

無線システム用高出力GaN HEMTの開発

関 昇平 佐野 芳明
牛窪 孝

だれでもいつでもどこからでもネットワークにアクセスできる環境『ユビキタスネットワーク』はこれまでの社会生活スタイルや産業を根本的に変えると期待されており、研究開発が進められている。このような環境を実現する場合、多数のモバイル端末間で大量のデータをやりとりする必要性から、より高周波で高出力な無線デバイスが求められる。たとえば第3世代携帯基地局では2GHz帯で数100Wの飽和出力を有するデバイスが必要となる。これまでガリウムヒ素 (GaAs) やインジウムリン (InP) 系のデバイスが開発実用化されているが、耐圧が10数V程度と小さく、大きな電力を得るにはゲート幅を広げ、駆動電流を稼ぐ必要があった。

化合物半導体の一種である窒化ガリウム (GaN) はバンドギャップが3.4eVとシリコン (Si) やガリウムヒ素 (GaAs) に比べ大幅に広く、耐圧の高いデバイスを実現できる。またヘテロ接合構造が可能のため、いわゆる高電子移動度トランジスタを実現でき、高出力の高周波デバイスとして期待されており、研究がなされている^{1) 2) 3) 4)}。

ここでは、当社で開発をすすめている無線用GaN高電子移動度トランジスタ (HEMT: High Electron Mobility Transistor) の開発について述べる。

GaN HEMTの特長とその構造

無線用高出力デバイスとしてはこれまで各種の材料を用いて開発されてきている。図1は無線用電界効果トランジスタについて、おもな半導体材料別に動作周波数範囲とその出力電力の範囲を示したものである。

高周波化の開発は単体半導体のSiを用いるMOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) から化合物半導体のGaAs MESFET (Metal-Semiconductor FET) P-HEMT (Pseudomorphic HEMT), InP P-HEMTを用いることにより、マイクロ波帯 (3GHz以上)、ミリ波帯 (30GHz以上) での動作が可能となってきた。しかし、高周波特性向上のためにデバイス寸法の微細化も行ってきたため、デバイスに印加できる電圧が小さくなり、取り出す電力を大きくすることができなかった。こ

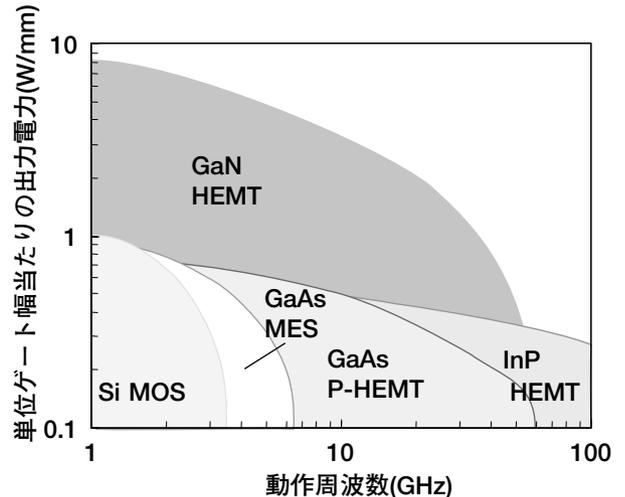


図1 おもな半導体材料別の電界効果トランジスタの動作周波数と出力電力

れに対してGaNはバンドギャップが3.4eVと通常用いられるSiやGaAsなどに比べ約2~3倍大きいため、絶縁破壊電界強度が高い。またAlGaIn/GaNヘテロ接合では自発分極と界面応力に起因するピエゾ分極のため、より高い濃度でしかも移動度の高い2次元電子ガス (2DEG : 2 Dimensional Electron Gas) が得られる。これらの特長からGaN HEMTでは高電圧高電流でしかも高周波動作が可能となる。図1に示すようにGaN HEMTは従来の半導体材料を用いたデバイスに比べ、一桁近く高出力を得ることがわかる。

