

AlN基板を用いたAlGaInチャンネル HEMTエピの開発

橋本 信*・秋田 勝史・田辺 達也
中幡 英章・竹田 健一郎・天野 浩

Epitaxial Layers of AlGaIn Channel High Electron Mobility Transistors on AlN Substrates — by Shin Hashimoto, Katsushi Akita, Tatsuya Tanabe, Hideaki Nakahata, Kenichiro Takeda and Hiroshi Amano — The epitaxial structures of aluminum gallium nitride (AlGaIn) channel high electron mobility transistors (HEMTs) were grown on sapphire and aluminum nitride (AlN) substrates. Reduction in the full width at half maximum of X-ray rocking curve for (10 $\bar{1}2$) peak of the AlGaIn channel layer, owing to the reduction of threading dislocation densities, resulted in a sharp decrease in the sheet resistance of 2-dimensional electron gas (2DEG). For AlGaIn channel HEMTs, it was found that improvement of the crystalline quality of AlGaIn channel layers was essential to the reduction of the sheet resistance of 2DEG. The use of AlN substrates improved the crystalline quality of the AlGaIn layer and lowered 2DEG resistance. These results suggested the high potential of AlN substrates for AlGaIn channel HEMTs.

Keywords: HEMT, AlN, AlGaIn, dislocation, AlGaIn channel HEMTs

1. 緒言

地球温暖化対策や、省エネルギーへの社会的要請、更には、機器の小型化・高性能化への要望からパワーデバイスの更なる特性の向上が求められている。しかしながら、既存のシリコン (Si) を用いたパワーデバイスでは、材料物性的にも、デバイス構造的にもその限界が近づいており、更なる特性の向上が困難となってきた。そこで、パワーデバイスの特性を大幅に向上させる方法として、窒化ガリウム (GaN) やシリコンカーバイド (SiC) 等のワイドギャップ半導体を使ったパワーデバイスの研究・開発が活発に行われている。

表1に主要なワイドギャップ半導体の物性定数を示す。GaNは、Siの約3倍の広いバンドギャップ (3.4eV)、Siの約10倍の高い絶縁破壊電界 (3.3MV/cm)、大きな飽和

電子速度 (2.7×10^7 cm/s) などの優れた物性を有しており、高周波パワーデバイスや、電力用パワーデバイスに適している。GaNの高周波パワーデバイスとしての優れた物性を活かすべく、無線通信応用、特に携帯電話の基地局への適用を目標とした研究開発が進められ⁽¹⁾、現在実用化されている。また、電力用パワーデバイスとしても、その応用についても研究・開発が行われている^{(2),(3)}。当社では、世界に先駆けて低転位^{*1}の自立GaN基板⁽⁴⁾を開発し、このGaN基板のGaNパワーデバイスへの応用を検討している。低転位のGaN基板を用いることによって、動作層の結晶品質を大幅に向上させることができ、GaN系半導体を用いたデバイスで優れたデバイス特性が実現できている^{(5)~(7)}。

その一方で、次世代の半導体に対する取り組みのひとつとして窒化アルミニウム (AlN) 基板の研究・開発も行ってきた。AlNは、GaNの約2倍の広いバンドギャップ (6.2eV)、GaNの約4倍の高い絶縁破壊電界 (12MV/cm)、さらにGaNの約1.5倍の良好な熱伝導率 (2.9W/cmK) 等の優れた物性を有している。そのため、AlNや、そのGaNとの混晶であるAlGaInのパワーデバイス用材料としてのポテンシャルは高い。例えば、AlGaInをチャンネルに用いた高電子移動度トランジスタ (HEMT)^{*2} (以下、「AlGaInチャンネルHEMT」と略す) では、通常のGaNをチャンネルに用いたHEMT (以下、「GaNチャンネルHEMT」と略す) に比べて、耐圧の大幅な向上が報告されている⁽⁸⁾。

当社では、昇華法を用いた高品質AlNの開発に取り組んでおり、大口径化に適した方法で良好な結晶品質を有する自立AlN基板を開発してきた^{(9),(10)}。また、高品質なAlN

