

氏 名	ただのひろし 只 野 博
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 55 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	化合物半導体の結晶欠陥に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 西沢 潤一
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 西沢 潤一 東北大学教授 高橋 正 東北大学教授 沢田 康次

論 文 内 容 要 旨

本論文は、西沢によって提案された蒸気圧制御温度差液相成長法でエピタキシャル成長させたⅢ-V族化合物半導体結晶中に含まれる，種々の欠陥や転位に関する論文である。

化合物半導体結晶には，化学量論的組成からのずれによる欠陥が存在する。Ⅲ-V族化合物半導体結晶における化学量論的組成からのずれは，主としてV族元素がⅢ族元素より高い蒸気圧を有していることに依存し，それに起因した点欠陥が半導体結晶の特性に多大な影響を及ぼすことが指摘され，系統的な研究が展開されてきている。蒸気圧制御温度差法は，西沢により開発された化合物半導体の液相エピタキシャル成長に最適な成長法である。この成長法を用いることにより，結晶中の点欠陥を制御でき，その挙動を推察することができる。

一方，1957年に渡辺・西沢によって半導体レーザが提案されて以来，オプトエレクトロニクス用半導体装置等として，異種接合を有する半導体装置が数多く作られてきている。しかしこれら異種接合には格子定数の差が存在し，半導体装置の特性低下の要因となっている。これに対し，西沢はいち早く格子定数を一致させることの重要性を主張し，その方法について提案している。

本論文ではこの方法を確立するために，格子定数の不一致により発生する種々の格子歪や転位の観察を行なった。

第2章では，結晶中の欠陥の種類と本研究で用いられた種々の欠陥の観察方法について述べている。

半導体結晶中の欠陥として主なものは、点欠陥、転位そして積層欠陥である。特に化合物半導体結晶では、複雑な点欠陥が発生することが考えられる。又転位特にらせん転位や積層欠陥は、結晶成長に対して重要な成長核として働くことが指摘されている。これら欠陥を観察する方法として、本研究では光学顕微鏡、X線回折を用いた観察および電子顕微鏡を用いた観察が行なわれた。また点欠陥の挙動を知るために、印加As圧に対する成長結晶の種々の特性の依存性が調べられた。

第3章では、本研究で用いられた蒸気圧制御温度差法による結晶成長方法について述べている。

蒸気圧制御温度差法 (Temperature Difference Method under Controlled Vapor Pressure, TDM-CVP) は、溶液の上下の温度差により溶質を拡散させて、結晶を一定の温度で成長させ、さらに結晶成長中にV族元素の蒸気圧を溶液上より印加し、結晶の化学量論的組成からのずれを制御しようとする液相エピタキシャル成長法であり、GaAs, GaAlAsP, GaP等の結晶成長に用いられている。

本研究では、(001)面を有するGaAs基板結晶上にGaAsまたはGaAlAsP結晶をTDM-CVPにより成長し、成長層に含まれる種々の欠陥の観察を行なった。

第4章は、液相エピタキシャル成長した結晶の表面モルフォロジーについて述べている。観察は主として光学顕微鏡を用いて行なった。

エピタキシャル成長層の表面には、しばしば積層欠陥が観察される。積層欠陥は横方向の成長を妨げることが、Siの気相成長等で観察されているが、GaAs等の液相成長においても成長のステップの横方向への拡がりを妨げることが観察された。また積層欠陥の発生要因の一つが基板結晶表面の損傷であることが確かめられた。

GaAsやGaAlAsP成長層の原子的オーダーで平坦なフェセット表面では、らせん転位の存在によるうず巻成長層が観察された。図1-(a)及び(b)は、GaAs及びGaAlAsP成長層で観察されたうず巻成長層の光学顕微鏡写真である。このうず巻模様は発生因であるらせん転位の回転の方向等によって種々の形態を示すことが観察された。うず巻成長層のステップ間隔は結晶の成長温度が高くなるほど広くなることが調べられた。(成長温度600℃でステップ間隔は約2.5μm, 650℃で約4μm, 700℃で約5μmであった。) またステップの高さが多重干渉法を用いて測定され、ほぼ結晶の格子定数程度であることが求められた。そしてこのステップの移動速度はフェセット表面において $2.9 \times 10^3 \mu\text{m}/\text{min}$ にもなることが求められた。

