

限りなく低雑音に挑むBS受信システム用半導体

Challenge of Cutting Noise in Semiconductor Devices for BS Receiver-system

岡部健明* Takeaki Okabe
坂本和道** Kazumichi Sakamoto
中込英明*** Hideaki Nakagomi
宇野康雄** Yasuo Uno



衛星放送受信装置 低雑音HEMTを搭載したBSコンバータとアンテナ、BSチューナによって美しい画像が受信できる。BSチューナはテレビジョン、ビデオに内蔵され操作性を高めている。

日立製作所は衛星放送受信システムの高性能・小形化を目的に、低雑音素子HEMT(High Electron Mobility Transistor)をはじめ、GaAsミキサダイオード、増幅用やチューナ用GaAs IC、FM復調IC、高周波トランジスタおよび可変容量ダイオードを開発し、製品化している。低雑音HEMTは、受信システムの初段に使われ、その雑音特性はシステム全体の

性能を左右する。電子線描画、最先端のプロセスを駆使して、12 GHzの雑音指数0.6 dBの2SK1844、より低雑音(0.55 dB)を実現した2SK1977、および低コストなレジンパッケージ品2SK1845を開発した。さらに、低局発信号漏えいのミキサダイオード、約200素子を集積したチューナICを、高周波特性に優れたGaAsの採用および素子の最適化によって実現した。

* 日立製作所 半導体設計開発センタ 工学博士 ** 日立製作所 半導体設計開発センタ *** 日立製作所 甲府工場

1 はじめに

BS (Broadcasting Satellite : 放送衛星) を用いたテレビジョン放送や音楽放送受信システムは、わが国と欧州を中心に大きな市場を形成している。わが国では、平成3年8月に打ち上げられた放送衛星BS-3bの成功と、これを用いたハイビジョンの試験放送などで、さらに普及にはずみをつけるものと期待されている。さらに、放送ソフトの充実化、多チャンネル化に加え、最近では通信衛星による放送サービスも計画されており、BS放送とともに大きなビジネスに発展するものと期待されている。

一方、家庭での受信システムにはアンテナの小形化、平面アンテナの採用が進められていると同時に、高品質な映像、音声への要望も強い。さらに、BSチューナのテレビジョン受像機、VTRへの内蔵化も進められており、小形・低消費電力化も必要となっている。

BS受信システムは、アンテナ、BSコンバータ(屋外ユニットとも呼ばれる。)およびBSチューナ(屋内ユニットとも呼ばれる。)とで構成されている(口絵、図1)。衛星から送られてくる12 GHzの微弱な電波はアンテナの反射によって一次放射器に集められ、BSコンバータへ送られる。BSコンバータでは微弱な信号を増幅した後、1 GHz帯の第一中間周波数に変換し、屋内にあるBSチューナへ送信する。BSチューナでは希望のチャンネルを選択し、映像信号および音声信号を再生し出力する。

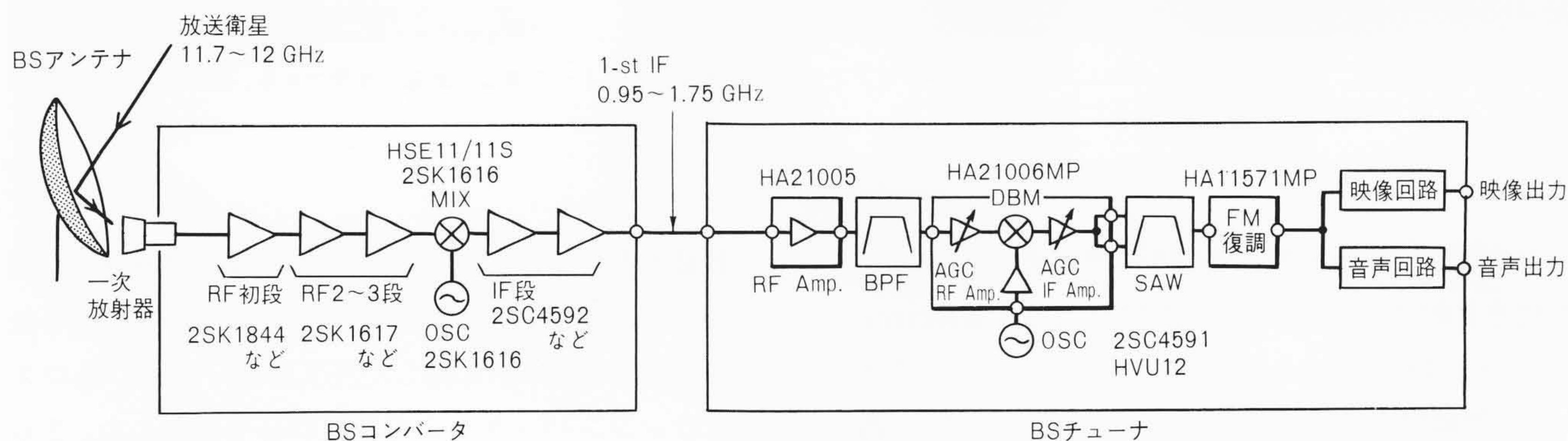
高品質な映像や音声を再生するためには、まず第一にBSコンバータの雑音特性やひずみ特性が重要になる。雑音特性は、初段の増幅素子の特性に大きく左右され、HEMT(High Electron Mobility Transistor)^{※)}と呼ばれる低雑音素子が使用されている。また、ミキサダイオードの変換損失特性や中間周波増幅素子の低雑音化も重要であり、これらデバイスの特性改善は絶えず続けられている。

BSチューナは、小形・低消費電力の要求のほかに共同受信に使われることが多いことから、低ひずみ特性と低局発信号漏えい特性が要求される。このため、周波数変換部に低雑音、低ひずみ特性を持つGaAs ICの使用や、FM復調部の1チップIC化が進められている。高周波増幅部および周波数変換部には、おのおのGaAs IC HA21005, HA21006MPを、FM復調部にはシリコンIC HA11571MPをそれぞれ開発した。集積回路を含め、日立製作所で製品化しているBS受信システム用デバイスの外形を図2に示す。

ここではHEMTの低雑音化技術、ミキサダイオードの高性能化技術、GaAs ICおよびFM復調ICの主な特性について述べる。

2 高品質な映像を実現する低雑音素子HEMT

HEMTは、半絶縁性GaAs基板上に形成した高純度GaAs層とN形AlGaAs層との間に電流通路となるチャ



注：略語説明 MIX (Mixer), RF (Radio Frequency), IF (Intermediate Frequency), DBM (Double Balanced Mixer), BPF (Band Pass Filter)
AGC (Automatic Gain Control), SAW (Surface Acoustic Wave), OSC (Oscillator)

図1 BS受信システム BS受信システム概要図を示す。BSコンバータ部にはHEMT, GaAsショットキーダイオード, 高周波バイポーラトランジスタが、またBSチューナ部にはGaAs IC, シリコンIC, 可変容量ダイオードなどがそれぞれ使用される。

