

# 高効率 X, Ku 帯 GaAs FET

## High-Efficiency X- and Ku-Band GaAs FETs

山村 拓嗣

木村 英樹

高木 一考

■ YAMAMURA Takuji

■ KIMURA Hideki

■ TAKAGI Kazutaka

東芝は、地上間通信及び衛星通信の基地局などで用いられる X 帯 (8 ~ 12 GHz 帯) 及び Ku 帯 (12 ~ 18 GHz 帯) マイクロ波固体増幅器向けの増幅素子として、8 ~ 15 GHz の周波数帯域で電力付加効率が 36 % を超える 2 W 級及び 8 W 級のガリウムヒ素 (GaAs) FET (電界効果トランジスタ) を開発した。イオン注入法の利点を生かして、FET の能動層深さ方向の電子濃度分布を最適化することで、高いドレイン効率と高利得を両立させることに成功した。その結果、開発した 10.7 ~ 11.7 GHz 帯の 8 W 級 GaAs FET では、電力付加効率が 39 % と当社の従来品に比べ 7 % 向上している。

Toshiba has recently succeeded in developing higher efficiency gallium-arsenide field-effect transistors (GaAs FETs) for solid-state microwave power amplifiers used in base stations for point-to-point or point-to-multipoint microwave communications, satellite microwave communications, and other applications. The newly developed FETs achieved a power-added efficiency of more than 36 % with output power levels of 2 W and 8 W in the X- and Ku-band frequency range (8-15 GHz).

To achieve both high drain efficiency and high power gain, we optimized electron-density distribution in the depth direction of the FET channel employing the advantages of ion-implantation technology. Of particular note is the fact that the new 8 W-class FET achieved an excellent power-added efficiency of 39 % in the frequency range from 10.7 to 11.7 GHz, representing a 7 % improvement compared with our existing products.

### 1 まえがき

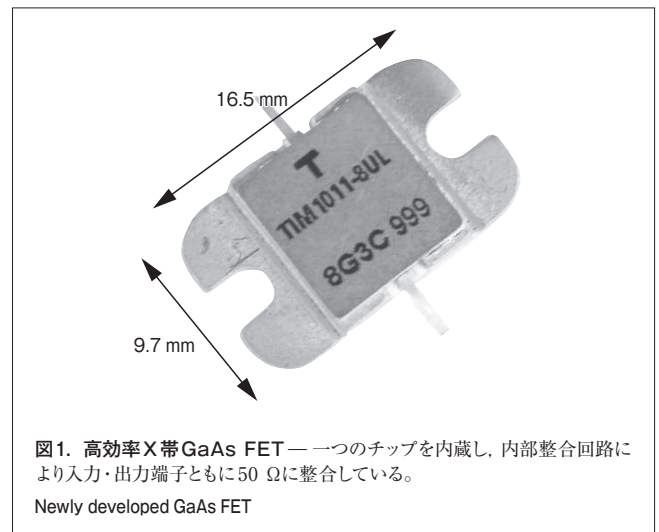
東芝は高出力の GaAs FET を市場に供給してきた<sup>(1), (2)</sup>。一般に、半絶縁性の GaAs 基板にイオン注入法で能動層を形成するイオン注入型 FET は、HFET (Heterojunction FET) や HEMT (High Electron Mobility Transistor) と比較して、ひずみ特性が優れている。ひずみ特性は入力信号と出力信号の線形性を表す指標であり、通信品質に影響する重要な特性である。また、GaAs FET が用いられる X 帯の地上マイクロ波通信や Ku 帯の衛星通信向けの固体増幅器では、高出力化及び低ひずみ化に加え、更なる高効率化への要求が高まっている。

GaAs FET は、L, S 帯 (1 ~ 4 GHz) では比較的高い効率が実現しやすいが、周波数が高くなるにつれて高い効率を得ることが難しくなる。また、増幅素子の重要な基本特性であり、効率にも大きく影響する利得も、周波数が高くなるにつれて小さくなる。X, Ku 帯において高い利得を実現するには、FET の設計に様々な配慮が必要となってくる。

