

学 位 論 文 題 名

窒化物半導体の接合特性評価とトランジスタ応用

学位論文内容の要旨

現在、世界的規模で対策が迫られている地球温暖化問題に対して、その原因である CO₂ 排出の抑制は様々な産業界において強く求められている。輸送関連分野では、排出される CO₂ 量が全排出量の 2 割程度にのぼると言われており、さらに中国、インドを初めとする新興国における自動車の爆発的な普及も予想されていることから、今後輸送関連分野での CO₂ 排出量が大幅に増加する恐れがある。

このような背景から、CO₂ 排出量の低減を目的にハイブリッド車 (Hybrid Vehicle:HV) や電気自動車 (Electric Vehicle:EV) の開発が急ピッチで展開されている。これら HV、EV では、搭載している直流電池から電気エネルギーを供給しており、一方動力を生み出す電気モータは 3 相交流モータが使用されている。このため、直流の電池電圧を 3 相交流電圧に変換する電力変換装置であるインバータが必要となる。現状のインバータは、Si IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) を主素子として構成されているが、Si 固有の材料性能限界のため、今後の大幅な特性向上、損失低減が困難となっている。

これを打開するため、炭化シリコン (SiC)、窒化ガリウム (GaN) 等のワイドバンドギャップ (Wide Band Gap:WBG) 素子の研究・開発が精力的に行われている。WBG 半導体は Si の 3 倍以上の禁制帯幅を持つため、Si パワーデバイスの最大動作温度が 150 °C 程度に制限されるのに対して、SiC、GaN パワーデバイスでは 250 °C 以上の高温領域での動作も可能である。さらに WBG 半導体は、絶縁破壊電界が Si に比べ約 1 桁程度高いことが特徴である。この点から、同じ耐圧を実現する上で、損失を 2 桁以上低減することが可能となり、将来の電力変換装置用パワーデバイスとして本命視されている。

Si、SiC ではそれぞれ Si 基板、SiC 基板が開発され、大電力用として必須の縦型デバイスの開発が可能であるのに対し、GaN では GaN 基板そのものの開発が進まず、GaN パワーデバイスはサファイア基板や Si 基板など異種基板上へ作製した小電力用横型パワーデバイスの開発に留まっていた。今世紀に入り、ようやく水素化物気相成長法による GaN 自立基板が開発され、基板サイズ、品質の点でパワーデバイス用としてはまだ十分でないものの、GaN でも縦型パワーデバイスの研究・開発を行う環境が整いつつある。さらに、GaN 縦型パワーデバイスを実現する上でカギとなる技術が「p 型 GaN 技術」である。デバイスの高耐圧化、車載デバイスで強く要求されている高耐量化を実現するために、デバイスの一部に p 型領域を形成し、高電界により発生する正孔の蓄積を防ぐ必要がある。

また高温動作が要求され、かつ安全保障上ノーマリオフ動作が強く求められる車載用パワーデバイスでは、GaN 電子デバイスで一般的なショットキーゲート構造では、高温でのリーク電流あるい

は正のゲート電圧に対するバリア性の点から適用が困難である。これを解決する方法として、絶縁膜を適用した絶縁ゲート構造がある。Si では Si 自身の酸化物である SiO₂ が優れた界面特性等の理由から主に用いられている。しかし、GaN では SiO₂ との界面に高密度の界面準位が形成され、良質な界面特性が得られない、という課題を抱えている。

以上の背景を踏まえて、本研究では、p 型 GaN の特性を各種電氣的評価から明らかにするとともに、ゲート絶縁膜用として Si デバイスで実績のある SiO₂ および高誘電体膜として注目されている Al₂O₃ 膜に関して検討を行った。さらに、GaN 自立基板上に GaN 縦型パワーデバイスを試作し、その特性に関して評価を行い、GaN 縦型パワーデバイスの可能性に関して検討を行った。

