Surface Passivation Effect of SiN for AlGaIn/GaN Hetero Structure

—Recovery of Thermal Damage—

Kenji Shiojima Member (NTT Photonics Laboratories, (present, University of Fukui))

Naoreru Shigekawa Member (NTT Photonics Laboratories)

Keywords : AlGaIn/GaN hetero structure, HEMT, SiN, surface passivation, thermal damage

An annealing study of the AlGaIn/GaN 2DEG structure for HEMTs with or without SiN surface passivation films was conducted with the AlGaIn layer thickness dependence taken into consideration. The epitaxial structure, which was grown on a two-inch (0001)-plane sapphire substrate by metal-organic chemical vapor deposition. The structure comprises a semi-insulating GaN layer (2 μm), an undoped-Al_{0.28}Ga_{0.72}N spacer layer. Two different AlGaIn thickness wafers were grown to be 14, 30 nm. The process flow is as follows, as shown in Fig. 1; 1st SiN deposition on the half of the wafers, annealing at 900°C for 10 min, SiN etching by HF solution, then 2nd SiN deposition on the entire wafers. Eddy current measurements were repeatedly conducted to characterize the sheet resistance nondestructively at the same point. As shown in Fig. 2, without SiN, the sheet resistance of the samples with thin AlGaIn layers

increased significantly upon annealing at 900°C. In contrast, samples with SiN were thermally stable after annealing at up to 900°C even when the AlGaIn layer was as thin as 14 nm. Even in the region where the sheet resistance had increased due to the annealing, depositing SiN recovered the sheet resistance to the original values.

Fig. 1. Experimental procedure of combination of Eddy current measurements, SiN deposition, and annealing

Fig. 2. Sheet resistance variations between among process stages

SiN 膜による AlGaIn/GaN ヘテロ構造の表面保護効果

——熱処理損傷の回復——

正 員 塩島 謙次^{*,**} 正 員 重川 直輝^{*}Surface Passivation Effect of SiN for AlGaIn/GaN Hetero Structure
——Recovery of Thermal Damage——Kenji Shiojima^{*,**}, Member, Naoruru Shigekawa^{*}, Member

An annealing study of the AlGaIn/GaN 2DEG structure for HEMTs with or without SiN surface passivation films was conducted with the AlGaIn layer thickness dependence taken into consideration. Without SiN, the sheet resistance of the samples with thin AlGaIn layers increased significantly upon annealing at 900°C. In contrast, samples with SiN were thermally stable after annealing at up to 900°C even when the AlGaIn layer was as thin as 14 nm. Even in the region where the sheet resistance had increased due to the annealing, depositing SiN recovered the sheet resistance to the original values.

キーワード : AlGaIn/GaN ヘテロ構造, HEMT, SiN, 表面保護膜, 熱処理損傷

Keywords : AlGaIn/GaN hetero structure, HEMT, SiN, surface passivation, thermal damage

1. はじめに

GaN は GaAs より高い絶縁破壊耐圧 ($>5 \times 10^6$ V/cm), 電子飽和速度 (2.5×10^7 cm/s) をもち, また, 優れた非弾性電子輸送特性 (大きな速度オーバーシュート効果) を高電界下 (>100 kV/cm) で示す⁽¹⁾. よって近年, GaN 系電界効果トランジスタ (FET) の研究開発が高温, 高出力, 高周波, 耐環境デバイスの実現に向け, 急速に加速している⁽²⁾⁽³⁾. 特に携帯電話基地局パワーアンプ応用では GaAs を凌ぐ特性が報告され, 実用化に至っている⁽⁴⁾.

一般に GaN 系電子デバイスは六方晶 c 面に結晶成長を行った基板を用いて作製されている。Al を混晶してヘテロ接合を形成し, 自己分極, ピエゾ分極効果を有効に利用した高濃度薄層チャネルを得ることができるという特徴がある。このため, 不純物ドーピング無しで, シートキャリア濃度 1×10^{13} cm⁻², 移動度 1000 cm²/Vs 程度の 2 次元電子ガス (2DEG) チャネルを形成することができる⁽⁵⁾。しかし, 分極効果によるキャリアの誘発は基板表面の電荷状態に敏感である。デバイス応用では FET のゲートとドレインの間で表面準位に電子が捕獲され, 直流特性と交流特性に差が

