ナイトライド系半導体の電子デバイス展開†

西 井 勝 則* 池 田 義 人** 正 戸 宏 幸**
松 野 年 伸** 井 上 薫**

Development of III – Nitride Based Electron Devices

by

Katsunori NISHII*, Yoshito IKEDA**, Hiroyuki MASATO**, Toshinobu MATSUNO** and Kaoru INOUE**

Wide band gap semiconductors such as III-V nitride materials and SiC have higher breakdown fields, higher electron saturation velocities and higher thermal conductivity than those of Si and GaAs. These attractive material properties are suitable for high power devices operating at high supply voltages. GaN-based electron devices are especially promising for high frequency operation because modulation-doped AlGaIn/GaN heterostructure with high electron mobility is available. Besides, the density of the two dimensional electron gases at the heterointerface is very high owing to the piezoelectric and spontaneous polarization effects. These heterostructures are grown on either sapphire or SiC substrates since no bulk GaN substrate is commercially available widely. For sapphire substrates, the thermal conductivity is relative low, which leads to the reduction of drain currents in the regions of high drain current and high drain voltages due to the self-heating effects. Thus the AlGaIn/GaN Heterostructure Field Effect Transistors (HFETs) grown on SiC substrates with high thermal conductivity are more suitable for high power device applications. This paper describes the improvements of process technologies and fabrication of the devices. The fabricated $0.3\mu\text{m}$ gate HFETs showed a maximum drain current of 740mA/mm , a peak transconductance of 150mS/mm and a breakdown voltage higher than 50V . The cut-off frequency f_T and maximum oscillation frequency f_{MAX} were 22GHz and 85GHz , respectively. The f_T and f_{MAX} were almost constant with the increase of drain voltage up to 30V . The output power of 1W/mm at 1.9GHz was obtained. And then frequency dispersion was not observed with the high voltage operation. These results indicate that AlGaIn/GaN HFETs grown on SiC substrates are quite suitable for high frequency microwave and millimeter-wave devices.

Key words: Wide band gap, AlGaIn/GaN heterostructure, Heterostructure field effect transistor, Power device, Breakdown voltage, Frequency dispersion

1 は じ め に

ワイドギャップ半導体である GaN 系半導体は、青紫色光デバイスの開発が牽引して急速に進歩してきた。また、GaN 系半導体は、Si や III – V 族化合物半導体と比較して 1 桁高い絶縁破壊電界強度、2 倍以上の電子飽和電子速度を有していることから、従来デバイスに比べて 1 桁以上高いパワー特性を実現できる電子デバイス材料として注目されている。

さらに、GaN 系半導体はヘテロ接合の形成が可能であり、AlGaIn/GaN 系ヘテロ構造では、界面に溜まる 2 次元電子ガスはピエゾ分極や自発分極の効果によって高い電子濃度が得られることや、高い電子移動度や飽和速度が得られることから、高周波電子デバイスとしても注目を浴びている。¹⁾

2 GaN の材料特性

Table I にワイドギャップ系半導体の材料物性を示す。GaN は、SiC と同等の絶縁破壊電界を示し、電子移動度が高いという特徴を有する。GaN はバルク結晶の入手が

困難なため、サファイア基板上や SiC 基板上にエピタキシャル成長させる必要があるが、AlGaIn/GaN ヘテロ構造を形成でき、2 次元電子ガスの高い移動度を利用した高速電子デバイスが形成できる利点がある。しかし、サファイア基板上に成長した場合、基板の熱伝導率が 0.3W/cmK と低いため高電流、高ドレイン電圧領域では、自己発熱によるドレイン電流の急激な低下が問題となる。^{2), 3)} したがって、パワーデバイス応用としては、SiC 基板上にエピタキシャル成長する方法が用いられている。⁴⁾