表1 各種半導体材料の物性定数

項目	半導体材料			
	Si	4H-SiC	GaN	AlN
バンドギャップ E_g [eV]	1.1	3.3	3.4	6.2
電子移動度 μ_e [cm^2/Vs]	1,400	1,020	2,000	1,090
絶縁破壊電界強度 E_c [MV/cm]	0.3	3.0	3.3	12
熱伝導率 λ [W/cmK]	1.5	4.9	2.0	2.9
飽和電子速度 v_{sat} [10^7 cm/s]	1.0	2.0	2.7	2.2
バリガ性能指数 (高周波) : $\mu_e E_c^2$	1	73	180	1,250
バリガ性能指数 (低周波) : $\epsilon \mu_e E_c^3$	1	600	1,450	36,000

基板を用いることで、AlN層やAlGaIn層の高品質化、更にそれらを用いたデバイスの特性向上が期待できるため、AlN基板の応用に関する検討も行っている。今回、AlGaInチャンネルHEMTのエピタキシャル膜（以下、「エピ」と略す）において、AlN基板を用いることにより、AlGaIn層の結晶品質が向上し、HEMTエピの2次元電子ガスの特性を向上させることができた。すなわち、AlN基板の優位性を確認することができたことを報告する。

2. エピ成長と実験方法

AlN基板及びサファイア基板上に有機金属気相成長(MOVPE：Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy)法を用いてAlN、AlGaInのエピを成長した。原料には、アンモニア(NH₃)、トリメチルガリウム(TMGa)、トリメチルアルミニウム(TMAI)を用いた。AlN基板は、転位密度が $1 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ 未満のものを用いた。

図1に、作製したAlGaInチャンネルHEMTエピの構造を示す。AlN層を、基板の上に直接成長した後、Al組成が約30%のAlGaInチャンネル層(バッファ層)を成長し、その上にAl組成が約50%のAlGaInバリア層を成長した。ここで、サファイア基板上では、AlN層の厚みや成長条件を変えることで、AlN層の結晶品質を変化させた。AlGaInチャンネル層及びAlGaInバリア層は、AlN基板上及びサファイア基板上で同じ成長条件・膜厚等を用いた。

HEMTエピの結晶品質の評価として、高分解能X線回折装置を用いて、X線ロッキングカーブ(XRC：X-ray Rocking Curve)を測定した。さらにHEMTエピのシート抵抗^{*3}の評価として、渦電流を利用したシート抵抗測定装置を用いた。金(Au)を電極として用いた容量-電圧(C-V：Capacitance-Voltage)測定から、キャリア濃度プロファイルを求めた。また、エピ表面の平坦性の評価として原子間力顕微鏡(AFM：Atomic Force Microscope)を用いた。



図1 AlGaInチャンネルHEMTエピの構造

3. 実験結果及び考察

HEMTデバイスを作製するためには、HEMTエピに

1. チャンネル層とバリア層の界面に2次元電子ガスが形成されていること
2. チャンネル層の残留キャリア濃度が十分低いこと

が不可欠である。それらを確認するために、C-V測定を実施し、キャリア濃度プロファイルを求めた。図2に、サファイア基板上のAlGaInチャンネルHEMTエピのキャリア濃度プロファイルを示す。その挿図はエピの表面付近を拡大したものである。エピ構造はAl_{0.49}Ga_{0.51}N (25nm)/Al_{0.29}Ga_{0.71}N (600nm)/AlN (800nm)/サファイア基板である。図2の挿図のキャリア濃度プロファイルから明らかに、キャリア濃度の最大値が表面からおおよそ25nmの位置にあり、これは、バリア層とチャンネル層の界面の位置に一致している。チャンネル層の残留キャリア濃度は、 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 未満であり、また、AlGaIn/AlN界面及びAlN/サファイア界面のキャリア濃度は、 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 未満である。これらのことから、Al_{0.49}Ga_{0.51}N/Al_{0.29}Ga_{0.71}N界面に2次元電子ガスが存在し、また、チャンネル層の残留キャリア濃度も十分低いことが分かった。このことから、バリア層とチャンネル層の界面に形成された2次元電子ガスのみがHEMTエピのシート抵抗に寄与していることが分かった。キャリア濃度プロファイルの積分から求めたシートキャリア濃度は、 $8.6 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ であった。なお、この報告で用いた他の試料でも2次元電子ガスがバリア層とチャンネル層の界面のみに存在することをC-V測定を用いて確認した。

