

機関番号：14603

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21860060

研究課題名（和文）

同一ポリタイプ 4H-AlN/4H-SiC ヘテロ界面の電子デバイス応用に関する研究

研究課題名（英文）

Study on isopolytypic 4H-AlN/4H-SiC hetero-interface for electronic device applications

研究代表者

堀田 昌宏 (HORITA MASAHIRO)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・助教

研究者番号：50549988

研究成果の概要（和文）：4H-AlN/4H-SiC(11-20)ヘテロ界面物性の解明を目的として、ヘテロジャンクション電界効果トランジスタ(HFET)およびヘテロジャンクションを有するホール効果測定素子の作製を行った。SiC エピタキシャル成長やイオン注入など、SiC に関するプロセスは問題なく進めることができたが、AlN のエピタキシャル成長およびその後のプロセスにおいて課題が残り、最終的にデバイスを完成させることができなかった。今後、これらの課題を解決し、デバイスを完成させるとともに、デバイスの電気的特性評価を行うことで、界面物性の解明することを引き続き目指す。

研究成果の概要（英文）：To investigate the properties of 4H-AlN/4H-SiC (11-20) heterojunction, heterojunction field-effect transistors (HFET) and Hall devices with the heterojunction were fabricated. In the fabrication process for these devices, SiC related processes, that is, epitaxial growth of SiC and ion implantation to SiC were completed. However, there still remain several challenges in epitaxial growth of AlN and post AlN growth process, resulting that the device fabrication is incomplete. We will try to resolve the challenges and complete the devices. We believe that characterization of these devices lead to clarification of the heterojunction properties.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010 年度	980,000	294,000	1,274,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,060,000	618,000	2,678,000

研究分野：半導体工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：ヘテロ接合デバイス，炭化ケイ素(SiC)，窒化アルミニウム(AlN)，結晶成長

1. 研究開始当初の背景

電気エネルギーを扱う半導体デバイスには高速・大容量・低損失であることが求められている。現在、半導体デバイスとしては主に Si や GaAs が用いられているが、これら

の材料は物性値から決まる物理的限界に達しつつある。この限界を打開するために、次世代パワーデバイス用材料として、ワイドギャップ半導体である炭化ケイ素(SiC)が着目を集めている。SiC は、バンドギャップ

が 3.26 eV(4H)であり、絶縁破壊電界、熱伝導度において、優れた物性を有することから、パワーデバイス用材料として非常に魅力的である。SiC は、現在 3rd インチウェーハが市販されるに至っており、エピタキシャル成長技術やイオン注入、電極形成などプロセス技術は、デバイス作製にとって十分な水準に達しつつあり、ショットキーダイオードをはじめとする電力用途 SiC パワーデバイスが、市場に出回りつつある。

一方で、次世代高周波用途パワーデバイスとしては、Ⅲ族窒化物半導体である窒化ガリウム(GaN)と窒化アルミニウム(AlN)を用いた AlGaIn/GaN ヘテロ接合による高電子移動度トランジスタ(HEMT)(=ヘテロ接合電界効果トランジスタ(HFET))が有望視されている。これは、GaN の飽和ドリフト速度が大きく、また、イオン化不純物散乱の影響を受けない HFET 構造が高速動作に適しているためである。ここで、SiC を高周波用途に用いることを考える。SiC の飽和ドリフト速度は GaN と同程度の値であり問題ないが、SiC は、他のⅣ族結晶と混晶を形成せず、ヘテロ構造によるバンドギャップ変調が不可能であるため、HFET の報告例がない。SiC とよりバンドギャップの大きい半導体とのヘテロ接合が形成できれば、SiC HFET が実現可能となる。

バンドギャップ(E_g)が SiC より大きい半導体として、Ⅲ族窒化物半導体 AlN ($E_g=6.2$ eV)がある。AlN と SiC は、ともに四配位の有極性六方晶であり、それらの結晶構造は積層順序を除いて類似している。また、格子定数差が AlN/SiC において約 1%と小さい、などの特長を有することから、SiC は AlN 成長用基板として用いられる。研究代表者は、これまで、4H-SiC 基板上への AlN 成長の研究に取り組んできた。基板の成長面は、一般的に(0001)極性面が用いられるが、研究代表者は、これに対して 90° 傾いた(11-20)無極性面上に AlN を分子線エピタキシー(MBE)成長することで、AlN が通常の 2H 構造ではなく、基板と同一の 4H 構造となる同一ポリタイプ成長を見出ししてきた。通常の AlN 成長では、積層構造(ポリタイプ)の違いが問題となる。