図2にGaN HEMTの断面構造模式図を示す。一般に大きく分けて (a) リセスゲート構造と (b) ノンリセスゲート構造とに分けられる。ともに基板上に有機金属化学気相堆積法 (MOCVD法) によりエピタキシャル結晶成長を行いAlGaIn/GaN HEMT構造を形成している。後者は表面の半導体層に直接、ソース、ドレイン用のオーミック電極とゲート用のショットキ電極形成している。構造が簡単なためウェハプロセスが容易であるという利点を有する。このため、通常よく用いられている。しかし、ソースゲート電極間やゲートドレイン電極間のAlGaIn

層表面が広く露出するため、表面の状態に起因する電流低下現象（電流コラプス）などの劣化を引き起こしやすい。またソース抵抗を低減しにくいいため、増幅率に対応するパラメータである相互コンダクタンス g_m が小さくなるという短所がある。

当社ではこのような課題を解決するため図2 (a) のリセスゲート構造を採用した^{5) 6) 7)}。この構造ではゲート付近以外は n^+ GaN層となっているため、表面の影響を受けにくい。また、ソース電極が n^+ GaN層に接触しているためノンリセス型に比べ、1/10以下の接触抵抗が得られ、またソース側の n^+ GaN層がゲート直近まで来ていることと相まってFETのソース抵抗が大幅に低減され相互コンダクタンスの向上が図れる。このようにリセスゲート構造では安定でかつ高性能な素子を得ることができる。

リセスゲートGaN HEMTの製作方法は次のように行う。エピタキシャル基板の上にアルゴンイオン注入により素子分離を行ったのち、ソースおよびドレイン電極となるTi/Alオーミック電極を形成する。ゲートリセス構造を安定に加工形成するため、当社では塩化ホウ素 (BCl_3) プラズマICP-RIE (Inductive Coupling Plasma Reactive Etching) による加工技術を開発した。

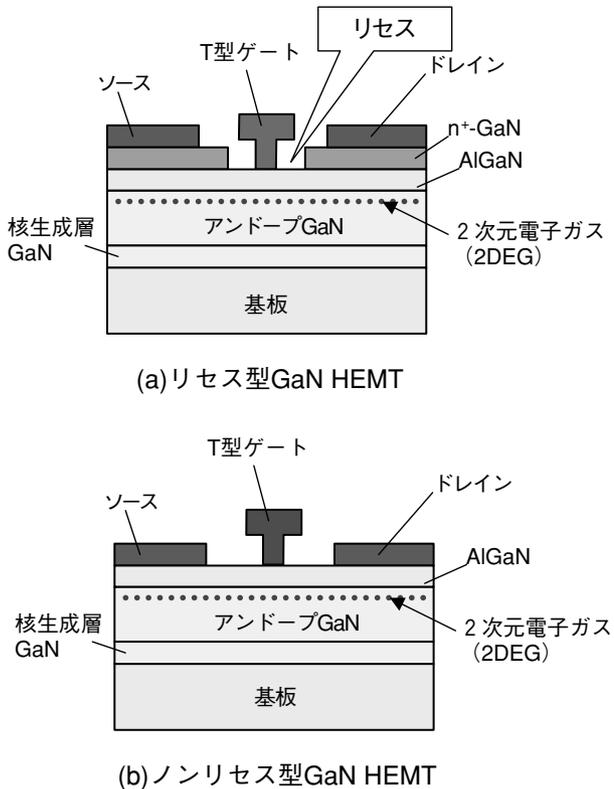


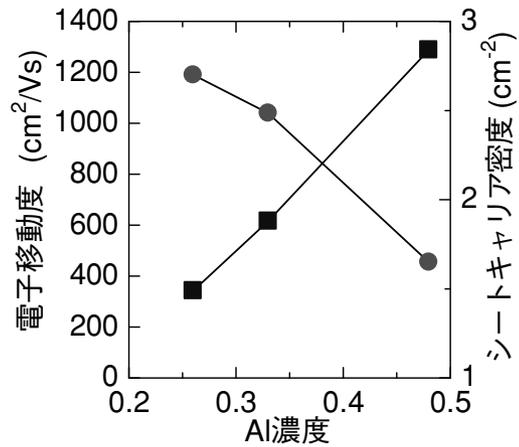
図2 GaN HEMTの構造模式図

窒化物半導体素子用の基板としてはサファイア (Al_2O_3) もしくはシリコンカーバイド (SiC) がよく用いられる。サファイアは青色発光ダイオードなどの基板として一般に用いられている。しかしながらSiCに比べるとサファイアはGaNとの格子定数の差が大きく結晶性向上が難しいことと熱抵抗が約20倍も大きく、無線用電力素子として用いたとき放熱面で極めて不利である。そこで基本的には基板材料としてSiCを用いることとした。

