

# 研 究 報 告 書

## 「SiC-MOSFET の抵抗損失低減のための界面制御技術」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成23年12月～平成27年3月

研 究 者: 喜多 浩之

### 1. 研究のねらい

電力制御用パワーデバイス技術向上によるエネルギー高効率利用が期待されている。既に普及している家庭機器だけでなく、EV や HEV 等の自動車用途、分散電源用途、さらには送電・変電設備等での効率向上が求められており、特に高電圧・大電流用途の高耐圧デバイスの特性の向上には大きな省電力効果が期待される。そこで高い絶縁破壊電界強度を実現するのに有利な SiC パワーデバイスの本格的な普及が鍵となる。ところが SiC 製ダイオードについては既に商用化も進みつつある一方、スイッチング素子である SiC 製 MOSFET については未だ開発途上であり、本格的な普及には至っていないのが実情である。

SiC MOSFET は、理論的には Si 製の IGBT 素子を凌駕する低オン抵抗と高スイッチング速度を期待できる。しかしながらその性能が不十分となる最大の要因は、未成熟な MOS 界面（酸化膜／SiC 界面）形成技術のためにチャネル中のキャリア移動度が低くなることである。そのためにオン抵抗が下がらず、また多量の界面欠陥は長期の動作信頼性を低下させるという問題も生じている。これらの本質的な解決のためには、反応制御に基づいた新しい界面形成技術を構築することによって、界面に導入される欠陥準位密度を大幅に低下させることが必要であると考えられる。

MOS 界面は主に SiC 表面の熱酸化によって  $\text{SiO}_2$  を形成する反応を利用して形成されるが、その副生成物である炭素が脱離せずに界面に残留すれば、酸化膜形成を阻害し、界面劣化を引き起こすことが危惧されている。これまでは、どのようにすれば炭素を円滑に脱離させることができるのかについて明確な指針がないまま、主に種々の雰囲気でのアニールや、窒素や水素の界面への導入による界面修繕効果について広く検討されてきた。本研究では、これらの動向とは一線を画し、SiC MOS 界面の形成過程の材料科学的な理解へ立ち戻り、その理解に基づいたプロセス設計によって理想的な MOS 界面形成を実現する。MOS キャパシタや MOSFET を試作し、それらのデバイス特性から界面制御の効果を実証することを目指す。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

一般に熱酸化は高品質な MOS 界面を形成する役割を期待されるのだが、SiC では副生成物の残留の問題がある。そこで熱酸化の条件を絞り込み、界面で生じる副生成物が CO として速やかに脱離しながら酸化を進行させるのが理想的だと考えた。4H-SiC(0001)面上でナノメートルの膜厚領域での熱酸化膜成長過程を調べてみると、界面反応律速であり CO の外方拡散は容易に生じると推定された。成長速度の活性化エネルギーは温度と酸素分圧によって値が異なり、反応モードが条件によって遷移していた。熱力学的な考察から、低温では C を固相に残しながら熱酸化が進行することが好まれるのに対し、高温では  $\text{SiO}_2$  を作ると同時に CO

分子を放出する理想モードが支配的だと推定された。

そこで、この条件に限定した酸化を行うことで理想界面に近づくことが可能と考え、MOS キャパシタによる界面特性の評価を行った。急速昇降温が可能なランプ加熱炉により 1300℃にて 4H-SiC(0001)面上に熱酸化膜を成長させた場合、容量—電圧特性はポアソン方程式から理論的に期待される特性にほぼ一致した。コンダクタンス法により界面欠陥準位密度( $D_{it}$ )を評価したところ、特に酸化後に 800℃の低温  $O_2$  アニールを行った場合、伝導帯端から 0.1eV～0.5eV と広い範囲において  $10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$  以下にまで低下した界面が実証できた。

一方、FTIR-ATR による MOS 界面構造の解析により、2つの発見があった。第一に、熱酸化膜を薄膜化すると Si-O-Si の伸縮振動ピークが低波数シフトを示し、界面に近づくにつれて構造歪みや不定比性が増大することが検出された。即ち、この界面には、原子配置の不整合を緩和する役割を持つ構造が自発的に形成するという熱酸化の特徴が備わっている。またその歪みは基板表面の原子配置の影響を受け、4H-SiC(0001)面において(000-1)面よりも小さくなる。第二の発見は、界面近傍のみで検出される、酸化によって生じる副生成物に由来したピークの存在である。そのピーク位置と、 $^{18}O_2$  酸化によって同位体効果を示す事実から 界面近傍で配位をした CO 構造に由来すると推定した。このピークは低温において  $O_2$  を酸化剤とした酸化のときだけに顕在化することから、界面特性が酸化条件に強く依存するという前述の結果ともよく整合する結果である。

