

外94-13

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

Characterization and Devices Application of GaSb and
Related Compounds Grown by Molecular Beam Epitaxy
(分子線エビタキシにより成長されたGaSb系化合物
半導体の評価とデバイスへの応用に関する研究)

申請者
児玉 充

MITSURU KODAMA

1994年 7月

ここ数年、オプトエレクトロニクス分野において光通信デバイスの開発が進展し、既に幾つかのデバイスが実用化されている。特に、光通信として使用されている石英系光ファイバーの長波長帯（1.3～1.7 μm ）での損失低減に伴い、この波長帯での発光、受光素子として、III-V族化合物半導体の研究が現在活発に行なわれており、この波長帯に対応する発光、受光素子であるInGaAsP系を中心とした材料の研究が進んでいる。また、現在各国にて研究中であるフッ化物系の光ファイバーは2 μm 以上の波長領域に石英系光ファイバーを上回る最低損失を有し、この波長帯での発光、受光素子としてGaSb系の化合物半導体が有望視されている。

一方、光ファイバ通信用デバイスの基礎となる電子材料であるIII-V族化合物半導体の結晶成長の研究も精力的に行われており、代表的な結晶成長法のキーテクノロジーの一つである分子線エピタキシ法(MBE)は、超格子構造を初めとした多くのIII-V族化合物半導体の結晶成長が過去行われている。

以上の背景に鑑み、本論文では分子線エピタキシによりIII-V族化合物半導体であるGaSb系混晶の結晶成長を行ない、それらの結晶評価とデバイスへの応用についての研究結果を述べている。本論文では全8章からなり、以下にその構成を示す。

第1章は「序論」であり、本研究の背景や関連する従来の研究について概説するとともに、本研究の目的について述べている。

第2章「MBEにおけるGaSb基板の表面清浄化法の研究」

MBEにおいて成長前における基板の前処理は、成長の第一ステップとして特に重要なプロセスである。従来、MBEにおけるGaSb基板の表面清浄化法については、GaAs基板やInP基板におけるそれと比較して詳細な報告例が殆どなく、そこで本研究では良質なGaSb系混晶結晶を得るためにGaSb基板の表面清浄化法についての最適条件を確立する検討を行なった。

前処理の最適化条件として、第一に平坦な基板表面が得られること、第二に基板表面の酸素、カーボン等の残留不純物がなくなることが重要であり、上記2つの条件を同時に満足する最適な前処理を検討した結果、以下の事が判明した。第一には成長されたGaSbの表面モロロジーが前処理により大きく影響を受けること、第二にGaSb基板表面の残留カーボンの影響によりGaSb成長層に積層欠陥が生じ成長層を劣化させること、第3に残留カーボンがGaSb基板とGaSb成長層間のオーミックコンタクトに影響を及ぼすことである。

これら前処理条件を最適化した結果、室温においてGaSb基板表面の酸化物の大部分を効果的に除去し、平坦な基板表面が得られるエッチング処理を開発した。これにより比較的低温（約250℃前後）にて残留酸素を完全に除去し、さらにGaSb系の成長温度範囲である約500℃前後において残留カーボンのない清浄なGaSb基板表面が得られた。この方法により良質のGaSb薄膜の成長が可能となった。

第3章「MBE-GaSb, InGaSb成長膜における結晶欠陥の評価に関する研究」

半導体薄膜のデバイスへの応用を行なうにあたって、成長膜の結晶欠陥は極力低減さ

れることが必要である。本研究ではMBE成長させたGaSb, InGaSb成長膜の結晶欠陥の発生メカニズムについて、光照射下でのHCl処理により効果的に結晶欠陥を露出させ、結晶欠陥と電気的特性との関連について検討が行われ、以下のことが判明した。

GaSbのホモエピタキシでは、成長膜の結晶欠陥は基板の品質、前処理及び熱処理条件により依存することが明かとなった。つまりGaSb基板における転位が成長膜にも伝搬し基板と同程度の転位密度を発生させた。さらに基板上的カーボンの残留不純物が積層欠陥を発生させたり、基板の熱処理により発生した基板上的欠陥が成長膜にも伝搬し成長表面を著しく劣化させることが判明した。

一方、GaAs基板上的InGaSbのヘテロエピタキシでは、成長膜と基板との格子不整合によりミスフィット転位と積層欠陥を発生させ、その転位密度は $10^8 \sim 10^{10} \text{cm}^{-2}$ にも達するだけでなく成長膜の電気的特性（移動度）も著しく劣化させた。この格子不整合による転位密度の増加と電気的特性の劣化は次の方法により緩和できた。第一にGaAs基板とInGaSb成長膜の間にAlSbやAlInSbのバッファ層を成長させること、第二にInGaSb成長層の膜厚をコントロールすることであった。この方法によりundoped-In_xGa_{1-x}Sb(0<x<0.2)の成長層について他の結晶成長法（液相エピタキシ法）にて行われたGaSb基板上的undoped-In_xGa_{1-x}Sb(0<x<0.2)とほぼ同程度の品質の成長膜が得られた。

