

移動体通信を支える高周波デバイス

RF Device Support for Mobile Communications

多田 昇
TADA Noboru

斎藤 正尚
SAITO Masahisa

山本 知彦
YAMAMOTO Tomohiko

携帯電話は、800MHzアナログのAMPS(Advanced Mobile Phone Service)やTACS(Total Access Communication System)方式からサービスが始まったが、加入者が増えるに従って周波数利用効率の高いシステムの800-900MHz帯のTDMA(Time Division Multiple Access)/GSM(Global System for Mobile Communications)へ移行している。最近では、米国、韓国で先行して立ち上がった、より利用効率の高いCDMA(Code Division Multiple Access)が加入者を伸ばしている。また、DCS(Digital Cellular System)/PCS(Personal Communication System)は1,800MHz帯を利用するなど高周波化も進んでいる。

当社では、送信側(Tx Port)はPCSバンドのCDMA用RFパワーアンプを、受信側(Rx Port)はSMART-2(Silicon Monolithic Architecture for RF Technology 2)プロセスを用いた広帯域アンプセルパック(Si MMIC)、VCO(Voltage Controlled Oscillator)用高性能マイクロ波トランジスタMTシリーズなどを、これらのシステムに向けて開発している。

The cellular phone system is changing from an 800 MHz AMPS/TACS (advanced mobile phone service/total access communication system) analog system to an 800-900 MHz TDMA/GSM (time division multiple access/global system for mobile communications) digital system. Recently, the number of subscribers to the CDMA (code division multiple access) system, which was launched in the United States and Korea ahead of other countries, has been increasing. In addition, the cellular system is shifting to a high frequency for DCS/PCS (digital cellular system/personal communication system) systems using 1,800 MHz.

We are developing an RF power amplifier for CDMA use in the PCS band (for the Tx port); a wideband amplifier called Cell-Pack using the SMART-2 (silicon monolithic architecture for RF technology 2) process (for the Rx port); and the MT series microwave transistors for voltage control oscillator (VCO) use (also for the Rx port).

1 まえがき

システムの高周波化に伴い、それに用いるデバイスの高周波動作対応が求められており、シリコン(Si)パイポラ系では、ウェーハ上で f_T (遮断周波数)=30GHz以上のデバイスの開発が行われている。このプロセスを用いて一部メーカーにおいては、SiのRF(Radio Frequency)小信号系ICの開発を進めている。しかし、現時点ですべてがIC化されているわけではない。

今日、高周波トランジスタの需要の多くは携帯電話であり、なかでもVCO用トランジスタの需要が増大している。使用される半導体は、発振用とパッファ用トランジスタに加え、発振周波数を可変するためのバリキャップダイオードの3素子で構成されており、発振段は V_{CE} (コレクタ・エミッタ間電圧)=1V以下でのC/N(Carrier/Noise)=-115dBc/V(60kHz offset)以下、電源電圧変動特性 ± 300 kHz以下(2.8V ± 0.1 V)など厳しい規格を満足しなくてはならない。また、パッファ段は低電圧低電流での高利得を要求されており、それぞれ素子の高性能化が求められているため、それを実現できる単体トランジスタの需要が高まっている。

他方、高周波性能・低消費電力要求に加え、部品点数の削減、実装面積縮小、システム設計の効率などの理由により、準マイクロ波帯まで動作するMMIC(Monolithic Microwave IC)の市場要求も多い。

この要求に対して、当社では、高周波ディスクリートデバイスで実績のある低雑音マイクロ波トランジスタ($f_T=10$ GHz)のプロセスをベースとして開発した、SMART-1プロセスを用いたSi MMIC群を“RFセルパックシリーズ”として商品化してきた。特に、入出力インピーダンスを50 Ω に整合した広帯域アンプシリーズは、移動体通信機器関連の普及に伴いPA(Power Amplifier)ドライバ用アンプ、OSQ(Oscillator)用パッファアンプ、更には2nd LNA(Low Noise Amplifier)用途として~3GHzまで動作する製品の市場要求が非常に高くなってきている。そこで今回、SMART-2($f_T=30$ GHz)プロセスを搭載した広帯域増幅器を開発した。また、送信系においては、以前から当社研究開発センターを中心にGaAs HBT(Heterojunction Bipolar Transistor)素子の研究を進めており、高周波特性に優れ、単一正電源動作が可能という特長を持っている。

