AlGaIn/GaN ヘテロ構造の諸特性と高電子移動度トランジスター

非正員 石川博康 (名古屋工業大学)

正 員 江川孝志 (名古屋工業大学)

正 員 神保孝志 (名古屋工業大学)

Investigations on AlGaIn/GaN Hetero-Structures and High Electron Mobility Transistor

Hiroyasu Ishikawa, Non-member, Takashi Egawa, Member

and Takashi Jimbo, Member

(Nagoya Institute of Technology)

Properties of metalorganic-chemical-vapor-deposition-grown AlGaIn/GaN hetero-structures on sapphire substrates were studied by the Hall effect and atomic force microscopy. The effects of the Al composition and roughness of the surface on the two dimensional electron gas (2DEG) mobility were investigated. 2DEG mobility of undoped-Al_{0.11}Ga_{0.89}N/GaN heterostructure on sapphire was 1100 and 9260 cm²/V·s at 300K and 4.6 K, respectively. We also fabricated recessed gate and non-recessed gate AlGaIn/GaN high electron mobility transistors (HEMT). The recessed and non-recessed gate devices showed the maximum transconductance 146 and 93 mS/mm, and drain-source current 900 and 720 mA/mm, respectively. The recessed gate AlGaIn/GaN HEMT exhibited the very weak temperature dependence of the threshold voltage. Our results demonstrate significant performance improvement for AlGaIn/GaN HEMT by using recessed-gate.

キーワード: AlGaIn/GaN, 高電子移動度トランジスター (HEMT), 二次元電子ガス (2DEG), リセスゲート

Keywords: AlGaIn/GaN, high electron mobility transistor (HEMT), two-dimensional electron gas (2DEG), recessed gate

1. まえがき

紫外～緑色発光素子材料として知られているワイドバンドギャップ GaN 系半導体材料は、電子デバイス材料としても優れた物性を有し、近年、同系材料を用いた FET (電界効果トランジスター) の研究が活発に行われている。ワイドバンドギャップ GaN 系材料は、(1) バンドギャップが 3.4 eV と大きく、(2) 破壊電圧が 2×10^6 V/cm と大きく、(3) 飽和速度が 2.7×10^7 cm/s と比較的高く、(4) 大きな ΔE_c を持つ AlGaIn/GaN ヘテロ接合の作製が可能であり、ヘテロ界面に 2DEG (二次元電子ガス) が形成される。2DEG については、Khan 等により 1991 年に AlGaIn/GaN ヘテロ接合のホール移動度が低温で大きく向上していること、翌年には Shubnikov-de Haas 振動により 2DEG の存在の確認が報告され、同ヘテロ接合は AlGaAs/GaAs と同様に接合界面に二次元電子ガスが形成できることが示された^(1, 2)。

これは、GaN 系材料が MESFET (金属-半導体 FET) だけでなく HEMT (高電子移動度トランジスター) にまで応用でき、GaAs 系 FET の作製技術が III 族窒化物半導体にも応用できることを初めて示したものである。1994 年に Khan 等は HEMT の静特性を報告し、高周波特性としては電流利得遮断周波数 f_T 、最大発振周波数 f_{max} の値はそれぞれ 11 GHz、35 GHz であった^(3, 4)。

AlGaIn/GaN ヘテロ構造を利用した AlGaIn/GaN 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、AlGaIn 層へのショットキー障壁が高いことによる小さなゲートリークと優れた逆方向特性等の、高温・高周波パワー素子としての大きな利点を有している^(5, 6)。このため、GaAs 系 FET を越える、高温動作可能なマイクロ波帯域の高出力素子として活発な研究・開発が行われている。GaN 系 FET は、携帯電話に代表される L/S 帯 (1~4 GHz) 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 (12~18 GHz) から Ka

帯 (27~40 GHz) での衛星通信などへの応用分野が考えられる。未使用状態の高い周波数帯であるミリ波帯域 (30 GHz~300 GHz) を利用するためのミリ波用デバイスとしても有望である⁷⁾。