第4章「MBE-GaSb成長膜におけるMorphological欠陥に関する研究」

GaSb系MBE成長特有の成長欠陥（Morphological欠陥）の発生メカニズムと電気的特性さらにはデバイスへの影響について以下のことが判明した。MBE成長中に発生するMorphological欠陥には2種類存在し、一つはGaの液滴そのものであり、他はGaSb成長表面に付着したGaの液滴からのGaSbの成長物であった。Morphological欠陥の密度はGaSbの成長速度に比例し、これはGaセルの温度上昇がMorphological欠陥の原因となるGaの液滴の噴出を増大させたことに起因した。しかしこの欠陥はGaSbの成長速度を低く（0.5 $\mu\text{m/h}$ 以下）することにより十分に低減させることが可能となった。更に、異なる成長速度で成長させたGaSbのダイオードを製作しそれらの逆方向特性の分布について調べた結果、Morphological欠陥が逆方向のリーク電流を増加させる要因となることが判明した。この結果はGaSbのホトダイオードへの適用を考えた場合、逆方向特性を改善する必要があるが、GaSbの成長速度を低く抑えることによりMorphological欠陥を低減させ、その結果良好な逆方向特性を有するダイオードを得ることが可能となった。

第5章「In_{0.23}Ga_{0.77}Sbによるプレーナ型電子遷移効果デバイスに関する研究」

InGaSbはGaAsと比較して電子遷移効果デバイス（ガンダイオード）として適しており、過去LPE法によるInGaSbの結晶成長とそのガンダイオード製作が報告されている。しかし、これらは半絶縁性基板等適当な基板の上に成長され製作されたデバイスではなく、基板のないバルク型のものであった。MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)への応用を勘案すると適当な基板上でのデバイス製作が必要であった。ここでは、基板としてGaAs及びGaSbを使用し、4種類の構造(InGaSb/GaAs, InGaSb/InAlSb/GaAs, InGaSb/GaSb, InGaSb/InAlSb/GaSb)からなるガンダイオードを製作し、ガンダイオードのしきい値電界

(負性抵抗を示す電界強度)の観点より最も適したデバイス構造についての評価が行われた。またデバイス製作において必要となるInGaSbの電極(Au/Sn)の接触抵抗の最適化についても検討を行なった。

GaAs基板を使用した構造ではInGaSbとの格子不整合によるInGaSbの電子移動度の低下が大きく、InAlSbのバッファ層を挿入した構造により電子移動度のある程度の改善は図られた。しかし、ガンダイオードのしきい値電界は理論計算による値よりかなり高い結果が得られた。これに対しGaSb基板上での2種類の構造についてはGaAs基板での結果と比較して電子移動度としきい値電界はかなり改善された。この改善されたしきい値電界(1.2kV/cm)は理論計算値(0.6kV/cm)と比較して高いが、これは実験値と計算値におけるキャリア濃度の違いによりionized impurity scatteringの影響が生じた結果と推定された。以上これら4種類のデバイス構造の検討結果より、GaSb基板とバッファ層の適用によりInGaSbガンダイオードのしきい値電界の改善が可能となった。

一方、InGaSbとAu/Snとのオーミックコンタクトに関する検討を行なった結果、接触抵抗はアロイ温度に依存し、約250℃付近で最小の接触抵抗が得られた。

第6章「GaSb, Al_{0.3}Ga_{0.7}Sb/GaSb ホトダイオードに関する研究」

GaSb, Al_{0.3}Ga_{0.7}Sbは光ファイバの伝送損失が小さくなる1.0~1.7μmの光波長領域の受光素子としての材料として適しており、GaSbホトダイオード及びAl_{0.3}Ga_{0.7}Sb/GaSbヘテロ接合からなるホトダイオードを製作し、光検出器に要求される性能条件の一つである低暗電流化のための最適条件に関して検討を行なった。

検討の結果、メサエッチ処理後のGaSb表面の残留酸化物(Ga₂O₃, Sb₂O₃)がリーク電流の増大を引き起こしており、これを除去することによりリーク電流をかなり抑制できることが判明した。その方法として室温にて効果的にGaSb表面の残留酸化物(Ga₂O₃, Sb₂O₃)を除去可能なメサエッチ処理と真空中又は窒素ガス下でのホトダイオードのアニール処理(約250℃)により、表面リーク電流を低減し逆バイアス特性を改善することが可能となった。この方法はAl_{0.3}Ga_{0.7}Sb/GaSbホトダイオードにも適用されGaSbホトダイオードと同様にこの改善効果が確認された。

第7章「GaSbショットキダイオードに関する研究」

製作簡易な受光素子としてショットキ接合ホトダイオードがあり、GaSbのpnダイオードと同様に逆バイアスリーク電流は大きく理想的なショットキ特性とは異なるものであった。これは金属と半導体表面に存在する酸化物の影響によるものであり、金属の蒸着前に清浄な半導体表面を獲得することが理想的なショットキダイオードを得るための重要課題であった。本研究ではGaSb基板の清浄化検討にて得られた方法によりAu-GaSbショットキダイオードを製作し理想特性に近いショットキダイオードを実現した。これにより逆バイアス特性のリーク電流は低減され性能の高い受光素子への適用可能性を示した。

第8章は「結論」であり、本研究で得られた知見をまとめると共に今後の課題について言及している。