## (2) 詳細

### 【 研究項目 A : SiC MOS 界面の形成手法の開発 】

従来、SiC の熱酸化によって作られる MOS 界面特性が向上しない原因として、熱酸化の際に余剰となる炭素が副生成物を生じて、界面での酸化膜形成を阻害することが考えられてきた。しかし、熱酸化反応を完全に抑制して MOS 界面を形成しても、研究項目 B で述べるような熱酸化膜の長所を生かすことができず、結局のところ高品質な界面の達成は望めない。従って、熱酸化の長所を用いながらも、それと同時に副生成物の影響を取り除くのが望ましい。SiC 熱酸化反応を理想化するために重要なのは、炭素由来の副生成物を速やかに取り除きながら酸化が進行する状況を、速度論と熱力学の2つの観点から作り出すことである。SiC の酸化は 1)  $O_2$  分子の膜中拡散、2)  $SiO_2$  形成反応、3) 余剰炭素が CO として外方へ拡散、の3段階で進行することに着目すると、3段階目の CO 脱離を速やかに進行させることが重要となる(図1)。

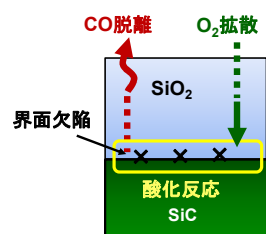


図1. SiCの熱酸化が3段階で進行することの模式図

速度論の観点から、CO の外方拡散によって質的に有利となるのは薄膜領域で界面反応律速となる状況である。そこでナノメートルオーダーの膜厚領域の成長過程を 4H-SiC(0001) について 1100℃～1300℃で調査したところ、時間に対して直線的に成長膜厚が増大する、即ち、この膜厚領域では界面反応律速とみなせることが明らかとなり、生成するCOの脱離は速やかに生じているとみなせる。ところがこの成長速度の温度依存性を調査したところ、1100℃以下では活性化エネルギーが減少し、反応モードの遷移が示唆された(図2)。酸化反応が速いことが知られる 4H-SiC(000-1)面の酸化においても同様に反応モードの切り替わりが観測

され、しかもその切り替わりの温度が窒素希釈によって酸素分圧を下げることで低温化することが見出された。つまり温度と酸素分圧、すなわち反応の熱力学的な条件が反応モードを決めていることがわかる。高温側は両結晶面に共通して 3.8eV と大きな活性化エネルギーを示し、また、酸化膜成長速度の酸素分圧依存性から決める反応次数は約 0.5 であった。これに対し、低温側での活性化エネルギーは(0001)面でおおよそ 2.4eV、(000-1)面で 1.6eV と差が現れ、また反応次数は約 1.0 となった。これらのことも、反応が条件によって遷移していることを強く支持する。これらのうち、後述する理由により、特に高温側の反応が重要である。この反応は、界面からのカルボニル基を経た CO の直接放出に律速された反応だと仮定すると、計算から推定された高いエネルギー障壁 (A. Gavrikov et al., J.Appl.Phys. 104, 0935 08 (2008)) から高い活性化エネルギーが無理なく説明され、また後述の反応モードの遷移に関する理解とも矛盾しない。

次に、これらの反応モードの実体の推定のため、熱力学的な条件によって SiC と O<sub>2</sub> の反応が違ふ可能性を考察した。まず、熱力学的に平衡状態の界面(界面反応律速下)で生じる反応の優先度を考察する手法 (Y. Song et al., J. Am. Ceram. Soc. 88, 1864 (2005)) を参考に、図3の①～③の反応の自由エネルギー変化  $\Delta G$  が最も負となるものが優先されると考えた。このうち  $\text{SiC} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{CO} \uparrow$  という、図中の②で示す反応が、界面から直接 CO を放出する理想的な反応であることは自明である。この反応が優先的に生じる条件は①と③の中間に限定されることが注目される。反応①では副生成物が C(固相)であり、界面や膜中に一旦 C を排出しながら  $\text{SiO}_2$  を形成する。この場合も C は最終的に酸化されて CO となって除去されるはずだが、界面に生成する C が界面の形成を阻害することは容易に想像できる。

