

学位論文題名

ガリウムヒ素電界効果トランジスタの信頼性に関する研究

学位論文内容の要旨

ガリウムヒ素電界効果トランジスタ(以下、GaAs MESFET (GaAs metal-semiconductor field-effect transistor) と記す)は個別部品のみならず、既にマイクロ波モノリシック集積回路やデジタル用集積回路(GaAs IC)として実用化されている。現在のこのGaAs MESFETの発展には、目を見張る性能の向上に関する研究とともに、デバイスの高信頼化の研究が大きな比重を占めている。NTTの基幹通信システムに用いるデバイスに対しては、いわゆる民生品に比べて高い信頼性が要求されるため、信頼性の研究は、殊更重要である。

GaAs MESFETのNTT(電電公社)マイクロ波通信回線への導入は、当初、マイクロ波帯における低雑音性能に着目して、受信用増幅器について1970年代後半から始まった。これに続き、進行波管などの交換保守をなくすることをめざして、システムの全固体化による高信頼化を期待して、本研究の対象である、電力増幅用GaAs MESFETなどの導入が進められた。

電力増幅用GaAs MESFETのNTT通信回線への導入は、まず最初に、1980年、非常災害時の通信用機器から始めた。基幹回線用でないこの機器には、当初のAlゲートのGaAs MESFETを採用した。次に、高出力化(5W 6.5 GHz)が図られ、そして1981年には、高信頼化したGaAs MESFETを基幹回線「高能率マイクロ波デジタル方式用送信設備」に本格的に導入した。その後、各種の回線への導入を進め、1985年には更に高い信頼性が要求される「通信衛星CS-3搭載用中継器」に導入した。これらの個別部品の実用化研究を通して培った技術を、次に、GaAs ICの信頼性設計あるいは評価技術として応用・展開し、1988年には光通信方式「F 1.6G方式用中継器」、1989年には「実験衛星ETS-6搭載用中継器」にGaAs ICを導入した。また、次期商用通信衛星「N-STAR用マイクロ波モノリシックIC」の信頼性設計ルールを構築した。GaAsなどの化合物半導体を用いたデバイスの研究開発は現在も続けられており、信頼性に関する最も難しい問題は表面(界面)の制御である。

本論文は、このような背景のもとで電力増幅用GaAs MESFETなどを実用化するために信頼性の見地から進めた検討について記したものである。具体的には、GaAs MESFETの降伏現象であるドレイン耐圧の決定機構と耐圧での焼損故障(burnout故障)をシミュレーションで解明している。また、ゲート電極材料の合金化反応に起因したburnout故障、および、当初のAlゲートGaAs MESFETで発生する故障の抑制技術などを実験により示している。更に、数原子層厚さの極薄層をGaAs表面に設けるパッシベーションの概念(原子層パッシベーション)を提案し、これを実証している。本論文は6章から構成されている。以下に各章の要旨を記す。

第1章は序章であり、本研究の背景と目的を述べるとともに、各章の構成を記した。

第2章では、GaAs MESFETのドレイン耐圧を2次元シミュレーションによって解析している。GaAs表面にある表面空乏層とGaAs MESFETに固有の耐圧のゲートバイアス依存性との関係を検討し、表面空乏層が耐圧のゲートバイアス依存性を決める主要因であることを

初めて明らかにした。また、少なくともゲート電圧が浅い ($V_{GS} \sim 0$ V) 場合には、ドレイン電極側での電圧集中による衝突イオン化で生成した電子と正孔が、半絶縁性基板内の導電率変調を誘発し、これが耐圧でのburnout故障のきっかけとなることを、負性抵抗を示す直前の状態までシミュレーションを行うことにより示している。

第3章では、GaAs MESFETのショットキーゲート電極材料を二層構造Al/Ti/(GaAs)とした場合の、熱的安定性について検討している。Al単体とGaAs、あるいは、Ti単体とGaAsのショットキー接合の電気的特性は熱的に安定であるが、これらの材料を組み合わせた二層構造Al/Tiの場合では、熱処理によって障壁の高さが下がるなどの変化を示し、デバイスの電気的特性劣化の要因となることが判明した。また、この劣化現象はAlとTiなどの合金化反応に起因することを分析により示し、更に、この電極系はGaAs MESFETのburnout故障の原因となることを明らかにするとともに、この故障の抑制技術を述べている。

第4章では、Alゲート電極GaAs MESFETで観測されるno-pinch-off故障（ドレイン電流をゲート電圧で制御できなくなる故障）の抑制技術を記している。この故障には、エレクトロマイグレーションが関与していると従来から考えられていたが、実験的には明らかにされていなかった。高いエレクトロマイグレーション耐性を有すると期待できた、Alの表面をTiで覆ったTi/Al構造の配線試料を準備して、従来のAl単体の試料と比較することにより、エレクトロマイグレーションに対するTi/Al構造の優位性を示している。更に、Ti/Alをゲート電極に採用することでno-pinch-off故障を抑制でき、GaAs MESFETを長寿命化できることを明らかにしている。また、ゲート電極材料構造のエレクトロマイグレーション耐性とGaAs MESFETの故障モードの関係について論じている。

