



Title	ゲルマニウム結晶粒界の担体輸送に関する研究
Author(s)	浜川, 圭弘
Citation	大阪大学, 1964, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/28824">https://hdl.handle.net/11094/28824</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed</a> 大阪大学の博士論文について

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏名・(本籍)	浜 川 圭 弘
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	第 5 6 2 号
学位授与の日付	昭 和 39 年 4 月 28 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	ゲルマニウム結晶粒界の担体輸送に関する研究
(主査)	
論文審査委員	教 授 犬石 嘉雄
(副査)	
	教 授 山村 豊 授 教 西村正太郎 教 授 山中千代衛
	教 授 山口 次郎

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、著者が大阪大学工学部および基礎工学部の電気工学教室において行なったゲルマニウム結晶粒界の担体輸送に関する研究の成果をまとめたもので、本文 8 章および総括と謝辞からなっている。

第 1 章は本論文の序論として、まず Si (シリコン) および Ge (ゲルマニウム) を中心とした半導体の研究が過去 10 数年間に非常に急速な進歩を遂げた理由について論述し、これを可能にした原因として、半導体の格子欠陥に関する研究の成果に負うところが多いことを説明し、Bicrystal の結晶粒界に関する研究が格子欠陥をめぐる電子現象をしらべる新手段であること、およびその重要性について述べている。

ついで粒界面転位と担体との相互作用についての本研究の目的をあげ、粒界面えん層を横ぎる伝導および粒界面に沿った担体輸送機構についての研究成果は、薄膜および多結晶材料の電気伝導機構、清浄表面および 2 次元結晶の電気物性の解明にもっとも基礎的な資料として寄与するところが大きいことを述べ、本論文の意義および特異性を明らかにしている。最後に、著者の過去の研究経過をあげ、これに関連して本研究がはじめられたその動機と必然性について説明し、また本研究に関連した内外の研究状況を概説し、本論文がこの分野において占める地位を明らかにしている。

第 2 章では、Bicrystal 結晶粒界の電子現象の解析に必要な基礎的事項について論述している。すなわち粒界面転位のひずみエネルギーおよび Dangling bond 間隔と Misfit angle との関係を理論的に示し、ついで Bicrystal 作成について、Seed の設計、引き上げなどに関連した技術的条件を明らかにし、さらに赤外ビジョン顕微鏡によって粒界面転位とその近傍の偶発転位を観測し、粒界面についての結晶学的考察を行なっている。また粒界面における不純物の強化拡散 (Enhanced Diffusion) につ

いて述べ、極低温強磁場中において安定な特性を得る試料作製の技術的条件を確立している。

第3章は粒界面えん層のエネルギー帯構造について研究したもので、粒界面の刃状転位による Deformation Potential と Dangling bond のアクセプタ作用について論述し、粒界面えん層の概念、およびそのえん層定数決定についての実験的手段を明示し、粒界面近傍の光起電力の分布と空間電荷静電容量の測定およびその解析から、種々の Misfit angle を持った結晶粒界のえん層定数を系統的に求め、粒界面における担体輸送現象の考察に必要な基礎定数の関連を明らかにしている。

第4章は粒界面を横ぎる担体輸送について調べたもので、低電界領域における V—I 特性、飽和電流および零バイアスコンダクタンスなど実験的に得られる諸量と粒界面えん層定数との関係を理論的に考察し、実験値を説明している。ついで粒界面における担体の再結合と捕獲割合を定義し、これの測定手段を示し、実験的に求めたこれら諸量の Misfit angle 依存性を明らかにしている。さらに粒界面えん層の高電界現象について、P—N 接合のなだれ破壊と Turn-over との関連を検討し、実験結果を理論的に説明している。

第5章では、粒界面伝導の電流磁場効果について、室温から2°Kにわたる実験結果を示し、これを解析して粒界面中の転位アクセプタ準位およびその濃度を求めている。また低温領域における還元ホール係数と比抵抗の異常な振舞について、一種の2帯複合伝導としてこれを取扱い、担体の種類として可能性のある2つのモデルを示し、実験値の解析から各帯中の担体移動度および濃度とそれを決める活性化エネルギーを求め、モデルと現象との対応事項を検討している。

