

ミリ波による高速通信の拡大を牽引する Si 基板上的窒化物半導体トランジスタの研究開発 (145006001)

GaN-Based Transistors on Si Substrate Leading Expansion of Ultra-High Speed Wireless Communication at Millimeter-Wave Frequencies

研究代表者

分島 彰男 名古屋工業大学

Akio Wakejima Nagoya Institute of Technology

研究分担者

江川 孝志[†] 葛原 正明^{††} 細谷 健一^{†††}

Takashi Egawa[†] Masaaki Kuzuhara^{††} Kenichi Hosoya^{†††}

[†]名古屋工業大学 ^{††}福井大学 ^{†††}広島工業大学

[†]Nagoya Institute of Technology ^{††}University of Fukui ^{†††}Hiroshima Institute of Technology

研究期間 平成 26 年度～平成 28 年度

概要

第 5 世代移動体通信 (5G) の普及に向けて、高速・大電力動作性能と低価格性を備える Si 基板上的 GaN 系トランジスタが E-Band (70~80GHz) を用いた基地局増幅器用トランジスタとして実用可能であることを実証した。Si 基板上的結晶成長初期緩衝層 (バッファ層) を厚くすることによって、Si 基板への高周波電力のリークを抑制し、Si 基板上的 AlGaIn/GaN 系 HEMT にて最大発振周波数 (F_{max}) > 150GHz を得た。さらに、短チャネル効果抑制ができる InAlN/GaN 構造にて、AlGaIn/GaN 系に対して 2 倍以上のドレイン電流を有し、 F_{max} = 200GHz を達成した。また、ミリ波帯増幅器に必須となる配線技術に関して、低損失性に優れたコプレーナ線路にて挿入損失 = 0.8dB/mm を得た。

1. まえがき

近年スマートフォンなどに代表される高速・大容量モバイル通信システムの急激な普及に伴い、移動体通信トラフィックが爆発的に増大し、基幹ネットワークのみならず末端の基地局へのエントランス回線等についても大容量化が求められ、光通信のみならず、無線通信の大容量化が求められている。

無線通信の大容量化には広帯域な周波数の確保が必須となるため、第 5 世代移動体通信 (5G) においては、3.5GHz、28GHz などと併せて、70~80GHz 帯 (E-band) の使用も検討されている。この中でも、E-Band は他の周波数帯に対して利用可能な連続帯域幅が広いといった決定的なメリットを有していることから関心が集まっている。一方で、E-Band のようなミリ波帯用は、28GHz などの準ミリ波帯などに比べて、素子製作技術が成熟しておらず高価なため、費用対効果が低いことが要因となり、検討が遅れている。

E-band 無線機器の低廉化の要請は、現在非常に大きく、無線機器の中核を担うトランジスタの高速動作と大電力動作の両立といった性能向上、低価格化の要求は、極めて高い状況にあるものである。

このような背景のもと、本研究開発においては、高速動作かつ大電流密度特性を有し、かつ低価格で製造できる Si 基板上的 GaN 系トランジスタが E-band 無線機器に適用可能であることを示すことで、早急に高い周波数帯への移行を促すことを目的とした。

2. 研究開発内容及び成果

本研究開発においては、主に以下の 4 項目について研究開発を行った。

2-1. Si 基板上的 GaN 系エピタキシャルの低損失化に向けた成長用緩衝層 (バッファ層) の検討

絶縁 (半絶縁性) でない Si 基板を用いた高周波デバイ

スを作製する際の懸念事項の一つは、高周波電力の Si 基板への漏れである。これに対して、GaN チャネル層の下の厚さ 1100nm (タイプ 1 : GaN 層 800nm + バッファ層 300nm) と 2600nm (タイプ 2 : GaN 層 200nm + バッファ層 2400nm) 上に電極 (100 μ m \times 90 μ m) 作製して、リークを高周波特性の実測とその等価回路解析 (図 1) にて評価した。

