

# Ka帯 20 W級 GaN電力HEMT

## Ka-Band 20 W-Class GaN Power HEMT

松下 景一

高木 一考

高田 賢治

■ MATSUSHITA Keiichi

■ TAKAGI Kazutaka

■ TAKADA Yoshiharu

窒化ガリウム (GaN) 半導体を用いた電力HEMT (High Electron Mobility Transistors) は、高出力で高周波動作ができる素子として注目を集めており、マイクロ波通信などへの応用が期待されている。

既に東芝は、X帯 (8 ~ 12 GHz) やKu帯 (12 ~ 18 GHz) においてGaN半導体を用いた高出力電力素子を開発し実用化してきた。今回、0.2 μm以下の微細ゲート構造とドレインリーク電流を抑制するためのエピタキシャル構造を実現し、準ミリ波帯であるKa帯 (26 ~ 40 GHz) 出力20 W級の素子を得ることができた。これは、従来のガリウムヒ素 (GaAs) 系の素子では達成できなかった出力電力であり、Ka帯衛星通信用パワーアンプに応用できることを示すものである。

Aluminum gallium nitride/gallium nitride (AlGaN/GaN) high electron mobility transistors (HEMTs), which are promising candidates for next-generation microwave power devices, are attracting increasing research interest due to their inherent advantage of high power characteristics. In Ka-band satellite communication systems, AlGaN/GaN HEMT devices are expected to be adopted for solid-state power amplifiers instead of gallium arsenide (GaAs) pseudomorphic HEMT (pHEMT) devices because of the low output power of the latter devices.

Toshiba has already developed and released high-power AlGaN/GaN HEMTs for X-band and Ku-band applications. We have now developed a 20 W-class Ka-band AlGaN/GaN HEMT high-power device for Ka-band satellite communication systems applying a fine gate layer structure and epitaxial structure.

## 1 まえがき

近年の情報の大容量化に伴い、衛星通信システム (SATCOM: Satellite Communication Systems) はより高い周波数が必要とされている。マイクロ波用パワーアンプとして、進行波管 (TWTA: Traveling Wave Tube Amplifier) などの真空管式増幅器が広く使用されているが、寿命や軽量化に優位な点から固体増幅器 (SSPA: Solid State Power Amplifier) が望まれている。

SSPAに用いられる電力素子としては、以前からガリウムヒ素 (GaAs) 系の半導体素子が主流であった。しかし近年、ワイドギャップ材料<sup>(注1)</sup>である窒化ガリウム (GaN) が、その優れた特性を生かし高温動作、高電圧動作、高出力密度などが期待できることからキーデバイスとして注目を集め、急速に開発が進められている。既に東芝が開発したKu帯 (12 ~ 18 GHz) 50 W級 GaN HEMT (High Electron Mobility Transistors)<sup>(1)</sup> を用いてSNG (Satellite News Gathering) 用固体増幅器が実用化されている<sup>(2)</sup>。

(注1) バンドギャップとは、バンド構造における電子の二つの許容バンド間のエネルギー差を指す。ワイドギャップ半導体は、シリコン (Si) やGaAsなどに比べてこのバンドギャップが大きいことから、化学的安定性、熱伝導度、絶縁破壊電圧が高いという特性を持つ。そのため、GaNは高温動作や高電圧動作に対して優れた特性を持っている。

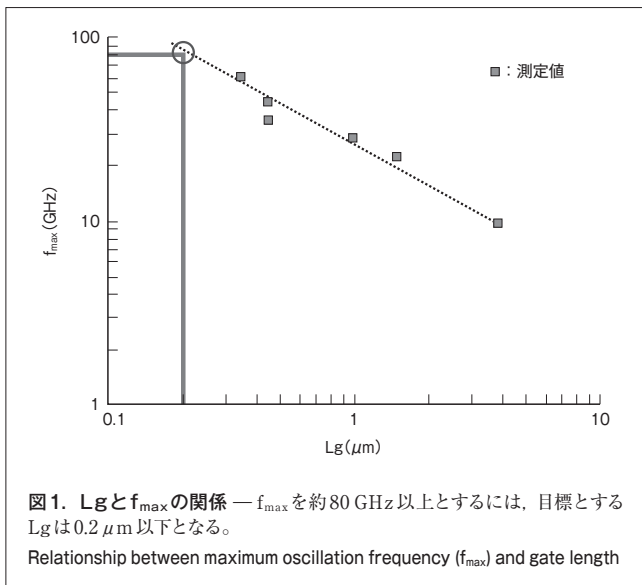
Ku帯よりも高い周波数帯であるKa帯 (26 ~ 40 GHz) においても衛星通信用として高出力電力素子の期待が高まっているが、この周波数帯で高出力電力素子を得るためには素子構造から検討する必要がある、開発要素も多く残っていた。