第6章は、粒界面伝導の担体散乱機構について論述したもので、前章で得た実験結果の解析から、粒界面伝導移動度の温度および Misfit angle 依存性を示し、結晶粒界面の特殊性を考慮してこれを理論的に検討している。その結果粒界面伝導移動度  $\mu$  を  $\mu^{-1} = \mu_{sl}^{-1} + \mu_d^{-1} + \mu_n^{-1}$  として表わし、i) 約100°K 以上の高温領域では、粒界面の有効伝導領域幅がせまいために起るボテンシャル井戸散乱移動度  $\mu_{sl}$  が、ii) 20°～80°K の温度領域では、転位列密度が高いことに起因する転位散乱移動度  $\mu_d$  が、iii) 0°K 以下の低温領域では中性不純物散乱移動度  $\mu_n$  が、それぞれ支配的であることを明らかにし、その理由を考察している。

第7章では、低温領域における還元ホール係数と比抵抗の異常な振舞についてその原因を調べるために、粒界面伝導の継および横磁気抵抗の温度、磁場の強さおよび磁場方向依存性を測定し、従来種々の材料について報告されている類似の異常電流磁場効果と対比してこれを検討している。その結果、負の横磁気抵抗の原因には縮退Geの場合に提唱されている "Spin-dependent 散乱" が、また異常継磁気抵抗の原因としては "Galvanomagnetic-morphic効果" による可能性が最も大きいことを述べこれを裏づける実験を行なっている。

第8章は、粒界面伝導の応用について論述したもので、第7章までに得た基礎的実験結果から、応用物性の観点より注目すべきいくつかの粒界面独特の性質をあげて説明し、応用装置への試みとして粒界面伝導の横電場変調作用を利用した新しい半導体素子G.B.F.E.トランジスタ ("Grain Boundary Field Effect Transistor") を試作し、実用への可能性を検討している。

結論では、本研究によって新しく得られた成果を総括的に述べている。

## 論文の審査結果の要旨

本論文はゲルマニウム結晶粒界面にそった方向、および粒界面壊層を横ぎる方向の担体輸送に関する基礎的研究とその応用について述べたもので、8章からなっている。

第1章は序論であって、まずシリコンおよびゲルマニウムを中心とした半導体工学が過去10数年間に非常に急速な進歩を遂げた理由について述べ、その原因には半導体の格子欠陥に関する研究成果に負うところが多いことを説明し、二次元的欠陥の集合である結晶粒界に関する研究が、格子欠陥をめぐる電子現象をしらべる新手段であること、およびその重要性について論述し、本研究の意義と目的を明らかにしている。ついで、本研究の着手に至った経過とともに関連分野の研究状況を概説し、本論文がこの分野において占める地位を明確にしている。

第2章では、ゲルマニウム結晶粒界の電気現象の解析に必要な基礎的事項について記述し、ついで、粒界研究のための Bicrystal 作成について、たねの設計、結晶成長などに関連した技術的条件を明らかにし、また、赤外ビジョン顕微鏡によって粒界面転位とその近傍の偶発転位の観測を行ない、これを考察している。さらに、極低温強磁場中において安定な特性を得るために必要な試料作成の技術的条件を確立している。

第3章は、粒界面えん層の電子エネルギー帯について研究したもので、粒界面にならんだ刃状転位の Deformation Potential によるエネルギー帯の変化と Dangling bond のアクセプタ作用について述べ、粒界面えん層の形を決定する種々の物理定数を求める実験的手段を論じている。ついで、粒界面近傍の光起電力の分布と、空間電荷層の静電容量の測定およびその解析から、種々の Misfit angle を持った結晶粒界のえん層定数を明らかにし、粒界面における担体輸送現象の考察に必要な基礎定数の相互関係について検討を行なっている。

第4章は、粒界面を横ぎる担体輸送機構について究明したもので、低電界領域における粒界面えん層を横ぎっての電圧電流特性、飽和電流および零バイアスコンダクタンスなど、実験的に得られる諸量と、粒界面えん層定数との理論的関係について論述し、これを実験的に検討している。ついで、粒界面における担体の再結合と捕獲割合について、定義とその測定手段について記述し、実験的にこれを求め、その Misfit angle 依存性を明らかにしている。さらに、粒界面えん層の高電界現象、とくに絶縁破壊および負性抵抗現象について行ない、これまでに得られた著者による P-N 接合のなだれ破壊と Turn-over の実験結果と関連させながら比較検討している。その結果、粒界面えん層の高電界現象の説明になだれ注入の概念を用いることを提案している。

