

SiC m 面における NO 窒化によるゲート酸化膜  
界面特性改善に関する研究

濱田 公守

2017年1月

筑波大学大学院博士課程

数理物質科学研究科博士論文

博士（工学）

SiC m 面における NO 窒化によるゲート酸化膜

界面特性改善に関する研究

濱田 公守

ナノサイエンス・ナノテクノロジー専攻

# 目次

第1章 序論	
1.1 研究背景	1
1.1.1 地球環境の変化と世界の CO <sub>2</sub> 排出規制動向	
1.1.2 CO <sub>2</sub> 排出量に対する自動車のインパクト	
1.1.3 電動系環境対応車両の住み分け	
1.1.4 電動系環境対応車におけるパワーエレクトロニクス技術の重要性	
1.1.5 ハイブリッド技術におけるパワー半導体の役割と重要性	
1.2 SiC パワー半導体への期待	13
1.2.1 Si パワー半導体の現状	
1.2.2 パワー半導体用材料と適用範囲	
1.2.3 次世代パワー半導体成功のためのコストシナリオ	
1.2.4 SiC パワー半導体の車両への適用実験	
1.2.4.1 プリウス	
1.2.4.2 カムリ	
1.2.4.3 FC バス	
1.3 SiC パワーMOSFET	23
1.3.1 パワー半導体材料としての SiC 結晶	
1.3.2 パワーMOSFET の構造とチャネル移動度のオン抵抗への影響	
1.3.3 4H-SiC トレンチパワーMOSFET におけるチャネル面方位と m 面の重要性	
1.3.4 ゲート酸化膜	
1.3.5 チャネル移動度に影響を与える要因	
1.3.6 NO-POA による移動度向上	
1.3.7 パワーMOSFET 形成プロセス	
1.4 研究概要	35
1.5 参考文献	35
第2章 4H-SiC m 面トレンチゲート型 MOSFET 特性に NO-POA が与える影響の調査	
2.1 序章	39
2.2 評価方法	39
2.3 MOSFET 特性	40
2.4 MOS キャパシタ特性	42
2.4.1 C-V 特性	
2.4.2 界面順位密度	

2.5	MOS 界面物理分析	44
2.5.1	SIMS	
2.5.2	CL	
2.5.3	FT-IR	
2.6	窒素の結合、占有サイトの検証	50
2.6.1	HAXPAES	
2.6.2	XPS	
2.6.3	XAFS	
2.7	考察	52
2.8	参考文献	55
第3章	NO-POA による 4H-SiC 酸化膜界面への窒素導入過程の詳細解析	
3.1	序章	57
3.2	NO-POA 窒素濃度／窒素面密度の結晶面方位依存性	57
3.3	SiC 界面への窒素導入初期過程	59
3.4	導入済界面窒素の入れ替わり現象	61
3.5	導入済界面窒素の Dry 酸化による窒素離脱現象	64
3.5.1	ベアウェーハ NO 酸化後の Dry 酸化	
3.5.2	CVD 堆積膜 75nm 付ウェーハ NO-POA 後の Dry 酸化	
3.6	Si/SiO <sub>2</sub> および SiC/SiO <sub>2</sub> 界面の窒化と窒素離脱についての過去論文調査	66
3.7	考察	68
3.8	参考文献	68
第4章	4H-SiC 酸化膜界面窒素モデル	
4.1	序章	69
4.2	m 面 界面窒化モデルの提案	69
4.2.1	飽和状態の m 面界面窒素分布推定図	
4.2.2	窒素導入モデル	
4.2.3	窒素離脱モデル	
4.2.4	窒素飽和モデル	
4.2.5	導入窒素量の検証	
4.2.6	m 面窒化モデルの確認	
4.3	界面窒化モデルの他面(Si 面, C 面, a 面) への適用	79
4.3.1	他面(Si 面, C 面, a 面)へのモデル適用の検討	
4.3.2	Si 面 窒素飽和モデルの考察	
4.4	4H-SiC 界面窒化モデルの検証と考察	81



4.5 参考文献	84
第5章 結論	85
付録	86
謝辞	88
発表論文と学会リスト	89
表彰等	94

## 第1章 序論

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 地球環境の変化と世界の CO<sub>2</sub> 排出規制動向

大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の急激な上昇に伴い、地球の平均気温も上昇し続けている。大気中の CO<sub>2</sub> や地球温暖化ガスの増加により気温が上昇することで、界面上昇、沿岸部の高潮被害、都市部の洪水被害に加え、大気環境変化起因の異常気象による災害、食料被害など人類の生活・生命にかかわる重大なリスクが発生する。すなわち大気中の CO<sub>2</sub> 濃度上昇は地球と人類にとって大変大きな問題である。近年の CO<sub>2</sub> 増加と温度上昇は 95%以上の非常に高い確率で人類の化石資源利用に起因するものと考えられている<sup>1)</sup>。図 1-1-1 は 2100 年までの気温上昇を予測する CO<sub>2</sub> 排出シナリオ(Representative Concentration Pathway: RCP)を示したものである<sup>1)</sup>。ここには RCP8.3 (産業革命以前に比べ 2.6～4.8℃の温度上昇の可能性が考えられる CO<sub>2</sub> 排出シナリオ) から RCP2.6 (産業革命以前に比べ 2100 年時点における気温上昇 0.3～1.7℃に抑えるための CO<sub>2</sub> 排出シナリオ) が示されている。2015 年 12 月に COP21 の場において締結された“パリ協定”が、2016 年 11 月に発効された<sup>2)</sup>。“パリ協定”は気候変動抑制に関する多国間の国際的な協定で、そこでこの温度上昇を 2℃未満に抑えるということを目指し、各国の行動目標が宣言される。すなわち RCP2.6 の達成が目標となり。今後は各国ならびに各種産業においても、その宣言内容を実現するための行動計画が求められることになる。

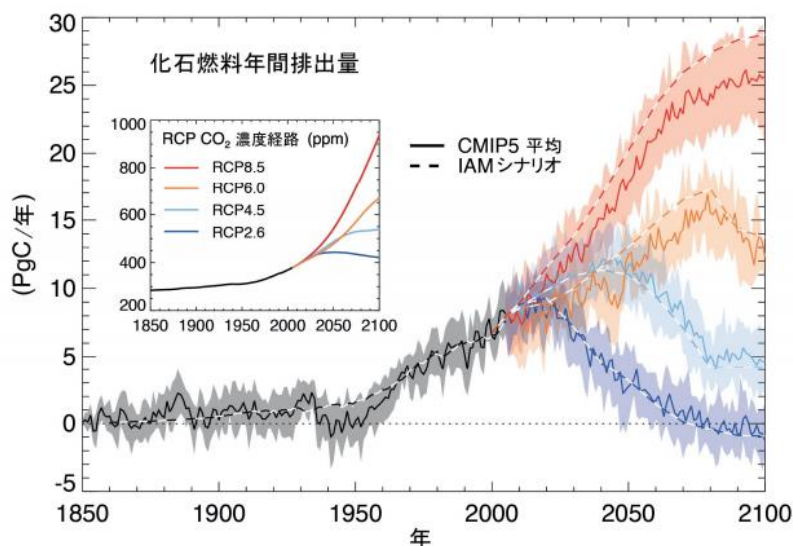


図 1-1-1 CO<sub>2</sub> 排出シナリオ(Representative Concentration Pathway: RCP)<sup>1)</sup>

### 1.1.2 CO<sub>2</sub>排出量に対する自動車のインパクト

図 1-1-2 は 2013 年における産業セクター毎の CO<sub>2</sub> 排出量とその比率を示す<sup>3)</sup>。2013 年における世界の CO<sub>2</sub> 排出量は 322 億トンと見積もられており、そのうち自動車からの排出量は 56 億トン、約 17% であり、非常に大きな比率を占めていることがわかる。自動車からの CO<sub>2</sub> 排出量を減らすためには、自動車の台数自体を減らす、自動車一台当たりの走行距離を減らす、もしくは自動車の燃費向上すなわち個車からの CO<sub>2</sub> 排出量を減らすことが必要となる。まず自動車の台数であるが、2014 年の世界の総自動車保有台数は 12.97 億台であり<sup>4)</sup>、さらに過去 3 年間の生産台数推移は 2013 年に 8731 万台、2014 に 8978 万台、2015 年には自動車総数の 7%にあたる 9080 万台の自動車が生産された<sup>5)</sup>。世界全体では生産台数並びに総保有台数の増加に飽和や低減の兆候は特にみられない。自動車一台当たりの走行距離においては、都市部においてはパークアンドライドなどのような生活利便性と交通渋滞低減のために、また鉄道網の整備などにより自動車一台当たりの走行距離を減らす動きはあるが、グローバルに走行距離の低減を指摘する経済指標や統計値はみられない。社会的に成熟が進み人口増加にもブレーキのかかっている日本においてさえ、人口一人当たりの走行距離は 1970 年の 915km から伸び続け 2005 年に一度 3796km とピークを持つが 2011 年以降再び増え続け 2013 年では 4146km となっている<sup>6)</sup>。従って自動車からの CO<sub>2</sub> 排出量を低減するためには、自動車一台当たりの燃費向上が必須であると言える。

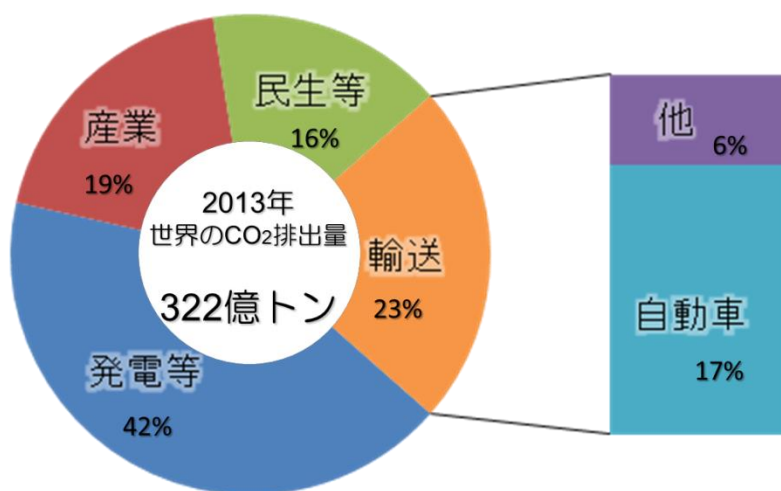


図 1-1-2 2013 年における産業セクター毎の CO<sub>2</sub> 排出量とその比率<sup>3)</sup>

図 1-1-3 のグラフは世界の主要な 4 つの国や地域の自動車の CO<sub>2</sub> 排出量規制の推移と今後の予想を示す。CO<sub>2</sub> 排出量は新ヨーロッパドライブングサイクル(NEDC)に換算した値である<sup>7)</sup>。全ての国と地域で 2020 年まで年率 4~5%の CO<sub>2</sub> 排出量低減が求められている。この値は車両一台当たりの平均 CO<sub>2</sub> 排出量を規制するものであり、メーカー毎に販売車両の平均値の提出が義務付けられその CO<sub>2</sub> 排出量がこの値を満たさない場合は、低 CO<sub>2</sub> 排出モデルを販売し一台当たりの CO<sub>2</sub> 排出量が規制値を下回る企業からのクレジットの購入、経済的ペナルティー（罰則金）、車両の販売制限等の処置がとられるため、自動車メーカーにとっては CO<sub>2</sub> 排出量削減すなわち燃費向上は最重要な開発テーマとなっている。トヨタ自動車が販売する代表的な幾つかの車両の CO<sub>2</sub> 排出量を同グラフの右軸に例として示した。これ

を見てもわかるように、2020年には乗用車の平均CO<sub>2</sub>排出量はハイブリッド車並みにする必要がある。

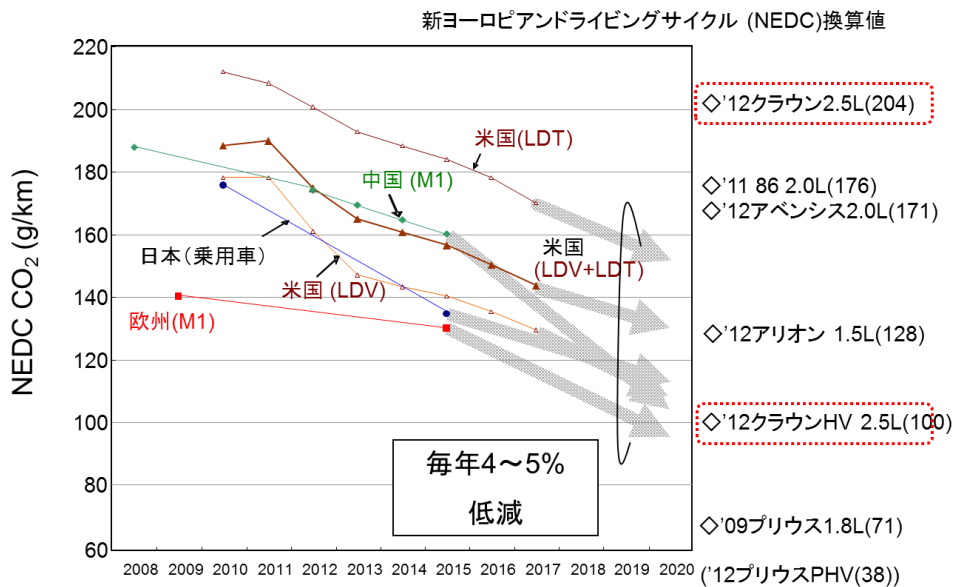


図 1-1-3 世界の主要な4つの国や地域の自動車のCO<sub>2</sub>排出量規制の推移と今後の予想

ここまでは自動車単独からのCO<sub>2</sub>排出量について述べてきたが、自動車からのCO<sub>2</sub>排出量の環境へのインパクトを考える場合はその車両単独の燃費性能だけでなく燃料生成の段階から消費まで全てのステップにおけるトータルのCO<sub>2</sub>排出量いわゆる Well-to-wheel CO<sub>2</sub>についても議論すべきである。近年はCO<sub>2</sub>排出削減という視点だけでなく一次エネルギーである石油の枯渇や価格の急騰に対するリスク対応、さらにはエネルギーセキュリティーという別次元の観点からも多用な一次エネルギー活用が推進されている。図 1-1-4 は一次エネルギー、自動車用燃料、自動車用パワートレインの関係を示したものである<sup>8)</sup>。現在主に使用されている燃料のガソリンや軽油は石油から生成され、それらを用いるエンジンは従来車やHVに使用されている。合成燃料は石油由来の原料に加えガスや石炭、バイオ起因の原料を液体化して燃料として用いるものである。一部の地域で利用されているバイオ燃料はサトウキビやトウモロコシなどの植物から作られる。またEVに使われる電力は、石油、石炭、天然ガスなどのCO<sub>2</sub>を排出する化石系燃料に加えウランを用いた原子力発電、また水力、太陽光、地熱などのリニューアブルエネルギーなど多用な一次エネルギーから得ることができ、一次エネルギーの多様化と将来のリニューアブルエネルギーの活用という観点から魅力的な燃料(走行エネルギー源)である。発電のための一次エネルギーが当初は石油や石炭などのような Well-to-tank CO<sub>2</sub>排出量の多いものであったとしても社会的な成熟が進みリニューアブルエネルギーなどの利用促進によって Well-to tank CO<sub>2</sub>を低減していけるという可能性が高いことも魅力である。FCVに利用される水素は現在のところその大部分は石油や天然ガスなどの化石系燃料から製造されており、その燃料製造過程からCO<sub>2</sub>を発生させる実態がある。ただし化学プラントから排出される大量の水素の活用や、原理的には電気を用いて水から水素を作り出すことも可能であるなど、電力同様多様な一次エネルギーの活用が期待される燃料である。

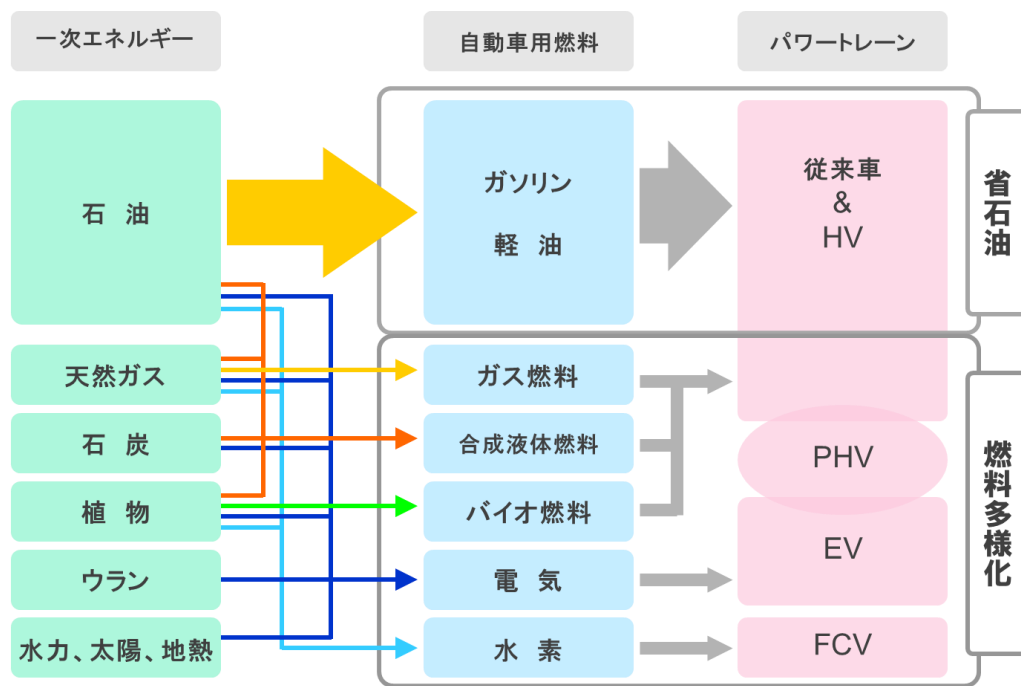
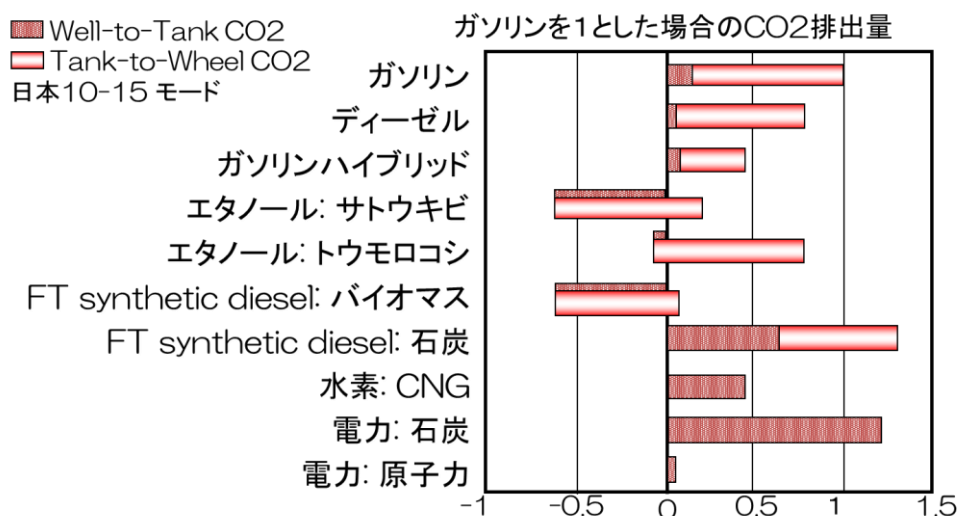


図 1-1-4 一次エネルギー、自動車用燃料、自動車用パワートレインの関係

図 1-1-5 はガソリンエンジンを用いた通常の車両の well-to-wheel CO<sub>2</sub> 排出量を 1 とした時の well-to-wheel CO<sub>2</sub> 相対値を示している<sup>9)</sup>。ディーゼルエンジン車は 0.75 であるのに対し、ガソリンハイブリッド車は燃費の良さすなわち Tank-to-Wheel CO<sub>2</sub> の少なさからその値は 0.45 になる。またバイオフェューエル、合成燃料、水素、電気などの他の燃料の値も併せて示す。これらの試算を通してわかることは、燃料だけでなくその一次エネルギーの種類、そこからの燃料の製法によっても well-to-wheel CO<sub>2</sub> は変わるということ、さらにそれらを用いるパワートレインの燃費性能によってトータルの CO<sub>2</sub> 排出量は決まるということである。



Source: Mizuho Information & Research Institute report

図 1-1-5 well-to-wheel CO<sub>2</sub> 排出量

図 1-1-6 は 2015 年 10 月にトヨタ自動車、「2050 年にトヨタ自動車が発売する新車が排出する CO<sub>2</sub> の量を 2010 年の排出量と比べ 90%削減する」ことを目標とした「新車 CO<sub>2</sub> ゼロチャレンジ」の中で示したパワートレイン別の販売台数比率シナリオである<sup>10)</sup>。現在のパワートレインの約 88%は通常のガソリンまたはディーゼルエンジン車で残りの大部分は HV であるが、2050 年の新車が排出する CO<sub>2</sub> を 90%減らすためには純粋なエンジン車は特殊な一部のマーケットを除きほとんど利用することができず、ほぼ全ての車両が図に示すようにハイブリッド車(HV)、プラグインハイブリッド車 (PHV)、電気自動車 (EV)、燃料電池車 (FCV) などの電動系環境対応車両とすることが必要と考えている。このシナリオを実現するためにはそれぞれのパワートレインの性能を上げて実質的な燃費すなわち CO<sub>2</sub> 排出量を低減するだけでなく、車両として走行性能、コストなど車の商品性を上げ、顧客や社会に受け入れてもらえる、むしろ進んで選んでいただけるような優れたパッケージングの車両を実現する必要がある。このように、国ごとの燃費規制に加え、すでに個別企業単位で将来の CO<sub>2</sub> 排出量を低減する動きが始まっている。今後国際的な協定、国や地方政府レベルの規制の強化、個別企業の努力に加え、低 CO<sub>2</sub> 排出燃製造のための技術革新やインフラ整備が進められていくことが予想される。次の世代の地球と人類のためにも、これらの行動を緩めることはゆるされず、技術先進国においては、一層の研究会開発の加速が必要となる。

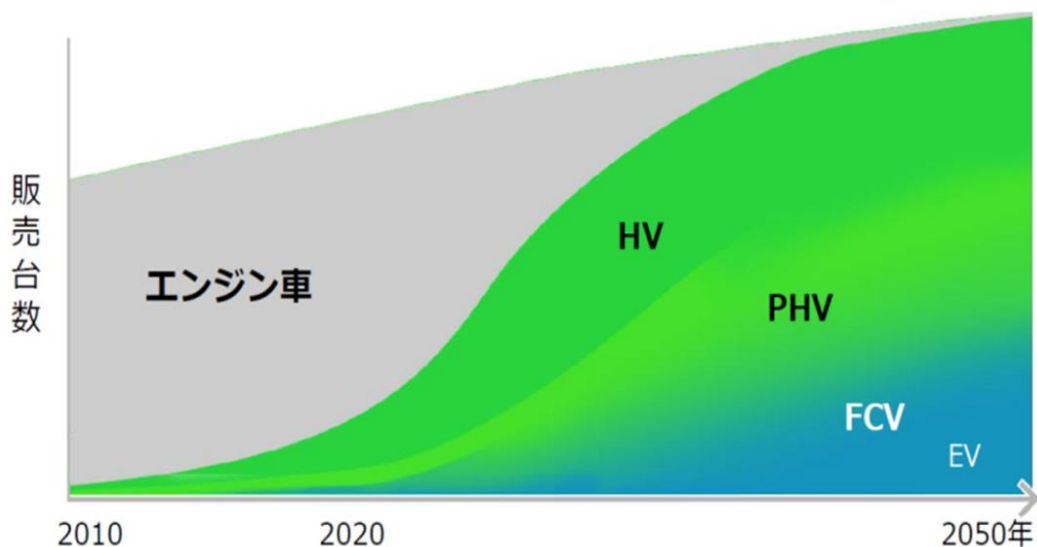


図 1-1-6 “トヨタ環境チャレンジ 2050” 今後の次世代車開発



### 1.1.3 電動系環境対応車両の住み分け

図 1-1-7 は電動系環境対応車両のパワートレインがどのような車両サイズと移動距離の関係に適しているかを示したものである<sup>8)</sup>。バッテリーのみをエネルギー源とする EV は短距離用のシティーコミューターに、FCV は長距離を走る大型トラックに、そして HV や PHV は自動車における中心的な市場である乗用車などの中型車のマーケットに適していると考えられる。EV の場合、充電インフラの普及とバッテリーの重量とコストならびに充電時間の長さがその利用シーンと商品性に制約を与えている。一充電の走行距離を伸ばす為には大きな容量のバッテリーを搭載する必要があり、このことは車両が高価になるばかりでなく重量の重いバッテリーを普段から運び続けるいわゆる“バッテリー運搬車”になる恐れがある。将来充電インフラが充実し、軽量で高容量の高性能バッテリーが安価に供給されるようになり、さらに高性能なモーターや低損失な制御技術の進歩により航続距離が延びることで一般車両の市場への参入が進むと考えられる。高価な建設費用がかかる水素ステーションを必要とする FCV の場合は、まず都市部と高速道路のサービスエリアなどに集中的に水素ステーションを建設することで都市部の乗用車や宅配トラック、都市と都市を結ぶ長距離トラック等の市場をカバーすることが可能となり、その後徐々にインフラの充実に伴い車両側の本格的な普及が進むと考えられる。EV も FCV もインフラの充実が車両普及のカギとなるため、それらの建設や燃料供給体制も含めた社会の合意形成も需要となる。その点 HV や PHV は燃料切れやバッテリー切れの心配が少なく現状のインフラを活用することができるため、電動系環境対応車のなかでは比較的地域を問わず早く普及を進めることが可能となる。従って当面の電動系環境対応車両としては乗用車市場を中心に HV と PHV が、バッテリー性能の向上と共にシティーコミューターや小型車両市場を中心に EV が、そして長期的には乗用車や長距離をルート走行するトラック市場を中心に FCV が時間をかけて徐々に普及するものと考えられる。