次に、AlGaInチャンネルHEMTエピにおける、2次元電子ガスの特性と結晶品質との関係を調べた。なお、結晶品質の評価として、HEMTエピのAlN層及びAlGaInチャンネル層の(0002)面及び(10 $\bar{1}$ 2)面のXRC測定を行った。図3に、AlGaInチャンネル層の(10 $\bar{1}$ 2)面のXRC半値幅と、シート抵抗の相関を示す。

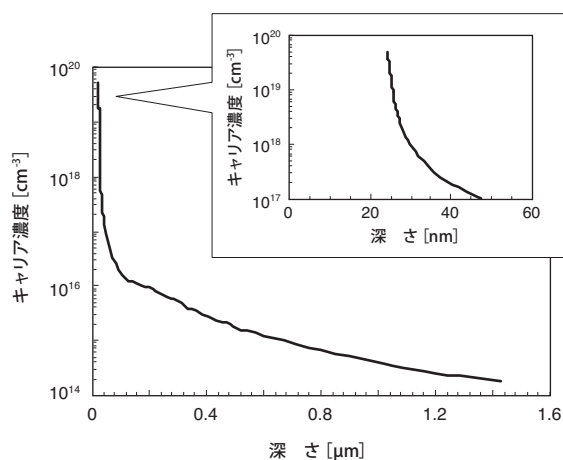


図2 AlGaInチャンネルHEMTエピのキャリア濃度プロファイル

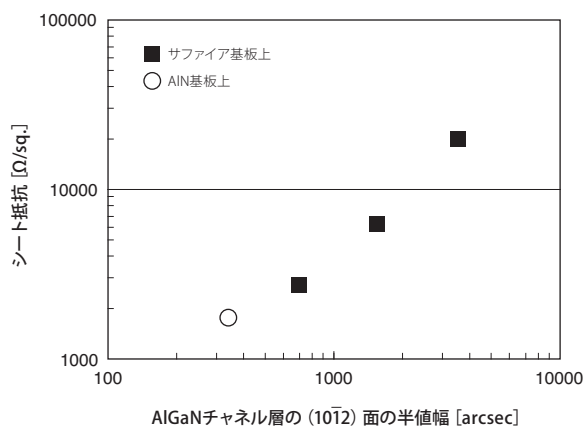


図3 AlGaInチャンネル層の(10 $\bar{1}2$)面の半値幅とシート抵抗の相関

図3に示す通り、サファイア基板上において、AlGaInチャンネル層の(10 $\bar{1}2$)面のXRC半値幅の低減に伴うシート抵抗の大幅な低減を確認した。更に低転位AlN基板上にAlGaInチャンネルHEMTエピを成長することで、AlGaInチャンネル層のXRC半値幅及びシート抵抗の更なる低減を確認した。なお、AlGaInチャンネル層の評価として、(0002)面と(10 $\bar{1}2$)面のXRC半値幅の測定を実施したが、(10 $\bar{1}2$)面のXRC半値幅の方が、シート抵抗との相関が強いことが分かった。螺旋転位は、(0002)面のXRC半値幅に影響を与え、刃状転位は(10 $\bar{1}2$)面のXRC半値幅に影響を与えることが知られている⁽¹¹⁾。よって、AlGaInチャンネルHEMTエピにおける、2次元電子ガスのシート抵抗は、主に刃状転位の影響を受けていると考えられる。

表2に、AlN基板上及びサファイア基板上に作製したAlGaInチャンネルHEMTエピの、AlN層及びAlGaInチャンネル層のXRC半値幅と、シート抵抗の典型的な値を示す。AlN基板上では、AlN層のXRC半値幅がサファイア基板上のものと比較して非常に小さく、AlGaInチャンネル層のXRC半値幅も小さくなっている。このことは、AlN基板上において高品質なAlN層が得られており、その上に成長することで高品質なAlGaInチャンネル層が得られている、ということを示している。その結果、AlN基板上のAlGaInチャンネルHEMTのシート抵抗は、サファイア基板上のものと比較して小さくなったと考えられる。この結果は、AlGaInチャンネルHEMTエピにおけるAlN基板の優位性を