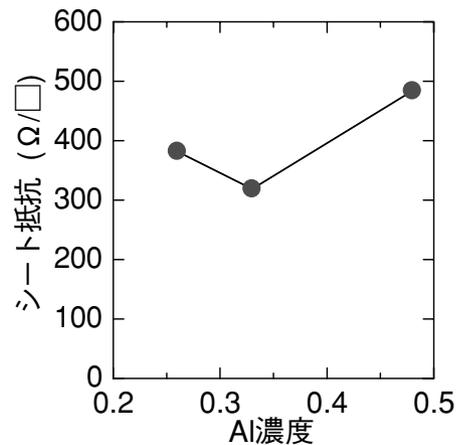
GaN HEMT高性能化設計

HEMT性能を向上させるため、エピタキシャル結晶組成、素子構造寸法の検討を行った。

AlGaN層のAl濃度を高めるとGaNとのバンドの不連続



(a)電子移動度とシートキャリア密度



(b)シート抵抗

図3 2次元電子ガス特性のAl濃度依存性

性が大きくなり、強い分極により、そこに溜まる2次元電子ガス (2DEG) の密度が高くなるためデバイスとしては、より電流を流すことができるようになる。一方、Al濃度の向上は結晶の質を維持するのが困難なため、電子の速度に関する電子移動度の低下の要因となりうる。そこで、Al濃度を変えたサンプルを作製し、電気特性を調べた。

図3は2DEGの電子移動度、キャリア密度、シート抵抗の測定結果を示す。室温でのホール効果をvan der Pauw法により評価し、各パラメータを求めた。予想されたとおりAl濃度を上げるにしたがいキャリア密度は増加するが、電子移動度は低下するのがわかる (図3 (a))。シート抵抗は電子移動度とキャリア密度の両方に対して反比例するため、図3 (b) に示すとおり、極小値が現れる。Al濃度 (以下Xとする) が0.33のとき最小値となっていることがわかる。

さらにこれらの基板を用いて実際にHEMT素子を形成し、相互コンダクタンス g_m と閾値電圧 V_{th} の値を比較した。図4にAl濃度依存性を示す。2DEGの特性から対応するように $X=0.33$ のときに g_m が最大値となることがわかる。この図ではソース抵抗の効果を取り除いた真性相互コンダクタンス g_{m0} も併せて示しており、真性部分では500mS/mm以上の値になっていることがわかる。以上の結果から、実際のHEMT製作にはAl濃度を0.33とすることとした。

チャンネル深さの検討

HEMTではゲート電極により直下の2DEGを変調させるため、チャンネル深さ (ゲート電極-チャンネル (2DEG) 間の距離) は素子性能へ直接的に影響を与える。

