

学 位 論 文 題 名

# Plasma Waves in Semiconductors and Their Interactions with Electromagnetic Waves up to Terahertz Region

(半導体中のプラズマ波とそのテラヘルツ帯に至るまでの  
電磁波との相互作用)

## 学位論文内容の要旨

情報通信システムのさらなる高度化・多機能化のために、超高周波・高電力固体増幅デバイスの開発が強く要請されている。従来の半導体デバイスの動作は基本的に半導体チャネル内のキャリアドリフトに基づいているため、動作周波数は電子走行時間に制限される。このため、デバイスの微細化により高周波動作を目指しているが、主な半導体の材料特性の限界、微細化によるショートチャネル効果やゲートリーク電流の増加などの問題により、サブミリ波 (THz) 領域で動作するデバイスの実現は非常に困難であると予想される。また、微細化は出力電力の減少を余儀なくし、現在用いられている進行波管素子で得られる出力を、従来の半導体デバイスで達成することは不可能に近い。

一方、半導体中のキャリアプラズマ波と電磁波の相互作用を動作原理とする固体進行波デバイスでは、ドリフトキャリアと遅波回路を介した電磁波とをカップリングさせ、ドリフトキャリアのエネルギーを電磁波に転換することにより、超高周波領域においても大きな増幅作用が期待できる。動作速度は電子走行時間ではなく、遅波回路の位相速度とドリフト速度の関係で決まるため、ナノメーター領域の微細化を伴わずに、高い動作周波数と出力電力が同時に達成できる。このような固体進行波増幅デバイスの実現を目的として、1960年代前半から1970年代半ばまで、理論・実験研究が盛んに行われていたが、未熟な半導体プロセス技術や不十分な理論解析のため、実用化には至らなかった。しかし、厳密な理論的アプローチと、現在の高度な半導体材料技術、デバイス作製技術、測定技術を駆使することにより、固体進行波増幅デバイスの実現は可能であると思われる。

このような背景のもとに、本論文は、固体進行波増幅デバイスの実現を目指し、キャリアプラズマ波と電磁波の相互作用の基本性質を解明することを目的として理論的検討・実験的検討を行ったものである。本論文は8章から構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第1章では、本研究の背景と目的を述べるとともに各章の概要を記している。

第2章では、金属ゲート電界効果トランジスタ (MESFETs)、高電子移動度トランジスタ (HEMTs)、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBTs) といった従来の半導体デバイスの現状の特性をレビューしている。特に、動作周波数と出力電力のトレードオフの関係を詳細に記述している。

第3章では、1960年代前半から1970年代半ばまでに報告された、固体進行波増幅デバイスに関する主な理論的・実験的研究をレビューしている。

第4章では、半導体-誘電体界面に沿って伝搬するTransverse magnetic (TM) モード表面波の解析を行っている。この解析では、Maxwell方程式と流体モデルに基づくプラズマ電子運動方程式を連立して解くことによって、半導体表面に設けられた遅波回路に電磁波が導入された場合に半導体中に励起される表面波成分を求めた。半導体中に横波の性質を有するquasi-solenoidal成分と縦波の性質を有するquasi-lamellar成分の2種類の表面波成分が存在することを示し、半導体-誘電体界面で成立する境界条件を求めた。また、TM表面波成分の励起に対する半導体中のプラズマ波の誘電応答を解析するために、実効誘電率を導出した。さらに、多層構造を解析するための等価伝送線路を用いた手法を述べている。

第5章では、HEMT構造の2次元電子ガス(2DEG)層に沿って伝搬するTM波についての解析を説明している。HEMT構造においては横波性質を有するquasi-solenoidal成分が支配的であることが示され、強い閉じ込め効果をもつ2DEG構造を利用することにより、電磁波と半導体中のプラズマ波の相互作用の効率を格段に高められることを示した。

第6章では、2DEGプラズマ波とインターデジタル遅波回路に伝搬する電磁波との相互作用の理論解析を述べている。ここでは、デバイス構造と解析手順を詳細に説明している。理論解析の結果、キャリアドリフト速度が遅波された基本波位相速度とほぼ同程度になる場合に、キャリアプラズマ波と電磁波との相互作用により明確な負性コンダクタンスが現われることが示され、進行波管と同様な相互作用条件が成立することが確認された。また、周波数が大きくなるほど大きな負性コンダクタンスを得られることがわかった。1THz帯では300mS/cmと大きな負性コンダクタンスが現れることが示唆された。

第7章では、実際に高移動度を有するAlGaAs/GaAsヘテロエピ構造とインターデジタル線路遅波回路を用いた固体進行波素子を試作し、評価を行った結果を述べている。ここでは、デバイス構造、作製手順、測定方法を詳細に説明し、理論解析結果と実験結果との比較を述べている。インターデジタル遅波回路下の半導体中に不均一な電界分布が存在することを考慮してコンダクタンスの理論計算を行い、実験結果がよく再現できることを示した。すなわち、半導体中のプラズマ波と電磁波の相互作用が生じていることが明らかとなった。さらにこの結果に基づいて、インターデジタル遅波回路下で均一電界を実現するための最適なデバイス構造を提案した。作製したデバイスのDC I-V 特性から線形領域の拡大や高電圧側へのピンチオフ電圧のシフトという傾向が確認され、電界分布の均一化がされた。

第8章では、本論文の結論を述べると共に今後の研究方向を記している。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 橋 詰 保  
副 査 教 授 雨 宮 好 仁  
副 査 教 授 佐 野 栄 一  
副 査 助 教 授 葛 西 誠 也