表2 AlGaInチャンネルHEMTの、XRC半値幅とシート抵抗の典型的な値

	単 位	AlN基板上		サファイア基板上	
		(0002)	(10 $\bar{1}2$)	(0002)	(10 $\bar{1}2$)
AlN層のXRC半値幅	[arcsec]	37	92	449	742
AlGaInチャンネル層のXRC半値幅	[arcsec]	160	341	513	771
シート抵抗	[Ω/sq.]	1737		2754	

示すものである。

通常のGaInチャンネルHEMTの場合、 $10^8 \sim 10^{10} \text{cm}^{-2}$ の貫通転位が発生するにもかかわらず、一般的にSiC基板やサファイア基板、Si基板が用いられ、良好な特性が得られている。特にSi基板上のGaInチャンネルHEMTでは、GaInチャンネル層のXRC半値幅は1000arcsecより大きい、良好なシート抵抗等の特性が報告されている⁽¹²⁾。また、理論的にも2次元電子ガスの移動度に対する転位の影響が十分小さいことが示されている^{(13)、(14)}。これとは異なり、AlGaInチャンネルHEMTの場合、2次元電子ガスのシート抵抗の低減のためには、AlGaInチャンネル層の転位の低減が不可欠であることを今回明らかにした。

上記の結果に関して、より詳細な議論を行うために、C-V測定から求めたシートキャリア濃度及びシート抵抗から、2次元電子ガスの移動度を計算した。図4に、サファイア基板上のAlGaInチャンネル層の(10 $\bar{1}2$)面のXRC半値幅に対する移動度、シートキャリア濃度の依存性を示す。図4より、AlGaInチャンネル層のXRC半値幅の増大に伴い、移動度だけでなく、シートキャリア濃度も大幅に低下していることが分かる。すなわち、AlGaInチャンネルHEMTの場合、移動度だけでなくシートキャリア濃度も、AlGaInチャンネル層の転位密度に依存している、ということを示している。

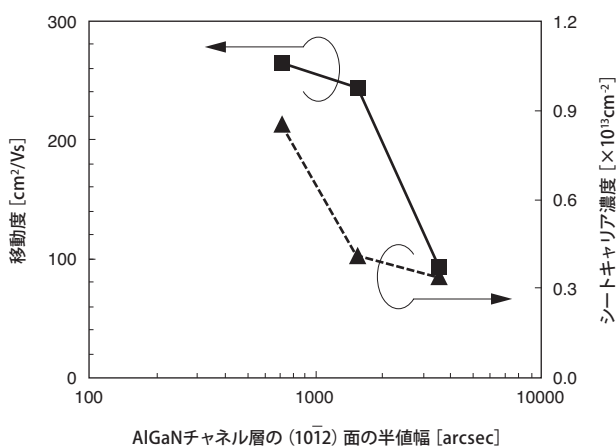


図4 AlGaInチャンネル層の(10 $\bar{1}2$)面の半値幅と移動度及びシートキャリア濃度

これらの結果に関して、以下のように考察した。一般的にAlGaInは、GaInに比べ、表面平坦性の良好なエピ成長が困難である。そのため、AlGaInチャンネル層をエピ成長する場合、XRC半値幅が増加、すなわち転位密度が増加したとき、転位を起因としたVピット*⁴等による表面の荒れも大きくなり、AlGaInチャンネル層のエピ表面の平坦性も悪化すると考えられる。そのような表面平坦性の悪化したAlGaIn

チャンネル層の上に、AlGaIn バリア層を成長する場合、

1. AlGaIn バリア層の歪みが緩和されるため、 piezo 分極^{*5}が小さくなり、シートキャリア濃度が低下する
2. バリア層とチャンネル層の界面の急峻性の悪化により、キャリアの散乱が大きくなり、移動度が低下する

と考えている。このため、AlGaIn チャンネル HEMT の場合、転位密度に対して、移動度や、シートキャリア濃度、シート抵抗が大きく影響を受けたと考えている。

図 5 にサファイア基板上及び AlN 基板上の AlGaIn チャンネル HEMT エピの表面 AFM 像を示す。いずれの試料でも良好なステップフロー成長が実現している。しかしながら、サファイア基板上の HEMT エピでは、ステップがうねっており、数多くの V ピットが発生することで表面平坦性が悪化し、表面粗さを表す RMS 値も 0.50nm となっている。一方 AlN 基板上では、ステップが規則正しく並んでおり、V ピット等も見られず、良好な表面平坦性が実現しており、RMS = 0.12nm と優れた値が得られている。この AFM 観察の結果は、上記の考察を支持する結果であり、AlGaIn チャンネル HEMT エピにおける、AlN 基板の有用性を示す結果の一つである。