すなわち、AlN/SiC が 2H 構造/4H (or 6H)構造となり、2H-AlN/4H-SiC 界面には、必ず転位が発生する。これに対して、ポリタイプを一致させて成長した 4H-AlN/4H-SiC 構造では、転位が存在しない界面が可能である。研究代表者は、この 4H-AlN の高品質化に取り組む、一般的な AlN(転位密度: $10^9 \sim 10^{10} \text{cm}^{-2}$)と比較して、極めて高品質な AlN(転位密度: $8 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$)を得ることに成功した。さらに、研究代表者は、この同一ポリタイプ成長によって実現された高品質ヘテロ界面を、電子デバイスで用いることを考え、AlN を絶縁膜に用いた金属/絶縁膜/半導体電界効果トランジスタ(MISFET)の試作を試みた。作製した MISFET は、明確な FET 動作を示し、世界初となる AlN/SiC MISFET の動作および、高品質ヘテロ界面を用いた電子デバイス応用の可能性を見出した。

本研究の AlN/SiC ヘテロ界面は、(11-20)面上に形成していることから、Al-C 結合と N-Si 結合が同数存在し、電気的に中性な界面となっている。よって、作製した MISFET は、ゲート電圧 0 V において、界面にキャリアが存在せず、ノーマリオフ特性となるべきである。しかし、実際には、FET は、ノーマリオン特性を示した。この予想に反した特性の原因は、明らかにはなっていない。

2. 研究の目的

本研究では、同一ポリタイプ成長によって低欠陥密度が実現された(11-20)面 4H-AlN/4H-SiC 界面の物性を明らかにすることを目的とする。これまでの研究において、FET の動作は確認されたが、デバイスの実現可能性を知ることを第一目的としてきたため、デバイスプロセスの最適化は一切行っていなかった。そこで、本研究では、まず、界面物性を評価するためのデバイス構造を作製するプロセスから検討を行い、デバイスの作製、評価に取り組む。さらに、これらのデバイスにおいて電気的特性評価を行うことで、4H-AlN/4H-SiC 界面で変調ドーピングが実現されている明確な証拠を得ることを目指す。

3. 研究の方法

これまで、図 1(a) に示す、4H-AlN/4H-SiC MIS 界面を利用した FET において、ノーマリオン動作が確認された。通常 SiC 基板を p 型とした MISFET においては、ゲート電極に正電圧を印加し、p 型 SiC が n 型に反転することによりスイッチング動作を示す。これは、バックグラウンド不純物により n 型にドーピングされた 4H-AlN から電子が供給され、界面に二次元電子ガス (2DEG) が形成されていると推測される。この 2DEG 形成に関する知見を得るために、図 1(a), (b) に示す FET の作製を行った。図 1(a) の SiC 基板を p 型としエンハンスメント型 FET に対して、図 1(b) は SiC 基板を n 型としたディプレッション型 FET である。これらの FET に対して、4H-AlN 中の不純物量と、FET のしきい値の相関を調べることによって、2DEG に関する知見が得られると考えた。また、図 1(c) に示す、ホール素子の作製を行った。4H-AlN/4H-SiC

界面を形成したホール素子に対して、ホール効果の測定温度依存性の測定を行い、磁気抵抗の量子振動が観測されれば、2DEG 形成を示す事ができる。

基板は、n 型 4H-SiC (11-20) 面基板を用いた。基板上にコールドウォール化学気相堆積法により n 型エピ層 (5 μm) を形成した後、Al イオン注入による選択的ドーピングによりチャンネルとなる p 型領域を形成した。また、エピ層に形成される n 型チャンネルに対して、n 型基板の影響を排除するため、高エネルギー (2.5 MeV) Al イオン注入による埋め込み p 型層を形成した。イオン注入プロセス後に注入イオンの活性化を行い、4H-AlN のエピタキシャル成長を行うが、ソース・ドレイン電極形成のための高濃度 n 型領域上に成長される 4H-AlN への品質悪化を避けるため、イオン注入プロセスでは、P イオン注入による高濃度 n 型領域形成に加え、N イオン注入による低濃度 n 型ドリフト層の形成も行った。4H-AlN を MBE 法により形成した後、素子分離のために、反応性イオンエッチング (RIE) によりトレンチを形成した。最後に、ソース・ドレイン電極およびゲート電極を形成した。

4. 研究成果

本研究で作製するデバイスのプロセスは、(1) SiC エピタキシャル成長、(2) SiC へのイオン注入による選択的ドーピング、(3) AlN エピタキシャル成長、(4) 素子分離および電極形成に分類される。SiC の結晶成長技術、デバイスプロセス技術は、数多くの知見がある。本研究で用いた基板が (11-20) 面であり、一般的に研究開発が行われている {0001} 面と異なっているものの、(1) および (2) に関しては、問題なく進めることができた。しかしながら、(3) に関して、これまで研究代表者が 4H-SiC (11-20) 面上基板への 4H-AlN (11-20) 成長に取り組んできたが、AlN 成長条件が、デバイス作製プロセスに与える影響などの知見は極めて少なく、本研究では、成長した 4H-AlN が (4) のプロセスに与える影響により、デバイスの完成まで到達することが困難であった。よって、デバイスの電气的特性評価を行うことはできな

