

衛星搭載用エンジニアリングモデル ミリ波中継器受信部

Engineering Model for Receiving Section of Millimeter-wave Repeater in Satellites

Hitachi recently completed an order from the Radio Research Laboratories of the Ministry of Posts and Telecommunications for the second engineering model for the receiving section of a millimeter-wave repeater, part of the experimental communications satellite system. Because of its special assignment aboard the satellite, this repeater must have extremely low noise characteristics, compact configuration, light weight and low power consumption. It consists of a local oscillator, a frequency converter circuit, and an intermediate frequency amplifier. Its receiving frequency is 34.7 GHz, and its intermediate frequency, 3.95 GHz. Since the intermediate frequency amplifier employs GaAs Schottky barrier gate field effect transistors, the overall noise figure for the receiving section is reduced to 12 dB or less. And the noise figure for its intermediate frequency amplifier is only 4 dB or less. The local oscillator uses GaAs gunn diodes, holding its total power consumption to 4.5W or less including the loss in the power supply unit.

工藤康* *Yasushi Kudō*
 桑本良知* *Yoshitomo Kuwamoto*
 馬場芳宏* *Yoshihiro Baba*
 古寺博** *Hiroshi Kodera*
 植木克彦*** *Katsuhiko Ueki*

1 緒言

国内通信衛星システムは、海外では昭和47年11月にカナダが世界最初に完成し実用化に入ったが、アメリカをはじめ各国でもこの国内通信衛星システム計画が本格化しつつある。

我が国でも将来の通信の多様化、需要の拡大に対処するため、国内通信衛星システムの実用化が計画されている。その中の一つである実験用静止通信衛星(ECS)計画の一環として、日立製作所では郵政省電波研究所の指導により、衛星搭載用ミリ波中継器受信部のエンジニアリングモデル(EM₁₋₂)を完成し、昭和48年3月に納入した。

本装置は衛星搭載用を前提としたエンジニアリングモデル(EM₁₋₂)として開発されたもので、宇宙機器としての特殊環境条件を考慮した設計を行なうとともに、電気的な性能面でも低雑音化、低消費電力化が図られている。

このため、中間周波増幅用素子には新しく開発したGaAs電界効果トランジスタ(以下、FETと略す)を使用し、低雑音化を達成している。この結果、総合雑音指数は34.7GHzで12dB以下を確保した。

また、低消費電力化の対策の一つとして、局発信号発生部に使用した発振用素子には、発振効率3%台を確保するGaAsガンダイオードを新しく開発し用いた。

本稿はこれらの概要について紹介するものである。

2 装置の概要

一般に衛星に搭載される機器の開発はブレッドボードモデル(BBM)、エンジニアリングモデル(EM)、プロトタイプモデル(PM)、最後に打上げ用のフライトモデル(FM)と順次4段階のステップで実施されるが、ミリ波帯を使用する通信技術はまだ本格的実用段階に至らず、技術開発中であるため、

今回のエンジニアリングモデルの開発は第一次エンジニアリングモデル(EM₁₋₁)、第二次エンジニアリングモデル(EM₁₋₂)の2段階に分けて行なわれた。

本稿で述べるのはこの第二次エンジニアリングモデルであり、第一次エンジニアリングモデル(EM₁₋₁)の技術を更に発展させたもので、今後静止通信衛星システムの検討のための各種実験に使用される予定である。

本装置は実験用静止通信衛星システムの中で、上り回線用として衛星に搭載された受信システムの入力部に使用されるものである。

図1は本装置の外観(完成時には硬質発泡ウレタン樹脂でポッティングを行なう)を、図2は概略系統図を示すものである。

ミリ波中継器受信部は、周波数変換部及び局発信号発生部を含む高周波部並びに中間周波増幅部より構成されている。

衛星に搭載される中継器の条件は、通信衛星の大きさ、通信衛星重量及び搭載される太陽電池により大きく制約されるため、装置としての重量の軽減及び電力消費量の低減は、一般に使用される装置と比較して特に重視されるものである。

