

# 耐環境素子としての GaN 電子デバイス

## Environmentally Hard GaN Electronic Devices for High Temperature, High Frequency, and High Power

吉田清輝\*  
Seikou Yoshida

鈴木 譲\*  
Jo Suzuki

概要 GaN系半導体はSiC, ダイヤモンドと同様ワイドバンドギャップ半導体材料でバンドギャップが大きいだけでなく融点が高く絶縁破壊電界も従来のSiやGaAsよりも大きいため, 高耐圧, 高周波, 高温動作のパワーデバイス用材料として期待されている。我々はこのGaNをガスソースMBE法により作成し, 高品質のGaNエピタキシャル膜を得ることができた。更にこのGaNを用いてMESFETを試作した。オーミック電極にAl/Ti系材料を用いゲート電極にPt系材料を用いた。その結果, 室温において熱処理なしで良好なFET特性が得られた。このFETの耐圧は80V以上である。加熱による耐久特性を電流-電圧測定より調べた結果, 400 °Cにおいて1000時間の長時間加熱後もFET特性が劣化せず安定に保持することが確認された。また400 °Cでの通電加熱試験を行った結果, FETの電流値は全く変化せず安定していることが確認された。更にn-p-n GaNバイポーラトランジスタを試作し, 300 °Cでの高温動作を確認した。GaN電子デバイスは過酷な環境温度においても安定に動作するため, 高温動作電子デバイスとして高い信頼性を有することが確認された。

### 1. はじめに

21世紀に向けてCO<sub>2</sub>の低減など環境対策を考えた, エネルギー開発が必要になってくる。即ち効率の良い電力生産及び省エネルギー対策が必要になってくる。例えば, 電力の省エネルギー化には電力変換に伴う損失の更なる低減が課題である。電力変換にはSi系のスイッチングデバイスが使われパワーデバイスの損失を減らすため, Siデバイスの集積度も十分に上がりSiのMOSFET等の動作時のオン抵抗は物性上の限界値に近づくところまで来ている。これに対しワイドバンドギャップ半導体であるSiC, GaN, AlN等のIII-V族窒化物半導体, ダイヤモンド等はバンドギャップが大きいだけでなく原子間の結合距離が小さく結合エネルギーが大きく更に融点が高く熱的・化学的に安定でハードエレクトロニクス材料として注目されている<sup>1)</sup>。ハードエレクトロニクス材料に適しているか否かを示す物性値として, バンドギャップのほかに, 絶縁破壊電界, 飽和ドリフト速度, 熱伝導度, 移動度, 誘電率等の物性値が挙げられる。これらの物性値を組み合わせたデバイスの性能指数 (figure of merit) が幾つか提案され<sup>2)-6)</sup>, GaN, SiC, ダイヤモンドはSiにくらべていずれも大きな性能指数をもつことが報告されている<sup>7)</sup>。

更にワイドバンドギャップ半導体は更にGaNのもう一つの特徴として動作時のオン抵抗が理想的にはSiよりも1桁以上小さくでき, パワー損失が少なく発熱の少ないスイッチングデバイ

ス及びインバータ等の冷却フリーの電力用パワーデバイスとして, Siでは実現しにくい性能を有するデバイスへの応用が期待されている。

高温動作デバイスの用途は, 高温用センサー, 自動車, 宇宙用ロケットエンジンの制御部, 原子力, 地下探査用測定器材等がある。高温動作の特徴は従来のデバイスが安定な動作を維持するために動作時の発熱を抑えるために大がかりな冷却装置を必要としたのに対し冷却設備を最小化又は冷却フリーで動作できるという大きな利点を持っている。GaNの電子デバイスの開発は最近になって, 米国を中心に高周波動作や高温動作等の報告がようやく活発に行われるようになった。

GaNの高温動作デバイスの報告例としてはMESFET (metal semiconductor field-effect transistor<sup>8)-10)</sup>, HFET (hetero-field effect transistor<sup>11)</sup>, MODFET (modulation-doped field effect transistor<sup>12)</sup>等があげられる。しかしながら, ほとんどが高温での静特性のみの報告でどのように測定したかは不明で更に, 300 °C以上の高温での通電動作の報告はなかった。