Fig. 1 に、電子速度の電界依存性を示す。⁵⁾ GaAs は低電界領域での移動度が大きいものの、 $2 \times 10^4\text{V/cm}$ を越える領域では Si よりも移動度が低くなる。一方、AlGaIn/GaN のヘテロ構造と SiC では、 $10^4 \sim 10^5\text{V/cm}$ の電界をかけて、Si や GaAs の 2 倍以上の電子速度を有しており、高周波領域のデバイス応用に有望であることがわかる。

今回、ナイトライド系半導体の電子デバイス展開を図るため、AlGaIn/GaN Heterostructure Field Effect Transistor (HFET) のプロセス・デバイス開発を行い、高周波電子

† 原稿受理 平成 12 年 7 月 10 日 Received July 10, 2000

* 正 会 員 松下電子半導体デバイス研究センター 〒569-1193 高槻市幸町, Semiconductor Device Research Center, Matsushita Electronics Corp., Saiwai-cho, Takatsuki, 569-1193

** 松下電子半導体デバイス研究センター 〒569-1193 高槻市幸町, Semiconductor Device Research Center, Matsushita Electronics Corp., Saiwai-cho, Takatsuki, 569-1193

Table I. Material properties of Si, GaAs, SiC and GaN.

	Units	Si	GaAs	4H-SiC	GaN/ <i>sapphire</i>	GaN/ <i>SiC</i>
Bandgap	eV	1.12	1.42	3.25	3.4	3.4
Dielectric Constant		11.9	12.5	10.0	9.5/10	9.5/10
Breakdown Field	V/cm	3×10^5	4×10^5	3.5×10^6	3.5×10^6	3.5×10^6
Saturation Velocity	cm/s	1×10^7	1×10^7	2×10^7	2.5×10^7	2.5×10^7
Electron Mobility	cm^2/Vs	1350	6000	800	1500	2000
Thermal Conductivity	W/cmK	1.5	0.46	4.9	0.3	4.9

Fig. 1. Relationship between electron velocity and electric field for Si, GaAs, SiC and AlGaIn/GaN system.

デバイスとしての可能性を検討した。

3 AlGaIn/GaN HFET

3.1 エピ構造

AlGaIn/GaN HFET に用いたエピ基板構造を Fig. 2 に示す。半絶縁性 6H-SiC 基板の上に、AlN 層 100nm, i-GaN 層 3 μm , i-AlGaIn 層 2nm, キャリア濃度 $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の n-AlGaIn 層 15nm, i-AlGaIn 層 3nm を成長した構造である。なお, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 層の Al 組成 x は全て 0.25 である。ホール測定の結果, 室温でのこの基板の電子移動度は $1360 \text{cm}^2/\text{Vs}$, シートキャリア濃度は $7 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ であった。

i - AlGaIn ($x=0.25$) 3nm
n - AlGaIn ($x=0.25$) Si: $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 15nm
i - AlGaIn ($x=0.25$) 2nm
i - GaN 3 μm
i - AlN 100nm
S.I. 6H-SiC Substrate 300 μm

Fig. 2. Schematic drawing of the AlGaIn/GaN heterostructure.

3.2 オーミック電極

n-GaN に対して Ti や Al はショットキー障壁高さが低く, オーミック電極として広く検討されている⁶⁾。我々は, Ti/Al 電極のオーミックシンターでの酸化を抑制するため, 水素雰囲気中でのシンターを検討した。実験には, 3.1 節で示したエビ構造のサンプルを用いた。Ti/Al 電極はリフトオフ法で形成し, 膜厚を 25/200nm とした。オーミックシンターは, カーボングラファイト製のホットプレート式シンター装置で, 一度真空中に排気後, 水素雰囲気中で行った。Fig. 3 は, オーミックコンタクト抵抗のオーミックシンター温度依存性を示したものである。オーミックシンターの評価は, TLM 法で行った。図より, コンタクト抵抗のシンター温度依存性は大きく, シンター温度が 550 $^{\circ}\text{C}$ で $7.2 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}^2$ の最小値が得られ, 温度をさらに上げると, コンタクト抵抗は高くなっていくことがわかる。

