

論文の内容の要旨

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）

高性能な GaAs JFET (Junction FET) の実現に向けては、高温アニール時の砒素の蒸発が大きな課題となっていた。JFET の作製において、イオン注入した Si を活性化するために、水素ガスをベースに AsH₃ を導入して、過剰砒素圧下でアニールする方法がとられていたが、十分に高い活性化率は得られていなかった。特に量産に有利な GaAs 表面を雰囲気中に曝してアニールする Face-up 法（以下 FU 法と略す）では、ダミーウェハでキャップをしてアニールする Face-to-face 法（以下 FF 法と略す）に比べて、著しく低い活性化率しか得られない問題があった。

代替のキャリアガスとしてアルゴンガスを用いた FU 法において、格段に活性化率が向上し、均一性も向上した結果を踏まえ、水素ガスとアルゴンガスの分圧比を変化して活性化率向上の原因を調べた。その結果、水素ガスの分圧に比例して GaAs 表面がエッチングされ、GaAs ウェハ中に不純物として含まれていた Ga サイトの Mn アクセプタ Mn_{Ga} が表面近傍に拡散し、蓄積することにより、Si ドナーを補償していることを明らかにした。

さらに、代替ガスとしてアルゴンガスを主体とするアニールを提唱し、量産性、再現性にすぐれた製造プロセスを確立した。その結果、従来比で 2 倍以上のトランスコンダクタンス:電圧-電流増幅率 g_m 及びカットオフ周波数 f_t が得られ、6 GHz 以上の超高速動作の実現に至った。以下、本論文の Chapter に沿って概要を述べる。

Chapter 1: Introduction

GaAs デバイスは、通信の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。ローコストで高性能な GaAs デバイスの実現に向けて必要となる開発課題を明確にし、本論文の目的と意義について述べている。

Chapter 2: Backgrounds

GaAs は、電子移動度が Si に比べて 6 倍以上高く、バンドギャップも大きいことから、超高速デバイスとして期待されていた。しかし、熱伝導性など熱的な性質が Si よりも劣ることに加えて、蒸気圧が高いため、イオン注入後の熱処理において、砒素の蒸発を防ぐことが重要な研究課題であった。

様々なデバイス構造の GaAs FET が提唱されている中で、順方向バイアス電圧が最も大きく使いやすい JFET を研究開発対象とした。

JFET の高周波動作の性能指標 f_t を高めるには、大きな g_m を得ることが重要である。また、大きな g_m を得るためには、短ゲート化を図ると同時に、チャネル層のキャリア濃度を高く、厚みを薄く形成することが肝要である。従って、高性能な JFET の実現には、チャネル形成において、キャリアの拡散がなく、高活性化率を得られるアニール方法の開発が必須となる。

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

GaAs の n 型ドーパントとして、拡散係数や、毒性の観点から Si を選択した。GaAs へのイオン注入後のアニール方法としては、AsH₃ を用いた過剰砒素圧下でアニールを行うキャップレスアニール法を検討した。しかし、水素ガスをキャリアガスとしてアニールを行う方法では十分に高い活性化率が得られず、特に量産性が高い FU 法では活性化率が 68% 程度と著しく低かった。

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

水素ガス中でのアニールでの低活性化率の要因を探る為、不活性なガスとしてアルゴンガスを代替ガスとしてアニール中の雰囲気ガスの影響を検討した。AsH₃分圧一定のもと、水素ガスとアルゴンガスの分圧を変化してアニールを行ったところ、アルゴンガスの分圧に比例して、シートキャリア濃度が上昇し、100%アルゴン雰囲気では、FU法でも活性化率90%以上の高い活性化率が得られることを見出した。同時に、水素ガス中のアニールでは、キャリアを補償する捕獲中心がピーク濃度 $2 \cdot 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 程度、深さ $0.1 \cdot 0.4 \text{ }\mu\text{m}$ で表面近傍に蓄積している様子が $C-V$ 測定により示された。

フォトルミネッセンス測定より、バンド端から 100 meV のエネルギーに Mn_{Ga} アクセプタに起因する発光が確認され、水素ガス分圧との間に明確な相関があることを見出した。さらに、SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy) 分析による Mn の定量観察を行ったところ、表面から深さ $0 \cdot 0.3 \text{ }\mu\text{m}$ に原子濃度 $1 \cdot 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の Mn の蓄積が確認された。以上から、Mn の表面蓄積が水素ガス中アニールにおける Si 活性化率低下の主要因であることが定量的に示された。

