

水野 晴彦  
H. Mizuno

田中 博之  
H. Tanaka

荒井 重光  
S. Arai

増田 和俊  
K. Masuda

Q帯(動作周波数42GHz帯)ヘテロ接合型ミリ波電力FET(電界効果トランジスタ)を開発した。耐圧向上を目的としてGaAs動作層上にAlGaAs層を設けたヘテロ接合構造とした。同素子にはEB(電子ビーム)直接描画技術を用いてゲート長 $0.3\mu\text{m}$ のT形ゲート構造、リセス内ゲートオフセット構造を採用した。また、電力分配・合成回路をFETチップ上に形成し42GHz帯でのインピーダンス整合を容易にした。さらに、多段増幅器を形成するために、各段のFETのゲート幅は $400\mu\text{m}$ 、 $800\mu\text{m}$ 、 $1,600\mu\text{m}$ 、 $2,400\mu\text{m}$ とシリーズ化を図った。ゲート幅 $2,400\mu\text{m}$ の素子で、周波数42GHzにおいて出力1W、電力利得4.4dB、電力付加効率30.1%の世界トップレベルの良好な特性を得た。

This paper reports on a series of newly developed Q-band heterojunction power field-effect transistors (H-FETs). In order to obtain a higher breakdown voltage, an AlGaAs layer is inserted between the cap layer and the channel layer. The devices have a T-shaped gate with a length of  $0.3\mu\text{m}$ . Using direct electron-beam (EB) lithography, offset gates are adopted in the recess. The devices also employ a monolithically integrated  $1/4$  wavelength impedance transformer for the input and output matching networks.

Four FETs having gate widths of  $400\mu\text{m}$ ,  $800\mu\text{m}$ ,  $1,600\mu\text{m}$ , and  $2,400\mu\text{m}$  have been developed to construct a multistage amplifier. An output power of 1 W with a power-added efficiency of 30.1% has been obtained at 42 GHz from the  $2,400\mu\text{m}$  gate width device.

### 1 まえがき

日本放送協会(NHK)と共同で42GHz帯ハイビジョンFPU(Field-Pick-Up:局外中継装置)に使用する電力用多段増幅器を開発するに際して、さらにこの増幅器に使用するマイクロ波電力素子を開発する必要がある。これは、電力多段増幅器の動作周波数がQ帯(42GHz)と高い周波数であり、現在東芝が製品化しているマイクロ波・ミリ波電力素子では対応できないためである。新規開発するミリ波電力素子では、電力多段増幅器の初段用素子として出力電力100mW級、最終段素子として600mWから1W級と、出力電力のラインアップ化が要求された。現在の研究開発動向として、30GHz以上の周波数帯域では、利得が大きくとれるInGaAs層を動作層とした歪(ひずみ)格子構造を用いたいわゆる電力用Pseudomorphic HEMT(P-HEMT:歪格子構造高電子移動度トランジスタ)が注目されている。例えば、周波数40GHzにおいてP-HEMTを用いたミリ波モノリシック集積回路(MMIC)を試作し、出力1W、電力付加効率(PAE)29.4%を得たとの報告がされている<sup>(1)</sup>。しかし、P-HEMTは素子の耐圧が小さい、電力素子としての信頼性実績が少ないなど、まだ解決しなければならない課題も多い。

これらの課題を解決するために、今回GaAsを動作層とし、AlGaAsをショットキー接合層としたヘテロ接合FET(H-FET)をシリーズ化して開発したので紹介する。

### 2 基本素子設計

今回開発対象とした動作周波数42GHzにおいては、従来東芝が製品化を進めてきたイオン注入型の電力用GaAsMESFET(Metal Semiconductor FET)<sup>(2),(3)</sup>ではもはや十分な利得が得られないことがわかっており、先に述べたとおり新規に基本素子の開発から行う必要があった。

