

令和 4 年 6 月 18 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04494

研究課題名(和文) SiC MOS界面の反転層移動度の散乱機構の研究

研究課題名(英文) A study on scattering mechanisms of inversion layer mobility in SiC MOSFETs

研究代表者

畠山 哲夫 (Hatakeyama, Tetsuo)

富山県立大学・工学部・教授

研究者番号：90222215

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：SiC MOS界面の物性を考慮した散乱理論に基づく移動度計算プログラムを開発し、移動度計算と移動度測定結果を比較することにより、まずSiC MOS界面移動度の劣化要因はフォノン散乱及び界面のクーロン散乱ではないことを示した。次にSiC MOS界面移動度の実効電界依存性、電子濃度依存性はMOS界面の双極子による散乱で説明できることを示した。界面双極子の生成機構を考察し、SiC MOS界面近傍の高密度格子欠陥が界面電荷移動層に乱れを生じさせ、界面双極子が生成されるというメカニズムを提案した。以上によりSiC MOS界面移動度の主な劣化要因は、高密度のMOS界面双極子の可能性が高いと結論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SiC MOS界面の移動度は、SiC材料自体の移動度と比べて非常に小さく、SiC MOSFETの性能を律速している。そのためSiC MOSFETの活用範囲は界面の移動度の影響が少ない高電圧の電力機器に限定されている。SiC MOS界面の移動度の改善はSiC MOSFETの活用範囲を広げ、省エネへのインパクトが大きい。一方、SiC MOS界面の移動度改善の研究は20年以上取り組まれていたが、困難な問題であり、十分な成果が上がっていない。本研究はSiC MOS界面の移動度の劣化の物理の本質に迫るものであり、移動度問題解決のロードマップの最初のマイルストーンとなる成果である。

研究成果の概要(英文)：At first, to examine the dominant scattering mechanism of the measured mobility at SiC MOS interfaces, we have developed a mobility calculation program based on the scattering theory of two-dimensional electron gas considering the physical properties of SiC. By the comparison between experimental results and calculated results, it has been shown that the dominant deterioration factor of the SiC MOS interface mobility is neither phonon scattering nor Coulomb scattering. Furthermore, we have also shown that the effective electric field dependence and electron concentration dependence of the measured mobility can be reproduced by calculated mobility limited by the scattering originated from the dipoles at the MOS interface. We have investigated the possible mechanism of the formation of dipoles at the interface. It has been concluded that the dominant deterioration factor of mobility at the SiC MOS interfaces is likely to be scattering by high-density of dipoles at the MOS interface.

研究分野：電気電子工学 電子デバイス分野

キーワード：電子デバイス 電気双極子 界面テクノロジー パワーデバイス MOSFET 移動度 シリコンカーバイド 散乱機構

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

次世代パワーデバイスである SiC-MOSFET はその優れた省エネ特性から新幹線や通勤電車、エアコン、電気自動車などに採用が進んでいる。SiC MOSFET の弱点であり、喫緊の開発課題は SiC MOS 界面の低移動度の改善である。現状の SiC MOSFET の MOS 界面の反転層移動度は SiC のバルク移動度の 1/10 以下であり、SiC 材料のポテンシャルを活かすための大きな障害となっている。

SiC MOS 界面の低移動度の要因は MOS 界面の価電子帯近傍の界面準位の電子捕獲による自由電子密度の低下と、自由電子自体の移動度の低下の 2 つに分解できる*。前者に関してはプロセス条件の最適化と MOS 界面に用いる面方位を選択することにより可動電子の比率を高めることが可能であることが示されている*。一方、後者の自由電子の移動度に関しては、改善の報告はあるが、その改善手法の開発指針は定まっていない。自由電子の移動度の劣化要因に関しても多くの検討がなされているが、結論は定まっていない。従って、自由電子の移動度改善の開発方針を定めるために、まず自由電子の移動度の劣化要因を明確化することが強く求められている。

*本研究代表者と共同研究者による本研究開始以前に発表された研究成果

2. 研究の目的

以上で述べた様に、SiC MOS 界面の自由電子の移動度を向上させることが強く求められている。しかしながら SiC MOS 界面の移動度向上の課題は 20 年以上取り組まれているにも関わらず十分な成果が得られていない非常に困難な課題である。開発の遅延の理由の一つとして SiC MOS 移動度劣化機構が十分に解明されていないことが挙げられる。そこで、上記に述べた移動度劣化機構の 2 つの要因(電子捕獲と自由電子移動度の劣化)の中で、まだ理解されていない自由電子移動度の劣化要因の明確化を本研究の目的として設定した。

3. 研究の方法

本研究では、SiC MOS 界面の移動度低下の原因となる主たる散乱要因をホール効果による移動度の測定結果と擬二次元電子ガスの散乱理論(マルチバンド計算で三次元の影響を取り入れる)による理論計算による散乱要因別の移動度の比較から推定した。