第5章では、GaAs表面の電気的特性を制御する技術として、数原子層厚さの極薄層を表面に設ける方法である、原子層パッシベーション構造を提案している。そして、この極薄層の具体例として、約1 nmの厚さのInP系あるいはGaP系化合物層を検討している。これらの極薄層をGaAs表面に設けることで、n形およびp形GaAsのバンド端フォトルミネッセンス強度が増強すること、すなわち、表面再結合速度を低減できたことを示している。更に、この表面改質効果は、GaAsの表面のバンドの曲がりが増加したためであることをX線光電子分光法で明らかにし、また、金属絶縁体半導体ダイオード(M/SiO₂/GaP/n形GaAs)を作製し、未処理のGaAs表面に比べて界面トラップの影響を低減できたことを示している。

第6章では、本論文の結論を述べている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	長谷川	英機
副査	教授	雨宮	好仁
副査	教授	福井	孝志
副査	教授	陽	完治
副査	助教授	橋詰	保

学位論文題名

ガリウムヒ素電界効果トランジスタの信頼性に関する研究

ガリウムヒ素電界効果トランジスタは、そのすぐれた高速性能により、近年、著しい発展を示し、既にマイクロ波およびミリ波帯の個別部品のみならず、モノリシックアナログおよびデジタル集積回路の形で実用化され、実績を広めつつある。現在のこの発展を支えているのは、素子の高速性能のみならず、素子の高信頼化技術である。ことに、化合物半導体デバイスでは、信頼性を支配する最も難しい問題として、表面および界面の制御が挙げられ、素子の微細化の進展と共に、ますます、今後、その重要性が高まると考えられている。

本論文は、このような背景のもとで、ガリウムヒ素電界効果トランジスタの高信頼化のために、表面・界面に起因する種々の故障の原因の解析とその抑制を目指して行った一連の研究結果をまとめたものである。本論文は6章から構成されている。以下に各章の概要を示す。

第1章では、本研究の背景、従来のトランジスタの信頼性に関する課題、本研究の目的と構成について述べている。

第2章では、トランジスタ内部でのキャリアの振る舞いの2次元シミュレーション解析により、トランジスタに印可できるバイアスの上限値を決定するドレイン耐圧の決定機構を検討している。その結果、ガリウムヒ素の表面空乏層の存在が、トランジスタのドレイン耐圧のゲートバイアス依存性を決める主要因であること、および、ドレイン電極側での電界集中がバーンアウト故障を引き起こす原因であることを明らかにしている。このことは、バーンアウト故障がガリウムヒ素材料そのものに固有の致命的な現象ではないことを示している。

第3章では、トランジスタのショットキーゲート特性の安定性向上を目的として、Al/Ti/GaAs系の熱的安定性に関して検討を行っている。まず、この系では、熱処理によりAlとTiの合金化に関係した界面反応が進行し、障壁の高さが複雑な変化を示すことを明らかにするとともに、障壁高さの低下に伴う電流の増加がバーンアウト故障を引き起こすことも明らかにしている。さらに、Tiを薄層化(5nm)することにより、これを抑制し、電気的特性が安定化できることを明らかにしている。

第4章では、トランジスタのゲート材料としてAlを用いた際に生じるピンチオフ不良を抑制するために、Alの表面をTiで覆った新しいTi/Al配線構造を検討

している。まず、Ti/Al配線構造はAl配線に比べ、エレクトロマイグレーション耐性が高いことを明らかにしている。さらに、ピンチオフ不良にはエレクトロマイグレーションが関係していることを実験的に示すとともに、Ti/Al配線構造をトランジスタのゲート電極に用いることにより、ピンチオフ不良が抑制され、トランジスタを長寿命化できることを示している。

第5章では、上で述べた信頼性に関わる現象が全てガリウムヒ素表面の性質やその変化に由来していることから、ガリウムヒ素表面の電気的特性の制御法について検討している。具体的には、新しいガリウムヒ素の表面・界面制御技術として、数原子層厚さのインジウムリンないしガリウムリン極薄層を表面に設ける原子層パッシベーションを提案し、その有効性を実証している。これらの極薄層をガリウムヒ素表面に設けることでn形およびp形ガリウムヒ素のバンド端ホトルミネセンス強度の増大に成功している。さらに、極薄層を絶縁体-半導体界面に挿入した金属-絶縁体-半導体ダイオード(M/SiO₂/GaP/n-GaAs)では、極薄層を有しない構造より界面トラップの影響が少ないことを示している。

第6章では、本研究の成果を総括している。

これを要するに、著者は、ガリウムヒ素電界効果トランジスタの高信頼化にあたって問題となる種々の故障の発生機構およびその抑制手法に関し、いくつかの有益な知見を得たものであり、半導体工学の進歩に寄与するところ大である。

よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。