AlGaIn/GaN HEMT の高性能化には、(1) 2DEG の移動度向上と (2) 寄生抵抗の低減が必要である。(1) の点において、格子定数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⁸⁾。(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^{9, 10)}。文献 9, 10 によれば、リセスゲートを用いた GaN MESFET (ゲート長: 1.3 μm) では相互コンダクタンス 41 mS/mm、AlGaIn/GaN HEMT (ゲート長: 0.4 μm) では 45 mS/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持たないゲート長 2.1 μm の GaN MESFET で相互コンダクタンス 33 mS/mm が得られていることを考慮すると、文献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ない¹¹⁾。特に AlGaIn/GaN HEMT では 2DEG の移動度向上とソース抵抗の低減により更なる高性能化が期待できる。

本研究では、AlGaIn/GaN HEMT の高性能化を目的とし、有機金属気相成長(MOCVD)法を用いて AlGaIn/GaN ヘテロ構造を成長し、電気的特性と表面形態を調べた。また、リセスゲート及びノンリセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT を作製し、両者の比較を行った。作製したリセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT は、ノンリセスゲート構造と比べて高い相互コンダクタンスが得られ、リセスゲート構造の有用性が示された。また、高温特性を測定したところ、しきい値電圧の変動が極めて小さかった。

2. 実験方法

<2.1> AlGaIn/GaN ヘテロ構造の評価

本研究で用いた試料は、常圧 MOCVD 装置を用い、二段階成長法により 2 インチサファイア(0001)基板上に成長させたものである。III 族源として TMG (トリメチルガリウム)、TMA (トリメチルアルミニウム)、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 SiH_4 (モノシラン、水素希釈 10 ppm)、キャリアガスとして水素を使用した。サファイア基板を水素雰囲気中、

1100 $^{\circ}\text{C}$ 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 $^{\circ}\text{C}$ にて 30 nm 堆積した。緩衝層堆積後、1080 $^{\circ}\text{C}$ に昇温し、GaN と AlGaIn の成長を行った。

AlGaIn/GaN ヘテロ構造の電気的特性と表面形態を調べるための試料として、アンドープ GaN 層を 2 μm 成長後、アンドープ AlGaIn 層を 30 nm 堆積した。AlGaIn 層の Al 組成は、二結晶 X 線回折法により AlGaIn と GaN(0004)面のピーク差を測定し、ベガード則 (無歪み系の変化を仮定) から見積もった。AlGaIn/GaN の電気的特性評価として、van der Pauw 法によるホール効果測定を行った。また、電気的特性と表面形態との相関性を調べるため、AFM (原子間力顕微鏡) による表面観察を行った¹²⁾。

<2.2> AlGaIn/GaN HEMT の作製

AlGaIn/GaN HEMT 構造として、アンドープ GaN を 2.5 μm 成長後、アンドープ $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}$ スペーサ層、Si ドープ $\text{n}^+\text{-Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}$ キャリア供給層 ($\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) を 20 nm、Si ドープ $\text{n}^+\text{-GaN}$ コンタクト層 ($\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) を 20 nm 順次 MOCVD 法により成長した^{13, 14)}。

リセスゲート構造及びノンリセスゲート構造の違いとしては、 $\text{n}^+\text{-Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}$ キャリア供給層までは同じであるが、リセスゲート無しの構造ではトップ層として $\text{i-Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}$ が 5 nm 形成されており、リセスゲート有りの構造ではコンタクト層として $\text{n}^+\text{-GaN}$ が形成されている。フォトリソグラフィ技術と BCl_3 ガスを用いた RIE 装置 (パワー: 10 W、圧力: 3 Pa) を用いてエッチングを行い、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、 $\sim 6 \text{ nm/min}$ である。ドレイン電極及びソース電極として Ti/Al (20 nm/150 nm) 蒸着後、窒素雰囲気中にて 900 $^{\circ}\text{C}$ 、60 秒間アニールを行った。リセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT では、 BCl_3 ガスを用いた RIE 法 (10 W、3 Pa) により、幅 6 μm 及び深さ 30 nm のリセスエッチングを行った。RIE による損傷を回復するためのアニール処理等は行っていない。ゲート電極については、リセスゲート構造及びノンリセスゲート構造共に Pt/Ti/Au (10 nm/40 nm/100 nm) を用い、エッチングしたドレイン-ソース電極間に形成した。ゲート長及びゲート幅は 2.0~2.1 μm 、15 μm であり、ソース及びドレイン電極の間隔は 10 μm である。AlGaIn/GaN HEMT の静特性は、半導体パラメータアナライザーとカーブ・トレーサーを用いて測定し、容量-電圧 (C-V) 特性は 100 kHz で測定した。

