

## リセスゲートを用いたサファイア基板上的の AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT の諸特性

江川 孝志<sup>†a)</sup> 石川 博康<sup>†</sup> 趙 廣元<sup>††</sup> 神保 孝志<sup>†††</sup>  
梅野 正義<sup>†,†††</sup>

### Characteristics of Recessed Gate AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs on Sapphire Substrate

Takashi EGAWA<sup>†a)</sup>, Hiroyasu ISHIKAWA<sup>†</sup>, Gangyuan ZHAO<sup>††</sup>, Takashi JIMBO<sup>†††</sup>, and Masayoshi UMENO<sup>†,†††</sup>

あらまし サファイア基板上有機金属気相成長 (MOCVD) 法を用いて AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ構造を成長し、更にリセスゲートプロセスを用いて AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 高電子移動度トランジスタ (HEMT) を作製した。50K 以下の低温にてシートキャリア密度が一定になる 2 次元電子ガス特有の特性が観察された。8.9K において移動度は 12000cm<sup>2</sup>/Vs, シートキャリア密度は 2.8×10<sup>12</sup>cm<sup>-2</sup> であった。このような高品質の薄膜に変調ドープを行い、リアクティブイオンエッチング (RIE) によるリセスゲートプロセスを用いて作製したゲート長 2.1μm の AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT は、25°C にて相互コンダクタンス 146mS/mm, ドレーン電流 900mA/mm の良好な特性が得られた。350°C では、相互コンダクタンスが 62mS/mm と低下したが、良好なピンチオフ特性及び飽和特性を示した。また、25°C 及び 350°C でのしきい値電圧の変化は 0.3V と非常に小さく、AC 動作時での顕著な電流コラプスは観測されなかった。

キーワード AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT, 2 次元電子ガス, リセスゲート, 高温特性, 電流コラプス

## 1. ま え が き

GaAs 系電界効果トランジスタ (FET) を<sup>りょうが</sup>凌駕する半導体材料としてワイドギャップ GaN 系 FET の研究開発が活発に行われている。ワイドギャップ GaN 系

半導体材料では、(1) バンドギャップが 3.4eV と大きく、(2) 破壊電界が 2×10<sup>6</sup>V/cm と大きく、(3) 移動度が 2000cm<sup>2</sup>/Vs, 飽和速度が 2.7×10<sup>7</sup>cm/s と比較的高く、(4) 大きな ΔEc をもつ AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ接合の作製が可能であり、ヘテロ界面に 2 次元電子ガス (2DEG) が形成される。またピエゾ効果による高いシートキャリア密度 (1×10<sup>13</sup>cm<sup>-2</sup>) が得られる。したがって、AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ構造を利用した AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 高電子移動度トランジスタ (HEMT) では、ヘテロ界面に形成される 2DEG のシートキャリア密度が高く、AlGa<sub>N</sub> 層へのショットキー接触の高い障壁高さによる小さなゲートリークと優れたゲート逆方向特性等の高温・高周波パワー素子として大きな利点を有している。このため、高温動作可能なマイクロ波帯高出力素子材料として活発な研究・開発が行われている [1],[2]。各材料の絶縁破壊電界、飽和電子速度、熱伝導度、移動度及び誘電率などの物性値を用いて計算したジョンソ

† 名古屋工業大学・極微構造デバイス研究センター, 名古屋市  
Research Center for Micro-Structure Devices, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

†† 名古屋工業大学・ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー, 名古屋市  
Venture Business Laboratory, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

††† 名古屋工業大学・都市循環システム工学専攻, 名古屋市  
Department of Environmental Technology & Urban Planning, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

†††† 名古屋工業大学・電気情報工学科, 名古屋市  
Department of Electrical and Computer Engineering, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

a) E-mail: egawa@mothra.elcom.nitech.ac.jp

表1 性能指数及び素子動作温度の比較

Table 1 Comparison of normalized figures of merit and operating temperature for various semiconductors.

| 性能指数<br>材料 | ジョンソン<br>指数 | キー指数 | Baligaの<br>高周波指数 | 素子動作<br>温度 (°C) |
|------------|-------------|------|------------------|-----------------|
| Si         | 1           | 1    | 1                | <200            |
| GaAs       | 11          | 0.45 | 16               | <200            |
| 4H-SiC     | 410         | 5.1  | 34               | >500            |
| GaN        | 790         | 1.8  | 100              | >600            |

ン指数, キー指数, Baliga の高周波指数などの性能指数及び素子動作温度を表1に示す[3]. 表1では, 比較のためにSiの性能指数で規格化してある. 表1に示した性能指数, 素子動作温度, 基板サイズ及び価格などを考慮すると, GaN系半導体材料は高温動作のマイクロ波帯高出力素子材料として優れていることが理解できる. GaN系FETは, 携帯電話に代表されるL/S帯(1~4GHz)での移動体通信の基地局及び今後の発展が期待されるKu帯(12~18GHz)からKa帯(27~40GHz)での衛星通信などへの応用分野が考えられる.