※) 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。

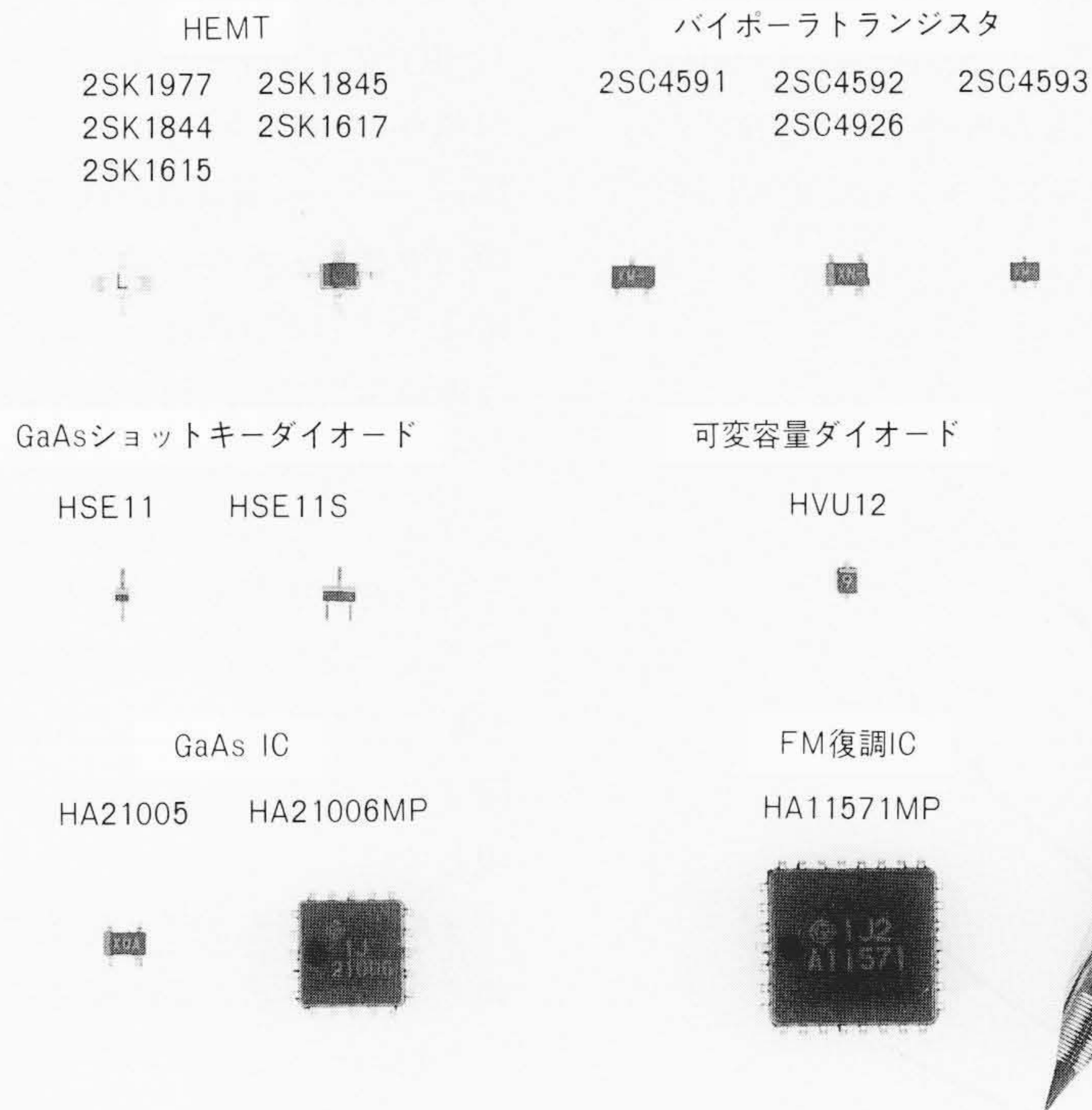


図2 BS受信システム用半導体素子外形
子はレジン外形である。

HEMTは、セラミックおよびレジン外形がある。他の素

ネルを形成したもので、表面に形成したゲートの電圧で、チャンネルの導電度を変化させ、増幅作用を得ている(図3)。チャンネルが形成されているGaAsには不純物が含まれていないので、電子は走行中に不純物散乱を受けず、高い移動度を示す。したがって、高周波に対し大きな増幅度が得られ、さらに、雑音の原因となる抵抗を低減できるなど、高周波素子として本質的に優れた性質を持っている。これがHEMTが12 GHz帯で、低雑音素子として用いられる大きな理由である。これらの特長を引き出し、実用的な素子を実現するためには、良質な結晶基板の使用や素子設計が重要である。

GaAs基板上への高純度GaAs、N形AlGaAsなどの形成は、原子層単位の成長制御が可能な、分子線エピタキシアル法を用いた。その結果、急峻(しゅん)なGaAs/AlGaAs接合を得ることができ、移動度の大きなチャンネルが得られた。また、各層の不純物プロファイルを最適化し、高品質なHEMT基板を得た。

高周波領域で高利得、低雑音を達成するためには、ゲート電極直下のチャンネルの寸法を短くすることによって電気抵抗を低減し、高電流化する手法がとられる。これは、ゲート電極の寸法を電子ビーム描画を用いて、0.2 μm

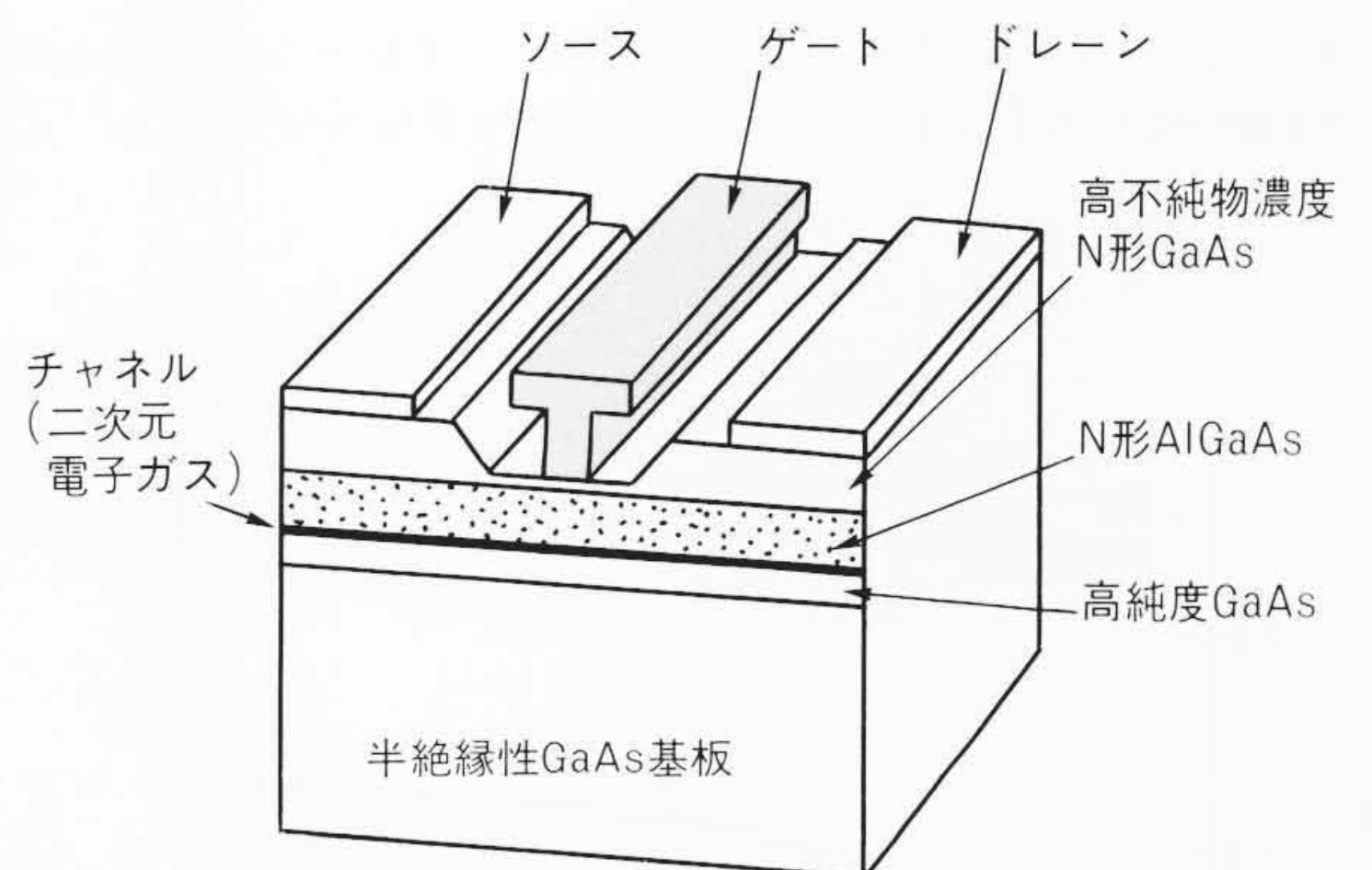
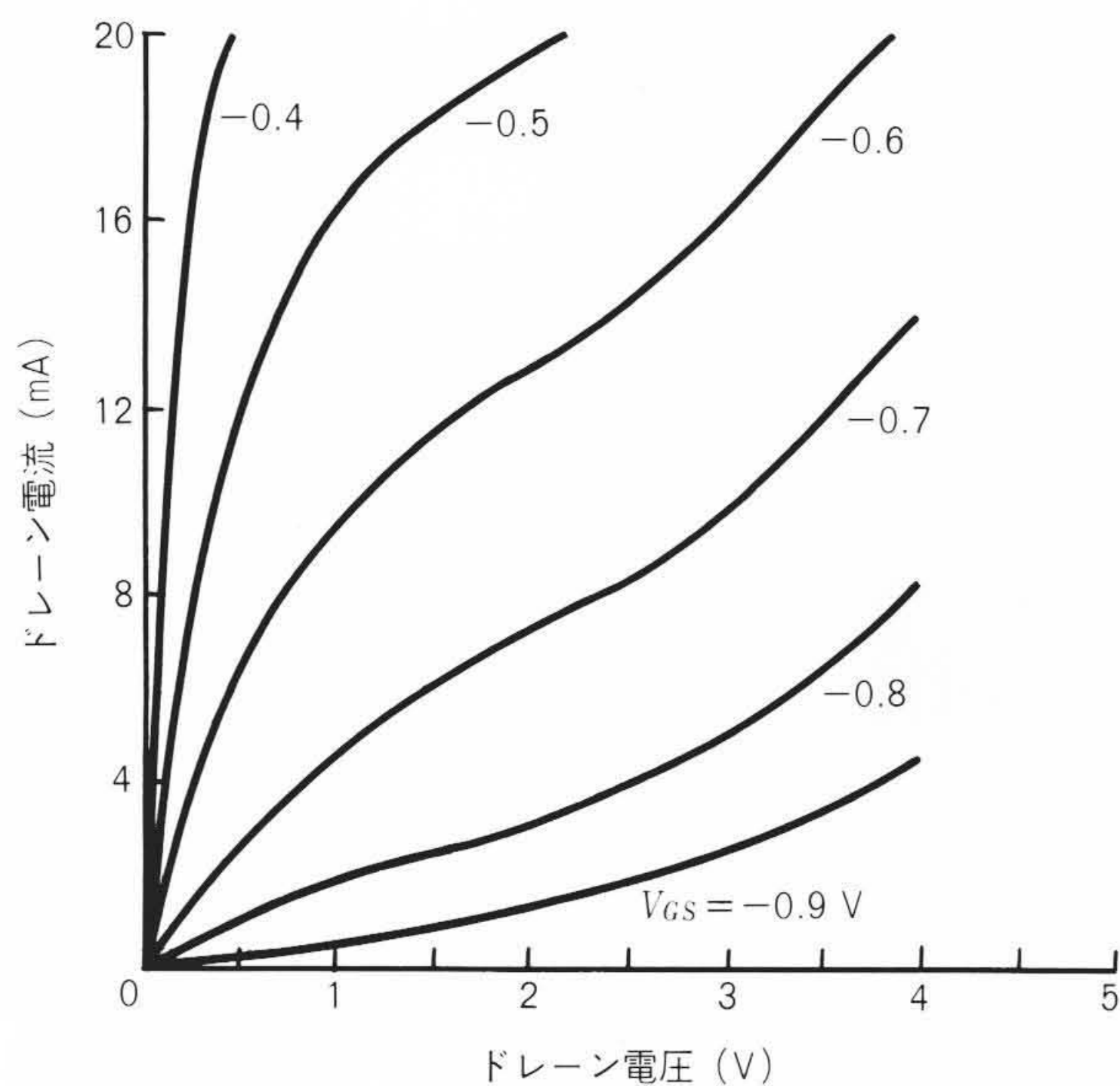


