

1.8~2.0 GHz帯デジタル方式移動体通信用の高周波デバイス

High-Frequency Semiconductor Devices for Mobile Telecommunication Systems

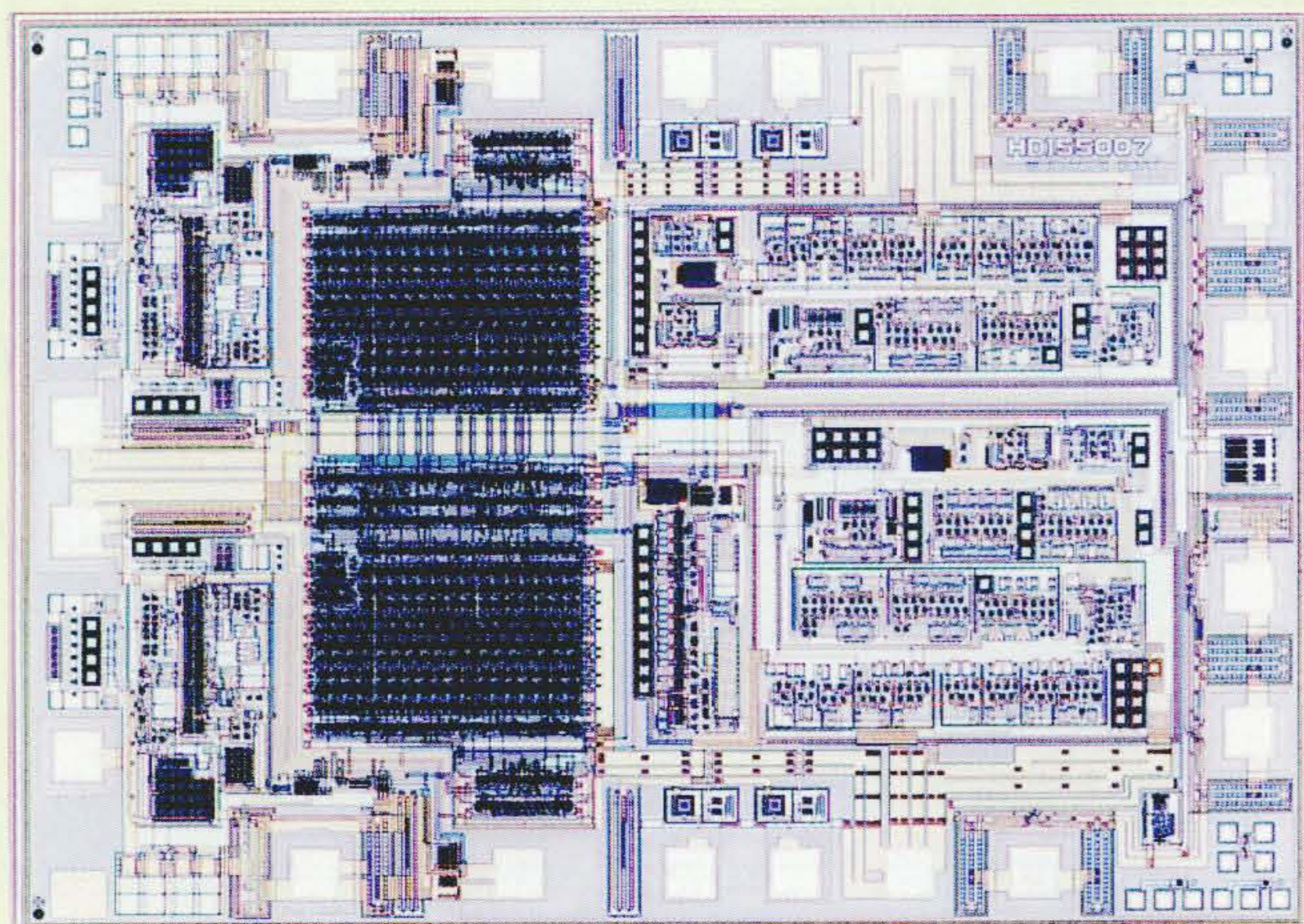
草野忠四郎* Chûshirô Kusano

吉田 功* Isao Yoshida

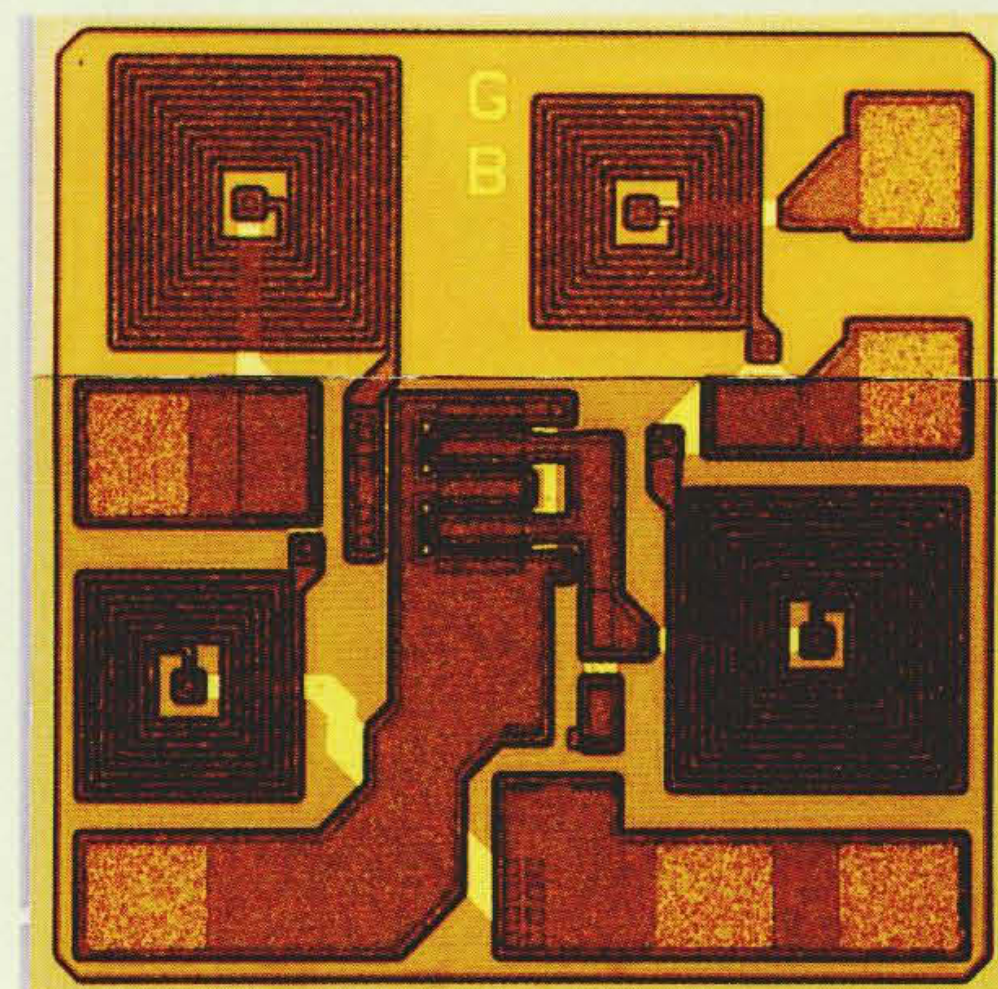
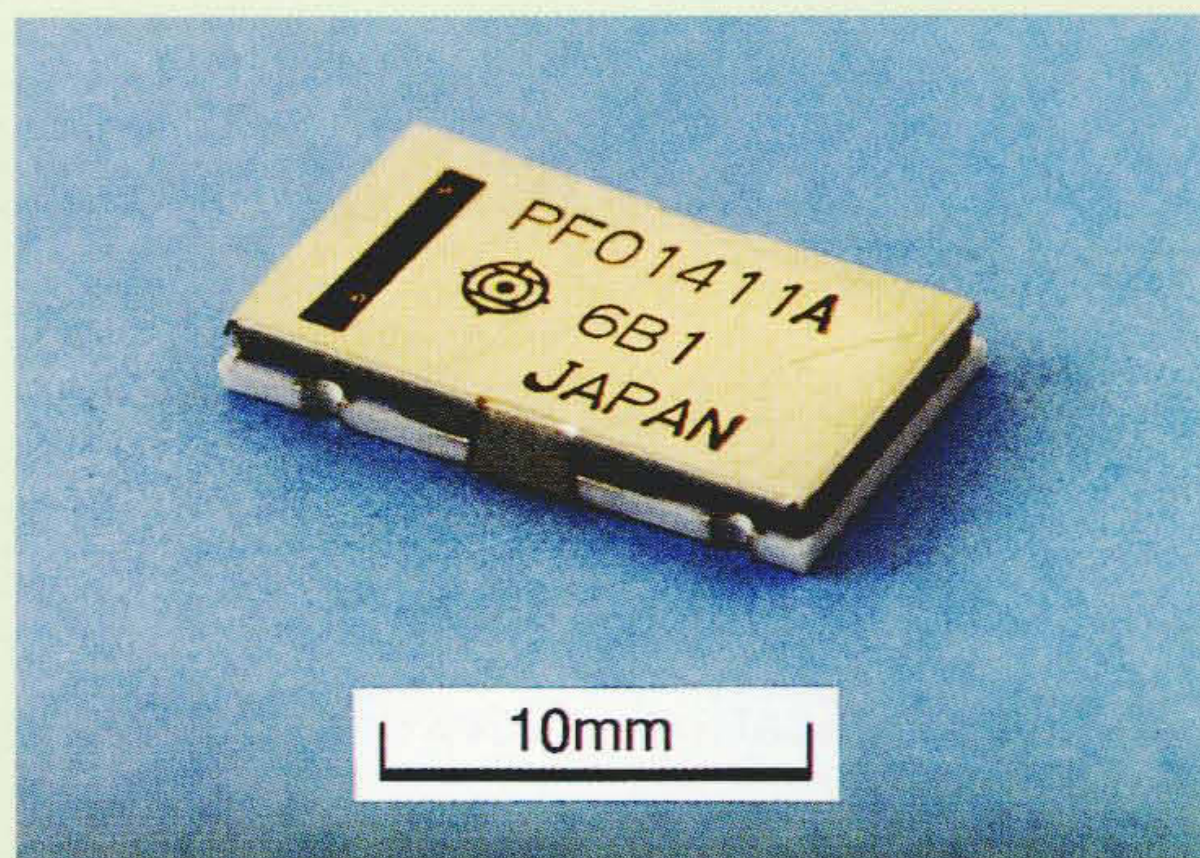
佐藤 和男** Kazuo Satô