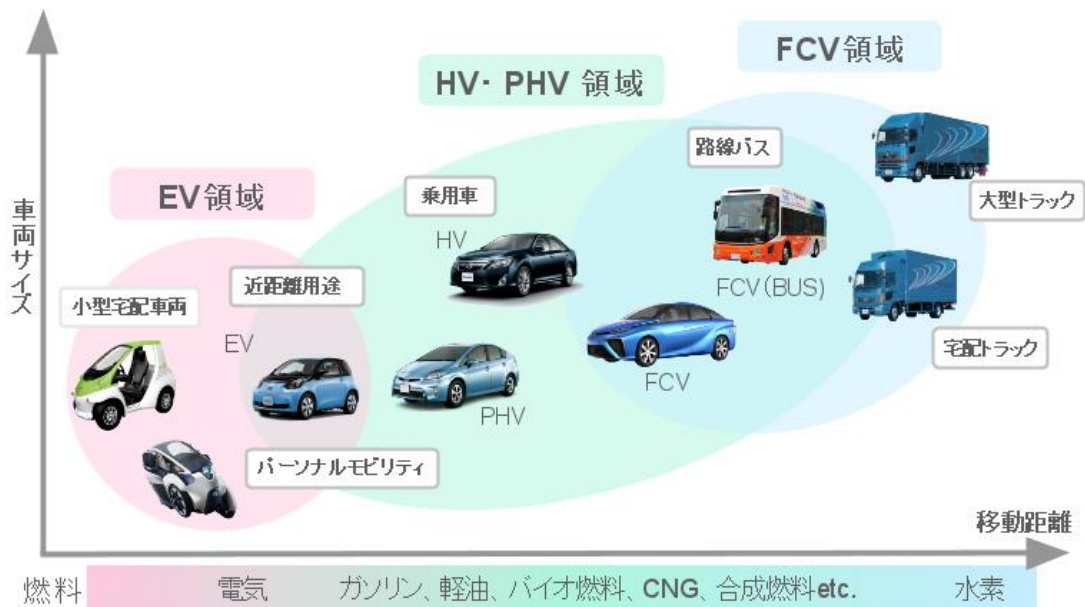


図 1-1-7 モビリティの棲み分けイメージ

### 1.1.4 電動系環境対応車両におけるパワーエレクトロニクス技術の重要性

図 1-1-8 は車両重量と燃費の関係プロットしたものである<sup>11)</sup>。燃費は日本の 10-15 モードで示されている。黒いラインはコンベンショナルなエンジンを、青いラインは直噴ガソリンエンジンを、そして緑のラインはハイブリッド車の燃費を示す。このグラフよりガソリンエンジン自体の改良では燃費改善効果は 20%程度にとどまる一方、ハイブリッド車では燃費効果は約 2 倍になることがわかる。

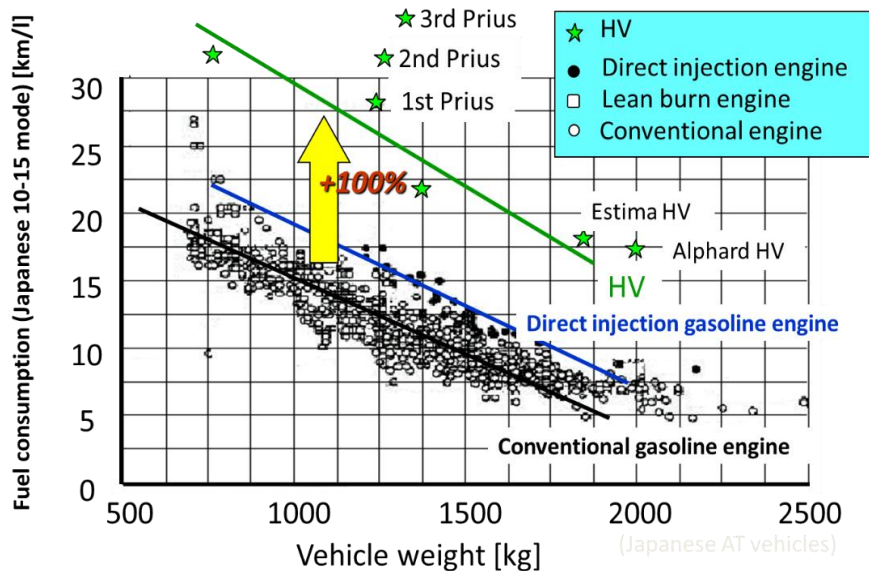


図 1-1-8 Vehicle Weight and Fuel Consumption

図 1-1-9 は燃費向上効果が大きくトヨタをはじめとして市販車で広く採用されているシリーズパラレルハイブリッドシステムにおける燃費向上の原理を示している<sup>12)</sup>。以降本論文においてはハイブリッドシステムやそれを搭載する車両を述べる場合、すべてこのシリーズパラレルハイブリッドシステムやそれを搭載した車両を対象とする。車両が停止しているときはエンジンが停止し燃料を消費しない（アイドルストップ）。ガソリンエンジンの熱効率が悪い低速度域における加速時は、効率の良い電気モーターを主に用いる。一定の速度以上になるとガソリンエンジンと電気モーターの両方を用いることで十分な加速を得ることができる。通常の走行時にはガソリンエンジンは常に高効率な領域で使われる。エンジンパワーが足りない場合はバッテリーから供給される電気エネルギーを用いてモーターがパワーを補い、エンジンのパワーが走行に必要なパワー以上である場合はそのエネルギーをバッテリーに充電する。減速時には、以前は熱エネルギーとして捨てられていた運動エネルギーが発電により電気エネルギーに変換され回生エネルギーとしてバッテリーに蓄えられる。つまりこのシステムにおける燃費向上のキーは、①停止時にはエンジンを止める、②エンジンは高効率な動作領域以外では可能な限り動作させない、③エンジンとモーターの両方を用いることでエンジンのダウンサイジングを行いベースの燃料消費量を抑える、④回生動作によりエネルギー回収を行うことであり、その真髄はこれらの要求を運転状況に応じて適切に切り替えるエネルギーマネージメントアルゴリズムとそれを実現するハードウェアとソフトウェア技術である。



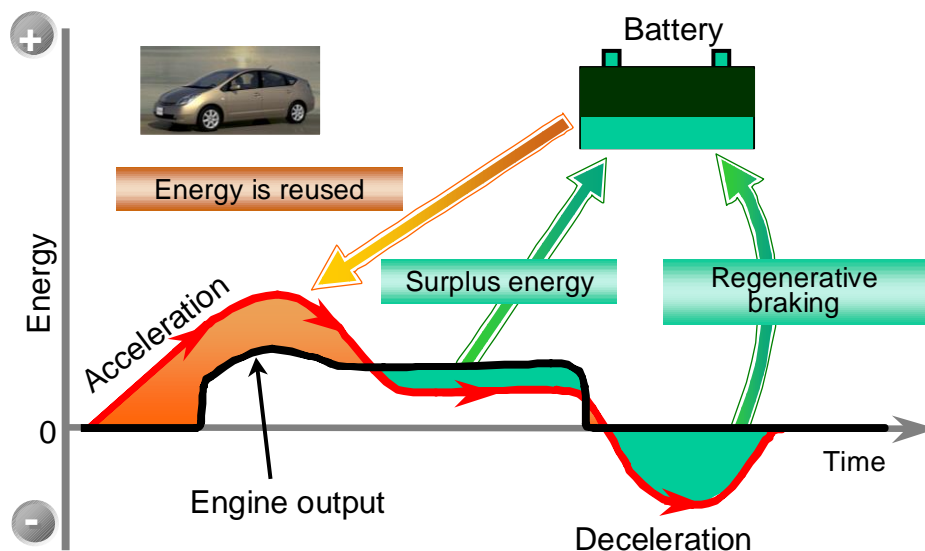


図 1-1-9 ハイブリッド車 エネルギーマネジメント

図 1-1-10 はハイブリッドシステムの構成を示している<sup>13)</sup>。エンジン、発電機、モーターが動力分割機構を通して機械的に接続さる。一方発電機、モーター、バッテリーがインバータを通してつながれている。このシステムはバッテリーとインバータの間に昇圧コンバータを持ち、高価なバッテリーセル数を増やすことなく高いモーター駆動電圧を得ることができる、すなわち大幅にコスト、重量、サイズを増やすことなく高いパワーを得ることができるシステム構成となっている。ハイブリッド車はバッテリーに蓄えた直流電圧をインバータで交流電圧に変換し数 10kW から 100kW 以上の交流モーターを駆動し、走行に用いる。またエンジンの余剰パワーや回生時のエネルギー回収には独立した発電機により発電を行い、バッテリーに充電する。図 1-1-11 にこのハイブリッドシステムの主要パワーエレクトロニクス部分の電気回路を示す<sup>14)</sup>。約 200V のバッテリーが昇圧コンバータを通し必要に応じて 600V まで昇圧される。この最大電圧は、搭載される車両の要求に応じて最大 650V 程度まで高められる場合もある。昇圧コンバータと並列に接続されている DC/DC コンバータは高圧のバッテリーからコンベンショナルシステム向けに 12V の電圧を生成させる回路である。昇圧コンバータの二次側にはモーター用と発電機用の三相インバータがそれぞれ独立して並列に接続されている。それ以外にフィルタコンデンサ、リアクトル、平滑コンデンサなどが接続される。これらの部品はパワーコントロールユニット(PCU)と呼ばれる部品に一括して内蔵されている。PCU はおおよそ 12V の鉛バッテリー程度のサイズであり、車両搭載が容易になるような設計がなされている。この HV 技術は次世代の電動系環境対応車両に共通して利用可能なコア技術といえる。HV の電池容量を増やして外部充電機能を追加すれば PHV になり、PHV からエンジンと燃料タンクを取り除くと EV になる。また HV のエンジンと燃料タンクを燃料電池と水素タンクに置き換えれば FCEV になる。実際の車両開発はここで言うほど単純なことではないが、基本となる部品技術、生産技術、ソフトウェアなどは広く流用可能である。したがって、HV の技術の進化は次世代電動系環境対応車両に幅広く活用されることを意味し、それらの部品や制御技術の性能向

上は大変重要である。トヨタの代表的ハイブリッド車であるプリウスを例にとると、これまでもモーター、バッテリー、パワーコントロールユニットなどのHVシステムの主要コンポーネントの高出力密度化を進めてきたが、今後もHVの一層の普及と次世代電動系環境対応車の実用化促進のために、これらのコンポーネントの小型化と高性能化が要求されている。

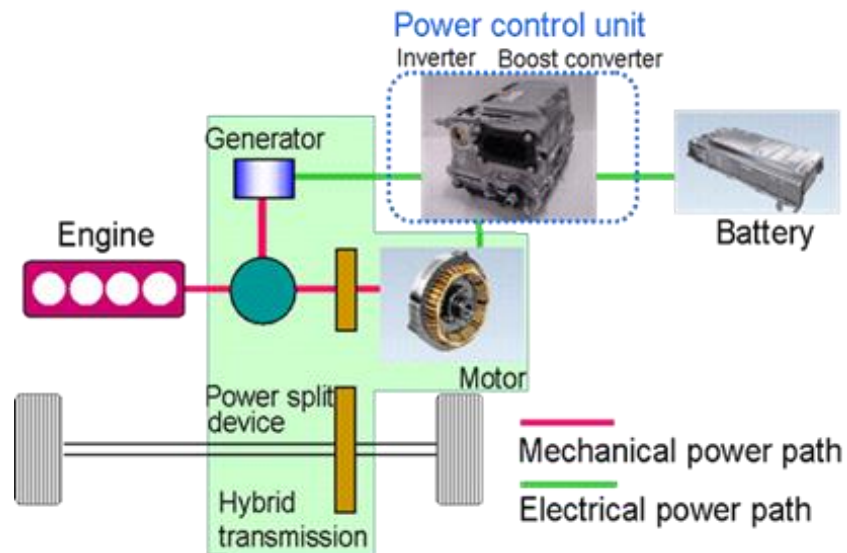


図 1-1-10 トヨタハイブリッドシステム (THS) システム構成

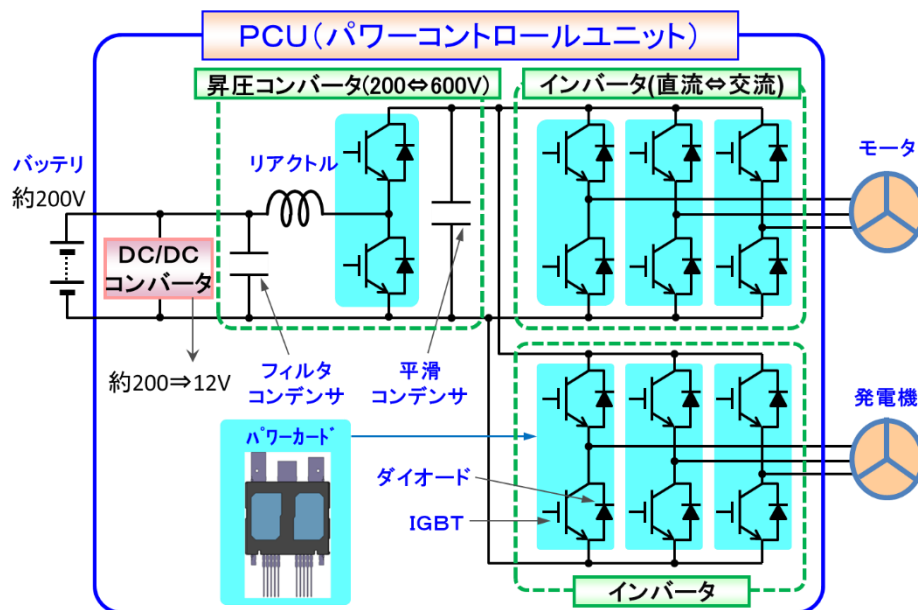


図 1-1-11 THSパワーコントロールユニット (PCU) 回路構成

2015年12月に販売開始された4代目プリウスは、歴代プリウスが新技術を投入しながら実現してきた燃費性能を一層向上させている。2009年に販売された3世代の32.6km/Lから6年を経て25%以上向上した40.8km/L（JC08モード。米国EPA燃費では50mpg(mile per gallon)から56mpgへ）という世界トップレベルの値を実現している。この燃費はエンジン自体の燃焼効率をガソリンの市販エンジンとしてはトップレベルの40%に向上、空気抵抗係数0.24の実現や車両走行抵抗の低減、パワーエレクトロニクスシステムの損失20%低減などの成果により実現している。図1-1-12にJC08モード走行燃費向上の内訳を示す<sup>15)</sup>。この燃費向上の寄与度を見てわかるように、非常に優れた燃費性能を実現している電動系環境対応車両の燃費向上はパワーエレクトロニクス技術の進歩によるところが大きい。今後の燃費向上もパワーエレクトロニクス技術の一層の進歩に期待するところが大いと考えられる。

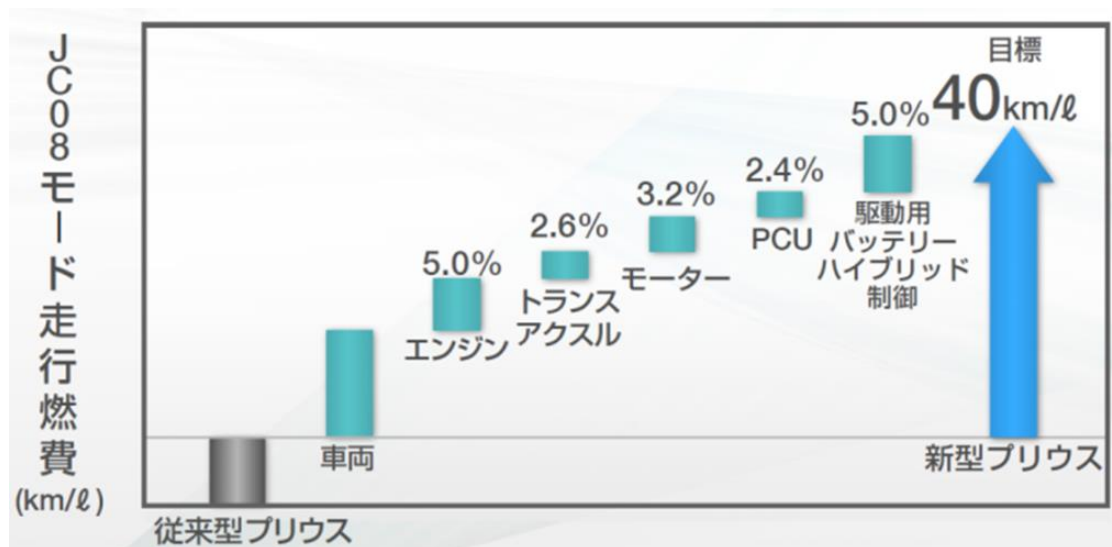


図 1-1-12 第4世代プリウス燃費改善アイテムとその効果

### 1.1.5 ハイブリッド技術におけるパワー半導体の役割と重要性

パワー半導体はハイブリッドシステムにおけるキーコンポーネントの一つである。パワー半導体はインバータや昇圧コンバータに用いられており、数十から数百Aのモータ駆動用の大電流を高速でオン/オフすることでモータを高精度に制御するためのトランジスタや、大電流の流れる向きを制御するダイオードなどの整流素子の総称である。パワー半導体はその電流のオン/オフ時や通電時に損失を発生し、その損失は全て熱として失われる。取り扱う電力量が数十kwから百kw以上であるため、損失が1%変わるだけでkwレベルの損失を発生することになる。損失はパワー半導体の温度を上昇させ特性低下や信頼性劣化を引き起こす恐れがあるため損失により発生した熱を取り除く冷却技術は大変重要な要素技術である。また燃費へのインパクトとしては、そもそも本来走行に用いられるべきエネルギーが熱として失われることになるため燃費を低下させる要因となる。図1-1-13にハイブリッドシステムにおける電力損失の内訳を示す<sup>16)</sup>。ハイブリッドシステムにおける電力損失全体の中で約20%がパワー半導体によるものであることがわかる。4代目プリウスはモータや発電機を制御するPCUの主回路内

で 16 個の Si IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) と 16 個の Si ダイオードが用いられている。それぞれのパワー半導体のサイズは約 1cm 各前後であり、インバータ内の単独部品としては高価なものとなっている。従って、パワー半導体の損失性能の向上と、コスト低減は重要なテーマである。

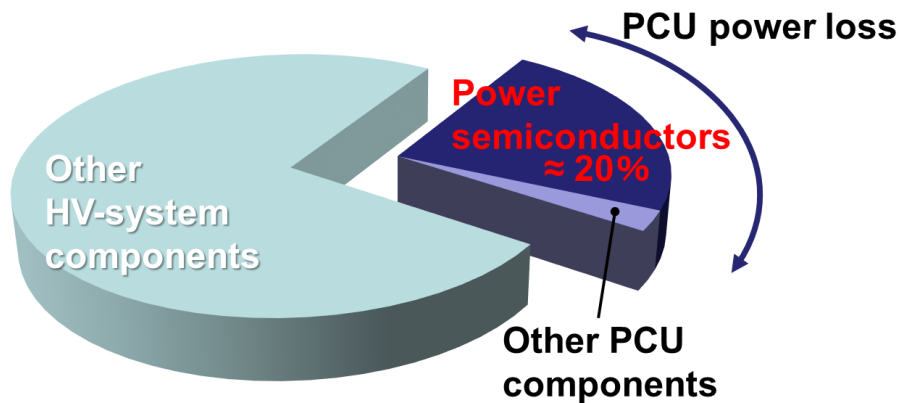






図 1-1-13 HV Electrical Power Loss

過去 4 世代にわたるプリウス用 IGBT の比較を表 1-1-1 に示す<sup>16)</sup>。1 世代用 IGBT はプレーナゲート構造にパンチスルー構造となるエピタキシャル層を用いたウェーハ構造、さらにヘリウム線を用いた局所ライフタイム制御技術を適用し 600V の素子を用いた。この世代ではハイブリッド車用の量産 IGBT はまだ実用化されておらず、産業用の IGBT で不足していた破壊耐量を高くすることを主眼に設計が行われた。2 世代では 1 世代の構造をベースに同じくプレーナゲート構造、パンチスルーウェーハ、ヘリウム線による局所ライフタイム制御技術を適用しながら、システムの電源電圧の増加に伴い素子耐圧を 850V まで向上させた。また耐圧の向上と一世代に比べて面積比 0.79 となる大幅な素子サイズの低減にも関わらず、損失を 6 割以上低減している。3 世代の IGBT は大幅な構造の変更が行われた。表面構造はトレンチゲート型構造を採用し、基板はバルク型 Si 基板と裏面からの低ホール注入技術を適用し、耐圧を 1200V まで増加させ、素子面積も一世代の 0.65 にまで低減させながら素子損失は一世代の 1/4 にまで低減した。4 世代の IGBT は 3 世代の構造をベースに一層損失性能を向上させたものになっている。図 1-1-14 に 3 世代 IGBT と 4 世代 IGBT の構造を比較して示す<sup>16)</sup>。この両者の構造の最大の違いは、表面構造にある。3 世代の IGBT の表面構造はコンベンショナルなトレンチゲート構造を用いていたため、ゲートの微細化による電子注入の効率は高められたが、n-ドリフト層の抵抗値を下げるために必要とされる少数キャリアであるホールが表面のボディ-p層を通過して抜けてしまい、表面近傍の抵抗率が増加していた。4 世代の IGBT では表面のボディ-p層の内部に SBL(Super Body Layer)と呼ばれる n 層を配置することにより、ホールの抜けを抑制することに成功した。その結果、表面近傍のホール密度が向上し、一層の導通損失を低減することができた。素子面積は 3 世代からさらに低減しながらも素子損失を一世代の 21%とした<sup>17)</sup>。素子サイズの低減はコスト低減に、損失の低減はハイブリッド車の燃費低減に直接寄与することであり、今後も性能向上による素子サイズと損失を低減する開発は続けられていく。

表 1-1-1 プリウス用 IGBT の進化と損失低減

	1 <sup>st</sup> generation Prius	2 <sup>nd</sup> generation Prius	3 <sup>rd</sup> generation Prius	4 <sup>th</sup> generation Prius
Silicon power semiconductor				
Power loss	1		0.25	0.21

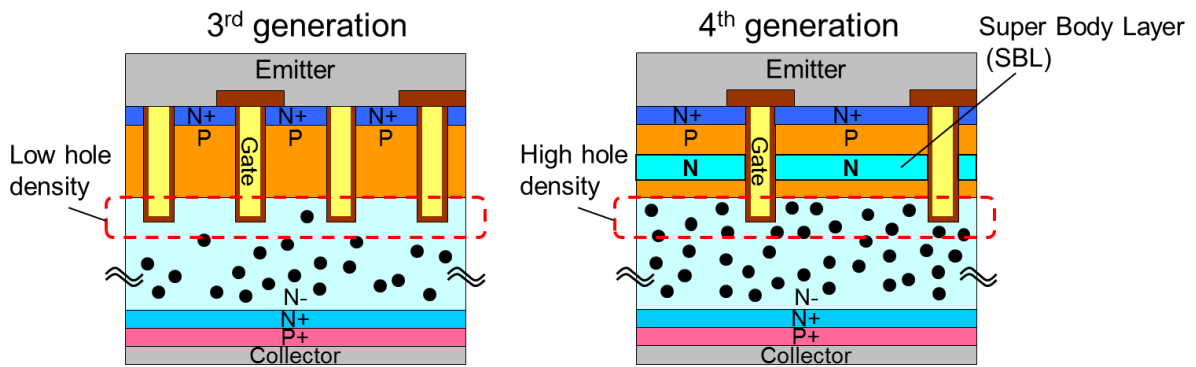


図 1-1-14 3 世代プリウス用 IGBT と 4 世代プリウス用 IGBT の構造比較

## 1.2 SiC パワー半導体への期待

### 1.2.1 Si パワー半導体の現状

前節で述べたように、パワー半導体の性能向上が強く求められている。現在主に用いられているパワー半導体用の材料は Si であり、その結晶品質、安定供給、そして何よりもコストの安さからパワー半導体のみならず、一部の特殊な性能が要求されるデバイスを除きほとんどの半導体素子は Si を材料として製造されている。Si を用いたパワー半導体では、100V 以下の低耐圧用途の大部分と 1kV クラスまでの一部の高周波用途向けにパワー MOSFET が、300V から 3.3kV また近年は 6.5kV クラスの高耐圧まで幅広く IGBT が、IGBT と同等以上の耐圧で特に大電力用途ではサイリスタ系のデバイスが用いられている。パワー MOSFET、IGBT 共に絶縁ゲート型デバイスで、ゲートへの電圧印加によりオン/オフの制御が可能という駆動方式の容易さから、これらのデバイスは急速に適用が広がってきた。サイリスタは高電圧大電力用に長い歴史を持つが、そのスイッチング損失の大きさと駆動回路の複雑さ、さらには IGBT の高耐圧品の開発の進展に伴い、低い耐圧用途から IGBT に置き換えが進んでいる。IGBT は Si パワー半導体としては非常に優れた特性を示し、今後もその性能の向上と共に幅広く用いられていくことが予想される。Si パワー MOSFET では 100V を超えたあたりから導通損失が著しく増加し始めるが、これは Si 材料が持つ絶縁破壊電界強度の制約により、ドリフト層の比抵抗値が高くなってしまったためである。Si でパワー MOSFET などのユニポーラデバイスを作成した場合、導通損失は耐圧の約 2.5 乗で増加することが知られている。このことが高速動作を要求する一部の特殊な用途を除き、パワー MOSFET が比較的耐圧な用途に応用が限定されている理由である。IGBT やサイリスタはドリフト層に少数キャリアを注入することで電導度変調を引き起こすバイポーラ動作により低導通損失を実現している。ただしその場合、基板内部に蓄積させた少数キャリアをスイッチングオフ時に引き抜く必要があり、そこでスイッチング損失が増加するという背反がある。IGBT はパワー MOSFET に比べてスイッチング損失が増加すること、さらにホール注入の為に裏面に形成される PN 接合の順方向オフセット電圧という損失増加要因があるにもかかわらずトータルの損失低減効果が見込めるために、現在では 300V から数 kV の幅広い耐圧域で用いられている。

一般にハイブリッドシステムでは 600V から 1.2kV 耐圧の IGBT が主に用いられている。300V 以下のバスライン電圧を用いるシステムでは 600V クラスの素子が、600~700V 前後のバスライン電圧を用いるシステムでは 1200V クラスの耐圧素子が適している。また将来は 800V クラスのバスライン電圧の採用が進むことも予想されており、その場合は 1.7kV やそれ以上の耐圧の素子の必要性が高まる可能性もある。従って、Si パワー半導体をハイブリッドシステムに用いる場合、ほとんど全てのシステムで IGBT が最も適したパワー半導体であると言える。

### 1.2.2 パワー半導体用材料と適用範囲

現在パワー半導体材料として主に用いられている Si に加え、近年 SiC や GaN などのワイドバンドギャップ半導体が注目されている。表 1-2-1<sup>18)</sup> に Si, SiC, GaN のパワー半導体の性能に関する代表的な材料特性を、図 1-2-1 に同様の指標の Si に対する相対値をレーダーチャートで示す。レーダーチャートの外側のプロットがパワー半導体にとって有利な特性である。SiC や GaN は Si に比べて多くの点でパワー半導体にとって有利な特性を持つ事が分かる。この中でも 1kV 前後で大電流を取り扱うパワー半導体にとって特に優れた特性は絶縁破壊電界(Breakdown Field)が高い点である。SiC や GaN では最大電界を Si の 10 倍高くできるためドリフト層の不純物濃度は 10 倍すなわち比抵抗が 1/10 となり、併せてドリフト層の厚みが 1/10 で良いためドリフト層の抵抗が 1/100 になる。SiC の熱伝導度は Si の



