

氏名	松原 覚 衛 まつ ばら かく えい
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	論工博第442号
学位授与の日付	昭和46年7月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
学位論文題目	化合物半導体 InSb の電气的特性並びに負性抵抗現象に関する基礎的研究
論文調査委員	(主査) 教授 大谷泰之 教授 田中哲郎 教授 川端 昭

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は III—V 族化合物半導体 InSb の単結晶作製およびその電气的特性と、とくにこの種半導体で観測される負性抵抗現象についての基礎的研究の成果をまとめたものであり、11章から成っている。

第1章では InSb に関する研究の沿革と現状について概説し、InSb の伝導機構ならびに興味ある物理現象に対する未解決の問題点を明らかにして、本研究の目的ならびに意義を明確にしている。

第2章では InSb の高純度処理、ならびに単結晶作製条件について論じている。とくに単結晶作製に関して良好な結晶を得るための種結晶の極性効果、添加不純物の偏析係数と最適引上げ条件などについて記述してある。

第3章は作製された InSb 単結晶の電气的ならびに磁气的測定結果について述べたものである。すなわち、抵抗率、Hall 係数、Hall 移動度の不純物濃度依存性、磁気抵抗効果の基礎的測定を行ない多結晶についての結果と対比させて考察している。さらに、結晶の異方性、Hall 移動度の温度依存性を測定し、実験結果と輸送理論とを対比させて散乱機構の解析を行なっている。

第4章では InSb の pn 接合ダイオードの再結合伝導機構について論じている。すなわち、InSb 結晶中に再結合準位をつくる1価の不純物(例えば Cu)を添加した場合の電圧—電流特性、接合容量およびコンダクタンスの測定を行なって、浅い不純物準位をもつ場合の結果と対比させて述べている。さらに、InSb の結晶面効果とダイオード特性との関係についても述べてある。

第5章は InSb ダイオードの過渡応答特性について述べたものである。著者はダイオードに順方向電流パルスを加え、そのカット・オフ後の開放電圧の減衰特性から少数キャリアの寿命を測定している。なお、これについての近似解析結果と実験結果との対比を行なっている。

第6章では InSb に再結合中心(あるいはトラップ)が含まれる場合に観測される複注入型負性抵抗現象を理論的に解析し、さらに実験結果と対比して論じている。すなわち、再結合中心の注入キャリアに対する捕獲確率が電子と正孔とで大きく異なる場合には負性抵抗が発生する。ただし、捕獲確率比が大

きい場合でも結晶中に存在する多数キャリア（自由正孔）の濃度と再結合中心の濃度が同程度であると負性抵抗は発生しないことを理論的に見出し、この現象が注入キャリアに対する捕獲確率、多数キャリアに対する再結合中心濃度の割合、さらに移動度比と密接に関係していることを示唆している。なお、多くの半導体あるいは絶縁体で起こる複注入型負性抵抗現象を検討する手段として、本研究の結果が極めて有用であることを示している。

第7章では前章で述べた複注入型ダイオードの負性抵抗現象に及ぼす横磁界効果について理論的に解析し、さらに実験結果と対比して論じている。この研究の結果、始めてこの負性抵抗特性の高磁界効果が定量的に解析できるようになり、実験結果との対応が極めて良いことを示している。なお、この種ダイオードの磁気抵抗効果と両電極がオーム接触された普通の磁気抵抗素子における効果について理論解析した結果も示している。

第8章では複注入ダイオードの負性抵抗特性に及ぼす光と磁界の相互効果について述べている。この研究の結果、著者は極めて高性能の光磁気ダイオードを開発している。これについて光エネルギー感度特性、磁界強度特性、温度特性、光応答特性などの基礎的測定を行なった結果について述べている。また、この新しい光磁気ダイオードの可能な応用分野についても述べている。

第9章では複注入ダイオードの順方向電流と磁界との相互作用によって起こる電子—正孔プラズマの不安定振動について述べている。すなわち、振動波形のモードと磁界強度、電流と磁界との角度依存性などの基礎的研究を行なった結果を示している。また、振動の発生機構およびその振動波形のモードについて考察した結果を示している。

第10章では InSb トンネルダイオードについての基礎研究の結果が述べられている。すなわち、縮退濃度と最適合金条件の確立、ダイオード特性に及ぼす結晶面効果、温度特性の実験結果が示してあり、他の物質（例えば Ge, GaAs）における結果と対比されている。さらに、発振特性の解析、スイッチング速度と接合容量の測定結果について述べてある。

第11章は総括であり、第2章から第10章までを通して得られた主な結果を要約して述べたものである。

論文審査の結果の要旨

III—V 族化合物半導体の中で InSb は電子移動度が最も大きい材料であるため、これまで数多くの注目すべき実験報告がなされているにもかかわらず、この物質に対する精細な理解と実験結果に対する統一的な解釈に欠けるところが極めて多い。本論文はこれらの点を追究しているとともに、工学的応用の基礎を明らかにしたもので、その主な成果は次の通りである。

1. InSb は凝固の際の体積膨脹係数が大きく、しかも固溶範囲が狭いために単結晶作製が非常に困難であった。著者は固相と液相間の温度勾配と成長速度、さらに種結晶の極性等について綿密な配慮を行ない始めて良質の大型単結晶を作製している。また、偏析係数の異なる不純物を添加して結晶成長を行なう場合についても理論的見地から検討を加え、不純物分布の様な単結晶の作製に成功している。

2. 得られた単結晶について電気的特性および磁気的特性の測定を行ない、さらに結晶の異方性、散乱機構、Hall 移動度の不純物濃度依存性などを精密に測定して、この物質の電気的性質を明確にした。

3. InSb pn 接合ダイオードの電圧—電流特性が、この物質特有の結晶面効果に関係していることに着目して、合金条件、不純物の種類とその濃度、接合容量とコンダクタンスの測定からその効果を確かめた。さらに、この結晶面効果が現われる原因を電子結合モデルによって解明した。

4. InSb に 1 価の不純物（例えば Cu）を添加した結晶を用いて注入型ダイオードを作ると、その順方向特性に負性抵抗が観測される。この原因について理論的に詳しく解析し、この問題に対する十分な解決を与えた。すなわち、この負性抵抗現象が注入キャリアーに対する捕獲確率、再結合中心濃度、多数キャリアー濃度およびキャリアーの移動度と密接に関係していることを始めて見出した。

5. 深い不純物準位をもつ注入型ダイオードの磁界特性について理論的に解析し、高注入状態における特異な磁界効果の機構を明確にした。この種ダイオードにおける高磁界効果は InSb の場合僅か 200 ガウス程度の微少磁界で大電流が制御できるので、より高性能化を図るためにも物理機構の解明が重要な課題であったが、著者は理論解析によってこの問題に対する解決を与えた。

6. 著者は上記負性抵抗ダイオードについて光と磁界の相互作用を研究し、全く新しい高性能光磁気ダイオードを開発している。この素子は光エネルギー感度が極めて高く、大電流の制御が可能であること、さらに光応答速度が速く、S/N 比が高いために、赤外レーザ通信用受光素子や超高周波発振用素子など非常に広範囲の応用が期待されるものである。

以上要するに、本論文は InSb について、その単結晶作製条件の確立と電氣的性質に関する詳細な研究のほか、とくに深い不純物を含む複注入型負性抵抗現象については磁界効果および光効果を考慮に入れて極めて綿密な研究を行っており、この種化合物半導体に対する豊富な新しい知見を提供するものであって、学問的にも工学的応用の見地からも貢献するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。