

氏名(本籍)	かま だ みき お 鎌 田 幹 夫 (神奈川県)		
学位の種類	博 士 (工 学)		
学位記番号	博 乙 第 705 号		
学位授与年月日	平成 3 年 7 月 31 日		
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当		
審査研究科	工 学 研 究 科		
学位論文題目	AlInAs/GaInAsヘテロ構造のMOCVD成長とHEMTへの応用		
主査	筑波大学教授	工学博士	長谷川 文 夫
副査	筑波大学教授	工学博士	南 日 康 夫
副査	筑波大学教授	工学博士	徳 山 巍
副査	筑波大学教授	工学博士	升 田 公 三
副査	筑波大学教授	工学博士	川 辺 光 央

## 論 文 の 要 旨

HEMT (High Electron Mobility Transistor) は、高移動度の2次元電子ガスをキャリアとし、その密度を電界によって変調するFET (Field Effect Transistor) である。HEMTを構成する材料系としては、従来主にAlGaAs/GaAsヘテロ構造系が用いられており、高周波低雑音素子として、確固たる地位を確立している。特に、12GHz帯における衛星放送受信の普及は、HEMTの優れた低雑音特性によるところが大きい。しかしながら、受信装置に於ける高感度低雑音化に対する要求は留まるところを知らず、更なる特性改善の要請が強い。素子特性は年々向上しているが、その主たる要因はゲート長の短縮によるものである。しかしながら微細化にも限界があり、AlGaAs/GaAs HEMTの特性向上は飽和しつつあると言える。

本研究は、このようなAlGaAs/GaAsを用いたHEMTの特性限界を打破すべく、新しい材料として、InP基板に格子整合する $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}/\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ を取り挙げ、その結晶成長、ヘテロ構造の作成から、HEMT, MISFETへの応用までを検討した物である。

InP基板に格子整合する $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}/\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ ヘテロ構造(以下AlInAs/GaInAsの様に省略する)に於いてはAlInAsがバリア層、GaInAsがチャンネル層になる。GaInAsは、室温において $10,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ を越える高電子移動度を持ち、AlInAs/GaInAsヘテロ構造は、AlGaAs/GaAs系の約2倍の伝導帯不連続( $\Delta E_c=0.52\text{eV}$ )を持つ。そのためHEMTの特性が大幅に改善されることが期待される。本論文ではまず第2章においてAlInAs/GaInAs HEMTの特性の見積りを行い、FETの重要な性能指数である相互コンダクタンスが、AlGaAs系HEMTの約2倍になることが期待される事

を明らかにしている。

HEMTの作製には、選択ドーパAlInAs/GaInAsヘテロ構造という特殊な結晶構造が必要である。これまで、この系の成長は、もっぱらMBE (Molecular Beam Epitaxy) 法によって行われてきた。しかしながら、MBE法は超高真空技術を用いるため、必ずしも量産に向かないという欠点がある。そこで申請者は、より量産に適したMOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) 法によって、選択ドーパAlInAs/GaInAsヘテロ構造の成長を試みている。

MOCVD成長にあたっては、まず高純度GaInAs層を成長することが、高電子移動度を得るために必要である。しかしながら、GaInAs層の成長条件とその特性については、従来系統的な報告が見られない。したがって、まずこの点を明らかにすることが、良質な結晶を得る上での重要な課題であった。本論文では第3章でGaInAs層の電気的・光学的特性と成長時のV/III比との関係について詳しく検討し、MOCVD GaInAsに於いては主たる残留アクセプターがZnであるため、V/III比の増加と共に、残留ドナー、残留アクセプター共に増加し、MOCVD GaAsの場合のようなpn反転が起きないことを明らかにしている。

又、良好な特性の2次元電子ガスを得るには、急峻なAlInAs/GaInAsヘテロ界面を成長する必要がある。申請者は、原料ガスを非常に高速に切り替える事によって、急峻なヘテロ界面を達成、量子井戸構造の光学的測定評価から、作製されたヘテロ界面の揺らぎが単原子層以下であることを明らかにしている (第4章)。