3倍以上あるため、このことはパワー半導体にとっては有利に働く。GaNの場合、この物性値で示されるパワーMOSFETを作成することは困難なためSiウェーハ上にエピ成長したGaN結晶に横型のHEMT構造のデバイスを作製することになる。横型GaNパワー半導体は大電流を流すことは難しいが、HEMT構造であることから高周波パワー半導体として高いポテンシャルを持つ。この様に、SiCとGaNは共に次世代のパワー半導体材料として期待されている。

表 1-2-1 Si, SiC, GaN の代表的な材料特性<sup>18)</sup>

	SiC(4H)	GaN	Si	GaAs
Band gap (eV)	3.26	3.39	1.12	1.43
Electron mobility (cm <sup>2</sup> /V·s)	1000	1000	1350	8000
Breakdown field (MV/cm)	3.0	3.0	0.3	0.4
Saturation drift velocity (cm/s)	2 × 10 <sup>7</sup>	2 × 10 <sup>7</sup>	1 × 10 <sup>7</sup>	1 × 10 <sup>7</sup>
Thermal conductivity (W/K·cm)	4.9	1.3	1.5	0.5

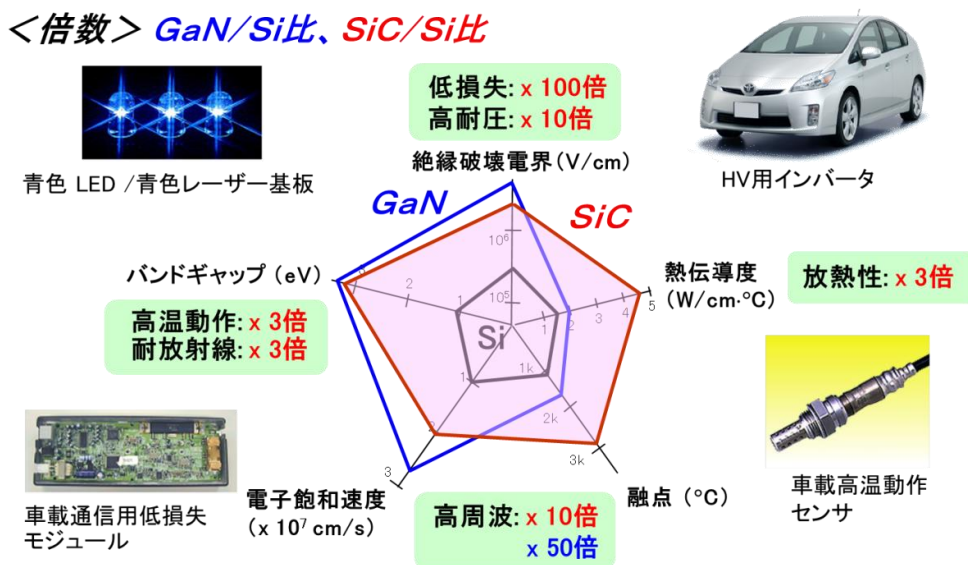


図 1-2-1 Si, SiC, GaN のパワー半導体の性能に関する代表的な材料特性比較

自動車では数多くのパワー半導体が用いられている。コンベンショナルな12V電源系ではSiパワーMOSFETが最も適していると考えられる。高電圧バッテリーを搭載するHV, PHV, EVでは、高電圧回路は走行システムだけではなくDCDCコンバータ、ACコンセント用インバータ、充電器に用いられ、さらにエアコンなどのような周辺システムにも用いられる可能性がある。走行システムでは600Vから1200Vもしくはそれ以上の耐圧で数百Aの大電流を取り扱うため、現在縦型のIGBTが用いられているが、接合や放熱の要件から新材料のパワー半導体を用いた場合でも同様に縦型構造が求められる。一方周辺システムの場合、数kW以下の出力であることから横型構造のパワー半導体の適用も可能となる。

図 1-2-2 に PHV をモチーフに Si(IGBT), SiC(縦型 MOSFET), GaN (横型 HEMT, 縦型 MOSFET) を想定した適用のポテンシャルについて整理を行った<sup>19)</sup>。走行システム(Main System)は縦型素子であれば SiC でも GaN でも適用の可能性はあるが、現在の技術レベルでは結晶作成、パワー半導体の設計並びに製造プロセス共に大電力用の縦型 GaN パワーMOSFET の実用化の可能性はまだ未知数であり、今後の研究の成果の期待するところである。周辺システム(Auxiliary System)では取り扱う電力が小さいためパワー半導体の性能差が表れにくい。さらにコストが最も重視されるため、標準化された安価なパワー半導体に向けたマーケットであると言える。現状は Si-MOSFET や Si-IGBT が用いられているが、近い将来小容量の SiC や横型 GaN デバイスなどの価格が普及帯になったときはその性能の高さを活かし適用される可能性の高い応用と考えられる。

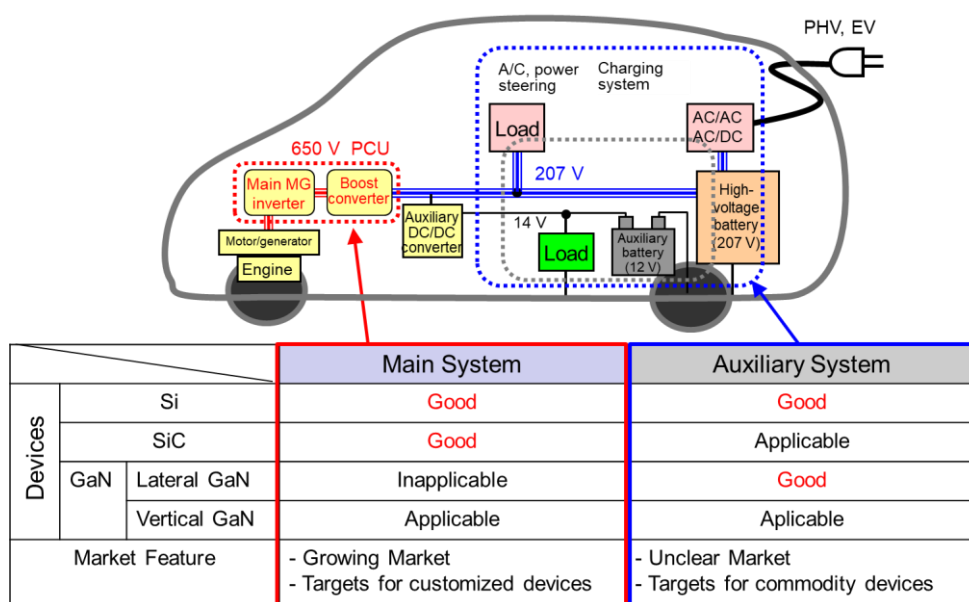


図 1-2-2 Si, SiC, GaN のパワー半導体の性能に関する代表的な材料特性比較<sup>19)</sup>

### 1.2.3 次世代パワー半導体成功のためのコストシナリオ

ここまで材料特性並びにパワー半導体の予想特性から SiC の次世代電動系環境対応車両への適用の可能性について説明を行ってきたが、実際の車両に適用にあたってはコストの課題を避けて考えることはできない。現状の SiC MOSFET の素子コストを Si IGBT の素子コストと比較した場合、性能向上分を考慮しても競争力があるとは言えず、このままでは車両搭載は困難である。将来の普及を目指すためには、結晶の品質向上とコスト低減やパワー半導体の性能向上とプロセスコスト低減に加え、システムレベルでのコスト低減、すなわち PCU 全体のコストメリット追及、MOSFET の高速スイッチング特性を活かしたインダクタンスやキャパシタンスの小型軽量低コスト化、冷却システムも含めた低コスト化などが必要となる。これらの効果を取り込んだ上でトータルコストが Si IGBT を下回った時に、SiC MOSFET の本格普及が始まると考えられる。図 1-2-3 はコスト側面からの SiC 成功シナリオを 2007 年にトヨタ自動車が生じたものである<sup>20)</sup>。この図が作成された当時 2020 年までに Si IGBT に対しトータルコストイブンを実現、2020 年以降の本格的な普及を目標とした。



## Scenario of Successful SiC

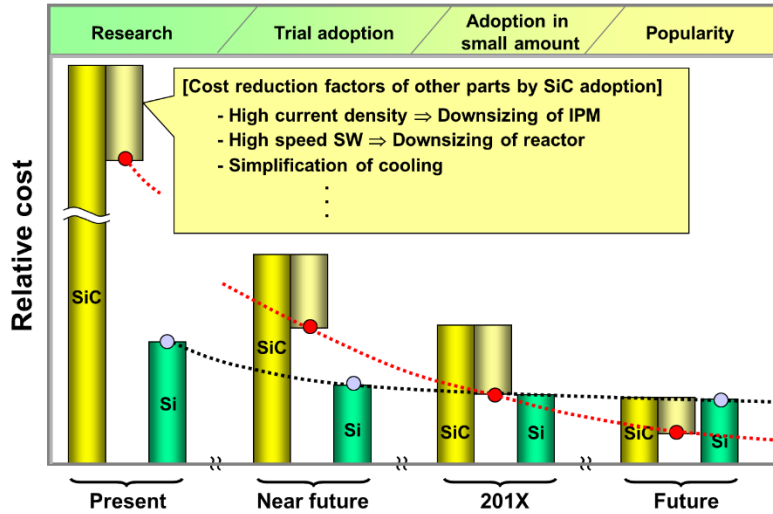


図 1-2-3 SiC 成功のシナリオ<sup>20)</sup>

### 1.2.4 SiC パワー半導体の車両への適用実験

#### 1.2.4.1 プリウス

トヨタ自動車はデンソー、豊田中央研究所と共同で 2014 年より SiC パワー半導体の実車への搭載実験を始め、SiC パワー半導体の有効性を確認した<sup>21)</sup>。ここで用いた SiC パワー半導体は、JBS(Junction Barrier Schottky) Diode とトレンチゲート型 MOSFET である。MOSFET は我々がトレンチ MOSFET に期待する十分な低抵抗をまだ示しているとは言えないが、必要とされる 1200V の耐圧は確保しており、ユニポーラパワー半導体としてのメリットを実車で確認するには十分な性能を有している。2014 年に 3 世代プリウスのパワーモジュールにフル SiC (パワー-MOSFET+SiC ダイオード) を実装し、量産に使用されている Si モジュールとの性能比較を行った。図 1-2-4 に車両外観写真と搭載した素子の外観写真を示す<sup>13-16)</sup>。図 1-2-5 に量産 Si モジュールの全体俯瞰図、Si と SiC をそれぞれ搭載したパワーモジュール、そしてパワー半導体部分の拡大写真をしめす。パワーモジュールに搭載されている 2 つのインバータと 1 つの昇圧コンバータ用の全ての IGBT 及びダイオード各 2 2 個全てを SiC パワー半導体に置き換えている。約 1cm 角のサイズを持つ IGBT は 1 素子で 200A の電流を流すことができるが、SiC ではこれだけ大きな電流容量を持つ大型チップを作成することが困難であるため、3 チップ並列接続し同等の通電特性を確保している。図 1-2-6 に昇圧コンバータに用いた(A)スイッチング素子(Si IGBT, SiC MOSFET)及び(B)ダイオード(Si PiN Diode, SiC JBS Diode)の室温における電流-電圧特性を示す。ダイオード及びスイッチング素子共に、SiC は Si と比較して広い電流範囲において低い導通損失を示すことを確認した。図 1-2-7 に昇圧コンバータ、発電機用インバータ、走行用インバータのそれぞれのパワー半導体に 100A 流した時のスイッチング損失の Si と SiC パワー半導体の比較を示す。SiC パワー半導体ではスイッチング損失が 70%から 85%と大幅に低減されていることが確認できた。また図 1-2-8 に昇圧コンバータを連続動作させたときのリアクトルに流れる電流値と素子温度との関係を示す。昇圧コンバータのスイッチング周波数は 10kHz と 20kHz で評価を行った。Si をスイッチング周波数 20kHz で動作させた場合、10kHz の動作と比較して温度上昇は約 2 倍に増加するのに対し、SiC ではスイッチング周波数を 10kHz から 20kHz に増加しても温度上昇は 3 割から 5 割程度と小さい。

SiC はユニポーラ素子であるためスイッチング損失が本質的に小さく、損失のキャリア周波数依存性が小さいことが分かる。今回このことを実際のHVの昇圧コンバータで実験的に確認することができた。SiC は高周波化に有利であるため、昇圧コンバータのキャリア周波数を上げることでリアクトルやコンデンサを小型にすることができるため、PCU の小型、軽量化に期待が掛かる。

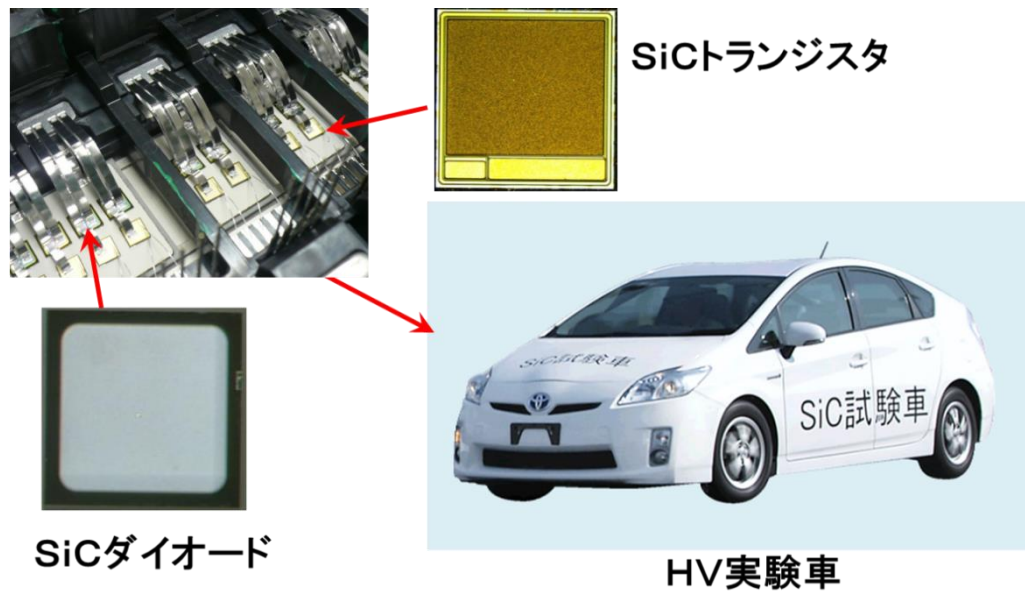


図 1-2-4 フル SiC 搭載 第 3 世代プリウス実験車

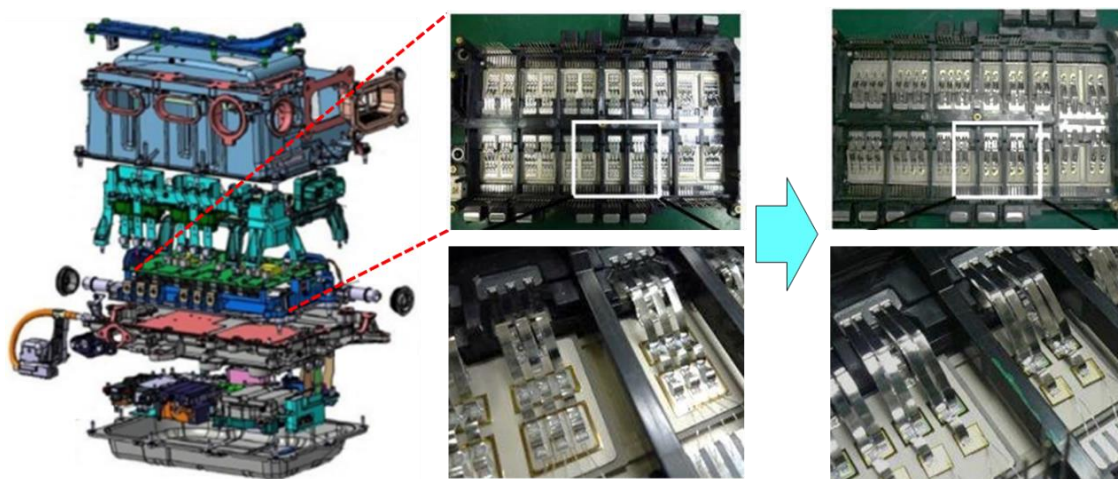


図 1-2-5 量産 Si モジュールの全体俯瞰図、Si と SiC パワー半導体部分の拡大写真

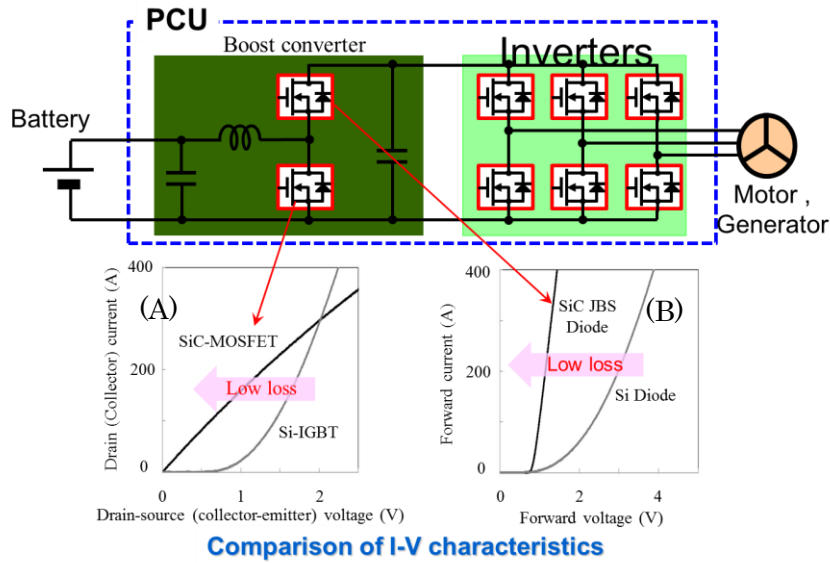
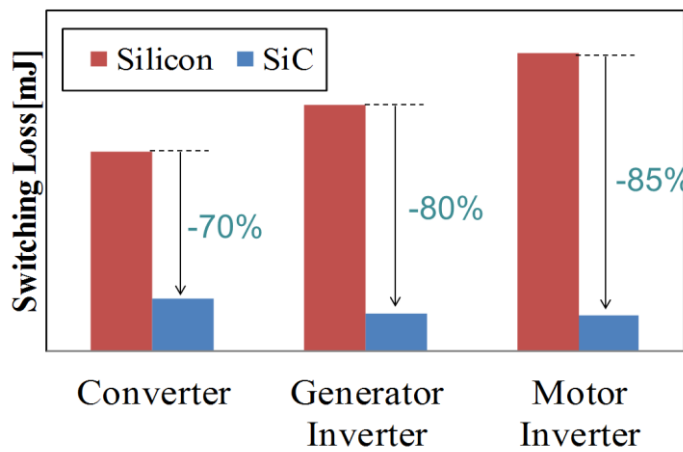


図 1-2-6 昇圧コンバータに用いた(A)スイッチング素子(Si IGBT, SiC MOSFET)及び(B)ダイオード(Si PiN Diode, SiC JBS Diode)電流－電圧特性



\*Under 100A current flow

図 1-2-7 昇圧コンバータ、発電機用インバータ、走行用インバータの 100A 通電時のスイッチング損失：Si と SiC の比較

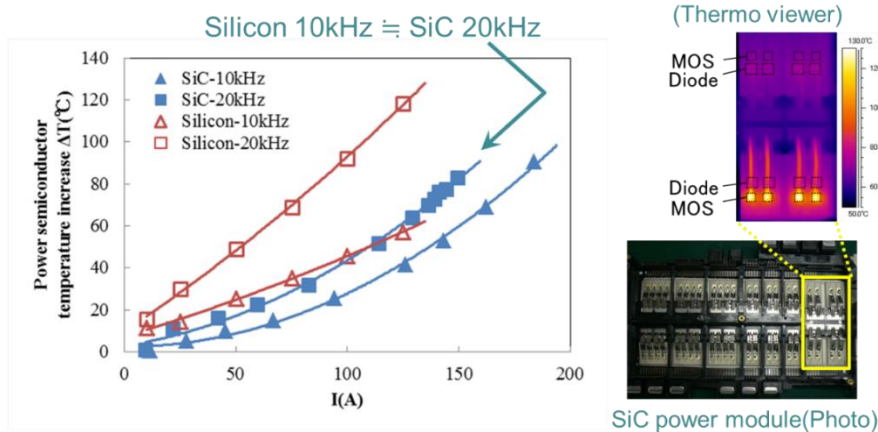


図 1-2-8 昇圧コンバータ連続動作時の電流値と素子温度との関係：Si と SiC の比較

### 1.2.4.2 カムリ

2015年にはカムリにフル SiC パワー半導体を搭載した車両を作製した(図 1-2-9) <sup>14-16, 22)</sup>。この車両は NEDO の国家プロジェクトの一つである新材料パワー半導体プロジェクトの成果を適用して試作したものである。この車は公道走行を行うことを目的として作製したため、ハイブリッドシステムは全ての機能、すなわち走行機能のみではなく路上における性能と安全性を確保するための安全機能などが全て織り込まれた車両となっている。具体的には、パワー半導体の動作の安全な保証するためのオンチップ温度センサーや電流センサーがチップ上に作りこまれている。その結果、ナンバープレートをつけて公道走行を行うことを可能としている。



図 1-2-9 フル SiC 搭載 ナンバープレート付きカムリ

カムリハイブリッドは3世代プリウスと異なり両面冷却パワーモジュールを使用しており、SiC MOSFET と SiC JBS ダイオードを初めて両面パワーカードに実装し搭載した車両である(図 1-2-10)。このカムリもプリウス同様、昇圧コンバータとインバータの Si パワー半導体をすべて、SiC パワー半導体に置き換えている。この車両は 2015 年 1 月に公開され、以降 2016 年 12 月現在も公道走行を続けている。

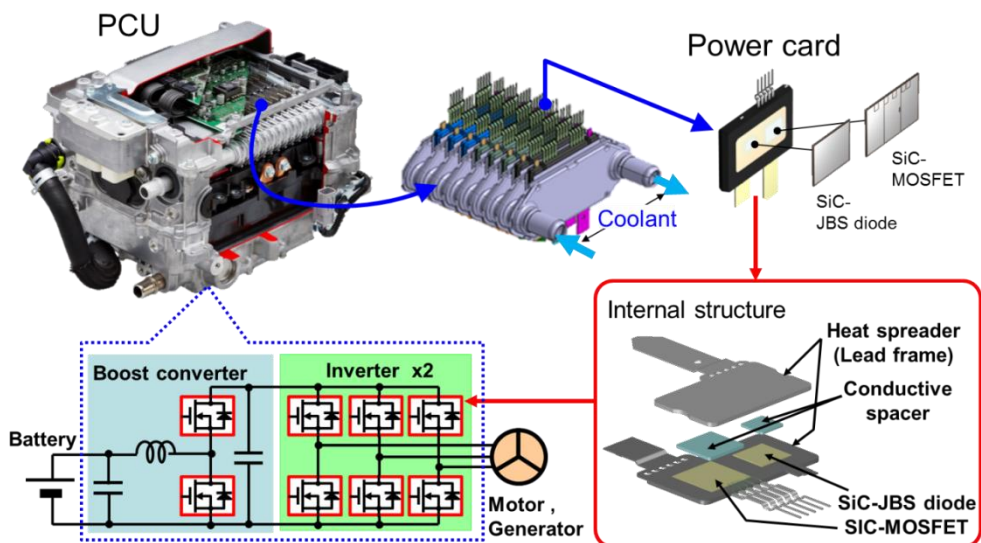


図 1-2-10 フル SiC カムリ用両面パワーカード搭載 PCU



### 1.2.4.3 FCバス

トヨタ自動車は3台目のSiC車両搭載検討車として、SiC JBS ダイオードを燃料電池バスに搭載した<sup>14-16, 22, 23)</sup>。図1-2-11にFCバスの外観写真を示す。燃料電池バス自体はトヨタ自動車と日野自動車が共同で開発したものであり、そのFCブーストコンバータにSiC JBS ダイオードを搭載している。このバスは実際に営業路線で運行され、一般のお客様に乗車していただくために作成された。豊田市の路線バスとして、2015年1月より試験的に営業運行を開始した。



図 1-2-11 SiC 搭載 FC バス

図1-2-12にこの燃料電池バスに搭載されているFCシステムの概要を示す。この燃料電池バスは、世界初の量産FC乗用車であるミライ用に開発された燃料電池システムを二機並列に搭載している。具体的には図に示すように、モーターの出力軸を機械的に並列接続している。このシステムでは70MPaの高圧水素燃料タンクに蓄えられた水素ガスがFCスタックに送られ、そこで空気中の酸素と反応し発電が行われる。そこで発電された電気エネルギーによって、インバータを通してモーターが駆動される。このシステムではSiC JBS ダイオードがFCブーストコンバータの出力部に用いられている。

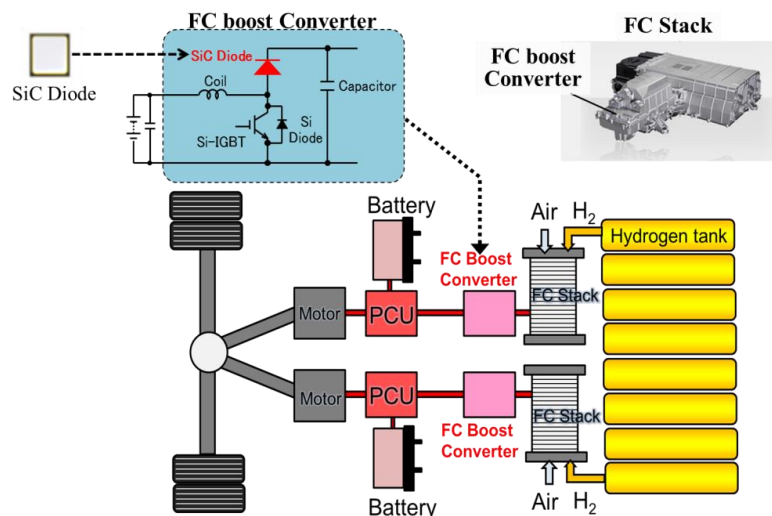


図 1-2-12 FC バス用 FC システム概要

図 1-2-13 に Si PiN ダイオードと SiC JBS ダイオードの外観写真、並び回路図、各ダイオードの I-V 波形並びにダイオードのリカバリ損失と下アームに接続されている IGBT のターンオン損失の比較を示す。素子サイズは約半分になっているが順方向特性的にはあまり大きな違いは無い。また SiC JBS ダイオードのユニポーラ特性によりリカバリ損失とターンオン損失共に大幅に低減していることが確認できた。