また, 電極表面のモロロジーは, Fig. 4 に示すように水素雰囲気中 (a) では 550 $^{\circ}\text{C}$ のシンターにおいても反応は起こらず良好であった。一方, 比較のために行ったアルゴン雰囲気中 (b) での 550 $^{\circ}\text{C}$ シンターでは図に示すように電極の一部で反応が観察され, コンタクト抵抗値も $1.2 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}^2$ と水素雰囲気中に比べて高い結果であった。

3.3 HFET 作製プロセス

Fig. 5 に AlGaIn/GaN HFET の断面構造図を示す。素子分離はメサ構造とし, メサエッチングは ECR ドライエ

Fig. 3. Relationship between contact resistivity and sintering temperature for ohmic electrodes.

(a) Hydrogen atmosphere (b) Argon atmosphere

Fig. 4. Surface micrographs of ohmic electrodes.

Fig. 5. Cross-sectional view of the AlGaIn/GaN HFET.

ッチングにより 250nm エッチングした、オーミック電極には 3・2 節で説明した Ti/Al を用いた。ゲート電極には、ショットキー障壁高さが高い Pd を用い、ゲート抵抗低減のために Pd/Ti/Au (100/50/200nm) の多層構造とした。また、高周波特性の向上のため電子ビーム露光法を用いて、0.3 μ m の T 型ゲート電極とした。Fig. 6 に、作製した 0.3 μ m T 型ゲート AlGaIn/GaN HFET のゲート電極部断面 SEM 写真を示す。ゲート長 (L_g)、ソースゲート間距離 (L_{gs})、ゲートドレイン間距離 (L_{gd}) は、それぞれ 0.9 μ m, 0.3 μ m, 1.8 μ m である。0.3 μ m の T 型ゲート電極が良好に形成できていることがわかる。

3・4 DC 特性

作製した 0.3 μ m ゲート AlGaIn/GaN HFET の I-V 特性を、Fig. 7 に示す。ドレイン電圧 (V_{ds}) を 20V まで印加しても良好な HFET 特性を示している。ピンチオフ特性も優れ、この HFET のしきい値電圧は約 -5V, 最大ドレイン電流 (I_{MAX}) は約 740mA/mm (@ $V_{gs} = +1.5V$, $V_{ds} = 15V$) と GaAs デバイスの約 2 倍の電流密度が得られた。

Fig. 6. Cross-sectional SEM view of the gate electrode region.

Fig. 7. Relationship between drain current (I_{ds}) and drain voltage (V_{ds}).

また、最大相互コンダクタンス (g_{mMAX}) は 150mS/mm で、ゲート・ドレイン間の逆耐圧 (BV_{gd}) は 50V 以上あった。

3・5 高周波特性

小信号 S パラメータから導出した電流利得 ($|h_{21}|$)・電力利得 (MSG/MAG) を Fig. 8 に示す。ゲート幅は 100 μ m である。電源電圧は 15V, ゲート電圧は -2.3V で測定した。電流利得遮断周波数 f_T , 最大発振周波数 f_{MAX} は、それぞれ 22.2GHz, 85.3GHz の特性が得られた。Fig. 9 に f_T , f_{MAX} の電源電圧 (V_{ds}) 依存性を示す。ゲート電圧は -2.3V と一定とした。ドレイン電圧 30V までほぼ一定の特性を示しており、AlGaIn/GaN HFET がマイクロ波・ミリ波デバイスとして高いポテンシャルを有していることがわかる。Fig. 10 にオンウエハによって行った、パワー評価の結果を示す。測定周波数は 1.9GHz, 電源電圧は 20V で測定した。パワー密度として 1W/mm 以上の特性が得られている。

次に大振幅動作における周波数分散の評価を行った。一般に周波数分散があると、高周波入力に対してドレイン電流が追従できなくなり、ドレイン電流の低下を引き起こし、その結果、出力パワーを十分引き出せない。そのため、大振幅動作における周波数分散を抑制することは極めて重要である。Fig. 11 に測定回路を示す。ドレイン電圧は 5V とし、入力信号として矩形波を用いて出

Fig. 8. Frequency dependence of small signal gain.