ここでは、Ka帯素子としての技術課題であるゲート構造及びエピタキシャル層構造についての解決施策と、開発した素子の特性について述べる。

## 2 技術課題と解決施策

電力HEMTの一般的な特性として、動作周波数を高くすると利得は急激に低下する。利得を向上させるためには、ゲート長 (Lg) を短くしたり単位素子当たりのゲート幅を狭くしたりするなどの対策が必要である。しかし、Lgを短くするとショートチャネル効果が起こるという問題がある。ショートチャネル効果とは、ゲート電圧がピンチオフ電圧 (電流が流れなくなるときのゲート印加電圧) 以下であってもソースとドレイン間にリーク電流が流れる現象である。大きなリーク電流はソースとドレイン間の耐圧低下を招き、低電圧での駆動しかできなくなるため、電力素子としての十分な出力電力を得ることができない。また、同時に利得の低下も生じるなど素子性能を劣化させる様々な問題が起きる。

今回ターゲットとした動作周波数26 GHzの20 W級GaN電



力HEMT素子の技術課題は、次の2点である。

- (1) ゲート微細化技術の開発
- (2) ドレインリーク電流を抑制するためのエピタキシャル構造の実現

### 2.1 ゲート構造

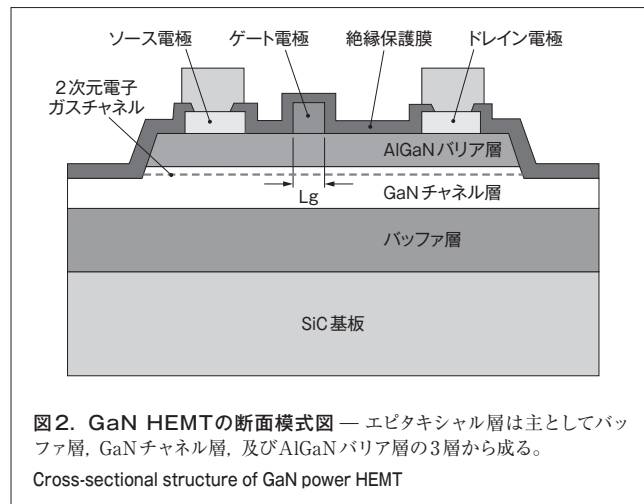
まず、目標とする $L_g$ を設定した。 $L_g$ を選ぶ一つの指標として最大発振周波数( $f_{max}$ )がある。 $f_{max}$ とは、利得が得られる最大の周波数を示すものである。 $L_g$ と $f_{max}$ の関係を図1に示す。一般に、 $f_{max}$ は動作周波数の約3倍以上が必要であると言われている。このことから、周波数26 GHz以上を目標周波数にした場合には、 $f_{max}$ は約80 GHz以上とする必要がある。

したがって、 $L_g$ は $0.2 \mu\text{m}$ 以下と非常に微細な構造にしなくてはならないことがわかる。現在、製品化しているX帯(8~12 GHz)やKu帯では約 $0.35 \mu\text{m}$ であり、従来のX帯やKu帯で使用されているゲート形状は適応することができない。今回、当社は新たにゲート微細化技術を開発し、 $L_g=0.1 \mu\text{m}$ まで得られるようになった。

### 2.2 エピタキシャル構造

GaN HEMTの構造は、半絶縁性のSiC(炭化ケイ素)単結晶基板を下地として、その上にGaN層や窒化アルミニウムガリウム(AIGaN)層などをMOCVD法(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition:有機金属気相成長法)を使って、エピタキシャル成長層として形成させる。図2に示すとおり、成長層は主として3層で構成されており、下地のSiC単結晶基板上のバッファ層、GaNチャンネル層、及びAIGaNバリア層である。