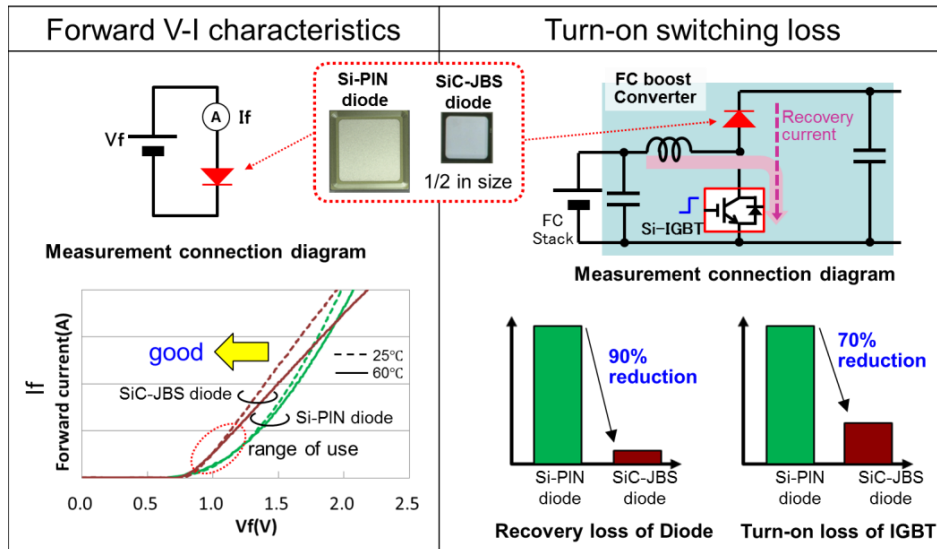


図 1-2-13 FCDC コンバータ用 Si PiN ダイオード、SiC JBS ダイオード損失比較

図 1-2-14 は、昇圧コンバータの効率を Si PiN ダイオードと SiC JBS ダイオードを用いた場合で、それぞれ比較した結果である。燃料電池の出力電圧を約 300V から 650V に昇圧した際に、0.5%以上効率を向上していることを確認した。FC ブーストコンバータは FCV が走行するために必要な全エネルギーが通過するため、ここの損失は車両の燃費に直接影響を与える。さらにこの FC ブーストコンバータの出力自体 110kW と非常に大きなものであるため、0.5%の改善は 500W の損失低減に相当し、燃費のみならずパワー半導体素子の冷却設計にも大きなインパクトを与える。

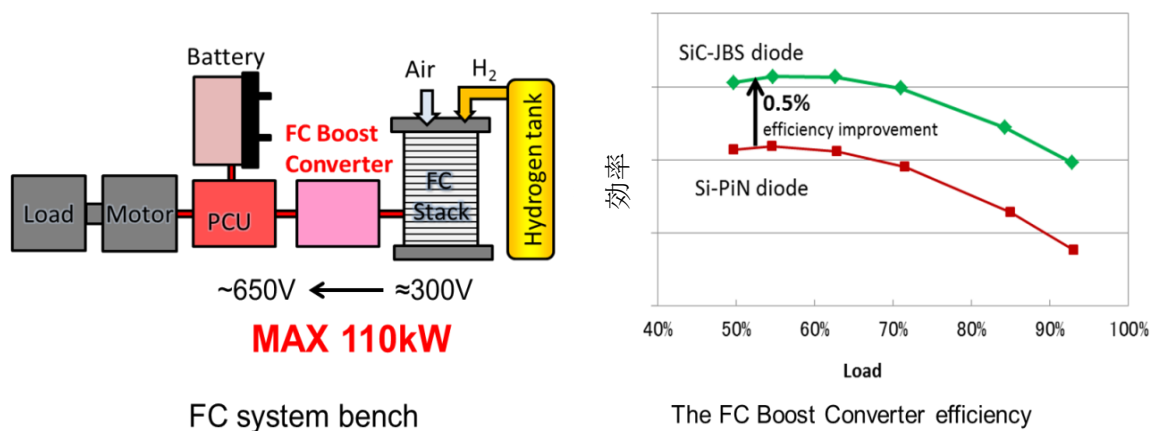


図 1-2-14 FCDC コンバータ用 Si PiN ダイオード、SiC JBS ダイオード昇圧効率比較

上述のようにトヨタ自動車は3種類の車両に SiC パワー半導体を搭載し、評価を進めている。このような評価を進める理由は前章でも述べた通り、次世代電動系環境対応車両の燃費を一層向上させ、また商品性を向上させそれらの車両の普及を加速することにより CO<sub>2</sub> 排出量を削減することである。商品性の向上の大きなアイテムの一つに PCU の小型化がある。将来的には PCU のサイズを現行の PCU の 1/5 にすることを目標としている（図 1-2-15）<sup>21)</sup>。SiC パワー半導体には、そのことを実現するだけの可能性がある」と期待している。

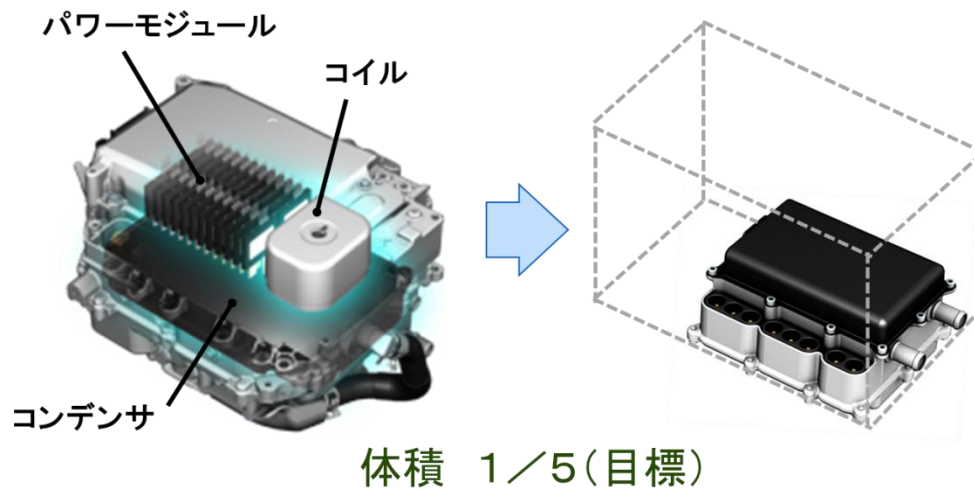


図 1-2-15 PCU 体積低減目標イメージ

### 1.3 SiC パワー-MOSFET

#### 1.3.1 パワー半導体材料としての SiC 結晶

SiC 結晶は多くの結晶多型（ポリタイプ）を持つことが知られており、結晶構造に応じて材料が持つ特性も異なる。代表的な結晶構造である 3C, 4H, 6H-SiC 構造の模式図を図 1-3-1 に示す<sup>18)</sup>。原子○は Si、●は C（カーボン）を表す。SiC は Si と C 原子がそれぞれ正四面体構造を持ち、最初の 3,4,6 という数値はその単位正四面体構造の C（シー）軸方向の繰り返し数を表す。この図において上面は表面に露出する元素は全て C（カーボン）となるため C（カーボン）面、下面は全て Si となるため Si 面（シリコン面）と呼ばれる。表 1-3-1 に各種パワー半導体材料の物性値を示す<sup>24)</sup>。3C, 4H, 6H 全てのポリタイプの SiC は GaN やダイヤモンドと同様に Si に比べバンドギャップが広くワイドバンドギャップ半導体と呼ばれている。パワー半導体として特に優れた特性は、絶縁破壊強度が高いことで、この特性により高耐圧なユニポーラデバイスの形成が可能となり、低い導通損失とスイッチング損失の両立が可能となる。また熱伝導率が高いこともパワー半導体としては有利な点で、次世代パワー半導体材料として比較されることの多い GaN に比べて優れている点の一つといえる。3C, 4H, 6H-SiC の中では 4H-SiC がバンドギャップ、絶縁破壊強度、熱伝導率全ての面でパワー半導体に適しており、現在のパワー半導体への応用は主に 4H-SiC 結晶が用いられている。

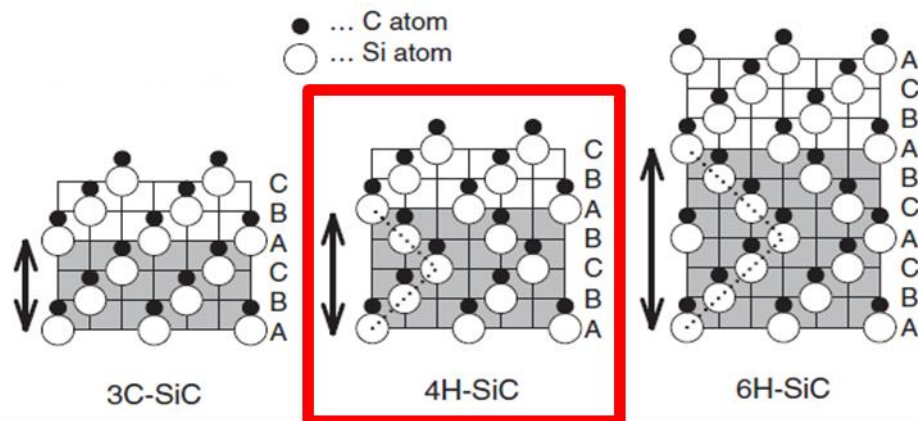


図 1-3-1 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC 構造模式図<sup>18)</sup>

表 1-3-1 各種パワー半導体材料の物性値<sup>24)</sup>

	3C-SiC	4H-SiC	6H-SiC	Si	GaAs	GaN	ダイヤモンド
エネルギーバンドギャップ(eV)	2.2	3.1	2.9	1.1	1.4	3.4	5.5
絶縁破壊電界(V/cm)	$3 \times 10^6$	$3 \times 10^6$	$2.5 \times 10^6$	$3 \times 10^5$	$4 \times 10^5$	$2 \times 10^6$	$8 \times 10^6$
熱伝導率(W/cm <sup>2</sup> °C)	4.9	5.0	4.9	1.5	0.54	1.3	20
飽和電子速度(cm/s)	$2.5 \times 10^7$	$2.7 \times 10^7$	$2.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7$	$2 \times 10^7$	$2.5 \times 10^7$	$2.5 \times 10^7$
格子定数(Å)	a = 4.36	a = 3.08	a = 3.08	a = 5.43	a = 5.65	a = 3.16	a = 3.57



4H-SiC 結晶は六方晶であり、Si 面、C 面、a 面、m 面の4つの主要な結晶面を持つ。4H-SiC の代表的な面をボールアンドスティック構造モデルを用いて図 1-3-2 に示す<sup>24)</sup>。このモデルでは図 1-3-1 同様、上面が C (カーボン) 面、下面が Si 面でそれぞれ $[000-1]$  $[0001]$ と、また a 面は $[11-20]$ 、今回の研究対象である m 面は $[1-100]$ と表記して示されている。六方晶の上面図を図中に示すが、青い線が a 面、赤い実線が m 面を示している。なお 4H-SiC は六方晶であるため、各面は  $60^\circ$  毎に同じ特性面となり、例えば m 面で言うると赤い破線は全て m 面となる。a 面も  $60^\circ$  回転した面は全て a 面となる。また結晶構造の最小単位である結晶格子は上面図の黄色で示した、正六角形の3分の1の菱形(正三角形が2つくっついた形)を上面と底面に持つ角柱の構造となる。この4つの主要結晶面は Si と C の配列や結合が異なることで、酸化速度などの材料特性も、移動度などの電気特性もそれぞれ異なる値を持つ。4H-SiC を用いてパワーMOSFET を作成した場合、構造上 MOSFET の特性に大きく影響を与えるチャンネル面として、この4つの全ての面が利用可能である。

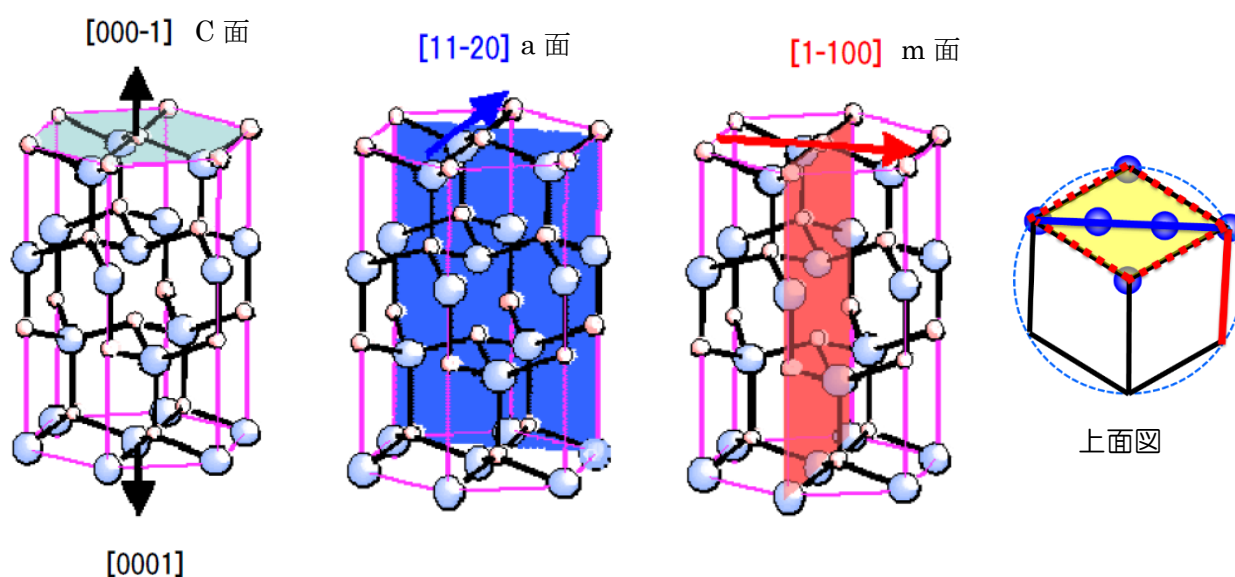


図 1-3-2 4H-SiC の代表的な結晶面のボールアンドスティック構造モデル<sup>24)</sup>及び上面図

### 1.3.2 パワーMOSFET の構造とチャンネル移動度のオン抵抗への影響

パワーMOSFET にはゲート構造の違いによりプレーナ (ゲート) 型 MOSFET とトレンチ (ゲート) 型 MOSFET の2種類の基本構造がある (図 1-3-3)<sup>25)</sup>。プレーナ型 MOSFET はチャンネルが Si 面又は C 面となり、トレンチ型 MOSFET はチャンネルが a 面、m 面又はその間の面となる。Si 面、C 面より a 面、m 面の方が移動度は高いことが確認されており (図 1-3-4)<sup>25)</sup>、プレーナ型 MOSFET は比較的移動度が低い Si 面や C 面を用いさらに微細化が困難であるのに対し、トレンチ型 MOSFET は比較的移動度の高い a 面または m 面が利用でき構造上微細化も進めやすいため低オン抵抗化のポテンシャルは高い。

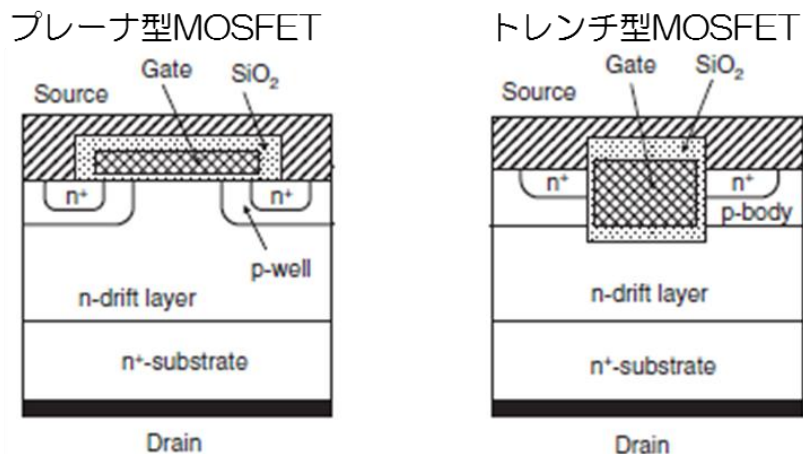


図 1-3-3 プレーナ型 MOSFET とトレンチ型 MOSFET 構造概略図 <sup>25)</sup>

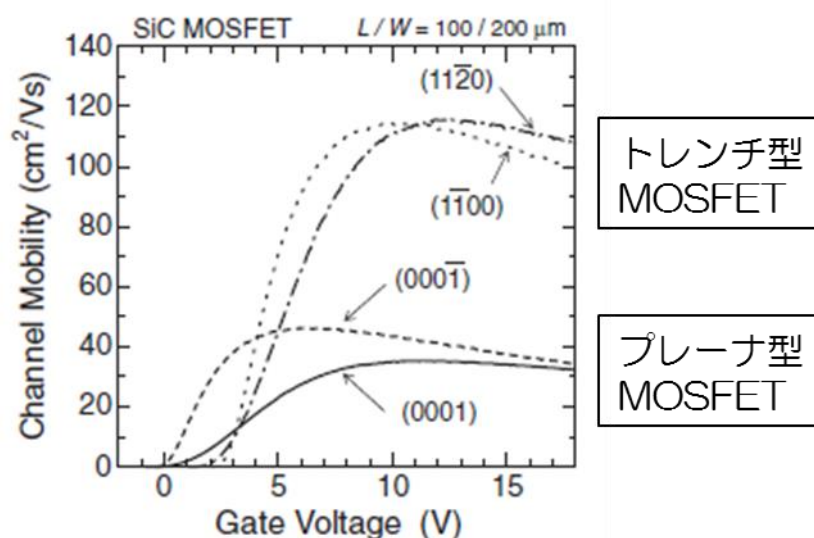
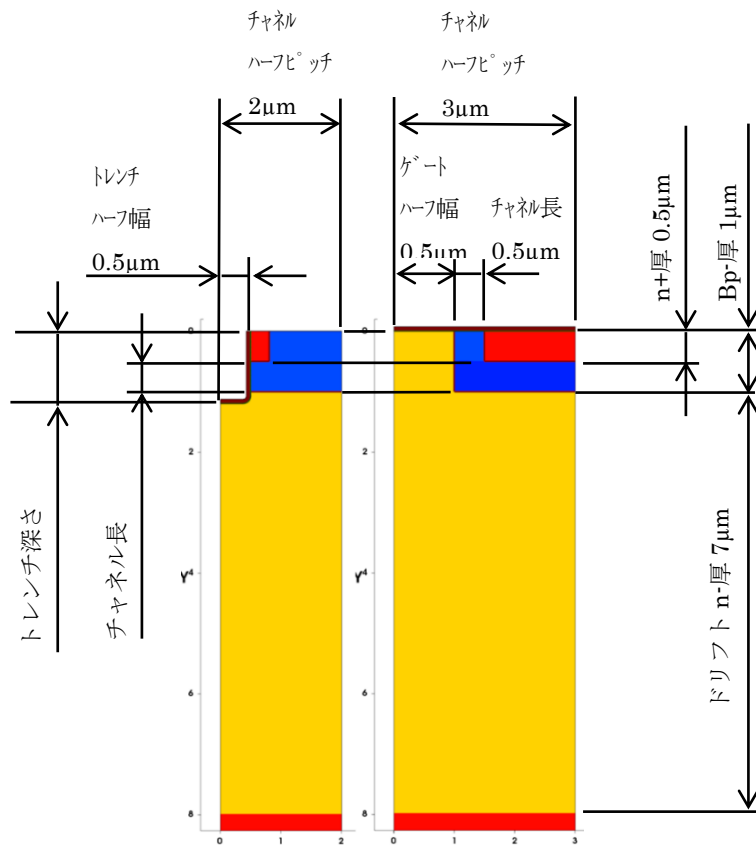


図 1-3-4 4H-SiC 結晶面方位と移動度、ならびに各面方位が適用可能な MOSFET 構造 <sup>25)</sup>

デバイスシミュレーションを用いて移動度がオン抵抗に与える影響を検討した。計算に用いたシミュレータは Synopsis 社の Sentaurus で、比較のための構造モデルと構造パラメータを図 1-3-5、表 1-3-2 に示す。両構造とも 1200V 耐圧を想定している。トレンチ型 MOSFET のセルピッチは  $4\mu\text{m}$  (シミュレーションではその半分の幅の  $2\mu\text{m}$  のモデルを使用)、プレーナ型 MOSFET のセルピッチは  $6\mu\text{m}$  (シミュレーションでは  $3\mu\text{m}$  のモデルを使用)、チャネル長と濃度、ドリフト n 層厚と濃度、基板厚と濃度などは全て同じとしている。プレーナ型 MOSFET の場合、セルピッチとオン抵抗と耐圧に相関がある。セルピッチはモデル中のゲート (ハーフ) 幅を広げてセルピッチを広げるものとする。オン抵抗は極小値をとるが、同時に耐圧はある一定のセルピッチ以上になると低下する。このドリフト n 層濃度の場合セルピッチを小さくするとチャネル密度が上がるためチャネル抵抗成分が下がるがボディ p 層にまかれた JFET 抵抗成分が増加する。これらの合計がオン抵抗であるためどちらの抵抗値もが過大にならない寸法で極小値を持つ。一方、耐圧はゲート幅が広がることでボディ p 拡散層の角部に電界が集中することで耐圧の低下が起こる。今回のシミュレーションでは、事前に耐圧シミュレーションを行い、



(1) 4μm ピッチ (2) 6μm ピッチ  
トレンチ型 MOSFET プレーナ型 MOSFET

図 1-3-5 4H-SiC デバイスシミュレーションモデル

表 1-3-2 4H-SiC デバイスシミュレーションモデル 構造パラメータ

	トレンチ型 MOSFET	プレーナ型 MOSFET
ウェーハ面	Si面	
チャンネル面	m面	Si面
チャンネル移動度(cm <sup>2</sup> /V/s)	2~100	
n+厚(μm)	0.5	
n+濃度(/cm <sup>3</sup> )	1.0E+20	
Body p-厚(μm)	1.0	
Body p-濃度(/cm <sup>3</sup> )	3.0E+17	
ドリフトn-厚(μm)	7	
ドリフトn-濃度(/cm <sup>3</sup> )	1.60E+16	
基板厚(μm)	350	
基板比抵抗(Ωcm)	0.02	
チャンネルピッチ	4.00	6.00
チャンネル長(μm)	0.5	
ゲート酸化膜厚(μm)	75	

仕様の1200Vを超える1237Vの耐圧が出せるゲート幅である $2\mu\text{m}$ を採用しトータルセルピッチは $6\mu\text{m}$ とした。その構造パラメータを固定して、移動度のみを2から100 ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )まで変化させたときの規格化オン抵抗 ( $\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ )を比較した値を図1-3-6に、またその抵抗値のチャンネル抵抗、ドリフト抵抗(プレーナ型MOSFETのJFET抵抗を含む)、基板抵抗にブレークダウンしたものを図1-3-7に示す。図1-3-6より、トレンチ型MOSFETの移動度が20 ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )以上になると、プレーナ型MOSFETの移動度がどこまで下がってもその値より低い抵抗値を得ることができないことが分かる。プレーナ型MOSFETの採用するSi面やC面では実験的には移動度は相対的にa面やm面よりも低いことからトレンチ型MOSFETに優位性があると言え、またトレンチ型MOSFETではこのシミュレーションモデルよりも一層微細化を進めることでさらにオン抵抗を低減することが可能となる。

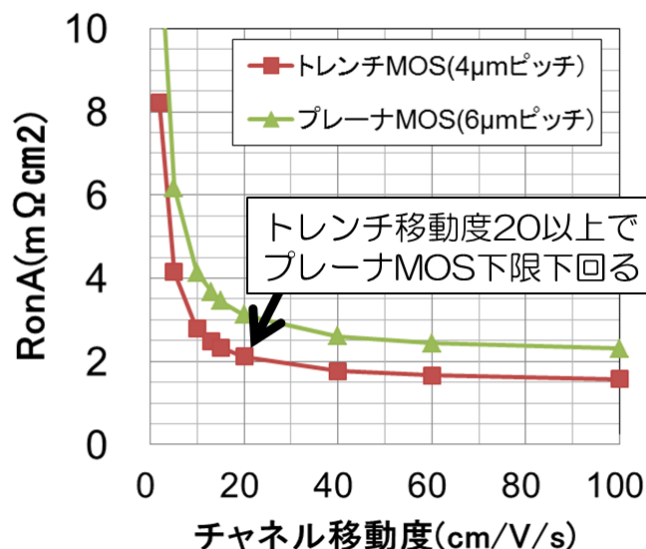


図1-3-6 トレンチ型MOSFETとプレーナ型MOSFETの規格化オン抵抗  $R_{onA}$  ( $\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ )のチャンネル移動度依存性(シミュレーション値)

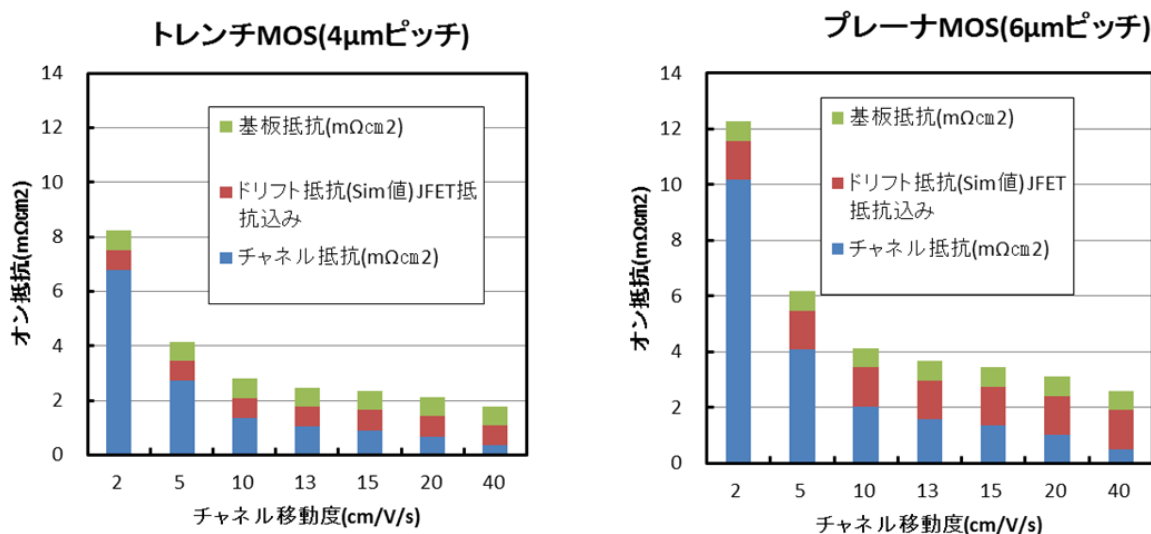


図1-3-7 トレンチ型MOSFETとプレーナ型MOSFETの規格化オンの要素抵抗(基板抵抗、ドリフト抵抗、チャンネル抵抗)へのブレークダウン(シミュレーション値)