Fig. 9. Drain voltage (V_{ds}) dependence on Cut-off frequency (f_T) and maximum oscillation frequency (f_{MAX}).

Fig. 10. On wafer power measurement at 1.9GHz.

力波形をオシロスコープで観測することにより、ドレイン電流の時間応答を観測した。測定に用いた AlGaIn/GaN HFET のゲート幅は 1mm である。また、比較のためイオン注入による GaAs MESFET の評価も併せて行った。Fig. 12 に 10kHz で規格化した測定結果を示す。GaAs MESFET では顕著な周波数分散を示しているが、AlGaIn/GaN HFET では測定した 10Hz から 1MHz の広い周波数範囲でほぼ平坦であり、周波数分散は観測されなかった。このことは SiC 基板上に成長した AlGaIn/GaN HFET がパワーデバイスのような大振幅動作において、ドレイン電流の低下すなわち出力の低下を生じないことを示している。

Fig. 11. Measurement circuit of frequency dispersion.

Fig. 12. Frequency dispersion measurement for GaAs MESFET and AlGaIn/GaN HFET.

4 ま と め

熱伝導特性に優れる半絶縁性 SiC 基板上に成長した AlGaIn/GaN ヘテロ接合基板を用いた $0.3 \mu m$ T 型ゲート AlGaIn/GaN HFET を開発した。その結果、DC 特性で、最大ドレイン電流が 740mA/mm、最大相互コンダクタンスが 150mS/mm、ドレイン耐圧が 50V 以上の特性を得た。高周波評価の結果、 f_T および f_{MAX} がそれぞれ 22.2GHz、85.3GHz の特性を実現し、高い電源電圧においてもこれらの特性が維持されることを確認した。また、ゲート幅 $100 \mu m$ の AlGaIn/GaN HFET で 1.9GHz におけるパワー特性をオンウエハーで評価し、1W/mm 以上の出力を得た。さらに、SiC 基板上の AlGaIn/GaN HFET が、周波数分散を持たないことを確認した。

以上の結果より、SiC 基板上の AlGaIn/GaN HFET は、高周波電子デバイスとして非常に高いポテンシャルを有しており、結晶品質や放熱の観点からもマイクロ波・ミリ波帯のデバイスに極めて有望であるといえる。今後、プロセス技術が一層進歩することによりさらにナイトライド系電子デバイスの研究開発が加速されるものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) E. T. Yu, G. J. Sullivan, P. M. Asbeck, C. D. Wang, D. Qiao and S. S. Lau, Appl. Phys. Lett., **71**, 2795 (1997).
- 2) Y.-F. Wu, B. P. Keller, P. Fini, S. Keller, L. T. Keihas, S. P. Denbaars and U. K. Mishra, IEEE Electron Device Letters, **19**, 50 (1998).
- 3) G. J. Sullivan, M. Y. Chen, J.A.Higgins, J. W. Yang, Q. Chen, R. L. Pierson and B. T. McDermott, IEEE Electron Device Letters, **19**, 198 (1998).
- 4) S. T. Sheppard, K. Doverspike, W. L. Pribble, S. T. Allen, J. W. Palmour, L. T. Keihas and T. J. Jenkins, IEEE Electron Device Letters, **20**, 161 (1999).
- 5) R. J. Trew, M. W. Shin and V. Gatto, Proceedings of 1996 GaAs IC Symp., 6 (1996).
- 6) A. T. Pingt, Q. Chen, J. W. Yang, M. Asif. Khan and I. Adesida, Journal of Electronic Materials, **27**, 261 (1998).