電流はドレイン電極とソース電極間のGaNチャンネル層内の2次元電子ガスチャンネルを流れる。ゲート電極に電圧を印加することで空乏層が生じて電流を制御する。 $L_g$ が短いとショートチャンネル効果が起きてしまうため、これを抑制する目的で、AIGaNバリア層を薄くしてドレインリーク電流を減らすのが一

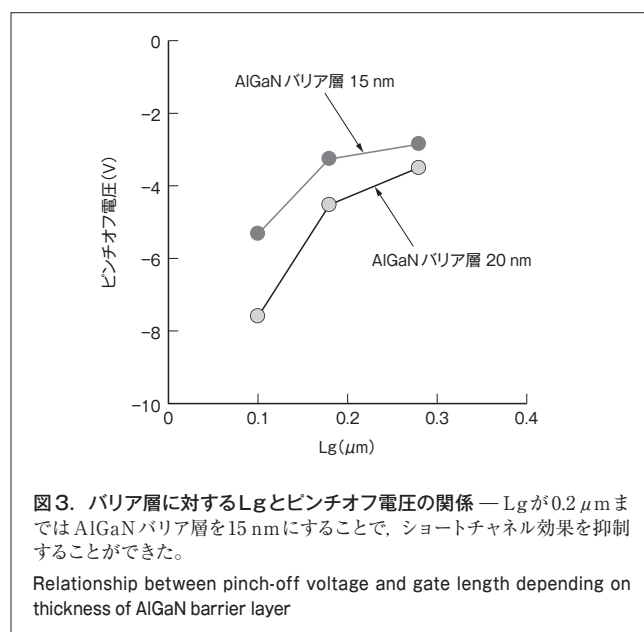


般的である。

図3は、ピンチオフ電圧の $L_g$ 依存性を示すために、 $L_g$ を $0.1 \mu\text{m}$ 、 $0.18 \mu\text{m}$ 、及び $0.28 \mu\text{m}$ としたときのピンチオフ電圧をプロットしたものである。AIGaNバリア厚20 nmと15 nmについての比較を行った。ここで、電流密度がほぼ等しくなるようAIGaNバリア厚20 nmのアルミニウム(AI)組成は25%、厚さ15 nmのAI組成は30%としている。

$L_g$ が $0.28 \mu\text{m}$ では両者にあまり差はないが、AIGaNバリア厚20 nmの素子のほうが、 $L_g$ が短くなるにつれてピンチオフ電圧が大きく低下して、目標とする $L_g$ である $0.2 \mu\text{m}$ 以下でその差は大きくなり、ショートチャンネル効果の影響が見えている。 $L_g$ が $0.18 \mu\text{m}$ では、AIGaNバリア層を15 nmにすることでショートチャンネル効果を抑制できることがわかった。

AIGaNバリア層の薄膜化によってドレインリーク電流は低減できるが、ドレイン電流の一部はバッファ層部にも流れてし



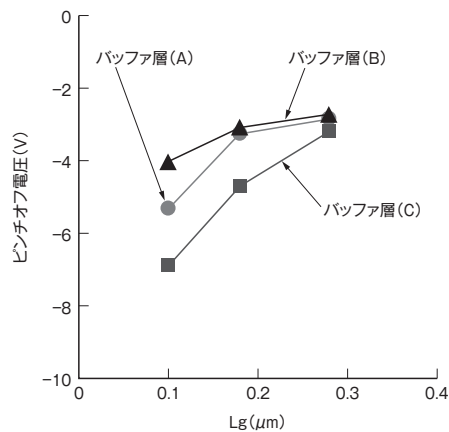


図4. バッファ層に対するLgとピンチオフ電圧の関係 — バッファ層 (A) と (B) はLgが0.2 μmまではほとんど差はなく、ピンチオフ電圧の低下も少ない。

Relationship between pinch-off voltage and gate length depending on buffer layer

まうためバッファ層の工夫も必要である。そこでバッファ層について検討した。

リーク対策を施した3種類のバッファ層 (A), (B), (C) 上にそれぞれGaNチャンネル層とAlGaInバリア層 (厚さ15 nm, Al組成30%) のエピタキシャルを成長させ、これらのウェーハ上にデバイスを作製した。ピンチオフ電圧のLg依存性を図4に示す。Lgが0.28 μmではいずれも差がないが、バッファ層 (C) はLgが0.28 μmよりも短くなるとピンチオフ電圧が急激に低下していることがわかる。一方、バッファ層 (A) と (B) はLgが0.18 μmまではほとんど差はなく、ピンチオフ電圧の低下も少なく、ショートチャンネル効果の影響が小さいことがわかる。