AlGaIn/GaN HEMTの高性能化には(1)2DEGの移動度の向上と(2)寄生抵抗の軽減が必須である(1)の点において, 格子不整合の大きなサファイア基板上(サファイアとGaNの格子不整合: 13.8%)に成長したAlGaIn/GaNヘテロ構造における2DEGの移動度は, 格子不整合がより小さい6H-SiC基板上(6H-SiCとGaNの格子不整合: 3.4%)に成長したものより低いという報告がある[4](2)の点では, 寄生ソース抵抗を小さくするためにリセスゲート構造の適用が有効である[5],[6]. 文献[5],[6]によればリセスゲートを用いたGaN MESFET(ゲート長: 1.3 $\mu\text{m}$ )では相互コンダクタンス41mS/mm, AlGaIn/GaN HEMT(ゲート長: 0.4 $\mu\text{m}$ )では45mS/mmという値が報告されている. しかしながら, 我々はリセスゲート構造をもたないゲート長2.1 $\mu\text{m}$ のGaN MESFETで相互コンダクタンス33mS/mmが得られていることを考慮すると[7], 文献[5],[6]の値は決して高いものではなく, リセスゲートの有用性を十分発揮しているとはいえない. 特にAlGaIn/GaN HEMTでは2DEGの移動度向上とソース抵抗の軽減により更なる高性能化が期待できる.

また, GaN系MESFET及びHEMTでは, 暗い状態あるいはACで電流-電圧特性を測定すると, 光照射あるいはDCでの場合と比較して, ドレイン電流が減少する(電流コラプス)現象がある[8]~[10]. 電流コラプスは, 表面や結晶欠陥などのプロセス技術及び結晶品質に起因したものであると考えられており, AlGaIn/GaN HEMTなどを高周波パワー素子として利用する場合, 実用上大きな障害となる.

本研究では, 有機金属気相成長(MOCVD)法を用いてサファイア基板上に高品質AlGaIn/GaNヘテロ構造を成長し, 反応性イオンエッチング(RIE)によるリセスゲートプロセスを用いてゲート長: 2.1 $\mu\text{m}$ のAlGaIn/GaN HEMTを作製した. 試作したHEMTの相互コンダクタンスは146mS/mm, ドレイン電流は90mA/mmであった. また, 350°Cの高温においても, 良好なピンチオフ特性及び飽和特性を保持し, しきい値電圧( $V_{th}$ )の変動が小さいことを見出した. 更に, RIEによるプラズマ損傷及び電流コラプスについても報告する.

## 2. 実験方法

### 2.1 MOCVD法を用いた結晶成長

本研究で用いた試料は, 常圧MOCVD装置を用いて2段階成長法により2インチサファイア(0001)基板上に成長させた. III族源としてトリメチルガリウム(TMGa), トリメチルアルミニウム(TMA), V族源として高純度アンモニア(5N), n形ドーパントとしてモノシラン(SiH<sub>4</sub>, 10ppm), キャリヤガスとして水素を使用した. 図1にサファイア基板上にGaN層を成長するときの成長温度シーケンスを示す. サファイア基板を水素雰囲気中, 1100°Cにてサーマルクリーニングを行った後, 低温GaN緩衝層を500°Cで30nm堆積し, 1080°Cに昇温しアンドープGaN層を成長した.

サファイア基板上に高い移動度をもつ2DEGを形成するには, 平坦で急峻なヘテロ界面を有するAlGaIn/GaNヘテロ構造を成長する必要がある. そのためには, サファイア基板上に平坦なGaN層を成長する必要がある. 本実験では, 異なる基板メーカー(A,B,C,D社)から購入した4種類のサファイア基板上に3 $\mu\text{m}$ のGaN層を成長し, サファイア基板及びGaN層表面の平坦性を原子間力顕微鏡(AFM)を用いて評価した. ホール測定用のアンドープAlGaIn/GaNヘテロ構造では, 1080°CでアンドープGaN層を2.5 $\mu\text{m}$ 成長した後, 同温度にてアンドープAlGaIn層を成長

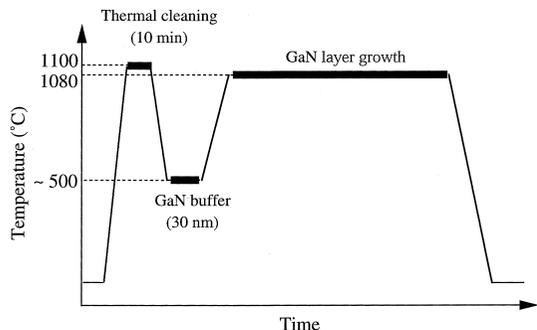


図1 MOCVD装置を用いた2段階成長法によるサファイア基板上のGaN層の成長シーケンス  
Fig.1 MOCVD growth sequence of GaN layer on sapphire by two step growth technique.

