

学位論文題名

化合物半導体超高周波トランジスタの低雑音化構造と  
その製作プロセスに関する研究

学位論文内容の要旨

情報通信のグローバル化と伝送容量の増大に対応するためには、衛星通信技術の高度化とマイクロ波デバイスの高性能化、高集積度化、高信頼度化が不可欠である。とくに、衛星通信需要の拡大とともに周波数もC帯からKu帯、Ka帯へと高周波化が進展しており、通信衛星に搭載される低雑音増幅器の一層の低雑音化、高利得化が必須である。

一方、温室効果の解明などを目的とした地球観測プラットフォーム技術衛星ではミリ波センサを用いたリモートセンシング技術が試験段階にある。また、自動車に搭載する衝突回避用ミリ波センサの実用化にも大きな期待が寄せられている。

そのため、これらのシステムに必須となる化合物半導体超高周波トランジスタの低雑音化を実現する構造とその製作プロセスの開発が強く要請されている。

本論文は、ガリウム砒素系およびインジウム・リン系の化合物半導体超高周波トランジスタのプロセス技術を高度化することで当該トランジスタの低雑音化、高利得化、高均一化を実現してきた研究開発の成果をとりまとめたものであり、全6章から構成されている。その内容は、以下に示すとおりである。

第1章は、序論である。本章では、マイクロ波通信システム、ミリ波応用システムの技術動向について述べるとともに低雑音ガリウム砒素電界効果トランジスタ、ガリウム砒素系の低雑音高電子移動度トランジスタ、インジウム・リン系の低雑音高電子移動度トランジスタに関するプロセス技術の研究の背景を述べて本研究の目的、意義を明らかにしている。

第2章では、トランジスタの高性能化の阻害要因となるゲート抵抗、ゲート容量の低減に有効な多層ゲート電極構造の低雑音ガリウム砒素電界効果トランジスタの製作プロセスを新たに提案するとともに実用化の鍵となったサブミクロン加工技術の研究結果とトランジスタ特性について述べる。本トランジスタでは、ショットキーゲート電極として高融点のタングステンシリサイドを用いており、導伝型を付与する不純物のドーピングはイオン注入で行っている。トランジスタの構造パラメータと特性の関連を検討して、相互コンダクタンスを高めるためにゲート電極を微細化(0.3  $\mu\text{m}$ )するとともにn型チャンネル層の直下へp型層を埋め込むことでチャンネル層を実効的に薄層化している。また、タングステンシリサイドの上層にチタン/金の低抵抗二層膜を自己整合的に積層することでゲート抵抗を低減している。これらにより、従来の高融点ゲート電極の電界効果トランジスタでは達成し得なかった低雑音特性が実現できている。本トランジスタで四段低雑音増幅器を試作した結果、衛星放送の周波数帯域の12ギガヘルツ帯で良好な高周波特性が得られ、実用化可能であることを実証している。

第3章では、第2章で述べられた電界効果トランジスタを更に低雑音化するための新しい製作プロセスを提案するとともに得られたトランジスタ特性について述べる。また、一段低雑音増幅器の試作結果についても述べる。本トランジスタでもショットキーゲート電極としてタングステンシリサイドを用いているが、更にゲート抵抗を低減させるために上層のチタン/金の二層膜と下層のタングステンシリサイドの積層形状をT型化してゲート電極の断面積を拡大している。また、本T型ゲート電極形成プロセスではゲート容量の低減を図るため、シリコンイオンの入射角を変えた斜め回転イオン注入でn'層を形成している。本トランジスタで一段低雑音増幅器を試作した結果、イオン注入で形成されたガリウム砒素電界効果トランジスタを用いたものとして世界最高の低雑音特性が得られることが明らかとなった。この結果は、本トランジスタが衛星通信用トランスポンダ（中継器）の高性能化を図る上で有望であることを示している。

