

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料 〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

研究期間：2021～2025
課題番号：21H05003
研究課題名：ロバストエレクトロニクスを目指したSiC半導体の学理深化
研究代表者氏名（ローマ字）：木本 恒暢（KIMOTO Tsunenobu）
所属研究機関・部局・職：京都大学・工学研究科・教授
研究者番号：80225078

研究の概要：

エレクトロニクス社会を支える半導体はSiを中心として発展してきたが、その技術は成熟しつつある。炭化珪素(SiC)は高い電界強度や高温に耐える優れた性質を有する半導体であり、Siの限界を打破する高耐電圧・低損失トランジスタや高温動作集積回路を実現できる。本研究では、SiC半導体における電子の挙動や酸化膜/SiC界面物性、SiCトランジスタ特性を実験および計算により明らかにする。

研究分野：電気電子材料

キーワード：炭化珪素、酸化膜/半導体界面、トランジスタ、絶縁破壊、高温動作集積回路

1．研究開始当初の背景

SiC半導体は、高品質・大口径ウェハを作製可能で、広禁制帯幅半導体としては例外的に広範囲のn型、p型伝導性制御が容易であるので、SiCを用いればSi限界を打破する各種の高性能トランジスタを実現できる。最近、耐電圧1~3kV級のSiCパワーデバイスの実用化が始まり、各種機器(電源、太陽電池用パワコン、電気自動車、電車等)で省エネ効果を発揮しているが、SiC本来の特性から大きく乖離している。この原因は、酸化膜/SiC界面(MOS界面)に存在する高密度の欠陥にある。また、SiC MOS反転層内のキャリア散乱過程が未知であるため、トランジスタ構造が与えられても特性を予測できないという問題があった。さらに、SiC特有の高電界(MV/cm)における電子物性や接合の絶縁破壊機構が未知であるため、高性能・高機能SiCデバイスの設計に大きな支障を来していた。

2．研究の目的

本研究ではSiCを用いたロバスト(堅牢)エレクトロニクスの開拓に取り組む。高電圧・高温で動作する電力用デバイスおよび低消費電力CMOS(相補型MOS)集積回路の実現に向けて、高品質酸化膜/SiC界面の形成と高性能トランジスタの実証、MOS界面におけるキャリア輸送のモデル化、CMOS素子の高温動作実証を行う。また、高電界における電子物性および絶縁破壊機構を実験的に明らかにすると共に、その理論的裏付けを行う。複雑材料系の界面電子物性、高エネルギーキャリアの輸送、極限環境におけるデバイス動作に関わる学理の革新と深化を目指す。

3．研究の方法

- 1) 独自に提案した革新的な酸化膜形成手法をさらに高度化し、その高品質SiC MOS界面の電子物性と界面構造を解明する。
- 2) 上記の高品質MOS界面を利用したSiC MOSトランジスタの高性能化を実証すると共に、MOSトランジスタの特性予測を可能とする物理モデルを構築する。
- 3) SiCでは未開拓のpチャネルSiC MOSトランジスタおよびCMOS素子を作製し、その高性能化を図る。
- 4) SiCの高電界電子物性(電子および正孔の衝突イオン化係数、ドリフト速度など)の温度依存性、結晶方位依存性を実験および理論計算により解明する。
- 5) SiC pn接合およびショットキー障壁における高電界特性を体系的に調べ、絶縁破壊機構を解明する。

いずれも実験研究を基軸としながら、バンド構造やキャリア散乱を計算する研究と組み合わせ、半導体物理、結晶工学、電子デバイス工学などの学際的要素を含む研究とする。

4．これまでの成果

SiO₂/SiC界面の研究に関しては、過去30年以上に亘って採用されてきた熱酸化が本質的に界面近傍に高密度の欠陥(炭素関連欠陥)を生成することを見出し、この欠陥生成を回避する独自の酸化膜形成プロセスを提案して界面欠陥密度の大幅な低減とチャネル移動度の顕著な向上を達成した。特に高濃度ドーパされたp型ボディ領域上に作製したSiC(11 $\bar{2}$ 0)、(1 $\bar{1}$ 00) MOSFETのチャネル移動度(130~140 cm²/Vs)は従

来技術の 5~10 倍に相当する世界最高の値である (図 1)。これらの成果は酸化機構や欠陥物理などの材料科学に基づいて電子デバイスの性能を大幅に向上したものである。

SiC デバイスの高電界現象 (絶縁破壊機構、トンネル現象) の研究に関しては、電界集中を抑制した様々なダイオードを自作し、その特性を解析することによって衝突イオン化係数の大きな異方性を見出して、これを SiC 特有のバンド構造を考慮したフルバンドのモンテカルロシミュレーションにより説明した。また、高濃度ドーパされた SiC pn 接合およびショットキー障壁におけるトンネル電流についても、物理の基本に立ち戻った解析式を導出し、これを用いることによって (パラメータフィッティングなしに) 実験結果を 6 桁以上の電流密度範囲で定量的に説明できることを示した (図 2)。いずれも実験研究と理論研究の融合によってワイドギャップ半導体のデバイス物理に明確な理解を与える成果である。