### 1.3.3 4H-SiC トレンチパワーMOSFET におけるチャンネル面方位と m 面の重要性

4H-SiC ウェーハは良質なエピタキシャル層を得るために C (シー) 軸に対し a 面側に  $2^\circ$  から  $8^\circ$  程度のオフ角を持たせている<sup>18)</sup>。a 面にオフ角を持つため a 面をチャンネル面として用いた場合、対向するトレンチ側壁の移動度に非対称性が現れることが Yano らにより指摘されている<sup>26)</sup>。片側面のチャンネル移動度は非常に高くなるが、対向側のチャンネル移動度は大幅に減少する。a 面に対し  $13^\circ$  の傾きを持たせた論文の例では半分以下に減少している。この現象は均一性と再現性の高い製造プロセスの確立が求められる産業的には好ましいものではない。一方 a 面と直交する m 面にはオフ角の影響は現れず、対向するトレンチ側壁で均等なチャンネル移動度となる。また Banzhaf らは  $30^\circ$  毎にトレンチ方向を変化させ閾値、移動度と最大ドレイン電流の変化を計測している<sup>27)</sup>。明らかにオフ角の影響を受けたと考えられるトレンチの方向に対する閾値と移動度の依存性が現れており、a 面では対抗するチャンネル面で移動度は約 2 割の差が発生し、閾値は逆の傾向を表している。特性が悪くなっている(-1-120)面の面方位が正確な a 面からずれることにより、界面順位が増加しその結果閾値の増加と移動度の減少が発生していると思われる。それに対し m 面では両者共に対抗するチャンネル面で均一な電気特性を示すことを報告しており、m 面は a 面よりも産業的に望ましい特性を持つことを示している。

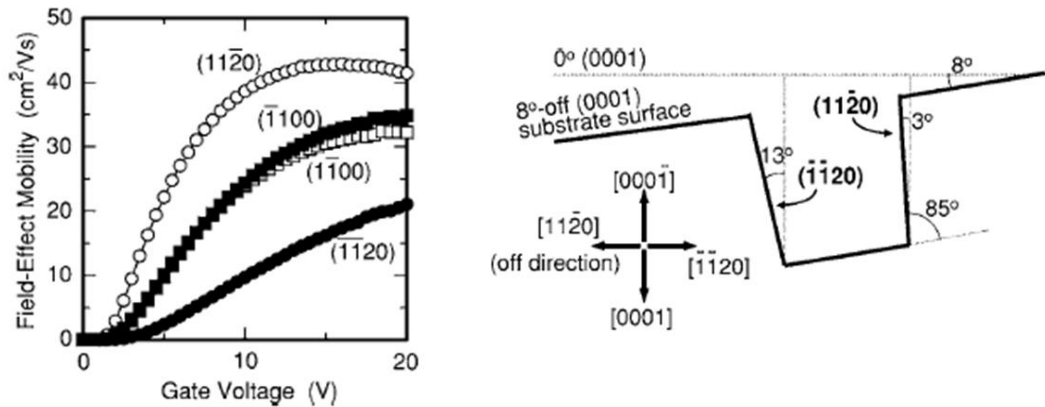


図 1-3-8 4H-SiC a 面(11-20)(-1-120)面と m 面(1-100)(-1100)面の移動度の違い  
a 面の非対称性を表す原因である基板オフ角がトレンチ側壁角の面方位に与える影響<sup>26)</sup>

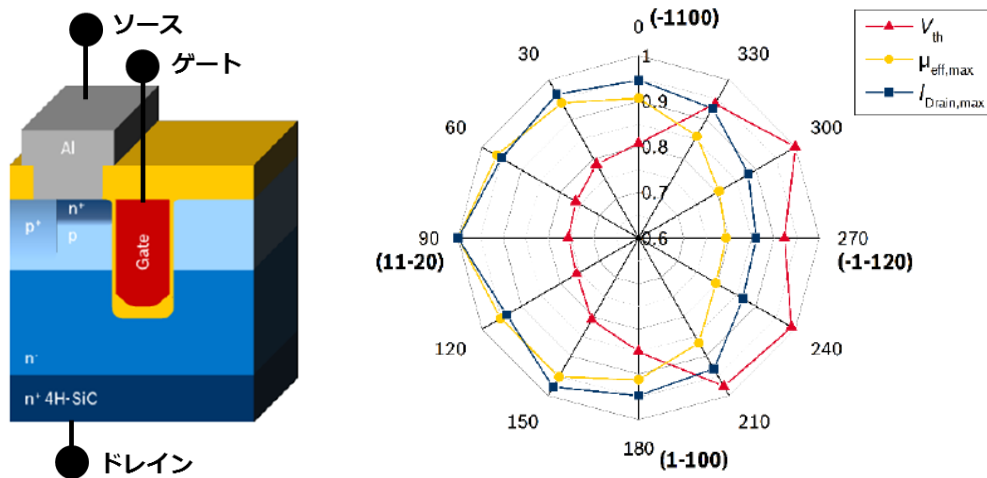


図 1-3-9 4H-SiC トレンチ型 MOSFET の閾値、移動度、トレンチ面の面方位依存性と移動度計測用片側チャンネル TEG 構造<sup>27)</sup>

### 1.3.4 ゲート酸化膜

MOSFET を作製する場合、ゲート酸化膜形成工程はチャネルの特性に影響を与える重要な工程であるが、ゲート酸化膜作成方法には SiC 結晶を直接酸化する方法<sup>28-35)</sup>と、SiC 膜を堆積させる方法<sup>36-41)</sup>がある。SiC は熱酸化によって SiO<sub>2</sub> ゲート絶縁膜を直接形成することのできる唯一のワイドバンドギャップ半導体であり、そのことは大きなアドバンテージの一つと考えられていた。ただ実際は、酸化により SiC 中の C が酸化膜界面に存在しゲート酸化膜質の劣化要因となるなど Si の時には経験しなかった事象が発生し、そのこと自体は特別有利とはいえないことが分かってきた。現状は熱酸化と堆積膜どちらも一長一短と言え、各研究機関や企業はそれぞれが独自のノウハウを蓄積しながら、使いこなしているという状況である。我々は膜厚制御と界面プロセスの分離可能な堆積膜に可能性があると考え、堆積膜具体的には LP-CVD 酸化膜に対し NO-POA を適用するプロセスをベースプロセスとして、検討を行った。

### 1.3.5 チャネル移動度に影響を与える要因

チャネル移動度の低さは界面準位の多さに起因していると考えられているが、界面準位と酸化/POA 条件との間には密接な関係があることが知られている<sup>29, 31, 33, 42, 43)</sup>。MOSFET の低抵抗化にはチャネル移動度の向上が必須であるが、ゲート界面順位とチャネル移動度には強い相関があることも知られており<sup>44)</sup>、移動度向上のためには界面順位密度を下げるのが重要である (図 1-3-10)。

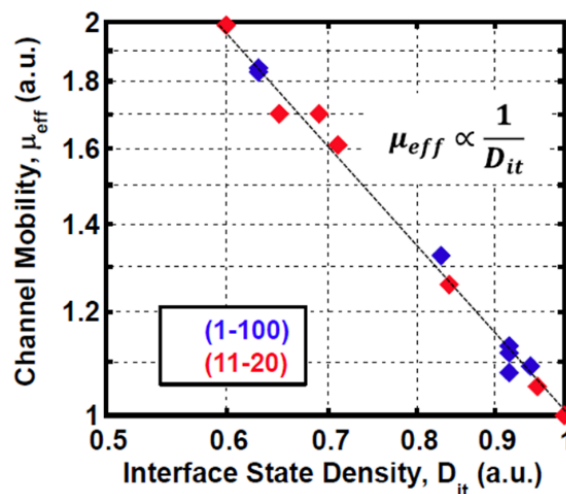


図 1-3-10 チャネル移動度と界面順位密度の関係実験値 (a 面、m 面)<sup>44)</sup>

Si MOSFET の Si/SiO<sub>2</sub> 界面における移動度の決定メカニズムは比較的解析されており、その考え方は SiC MOSFET の SiC/SiO<sub>2</sub> 界面にも適用できると考えられる。移動度は(a)クーロン散乱、(b)表面ラフネス散乱、(c)フォノン散乱の3つの散乱要素からなる。それぞれの散乱因子に影響を与える要因は下記である<sup>45-48)</sup>。

- (a)クーロン散乱 : 界面電荷 (界面準位、酸化膜トラップ、固定電荷による要因)
- (b)表面ラフネス散乱 : 表面凹凸 (エッチング、酸化、後処理などで決まる形状による要因)
- (c)音響フォノン散乱 : 結晶振動 (温度による要因)

ここで(a)クーロン散乱を  $\mu_c$ 、(b)表面ラフネス散乱を  $\mu_{sr}$ 、(c)音響フォノン散乱を  $\mu_{ac}$  とした時に実行



チャネル移動度は式(1-3-1)で表される。

$$\frac{1}{\mu_{eff}} = \frac{1}{\mu_c} + \frac{1}{\mu_{ac}} + \frac{1}{\mu_{sr}} \quad (1-3-1)$$

また、それぞれ散乱要素は、

$$\mu_c \propto \frac{T}{N_T} \left( 1 + \frac{N_S}{N_{scr}} \right) \quad (1-3-2)$$

$$\mu_{ac} \propto \frac{A}{E_{eff}} + \frac{B}{T \cdot E_{eff}^{\frac{1}{3}}} \quad (1-3-3)$$

$$\mu_{sr} \propto \frac{\delta}{E_{eff}^2} \quad (1-3-4)$$

ここで、

$\mu_m$ : Maximum mobility in the bulk (=1071)

T: 温度

$N_A$ : Doping density

$N_T$ : Total number of trapped charge

$N_S$ : Surface carrier concentration

$E_{eff}$ : Effective field

$\eta_B, \gamma_B, N_{ref}, N_{scr}, A, B, \delta$ : empirical parameter

である。これらの散乱要因毎のチャネル移動度と実効電界の関係性を図 1-3-11 に示す。SiC でもこの相対性は変わらず、実用域での SiC 界面電界はクーロン散乱が支配的である。従ってチャネル移動度向上のためには、クーロン散乱の低減が有効でそのためには  $N_t$  (Total number of trapped charge) の低減すなわち界面順位密度の低減が必要である。

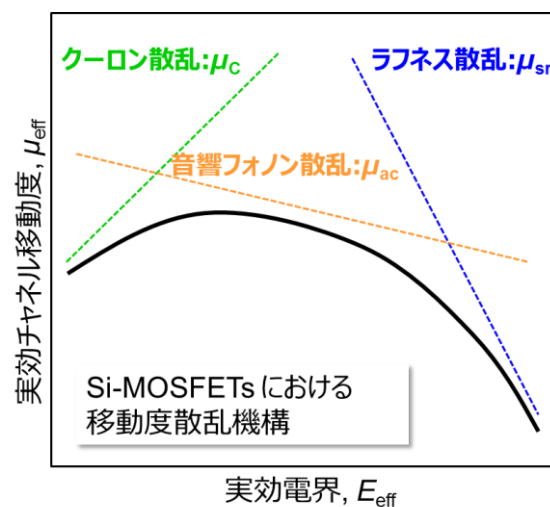


図 1-3-11 散乱要因毎のチャネル移動度と実効電界の関係性  
(Si で確立された理論であるが SiC でも同様の傾向があると考えられる)

### 1.3.6 NO-POA による移動度向上

Si の微細 MOS では、ゲート絶縁膜/界面の窒化プロセス (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, プラズマ窒化) が検討、導入されてきた。その目的は、

- 界面準位低減による移動度向上
- ダブルゲート pMOS (ボロン拡散ゲート) のボロンの基板への拡散防止
- 高誘電率化に伴う酸化膜厚増加によるゲートリーク電流の低減
- ホットキャリア耐性の向上

などである。Si デバイスの場合、250nm<L<sub>g</sub> デザインルール(5.5nm<T<sub>ox</sub>)までの世代では通常の熱酸化によるゲート酸化膜形成が行われていたが、130nm<L<sub>g</sub><180nm デザインルール(1.8nm<T<sub>ox</sub><4.0nm)世代から界面近傍の窒化プロセスが導入され、さらに L<sub>g</sub><100nm デザインルール(T<sub>ox</sub><1.2nm)世代では界面近傍の窒化に加え SiO<sub>2</sub> 表面窒化を取り入れたり (図 1-3-12)<sup>49)</sup>、L<sub>g</sub>=45nm デザインルール(T<sub>ox</sub>=0.7nm) 世代では、SiO<sub>2</sub> 中の界面近傍の Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 構造まで制御する必要が起きている<sup>50)</sup>。Si MOSFET における目標構造は、

- ①SiO<sub>2</sub> バルクの窒素濃度は上げる (高誘電率化により酸化膜厚を上げリーク電流低減)
- ②界面直近の窒素濃度は下げる (ホールトラップ低減)
- ③界面のみ窒素濃度上げる (移動度向上)

と明確であった。界面移動度の上がらない SiC MOSFET の界面準位低減と移動度向上にこれら Si で開発されたゲート絶縁膜の窒化 (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, NO) 技術の適用が検討されてきた。

Change of gate oxide process.

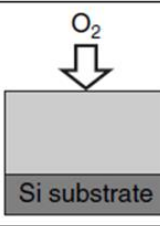
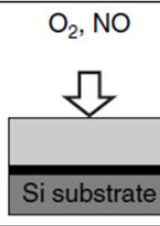
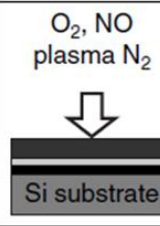
Device generation	L <sub>g</sub> >250 nm	180 nm>L <sub>g</sub> >130 nm	L <sub>g</sub> <100 nm
Gate oxide thickness	T <sub>ox</sub> >5.5 nm	4.0 nm>T <sub>ox</sub> >1.8 nm	T <sub>ox</sub> <1.2 nm
Structure			
N distribution	None	Near Si substrate	Near Si substrate +SiO <sub>2</sub> surface
Process	Oxidation	Oxidation +NO nitridation	Oxidation +NO nitridation +Plasma nitridation

図 1-3-12 Si MOSFET の微細加工の世代とゲート酸化膜窒化技術の推移<sup>49)</sup>

窒化に用いられるガスは NO, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> など各種のガスが、様々な温度や時間の条件で検討されているが、SiC に対する NO-POA の場合そのほとんど全てが 1050℃~1300℃と、Si の 1000℃以下と比較して高温の条件で行われている。Si の場合は微細 CMOS 用プロセスであるため、不純物拡散層が広がらないように熱負荷を極力小さくしたいということと、NO や N<sub>2</sub>O による酸化を抑制するため、低温かつ短時間で界面窒化処理を行う必要がある。一方、SiC の場合は、不純物層を形成するためのドーパント



である窒素、リン、アルミなど全て非常に拡散係数が小さく実質的に拡散層は広がることは想定しなくて良いため、純粋にゲート界面改質のための NO-POA に必要な温度条件を検討すればよい。Chung らにより NO 処理を導入することで移動度が向上<sup>29)</sup>することが確認されて以来、Si 面、C 面、a 面、m 面の全ての面で窒化処理により界面特性が改善されていることは確認されている。例えば図 1-3-13 は Si 面に対し 1175°C の NO-POA を 0 分から 120 分まで変更した時のエネルギーレベルと各エネルギーレベルにおける界面順位密度の関係を示したものであるが、明らかに NO-POA 時間を長くすることで界面順位密度は低減している<sup>31)</sup>。図 1-3-14 は Dry 酸化で形成した膜に NO-POA を施した場合の移動度の変化<sup>29)</sup>を、図 1-3-15 は NO-POA 時間を 0 分から 4 時間まで伸ばすことによる界面窒素面密度の増加により界面のトラップ順位密度が減少すると同時に移動度も改善する様子を示している<sup>33)</sup>。ただし界面窒化による特性改善のメカニズムが十分把握されていないため、いまだ目標とする構造は明確ではない。界面の窒化状態は Si とは異なる上に窒化に求める要件も異なってくるため、Si において検討された図 1-3-12 に示すような界面近傍の構造設計が適切であるとは限らない。これらは全て SiC は結晶中に Si 以外に C が存在するためであり、この C が結晶、界面、酸化膜の界面近傍の全ての領域の窒化に対し影響を与えているためである。これらの NO-POA による効果は、Si 面、C 面、さらに近年においては a 面に対しても比較的 research が進みデータの蓄積や現象の解析も進められているが、筆者らが重要と考える m 面については多くの研究がなされているとはいえず、窒化状態の把握やプロセス依存性、窒化メカニズムにおける m 面の特殊性の有無も含めほとんど議論されていないのが現状である。

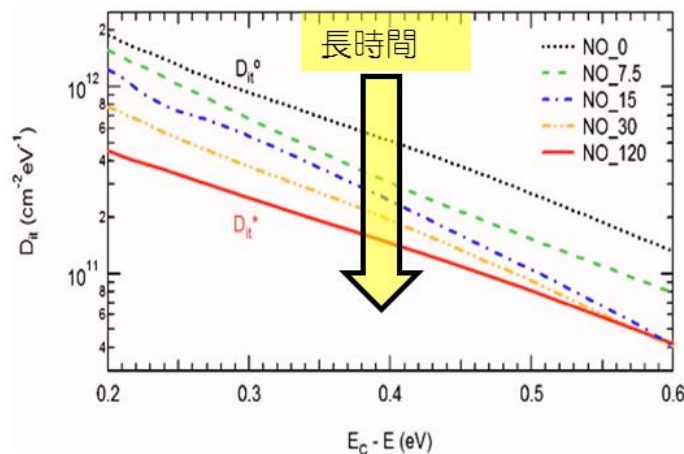


FIG. 5. (Color online) Density of interface states of the control sample (2 h Ar at 1175 °C) and of the ones annealed for 7.5, 15, 30, and 120 min in NO.  $D_{it}^0$  and  $D_{it}^*$  refer to the  $D_{it}$  prior to NO annealing and at N saturation, respectively.

図 1-3-13 4H-SiC Si 面に対し 1175°C の NO-POA 実施した時の各エネルギーレベルの界面順位密度の NO-POA 時間の影響<sup>31)</sup>

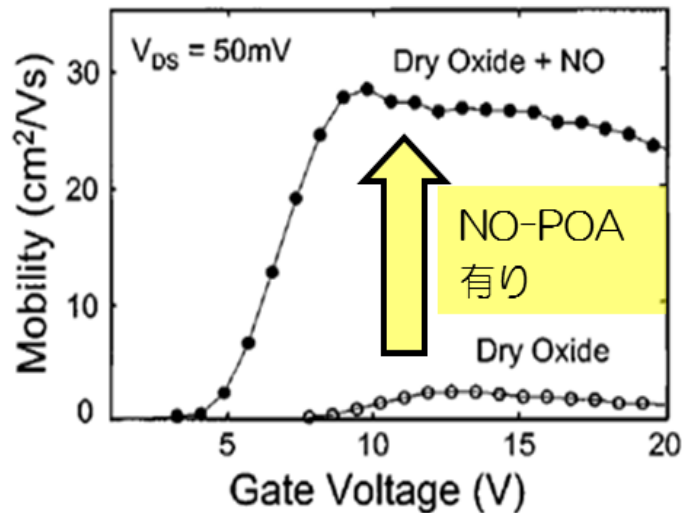


図 1-3-14 4H-SiC に Dry 酸化で形成した膜に対する 1175°C、2 時間の NO-POA の有無による移動度の変化<sup>29)</sup>

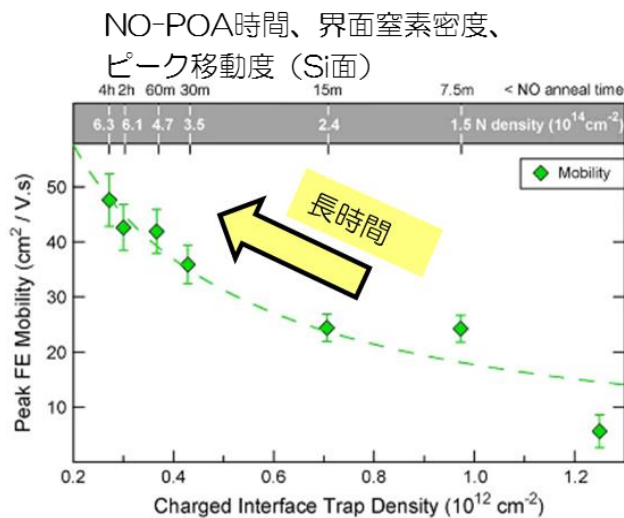


Fig. 1. Peak field-effect mobility is plotted as a function of various NO annealing times (upper axis), which yield distinct densities of charged interface states (lower axis) in the ON-state of the MOSFETs. The N density at the interface is measured by SIMS. The dashed line is a fit by (4).

図 1-3-15 NO-POA 時間を延ばすことによる界面窒素面密度の増加と界面のトラップ順位密度が減少すると同時に移動度も改善する四者の関係<sup>33)</sup>

### 1.3.7 パワーMOSFET 形成プロセス

トレンチ型パワーMOSFET の形成プロセスの概要を図 1-3-16 に示す。基板は高濃度 n 型基板に n-ドリフト層用エピタキシャル層、ボディ p-層用エピタキシャル層を堆積させたウェーハを準備し、そこにソース n+をイオン注入で形成、SiO<sub>2</sub>マスクでゲート用トレンチエッチングを行い、ゲート酸化膜を LP-CVD で堆積後 NO-POA 処理を行う。その後、ゲートポリ Si を埋め込み、相関絶縁膜によりゲートポリ Si を絶縁し、ソース、ゲート用のコンタクト開口後上部電極を形成し、トランジスタが完成する。

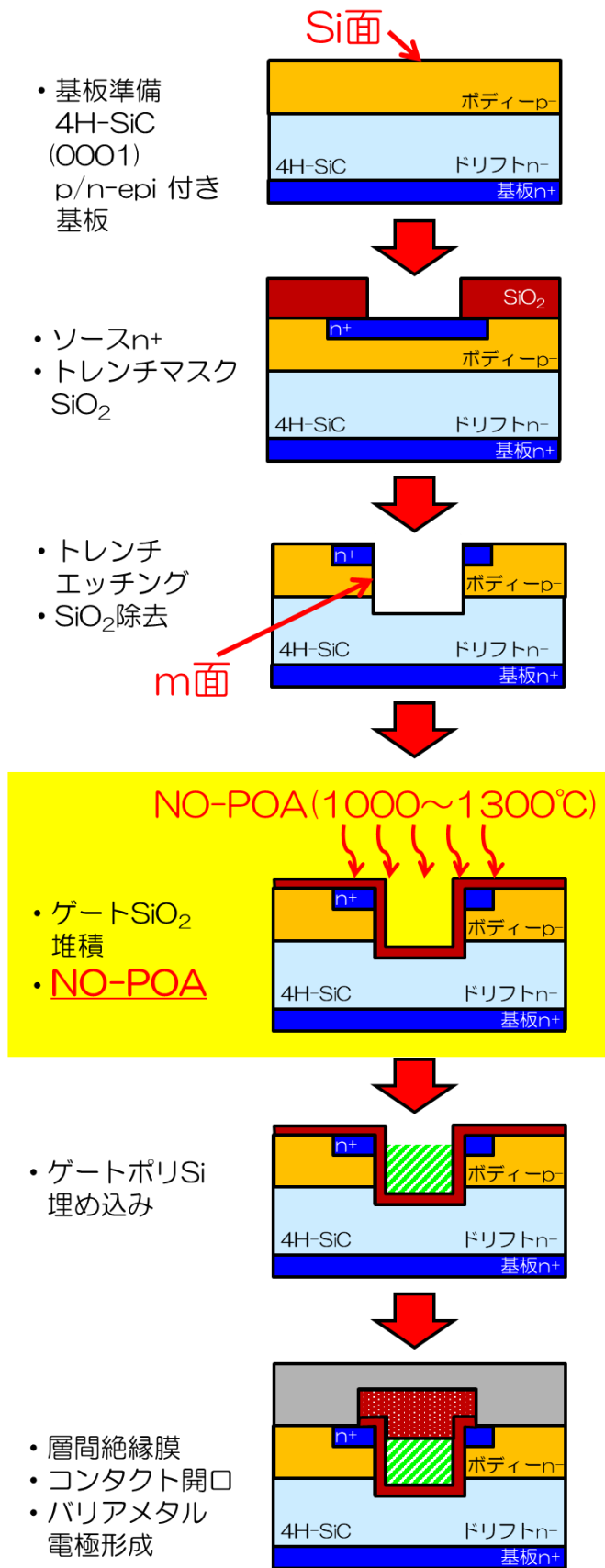


図 1-3-16 トレンチ型パワーMOSFET 作成プロセス

## 1.4 研究概要

当研究の目的は、4H-SiC m面の移動度向上を目的とした、NO-POAの有効性の確認と界面窒化メカニズムについての考察を行い、最終的には4H-SiCのm面にとどまらずSi面、C面、a面の全ての界面の窒化現象を説明するNO-POAによる窒化モデルを提案するものである。

本論文は全体で5章立てとなっている。第1章の概要に続き、第2では「4H-SiC m面トレンチゲート型MOSFET特性にNO-POAが与える影響の調査」と題し、m面MOSFETにNO-POAを施した時のMOS特性(移動度)、Capacitance特性(C-V特性、界面順位)、界面物理分析(SIMS、CL、FT-IR、HAXPES、XPS、XAFS)による状態の把握を行う。ここから界面窒素の高濃度化と界面順位低減、移動度改善に強い相関があることを確認した。併せて、m面特有の窒素飽和値が存在することを見出す。このm面特有の窒素飽和値は、m面界面の窒化の特徴の一つであり、窒化メカニズムを考える上での大きなヒントとなる。続いて第3章では「NO-POAによる4H-SiC酸化膜界面への窒素導入過程の詳細解析」と題し、m面界面の窒素飽和値を決めるメカニズム解明のための窒素導入と離脱に対する基礎評価を実施する。具体的には、SiC界面のNO-POAによる窒化の面方位依存性の確認、窒素導入、窒素離脱に対する実験により窒素導入と離脱の現象を詳細に調査することで、界面窒化メカニズムの考察を行う。第4章は「4H-SiC酸化膜界面窒素モデル」と題し、この論文のテーマであるm面を起点とした界面のNO-POAによる界面窒化モデルの提案と検証に続き、他の面すなわちSi面、C面、a面にもそのモデルを適用した場合の考察、結果、検証を行っている。第5章は結論で当研究成果を整理し、材料側面の研究にとどまらず4H-SiCパワーMOSFETを実用化するに当たっての当研究結果の貢献を述べる。