一方の反応③は界面で  $\text{SiO} \uparrow$  をつくる反応なので、 $\text{SiO}_2$  の酸素欠損が過剰に導入される恐れがある。ここで、界面での実効的な酸素分圧は、気相中よりはるかに低いことには注意が必要である。例えば、与えられた酸素分圧に対するバルク  $\text{SiO}_2$  への溶解度によってこれを近似的に表すことが可能であろう。各反応の境界線は熱力学的な仮定からの推定線に過ぎず、定性的な意味しか持たないのであるが、4H-SiC (0001)面では実際の遷移がこの線に近く、(000-1)面では高温側へずれることが実験的に示唆された(詳細省略)。そこで、(0001)面に対して理想的な反応が支配する範囲だと予想された 1atm O<sub>2</sub>, 1100°C～1300°Cにおいて MOS キャパシタを作製し、界面特性の評価を行うこととした。ここで、実験上の鍵となるのはランプ加熱方式の急速昇降温が可能なる炉を用いたことであり、雰囲気一定のまま上記の最適温度領域だけで酸化を進行させる操作を行った。

容量—電圧特性(C-V 特性)の結果、図4に示すように、電位分布に関するポアソン方程

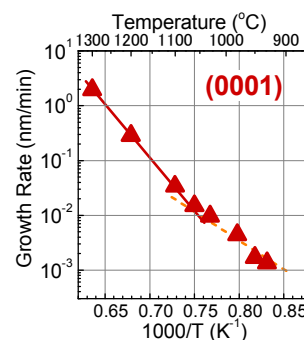


図2. 界面反応律速領域の酸化速度の温度依存性。傾きが 1100°C 付近で変化しているのは、反応モードの遷移によって活性化エネルギーが変化したためと推定される。

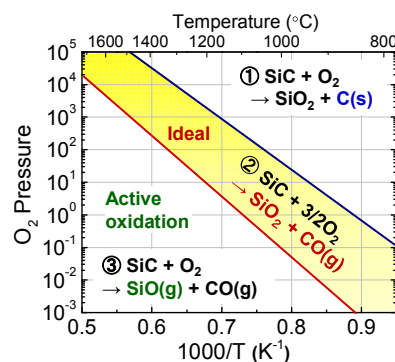


図3. 反応①～③のうち最も優先される反応は温度と酸素分圧により変化する。理想的な反応である②の条件は限定されている。酸素分圧は気相ではなく、界面の実効的な圧力であることに注意されたい。

式を解いて得られた理想曲線(ideal)とほぼ一致した特性が得られた。また周波数分散が小さいことから、界面欠陥やボーダートラップと呼ぶ界面近傍の欠陥の抑制に成功している。コンダクタンス法を適用して界面準位密度  $D_{it}$  を算出し、その分布について示したのが図5である。測定温度を様々に変化させた結果、伝導帯端から 0.1~0.5eV の範囲で、 $< 10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$  と世界的に最高水準の界面が得られていることが実証された。特に、酸化膜成長後に低温(800°C, 熱酸化による  $\text{SiO}_2$  の成長が極めて遅い温度)でアニールを行った場合に最も低い密度を示したことは、アニール処理の重要性を示す。アニール雰囲気をも  $\text{N}_2$  と  $\text{O}_2$  で変えて比較したところ、 $\text{N}_2$  では殆ど効果は見られなかったことから、単なる熱的な緩和ではなく、高温で不可避免的に導入される酸素欠損に由来した欠陥の修復が生じると予想している。次に、 $\text{O}_2$  アニールの処理時間依存性を調べたところ、加熱時間の延長は逆に劣化を引き起こすことがわかった。これは、 $\text{O}_2$  アニールが短時間で急速に効果を発揮する一方、時間とともに少しずつ低温での界面の酸化膜成長が無視できなくなって劣化するというトレードオフによると考えられる。本研究で得た最も優れた界面の  $D_{it}$  は Si-MOS と比肩できるレベルである。従来の SiC の MOS キャパシタでも酸化後に界面に他元素を導入する特殊な処理手法によって同程度の  $D_{it}$  が報告されたことはあるが、これらのものは製造工程を煩雑化させるだけでなく、信頼性の観点でも犠牲を避けられない。一方、本研究の手法は熱酸化の長所を、条件の制御だけで引き出したものである。