3. 実験結果及び考察

<3・1> AlGa_N/Ga_N ヘテロ構造表面と電気的特性

サファイア基板上に成長した AlGa_N/Ga_N ヘテロ構造の AFM 像を図 1 に示す⁽¹²⁾。表面には粒界が観察され、Al 組成の増加に従い表面から観察した粒径が小さくなる傾向にあった。試料表面の peak to valley (P-V) 値は AlGa_N 層の厚さと同じオーダーであった。これより、AlGa_N 層は下地の Ga_N 層を完全には覆っていないものと考えられる。

図 2 に AlGa_N/Ga_N ヘテロ構造の 2DEG 移動度の Al 組成依存性を示す。測定温度は 300 K と 77 K である。300 K において、2DEG 移動度の Al 組成依存性は小さいが、Al 組成が 20 % 付近に移動度のピークが観察される。77 K においては、Al 組成の増加と共に 2DEG 移動度が減少する傾向にあった。図 1 に示したように、AlGa_N 層の被覆が不完全であると AlGa_N/Ga_N 界面の形成が不完全なものとなるため、界面の平坦性及び急峻性が重要な 2DEG の移動度に影響したものと思われる。

AlGa_N 層を 30 nm から 200 nm と厚くすることにより AlGa_N の被覆率の向上を試みたところ、Al_{0.11}Ga_{0.89}N の場合で、P-V 値は 22.9 nm から 3.18 nm へと一桁減少した。この Al_{0.11}Ga_{0.89}N (200 nm) /Ga_N ヘテロ構造試料のホール電子移動度及びシートキャリア密度の温度依存性を

図 1 AlGa_N (30 nm)/Ga_N (2 μm)ヘテロ構造の表面 AFM 像
Al 組成: (a) 11%, (b) 16%, (c) 19%, (d) 26%

Fig. 1 AFM images of the AlGa_N (30 nm)/Ga_N (2 μm) hetero-structures Al composition: (a) 11%, (b) 16%, (c) 19%, (d) 26%

図 3 に示す。内挿図は 4.2 K で測定した Shubnikov-de Haas 振動である。内挿図に示すように Shubnikov-de Haas 振動が明瞭に観察されており、2DEG の存在を確認することができた。通常バルクにおいてイオン化不純物散乱の影響が予測される 100 K 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。300 K における移動度は 1100 cm²/Vs という高い値であり、2DEG 特有の特性が現れている。測定温度が下がるに従い移動度は高くなり、4.6 K では 9260 cm²/Vs に達した。さらに最

図 2 300 K (黒丸)及び 77 K (白丸)における AlGa_N/Ga_N ヘテロ構造の 2DEG 移動度の Al 組成依存性

Fig. 2 2DEG mobility in AlGa_N/Ga_N hetero-structures with different Al composition, measured at 300 K (solid dots) and at 77 K (open circles).

図 3 Al_{0.11}Ga_{0.89}N/Ga_N ヘテロ構造の 2DEG 移動度及びシートキャリア密度の温度依存性
内挿図は 4.2 K において測定した、Shubnikov-de Haas 振動を示す。

Fig. 3 Temperature dependence of the 2DEG mobility and sheet carrier concentration of a Al_{0.11}Ga_{0.89}N/Ga_N hetero-structure The inset shows the Shubnikov-de Haas oscillations measured at 4.2 K.