我々は, ガスソースMBE法により高品質GaNを作成し, GaN MESFET及びバイポーラトランジスタを試作した。その結果, 世界で初めてGaNFETの400 °Cでの通電加熱による高温での信頼特性及び300 °Cでの高温特性を調べたので報告する。

### 2. GSMBE による GaN 成長

GaNの成長にはガスソース分子線エピタキシャル成長法 (GSMBE)<sup>13)-14)</sup>を用いた。GSMBEの成長室には, III族ソースのGa, In, AlとドーパントとしてのSiの各Knudsenセル,

\* 研究開発本部 横浜研究所 次世代技術センター

窒素源としてのジメチルヒドラジン((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>NNH<sub>2</sub>, DMHy)<sup>15)</sup>、アンモニア(NH<sub>3</sub>)のガスノズルを備えている。また四重極質量分析計 QMS と表面の再構造状態を実時間で観察するための高速電子線回折(RHEED)装置が設置されている。

GaNバッファ層の形成には、アンモニアよりも分解しやすい材料のジメチルヒドラジンをを用いた。ジメチルヒドラジンで活性層を形成するとカーボン等の汚染による高抵抗化を防ぐため活性層のGaNの成長にはアンモニアを用いた<sup>16)~18)</sup>。基板とガスノズル等の装置構成を最適化することでアンモニアガスをクラッキングしなくても比較的速い成長速度(最大1.5 μm/h)が得られた。

つぎにGaNの成長について説明する。図1に示されるようにサファイア(0001)基板を用いGaNを形成した。まず950℃で30分間自然酸化膜除去を行った後、700℃に基板温度を下げてサファイア基板上に1~2層のGaを付けて表面をGaリッチ面とした後ジメチルヒドラジンとGaソースを同時供給してGaNバッファ層を50nmの厚さを有するバッファ層を基板全面に均一に形成した。その後温度を850℃まで上げてクラッキングしないアンモニアガスとGaを用いて厚いGaN膜の成長を行った。またn型GaNのドーパントとしてSiを用いた。

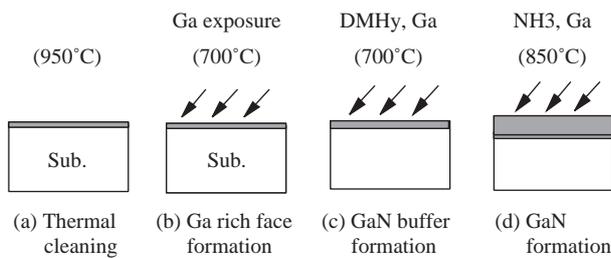


図1 GSMBEによるGaN形成プロセス  
GaN formation process using a GSMBE

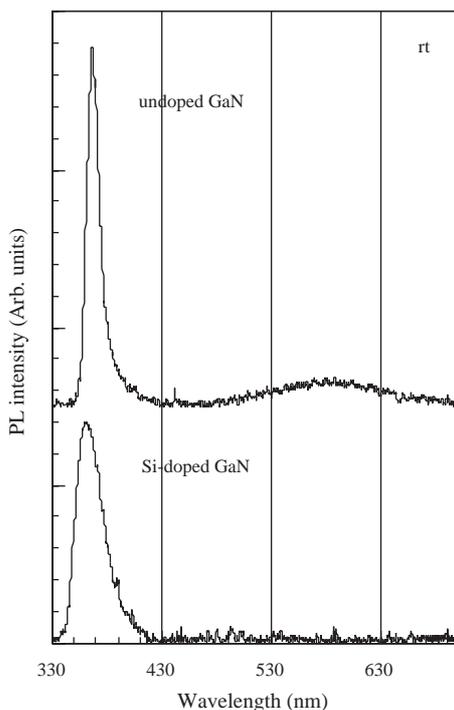


図2 アンドープGaNとSiドーブGaNのフォトルミネセンススペクトル  
Photoluminescence spectra of undoped and Si doped GaN at room temperature

### 3. GaN 結晶の特性

GSMBE法で作成したGaNの評価を行った。まずGaN結晶表面の観察を光学顕微鏡を用いて行った。すなわちノマルスキー顕微鏡で表面観察を行うとGaNの表面は非常に平坦であることが分かった。また得られた結晶の光学的特性を室温のフォトルミネセンス法で測定するとアンドープGaN結晶では図2に示すように365nm付近の強いバンド端発光と弱い580nm付近に深い順位のyellow luminescenceが観察された。SiドーブGaN結晶では580nm付近のバンド端発光のみ観察され深い順位の発光は観察されなかった。