ここでは、今回開発したマイクロ波トランジスタMTシ

リーズ、高周波広帯域アンプ、及びGaAs HBTを用いたM-MIC PCS・CDMA用高周波パワーアンプの特長について述べる。

2 マイクロ波トランジスタ MTシリーズ

MTシリーズのTESM(Thin Extreme Super Mini)パッケージ品の外形を図1に示す。

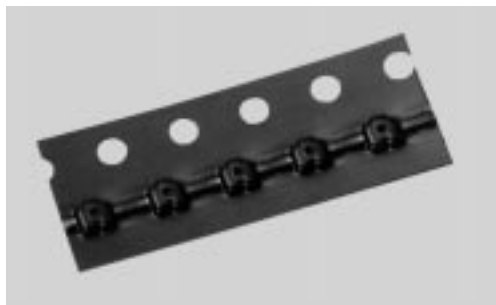


図1．マイクロ波トランジスタMTシリーズ VCO用トランジスタMTシリーズのTESMパッケージ品を示す。
MT series microwave transistor

2.1 市場の要求

携帯電話は、普及するに従ってアナログからデジタル、小型・軽量化、長時間通話など、機器に対する市場の要求は厳しくなっている。それぞれの要求を素子に対する要求に書き換えると、以下ようになる。

- (1) アナログからデジタル 低位相雑音化要求。具体的にはC/Nや低周波ノイズの低減化
- (2) 小型・軽量化 VCOモジュールの小型化によって使用される素子の超小型・薄型化
- (3) 長時間通話 使用される電池がNiMnHからLiイオンへ換わり、これに伴う3.6V以下での動作

これらの要求を実現するには、(1)はSiの結晶レベルでの欠陥の低減や、チップの製造工程での高度な熱処理の管理が要求され、(2)については、既に2in1ES&(Extreme Super Mini 6 leadsパッケージ：モールド部1.6mm×1.2mm)やTESM(1.4mm×1.2mm×0.59mm)を市場に投入済みで、更に超小型リードレスタイプのCSP(Chip Scale Package：1.0mm×0.6mm×0.6mm)を開発している。(3)は今回の製品開発においてもっとも重要な項目で、ICとは異なり素子内部にレギュレータを持ってない単体トランジスタにおいて、低電圧、低電流動作での電源電圧変動特性をいかに改善するかが課題となる。

2.2 開発のポイント

MTシリーズは、以下のポイントに着目し開発した。

- (1) 帰還容量の低減 真性ベース領域を縮小化するため、エミッタピッチを狭ピッチとした。
- (2) 寄生容量の低減 電極配線幅を縮小し、近接LOCOS(LOCAl Oxidation Silicon)を採用した。また、2層配線化した。
- (3) 電圧依存性の向上 エピタキシャル層の厚さ(t_{VG})、固有抵抗(r_{VG})の最適化を実施した。

以上のパラメータの最適値を抽出することで、帰還容量(C_{re})の絶対値及び電圧依存性の改善、Low(sat)化(低コレクタ・エミッタ間飽和電圧)を実現し、 $V_{CE} < 1V$ の特性の改善を実現した。開発したマイクロ波トランジスタMT3S04Tのチップ写真を図2に、従来品2SC5086FTとのデザインの違いを表1に示す。

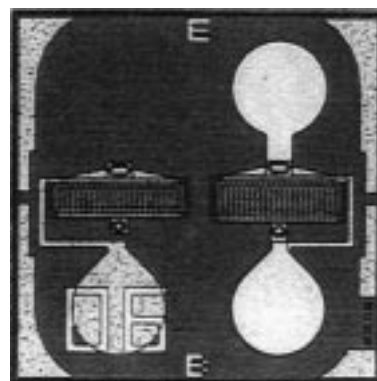


図2．MT3S04Tのチップ写真 高周波用にくし形構造になっている。
Chip photograph of MT3S04T

表1．従来品2SC5086FTとの比較
Comparison data with 2SC5086FT

開発のポイント	項目	MT3S04T*
トランジスタサイズの縮小	エミッタ幅	100%
	エミッタピッチ	84%
	エミッタ長	100%
	エミッタ本数	100%
	ベーストータル面積	70%
コレクタ基板の最適化	コレクタ t_{VG}	40%
	コレクタ r_{VG}	86%
電極配線の縮小化	ベース/パッド間配線幅	30%
寄生容量削減	ベースパッド直下	エミッタシールド化