図3 HEMTの基本構造図 二次元電子ガス層から成るチャンネルは、高純度GaAs層の表面に形成される。ゲート電極は、寄生抵抗低減のためT字形状をしている。

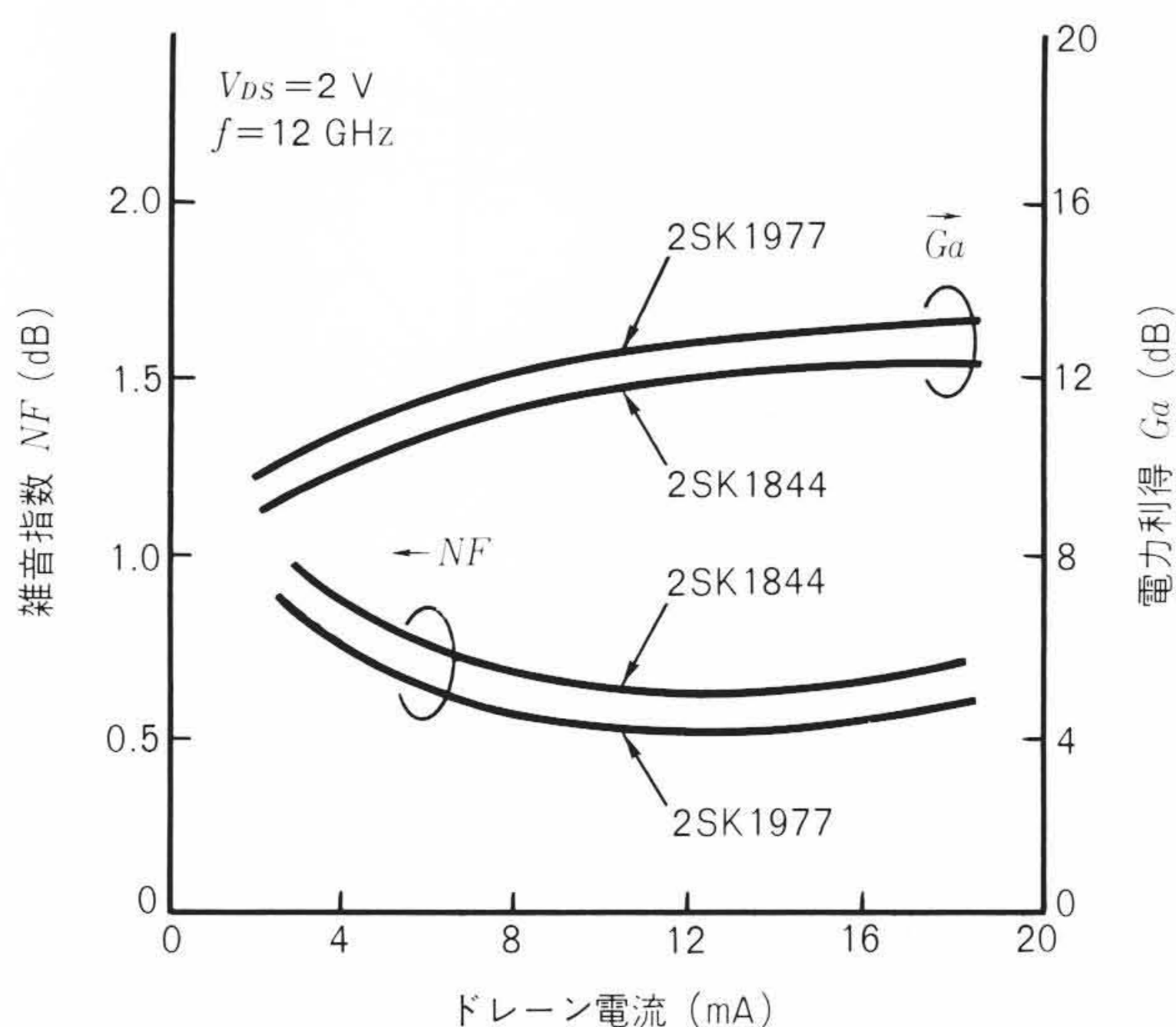
以下に微細加工することによって達成される。しかし、0.2 μm以下の電極では電極自体の抵抗が大きくなり、かえって増幅度の低下、雑音の増加を生じる。これらの特性劣化を防止するために、図3に示すようなT字形のゲート電極を形成した。微細かつ特殊な形状を再現性よく実現するためには高度のプロセス技術が必要であり、ドライエッチング、セルフアライン(自動位置合わせ)手法

などを適用した。以上の技術を適用したHEMTの入出力特性の一例を図4に示す。この素子(2SK1844)の12 GHzでの標準の雑音指数は0.6 dB、電力利得は11.5 dBである。また、電力利得、雑音指数のドレーン電流依存性を



注：略語説明 V_{GS} (ゲート・ソース間電圧：Gate-Source Voltage)

図4 HEMTの入出力特性(2SK1844) ドレーン電流10 mAのとき約60 mSと大きな相互コンダクタンスを示している。



注：略語説明 V_{DS} (ドレーン電圧)

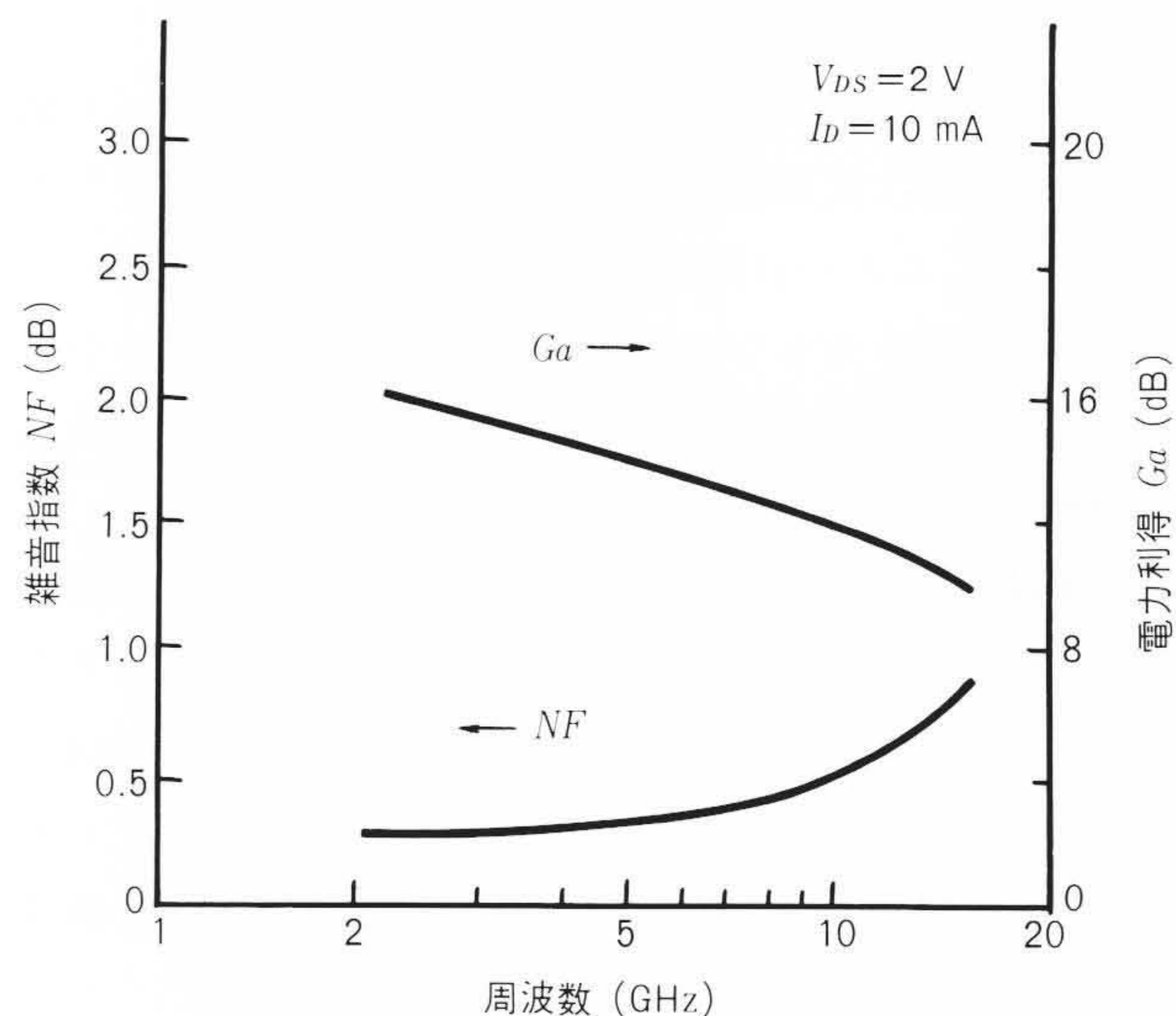
図5 雑音指数、電力利得のドレーン電流依存性 雑音指数最小にチューニングして測定した。10～12 mAのドレーン電流時に雑音は最低となる。2SK1977では雑音、電力利得とも高性能化されている。

図5に示す。同図には、さらに低雑音化を実現した素子(2SK1977)の特性も示してある。電力利得は素子の電流に依存し、電流を大きくすれば電力利得も大きくなる(同図)。一方、雑音特性は同図に示すように、電流が小さい領域ではチャネルの抵抗によって雑音は大きくなるが、電流を増加するに従って低下する。しかし、さらに大きな電流領域では、再び緩やかに増加する。

電子の移動度はチャネルが形成される半導体材料にも依存する。さらに高性能な素子を実現するために、ゲート電極幅を0.15 μm 以下とし、T字形状を持つアルミニウムで形成し、高周波特性を劣化させる寄生抵抗や寄生容量を極力低減した。この改良素子(2SK1977)の特性は図5に示すように、12 GHzで約0.55 dBの雑音指数を実現している。

また、BS受信装置の普及に伴い、低コスト化の要求も強くなっている。高性能品では、高周波での性能低下を防ぐためセラミックパッケージを用いている。日立製作所では、量産性の向上と低コスト化の目的で、レジnpパッケージを検討し、レジンの影響による特性低下を低減し、製品化した。

HEMTのチップとボンディングした状態の電極部を先の口絵に示す。ゲート電極への給電は2か所で行い、寄生ゲート抵抗の低減を図った。HEMTのワイヤボンディングは、従来、パッド部の面積が小さくて済むウエッジボンディングが採用されていた。ネイルヘッドボンデ



注：略語説明 I_D (ドレーン電流：Drain Current)

図6 雑音指数、電力利得の周波数依存性(2SK1844) 12 GHzでの雑音指数は0.6 dBと低雑音が達成されている。また、2～3 GHzでは0.3 dBと超低雑音を示している。

表1 低雑音HEMTラインアップ 超低雑音素子から低コストのレジン品まで、各用途に合わせたラインアップをそろえている。

形 名	用 途	外 形	規 格
2SK1615	RF初段	セラミック	$NF=0.8\text{ dB typ.}$, $Ga=11.0\text{ dB typ.}$
2SK1616	OSC, MIX RF 2～3 段	μ -FPAK	$NF=1.3\text{ dB typ.}$, $Ga=10.0\text{ dB typ.}$
2SK1617	RF 1～3 段	μ -FPAK	$NF=1.0\text{ dB typ.}$, $Ga=9.3\text{ dB typ.}$
2SK1844	RF初段	セラミック	$NF=0.6\text{ dB typ.}$, $Ga=11.5\text{ dB typ.}$
2SK1845	RF初段	μ -FPAK	$NF=0.8\text{ dB typ.}$, $Ga=10.5\text{ dB typ.}$
2SK1977	RF初段	セラミック	$NF=0.55\text{ dB typ.}$ $Ga=11.5\text{ dB typ.}$

注： μ -FPAKは、HEMT用レジン外形の愛称である。

イングは、量産性に優れていたものの、パッド部の面積が大きく寄生容量が増加するため、超高周波素子には適用できなかった。しかし、小ボール径化が可能なネイルヘッドボンダの開発により、HEMTのような超高周波素子にも適用できるようにした。

HEMT(2SK1844)の雑音および電力利得の周波数特性を図6に示す。12 GHzでの雑音指数は0.6 dBと高性能化が図られている。

日立製作所の低雑音HEMTのラインアップを表1に示す。12 GHzでの雑音指数は0.55～1.3 dB、利得は9.3～11.5 dBとなっている。また、パッケージもセラミック外形と低コストのレジン外形の2種類が製品化されている。

3 高性能・低コスト化を実現したGaAsミキサダイオード

BSコンバータのミキサダイオードにも、低雑音特性、広い周波数範囲にわたっての低変換損失特性が必要である。これらの要求を満たすために、GaAsショットキーダイオードHSE11を製品化した。

ダイオードの構造は、N形GaAs基板上に金属電極を形成したものである(図7)。動作原理は、金属電極とGaAs基板の間に形成されるショットキーバリアの非直線的な特性を利用して、高周波信号および局部発振の二つの周波数から1 GHzの中間周波信号を取り出すものである。高周波帯での低雑音化は、直列抵抗の低減が重要で、GaAs基板の不純物濃度分布および厚さを最適化した。不純物濃度と動作限界を与える遮断周波数との関係を図8に示す。接合直径は小さいほうが高い遮断周波数が得られるが、加工上の制限から10 μm とした。