本論文は第 1 章から第 6 章で構成されている。以下、各章の要旨をまとめる。

第 1 章は序論として、GaN パワーデバイスを取り巻く状況を自動車用途を想定して述べ、本研究の必要性等に関してまとめた。

第 2 章では、GaN を中心とした窒化物半導体の特徴を、GaN 基板技術および GaN パワーデバイスの研究・開発状況を絡めて述べる。

第 3 章では、p 型 GaN のエピタキシャル成長と成長層の電氣的特性評価、および GaN 自立基板上に形成した p-n ダイオードの解析を行い、縦型パワー素子としての GaN p-n ダイオードの基本特性を検討した。さらに、素子作製プロセスで用いられるプラズマプロセスの素子特性への影響を評価するために、プラズマプロセスに曝された層を有する p-n ダイオードを形成し、プラズマ照射による空孔型欠陥の発生が、p-n 接合の漏れ電流を増大させ、かつ耐圧特性を劣化させる要因となることを明らかにした。

第 4 章では、高温・ノーマリオフデバイスを前提とした絶縁ゲート構造を想定し、SiO₂ 膜および Al₂O₃ 膜の検討を行った。GaN 上 SiO₂ 膜の課題の一つである界面準位の低減に関して、新たな成膜手法を考案し、従来の界面準位を 2 桁低減可能な手法を提案した。また、さらなるデバイス高性能化で期待される高誘電率 Al₂O₃ 絶縁膜に関して、その堆積法の検討と界面特性の評価を行い、Al₂O₃ 膜の良好な絶縁特性と Al₂O₃/GaN 構造の低界面準位密度を示した。

第 5 章では、GaN 自立基板上に形成した 2 種類の GaN 縦型トランジスタの作製法とその基本特性を記述した。一つは、GaN エピタキシャル層中に部分 p 型埋込層を有するアパーチャ構造縦型 GaN トランジスタであり、もう一つは現在 Si パワーデバイスで主流となっているトレンチゲート型 GaN トランジスタである。両者とも良好な電気特性を示し、大電力スイッチング用トランジスタとして主流となる縦型トランジスタ構造の有力候補であることを明らかにした。

最後に第 6 章にて本研究のまとめを行った。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 橋 詰 保

副 査 教 授 佐 野 栄 一

副 査 准教授 葛 西 誠 也

学 位 論 文 題 名

窒化物半導体の接合特性評価とトランジスタ応用

CO₂ 排出の抑制は世界規模で強く求められている。増加の一途をたどる電力消費が CO₂ 排出の最大要因であるが、輸送関連分野の排出量が全排出量の 2 割程度に達しており、今後、新興国における自動車の爆発的な普及も予想されていることから、輸送関連分野での CO₂ 排出抑制は、低炭素社会実現に向けて重要な課題となっている。

このような背景から、ハイブリッド車や電気自動車の開発が急ピッチで展開されている。これらの車種では、搭載している直流電池から電気エネルギーを供給しており、一方動力を生み出す電気モータは 3 相交流モータが使用されている。このため、直流電力を 3 相交流電力に変換する電力変換装置 (インバータ) が必要となる。現状のインバータは、シリコン (Si) トランジスタを主素子として構成されているが、Si 固有の材料性能限界のため、今後の大幅な特性向上や電力損失低減が困難となっている。

Si 材料性能限界を超える次世代インバータとして、炭化シリコン (SiC) と窒化ガリウム (GaN) を利用した素子の研究・開発が急ピッチで行われている。これらの半導体は Si の 3 倍以上の禁制帯幅を持つため、Si パワーデバイスの最大動作温度が 150 °C 程度に制限されるのに対して、SiC および GaN パワーデバイスは 250 °C 以上の高温領域での動作も可能である。さらに絶縁破壊電界が Si に比べ約 1 桁程度高いことから、同じ耐圧を実現する上で、損失を 2 桁以上低減することが可能となり、将来の電力変換装置用パワーデバイスとして大きな注目を集めている。特に窒化物半導体系材料は、InN、GaN、AlN の混晶を組み合わせた異種接合構造が形成でき、優れた電気的特性を持つ界面電子層を利用することにより、極めて損失の低いトランジスタが作製できる。しかしながら、GaN 基板の開発が進まず、GaN パワーデバイスはサファイア基板や Si 基板など異種基板上へ作製した小電力用横型デバイス開発に留まっていた。今世紀に入り、ようやく水素化物気相成長法による GaN 自立基板が開発され、GaN でも縦型パワーデバイスの研究・開発を行う環境が整いつつある。

