

プラスチックフィルム上での高性能半導体薄膜合成に成功

情報化社会の発展に伴い、安価・軽量・丈夫・柔軟なプラスチックを半導体薄膜の基材としたフレキシブル・デバイスが注目を集めています。プラスチックフィルムに高度な情報処理機能をもたせるには、集積回路に用いられるシリコン (Si) 基板と同等のキャリア移動度をもつ半導体薄膜を合成する必要があります。しかし、耐熱温度の限られたプラスチックフィルム上で、そのような半導体薄膜を得ることはこれまで困難とされてきました。

本研究チームは、Si を上回るキャリア移動度と、比較的低い結晶化温度をもつゲルマニウム(Ge)に着眼し、Ge 薄膜の結晶化過程を工夫するとともに、耐熱プラスチックフィルムを用いることにより、上記の問題を解決しました。具体的には、プラスチックフィルム表面を、Ge トランジスタのゲート絶縁膜としても好適な酸化ゲルマニウム (GeO_2) でコーティングした上で、Ge 薄膜を 500°C に加熱して結晶化を誘起することで、極めて品質の良い多結晶 Ge 薄膜を実現しました。キャリア移動度は、ガラスやプラスチックなどの非晶質基板上に直接合成されたあらゆる半導体薄膜の中で最高となる $690 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ に達しました。これは、単結晶 Si 基板の正孔移動度をも凌駕する値です。本研究成果により、あらゆる電子デバイスの汎用性を飛躍的に向上させるような、革新的なフレキシブル・デバイスの開発が期待されます。

研究代表者

筑波大学数理物質系
都甲 薫 准教授

研究の背景

情報化社会の発展に伴い、より高性能の電子デバイスに対する要求が飛躍的に高まっており、安価・軽量・丈夫・柔軟なプラスチックを半導体薄膜の基材としたフレキシブル・デバイスが注目を集めています。一般に、半導体薄膜は、高い温度で合成するほど優れた機能が得られますが、プラスチックフィルムは耐熱性に乏しく、基材として利用することは困難です。そこで、低い合成温度でも高い性能を発揮できる有機物や酸化物をベースとした半導体薄膜をプラスチックフィルム上に形成することにより、ウェアラブルなセンサデバイスなどが実証されてきました。しかし、これらの材料のキャリア移動度^{注1)}は、集積回路で用いられる単結晶シリコン (Si) 基板と比べると一桁以上低い値であり、プラスチックフィルムに高度な情報処理機能をもたせるには、抜本的な材料の革新が必要です。

一方、ゲルマニウム (Ge) ^{注2)} は最も古くから知られる半導体材料であり、Si を上回る高いキャリア移動度をもっていることから、トランジスタ材料として再び利用されています。近年のデバイス化技術の発展により、単結晶 Ge 基板をベースに構築したトランジスタは、単結晶 Si トランジスタを凌駕する高い性能を得るに至りました。また、Ge は Si よりも低温で結晶化できるため、ガラスやプラスチックフィルムなどの上に構築する薄膜トランジスタの材料としても有望です。しかし、このような基板の上に Ge 薄膜を直接合成した場合、その品質は劣悪であり、Ge 本来の高いキャリア移動度を発揮することは困難でした。

研究内容と成果

本研究チーム（筑波大学、産業技術総合研究所、ゼノマックスジャパン株式会社）は、Ge 薄膜の結晶化過程を制御するとともに、耐熱プラスチックフィルムを用いることにより、上記の問題を解決しました（図1）。200°C以下の低温で成膜した Ge 薄膜は、非晶質^{注3)}の膜になりますが、その後、350°C以上の熱処理を行うと固相成長^{注4)}が生じ、小さな結晶粒で構成される多結晶^{注5)}になります。今回、プラスチックフィルム表面を、Ge トランジスタに用いる絶縁膜としても好適な酸化ゲルマニウム (GeO_x) でコーティングした上で、Ge 薄膜の固相成長を行うことで、多結晶 Ge 薄膜の結晶粒が劇的に拡大することを発見しました。この現象は、固相成長中において GeO_x層から Ge 薄膜中へ適度に酸素が拡散し、界面核発生の頻度を低減したためと考えられます。さらに、耐熱プラスチックフィルムの採用によって、500°Cまでの高温プロセスが可能となったため、Ge 薄膜の結晶欠陥を十分に低減することができました。以上のような多結晶 Ge 薄膜の大粒径化・高品質化の結果、キャリア移動度は 690 cm²/Vs に達しました。これは、ガラスやプラスチックなどの非晶質基板上に直接合成されたあらゆる半導体薄膜の中で最高値であり、従来の集積回路に用いられる単結晶 Si 基板の正孔移動度をも凌駕する値であることから、プラスチックフィルム上に Si 集積回路に匹敵する情報処理機能を搭載できる可能性があります。