容量・抵抗の値を表 1 に示す。容量と並行に設置した抵抗 (R_1) の大きさが 6 k Ω と、20 k Ω とバッファタイプ 2 では 3 倍程度大きな値となっていることが分かった。この結果から、バッファタイプ 2 を用いることで、高周波電力の漏れが抑制されることが分かった。

表 1. 容量・抵抗値

タイプ	R_1 (k Ω)	C_1 (pF)	R_2 (Ω)
1	6	0.02	60
2	20	0.02	65

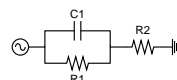


図 1 バッファ層評価用電極部の等価回路

2-2. Si 基板上的 AlGaIn/GaN 系 HEMT の 80GHz 帯適応可能性実証

Si 基板上的 AlGaIn/GaN ヘテロ構造を用いて HEMT を作製した。作製した HEMT のゲート長 (L_g) = 0.08 μ m ~ 1.5 μ m である。

図 2 に作製したゲート長 (L_g) = 0.1 μ m の I - V 特性を示す。最大ドレイン電流 = 590mA/mm、最大トランスコンダクタンス = 155mS/mm であった。また、ゲートリーク特性は、ゲート電圧 = 40V においても 20 μ A/mm であり、十分に低いリーク電流であった。

同素子の高周波特性として、電流利得遮断周波数 F_T と最大発振周波数 F_{max} は、それぞれ、90GHz と 150GHz を得た (図 3)。この特性は、80GHz での使用を考えると、十分とは言えないものの、適応可能な範囲の高周波特性である。

F_T と F_{max} の L_g 依存性からは、 $L_g=0.1\mu\text{m}$ 以下に短ゲート化しても、高周波特性が向上しないことが示され（短チャンネル効果）、高周波特性向上には InAlN/GaN 系のようなゲートチャンネル間距離の短縮が可能な構造を採用する必要があらることがはっきりした。

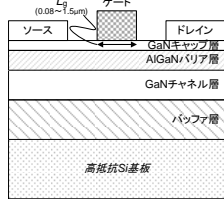


図2 AlGaIn/GaN HEMT 構造とその $I-V$ 特性

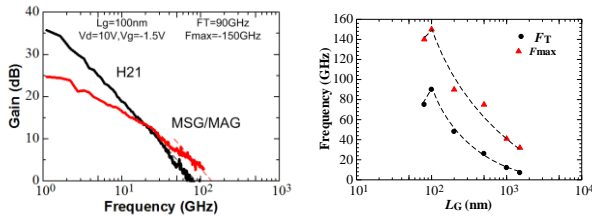
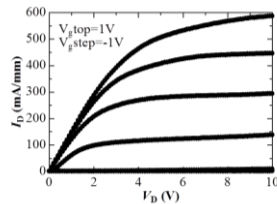


図3 AlGaIn/GaN HEMT の利得特性と F_T , F_{max} の L_g 依存性

2-3. Si 基板上的 InAlN/GaN 系 HEMT による高周波特性改善

高周波特性改善にむけたゲートチャンネル間距離の短縮が可能な構造として InAlN/GaN 系 HEMT の検討を行った。構造は、図2の AlGaIn バリア層を InAlN バリア層に変えた構造である。AlGaIn/GaN 系と比べて分極電荷が大きいこと、バリア層と GaN 層間の ΔE_c が大きいことから薄いバリア層でも大電流密度を維持でき、短チャンネル効果抑制が可能な構造である。バリア層厚は 2-2 の AlGaIn/GaN では 18nm であるが、本構造 InAlN/GaN 構造では 12nm と 2/3 に薄くしている。

$L_g=0.1\mu\text{m}$ の InAlN/GaN 系 HEMT の $I-V$ 特性と利得特性を図4に示す。バリア層厚を AlGaIn/GaN 系に対して 2/3 にしているが、最大ドレイン電流は 1400mA/mm と 2 倍以上の値を得ることができている。また、 F_T , F_{max} は、それぞれ 100GHz, 200GHz であり、AlGaIn/GaN 系の 90GHz, 150GHz に対して向上させることに成功した。