* 2SC5086FTを100としたときのMT3S04Tのデザインのスケールを示す。

2.3 従来製品との比較

従来製品とMTシリーズの比較データを以下に示す。

図3は帰還容量の電圧依存性を示したもので、今回開発したMT3S04Tと従来品2SC5086FTを比較した。 $V_{CE}=1V$ 以

下の領域の帰還容量低減と、3V以上の容量の電圧依存性が大幅に改善されていることがわかる。また、図4に挿入電力利得(S_{21}^2)の電圧依存性を示す。電圧依存性が従来品より低減されているようすが読み取れる。

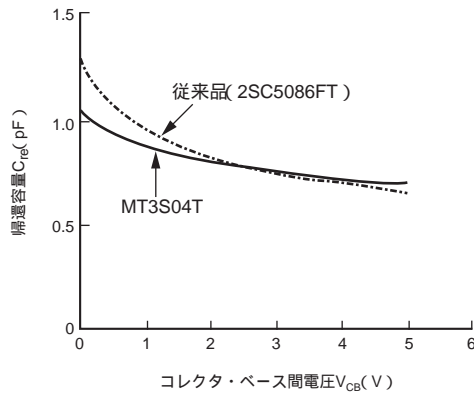


図3. $C_{re} - V_{CB}$ 特性 $V_{CE}=1V$ 以下の領域の帰還容量低減と、3V以上の容量の電圧依存性が大幅に改善されている。

$C_{re} - V_{CB}$ characteristics

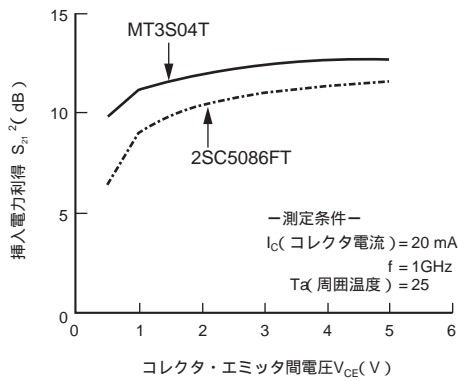


図4. $|S_{21}|^2 - V_{CE}$ 特性 C_{re} の電圧依存性の改善から S_{21}^2 の特性の改善ができたことを示している。

$|S_{21}|^2 - V_{CE}$ characteristics

2.4 製品のラインアップ

VCOの回路説明のときにも記述したように、発振とバッファのトランジスタが異なった製品を使うことと、小型化の要求から、異チップ混載型のマルチチップ品 ES6パッケージも同時に開発した。

また、MT3S04T($f_T=7\text{GHz}$), MT3S03T($f_T=10\text{GHz}$ High Current), MT3S06T($f_T=10\text{GHz}$ Low Current), MT3S07T($f_T=12\text{GHz}$)の4タイプの開発を完了した。更に、低周波ノイズの低減を目指した製品と、ケーブルチューナや中電力アンプ用途を目指した超高電流/低ひずみ品の開発を進めていく計画である。

3 SMART-2 プロセス セルパック TA4016AFE

3.1 広帯域アンプ設計のポイント

移動体通信機器用としては、 $\sim 3\text{GHz}$ までの動作に加え、以下の仕様が要求される。

- (1) 低電圧、低消費電力動作
- (2) 帯域内入出力インピーダンスの50 Ω 整合
- (3) 低NF(雑音指数)性能
- (4) 小型外囲器
- (5) 外付け部品点数の削減

3.1.1 SMART-2 プロセス 低電圧、低消費電力と広帯域性能の達成は、従来プロセスでは困難なため、新規に開発したSMART-2プロセスを用いた。

このプロセスの特長は、“高解像度の露光装置によるエミッタ幅 $0.5\mu\text{m}$ 化”と“低温エピタキシャル成長による高濃度で浅いベース形成”の実現である。この最新技術により、図5に示す $f_T - I_C$ (コレクタ電流)特性のように、従来プロセスと比較して $f_T=30\text{GHz}$ と飛躍的な性能向上を実現した。

