

新構造 SiC 素子で 600°C動作を達成

—真に実用的な極限環境集積回路の実現へ—

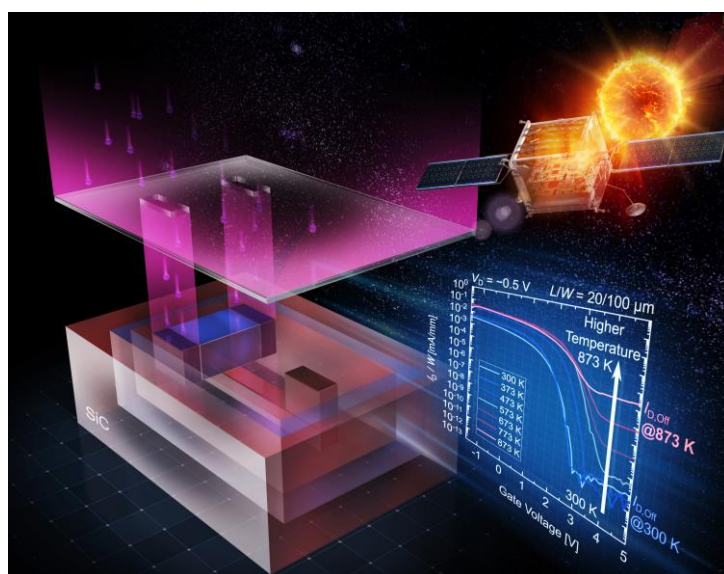
概要

京都大学大学院工学研究科 金子光顕 准教授、柴田峻弥 修士課程学生（研究当時）、木本恒暢 教授らの研究グループは、極限的な高温環境で動作する集積回路の実現を目指して、シリコンカーバイド（炭化ケイ素、SiC）を用いた新しいトランジスタ構造を開発し、摂氏 600 度での動作を実証しました。

現在広く使われているシリコン集積回路は、およそ摂氏 250 度を超えると正常に動作できません。このためジェットエンジンの内部や、金星の表面（およそ 460 度）といった環境では、動作が不可能でした。SiC は高温で動作できる次世代半導体として長年研究されてきましたが、イオン注入により作製した SiC 接合型トランジスタには、閾値電圧を正確に設計できないことと、高温で基板を通してリーク電流が流れてしまうという 2 つの大きな課題がありました。

研究グループは、ゲートをチャネルの下に配置する「ボトムゲート構造」と、pn 接合で素子を電氣的に分離する「ダブルウェル構造」を組み合わせることで、この 2 つの課題を同時に解決し、摂氏 600 度で安定に動作する SiC トランジスタを実証しました。今後は、この新構造を用いて回路化に取り組み、金星探査やジェットエンジン内部モニタリングなど、これまで電子回路が入り込めなかった極限環境での応用につなげていきます。

本研究成果は、2026 年 8 月 17 日に米国の国際学術誌「*APL Electronic Devices*」に招待論文としてオンライン掲載されました。また、本論文は当該学術誌の Featured article および AIP Publishing の Scilight に選出されています。



作製した SiC 接合型トランジスタのイメージ図と室温~600°Cの電気特性

©京都大学

1. 背景

ジェットエンジンの内部、地熱井の底、そして金星の表面など、電子回路にとって過酷な高温環境で動作するセンサーや制御回路が求められています。しかし、現在のシリコン製の半導体は、およそ摂氏 250 度を超えると正常に動作できません。金星探査機は過去の例でも、シリコン電子回路の熱耐性が原因で数時間しか活動できませんでした。

この壁を越える次世代半導体の代表格が、シリコンカーバイド（炭化ケイ素、SiC）です。SiC は非常に高温でも半導体として機能する物性を持ち、世界の複数の研究グループが摂氏 500 度以上で動作する SiC 集積回路を実証してきました。

これらのアプローチのうち、「イオン注入^{注1}」によりトランジスタを作る方式は、現在の半導体産業の標準的な製造工程との親和性が高く、産業応用の観点で重要な技術です。しかし、イオン注入で作る SiC 接合型トランジスタには、集積回路を組むうえで基本となる「閾値電圧^{注2}」を狙った通りに設計することが難しいという課題と、高温になると基板を通してリーク電流が流れ、回路が正常に動かなくなるという課題が残っていました。研究グループは、この2つの課題を同時に解決する新しい構造の開発に取り組みました。