#### 【 研究項目 B: SiC/SiO<sub>2</sub> 界面構造の解析と理解 】

4H-SiC 上に形成される熱酸化  $\text{SiO}_2$  膜の界面近傍の構造解析のため FTIR-ATR 測定を行った。成長した酸化膜を希釈 HF 溶液中で逐次エッチングしながら Si-O-Si の非対称伸縮振動の LO モードのピーク位置の膜厚依存性を評価したところ、膜厚の減少と共に、図6に示す通り 2 nm 以下付近で LO モードの低波数シフトが明確に観察された。これは、界面に近づくにつれて構造的に歪み、また化学量論比を満たさない  $\text{SiO}_2$  が形成されていることを意味する。このような緩和構造は、Si 基板上の熱酸化膜においても歴史的に広く認識されているものであり、この点で SiC 熱酸化膜と Si 熱酸化膜は共通の特徴を持つことが確かめられる。この歪んだ構造は、界面における原子配列の不整合を緩衝する役割を担うと考えら

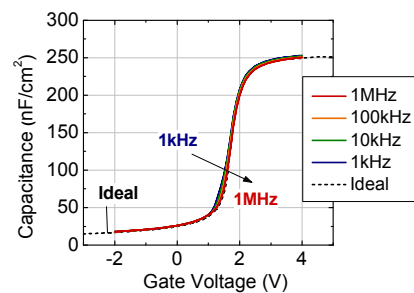


図4. 測定周波数を 1kHz~1MHz としたときの Au/SiO<sub>2</sub>/4H-SiC(0001) MOS キャパシタの C-V 特性。点線は理想曲線を示す。

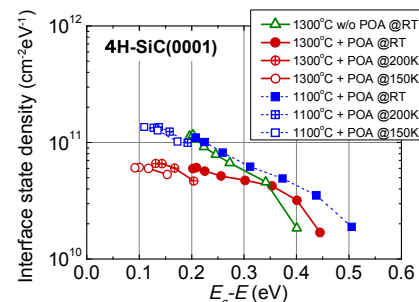


図5. コンダクタンス法を用いて決定した界面欠陥準位密度  $D_{it}$  の分布。横軸は伝導帯端からのエネルギー深さを表わす。

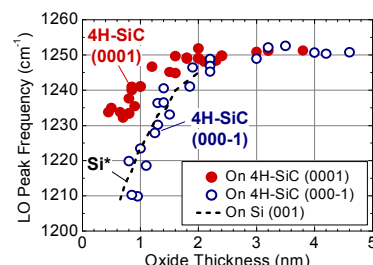


図6. 成長した熱酸化膜をエッチバックして薄膜したときの Si-O-Si 伸縮振動 LO モードのピークシフト。結晶面による違いが見られる。参考のため、Si 基板上の熱酸化膜の文献データ(\*S. Miyazaki et al., Appl. Surf. Sci. 113/114, 585 (1997))を点線で示した。



れ、MOS 界面欠陥準位を減じようとするときには決定的に重要となる。即ち、4H-SiC 上においても最も理想的な界面は、熱酸化反応によってこそ実現するという項目 A の検討結果とよく整合する結果である。さらに、表面原子配列の大きく異なる(0001)面と(000-1)面の2つの結晶面上の熱酸化膜を比較したところ、(0001)面の方が歪みの小さい界面となっていることが判明した。この違いは温度や酸素分圧を変えても常に現れるものであったため、反応速度や過程の違いではなく、表面原子配列の違いを反映したものである。(0001)面では表面 Si-O 結合の密度が少ないことと関連して、歪みの少ない構造をとると理解され、電気特性の観点からは、欠陥準位を導入する駆動力が少なく済む界面であることを示唆している可能性がある。この推定もまた、項目 A で高品質界面が(0001)面で比較的容易に得られたこととも矛盾しない。