また、中継器の低雑音化は、中継システム設計上地球局の送信電力を決定する要素であり、本装置の低雑音化により地球局の経済化が左右されるものである。

本装置の製作は、上記のように軽量化、低電力化、低雑音化の3要素に重点を置き実施された。

2.1 主要定格

ミリ波中継器受信部の主要定格は次に示すとおりである。

受信周波数：34.7GHz

中間周波数：3.95GHz

* 日立製作所戸塚工場

** 日立製作所中央研究所 理学博士

*** 日立電子株式会社小金井工場

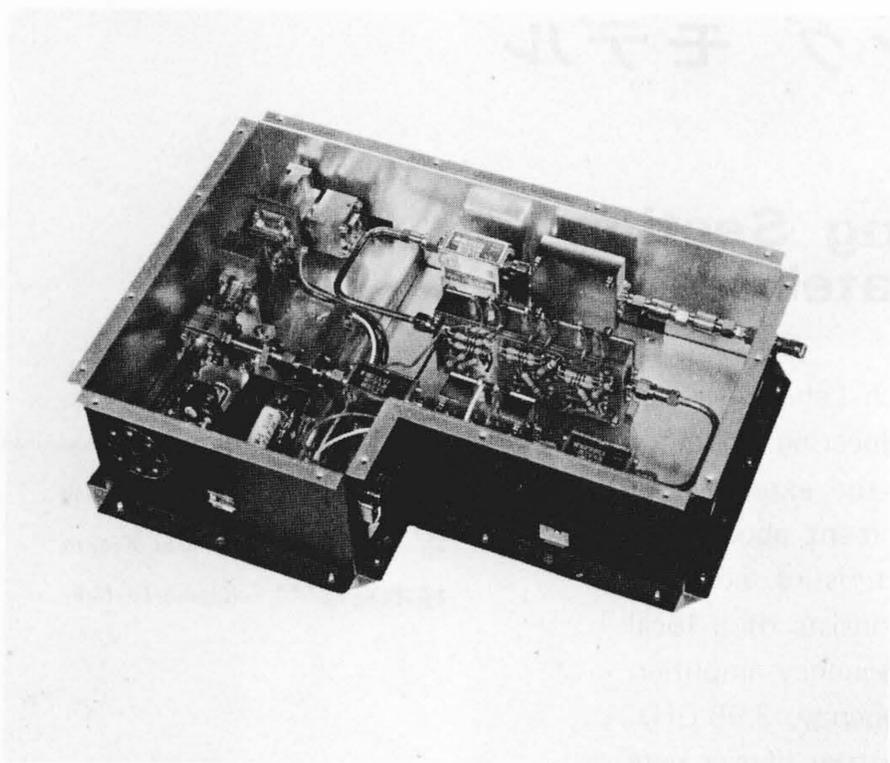


図1 ミリ波中継器受信部の外観 電圧変換回路は含まず、寸法は280×200×80(mm)、重量は1.7kgである。

Fig. 1 Receiving Section of Millimeter-wave Repeater

雑音指数：12dB以下
 総合利得：23.5～26.5dB ステップ可変
 電源：DC21～30V 4.5W以下
 装置重量：2.5kg以下

2.2 設計の要点

(1) 低雑音化：周波数混合用GaAsショットキーバリアダイオード及び中間周波増幅用GaAs FETを新しく開発使用する

とともに、高周波ろ波器の製法に改善を加え、低雑音化を達成した。

(2) 低電力化：局発信号発生部では、発振素子としてGaAsガンダイオードの高効率発振について検討を加え、また、回路方式的には、高Q安定化空洞ロック方式を採用して低消費電力化を達成するとともに、小形軽量化をも実現している。

(3) 宇宙機器としての信頼性確保：本装置は衛星搭載機器のエンジニアリングモデルであるため、信頼度設計上次の設計手法を用いるとともに、部品設計製作の段階においても気圧、振動などの考慮が払われている。

FMEA (Failure mode Effect Analysis)

WCA (Worst Case Analysis)

(4) 機能単位でのインタフェース設定：エンジニアリングモデルとしての有効的活用を図るために、各機能単位ごとにインタフェースを設定、装置全体としての試験のみならず、機能単位ごとに十分な試験が実施できるようになっている。

3 高周波部

3.1 受信高周波ろ波器

本装置に使用した受信高周波ろ波器は、直結形多段低損失帯域通過ろ波器により構成されている。段数は9段で電子計算機によるシミュレーションにより必要帯域及び減衰量の設計が行なわれている。

このろ波器には、システム設計上 $f_0 \pm 300\text{MHz}$ にて必要減衰量30dBの選択特性をすべて課せられているため、ろ波器製造に当たっては特に高いQを取る必要があった。

このため、製造に当たっては、導電面となるフィルタ内面はAg電解鍍造により、製作完成後のめっきを不要とした。この結果得られた帯域、減衰、遅延などの主な特性は図3に示すとおりである。

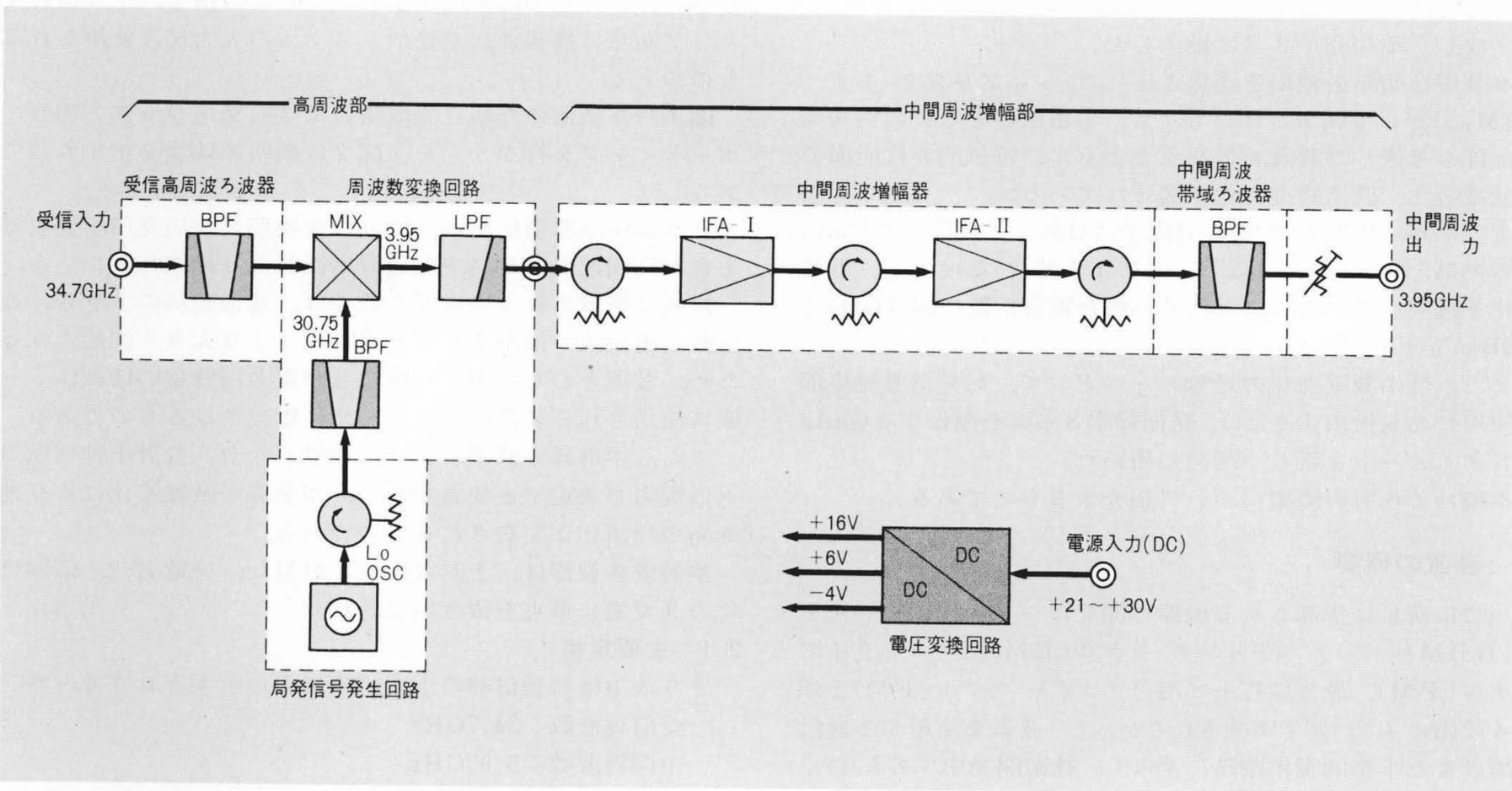


図2 ミリ波中継器受信部系統図 装置全体の信号の流れと各部の関係を示す。受信入力信号34.7GHzは高周波部で3.95GHzに周波数変換され、中間周波増幅部で所定のレベルまで増幅され次に続く装置へ供給される。