適化した構造では 9 K で $12000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ が得られている⁽¹²⁾。シートキャリア濃度は測定温度が下がるに従い小さくなり、50 K 以下ではほぼ一定の値となり、キャリアの開じ込めが観察されている。50 K 以下のシートキャリア密度が実質的な二次元電子ガス密度であると思われる。実際、シバニコフ・ド・ハース振動から求めたシートキャリア密度はホール効果測定の結果と良く一致した。

<3・2> AlGaIn/GaN HEMT の諸特性

リセスゲート及びノンリセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT のドレイン-ソース電流 - ドレイン-ソース電圧 ($I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$) 静特性をそれぞれ図 4(a)及び(b)に示す。リセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT ではゲート-ソース電圧 (V_{GS}) を +1.5 ~ -6.5 V、ノンリセス構造では V_{GS} を +1.0 ~ -7.0 V 変化させて測定した。リセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT の相互コンダクタンス g_{m} の最高値

図 4 (a)リセスゲート構造及び(b)ノンリセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT の $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ 静特性

Fig. 4 $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ characteristics of (a) a recessed gate and (b) a non-recessed gate AlGaIn/GaN HEMT.

g_{mmax} と I_{DSmax} の最高値 I_{DSmax} はそれぞれ 146 mS/mm、900 mA/mm であった。しきい値電圧 V_{th} が約 -6.8 V においてピンチオフを示す変調特性を得た。エンドレジスタンス法により測定したソース抵抗 R_s は $6.1 \Omega\cdot\text{mm}$ であり、 g_{mmax} と R_s より真性 g_{mmax0} を求めると 1335 mS/mm という高い値であった。一方、比較のために作製したノンリセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT の g_{mmax} 及び I_{DSmax} はそれぞれ 93 mS/mm、720 mA/mm であった。ソース抵抗 R_s は $10.0 \Omega\cdot\text{mm}$ であり、 g_{mmax} と R_s より真性 g_{mmax0} を求めると 1329 mS/mm となり、両構造ともほぼ同じ値であった。よって、リセスゲート構造とすることでソース抵抗が低減され、 g_{mmax} が約 1.6 倍向上したと言える。 I_{DSmax} はリセス構造とすることで約 1.3 倍になっているが、その機構については不明である。リセス構造とすることで g_{mmax} 、 I_{DSmax} 共に向上することが見田等からも報告されている⁽¹⁵⁾。本研究で作製したリセスゲート構造 AlGaIn/GaN MODFET は $2.1 \mu\text{m}$ と比較的長いゲート長を持つにも関わらず、これより短いゲート長 $0.25 \mu\text{m}$ を持つ Burm らの同構造 HEMT の g_{mmax} 、 I_{DSmax} (それぞれ 45 mS/mm、135 mA/mm) より大きな値が得られている⁽¹⁰⁾。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。

<3・3> AlGaIn/GaN HEMT の高温特性

リセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT の g_{mmax} 及び I_{DSmax} の温度依存性を測定したところ、温度の増加とともに g_{mmax} が下がり、室温 (25 $^{\circ}\text{C}$) において 146 mS/mm であったのが 350 $^{\circ}\text{C}$ においては 62 mS/mm となった⁽¹⁴⁾。また I_{DSmax} も g_{mmax} と同様な温度依存性を示し、室温において 800 mA/mm であったのが 350 $^{\circ}\text{C}$ においては 340 mA/mm となった⁽¹⁴⁾。ホール効果測定から求めた AlGaIn/GaN ヘテロ構造の抵抗率の温度特性より、350 $^{\circ}\text{C}$ での抵抗率は移動度低下により室温の値の約二倍程度となる。よって、高温における g_{mmax} 及び I_{DSmax} の減少は抵抗率の増加によるものと推測される。