4. 研究成果

(1)フォノン散乱移動度と実験結果の比較

まず SiC の物性から予測される SiC MOS 理想界面(欠陥等の散乱要因が無い)の移動度を調べた。SiC のバルク中の電子移動度は実験で用いられている低濃度基板ではフォノン散乱で律速される。従って SiC MOS 界面の電子(擬二次元電子ガス)の理想界面の移動度はフォノン散乱移動度である。図 1 にフォノン散乱移動度の計算結果と実験結果を示す。横軸は MOS 界面の実効電界である。フォノン散乱移動度の特徴として、低い実効電界において計算した移動度は SiC バルク移動度を再現するようになる。低電界状態では、閉じ込めが弱い擬二次元電子ガスは三次元的な性質を取り戻すためと考えられる。実際、図 1 の計算結果に示されるように SiC MOS 界面の電子のフォノン移動度は低

電界領域ではバルクのフォノン移動度の 9 割程度の値を示している。実効電界が 1 MV/cm 程度の高電界領域で閉じ込め効果が強い場合でもバルク移動度の 5 割以上の値になっている。一方、移動度の実験結果の電界依存性の指数は音響フォノン散乱移動度とほぼ同じだが、絶対値が全

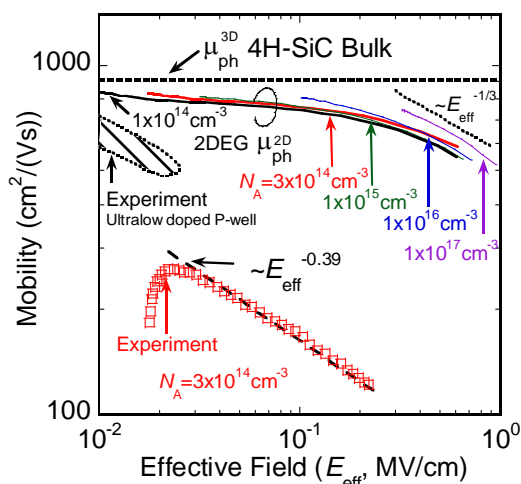


図 1: SiC MOS 界面のフォノン散乱移動度の計算結果と実験結果の比較

く異なる。以上の考察より、SiC MOS 界面の移動度はフォノン散乱以外の外的な要因で制限されていると結論した。

(2)クーロン散乱移動度

SiC MOS 界面の外的な散乱要因としてまず考えられるのは界面のクーロン散乱体である。図2に界面に $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ の密度でクーロン散乱体が存在する場合の界面クーロン散乱移動度と実験結果の比較を示す。界面クーロン散乱移動度では波動関数と界面との距離(実効電界に依存)と遮蔽効果(キャリア濃度に依存)が重要なパラメタとなる。キャリア濃度が大きくなると、遮蔽効果は増大し、散乱強度は抑制される。一方、実効電界は大きくなるため、波動関数は界面に押し付けられ、クーロン力が大きくなり散乱強度は増大する。図2の計算結果では実効電界が増加(キャリア濃度が増加)すると移動度は増加(散乱強度が下がる)しているため遮蔽効果が大きいことがわかる。この計算結果は図2に示されている様に実験結果と相反するので、界面のクーロン散乱体はSiC MOS 界面の移動度劣化の主要因ではないと結論できる。

(3)双極子散乱移動度

以上の議論から示された様にフォノン散乱移動度およびクーロン散乱移動度でSiC MOS 界面の移動度の実験結果を再現するのは難しい。そこで実験結果を説明できる散乱体の特徴を考えてみる。(2)の移動度に対する遮蔽効果と閉じ込め効果の競合の議論より、SiC MOS 界面の移動度を律速する散乱機構では遮蔽の影響がクーロン力より弱く、閉じ込めの影響はクーロン力より強いことが必要である。この2つの条件は相互作用の到達距離がクーロン力より短い散乱ポテンシャルの想定することで満たすことができる。つまり相互作用の到達距離が短いので遮蔽効果は弱くなり、また相互作用の強度は散乱体近傍ではクーロン力より急激に増加するので、電子の閉じ込めに対して散乱強度はより増加する。そこで、我々は到達距離がクーロン力より短い双極子による散乱を考えた。この双極子散乱が、SiC MOS 界面移動度の律速要因となる可能性を計算と実験結果の比較により検討した(双極子電荷の距離を仮に 10 \AA と仮定している)。計算結果を図3に示す。図3から分かる様に双極子散乱とフォノン散乱を合成した移動度は実験結果に類似した実効電界依存性を示す。さらに基板濃度が高い場合においても双極子散乱移動度は実験結果と類似した実効電界を示す。双極子散乱移動度では基板濃度が高い場合において遮蔽効果がより顕著に表れる。図3に示されている様に実験結果も同じ特徴を示している。以上、計算と実験の一致より双極子散乱がSiC MOS 界面の主要な散乱機構であると結論した。

(4)双極子散乱体の起源について

双極子は、界面に電荷の平衡状態からの乱れがあれば、電界分布の多重極展開の第2項として自然に定義される。一般にMOS 界面には界面電荷移動があり、自然に双極子が形成されている。SiC MOS 界面近傍には高密度で格子欠陥が生成されることが予測されている。この格子欠陥が界面電荷移動層に乱れを生じさせ、界面双極子が生成されるというメカニズムを提案した。

