



## 超高周波 窒化ガリウムトランジスタの研究開発

ミリ波帯無線通信システム構築に向けたボトムアップ

東脇 正高

独立行政法人情報通信研究機構 新世代ネットワーク研究センター  
主任研究員

### 研究の背景

ここ20年で広く一般に普及した携帯電話、無線LANなどに代表されるように、10 GHz程度までの周波数における高速無線通信は、現在我々がごく身近に接するテクノロジーとなりました。今後、更なる高速大容量通信および無線用途の拡大にはより高い周波数の活用が必要となります。このような事情から、現行より一つ上の周波数帯に相当するミリ波帯(30~300 GHz)、中でも50 GHz以上における無線通信システム構築の必要性がかねてから指摘されています。しかしながら、研究開発がこれまでも継続的に進められてきたにもかかわらず、実用化が思うように進んでいないのが現状であります。そのデバイス面での大きな理由の一つとして、既存の半導体デバイス技術で高性能な固体素子受信機は作製可能にもかかわらず、送信機は出力が低く、同時に非常に複雑で高価なものになってしまうことが挙げられます。本研究は、安

価でコンパクトなミリ波帯における固体素子高出力送信機を実現するために、窒化ガリウム(GaN)を材料としたトランジスタに着目し、主にその高周波特性を向上することで上記課題を解決することを目指して進めてきたものであります。

GaNトランジスタには、化合物半導体を材料とした場合に良く用いられる電界効果型トランジスタ(FET)の一種である、高電子移動度トランジスタ(HEMT)と呼ばれる構造が広く用いられています。GaN HEMTにおいても他の半導体材料を用いたFETと同様に、高速、高周波化は、ゲート電極微細化による電子のチャネル走行時間の短縮により達成されます。しかし同時にFETにおいては、ゲート微細化に伴う様々なショートチャネル効果と呼ばれる問題も起こります。この問題を最も効果的に抑制する方法は、ゲート電極長とゲート電極-チャネル間距離(HEMTの場合主として障壁層の厚み)の比に相当するアスペクト比を高く保つことであります。つ

まり、障壁層厚をゲート長短縮に伴い薄くしていくことでショートチャネル効果を軽減することができます。しかしドーピングではなく、分極効果などの窒化物半導体特有の物性を利用して窒化アルミニウムガリウム(AIGaN)障壁層とGaN層のヘテロ界面に電子を誘起してチャネルを形成しているGaN HEMTにおいては、AIGaN障壁層の厚みを薄くすると電子濃度が著しく減少し、結果寄生部分を含めたチャネル全体の電気抵抗が増加するという新たな問題が生じていました。そのため、本研究を開始した時点では、ミリ波応用に必要なレベルの高周波特性を有するGaN HEMTは報告されていませんでした。

### 研究の成果

本研究では、GaN HEMTの高周波デバイス特性を改善するために、最短でゲート長30 nmの微細T型ゲート作製プロセスを開発すると同時に、高い結晶品質を保った高Al組成AIGaNを分子線エピタキシー成長する技術や、窒化シリコン( $\text{SiN}_x$ )膜をAIGaN障壁層上に堆積することで電子濃度を増加させる効果があることの発見などのオリジナルな材料研究の成果も活用してきました。

まず本研究においては、10 nm以下と非常に薄いAIGaN障壁層を有するAIGaN/GaN HEMT構造においても、 $\text{SiN}_x$ 膜をAIGaN上に堆積することにより $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ を超える高い二次元電子ガス濃度が得られることを発見しました(図1) [1]。また、この効果はAIGaN層が薄いほどより顕著となること、 $\text{SiN}_x$ 厚にはほとんど依存しないことも分かっておりま