河合和彦** Kazuhiko Kawai

Si-MOSFET
高周波電力増幅モジュール



Bi-CMOS周波数シンセサイザIC



GaAs-MMIC (低雑音増幅器)

注：略語説明 MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)
Bi-CMOS(Bi-Complementary MOS), MMIC(Microwave Monolithic IC)

携帯電話機用の高周波電力増幅モジュール、GaAs-MMIC、および周波数シンセサイザIC

新構造Si-MOSFETで電力効率を向上した小型パッケージ高周波電力増幅モジュール、回路設計の最適化によって小型パッケージ化を実現した全整合回路内蔵のGaAs-MMIC、および高周波アナログLSIに適したBi-CMOSプロセスによって低消費電力を実現したPLL(Phase-Locked Loop)周波数シンセサイザICを開発した。

自動車電話、携帯電話などでの移動体通信システムの普及は目覚ましく、利用者の急速な増加が見込まれている。こうした状況に対応するためにアナログからデジタル方式への急速な移行、従来の周波数800 MHz帯を超える1.8~2.0 GHz帯の高い周波数の利用が進むものと考えられる。

一方、小型、軽量で長時間の通話、待ち受け可能な携帯端末を実現するためには半導体部品の高性能化、小型・高集積化が必須課題である。特に電波の受・送信を

行う無線部を構成する高周波デバイスは、周波数帯が高くなるにしたがっていっそうの高性能化が要求される。

こうしたニーズにこたえて日立製作所は、1.8~2.0 GHz帯デジタル方式移動体通信システムへの適用を目指し、新構造Si-MOSFET(電界効果トランジスタ)を用いた小型パッケージ高周波電力増幅モジュール、全整合回路を内蔵した超小型パッケージGaAs-MMIC(マイクロ波モノリシックIC)、および低消費電力のBi-CMOS周波数シンセサイザICを開発した。

*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

いつでも、どこでも、だれとでも情報交換を可能とする移動体通信の普及は目覚ましく、自動車電話、携帯電話の加入者数は、1996年8月時点で、全世界で9,000万人以上、国内で1,700万人以上であり、さらに年率20%前後の増加が見込まれている。現在はアナログ方式とデジタル方式が共存しているが、今後の加入者増加に対応するためにデジタル方式への急速な移行、高い周波数帯の利用が進むものと考えられる。

高い周波数帯利用の動きとしては、従来の800～900 MHz帯から新たに1.8～2.0 GHz帯、具体的には、わが国ではPHS(Personal Handyphone System)、欧州ではPCN(Personal Communication Network)やDECT(Digital European Cordless Telecommunications)、米国ではPCS(Personal Communication Services)のサービスが始められている。特に1.8～2.2 GHz帯は、将来の公衆陸上移動体通信システム“FPLMTS”(Future Public Land Mobile Telecommunication System)用に世界共通の周波数帯として割り当てられており、この周波数帯の利用が拡大するものと思われる(図1参照)。

一方、移動体通信の普及には、小型、軽量で長時間の通話、待ち受け可能な低価格の携帯端末が不可欠である。こうした期待にこたえるためには半導体部品を中心にした電子部品の高性能化、低消費電力化、小型・高集積化が必須であり、積極的な研究・開発が進められている。

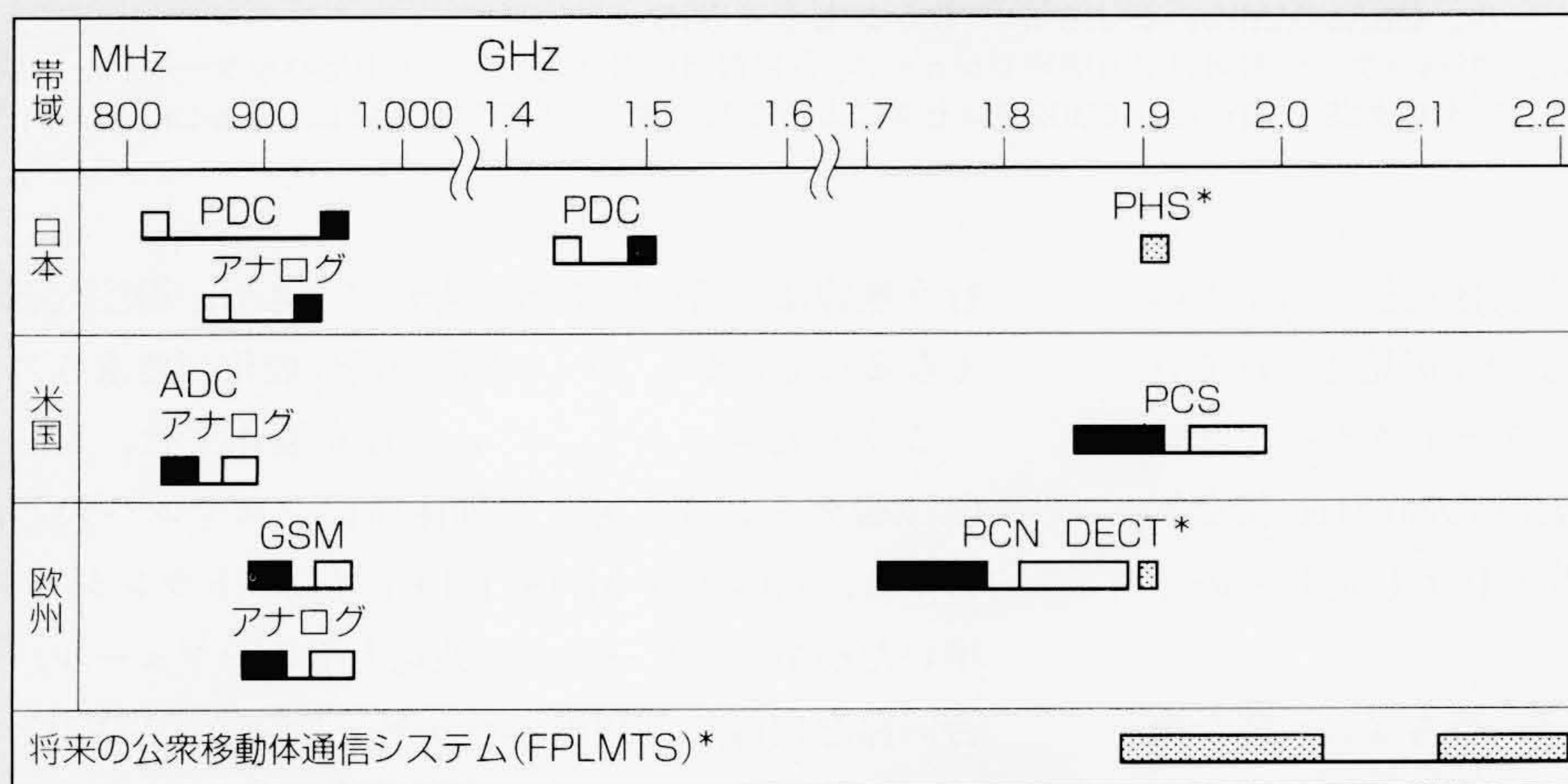
特に電波の受信、送信を行う無線部を構成する高周波デバイスには、周波数帯が高くなるにしたがっていっそうの高性能化が要求されている。こうした要請を受けて日立製作所は、移動体通信用の各種半導体デバイスの製品開発を推進してきた。

