

水素処理により半導体用多結晶ゲルマニウム薄膜の性能を飛躍的に向上

半導体デバイスに用いる多結晶ゲルマニウム（Ge）薄膜について、その品質を向上させた上で水素添加を行うことで、正孔密度が顕著に低減することを発見しました。また、追加の低温熱処理により、水素導入時に生じる Ge 表面のダメージを回復し、正孔密度をさらに低減させることに成功しました。

情報化社会の進展に伴い、半導体デバイス性能の革新が求められています。中でも、ガラスやプラスチックといった絶縁体上に高品質なゲルマニウム（Ge）薄膜を形成できれば、高性能な薄膜トランジスタを用いたディスプレイ端末や三次元 LSI（大規模集積回路）、さらには低コストかつ高効率な薄膜太陽電池の実現も期待されます。そのため、基板や既存素子にダメージを与えない 500℃以下の低温プロセスによる Ge 薄膜合成の研究が盛んに行われてきました。

半導体デバイスの作製には、電荷を運ぶキャリア密度の制御が必須です。しかし、Ge は結晶内の欠陥（原子配列の乱れ）がアクセプタ（正の電荷を生み出す不純物）となるため、これまでキャリア密度の制御が極めて困難でした。

本研究では、多結晶 Ge 薄膜の品質を向上させた上で水素添加を行うことにより、正孔密度が顕著に低減することを発見しました。また、追加の低温熱処理を行うことで、水素導入時に生じる Ge 表面のダメージを回復し、正孔密度をさらに低減させることに成功しました。その結果、従来比で 3 桁低い、 10^{14} cm^{-3} の正孔密度を達成しました。

本研究成果は、Ge 系電子デバイスの性能向上と実用化への展開が強く期待されます。

研究代表者

筑波大学数理物質系

都甲 薫 教授

野沢 公暉（応用理工学学位プログラム 博士後期課程2年）

研究の背景

ゲルマニウム (Ge) は、光検出器や高効率太陽電池の基板材料として広く利用されているほか、高いキャリア移動度^{注 1)}を有することから、既存の主要半導体材料であるシリコン (Si) に代わる高性能トランジスタの材料としても注目されています。近年では、ガラスやプラスチックといった絶縁体上に高品質な Ge 薄膜を形成することで、高性能薄膜トランジスタを用いたディスプレイ端末や三次元 LSI (大規模集積回路)、さらに低コストで高効率な薄膜太陽電池の実現などが期待されています。そのため、基板や既存素子に熱的損傷を与えない 500°C 以下の低温プロセスにより、高品質な Ge 薄膜を形成する技術の開発が、国内外で活発に進められています。多くの半導体デバイスでは、キャリア密度^{注 2)}を制御することが重要となります。しかし、Ge 中の欠陥はアクセプタ^{注 3)}として働くため、絶縁体上に合成した多結晶 Ge 薄膜は高い正孔密度を持っており、これまで、正孔密度が 10^{17} cm^{-3} を下回る多結晶 Ge 薄膜合成の報告例はありませんでした。このような高いキャリア密度は、光学デバイスにおけるキャリア寿命低下やトランジスタにおけるリーク電流など、Ge 系半導体デバイスにおける主要な課題となってきました。

研究内容と成果

本研究では、多結晶 Ge 薄膜の正孔密度低減の方法として、プラズマ処理による水素添加効果を検討しました。水素添加は、Si を始めとする多くの半導体材料に対して電気的特性の制御に効果的であると報告されているものの、Ge においては効果がないと考えられていました。しかし今回、ガラス基板上に大きな結晶粒をもつ多結晶 Ge 薄膜を形成した上で水素添加を行うことで、Ge 薄膜の正孔密度が劇的に低減する現象を発見しました。さらに、水素添加した Ge 薄膜に対して低温 (200°C) で追加熱処理を施したところ、水素プラズマ処理時に生じる Ge 薄膜の表面ダメージを回復することに成功しました。その結果、高い正孔移動度 ($170 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) を維持しながら、従来比の 3 桁減となる 10^{14} cm^{-3} 台の正孔密度を達成しました (参考図)。

今後の展開

本研究で合成された極めて低い正孔密度の Ge 薄膜は、多様な Ge 系半導体デバイスの性能向上に大きく貢献することが期待されます。また、本手法は最高プロセス温度が低温のため、ガラス以外のフレキシブルなプラスチック基板上への展開も可能であり、ウェアラブルデバイスをはじめ、壁面やさまざまな物体に貼り付けて利用できる新たな電子デバイスの実現に資すると考えられます。今後さらに、今回得られた多結晶 Ge 薄膜を基盤とした Ge 系半導体デバイスの動作実証を進めていく予定です。

参考図

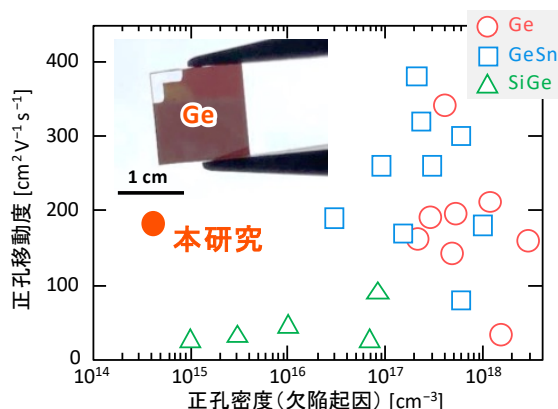


図 本研究で開発したガラス基板上 Ge 薄膜の写真、および従来の Ge 系薄膜との電気的特性の比較。

用語解説

注1) 正孔移動度

半導体中で、電場により正孔（+の電荷をもつ粒）が移動するときの移動のしやすさを示す値。この値が大きい半導体材料を用いるほど、トランジスタの動作速度が向上する。

注2) キャリア密度

半導体内に存在するキャリア（正孔または電子）の数の多さを示す指標で、材料の電氣的性質を大きく左右する。

注3) アクセプタ

半導体に加えることで正孔を生み出す不純物のこと。電気の流れを制御するために、その量を制御する必要がある。

研究資金

本研究は、NEDO 先導研究プログラム/未踏チャレンジ 2050、JST 創発的研究支援事業、JSPS 科研費 (No. 24KJ0509)、東電記念財団、および笹川科学研究助成の支援によって実施されました。

掲載論文

【題 名】 Hydrogen passivation effects on polycrystalline Ge thin films.

(多結晶ゲルマニウム薄膜への水素パッシベーション効果)

【著者名】 Koki Nozawa, Kota Igura, Takuto Mizoguchi, Noriyuki Saitoh, Noriko Yoshizawa, Takashi Suemasu, Kaoru Toko

【掲載誌】 NPG Asia Materials

【掲載日】 2025 年 6 月 17 日

【DOI】 10.1038/s41427-025-00611-w

問い合わせ先

【研究に関すること】

都甲 薫（とこう かおる）

筑波大学数理物質系 教授

URL: <https://trios.tsukuba.ac.jp/researcher/0000003027>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp