　　U.D.C.〔621.382.3＋621.3.049.774〕.029.64:546.681′19-162

超高周波半導体素子

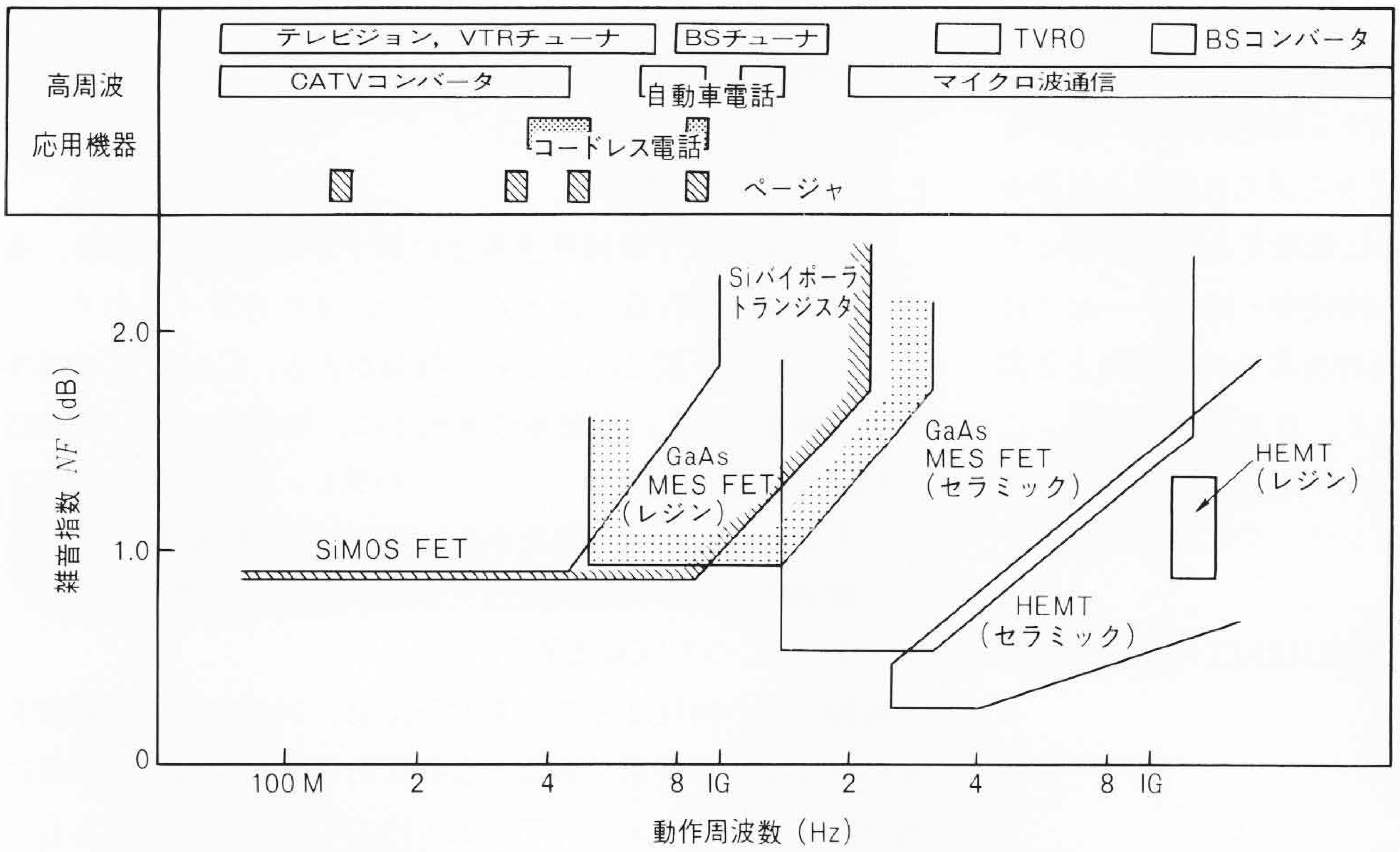
Ultra-High Frequency Semiconductor Devices

増田　章*　*Akira Masuda*
坂本和道*　*Kazumichi Sakamoto*

超高速・高周波用半導体材料としてシリコンの次世代を担うものは，化合物半導体と考えられ，その中でもガリウム・ひ素(以下，GaAsと記す。)は，代表格的な存在である。GaAsは，電子移動度がシリコンの6倍と高く，超高周波動作に適しており，衛星放送や携帯電話などの各種映像・情報サービスの急速な普及により，半導体としての重要性はいっそう高まってきている。このような市場ニーズに対応し，超高周波用GaAsデバイスとして，低雑音HEMT※1)(High Electron Mobility Transistor：高電子移動度トランジスタ)やGaAs集積回路の開発を行った。電子線直接描画・分子線エピタキシアル技術などの最先端技術を駆使し，12 GHz雑音指数0.8 dBの超低雑音性能を達成した2SK1615および約200素子を集積したBSチューナ用のGaAsアナログ集積回路HA21002などの製品化を実現した。

1 緒　言

高度な情報通信時代を背景に，情報量の増大に対処するため，UHF～SHF帯(0.3～30 GHz)の電波を利用した情報・通信システムが普及しつつある。このような超高周波の信号を安定に増幅するためには，今までのシリコン(以下，Siと記す。)材料を使用した半導体素子では性能が得られず，より高速・高周波動作が可能な化合物半導体であるガリウム・ひ素(以下，GaAsと記す。)材料の半導体素子が必要となる(**図1**)。DBS(Direct Broadcasting Satellite：衛星放送)に代表される超高周波信号を扱う機器には，HEMT※1)(High Electron Mobility Transistor：高電子移動度トランジスタ)超高周波半導体



注：略語説明
TVRO (Television Receiver Only)
CATV (Cable Television)
MOS FET (Field Effect Transistor
：電界効果トランジスタ)
MES FET (Metal Semiconductor FET)
HEMT (High Electron Mobility
Transistor)

図1　高周波応用機器と高周波半導体素子　高周波応用機器とその動作周波数の関係および使用半導体素子としてカバーできる動作周波数・雑音指数領域を示した図である。

※1)　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。

* 日立製作所 半導体設計開発センタ

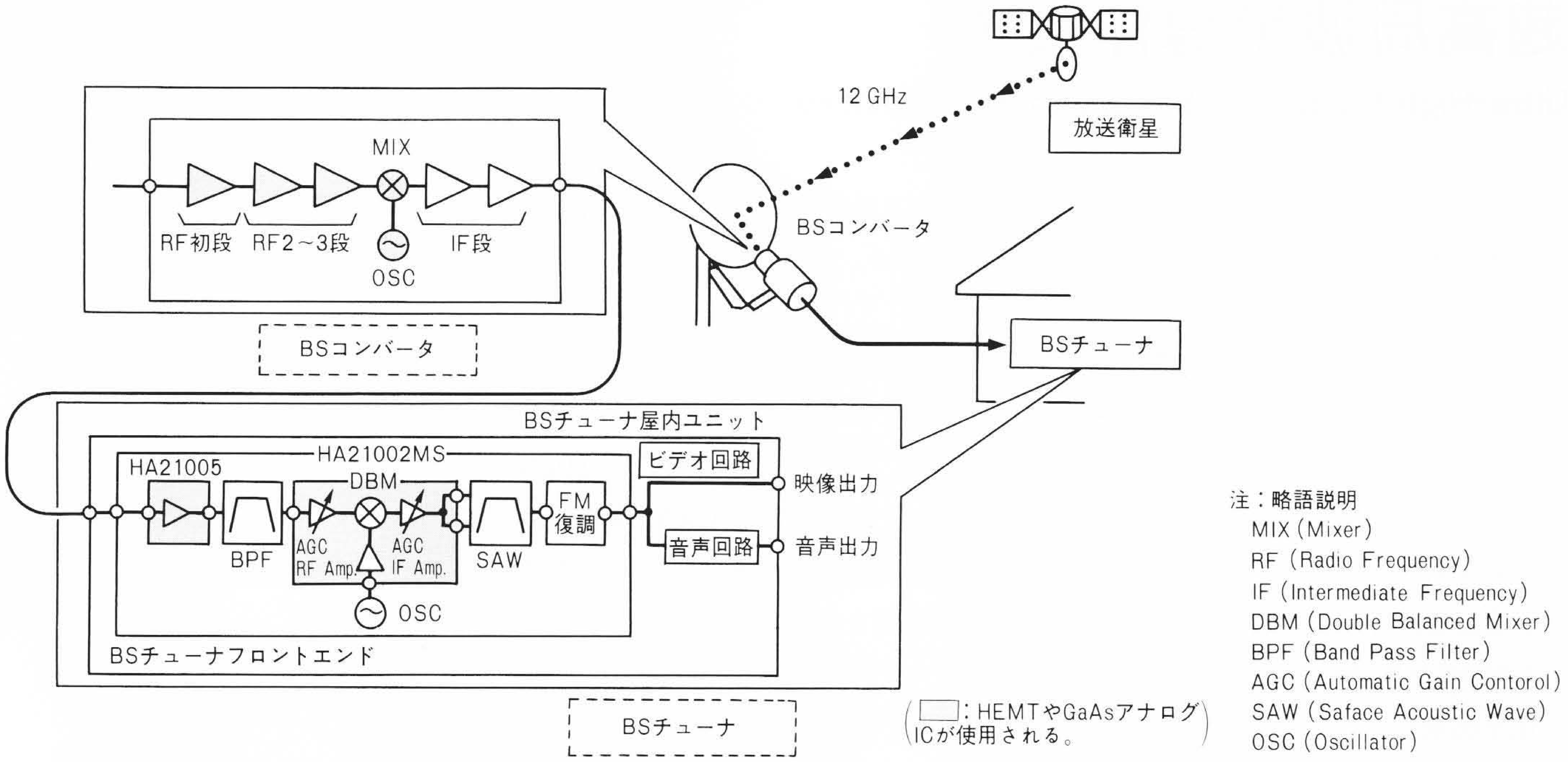


図2　衛星放送受信システム　衛星放送受信システム概要図である。BSコンバータにGaAs FETやHEMTが，BSチューナにGaAs高周波アナログICなどが使用されている。

素子であるGaAs FET (Field Effect Transistor：電界効果トランジスタ)が使用されている。

最近の日本・欧州を中心にDBSは急速な普及を示し，HEMTなどの性能向上もあり，衛星放送受信機の高性能化・受信アンテナの小口径化が進んでいる。DBSを受信するためには，BSコンバータとBSチューナが必要である(**図2**)。BSコンバータは，衛星からの12 GHzの微弱な信号を低雑音で増幅し，0.95～1.75 GHzの信号に変換する機能を持ち，BSチューナは室内にあって，BSコンバータから送られてくる信号から所望の信号を選択し，ビデオ信号に変換する機能を持っている。今後，衛星などを使用した各種映像・情報サービスはさらに活発化し，HEMTなどの超高周波素子の性能向上と需要は急速に高まってくると考えられる。日立製作所では，このような超高周波応用機器の性能向上や小形化に対応するため，半導体素子として低雑音HEMTシリーズおよびGaAsアナログICの開発・製品化を行った。

本稿では，GaAsアナログICと低雑音HEMTの半導体技術および製品の概要について述べる。

2　GaAsアナログIC

GaAs MES (Metal Semiconductor)形FETは，キャリヤとなる電子の移動度がSiに比較し6倍と高く，また伝達特性が二乗特性を示し，三次ひずみ性能に優れるため，高周波増幅用素子として各種の機器に使用されている。しかし，高周波回路を半導体チップの上に集積した高周波アナログICは，ほとんどがプロセスの安定したSiバイポーラトランジスタを用いたものが多く，GaAs MES形FETを使用したICはきわめて少ないのが現状である。

GaAsは物性的にはSiと異なり，真性キャリヤ濃度が低いため，半絶縁性の結晶が容易に得られ，また電子移動度も高く超高周波アナログICに適した素材である。日立製作所では，GaAsプロセス技術の向上を図り，GaAs MES形FETのプロセス安定化やFETしきい値V_{th}ばらつきの低減を行い，GaAsアナログICの製品化を実現した。

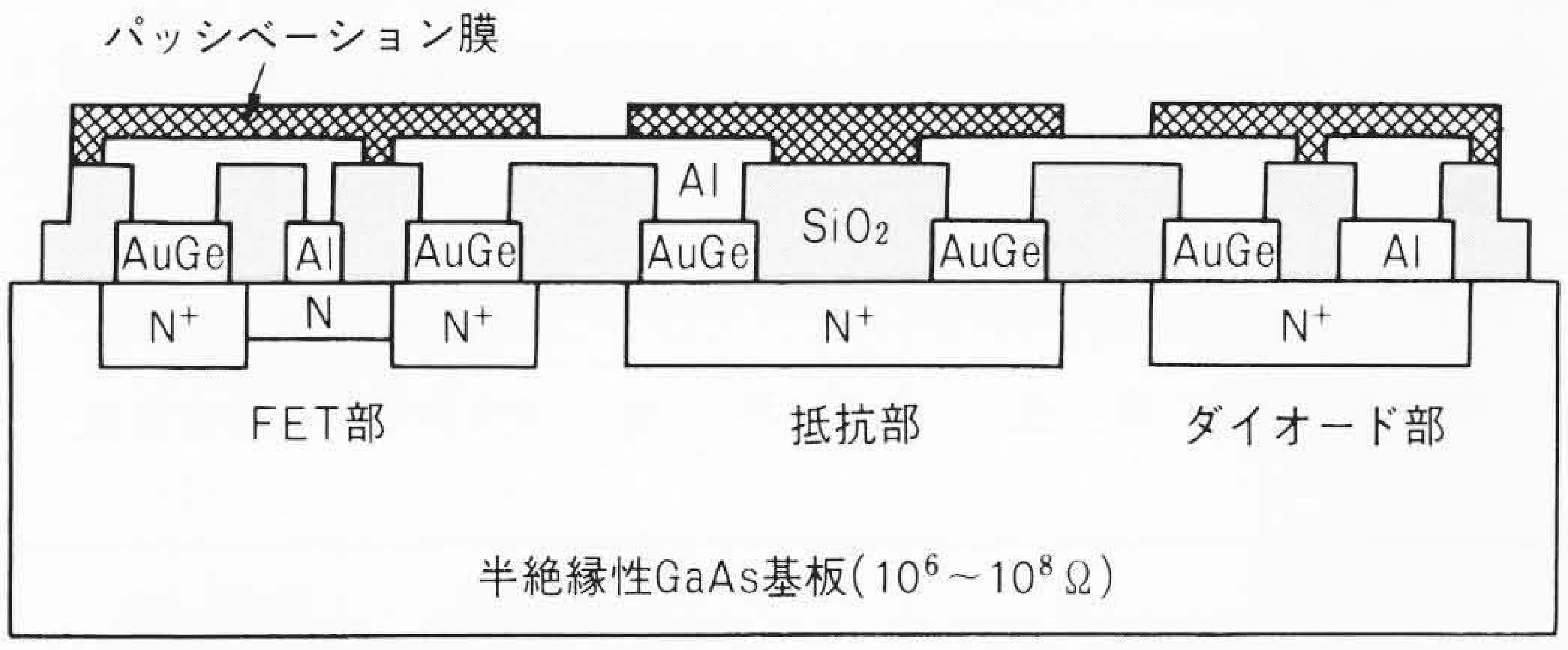
2.1　GaAs IC化技術

GaAs ICは，半絶縁性基板上に素子が形成できるため，基板に対する浮遊容量がほとんどなく，また各素子間のアイソレーションも不要であるという特長がある。GaAs ICの基本構造を**図3**に示す。半絶縁性基板上に，増幅素子としてMES形FETや抵抗，ダイオードなどを形成し，配線によってICを形成する。ICとして機能させるためには，増幅素子のV_{th}ばらつき低減技術や不純物活性化プロセスなどが必要となる。

(1)　V_{th}ばらつき低減技術

増幅素子の特性ばらつき(特にV_{th})は，回路設計の余裕度を左右する重要な要素である。このばらつきの原因は，結晶に起因するもの，ウェーハプロセス内での処理方法によるものなどさまざまであるが，主な原因は，不純物のプロファイルが一定になりにくいことがあげられる。このため，注入量と注入深さの制御性が良いイオン注入技術を用い，またGaAs表面の安定化を行うため，イオン注入時に薄い酸化膜を設け不純物を注入するプロセスなどを適用している。

(2)　不純物活性化プロセス



注：略語説明　AuGe(金・ゲルマニウム材料)，SiO_2(シリコン酸化膜)

図3　GaAs IC基本構造図　半絶縁性基板の上にFET，抵抗，ダイオードなどを形成しAl配線で集積回路を形成している。

GaAsウェーハでは，注入した不純物が100%キャリヤとして寄与することはなく，活性化の方法・温度・前処理などで大きく変わる。これはGaAsという化合物が，2種類の蒸気圧が異なる原子から成っていることによるものである。このため，工程内でのGaAs表面の露出を避け，熱処理の低温化により，熱による影響を最小となる不純物活性化プロセスを適用している。

(3)　パッシベーション技術

GaAsには，Siに対するSiO_2のような安定な熱酸化膜が成長しないことと，熱に対して敏感であるという性質がある。したがって，GaAsの表面を安定化させることが，製造工程での特性変化を抑え，製品の信頼性を高めるため重要となる。このため，低温で形成可能なパッシベーション材質や，さらにウェーハへの膜応力の少ないパッシベーション構造を採用している。

2.2　GaAs IC回路技術

GaAs ICの回路設計に用いたGaAs FETは，ディプレッション形のFETで，V_{th}は-1.0 V，ゲート長は1 μmである。**表1**にデバイスの基本特性を示す。このFETを使用し，IC回路技術としては周波数変換回路(以下，ミクサ回路と称する。)や増幅回路などの信号処理回路を平衡回路構成とすることにより，二次ひずみの特性向上を図り，またFETの持つ特長であるひずみ性能の劣化の少ない利得制御特性を生かし，低雑音・低ひずみで，しかも広いダイナミックレンジの信号処理が可能となる。ここでは，FETの良好な三次ひずみ特性が生かせるミクサ回路技術について述べる。

(1)　ミクサ回路技術

ミクサ回路は，二次ひずみ特性を回路的に改善し，さらに良好な回路間アイソレーションが得られるDBM(ダブルバランス形ミクサ)を用いている。**図4**に，50～900 MHzミクサの基本回路を示す。この回路は，DBMを構成するFET(Q_1～Q_4)，差動増幅器形式のバッファ増幅器(Q_5，Q_6)，入力スイッチ回路(Q_7)などで構成した。発振信号はQ_1～Q_4のゲート端子に入力され，バッファ増幅器のゲートから入力される受信信号は，増幅されてDBMのソース端子に印加され，周波数変換を行う。バッファ増幅器のソース端子間には，抵抗R_sを挿入し，ひずみ特性の向上を図り，スイッチ回路はVHF信号入力時に高周波的にオンとなりVHF端子からの入力信号の平衡・不平衡変換の機能を持つ。GaAs FETを使用することにより，50～900 MHzまでの周波数変換を一つのDBMで処理することができ，また低雑音で低ひずみなミクサ回路が得られる。**図5**にこのミクサ回路の変換利得・雑音指数特性を示す。変換利得は12～18 dB，雑音指数は8～10 dBが得られ，また二次相互変調ひずみは-40～-50 dB，三次相互変調ひずみは-60～-70 dBと良好な値が得られ，高性能なミクサ回路を実現した。

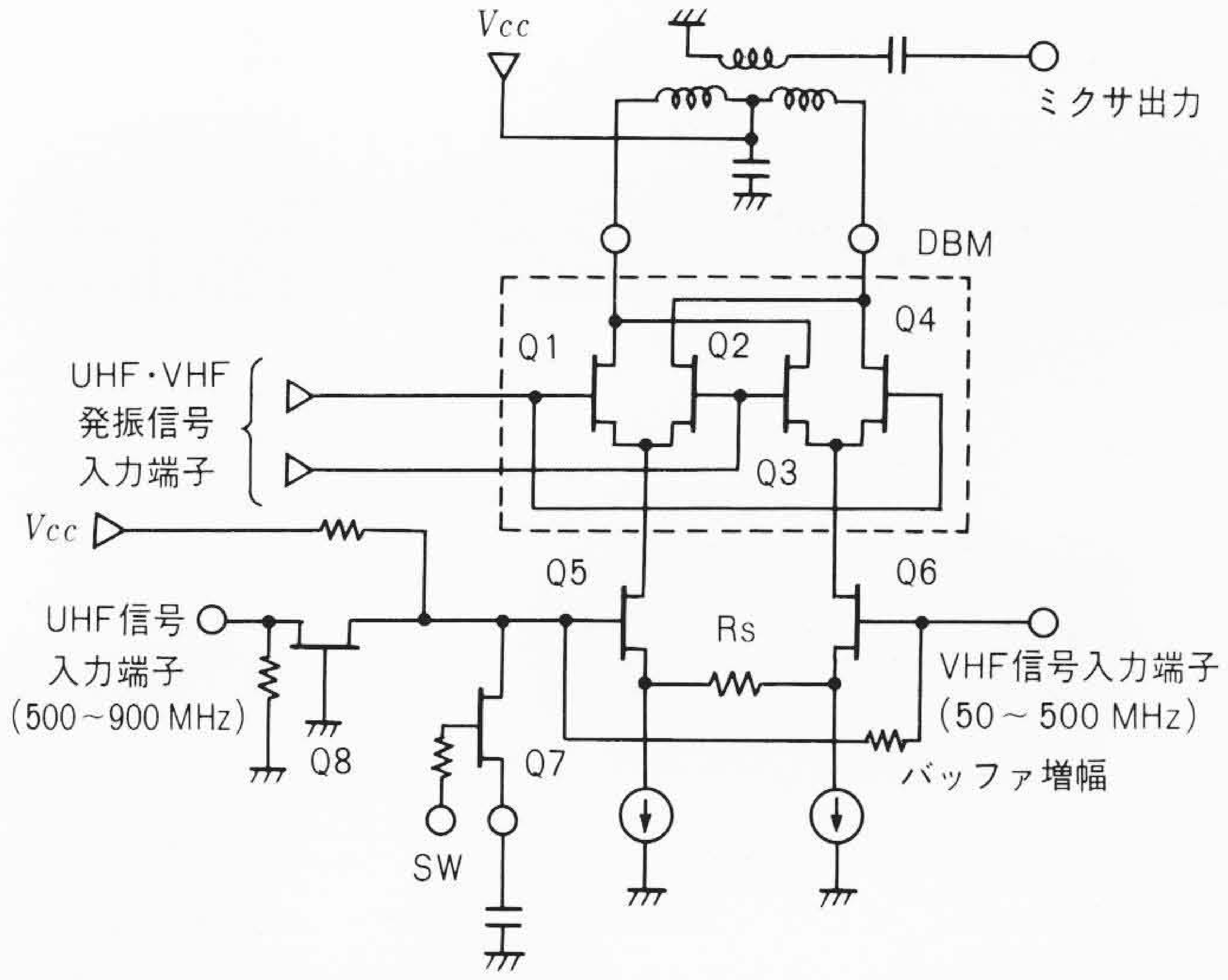
2.3　製品概要

高周波GaAsアナログICとしては，テレビジョンチューナ用として，動作周波数50～900 MHzに対応したHA21001と動作周波数950～1,750 MHzに対応したBSチューナ用HA21002，HA21005の3品種を製品化した。製品の外観を**図6**に，製品ラインアップを**表2**に示す。これらの高周波ICは，GaAs ICプロセスを適用し，ゲート長1.0 μmの微細ゲート加工技術に

表1　FETの基本特性　GaAs IC回路設計に用いたFETの基本特性を示す。MES形FETであり，能動層はイオン打ち込み技術を用い形成している。

項　目	値	備　　考
V_{th}	-1.0 V	——
g_m	100 mS/mm	I_d＝5 mA
R_s	1 Ω	ゲート幅1 μm
R_d	1 Ω	ゲート幅1 μm

注：略語説明　R_s(ソース抵抗)，R_d(ドレーン抵抗)，I_d(ドレーン電流)



注：略語説明　Vcc(電源電圧)，DBM(ダブルバランス形ミクサ)

図4　ミクサの基本回路　DBM，バッファ増幅回路，スイッチ回路で構成したGaAsミクサの基本回路を示す。

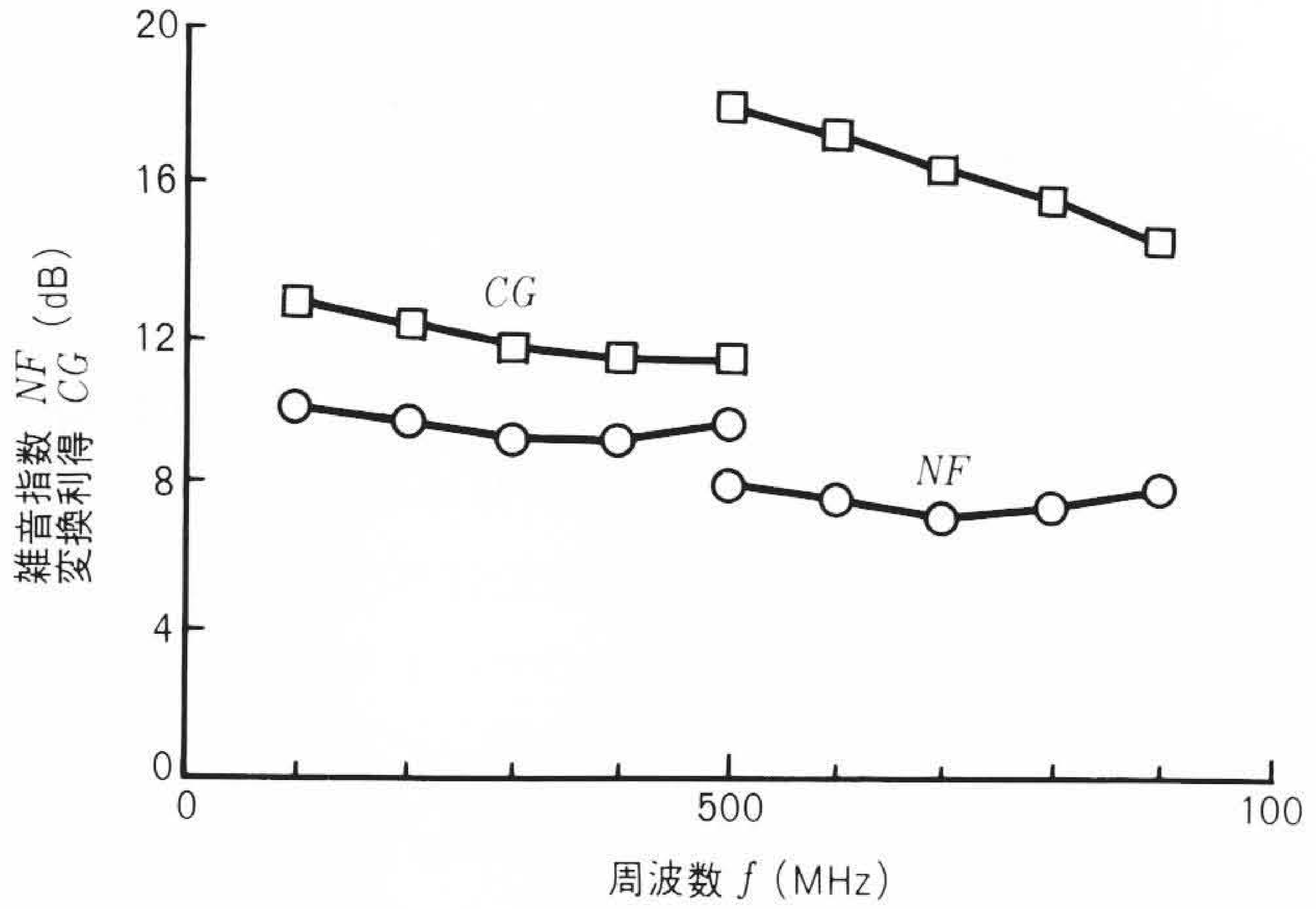
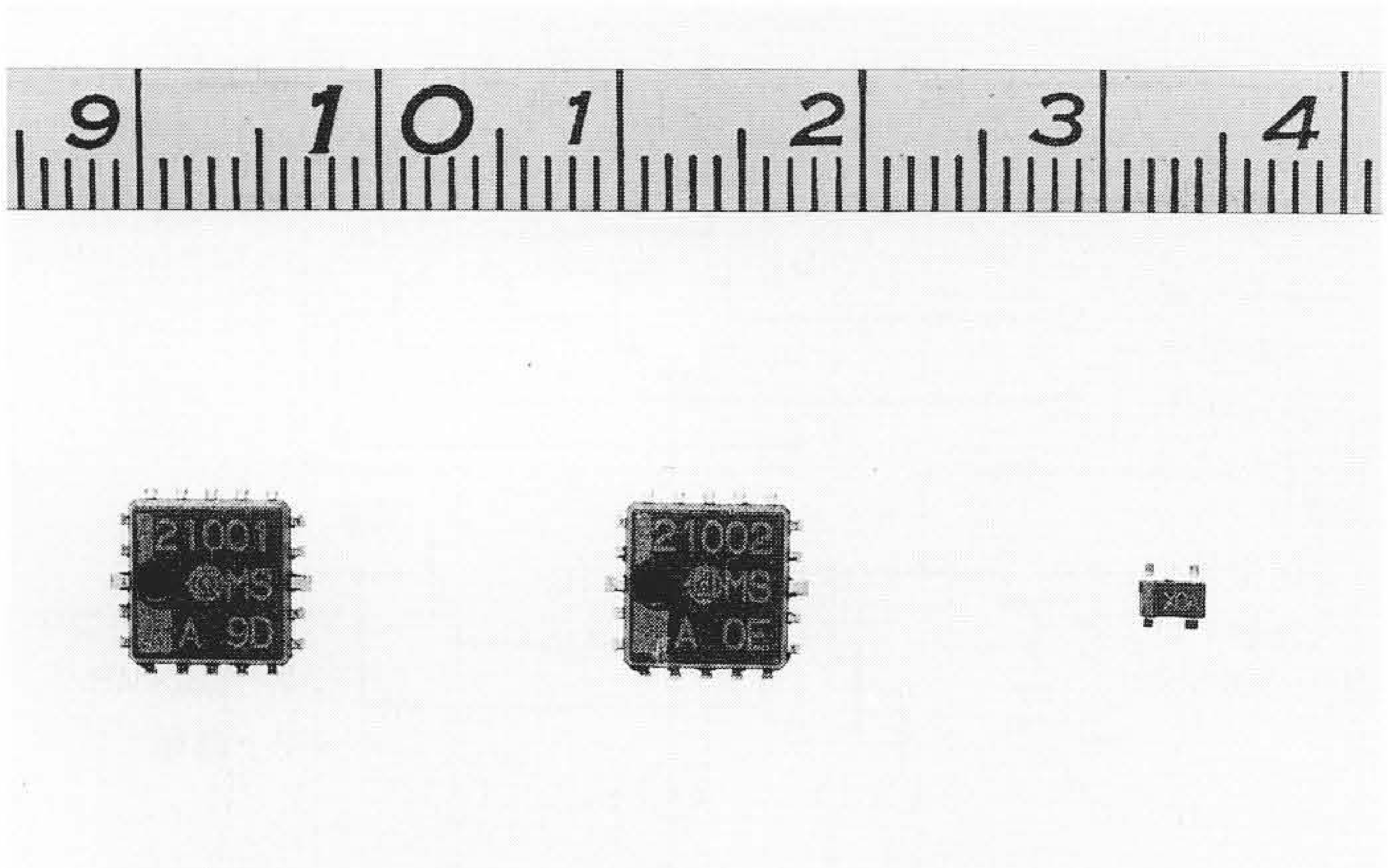


図5 GaAsミクサ回路の雑音指数・変換利得周波数特性 図4のミクサ回路の雑音指数・変換利得特性を示す。電源電圧は9Vを印加し，一つのDBMで50〜900 MHzの周波数変換を実現した。

よって，優れた低雑音性能・低ひずみ性能を実現した。BSチューナ用HA21002の内部ブロックダイヤグラムおよびチップ外観を**図7**に示す。

3 低雑音HEMT

HEMTは，FETの一種であり，構造的には，**図8**に示すように電子供給層となるN形のAlGaAs(アルミニウム・ガリウム・ひ素)と高純度のGaAs層から形成されている。この2種類の接合面に電子の集まった電子層が形成される。この電子層は，非常に厚みが薄いため二次元電子ガス層と呼ばれる。この二次元電子ガス層は，不純物のないGaAs層中に形成されるため，不純物による電子の散乱がなくGaAs本来の高電子移動度が得られる。このためHEMTは超高速スイッチング動作や超高周波動作に優れた性能が得られる。