ここでは、新たに開発した1.8～2.0 GHz帯移動体通信用高周波デバイス、Si-MOSFET高周波電力増幅モジュール、GaAs-MMIC、およびBi-CMOS周波数シンセサイザICについて述べる。

2. 移動体通信システムと高周波デバイス

携帯電話の基本ブロックダイアグラムとデバイス技術を図2に示す。機能的には電波の送信、受信を行う無線部、音声信号処理および入出力制御を行うベースバンド部で構成している。無線部は高周波部と中間周波部とから成っている。高周波部は電波(1.8～2 GHz)を受信側、送信側に分けるアンテナスイッチ、低雑音増幅器、送信・受信ミキサ、電力増幅器などから、中間周波部は中間周波増幅器、直交変調器、周波数シンセサイザなどでそれぞれ構成している。

携帯電話は、小型、軽量で、長時間の通話、待ち受けが要求される。このため、携帯電話に用いられる半導体デバイスは、高集積、低電圧、低消費電力であることが常に求められる。特に無線部では1.8～2.0 GHz周波数帯になると、800～900 MHz帯に比べていっそうの高性能化が必要である。



注：略語説明ほか

PDC(Personal Digital Cellular)

ADC(American Digital Cellular)

GSM(Global System for Mobile Telecommunications)

■(携帯機送信), □(携帯機受信)

* DECT, PHSは共通, FPLMTSは未定

図1 移動体通信システムの周波数帯域

現状の移動体通信システムでは主として800～900 MHz帯が利用されているが、加入者の増加に対応するために、高い周波数1.8～2.0 GHz帯を利用する新しいデジタルシステムの導入が積極的に進められている。FPLMTSは将来の移動体通信システム用に世界共通の周波数帯として割り当てられている。

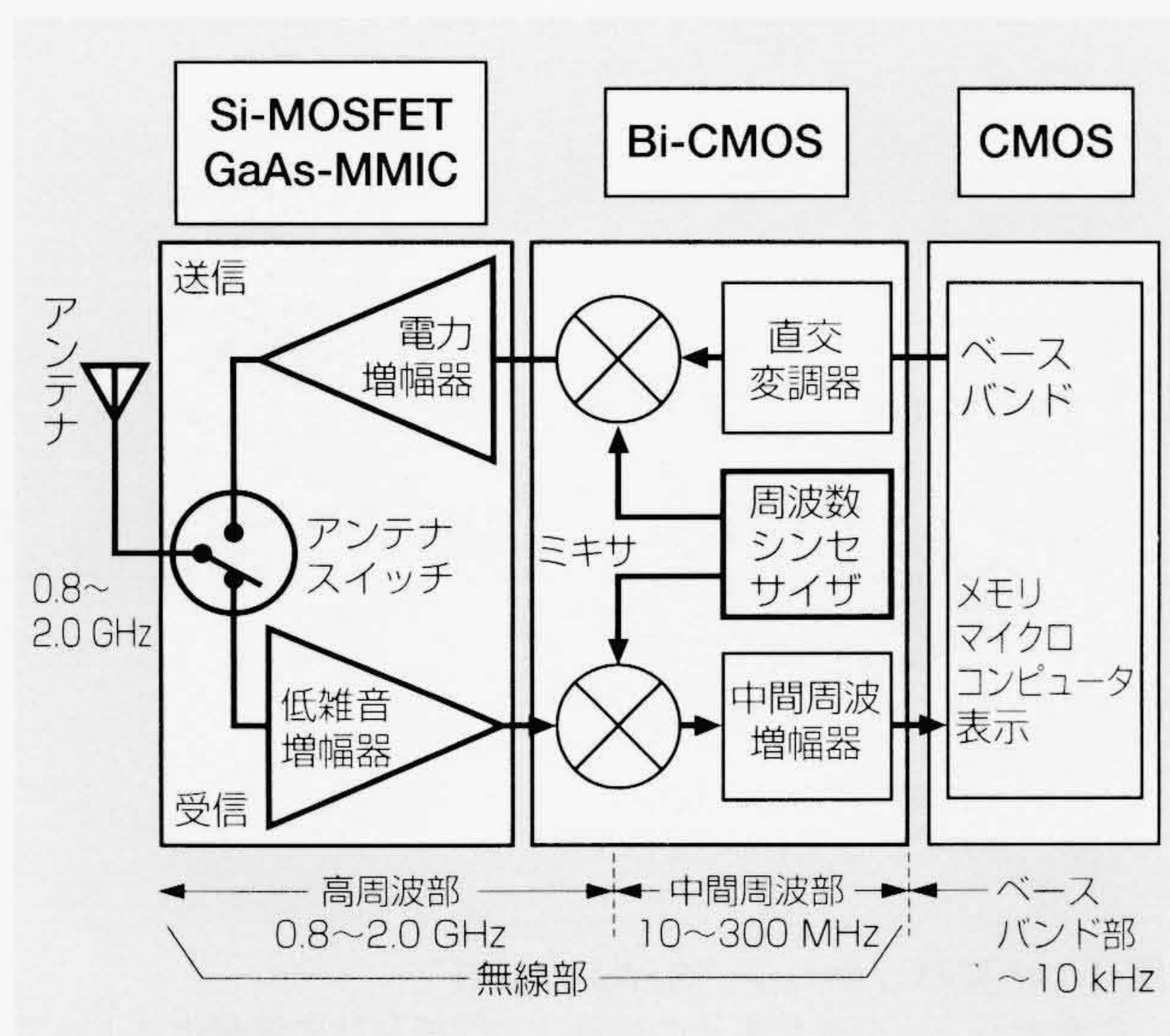


図2 携帯電話の基本ブロックダイアグラムとデバイス技術
携帯電話は、高周波部、中間周波部から成る無線部と、制御、入出力を行うベースバンド部から成っている。高周波部では高周波特性の優れたSi-MOSFET、GaAs-MMIC技術が、高周波性能に加えて高集積が要求される中間周波部ではBi-CMOS技術がそれぞれ用いられている。

具体的な無線部用半導体デバイス技術としては、高出力・高効率動作が可能なSi-MOSFET、低雑音、低ひずみ、低損失のGaAsデバイス、また高周波動作と高集積の両立を可能とするBi-CMOS技術などがある。