ミリ波電力素子として、①高出力を得るために素子の耐圧が大きく、②動作周波数に対して十分な利得が得られ、③高い信頼性が望まれる。これらの点に着目してわれわれは動作層であるGaAs層上にショットキー接合層としてAlGaAs層を設けたH-FETを基本素子として選択した。つまり、H-FETはAlGaAs層をショットキー接合層として用いることでゲート電極-ドレイン電極間の耐圧を増大できる。また、動作層であるGaAs層の電子濃度を高くすることにより利得の増大が図れる。このようにH-FETはミリ波電力素子として①、②の条件を満足させる。③の信頼性について

は素子試作により確認することとした。

H-FETの基本素子の断面構造を図1、ゲート近傍のSEM写真を図2に示す。素子の直列抵抗低減を図るためにキャップ層として $n^+$ -GaAs層を設けその直上にソース電極、ドレイン電極を設けている。ゲート抵抗低減を目的としてT形ゲート構造を採用し、ゲート長 $0.3\mu\text{m}$ のAu/Pt/Ti構成のゲート電極をAlGaAs層上に形成した。さらに耐圧向上施策として2段型リセス構造を採用し、リセス内にソース電極側に $0.1\mu\text{m}$ オフセットした位置にゲート電極を配置した。ゲート電極、2段型リセス構造形成にはEB直接描画技術を用いた。

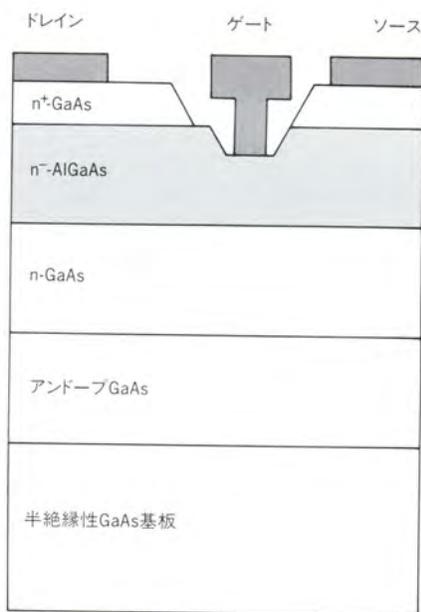


図1. H-FETの断面構造 ショットキー接合層にAlGaAs層を用いた。ゲート抵抗低減のためT形ゲート構造を採用した。

Cross-sectional view of newly developed H-FET



図2. H-FETの断面SEM写真 電子ビーム直接描画方法を用いてゲート長 $0.3\mu\text{m}$ のゲート電極をリセス内でソース側に $0.1\mu\text{m}$ オフセットして形成した。

SEM picture of newly developed H-FET

### 3 回路構成

多段電力増幅器構成にあたり100 mW級、200 mW級、400 mW級、600 mW級素子が必要である。そこでおのおの出力電力を得るためにゲート幅を $400\mu\text{m}$ 、 $800\mu\text{m}$ 、 $1,600\mu\text{m}$ 、 $2,400\mu\text{m}$ の4種とした。

ミリ波回路では、電力素子の能力を引き出すために反射損を減らしスムーズに電波を伝搬できるようにすること、いわゆるインピーダンス整合をとることが重要である。42 GHzという動作周波数においてインピーダンス整合回路を設計する場合さまざまな寄生容量を考慮する必要がある。例えば、素子の組立に用いるボンディングワイヤの長さがインダクタンスとなり、また近接電極との間で容量が構成される。このため、組立位置のわずかな違いで整合条件を満たさなくなり、素子能力を十分に引き出すことができなくなる。さらに、ミリ波電力素子ではゲート幅が大きく、素子のインピーダンスが低下することから、インピーダンス整合回路設計の精度も要求される。

