

Title	エピタキシャルホイスラー合金を用いたp-Ge中のスピ ン伝導の実証と縦型スピndeデバイスへの応用
Author(s)	河野, 慎
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/61811">https://hdl.handle.net/11094/61811</a>
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認した ため、全文に代えてその内容の要約を公開していま 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">大阪大学の博士論文につい て</a>をご参照ください。

***Osaka University Knowledge Archive : OUKA***

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

Osaka University

## 論文内容の要旨

氏名 ( 河野 慎 )

論文題名

エピタキシャルホイスラー合金を用いた $p$ -Ge中のスピントロニクスの実証と縦型スピンドバイスへの応用

## 論文内容の要旨

次世代CMOSのチャンネル材料として期待されているゲルマニウム (Ge) とスピントロニクスを融合するためには、電氣的なスピントロニクス注入・検出手法を用いてスピントロニクス伝導を検討し、その物理現象を理解することが重要である。本研究では、スピントロニクス緩和が非常に速いことが知られている正孔スピントロニクスの伝導を検出するために、強磁性ホイスラー合金の一つと知られている $\text{Fe}_3\text{Si}$ 上に $p$ 型Ge ( $p$ -Ge) 層を結晶成長する技術を開発し、強磁性ホイスラー合金から $p$ -Geへのスピントロニクス注入・伝導・検出を実証した。さらに、 $p$ -Geのスピントロニクス拡散長やスピントロニクス緩和時間を明らかにすることに成功した。最終的に、 $\text{Fe}_3\text{Si}/p\text{-Ge}/\text{Fe}_3\text{Si}$ 縦型構造におけるスピントロニクス伝導の実証とその高性能化について議論した。

 $p$ -Geへの電氣的スピントロニクス注入とスピントロニクス伝導物理

$p$ -Geへの電氣的スピントロニクス注入・検出を実証するために、信頼性の高い電氣的スピントロニクス伝導検出手法である非局所4端子電圧測定法と $p$ -Ge/ $\text{Fe}_3\text{Si}$ 縦型接合を組み合わせた独自の素子構造を提案し、その微細加工プロセスの開発とスピントロニクス伝導性の評価を行った。10~125 Kという低温領域ではあったが、 $p$ -Geを介した非局所スピントロニクス伝導を世界で初めて検出することに成功した。一次元スピントロニクス拡散モデルを用いた解析から、 $p$ -Geのスピントロニクス拡散長が10 Kで約50 nmであることを明らかにした。また、この電氣的な手法から明らかにした正孔スピントロニクスの緩和時間の温度依存性は、信頼性の高い光学的スピントロニクス注入技術によって明らかにされている結果と一致していることを確認した。

縦型スピントロニクスバルブ構造における $p$ -Geを介したスピントロニクス伝導

チャンネル長を50 nm以下に制御した $\text{Fe}_3\text{Si}/p\text{-Ge}/\text{Fe}_3\text{Si}$ 積層構造を微細加工することで縦型スピントロニクスバルブ素子とし、局所2端子電圧測定法を用いて電氣的スピントロニクス注入・検出を検討した。10 Kで上部と下部の $\text{Fe}_3\text{Si}$ 層の磁化配置に依存した磁気抵抗の変化を観測し、 $p$ -Geチャンネル縦型スピントロニクスバルブ素子の不揮発メモリ動作を世界で初めて実証した。一方、得られたスピントロニクス信号の大きさは理論値の1/3程度であることが判明し、Ge原子の拡散による上部 $\text{Fe}_3\text{Si}$ 層のスピントロニクス偏極率の減少が性能低下の原因の一つであると考察した。このことから、 $p$ -Geチャンネル縦型スピンドバイスの高性能化のためには、Geと融合可能な高スピントロニクス偏極材料の利用が必要であるという問題を提起した。

高性能 $p$ -Geチャンネル縦型スピンドバイスに向けた要素技術開発

$p$ -Geチャンネル縦型スピンドバイスの高性能化を図るため、 $\text{Fe}_3\text{Si}$ と同じ強磁性ホイスラー合金の中でも高スピントロニクス偏極材料として期待されている $\text{Co}_2\text{FeSi}$ をスピントロニクス注入・検出電極とする素子構造を検討した。 $\text{Co}_2\text{FeSi}$ 層上にGe層を高品質に形成するためには、 $\text{Co}_2\text{FeSi}$ 層との反応を抑制する成長温度 (< ~250 °C) におけるGe薄膜の二次元エピタキシャル成長条件を最適化する必要があった。本研究では、Geと同じIV族元素である錫 (Sn) のサーファクタント媒介エピタキシー法と同時蒸着法を検討し、金属上への半導体ヘテロエピタキシャル成長における新手法として利用可能であることを明らかにした。最終的に、ヘテロ界面における反応を抑制した全エピタキシャル $\text{Co}_2\text{FeSi}/p\text{-Ge}/\text{Co}_2\text{FeSi}$ 縦型構造を実現した。