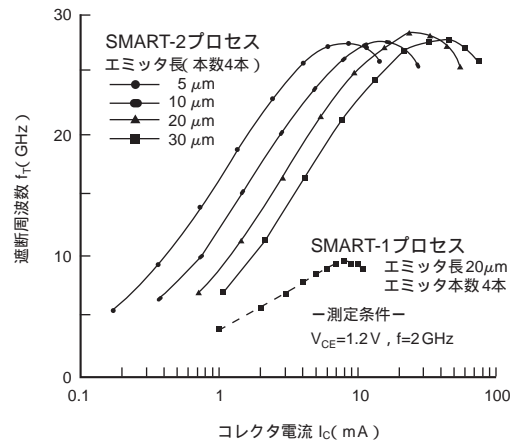


図5. SMART-2 プロセス トランジスタの $f_T - I_C$ 特性 SMART-1 プロセスに比べて、新たに開発したSMART-2 プロセス トランジスタは性能が大幅に向上した。

$f_T - I_C$ electrical characteristics of SMART-2 process transistor

3.1.2 回路設計 設計環境においては、以前より培ってきた高周波CAD技術を用いてSMART-2に対する期待値の高い回路を設計した。

- (1) On Wafer SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)Parameter 抽出環境の構築とS-Parameter Fitting(実測値とシミュレーション値の合わせ込み)精度技術の向上
- (2) トランジスタ性能のライブラリ作成(各直動作点における S_{21}^2 , NF, IM_3 (3rd order Inter Modulation distortion)などのRF性能データライブラリ)

回路設計のポイントは、前述の仕様達成のため、各ノードのダイナミックレンジ、ゲイン配分の最適化、トランジスタ デバイスライブラリによる最適なトランジスタサイズ の選択、S-Parameter を含めた高周波シミュレーションで ある。

特に、 f_T が高い SMART-2 プロセス トランジスタ を用い ることで異常発振が懸念されるため、正帰還ループに注意 して回路定数を決定し、更にマスキレイアウトとピン配置 も十分考慮し対策を講じた。

3.1.3 TA4016AFE 紹介 従来プロセスでは、電源 電圧 $V_{CC}/I_{CC}=3V/12mA$ で $S_{21}^2=10\text{ dB}$, BW (周波数帯域幅) =2.5 GHz が限界であったが、この製品は低電圧 $V_{CC}/I_{CC} =2V/6\text{ mA}$ と消費電力 1/3 で $S_{21}^2=19\text{ dB}$, BW=3.2 GHz, 更 に $V_{CC}/I_{CC}=3\text{ V}/11\text{ mA}$ では 22 dB, 4.5 GHz と従来品に対し高 利得、広帯域を低消費電力にて実現した。TA4016AFE の 基本特性を表 2 に、 $S_{21}^2 \cdot f$ 特性を図 6 に示す。

表 2 . TA4016AFE の基本特性

Electrical characteristics of TA4016AFE chip

項目	記号	条件	標準特性
回路電流	I_{CC}	$V_{CC}=2V$, 無信号時	6 mA
周波数帯域幅(＊)	BW	$V_{CC}=2V$, (＊)	3.4 GHz
電力利得	S_{21}^2	$V_{CC}=2V$, $f=1.5\text{ GHz}$	19 dB
雑音指数	NF	$V_{CC}=2V$, $f=1.5\text{ GHz}$	4.5 dB
アイソレーション	S_{12}^2	$V_{CC}=2V$, $f=1.5\text{ GHz}$	- 33 dB
入力リターンロス	S_{11}^2	$V_{CC}=2V$, $f=1.5\text{ GHz}$	- 14 dB
出力リターンロス	S_{22}^2	$V_{CC}=2V$, $f=1.5\text{ GHz}$	- 7 dB
出力電力(1dB コンプレッション)	P_{O1dB}	$V_{CC}=2V$, $f=1.5\text{ GHz}$	- 7 dBmW