更に、得られた選択ドーパAlInAs/GaInAsヘテロ構造を用いてHEMTを作製し、AlGaAs/GaAs HEMTを超える、優れた素子特性を実証した。そのために申請者はまず、AlInAs/GaInAsヘテロ構造に適したプロセス技術の開発を行っている。中でも良好なオーミックコンタクトの作成はデバイス作成上最も重要なプロセスの1つであり、半導体材料に大きく依存する。本研究では、この検討に特に力を入れ、第5章においてAlGaAs/GaAs HEMTで一般に使われているNiAuGeはAlInAs/GaInAs HEMTでは適しておらず、Au/AuGeによって、より低抵抗の実用に耐えるオーミックコンタクトを得ることが出来ることを明らかにしている。

これらの急峻なヘテロ界面、良好なオーミックコンタクトを用いて試作したAlInAs/GaInAs HEMTは、申請者の期待どおり同一ゲート長のAlGaAs/GaAs HEMTの2倍の相互コンダクタンスを有していることが明らかになった。申請者の解析によると、これは寄生抵抗が期待通り低くなっていることと、AlInAs/GaInAsヘテロ界面の電子の飽和速度が $3 \times 10^7 \text{cm/sec}$ とAlGaAs/GaAs HEMTのそれぞれ2倍近い値になっているためである。

前述した様に、HEMTは高周波低雑音素子として、確固たる地位を築いているが、デジタルICとしては、今だにMESFETの方がむしろ主流である。AlInAs/GaInAsセルフアラインMISFETは、「しきい値電圧が、その構造パラメーターによらず常に $\sim 0 \text{V}$ である」という、デジタルIC応用に適した性質を持っている。この特質は、ショットキーバリア高さ ( $\phi_{\text{Bn}}$ ) と伝導帯不連続 ( $\Delta E_{\text{c}}$ ) がほぼ等しいという、AlInAs/GaInAsヘテロ構造の物性的性質によるものである。

申請者はこのようなAlInAs/GaInAs MISFETの高い可能性を実証すべく、WSiをゲートとした

セルフアラインMISFETを試作，第6章において期待通りしきい値電圧は $\sim 0$  V，740mSという高い相互コンダクタンスが得られること，シュブニコフ・ドハース振動によって，これが確かに2次元電子ガスによるものであることを明らかにしている。

以上の様に本論文では，AlInAs/GaInAsと言う新しい半導体材料を，そのエピタキシャル成長技術から，HEMT MISFETの試作まで検討し，この材料が現在のAlGaAs/GaAs HEMTの特性限界を打破するものであることを明らかにしている。

## 審 査 の 要 旨

AlGaAs/GaAs HEMTは12GHz帯における衛星放送受信用低雑音素子として，確固たる地位を確立している。しかし，受信装置に於ける高感度低雑音化に対する要求は益々強く，ゲート電極の微細化，新しい半導体材料の開発の努力が活発になされている。

本論文は其中で最も将来性があると考えられる，AlInAs/GaInAsヘテロ構造について，その結晶成長からプロセス技術，HEMT MISFETの試作まで行い，その可能性を実証した点で高く評価できる。特に従来データのバラツキが大きく，良く分からなかったMOCVD GaInAs層キャリア濃度のV/III比依存性を，特殊な評価法によってはっきりさせた点，原子層オーダーで急峻なAlInAs/GaInAsヘテロ構造を実現した点，AlInAs/GaInAsに適した新しい良好なオーミック電極を金属学的な評価も含めて開発した点，そして何よりもこれらの技術を用いて，AlInAs/GaInAs HEMT MISFETが従来のAlGaAs/GaAs HEMTの約2倍の相互コンダクタンスを有することを実証した点が高く評価できる。最先端の短ゲート技術を用いて，雑音指数が従来のAlGaAs/GaAs HEMTより遙かに優れていることを示す所まで，実験を行えなかったのは残念であるが，それによって本論文の評価が下がるものではないであろう。

よって，著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。