以上の成果は、 $p$ -Geを用いた縦型スピンドバイスの基礎となる電氣的スピントロニクス注入・検出に関するスピントロニクス伝導物理と材料開発における先駆的研究であり、次世代の $p$ -Geチャンネル縦型スピントロニクスデバイスの実現への道を開拓する指針を呈示するものである。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 河 野 慎 )		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教 授 浜 屋 宏 平
	副 査	教 授 岡 本 博 明
	副 査	教 授 酒 井 朗

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、次世代の半導体エレクトロニクスにおいて革新的な低消費電力技術を提供する可能性のあるスピントロニクスという研究分野において、独自の結晶成長技術を用いて強磁性ホイスラー合金上に*p*-型ゲルマニウム (*p*-Ge) を積層する技術を開発し、強磁性ホイスラー合金から*p*-Geへの電氣的スピン注入・伝導・検出の実証し、*p*-Geスピントロニクス分野に大きな進展を提供するとともに、縦型スピントランジスタの実現可能性を開拓することを目的としている。次世代の半導体材料として期待されているGeは、エレクトロニクスの基盤材料であるSiよりも電子・正孔ともに高い移動度を有し、近年、次世代CMOSのチャンネル材料として注目を集めている。スピントロニクス分野において、このGe中を電子スピンの伝導する研究は報告されてきたが、正孔スピンの伝導がどのように注入・輸送・検出されるのかはほとんど未解明であった。これに対して、河野氏は、強磁性ホイスラー合金 (Fe<sub>3</sub>Si) の(111)結晶面とGe(111)結晶面の原子配列マッチングを利用し、Si基板上の高品質Fe<sub>3</sub>Si/*p*-Geヘテロ界面と独自の微細素子構造を利用した電氣的スピン変換の物理と*p*-Ge中のスピン緩和現象の詳細を明らかにした。また、世界初となるFe<sub>3</sub>Si/*p*-Ge/Fe<sub>3</sub>Si縦型三層構造を用いたスピン依存伝導を観測し、縦型スピントランジスタの実現可能性を開拓したと考えられる。

本論文は5章から構成されている。第1章では序論及びGeスピントロニクスへの期待と縦型半導体スピントロニクス素子実証の重要性を述べ、*p*-Geスピントロニクスの現状 (先行研究) が紹介されている。ここでは、*p*-Geへのスピン注入さえも未だ信頼性の高い結果が得られていない現状を述べている。第2章では、信頼性の高い電氣的スピン伝導検出手法である非局所4端子電圧測定法と*p*-Ge/Fe<sub>3</sub>Si縦型構造を組み合わせた独自の非局所スピンバルブ素子の提案から微細加工プロセス開発およびスピン伝導物性評価までを行った。低温領域ではあるが、世界初となる*p*-Geを介した非局所スピン伝導を観測することに成功し、スピン拡散長が10 Kで約50 nmであることを明らかにしている。また、正孔スピン緩和時間の温度依存性は、これまで報告されている光学的スピン注入によるGe中の正孔スピンのダイナミクスから得られている結果と一致していること提示した。第3章では、*p*-Ge層を50 nm以下に制御したFe<sub>3</sub>Si/*p*-Ge/Fe<sub>3</sub>Si構造からなる縦型スピンバルブ素子を作製し、局所2端子電圧測定法を用いて電氣的スピン注入・検出に世界で初めて実証した。一方、得られたスピン信号から、性能低下の原因や今後の高性能化への指針を考察・明示した。第4章では、*p*-Geチャンネル縦型スピンデバイスの高性能化を目指し、強磁性ホイスラー合金の中でも高スピン偏極材料として期待されているCo<sub>2</sub>FeSiをスピン注入・検出電極とする素子構造への革新を図った。従来の作製手法では、*p*-Ge/Co<sub>2</sub>FeSi界面にはスピン注入効率の低下の原因となる反応層が容易に形成されてしまうことが判明したため、Snを用いたサーファクタント媒介エピタキシー法や同時蒸着法を検討し、金属 (Co<sub>2</sub>FeSi) 上への半導体 (Ge) ヘテロエピタキシャル成長における新手法を開拓したと言える。最終的に、ヘテロ界面における反応を抑制した全エピタキシャルCo<sub>2</sub>FeSi/*p*-Ge/Co<sub>2</sub>FeSi縦型構造を実現することに成功した。第5章では、研究の総括と今後の展望が述べられており、これまでの成果を基に*p*-Geを用いた縦型スピントランジスタ実現に向けた課題や検討すべき事項がまとめられている。

平成29年2月10日に審査担当者と河野氏で審査委員会を開催し、河野氏に博士論文の内容に関する説明を行わせた後、質疑・討論及び口頭試問を行った。論文の内容は世界的にも極めて優れた内容と先進性を有していること、実験技術やその性能向上への取り組みは極めて優れており新規性に富んでいること、研究業績は十分であることを確認した。また、河野氏は質疑においても本分野における十分な物理的知見を有しており、広範な知識と深い理解を有していることが確認できた。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として十分な価値があるものと認めるに至った。