そこでゲート長 $0.21 \mu\text{m}$ のHEMTにおいてリセスエッ

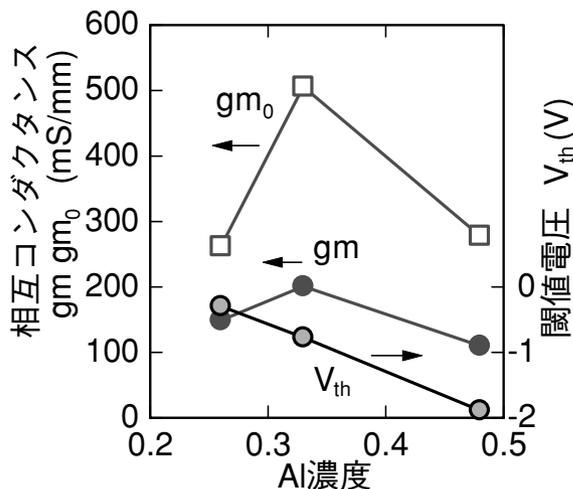


図4 相互コンダクタンスと閾値電圧のAl濃度依存性

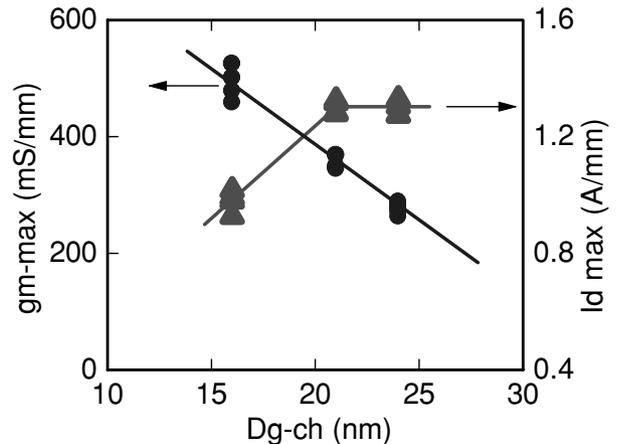


図5 相互コンダクタンスと最大ドレイン電流のチャンネル深さ依存性

チング量を変化させ、相互コンダクタンス g_m 、最大電流 I_{dmax} と小信号高周波特性の変化を調べた。チャンネル深さ (Dg-ch) はエッチング前のエピ層の厚さからエッチング深さを引いて求めた。エピ層の厚さはTEM (透過電子顕微鏡) により評価し、エッチング深さは表面形状測定器により評価した。図5は g_m と I_{dmax} のチャンネル深さ依存性を示したものである。

最大電流はDg-chを24nmから16nmまで下げると1.2A/mm程度へ約20%程度減少する。一方 g_m はほぼ直線的に増加し、Dg-chが16nmでは500mS/mmと倍増している。これは等価的にゲートと2DEGとの静電容量が増えた効果が大きく効いていると考えられる。

図6は電流利得遮断周波数 f_T のDg-ch依存性を示す。

これは同時に製作したゲート幅 $100 \mu\text{m}$ の高周波評価用のHEMT素子を用いて得た結果である。Dg-chの減少に伴い f_T が58GHzから68GHzへと向上している。

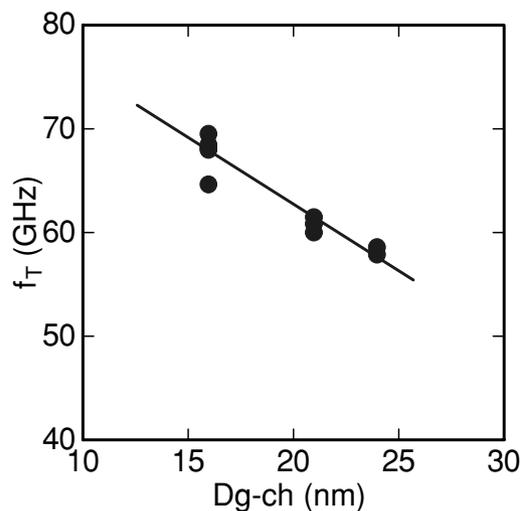


図6 電流遮断周波数のチャンネル深さ依存性

最適化したデバイスの特性

以上の検討した素子パラメータを元に製作したDC特性と高周波特性を図7, 図8に示す。

DC特性として最大 $g_m = 525\text{mS/mm}$, 最大ドレイン電流 $I_{d\text{max}} = 1.25\text{A/mm}$ が得られた。他の機関からこれまで報告されている g_m は最高で $400\text{mS/mm}^{\text{⑧}}$ であり, 得られた値は我々が知る限りで最高のものである。

また, 高周波特性については電流利得遮断周波数 $f_T = 70\text{GHz}$, 最大発振周波数 $f_{\text{max}} = 102\text{GHz}$ が得られた。