Van der Pauw法により電気的な測定を行った。GaNの電気特性はGaNの結晶性と非常に強い相関があった。GaNの結晶性が良くないとキャリア濃度はn型で10<sup>19</sup>cm<sup>-3</sup>から10<sup>20</sup>cm<sup>-3</sup>と非常に高い値を示した。このような場合、結晶表面は荒れていてかつ結晶内部は多数の柱状構造をしていた。窒素vacancyに基づく欠陥がn型不純物として働くことがいわれている<sup>19)</sup>。またこのようなキャリアとなる欠陥の低減がアンドープ結晶に必要である。結晶成長条件を最適化して結晶性を高めていくとこの柱のセル数も少なくなり結晶表面もスムーズになった。その結果、結晶性の向上とともにキャリア濃度は下がりアンドープGaNサンプルでは最小値が7x10<sup>16</sup>cm<sup>-3</sup>と高純度化し移動度も300cm<sup>2</sup>/Vsecと良好な値を得た。

### 4. GaN MESFET 作成

つぎにGaN MESFETを作成した<sup>9), 20)</sup>。このときのFET構造を図3に示す。GaNバッファ層の上にアンドープGaNを1000nm形成しその上に絶縁のためのAlNを50nm形成した。最後に活性層のSiドーブGaNを200nm成長した。キャリア濃度は3x10<sup>17</sup>cm<sup>-3</sup>で移動200cm<sup>2</sup>/Vsecのものを用いた。FET作成プロセスを簡単に説明するとまず、GaNエピタキシャル膜上に絶縁膜としてSiO<sub>2</sub>膜を200nm成膜した。その後フォトレジスト等であらかじめパターンニングした後、CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Arの混合ガスを用いるECR(electron cyclotron resonance)plasmaエッチングによりGaNをエッチングした。このときのエッチングレートは14nm/minである。エッチング後のGaN表面はSEM(scanning electron microscope)観察からスムーズな面であることがわかった。つぎにソース・ドレインのオーミック電極材料としてAl/Ti系材料を蒸着した後、ショットキーゲート電極とし

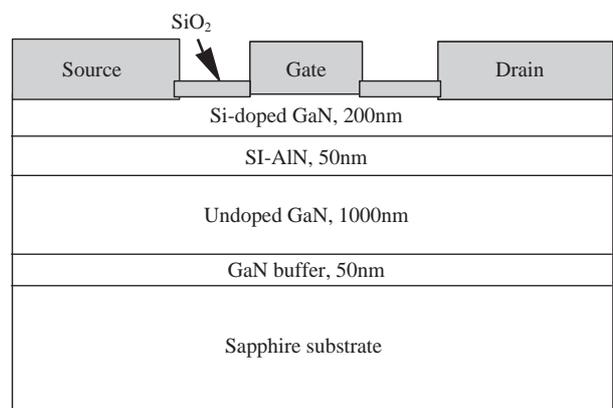


図3 GaN MESFETの構造  
Schematic structure of GaN MESFET

てPt系材料を蒸着しFETを作成した。ゲート長は2.5 μmでゲート幅は100 μmであった。

### 5. MESFETの特性評価

まずソース・ドレイン電極の電流電圧測定を熱処理なしの条件で行うと良好なオーミックコンタクトになっていることが確認された。コンタクト抵抗は $1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ であった。ゲート・ソース間のショットキー特性を調べるとやはり熱処理なしの条件で整流特性が得られた。逆方向の耐圧は80Vを越え十分大きい値を示した。容量-電圧(C-V)測定では、Ptゲートのパリアの高さは約1.0eVであることが分かった。室温でのFETの電流・電圧の静特性を図4に示す。安定した特性が得られた。相互コンダクタンスは最大25mS/mmと良好な値が得られた。また、ショットキー電極にタングステンを用いてもFET特性は得られた。