Fig. 2 Blok Diagram of Receiving Section for Millimeter-wave Repeater

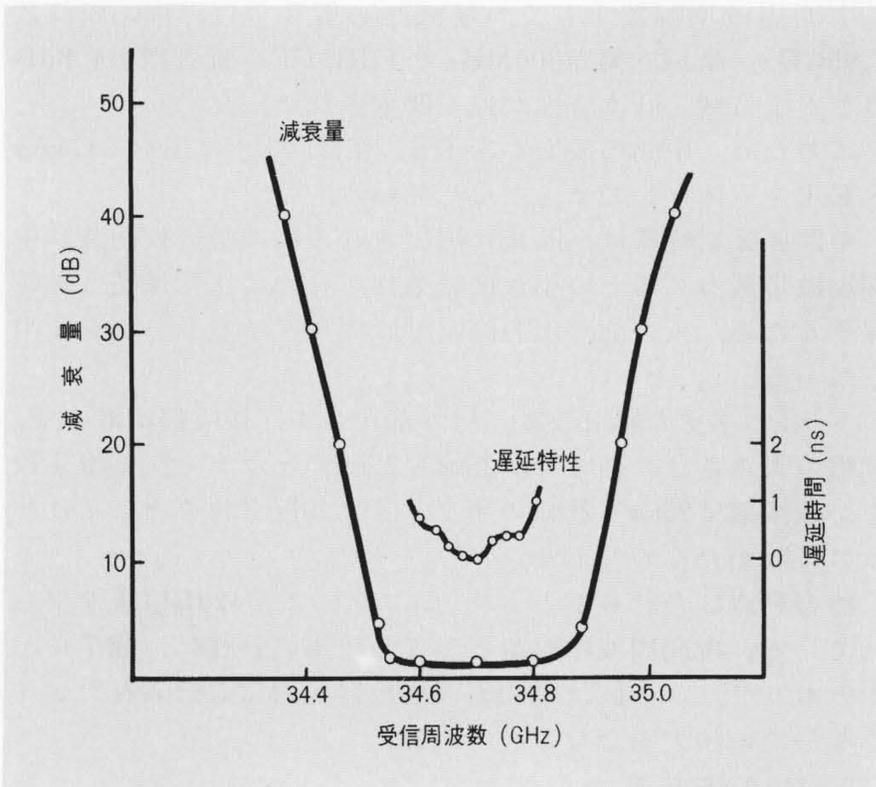


図3 受信高周波ろ波器の減衰特性及び遅延特性 高周波ろ波器の帯域内通過損失及び帯域外の選択特性を表わすもので、規格配分をほぼ満足している。

Fig. 3 Loss & Delay Time Characteristics of Millimeter-wave B.P.F

3.2 周波数変換回路

周波数変換回路に使用するミキサダイオードとしては、ミリ波帯で実績のあるGaAsショットキーバリアダイオードを採用した。本ダイオードは3または5 $\mu\text{m}\phi$ の接合直径を有する、いわゆるハニカム構造を持っており、ケーシングは第一次エンジニアリングモデル(EM₁₋₁)としての実績を積んだマイクロピル形ケースに改良を加え、図4に示すケースに組み込まれている。周波数変換回路は、受信高周波ろ波器及び局部発振器帯域ろ波器の間にミキサ回路を配置したインラインシングルエンドミキサ方式を採用、ミキサ回路内に配置したラジアルラインモード共振板による整合回路を設けているので、周波数設定は容易である。

本構造による周波数変換回路の理論変換損失は、上述の接合部パラメータより接合部理論変換損失(映像周波数短絡条件)1.15dB寄生パラメータによる増分損失1.76dB(@34.7GHz, 5 $\mu\text{m}\phi$ 接合)と算定され、更に受信高周波ろ波器をはじめとする定損分は実測により2.25dBであるので、理論的には5.16dBと計算される。この結果、得られた周波数変換回路としての代表特性は図5に示すとおりである。この値は受信高周波ろ波器特性を含むもので実測変換損失5.5dBが得られ、理論検討値とよく一致している。

3.3 局発信号発生回路^{(1)~(4)}

ミリ波帯の局発信号の発生方式としては、一般に次の3方式が考えられる。

- (1) 高Q安定化空胴によるロック方式
- (2) 高安定水晶規準発振器によるロック方式
 - (a) 注入同期方式
 - (b) 位相ロック方式

このうち、水晶発振器の高安定性を利用する諸方式はいずれも逡倍回路、増幅回路を必要とし、したがって、多くのバラクタ、トランジスタなどの半導体部品やチューニング回路をもつ。