これら結晶の表面モルフォロジー観察により、結晶の二次元成長が推論された。

第5章では、GaAs成長層中の点欠陥の挙動について、その諸特性のAs圧依存性より述べている。

図2-(a),(b)及び(c)は、成長温度700℃で成長したGaAs成長層の電氣的、光学的及び結晶学的特性の印加As圧に対する依存性を示している。これらの特性のAs圧依存性は、As圧を印加したGaAs結晶の熱処理実験の結果と類似しており、特性を左右する点欠陥としてGaAs液相成長においても、低As圧側でAsの空格子点、また高As圧側でAsの格子間原子が考えられる。さらに最適As圧を印加して成長することにより、点欠陥密度が最小となることがわかり、

この最適As圧はGaAs熱処理実験で示された温度依存性に等しい成長温度依存性をもつことが調べられた。

第6章では、化合物半導体異種接合における格子歪と、導入されたミスフィット転位について述べている。

GaAs-GaAlAsP異種接合における格子歪は、Al及びPの組成比で変化する。本研究では、溶液中に投入したPの量によるGaAs基板結晶及びGaAlAsP成長層の縦方向及び横方向の格子間隔が測定され、特定のPの投入量において成長層の格子間隔が基板結晶のそれに一致することが示された。また例えばPの投入量が少ない場合には、成長層は横方向に縮められ縦方向に伸ばされているのが測定された。

さらに、GaAs-GaAlAsP異種接合に導入されたミスフィット転位が、X線回折法、光学顕微鏡そして電子顕微鏡を用いて観察された。そしてGaAs-GaAlAsP異種接合では、ミスフィット転位は〔110〕方向にまず導入されやすいことが明らかとなった。さらに成長層の格子定数が基板結晶よりも小さくなったり、成長層の厚さが増すと、2つの直交する<110>方向にミスフィット転位が導入されるのが観察された。その関係を図3に示す。またこれより、Al及びPの組成比の厳密な制御と成長層の厚さの制御により無歪で無転位のGaAs-GaAlAsP異種接合が成長できることが実験的に確かめられた。

ミスフィット転位は〔110〕方向と〔 $\bar{1}\bar{1}0$ 〕方向の転位間に相互作用が存在することが、光学顕微鏡及び電子顕微鏡を用いて観察された。また〔 $\bar{1}\bar{1}0$ 〕方向の転位の一部は刃状転位であることが求められた。

次にミスフィット転位を発生させる臨界のディファレンシャル・ストレインが初めて実測され数Åのオーダーであることが求められ、転位導入に対する一応の傾向が示された。

第7章は、格子定数の異なる接合を有する結晶中に発生する格子歪の数値解析について述べている。

図4はこの解析で用いられた単純な2次元の立方格子モデルを示している。この解析により異種接合を有する結晶中の横方向の格子間隔の変化が求められた。その一例を図5に示す。さらに結晶の曲率半径の変化そしてディファレンシャル・ストレインの変化が求められた。

第8章は結論である。

- (1) III-V族化合物半導体結晶では、蒸気圧制御温度差法を用い最適As圧を印加して結晶を成長することにより、化学量論的組成からのずれの最小な結晶が成長できる。
- (2) 結晶表面が光学顕微鏡を用いて観察され、積層欠陥やらせん転位が成長中心として働くこと等が示された。
- (3) GaAs-GaAlAsP異種接合において導入される格子歪やミスフィット転位が測定され、格子歪はAlとPの組成比の厳密な制御によりなくなること、ミスフィット転位は〔110〕方向に導入されやすいこと、臨界のディファレンシャル・ストレインが数Åであること等が求められた。
- (4) 格子歪の分布が2次元の格子モデルを用いて解析され、実際の場合と比較された。