## 学 位 論 文 題 名

### Plasma Waves in Semiconductors and Their Interactions with Electromagnetic Waves up to Terahertz Region

(半導体中のプラズマ波とそのテラヘルツ帯に至るまでの  
電磁波との相互作用)

現在の高度情報社会は、さらに、全ての人々があらゆる局面で高品位の情報を入手・共有・交換できる「次世代ユビキタスネットワーク社会」の実現を目指し、急速な発展を続けている。これに伴い、情報通信ハードウェアシステムの基幹をなす半導体電子デバイス・集積回路に対して、さらなる高性能化が求められている。

情報通信システムの高度化・多機能化のために、超高周波・高電力固体増幅デバイスの開発が強く要請されている。従来の半導体デバイスの動作は基本的に半導体チャネル内のキャリアドリフトに基づいているため、動作周波数はチャネル内の電子走行時間に制限される。このため、これまではデバイスの微細化により高周波動作を達成してきたが、主な半導体の材料特性の限界、微細化によるショートチャネル効果やゲートリーク電流の増加などの問題により、サブミリ波 (THz) 領域で動作するデバイスの実現は非常に困難であると予想される。また、微細化はデバイス出力電力の減少を余儀なくし、現在用いられている進行波管素子で得られる出力を、従来の半導体デバイスで達成することは不可能に近い。

一方、半導体中のキャリアプラズマ波と電磁波の相互作用を動作原理とする固体進行波デバイスでは、ドリフトキャリアと遅波回路を介した電磁波とをカップリングさせ、ドリフトキャリアのエネルギーを電磁波に転換することにより、超高周波領域においても大きな増幅作用が期待できる。動作速度は電子走行時間ではなく、遅波回路の位相速度とドリフト速度の関係で決まるため、ナノメートル領域の微細化を伴わずに、高い動作周波数と出力電力が同時に達成できる。このような固体進行波増幅デバイスの実現を目的として、1960年代前半から1970年代半ばまで、理論・実験研究が盛んに行われていたが、実用化には至らなかった。しかし、現在の高度な半導体材料技術、デバイス作製技術、測定技術を駆使することにより、固体進行波増幅デバイスの実現は可能であると思われる。

このような背景のもとに、本論文は、固体進行波増幅デバイスの実現を目指し、キャリアプラズマ波と電磁波の相互作用の基本性質を解明することを目的として理論的検討・実験

的検討を行ったものである。本論文は8章から構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第1章では、本研究の背景と目的を述べるとともに各章の概要を記している。

第2章では、金属ゲート電界効果トランジスタ (MESFETs)、高電子移動度トランジスタ (HEMTs)、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBTs) といった従来の半導体デバイスの現状の特性を概説している。特に、動作周波数と出力電力のトレードオフの関係をしく記述している。

第3章では、1960年代前半から1970年代半ばまでに報告された、固体進行波増幅デバイスに関する主な理論的・実験的研究を概説している。

第4章では、半導体-誘電体界面に沿って伝搬するTransverse magnetic (TM) モード表面波の解析を行っている。この解析では、Maxwell方程式と流体モデルに基づくプラズマ電子運動方程式を連立して解くことによって、半導体表面に設けられた遅波回路に電磁波が導入された場合の半導体中に励起される表面波成分を求めている。また、TM表面波成分の励起に対する半導体中のプラズマ波の誘電応答を解析するために、実効誘電率を導出した。

第5章では、HEMT構造の2次元電子ガス (2DEG) 層に沿って伝搬するTM波についての解析を行った。HEMT構造においては横波性質を有するquasi-solenoidal成分が支配的であることが示され、強い閉じ込め効果をもつ2DEG構造を利用することにより、電磁波と半導体中のプラズマ波の相互作用の効率を格段に高められることを示した。

第6章では、2DEGプラズマ波とインターデジタル遅波回路を伝搬する電磁波との相互作用の理論解析を述べている。ここでは、デバイス構造と解析手順を詳細に説明している。理論解析の結果、キャリアドリフト速度が遅波された基本波位相速度とほぼ同程度になる場合に、キャリアプラズマ波と電磁波との相互作用により明確な負性コンダクタンスが現れることが示され、進行波管と同様な相互作用条件が成立することが確認された。また、周波数が大きくなるほど大きな負性コンダクタンスを得られることがわかった。1 THz帯では300 mS/cmと大きな負性コンダクタンスが現れることが示唆された。

第7章では、実際に高移動度を有するAlGaAs/GaAsヘテロエピ構造とインターデジタル線路遅波回路を用いた固体進行波素子を試作し、評価を行った結果を述べている。ここでは、デバイス構造、作製手順、測定方法を詳細に説明し、理論解析結果と実験結果との比較を述べている。インターデジタル遅波回路下の半導体中に不均一な電界分布が存在することを考慮してコンダクタンスの理論計算を行い、実験結果がよく再現できることが示されている。すなわち、半導体中のプラズマ波と電磁波の相互作用が生じていることを明らかにしている。さらにこの結果に基づいて、インターデジタル遅波回路下で均一電界を実現するための最適なデバイス構造を提案し、作製したデバイスの直流電圧-電流特性から、線形領域の拡大や高電圧側へのピンチオフ電圧のシフトという傾向が確認され、電界分布の均一性が向上したことが示された。

第8章では、本論文の結論を述べている。

これを要するに、本論文は、固体進行波増幅デバイスの実現を目指し、半導体ヘテロ界面に存在する2次元電子ガスプラズマ波と電磁波の相互作用を解明することを目的として、理論的検討・実験的検討を行ったものであり、ここで得られた半導体プラズマ波と電磁波との相互作用に関する新しい知見は、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者と認める。