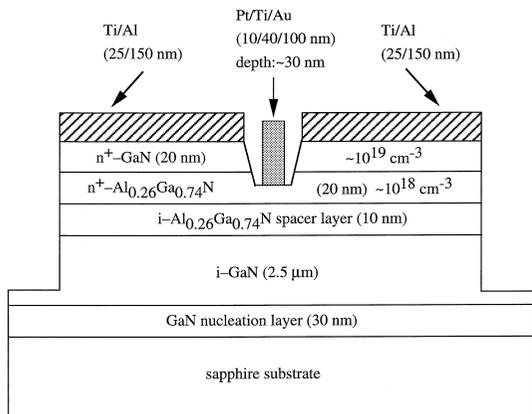


図2 リセスゲートプロセスによるサファイア基板上のAlGaIn/GaN HEMTの断面構造図  
Fig.2 Cross-sectional structure of AlGaIn/GaN HEMT grown on sapphire using recess gate process.

した。AlGaIn/GaN HEMTでは、アンドープGaInを2.5μm成長後、アンドープAlGaInスペーサ層を10nm、Siドープn<sup>+</sup>-AlGaInキャリア供給層 (~10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>)を20nm、Siドープn<sup>+</sup>-GaInコンタクト層 (~10<sup>19</sup>cm<sup>-3</sup>)を20nm成長した。AlGaIn層のAlNモル分率は、2結晶X線回折法によりAlGaInとGaIn(0004)面のピーク差を測定し、ベガード則(無ひずみ系の変化を仮定)から見積もった。

### 2.2 リセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT の作製

図2にリセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMTの断面構造図を示す。フォトリソグラフィ技術とBCl<sub>3</sub>ガスを用いたRIE装置(パワー:10W, 圧力:3Pa)を用いてエッ

表2 各種サファイア基板及びサファイア基板上のGaN層の表面平坦性の比較

Table 2 Comparison of surface flatness for various sapphire substrates and GaN layers grown on sapphire substrates.

|                       | Sapphire substrate (0001) |       |              |      | GaN (3 μm)/sapphire |       |      |      |
|-----------------------|---------------------------|-------|--------------|------|---------------------|-------|------|------|
|                       | A                         | B     | C            | D    | A                   | B     | C    | D    |
| R <sub>a</sub> (nm)   | 1.69                      | 0.21  | 0.11<br>0.20 | 0.20 | 55.95               | 0.35  | 0.74 | 0.27 |
| R <sub>rms</sub> (nm) | 2.65                      | 0.35  | 0.14<br>0.27 | 0.24 | 68.87               | 0.44  | 0.96 | 0.34 |
| P-V (nm)              | 48.5                      | 29.88 | 1.75<br>6.22 | 1.40 | 395.5               | 17.28 | 5.74 | 3.44 |

チングを行い、素子間分離を行った。この条件でのGaN層のエッチングレートは、~6nm/minである。ドレイン電極及びソース電極としてTi/Al(25nm/150nm)を蒸着後、窒素雰囲気中にて900°C、60秒間アニールを行った。次にBCl<sub>3</sub>ガスを用いたRIE法(10W, 3Pa)によりリセスエッチングを行い、ゲート電極にはPt/Ti/Au(10nm/40nm/100nm)を用い、エッチングしたドレイン・ソース間に形成した。今回作製した素子では、RIEによる損傷を回復するための熱処理などのプロセスは行っていない。ゲート長及びゲート幅は2.1, 15μmであり、ソース及びドレイン電極の間隔は10μmである。

アンドープAlGaIn/GaNヘテロ構造のホール効果測定は、van der Pauw法を用いて測定した。また、RIEによる損傷の実験では、GaN層をRIE法を用いてエッチングした後(10W, 3Paで0, 5, 15, 25分)に直径150μmのショットキーダイオードを作製して、電流-電圧特性からその影響を調べた。AlGaIn/GaN HEMTの電流-電圧特性は、半導体パラメータアナライザーとカーブトレーサを用いて測定し、容量-電圧(C-V)特性は100kHzで測定した。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 サファイア基板及びGaN層の表面平坦性

表2に異なる4種類のサファイア基板及びその上に成長したGaN層表面のAFM観察から求めた平均値(R<sub>a</sub>), 2乗平均面粗さ(R<sub>rms</sub>)及び高低差(P-V)の値を示す。各サファイア基板表面は、各々特長のある表面形状をもつことが明らかになった。A社のサファイア基板は、全体的に凹凸が大きく、更にこの上にGaN層の結晶成長を行うと凹凸が更に大きくなる。B社の基

