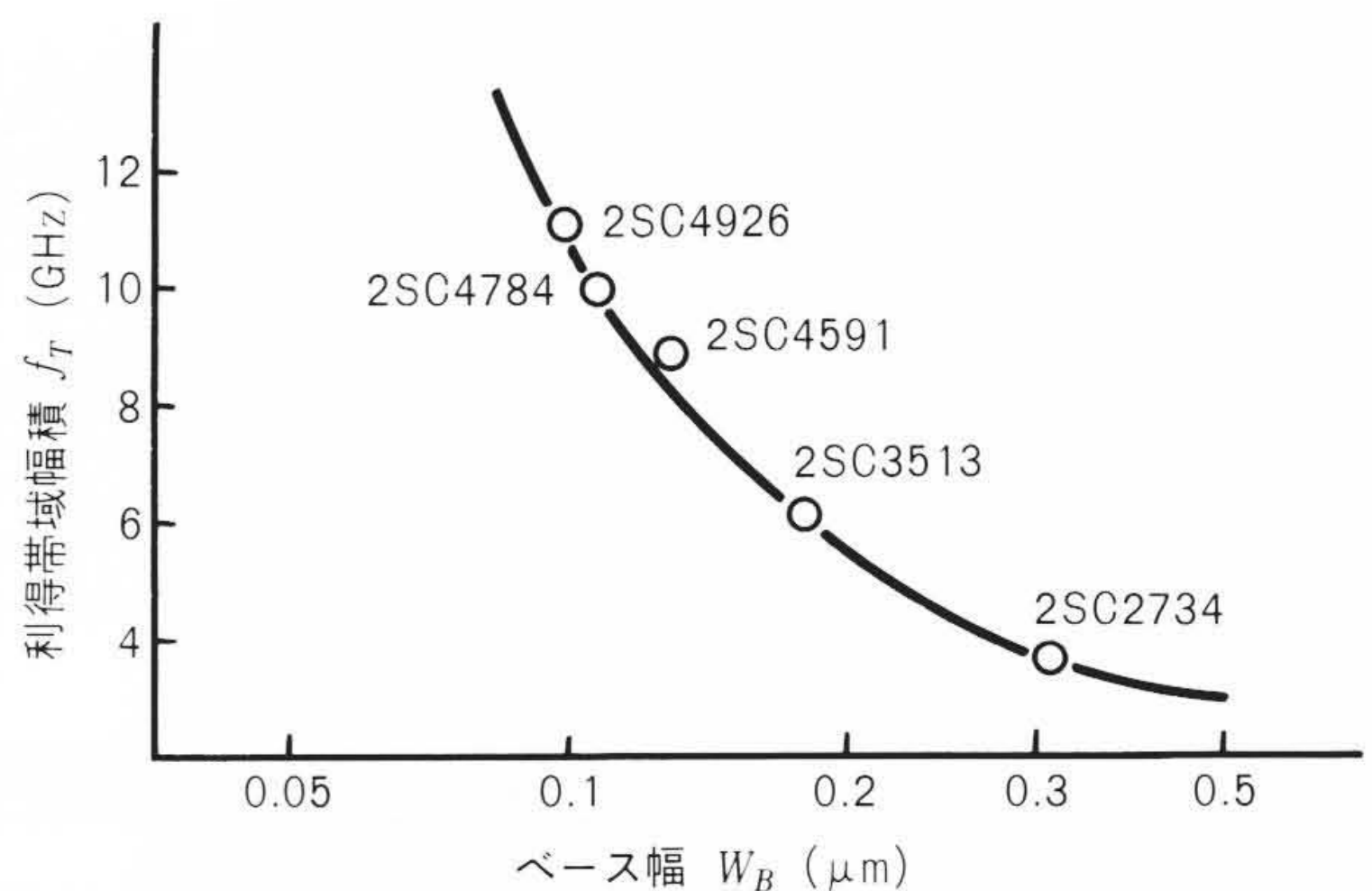


図5 利得帯域幅積とベース幅 高周波バイポーラトランジスタの利得帯域幅積は、ベース幅が狭くなるほど大きな値が得られ、高周波領域での高性能化が実現できる。

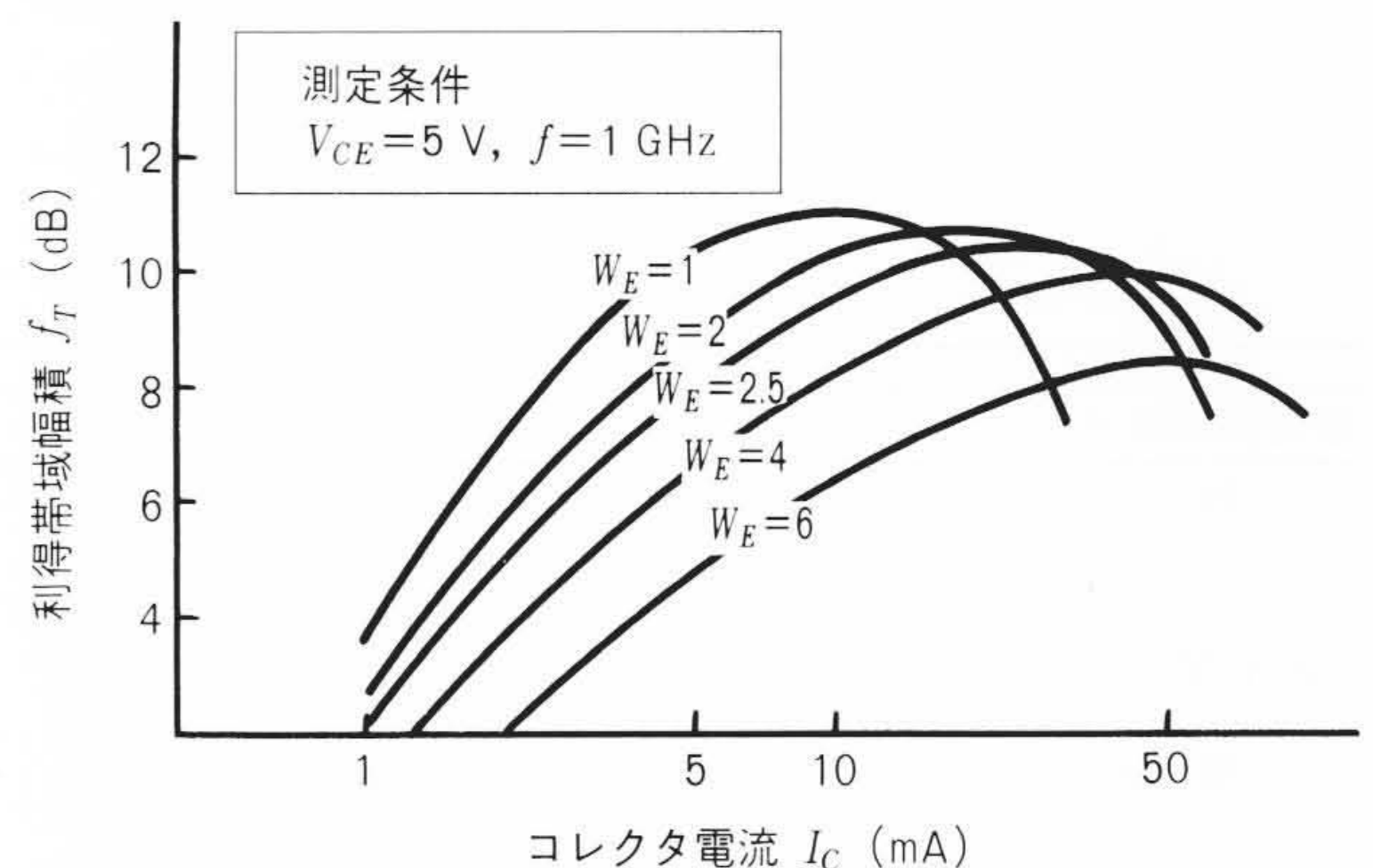


図6 利得帯域幅積のコレクタ電流特性 利得帯域幅積のコレクタ電流特性は、エミッタ面積によって変化する。低電流領域での性能向上は、エミッタ面積を小さくすることによって実現できる(図中のエミッタ面積は最も小さいものを1とし相対値で示している)。