FTIR-ATR スペクトルをさらに注意深く観測したところ、あるサンプル群には図7に示す通り、 $2100\text{cm}^{-1}$  付近に、SiC 基板や  $\text{SiO}_2$  には帰属できない弱いピークが現れた。熱酸化膜をエッチバックして薄膜化してもピーク強度が変わらないことから、界面から 1 nm 以内程度に局在する構造に由来することを確認した。従ってこのピークは、酸化によって界面に生じた副生成物を検出したものであると推定するのが妥当である。そこで、酸化温度や酸化雰囲気(ドライ/ウェット)を系統的に変えてこのピークが出現する条件を求めた。なお、ウェット酸化は  $\text{N}_2$  ガスを  $60^\circ\text{C}$  に保持した水を通じることでおよそ 0.2 atm の水蒸気を含ませて行った。その結果、低温でのドライ酸化のときにだけ顕在化するピークであり、特に  $500^\circ\text{C}$  程度まで低温化したときに明確なピークとなることが判明した。前述の熱力学的な成長条件による反応モードの遷移を考慮すると、低温モードでは C を固相に残しながら酸化が進行する方が好まれるのであり、このピークは C に由来した副生成物が脱離できずに界面に残留したものと推定される。一方、 $\text{N}_2$  をキャリアガスとしたウェット酸化の場合は低温成長であってもピークが観察されないため、 $\text{H}_2\text{O}$  を酸化剤とする場合には副生成物が自動的に除去されるのだと予想される。次に  $^{18}\text{O}_2$  同位体ガス中で酸化を行い、このピーク位置に与える影響を調べたところ、低波数側へのシフトが観察され、酸素を含む化合物に由来することが明らかとなった。観察された波数域を考慮すると、例えば SiC 界面近傍で化学的な吸着をして閉じ込められた CO が思い当たる。実際、 $^{18}\text{O}_2$  酸化で得られるシフト量は CO 分子に対する同位体効果と考えると矛盾のない量であり、また  $^{18}\text{O}_2$  で酸化後の試料の TDS 測定の結果、 $800^\circ\text{C}$  付近から質量数 30 ( $=\text{C}^{18}\text{O}$ ) の脱離ピークが立ち上がることが観察された。FTIR の検出感度の制約から、このような副生成物が検出されるのは、残留量が極めて高いときに制約されるものの、酸化条件によって界面反応が大きく変化することが明確となったことから、項目 A での反応モードの選択が重要との考察を強く支持する結果である。

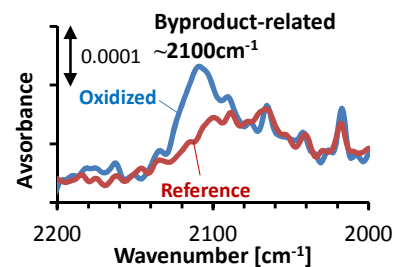


図7. FTIR により検出された界面に生成・残留する副生成物と推定されるピーク。低温のドライ  $\text{O}_2$  酸化のときのみ顕在化する。

### 3. 今後の展開

本研究の最大の成果は、SiC MOS 界面での酸化反応を本質的に理解することに基づいて界面特性の大幅向上に成功したことである。これを MOSFET へ適用すればチャネル移動度の大幅な向上が見込める。今後はこれを生かして以下のような展開を考えている。

- ・ 試作した MOSFET のチャネル移動度を系統的に評価し、その結果をフィードバックして、さらなる向上のための、特に酸化膜成長後の熱処理についての検討。
- ・ 現在は未解明のままである MOSFET チャネル移動度を制約する因子についての解析を行う。具体的には、クーロン散乱とそれ以外の散乱因子との分離、定量化を行って、さらなるチャネル移動度向上のための指針を明確化するための研究とする。
- ・ 本研究にて検討したのは主に 4H-SiC(0001)面上の MOS 特性であるが、次世代のトレンチ MOS 構造の実用化のためには、その他の結晶面上の MOS 特性の制御は不可欠となる。そこで反応性が異なる他の結晶面についても、本研究のコンセプトを拡張した検討を進める。

#### 4. 評価

##### (1) 自己評価

当初提案時より一貫して、MOS 界面の制御技術が MOSFET の核心部分だと主張してきたが、本研究ではまさにその核心部分で十分な成果を得た。特に、MOS 界面欠陥密度を、熱酸化プロセスの制御だけで大幅に低減できたことは、従来 SiC デバイス業界では「悪者」とされてきた熱酸化の意味を一新すると同時に、MOS デバイス開発のためのアプローチを大きく変えるだけの技術的なインパクトを与えることができたと考えている。実際、プロセスの効果を実証した論文を JST-東大共同のプレスリリースを行って頂いたお陰もあり、SiC デバイスメーカー大手数社から共同研究可能性を含めた情報交換を開始するに至った。また、国内の SiC 研究の中心をなす「先進パワー半導体分科会 研究会(旧 SiC 研究会)」での招待講演を行うなど、成果のアピールの場も多く得ることができ、研究開始から3年間での成果として満足している。