3. Si-MOSFET高周波モジュール

日立製作所は、約25年間にわたってSiパワーMOSFETの研究開発を続けてきた(図3参照)。Si-MOSFETは当初、オーディオ用であったが、ゲート材料を多結晶シリコンから金属モリブデン(Mo)に替えることによって高周波性能が飛躍的に向上した。さらに微細加工技術の適用により、Moゲート構造Si-MOSFETの動作周波数を1 GHz以上に改善し、移動体通信システム用携帯電話機に適用できる高効率パワーMOSFET(Lシリーズ)の開発に成功した¹⁾。

Si-MOSFET電力増幅器(高周波モジュール)は、電力利得が高く、単一電源動作、負荷変動に対する優れた安定性を兼ね備え、セットでの回路構成が簡単な点を特徴としている²⁾。最近では欧州デジタルセルラGSM(Global System for Mobile Communications)用携帯電話で広く用いられている。この章では、高い周波数帯利用が進展する中で、1.8~1.9 GHz帯への適用を目指して開発した新構造MOSFET(L4)、および小型パッケージ技術について述べる³⁾。

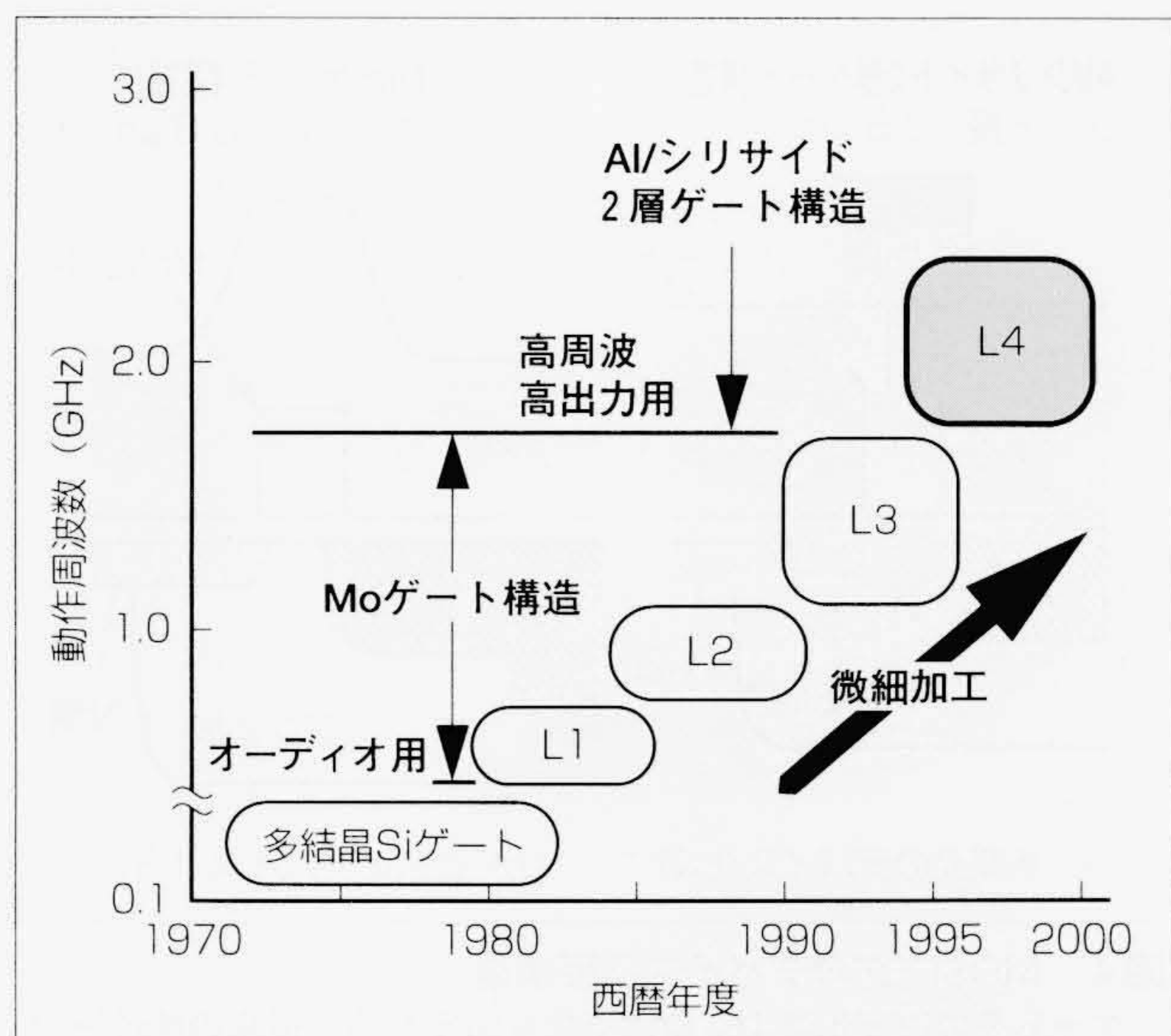


図3 日立製作所での高周波Si-MOSFETの開発推移

Si-MOSFETは当初、オーディオ用であったが、Moゲート構造、微細加工技術により、高周波特性を飛躍的に向上させることができ、800 MHz帯の携帯電話用高効率高出力MOSFETとして製品化に成功した。今回、新たにAI/シリサイド2層ゲート構造を開発し、2 GHz帯へ適用できる高周波MOSFET(L4)を開発した。

これまでのLシリーズMOSFETに用いたMoゲート電極では、 $0.7\ \mu\text{m}$ が量産加工技術としてほぼ限界であり、また、将来の高性能化を可能とするために、L4デバイスではゲート電極構造の変更を行った。L4デバイスと従来デバイスの断面構造を図4に示す。L4デバイスの特徴は、 $0.5\ \mu\text{m}$ に微細化したシリサイドゲート電極とその上に低抵抗のAl電極を形成した、Al/シリサイド間2層ゲート構造にある。この構造により、ゲート長の微細化とゲート抵抗の低減を両立することができ、1.9 GHz、電源電圧4.8 V、ゲート幅7.5 mmの素子で1 W出力、電力付加効率55%が得られ、従来デバイス(L3, $0.8\ \mu\text{m}$ ゲート長)に対して出力で30%、電力付加効率で9%の改善を図ることができた。さらに、1.9 GHz帯PCS用の高周波モジュールを試作した結果、電源電圧4.8 Vで、出力電力2 W、総合効率45%と良好な高周波特性を得た。

携帯電話の小型化要求にこたえるため、高周波モジュールのパッケージ小型化は重要な開発課題である。日立製作所は、これまで表面実装型パッケージ、リフロー対応などの技術を開発し、大幅なパッケージの小型化を実現してきた(図5参照)。さらに今回、多層セラミック基板によるリードレスタイプの新構造K型パッケージを開発した。Kパッケージは容積が約 $0.2\ \text{cc}$ であり、従来比で実装面積では $\frac{1}{2}$ 以下、容積では約 $\frac{1}{3}$ の小型化を達成している。