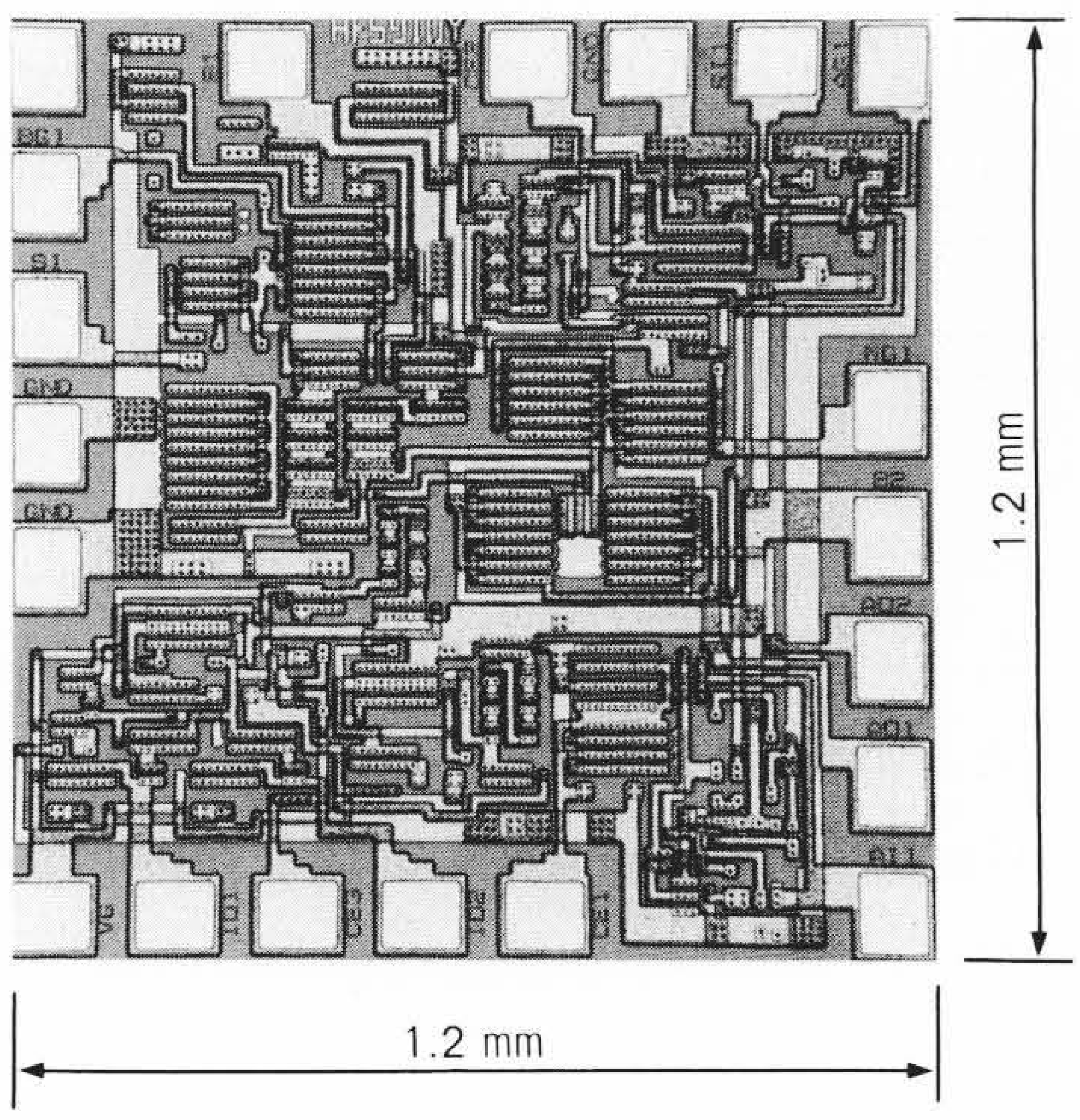


(a) HA21001 (b) HA21002 (c) HA21005

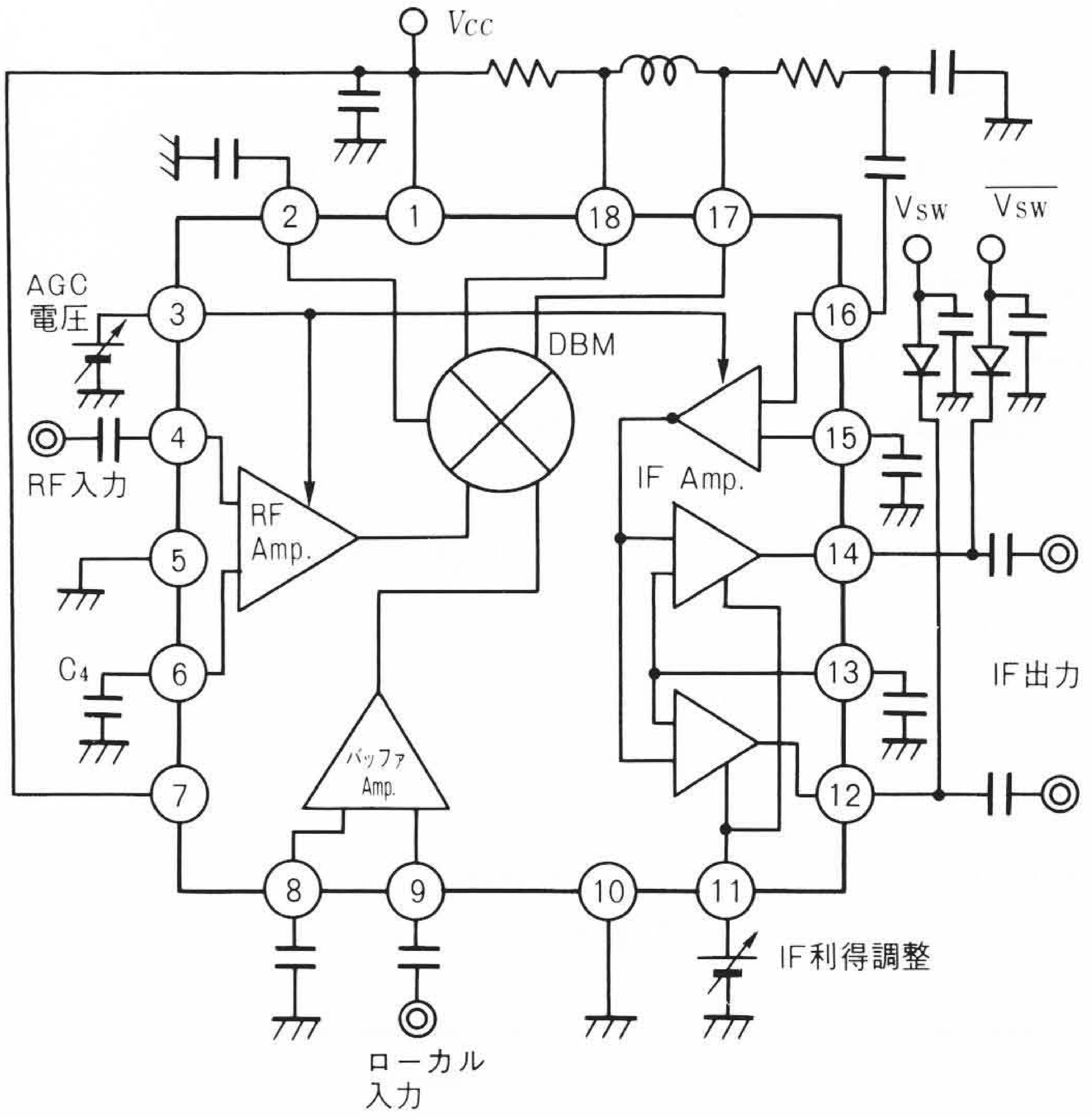
図6 高周波GaAs IC製品外観図 HA21001はテレビジョンチューナ用，HA21002およびHA21005はBSチューナ用GaAsアナログICである。

表2 高周波GaAs IC製品ラインアップ GaAsの特長点を生かしひずみ性能・高周波性能に優れたIC3品種の製品化を実施した。テレビジョンチューナ〜BSチューナの小形・高性能化が可能な製品ラインアップである。

形名	用途	外形	主要特性	
			電力，変換利得 (dB)	雑音指数 (dB)
HA21001MS	テレビジョン，VTRチューナ MIX，OSC	MSP-18	23 dB typ. (60, 460 MHz) 31 dB typ. (860 MHz)	10 dB typ. (60, 460 MHz) 8 dB typ. (860 MHz)
HA21002MS	BSチューナ MIX，AGC	MSP-18	31 dB typ. (990 MHz)	利得制御量 55 dB typ. (990 MHz)
HA21005	BSチューナ 広帯域RF増幅用	MPAK-4	12 dB typ. (990 MHz)	7 dB typ. (990MHz)



(a) チップ外観図



(b) 内部ブロック図

図7 BSチューナ用HA21002内部ブロック図およびチップ外観図 HA21002はBSチューナ用ミキサ，AGCアンプであり，約200素子を1チップ上に集積している。