第5章では、粒界面にそった伝導の電流磁場効果について、室温から2°Kにわたるホール係数および比抵抗の実験結果を示し、その解析から粒界面転位によって生じたアクセプタ準位のエネルギーおよびその濃度を求め、これの Misfit angle 依存性を明らかにしている。また、低温領域におけるホール係数と比抵抗の異常な振舞について、粒界面の Dangling bond が作る不純物帯と、価電子帯より成る一種の2帯複合伝導としてこれを取扱いその担体の種類について、可能性のある2つのモデルを示し、実験結果の解析から、各帯中の担体移動度、濃度および活性化エネルギーを求め、各モデルと現象

の対応について検討している。

第6章は、粒界面伝導の担体散乱機構について論述したもので、前章で得た実験結果の解析から、粒界面伝導の担体移動度について温度およびMisfit angle依存性を明らかにし、結晶粒界面の特殊性を考慮して、これを理論的に検討している。その結果、約100°K以上の温度領域では、格子散乱およびボテンシャル井戸散乱が、20~80°Kの温度領域では、粒界面の転位列密度が高いことに起因する転位散乱が、また10°K以下の領域では、中性不純物散乱が、それぞれ担体の散乱を支配していることが明らかとなり、その理由を考察している。

第7章では、低温領域におけるホール係数と比抵抗の異常性と、第5章の二帯複合伝導モデルとの関連をさらに検討するために、粒界面伝導の継および横磁場抵抗効果の温度、磁場の強さ、およびその方向依存性を測定し、大きい負の横磁場抵抗効果および異常な磁場依存性で代表される。異常電流磁場効果を見出し、その説明について従来類似の現象に提案されているいろいろの理論的モデルと比較して検討している。その結果、負の横磁場抵抗の原因には、縮退ゲルマニウムの場合と同様極低温でみられるスピン依存散乱の磁場変化が、また異常継磁場抵抗の原因としては、粒界面が狭いために起る Galvanomagneto morphic 効果による可能性が最も大きいことを推論しさらにこれを裏づける他の実験的事実を示し、現象論的に異常電流磁場効果を説明している。

第8章は、粒界面伝導の応用について研究したもので、第7章までに得た基礎的実験結果を応用的見地からみなおし、従来の単結晶ではみられない。粒界面の特質をあげて説明し、ついで、これの半導体装置への応用の試みとして、粒界面伝導度の横電場変調作用を利用した新しい素子「結晶粒界面効果トランジスタ」を提案している。本素子は多数担体素子であるため、低雑音であること、放射線や表面の汚れなどの影響をうけ難いこと、高入力インピーダンスをもつこと、特性の温度依存性が少ないとことなど、少数担体素子である従来のトランジスタにはみられない特長ある性能が期待される。試作素子について基礎的な実験結果を示し、実用への可能性を検討している。

結論では、本研究によって新しく得られた成果を総括的に述べている。

本論文は、ゲルマニウム Bicrystal の製作、その結晶粒界面の結晶学的観察、粒界面えん層およびその電子エネルギー帯を定める諸定数の測定を行ない、さらに粒界面を横ぎる方向ならびに粒界面にそった方向の電気伝導特性について、系統的に研究したものである。とくに、室温から2°Kにわたって測定された粒界面内での電気伝導の電流磁場効果の実験結果から、興味ある異常効果を発見し、また、従来、理論的に予想されていた転位散乱について始めて実験的に検討し、さらに転位アクセプタ準位、担体移動度を決める散乱因子の分類など、結晶粒界での担体輸送に必要な基礎的要素を明らかにした。

これらの成果は、半導体結晶粒界および格子欠陥の電子現象究明に重要な情報として貢献するのみならず、最近しだいに実用化されつつある薄膜素子などの多結晶電子材料の電気伝導機構の解明に基礎的な手がかりをあたえ、また清浄表面および2次元結晶などの半導体物性の研究にも貴重な知見をあたえるもので、半導体工学上極めて大きい価値をもっている。

よって本論文は、工学博士論文として充分価値あるものと認める。