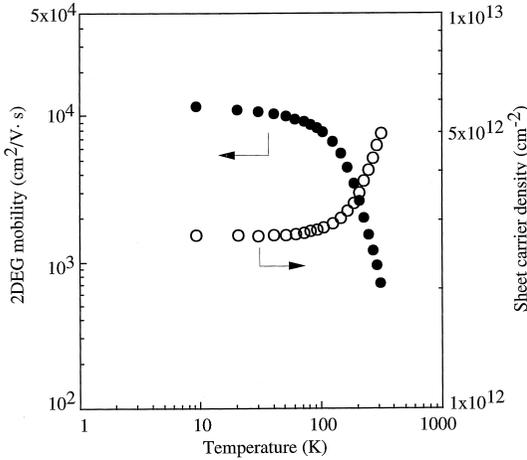


図3 2次元電子ガスの移動度及びシートキャリア密度の温度依存性  
Fig.3 Temperature dependence of 2DEG mobility and sheet carrier concentration.

板では、スパイク状の突起物が観察された。また、C社のサファイア基板ではロットによっては、スパイク状の突起物が観察された。これは、基板表面の最終仕上げの研磨方法に依存するものと考えられる。D社のサファイア基板及びこの上に成長したGa<sub>0.15</sub>In<sub>0.85</sub>N層表面のRmsは、各々0.24nm及び0.34nmと安定した平坦性が得られたので、本研究ではこのサファイア基板上にAlGa<sub>0.15</sub>In<sub>0.85</sub>N/GaNヘテロ構造を成長した。また、2インチサファイア基板上(周辺5mmを除く)のGa<sub>0.15</sub>In<sub>0.85</sub>N層の膜厚の面内均一性は、標準偏差で35nmであった。

3.2 AlGa<sub>0.15</sub>In<sub>0.85</sub>N/GaNヘテロ構造内の2次元電子ガス

図3にホール効果測定から求めたアンドープAlGa<sub>0.15</sub>In<sub>0.85</sub>N/GaNヘテロ構造のシートキャリア密度及びホール電子移動度の温度依存性を示す。100K以上の範囲では、温度の増加とともにホール電子移動度が急激に減少し、シートキャリア密度がゆるやかに上昇している。イオン化不純物散乱の影響が予測される100K以下の温度では、温度変化に対しホール電子移動度、シートキャリア密度ともに大きく変化しない様子が観察された。このAlGa<sub>0.15</sub>In<sub>0.85</sub>N/GaNヘテロ構造の300Kにおけるホール移動度は、740cm<sup>2</sup>/Vsであり、シートキャリア密度は5.1×10<sup>12</sup>cm<sup>-2</sup>であった。8.9Kにおいてホール移動度は最高値12000cm<sup>2</sup>/Vsとなり、このときのシートキャリア密度は2.8×10<sup>12</sup>cm<sup>-2</sup>であった。一般に、AlGaAs/GaAsヘテロ構造でのシートキャリア

表3 RIEを用いてエッチングしたGa<sub>0.15</sub>In<sub>0.85</sub>N層上のショットキー特性の比較  
Table 3 Comparison of characteristics for Schottky diodes on Ga<sub>0.15</sub>In<sub>0.85</sub>N layers etched by RIE.

| エッチング時間(分)<br>ショットキー特性 | 0    | 5     | 15    | 25    |
|------------------------|------|-------|-------|-------|
| n値                     | 1.28 | 1.71  | 3.48  | 2.64  |
| 障壁の高さ(eV)              | 0.96 | 0.87  | 0.82  | 0.84  |
| 逆方向電圧(V)<br>@ 0.1 mA   | >60  | 32~36 | 28~36 | 32~38 |

密度は10<sup>10</sup>~10<sup>11</sup>cm<sup>-2</sup>である。これと比較すると、AlGa<sub>0.15</sub>In<sub>0.85</sub>N/GaNヘテロ構造でのシートキャリア密度は、約一けた大きい。このような比較的大きなシートキャリア密度は、ピエゾ効果によるものと考えられている[11]。本研究で得られた移動度の値は、MOCVD法を用いてサファイア基板上に高品質なAlGa<sub>0.15</sub>In<sub>0.85</sub>N/GaNヘテロ構造が成長されており、そのヘテロ界面に2DEGが形成されていることを示唆するものである。また、サファイア基板とGa<sub>0.15</sub>In<sub>0.85</sub>N層との格子定数差が13.8%と大きいにもかかわらず、サファイア基板のAlGa<sub>0.15</sub>In<sub>0.85</sub>N/GaNヘテロ構造で12000cm<sup>2</sup>/Vsの大きな移動度が得られたことは、注目すべきである。更に、2DEGの移動度は、AlGa<sub>0.15</sub>In<sub>0.85</sub>N層のAl組成及び膜厚に依存する[12]。

