

論文審査の結果の要旨

氏名：奥 洞 明 彦

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：Study on ambient gas effect in the annealing of ion-implanted GaAs toward realizing superior JFETs

（高性能 JFET 実現に向けたイオン注入 GaAs のアニール時の雰囲気ガス効果に関する研究）

審査委員：（主査） 教授 中 川 活 二

（副査） 教授 山 本 寛

教授 高 橋 芳 浩

教授 高 野 良 紀

GaAs（砒化ガリウム）をはじめとする化合物半導体デバイスは、欠くことのできない半導体デバイスとして現代の情報通信を支えている。この GaAs 化合物半導体デバイスの研究開発当初は、キャリアを制御するために注入したイオンを活性化するためのアニール処理において、蒸気圧が高い As（砒素）が GaAs 基板から抜けてしまう現象である「砒素抜け」が大きな問題であった。学位申請者は、この問題を解決するために、GaAs へのイオン注入アニール時のキャリア活性化メカニズムをアニール時の雰囲気ガスに対して検討解析し、高い活性化率が再現性良く得られる雰囲気ガスとそのアニール条件を見いだした。この成果により、GaAs による JFET（Junction FET）の飛躍的な性能向上が図られ、この JFET の高速性能を立証した IC の実現に至った。

第 1 章 序章（Chapter 1: Introduction）

第 1 章では、スマートフォンなどで使われる現代の高速・大容量通信ネットワークで、GaAs 化合物半導体デバイスが、通信フロントエンドにおけるマルチバンド/マルチモード化を支える重要なデバイスの 1 つとなっていることを紹介し、GaAs 化合物半導体 JFET の研究開発に至った理由と、ローコストで高性能なデバイス実現のための本研究の意義を説明している。

第 2 章 背景（Chapter 2: Backgrounds）

第 2 章では、本研究で用いた GaAs 化合物の、結晶構造、結晶作製法、結晶の特徴等について述べている。また、As の蒸気圧が高いために、半導体材料として用いるための不純物イオンを注入した後のアニール時において、As が蒸発して消失する現象が、デバイス作製上大きな問題であることなど、GaAs デバイス技術の背景を示している。

第 3 章 GaAs FET のイオン注入/アニールにおける課題

（Chapter 3: Previous work for ion implantation and annealing of GaAs）

第 3 章では、GaAs の不純物として Si を選択した理由を述べ、また、アニール時の「砒素抜け」を防ぐ手法として、GaAs 表面に保護膜を形成するキャップアニール法、保護膜の無いキャップレスアニール法について紹介し、キャップレスアニール法を選択したことを述べている。コストの面から、1 枚の GaAs 基板表面を上にして保持する Face-up 法と呼ばれるキャップレスアニール法を本研究で選択した経緯を説明している。また、Face-up 法では、当初、水素ガスをキャリアガスとし、「砒素抜け」を抑制するために過剰砒素圧の雰囲気ガスでアニールを行ったが、十分なシートキャリア濃度が得られず、イオン注入した Si の活性化率が低下することが課題となったことを説明している。

第 4 章 Si をイオン注入した GaAs における雰囲気ガスの効果

（Chapter 4: Ambient gas effect on activation of Si ion-implanted GaAs）

水素ガスの代替として Ar を選択し、Face-up 法においても注入した Si の十分な活性化率が得られることを見いだした。さらに、水素ガスと Ar ガス分圧を変化してアニールを行って解析した結果、キャリアガスとして水素ガスを用いたときのアニールにおいて Mn アクセプタが GaAs 基板表面に発生することで、

イオン注入した Si の活性化を低下していたことが示唆された。さらに Secondary Ion Mass Spectroscopy (SIMS) 分析による分析を行い、GaAs 基板表面に Mn が含まれていることを確認した。

更なる解析で、アニール時の水素ガスによるエッチングが起これ、そのエッチングの活性化エネルギーは、Ga の蒸発の活性化エネルギーと一致したことから、GaAs 表面が水素ガスと反応して As がエッチングされているメカニズムを推定した。Quadrupole Mass Spectrometer (Q-mass) と Particle Induced X-ray Emission (PIXE) 分析より、上記推定のメカニズムの妥当性を検証した。

以上から、水素ガスをキャリアガスとして用いたアニールでは、水素ガスにより GaAs 表面がエッチングされ、その過程で Mn が表面に生成することが考えられた。Mn 濃度が高いことから、第 5 章で GaAs の熱変性を調べて解析を進めた。

第 5 章 Un-Doped GaAs における熱変性

(Chapter 5: Thermal conversion in un-doped GaAs)

