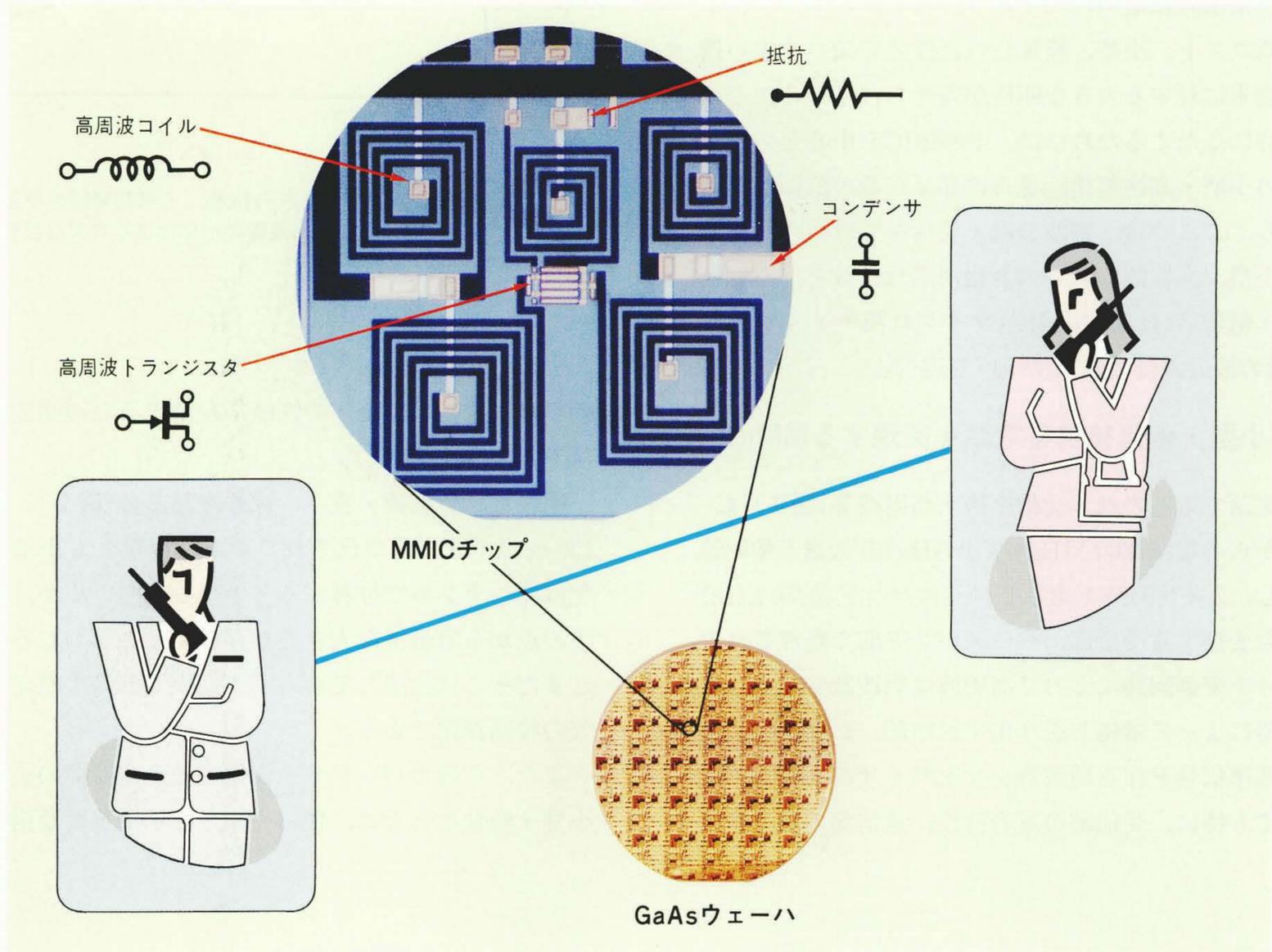


# 低消費電力・低雑音の マイクロ波集積回路(ガリウムひ素MMIC)

Low-Power and Low-Noise Microwave-Monolithic IC(GaAs MMIC)

草野忠四郎\* Chūshirō Kusano  
長谷英一\* Eiichi Hase

坂本和道\*\* Kazumichi Sakamoto  
清水修一\*\* Shūichi Shimizu



GaAs(ガリウムひ素)MMIC トランジスタ、コイル、コンデンサ、抵抗などの個別部品を集積した低消費電力・低雑音のGaAs MMICを用いることにより、小型・軽量かつ低価格の携帯電話が実現できる。

移動通信システムの急速な需要の増大に伴い、小型・軽量、低コストかつ高性能の携帯電話に対する期待が高まっている。日立製作所はこうしたニーズにこたえるため、個別部品による混成集積回路(ハイブリッドIC)で構成してきた高周波部をさらにいっそう超小型・低価格・高性能にするため、低消費電力、低雑音のGaAs(ガリウムひ素) MMIC(マイクロ波モノリシックIC)の研究開発を行っている。

