

高キャリア移動度材料の薄膜技術構築と 超高速フレキシブル・トランジスタの創製

筑波大学 数理物質科学研究群 博士後期課程 1 年（助成時）

同上 博士後期課程 2 年（現 在）

野沢 公暉

安価で汎用性が高いプラスチック基板上に相補型トランジスタ(CMOS)を形成できれば、Society 5.0 における基盤技術であるヒューマシンのインターフェースの発展が期待される。一方で、国内において p チャネルに正孔移動度の高い単結晶 Ge を、n チャネルに電子移動度の高い単結晶 InGaAs を用いるハイブリッド・チャネルが研究され、優れた CMOS 特性が報告されてきた。しかしプラスチックは耐熱温度が低いいため、プラスチック基板上での単結晶合成は現実的ではなく、低温で合成可能な多結晶材料の高品質化が求められる。

そのような中、私はこれまで、多結晶薄膜の成長手法の一つである「固相成長法」を深化し、プラスチックの耐熱温度以下で高品質な Ge 薄膜の合成に成功してきた[1,2]。本研究においては、固相成長法をシーズとして（1）水素パッシベーションによる多結晶 Ge 薄膜中の劇的なアクセプタ欠陥補償、（2）固相成長法による高電子移動度多結晶 InGaAs 薄膜の低温合成、（3）多結晶薄膜の物性理解に向けた深層学習の応用の 3 項目を実施した。

【1】水素パッシベーションによる多結晶 Ge 薄膜中の劇的なアクセプタ欠陥補償

多結晶 Ge 薄膜におけるアクセプタ欠陥は、高い正孔密度($> 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)を誘起する。これは、トランジスタのリーク電流抑制や低電子密度制御における主要な未解決課題であった[3]。一方で半導体の結晶性改善手法として水素パッシベーション効果はよく知られているが、これまで Ge 薄膜への水素添加による電気特性改善に成功した報告例はなく、Ge 薄膜には水素補償効果はないと考えられていた[4]。

そのような中、私は、結晶粒径の十分に大きな($> 1 \mu\text{m}$) Ge 薄膜に対して水素プラズマ処理を行うことで、正孔密度が劇的に低減する現象を発見した。さらに、水素プラズマ処理後に低温熱処理(200°C)を施すことで、低キャリア密度($< 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)と高正孔移動度($> 170 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)を両立することに成功した[5]。

本研究の成果は Ge 系デバイスの高性能化に向けて主要な課題であった高密度なアクセプタ欠陥の劇的な低減に成功した初めての成果であり、電子デバイスの発展に資する成果である。

【2】 固相成長法による高電子移動度多結晶 InGaAs 薄膜の低温合成

バルク単結晶 InGaAs は優れた電子移動度を有するが、絶縁体基板上に形成された多結晶 InGaAs 薄膜においては、報告例すらほとんどない。本項目では、絶縁体上に形成された多結晶 InGaAs 薄膜の電気特性を体系的に調査するとともに、シーズ技術である「固相成長法」の適用により絶縁体基板上高電子移動度 InGaAs 薄膜の低温合成を行った。

初めに、絶縁体上へ堆積時に結晶化させた $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 薄膜の結晶性及び電気特性を評価した。堆積条件の変化により結晶粒径や配向性が系統的に変化する傾向を確認した一方、電子移動度は中間組成である $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ においても $40 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 程度と改善の余地が大きい結果となった[6]。

続いて、非晶質状態で堆積した $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ に対して熱処理を施し、固相成長による結晶化を誘起した。非晶質前駆体の堆積条件や、高圧下（1 MPa）での熱処理を施すことで、プラスチックの耐熱温度以下である $500 \text{ }^\circ\text{C}$ においても電子移動度 $840 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ を達成した。従来多結晶 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 薄膜の電子移動度を 20 倍以上更新する値である。

【3】 機械学習を用いた多結晶半導体薄膜の電気特性予測

多結晶半導体薄膜の物性向上には物性理解が必要不可欠である。一方で近年、深層学習を利用して材料科学の進展を図るマテリアルズ・インフォマティクスが盛んに研究されている[7]。本稿では、電子顕微鏡から得られた多結晶 Ge 薄膜の情報を深層学習の一種であるニューラルネットワークに学習させることで、新たな方法での物性理解を試みた[8]。

初めに、ニューラルネットワークへ多結晶 Ge 薄膜の電子顕微鏡像を読み込ませるとともに、電気特性を対応付けることで電子顕微鏡像からの電気特性の予測に成功した。続いて、学習したモデルに対して極値を読み込ませることで、深層学習モデルの理解を解釈することに成功した。

講演では、上記の研究成果について紹介するとともに、上記以外に取り組んだ研究の簡単な紹介や、今後の展望について述べる。

[1] **K. Nozawa** *et al.*, ACS Applied Electronic Materials **5**, 3 (2023).

[2] **K. Nozawa** *et al.*, Applied Physics Letters **122**, 201901 (2023).

[3] K. Toko *et al.*, Scientific Reports **7**, 16981 (2017).

[4] J. Weber *et al.*, Applied Physics Letters **91**, 142101 (2007).

[5] **K. Nozawa** *et al.*, Minor revision in NPG Asia Materials.

[6] **K. Nozawa** *et al.*, Minor revision in Materials Research Bulletin.

[7] T. Ishiyama *et al.*, Science and Technology of Advanced Materials: Methods **2**, 213 (2022).

[8] **K. Nozawa** *et al.*, Advanced Electronic Materials(2024).