

氏名	マセ アキラ 間瀬 晃
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第1321号
学位授与の日付	2024年3月31日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	GaN系npnヘテロ接合バイポーラトランジスタの研究 (Study on GaN-based npn heterojunction bipolar transistors)

論文審査委員	主査	教授	三好 実人
		教授	加藤 正史
		教授	岩田 直高
			(豊田工業大学)

## 論文内容の要旨

本研究は、三好研究室で進められている『GaNに格子整合し、ひずみと $E_g$ を独立で制御できる四元混晶AlGaInN』をエミッタに用いたGaN系HBTの新たな構造と工法を探求し、良好な特性を有するHBTを提案することを目的としている。そのアプローチとして、シミュレーションにより新構造の要件を得ること。実試作により個別要素検討とHBTの実試作により特性を得ること。更にはシミュレーションと実試作の結果との比較から考察を行ったことを示した。本論文は6章からなり、その構成は以下の通りである。

第1章では総論を述べた。半導体を取り巻く環境から、GaN系HBTの可能性のある応用として、今後需要が伸びていく中容量中高速駆動を両立する半導体デバイスとGaN系HBTの位置づけを考えていることを示した。

第2章では研究の前提となる原理や要素技術。特に基本材料である混晶についてはエネルギー準位など、計算前提を整理して記述している。さらにGaN材料の特徴、結晶構造や特徴的な転位、HBTの構造と動作原理、シミュレーションの原理・モデル、各プロセスおよび評価に必要な要素技術について述べている。

第3章では、シミュレーションによって、HBTの基本構造や提案する技術に関する検討の内容と結果の解析を行っている。この章の目的は、それぞれの領域に求められる要素項

目が特性に与える影響とその範囲を明らかにすることにある。本研究は実験的アプローチからのスタートではなく、計算に基づいた検討結果を反映させて実検討を行うことを特徴としている。検討の結果、エミッタではベース・エミッタ間のエネルギーバンドギャップ  $\Delta E_g$  が 0.25eV 付近に電流増幅率  $\beta$  の緩やかなピークを持つことがわかり、その推定理由を述べている。ベースでは正味のアクセプタキャリア濃度  $[N_A - N_D]$  が  $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上必要であることが分かった。この値以下ではベース電流の制御にかかわらずコレクタ電流が徐々に増加するアーリー効果およびパンチスルー現象が生じ、この傾向はベース電流が大きくなるほど顕著になることが分かった。ベース材料にアクセプタキャリア濃度が高く出来る GaInN を用いることの有効性が確認できた。またコレクタでは、層の厚みが 300nm でも 130V 以上の耐圧を有すること、および逆方向耐圧は可変ホッピング伝導を示すことが分かった。

第4章では、シミュレーションで得た構造を実現するための要素技術の実験的な追求と、HBT の試作・評価および考察を示した。その結果、要素技術ではベース層の低抵抗化は GaInN を用いた場合、結晶品質と低抵抗化を両立する、InN のモル分率が 5%とすることで良好なベースが得られることがわかった。また、ベース電極接続の低抵抗化については、*p*-GaInN ベースと金属電極 Ni/Au の間に 1000°C で再成長させた *p*-GaIn を挿入することで固有接触抵抗を低減出来ることがわかった。他の可能性として MgO 膜からの固相拡散法による *p*+接続層の形成の効果を併せて示した。シミュレーションと要素技術検討を反映した HBT の試作では、ベース電流信号に応じた変調がみられるトランジスタ特性を得ることができ、 $I_B=500 \text{ nA}$ 、 $V_{CE}=4 \text{ V}$  での電流密度は約  $1.7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  である。アーリー効果特性が顕著なことから、ベースのアクセプタキャリア濃度が想定よりも一桁ほど低く、ベース幅変調が生じている可能性が高いことを示した。電流増幅率  $\beta$  は 64 であった。残留課題は *p*-GaInN ベースと電極の接続に完全なオーミック接続が出来ていないこと、シミュレーションで求めた特性と実際の試作結果との乖離である。