3.3 ショットキー特性及びRIEによる損傷

表3にRIEを用いてエッチングしたGa<sub>0.15</sub>In<sub>0.85</sub>N層上に作製したPt/Ti/Auショットキーダイオードの理想因子(n値)、障壁の高さ及び逆方向電流0.1mAでの逆方向電圧を示す。比較のためにエッチングを行わない場合の結果も示す。エッチングを行わない場合と比較して、RIEを用いてエッチングを行うとn値、障壁の高さ及び逆方向電圧は、劣化している。これは、プラズマ損傷によるものと考えられる。更にエッチングすることにより、ショットキーダイオードの特性は改善される傾向にあるが、この原因は明らかでない。また、RIEエッチングした試料を700°Cでアニールすることによりショットキーダイオードの特性は改善される傾向にある。これは、アニールによる損傷の回復によるものと考えられる。また、今回作製したリセスゲート構造AlGa<sub>0.15</sub>In<sub>0.85</sub>N/GaN HEMTでは、RIEを用いてリセスエッチングを行った後は、プロセスの関係上アニールなどによる損傷の回復は行っていない。

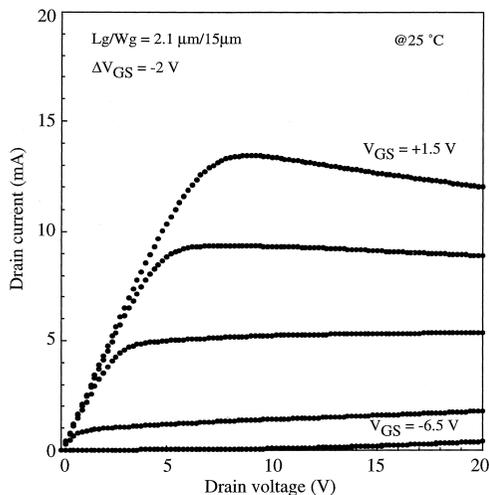


図4 25°Cでの AlGaIn/GaN HEMT の静特性  
Fig.4 I-V characteristic of AlGaIn/GaN HEMT at 25°C.

### 3.4 AlGaIn/GaN HEMT の静特性

図4にゲート電圧 ( $V_{GS}$ ) を  $+1.5 \sim -6.5V$  と変化させて25°Cで測定したリセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT のドレイン電流-ドレイン電圧 ( $I_{DS}-V_{DS}$ ) の静特性を示す. このリセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT の相互コンダクタンスの最大値 ( $g_{mmax}$ ) 及び  $I_{DS}$  の最大値 ( $I_{DSmax}$ ) はそれぞれ 146mS/mm, 900mA/mmであった. しきい値電圧 ( $V_{th}$ ) は約  $-6.8V$  でピンチオフを示す特性を得た. また, ソース抵抗は約  $6.1\Omega$ mmであるため, この値を用いて計算した真性相互コンダクタンス ( $g_{m0}$ ) は 1335mS/mmと非常に大きな値であった. 本研究で作製したリセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT は  $2.1\mu\text{m}$  と比較的長いゲート長をもつにもかかわらず, これより短いゲート長  $0.4\mu\text{m}$  をもつBurmら [6] のリセスゲート構造HEMTの  $g_{mmax}$ ,  $I_{DSmax}$  (それぞれ  $45\text{mS/mm}$ ,  $135\text{mA/mm}$ ) より大きな値が得られている. これは高品質な AlGaIn/GaN ヘテロ構造によって, リセスゲート構造の効果が大きく現れたものと考えられる. 今回作製した素子では, 伝送線路法から求めた固有接触抵抗値が  $1 \sim 4 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}^2$  と大きく, また RIE による損傷が残っていることを考慮すると, 固有接触抵抗値の低減及び損傷を回復するプロセスを導入することにより, 更に素子特性が改善できると考えられる.

C-V 法を用いてイオン化不純物濃度の深さ方向プロファイル測定した. AlGaIn/GaN ヘテロ界面付近

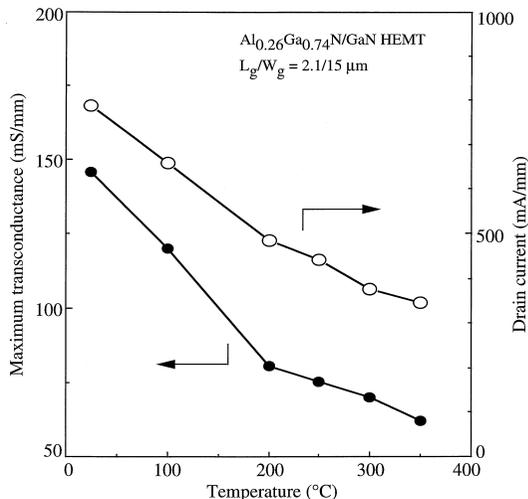


図5 最大相互コンダクタンス及びドレイン電流の温度依存性  
Fig.5 Temperature dependence of maximum transconductance and drain current.