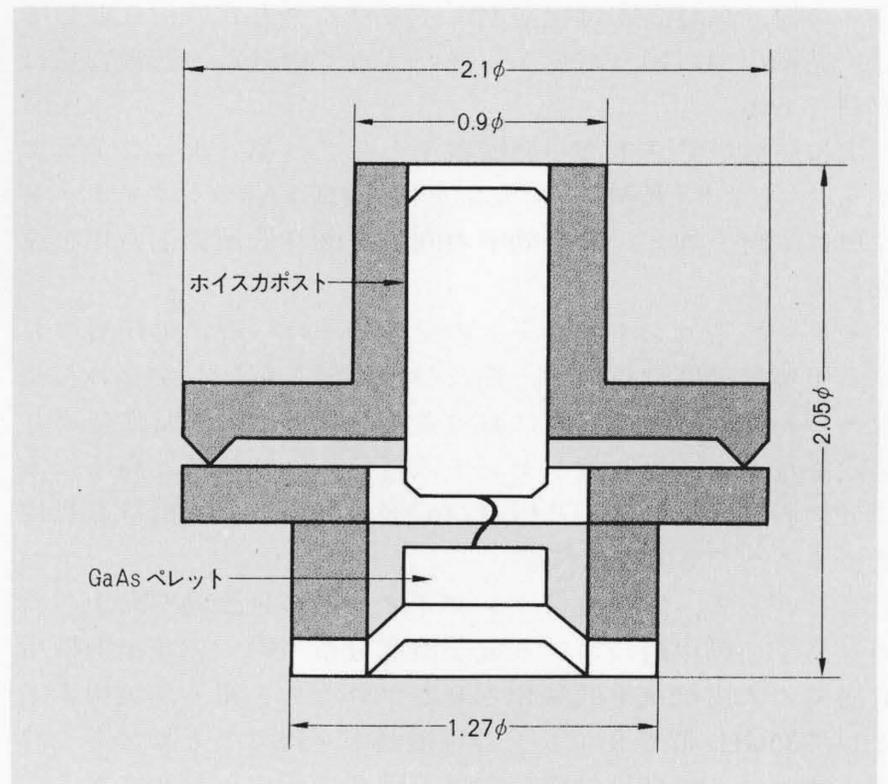


図4 マイクロピル形ショットキーバリアダイオードの構造 GaAsペレットは超小形セラミックケースに封入されている。

Fig. 4 Cross Section of Schottky Barrier Diode

空胴によるロック方式は、その点、部品点数が少なく、かつ半導体部品もガンダイオードのみとなり、重量の軽減の面で特に有利である。また、方式の信頼性は部品点数、特に半導体部品の数が増せば低下することを考慮して、空胴ロック方式を採用している。

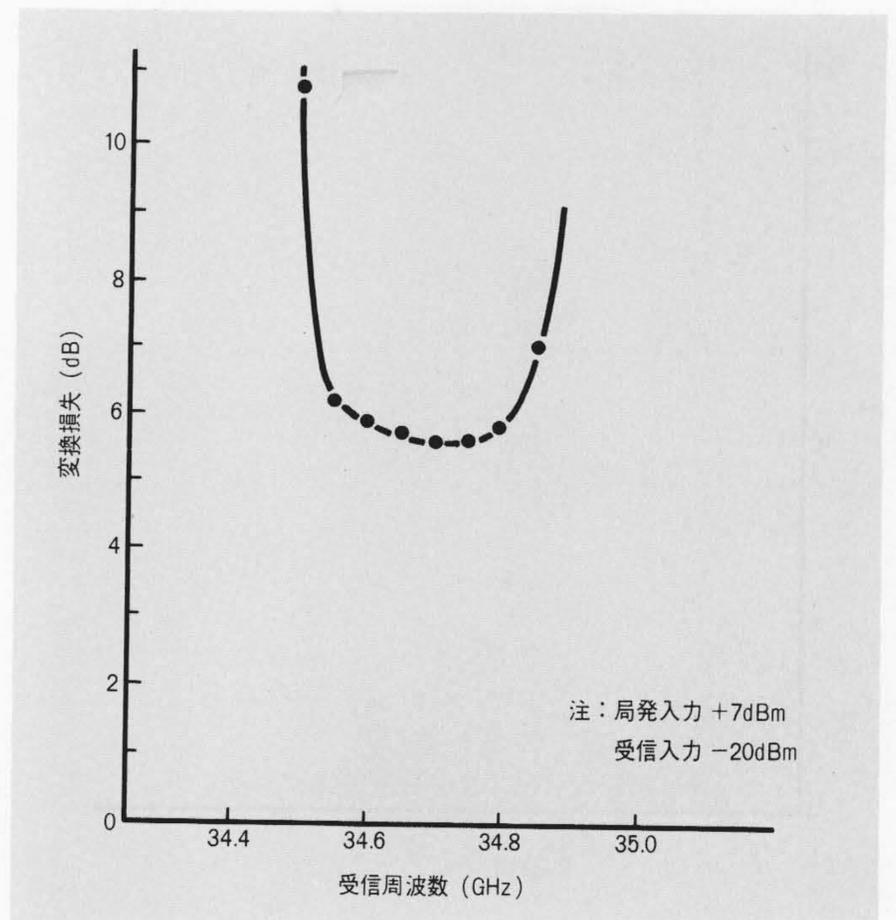


図5 周波数変換回路の変換損失 受信高周波ろ波器の換入損失を含んだ、高周波部総合の特性を示す、規格配分6.5dB_{max}に対し約1dBのマージンが得られた。

Fig. 5 Conversion Loss Characteristics of Frequency Converter

その他、高Q高安定化空胴によるロック方式の利点としては、発振出力の雑音が少ないという点で中継器の低雑音化に有利である。

次に局発信号発生部の発振素子としては第一次エンジニアリングモデル(EM₁₋₁)で実績を積んだGaAsガンダイオードに更に改良を加え、発振効率の向上を図り低消費電力化を達成している。

センチ波帯ガンダイオードの発振効率は一般に動作層における不純物濃度分布の均一性及び動作層と電極、すなわち基板あるいはn⁺層との界面における不純物濃度の異常性により決定されるが、周波数がセンチ波帯からミリ波帯と高くなるに従い表皮効果による基板及びn⁺層の高周波交流抵抗も無視することができなくなる。

したがって、ミリ波帯ガンダイオードの発振効率向上のために素子の動作層における電子濃度分布の均一化及び電極用n⁺層での表皮抵抗を低減化させるプロセスを組み、実用素子として30GHz帯で3%以上の発振効率を得ることができた。代表的ロットの発振効率分布は、図6に示すとおりである。

4 中間周波増幅器

4.1 中間周波増幅器

中間周波増幅回路は、衛星搭載用として小形軽量化を満足させるためにマイクロIC化が行なわれている。

本増幅器のマイクロ波IC化は、サファイアの基板を使用し、薄膜技術によりマイクロストリップ線路を形成し、その線路上に積層セラミックチップコンデンサ、トランジスタ、及び入出力の接続用小形同軸コネクタ(OSM形)を微小接合技術により接合した、ハイブリッド形ICである。