発生し, 出力電流が減少する電流コラプスという現象が発生する。よって, デバイス表面の保護膜, 表面状態の理解は重要な課題である。

我々はこれまでに熱処理が 2DEG チャネルの電気的特性に与える影響を評価してきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。有機金属化合物気相成長法 (MOCVD) により成長した AlGaIn/GaN 2DEG 構造を窒素雰囲気中で熱処理を行った結果, 結晶成長温度 (約 1000°C) より低い温度でチャネルのシート抵抗が増加した。このシート抵抗の増加は AlGaIn 層の膜厚が 20 nm 以下の場合に顕著であり, また基板の結晶性にも影響を受けることが分かった。実際のデバイスプロセスにおいてこの現象はオーミック電極形成時の高温熱処理 (～900°C) で発生し, FET 作製の歩留まり, 均一性に大きな影響を及ぼすことも報告した⁽⁸⁾。シート抵抗増加の抑制には熱処理前に SiN 表面保護膜を形成することが有効的であり, AlGaIn 厚さが 15.2 nm まで薄くても良好な熱的安定性を確認している⁽⁷⁾。

本論文では SiN の保護膜としての役割だけでなく, 基板表面の改質効果に着目した。熱処理によりシート抵抗が増加してしまった領域に SiN 膜を堆積し, 電気的特性をうず電流法によりマッピング評価した。AlGaIn 膜厚の異なる 2 種類のウエハーを用意し, 表面敏感性も検討した。

2. 実験方法

〈2・1〉 試料の作製 図 1 に実験に用いたウエハーの断面構造を示す。試料は 2 インチサファイア (0001) 基板上に MOCVD 法で半絶縁 GaN 層 (2 μm), アンドープ-

* NTT フォトニクス研究所
〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1
NTT Photonics Laboratories,
3-1, Morinosato WakamiyaAtsugi-shi, Kanagawa 243-0198
** 福井大学大学院 工学研究科(現所属)
〒910-8507 福井市文京 3-9-1
University of Fukui,
3-9-1 Bunkyo, Fukui 910-8507

Fig. 1. Schematic cross-section of the AlGaIn/GaN 2DEG structure.

Fig. 2. Experimental procedure of combination of Eddy current measurements, SiN deposition, and annealing.

AlGaIn 層の順で成長した。Al の組成は 28% である。AlGaIn 層の厚さは 14, 30 nm の 2 種類の試料を用意した。AlGaIn 厚は X 線測定により実測した。電子移動度は $1300\text{cm}^2/\text{Vs}$ である。

〈2・2〉 評価手順 2DEG 構造のシート抵抗の測定には渦電流法を用いた。渦電流法は電極の形成が不要な非破壊評価であり、プロセスを経るたびに同一地点のシート抵抗をマッピング測定することができる。2 インチウエハー面内で放射線状に 16 点の測定を行った。図 2 に実験手順を示す。アセトン、エタノール、塩酸の順で洗浄を行った後、2 インチウエハー面内でシート抵抗の初期値を測定した (as-grown)。次にウエハーの約半分の領域に SiN 膜を堆積し、SiN 保護膜有無の 2 つの条件を同一ウエハー内に形成した。SiN 膜はプラズマ CVD 法でアンモニアとシランを用いて堆積し、厚さは 100 nm である。再び渦電流測定を行った後、窒素雰囲気中で 900°C 、10 分間のランプアニールを行った。熱処理温度は Ti/Al オーミック、Al オーミック電極の典型的なシンター条件である温度を選んだ。渦電流測定後、SiN 膜をフッ酸により除去した。最後に先ほどと同じ条件で、ウエハー全面に SiN 膜を堆積した。

3. 結果と考察

図 3 に 2 インチウエハー面内でのシート抵抗の分布、図 4 に各状態での数値比較を行った結果を示す。as-grown 状態において、AlGaIn 厚さ 30 nm のウエハーは面内平均値 $488\ \Omega/\square$ 、標準偏差 $4.6\ \Omega/\square$ (0.9%) の良好な均一性を示している。我々の成長条件においては標準的な特性を示している。一方、AlGaIn 厚さ 14 nm ウエハーの面内平均値は $913\ \Omega/\square$ である。AlGaIn 膜厚が約半分に減少したため、2DEG チャネルのポテンシャルが増加し、シートキャリア濃度が減少したと考えられる。標準偏差は $198\ \Omega/\square$ (21%) であり、傾きをもった面内分布が観察される。成長炉の構造上、温度勾配をもつことが原因であると考えられる。しかし、AlGaIn 膜厚の均一性は X 線測定により 10% 以下であることから、このような大きな不均一性には表面準位等の別の原因も関与していると考えられる。図 4 より、両ウエハーで均一性に差があるものの、SiN を堆積する領域と堆積しない領域で、シート抵抗のばらつきは同程度であり、比較検討に支障がないと考えられる。

