

## 論文審査の結果の要旨および担当者

|      |               |
|------|---------------|
| 報告番号 | ※ 甲 第 12783 号 |
|------|---------------|

氏 名 高橋 恒太

### 論 文 題 目

Ge系IV族混晶半導体薄膜の形成および電子物性制御  
(Crystallization and control of electronic property of Ge-related group-IV semiconductor thin films)

### 論文審査担当者

|    |       |    |        |
|----|-------|----|--------|
| 主査 | 名古屋大学 | 教授 | 中塚 理   |
| 委員 | 名古屋大学 | 講師 | 黒澤 昌志  |
| 委員 | 名古屋大学 | 教授 | 財満 鎮明  |
| 委員 | 名古屋大学 | 教授 | 鳥本 司   |
| 委員 | 名古屋大学 | 教授 | 宇佐美 徳隆 |

## 論文審査の結果の要旨

高橋恒太君提出の論文「Ge系IV族混晶半導体薄膜の形成および電子物性制御」は、次世代の積層型三次元集積回路の実現に向けて、液中パルスレーザを用いた低温プロセスによる絶縁膜上ゲルマニウム（Ge）系IV族混晶半導体薄膜の形成およびその電子物性制御に関する研究をまとめたものである。本論文は、全6章より構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的について述べている。

第2章では、液中パルスレーザプロセスの概略および各種結晶、電子物性の評価手法について説明している。

第3章では、リン酸溶液中パルスレーザ照射によるGe中へのリンドーピング技術について検討している。本研究ではリン酸溶液中レーザ照射したGe基板の電気特性とレーザ照射条件の関係を詳細に調査した。その結果、レーザ照射回数の増加に伴いシート抵抗が減少し、結晶中へのリン導入およびその活性化が示された。レーザ照射により形成されたpn接合ダイオードの電気伝導特性を詳細に調べた結果、リーク電流などが抑制された理想的な電気伝導特性が得られており、ドーピングに伴う結晶学的損傷が少ないことが示された。これらの結果に基づき、高温プロセスによるドーピング手法と同等の高い品質を有するpn接合形成を、液中レーザプロセスによって実現可能であることが実証された。

第4章では、水中パルスレーザ照射による絶縁膜上多結晶 $Ge_{1-x}Sn_x$ 形成およびドーパント活性化技術について検討し、プロセス温度シミュレーションを行うと共に、多結晶薄膜のキャリア物性を詳細に調査している。紫外レーザのGeに対する短い侵入長および水による冷却効果により、パルスレーザ照射に伴う下地基板温度の上昇は $100^{\circ}C$ 以下に抑制できることを明確化し、低温プロセス技術として有望であることをシミュレーションから示した。また、偏析しやすいSbをドーパントとした場合にも、極短時間のレーザプロセスにおいては結晶化後の膜中Sb濃度を高濃度に維持できることを見出し、パルスレーザによる短時間溶融・結晶化過程における偏析抑制効果を示した。さらに、本手法で形成されたSbドープ多結晶Geは、従来手法に比べ極めて高いSb活性化率を有することをX線光電子分光法により明らかにし、高濃度n型ドーピングと高い移動度の両立を実証した。

加えて、 $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜に対しp型ドーパント（B、Al、Ga、In）およびn型ドーパント（P、As）をそれぞれ導入し、水中パルスレーザ照射におけるドーパントの振る舞いについて系統的に調査した。その結果、照射エネルギーの増加に伴って、膜中濃度が減少するドーパント（Al、Ga、In、P）と一定値を保つドーパント（AsおよびSb）に分類できることを見出した。その理由を考察するために、水によるドーパント原子の酸化に注目し、化学ポテンシャルの観点から整理した結果、酸化傾向の高いドーパントにおいてその濃度の減少によってキャリア濃度が減少することを明らかにした。従って、水中パルスレーザ照射における水によるドーパント酸化抑制の重要性を示した。さらに、レーザ照射回数の低減が酸化抑制に効果的であることを見出し、酸化されやすいGaをドーパントとした場合でも、高移動度かつ高濃度p型ドーピングが可能であることを実証した。

第5章では、水中パルスレーザ照射による低温ドーピング技術の応用として薄膜熱電発電素子形成に注目し、n型多結晶 $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜の熱電物性を解明すると共に熱電発電素子の形成と動作実証を行なった。n型多結晶 $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜の室温におけるSeebeck係数、電気伝導率および熱伝導率を評価した結果、他のIV族薄膜熱電材料と遜色ない性能を有することを実証した。絶縁膜上にp型およびn型多結晶 $Ge_{1-x}Sn_x$ 薄膜からなる熱電素子を $300^{\circ}C$ 以下のプロセス温度で形成することに成功し、その熱電発電特性の観測によって水中パルスレーザ照射を用いた絶縁膜上への低温熱電デバイス形成を実証した。

第6章は本研究の総括であり、本研究の結論が述べられている。

本研究は、液中レーザ照射によるGe系IV族材料の結晶化およびドーパント導入と結晶・電気的特性について詳細かつ系統的に調査を行っている。その結果、絶縁膜上半導体多結晶薄膜に対する低温プロセスによるキャリア制御技術の構築に加えて、実際のデバイス応用にも結実させている。これらの成果は工業上、学術上、関連するエレクトロニクス分野に寄与するところが極めて大きい。よって、本論文の提出者である高橋恒太君は、博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があるものと判定した。