つぎに400 °Cでの加熱による耐久特性を調べた。測定方法は

電気炉の中に石英管を設置しこの中に窒素ガスを10 l/minでフローさせながら電気炉の温度を400 °Cの設定しこの中にGaNFETサンプルをむき出しの状態を設置した。所定時間ごとにサンプルを引き出し、電流電圧測定を行い、再度電気炉に直ちに挿入し所定時間ごとに繰り返しFETの特性を調べた。図5はゲート電圧 $V_{gs}=0V$ でドレイン・ソース間電圧 $V_{ds}=20V$ のときの相互コンダクタンスの経時変化を示す。1000時間加熱してもほとんど変化せず安定していることが確認された。

つぎに、400 °CでFETサンプルを直接加熱し更に連続的に電流をFETに流しながら、FET特性を調べた。すなわち、図6に示すような通電過熱装置を用いて高温での通電過熱試験を行った。サンプルは窒素ガス雰囲気中でむき出しの状態ステージに設置し、ヒータで直接過熱しながら、一定の電流・電圧をかけて400 °Cの経時変化を調べた。

図7にゲート電圧 $V_{gs}=0V$ で、ドレイン・ソース間電圧 $V_{ds}=20V$ のときのドレイン、ソース間の電流 $I_{ds}$ のエージングテストの結果を示す。300時間通電加熱を行ったが $I_{ds}$ が全く変化せず安定していることが確認された。図8は400 °Cで300時間加熱したときのFET特性を示す。室温で測定したときとほぼ同一の特性を示し高温動作による劣化がないことが確認された。またソース・ゲート間の耐圧は通電過熱時の電流-電圧測定から80V以上あり耐圧がほとんど劣化しないことが確認された。

更に、GaNFETの高温での電極の劣化の様子を調べる

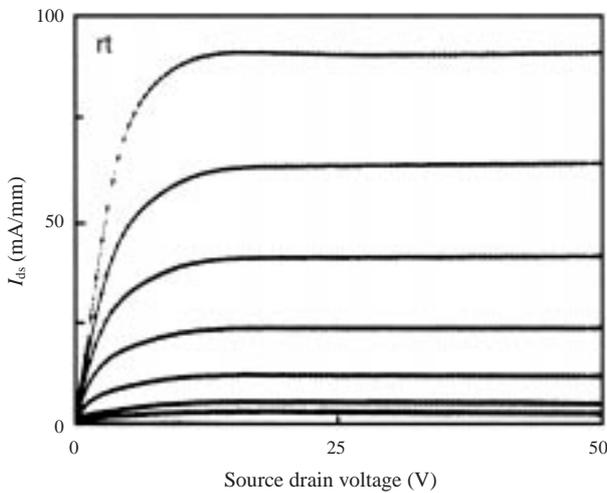


図4 室温におけるGaNFETの電流-電圧特性 (ゲート・ソース電圧 $V_{gs}$ を-1Vステップで0Vから-5V変えている)  
Current-voltage characteristics ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) of a GaN MESFET at room temperature (The gate voltages ( $V_{gs}$ ) was changed from 0 V to -5 V in steps of -1 V)

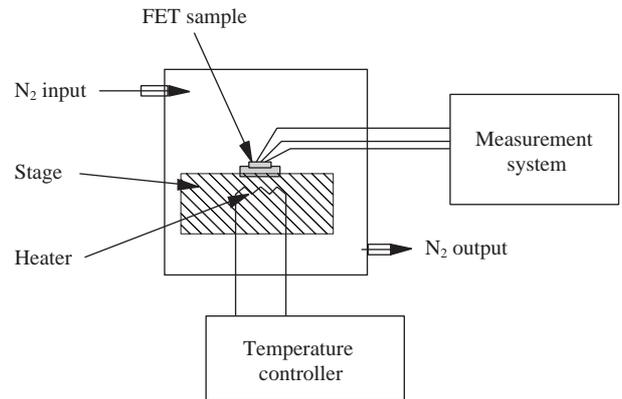


図6 FETの通電加熱装置  
Schematic drawing of heating setup of FET by continuous current injection