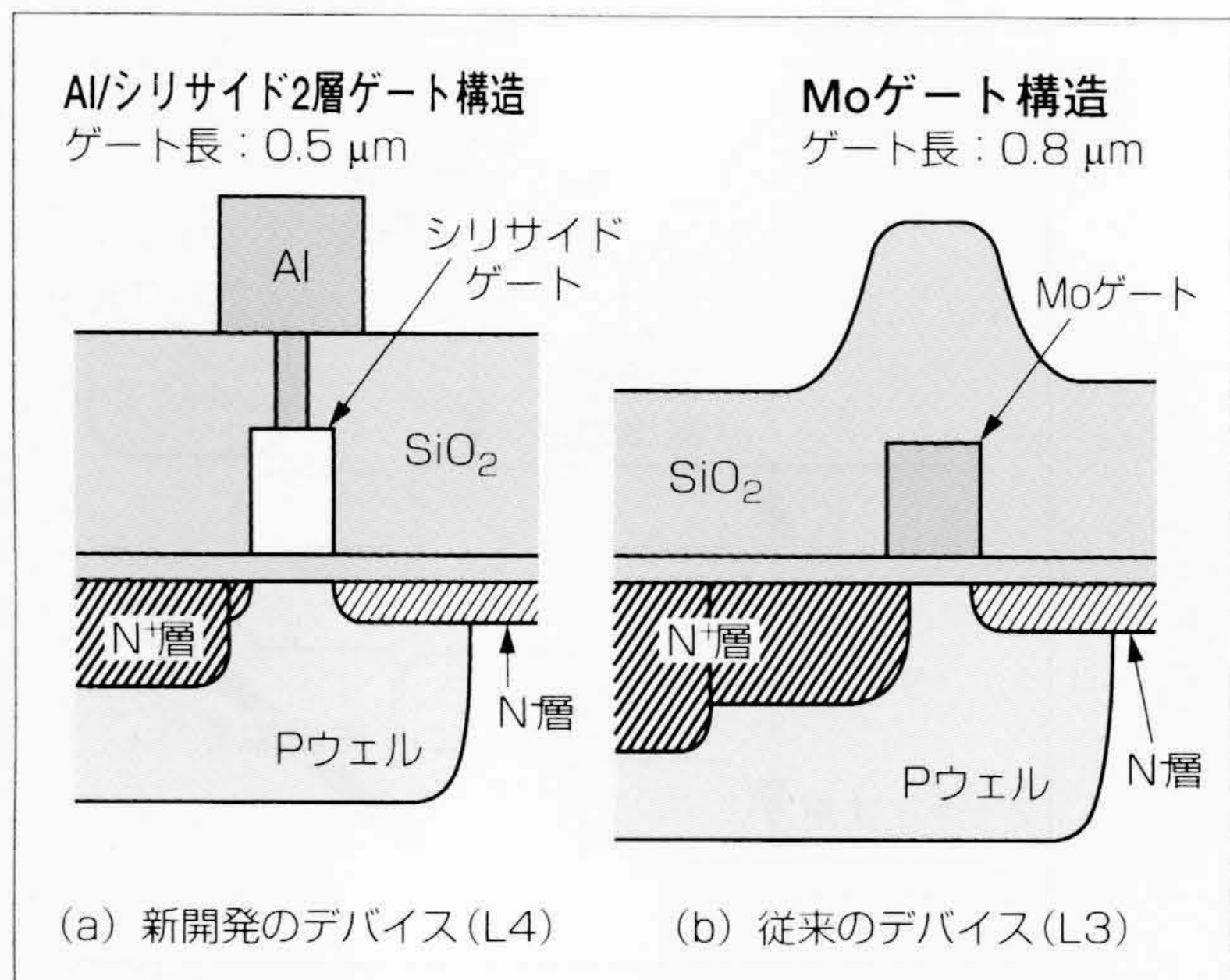


図4 MOSFETのデバイス断面構造

ゲート長の微細化による高性能化を図るため、従来のMoゲート(0.8 μm, L3)に替えてAl/シリサイド2層ゲート構造を開発し、ゲート長0.5 μm化を達成した。

今後はさらに低電圧動作での高周波特性の向上、高機能化を進める考えである。

4. GaAs-MMIC

800 MHz以上の高周波信号を処理する携帯電話の無線部では、電力損失を抑えるため、入出力インピーダンス整合が不可欠である。GaAsデバイスに用いる結晶基板は半絶縁性であるため、GaAsチップ上に低損失の整合回路を形成することができる。このため、外付け部品

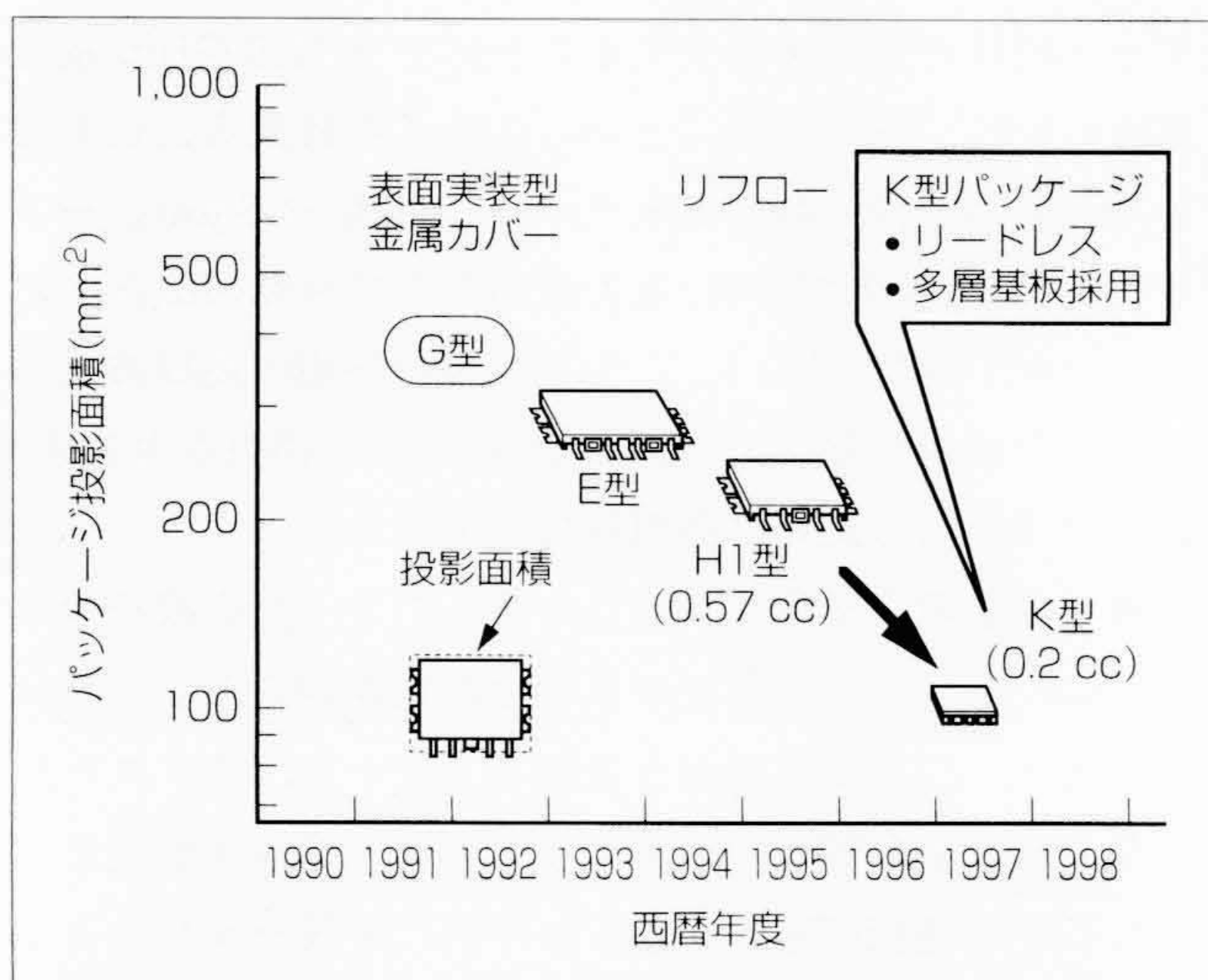


図5 日立製作所における高周波モジュール用パッケージの開発推移

高周波モジュールの小型化へのニーズにこたえるため、新たに多層セラミック基板を採用してリードレスの新構造K型パッケージ(0.2 cc, 従来比約 $\frac{1}{3}$)を開発した。