これらの実験結果より、AlGaIn チャンネル HEMT エピでは、2次元電子ガスのシート抵抗の低減のために、高品質な AlGaIn チャンネル層を得ることが必要不可欠である、ということが明らかとなった。更に、低転位 AlN 基板を用いることは高品質な AlGaIn 層を得るために非常に有力な手段である、ということを示すことができた。

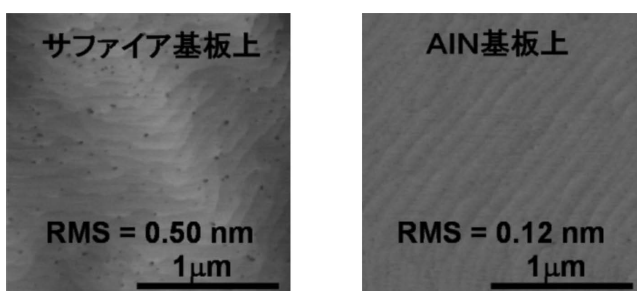


図 5 サファイア基板及び AlN 基板上の AlGaIn チャンネル HEMT エピの表面 AFM 像

4. 結 言

AlN 基板上に AlGaIn チャンネル HEMT エピ構造を作製し、サファイア基板上と比較した。サファイア基板上では、AlGaIn チャンネル層の (10 $\bar{1}$ 2) 面の XRC 半値幅の低減に伴い、2次元電子ガスのシート抵抗が低減した。AlN 基板上では、AlGaIn チャンネル層の結晶品質が、サファイア基板上

に比べて更に向上するとともに 2次元電子ガスのシート抵抗も低減し、AlGaIn チャンネル HEMT における AlN 基板の優位性を確認できた。このことは、AlGaIn チャンネル HEMT の場合、AlGaIn チャンネル層の結晶品質の改善は、2次元電子ガスの特性の向上に有効であることを示している。

5. 謝 辞

本研究は「NEDO ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術の開発-窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発プロジェクト」の委託を受けて行われた。

用語集

※1 転位

結晶中に含まれる結晶欠陥のひとつで、結晶格子の原子配列のずれが線状になっている結晶欠陥のこと。

※2 高電子移動度トランジスタ (HEMT)

半導体ヘテロ接合に誘起された高移動度の 2次元電子ガスを、チャンネルとして用いた電界効果トランジスタのこと。窒化物半導体の場合、2次元電子ガスは piezo 分極及び自発分極^{*6}により誘起される。

※3 2次元電子ガスのシート抵抗

2次元電子ガスにより形成されたチャンネルの抵抗 (電流の流れにくさ) のこと。シート抵抗が小さいほど、電流が流れやすい。2次元電子ガスのシート抵抗は、2次元電子ガス濃度と、その移動度に反比例する。