なお一般にPOAはPost Oxidation Annealの略であるため、酸化後もしくは酸化膜堆積後の後処理として行うアニールのことを意味するが、今回の実験では文字通りの酸化膜堆積後のNOアニール以外に、NO-POAによる酸化を積極的に行うなど、多くの条件の実験を行っているため、当論文においては複雑さを低減するためにNOガスをを用いた高温熱処理は、全て区別せずNO-POAと表現する。

## 1.5 参考文献

- 1) IPCC AR5 技術要約 p.68, [http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc\\_ar5\\_wg1\\_ts\\_jpn.pdf](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_ts_jpn.pdf)
- 2) 環境省 HP, <http://www.env.go.jp/earth/cop/cop21/>
- 3) IEA Statistics 2015 Edition, “CO<sub>2</sub> EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION”, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsFromFuelCombustionHighlights2015.pdf>
- 4) JAMA HP, クルマと世界> 世界生産・販売・保有・輸出, <http://www.jama.or.jp/world/world/index.html>
- 5) JAMA HP, クルマと世界 > 世界生産・販売・保有・輸出 > 世界 生産 > 表1: 世界各国/地域の四輪車生産台数, [http://www.jama.or.jp/world/world/world\\_t2.html](http://www.jama.or.jp/world/world/world_t2.html)
- 6) 東京大学高見淳史: 交通の現状 <http://www.nikkoken.or.jp/pdf/publication/2015j/11.pdf>
- 7) Kimimori Hamada, “Power Electronics Technologies for Environmentally Friendly Electrified Vehicles”, VPPC2016, Keynote speech presentation, Hangzhou, China, 20<sup>th</sup> October, 2016
- 8) 濱田公守, “ハイブリッド用パワーエレクトロニクス技術と次世代パワーデバイス開発への取組み”, 愛知地域スーパークラスター成果報告会, 2014.12.2
- 9) Toyota Motor Corporation, Mizuho Information & Research Institute, Inc., “Well-to-Wheel Analysis of Greenhouse Gas Emissions of Automotive Fuels in the Japanese Context”, Nov. 2004,

<https://www.mizuho-ir.co.jp/english/knowledge/report/pdf/wtwghg041130.pdf>

10) トヨタ自動車 HP, “トヨタ環境チャレンジ 2050”,

<http://www.toyota.co.jp/jpn/sustainability/environment/challenge2050/>

11) Kimimori Hamada, “Present Status and Future Prospect of Electronics in EVs/HEVs and Expectation for Wide-Bandgap Semiconductor Devices – The latest version 2009”, German SiC Workshop, 19<sup>th</sup> June 2009

12) Kimimori Hamada, “Challenge of Adopting TCAD in the Development of Power Semiconductor devices for Automotive Applications”, SISPAD 2014 Yokohama, Keynote Speech Presentation, 9<sup>th</sup> September, 2014

13) Kimimori Hamada, Masaru Nagao, Masaki Ajioka, Kawai, Fumiaki, “SiC - Emerging Power Device Technology for Next-Generation Electrically Powered Environmentally Friendly Vehicles”, Transactions on Electron Devices, Vol: 62, Issue: 2, 2015, pp. 278-285

14) 濱田公守, “最新の環境対応車両用パワーエレクトロニクス技術と将来に向けたワイドバンドギャップ半導体の重要性”, 日本学術振興会 ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第 162 委員会 第 100 回研究会 記念シンポジウム「ワイドギャップ半導体が拓く高度環境・情報化社会」, 2016.10.28

15) 濱田公守, “SiC の開発の現状と車載への展望”, 日経テクノロジーセミナー, 講演資料, 2016/3/28

16) Kimimori Hamada, “Installation of All-SiC Inverter System of Hybrid Electric Vehicles”, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2015, Keynote Speech, 9<sup>th</sup> October 2015

17) Toyota Global Newsroom, “TOYOTA、新型プリウスに採用される先進技術を公開”, <http://newsroom.toyota.co.jp/jp/detail/9826871/>, 2015/10/13

18) H. Matsunami, “Technological Breakthroughs in Growth Control of Silicon Carbide for High Power Electronic Devices”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.43, No.10, 2004, pp.6835-6847

19) K. Hamada, “Power Electronics Technologies for Hybrid Vehicles”, TIA Summer School 2016, Text book

20) Kimimori Hamada, “Present Status and Future Prospect of Electronics in EVs/HVs and Expectation for Wide-bandgap Semiconductor Devices”, Physical status solidi, Silicon Carbide, Vol. 2: Power device and Sensors, 2010, pp. 1-19, ISBN: 978-3-527-40997-6.

21) Toyota Global Newsroom, “トヨタ自動車、新素材 SiC による高効率パワー半導体を開発”, <http://newsroom.toyota.co.jp/jp/detail/2657262/>, 2014/5/20

22) Toyota Global Newsroom, “トヨタ自動車、新素材 SiC パワー半導体搭載車両の公道走行を開始” <http://newsroom.toyota.co.jp/jp/detail/5725437/>, 2015/1/29

23) Toyota Global Newsroom, “トヨタ、日野、新燃料電池システムを搭載したバスを豊田市での営業運行向けに提供” <http://newsroom.toyota.co.jp/jp/detail/4857986/>, 2015/1/8

24) 恩田 正一, “4H-SiC における結晶欠陥の微細構造とデバイス特性への影響に関する研究”, 筑波大学博士論文 12102 甲第 6658 号(2013)

25) Tsunenobu Kimoto, “Material science and device physics in SiC technology for high-voltage power devices”, Japanese Journal of Applied Physics 54, 040103 (2015)

26) Hiroshi Yano, Hiroshi Nakao, Hidenori Mikami, Tomoaki Hatayama, Yukiharu Uraoka, and Takashi Fuyuki, “Anomalously anisotropic channel mobility on trench sidewalls in 4 H - Si C trench-gate metal-oxide-semiconductor field-effect transistors fabricated on 8° off substrates”, Applied Physics Letters 90, 042102 (2007)

- 27) C. T. Banzhaf, S. Schwaiger, D. Scholten, S. Noll, and M. Grieb, "Trench-MOSFETs on 4H-SiC", International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2015, in Proc., We-2A-4, 7<sup>th</sup> October 2015
- 28) Vickram R. Vathulya, Dong Ning Wang, and Marvin H. White, "On the correlation between the carbon content and the electrical quality of thermally grown oxides on p-type 6H-Silicon carbide", Applied Physics Letters 73, 2161 (1998)
- 29) G. Y. Chung, C. C. Tin, J. R. Williams, K. McDonald, R. K. Chanana, Robert A. Weller, "Improved Inversion Channel Mobility for 4H-SiC MOSFETs Following High Temperature Anneals in Nitric Oxide", IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 22, NO. 4, APRIL 2001
- 30) Hiroshi Yano, Hiroshi Nakao, Hidenori Mikami, Tomoaki Hatayama, Yukiharu Uraoka, and Takashi Fuyuki, "Anomalously anisotropic channel mobility on trench sidewalls in 4 H - Si C trench-gate metal-oxide-semiconductor field-effect transistors fabricated on 8° off substrates", Applied Physics Letters 90, 042102 (2007)
- 31) John Rozen, Sarit Dhar, M. E. Zvanut, J. R. Williams, and L. C. Feldman, "Density of interface states, electron traps, and hole traps as a function of the nitrogen density in SiO<sub>2</sub> on SiC", J. Appl. Phys. 105, 124506 (2009)
- 32) Yuichiro Nanen, Muneharu Kato, Jun Suda, and Tsunenobu Kimoto, "Effects of Nitridation on 4H-SiC MOSFETs Fabricated on Various Crystal Faces", IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 60, NO. 3, MARCH 2013
- 33) John Rozen, Ayayi C. Ahyi, Xingguang Zhu, John R. Williams, and Leonard C. Feldman, "Scaling Between Channel Mobility and Interface State Density in SiC MOSFETs", IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 58, NO. 11, NOVEMBER 2011
- 34) Daniel Haasmann, Hamid Amini Moghadam, Jisheng Han, Amirhossein Aminbeidokhti, Alan Iacopi, and Sima Dimitrijevic, "Dipole Type Behavior of NO Grown Oxides on 4H-SiC", Materials Science Forum, Vol. 858, pp 453-456
- 35) Seiya Nakazawa, Takafumi Okuda, Jun Suda, Takashi Nakamura, and Tsunenobu Kimoto, "Interface Properties of 4H-SiC (11 $\bar{2}$ 0) and (1 $\bar{1}$ 00) MOS Structures Annealed in NO", IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 62, NO. 2, FEBRUARY 2015
- 36) S. Sridevan and B. Jayant Baliga, "Lateral N-Channel Inversion Mode 4H-SiC MOSFETs", IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 19, NO. 7, JULY 1998
- 37) Won-ju Cho, Ryoji Kosugi, Junji Senzaki, Kenji Fukuda, Kazuo Arai, and Seiji Suzuki, "Study on electron trapping and interface states of various gate dielectric materials in 4H-SiC metal-oxide-semiconductor capacitors", Applied Physics Letters 77, 2054 (2000)
- 38) Ryoji Kosugi, Won-ju Cho, Kenji Fukuda, and Kazuo Arai Seiji Suzuki, "High-temperature post-oxidation annealing on the low-temperature oxide/4H-SiC(0001)", JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, VOLUME 91, NUMBER 3, 1 FEBRUARY 2002
- 39) 渡部 平司, 細井 卓治, "熱酸化 SiO<sub>2</sub>/SiC 界面原子構造と界面電気特性の評価", 表面科学, 特集「ゲートスタック技術の表面・界面科学」, Vol. 33, No. 11, pp. 639-644, 2012
- 40) P. Fiorenza, F. Giannazzo, M. Vivona, A. La Magna, and F. Roccaforte, "SiO<sub>2</sub>/4H-SiC interface doping during post-deposition-annealing of the oxide in N<sub>2</sub>O or POCl<sub>3</sub>", Appl. Phys. Lett. 103, 153508 (2013)
- 41) P. Fiorenza, F. Giannazzo, M. Vivona, A. La Magna, and F. Roccaforte, "SiO<sub>2</sub>/4H-SiC interface doping during post-deposition-annealing of the oxide in N<sub>2</sub>O or POCl<sub>3</sub>", Appl. Phys. Lett. 103, 153508 (2013)



- 42) John Rozen, "Tailoring Oxide/Silicon Carbide Interfaces: NO Annealing and Beyond", Physics and Technology of Silicon Carbide Devices, InTech, <http://dx.doi.org/10.5772/54396>
- 43) John Rozen, xingguang zhu, A. C. Ahyi, J. R. vvi11iams, and L. C. Feldman, "The limits of post oxidation Annealing in NO", Materials Science Forum, Vol.645-648 (2010), PP 693-696
- 44) 朽木他、第 61 回応物春季学演会 17a-PG3-10
- 45) C. Lombardi et al., IEEE Trans. Computer-aided Design, 7 (1988) 1164.
- 46) S. Takagi et al., IEEE Trans. Electron Devices, 41 (1994) 2357.
- 47) H. Naik and T. P. Chow, Materials Science Forum, 679-680 (2011) 595.
- 48) K. Kutsuki et al., 2016 SSDM, PS-14-14.
- 49) Kanetake Takasaki, Kiyoshi Irino, Takayuki Aoyama, Youichi Momiyama, Toshiro Nakanishi, Yasuyuki Tamura, and Takashi Ito, Impact of Nitrogen Profile in Gate Nitrided-Oxide on CMOS Performance and Reliability", Fujitsu Sci. Tech., J., 39, 1, p.40-51 (June 2003)
- 50) 松下大介、岡村浩一、加藤弘一, "次世代極薄ゲートシリコン酸窒化膜の実現", 東芝レビューVol. 60, No.4 (2005)

## 第2章 4H-SiC m面トレンチゲート型 MOSFET 特性に NO-POA が与える影響の調査

### 2.1 序章

第1章において、4H-SiCのm面をチャンネル面とし堆積ゲート酸化膜を採用したトレンチ型パワーMOSFETが、低オン抵抗特性と加工安定性に最も優れたデバイス構造である可能性が高いことを述べた。ただSiCパワーMOSFETはこれまでSi面やC面をチャンネル面としたプレーナ型の開発が進められてきたためm面の基本的な特性や、MOSチャンネル界面改質に広く用いられているNO-POAの効果や可能性について十分な研究がなされていないことも示した。

第2章の目的はm面MOSFETにNO-POA施した時のMOS特性、MOSキャパシタ特性、界面状態の把握と他面との比較より、m面におけるNO-POA条件と界面状態、電気的特性の関連性について調査を行う。

### 2.2 評価方法

以下に実験の流れを示す。評価にはトランジスタとしての電気特性を確認するトレンチ型MOSFETと、MOS電気特性を確認するMOSキャパシタならびに物理分析を行うための3種類のサンプルを目的に応じて作成した。サンプル作成の概略フローを図2-2-1に示す。

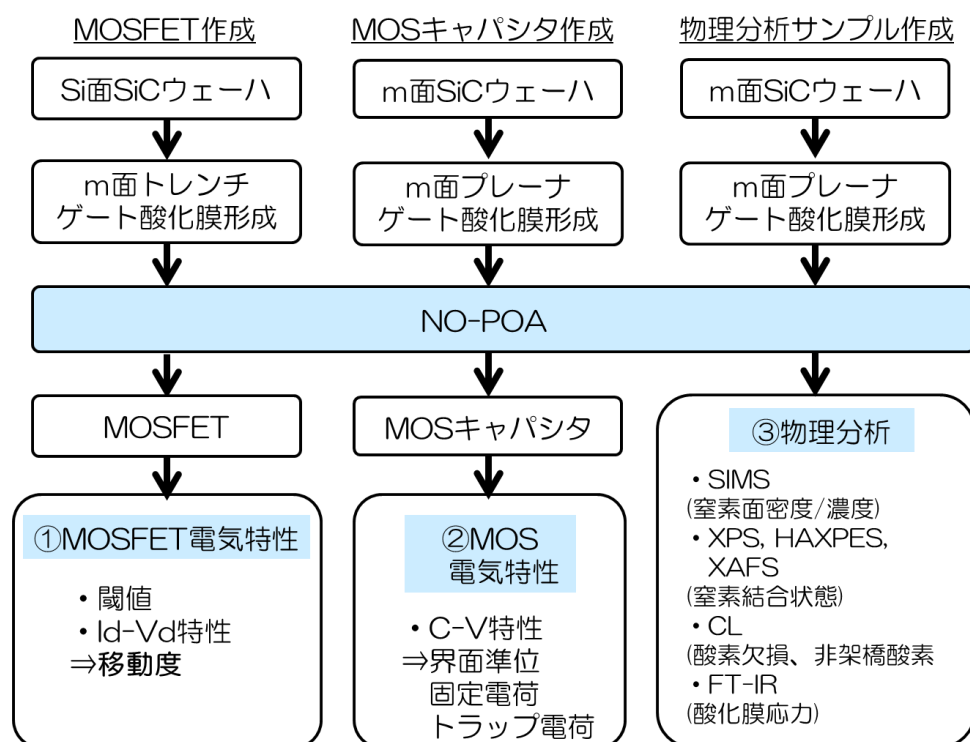


図 2-2-1 サンプル作成概略フロー

NO-POAの実験水準を表2-2-1に示す。下記5水準のNO-POA条件にてMOSFET、MOSキャパシタならびに分析用のサンプルを作製し、①MOSFET特性、②MOSキャパシタ特性、③酸化膜ならびに界面物理分析を実施。サンプル内容と使用ウェーハは下記。

①MOSFET：Si面ウェーハにm面をチャンネルとするトレンチMOSFETを形成した。使用したウェーハはCree社製n型基板(N濃度：5~10E18/cm<sup>3</sup>、厚さ：370~420 μm)の上にn-ドリフト用のn型エピタキシャル層(窒素濃度：1E16/cm<sup>3</sup>、厚さ：10 μm)、ボディ-p用のp型エピ(Al濃度：1~3E17/cm<sup>3</sup>、厚さ：1.5 μm)を堆積したもの。これを図2-2-1のフロー(詳細フローは図1-3-16参照)にてパワーMOSFETを作成。

②MOSキャパシタ：使用したウェーハはCree社製m面n型基板(N濃度：5~10E18/cm<sup>3</sup>、厚さ：370~420 μm)の上にn型エピ(N濃度：1E16/cm<sup>3</sup>、厚さ：5.0 μm)を堆積したもの。その上にゲート酸化膜を堆積し、NO-POA実施。表面電極としてAl電極を蒸着。

③物理分析用サンプル：使用したウェーハはCree社製m面n型基板(N濃度：5~10E18/cm<sup>3</sup>、厚さ：370~420 μm)の上にn型エピ(N濃度：1E16/cm<sup>3</sup>、厚さ：5.0 μm)を堆積したもの。その上にゲート酸化膜をLP-CVD法で堆積し、NO-POA実施。NO-POAに用いた炉はファーンネス炉である。

表 2-2-1 m面 NO-POA 評価 実験水準表

SiO <sub>2</sub> 成膜法	サンプル	面方位	NO-POA			実施事項
			温度 (°C)	時間 (min)	膜厚 (nm)	
堆積膜 (LP-CVD)	A	m面	1300	30	75	①②③
	B	m面	1150	30	75	①②③
	C	m面	1000	30	75	①②③
	E	m面	1300	90	75	③
	F	Si面	1300	30	75	③
Dry O <sub>2</sub> 酸化	D	m面	-	-	75	③

### 2.3 MOSFET 特性

MOSFETのI-V特性を図2-3-1に示す。NO-POAを高温化することで電流駆動能力が向上している。NO-POA温度が上がるほど閾値が低下しているが、窒素のドナー化の影響はこれほど大きなものではなく、今回の実験では元のエピウェーハの濃度のばらつきが主な要因となっている。

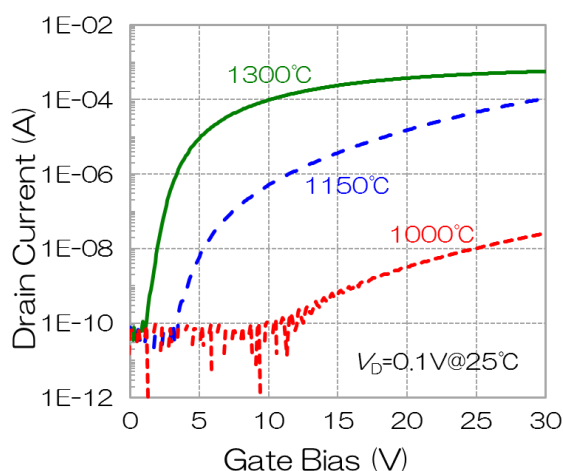


図 2-3-1 MOSFET Id-V<sub>g</sub> 特性

図 2-3-1 のデータより、式(2-3-1)を用いて実効移動度計算する。

$$\mu_{eff} = \frac{L}{W} \cdot \frac{g_d}{qN_s} \quad (2-2-1)$$

ここで、

$$qN_s = C_{ox}(V_G - V_{th}) \quad (2-2-2)$$

$$g_d = \frac{\partial I_D}{\partial V_D} \quad (2-2-3)$$

をデータより読み取り移動度を得る。計算結果を図 2-3-2 に示す。NO-POA 1000°Cの条件では電流駆動能力が低すぎ、移動度算出ができなかった。実験結果より素子毎に  $V_{th}$  が大きくことなっていたが、移動度は  $V_{th}$  依存性が大きいことから次に  $V_{th}$  補正を実施した。

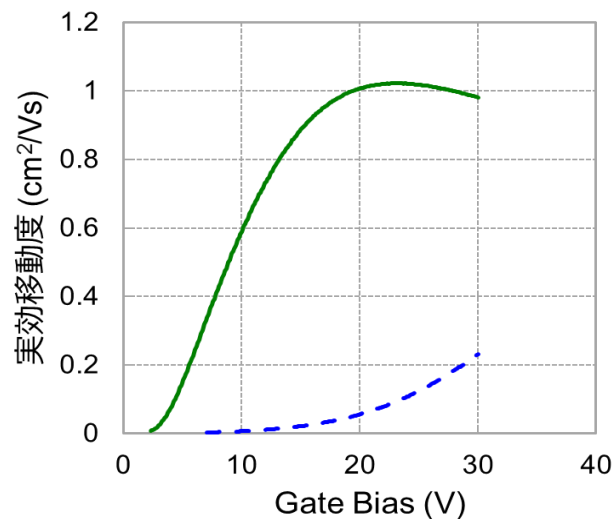


図 2-3-2 移動度のゲート電圧依存性

まず移動度は表面キャリア密度  $N_s=5E12cm^{-2}=(C_{ox}/q) \times (V_G-V_{th})$  で規定した (図 2-3-3)。これはデバイス動作点相当の表面キャリア密度である。次に 1150°Cの移動度に対しボディーP濃度補正を行った。分析により 1300°CのサンプルのボディーP 拡散層濃度は  $9.26E16cm^{-3}$ 、1150°Cサンプルは  $2.70E17cm^{-3}$  を得ていたため、朽木らにより報告されている m 面におけるボディーP-拡散層濃度と規格化実行移動度の関係から、1300°Cの時の移動度を 1 とした時の規格化移動度 0.57 を得た (図 2-3-4)。また図 2-3-1  $I_d-V_g$  カーブのサブスレッショルドスロープから  $D_{it}$  を算出し、1300°Cの時  $D_{it}=1.52E12(cm^{-2}eV^{-1})$ 、1150°Cの時  $D_{it}=6.08E12(cm^{-2}eV^{-1})$  を得た。以上の測定結果を表 2-3-1 にまとめる。これらの値は他の研究チームが報告しているm面 NO-POA(1150°C, 60min)の  $D_{it}=1.7E12$ ,  $\mu_{eff}=32$ ,  $@V_{th}=6.6v$  とおおよそ近い値であった<sup>2)</sup>。

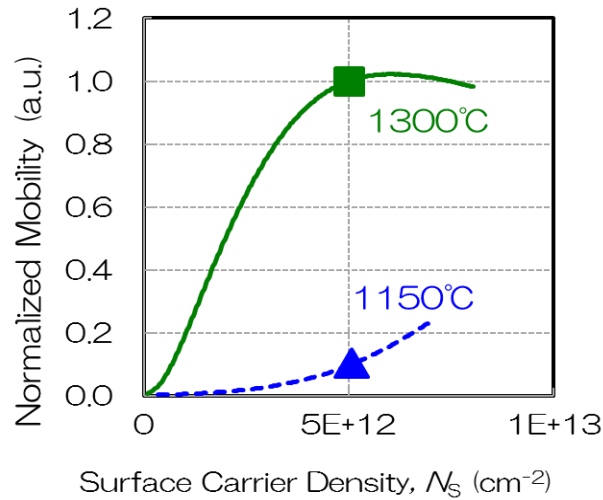


図 2-3-3 移動度の表面キャリア密度依存性

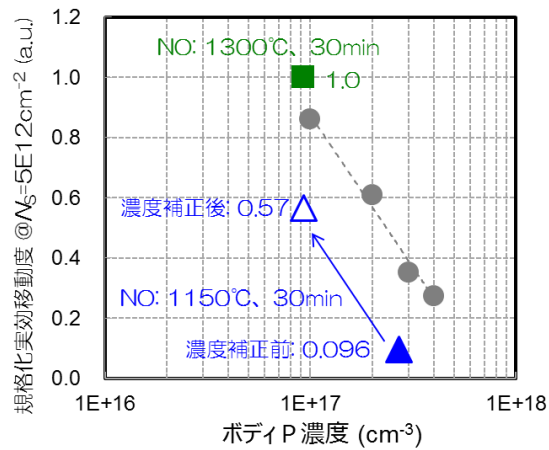


図 2-3-4 移動度のボディーP-拡散不純物濃度依存性

表 2-3-1 m 面 MOSFET 電気特性並びに移動度

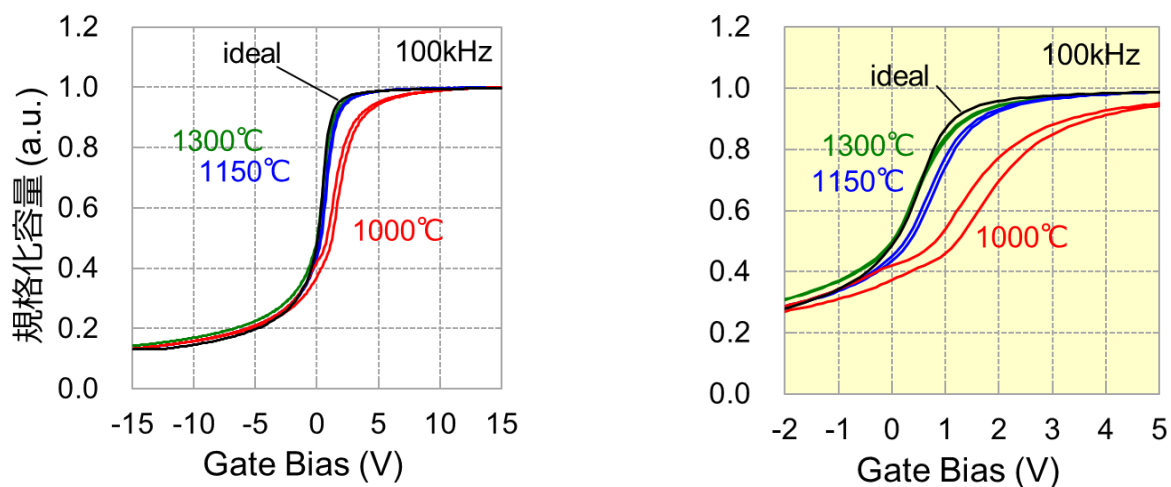
	$N_A$ (cm <sup>-3</sup> )	$V_{th}$ (V)	$D_{it}$ (cm <sup>-2</sup> eV <sup>-1</sup> )*	$\mu_{eff}@N_S=5E12cm^{-2}$	
1300°C	9.26E16	2.02	1.52E12	1.0	
1150°C	2.70E17	5.91	6.08E12	0.096	0.57 (閾値補正後)

## 2.4 MOS キャパシタ特性 (C-V ヒステリシス、 $V_{FB}$ 、 $\Delta V_{FB}$ 、 $D_{it}$ )

### 2.4.1 C-V 特性

3 水準の NO-POA サンプルの C-V 特性を測定した。測定波形を図 2-4-1 に示す。測定は室温、100KHz で行い、最大容量で規格化している。左図(1)はゲート電圧(±15V)の測定範囲全体を、右図(2)は反転電圧近傍のゲート電圧(-2~5V)を拡大したものである。1300°Cはほとんど理想 C-V に近い特製を示している。1150°Cもおおよそ理想曲線に近い特性を示すが、やや負の固定電荷持つ。1000°Cは界面の固定電荷、ヒステリシス共に大きく、デバイスに用いたとしても急峻なゲート反転特性が得られず、問