ここでは、X, Ku 帯においてイオン注入型 GaAs FET の効率を向上させるうえでの技術課題と、今回適用した解決方法、及び得られた特性について述べる。

### 2 高効率 X, Ku 帯 GaAs FET の概要

開発した 8 W 級の X 帯 GaAs FET の外観を図 1 に示す。



16.5 × 9.7 mm のパッケージに GaAs FET チップを一つ実装している。内部整合回路により入力・出力端子を 50 Ω に整合している。

### 3 技術課題と解決方法

マイクロ波電力増幅素子の効率を表す指標として、ここでは電力付加効率 ( $\eta_{add}$ ) を使う。 $\eta_{add}$  は直流入力電力 ( $P_{DC}$ ) からマイクロ波出力電力 ( $P_{out}$ ) への変換効率を表す指標で、(1)式で定義される。

$$\eta_{add} = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} \quad (1)$$

$P_{in}$  : マイクロ波入力電力

また、 $\eta_{add}$ はドレイン効率 ( $\eta_D$ )と利得 ( $G$ ) で表すことができる。 $\eta_D$ と $G$ は、(2)、(3)式で定義される。

$$\eta_D = \frac{P_{out}}{P_{DC}} \quad (2)$$

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3)$$

これらを用いると $\eta_{add}$ は(4)式で表すことができ、 $\eta_{add}$ を向上するためには、高い $\eta_D$ と高い $G$ が必要になることがわかる。

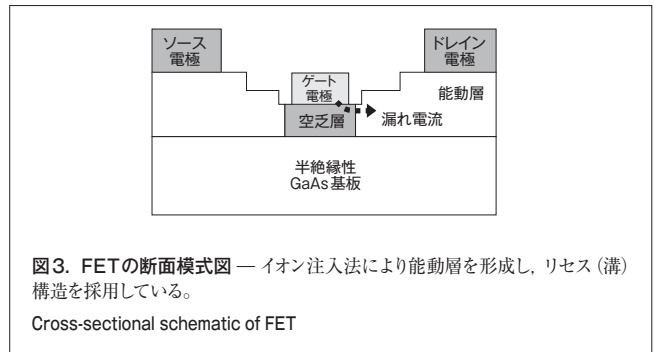
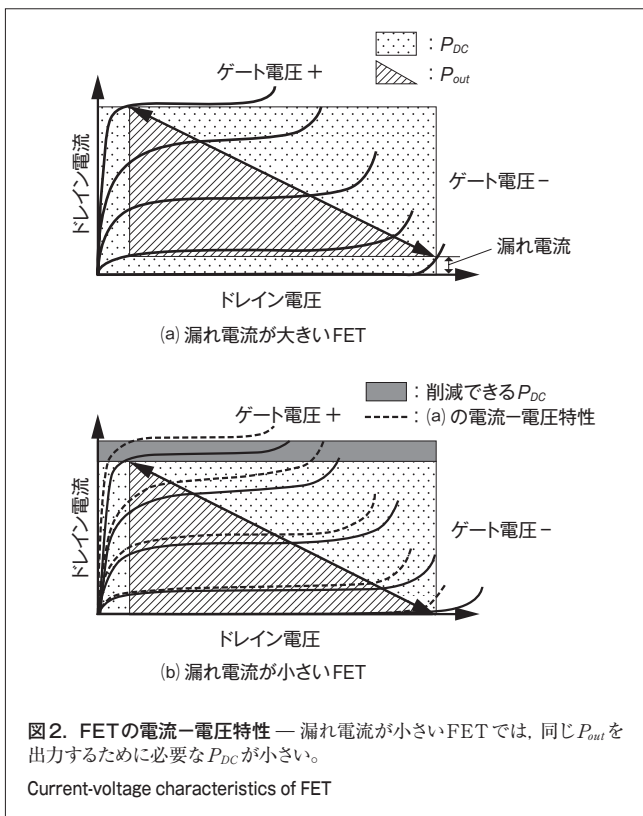
$$\eta_{add} = \eta_D \left( 1 - \frac{1}{G} \right) \quad (4)$$

### 3.1 $\eta_D$ と電子濃度

(2)式は、 $P_{DC}$ を小さくすれば $\eta_D$ が向上することを示している。ゲートに負電圧を印加してドレイン電流を遮断した状態をピンチオフと呼ぶが、この状態でドレイン電圧を更に大きくすると遮断しきれない漏れ電流が生じる。この漏れ電流が小さいFETでは、比較的小さい $P_{DC}$ でも同じ $P_{out}$ を出力できる。