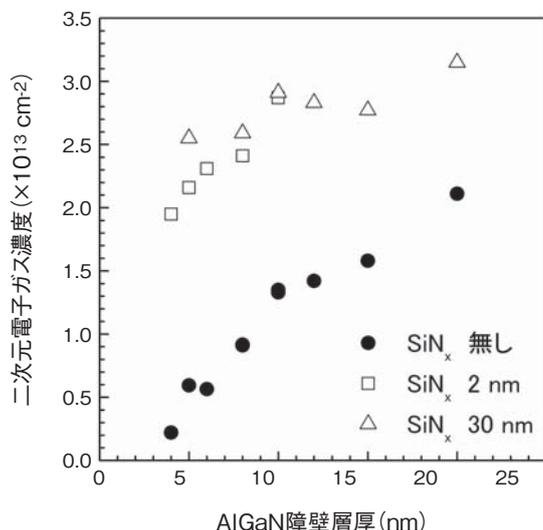
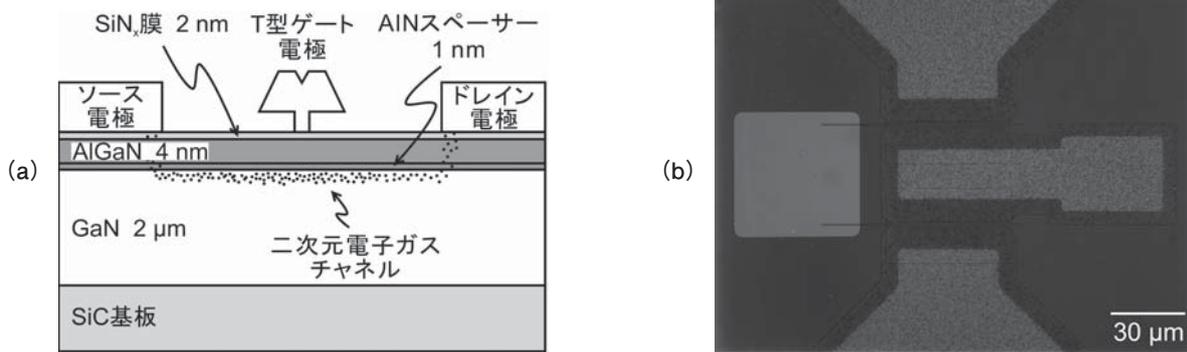


図1  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}/\text{GaN}$  HEMTの二次元電子ガス濃度のAIGaN障壁層厚依存性。 $\text{SiN}_x$ 膜をAIGaN上に堆積することで、大きな電子濃度の増加が得られることが分かる。また、 $\text{SiN}_x$ 膜厚を変えても増加量はほとんど変わっていない。

図2 ゲート長60 nmのAl<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>N/GaN HEMTの(a)断面模式図、(b)表面光学顕微鏡写真



す[2]。これらの特性は、極短ゲートを有するGaN HEMTにおいても、高いアスペクト比を維持し、なおかつデバイス全体の抵抗を低く保つことを可能にします。

図2に、これまでに作製したデバイスの中でも代表的な、ゲート長60 nmのAlGaIn/GaN HEMTの(a)断面模式図と(b)表面から撮影したデバイス全体の光学顕微鏡写真を示します。デバイス構造における特徴的な点としては、(1)障壁層厚がSiN<sub>x</sub>も含めたトータルでも7 nmと非常に薄いこと、(2)AlGaInのAl組成が40%と高いこと、(3)非常に薄いSiN<sub>x</sub>膜を電子濃度増加の目的でAlGaIn上に堆積していることが挙げられます。これらの特徴は、上述のように短ゲート化による高周波特性改善の効果を出来るだけ効率的に得るためのものであります。結果、トランジスタの高周波特性の性能指数の一つで、電流増幅可能な最高周波数、つまりトランジスタとして動作可能な最高周波数に相当する電流利得遮断周波数( $f_T$ )を、本研究を開始した時点で報告されていたGaNトランジスタの最高記録121 GHz[3]から、2005年の時点で152 GHzに、その後改善を重ね2007年には現在でもGaNトランジスタとして最高記録となる190 GHzまで高めることに成功いたしました(図3)[4-6]。また、もう一つの重要な電力利得に関する性能指数である最大発振周波数( $f_{max}$ )も251 GHzと、GaNトランジスタ最高値を記録しています(図3)。通常、十分な利得を得るために、トランジスタにはその動作周波数の2~3倍程度の $f_T$ 、 $f_{max}$ が必要とされます。そのため本研究で得られたこれらの値は、少なくとも100 GHz程度までの周波数領域においてGaN HEMTが実用可能であることを示したことになります。