4.2 製品ラインアップ

コードレス電話や自動車電話など多彩なアプリケーションに対応し、最先端の微細加工やプロセス技術を駆使して、高利得で低雑音の高周波バイポーラトランジスタを製品化している。製品ラインアップを図7に示す。17品種系列で41品種(うち低電流・低電圧動作対応4系列7品種)の品ぞろえがあり、利得帯域幅積11 GHzまでカバーしている。外形も超小型面実装からTO-92外形まで6外形に展開している。

(1) 2SC4926系

2SC4926系は、利得帯域幅積11 GHz(5 V/20 mA)で高利得が得られる製品である。従来の1 GHz帯から今後展開が予定されているデジタルコードレス電話など、2 GHz帯への用途にも対応できる。

(2) 2SC4902系・2SC4899系・2SC4784系・2SC4993系

2SC4902系などは、低電流・低電圧動作での性能に優れ、ページャ・携帯電話などの電池動作の機器に最適である。

5 GaAsデバイス

GaAsは、電子移動度がシリコンに比較して約6倍大きく、かつ基板が半絶縁性であるという特長を持つ。シリコンバイポーラトランジスタとHEMTの性能比較を図8に示す。バイポーラトランジスタに比べ、低電流領域からのHEMTは利得およびアイソレーション性能に優れる。また、増幅器としての雑音指数も、バイポーラトランジスタの1.6 dBに比べて0.8 dBと低雑音性能を