今回、能動素子としては、電子線描画技術などの

最先端プロセスによる高周波特性に優れたGaAs FET(電界効果トランジスタ)を、また、信号電力の伝達損失を最小限にするために、スパイラル型インダクタを使った整合回路技術をそれぞれ開発した。これらの技術によって将来のデジタルセルラーの周波数(1.5 GHz)で電源電圧3 V、動作電流4 mAで電力利得11 dB、雑音指数2.3 dBの低消費電力・低雑音増幅器MMICを実現した。

\* 日立製作所 中央研究所 \*\* 日立製作所 半導体事業部

## 1 はじめに

自動車電話や携帯電話など、ここ数年来、移動通信システムへの需要は世界的に急増している。こうした状況に対応するために、現行のアナログ方式からデジタル方式への技術開発、また周波数帯の高周波化に向けた技術開発が積極的に進められている。一方、ユーザー側からは、低コスト、小型、軽量かつ高性能で使いやすい携帯電話端末に対する大きな期待が寄せられている。こうした期待にこたえるためには、半導体ICを中心とする電子部品の小型・高性能化、さらに部品点数の低減が不可欠である。ここでは、電波の送・受信を受け持つ高周波部での小型、高性能、低コスト化の鍵(かぎ)を握る低消費電力・低雑音GaAs MMIC(マイクロ波モノリシックIC)技術の最近の研究成果について述べる。

## 2 超小型・低価格携帯電話を実現するMMIC

携帯電話で電波の送・受信を担う高周波部(図1)は、基地局からの電波(800 MHz~1.9 GHz)を低雑音増幅器で増幅し、ミキサ回路を通じてベースバンド(約50 kHz)に周波数変換する受信部、ベースバンド部で処理された音声信号を変調回路によって高周波に周波数変換後、電力増幅器によって増幅し送り出す送信部、および周波数変換の基準信号を作る周波数シンセサイザで構成している。中でも特に、受信部の雑音特性、送信部の電力変換

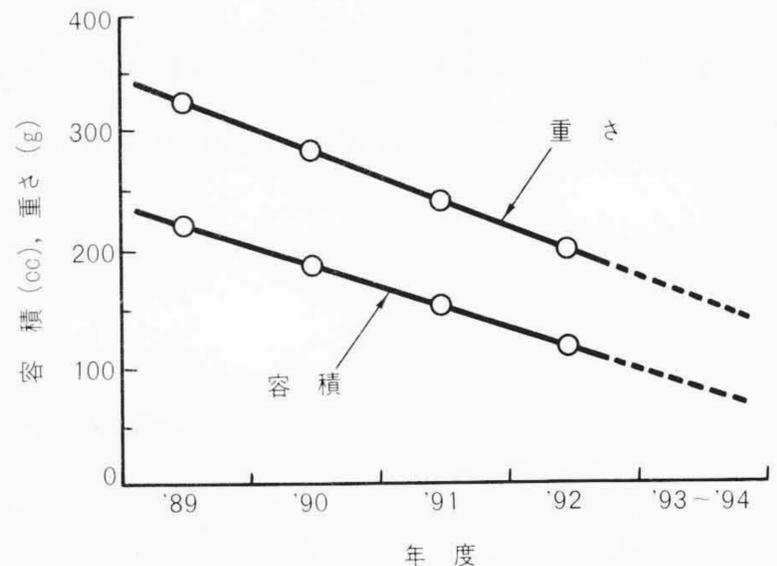
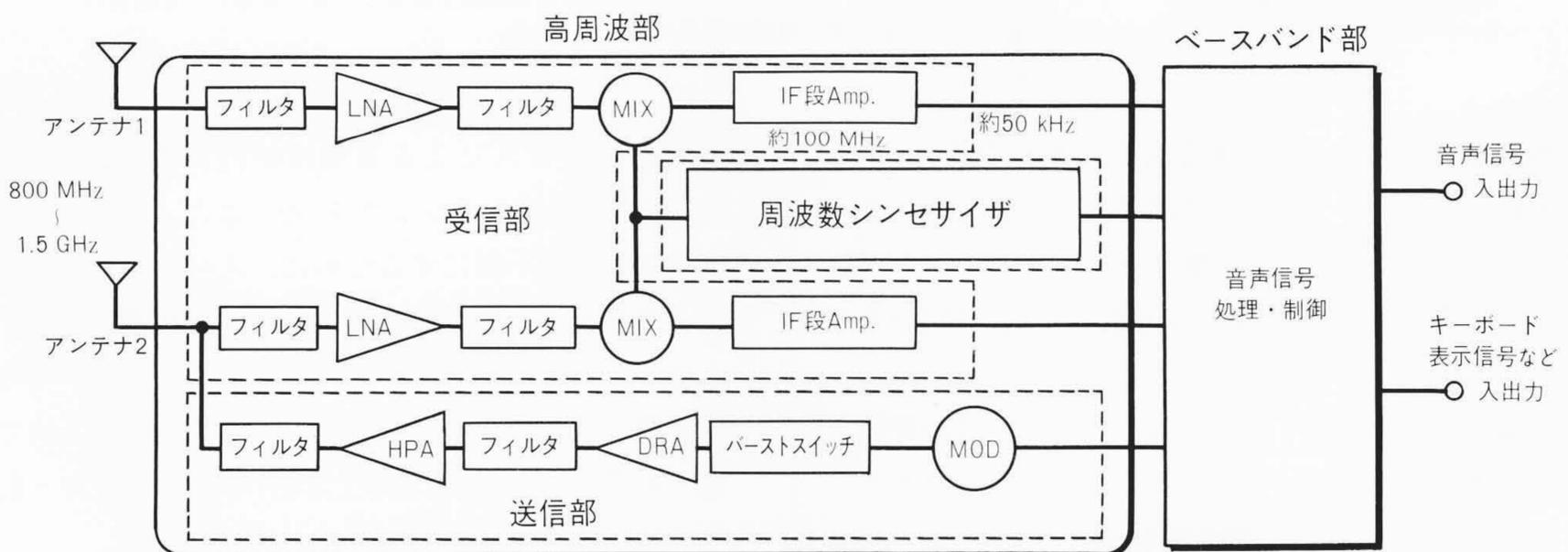