に  $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  の急峻なスパイク状のプロファイルが観測された. このことから AlGaIn/GaN ヘテロ界面に2次元電子ガスが形成されていることが明らかになった.

### 3.5 高温特性

図5に  $g_m$  及び  $I_{DS}$  の温度依存性を示す.  $g_m$  の温度変化に関しては, 温度が  $200^\circ\text{C}$  まで増加すると  $g_m$  は急激に減少し, その後温度の上昇とともに緩やかに減少し,  $25^\circ\text{C}$  で  $146\text{mS/mm}$  あったものが  $350^\circ\text{C}$  では  $62\text{mS/mm}$  となった.  $I_{DS}$  の温度変化も  $g_m$  と同じ傾向を示す. このような高温での  $g_m$  の減少は, 高温における2DEGの移動度の減少が起因しているものと考えられる.  $350^\circ\text{C}$  におけるこのリセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT の  $I_{DS}-V_{DS}$  特性を図6に示す. 前述のように  $g_m$  は減少するが, 良好なピンチオフ特性及び飽和特性を保持している. 更に,  $350^\circ\text{C}$  で測定した後, 室温まで降温して再び特性を測定したところ,  $I_{DS}-V_{DS}$  特性の再現性が確認された. これは, 高温におけるショットキー電極と AlGaIn 層及びオーミック電極と GaN 層での界面反応・劣化が起きていないことを示唆している. 図7に  $V_{th}$  の温度依存性をゲート幅  $15$  及び  $200\mu\text{m}$  の素子について GaN MESFET の結果と併せて示す. GaN MESFET の場合の  $V_{th}$  の温度変化は,  $25^\circ\text{C}$  で約  $-12V$  のものが  $350^\circ\text{C}$  で約  $-19V$  と大きく負側に変化している. これに対し

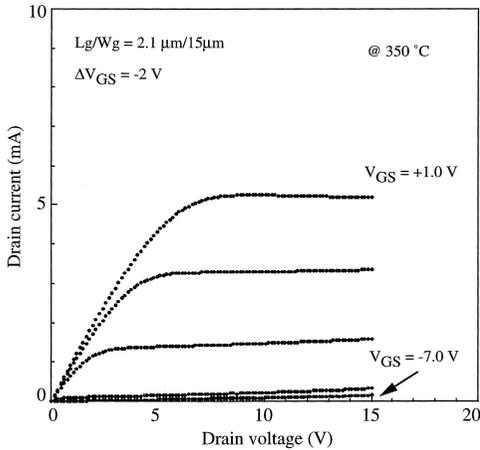


図6 350°CでのAlGaIn/GaN HEMTの静特性  
Fig.6 I-V characteristic of AlGaIn/GaN HEMT at 350°C.

て、AlGaIn/GaN HEMTでは $V_{th}$ は温度の上昇にかかわらず、約-7Vとその変化は非常に小さい。このようにAlGaIn/GaN HEMTでの $V_{th}$ の温度依存性が小さいことの原因の一つは、ピエゾ電荷の影響が考えられる。更に、AlGaIn/GaN HEMTでの $V_{th}$ の温度変化が非常に小さいことは、HEMTの特徴であり、高温電子デバイスとしての設計及び応用という点での長所といえる。

### 3.6 電流コラプス

DC測定においてドレーン電圧を連続的に掃引したとき (hold time = 0秒)のみ、ドレーン電圧を20V以上印加すると、低電圧領域でドレーン電流が減少する現象 (電流コラプス) が報告されている [10]。また、AC (カーブトレーサ) 動作で電流-電圧特性を測定すると電流キックは観測されないが、ドレーン電流が全体的に減少することも報告されている [10]。このような電流コラプスは、試料表面及び結晶欠陥などのプロセス技術及び結晶品質に起因するものであり、RF特性での出力低下という重大な問題を引き起こす。

図8にAC (カーブトレーサ) 動作で測定した $I_{DS}$ - $V_{DS}$ 特性を示す。この結果と図4における $V_{GS}=+1.0V$ でのドレーン電流を比較するとAC (カーブトレーサ) 動作においてもドレーン電流に顕著な減少は観測されなかった。また、hold timeを10秒、20秒に設定し、ドレーン電圧を20V以上印加し電流-電圧測定を行ったが、hold time=0秒の場合と同じ特性であった。更に、白色光の照射の有無による電流-電圧特性の変化

