

氏名(本籍地)	星 拓也
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博 甲 第 7240 号
学位授与年月日	平成 27 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理工学物質科学研究科
学位論文題目	InP系HBT高機能化に向けたInGaAsSb系材料のMOCVD成長とデバイス特性に関する研究

主査	筑波大学連携大学院准教授	博士(工学)	後藤 秀樹
副査	筑波大学教授	工学博士	山田 啓作
副査	筑波大学教授	博士(学術)	都倉 康弘
副査	筑波大学教授	博士(工学)	大野 裕三

論 文 の 要 旨

本論文では、将来の光通信で求められる大容量化、高速化に対応するため、InP系のヘテロバイポーラトランジスタに着目し、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ をベース層に有するダブルヘテロ接合バイポーラトランジスタの作製および特性向上に取り組む。具体的には、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ ベース DHBTの結晶成長技術検討およびデバイス検討を通じて、GaAsスペーサ層の導入による $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ ベース DHBTの高電流利得化技術、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ ベース適用による低ターン・オン電圧化と、組成傾斜 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ ベースによる高周波特性の向上に関して議論する。

第2章は、本論文の背景を述べる。まず、日本国内の通信環境について紹介する。光通信は、インターネットの普及を皮切りに、そのアクセス回線速度は上昇しており、今後もその流れが加速されると予測される。上記の要請を満たすものとして、InP系ヘテロ接合バイポーラトランジスタ(Heterojunction Bipolar Transistors, HBT)が使われており、今後さらに特性を向上させるためには、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ の利用が有望である。 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ をベース層に有するダブルヘテロ接合バイポーラトランジスタ(Double Heterojunction Bipolar Transistors, DHBT)構造は、InPコレクタの適用により耐圧と f_T の両立が可能な点や、type-IIヘテロ構造のために内蔵電位がベース層のドーピングとバンドギャップのみで決まるため低ターン・オン電圧化が可能である点などの特徴を有しており、高出力化や低駆動電圧化といった近年の性能要求に応えることができる有望なデバイス構造である。また、組成傾斜 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ ベースによる高 f_T 化が可能であり、次世代ベース層材料として期待される。本章では、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ ベース DHBTが達成すべき性能目標と、研究方針を示す。

第3章では、本研究における実験手法、評価手法および実験結果の解析手法について述べる。本研究においては、すべての試料は減圧MOCVD法によって、半絶縁Feドープ(001)InP基板上に成長を行った。III族原料にはトリエチルガリウム(Triethylgallium, TEGa)、トリメチルインジウム(Trimethylindium,

TMIIn)、V族原料にはアルシン、ホスフィン、トリメチルアンチモン(Trimethylantimony, TMSb)、ドーピング原料にはジシラン、 CBr_4 を用い、 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 以上に基板を加熱して成長を行った。また、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ のCドーピング時の固相組成の支配的要因を明らかにし、組成変動の予測技術を確立すべく、 CBr_4 のエッチング効果を取り込んだ熱力学計算を行った。また、電気特性の評価に用いたデバイス構造についても紹介する。

第4章では、 $\text{InP}/\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ DHBTの電流利得を向上させる手法として、GaAsスペーサ層をInPエミッタ層と $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ ベース層の間に挿入する手法を提案し、この挿入効果について議論する。本手法は、 $\text{GaAs}_{1-y}\text{Sb}_y$ ベース層形成の後に、単にTMSbおよび CBr_4 の供給を中断することで、GaAsスペーサ層を成長無中断で形成可能であるために、ベース-エミッタ界面形成が容易となる。また、歪GaAs/InPがtype-IIのバンドラインナップを有するため、DHBTの特徴が損なわれないという利点を有する。検討の結果、2 nmのGaAsスペーサ層が、高周波特性を損なうことなくDHBTの電流利得を向上させることができる有益な構造であることを示唆するものである。また本検討より今後、ワイドバンドギャップエミッタ層や四元混晶 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ ベース層の適用により、DHBTのさらなる高電流利得化の可能性が示された。

第5章では、四元混晶 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ をDHBTのベース層に適用することで、DHBTのターン・オン電圧を低減させる検討について述べる。 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ ベースDHBTは、InP系DHBTの高周波特性などを犠牲にすることなく、その駆動電圧を低減し、ICの低消費電力化に貢献できる有益なデバイス構造であることが明らかとなった。

第6章では、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ ベースDHBTの f_T を向上させる手法として、新規な組成傾斜ベースの形成手法である CBr_4 流量変調法を提案する。これは、ベース層形成時に、コレクタ層側からエミッタ層側にかけて、そのほかの原料の供給量を一切変化させずに、ドーピング原料である CBr_4 の供給量のみを増大させることで、組成傾斜ベースを形成する手法である。この手法は、 CBr_4 単一原料の供給量変化のみで形成が可能であるため、エピタキシャル成長の制御性の観点から優位であると考えられる。本章の結果は、超高速光通信用ICや、高い f_{max} と耐圧が必要とされるミリ波ICへの応用展開への有望性を示唆するものである。

第7章においては、これまでに議論した、DHBTの高電流利得化、低ターン・オン電圧化、高周波特性の向上の三つの観点から検討を行った内容に関してまとめる。さらに、本研究の現在の位置付けと、今後の展開について示す。

審 査 の 要 旨

[批評]

本論文は、現在および将来の光通信技術で重要な役割を果たす、InP系のヘテロバイポーラトランジスタに関するもので、その中でInGaAsSbをベース材料に用いたものに注目している。この材料は、バンド構造としてはデバイスの特性向上には魅力的であることが明らかであったものの、その結晶成長やドーピング技術など基本的な部分で未解明な問題が多く、応用までにはかなり時間が必要であると考えられていた。本研究は、これらの基本的な結晶成長技術やデバイス設計および、その電気特性評価に取り組み、従来まで作製されているデバイスと同等以上の性能を得ている。また、デバイス構造そのものにオリジナ

ルな構造を提案し、実際の性能向上を確認している。これらの成果は、結晶成長技術の学術的貢献とともに、電子デバイスの応用分野の発展に対しても貢献する重要なものと判断される。また、本研究の成果と従来研究との関係および将来の展望も詳細に分析しており、研究および関連知識に関する著者の能力の高さも確認された。以上のことから、本論文は学位授与にふさわしいと判断される。

〔最終試験結果〕

平成27年2月16日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。