図2 携帯電話の容積・重さの推移 携帯電話の小型・軽量化は急速に進展しており、高周波部の小型化は不可欠な技術課題である。

効率は、携帯電話全体の性能を左右するため高性能化に対する要求が強い。

携帯電話の容積・重さの推移を見ると(図2)、現在約150 cc以下まで小型化されている。今後とも小型・軽量化は同じテンポで推移すると予想されているが、使い勝手の点からは最適な大きさが存在すると思われる。しかしまだそこには達しておらず、高周波部の小型化も不可欠の技術課題である。

また、1回のバッテリー充電で使える時間の長さは、小型・軽量とともに、使いやすさを示す重要な指標であ



注：略語説明 LNA (Low Noise Amplifier ; 低雑音増幅器), MIX (Mixer ; ミキサ回路), IF (Intermediate Frequency ; 数百キロヘルツ~数百メガヘルツ), MOD (Modulator ; 直交変調器), DRA (Driver Amplifier), HPA (High Power Amplifier)

図1 携帯電話の高周波部システム 携帯電話の高周波部システムの概要を示す。受信部のLNA, MIX, 送信部のMOD, パーストSW, DRA, HPAなどでGaAs FET-MMICが使用される。また、IF段Amp.ではSiバイポーラトランジスタが、周波数シンセサイザではLSIが使用されている。

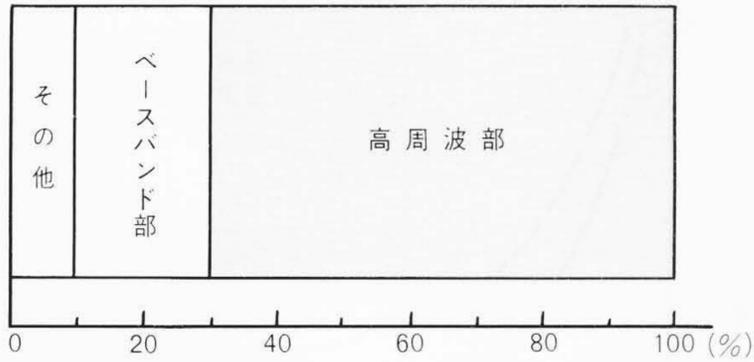


図3 携帯電話の消費電力内訳 携帯電話での消費電力は高周波部が約70%を占めている。高周波部の低消費電力化は使用時間の延長、電池の小型化および本数低減のために重要な課題である。

る。これを決める消費電力の内訳を見ると(図3), 高周波部の消費電力が全体の約70%以上を占めている。高周波部は受信待ち受けのために常時働いているだけでなく、大電力の送信を行わなければならないことによる。さらに、携帯電話を小型・軽量化するためには電池の小型化、本数の削減が不可欠であり、こうした点からも、高周波部の低消費電力化はきわめて重要な課題である。

現在の高周波部は、トランジスタなどの能動素子と、抵抗、コンデンサ、インダクタコイル、フィルタなどの受動素子の個別部品をプリント基板上に実装したハイブリッドICで構成している。ハイブリッドICでは、部品の選択が容易であり、実装後の調整が可能のため良好な特性を得やすいという特長がある半面、設計・組立・調整に熟練した技術と時間を要するため、小型・低コスト化に限界がある(表1)。