そこで、電力素子チップ内に電力合成・分配器およびインピーダンス変換器を付加し素子のインピーダンスを高め、組立条件を含む外部回路による整合条件の範囲を広げるくふうをした。図3にゲート幅 $2,400\mu\text{m}$ の素子の外観を示す。素子の中央にゲート幅 $1,200\mu\text{m}$ の単位素子を配置し、入力側、出力側双方に電力合成・分配器およびインピーダンス変換器が設けてある。

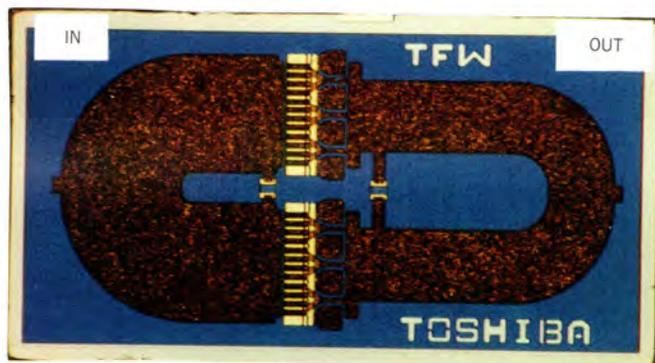


図3. ゲート幅 $2,400\mu\text{m}$ の素子外観 入力側、出力側にインピーダンス変換器を備え、二つの単位素子を電力合成している。

Top view of newly developed H-FET with  $2,400\mu\text{m}$  gate width

ミリ波電力素子の能力を十分に引き出すには単位素子を均一動作させることも重要となる。半導体素子は一般的に諸特性に動作温度依存性を示すことから、各単位素子の温度分布が異なった場合には、特性の異なる素子を回路合成、インピーダンス整合することになり、その設計はきわめて難しくなる。その結果、電力合成回路の損失を増大させることにな

る。

図4にゲート幅800 $\mu\text{m}$ 素子のIR(赤外)顕微鏡観察による温度分布を示す。上部が入力側、下部が出力側、中央に単位素子が二つ配置されている。単位素子に直流電源が供給されることでその動作層もつ電気抵抗により発熱が起こる。発生した熱はGaAs半導体基板を介して多段電力増幅器の筐(きょう)体を通じて外部に放出される。ところで、一般的にGaAsは熱伝導率が小さいため、単位素子間の温度差とこれによって生ずるそれぞれの単位素子の諸特性の差が懸念される。図4から単位素子間に温度差はないことが確認でき、温度分布に伴う単位素子間の不均一動作とこれに伴う損失増大は回避できると考えられる。

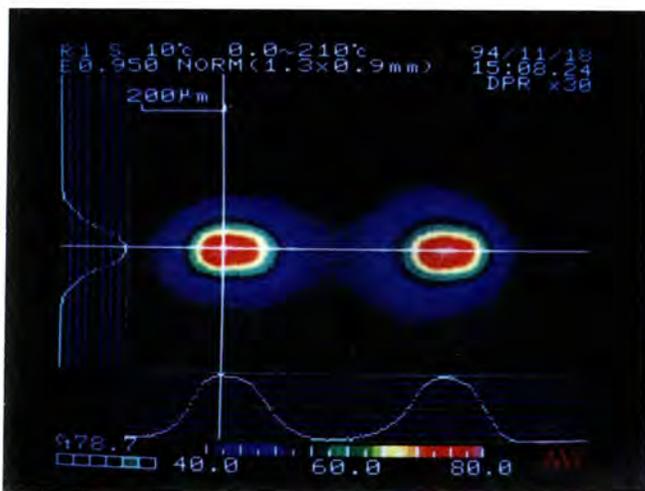


図4. ゲート幅800 $\mu\text{m}$ の温度分布 二つの単位素子が同じ温度分布を示しているため均一動作が期待できる。

Temperature distribution of FET chip with 800 $\mu\text{m}$  gate width

また、IR顕微鏡による各素子の熱抵抗の評価結果を表1に示す。各素子とも多段電力増幅器の最高使用温度でも動作層温度は110 $^{\circ}\text{C}$ 以下であると推定される。