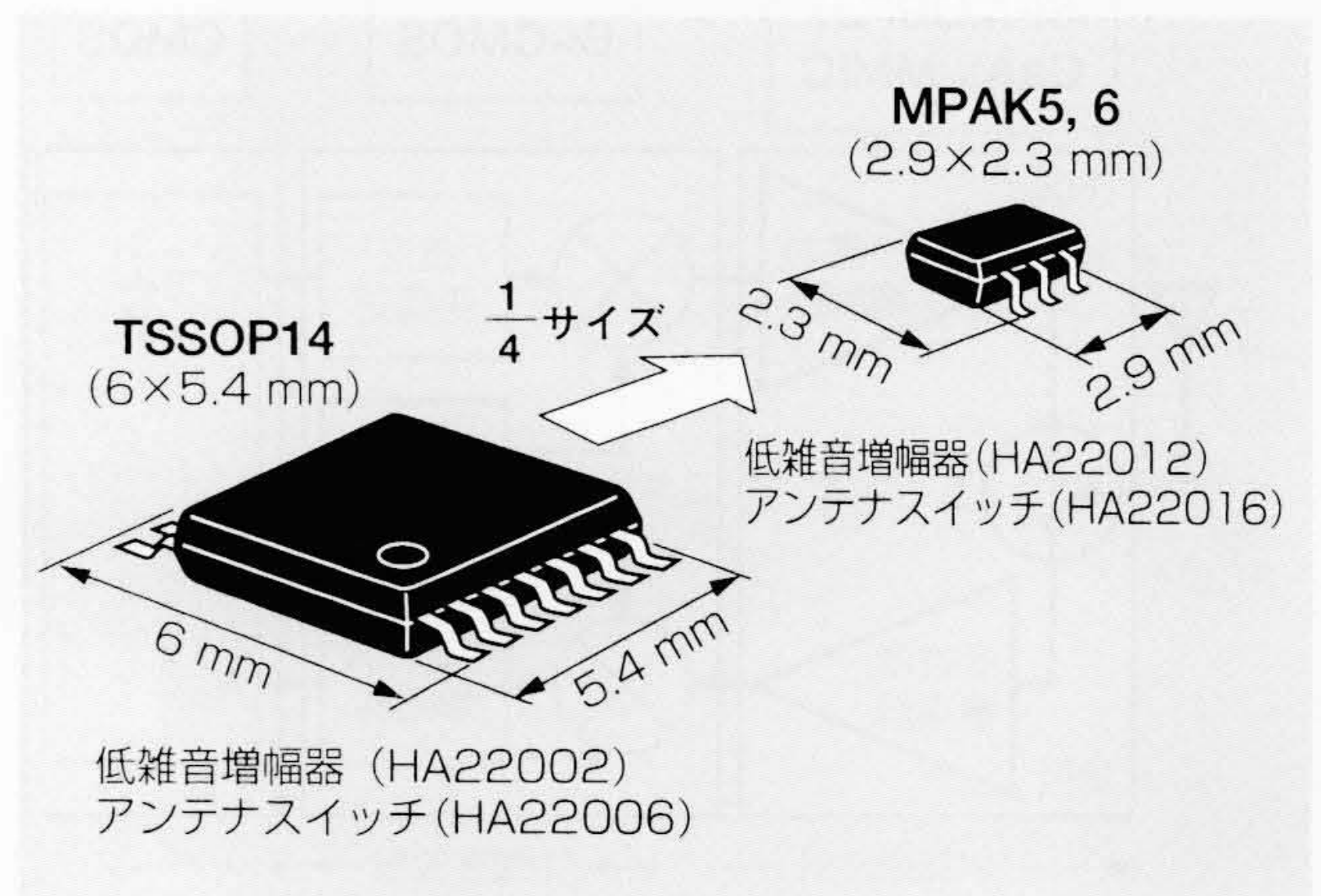


図6 小型パッケージ“GaAs-MMIC”

GaAsチップ上の受動素子の微細化、回路設計の最適化によってチップサイズを低減し、従来比約 $\frac{1}{4}$ の小型パッケージ化(MPAK5, 6)を実現した。

点数の大幅な低減、組立、調整が容易という、Si-LSIでは得難い特徴が実現可能である。

日立製作所は、これらの特徴を持つGaAs-MMICの製品化を目指し、低雑音・低損失GaAs-FET, 厚膜Auめっきによるスパイラルインダクタなどのデバイス、プロセス技術を開発し、1.9 GHz帯用GaAs-MMICチップセットを製品化し量産化した⁴⁾⁵⁾。今回は、小型化へのいっそうの市場要求にこたえるため、パッケージ定数を回路の一部として取り込んだ総合的な高周波回路設計技術を開発し、入出力50 Ω整合回路の内蔵とチップサイズの小型化を両立させて、小型プラスチックパッケージ(MPAK5, 6)への搭載を可能とした。

開発した低雑音増幅器MMIC(HA22012)のチップを21ページの写真に示した。従来技術によるMMICに比べて表面積を約6割に縮小した。その結果、図6に示すように小型パッケージ(MPAK5)を用いることができ、実装面積で当社従来製品(TSSOP14)比約 $\frac{1}{4}$ の小型化を実現している。

HA22012の高周波特性を図7に示す。低雑音特性を実現するために、寄生容量の小さい0.4 μmゲート長デュアルゲートFET構造を用いている。1.9 GHz動作、電源電圧3 V、動作電流3 mAで電力利得13.5 dB、雑音指数1.9 dB、出力インタセプトポイント(IP3)12.5 dBmと良好な特性を示した。

小型パッケージ化(MPAK6)を図ったアンテナスイッチ(HA22016)の特性を図8に示す。送受信時の入出力切換に適用されるアンテナスイッチとしてSPDT(Single-