従来、10 GHz以上の衛星通信などの分野では少量であ

るがMMICが実用化されていた。最近、移動通信が一般家庭にも手が届くようになって大量の需要が予測され、MMICの研究開発も呼応して盛んになりつつある。MMICは、従来のハイブリッドICを一つの半導体基板上に集積回路プロセス技術を用いて形成するために、小型・軽量だけでなく、本質的に無調整で使用できるポテンシャルを持ち、トータルの製造コストを大幅に低減できる利点が期待できる(表1)。これらを実現するためには、高性能の能動・受動素子、および回路を高精度に設計・製造する技術が必要である。

### 3 高性能MMICの鍵を握るGaAs能動素子とスパイラルインダクタ素子

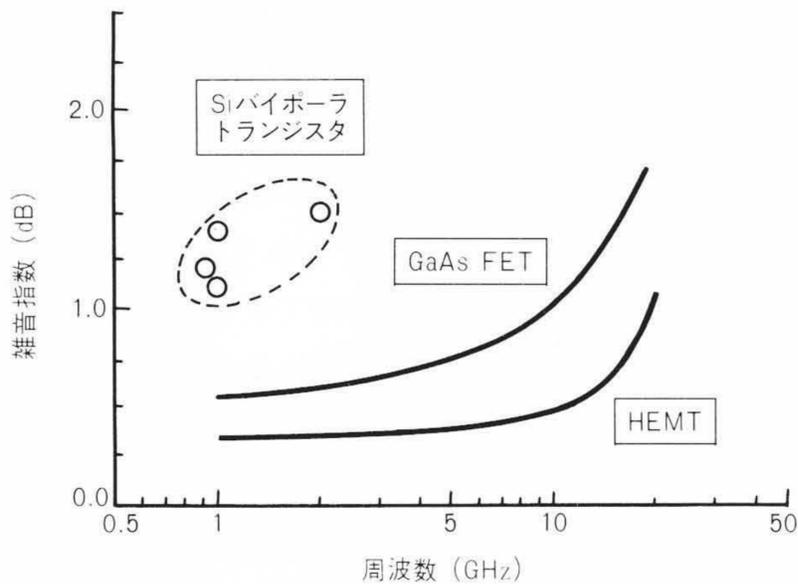
移動通信の高周波部では雑音特性や電力変換効率の優れたGaAs FET(電界効果トランジスタ)が主に使われており、今後、高周波化に向かうことから、GaAs FETの重要性はますます高まると思われる(図4)。MMICの視点からは、GaAs FETを形成するGaAs基板は抵抗が高く、半絶縁性であるため、能動素子だけでなく配線や受動素子と基板との寄生容量が小さくなり、損失の少ない高性能な高周波回路を実現できるという大きな利点がある。

GaAs FETは、半絶縁性GaAs基板上にイオン打ち込み工程によって形成したN型導電層でドレーンからソースに流れる電流を、ゲート電極の電圧で制御することによって増幅作用を得る(図5)。FETの高周波特性は、ゲート電極の長さが短いほど向上することが知られている。日立製作所は、従来の光描画技術に替え、電子線描

表1 MMICとハイブリッドICの特長と開発課題 ハイブリッドICでは、小型化に限界があるが、MMICでは、本質的に超小型化が可能である。また、MMICはチップサイズの小型・高集積化が進み、より低価格化が可能であるばかりでなく、無調整で使用できるなどの利点から、システムトータルとしての低コスト化にも寄与すると思われる。

特長 構造	高性能化	超小型化	低価格化	開発課題
MMIC	現状 ○ → 将来 ◎	現状 ○ → 将来 ◎	現状 △ → 将来 ◎	● 送受信共用1チップ高周波IC ● 整合回路内蔵完全無調整IC
	課題 ● 能動・受動素子の高性能化 ● 高性能回路方式の開発	課題 ● 外付け部品数の低減 ● 高集積化	課題 ● チップサイズの小型化 ● 高集積化による多機能ワンチップIC	
ハイブリッドIC	現状 ○ → 将来 ◎	現状 △ → 将来 △	現状 ○ → 将来 ○	● マイクロハイブリッドチップ実装
	課題 ● 個別部品の選別組立・調整により、高性能化が容易である。	課題 ● 個別部品のため、小型化に限界がある。	課題 ● 組立・調整により、低価格化に限界がある。	

注：記号説明 ◎(優), ○(良), △(可)



注：略語説明 HEMT (High Electron Mobility Transistor)

図4 GaAsデバイスとSiデバイスの雑音特性比較 GaAs FETは、高周波Siバイポーラトランジスタに比べて雑音特性が優れており、携帯電話用MMICの能動素子として最適である。また、衛星放送受信システム用の素子として開発されたHEMTは、さらに優れた低雑音特性を示しており、将来のMMIC用素子として期待される。