研究提案時には、MOS 界面の制御についてのアイデアを何通りか記述していたが、最も期待したアイデア(SiC 上の金属だけを選択酸化してつくる MOS)は殆ど進展がなく、逆に期待の小さかったアイデア(薄膜領域の熱酸化条件を改良)が成功するなど、予想外な展開ばかりであった。当初の見通しが非常に底の浅いものであったことを強く反省しているところであるが、幸い、見切りを早くつけて、注力する検討項目をシフトさせたのが奏功し、最終的な成果に結びつけることができた。これもさきがけ研究における弾性的に計画を運用できる仕組みに助けられた面が大きい。

また、研究提案時には、MOS 界面欠陥だけでなく、金属-SiC 界面の制御技術など視野を広く技術開発をおこなうことも考えたが、アドバイザーや総括の意見を受けて MOSFET の課題の核心に迫ることが最も重要と認識を改め、MOS 界面に注力した研究を遂行し、他の界面はあくまで MOSFET 試作に必要な技術の1つと位置付けた。3年間という期間を考えると、実際にこのような絞り込みは有効であったと考えている。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、さきがけ研究会、及び年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

MOSFET のエネルギー効率向上のための抵抗損失低減化に資する MOS 界面形成について研究を進め、SiC-MOSFET の真の性能を拓く成果を上げた点を高く評価します。

当初は研究の進展が芳しく無く、研究の継続性を心配することもありましたが、研究会や領域アドバイザーとの議論を重ね、しっかりと出口から見た課題を見据え、MOS 界面の欠陥軽減とドライ酸化プロセスに集中し、粘り強く、界面の形成過程を材料科学的な理解から

解き明かすという独自理念と、様々な試行錯誤を繰り返した結果、良い成果が得られ、課題を達成したものと考えます。

特に、熱処理方法の工夫で大きな成果を上げた点は着想の良さを示しているとともに、プレスリリースにより業界紙に取り上げられ、多くの企業との良い接点が出来きつつあることは、重要な課題を達成したインパクトの大きい研究と成果であったことを示しています。

今後は SIP で企業へつなげる応用研究への発展と量産技術へ展望を描き、研究を進展されることが期待されますが、実用技術化、量産技術化に向けては、さらに微細な制御が必要な方法論であると考えられ、基礎研究として、化学反応過程の詳細制御を達成すべく、熱力学的、速度論的、反応論的な分析と検討を進められることが期待されます。

また、計算科学的アプローチを組み合わせ、より深い理解が得られればさらに貢献は大きいものと考えられます。体制についても、SiC デバイス開発メーカー等と提携し、実デバイスに本研究の酸化プロセスを適用し、自身は酸化膜作製技術と評価、機構解明に集中するなど分担することも研究の効率を高めて早期に出口に到達するアイデアのように思います。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

1. Koji Kita, Yuki Fujino, Hirohisa Hirai, and Richard Heihachiro Kikuchi, "Transition of Thermal Oxidation Reaction Modes on 4H-SiC (0001) and (000-1) faces by Oxidation Temperature and Oxygen Partial Pressure", J. Appl. Phys., *submitted*
2. Hirohisa Hirai and Koji Kita, "Suppression of Oxidation-induced Byproduct Generation during Oxidation at 4H-SiC/SiO<sub>2</sub> Interface Characterized by Infrared Spectroscopy", Appl. Phys. Express,
3. Richard Heihachiro Kikuchi and Koji Kita, "Fabrication of SiO<sub>2</sub>/4H-SiC (0001) Interface with Nearly-Ideal Capacitance-Voltage Characteristics by Thermal Oxidation," Appl. Phys. Lett. 105, 032106 (2014).
4. Richard Heihachiro Kikuchi and Koji Kita, "Interface-reaction-limited growth of thermal oxides on 4H-SiC (0001) in nanometer-thick region", Appl. Phys. Lett. 104, 052106 (2014).
5. Hirohisa Hirai and Koji Kita, "Structural difference between near interface oxides grown on Si and C faces of 4H-SiC characterized by infrared spectroscopy", Appl. Phys. Lett. 103, 132106 (2013).