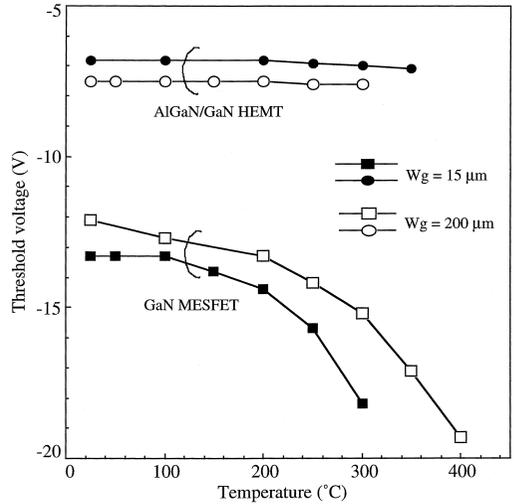


図7 AlGaIn/GaN HEMT及びGaN MESFETのしきい値電圧の温度依存性  
Fig.7 Temperature dependence of threshold voltage for AlGaIn/GaN HEMT and GaN MESFET.

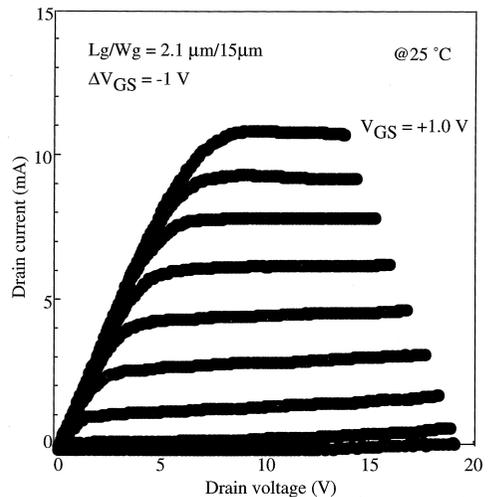


図8 AC (カーブトレーサ) 動作で測定したAlGaIn/GaN HEMTの静特性  
Fig.8 I-V characteristic of AlGaIn/GaN HEMT under AC condition (curve tracer).

も観測されなかった。

## 4. むすび

サファイア基板上にMOCVD法を用いてAlGaIn/GaNヘテロ構造を成長し、更にリセスゲートプロセスによりAlGaIn/GaN HEMTを作製した。温

度を変化させてAlGaIn/GaNヘテロ構造のホール効果測定を行ったところ、低温にてシートキャリア密度が一定になる2DEG特有の特性が観察された。8.9Kにおいて移動度は $12000\text{cm}^2/\text{Vs}$ であり、このときのシートキャリア密度は $2.8 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ であった。このような高品質の薄膜に変調ドープを行い、リセスゲートプロセスを用いて作製したゲート長 $2.1\mu\text{m}$ のAlGaIn/GaN HEMTでは、 $25^\circ\text{C}$ にて相互コンダクタンス $146\text{mS}/\text{mm}$ 、ドレイン電流 $900\text{mA}/\text{mm}$ が得られた。 $350^\circ\text{C}$ では、相互コンダクタンスが $62\text{mS}/\text{mm}$ と低下したが、良好なピンチオフ特性及び飽和特性を示した。また、 $25^\circ\text{C}$ 及び $350^\circ\text{C}$ でのしきい値電圧の変化は $0.3\text{V}$ と非常に小さい。更に、AC動作時での顕著な電流コラプスは観測されなかった。

謝辞 本研究の一部分は、「郵政省の周波数資源開発公募研究による研究成果」である。

#### 文 献

- [1] M. A. Khan, J. N. Kuznia, D. T. Olson, W. J. Schaff, J. W. Burm, and M. S. Shur, "Microwave performance of a  $0.25\mu\text{m}$  gate AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistor," IEEE Electron Device Lett., vol.65, no.9, pp.1121–1123, Aug. 1994.
- [2] Y.-F. Wu, B. P. Keller, P. Fini, S. Keller, T. J. Jenkins, L. T. Kehias, S. P. Denbaars, and U. K. Mishra, "High Al-content AlGaIn/GaN HEMT's for ultrahigh performance," IEEE Electron Device Lett., vol.19, no.2, pp.50–53, Feb. 1998.
- [3] T. P. Chow and R. Tyagi, "Wide bandgap compound semiconductors for superior high-voltage unipolar power devices," IEEE Trans. Electron Devices, vol.41, no.8, pp.1481–1483, Aug. 1994.
- [4] J. M. Redwing, M. A. Tischler, J. S. Flynn, S. Elhamri, M. Ahoujja, R. S. Newrock, and W. C. Mitchel, "Two-dimensional electron gas properties of AlGaIn/GaN heterostructures grown on 6H-SiC and sapphire substrates," Appl. Phys. Lett., vol.69, no.7, pp.963–965, Aug. 1996.
- [5] S. C. Binari, K. Doverspike, G. Kelner, H. B. Dietrich, and A. E. Wickenden, "GaN FETs for microwave and high-temperature applications," Solid-State Electron., vol.41, no.2, pp.177–180, 1997.
- [6] J. Burm, W. J. Schaff, G. H. Matin, L. F. Eastman, H. Amano, and I. Akasaki, "Recessed gate GaN HEMTs," Solid-State Electron., vol. 41, no.2, pp.247–250, 1997.
- [7] T. Egawa, K. Nakamura, H. Ishikawa, T. Jimbo, and M. Umeno, "Characteristics of a GaN metal semiconductor field-effect transistor grown on a sapphire substrate by metalorganic chemical vapor deposition," Jpn. J. Appl. Phys., vol.38, no.4B, pp.2630–2633, April 1999.
- [8] M. A. Khan, M. S. Shur, Q. C. Chen, and J. N. Kuznia, "Current/voltage characteristic collapse in AlGaIn/GaN heterostructure insulated gate field effect transistors at