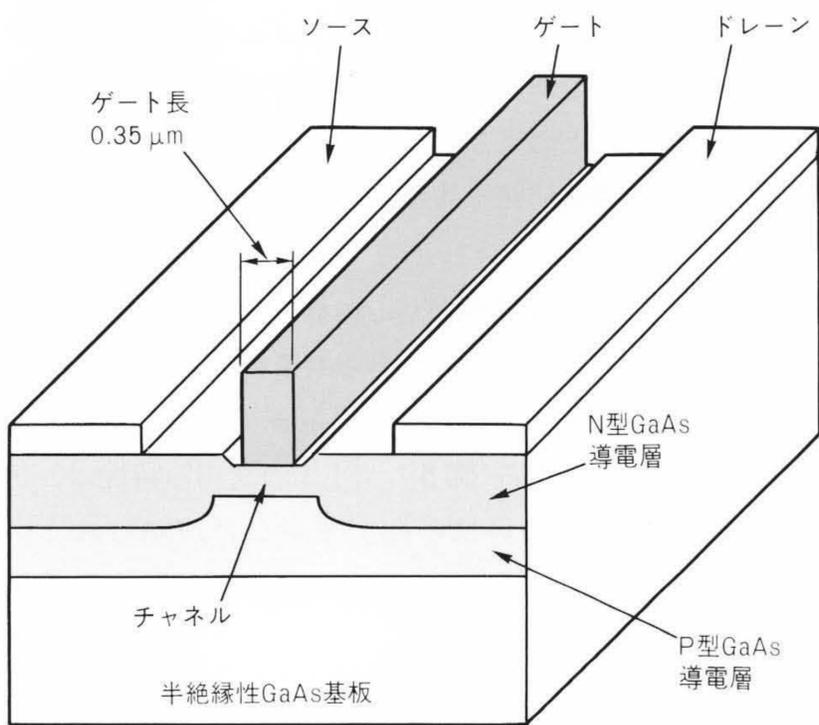


図5 GaAs FETの基本構造 チャンネルは、Siイオン注入で形成されたN型GaAs導電層から成る。なお、電子のチャンネル内閉じ込め効果を得るために、Mgイオン注入でP型GaAs導電層を形成している。また、電子線描画技術によって0.35 μmの微細ゲート電極を形成している。

画技術を用いて0.35 μmという微細ゲート構造を実現した。このようにして作製したGaAs FETでは、日立製作所の従来品に比較して雑音特性が大幅に改善されている(図6)。

移動通信用MMICでは、高い周波数で生じやすい信号電力の損失をできる限り抑えるために、回路の入出力インピーダンス整合が重要である。この整合回路は、コン

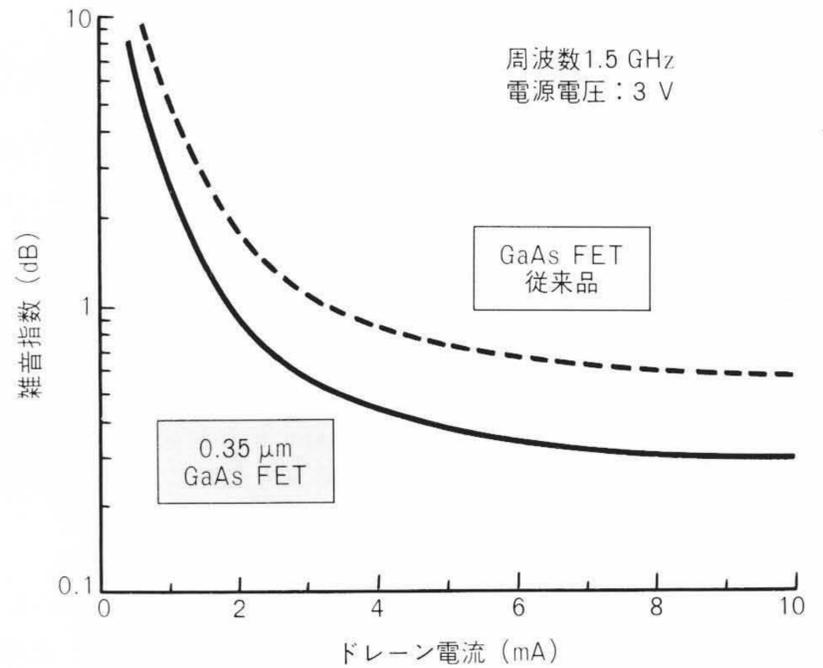


図6 GaAs FETの雑音指数の動作電流依存性 GaAs FETのゲート長を約1 μm(従来品)から0.35 μmに微細化することにより、雑音特性を大幅に改善することができる。

デンサや抵抗のほかに、インダクタを半導体基板上に形成する点で従来のLSIと大きく異なっている。移動通信用のMMICでは数十ナノヘンリー(nH)のインダクタンスが必要であり、通常、スパイラルインダクタが使われている(図7)。スパイラルインダクタでは、できるだけ小さい損失、小さい面積、高い自己共振周波数が要求され、これらを満たすように面積、巻数、配線金属の幅や間隔などの最適化が図られている。