＊ : BW : Band Width $f=1.5\text{ GHz}$ の S_{21}^2 に対し、3dB down の周波数。

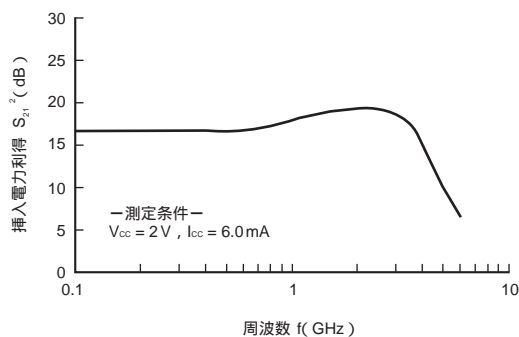


図 6 . TA4016AFE の $|S_{21}|^2 \cdot f$ 特性 3 GHz を超える広帯域特性を実現した。

$|S_{21}|^2 \cdot f$ electrical characteristics of TA4016AFE chip

このように、低電圧動作の広帯域増幅器としてトップク ラスの性能を達成した。また、入出インピーダンスの $50\ \Omega$ 整合、従来品に比べて NF の改善を行い、新規開発の超小

型パッケージ ES6 (1.6 mm × 1.2 mm) に搭載し小型化も実現 した。更に、外付け部品を不要とし部品点数の削減を達成 している。

このように、TA4016AFE は移動体通信機器に加え ISM (Industry Science Medical)バンドなどの市場要求を満たし た性能を実現している。

4 移動体通信用高周波パワーアンプ

4.1 CDMA 用 MMIC T8999

T8999 の外形写真を図 7 に示す。

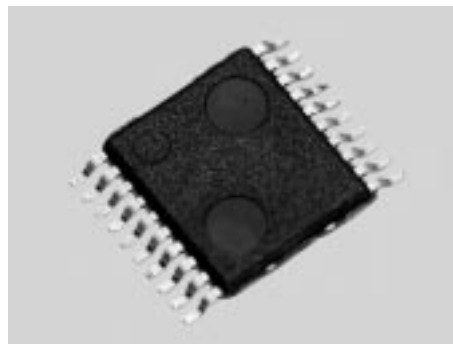


図 7 . CDMA 用 MMIC T8999 GaAs HBT は、InGaP 系のウェーハ を採用している。
T8999 monolithic microwave integrated circuit (MMIC) for CDMA use

当社の GaAs HBT は、InGaP 系のウェーハを採用してい る。この構造を採用したことで、従来の AlGaAs 系ウェー ハを用いた素子と比較して、次に示すような特長がある。

- (1) 小電流時の電流増幅率(β)が高い。(10 μA 時, HBT の $\beta=70$ に対し AlGaAs は、 $\beta=5.5$ と低下)
- (2) 高信頼性である。選択性エッチングが行えるためプ ロセスが容易で安定している。
- (3) 単一正電源動作が可能である。

高温通電した場合の β の時間変化を図 8 に示す。この結 果から AlGaAs HBT と比較して β の変化がほとんどなく信 頼性が向上していることがわかる。

図 9 は、T8999 の入出力特性と隣接チャネル漏洩(ろうえい)電力(ACP) の評価結果である。

1,880 MHz, $V_{CC}=3.6\text{ V}$, 出力電力 $P_O=29.0\text{ dBmW}$ において、 総合効率 $E_{\text{eff}}=35.2\%$, 隣接チャネル漏洩電力比 ACPR -29 dB, 電力利得 $G_P=23.9\text{ dB}$ を実現している。

T8999 は、温度補償回路付き利得制御回路をチップに内 蔵している。このため -30 から 80 まで温度を変化させ た場合の利得の変化は 0.5 dB 以内、隣接チャネル漏洩電力 の変化も 1.4 dB 程度と安定しており優れた温度特性を持つ

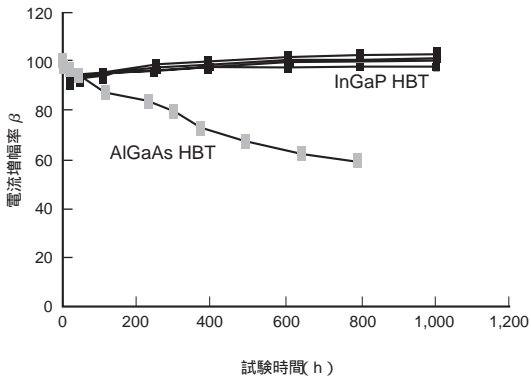


図8 . GaAs HBTの高温通電試験結果 AlGaAs HBTと比較して当社採用のInGaP HBTのほうが、 β が変化しないことがわかる。
High-temperature bias test of InGaP vs. AlGaAs heterojunction bipolar transistors (HBTs)