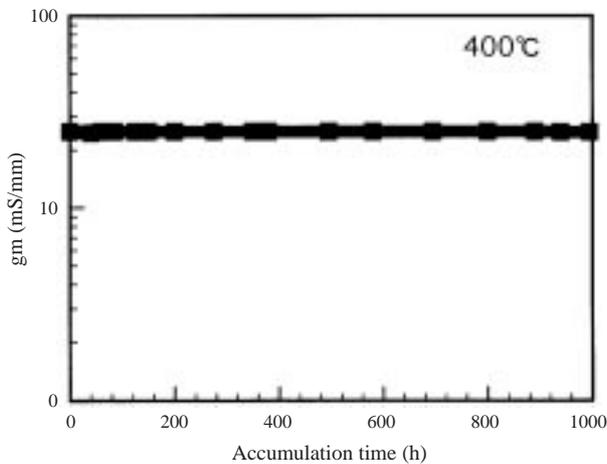


図5 400 °C加熱後のGaNFETの相互コンダクタンスgmの経時変化  
The time dependence of transconductance (gm) (mS/mm) at 400 °C

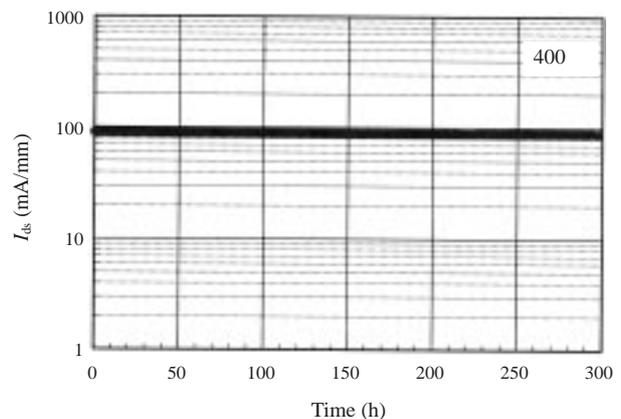


図7 400 °CでのGaNFETのソース・ドレイン電流のエージング特性  
Time dependence of  $I_{ds}$  of GaN MESFET during continuous-current injection at 400 °C

ために SIMS (secondary ion mass spectrometry) 分析を用いて検討した。GaN MESFET を 600 °C で 1 時間加熱したときのゲート電極と GaN エピタキシャル膜の界面付近の SIMS 分析の深さ方向のプロファイル調べた結果、電極材料及び半導体界面は非常に急峻で劣化していないことが確認された。これは、従来の Si や GaAs では実現できなかった新しい事実である。以上の結果より、GaN MESFET は高温動作デバイスとして優れていることが確認された。

### 6. バイポーラトランジスタの試作

npn 構造を有する GaN 多層膜を用いて GaN のバイポーラトランジスタを試作した。n のキャリア濃度は  $3 \sim 5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  で p 型のキャリア濃度は  $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  程度であった。バイポーラトランジスタの構造を図 9 に示す。このトランジスタ構造は上述の GaN MESFET の作成と同様に ECR プラズマエッチングによって作成した。ドライエッチング後の GaN の表面は比較的

平坦であった。つぎに電極形成を行った。n 型電極は MESFET の場合と同じく Al/Ti 系の電極材料を用いた。更に p 型電極には、Ni/Ti/Au 系の電極材料を用いた。室温と 300 °C に加熱したときの特性を示す。図 10 は室温におけるトランジスタの電流-電圧特性を示す。バイポーラトランジスタとしての特性を示している。GaN のバイポーラトランジスタの作成にはドライエッチングを用いたがエッチング時の GaN 表面がダメージを受けてトランジスタ動作しにくいと指摘されていた。特に、p 型 GaN の表面がダメージを受けると表面の p 型キャリアがダメージによって n 型化するといわれていたがそのような現象は我々の場合観察されなかった。これは我々のドライエッチングの条件が p 型 GaN のエッチング速度が 6nm/min と十分に遅くダメージが少なく結果として安定したバイポーラトランジスタの特性が得られたものと考えられる。更に、図 11 は 300 °C 加熱後のトランジ