トランジスタへのバイアス供給回路は、IC外部に設けられ一般部品が使用されている。

中間周波増幅器としての電氣的必要条件は、増幅周波数3.95GHz、帯域内偏差300MHzで1dB以下、雑音指数4.8dB以下と広帯域、低雑音性が強く要求された。

このため、中間周波増幅素子としては、次ぎに述べるGaAs FETを主体としてまとめられている。

中間周波増幅器は、前後に接続される周波数変換回路、中間周波帯域ろ波器との相互接続条件を含めて広帯域特性を確保するため、入力部、出力部及び段間にアイソレータを使用している。

トランジスタの使用数は、初段部が2本、後段部が6本で、基板の大きさは、初段部が25mm×25mmのサファイア基板1枚を、後段部は25mm×25mmのサファイア基板3枚をそれぞれケースに収めたものである。

総合利得は合計8本のトランジスタにより42dB以上が得られている。中間周波増幅器としての代表的特性は、図7に示すとおりで、この値は中間周波増幅器入力に設けられたアイソレータの損失を含むものである。

4.2 GaAs FET

4.1で述べた中間周波増幅器を実現するため、GaAs FETを用いた。GaAs FETは1966年にC. A. Mead⁽⁹⁾によって提案されて以来、マイクロ波トランジスタとして有望視され、各所で研究、開発が進められている^{(6)~(9)}。GaAs FETの特徴は次の点にある⁽¹⁰⁾。

- (1) GaAsの電子移動度が大きいので、しゃ断周波数を高くできる。
- (2) 結晶中に既存する多数キャリアのみを用いる素子であるため低雑音である。
- (3) 製作プロセスが拡散などの高温処理を必要とせず、かつ構造が簡単なため、高周波化に必要な微細加工が容易である。

GaAs FETは、半絶縁性GaAs基板(比抵抗 $\sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$)

