

京都大学	博士 (工 学)	氏名	三宅 裕樹
論文題目	Interface Control of AlGa _N /SiC Heterojunction and Development of High-Current-Gain SiC-Based Bipolar Transistors (AlGa _N /SiCヘテロ接合界面制御および高電流増幅率SiC系バイポーラトランジスタの実現)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、次世代電力変換用半導体として有望なSiC(炭化珪素)の高性能パワートランジスタの実現を目指して、SiCホモ接合を有するバイポーラトランジスタとAlGa_Nをエミッタに用いたAlGa_N/SiCヘテロ接合バイポーラトランジスタの作製に関する基礎研究についてまとめたもので、6章からなる。</p> <p>第1章では、電力利用の高効率化の重要性、および電力変換の効率を支配するパワー半導体デバイスの開発状況を整理した後、本研究で取り扱うSiC半導体の特徴とSiCパワーデバイスの研究状況を紹介し、高耐圧SiCパワートランジスタに対する期待と研究課題について概説している。次に、SiC系バイポーラトランジスタにおける電流増幅率の向上に焦点を絞って研究課題を整理し、当該分野における本研究の位置付けと目的を明らかにしている。</p> <p>第2章では、SiCバイポーラトランジスタを作製する土台となるn型/p型/n型SiCのホモエピタキシャル成長、およびAlGa_N/SiCヘテロ接合バイポーラトランジスタを作製する際の鍵を握るn型AlGa_Nのヘテロエピタキシャル成長について述べている。特に、化学気相堆積法によるSiCホモエピタキシャル成長のプロセス、およびSiC成長層の結晶性、表面平坦性、ドーピング制御について調べた結果を述べている。</p> <p>第3章では、SiCホモ接合からなるバイポーラトランジスタの作製と性能向上について述べている。まず、バイポーラトランジスタの基本構造と作製プロセスを紹介した後、トランジスタにおける電流増幅率の制限要因を論じ、その解決策を挙げて高性能SiCバイポーラトランジスタを実現する新しいプロセスを提案している。具体的には、エミッタ接合界面におけるキャリア再結合を抑制する上で、エミッタ/ベース領域の連続エピタキシャル成長が有効であることを示している。次に、表面再結合を抑制するためには、界面を窒化した酸化膜による表面パッシベーションが有効であることを示し、SiO₂/SiC界面における欠陥密度とトランジスタの電流増幅率の相関を明らかにしている。さらに、{1100}面をエミッタフィンガーの側壁とすることが効果的であることを示している。また、熱酸化によるSiC結晶中の深い準位低減プロセスを適用することで、p型ベース中のバルク再結合を低減している。これらのプロセスを集約することにより、コレクタ耐圧600V級のSiC(0001)面上トランジスタで257、SiC(000$\bar{1}$)面上のデバイスで439という最高のエミッタ接地電流増幅率を達成している。次に、この高い電流増幅率を有するSiCバイポーラトランジスタのコレクタ電流およびベース電流のガンメルプロット、電流増幅率の温度依存性を詳細に調べ、エミッタ接合におけるキャリア注入率やベース内のキャリア到達率のデバイス構造依存性、コレクタ電流依存性や温度依存性について議論している。また、高純度SiCの厚膜成長層を用い、空間変調型接合終端構造を適用することで、100程度の高い電流増幅率を維持しながら17kV以上という極めて高いコレクタ耐圧を達成した。これは、固体のスイッチング素子として最高の耐圧である。ベース</p>			