### (2) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 喜多浩之, 菊地リチャード平八郎, 平井悠久, 藤野雄貴「理想的な SiC MOS 特性の実現を目指した熱酸化プロセスの設計」応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第 1 回講演会 (2014 年 11 月 20 日, 名古屋), 招待講演.
2. プレスリリース:「次世代パワーデバイスの理想性能に近づく絶縁膜材料作製手法を開発～SiCと絶縁膜の界面欠陥解消による性能向上へ～」(2014 年 7 月 25 日 JST, 7 月 28 日 東京大学)

3. Koji Kita, "Achievement of Nearly-Ideal MOS Characteristics on 4H-SiC (0001) Based on Kinetic and Thermodynamic Control of Thermal Oxidation", The 18th Workshop on Dielectrics in Microelectronics (WODIM2014) (Jun 10, 2014, Kinsale, Ireland) 招待講演.
4. Koji Kita, Richard Heihachiro Kikuchi, and Hirohisa Hirai, "Understanding of Growth Kinetics of Thermal Oxides on 4H-SiC (0001) for Control of MOS Characteristics", 225th ECS Meeting (May 12, 2014, Orlando, USA) 招待講演.
5. Richard Heihachiro Kikuchi, Hirohisa Hirai, and Koji Kita, "Understanding of Growth Kinetics and Microscopic Structures of Nanometer-Thick Thermal Oxides on 4H-SiC", International Workshop on Dielectric Thin Films for Future Electron Devices: Science and Technology (2013 IWDTF), pp.107-108 (Nov. 8, 2013, Tokyo).

## 6.. その他関連の情報

### (1)新たに構築した研究ネットワーク

| 相手先分類 | 相手先名称            | 形態   | 概要                  |
|-------|------------------|------|---------------------|
| 企業    | 三菱電機             | 情報交換 | 共同研究について            |
| 企業    | 日立中研             | 意見交換 | MOS 界面形成技術について      |
| 企業    | デンソー・トヨタ自動車・豊田中研 | 意見交換 | MOS 界面形成技術について      |
| 企業    | 富士電機             | 意見交換 | 非公開                 |
| その他   | 産業技術総合研究所        | 意見交換 | MOS 界面欠陥密度の評価について   |
| さがけ内  | 二本柳聡史先生          | 試料提供 | 界面構造に関する解析技術の検討     |
| さがけ内  | 柴田直哉先生           | 試料提供 | 界面構造に関する解析技術の検討     |
| さがけ内  | 小野倫也先生           | 意見交換 | SiC MOS 界面欠陥の起源について |

### (2)研究会・領域会議での助言・指導による研究課題の進め方、方向修正等について

当初はいくつかの 4H-SiC の界面制御に関して広く扱い、特に MOS 界面については酸化膜質を含めた総合性能が重要との前提で研究計画を提案していた。しかしアドバイザーからは、まずは 4H-SiC の MOS 界面の欠陥密度が低減する技術を見つけられるかどうかの検討が最重要だとの指摘を受け、本研究ではそれ为目标とした技術開発に注力することとした。

MOS 形成手法が実用化されるには、最終的に信頼性の観点(トランジスタの閾値や、ゲート絶縁破壊)で実用に耐える品質の成膜技術であることが不可欠ではあるものの、信頼性の確保は、実用を目指す段階で後から検討すべきことであり、まずは界面欠陥密度が下がる見込みがあるかどうかの見極めがないと始まらないとの指摘であった。実際、本研究成果で界面欠陥低減の見込みが立ったことで、複数の企業から研究に関する意見交換や共同研究の可能性についての提案を受けることになり、適切な方向修正をできたと考えている。



(3) さきがけ期間を通じて研究手法、実用化への考え方、取り組み方で学んだこと

自身の研究する技術の実用化を目指す上では、課題となる事象の解決方法を見出すことに自己満足するのではなく、実際の応用技術へと展開することが重要であるということを強く印象付けられた。即ち、発見した解決方法を基にして、製造技術に習熟した研究者や技術者との意見交換や共同作業を経ることで、研究成果の真の技術的価値が判断されるということを学んだ。今後も、発見を基にした共同研究を自ら多数提案できるように心掛けながら研究に邁進したい。