第5章では、シミュレーションと試作結果との乖離理由の考察を行い改善の方向性を示した。着目は3点。「試作で得た HBT 特性の電流密度が低い点」については、ベース・エミッタ間  $\Delta E_g$  が想定よりも低い値を反映、「アーリー電圧が低い点」については、エミッタ直下で Mg 活性化の活性化が阻害されている状態を仮定したアクセプタキャリア密度分布の反映、「オフセット電圧が高い点」については、等価回路中のベースの接触抵抗と比抵抗に着目し、試作より得た実値を反映させた計算を行った結果、特性の傾向が一致することが分かった。この考察により HBT 素子の課題が明確にできた。

第6章では、本論文の総括を述べた。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、四元混晶AlGaInNをエミッタとするGaN系ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) に関するものである。その実現に向けたアプローチとして、シミュレーションによる素子構造の検討、個別実験による要素技術検討、HBT素子の試作・評価を行ってきた。本論文は6章からなり、その構成は以下の通りである。

第1章では総論が述べられている。半導体エレクトロニクスを取り巻く環境から、今後需要が伸びていく中容量中高速駆動を両立する半導体デバイスの中でGaN系HBTの位置づけを論じている。

第2章では、GaN材料の特徴、結晶構造や特徴的な転位、HBTの構造と動作原理、シミュレーションの原理・モデル、各プロセスおよび評価に必要な要素技術について述べている。

第3章では、シミュレーションによって、HBTの基本構造や提案する技術に関する検討の内容と結果の解析を行っている。検討の結果、HBTのエミッタではベース・エミッタ間のエネルギーバンドギャップ $\Delta E_g$ が0.25eV付近となる構成で電流増幅率 $\beta$ の緩やかなピークを持つ事が分かり、その推定理由を述べている。ベースでは実効的なアクセプ濃度として $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上が必要であり、それ以下ではベース電流の制御にかかわらずコレクタ電流が徐々に増加するアーリー効果およびパンチスルー現象が生じる。この傾向はベース電流が大きくなるほど顕著になる。この結果を受けて、ベース材料としてアクセプタキャリア濃度が高く出来るGaInN混晶を用いる事の有効性が確認に至った。またコレクタとしては層の厚みが300nmであっても130V以上の耐圧を有する事、および逆方向耐圧は可変ホッピング伝導を示す事を明らかにした。

第4章では、シミュレーションで得た構造を実現するための要素技術の実験的な追求と、HBTの試作・評価および考察を述べている。結果として、ベース層にGaInN混晶を用いた場合、結晶品質と低抵抗化を両立する混晶組成比としてInNモル分率を5%とする事で良好な導電特性が得られる事を示した。また、ベース電極接続の低抵抗化については、GaInN ベースと電極Ni/Au電極の間に1000°Cで再成長させたp-GaN層を挿入する事で固有接触抵抗を低減出来る事を見出した。さらに、他の候補技術としてMgO膜からの固相拡散法によるp+接続層の形成の効果を併せて示している。シミュレーションと要素技術検討を反映したHBT試作を行ったところ、ベース電流信号に応じた変調がみられるトランジスタ動作を確認した。結果として、ベース電流500 nA、コレクタ電圧4 Vとした場合のHBT動作において、コレクタ電流密度が約 $1.7 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、電流増幅率が $\beta=64$ という結果を得るに至っている。

第5章では、シミュレーションと試作結果との乖離理由の考察を行い改善の方向性を示している。第一に「アーリー電圧が低い点」については、エミッタ直下でMg活性化が部分的に阻害されている状態を仮定する事、第二に「オフセット電圧が高い点」については、等価回路中のベースの接触抵抗と比抵抗に試作で得られた実測値を用いる事、最後に「試作で得たHBT特性の電流密度が低い点」については、ベース・エミッタ間の $\Delta E_g$ が想定よりも低い値とする事、以上を採り入れる事でシミュレーションと試作結果の傾向が一致する事を示した。この考察により現行試作のHBT素子における技術課題を明確にした。

第6章では、本論文の総括及び今後の展望と課題について述べている。

以上の研究成果は、3編の学術論として発表されており、GaN系HBTを始めとする縦型トランジスタや高周波トランジスタの開発に重要な知見を与えるものである。以上より、本論文は本学の博士(工学)論文として十分な価値を有するものと認められる。