GaN 縦型パワーデバイスを実現する上でカギとなる技術が「高品質 p 型 GaN 層」である。デバイスの高耐圧化、車載デバイスで強く要求されている高耐量化を実現するために、デバイスの一部に p 型領域を形成し、高電界により発生する正孔の蓄積を防ぐ必要がある。また高温動作が要求され、かつ安全保障上ノーマリオフ動作が強く求められるパワーデバイスにおいて、高温でのリーク電流あるいは正のゲート電圧に対するバリア性の点から、金属ゲート (ショットキーゲート) 構造の適用が困難である。これを解決する方法として、絶縁膜を適用した絶縁ゲート構造がある。Si で

は Si 自身の酸化物である SiO₂ が優れた界面特性等の理由から主に用いられている。しかし、GaN では SiO₂ との界面に高密度の界面準位が形成され、良質な界面特性が得られない、という課題を抱えている。

以上の背景により、本研究では、次世代インバータの実現を目指して、GaN 素子構造および作製プロセスの要素技術の検討を系統的に行っている。具体的には、p 型 GaN および pn 接合の特性を各種電気的評価から明らかにするとともに、ゲート絶縁膜用として Si デバイスで実績のある SiO₂ および高誘電体膜として注目されている Al 酸化膜膜に関して検討を行った。さらに、GaN 自立基板上に縦型トランジスタを試作し、その基礎電気特性の評価を行い、GaN 縦型パワートランジスタのインバータ応用に関して検討が行われている。

本論文は第 1 章から第 6 章で構成されている。以下、各章の要旨をまとめる。

第 1 章は序論として、GaN パワーデバイスの特長を簡潔にまとめ、自動車用途を想定した性能予測と研究開発の課題点を整理し、本研究の目的を記述している。

第 2 章では、GaN を中心とした窒化物半導体の物性的特徴を概説し、さらに GaN 基板技術および GaN パワーデバイスの研究・開発状況について詳しく述べている。

第 3 章では、p 型 GaN のエピタキシャル成長と成長層の電気的特性評価、および GaN 自立基板上に形成した p-n 接合ダイオードの解析を行い、縦型パワー素子の基本要素としての GaN p-n ダイオードの特性を評価している。さらに、素子作製プロセスで用いられるプラズマプロセスの素子特性への影響を評価するために、プラズマプロセスに曝された層を有する p-n ダイオードを形成し、プラズマ照射による空孔型欠陥の発生が、p-n 接合の漏れ電流を増大させ、かつ耐圧特性を劣化させる要因となることを明らかにした。

第 4 章では、高温・ノーマリオフデバイスを前提とした絶縁ゲート構造開発を目的として、SiO₂ 膜および Al 酸化膜膜の GaN 表面への堆積とその界面特性の評価を行っている。SiO₂/GaN 構造における界面準位の低減に効果的な新たな堆積手法を考案し、従来の界面準位を 2 桁程度低減可能であることを示した。また、SiO₂ と比較してはるかに高い誘電率を有する Al 酸化膜に関して、その堆積法の検討と界面特性の評価を行い、Al 酸化膜膜の良好な絶縁特性と Al 酸化膜/GaN 構造の低界面準位密度を明らかにしている。

第 5 章では、GaN 自立基板上に形成した 2 種類の縦型トランジスタの作製法とその基本特性を記述している。一つは、GaN エピタキシャル層中に p 型埋込層を有するアパーチャ構造縦型 GaN トランジスタであり、もう一つは現在 Si パワーデバイスで主流となっているトレンチゲート型 GaN トランジスタである。両者とも良好な電気特性を示し、大電力スイッチング用トランジスタとして主流となる縦型トランジスタ構造の有力候補であることを示している。

第 6 章では本研究で得られた主な成果をまとめている。

これを要するに、本論文は、GaN pn 接合および絶縁膜/GaN 構造の特性を各種電気的評価から明らかにするとともに、GaN 自立基板上の縦型トランジスタの優位性と課題点を検討しており、ここで得られた基礎的知見は、窒化物半導体デバイス研究に貢献するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格ある者と認める。