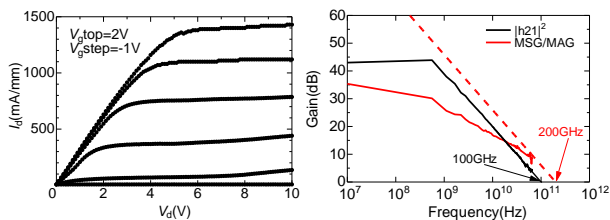


図4 InAlN/GaN HEMT の $I-V$ 特性と利得特性

2-4. Si 基板上的ミリ波帯用配線技術

2-1 と同様に、Si 基板上的 GaN 系トランジスタを用いて IC を作製する上では、配線部の低損失化も極めて重要な技術である。ここでは、基板の導電性の影響を受けにくいコプレーナ線路を検討した。

CPW 線路の挿入損失の周波数依存性（信号線路幅 S ） $=40\mu\text{m}$ 、線路-グラウンド間ギャップ W ） $=20\mu\text{m}$ 、線路長 $=0.8\text{mm}$ ）を一例として図5に示す。B-4 と M-4 の違いは、線路全体の幅違いである。80GHz における挿入損失はいずれの場合も、0.6dB であることから、単位長さあたりの

CPW 線路の挿入損失 $=0.8\text{dB/mm}$ と見積もられ、線路として使用可能であることを実証した。

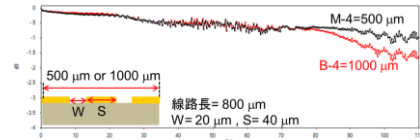


図5 Si 基板上的に作製した CPW 線路の挿入損失

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

今回開発した技術が真に 5G 基地局に対応したものかどうかの検証することで、研究開発成果の実用化を加速させる。現在、ミリ波増幅器技術、配線技術を組み合わせて、ミリ波帯増幅器としての動作（特性）実証に向けた IC 試作をすすめているところである（図6）。

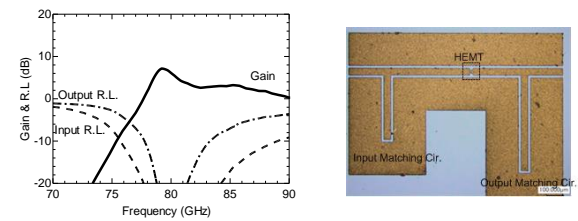


図6 InAlN/GaN HEMT を用いた 80GHz 帯 IC の設計利得特性と試作中の IC 外観

現在、5G においては、24~28GHz を使う動きが活発化している。また、これまで LTE 基地局で用いられてきた高価な SiC 基板上的 GaN 系 HEMT に代わる廉価なトランジスタ要求が高まっている。今回、検討したトランジスタならびに配線技術この周波数帯で十分に使用可能であるので、5G 基地局用増幅器トランジスタを開発する企業に協力することで、本研究開発で得られた様々な知見を実用化において活かしていく。

4. むすび

本研究開発では、高速・大電力動作と低価格性を備える Si 基板上的 GaN 系トランジスタならびに配線技術が E-Band (70~80GHz) を用いた第 5 世代移動体通信 (5G) の普及に必要な特性を有することを実証した。

【誌上発表リスト】

- [1]P. D. Christy, Y. Katayama, A. Wakejima, T. Egawa, "High f_T and f_{MAX} for 100 nm unpassivated rectangular gate AlGaIn/GaN HEMT on high resistive silicon (111) substrate", Electronics Letters Vol.51 Issue No.0017 pp1366-1368 (2015/8/17)
- [2]A. Wakejima, T. Narita, Y. Katayama, K. Tamesue, and T. Egawa, "Activation Energy of Frequency-Dependent Drain-Conductance of AlGaIn/GaN HEMT Evaluated with Low Frequency S-Parameters", Proceedings of 3rd IEEE Workshop on Wide Bangap Power Devices and Applications, pp81-84 (2015/11/3)
- [3]Y. Ikedo, Y. Ito, M. Kuzuhara, K. Hosya, and A. Wakejima, "Microwave Leakage through Buffer Layer of AlGaIn/GaN HEMT on Si", The 12th International Conference on Nitride Semiconductors (2017/7/23)