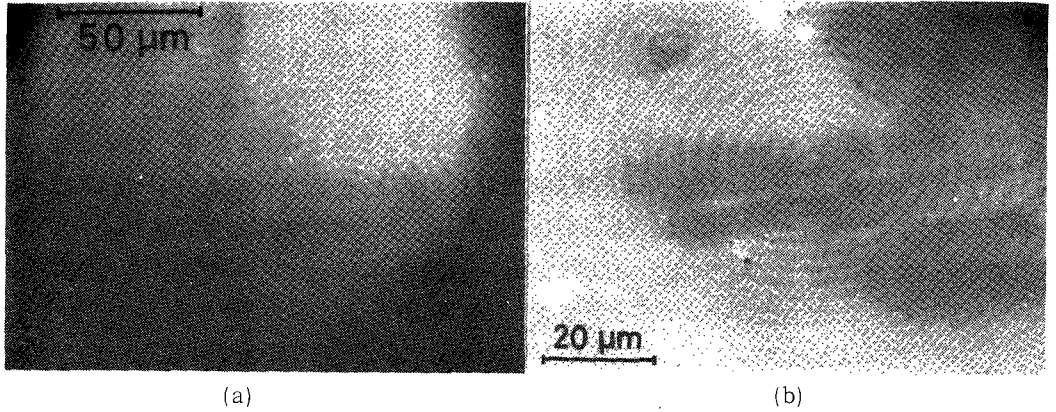


図1. らせん転位によるうず巻成長層
 (a) GaAs 成長層, (b) GaAlAsP 成長層

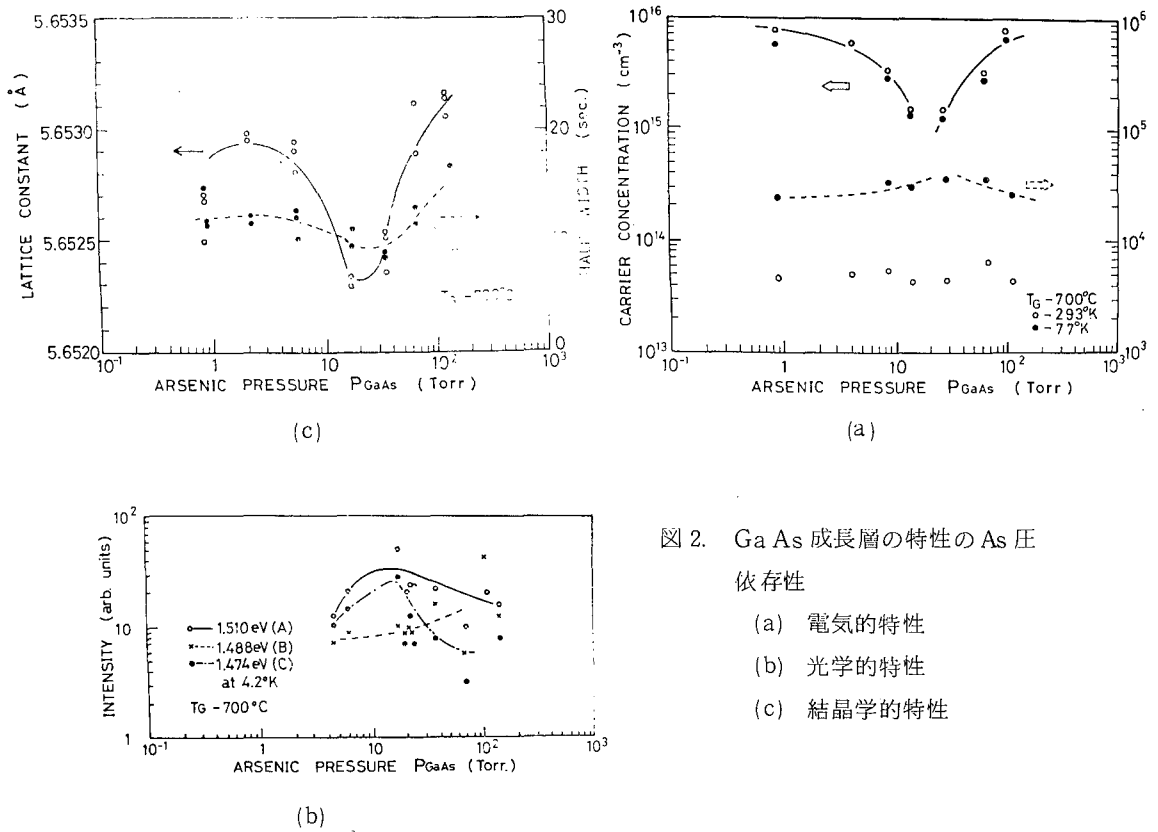


図2. GaAs 成長層の特性のAs圧依存性
 (a) 電気的特性
 (b) 光学的特性
 (c) 結晶学的特性

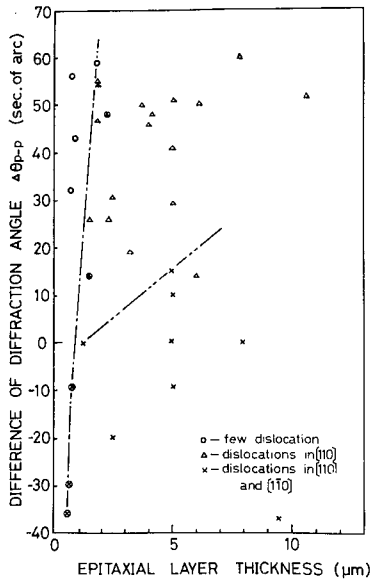


図3. ミスフィット転位の種類と格子歪, 成長層厚さとの関係

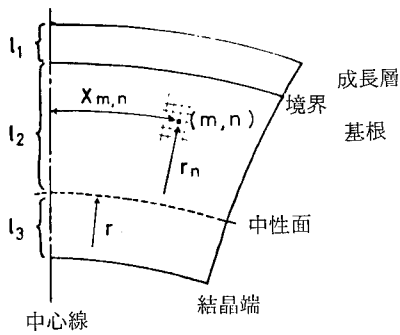


図4. 格子歪解析の格子モデル

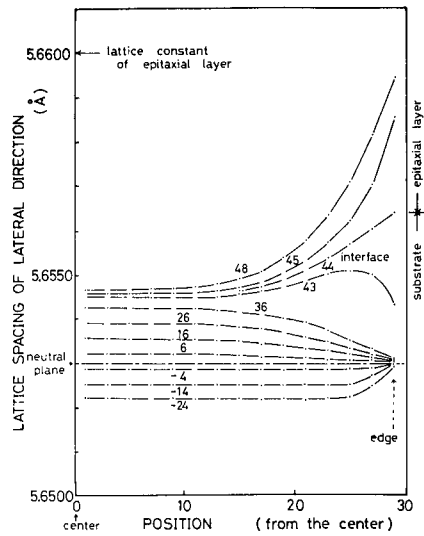


図5. 横方向の格子間隔の分布 (成長層は4層)

審査結果の要旨

ⅢV族間化合物半導体はレーザや発光ダイオードとして光通信に、電界効果トランジスタとして電気通信に、最近急速に実用化がはじまっている将来の重要材料である。

しかし、シリコン結晶に比較すると未だ純度も完全性も充分でなく、特に化学量論的組成よりのずれは今後の研究に待たねばならない点が多い。

本論文は、化学量論的組成よりのずれを抑えながらⅢV族間化合物に第三、第四の成分を混入することにより、格子不整を抑えて転位の導入を阻止するための研究をとりまとめたもので、全文8章よりなる。

第1章は序論であって、本研究の企画された経緯についてのべている。第2章は、半導体結晶中の転位とその観察方法について略述したものである。第3章は本研究に使用した結晶の育成方法とその従来法に対する特徴についてのべたものである。