図 5 に V_{th} の温度依存性をゲート幅 15 μm 及び 200 μm の素子について GaN MESFET の結果と合わせて示す⁽¹⁴⁾。GaN MESFET の場合の V_{th} の変化は、25 $^{\circ}\text{C}$ で約 -12 V のものが 350 $^{\circ}\text{C}$ で約 -19 V と大きく負側に変化している。これに対して、AlGaIn/GaN HEMT では V_{th} は温度の上昇に関わらず、約 -7 V とその変化は非常に小さい。

V_{th} の温度依存性の違いを調べるため、室温 (27 $^{\circ}\text{C}$) と 300 $^{\circ}\text{C}$ において測定した GaN MESFET 及びリセスゲート

ト構造 AlGaIn/GaN HEMT のキャリアプロファイルをそれぞれ図 6(a)及び(b)に示す。キャリアプロファイルは容 C-V 法により求めた。GaN MESFET では、27 °C においてチャンネル層とアンドープ層の界面で明瞭に減少するが、300 °C では緩やかに減少している。一方、リセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT では、300 °C で測定したプロファイルは 27 °C で測定したものと比べるとスパイク状ピークの値が減少しているが、ピーク位置と形状はほぼ同じである。MESFET はチャンネル層の空乏層幅を変化させて電流変調特性を得ているが、HEMT では 2DEG 濃度を直接変化させている。GaN MESFET とリセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT で V_{th} の高温特性に違いが現れたのは、電流変調機構の違いから以下のように考察される。

- (1) GaN MESFET ではチャンネル層とアンドープ層のキャリアの変化が高温においては急峻でなくなり、実効的なチャンネル層幅が広がったために V_{th} が大きく変化した。
- (2) リセスゲート AlGaIn/GaN HEMT では 2DEG の位置に変化はなく、 V_{th} が変化しない。

AlGaIn/GaN HEMT でのキャリアプロファイルの温度依存性が小さい原因の一つには、ピエゾ電荷の影響が考えられる。

4. むすび

AlGaIn/GaN HEMT の高性能化を目的とし、MOCVD 法を用いて AlGaIn/GaN ヘテロ構造を成長し、電気的特性と表面形態を調べた。表面には多数のピットが観察され、Al 組成の増加に伴いピット数が増加していた。また、三次元的構造が観察され、Al 組成の増加に伴い三次元性が強まる傾向にあった。リセスゲート及びノンリセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT を作製し、両者の比較を行った。リセスゲート構造では g_{mmax} と I_{DSmax} はそれぞれ 146 mS/mm、900 mA/mm であった。ノンリセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT の g_{mmax} 及び I_{DSmax} はそれぞれ 93 mS/mm、720 mA/mm であった。これらの結果より、リセスゲート構造とすることで、 g_{mmax} と I_{DSmax} はそれぞれ約 1.6 倍及び約 1.3 倍となり、リセスゲート構造の有用性が示された。リセスゲート AlGaIn/GaN HEMT の高温特性を測定したところ、 V_{th} の変動が極めて小さかった。300 °C で測定したキャリアプロファイルは 27 °C で測定したものと比べるとピーク位置と形状はほぼ同じであり、 V_{th} の温度変化が非常に小さかったものと考えられる。

図 5 リセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT と GaN MESFET の V_{th} の温度依存性

Fig. 5 Temperature dependence of V_{th} for a recessed gate AlGaIn/GaN HEMT and a GaN MESFET.

図 6 GaN MESFET 及びリセスゲート構造 AlGaIn/GaN HEMT のキャリアプロファイル

Fig. 6 The carrier profiles in (a) a GaN MESFET and (b) a recessed gate AlGaIn/GaN HEMT.