FETの電流-電圧特性を図2に示す。漏れ電流はゲート電極の電圧に同期して変化するわけではないため、 $P_{out}$ には変換されないむだな電力となる。

FETの断面模式図を図3に示す。FETはゲート電極の下



に自由電子が存在しない領域(空乏層)を持つ。ゲート電極にマイクロ波を入力してゲート電圧を周期的に変化させると、FETの空乏層の厚さが周期的に変化する。この空乏層の厚さの変化により、ドレイン電流はマイクロ波入力と同一周期で変化しながら増幅されて、マイクロ波出力となる。

上で述べた漏れ電流は、電界が集中しているゲート電極のドレイン端から生じる場合が多く、ゲート電極が接している半導体表面の電子濃度を低くすれば、この漏れ電流は低減できる。このように、 $\eta_D$ の向上には漏れ電流を抑制することが必要であり、そのためにはゲート電極直下の電子濃度を小さくすることが有効であることがわかる。

### 3.2 $G$ と電子濃度

$G$ は相互コンダクタンス ( $G_m$ ) に比例し、ゲート容量に反比例する。 $G_m$ はゲート電圧 ( $V_G$ ) の変化に対するドレイン電流 ( $I_D$ ) の変化の比であり、(5)式で定義される。

$$G_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \quad (5)$$

$G_m$ が大きいFETは、小さい $V_G$ で大きい $I_D$ を制御できる。これは小さい $P_{in}$ で大きい $P_{out}$ を制御できることを意味するため、 $G$ は $G_m$ に比例する。能動層の電子濃度を高くすることで $G_m$ は大きくなる。

ゲート容量はゲート電極が持つ電気容量であり、ゲート電極の下にある空乏層の厚さに反比例する。ゲート容量が小さいFETは、小さい $P_{in}$ で $V_G$ に大きな変化が生じる。これは小さい $P_{in}$ で大きい $P_{out}$ を制御できることを意味するため、 $G$ はゲート容量に反比例する。能動層の電子濃度を低くすることで、空乏層が相対的に厚くなるためゲート容量は小さくなる。

以上のように、 $G_m$ とゲート容量はともに電子濃度に対して単調増加するため、電子濃度を小さくしても $G$ の変化は小さい。

### 3.3 電子濃度分布の最適化

イオン注入法は、電氣的に加速したシリコン (Si) イオンを半絶縁性のGaAs基板に打ち込み、拡散させるものである。Siイオンは、基板中の原子と衝突を繰り返しながらエネルギーを失い、停止する。Siイオンが到達する深さは正規分布となり、その広がりは加速エネルギーに依存して決まる。注入したSiイオンは、高温の熱処理を加えることで活性化し、GaAs基板

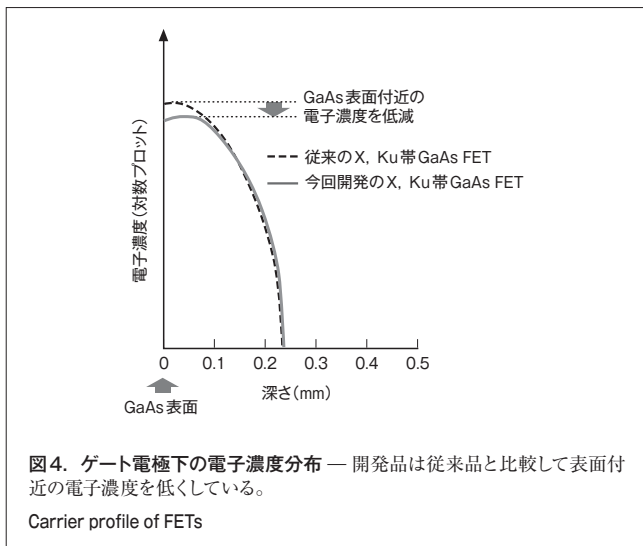


図4. ゲート電極下の電子濃度分布 — 開発品は従来品と比較して表面付近の電子濃度を低くしている。

Carrier profile of FETs

中に電子を作る。その結果、イオン注入型FETの電子濃度分布は正規分布となり、このなだらかな電子濃度の変化が優れたひずみ特性を生み出す。

従来のX, Ku帯GaAs FETと、今回開発した高効率のX, Ku帯GaAs FETの電子濃度分布を図4に示す。後者は前者と比較して、注入するSiイオンの量を減らし、同じ加速エネルギーでイオン注入を行うことで、ゲート電極形成面が位置する表面付近の電子濃度を低くしている。これにより、ゲート電極への電界集中が緩和され、漏れ電流を低減している。