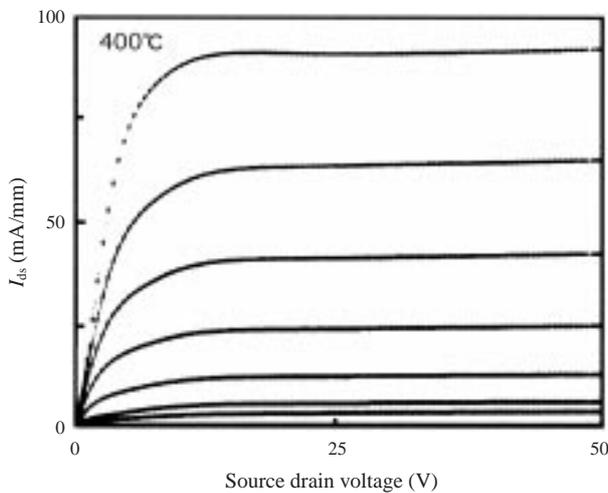


図 8 400 °C における GaN MESFET の電流 - 電圧特性 (ゲート・ソース電圧  $V_{gs}$  を -1V ステップで 0V から -5V 変えている) Current-voltage characteristics ( $I_{ds}$ - $V_{ds}$ ) of a GaN MESFET at 400 °C (The gate voltages ( $V_{gs}$ ) was changed from 0 V to -5 V in steps of -1 V)

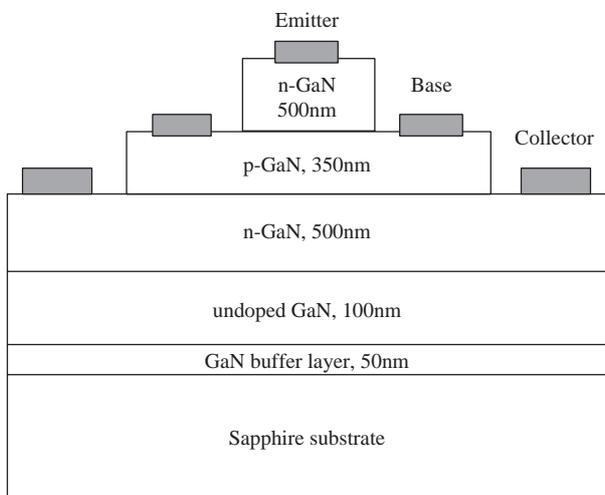


図 9 GaN の npn バイポーラトランジスタの構造 Schematic drawing of the structure of an n-p-n bipolar junction transistor using a GaN

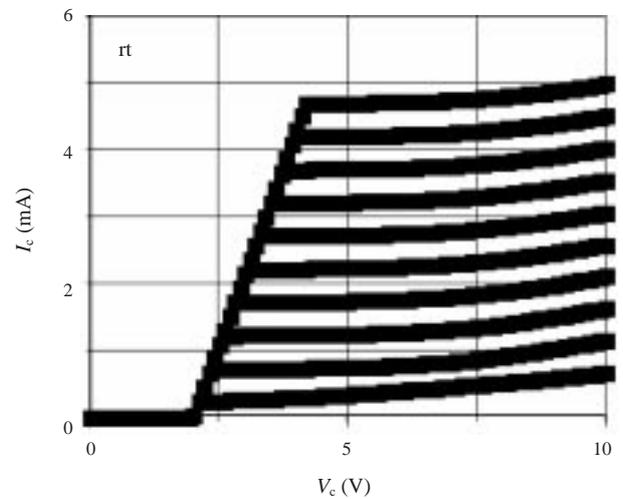


図 10 室温での npn バイポーラトランジスタのエミッタ接地における電流 - 電圧特性 Current ( $I_c$ ) - voltage ( $V_c$ ) characteristics, as measured in the common emitter mode, at room temperature (The base current ( $I_b$ ) was changed from 20  $\mu$  V in steps of 50  $\mu$  V)

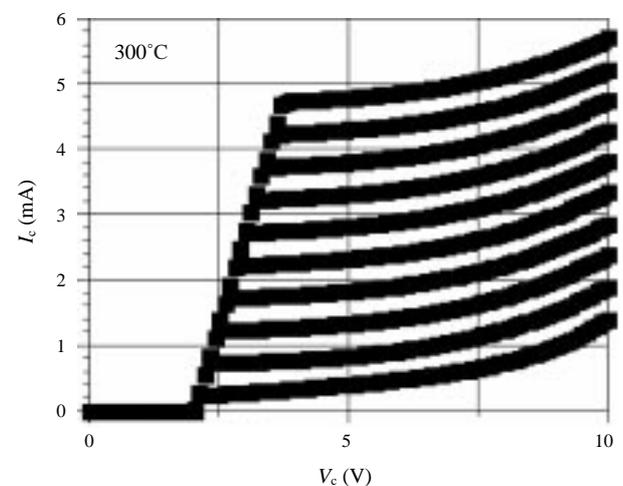


図 11 300 °C での npn バイポーラトランジスタのエミッタ接地における電流 - 電圧特性 Current ( $I_c$ ) - voltage ( $V_c$ ) characteristics as measured in the common emitter mode at 300 °C (The base current ( $I_b$ ) was changed from 20  $\mu$  V in steps of 50  $\mu$  V)