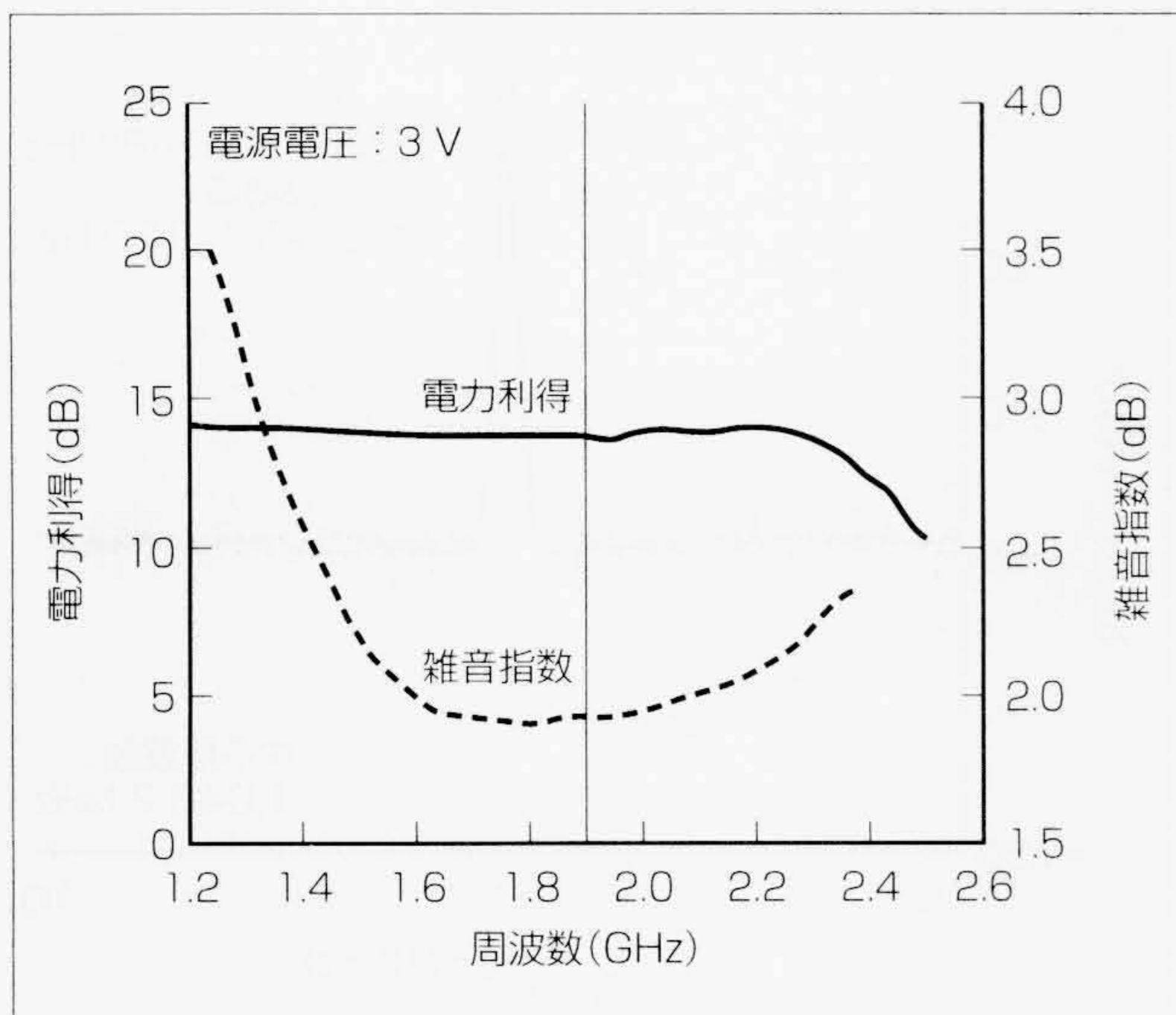


図7 低雑音増幅器MMIC(HA22012, 外形MPAK5)の高周波特性

周波数1.9GHz, 電源電圧3V, 動作電流3mAで電力利得13.5dB, 雑音指数1.9dB, 出力3次インタセプトポイント12.5dBmであり, 良好な高周波特性を示している。

Pole Double Throw) 方式を用いている。要求される特性には, (1) 信号通過時の損失が低い, (2) 大信号動作時のひずみが小さい, (3) オフ時の端子間分離特性が良好(高アイソレーション)などがある。このため, オン抵抗の小さいしきい電圧-2VのFET, 低ひずみ特性を実現するデュアルゲートFET, さらにFETの寄生容量をスパイラルインダクタによって中和する回路形式などを新たに開発

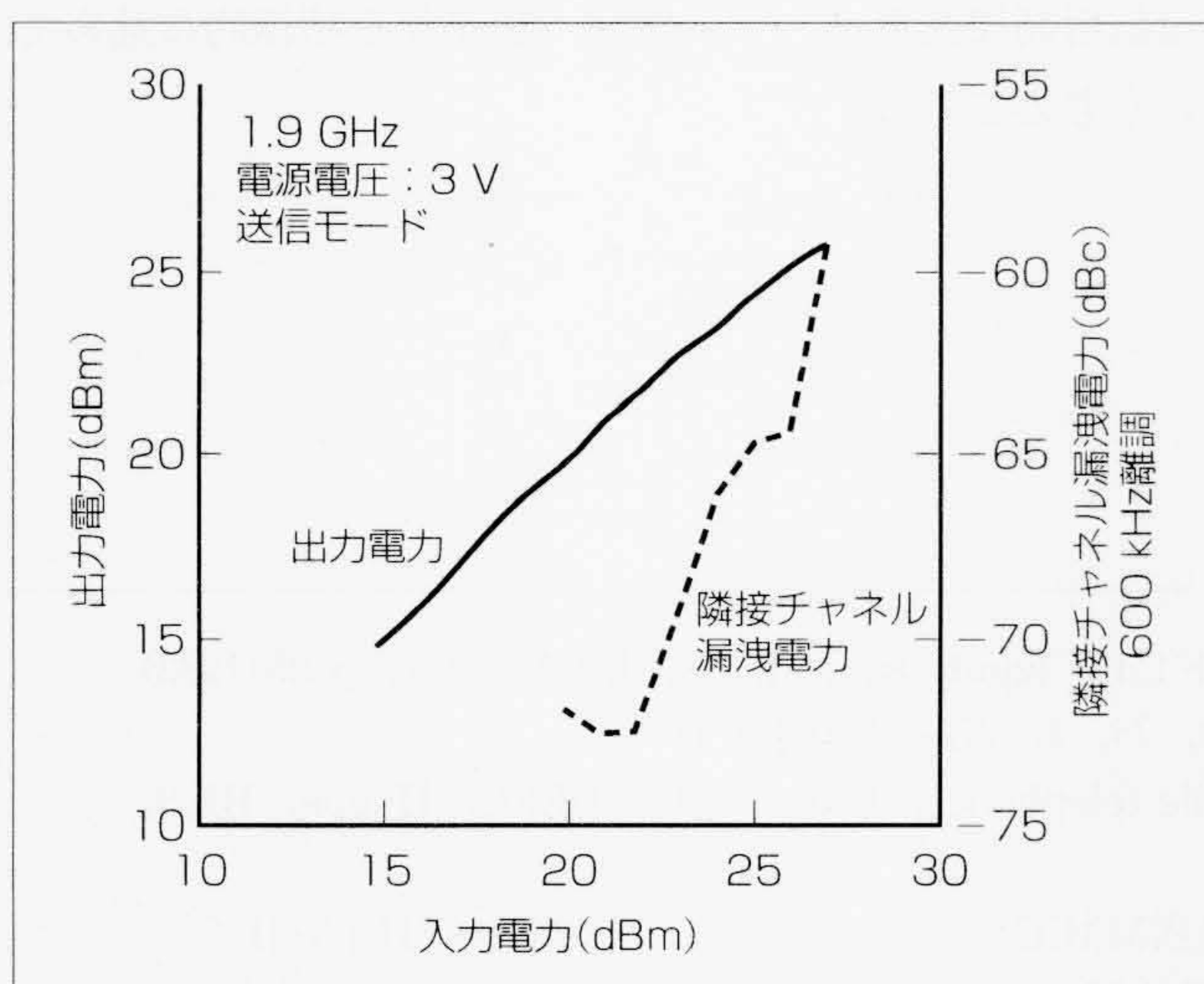


図8 アンテナスイッチMMIC(HA22016, 外形MPAK6)の高周波特性

周波数1.9GHz, 制御電圧3V, 送信モードでの挿入損失0.7dB, 1dB利得圧縮時の出力27dBm, 入力26dBm時 [$\frac{\pi}{4}$ シフトQPSK (Quadrature-Shift Keying) 変調信号] の600kHz離調隣接チャネル漏洩(えい)電力-65dBc, アイソレーション25dBであり, 高周波特性を示している。

した⁶⁾。また, 従来は負電圧制御(0V/-3V)であったが, 信号端子, 接地端子に容量を接続する回路形式のくふうによって正電圧(+3V/0V)制御を可能とした。

今後はパッケージの小型化, 複合機能化をさらに進め, よりニーズにこたえたGaAs-MMICの開発を継続する考えである。

5. Bi-CMOS高周波アナログLSI

中間周波部用半導体デバイスでは, アナログ・デジタル機能の混在と高集積化が要求される。日立製作所は, バイポーラトランジスタの高周波特性とCMOSの高集積性の両方の特徴を持つBi-CMOSプロセス [fT(遮断周波数)=15GHz] による高周波アナログLSIとして, 携帯電話機用PLL(Phase-Locked Loop)周波数シンセサイザ, およびこれらを核とした複合機能LSIの開発・製品化を進めてきた(表1参照)⁷⁾。

今回, 移動体通信システムのアナログ方式からデジタル方式への移行と, 高い周波数帯利用への動きに対応するため, デュアルPLL周波数シンセサイザとして, HD155007T, HD155008Tを開発した。動作周波数の組合せは, HD155007Tが2GHz, 510MHzで, HD155008Tが1.1GHz, 510MHzである。HD155007Tの主要特性を表2に示す。デジタル移動体通信用途を目指して, 低消費電力, 周波数切換時の高速ロックアップ, 低雑音化などを念頭に開発し, 低電圧動作(2.7Vから), パワーセーブモード内蔵, 定電流タイプチャージポンプ回路内蔵などを達成した。

チャージポンプ回路では高精度定電流ドライブ回路を採用し, 電源電圧や周囲温度などの環境条件の変動による位相雑音特性やロックアップ特性の変動の無い回路構成とした。HD155007Tの出力スペクトラムを図9に示

表1 高周波アナログLSI製品系列

携帯電話機用のPLL周波数シンセサイザ, およびこれらを核とした複合機能高周波LSIの開発・製品化を進めてきた。

製品型名	機能	アプリケーション
HD155001BT	1GHz PLL	アナログセルラ
HD155002T	1GHz/130MHz PLL+IF-VCO+送信ミキサ	アナログセルラ
HD155004T	150MHz 全CMOS PLL	アナログセルラ
HD155007T	2GHz/510MHz PLL	PHS用
HD155008T	1GHz/510MHz PLL	GSM用

注: 略語説明

IF-VCO(Intermediate Frequency-Voltage Controlled Oscillator)

表2 HD155007Tの主要特性

デジタル方式, 1.8~2 GHz帯用としてデュアルPLL周波数シンセサイザHD155007Tを開発した。低電圧(2.7 Vから), 低消費電流を実現している。

項 目	特 性
プリスケラ入力最大周波数	2 GHz min. (RF PLL), 510 MHz min. (IF PLL)
基準信号最大入力周波数	20 MHz min.
プリスケラ入力感度	-30 dBm typ.
消費電流	動作時
	12 mA typ.
	パワーセーブ時
	400 nA typ.

