

外 3-45

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

G a A s 結晶の欠陥形成機構と
その低減法に関する研究

申 請 者

山 田 孝 二

K o h j i Y a m a d a

平成 年 月

GaAs結晶は、Siに比べ電子移動度が4-6倍早く、室温で $10^7 \Omega \text{cm}$ 以上の高抵抗を示す特徴のため、高速電子デバイス用半導体として注目されている。特に、金属-半導体接合電界効果トランジスタ(MESFET)を利用した高速ICは、実用化の段階を向かえており、いっそうの高性能化が望まれている。また、GaAsやAlGaAsの薄膜を用いたヘテロバイポーラトランジスタ(HBT)や、高電子移動度トランジスタ(HEMT)も超高速デバイスとして期待されている。これらのデバイスの性能を十分発揮するためには、品質の高い結晶が不可欠である。しかし、GaAsは蒸気圧の高いV族元素(As)を含む化合物であるため、結晶成長時に成長法に依存した多くの欠陥が発生する。GaAsの特徴を十分に引き出したデバイスを実現するためには、高品質な結晶が不可欠である。

液体封止引き上げ(LEC)法GaAsは、安定な半絶縁性を持ち、大型(2-3インチ以上)・円形の基板ウェハが得られることから、GaAs-IC用基板として用いられている。GaAs-ICは、半絶縁性のGaAs基板に直接イオン注入によりMESFETの能動層を形成して作製するが、LEC法GaAsウェハ上に作成したFETは、素子ごとの特性の不均一が大きく、集積回路の高性能化の障害となっている。この素子特性不均一はLEC法結晶に高密度に存在する結晶欠陥(転位)の分布と関係し、高密度な転位の主原因は成長時の結晶内熱応力であると考えられている。このため、成長温度環境の改善による熱応力低減や、In元素添加による結晶硬化効果を利用した低転位化が進められている。しかし、なお完全無転位結晶は実現されていない。また、GaAs結晶中には転位以外にも析出物等の微小な欠陥が存在する。このような欠陥の電気特性への影響も懸念されるが、この欠陥の起源や制御法もよく判っていない。

一方、分子線エピタキシー(MBE)法や、有機金属気相成長(MOVPE)法による薄膜結晶は、HBTやHEMT等のデバイスに用いられている。これらのデバイスの性能を高めるためには、キャリアの再結合中心や捕獲中心として働く電氣的欠陥(深い単位)を低減する必要がある。この低減法としてIn元素添加法が注目されているが、この方法に伴う格子不整の悪影響が懸念されている。

本論文の目的は、GaAs結晶中の欠陥の形成機構を解明し、その低減をはかることにより高品質な結晶を実現することにある。LEC法GaAs結晶では、IC用基板として最大の問題である転位の発生機構を解明し、無転位化に必要な新しい成長法を提案する。この成長法とIn元素添加法との併用により、完全無転位結晶が実現できることを示す。次に、無転位化した結晶中に新たに発生する微小欠陥について、その形成機構、電気特性との関係を明らかにし、制御法を提案する。また、薄膜結晶の高品質化のために、等電荷元素(In)添加による深い単位低減について検討する。等電荷元素添加法の問題点であった基板とエピ層の格子不整の影響を明らかにし、格子不整を伴わずに深い単位を低減する方法を新に提案する。

本論文では、対象とする結晶欠陥ごとに研究成果を第二(転位)、三(微小欠陥)、四欄(深い単位)に分けて述べている。以下、編、章をおってその概要を述べる。

第一編は序論であり、第1章で、GaAs結晶の特徴と従来の研究の概略を述べ、第2章で本論文の目的と構成について述べる。

第二編は、液体封止引き上げ(LEC)法GaAs結晶の転位の発生機構と、無転位結晶の成長法について述べる。第1章では、LEC-GaAs結晶の特徴を述べ、本研究で用いた実験装置、評価法の説明を行う。第2章では、LEC-GaAs結晶の高密度の転位の原因である、成長時の結晶内熱応力を低減するための成長条件を明らかにする。2.2節では、有限要素法による結晶中温度分布の計算方法、及びこの温度分布と熱応力の関係を述べる。2.3節では、LEC法結晶の成長時の結晶内温度分布の特徴を明らかにする。2.4節では、この計算結果をもとに熱応力低減に必要な温度環境について考察する。この考察をもとに、2.5節では、封止剤を厚くしその中で結晶を成長・冷却する成長法-完全液体封止法(FEC法)-を提案し、この方法が低転位化に有効なことを示す。