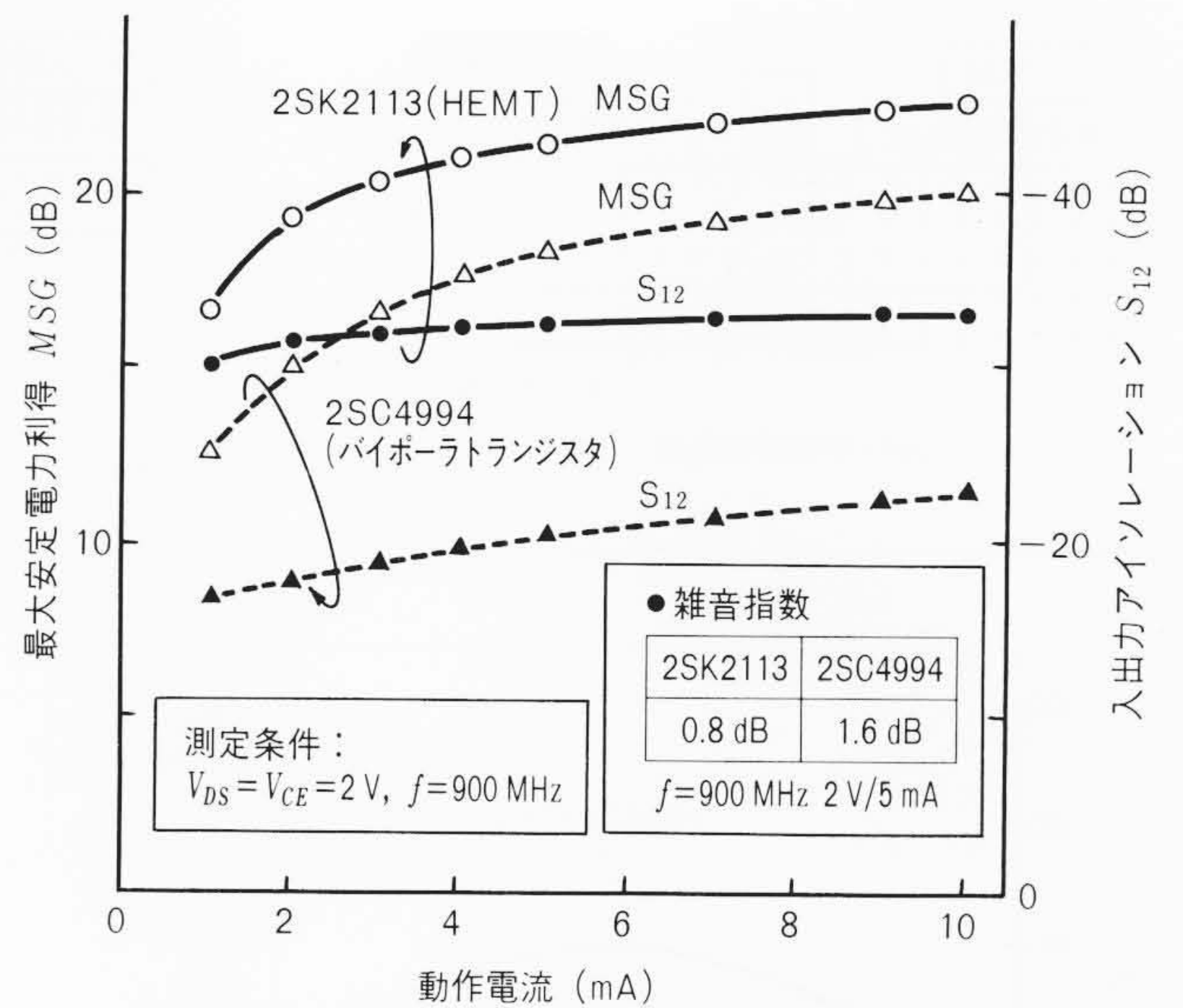


図8 シリコンバイポーラトランジスタとHEMTの性能比較
HEMTはシリコンバイポーラトランジスタに比較し、低電流領域での利得・雑音指数・入出力アイソレーション性能に優れる。

持つ。電子移動度が大きいと電子の走行速度が大きくなり、高周波・高速動作が可能となる。また、基板が半絶縁性であるため、寄生容量が小さくなり、かつ素子間分離が不要となる。これら二つの特長により、GaAsは高周波・高速動作半導体材料として使用される。構造は、現在FETとHEMTの2種類があり、ともに優れた高周波性能を持つ。GaAs FET(電界効果トランジスタ)とHEMTはシリコンバイポーラトランジスタに比較し、低電流・低電圧で低雑音と高利得性能が得やすく、また伝