日立製作所は、抵抗による損失を抑えるための厚膜めっき技術による8 μm厚の金配線と、10 μm配線幅・10 μm間隔微細化技術により、高性能スパイラルインダクタを形成する技術を開発した(図8)。10 μmの技術で作製した15 nHのインダクタを見ると、依然として約400 μm角程度と大きいですが、さらに配線幅・間隔の微細化を進めることで、より小型で高性能のインダクタが実現できることを示している。

#### 4 低雑音・低消費電力・低コストを実現するMMIC

##### 4.1 低雑音増幅器

開発した受信部の初段に用いる低雑音増幅器MMICの等価回路とチップを図9に示す。回路方式は、整合回路の回路定数の低減と整合条件の緩和のために、ソース電極と接地間にスパイラルインダクタを挿入した直列帰還型1段増幅回路とした。同図中の写真で明らかのように、チップのほとんどの面積をインダクタが占有してい

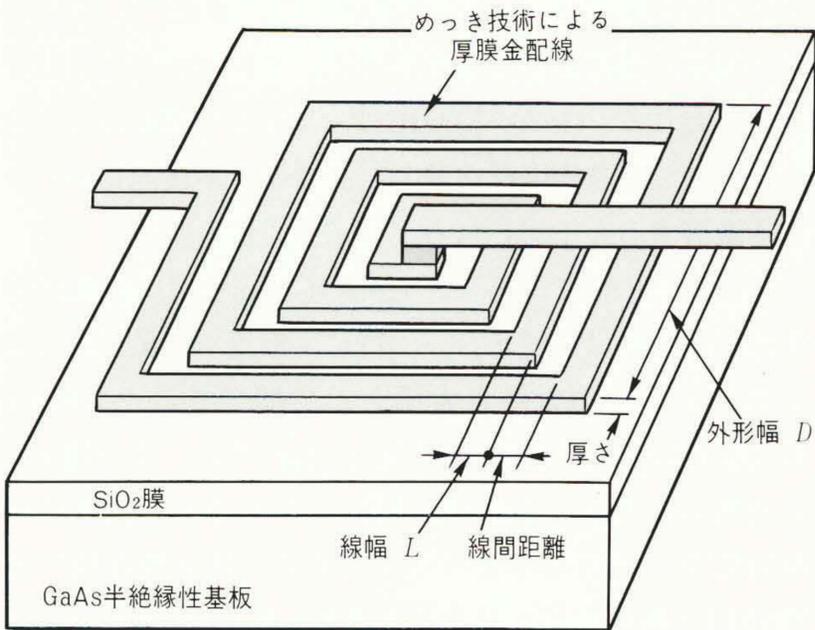


図7 スパイラルインダクタの基本構造 インダクタの特性は、面積、巻数および配線金属の幅と間隔によって決まる。配線抵抗による損失を小さくするために、めっき技術により約8 $\mu\text{m}$ の厚膜金配線を形成している。また、面積を小さくするために、線幅を10 $\mu\text{m}$ 、間隔を10 $\mu\text{m}$ としている。