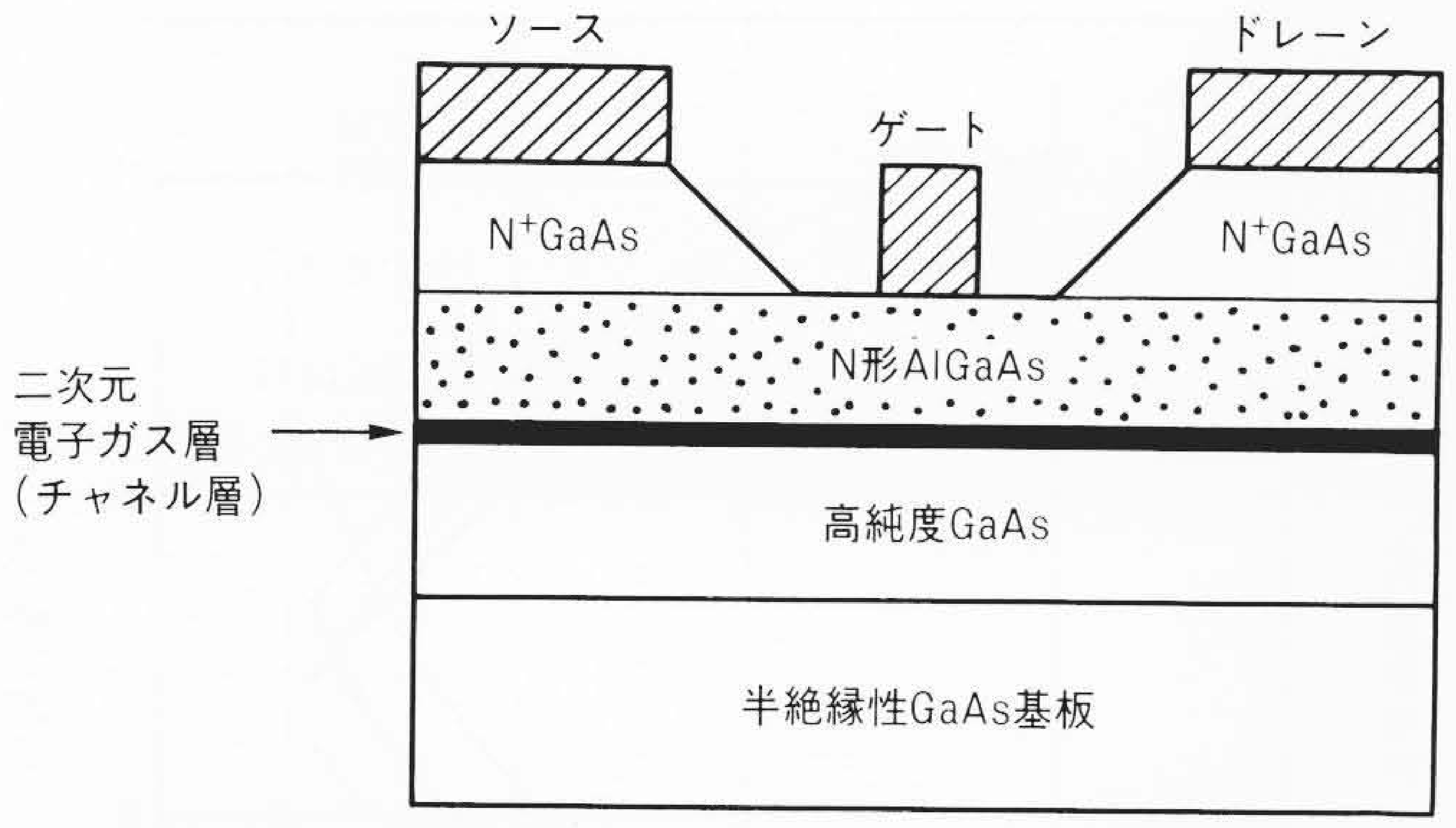
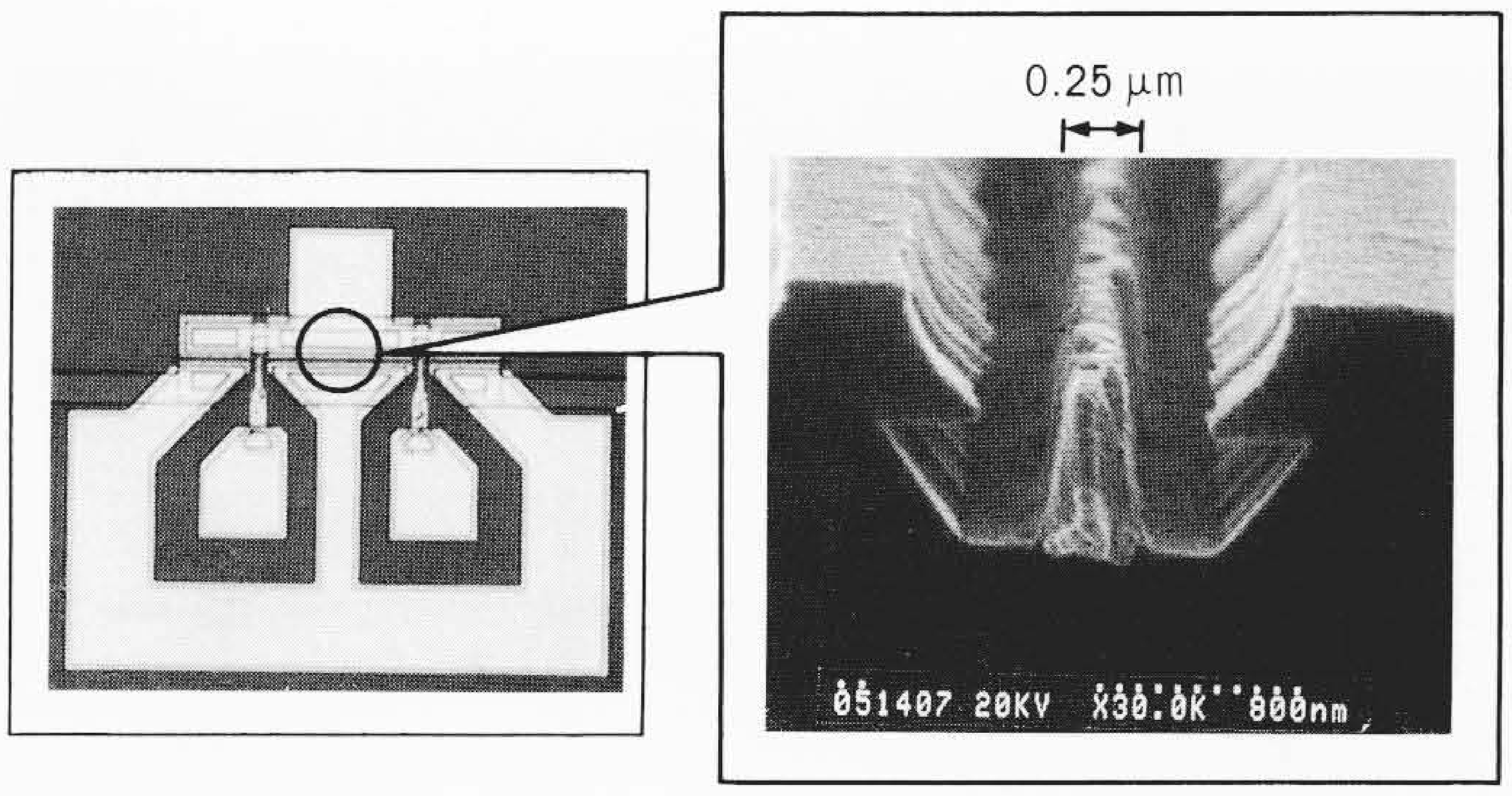


図 8　HEMTの基本構造図　　N形AlGaAsと高純度GaAsの接合面に二次元電子ガス層が形成され，この電子ガス層がチャネル層となり電流を流す。



(a) 2SK1615　　(b) ゲート部拡大図

図 9　HEMTチップ外観図とゲート部拡大図　　電子線直接描画技術により，0.25 μmの超微細ゲート電極形成を示す。

3.1　低雑音化技術

FETの雑音理論式は次式で示すことができる。

$$NF \simeq 1 + K \cdot f \cdot C_{gs} \left\{ \frac{(R_s + R_g)}{g_m} \right\}^{\frac{1}{2}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

ここに　NF：雑音指数
K：フィッティング係数
f：動作周波数
C_{gs}：ゲート～ソース間容量
R_s：ソース寄生抵抗
R_g：ゲート寄生抵抗
g_m：相互コンダクタンス

HEMTの低雑音化を達成するには，相互コンダクタンスg_mを増大させ，ゲート～ソース間容量C_{gs}およびゲート寄生抵抗R_g，ソース寄生抵抗R_sを低減させることが必要となる。これらの改善を行うには，結晶成長技術・微細加工技術，電極形成技術などのウェーハプロセス技術が重要となる。

(1)　結晶成長技術

相互コンダクタンスg_mの増大は，キャリヤとなる二次元電子ガス層のキャリヤ濃度を高くし，かつキャリヤの走行層となるGaAs層の高純度化を行うことによって実現できる。**図 8**に示すHEMTの各層の成長は，分子線エピタキシアル法によって行われるため，原子層単位の成長制御が可能となり，急しゅんなGaAs/AlGaAsヘテロ接合が形成でき，良好な二次元電子ガス層が得られる。また各層の濃度プロファイルを最適にすることにより，高品質なHEMT結晶が得られる。