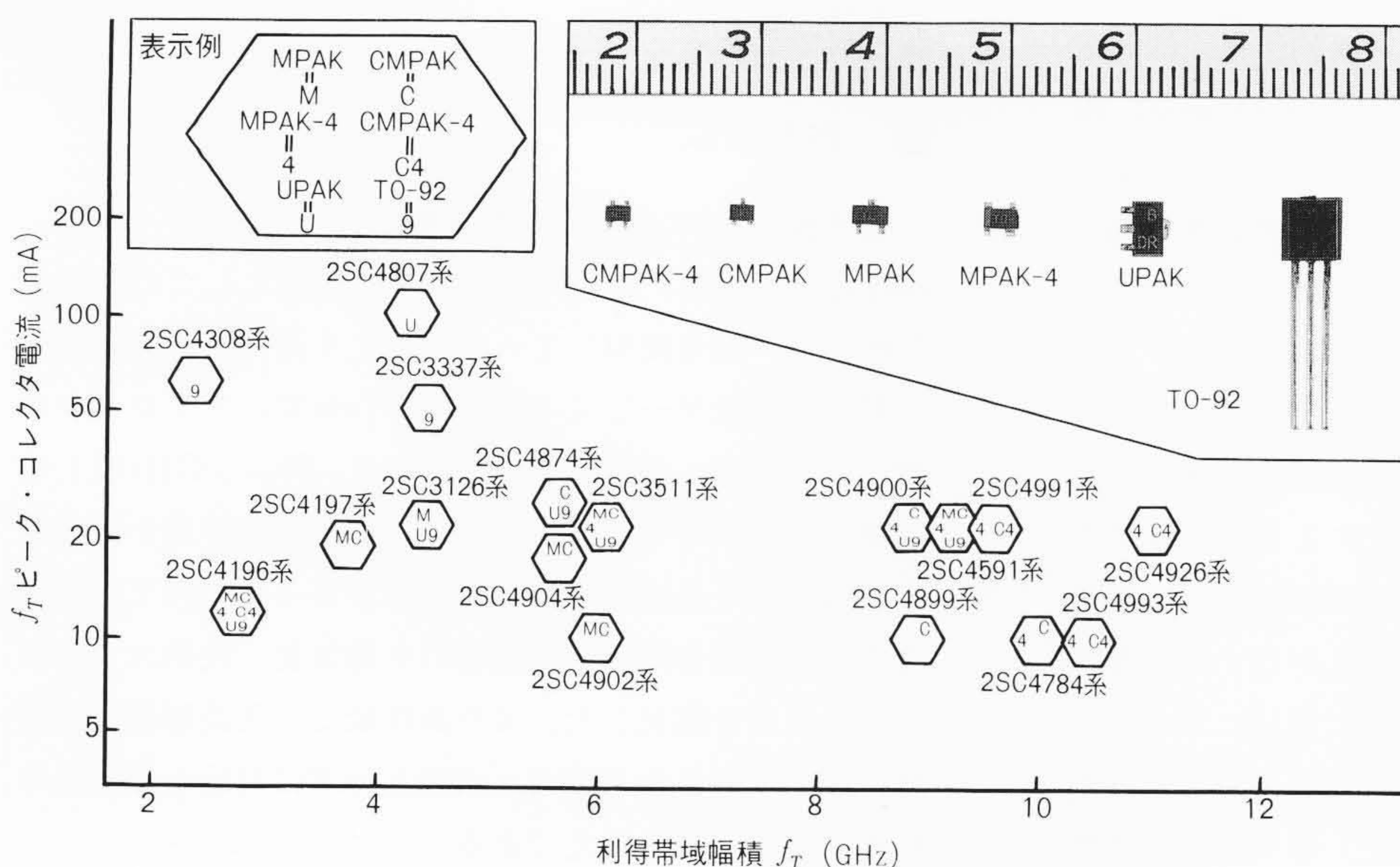


図7 高周波バイポーラトランジスタラインアップと外形 微細加工技術・プロセス技術を駆使し、用途に合わせて幅広いラインアップと面実装外形を含む6外形を準備している。