スタ高温特性を示す。加熱によって特性が若干変化したがトランジスタとして動作し続けることが確認された。電流利得  $h_{fe}=dI_c/dI_b$  は10程度である。バイポーラトランジスタの300℃加熱後の断面を透過電子顕微鏡 TEM 観察するとそれぞれの電極材料及びGaN層の界面は明確に分離されていて劣化していないことが確認された。GaNは高温動作のバイポーラトランジスタとしても有効であることがわかった。今後GaNの結晶性及びキャリア濃度を最適化するとバイポーラトランジスタの性能が更に高まることが期待できる。

## 7. おわりに

ガスソースMBE成長法による高品質のGaNエピタキシャル膜を作成し GaN MESFET を試作した。オーミック電極に Al/Ti系材料を用いゲート電極にPt系材料を用いた。その結果、良好なFET特性が得られた。このFETの耐圧は80V以上である。加熱による耐久特性を電流-電圧測定で調べた結果、400℃において1000時間の長時間加熱後もFET特性が劣化せず安定に保持することが確認された。更に400℃での通電加熱試験を行った結果、FETの電流値は全く変化せず安定していることが確認された。更にn-p-nバイポーラトランジスタを試作した。電流電圧測定からトランジスタ動作が確認された。更に、300℃での高温でも動作が確認された。このようにGaN電子デバイスは過酷な環境温度においても安定に動作するため、高温デバイスとして高い信頼性が有ることが確認された。

## 参考文献

- 1) 吉田貞史 : 電子通信情報学会誌 79, 1219 (1997).
- 2) E. O. Johnson : RCA Rev. 26, 163 (1965).
- 3) R. W. Keys: Proc. IEEE, 60, 225, (1972).
- 4) B. J. Baliga: IEEE Electron Device Lett.10, 455, (1989).
- 5) B. J. Baliga: J. Appl.Phys., 53, 1759, (1982).
- 6) K. Shenai, R. S. Scott, and B. J. Baliga : IEEE Trans. Electron Devices, 36, 1811,(1989).
- 7) T. P. Chow and R. Tyagi : IEEE Trans. Electron Devices, 41, 1481, (1994).
- 8) S. C. Binari, K. Doverspike, G. Kelner, H. B. Dietrich, and A. E. Wickenden : Solid State Electron. 41, 97 (1997).
- 9) S. Yoshida and J. Suzuki : Jpn. J.Appl. Phys. Lett.37, L482 (1998).
- 10) S. Yoshida and J. Suzuki : J. Appl. Phys.84, 2940 (1998).
- 11) M. A. Khan, M. S. Shur, J. N. Kuzunia, Q. Chin, J. Burm, and W. Schaff: Appl. Phys. Lett. 66, 1083 (1995).
- 12) A. Özgür, W. Kim, Z. Fan, A. Botchkarev, A. Salvador, S. N. Mohammad, B. Sverdlov, H. Morkoc : Electron. Lett. 31, 1389 (1995).
- 13) H. Okumura, S. Misawa, and S. Yoshida : Appl. Phys. Lett. 59, 1058 (1991) .
- 14) S. Yoshida, M.Sasaki, and H. Kawanishi : J. Cryst. Growth 136, 37 (1994).
- 15) S. Yoshida and M.Sasaki: Appl. Surf. Sci. 82/83, 28 (1995).
- 16) S. Yoshida : J. Appl. Phys. 81, 7966 (1997).
- 17) S. Yoshida : J. Cryst. Growth, 181 , 293 (1997).
- 18) S. Yoshida : J. Cryst. Growth , 191, 279 (1997).
- 19) S. Strite and H.Morkoc: J.Vac. Sci. Technol. B10, 1237 (1992).
- 20) S. Yoshida and J. Suzuki ,to be published in J. Appl. Phys.