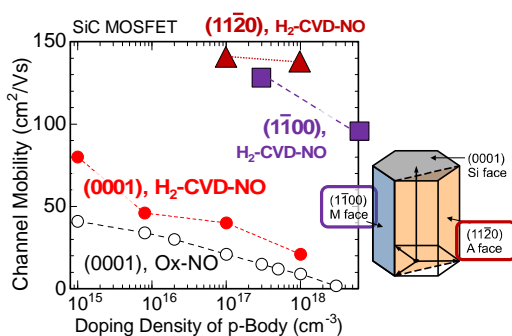


図 1: 酸化抑制プロセス(H₂-CVD-NO)による SiC MOSFET の移動度向上

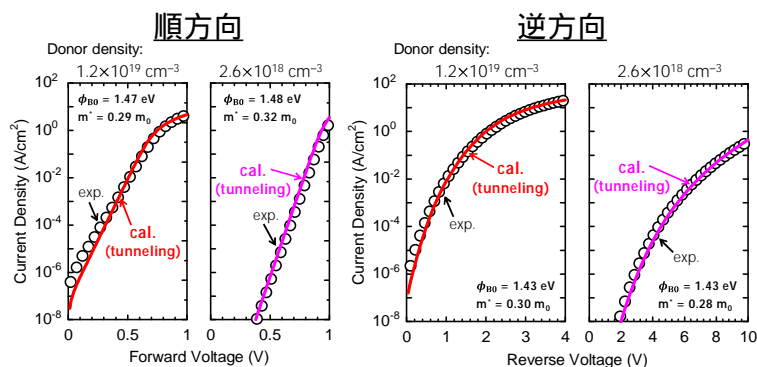


図 2: Ni/高濃度 n 型 SiC ショットキー障壁の電気的特性の実測結果と計算結果

5 . 今後の計画

SiC MOS 界面の研究に関しては、MOS-Hall 効果測定を低温 ~ 高温で実施し、キャリア移動度と実効垂直電界の関係性を求めてキャリア散乱機構を議論するデータを取得する。一方、反転層内のキャリアの波動関数とサブバンドエネルギーを計算し、SiC 特有の界面準位捕獲キャリアの影響を考慮したキャリア散乱過程を計算するモデルを構築し、上記の MOS-Hall 効果データを再現する。また、n チャネル素子と p チャネル素子を組み合わせた SiC CMOS 素子を作製し、その高性能化と高温動作を実証する。

SiC の高電界現象の研究に関しては、Time-of-Flight 法等により電子および正孔のドリフト速度の電界強度依存性を決定すると共に、フルバンド計算によりキャリア輸送を解析して理論的解釈を与える。また、金属/高濃度ドーパ SiC の電気的特性に関する実験研究と計算研究を進展させ、低い接触抵抗率を有するオーム性電極の形成を目指す。

6 . これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- 1) M. Hara, M. Kaneko, and T. Kimoto, “Enhanced tunneling current and low contact resistivity at Mg contacts on heavily phosphorus-ion-implanted SiC,” *Appl. Phys. Express*, **16**, 021003 (2023). 【査読有】
- 2) K. Tachiki, K. Mikami, K. Ito, M. Kaneko, and T. Kimoto, “Mobility enhancement in heavily doped 4H-SiC (0001), (1120), and (1100) MOSFETs via an oxidation-minimizing process,” *Appl. Phys. Express*, **15**, 071001 (2022). 【査読有】
- 3) H. Tanaka, T. Kimoto, and N. Mori, “Simulation analysis of high-field carrier transport in wide-bandgap semiconductors considering tunable band structures and scattering processes,” *J. Appl. Phys.*, **131**, 225701 (2022). 【査読有】
- 4) T. Kimoto, “High-voltage SiC power devices for improved energy efficiency” (解説論文), *Proc. Japan Academy, Ser. B*, **98**, 161–189 (2022). 【査読有】(論文投稿日: 2021 年 4 月 20 日、改訂日: 2021 年 12 月 16 日、受理日: 2022 年 1 月 19 日。論文投稿日が研究開始日より前であるが、本基盤研究(S)の成果(pn 接合の絶縁破壊、SiO₂/SiC 界面特性の向上)を追加して改訂した論文である。)
- 5) K. Mikami, K. Tachiki, K. Ito, and T. Kimoto, “Body doping dependence of field-effect mobility in both n- and p-channel 4H-SiC metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with nitrated gate oxides,” *Appl. Phys. Express*, **15**, 036503 (2022). 【査読有】

7 . ホームページ等

<https://semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp/%e6%88%90%e6%9e%9c%e7%99%ba%e8%a1%a8>