次に、ウエハーの半分の領域に SiN 膜を堆積した後の結果に移る。AlGaIn 厚さ 30 nm ウエハーではシート抵抗の変化が小さく、SiN 膜堆積領域 (図中のグレーで示した領域) で数 $\Omega/\square$ 、非堆積領域で $20\ \Omega/\square$ 程度の増加がみられた。面内均一性に変化はない。一方、AlGaIn 厚さ 14 nm ウエハーでは、堆積領域で $500\ \Omega/\square$ までシート抵抗が減少した。面内均一性も大幅に改善した。非堆積領域でも、面内ばらつきに僅かな減少がみられた。今回の実験結果と我々の過去の結果を比較して考察を加える。Si 変調ドープ AlGaIn/GaN 2DEG 構造 (Al 組成 25%、アンドープ AlGaIn/n-AlGaIn:Si ドーピング量 $1 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ /アンドープ AlGaIn/アンドープ GaN/サファイア基板) に今回と同じ条件で SiN 膜を堆積した⁽⁷⁾。トータル AlGaIn 膜厚は 20.7, 16.1, 15.2 nm の 3 種類であった。シート抵抗の初期値は $543\text{--}612\ \Omega/\square$ であった。SiN 膜堆積後、AlGaIn 膜厚 20.7 nm 試料で 1%, 16.1, 及び 15.2 nm

Fig. 3. Mapping results of sheet resistance over the 2-inch wafers using Eddy current method.

試料で 6% のシート抵抗の減少がみられた。AlGaIn 膜厚が厚くなるほど変化は少ない。今回の結果に比べ、SiN 堆積による減少傾向は同じであるが、変化量は小さい。この原因として、Si ドナーからのキャリア供給は表面状態の影響を受けにくいことが挙げられる。今回の試料はキャリアの供給を分極に依存しており、より表面敏感であるといえる。

900°C 熱処理後、AlGaIn 厚さ 30 nm ウエハー、及び 14 nm ウエハーの SiN 膜堆積領域では 10~30 Ω/□ 程度小さなシート抵抗の増加がみられた。SiN 膜の表面保護、及び厚膜 AlGaIn の効果が確認できた。これに対し、14 nm ウエハーの非堆積領域では 2 倍以上の増加、及び大きな面内ばらつきが観測された。このような大きな増加が起こった領域にゲート電極を形成しても、正常な FET 動作が得られないことが知られている⁽⁸⁾。よって、金属の堆積はシート抵抗の回復に寄与しないと考えられる。前出の参考文献(7)において、

(a) AlGaIn thickness = 14 nm.

(b) AlGaIn thickness = 30 nm.

Fig. 4. Sheet resistance variations between among process stages.

トータル AlGaIn 膜厚が 15.2 nm、熱処理条件 800°C、10 分間の場合、SiN 非堆積領域でのシート抵抗の増加は 32%であった。ここでも本実験の表面敏感な特性が現れていると考えられる。

SiN 除去後の結果は両試料共に変化はない。プラズマによる損傷が懸念されるドライエッチングではなく、フッ酸を用いたウェットエッチングを用いているため、表面状態の乱れは少ないと思われる。しかし、フッ酸による表面の洗浄効果（例えば自然酸化膜の除去）、及び表面が SiN と界面を形成している状態から大気へ変わる表面ポテンシャルの変化はシート抵抗に影響を与えないという結果となった。

引き続きウエハー全面に SiN 膜を堆積した後の測定結果に変化がみられた。AlGaIn 厚さ 30 nm のウエハーは面内平均値 (SiN 堆積、非堆積領域の結果を統合して計算) 502 Ω/□、