高周波領域では、ボンディングワイヤのインダクタンスによる特性劣化が大きくなるため、ワイヤ長さを極力

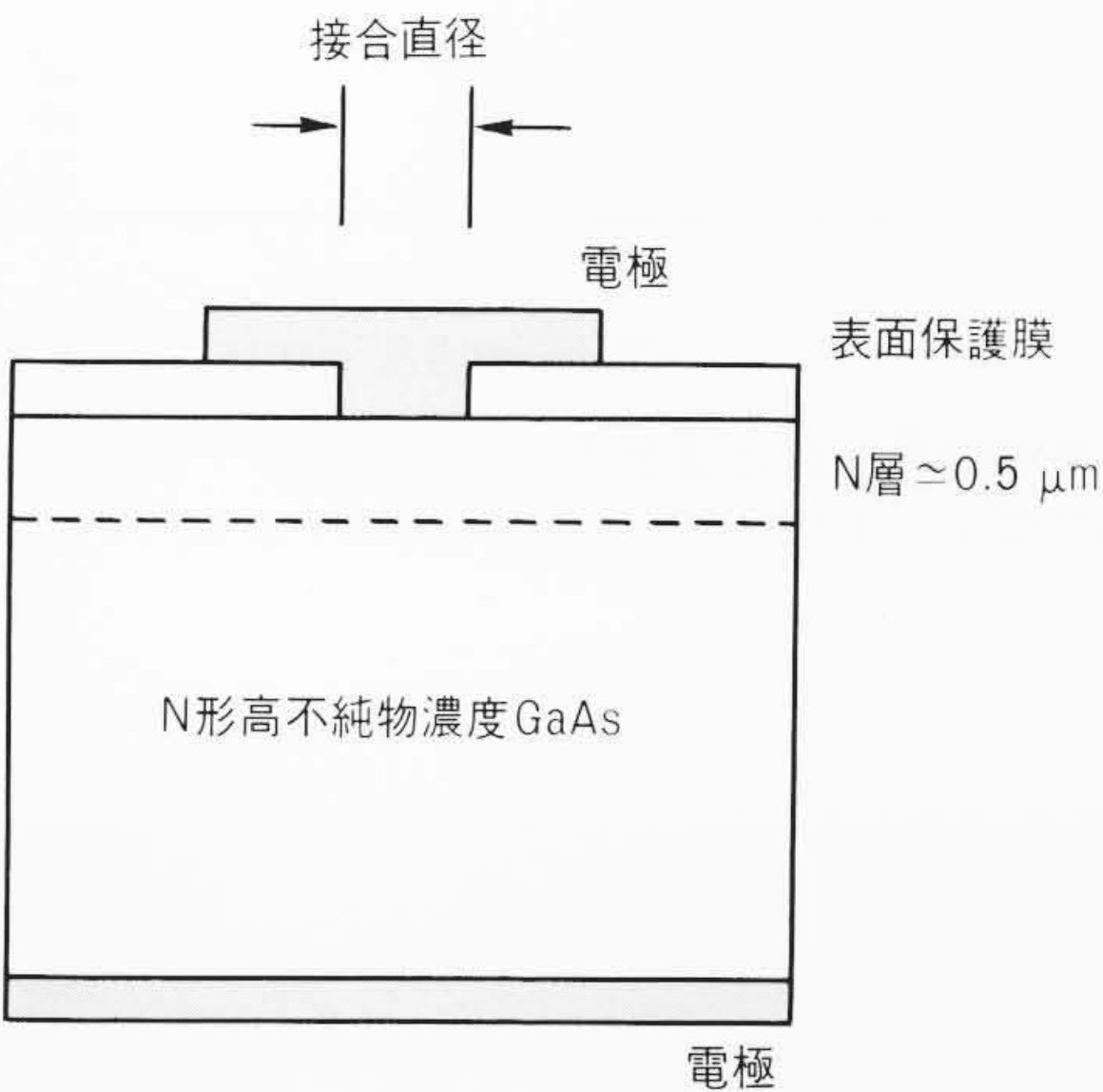


図7 GaAsショットキーダイオードの断面構造 表面のショットキー接合の直径は10 μm とし、高遮断周波数を実現している。

短くした。組立した状態を図9に示す。チップを載せるタブとワイヤを打つポスト間の距離を接近させ、直径18 μm の金線を用いた場合、不要なインダクタンスを0.3 nH以下に抑えた。また、特性劣化の原因となる寄生容量を低減するため、ポスト側からはじめてチップ上でボンディングワイヤを切断するという、通常とは反対のシーケンスを行うボンディング技術を確認し、寄生素子の低減を図った。

さらに、コスト低減のため、レジン外形を採用した。レジン化での問題点は誘電体損失による雑音の増加であるが、レジンの厚さを機械的強度との兼ね合いで、0.6 mmとした。現在は、ダイボンディングからモールド工程まで、全自動化ラインで量産している。