(2)　微細加工技術

ゲート長L_gは，高周波性能を左右する重要なパラメータであり，最先端の微細加工技術が必要とされる。HEMTのゲート加工には，電子線直接描画法を用いて，0.25 μmの超微細ゲートの形成を行っている(**図 9**)。また，C_{gs}はゲート長を短縮し，かつゲート直下のAlGaAs層の濃度を最適化することにより低減し，高性能化を可能としている。

(3)　電極構造

寄生抵抗を低減するため，ゲート電極としては低抵抗アルミニウムを採用し，またゲート部への給電点を2点とし低抵抗化を図っている。またソース抵抗は，良好なオーミック接続が可能となるようN形GaAs層の濃度の最適化を行っている。

3.2　組立・選別技術

HEMTのワイヤボンディングは，従来，パット部の面積が小さくて済むウェッジボンディングが採用されていた。量産性に優れたネイル ヘッド ボンディングは，パット部の面積が大きく，寄生容量が増加するため，超高周波半導体には適用できなかった。今回，小ボール径化(ボール径：80 μm→50 μm)が可能な高精度ネイル ヘッド ボンダの開発により，超高周波素子へもその適用範囲を広げることが可能になった(**図10**)。また，12 GHzという超高周波での雑音指数・電力利得選別も，高性能超高周波自動選別機の開発により，直流特性・高

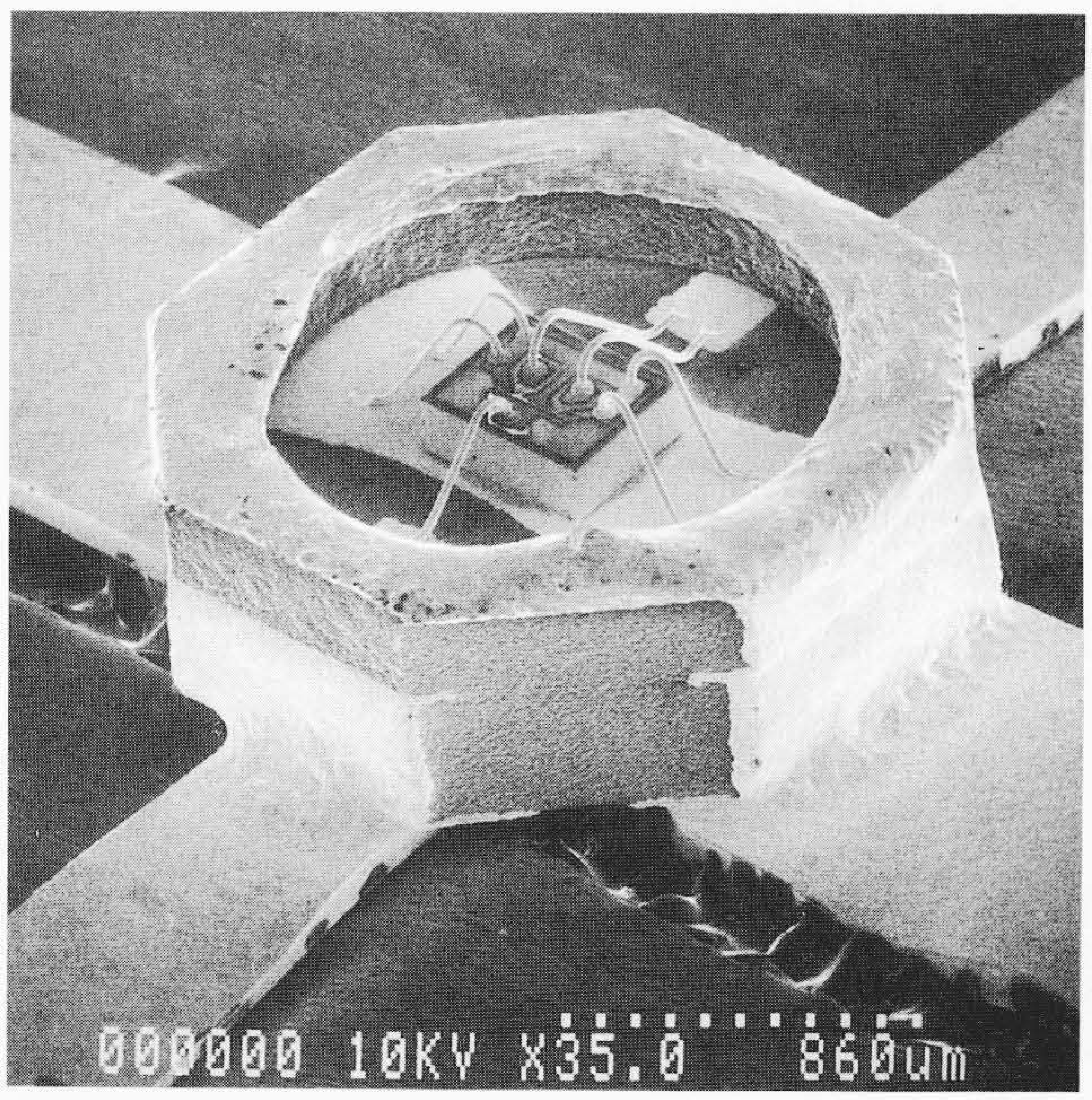


図10　高精細ネイル ヘッド ボンディング適用例　　超高周波素子に初めて量産性に優れたネイル ヘッド ボンディングを適用した。

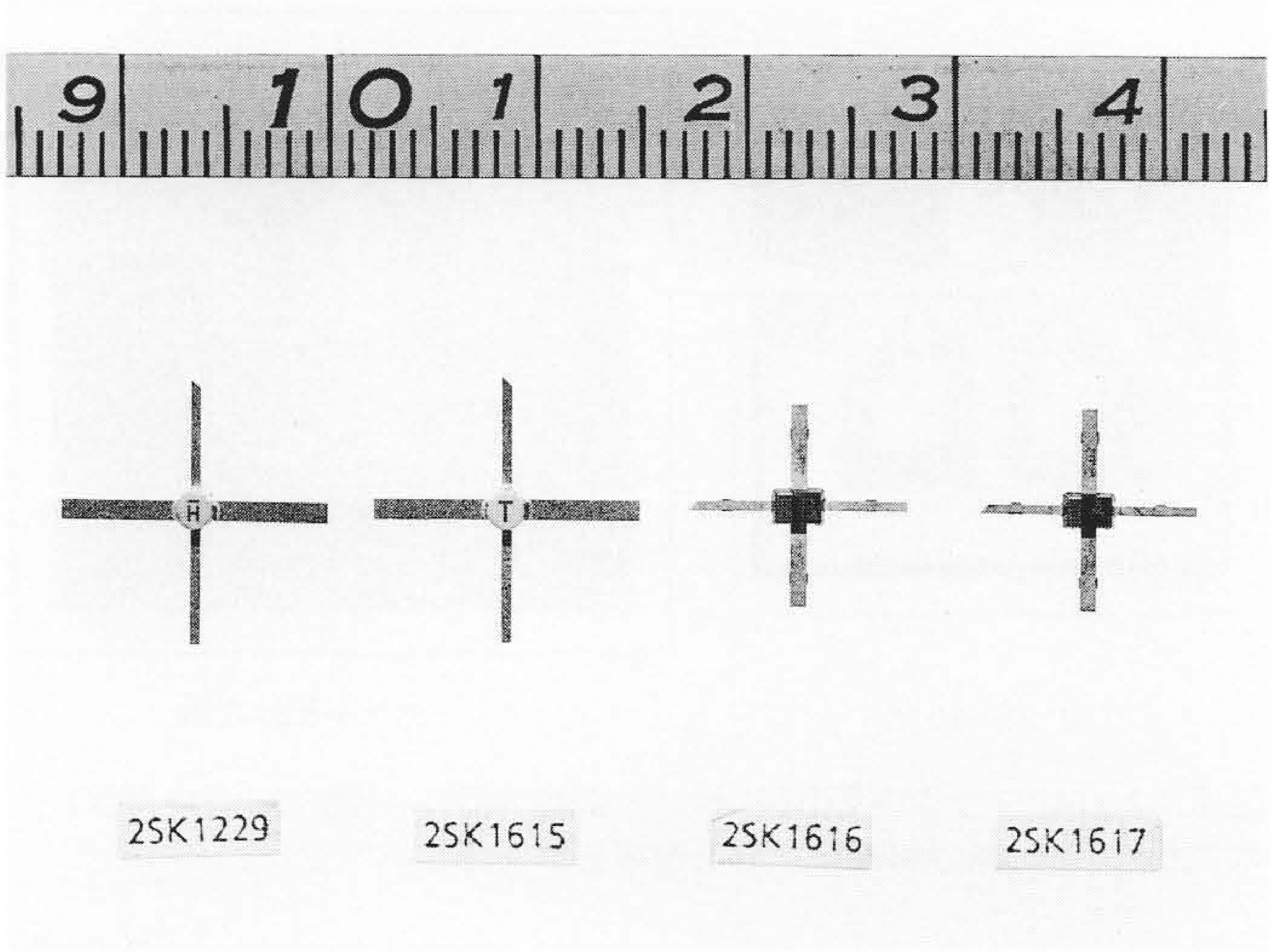


図11 低雑音HEMT製品外観図 12 GHz雑音指数0.8～1.3 dBの高性能が得られ，セラミック外形とレジン外形の2種類を製品化した。

表3 低雑音HEMTラインアップ 12 GHz帯で低雑音性能を持つHEMT 4品種をセラミック外形とレジン外形で製品化し，幅広い用途に対応できる製品ラインアップとした。