#### 4 高効率GaAs FETの特性例

3章で述べたイオン注入でできた電子濃度分布を持つ、8 W級高効率GaAs FETの入出力特性を図5に示す。ドレイン電圧10 V、測定周波数11.2 GHzで、線形利得10.4 dB、 $P_{1dB}$  (1 dB利得圧縮時出力) 39.2 dBm (8.3 W)、及び $P_{1dB}$ 時の電力付加効率39.8%を得た。

11.2 GHz及び14.0 GHzの各周波数で、2 W級及び8 W級の高効率GaAs FETの特性を表1に示す。表面付近の電子濃度を低くしたことで漏れ電流が抑えられ、効率が高くなっている。また、表面付近の能動層の電子濃度を下げた影響が利得には現れていないこともわかる。

表1. 高効率GaAs FETの諸特性

Performance of newly developed GaAs FETs

周波数	出力	線形利得 (dB)	$P_{1dB}$ (dBm)	$\eta_D$ (%)	$\eta_{add}$ (%)
11.2 GHz	2 W級	11.2	33.8	43.6	39.4
	8 W級	10.4	39.2	45.0	39.8
14.0 GHz	2 W級	9.4	33.8	46.1	39.5
	8 W級	8.6	39.2	44.0	36.4

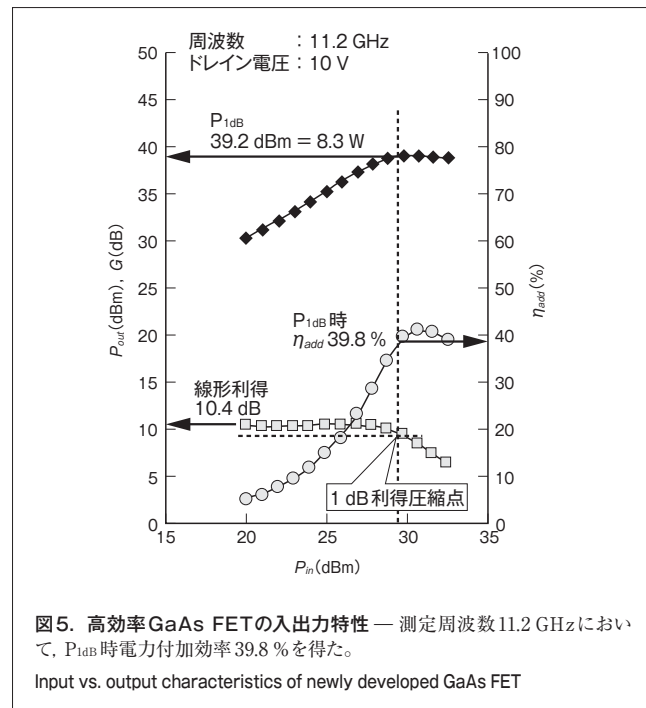


図5. 高効率GaAs FETの入出力特性 — 測定周波数11.2 GHzにおいて、 $P_{1dB}$ 時電力付加効率39.8%を得た。

Input vs. output characteristics of newly developed GaAs FET

#### 5 あとがき

高効率のX, Ku帯GaAs FETの製品化を目指し、イオン注入型の電子濃度分布に着目することで、11 GHz帯で電力付加効率が39%を超えるGaAs FETの開発に成功した。この構造を用いて、10.7~11.7 GHz帯と14.0~14.5 GHz帯において、2 W級及び8 W級の高効率製品のラインアップを実現した。

今後、更なる高出力化を目指し、開発したチップを二つ実装した4 W級及び15 W級のGaAs FETへと展開していく。

#### 文献

- (1) 木村英樹, ほか. C帯90 W電力FET. 東芝レビュー. 60, 6, 2005, p.48-51.
- (2) 高木一考, ほか. Ku帯30 W電力FET. 東芝レビュー. 60, 11, 2005, p.49-52.



山村 拓嗣 YAMAMURA Takuji

社会システム社 小向工場 マイクロ波技術部。  
マイクロ波半導体及び半導体製造プロセスの設計及び開発に従事。  
Komukai Operations



木村 英樹 KIMURA Hideki

社会システム社 小向工場 マイクロ波技術部主務。  
マイクロ波半導体及び半導体製造プロセスの設計及び開発に従事。  
Komukai Operations



高木 一考 TAKAGI Kazutaka

社会システム社 小向工場 マイクロ波技術部参事。  
マイクロ波半導体のデバイス設計及び開発に従事。応用物理学会会員。  
Komukai Operations