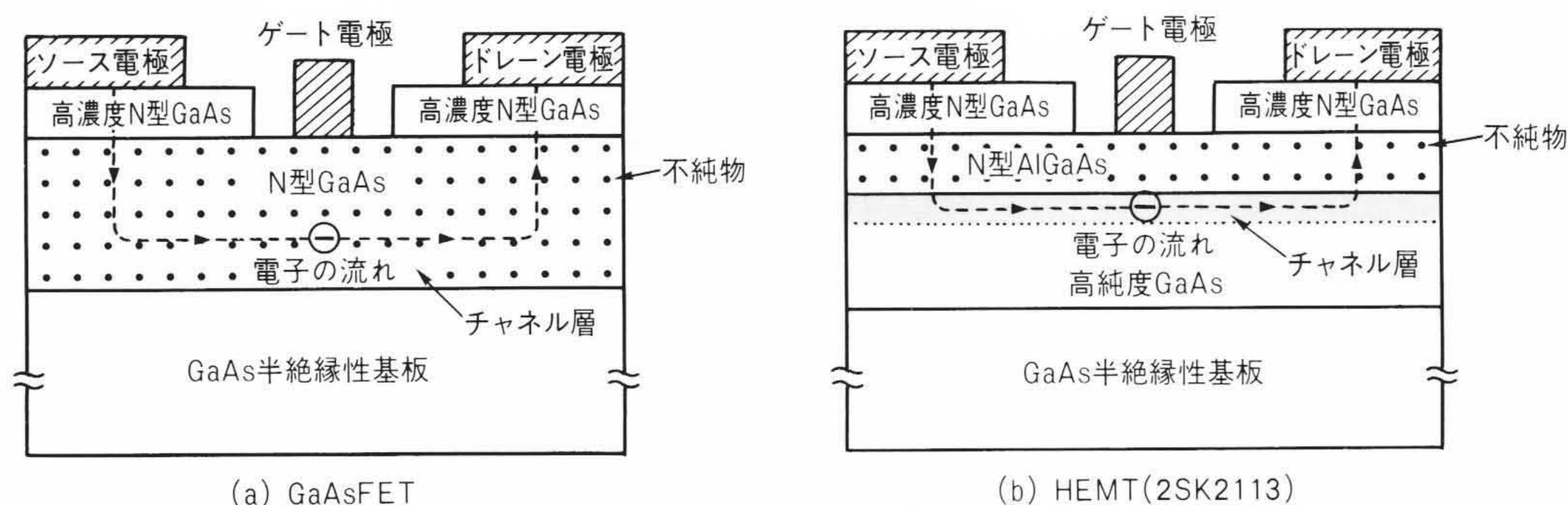


図9 GaAs FETとHEMT素子構造 GaAs FETはチャンネル層に不純物が多く、電子走行速度が制限されるが、HEMTの場合、不純物がきわめて少なく、より大きな電子走行速度が得られる。