第4章では、前章でのべた方法によって育成した結晶の表面に現われるモルフォロジーについて総括し、且つ、結晶内部に存在する転位などの欠陥との関係について二三の新しい知見についてのべている。特に、渦巻き転位の確認及び面成長機構との結びつけが行われたのは大きな成果である。また、格子不整とクロスハッチパターンとの関係を明確にしたのも新しい成果である。

第5章では、化学量論的組成と電気的及び結晶学的特性との関係について従来の結果を中心として本研究の結果をまとめて述べている。第6章は、前章までの成果にもとづき、基板結晶とは成分と組成の異なったⅢV族間化合物半導体結晶薄膜を成長させたときの格子定数や結晶の歪を測定し、格子定数の整合した薄膜結晶の成長を得るに至った測定結果についてのべたもので大きな成果である。

第7章は、単純化した立方格子模型についてはあるが、格子定数の異なった薄膜結晶を基板の上に育成したときの歪の分布を数値解析したもので、前章の結果と定性的によく一致する結果を得、原子層間での格子点の位置のずれが数Åの長さになると転位が導入されるという妥当な結論を得ている。このような応力の入った結晶内部の歪の分布と物性的な機構とを結びつけたのは新しい成果であると考えられ、注目すべき成果である。第8章は結論である。

以上要するに、本論文は格子定数の異なる結晶接合の力学的・結晶学的状態を明白にしたもので、半導体材料学及び半導体電子工学に資するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。