注: 略語説明

min. (minimum), typ. (typical)

す。中心周波数1,646.7 MHz, 位相比較周波数は300 kHzで, 位相雑音は-78.6 dBc/Hz (1 kHzオフセット), スプリアスレベルは600 kHzオフセットで-77 dBcと良好な特性を得た。周波数切換時のチャージポンプ電流レベルはHi/Loモードに設定でき, Hiモードで高速にロックアップさせた後, Loモードに切り替えることにより, 高速ロックアップと低雑音特性を両立させることができた。さらにパワーセーブモード解除後のロックアップタイムを短くするため, パワーセーブモードのチャージポンプ回路出力をハイインピーダンス状態としてループフィルタの容量に保持された電荷が保存されるようにした。また, パワーセーブモードでの消費電流を400~500 nAと1 μ A以下に抑えて低消費電力化を図った。

今後はいっそうの高性能, 高機能, 低消費電力化を目指し, PLL周波数シンセサイザを核に, 高周波アナログ機能ブロックを集積化した複合機能・高周波アナログLSIの開発を進めていく考えである。

6. おわりに

ここでは, 急速に普及, 拡大する移動体通信システム

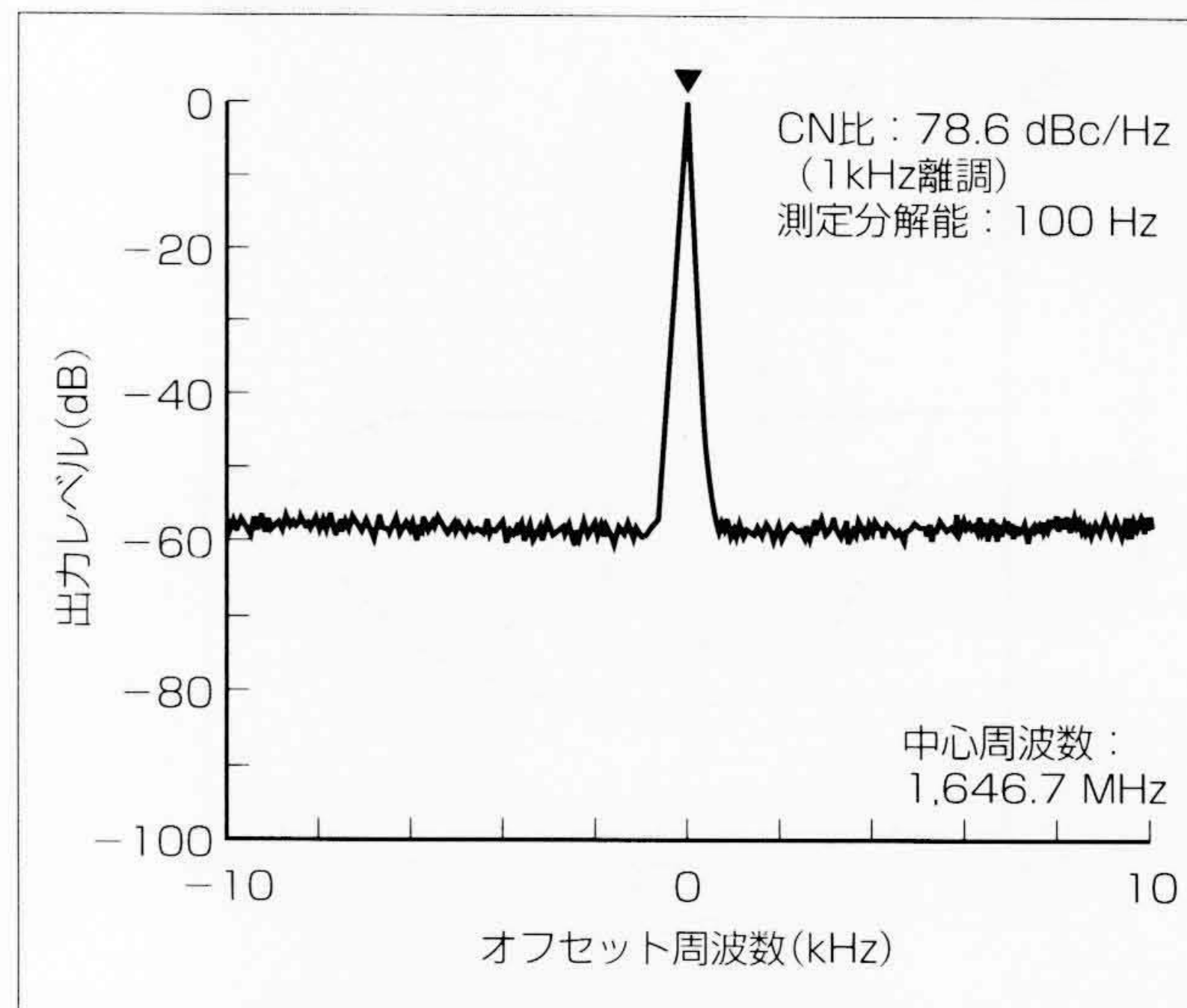


図9 HD155007Tの出力スペクトラム

中心周波数1,646.7 MHz, 位相比較周波数300 kHzで, 位相雑音は-78.6 dBc/kHz (1 kHz離調), スプリアスレベルは-77 dBc (600 kHz離調)であり, 良好な特性を示している。

のキーデバイスであるSi-MOSFET高周波モジュール, GaAs-MMIC, およびBi-CMOS周波数シンセサイザICについて述べた。

移動体通信システムの普及は目覚ましく, すでに, 無線通信機能は携帯電話だけでなくパソコン, 各種PDA (Personal Digital Assistant)に不可欠な機能になりつつある。そのためには, ここで述べた高周波デバイスをさらに高性能, 高集積, 高機能化していくことが必要である。このようなニーズにこたえるため, 今後も移動体通信用高周波デバイスの開発, 製品化を積極的に進めていく考えである。

参考文献

- 1) H. Itoh, et al.: Extremely high efficient UHF power MOSFET for handy transmitter, IEDM, 4.7, p.95(1983)
- 2) 岡部, 外: 高周波電力増幅用MOS・パワーモジュール, 日立評論, 75, 4, 275~280(平5-4)
- 3) I. Yoshida, et al.: A Si power MOS amplifier for PCN mobile telephones, Proc. of ESSDERC, Hague, B1.3, (1995-9)
- 4) 草野, 外: 低消費電力・低雑音のマイクロ波集積回路(ガリウムひ素MMIC), 日立評論, 75, 4, 269~274(平5-4)
- 5) 秋武, 外: デジタル携帯型通信端末用低電圧デバイス, 日立評論, 77, 10, 719~722(平7-10)
- 6) S. Tanaka, et al.: A 3V MMIC Chip Set for 1.9 GHz Mobile Communication System, 1995 IEEE International Solid-State Circuits Conference, Digest of Technical Papers, p.145
- 7) 武井, 外: 高周波対応BiCMOSプロセスと周波数シンセサイザへの応用, 日立評論, 75, 4, 287~290(平5-4)