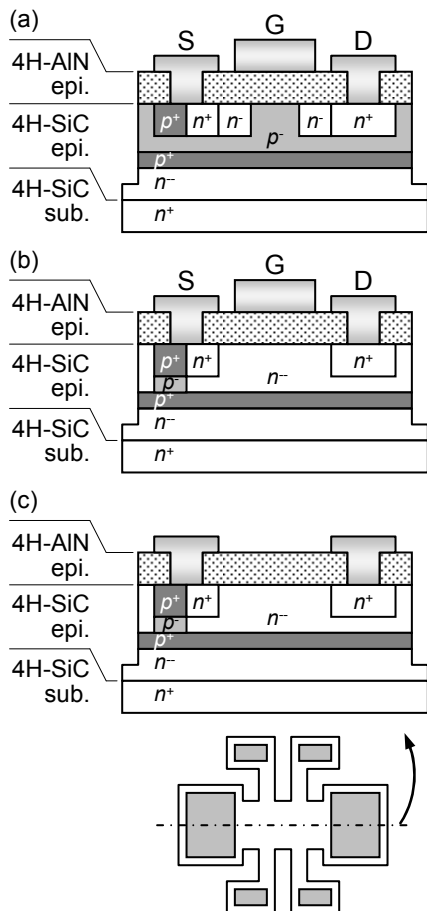


図 1: 本研究で作成を行ったデバイスの構造図

った。

(4)のプロセスにおいて、AlN を成長後、素子分離として、RIE により AlN をエッチングした後、SiC を 2.5 μm エッチングを行う。このプロセスを行った後の走査型電子顕微鏡 (SEM) 像を図 2 に示す。このプロセスにおいて、ソース・ドレイン電極形成のための高濃度 n 型領域のピンホール形成、および素子分離のために形成したトレンチ底部の著しい荒れが観測された。高濃度 n 型領域のピンホールの深さは、 μm オーダーであり、埋め込み p 層を貫通していることから、形成した電極が n 型基板上 n 型エピ層に接触すると予測される。この場合、埋め込み p 層は機能せず、4H-AlN/4H-SiC 界面の物性を正しく評価できないことから、素子分離プロセスにおいてこのピンホール形成を抑制する必要がある。また、トレンチ底部の著しい荒れは、その後の電極形成プロセスに影響することから、この荒れについても抑制する必要がある。AlN 成長を行っていない SiC 基板に対して、素子分離と同条件で RIE を行ったところ、これらのピンホールや著しい荒れは、観測されな

かった。このことから、SiC 上に AlN を成長することが、後プロセスへと影響していると考えられる。今後、AlN の成長条件を検討することによって、後プロセスで生じるこれらの問題の解決を図っていく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

Masahiro Horita, Tsunenobu Kimoto, Jun Suda, Nonpolar 4H-Polytype AlN/AlGaN Multiple Quantum Well Structure Grown on 4H-SiC (1 $\bar{1}$ 00), Applied Physics Express, vol. 5, p. 051001, 2009, 査読有

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀田 昌宏 (HORITA MASAHIRO)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・助教

研究者番号：50549988

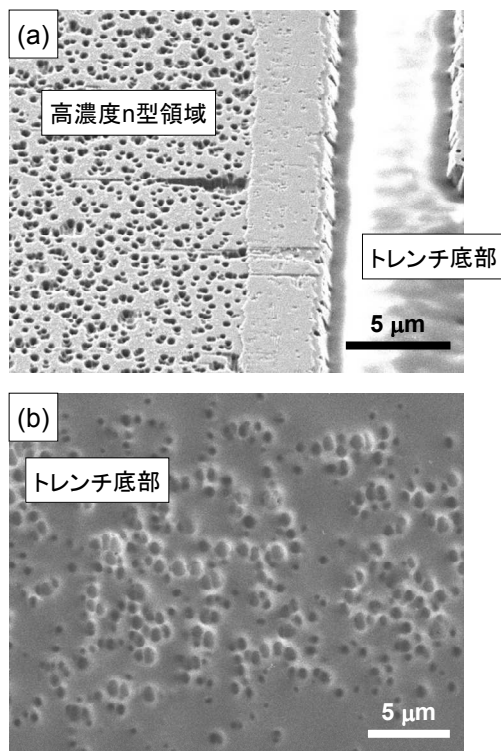


図 2: 素子分離のための RIE プロセス後の SEM 像; (a) 高濃度 n 型領域およびトレンチの鳥瞰 SEM 像, (b) トレンチ底部の平面 SEM 像.