第3章では、熱応力を低減した成長条件下での無添加無転位結晶の成長について述べる。3.2節では、ネッキングによる伝播転位の低減について述べる。3.3節では、低温度勾配下でのネッキングで除去困難な、少数の<001>軸転位の性質を明らかにする。3.4節では、成長方位の選択による伝播転位の完全除去について述べる。3.5節では、炉内温度勾配と無転位結晶の臨界直径の関係について述べる。そして、完全液体封止法とネッキング法による、従来の2倍の大きさの直径10-12mmの無添加無転位結晶の実現を示す。3.6節では、直径10mmの無転位結晶の電気特性均一性の評価結果について述べる。無転位化によりウェハ面内の電気特性が均一化することを明らかにし、無転位化の必要性を実証する。

第4章では、In添加法を用いた2インチ直径完全無転位結晶の成長について述べる。4.1節では、不純物添加による低転位化の背景を概説し、In元素添加が有望であることを述べる。4.2節では、In添加による低転位化の効果、及び、In添加により発生する問題点を確認する。4.3節では、In添加法と完全液体封止法との併用により、結晶外周部の応力誘起転位発生を抑制できること、しかし、In添加結晶の中心部には、種子結晶から伝播した高密度の転位が局所的に存在することを示す。4.4、4.5節では伝播転位の除去法として、無転位種子を用いる方法を提案し、伝播転位を形成しない条件を明らかにする。また、伝播転位の形成機構を考察する。4.6節では、完全液体封止法、In添加法、無転位種子法の併用により、直径2インチの完全無転位結晶が成長できることを示す。

第三編では、LEC-GaAsの無転位化により新たに発生する微小欠陥について述べる。第1章では、従来の微小欠陥の研究を概説し、次に微小欠陥の評価法について述べる。第2章では、無転位GaAs結晶中の微小欠陥の検出法を確立し、

微小欠陥の結晶成長条件依存性を明らかにする。2.2節では、エッチング法、赤外散乱法による欠陥の観察結果を示す。2.3節では、二つの検出法による欠陥像の対応関係を考察し、エッチングによる微小ビット欠陥、赤外散乱法による散乱欠陥が同一の結晶欠陥に対応することを明らかにする。これにより、両方法による無転位 GaAs 結晶中の微小欠陥の検出法を確立する。2.4節では、微小欠陥の結晶成長条件（冷却履歴、結晶組成、不純物濃度）依存性を明らかにする。この結果をもとに、過剰なひ素原子の析出による微小欠陥形成機構を考察する。

第3章では、無転位結晶の微小欠陥と電気特性、とくに半絶縁性を支配する深い準位 EL2 との関係について述べる。3.2節で、結晶の熱履歴（成長時の冷却履歴、及び成長後の熱処理）と EL2 濃度の関係を実験的に明らかにする。この結果をもとに、EL2 濃度は成長時熱履歴に依存するが、成長後熱処理により均一化できることを示す。3.3節では、融点近くの高温度熱処理により、微小欠陥の熱履歴依存性を消去できることを示す。3.4節では、前2節の結果をもとに、EL2 濃度と微小欠陥の関係について考察し、ともに過剰なひ素原子の挙動により説明できることを示す。3.5節では、高温熱処理と中温熱処理により、安定な半絶縁性に必要な高 EL2 濃度と均一な微小欠陥分布が同時に実現できることを示す。また、この結晶と有転位熱処理結晶を比較し、無転位結晶が均一性に優れていることを示す。

第四編では、バルク結晶の無転位化に効果のあった In 元素添加法の、薄膜結晶の品質向上への適用について述べる。第2章では、薄膜結晶への In 添加による深い準位の低減について検討し、2.2, 2.3節ではエピと基板結晶との格子不整が悪影響をもたらすことを示す。2.4, 2.5節では、In 添加の効果を In 原子周囲の局所歪によって考察する。2.6節では In 添加の効果をもとに In 原子の局所歪によって考察する。第3章では、GaAs 基板に格子整合する等電荷元素添加法について述べる。3.2節では格子整合をとるために必要な同時添加元素の選択条件を理論的に示す。これをもとに、3.3節では In と P の同時添加により、格子不整なしで深い準位が低減できることを実験的に示す。

第五編は、本論文で得られた主な結果をまとめて結論としている。

本論文では、GaAs 結晶の欠陥形成機構とその低減法について検討し、高品質な GaAs 結晶を実現する方法を提案した。特に、完全液体封止法により直径 10 mm の無添加無転位結晶を成長し、無転位化により電気特性が均一化することを実証した。また、In 添加結晶において、完全液体封止法、及び無転位種子法の併用により、実用サイズ（直径 2 インチ）の完全無転位結晶を実現した。さらに、無転位化後に発生した微小欠陥の形成機構の解明、制御法の提案により、一層の高均一結晶実現の可能性を明らかにした。