この3種類のバッファを用いた素子の $f_{max}$ について評価した結果を図5に示す。

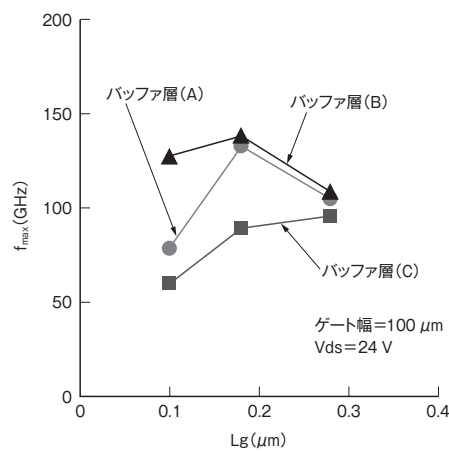


図5. バッファ層に対するLgと $f_{max}$ の関係 — バッファ層 (A), (B) ではLgが0.2 μmで $f_{max}$ がもっとも高くなり、138 GHzを得た。

Relationship between  $f_{max}$  and gate length depending on buffer layer

Lgが0.28 μmでは3種類のバッファ層の $f_{max}$ はほとんど同じであり、バッファ層 (C) はLgが短くなるにつれて $f_{max}$ も低下している。結果はピンチオフ電圧の傾向とよく一致しておりショートチャンネル効果によるものと考えられる。バッファ層 (A), (B) ではLgが0.18 μmで $f_{max}$ がもっとも高くなり、138 GHzを得た。これは、Ka帯で使用する素子として十分な性能となっている。

これらの結果ではバッファ層 (B) がもっとも良い値を示しているが、バッファ層 (B) はドレイン電圧30 V以上において電流劣化が観察されたことから、今回、電力素子はバッファ層 (A) を採用し作製した。また、Lgは0.18 μm, AlGaInバリア層は15 nm (Al組成30%) とした。

### 3 20 W級電力素子

出力電力を見積もるために、ゲート幅400 μmの単位セルHEMTを測定周波数14 GHzでロードプル測定を行った<sup>(注2)</sup>。飽和電力密度及び電力付加効率のドレイン電圧 (Vds) 依存性を図6に示す。

飽和電力密度はVdsが40 Vまで低下することなくほぼ比例して増加しており、Vds=30 Vにおいて3.9 W/mm、Vds=40 Vにおいて4.8 W/mmであった。Vdsが40 V以上では電力付加効率が低下していくため動作電圧はVds=30 Vとした。出力電力20 W以上を得るためには、総ゲート幅は約5 mmとなるが、熱や整合回路の影響で飽和電力密度が低下することを乗り越えて総ゲート幅を約6 mmとした。以上の結果に基づいて高出力電力素子を設計した。