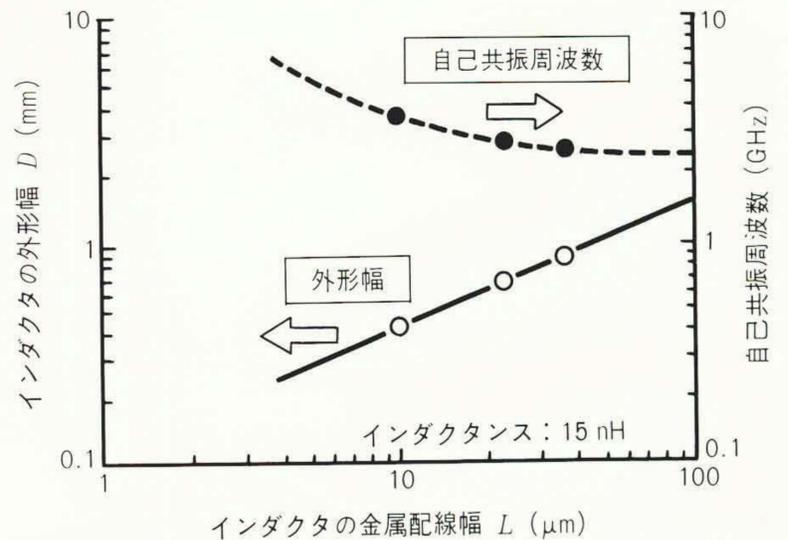
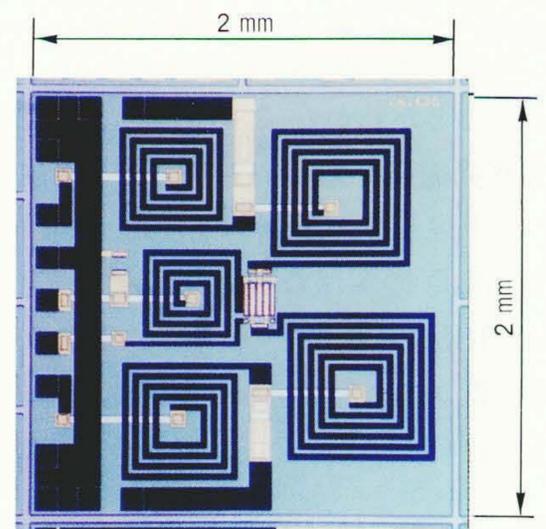
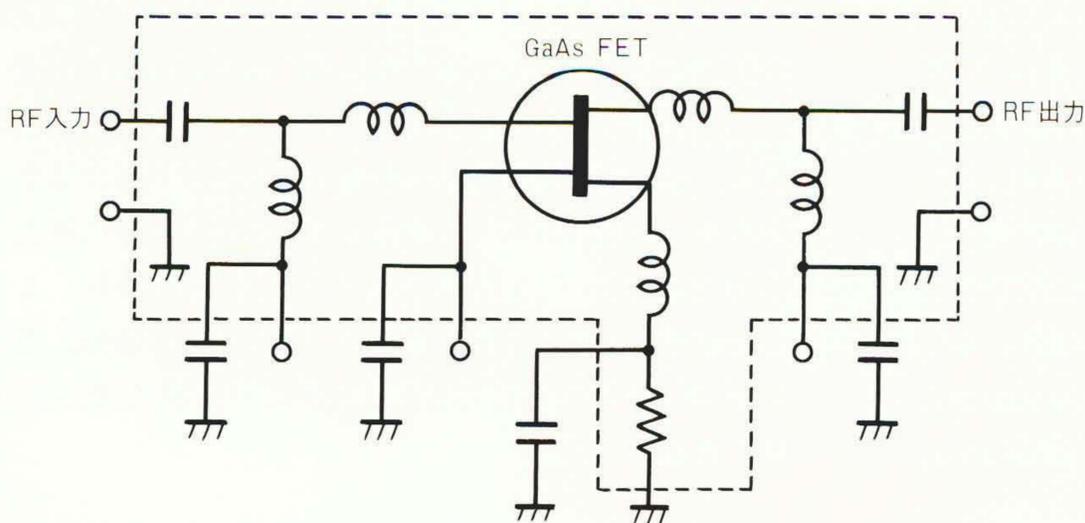


図8 スパイラルインダクタの金属配線幅と外形幅、自己共振周波数との関係 厚膜めっき技術によるスパイラルインダクタの金属配線幅(配線間隔は線幅と同じ)を微細化することにより、同じインダクタ(図では15 nH)を得るための面積は小さくできる。また、自己共振周波数が大きくなっていることから、寄生容量による素子特性の劣化は軽減し、より安定したインダクタンスを得ることができる。

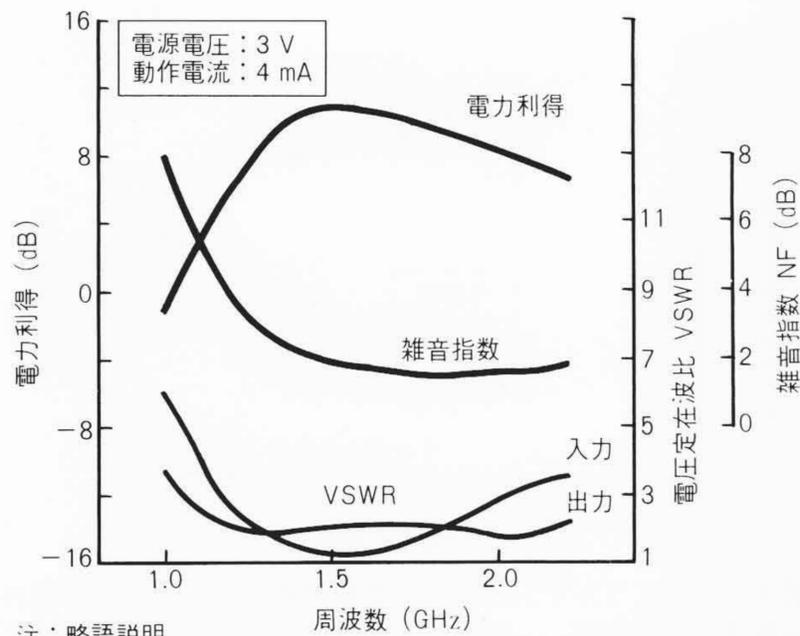
る。トランジスタはゲート長0.35 $\mu\text{m}$ で、寄生容量を小さくできるデュアルゲートFET構造を用いた。しきい電圧は-1 V、相互コンダクタンスは200 mS/mm、最大遮断周波数は約26 GHzであった。5個のスパイラルインダクタを用いているが、直列帰還型方式によって最大でも15 nH、総和を50 nH以下に抑えることができた。コンデンサはMIM(金属・絶縁膜・金属)構造、絶縁膜としてSiO<sub>2</sub>膜を、抵抗素子としてはSiイオン打ち込みによって形成したN型導電層をそれぞれ用いた。チップ寸法は2 mm角であった。