京都大学	博士 (工 学)	氏名	三宅 裕樹
<p>開放コレクタ耐圧とエミッタ開放コレクタ耐圧の比較、高電圧印加時の漏れ電流、コレクタ領域の伝導度変調効果の有無について議論し、高耐圧・高電流増幅率SiCバイポーラトランジスタ作製における今後の課題について整理している。</p> <p>第4章では、SiCより広い禁制帯幅を有するGaN(窒化ガリウム)をエミッタに用いたGaN/SiCヘテロ接合バイポーラトランジスタの作製と特性評価について述べている。まず、分子線エピタキシー法によりSiC(0001)オフ基板の上にGaNのヘテロエピタキシャル成長を行い、GaN成長層の結晶性や電気的性質を調べた結果についてまとめている。GaN/SiC界面で生成された転位が対消滅により減少するため、GaN成長層は良好な結晶性を有すること、Siドーピングにより十分な高濃度n型GaN層の成長が可能であることを明らかにしている。次に、GaN/SiCヘテロ接合バイポーラトランジスタおよびGaN/SiCヘテロ接合ダイオードを作製し、その特性を解析している。p型SiCベース領域のドーピング密度を10^{19}cm^{-3}から10^{18}cm^{-3}に減少させることにより、界面近傍のトンネル電流を介した再結合電流を大幅に低減できること、界面に極薄(1~2nm)のAlN層を導入することにより、GaN/SiC界面に存在する負のバンドオフセットを低減できることを明らかにしている。次に、これらの結果を活用してGaN/SiCヘテロ接合バイポーラトランジスタを作製し、エミッタ接地電流増幅率を従来の0.0001から0.01まで改善できることを示している。</p> <p>第5章では、上述のGaN/SiCヘテロ接合バイポーラトランジスタの特性をさらに改善するために、AlN/GaN短周期超格子を活用した擬似AlGaN/SiCヘテロ接合バイポーラトランジスタを提唱し、その作製と特性解析について述べている。キャリアの注入率に大きな影響を与えるAlGaN/SiC界面のバンドオフセットを定量的に調べ、実効的なAl組成が0.5以上で負のバンドオフセットを解消できることを見出している。さらに、この負のバンドオフセット解消の効果により、AlGaN/SiCヘテロ接合ダイオードの電流輸送機構が大きく変化することを示している。以上の知見を基にAlGaN/SiCヘテロ接合バイポーラトランジスタを作製し、Al組成増大による負のバンドオフセット解消および極薄のn型SiCスペーサ層の導入によって電流増幅率が大幅に向上し、世界初のAlGaN/SiCヘテロ接合バイポーラトランジスタのエミッタ接地動作(最大電流増幅率13)と高いコレクタ耐圧(1kV)を達成している。この結果は、格子不整合を有するヘテロ接合かつIII-V族/IV-IV族のヘテロヴァレント接合における界面電子物性制御の可能性を示唆するものである。また、デバイス特性とヘテロ接合における電流輸送機構の関係を論じ、将来の方向性について論じている。</p> <p>第6章は結論であり、本研究を通じて得られたSiCバイポーラトランジスタ、GaN/SiCおよびAlGaN/SiCヘテロ接合バイポーラトランジスタの特性を整理すると共に、トランジスタ動作に関連する半導体物理の知見を要約している。また、当該分野における今後の研究課題を提示し、これらの課題解決に向けた研究指針を提案している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、電力応用を目指したSiC(炭化珪素)系バイポーラトランジスタの高性能化に関する基礎研究についてまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. SiCホモ接合からなるバイポーラトランジスタ(BJT)における電流増幅率を制限する要因を検討し、高性能SiC BJTを実現する新しいプロセスを提案した。具体的には、エミッタ接合界面におけるキャリア再結合、エミッタ側面およびベース表面における再結合、およびp型ベース中のバルク再結合の低減方法を各々提案し、これらを集約することにより、最高で439という従来に比べて約4倍のエミッタ接地電流増幅率を達成した。コレクタ電流およびベース電流のガンメルプロット、電流増幅率の温度依存性を詳細に調べ、BJT内のキャリアの振舞いを明らかにした。また、高純度SiC厚膜と適切な接合終端構造を用いることで、17kV以上という極めて高いコレクタ耐圧を達成した。これは、固体のスイッチング素子として最高の耐圧である。
2. SiCより広い禁制帯幅を有するGaN(窒化ガリウム)をエミッタに用いたGaN/SiCヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)の作製を目指して、SiC上のGaNのヘテロエピタキシャル成長を行い、GaN成長層の結晶性や電気的性質を調べた。GaN成長層は良質な結晶性を有し、十分な高濃度n型ドーピングが可能であることを明らかにした。次に、GaN/SiC HBTを作製し、ベース領域のドーピング密度の最適化や、極薄AlN層の導入によるGaN/SiC界面のバンドオフセットの低減が注入率の向上に有効であることを示した。
3. 上述のGaN/SiC HBTの特性を改善するために、AlN/GaN短周期超格子を活用した擬似AlGaIn/SiC HBTを提唱した。キャリアの注入率に大きな影響を与えるAlGaIn/SiC界面のバンドオフセットを定量的に調べ、実効的なAl組成が0.5以上で負のバンドオフセットを解消できることを見出した。さらに、この負のバンドオフセット解消の効果により、HBTの電流増幅率が大幅に向上し、世界初のAlGaIn/SiC HBTのエミッタ接地動作(最大電流増幅率13)と高いコレクタ耐圧(1kV)を達成した。この結果は、III-V族/IV-IV族のヘテロヴァレント接合における界面電子物性制御の可能性を示唆するものである。また、デバイス特性とバンド構造の相関を論じ、将来の方向性について論じている。

以上、要するに、本論文は、SiCホモ接合を有するバイポーラトランジスタの性能を大幅に向上させる手法を提案すると共に、AlGaIn/SiCエミッタ接合を活用したヘテロ接合バイポーラトランジスタの動作実証を通じて、III-V族/IV-IV族ヘテロ接合における電子的な界面制御の可能性を提示したもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成24年2月14日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。