この Mn が表面に蓄積する起源やメカニズムについて知見を得るため、水素ガスと GaAs 表面の反応を調査した結果、水素ガスにより GaAs 表面は $1.0\text{-}1.5 \text{ nm/min}$ でエッチングされていることを見いだした。そのエッチングレートは水素分圧の $3/2$ 乗に比例し、AsH₃ 分圧や Si イオン注入の有無には依存しなかった。エッチングの活性化エネルギーは 2.9 eV と見積もられ、この値は Ga の蒸発の活性化エネルギーと一致した。以上のことから GaAs の高温アニールにおいては、GaAs 表面でまず砒素と水素が反応して AsH₃ となって離脱し、その後 Ga が蒸発するという Ga と As の等量的なエッチングのモデルを得た。

Chapter 5: Thermal conversion in un-doped GaAs

高抵抗の Un-doped GaAs 基板を用いて水素ガス中アニールによる伝導性の変化(熱変性)を調べた。その結果、水素ガス中のアニールでのみ、p タイプへの熱変性が確認された。SIMS 分析では、水素分圧に相応した Mn の表面蓄積が確認された。同時に、Mn の表面蓄積量を上回る Si の表面蓄積が確認され、そのプロファイルは Mn の表面蓄積プロファイルと酷似していた。

以上の結果は、Mn_{Ga} アクセプタの拡散と Si_{Ga} ドナーの拡散が、同時に起こっていることを示唆しており、例えば Si_{Ga}-Mn_{Ga} などのペアリングを行って表面拡散を起こしている可能性を示している。観察された Si すべてが Si_{Ga} ドナーであるとする、今回の p タイプ熱変性を説明できないため、格子間原子、或いは Si_{Ga} とほぼ等量の Si_{As} アクセプタが存在し、キャリアとしては補償されている可能性が考えられる。そこで、Si が GaAs 中でどの様な条件下でどの様な格子位置にあるかを知ることが鍵となった。

Chapter 6: Crystallographic studies by RBS/PIXE

RBS (Rutherford Back Scattering) /PIXE (Particle Induced X-ray Emission) 分析を用いて GaAs 中の Si の格子位置を観察した。格子位置の決定には GaAs 結晶の結晶軸 $\langle 110 \rangle$ 周りの非対称性を用いた。その結果、注入された Si は、ほぼ 100% 近くが格子位置を占有し、Si_{Ga} と Si_{As} の占有率はそれぞれ 80% と 20% と評価された。また、高温かつ長時間のアニールではこの値はそれぞれ 65% と 35% まで変化し、いわゆるサイトトランスファーが起きることが示された。熱変性の実験においては、かなり過剰なアニール条件となっていることから、Mn の蓄積と同時に観察された Si はほぼ格子位置にあり、Si_{Ga} と Si_{As} はほぼ等量とするモデルが妥当であることが判った。同時に Mn の表面への拡散は Mn_{Ga}⁻-Si_{Ga}⁺-Si_{As}⁻ の多重のペアリングの結果と推察された。

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

以上の結果を受けて提唱したアルゴンガスを主体とする新しいアニール方法により、FU法による縦型保持でのアニールが可能になり、生産性が大幅に向上した。また、作製した評価用 FET のピンチオ

フ電圧のばらつきが従来の水素ガスに比べて約 1/3 程度にまで減少し、JFET 単体における g_m も 650 mS/mm、 f_T で 65 GHz と従来比 2 倍以上の高性能化を達成した。さらに 1/4 分周回路の試作では 6 GHz の超高速動作が達成された。今回の水素ガス中で活性化低下のメカニズムの解明と、それに基づいた新しいアニール方法の採用で JFET デバイスの大幅な性能向上を実現し、また、優れた量産性をも確立した。

Chapter 8: Summary

本研究で得られた成果とそれをデバイス作製に応用した成果は以下のとおりである。

1. GaAs の水素雰囲気下での高温熱処理では、もともと基板中に存在していた不純物である Mn が表面に拡散するため、Si イオン注入においては活性化率の低下、また Undoped GaAs 基板では p-タイプ熱変性の原因となることを見いだした。
2. 上記 Mn の表面での蓄積は、水素ガスによる GaAs 表面のエッチングが原因であることを突き止めた。この時、Ga と As の等量的エッチングが起きることで、表面は鏡面状態となる。
3. RBS/PIXE を用いた GaAs 中における Si の格子位置観察の実験から、エッチングにおいては $Mn_{Ga}-Si_{Ga}-Si_{As}$ が多重ペアを作って表面へ拡散していくことが、示唆された。
4. アルゴンガスを主体のキャリアガスとする新しいアニール方法を提唱し、FET 作製に応用した結果、従来に比して飛躍的な性能の向上が FET 単体レベルでも回路レベルでも実証された。同時に均一性、再現性、量産性などにおいても優れたアニール方法であることを確認した。