2. 研究手法・成果

研究グループは、SiC の中に不純物イオンを打ち込んで局所的に p 型・n 型の領域を作る「イオン注入」の手法を用い、新しいトランジスタを作製・評価しました。

1つ目の工夫は、トランジスタのゲート電極をチャネル^{注3}の下に配置する「ボトムゲート構造」です。従来のようにゲートを上に置く構造では、イオン注入時に不純物が想定より深くまで潜り込む「チャネリング」という現象が起き、閾値電圧が設計値から大きくずれてしまいます。ボトムゲート構造ではこの深く潜った不純物をゲート側に取り込むため、閾値電圧の設計精度が大幅に向上しました。実際、閾値電圧の設計値と実測値の差を、摂氏 400 度において 0.1 ボルト以下まで抑えることに成功しました（従来構造では 2 ボルト以上ずれていました）。

2つ目の工夫は、トランジスタを「ダブルウェル」と呼ばれる pn 接合による分離構造の中に組み込むことです。従来は SiC の半絶縁性基板^{注4}そのものを絶縁体として利用していましたが、この基板は高温になると絶縁性を失い、リーク電流の原因になっていました。pn 接合を使った分離であれば、高温でも絶縁性が保たれます。この結果、リーク電流を大幅に低減し、摂氏 600 度（873 ケルビン）での安定なトランジスタ動作を実証しました。

さらに、残ったリーク電流の温度依存性を詳しく解析した結果、それが SiC の物性で決まる理論的な下限値に近いところまで抑えられていることが分かりました。これは、この構造で達成したリーク電流の低さが、材料そのものが持つ物理的な限界に近いことを意味します。

3. 波及効果、今後の予定

本研究で実証したトランジスタは、これまでのイオン注入で作製した SiC 接合型トランジスタでは難しかった摂氏 600 度という高温での安定動作を実現しました。この技術が発展すれば、金星表面探査、ジェットエン

ジンや発電用ガスタービンの内部モニタリング、地熱資源開発のための孔内センシングなど、シリコン電子回路では原理的に到達できない環境での電子回路応用が視野に入ります。

一方、今回のトランジスタは動作原理の実証を目的として設計されており、実際の論理回路（コンピュータや制御回路の基本要素）を組むために必要となる「ノーマリオフ動作^{注5}」には対応していません。今後は、この新しい構造を用いてノーマリオフ動作のトランジスタを設計し、n型・p型を組み合わせた低消費電力の相補型 JFET 集積回路（SiC CJFET）を実現することを目指します。また、実用化に向けては、高温環境で長時間にわたって安定に動作することを確認する信頼性評価や、周辺のパッケージ・配線材料の耐熱化など、多くの課題を解決していく必要があります。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は公益財団法人キヤノン財団の研究助成の支援を受けて実施されました。

<用語解説>

注1：イオン注入

半導体の中に、特定の元素のイオンを電界で加速して打ち込み、目的の場所だけに不純物（ドーパント）を導入する技術です。現在のシリコン半導体産業でも標準的に使われている加工方法で、半導体の中の狭い領域を精密に p 型・n 型に作り分けることができます。

注2：閾値電圧（しきいちでんあつ）

トランジスタが「オン」（電流が流れる状態）と「オフ」（電流が流れない状態）を切り替える境目の電圧です。集積回路を設計する上で最も基本となるパラメータのひとつで、この値が設計通りにならないと、そもそも回路が正しく動作しません。

注3：チャネル

トランジスタの中で、電流が流れる通り道となる薄い半導体層のことです。この層の厚さや不純物の濃度によって、閾値電圧などトランジスタの基本特性が決まります。

注4：半絶縁性基板

不純物を極めて少なくすることで、通常の半導体よりもはるかに電気を通しにくくした SiC の土台のことです。トランジスタ同士を電氣的に絶縁する目的で使われますが、高温になると絶縁性が低下してしまうという欠点があります。

注5：ノーマリオフ動作

何も電圧をかけていない状態でトランジスタが「オフ」（電流が流れない状態）になっている動作モードです。逆に、電圧をかけないと自然に電流が流れている状態を「ノーマリオン動作」といいます。ノーマリオフ動作は、消費電力が低い集積回路（相補型）を実現するために不可欠です。

<研究者のコメント>

高温で動く半導体、と聞くと遠い応用の話に聞こえるかもしれませんが。しかし、ジェットエンジンや発電用ガスタービンの効率化、地熱資源の開発、将来の惑星探査は、いずれもエネルギーや持続可能性に関わる決して遠くない課題です。ここで使える半導体デバイスが無いことが、これらの分野の技術発展を静かに、しかし確実に制約してきました。基礎研究と社会実装の両輪で、極限環境エレクトロニクスを本当に社会の役に立つ技術に育てていきたいです。(金子 光顕)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Over 600° C operation of ion-implantation-based SiC bottom-gate JFETs (イオン注入で作製した SiC ボトムゲート JFET の 600°C動作)

著 者：Mitsuaki Kaneko, Shunya Shibata, Tsunenobu Kimoto

掲 載 誌：APL Electronic Devices DOI：10.1063/5.0346734