低雑音増幅器MMICの電力利得、雑音指数の周波数依存性を図10に示す。周波数が1.4~1.7 GHzの範囲で、電力利得は11 dB以上、雑音指数は2.3 dB以下と良好な特性を持ち、電源電圧3 V、動作電流4 mAという低い消費電力で実現している。信号の反射損失を表す入出力定在波比が2.2以下と小さい点は、スパイラルインダクタを用いた整合回路が良好に動作していることを示している。これらの特性は、現在、携帯電話に使われているハイブリッドIC型低雑音増幅器よりも優れており、十分に実用可能である。



注：略語説明 RF (Radio Frequency)

図9 低雑音増幅器MMICの等価回路およびチップ 0.35 $\mu\text{m}$ デュアルゲート構造のGaAs FETを用いた直列帰還型1段増幅回路で、破線枠内をチップ上に形成している。チップサイズは約2 mm角である。



注: 略語説明

VSWR (Voltage Standing Wave Ratio), NF (Noise Figure)

図10 低雑音増幅器MMICの利得, 雑音の高周波特性 周波数1.5 GHz, 電源電圧3 V, 動作電流4 mAで, 電力利得が11 dB, 雑音指数が2.3 dBと, 低消費電力・低雑音特性が得られている。VSWRは2.2以下と小さく, スパイラルインダクタを用いた整合回路が良好な特性であることを示している。

#### 4.2 低コスト化に適したMMIC技術

これまでの開発により, MMICによってハイブリッドICと同等以上の高性能を得られることが明らかになった。一方, コスト面について見ると, 今後解決しなければならないいくつかの課題がある。MMICの低コスト化は, GaAs基板が大幅に安価になった現在, 製造プロセスの歩留り向上と半導体チップサイズの小型化とによってほぼ決まる。今回開発したMMICは, デバイス, 回路方式ともに簡易構造で高性能を実現できる点を特長としており, 製造プロセスでは高い歩留りが期待できる。しかし, 先の図9に示したように, 微細化技術を用いたにもかかわらず, スパイラルインダクタが依然としてほとんどの面積を占めており, インダクタの小型化が鍵(かぎ)であることがわかる。このような課題に対し, 今後, 積極的な研究開発を進めて解決していく方針である(表1)。

以上述べてきたように, 多くの機能を持つ高性能部品を, 単純化された製造プロセスで作ることのできるMMICは, これまでのシリコンLSIの歩みと同様に, 本質的に低コスト化に適した技術であり, 使いやすさの面からも今後ハイブリッドICに置き換わっていくと予想される。

#### 5 GaAs MMICの将来動向

移動通信システムは携帯電話だけでなく, 今後, 無線LAN, WANなどデータ通信へも用いられるので, 大き

な需要が予測される。これに伴って, 無線端末の超小型・軽量, 超低消費電力化へのニーズはますます増大すると思われる。GaAs MMICは, こうした潮流にこたえる技術として技術開発が進み, 高性能・多機能化がますます進展すると予想される。

高性能化の面で見ると, 近年のGaAsを用いた能動素子の性能向上は目覚ましい。特に, 最近, 衛星放送受信システム用の超低雑音素子として開発されたHEMT (High Electron Mobility Transistor)<sup>※</sup>は, 先の図4からも明らかのようにGaAs FETよりもさらに高性能のMMICを実現できるデバイスである。日立製作所でもHEMTの研究開発と製品化を推進しており, トランジスタレベルでの量産技術を確立している。また, HEMTの優れたトランジスタ特性は受動素子, 特にインダクタの小型化を可能とし, 低コスト化につながる利点を持っている。現在, GaAs FET-MMICの3倍から4倍の高性能が予測されているHEMT MMICを研究中である。

MMICの多機能化による部品点数の低減は, 小型・軽量化だけでなく, 低コスト化に不可欠である。今後は, 現状の機能ブロック別MMICから, 多機能化を目指した高集積MMICへの技術開発が進むものと予想される。さらに, SAW(表面弾性波)素子などのフィルタ素子, 周波数シンセサイザをMMICとマイクロハイブリッド化する超小型1モジュール高周波ICへも発展していくと思われる。

#### 6 おわりに

移動通信システムでの携帯電話の小型・軽量・低コスト化を目指した低消費電力, 低雑音GaAs FET-MMICについて述べた。MMICは, 多くの機能を一貫した製造プロセスで同一半導体基板上に同時に大量に製造する, 本質的に低コスト化に適した技術であり, 今後, 高性能・多機能化を目指した技術開発がますます加速すると思われる。MMICの携帯電話への適用はまだ始まったばかりであり, 小型化のニーズが強くなるこれからその特長が発揮されていくと予想される。日立製作所は, こうした市場ニーズにこたえるため, 高性能, 多機能, さらに低コストのMMICの早期開発に取り組んでいく方針である。

※) HEMTは, 1980年に富士通株式会社が開発したGaAsデバイスである。