以上のようにリセスゲート構造を用いたGaN HEMTは高周波, 高出力の応用に極めて有効な技術であり, 近い将来, ささまざまな無線応用システムで用いられることが期待される。

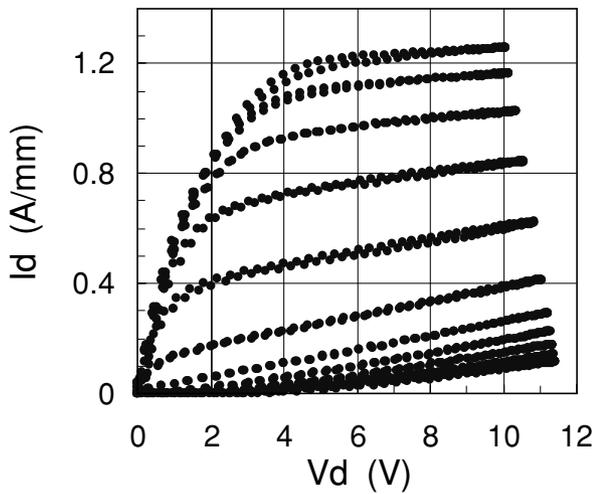


図7 最適化したデバイスのDC特性

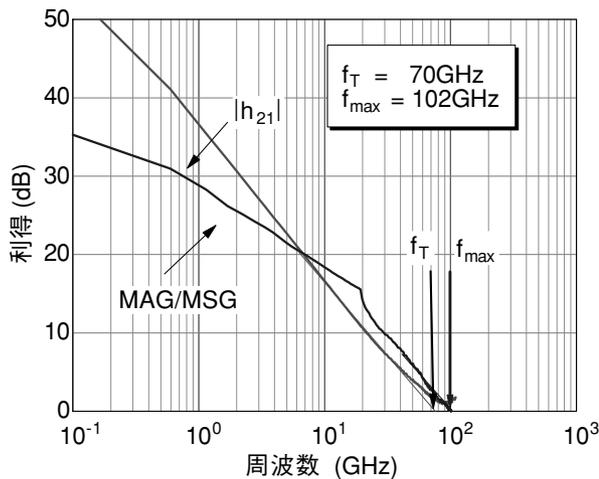


図8 最適化したデバイスのRF小信号特性

謝 辞

本研究開発を行うに当たり, エピタキシャル成長関連でご尽力いただいた名古屋工業大学極微デバイス機能システム研究センター江川孝志教授に感謝する。

本研究開発の一部は『産学官連携イノベーション創出事業費補助金(独創的革新技術開発研究提案公募制度)』ならびに『科学技術振興調整費』を用いて実施した。◆◆

参考文献

- 1) M. A. Khan, *et al.*, Appl. Phys. Lett. 63, p.1214, 1993
- 2) Y. F. Wu, *et al.*, IEEE Electron Device Lett., vol. 19, pp.50-53, 1996
- 3) T. Egawa, *et al.*, Appl. Phys. Lett. 76, p.121, 2000
- 4) M. Micovic, *et al.*: Electronics Letters 28th September Vol. 36 No. 4, pp.358-359, 2000
- 5) T. Yamada, *et al.*, 1st Int'l Workshop on Ultra-Low-Loss Power Device Tech, May 31, Nara, Japan, pp.223-224, 2000
- 6) Y. Sano, *et al.*, 59th Device Research Conference DIGEST, Indiana, USA, pp.81-82, 2001
- 7) Y. Sano, *et al.*: Int'l Conf. on SiC and Related Materials 2001 (ICSCRM2001), Tech. Digest, Nov.2, FrA1-5, 2001
- 8) V.Kumar, *et al.*:Electron. Lett., 28th Feb. 2002 Vol.38 No.5, pp.252-256, 2002

筆者紹介

関昇平: Shohei Seki.研究開発本部 先端デバイスラボラトリ
 佐野芳明: Yoshiaki Sano.研究開発本部 先端デバイスラボラトリ
 牛窪孝: Takashi Ushikubo.研究開発本部 先端デバイスラボラトリ