ダイオードミキサ回路は、一般に1個のダイオードを用いるシングルエンド回路が使われているが、この回路は構成が簡単であるという利点がある反面、局部発振の

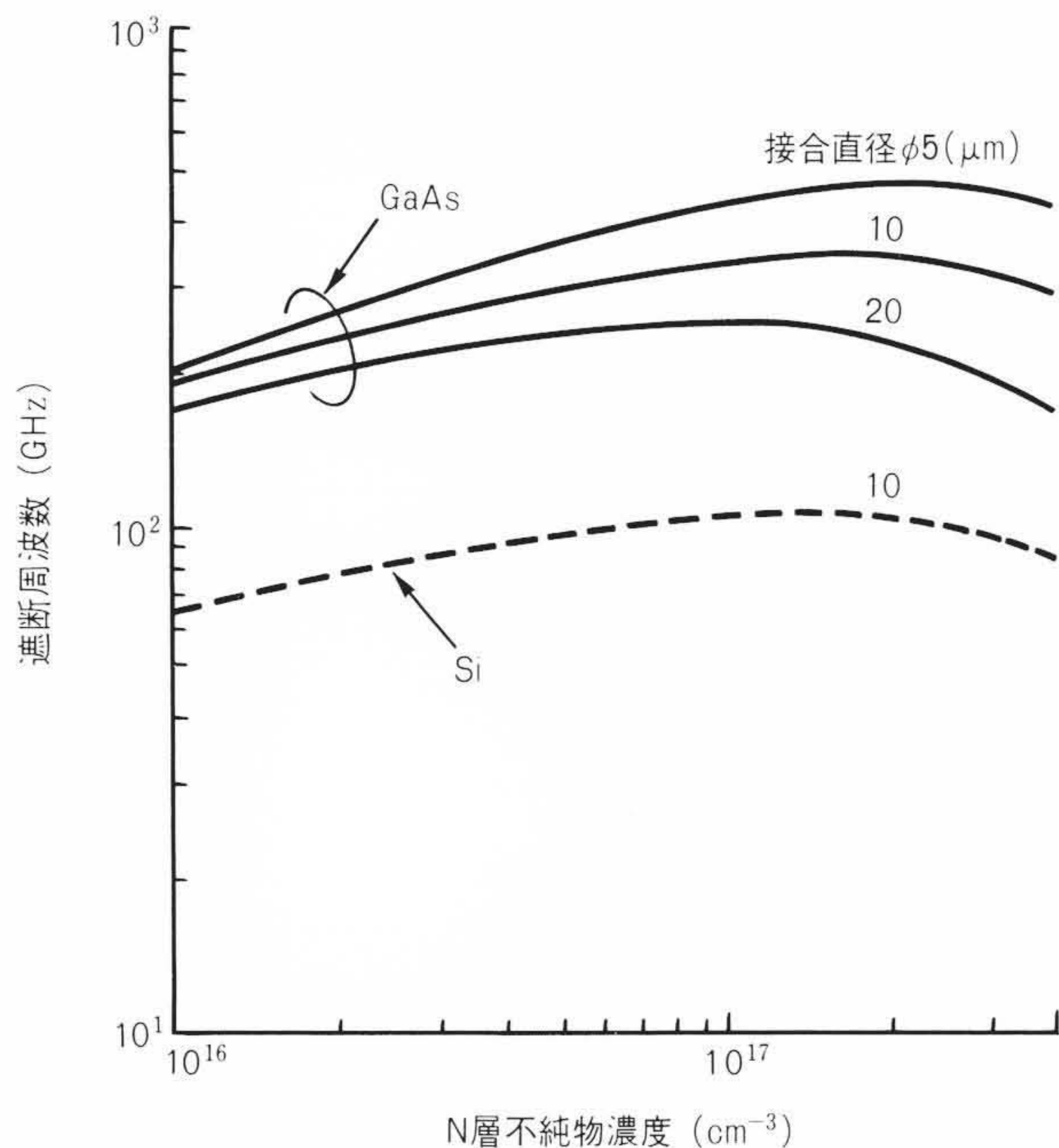


図8 N層不純物濃度と遮断周波数の関係 シリコンに比較し、GaAsでは3～4倍の高周波特性が期待できる。

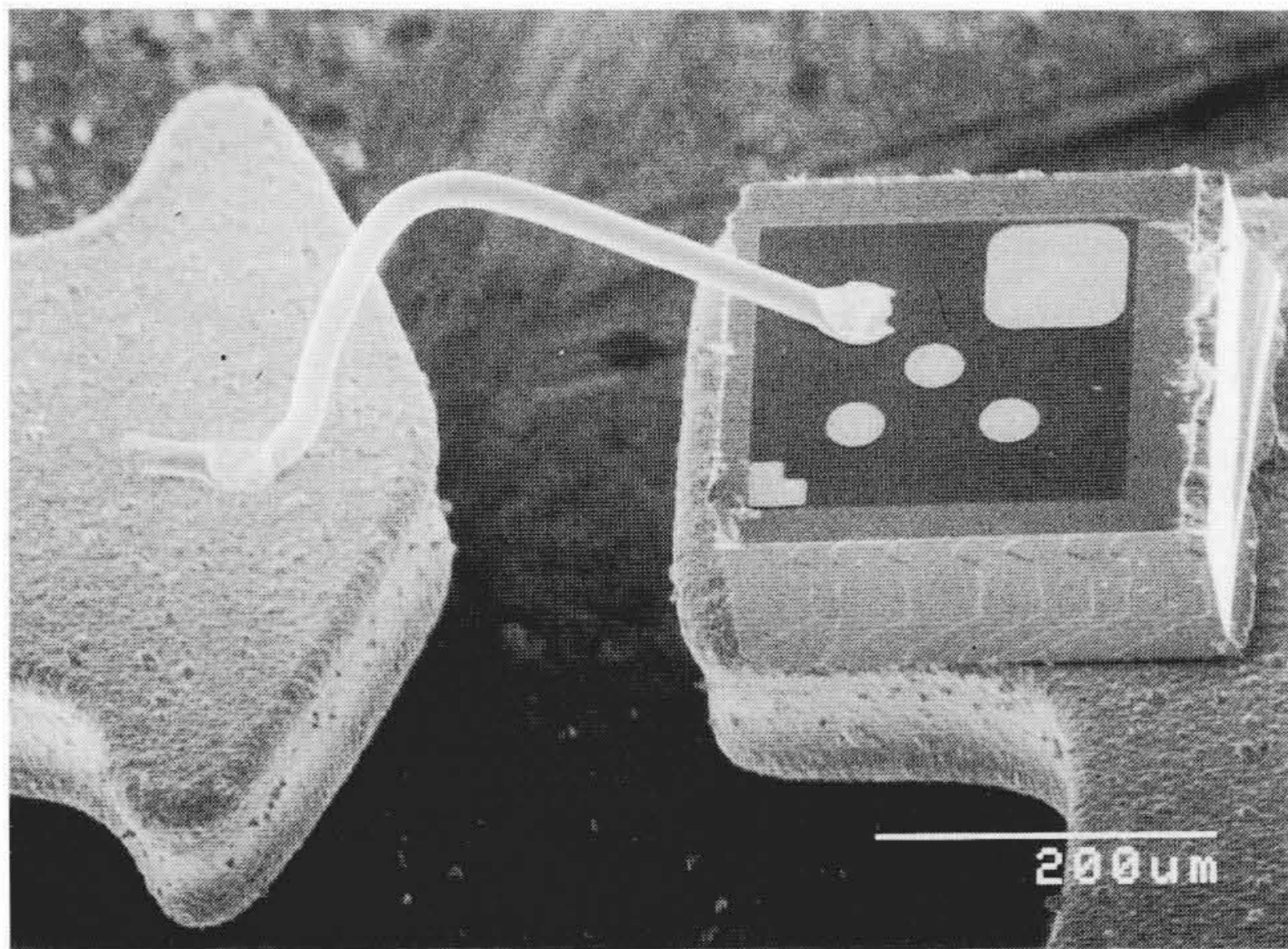


図9 GaAsショットキーダイオードの組立 ポスト側からチップ方向へとボンディングして、浮遊容量を低減した。さらに、ポストとタブ間の距離を接近させ、寄生インダクタンスを低減した。

電力が高周波端子へ漏れる、いわゆる局発信号漏れが大きいという欠点がある。したがって、局発信号漏れが問題となる用途では、ダイオードを2個用いる平衡形ミキサが使われる。このような用途に使いやすく、1パッケージに2チップ実装したミキサダイオードも開発した。図10は2個のチップを実装した例で、パッケージはレジンである。

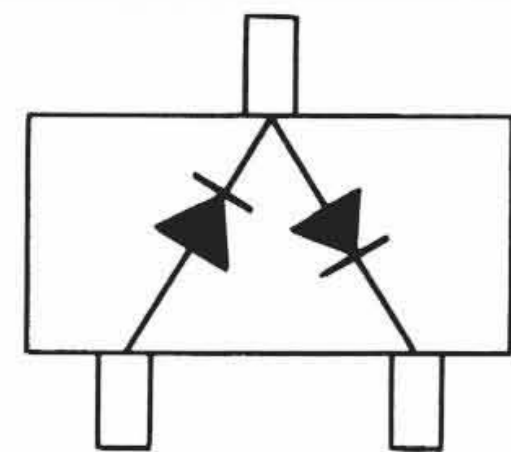
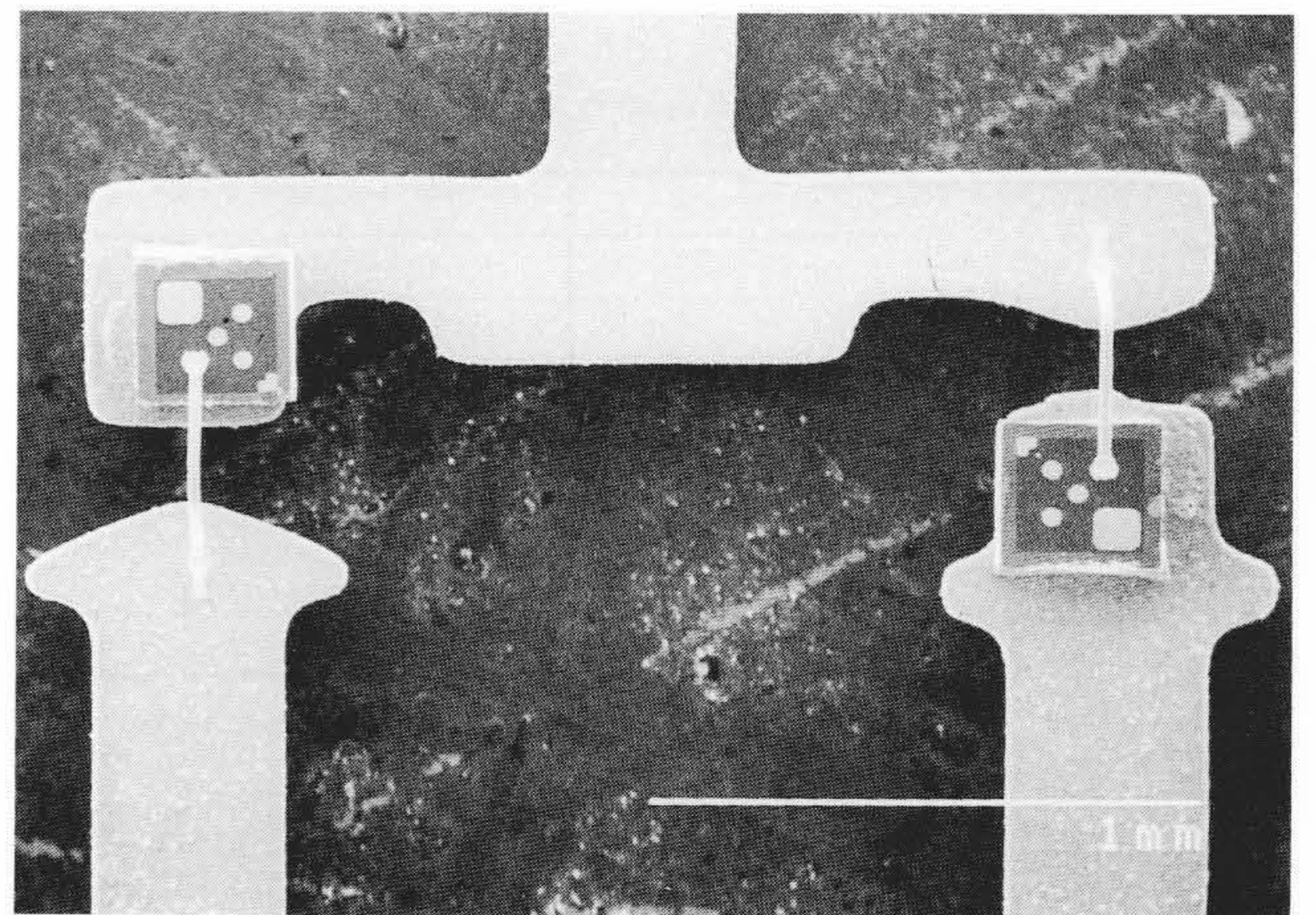


図10 ペアショットキーダイオードの組立写真とピン接続図(HSE11S) 特性のそろった2個のチップを同一のパッケージに実装し、平衡形ミキサ回路に使用する。

変換損失の周波数特性例を図11に示す。特性のそろった素子を2個同一パッケージに組み込んだ、ショットキーダイオード(HSE11S)では、順方向電圧偏差は0.02 V以下、端子間容量の偏差は0.05 pF以下と非常に特性がそろっており、したがって周波数特性も平たんになっている。そのため、2個のダイオードを用いるよりも、特性の良い平衡形ミキサを構成することが可能となる。また、局発信号漏れでは、局発信号電力10 dBmのとき、シングルエンド回路では-2.6 dBmに対し、平衡形ミキサの場合は-19.2 dBmと大幅に低減できることが明らかとなった。さらに基板への実装実験では、平衡形ミキサでは配置精度の影響が小さく、組立歩留りに対する有効性も明らかとなった。