謝 辞

本研究について多くの御助言、御指導を頂いた中部大学工学部電子工学科教授の梅野正義先生、Shubnikov-de Haas 振動の測定についてご協力頂いた日本酸素(株)の阿久津仲男氏に深く感謝いたします。

(平成 13 年 5 月 30 日受付, 平成 14 年 1 月 8 日再受付)

文 献

- (1) M. A. Khan, J. M. Van Hove, J. N. Kuznia and D. T. Olson: "High Electron Mobility GaN/Al_xGa_{1-x}N heterostructures grown by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition", Appl. Phys. Lett., **58**, 2408. (1991).
- (2) M. A. Khan, J. N. Kuznia, J. M. Van Hove, N. Pan and J. Carter: "Observation of a Two-Dimensional Electron Gas in Low Pressure Metalorganic Chemical Vapor Deposited GaN-Al_xGa_{1-x}N Heterojunctions", Appl. Phys. Lett., 3027 **60**, (1992).
- (3) M. A. Khan, Q. Chen, J. W. Yang, M. S. Shur, B. T. Dermott, and J. A. Higgins: "Microwave Operation of GaN/AlGaIn Doped Channel HFET's", IEEE Electron Device Lett., **17**, 325 (1996).
- (4) 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 μm Gate AlGaIn/GaN Heterostructure Field Effect Transistor", Appl. Phys. Lett., **65**, 1121 (1994).
- (5) 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 MODFET's for Ultrahigh Performance", IEEE Electron Device Lett., **19**, 50 (1998).
- (6) M. A. Khan, A. Bhattarai, J. N. Kunia and D. T. Olson: "High Electron Mobility Transistor Based on a GaN-Al_xGa_{1-x}N Heterojunction", Appl. Phys. Lett., **63**, 1214 (1993).
- (7) 郵政省平成 11 年版通信白書, 第 2 章.
- (8) J. M. Redwing, M. A. Tischler, J. S. Flynn, S. Elhamri, M. Ahoujja, R. S. Newrock, and W. C. Mitchell: "Two-Dimensional Electron Gas Properties of AlGaIn/GaN Heterostructures Grown on 6H-SiC and Sapphire Substrates", Appl. Phys. Lett., **69**, 963 (1996).
- (9) 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. **41**, 177 (1997).
- (10) J. Burm, W. J. Schaff, G. H. Matin, L. F. Eastman, H. Amano, and I. Akasaki: "Resessed Gate GaN MODFETs", Solid-State Electron., **41**, 247 (1997).
- (11) 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., **38**, 2630 (1999).

- (12) G. Y. Zhao, H. Ishikawa, T. Egawa, T. Jimbo and M. Umeno: "High-Mobility AlGaIn/GaN Heterostructures Grown on Sapphire by Metalorganic Chemical Vapor Deposition", Jpn. J. Appl. Phys., **39**, 155 (2000).
- (13) T. Egawa, H. Ishikawa, M. Umeno and T. Jimbo: "Recessed Gate AlGaIn/GaN Modulation-Doped Field-Effect Transistors on Sapphire", Appl. Phys. Lett., **76**, 121 (2000).
- (14) T. Egawa, G. Y. Zhao, H. Ishikawa, M. Umeno and T. Jimbo: "Characterization of Recessed Gate AlGaIn/GaN HEMTs on Sapphire", IEEE Trans. Electron. Dev., **48**, 603 (2001).
- (15) 見田充郎, 山田朋幸, 海部勝晶, 佐野芳明, 石川博康, 江川孝志, 梅野正義: "リセスゲートを有する高 gm AlGaIn/GaN HEMT", 第 61 回秋季応物講演予稿集 3pZQ-12, (2001).

石川 博康 (非正員) 1969 年 9 月 6 日生まれ。1998

年名古屋工業大学博士後期課程修了。博士(工学)。現在同大学極微構造デバイス研究センター助手。GaN 系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。

江川 孝志 (正員) 1956 年 8 月 4 日生まれ。1991 年

名古屋工業大学大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。現在同大学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。

神保 孝志 (正員) 1948 年 1 月 17 日生まれ。1975 年

名古屋大学大学院工学研究科博士課程満期退学。工学博士。現在名古屋工業大学大学院工学研究科都市循環システム工学専攻教授、同大学極微構造デバイス研究センター長(併任)。赤外線検出器、太陽電池、レーザー等の研究と教育に従事。