今後の展開

Ge 薄膜トランジスタに関するデバイス技術は概ね確立されているため、今回の Ge 薄膜をベースとしたフレキシブル・トランジスタの高速動作実証に向けて、さらに研究を進める予定です。これまで、高度な情報処理には固い Si 基板が必要でしたが、軽くて丈夫で柔らかいプラスチックフィルムを基材にすることができれば、さまざまな電子デバイスの汎用性が飛躍的に向上します。ウェアラブルな応用はもちろん、壁やモノに貼り付けて利用することで、あらゆるシーンで電子デバイスのメリットを享受できます。また、Ge は太陽電池や熱電変換素子としても有望な材料であり、本研究成果は、各種の革新的デバイスの実現にも貢献すると期待されます。

参考図

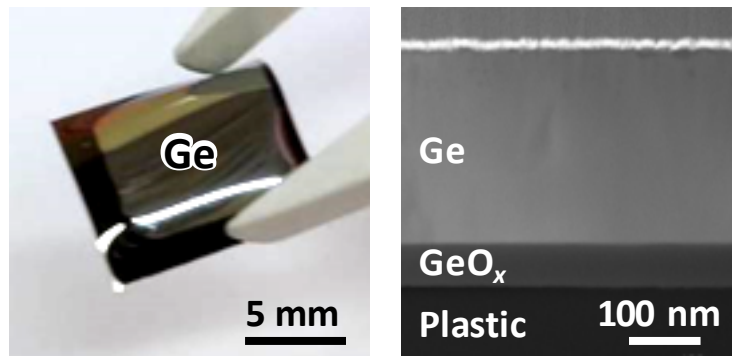


図 本研究で開発したプラスチックフィルム上 Ge 薄膜の写真（左）および断面電子顕微鏡像（右）。

用語解説

注1) キャリア移動度

半導体中で、電場によりキャリア（電子または正孔）が移動するときの移動のしやすさを示す値。さまざまな電子デバイスの性能に直結する重要なパラメータであり、この値が大きいほどトランジスタの動作速度が向上する。

注2) ゲルマニウム

シリコンと同じ IV 族の半導体。光検出器や多接合太陽電池に用いられる他、シリコンよりも電荷が移動しやすい性質をもつことから、次世代のトランジスタ用材料として研究されている。

注3) 非晶質

原子が不規則に並んだ、結晶ではない不安定な状態。熱を加えることで原子が移動し、結晶となる。

注4) 固相成長

非晶質状態の前駆体を、材料の融点以下で熱処理することで、固相で結晶が成長すること。半導体薄膜の固相成長はプロセスが簡便であることに加え、平坦な膜が得られやすいなど、産業応用上のメリットが大きい。

注5) 多結晶

いくつかの結晶の粒で構成された結晶。粒同士の間には存在する「粒界」が電荷の移動を妨げるため、ひとつの結晶から成る単結晶と比べて高いキャリア移動度を得にくい。

研究資金および利益相反の開示

本研究は、NEDO 先導研究プログラム/未踏チャレンジ 2050、JSPS 科研費 (No. 19J21034)、東電記念財団、および矢崎科学技術振興記念財団の支援によって実施されました。

なお、本研究に用いた耐熱プラスチックフィルムは、ゼノマックスジャパン株式会社との共同研究契約に基づき、同社から提供されたもの (XENOMAX[®]) を使用しました。

掲載論文

【題名】 Record-high hole mobility germanium on flexible plastic with controlled interfacial reaction.
(界面反応を制御したフレキシブルプラスチック上の最高正孔移動度ゲルマニウム)

【著者名】 Toshifumi Imajo, Takamitsu Ishiyama, Noriyuki Saitoh, Noriko Yoshizawa, Takashi Suemasu, Kaoru Toko

【掲載誌】 ACS Applied Electronic Materials (Supplementary Journal Cover)

【掲載日】 2021年12月21日

【DOI】 10.1021/acsaelm.1c00997

問合わせ先

【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 准教授

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

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報室

TEL: 029-853-2040

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