4 小形・低消費電力化に対応した集積回路

4.1 チューナIC

BSチューナには小形・低消費電力の要求のほかに、低ひずみ特性、低局発信号漏れが要求される。GaAsはシリコンよりも電子の移動度が高いため高周波特性に優れ、低雑音・高電力利得の増幅器やミキサ回路が形成できる。さらにGaAs基板は半絶縁性なので、ICを形成した場合、素子の寄生容量はほとんどなく、また素子間の分離も不要である。したがって、単体素子に比べ特性劣化

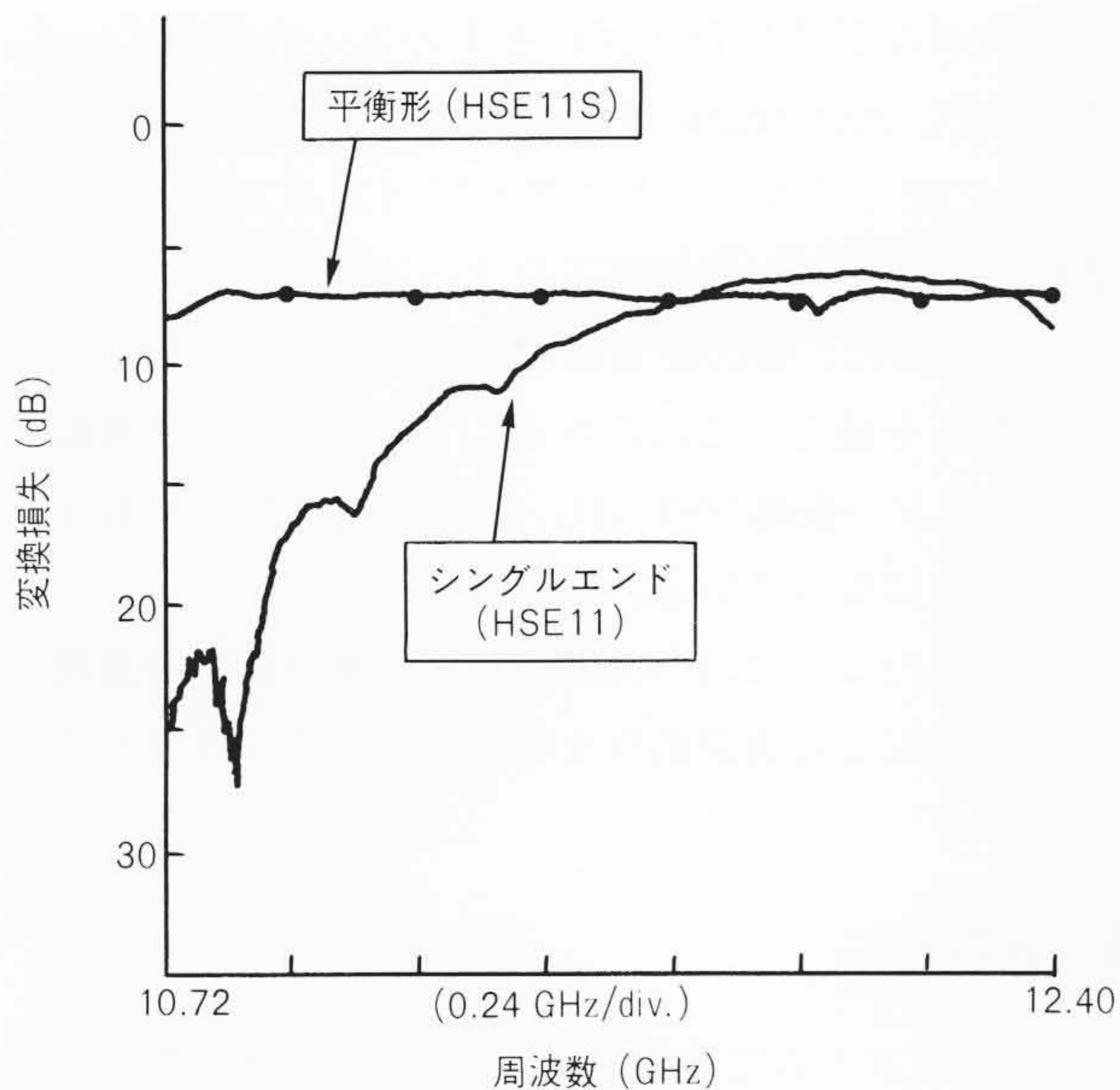
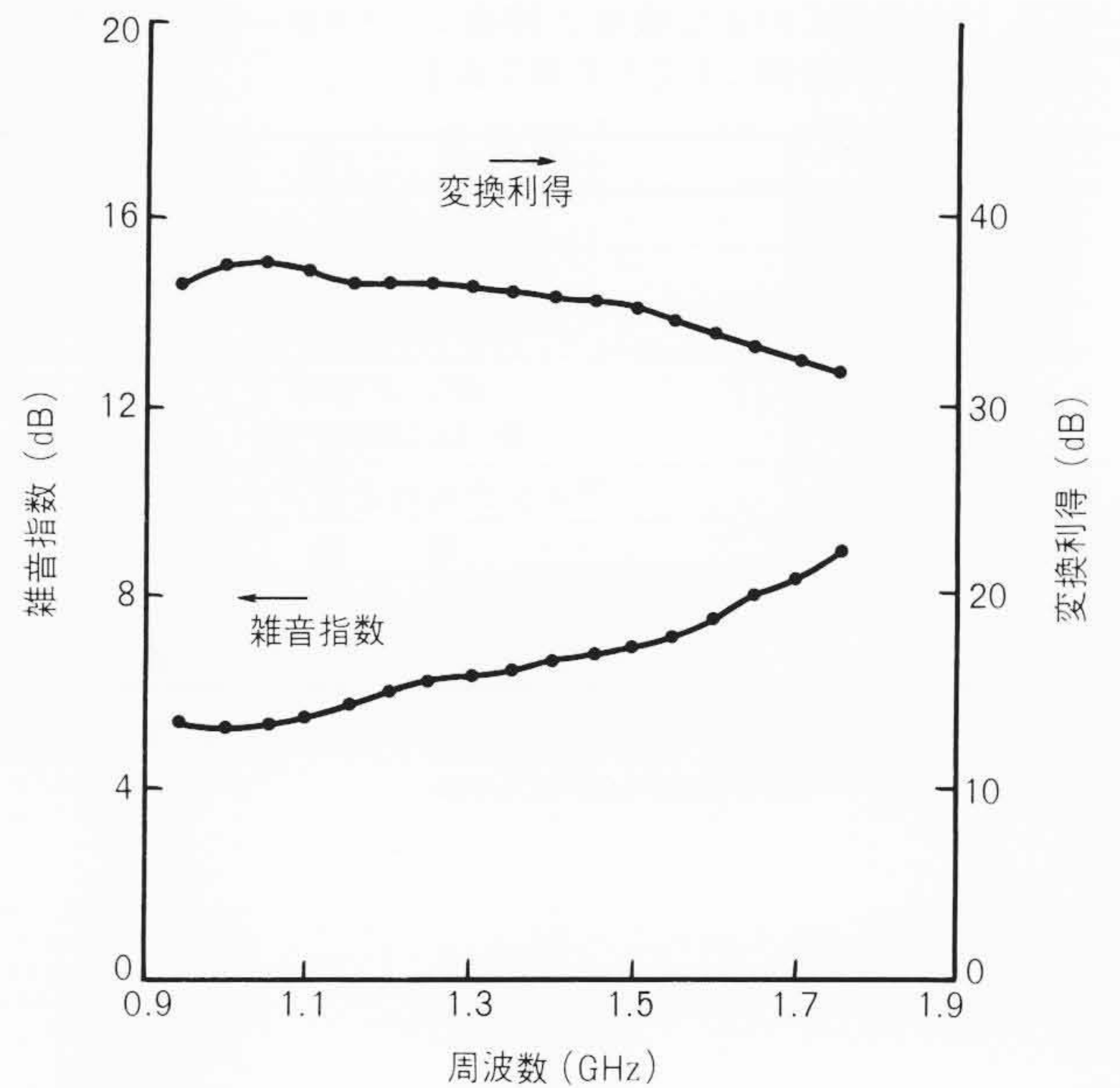


図11 ミキサ回路の変換損失 平衡形ミキサは、シングルエンド形よりも広帯域特性を示している。

がなく、高周波ICとして優れた性質を持っている。ICプロセスの問題点は、しきい電圧のばらつき、チップ表面の安定化である。前者は、イオン注入精度の改善により、後者は低温で形成したひずみの少ない安定化膜を採用することによってそれぞれ解決した。

ICに用いた基本素子は、しきい電圧 -1.0 V 、ゲート長 $1\text{ }\mu\text{m}$ である。高周波増幅に用いられるIC(HA21005)は、ゲート接地(ソース入力)とソース接地の直結形増幅回路構成とし、出力はソースフォロワ回路を用い、広帯域に安定した増幅器を構成した。

希望のチャネルの選択はチューナICによって行われる。低ひずみ特性と低局発信号漏えいは、DBM(Double Balanced Mixer)の採用とGaAs FET(電界効果トランジスタ)の低ひずみ特性によって実現した。DBMは、不要な周波数成分を相殺するように接続された2個の差動回路から成る。DBMを中心に、高周波および中間周波のAGC(Automatic Gain Control: 自動利得制御)アンプから成るチューナIC(HA21006MP)の雑音指数、高周波入力と中間周波出力との比で定義される変換損失の周波数依存性を図12に示す。変換利得は 0.95 GHz で 36 dB 、 1.75 GHz で 32 dB であった。雑音指数は 0.95 GHz で 5 dB 、 1.75 GHz で 9 dB と低雑音化されている。また、局発信号の漏えい特性は高周波入力端子と中間周波出力端子について測定した。結果を図13に示す。高周波入力端子では -40 dBm 、中間周波出力端子では -25 dBm と良



測定条件: $V_{CC}=9\text{ V}$, $V_{AGC}=4.5\text{ V}$, $P_{LO}=4\text{ dBm}$
 (変換利得: $P_{RF}=-50\text{ dBm}$, $f_{IF}=479.5\text{ MHz}$)
 (雑音指数: $f_{IF}=480\text{ MHz}$)

注: 略語説明 V_{AGC} (AGC電圧), P_{LO} (局発信号電力)
 P_{RF} (高周波信号電力), f_{IF} (中間周波数)

図12 雑音指数、変換利得の周波数依存性 $0.9\sim 1.8\text{ GHz}$ の広帯域で、 30 dB 以上の変換利得を実現している。

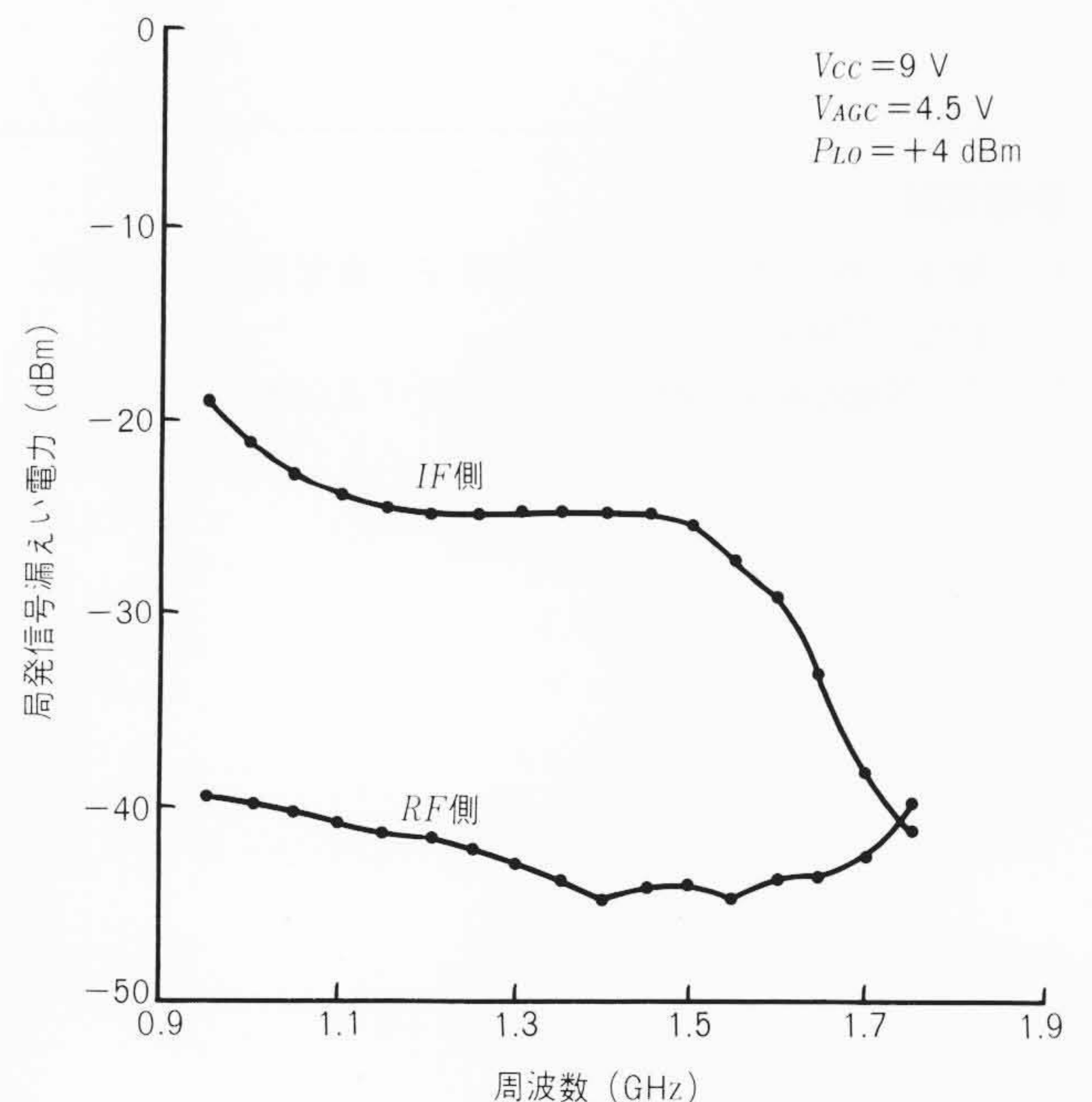


図13 局発信号漏えい量の周波数依存性 HA21006MP, RF側で -40 dBm 以下と良好な特性が得られている。

表2 FM復調ICの主な機能と特長 5 V単一電源で動作し、わが国と欧州両仕様に対応が可能である。

項 目	機 能, 特 長
電 源	5 V単一
適用 シ ス テ ム	日本仕様, 欧州仕様
復 調 方 式	PLL方式FM検波
A G C	RF, IF切換 IF AGC回路内蔵
A F C	デジタルおよびアナログ
MUSE受信対応	可 能
ビ デ オ 出 力	最大1 Vp-p 外付け抵抗でレベル設定可能

注：略語説明 AFC(Automatic Frequency Control：自動周波数制御)
PLL(Phase Locked Loop)

好な特性が得られている。

4.2 FM復調IC

復調部のすべての機能を1チップ化し、使い勝手を良くしたICがHA11571MPである。主な機能と特長を表2に示す。このICは5 V単一電源で動作し、わが国と欧州の両仕様に対応できる。復調にはPLL(Phase Locked Loop)を使用したFM検波方式を採用している。AGCは、検波出力レベルに応じて中間周波と高周波アンプを切り換えて制御している。このため、中間周波のAGC回路お

よび高周波AGC電圧出力回路をおのこの内蔵している。また、AFC(Automatic Frequency Control：自動周波数制御)に関しては、アナログAFC出力およびデジタルAFC出力を備え、外部電圧によって切換ポイントを指定する。さらに、MUSE受信に対してはキードAFCパルス入力端子を備え、これに対応している。ビデオ増幅回路は最大1 Vの振幅が得られ、外部抵抗でレベル設定ができるようになっている。

以上述べたように、FM復調ICでは、使い勝手を重視しながら、安定した復調動作を得るようにくふうされている。

5 おわりに

BS受信システムでの半導体素子の低雑音化、低ひずみ化について述べた。BSコンバータでは低雑音化の観点からHEMT、ミキサダイオードの特性が重要である。BSチューナでは、低ひずみ、低局発信号漏えい、小形および低消費電力化の観点から集積化が進められている。

今後は、BSコンバータでは、より高性能化と同時に集積化による小形・低コスト化が、BSチューナでは低電圧化による低消費電力化がそれぞれ進められると予測される。これらに対応した製品を開発し、市場ニーズにこたえていきたい。

参考文献

1) 増田, 外：超高周波半導体素子, 日立評論, 72, 12, 1295~1300(平2-12)

2) T. Nagashima, et al. : A 0.95~1.8 GHz GaAs Tuner for Direct Broadcast Satellite Reception, ISSCC Digest of Technical Papers(1990-2)