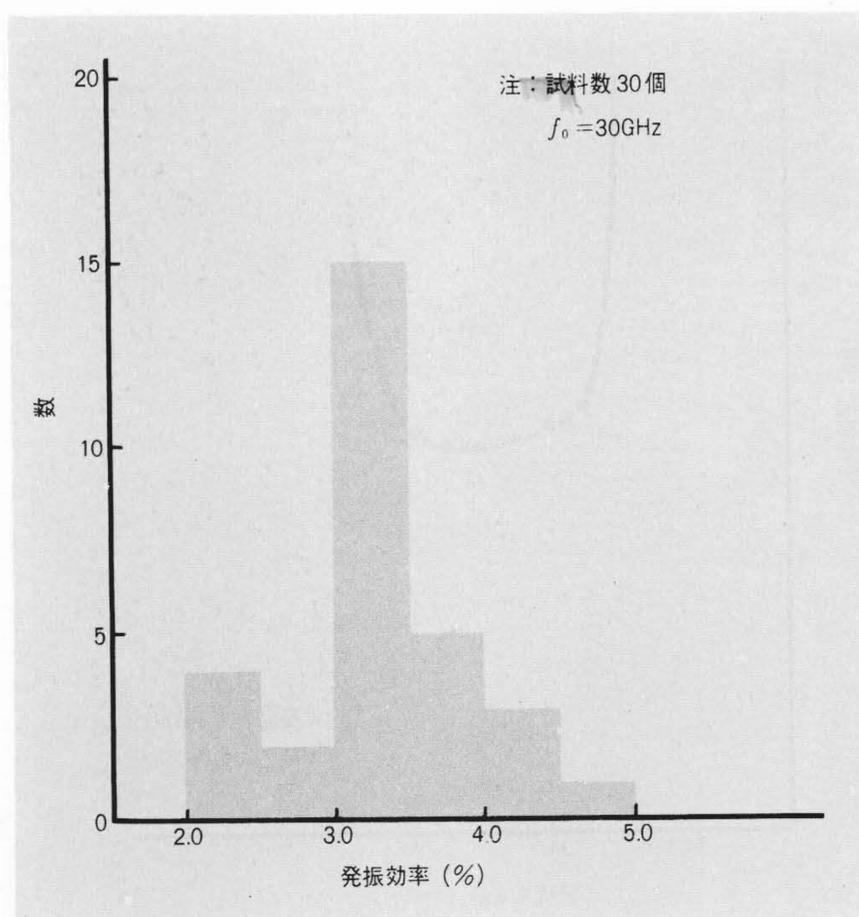


図6 GaAsガンダイオードの発振効率分布 平均発振効率3.3%、発振効率2.5%以上の歩どまり87%である。

Fig. 6 Histogram for Oscillation Efficiency of GaAs Gunn Oscillator

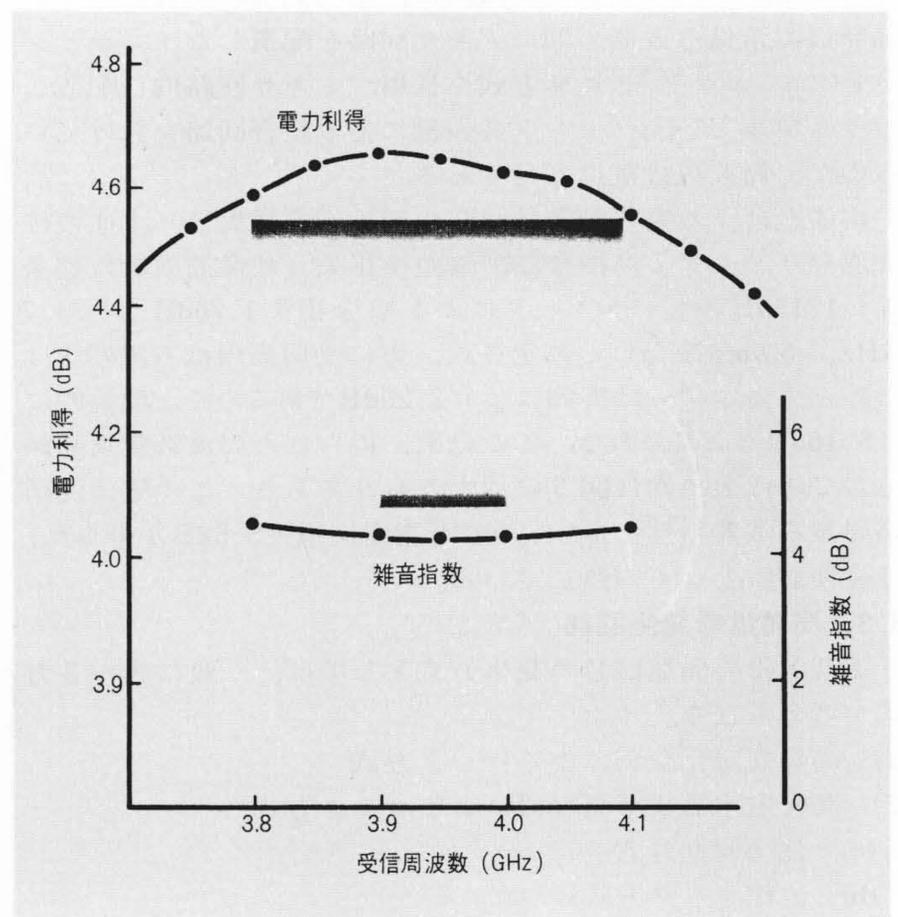


図7 中間周波増幅器の利得及び雑音指数 雑音指数は入力に設けたアイソレータを含み、規格配分4.8dBに対し0.5dBのマージンがある。

Fig. 7 Gain & Noise Figure Characteristics of IF Amplifier

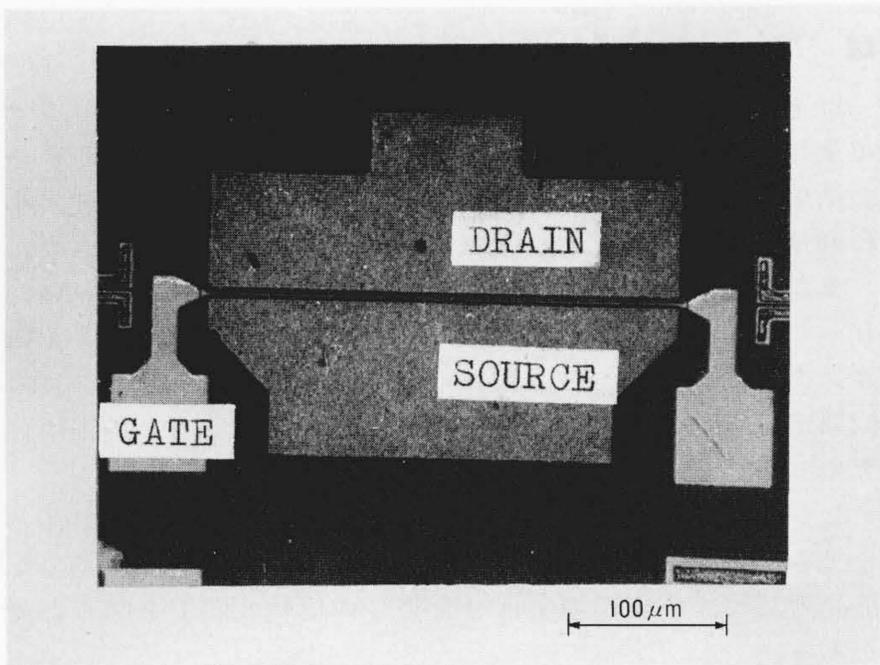


図8 GaAs FETチップの平面構造 ドレイン、ゲートソース間の各間げきは非常に狭く、微細加工技術を要する。

Fig. 8 Plane Structure of GaAs FET

上のN形エピタキシャル層(比抵抗約 $0.03\Omega \cdot \text{cm}$)を能動層とする。これは図8のようにソース、ドレインのオーム性電極、その間にゲートとなるショットキー接合電極を設ける。原理的にはゲート電極のソース、ドレイン電極方向の長さ(ゲート長)が高周波性能を決め、ゲート長に逆比例して性能が上がる。

このGaAs FETの性能を高め、ミリ波中継器への適合性を満足するため、次のような新たな諸技術の開発、進歩が必要であった。

- (a) GaAs FETの基本動作、マイクロ波帯で重要な影響をもつ寄生素子の両者を考慮した総合設計理論とこれに基づく素子構造の最適化、製作技術改良の方向付け⁽¹¹⁾。
- (b) 入出力絶縁性が優れ、損失の少ないFET用パッケージの開発。
- (c) エピタキシャル結晶成長法の改良による特性の改善⁽⁸⁾。
- (d) 微細加工性の優れたソース、ドレイン用低抵抗オーム性電極の形成。
- (e) はく離法による電極微細加工とゲート長の短縮。

以上の結果、図8に示すような平均のゲート長 $1.5\mu\text{m}$ のGaAs FETを製作した。ゲート幅は $300\mu\text{m}$ である。このFETは、上記のFET用セラミック円板形パッケージに組み込まれる。図9は、この完成されたGaAs FETを示すものである。

開発したGaAs FETの静特性の一例は図10に示すとおりである。最適設計の結果、低雑音化のためには能動層厚さの最適化の必要なことが分かり、この設計指針に従って作られたGaAs FETのドレイン飽和電流 I_{DSS} は 30mA 前後であった。雑音最小のバイアス条件はドレイン電流 10mA 付近にあり、このときの消費電力は約 30mW であった。この消費電力はSiバイポーラトランジスタに比べると約 $1/3$ で、衛星搭載用のための低消費電力化の要求を満たすものであった。

図11は、高周波特性の最も良いものの例を示すものである。しゃ断周波数(最高発振周波数) f_{max} は 50GHz 、 4GHz での雑音指数は 2.6dB 、最大電力利得 G_{max} は 20dB であった。また、中間周波増幅器に用いたGaAs FETの 4GHz での雑音指数