表1. 各素子の熱抵抗

Thermal resistance of newly developed H-FETs

ゲート幅 ( $\mu\text{m}$ )	熱抵抗 ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )
400	65.8
800	32.8
1,600	16.4
2,400	10.9

## 4 DC・RF特性

最大ドレイン電流は単位ゲート幅あたり550 mA/mm,

最大相互コンダクタンスは300 mS/mm, ドレイン降伏電圧は9 V以上であった。DC特性測定結果から動作電圧は5.0 V Maxとした。

RF (Radio Frequency) 特性は、回路調整用MIC (Monolithic IC) 基板の付いたキャリアプレートに組み立てて評価した。図5, 表2に代表的な入出力特性を示す。ゲート幅2,400 $\mu\text{m}$ 素子において1 dB利得圧縮時出力( $P1\text{ dB}$ )29.5 dBm, 線形利得(GI)5.9 dB, 飽和出力( $P_{\text{sat}}$ )1W, そのときの利得4.4 dB, 電力付加効率(PAE)30.1%の良好な特性を得た。

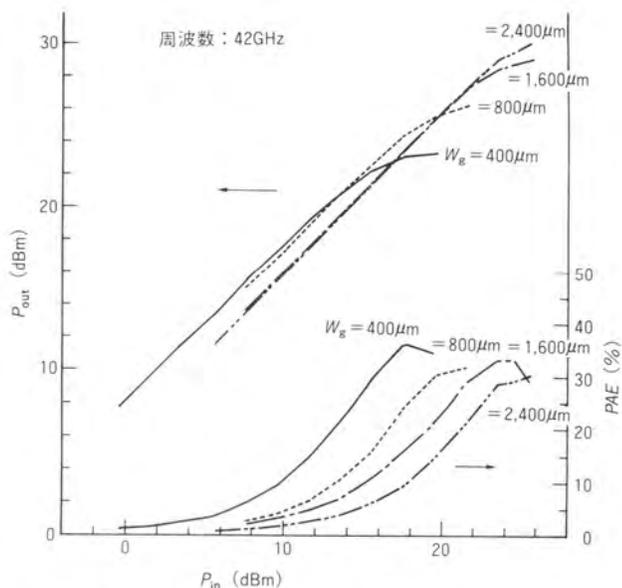


図5. 開発した各素子の代表的な入出力特性 42 GHzにおいて各素子ともにPAE 30%の良好な特性を得た。

Typical output power and power-added efficiency vs. input power of newly developed H-FETs

表2. RF特性

RF performance of newly developed H-FETs

要求出力 (mW)	ゲート幅 ( $\mu\text{m}$ )	$P1\text{ dB}$ (dBm)	GI (dB)	$P_{\text{sat}}$ (mW)	PAE (%)
100	400	21.7	7.6	210	31.2
200	800	25.1	7.9	430	32.1
400	1,600	28.2	6.0	810	33.1
600	2,400	29.5	5.9	1,000	30.1

図6に飽和出力電力, 線形利得およびPAEのゲート幅依存性を示す。飽和出力電力はゲート幅増大に比例して増大している。電力付加効率も30%以上の良好な特性を示した。