以上の検討により、SiC MOS 界面の移動度劣化要因を双極子散乱体と特定して明確化した。次のステップとして双極子散乱体の具体的な物理的実体を明確化し、双極子散乱体密度を低減し移動度向上が可能な半導体プロセス手法の考案に繋げていきたい。

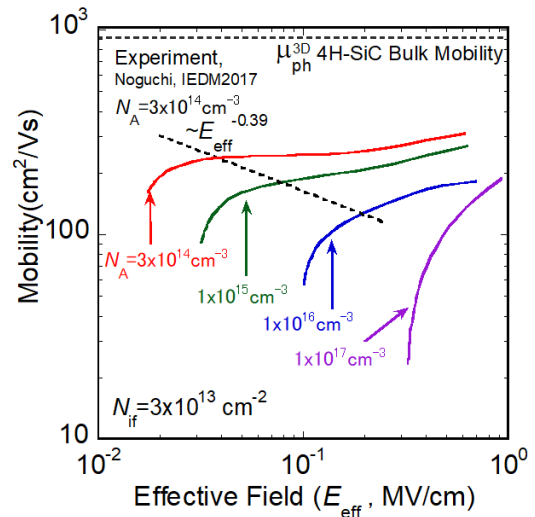


図2: SiC MOS 界面のクーロン散乱移動度の計算結果と実験結果の比較

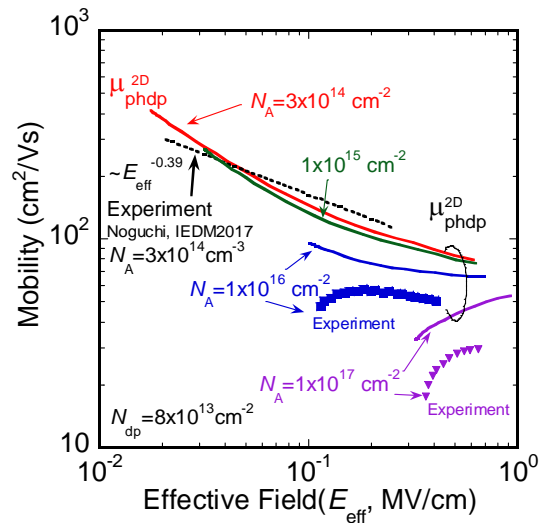


図3: 双極子散乱移動度(フォノン散乱移動度との合成)と移動度の実験結果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hirai Hirohisa, Hatakeyama Tetsuo, Sometani Mitsuru, Okamoto Mitsuo, Harada Shinsuke, Okumura Hajime, Yamaguchi Hiroshi	4. 巻 117
2. 論文標題 Difference in electron mobility at 4H-SiC/SiO ₂ interfaces with various crystal faces originating from effective-field-dependent scattering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 042101 ~ 042101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0012324	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hirai Hirohisa, Hatakeyama Tetsuo, Sometani Mitsuru, Okamoto Mitsuo, Harada Shinsuke, Okumura Hajime	4. 巻 115
2. 論文標題 Mobility-limiting Coulomb scattering in nitrided 4H-SiC inversion channel on m-face and 11 2 0 a-face characterized by Hall effect measurements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 132106 ~ 132106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5114669	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sometani Mitsuru, Hosoi Takuji, Hirai Hirohisa, Hatakeyama Tetsuo, Harada Shinsuke, Yano Hiroshi, Shimura Takayoshi, Watanabe Heiji, Yonezawa Yoshiyuki, Okumura Hajime	4. 巻 115
2. 論文標題 Ideal phonon-scattering-limited mobility in inversion channels of 4H-SiC(0001) MOSFETs with ultralow net doping concentrations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 132102 ~ 132102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5115304	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hatakeyama Tetsuo, Hirai Hirohisa, Sometani Mitsuru, Okamoto Dai, Okamoto Mitsuo, Harada Shinsuke	4. 巻 131
2. 論文標題 Dipole scattering at the interface: The origin of low mobility observed in SiC MOSFETs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 145701 ~ 145701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0086172	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 畠山 哲夫, 平井 悠久, 染谷 満 岡本 大, 岡本 光央, 原田 信介
2. 発表標題 SiC MOS反転層移動度の劣化要因に関する理論的考察
3. 学会等名 電子デバイス界面テクノロジー研究会 (第26回研究会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tetsuo Hatakeyama, Minoru Sometani, Hirohisa Hirai, Shinsuke Harada
2. 発表標題 [We-2A-02] The Effects of Coulomb Scattering Centers at SiO ₂ /SiC interfaces on Electron Mobility in Inversion Layers
3. 学会等名 International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 [We-2A-04] Independent Elimination of Traps and Scattering Centers by NO Annealing in 4H-SiC (11-20) a-face MOS Characterized by Hall Effect Measurement
2. 発表標題 Hirohisa Hirai, Tetsuo Hatakeyama, Mitsuru Sometani, Mitsuo Okamoto, Shinsuke Harada, Hajime Okumura
3. 学会等名 International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	平井 悠久 (Hirai Hirohisa)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	染谷 満 (Sometani Mitsuru)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関