第 5 章での推測が正しければ、Si をイオン注入していないサンプルでも水素ガス中でのアニールで Mn の表面への拡散が起こると予想される。そこで、高抵抗の Un-doped GaAs 基板の水素ガス中アニール時の伝導性(熱変性) 評価の結果、水素ガス中のアニールでは、p タイプへの熱変性が確認され、一方水素を含まないガス雰囲気では熱変性は観察されなかった。以上から、アニール時の水素分圧に応じた Mn が GaAs 表面で検出された SIMS 分析結果と合わせて考えると、水素ガスが含まれるガス雰囲気中でのアニールで GaAs 表面がエッチングされると同時に GaAs に含まれていた不純物 Mn が表面に拡散していることが裏付けられた。また、SIMS 分析では、GaAs 表面に拡散した Mn 以外にも Si が検出されたことから、Mn と Si の拡散には相関があり、Mn の負イオンと Si の陽イオンがペアリングして拡散している可能性が示唆された。

さらに詳細なメカニズムを知るため、Si が GaAs 結晶中でどのような条件下でどのような格子位置にあるかを知るために、次章で Rutherford Back Scattering (RBS) と PIXE による分析を行った。

第 6 章 RBS/PIXE を用いた結晶評価

(Chapter 6: Crystallographic studies by RBS/PIXE)

高い濃度の Si を GaAs 基板にイオン注入し、アニール後の Si の格子位置を解析した。注入された Si は、ほぼ 100% 近くが格子位置を占有し、850°C で 10 分のアニールでは Si ドナーと Si アクセプタの占有比率はそれぞれ 80% と 20% であった。アニール時間を 60 分程度に長くするとそれぞれの占有比率は 65% と 35% まで変化し、いわゆるサイトトランスファーが起こることが示された。したがって、水素キャリアガスを用いたアニールでの GaAs 基板表面で Mn と同時に検出された Si は、GaAs 結晶のほぼ格子位置にあり、Si ドナーと Si アクセプタがほぼ等量存在するモデルが妥当と考えられる。このことから、Mn の表面への拡散は、Ga サイトの負イオンの Mn と、Ga サイトの正イオン Si と、As サイトの負イオンの Si が、多重にペアリングした結果であると推測された。

第 7 章 新しいアニール方法とそれを用いた FET/IC の効果検証

(Chapter 7: A new annealing method and evaluation of fabricated FETs and ICs)

第 7 章では、第 4 章、第 5 章、第 6 章の結果から見いだした Ar ガスを主体としたキャリアガスを用いたアニール法を提唱し、提案したアニール法で実現した JFET の高性能化、均一性、量産性向上、ならびに試作回路の高速化の検討について述べている。

提唱した主なアニール条件は、Ar / H₂ / AsH₃ (分圧比 600 Torr / 150 Torr / 3 Torr) の混合ガスで 850 °C / 10 min である。この新たに提案したアニール条件により、Face-up 法による縦保持アニールも可能となり、種々の特性を改善し、大幅な生産性向上に結びついた。

以上のように、本論文による水素ガス中でのイオン注入した Si の低い活性化率のメカニズム解明と、それに基づいた新しい雰囲気ガスでのアニール方法採用により、JFET デバイスの大幅な性能向上が達成され、同時に優れた量産性を確立できた。

第 8 章 まとめ

(Chapter 8: Summary)

第 8 章では、本研究で得られた成果とデバイス作製に応用した成果をまとめている。

第一に、GaAs の熱処理で問題となっていた Face-up 法での低活性化率の原因究明のために解析を行った結果、水素雰囲気下でのアニールでは、もともと基板中に存在していた不純物である Mn が表面へ拡散し、この Mn がイオン注入した Si の活性化率を低下し、Un-doped GaAs 基板では p タイプ熱変性の原因となることを解明した。

第二に、上記 Mn の表面への拡散は、水素ガスによる GaAs 表面のエッチングが原因であり、Ga と As の等量的エッチングが起きることで、もともと基板中に不純物として含まれていた Mn が表面に残留するとともに、基板内部からも表面に拡散したことを推定した。

第三に、上記のエッチングにおいては、GaAs 結晶内で、Ga サイトの Mn と、Ga サイトの Si と、As サイトの Si が多重ペアを作って表面へ拡散していくことが、RBS/PIXE を用いた Si の GaAs 中での格子位置観察の実験から示唆された。

以上の結果から GaAs アニール中のメカニズムを解明し、また Ar ガスを主体とするキャリアガスを用いた新しいアニール方法を提唱することで、GaAs の FET で飛躍的な性能の向上と、均一性、再現性、量産性などに優れたアニール方法を確立した。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、またはその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成 26 年 2 月 13 日