※4 V ピット

エピ表面にできる欠陥のひとつで、V 型の窪み (ピット) のこと。V ピットは、転位を起源として発生する。

※5 piezo 分極

圧力・歪みにより、結晶格子が歪むことで発生する分極のこと。

※6 自発分極

結晶構造等により、自発的に発生する分極のこと。

参考文献

- (1) K. Joshin, T. Kikkawa, H. Hayashi, T. Maniwa, S. Yokokawa, M. Yokoyama, N. Adachi, and M. Takikawa, "A 174W High-Efficiency GaN HEMT Power Amplifier for WCDMA Base Station Applications", 2003 IEDM Tec. Digest. (2003) 983
- (2) Z. Bandic, P. M. Bridger, E. C. Piqette, T. C. McGill, R. P. Vaudo, V. M. Phanse, and J. M. Redwing, "High voltage (450V) GaN Schottky rectifiers", Appl. Phys. Lett. 74 (1999) 1266
- (3) P. Zhang, J. W. Johnson, B. Luo, F. Ren, S. J. Pearton, S. S. Park, Y. J. Park, J. -I. Chyi, "Vertical and lateral GaN rectifiers on free-standing GaN substrates", Appl. Phys. Lett. 79 (2001) 1555
- (4) Kensaku Motoki, Takuji Okahisa, Naoki Matsumoto, Masato Matsushima, Hiroya Kimura, Hitoshi Kasai, Kikuro Takemoto, Koji Uematsu, Tetsuya Hirano, Masahiro Nakayama, Seiji Nakahata, Masaki Ueno, Daijirou Hara, Yoshinao Kumagai, Akinori Koukita, Hisashi Seki, "Preparation of Large Freestanding GaN Substrates by Hydride Vapor Phase Epitaxy Using GaAs as a Starting Substrate", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 40 (2001) L140.
- (5) 田辺達也、橋本信、善積祐介、木山誠、「GaN基板上GaNエピタキシャル成長とパワーデバイスへの応用」、SEIテクニカルレビュー、第170号、p.p. 34-39 (2007)
- (6) 堀井拓、宮崎富仁、斎藤雄、橋本信、田辺達也、木山誠、「GaN基板上縦型SBDのFP構造による高耐圧化」、SEIテクニカルレビュー、第174号、p.p. 77-80 (2009)
- (7) Masaya Okada, Yu Saitoh, Mitsunori Yokoyama, Ken Nakata, Seiji Yaegassi, Koji Katayama, Masaki Ueno, Makoto Kiyama, Tsukuru Katsuyama, Takao Nakamura, "Novel Vertical Heterojunction Field-Effect Transistors with Re-grown AlGaIn/GaN Two-Dimensional Electron Gas Channels on GaN Substrates", Appl. Phys. Express 3 (2010) 054201
- (8) T. Nanjo, M. Takeuchi, M. Suita, T. Oishi, Y. Abe, Y. Tokuda, and Y. Aoyagi, "Remarkable breakdown voltage enhancement in AlGaIn channel high electron mobility transistors", Appl. Phys. Lett. 92 (2008) 263502
- (9) M. Tanaka, S. Nakahata, K. Sogabe, H. Nakahata and M. Tobioka, "Morphology and X-ray diffraction peak widths of Aluminum Nitride single crystals prepared by the sublimation method", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 36 (1997) L1062
- (10) 宮永倫正、水原奈保、藤原伸介、嶋津充、中幡英章、「昇華法によるAlN単結晶成長」、SEIテクニカルレビュー、第168号、p.p. 103-106 (2006)
- (11) A. Usui, H. Sunakawa, K. Kobayashi, J. Watanabe, and M. Mizuta, "Characteristics of FEEL- GaN grown by Hydride vapor phase epitaxy", MRS Symp. Proc., 482, (2001) G5.6.1
- (12) S. Kato, Y. Satoh, H. Sasaki, I. Masayuki, and S. Yoshida, "C-doped GaN buffer layers with high breakdown voltages for high-power operation AlGaIn/GaN HFETs on 4-in Si substrates by MOVPE", J. Crystal Growth 298 (2007) 831
- (13) Debdeep Jena, Arthur C. Gossard, Umesh K. Mishra, "Dislocation scattering in a two-dimensional electron gas", Appl. Phys. Lett. 76 (2000) 1707
- (14) Debdeep Jena and U. K. Mishra, "Effect of scattering by strain fields surrounding edge dislocations on electron transport in two-dimensional electron gases", Appl. Phys. Lett. 80 (2002) 64

執筆者

橋本 信* : 半導体技術研究所 結晶技術研究部
窒化物半導体の研究開発に従事



秋田 勝史 : 半導体技術研究所 結晶技術研究部 グループ長
博士 (工学)

田辺 達也 : 半導体技術研究所 主幹

中幡 英章 : 半導体技術研究所 結晶技術研究部 部長 博士 (工学)

竹田健一郎 : 名城大学 大学院理工学研究科
電気電子・情報・材料工学専攻

天野 浩 : 名古屋大学 大学院工学研究科
電子情報システム専攻 教授 工学博士

* 主執筆者