## 5 信頼性確認試験

素子の寿命推定を行うために、高温放置試験, 高温DC通電試験, RF過入力( $P5\text{ dB}$ )試験を現在も継続して進めている。

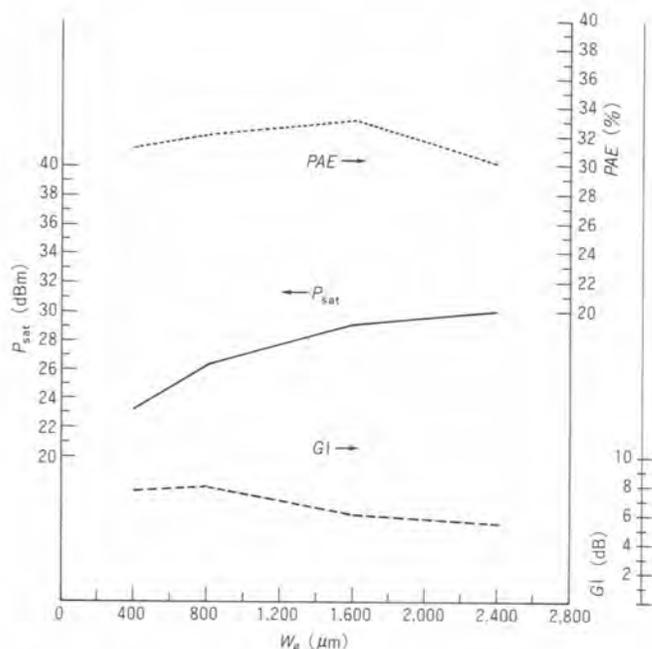


図6. RF特性のゲート幅依存性 ゲート幅増大による線形利得(GI)の減少は回路構成の改善によりさらに改善が期待できる。

Dependence of RF characteristics on total gate width

る。高温放置試験、高温 DC 通電試験から推定される最高動作層温度 110 °C における寿命予測は  $1 \times 10^5$  時間以上である。試験継続により寿命予測時間はさらに伸びると考えられる。RF 過入力 (P5 dB) 試験では 2,000 時間を経過した時点で特性の劣化は生じていない。

以上の結果から、今回開発した H-FET は従来より製品化しているイオン注入型 GaAs MESFET と同等の寿命予測であることを確認できた。

## 6 あとがき

42 GHz 帯電力用 H-FET を開発した。設計にあたり素子構造、回路構成を検討し、ゲート幅のシリーズ化 ( $W_g = 400$

$\mu\text{m}$ ,  $800 \mu\text{m}$ ,  $1,600 \mu\text{m}$ ,  $2,400 \mu\text{m}$ ) を行い、 $W_g = 2,400 \mu\text{m}$  の素子で出力 1W, 利得 4.4 dB, 電力付加効率 30.1% の世界最高レベルの特性を得た。シリーズ化した各ゲート幅の素子でも電力付加効率 30% 以上の高効率を得ており、開発を進めている電力用多段増幅器の低消費電力化が期待できる。また、信頼性試験を行った結果、予測寿命は現在のところ  $1 \times 10^5$  時間以上であり、信頼性試験の進捗によりさらに寿命長期化が期待でき、実用上問題ないことを確認した。

## 文献

- (1) J. C. L. Chi, et al : A 1-W High-Efficiency Q-Band MMIC Power Amplifier. IEEE Microwave and Guided Wave Lett., 5, 1, pp. 21-23 (1995)
- (2) 吉田大広, 他 : 20 GHz 帯外周器入り電力 GaAs FET, 昭和 63 年電子情報通信学会春季全国大会, pp. 1-350 (1988)
- (3) Y. Oda, et al : Ka-BAND 1 WATT POWER GaAs MMICs. 1988 IEEE MTT-S Digest, pp. 413-416 (1988)



水野 晴彦 Haruhiko Mizuno

1977 年 NHK 入局。ハイビジョンなどの伝送設備の開発整備に従事。現在、NHK 技術局技術開発センター チーフエンジニア。

Japan Broadcasting Corporation



田中 博之 Hiroyuki Tanaka

1991 年 NHK 入局。ハイビジョン伝送・放送設備の開発整備に従事。現在、NHK 技術局技術開発センター。

Japan Broadcasting Corporation



荒井 重光 Shigemitsu Arai

1984 年入社。マイクロ波帯、ミリ波帯電力素子の開発に従事。現在、小向工場マイクロ波部主務。

Komukai Works



増田 和俊 Kazutoshi Masuda

1985 年入社。マイクロ波帯、ミリ波帯増幅器の開発に従事。現在、小向工場マイクロ波部。

Komukai Works