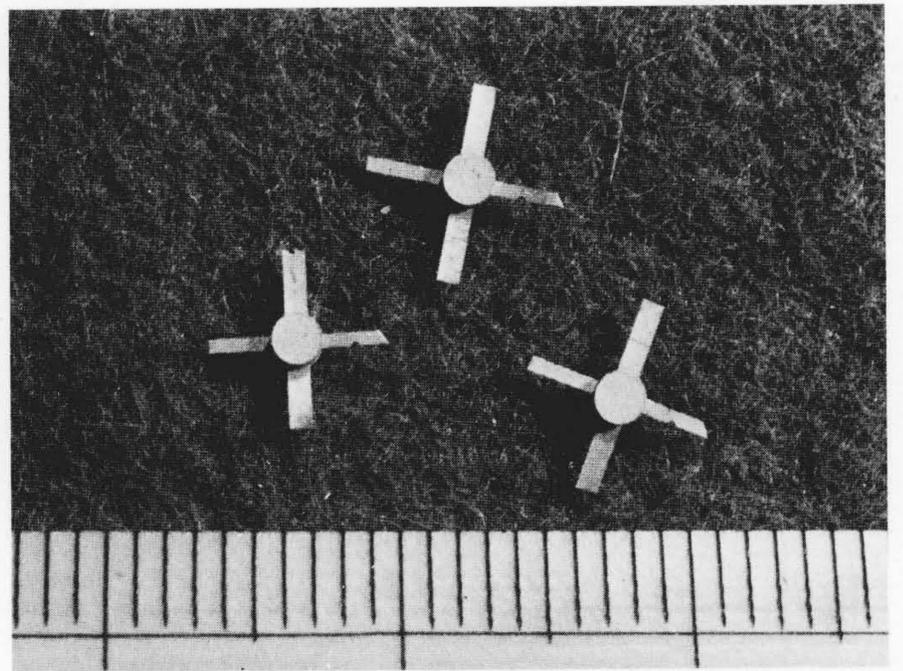


図9 パッケージに組み込まれ完成したGaAs FET(スケールの大きさ: 1目盛=1mm) 各端子の配置は中央にゲート端子(上下に伸びた幅の広いリード)を、左右にソース及びドレインを配置しシールド効果を持たせている。

Fig. 9 GaAs FET

は 3dB 前後で、このときの実利得は 8dB 前後であった。この雑音性能は、衛星搭載ミリ波中継器の中間周波増幅器用として十分なものである。しかも、信頼性向上に有利なパッケージ入りで、消費電力も小さい。更に、設計上、回路との適合性も考慮されており、所期の性能の中間周波増幅器、ひいてはミリ波中継器受信部の完成にも役立つことができた。

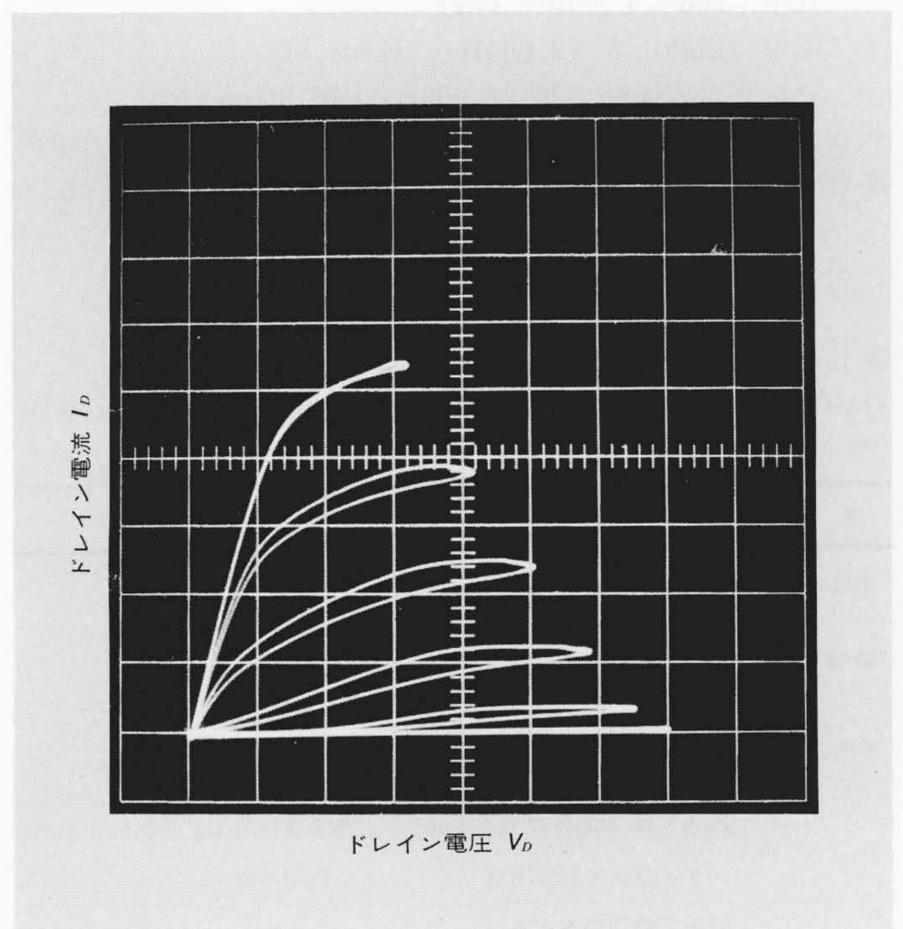


図10 GaAs FETの静特性 横: V_D 1V/div, 縦: I_D 5mA/div, バイアス: V_G 0.5V/step, ドレイン電圧 $1.5\sim 3\text{V}$ が最適であることが分かる。