形名	用途	外形	規格
2SK1229	RF初段用	セラミック	NF＝1.0 dB typ., Ga＝11.0 dB typ.
2SK1615	RF初段用	セラミック	NF＝0.8 dB typ., Ga＝11.0 dB typ.
2SK1616	OSC, MIX用 RF2～3段用	μ-FPAK	NF＝1.3 dB typ., Ga＝10.0 dB typ.
2SK1617	RF1～3段用	μ-FPAK	NF＝1.0 dB typ., Ga＝ 9.3 dB typ.

注：μ-FPAK(HEMT用レジン外形の愛称)

周波特性を同時に選別することができ，量産面でのフレキシブルな対応が可能になった。

3.3 製品概要

低雑音HEMTシリーズとしては，高性能セラミック外形品とレジンモールド外形品の2系列があり，12 GHzの雑音指数0.8～1.3 dBをカバーする4品種を製品化した。製品の外観を**図11**に，製品ラインアップを**表3**に示す。特にレジン外形HEMT，2SK1616，2SK1617は量産性に優れ，レジン外形ながら雑音指数1.0 dB，1.3 dBの高性能を実現した。雑音指数・付随利得の周波数特性を**図12**に示す。2SK1615は，18 GHzでも雑音指数1.2 dBが得られ，2～18 GHzの幅広い範囲で使用が可能な高性能な製品である。

4 結 言

超高周波半導体として，GaAs高周波アナログICおよび低雑音HEMTの開発・製品化を行った。GaAsアナログICは，1 μm GaAs IC設計ルールを適用し，約200素子を1チップ上に集積し，1.75 GHzまで優れた高周波特性が得られるHA21002の製品化を行い，BSチューナの小形・高性能化を可能にした。

低雑音HEMTは，電子線直接描画技術による0.25 μmの超微細ゲート形成，分子線エピタキシアル技術による高品位

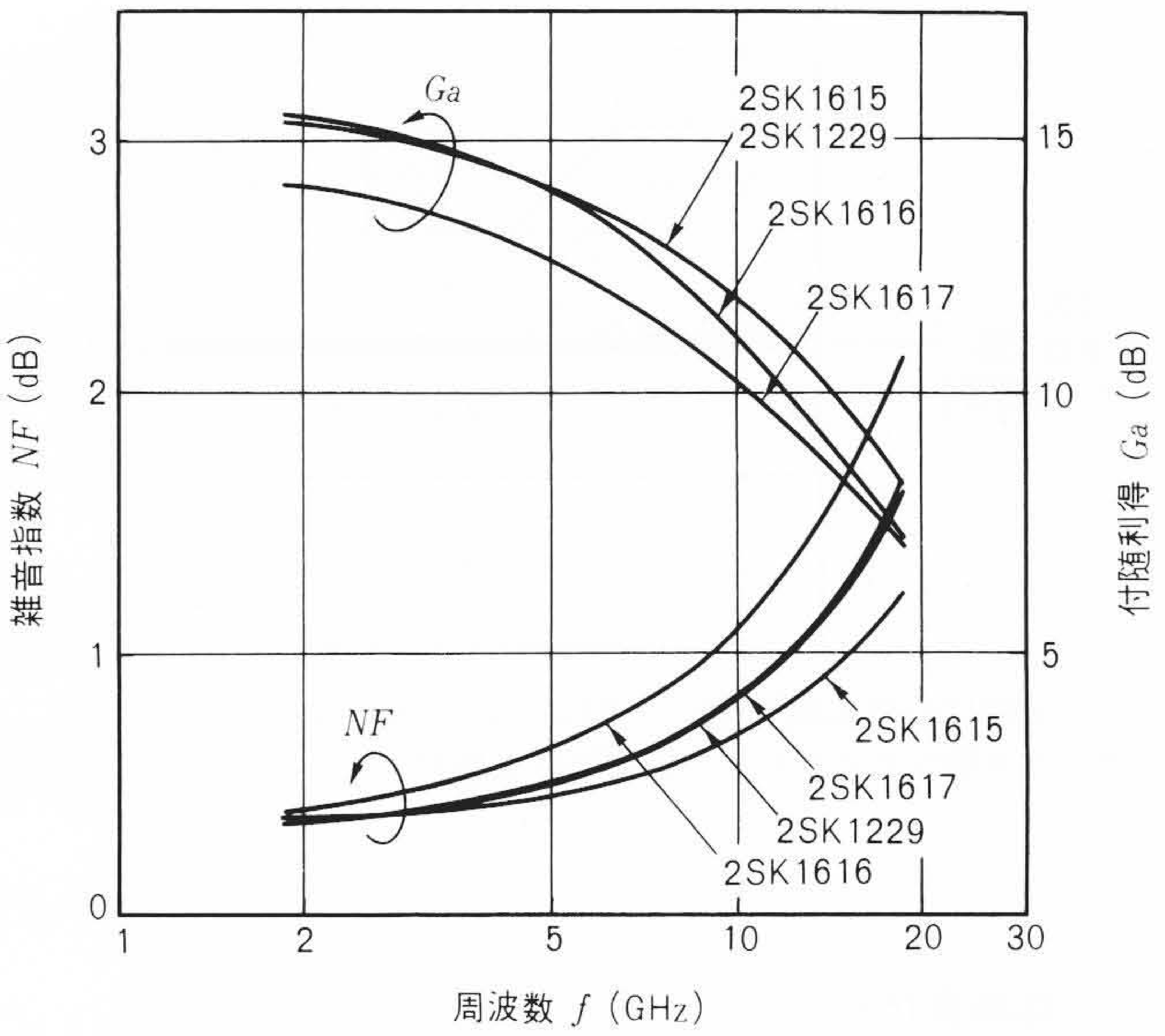


図12 HEMTの雑音指数・付随利得の周波数特性 12 GHz雑音指数0.8～1.3 dB typ.の性能を持つ4品種を製品化した。18 GHzでも1.2～2.1 dB typ.の高性能が得られる。

HEMT結晶を実現し，12 GHz雑音指数0.8 dBの低雑音性能を達成した。また，量産性に優れた世界初のレジン外形HEMT 2SK1616，2SK1617の製品化を行った。

今後さらに，衛星などを利用した各種映像・情報サービスは普及が進むと予想され，より高性能・高機能なGaAsアナログICや低雑音HEMTの製品を開発し，市場ニーズに対応していく考えである。

参考文献

1) 山根，外：衛星放送用低雑音MMIC増幅器，電子情報通信学会，ED89-153(1990-1)
2) Mizukami. M, et al.：A High Quality GaAs IC Tuner for TV/VCR Receiver, IEEE Trans. on CE, 34, 3(1988)
3) Yamamoto. A, et al.：A Compact Satellite 1 GHz Tuner with GaAs ICs, IEEE Trans. on CE, 35, 3(1989)
4) Nagashima. T, et al.：A 0.95～1.8 GHz GaAs Tuner for Direct Broadcast Satellite Reception ISSCC Digest of Technical Papers(1990-2)
5) 長谷，外：UHF帯中出力GaAsモノリシック増幅器，電子情報通信学会，C-406(1990-10)
6) 長谷，外：非対称構造GaAs MES FETの高周波特性の一検討，電子情報通信学会，C-48(1989-9)
7) 山根，外：2 DEG FET解析モデル，電子情報通信学会，C-98(1990-4)
8) 山根，外：Low Noise 2 DEG FET MMIC Amplifier for DBSアジア・パシフィック・マイクロウェーブ・コンファレンス(APMC)，41-3(1990-9)