

氏名	茂藤 健太
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 9374 号
学位授与年月日	令和 2年 3月 25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

IV 族混晶半導体薄膜の結晶成長とトランジスタ応用に関する研究

主査	筑波大学 教授 博士(工学)	末益 崇
副査	筑波大学 准教授博士(工学)	都甲 薫
副査	筑波大学 教授 Ph.D.	佐野 伸行
副査	筑波大学 准教授博士(工学)	蓮沼 隆
副査	九州大学 教授工学博士	中島 寛

論 文 の 要 旨

本論文は、絶縁体上における高速 CMOS 回路の実現に向けた、多結晶 Ge および GeSn 薄膜の高品質合成および薄膜トランジスタ(TFT)実証を目的としている。第1章では、Ge デバイスへの期待に関して述べられ、Si に替わる MOSFET のチャンネル材料として Ge が有望であることが示されている。更に、絶縁体上の Ge 薄膜をベースとした TFT を低温 (< 500 °C) で作製することにより、Si 集積回路への3次元積層やディスプレイへのモノリシック集積等の幅広い応用が期待されると述べられている。そこで、多結晶 Ge を絶縁体上に低温合成 (< 500 °C) し、TFT を作製する研究が活発化しているが、これまでに合成されてきた多結晶 Ge は欠陥誘起アクセプタにより正孔密度が高く、粒界散乱により Hall 効果移動度が低いことが課題となっている。チャンネルの微細化 (< 1 μm) やマルチゲート構造により、リーク電流やトランジスタ移動度を改善できるものの、多結晶 Ge 膜の品質が TFT の性能を律速しているのが現状である。本論文では、「固相成長法の高度化」および「Ge 中への Sn 添加」を検討することで、従来最高品質となる多結晶 Ge 薄膜の低温形成に成功すると共に、優れた TFT 動作を実証している。

第2章では、固相成長の前駆体となる Ge の堆積温度を制御することで、固相成長 Ge の結晶粒径を劇的に拡大することに成功している。Hall 効果移動度の温度依存性から、前駆体の加熱堆積により、大粒径化のみならず、粒界トラップ準位密度および粒界障壁が低減したことを明らかにしている。これらの現象を前駆体の原子密度の観点から説明している。

第3章では、Ge 中への Sn 添加を重畳し、結晶粒径の拡大および粒界障壁の低減と共に正孔密度の低減を実現している。これらの現象を前駆体密度に加えて、格子置換 Sn 組成の観点から説明している。GeSn の膜厚を制御することにより、粒界散乱および GeSn/ガラス界面における散乱を最小化している。以

上により高移動度化した GeSn の移動度は、粒界・界面散乱のみならず、不純物散乱が支配的であることを明らかにすると共に、ポストアニールにより、欠陥誘起アクセプタを低減し、不純物散乱を低減することに成功している。最終的に、絶縁体上に直接、低温合成 (< 937 °C) した薄膜の中で最高値となる正孔移動度 $540 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を達成している。

第 4 章では、前章までに得られた高移動度 Ge および GeSn をベースとした TFT 応用を検討している。大粒径試料の薄膜化により、固相成長 Ge の特性を引き出すことに成功し、電界効果移動度 $170 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ およびオン/オフ電流比 10^2 が得られている。更に Sn 添加による正孔密度低減の効果を活かし、高い電界効果移動度 ($170 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) を維持したまま、オン/オフ電流比を約 1 桁向上 (10^3) させることに成功している。チャンネルを微細化しない簡易な多結晶 Ge-TFT として、電界効果移動度とオン/オフ電流比を最高レベルで両立している。更に、これらの TFT チャンネル長依存性から、チャンネル長の縮小と共に特性ばらつきが顕著になる傾向を見出している。これは、多結晶 Si-TFT において一般的傾向であり、多結晶 Ge 系-TFT においては初の成果である。以上の成果は、結晶成長とデバイス技術の両面において、多結晶 Ge 系-TFT の高性能化の指針を与えるものである。

審 査 の 要 旨

[批評]

Ge は電子・正孔共に高い移動度を持ち、低温で結晶化が可能であることから、低耐熱な絶縁体上における高速 CMOS 回路への応用が期待されている。しかし、これまで絶縁体上に低温合成された多結晶 Ge 膜の電気的特性は劣悪であり、本研究がそのブレイクスルーとなっている。本研究では、ガラス基板上において、固相成長の前駆体となる非晶質 Ge 膜に対する加熱堆積および Sn 添加により、固相成長 Ge の劇的な粒径の拡大および粒界障壁の低減を実現している。これらの現象を前駆体の原子密度および Sn の格子置換/析出の観点から統一的に説明している。また、GeSn の膜厚に着目し、GeSn/ガラス界面における散乱の存在を見出し、膜厚 150 nm において正孔移動度が最大となることが示された。以上により高移動度化した多結晶 GeSn 膜の移動度は、粒界や界面散乱よりも不純物散乱の影響を受けていることが示され、ポストアニールを施すことでアクセプタとして作用する欠陥を低減し、更なる移動度の向上に成功している。以上のような各種キャリアの散乱要因 (粒界・界面・不純物散乱) を低減する種々のアプローチにより、絶縁体上に直接、低温合成 (< 937 °C) した薄膜の中で世界最高の正孔移動度 $540 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を達成したことは高く評価できる。

更に、固相成長 Ge および GeSn 膜を用いた蓄積型の p チャンネル TFT を作製している。Ge (Sn) 膜の特性と TFT 特性の関係を明らかにし、大粒径試料を薄膜化することで電界効果移動度とオン/オフ電流比を同時に向上できるとの指針を構築している。Sn 添加により、オン/オフ電流比は 1 桁向上し、最終的に電界効果移動度 $170 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、オン/オフ電流比 10^3 を実現しており、多結晶 Ge 系-TFT として高いレベルで電界効果移動度とオン/オフ電流比を両立している。TFT のチャンネル長依存性から、粒界を反映した TFT 特性の分布についても言及しており、多結晶 Si-TFT と同様の傾向を Ge (Sn) -TFT において初めて観測している。学術的にも重要な知見であり、本論文の独創的成果として高く評価できる。

〔最終試験結果〕

2020年2月15日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、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。