題になるレベルであり、MOSFET でほとんど電流が流れなかった結果を反映している。この傾向は他の Si 面や C 面で知られている傾向と一致する<sup>3-5)</sup>。m面も他面同様 NO-POA 条件が MOS 界面に与える影響が大きいことを確認した。



(1) 全測定ゲート電圧(±15V)範囲

(2) ゲート電圧(-2~5V)範囲拡大

図 2-4-1 C-V 特性測定結果

## 2.4.2 界面順位密度

C- $\psi_s$ 法<sup>6,7)</sup>を用いて、界面順位密度  $D_{it}$  を算出した。測定結果を図 2-4-2 に示す。その結果  $D_{it}$  は  $1000^\circ\text{C} > 1150^\circ\text{C} > 1300^\circ\text{C}$  と NO-POA 温度を上げることで減少し、高温で NO-POA を行う方が高い移動度を持つ良好なデバイス特性が得られることを裏付けた。

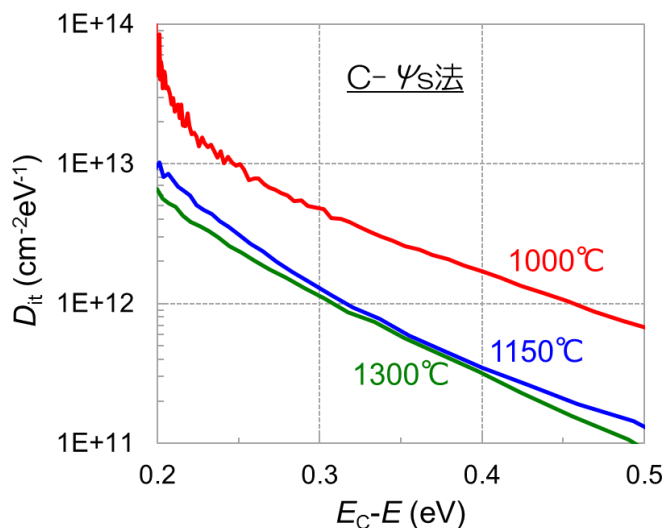


図 2-4-2 界面順位密度の NO-POA 条件依存性測定結果

2.3、2.4 で得られた MOSFET ならびに MOS キャパシタの電気特性の測定結果一覧を表 2-4-1 にまとめる。今回評価を行った NO-POA 温度  $1000^\circ\text{C} \sim 1300^\circ\text{C}$  の範囲では、 $1300^\circ\text{C}$  の時が全ての電気特性項



目でよい値が得られ、NO-POA 温度による特性改善効果が明らかとなった。

表 2-4-1 m 面 MOSFET 電気特性並びに移動度

試料		電気特性				
		CV測定				MOSFET
		CVヒス (mV)	V <sub>FB</sub> (V)	ΔV <sub>FB</sub>	D <sub>it</sub> (cm <sup>-2</sup> eV <sup>-1</sup> )	移動度
A	1300℃	48	0.92	0.11	6.1E+12	1
B	1150℃	95	1.2	0.4	1.0E+13	0.57
C	1000℃	390	2.6	1.8	6.4E+13	—
D	Dry酸化	266	-2.1	—	—	—
備考		±15V			C-ψs法 @0.2eV	相対値

## 2.5 MOS 界面物理分析

### 2.5.1 SIMS

SIMS とは Secondary Ion Mass Spectroscopy (2 次イオン質量分析) の略称。原理は一次イオンを 100V ~20kV で加速して試料に照射し、原子または分子を放出させ、そのうちイオン化する一部の物質 (二次イオン) を加速して質量分析するもの。一次イオンとしては正のイオン化率が高い O<sup>2+</sup> や負のイオン化率が高い Cs<sup>+</sup> を使用する。主成分元素、高濃度成分の分析では、XC<sub>s</sub><sup>+</sup> イオンを検出する (本研究で利用)。特徴はほとんどの元素に対し、検出下限 1E16cm<sup>-3</sup> 以下の分析が可能であり、深さ方向分析や同位体測定が可能など、優れた特徴を持つ。今回対象とする窒素分析の場合、同一条件、同一タイミング計測のような相対定量性は数%台の優れた制度を持つが、絶対精度としては 15% から 20% 程度と考えられており、厳密な絶対定量精度を求める場合は、定量性の高い他の計測法などを常にリファレンスデータとして取り続けるなどのキャリブレーションが必要となる。今回は、高い相対比較能力と 20% 以下の絶対精度の前提でデータを解釈し議論を進める。

m 面に対し NO-POA 温度を変化させたサンプルの界面近傍の窒素量を、SIMS を用いて計測した。使用した装置は PHI 製四重極型 SIMS である。測定波形を図 2-5-1 に示す。縦軸に窒素の濃度 (/cm<sup>3</sup>)、横軸は窒素のピーク値を 0 に取りスパッタレートから換算した値を示している。ここには示されていないが、O, C, Si の分布より、窒素は全て界面に集中して存在していることを確認している。これは Si デバイス<sup>8)</sup> や 4H-SiC の Si 面でも見られた現象である<sup>9)</sup>。この結果より、高温処理ほど窒素の濃度は高くなり、半値幅は約 3.4nm である。また酸化膜側には界面窒素ピーク濃度の 10% 以下の最高濃度で、界面窒素面密度の 20% 前後の窒素が存在することが分かった。ここで酸化膜側の最高濃度とは、x 座標の -6nm の値でみられる窒素分布の変曲点より少し低い部分の窒素濃度のことを、また酸化膜中の窒素面密度とは -6nm 以下の部分に存在するトータルの窒素量を指している。この分布をみると、明らかに界面付近 (x=0 付近) に存在する急峻で高濃度な分布と、それとは異なる緩やかに酸化膜内部に広がる分布が重なって検出されている。NO-POA により界面と酸化膜の両方に異なる形で窒素が導入されたと考えられる。

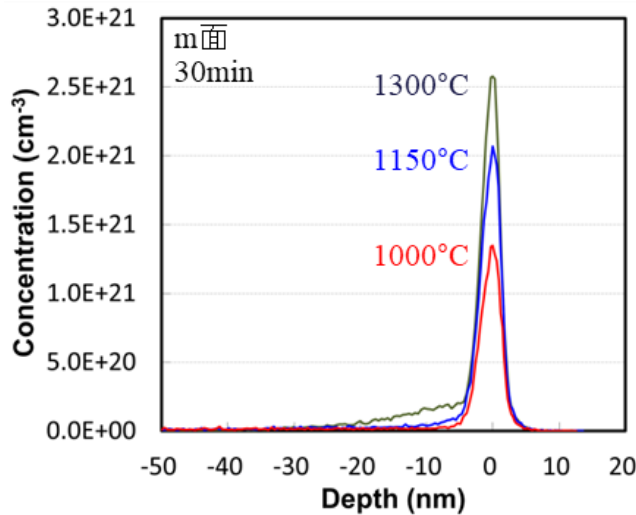


図 2-5-1 窒素分布の SIMS 測定結果(NO-POA 温度依存性)

次に m 面サンプルに NO-POA 1300°Cを 30min 適用したものと 90min 適用したもの、並びに Si 面サンプルに NO-POA 1300°Cを 30min 適用したものの窒素の SIMS 分析結果を図 2-5-2 に示す。まず m 面サンプル同士を比較すると、30min と 90min では分布はほとんど変わらず、この分布の  $x=\pm 6\text{nm}$  の範囲を積分した界面窒素面密度( $\text{cm}^2$ )は 30min で  $9.86\text{E}14/\text{cm}^2$ 、90min で  $9.70\text{E}14/\text{cm}^2$  とほとんど変わらないことが分かった。界面窒素量は飽和値を持ち、1300°Cの NO-POA では 30min でほぼ飽和している。次に Si 面のサンプルを m 面のサンプルを比較すると、同じ 30min の NO-POA を施したものの同士でも、Si 面では  $4.80\text{E}14/\text{cm}^2$  と m 面の 49%しか窒素が存在しないことが分かった。すなわち、界面に存在する高濃度の窒素は面方位によって異なっている。この面方位により異なる飽和値を持つことは Si 面、C 面、a 面では確認されていることで<sup>10)</sup>、今回 m 面でも同様の窒素挙動が確認された。SIMS で得られた窒素分布の界面窒素面密度、酸化膜窒素面密度、界面ピーク濃度、酸化膜ピーク濃度を表 2-5-1 に整理する。

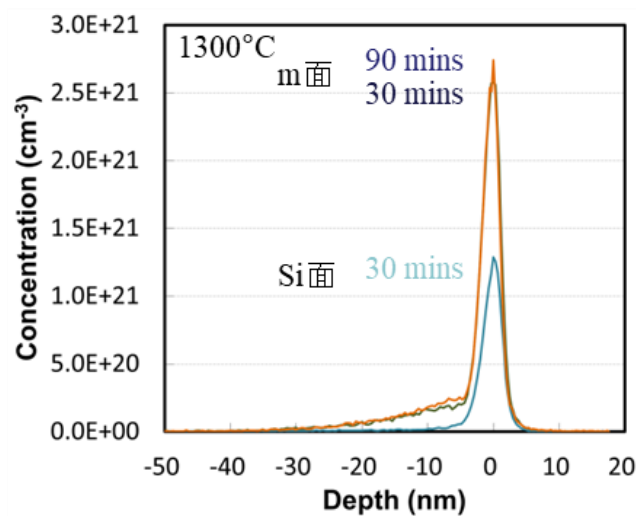


図 2-5-2 窒素分布の SIMS 測定結果(NO-POA 時間依存性、面方位依存性)

表 2-5-1 m 面 MOSFET 電気特性並びに移動度

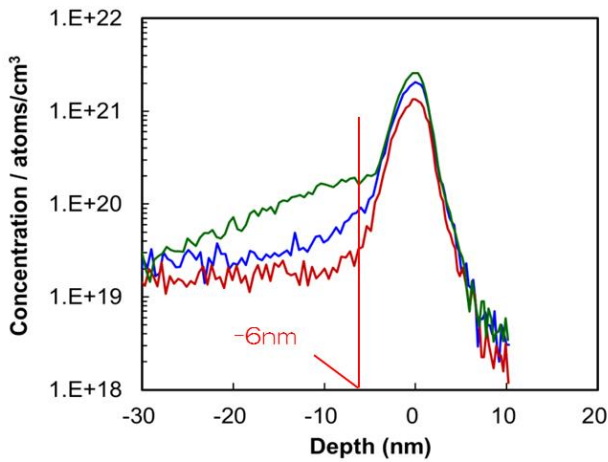
試料		物理分析					
		SIMS					
		界面窒素 面密度	酸化膜窒素 面密度	酸化膜/ 界面比	界面ピーク 濃度	酸化膜 ピーク 濃度	酸化膜/ 界面比
		(at/cm <sup>2</sup> )	(at/cm <sup>2</sup> )	(%)	(at/cm <sup>3</sup> )	(at/cm <sup>3</sup> )	(%)
A	1300°C	9.86E+14	2.31E+14	23	2.58E+21	1.82E+20	7
B	1150°C	8.13E+14	1.25E+14	15	2.07E+21	8.08E+19	4
C	1000°C	5.34E+14	9.54E+13	18	1.35E+21	3.45E+19	3
E	90min	9.70E+14	—	—	2.72E+21	—	—
F	Si面	4.80E+14	—	—	1.27E+21	—	—
D	Dry酸化	検出限界以下	検出限界以下		検出限界以下	検出限界以下	
備考		±6nm	-50~-10nm			@-6nm	

Si 面の界面窒素面密度は、Si 面の表面に存在する Si 原子の面密度の約 1/3 程度であることが報告されている。今回の実験で得られた界面窒素面密度と界面 Si 面密度の計算値を表 2-5-2 に示す。Si 面は Si 面密度の 39% であり、過去文献値の約 1/3 というものと類似の数値であった<sup>11)</sup>。m 面における窒素数は飽和値の場合、1.50~1.52 倍となっている。この値は今回初めて報告される値である。

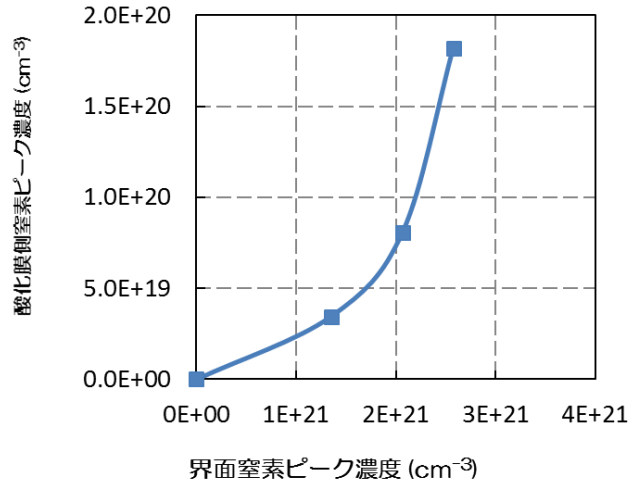
表 2-5-2 m 面、Si 面の窒素面密度 SIMS 計測値と Si 面密度計算値比較

試料		物理分析		
		SIMS		
		界面窒素 面密度 実測値	界面Si 面密度 計算値	実測値/ 計算値
		(at/cm <sup>2</sup> )	(at/cm <sup>2</sup> )	
A	1300°C	9.86E+14	6.47E+14	1.52
B	1150°C	8.13E+14		1.26
C	1000°C	5.34E+14		0.83
E	90min	9.70E+14		1.50
F	Si面	4.80E+14	1.22E+15	0.39
D	Dry酸化	検出限界以下		
備考		±6nm		

図 2-5-3 に表 2-5-1 にみられる(1)酸化膜ピーク濃度の計測ポイントと(2)界面ピーク濃度との関係を示す。酸化膜側のピークは  $x=6\text{nm}$  の値と定義した。界面ピーク値と酸化膜ピークの値には強い相関がある。界面窒素の一部が酸素と結合するか、元々酸素と結合していた窒素がそのまま酸化膜に移行していると考えられるが、その関連性については、今回考察は行っていない。



(1) 酸化膜窒素ピーク濃度定義位置



(2) 界面窒素ピーク濃度と酸化膜窒素ピーク濃度相関

図 2-5-3 界面窒素ピーク濃度と酸化膜窒素ピーク濃度の関係

## 2.5.2 CL

CLとは Cathode Luminescence (カソードルミネッセンス) の略称。測定原理は試料に数 keV の電子線を照射し、価電子帯の電子を伝導帯に励起する(電子-正孔対生成)。電子が伝導帯から価電子帯に戻る途中にバンドギャップ内にある準位にトラップされ電子-正孔が再結合するとき放出される電磁波(主に可視光)を検出するもので、そのトラップ準位が不純物、格子欠陥等何に起因するものかを判定することで、材料の状態を知ることができる。特徴は装置感度向上により、適用範囲が直接遷移半導体だけでなく、間接遷移半導体や絶縁体に拡大している。今回は CL により酸素欠損と非架橋酸素量を計測した。使用装置は、堀場製作所製 HR-320 検出器。計測結果を図 2-5-4 に、酸素欠損と非架橋酸素ピークの読み取り強度を表 2-5-3 に示す。なお CL では SiC 基板と酸化膜の発光のスペクトラムが重なり解釈が困難なため、Si 基板を用いて評価している。電子線エネルギーは 2keV、電子侵入長は約 100nm で、酸化膜全体を計測している。NO-POA 1000℃の条件は非架橋酸素多く、堆積膜のガスから供給された原材料の架橋反応が十分進んでおらず、アニール不足であることが分かった。NO-POA 温度を 1150℃から 1300℃へと上げていくことで非架橋酸素が減少し酸素欠損が増加している。高温 NO-POA による酸素欠損起因のホールトラップ増加の指摘があり<sup>9,12)</sup>、その懸念を裏付ける結果となった。

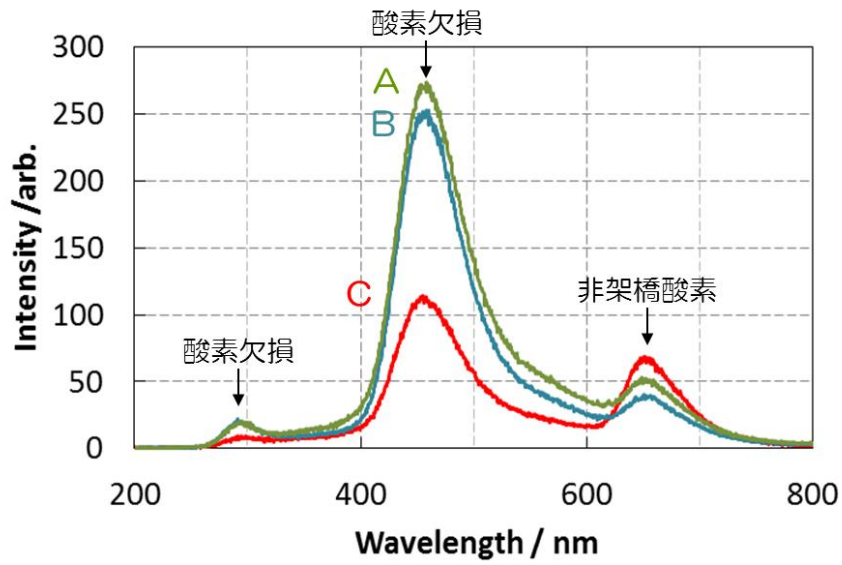


図 2-5-4 酸化膜 CL 分析

表 2-5-3 酸素欠損、非架橋酸素ピークの NO-POA 条件依存性

試料		物理分析	
		CL	
		酸素欠損 ピーク高さ (arb.)	非架橋酸素 ピーク高さ (arb.)
A	1300℃	273	52.1
B	1150℃	253	40.4
C	1000℃	114	68.4
E	90min	—	—
F	Si面	—	—
D	Dry酸化	—	—
備考		全厚	全厚

### 2.5.3 FT-IR

FT-IR とは Fourier Transform Infrared Spectroscopy (フーリエ変換赤外吸収分光) の略称。測定原理は以下の通りである。白色の赤外光を試料に照射すると、特定の赤外光が原子間の結合に吸収され振動する(双極子モーメントが変化する振動のみ赤外活性)。全波長域の赤外光を一括でマイケルソン干渉計に入れ、移動鏡を動かしながら赤外線強度を測定し、光路差に対する赤外線強度をフーリエ変換することで波数に対する赤外線透過率を取得するものである。この計測法の特徴は、フーリエ変換の採用により分散型に比べ波数分解能が向上し、S/N 向上する。

FT-IR を用いて、酸化膜界面近傍の歪を測定した<sup>13)</sup>。使用した装置は、Bio-Rad Digilab 製 FTS-55A で ATR 法を用いた。酸化膜を表面から界面近傍までエッチングし、歪値を測定している。測定結果を図 2-5-5 に、TO モードピーク位置の読み取り値を表 2-5-4 に示す。その結果、界面から 5nm 以内に歪が見られ、アニールの高温化により歪が緩和することが分かった。また酸化膜厚 0.5nm の位置(ほぼ結晶との界面)の値より、同じ 1300°Cでも Dry 酸化(D)より NO-POA(A)の方が歪が少ないが、これは窒素導入により結晶格子定数の差が小さくなるためと考えられている<sup>14)</sup>。1000°C(C)では酸化膜内部深くまで歪があり、CL でも指摘されたアニール不足が原因であると考えられる。

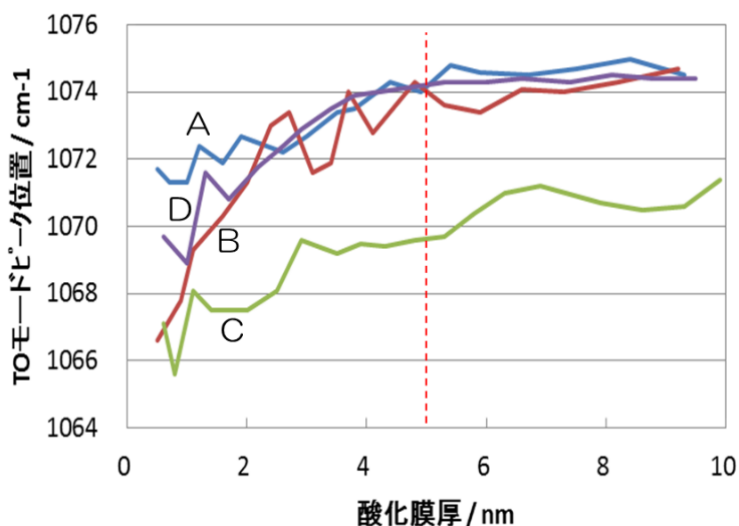


図 2-5-5 FT-IR 分析

表 2-5-4 FT-IR TO ピーク位置

試料		物理分析
		FT-IR (cm-1)
A	1300°C	1071.7
B	1150°C	1066.6
C	1000°C	1067.1
E	90min	—
F	Si面	—
D	Dry酸化	1069.7
備考		@0.5nm



## 2.6 窒素の結合、占有サイトの検証

### 2.6.1 HAXPAES

HAXPES とは Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy (高エネルギーX線光電子分光分析) の略称。その原理は、

- ・数～10keV の X 線を試料に照射
- ・光電子効果により放出された光電子の運動エネルギーを HAS(半球型)アナライザにより測定
- ・式(2-6-1)により運動エネルギーを結合エネルギーに換算

$$E_b = h\nu - E_k \quad (2-6-1)$$

して原子の結合エネルギーを計測する技術である。ここで、 $E_b$  は結合エネルギー、 $h\nu$  は入射 X 線のエネルギー、 $E_k$  は光電子の運動エネルギーである。今回この計測にあたっての高エネルギー X 線源として Spring-8 を利用した<sup>15)</sup>。この計測技術は、光電子の平均自由行程が 10nm 程度となる高エネルギーの X 線を照射することで表面から 10nm 下にある埋もれた界面の分析が可能となることや、特定元素の試料内での結合状態の分析が可能であり、絶縁物の測定が容易である、などの特徴を持つ。今回 HAXPES を用いた目的は酸化膜を残したまま、 $\text{SiO}_2/\text{SiC}$  界面に存在する N の結合状態をみることである。一般に原子の結合状態を観測するには類似の技術である XPS を用いることが多いが、その場合光電子の平均自由行程が 1nm 程度しかとれないため、酸化膜を除去し結晶側のみを計測することになる。今回は HAXPES と XPS のデータを比較することで、酸化膜有無による異なる結合の存在を確認することとした。使用したビームラインは SPring-8 BL47XU、入射 X 線：7.944 keV、光電子取出角： $89^\circ$ 、光電子分光器：VG-SCIENTA R-4000 の装置と条件で計測を行った。キャリブレーションは以下の手順で行った。1000°C のアニールサンプルの  $\text{Si}1s$  スペクトラムの  $\text{SiO}_2$  の値を文献値<sup>16)</sup>より 1840.6eV と定義し、他のスペクトラムもその補正に合わせて測定値をシフトする。その後、このサンプルで得られる  $\text{C}1s$  スペクトラムの  $\text{SiC}$  ピーク位置に全てのサンプルのピーク位置を合わせることで、エネルギーの絶対値を補正した。 $\text{N}1s$  スペクトラムの 397.8eV を  $\text{Si-N}$  結合と仮定したところ、全てのサンプルにこの結合エネルギーが観測された。測定結果を図 2-6-1 に示す。なお Dry 酸化サンプルからは  $\text{Si-N}$  は検出されなかった。

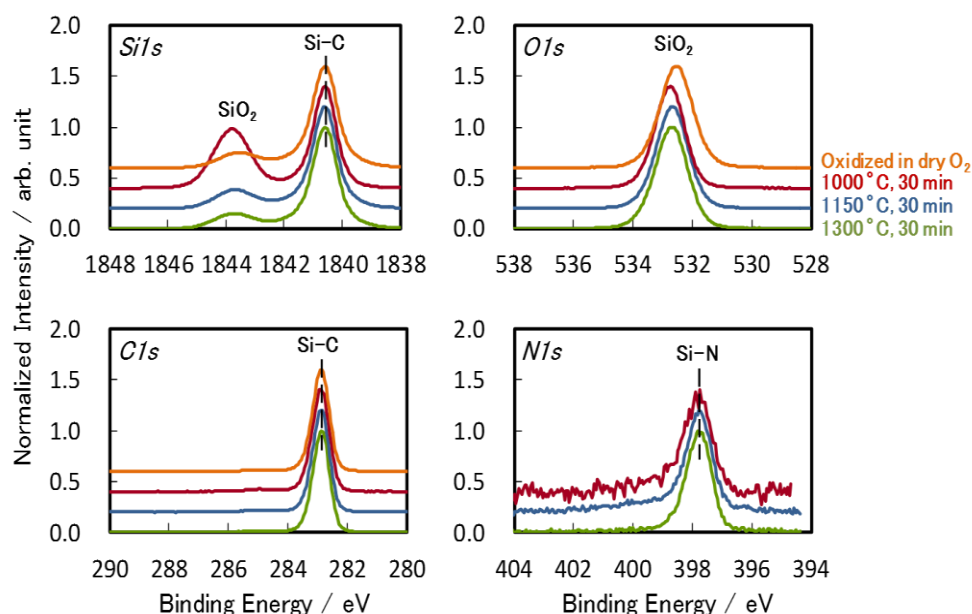


図 2-6-1 HAXPES 測定結果

ここでは各グラフにおいて、全てのサンプルのピーク高さを1と正規化している。397.8eVの結合エネルギーは窒素とSiの3配位の結合を示しているため、もともとの母材であるSiC、SiO<sub>2</sub>以外に存在する主たる結合はSi-N結合であることが分かった。さらに、Si-N結合の高エネルギー側に少しテールをひくことから、N1s スペクトラム波形のみを抜き出しSi-N(397.8eV)、Si<sub>2</sub>-N-O(398.3eV)、Si-N-O<sub>2</sub>又はC-N(399.4eV)<sup>17)</sup>の3つのガウシアン分布で波形分離を行ったところ、全てのサンプルからSi<sub>2</sub>-N-O、Si-N-O<sub>2</sub>又はC-N結合が存在する可能性がきらかとなった(図2-6-2)。また全ての温度でSi<sub>2</sub>-N-O結合の量はSi-N結合の約1割程度であることも分かった。Si-N-O<sub>2</sub>ピークはブロードであるため、他の結合状態が混在している可能性も高い。