Fig. 10 Typical $V_D - I_D$ Characteristics of GaAs FET

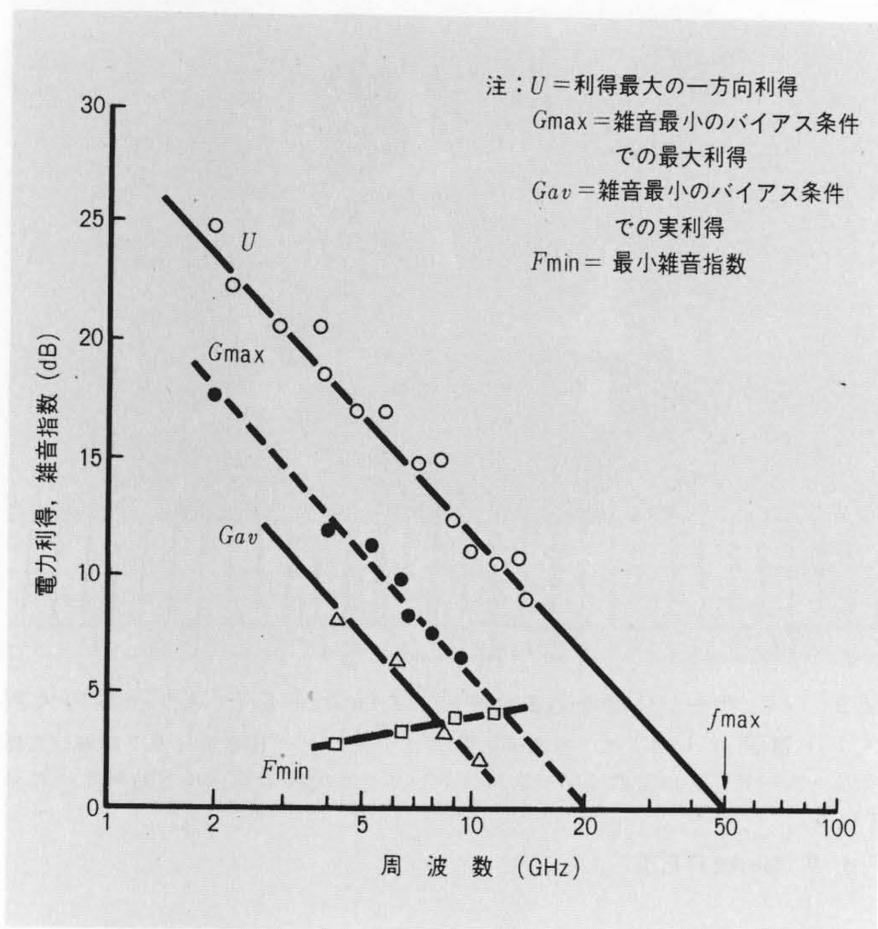


図11 電力利得と雑音指数の周波数依存性 Uの分布を直線に伸ばすことにより、 f_{max} 50GHzであることが分かる。

Fig. 11 Power Gain & Noise Figure V.S Frequency Characteristics of GaAs FET

5 総合特性

本装置の総合主要性能は表1に示すとおりである。

なお、本装置に与えられた特殊環境条件は、

温度：0～+45°C

気圧：760～ 1×10^{-5} Torr

正弦波振動：5～2,000Hz 最大8.5G

ランダム波振動：20～2,000Hz 16.3Grms

となっており、このうち、温度条件及び気圧条件を含めての雑音指数、総合利得の変動幅は0.5dB以内が得られている。

表1 ミリ波中継器受信部総合主要性能(標準環境条件)

Table 1 Specification & Characteristic of Receiving Section for Millimeter-wave Repeater

項目	設計仕様	測定値
受信周波数	34.7GHz	—
雑音指数	12dB以下	11.3dB
帯域内偏差	$f_0 \pm 50\text{MHz}$ 1dB以下	0.6dB
	$f_0 \pm 150\text{MHz}$ 3dB以下	2.5dB
利得	23.5～26.5dBの間で、1dBステップにて設定可能	指示値に対し、 $\pm 0.5\text{dB}$ 以内に設定可能
消費電力	電圧変換回路を含み、4.5W以下	3.5W
重量	電圧変換回路を含み、2.5kg以下	2.35kg

6 結 言

以上、ECS計画の一環としての第二次エンジニアリングモデル ミリ波中継器受信部製作の概要について述べた。その結果、衛星に搭載するための必要条件である低雑音化、小形軽量化及び消費電力の低減の見通しを得ることができた。

また、装置まとめに使用した半導体については、GaAsショットキーバリアダイオードのミリ波帯での低損失化、GaAsガンダイオードのミリ波帯での高効率発振化及びマイクロ波低雑音トランジスタとしてのGaAs FETの完成と各実用化をいっそう進展させることができた。

しかし、今後衛星搭載用ミリ波中継器フライトモデル用として本装置をまとめるためには、これら半導体を更に完全な部品として、宇宙環境条件を含めての信頼度向上を図る必要がある。

終わりに本装置の開発に当たり、御指導を賜った郵政省電波研究所川上特別研究官をはじめ、関係各位に対し深く謝意を表わす次第である。

参考文献

- (1) 青木俊男, 田中修平: 「超高周波ガン・ダイオードの高出力化」 信学会マイクロ波研究会資料 MW72-29 (昭47)
- (2) 田中修平, 青木俊男: 「ダイヤモンド・ヒートシンクを用いた20GHz帯高効率・高出力ガンダイオード」 信学会マイクロ波研究会資料 MW72-108 (昭47)
- (3) 宮崎ほか: 「連続液成長で作ったミリメートル波用ガンダイオード」 電子通信学会誌 55 9 (1972)
- (4) 田中修平, 青木俊男: 「30GHzガンダイオードの高効率化」 信学会全国大会 381 (昭48)
- (5) C.A.Mead: "Schottky Barrier Gate Field Effect Transistor" Pro IEEE 54 307-308 (1966)
C.A.MeadがGaAsショットキーバリアゲートFETを提案した論文で基本的な考えが述べられている。
- (6) 小川正毅, 河村信雄: 「GaAs FETの現状と将来」 電子通信学会誌 56 657 (1973)
GaAs FETの現状と将来性について述べられており、専門外の読者にFETの全体を理解するのに適当である。
- (7) W.Baechtald: "X and KU-Band Amplifiers With GaAs Schottky-Barrier Field-Effect Transistor" IEEE J SC-8 (1) 54-58 (1973)
- (8) C.A.Liechti and R.L.Tillman: "Application of GaAs FET Schottky-Gate FET in Microwave Amplifiers" Digest of Technical Papers, ISSC THPM 7. 1 74-75 (1973)
- (9) N.G.Bechtel, W.W.Hooper and P.L. Hower: "Design and Performance of The GaAs FET" IEEE J SC-5 319 (1970)
- (10) 古寺博: 「GaAs FETの雑音特性」 電子装置学会資料 EDD-72-34 (昭47-9)
超高周波領域でのGaAs半導体の有効性について述べられている。
- (11) S.Asai et al: "Single and Dual Gate GaAs FET Schottky Barrier Gate FET for Micro-wave Frequency" Pro 5th Conf Solid State Device (1973)
- (12) S.Asai et al: "Effect of Deep Center on Micro-wave Frequency Characteristics of GaAs Schottky Barrier Gate FET" Proc 4th Conf Solid State Devices Tokyo (1972)