high drain bias," Electron. Lett., vol.30, no.25, pp.2175–2176, Dec. 1994.

- [9] S. C. Binari, W. Kruppa, H. B. Dietrich, G. Kelner, A. E. Wickenden, and J. A. Freitas Jr., "Fabrication and characterization of GaN FETs," Solid-State Electron., vol.41, no.10, pp.1549–1554, 1997.
- [10] 国弘和明, 笠原健資, 高橋裕之, 大野泰夫, "マイクロ波高出力AlGaIn/GaN HJFETs," 信学技報, ED99-46, CPM99-20, SDM99-20, May 1999.
- [11] E. T. Yu, G. J. Sullivan, P. M. Asbeck, C. D. Wang, D. Qiao, and S. S. Lau, "Measurement of piezoelectrically induced charge in GaN/AlGaIn heterostructure field-effect transistors," Appl. Phys. Lett., vol.71, pp.2794–2796, Nov. 1997.
- [12] G. Y. Zhao, H. Ishikawa, T. Egawa, T. Jimbo, and M. Umeno, "High mobility AlGaIn/GaN heterostructures grown on sapphire by MOCVD," Jpn. J. Appl. Phys., vol.39, no.3A, pp.155–158, March 2000.

(平成11年11月12日受付)



江川 孝志 (正員)

昭55名工大・工・電子卒。昭57同大学院修士課程了。同年沖電気工業(株)入社。平3名工大学院博士後期課程了。工博。同年名工大助手。現在名工大極微構造デバイス研究センター教授。ヘテロエピタキシャル成長技術を用いたGaAs及びGaN系トランジスタ及び発光素子の研究と教育に従事。平3電気学会電気学術振興賞(進歩賞)及び小平記念賞, 平8レーザー研究業績賞「論文賞(解説部門)」受賞。電気学会, レーザー学会, 応用物理学会各会員。



石川 博康

平5芝浦工大・工・電子卒。平10名工大学院博士後期課程了。博士(工学)。同年名工大極微構造デバイス研究センター助手。窒化物半導体のヘテロエピタキシャル成長及びそのデバイスの研究と教育に従事。応用物理学会会員。



趙 廣元

昭57内蒙古大・理・物理卒。平3中国科学院修士課程了。平10名工大博士後期課程了。工博。同年名工大非常勤講師。GaNの結晶成長の研究に従事。応用物理学会会員。



神保 孝志 (正員)

昭45名大・工・電子卒。昭50同大大学院博士課程満退。工博。名大工助手・講師，名工大電気情報助教授・極微構造デバイス研究センター教授を経て平9名工大都市循環システム工学専攻教授。半導体デバイスの研究と教育に従事。赤外線検出器，太陽電池，レーザ，光電子集積回路，格子ミスマッチ系のヘテロエピタキシ等进行研究。平3電気学会電気学術振興賞（進歩賞）及び小平記念賞，平8レーザー学会レーザー研究業績賞「論文賞（解説部門）」受賞。電気学会，レーザー学会，応用物理学会，日本赤外線学会，日本物理学会各会員。



梅野 正義 (正員)

昭35名工大・工・電気卒。昭37東工大大学院修士課程了。工博。同年名大助手。昭53名工大工学部教授。平8～10同大学副学長。現在，名工大工学部教授，極微構造デバイス研究センター長（併任）。半導体結晶成長，太陽電池，レーザ，人工網膜の研究と教育に従事。昭42米沢賞，平3電気学会電気学術振興賞（進歩賞）及び小平記念賞，平8レーザー研究業績賞「論文賞（解説部門）」受賞。電気学会，レーザー学会，応用物理学会，日本赤外線学会，日本物理学会，日本ME学会，可視化情報学会，IEEE各会員。