第4章では、ヘテロ接合構造をしたガリウム砒素系の低雑音高電子移動度トランジスタの製作プロセスとトランジスタ特性の高均一化に関する研究成果および一段低雑音増幅器への応用について述べる。本トランジスタでは、相互コンダクタンスを高めるためにアルミニウムのゲート電極を0.15 $\mu\text{m}$ まで微細化するとともに、チャンネルとなるインジウム・ガリウム砒素層に接するアルミニウム・ガリウム砒素層（電子供給層）に一原子面のシリコン高濃度層を設けている。また、ゲート電極の超微細化とゲート抵抗の低減を両立できる製作プロセスとして電子ビーム直接描画/紫外線露光の併用、それに対応した独自の二層レジスト技術がT型ゲート電極の形成に有効であることを示している。トランジスタのドレイン電流を精密制御するためには、ショットキーゲート電極と接するアルミニウム・ガリウム砒素層の厚みの制御が必須である。そのためには、上層のガリウム砒素層を高い選択比で除去できることが必須で、エッチャントとしてアンモニアでpHを調整したクエン酸/過酸化水素混合液が適していることを明らかにしている。また、ガリウム砒素基板の裏面に接地電極を設けるためのバイアホールの形成に四塩化珪素と塩素を反応ガスとしたマグネトロニオンエッチングが有効であることを実証している。本構造のトランジスタおよび一段低雑音増幅器では、各々60ギガヘルツ、50ギガヘルツで、通常の電界効果トランジスタでは達成不可能な世界トップレベルの低雑音特性を実現している。

第5章では、インジウム・リン系の結晶材料を適用した低雑音高電子移動度トランジスタの製作プロセスに関する研究成果について述べる。本トランジスタでは、電子供給層にアルミニウム・インジウム砒素層、チャンネル層にインジウム・ガリウム砒素層を用いることで電子の閉じ込め効果が改善され、そのためガリウム砒素系の低雑音高電子移動度トランジスタに比べて約1.6倍の相互コンダクタンスが得られている。また、遮断周波数についても約2倍の値が得られ、高速動作の点で優れていることが確認されている。インジウム・リン系の本トランジスタの60ギガヘルツでの最小雑音指数は、第4章で述べられたガリウム砒素系の高電子移動度トランジスタに比べて約25%小さく、ミリ波帯で使用される将来の通信機器の基本素子として高いポテンシャルを有することを示している。さらに、T型ゲート電極形成用の二層レジストプロセスにおいて下層レジストのポリジメチルグルタルイミドが高解像度化するという新しい知見を示している。

第6章では、本論文を総括しており、得られた結果と知見を要約している。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	長谷川	英機
副査	教授	山科	俊郎
副査	教授	雨宮	好仁
副査	教授	福井	孝志
副査	助教授	橋詰	保

## 学位論文題名

# 化合物半導体超高周波トランジスタの低雑音化構造と その製作プロセスに関する研究

21世紀に本格化すると予想される高度情報化社会においては、マイクロ波・ミリ波通信技術は、マルチメディア情報化社会の展望と共に、新しい展開の途が開かれつつある。すなわち、F T T H (fiber to the home) 構想を含む壮大な光ネットワーク形成の核となる光技術の展開の他に、携帯電話・車載電話などの移動通信、自動車の衝突回避用ミリ波レーダーシステム、衛星を介するグローバルなネットワーク構成等の実用化に大きな期待が寄せられている。このため、これらのシステムの中核を担う高周波デバイスの研究開発が活発に展開されており、特に、衛星通信需要の拡大とともに、衛星通信に搭載される低雑音増幅デバイスの更なる低雑音化、高周波化、高利得化が強く要請されている。

本論文は、このような背景のもとで、ガリウムヒ素(GaAs)系およびインジウムリン(InP)系の化合物半導体超高周波トランジスタの低雑音化、高利得化、高均一化のための最適構造を提案し、さらに、これを実現するための製作プロセスに関する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、研究の背景、化合物半導体電界効果トランジスタおよび高電子移動度トランジスタの現状と問題点、本研究の目的と構成について述べている。