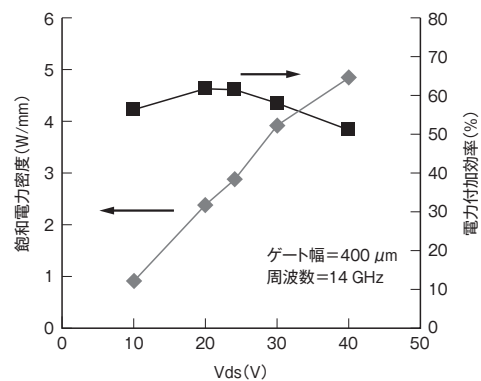


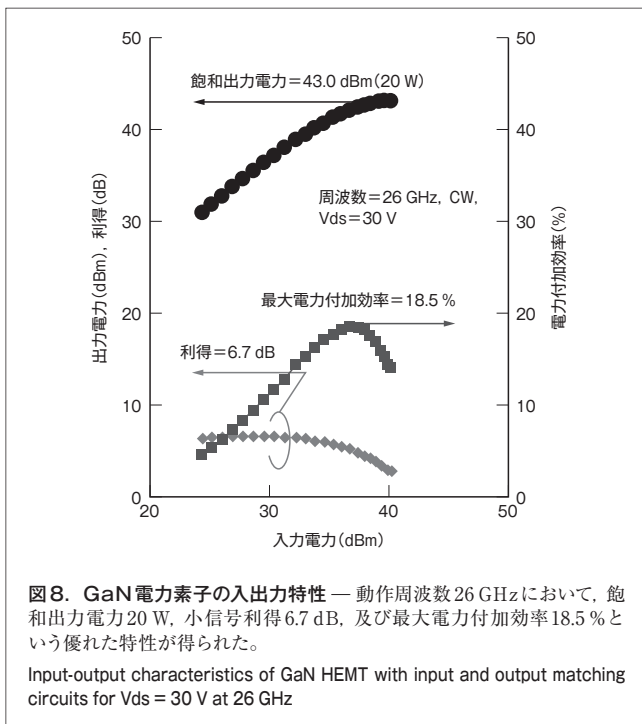
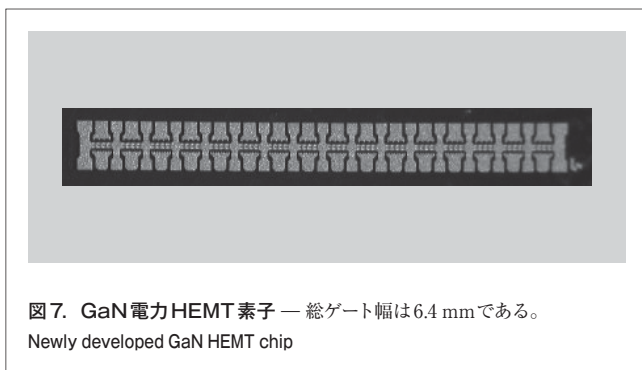
図6. ロードプルによる飽和電力密度と電力付加効率のVds依存性 — Vds=30 Vにおいて飽和電力密度3.9 W/mm、Vds=40 Vにおいて飽和電力密度4.8 W/mmを得た。

Dependence of saturated output power density and power-added efficiency on operating voltage

(注2) ロードプルは、素子の能力を簡易的に評価する手法で、素子の基本性能評価に用いられる。しかし、出力の大きな素子は装置の制約上評価が難しい。そのため、まずロードプル測定によって単位セルの性能評価をして高出力電力素子の性能を見積もった。

今回作成した総ゲート幅6.4 mmのGaN電力HEMT素子を図7に示す。

この素子の入出力に整合回路を付加して電力素子を形成した。電力素子の入出力特性を図8に示す。動作周波数26 GHz、連続動作(CW: Continuous Wave)においてV<sub>ds</sub>=30 Vで、飽和出力電力20 W (43.0 dBm)、小信号利得6.7 dB、及び最大電力付加効率18.5%を得た。



## 4 あとがき

Ka帯用パワーアンプ向けのGaN電力HEMT素子を作製した。Lgとエピタキシャル構造について検討し、素子性能としてf<sub>max</sub> 138 GHzを得た。また、総ゲート幅6.4 mmの電力HEMT素子の入出力整合をとり、動作周波数26 GHzにおいて飽和出力電力20 W、小信号利得6.7 dB、最大電力付加効率18.5%という優れた性能のデバイスを得ることができた。これによりKa帯電力HEMTを用いたパワーアンプ実用化のめどが立った。

## 文献

- (1) 高木一考 他. Ku帯50 W級GaN HEMT. 東芝レビュー. 63, 5, 2008, p.40 - 43.
- (2) 望月 亮 他. Ku帯衛星通信用 小型・屋外型SSPA. 東芝レビュー. 65, 11, 2010, p.46 - 49.



松下 景一 MATSUSHITA Keiichi

社会インフラシステム社 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・開発に従事。応用物理学会会員。  
Komukai Operations



高木 一考 TAKAGI Kazutaka

社会インフラシステム社 小向工場 マイクロ波技術部参事。  
マイクロ波半導体デバイスの設計・開発に従事。応用物理学会会員。  
Komukai Operations



高田 賢治 TAKADA Yoshiharu

研究開発センター 電子デバイスラボラトリー研究主務。  
GaN電子デバイスの研究・開発に従事。応用物理学会会員。  
Electron Devices Lab.