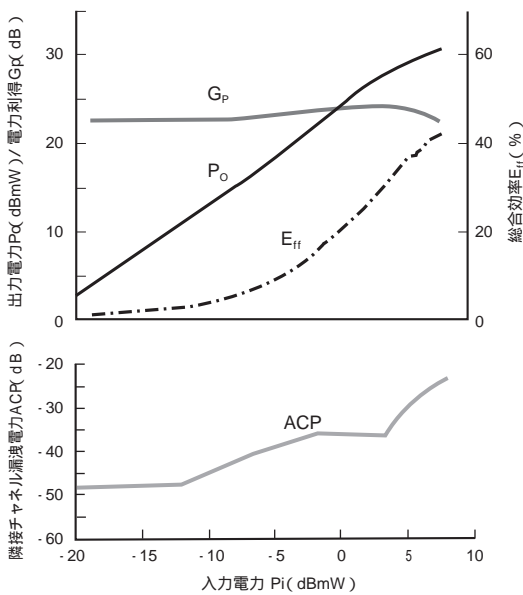


図9 . T8999 の入出力特性 出力29dBmW時に、 E_{if} 35.2% , ACPR -29 dB以下、 G_p 23.9 dBを達成している。
Output power - Input power ($P_o - P_i$) data of T8999 MMIC

ことが確認されている。

パッケージは、0.5 mm ピッチ 20ピン (HSOP (Small Outline Package with Heat) -20) を採用しており、リードを含めて6.4 mm × 5.4 mm × 厚さ1.0 mmと小型化を実現している。裏面のヒートシンクで熱抵抗を低減させ、小型パッケージでありながら1Wクラスの高出力素子の搭載を可能とした。

現在このほかにも、同素子を用いた800 MHz/1.9 GHz帯整合回路付きパワーアンプ (Micro PA : Micro Power Amplifier for handy cellular) も開発している。

5 あとがき

マイクロ波トランジスタMTシリーズの開発にあたっては、低電圧時の電圧依存性を改善するパラメータを探索し最適化を行うことで、従来製品に対し大幅に特性の改善を図ることができた。しかし、市場の要求はすでに次の高周波VCOモジュールへとシフトしており、これに対応していくには単に従来の技術の延長線的な開発では、特性を満足させることが困難になってきている。

このため、トランジスタのアクティブ領域においては、エピタキシャルベースプロセスを用いたシャロー (shallow) ベース技術の確立やSiGeを用いた高 f_T 品の実現を目指し、配線やパッドにおいては電極の引出し部の形状の見直し、素子上ボンディング技術などを早期に確立し、製品へフィードバックしていく予定である。

また、セルパックにおいては、様々な市場の要求に対応できるよう出力レベルを変えた広帯域増幅器のラインアップ拡充と、通信・チューナ用DBM (Double Balanced Mixer) , AGC (Automatic Gain Control) セルパックの商品化を推進する計画である。更に、次世代セルパックの取組みとしてSiGe, GaAs HBTデバイスを用いた高性能高周波セルパックの開発を目指していく。

送信系においては、CDMA/PCS用パワーアンプモジュールの開発も進んでいる。同時に、2001年以降本格稼働予定のワイドバンドCDMA (W-CDMA) 用 Micro PAの開発も推進している。現在プロトタイプを試作が進んでおり、変調時の出力電力 $P_o = 28$ dBmW, 総合効率 $E_{if} = 37\%$, 隣接チャネル漏洩電力比ACPR -41dB (5MHz offset) を達成している。パッケージサイズは6 mm × 6 mm × 厚さ2 mmでの製品化を目指していく。

文 献

- (1) 塚本 達彦, 他. 遮断周波数30 GHzクラスの高周波アナログプロセス SMART-2. 東芝レビュー . 57, 8, 1997, p.71-74.



多田 昇 TADA Noboru

セミコンダクター社 ディスクリート半導体事業部 ディスクリートデバイス応用技術第一部主務。高周波用小信号デバイス応用技術業務に従事。

Discrete Device Div.



齊藤 正尚 SAITO Masahisa

セミコンダクター社 ディスクリート半導体事業部 ディスクリートデバイス応用技術第一部主務。セルバックIC設計業務に従事。

Discrete Device Div.



山本 知彦 YAMAMOTO Tomohiko

セミコンダクター社 ディスクリート半導体事業部 ディスクリートデバイス応用技術第一部主務。高周波用高出力デバイス応用技術業務に従事。

Discrete Device Div.