### 今後の展望

現在、50 GHz以上の周波数をターゲットとしたGaN HEMT単体およびその集積回路の研究開発は、非常にホットなトピックとして国内外の研究機関で精力的に進められており、超高速無線LAN、次世代高度道路交通システム(ITS)などの様々な新し

いミリ波無線通信分野での応用が今後期待されます。またGaNトランジスタは、信頼性を含めた研究の一層の進展とともに、これまでも注目されてきた高出力、高耐圧デバイスや、本研究で提案する高周波無線通信分野のみならず、デジタル応用も含めた様々な分野に広がっていくものと考えております。

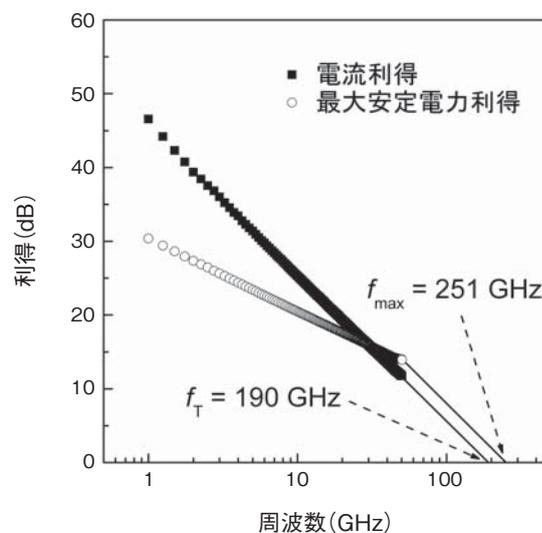


図3 電流利得および最大安定電力利得の周波数依存性。利得が0になる周波数まで実測できない場合には、図に示すように-20 dB/decadeの傾きを持って外挿することにより $f_T$ 、 $f_{max}$ を見積もる方法が取られる。

### 補足説明

#### ミリ波

周波数30~300 GHzの電磁波。名称は、波長が1~10 mmであることに由来する。周波数が高いことから高速大容量データ通信に適している。また指向性が非常に高いことも特徴。

#### 窒化ガリウム(GaN)

III族窒化物化合物半導体の一つ。バンドギャップは室温で3.4 eV。窒化アルミニウム(AIN)、窒化インジウム(InN)などとの混晶も含めて、0.6~6.2 eVの広いバンドギャップ領域をカバーする。他の半導体と比較して、(1)熱伝導率が大きく放熱性に優れている、(2)高温での動作が可能、(3)飽和電子速度が高い、(4)絶縁破壊電界が高いなどの優れた特性を有する。青色発光ダイオード、レーザーダイオードなどの光デバイスの材料としても有名。

### References (参考文献)

- [1] M. Higashiwaki, N. Hirose, and T. Matsui, IEEE Electron Device Lett. 26, 139(2005).
- [2] M. Higashiwaki, N. Onojima, T. Matsui, and T. Mimura, J. Appl. Phys. 100, 033714(2006).
- [3] V. Kumar, W. Lu, R. Schwindt, A. Kuliev, G. Simin, J. Yang, M. Asif Khan, and I. Adesida, IEEE Electron Device Lett. 23, 455(2002).
- [4] M. Higashiwaki and T. Matsui, Jpn. J. Appl. Phys. 44, L475(2005).
- [5] M. Higashiwaki, T. Matsui, and T. Mimura, IEEE Electron Device Lett. 27, 16(2006).
- [6] M. Higashiwaki, T. Mimura, and T. Matsui, Appl. Phys. Exp. 1, 021103(2008).