文 献

- (1) B. E. Foutz, L. F. Eastman, U. V. Bhapkar, and M. S. Shur : Appl. Phys. Lett., Vol.70, p.2849 (1997)
- (2) S. T. Sheppard, K. Doverspike, W. L. Pribble, S. T. Allen, J. W. Palmour, L. T. Kehias, and T. J. Jenkins : IEEE Electron Device. Lett., Vol.20, p.161 (1999)
- (3) B. J. Thibeault, B. P. Keller, Y.-F. Wu, P. Fini, U. K. Mishra, C. Nguyen, N. X. Nguyen, and M. Le: IEDM Tech. Dig., p.569 (1997)
- (4) T. Kikkawa, T. Maniwa, H. Hayashi, M. Kanamura, S. Yokokawa, M. Nishi, N. Adachi, M. Yokoyama, Y. Tateno, and K. Joshin : IEEE MTT-S Dig., p.1347 (2004)
- (5) Y.-F. Wu, B. P. Keller, S. Keller, D. Kapolnek, S. P. DenBaars, and U. K. Mishra : "Measured microwave power performance of AlGaIn/GaN MODFET", IEEE Electron Device Lett., Vol.17, pp.455-457 (1996)
- (6) K. Shiojima and N. Shigekawa : "Thermal Stability of Electrical Properties in AlGaIn/GaN Heterostructures", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.43, No.1, pp.100-105 (2004)
- (7) K. Shiojima, S. Sugitani, and N. Shigekawa : "Systematic study of thermal stability of AlGaIn/GaN two-dimensional electron gas structure with SiN surface passivation", IEICE Electronics Express, Vol.1, No.7, pp.160-164 (2004)
- (8) K. Shiojima, and N. Shigekawa : "Improved FET performance by suppression of sheet resistance increase in AlGaIn/GaN 2DEG structure", State-of-the-art Program on Compound Semiconductors (SOTAPOCS) XXXV in the 202nd Meeting of Electrochemical Society (ECS) in Salt Lake City, Oct. 22 (2002)

標準偏差 $4.8\Omega/\square$ (0.9%) である。初期値に比べ、平均値は $14\Omega/\square$ 増加しているが、均一性は良好な値を示している。一方、AlGaIn 厚さ 14 nm のウエハーは面内平均値 $595\Omega/\square$ 、標準偏差 $30\Omega/\square$ (5%) である。大幅なシート抵抗と均一性の改善が観測された。SiN 膜を堆積することにより、ウエハーの表面状態の均一化、及び熱処理損傷をほぼ完全に回復することができる。これらはデバイスプロセスに大きな影響を与える知見であると考えられる。

シート抵抗変化のメカニズムについて考察を加える。SiN 膜の堆積により、熱損傷を受けた表面が可逆的に回復することから、窒素原子の外方拡散や表面の窒化という不可逆過程は起こっていないと考えられる。また、この変化は AlGaIn 膜厚、およびドーピングの有無に依存することから、表面の電荷状態、ポテンシャルの変化が優位であると考えられる。しかし、熱処理でキャリアがほとんど消滅するだけのポテンシャル変化は FET 動作に置き換えれば数 V のゲート電圧変化に相当するため、分極効果自体にも表面の影響が及んでいるとも考えられる。SiN 膜堆積による損傷回復の素過程をみると、アンモニア中での基板の加熱、窒素プラズマの照射が表面の改質、例えば窒素リッチな表面への変化が行われている可能性がある。均一性が良いことから、表面ピニングの位置が一義的に決まる表面準位の形状が示唆される。SiN 堆積条件を変える等の更なる検討がメカニズム解明への課題である。

デバイスプロセスへの応用を考えると、熱損傷を回復させた表面にゲート電極を形成し、デバイス動作を確認することも課題として挙げられる。

4. ま と め

AlGaIn/GaN 2DEG 構造における、SiN 膜の基板表面改質効果を評価した。AlGaIn 厚さの異なる試料を用意し、部分的な SiN 膜堆積、 900°C 熱処理、SiN 膜除去、再 SiN 膜堆積を行い、各過程で、うず電流法を用いてシート抵抗のマッピング評価を行った。

SiN 保護膜を堆積していない領域では熱処理によりシート抵抗が増加し、その傾向は AlGaIn 厚さが薄いほど顕著であった。SiN 保護膜を堆積した領域は膜厚によらず、熱的に安定であった。熱損傷を受けてシート抵抗が 2 倍以上増加した領域でも、SiN 膜を堆積することによりシート抵抗値が回復し、均一性も向上することを見いだした。

(平成 19 年 10 月 9 日受付)

塩 島 謙 次

(正員) 1964 年 4 月 6 日生。1992 年 3 月東京都立大学大学院工学研究科博士課程修了。同年 4 月、NTT 入社。以後、GaAs MESFET の研究開発、GaN 結晶評価、電子デバイスの作製に従事。1997 年 4 月より 1998 年 4 月まで米国 Purdue 大学客員研究員。2001 年度徳島大学客員教授。2006 年 4 月より福井大学大学院工学研究科准教授。博士 (工学)。

重 川 直 輝

(正員) 1962 年 3 月 31 日生。1986 年 3 月東京大学大学院理学系研究科修士課程修了。1986 年 4 月 NTT 厚木電気通信研究所 (現フォトリクス研究所) 入社。化合物半導体ヘテロ構造中の輸送特性の研究に従事。博士 (理学)。