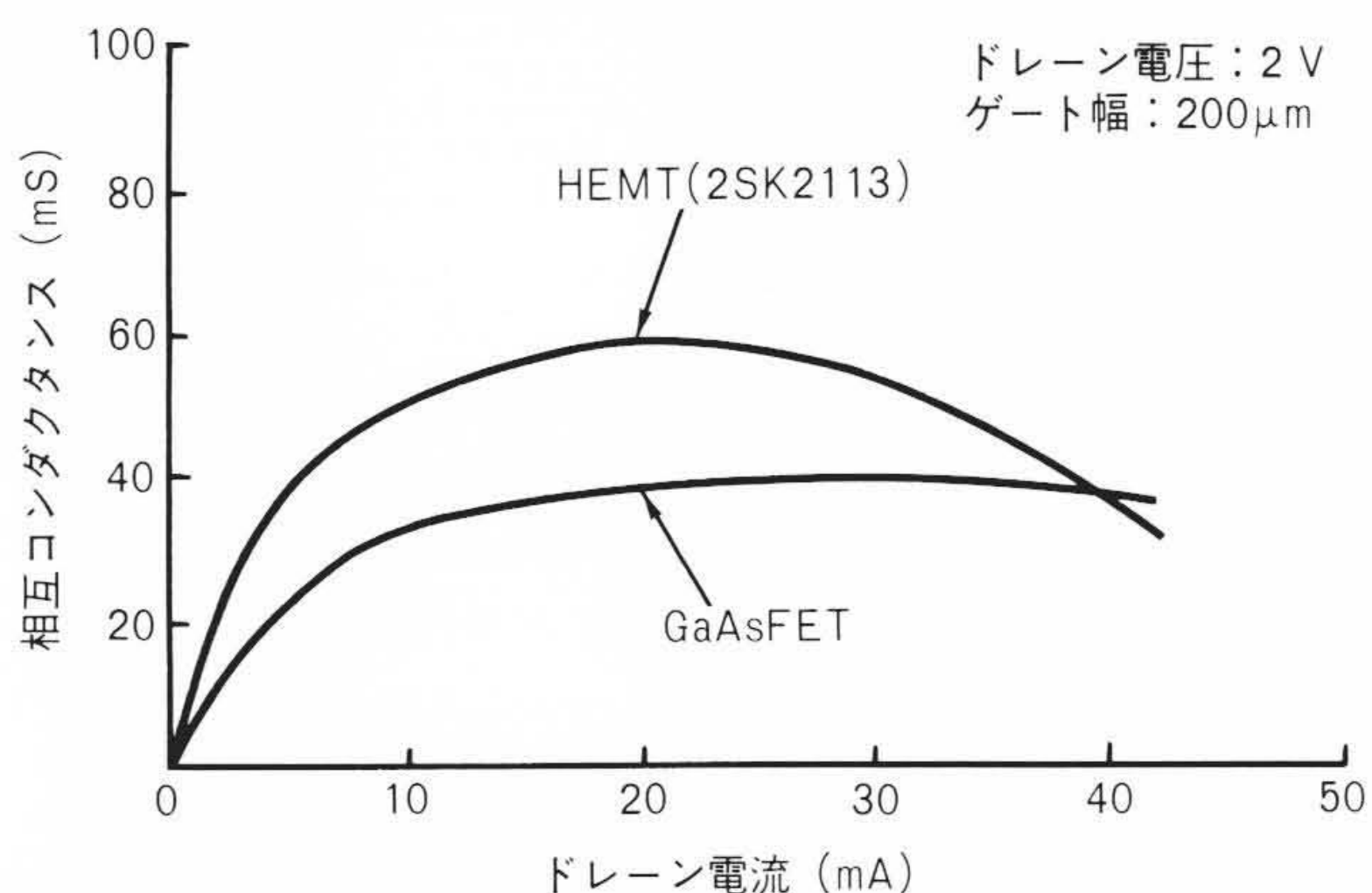


図10 GaAs FETとHEMTの相互コンダクタンス電流特性
HEMTの場合、より大きな電子走行速度が得られ、低電流領域での高相互コンダクタンス化が実現できる。

達特性が二乗関数で近似できるため、ひずみ性能に優れる。このため、移動通信機器、特に携帯型の高周波低雑音回路に最適である。

5.1 低電流動作技術

高周波領域での高性能化は、FETの動作領域を小さくして低容量化を図り、電流の担い手である電子走行速度を大きくすることが重要である。低電流動作化には低電流での相互コンダクタンスの向上が必須(す)である。相互コンダクタンスは電子走行速度に比例するため、電子走行速度を大きくすることが相互コンダクタンスの向上につながる。電子走行速度を大きくするには、MOCVD(有機金属気相成長)技術やMBE(分子線エピタキシャル)技術を駆使し、キャリア濃度の高濃度化とチャンネル層の薄層化を行う。さらに向上するには、HEMT構造の採用が必要となる。HEMTは図9に示すように、通常のGaAs FETと異なって不純物のない高純度のGaAs層を電子が走行するため、不純物による散乱がなく高速度で走行することが可能となる。この結果、図10に示すように低電流領域での相互コンダクタンスが向上し、優れた高利得・低雑音性能が得られる。また、準マイクロ波帯

表3 GaAsデバイス製品ラインアップ 移動通信機器に使用されるGaAs FET,HEMT 4品種を使いやすい面実装外形で品ぞろえした。

製品型名	構 造	外 形	主 要 特 性
2SK2113	シングルゲート HEMT	CMPAK-4	● 超低雑音 $NF=0.8$ dB typ. ● 電源電圧 1 ～ 3 V対応
3SK239	デュアルゲート GaAs FET		● 低 雑 音 $NF=1.2$ dB typ. ● 電源電圧 3 ～ 9 V対応
3SK228		MPAK-4	● 低 雑 音 $NF=1.6$ dB typ. ● ひずみ性能に優れる。 ● 電源電圧 6 ～ 12 V対応
3SK191			

以上の周波数でも優れた性能を得るために、電子線直接描画技術を用い、 $0.25\mu\text{m}$ の超微細ゲート電極加工を行って低容量化を図った。

5.2 製品ラインアップ

移動通信機器の低雑音増幅回路に優れた性能を持つGaAs FET,HEMT 4品種を製品化した。表3に示すように、GaAs FETは帰還容量の小さなデュアルゲートFET(3品種)を、HEMTは $0.3\mu\text{m}$ の微細加工ゲートを持つ高性能品(1品種)を、それぞれ使いやすい小型面実装外形で品ぞろえした。

6 おわりに

電子機器、特に電池動作対応機器は、今後小型・軽量・高性能化が進み、なかでも情報通信端末としての移動通信機器は、従来使用していない、より高い周波数領域への移行と各種サービスの展開に合わせて、アナログからデジタル化への対応が必須となる。特に1GHz以上の準マイクロ波帯を使用する移動通信機器の普及を実現するには、より高性能な個別半導体があって初めて可能となる。日立製作所は、最先端の半導体加工技術およびプロセス技術を駆使した、より高性能な高周波用個別半導体の開発と製品化を進め、市場ニーズに対応した製品の拡充を図っていく考えである。