第2章では、ゲート抵抗およびゲート容量の低減に有効な多層ゲート構造GaAs電界効果トランジスタの提案とそれを実現するサブミクロン微細加工プロセスの開発および作製されたデバイスの特性評価について述べられている。ショットキーゲート電極として従来より用いられてきた高融点金属のタングステンシリサイド上に、Ti/Au電極を形成することにより、多層ゲート構造を実現した。さらに、ゲート長を $0.3\mu\text{m}$ に微細化するとともに、n形チャネル層へのp層埋込により実効的にチャネル層を薄層化し、短チャネル効果を抑制することに成功した。製作されたトランジスタにおいて、遮断周波数は36.8GHz、12GHz帯で最小雑音指数1.07dB、付随利

得11.0dBが得られ、従来型のトランジスタの特性を大きく上回る高周波特性が実現された。さらに、4段増幅モノリシックマイクロ波集積回路(MMIC)への応用が試みられ、最小雑音指数1.6dBという良好な低雑音特性が得られること示した。

第3章では、多層ゲート構造GaAs電界効果トランジスタの雑音特性をさらに向上させるために、T形ゲート構造が提案され、その作製プロセス技術とデバイス特性の評価結果が記述されている。T形ゲート構造の実現のために、新たに、制御性のきわめて高い等方性ドライエッチング技術を開発し、タングステンシリサイド電極をサイドエッチングするプロセスを確立した。さらに、斜め入射イオン注入技術の採用により、チャンネルとソース・ドレイン間に中間濃度層(n'層)を挿入し、実効的ゲート長を短くして特性向上を実現した。製作されたトランジスタは、12GHzで最小雑音指数0.87dBを示し、T形ゲートとすることにより、最小雑音指数が0.2dBも改善され、さらに、1段増幅MMICにおいては、14GHzで最小雑音指数1.2dBが得られ、イオン注入プロセスで作製されたトランジスタをベースとするMMICでは世界最高の特性を達成した。

第4章では、AlGaAs/InGaAs/GaAs疑似格子整合高電子移動度トランジスタ(HEMT)の高性能化に有望なプロセス技術の開発と、作製したデバイスの評価について述べられている。まず、独自に開発された電子ビーム直接描画法と紫外線露光法を併用して、さらに2層レジスト技術を組み合わせて、0.15 $\mu$ mの超微細T形ゲート構造を実現した。次に、クエン酸系のエッチャントによる制御性に優れた選択エッチング技術を開発し、ピンチオフ電圧の均一性を格段に向上させることに成功した。さらに、SiCl<sub>4</sub>/Cl<sub>2</sub>を用いたドライエッチングプロセスを導入し、垂直でアスペクト比の高いバイアホールの形成を可能とした。製作されたHEMTは、60GHzで最小雑音指数1.6dB、付随利得6.5dBの優れた高周波特性を示した。さらに、1段増幅MMICへの応用が試みられ、50GHz最小雑音指数1.8dB、付随利得8.1dBが得られ、AlGaAs/InGaAs疑似格子整合HEMTがミリ波システムの基本デバイスとして有望であることを明らかにした。

第5章では、伝導帯のバンド不連続量がAlGaAs/InGaAsヘテロ構造よりも0.1eV程度高く、高い2次元電子ガス濃度が実現可能な、AlInAs/InGaAs系HEMTの作製プロセスと特性評価について述べられている。このヘテロ系にT形ゲート構造を応用することによって、作製されたHEMTは、60GHzで最小雑音指数0.9dB、付随利得7.0dBの優れた高周波特性を有し、ミリ波デバイスとして非常に有望であることを示した。

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、化合物半導体超高周波トランジスタの低雑音化、高利得化、高均一化のための最適構造を提案し、さらに、これを実現するための製作プロセスを高度化し、マイクロ波・ミリ波帯で動作する半導体電子デバイスの設計およびプロセス技術研究開発の指針を明確にしたものであり、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。