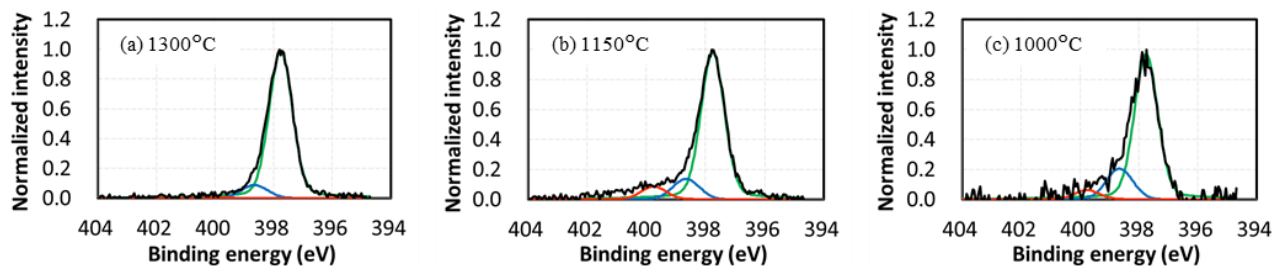


図 2-6-2 HAXPES N1s Si-N ピーク波形の Si<sub>2</sub>-N-O 結合、Si-N-O<sub>2</sub> or C-N 結合ピーク分離

## 2.6.2 XPS

XPSはHAXPESと同様X線を照射し、そこから発せられる光電子の運動エネルギーから原子の結合状態を観察する技術であるが、入射X線のエネルギーが低いことから光電子エネルギーも低く酸化膜が残ると光電子が吸収されてしまうため、酸化膜をHFで溶解除去して結晶界面(表面)を直接測定している。使用した装置はPHI-5500、X線源:MgK $\alpha$ 、取出角:45°で計測を行った。その結果、HAXPES同様Si-N結合が主要結合であることが分かった(図2-6-3)。Si-Nの波形はHAXPESとほとんど同一で、W/Eに溶けない結晶側界面にSi<sub>2</sub>-N-O結合、Si-N-O<sub>2</sub>又はC-N結合が存在すること分かった。

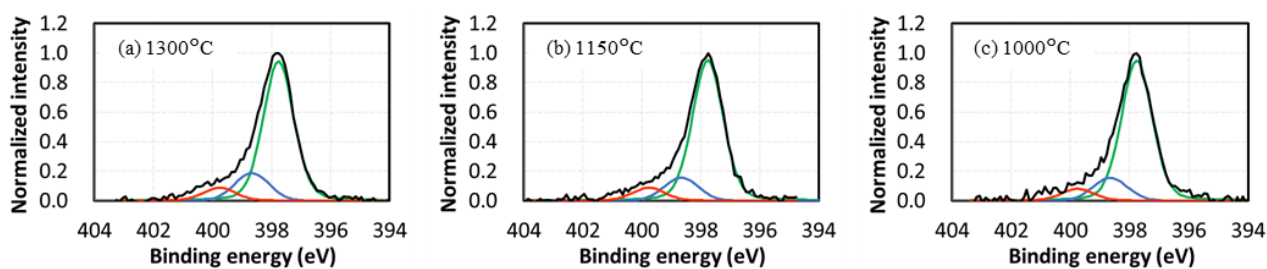


図 2-6-3 XPS N1s Si-N ピーク波形の Si<sub>2</sub>-N-O 結合、Si-N-O<sub>2</sub> or C-N 結合ピーク分離

## 2.6.3 XAFS

XAFSとはX-ray Absorption Fine Structure (X線吸収微細構造)の略称。測定原理は、試料にX線を照射し目的元素の吸収端付近のX線吸収係数( $\mu$ )を測定し、X線のエネルギー( $E$ )を掃引することで、 $E$ と $\mu$ の関係を取得する。そこから窒素の置換サイトや窒素の結合状態を知るものである<sup>18)</sup>。特徴としては、蛍光法、電子収量法の適用により、薄膜試料の測定も可能となる。しかし一般的なスペクト

ル解釈法がないため、本研究では、第一原理計算スペクトルと比較することにより結合状態を推定した。X線源として「あいちSR」を利用し、全電子収量法を適用した。第一原理計算により求めたX線吸収波形と、計測波形を図2-6-4に示す。測定波形を第一原理計算で求めたシミュレーション波形と比較して確認できたことは、

- ・415eV以下のN吸収端スペクトルはSiCのCのNへの置換やSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>のスペクトルに類似している
- ・SiCのSiのNへの置換やSiCの格子間Nは認められなかった

ということである。すなわちSiC結晶側にSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>またはSiCのCからNへの置換が存在することが確認できた。この結果はHAXPESやXPSの結果をサポートするものである。なおNを含まないDでも415~435eVに上凸あり、窒素吸収端スペクトルにもCのXAFS振動が現れていると考える。

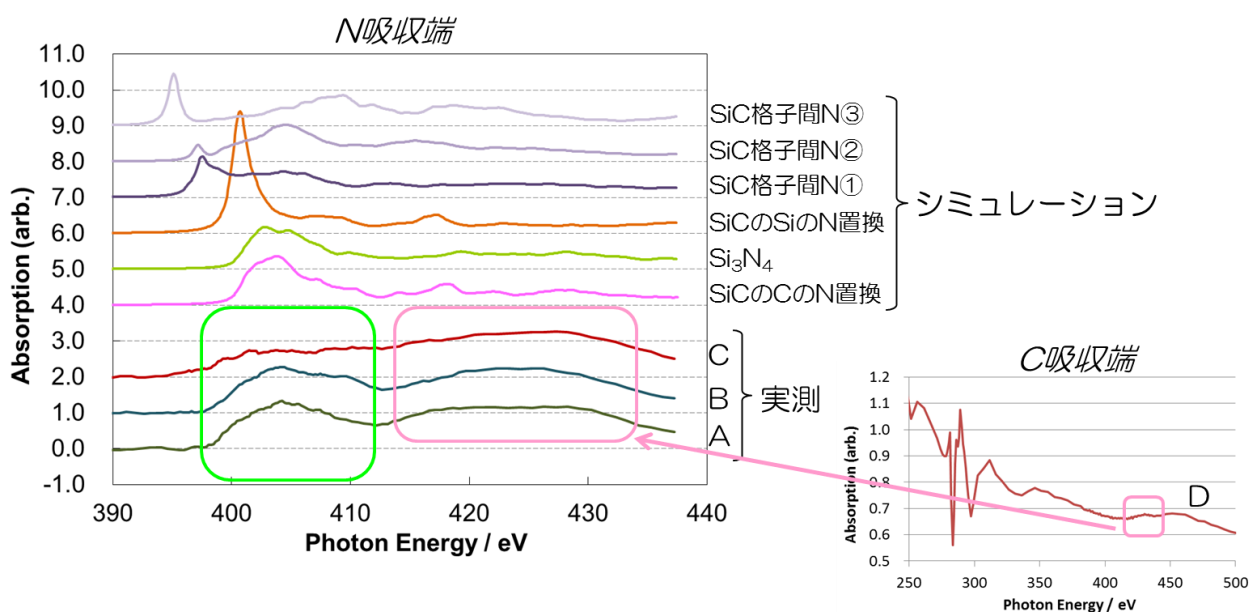


図 2-6-4 XAFS 測定結果

## 2.7 考察

分析結果と電気特性との間の以下の相関を確認した。

- ・界面窒素面密度は高い方が移動度高く、D<sub>it</sub>が下がり、C-V特性も全て良好である。
- ・これは過去に報告されているSi面, C面, Siの評価結果と同傾向である。
- ・窒素は界面にのみ多量に存在し多くはSi-N結合で、1割程度がSi<sub>2</sub>-N-O, Si-N-O<sub>2</sub>結合である。
- ・窒素は界面の炭素と置き換わっている。
- ・m面の界面窒素面密度は飽和値をもち、今回初めて9.8E+14/cm<sup>2</sup>程度と確認された。
- ・この量はm面の界面Si(C)面密度の約1.5倍であることも初めて確認された
- ・Si面の界面窒素面密度は4.80E14/cm<sup>2</sup>で界面炭素面密度の約0.4倍であった。
- ・堆積酸化膜に対し十分なアニール効果を出すためには1150°C以上は必要。
- ・NO-POA温度の高温化により酸化膜界面の歪が減少した。
- ・同じくNO-POA温度高温化により酸素欠損が増加し、ホールトラップ増加の懸念が確認された。

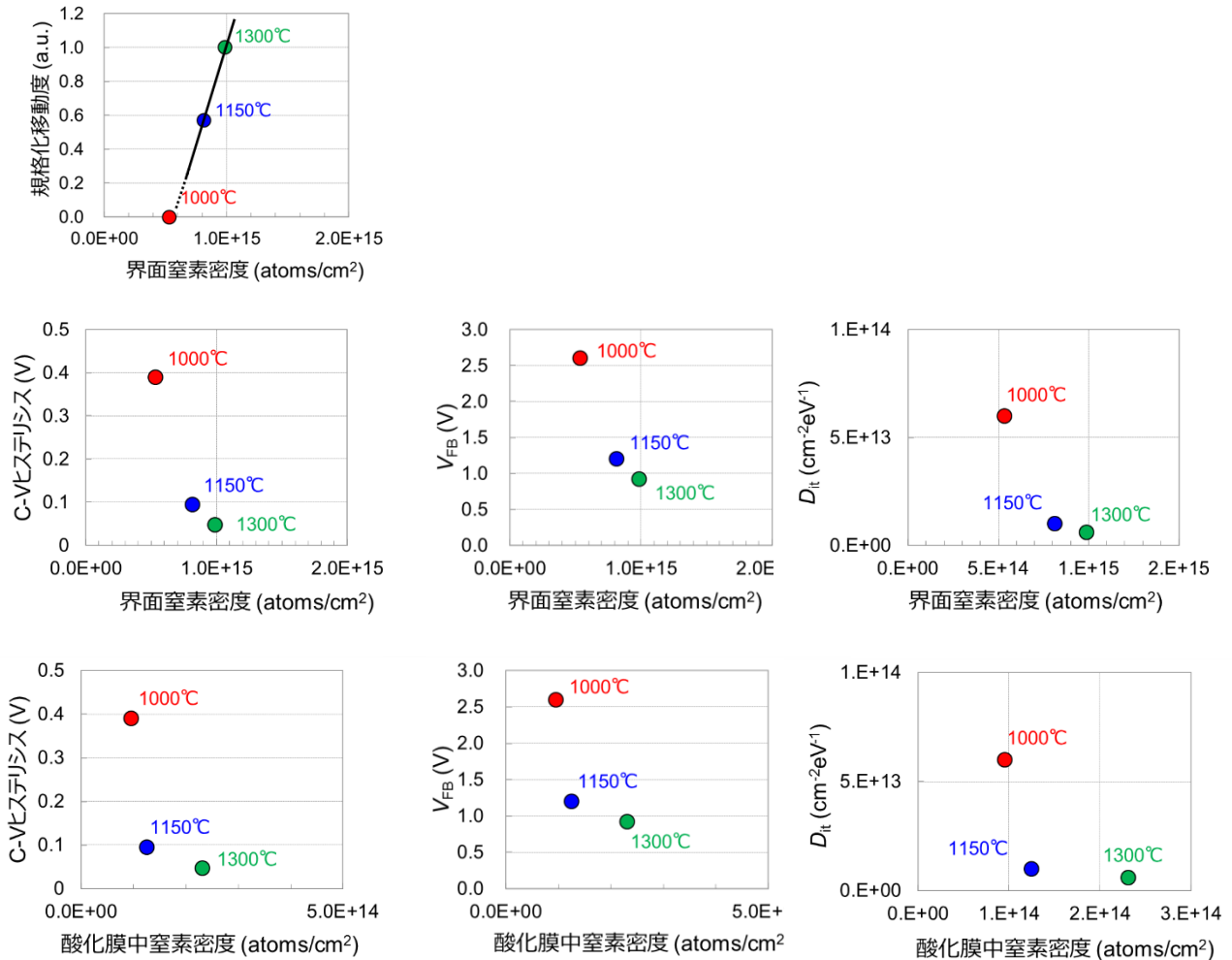
表2-7-1に第2章における測定結果の一覧を示す。

表 2-7-1 NO-POA 条件違いによる物理分析、電気特性測定結果一覧

試料	物理分析							電気特性					
	SIMS				CL		FT-IR	CV測定				MOSFET	
	界面窒素密度 (at/cm <sup>2</sup> )	酸化膜窒素密度 (at/cm <sup>2</sup> )	界面ピーク濃度 (at/cm <sup>3</sup> )	酸化膜ピーク濃度 (at/cm <sup>3</sup> )	酸素欠損ピーク高さ (arb.)	非架橋酸素ピーク高さ (arb.)	絶対値 (cm <sup>-1</sup> )	CVヒス (mV)	V <sub>FB</sub> (V)	ΔV <sub>FB</sub>	D <sub>it</sub> (cm <sup>-2</sup> eV <sup>-1</sup> )	移動度	
A	1300°C	9.86E+14	2.31E+14	2.58E+21	1.82E+20	273	52.1	1071.7	48	0.92	0.11	6.10E+12	1
B	1150°C	8.13E+14	1.25E+14	2.07E+21	8.08E+19	253	40.4	1066.6	95	1.2	0.4	1.00E+13	0.57
C	1000°C	5.34E+14	9.54E+13	1.35E+21	3.45E+19	114	68.4	1067.1	390	2.6	1.8	6.40E+13	—
E	90min	9.70E+14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F	Si面	4.80E+14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D	Dry酸化	検出限界以下	検出限界以下	検出限界以下	検出限界以下	—	—	1069.7	266	-2.1	—	—	—
備考		±6nm	-50~10nm			全厚	全厚	@0.5nm	±15V			C-ψs法 @0.2eV	相対値

以下に、物理分析結果と電気的特性の関係一覧を示す。

最も明確な関係がみられることは、界面窒素面密度は高い方が移動度高く良好な特性となることである。これは界面窒素面密度の増加により界面準位密度が低下し移動度が向上することによる。他の特性としては、酸素欠損と C-V ヒステリシス、V<sub>FB</sub>、D<sub>it</sub> との間に明確な相関がみられる。ただ酸素欠損が多いことでこのような結果につながるとは考え難く、それらの特性を向上させる NO-POA の高温化により酸素欠損が増加しているためである。このことは、今回評価できなかった前述のホールトラップ増加の可能性を示し、MOSFET 移動度向上と酸化膜閾値安定化とはトレードオフの関係にあることを示し、NO-POA の限界を指摘する意見<sup>3)</sup>と一致する結果となった。



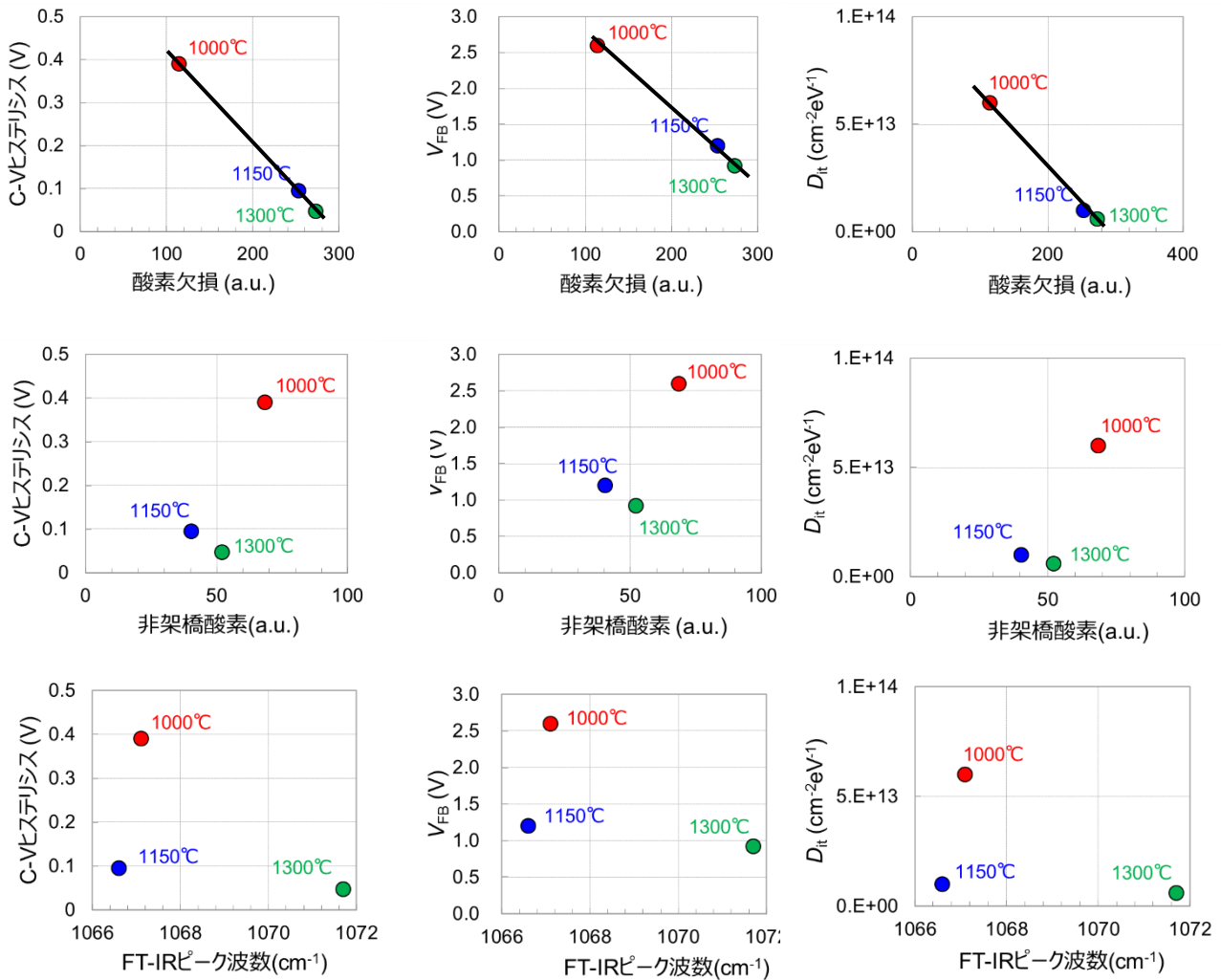


図 2-7-1 NO-POA をプロセスパラメータとして変化させることにより得られた MOS キャパシタ / MOSFET の電气的特性と MOS 界面並びに酸化膜内部の物理分析結果との相関一覧

以上の結果より、m 面においても他の Si 面、C 面、a 面などと同様に NO-POA の効果は確認でき、1300°C の高温 NO-POA により MOS 界面特性は改善されることが分かった。ただ NO-POA による界面窒素面密度には飽和値がある為、窒素面密度増加による移動度の向上検討自体が困難であることが分かった。またその飽和値は m 面特有のものであった。Si 面や C 面でも界面窒素が飽和することは知られているが、その飽和のメカニズムは明らかになっていない。界面窒素量を増やすことで MOS 特性の一層の特性向上の可能性は残るが、NO-POA による窒素密度飽和のメカニズムを明らかにすることなしにはこれ以上の特性向上は困難であることが分かった。

当研究では第 3 章以降で、m 面における窒素飽和のメカニズムを考察するものとする。

## 2.8 参考文献

- 1) Katsuhiro Kutsuki, Sachiko Kawaji, Yukihiro Watanabe, Masatoshi Tsujimura, Toru Onishi, Hirokazu Fujiwara, Kensaku Yamamoto, Takashi Kanemura, "Impact of Al Doping Concentration at Channel Region on Mobility and Threshold Voltage Instability in 4H-SiC Trench N-MOSFETs", Materials Science Forum, Volume 858, pp. 607-610 (2016)
- 2) Hiroshi Yano, Hiroshi Nakao, Hidenori Mikami, Tomoaki Hatayama, Yukiharu Uraoka, and Takashi Fuyuki, "Anomalously anisotropic channel mobility on trench sidewalls in 4 H - Si C trench-gate metal-oxide-semiconductor field-effect transistors fabricated on 8° off substrates", APPLIED PHYSICS LETTERS 90, 042102 (2007)
- 3) John Rozen, Xingguang Zhu, A.C.Ahyi, J.R.Williams and L.C.Feldman, "The Limits of post oxidation Annealing in NO", Materials Science Forum, Vols.645-648 (2010), PP 693-696
- 4) John Rozen, "Tailoring Oxide/Silicon Carbide Interfaces: NO Annealing and Beyond", Physics and Technology of Silicon Carbide Devices, book edited by Yasuto Hijikata, ISBN 978-953-51-0917-4, Published: October 16, 2012 under CC BY 3.0 license.
- 5) Yuichiro Nanen, Muneharu Kato, Jun Suda, and Tsunenobu Kimoto, "Effects of Nitridation on 4H-SiC MOSFETs Fabricated on Various Crystal Faces", IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 60, NO. 3, MARCH 2013, pp. 1260-1262
- 6) Hironori Yoshioka (吉岡裕典), Junji Senzaki (先崎純寿), Atsushi Shimosato (下里淳), Yasunori Tanaka (田中保宣), and Hajime Okumura (奥村元), "Effects of interface state density on 4H-SiC n-channel field-effect mobility", Applied Physics Letters 104, 083516 (2014)
- 7) Hironori Yoshioka, Takashi Nakamura, and Tsunenobu Kimoto, "Accurate evaluation of interface state density in SiC metal-oxide-semiconductor structures using surface potential based on depletion capacitance", Journal of Applied Physics 111, 014502 (2012)
- 8) Z. - Q. Yao, H. B. Harrison, S. Dimitrijevic, D. Sweatman, and Y. T. Yeow, "High quality ultrathin dielectric films grown on silicon in a nitric oxide ambient", Appl. Phys. Lett. 64 (26), 27 June 1994
- 9) John Rozen, Sarit Dhar, M. E. Zvanut, J. R. Williams, and L. C. Feldman, "Density of interface states, electron traps, and hole traps as a function of the nitrogen density in SiO<sub>2</sub> on SiC", JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 105, 124506 (2009)
- 10) S. Dhar, L. C. Feldman, K.-C. Chang, Y. Cao, L. M. Porter, J. Bentley, and J. R. Williams, "Nitridation anisotropy in SiO<sub>2</sub>/4 H - SiC", JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 97, 074902 (2005)
- 11) G. Pennington and C. R. Ashman, "Nitrogen passivation of (0001) 4 H - Si C silicon-face dangling bonds", APPLIED PHYSICS LETTERS 91, 072106 (2007)
- 12) V. Afanas'ev and A. Stesmans, "Hole traps in oxide layers thermally grown on SiC", Appl. Phys. Lett. 69 (15), 7 October 1996
- 13) Hirohisa Hirai and Koji Kita, "Structural difference between near interface oxides grown on Si and C faces of 4H-SiC characterized by infrared spectroscopy", APPLIED PHYSICS LETTERS 103, 132106 (2013)
- 14) Xiuyan Li et al, Extended Abstract of the 2016 international Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), 2016, PP237-238
- 15) Spring-8 HP,  
[http://www.spring8.or.jp/ext/ja/iuss/html/text/11file/metal\\_mate\\_eval-5/watanabe.pdf](http://www.spring8.or.jp/ext/ja/iuss/html/text/11file/metal_mate_eval-5/watanabe.pdf)
- 16) Y. Xu, X. Zhu, H. D. Lee, C. Xu, S. M. Shubeita, A. C. Ahyi, Y. Sharma, J. R. Williams, W. Lu, S. Ceesay, B. R. Tuttle, A. Wan, S. T. Pantelides, T. Gustafsson, E. L. Garfunkel and L. C. Feldman, J.



Appl. Phys. 115, 033502 (2014), 10.1063/1.4861626

17) K. Y. Cheong, S. Dimitrijević, J. Han and H. B. Harrison, J. Appl. Phys. 93, 5682 (2003),  
10.1063/1.1555696

18) 株式会社東レリサーチセンター HP, [http://www.toray-research.co.jp/kinougenri/hyoumen/hyo\\_008.html](http://www.toray-research.co.jp/kinougenri/hyoumen/hyo_008.html)

## 第3章 NO-POAによる4H-SiC酸化膜界面への窒素導入過程の詳細解析

### 3.1 序章

第2章における評価を通じ、界面窒化層形成に対する基本的な課題があきらかとなった。パワーMOSFETの移動度と界面窒素量には明確な相関がある。すなわち移動度向上のための有効な手段として、NO-POAによる界面窒素量の増加は有効な手段であることが確認できたが、その窒素量は飽和値を持つことも確認できた。その界面窒素量の飽和値は面方位によって違いがある。今回対象としているm面に関して、その窒素の飽和量を決める要因がなにであるかは、まったく報告されていない。また他のSi面、C面、a面についても飽和値のおおよその値と窒素が界面に0.数nm厚さのモノレイヤー程度の幅で存在するであろうこと以外は、明確な指摘もみられない。第3章ではこれらの状況を鑑み、m面における界面窒素の飽和のメカニズムの解明のために、界面窒素の導入の詳細な検討を行うものとする。界面窒素の飽和値はそこに存在する窒素の濃度とその濃度の窒素が存在する領域の厚さによって決まる。すなわち、

$$\text{飽和値} = \text{窒化層厚} \times \text{最高窒素濃度}$$

と表すことができる。従って、窒化層の厚さを決める要因と、最高濃度を決める要因が明らかになれば、飽和値を知ることができるはずである。

第3章の目的はm面界面における窒素の「導入」「離脱」「飽和」の起源を知ることが目的に、NO-POAによるm面界面への「導入」と「離脱」の詳細な評価を行うものとする。3.2と3.3では界面への窒素の「導入」に対する評価を、3.4と3.5では窒素の「離脱」に対する評価を行う。「飽和」については第4章のなかで考察を行う。

### 3.2 NO-POA 窒素濃度／窒素面密度の結晶面方位依存性

まず初めに、m面、Si面、C面の各面方位のベアSiCのNO-POAによる窒化の基本特性を得る。それぞれの面方位を持つCree社製n型基板( $5 \sim 10E18/cm^3$ )上にn型エピタキシャル層( $1E16/cm^3$ ,  $5\mu m$ )を積んだ基板を、直接ファーネス炉で $1300^\circ C$ ,  $N_2$ 希釈の10%NOで30minと240minの2条件のNO-POAを行い、窒素量をSIMSにて計測した。測定結果を図3-2-1に示す。それぞれの面方位ごとに、横軸にSIMSのスパッタリングレートから換算した酸化膜厚(nm)、縦軸に窒素濃度( $/cm^3$ )を示す。またそれぞれの酸化膜厚と、界面の窒素ピーク値の $\pm 6nm$ の範囲の窒素積分値である窒素面密度( $/cm^2$ )を表3-2-1にまとめた。その結果、すべての面で界面にのみ高濃度の窒素層があり、面ごとに異なる窒素面密度の飽和値を持つこと、また酸化膜中に少量の窒素が存在することが分かった。第2章のLP-CVD酸化膜付きの実験において、m面とSi面ウェーハで異なる界面窒素面密度の飽和値を確認したがベアウェーハでも同様の傾向であり、さらにC面でも同様の飽和傾向と異なる飽和値があることが分かった。全ての面でNO-POA時間30minで窒素量はおおよそ飽和していた。m面、Si面それぞれ $9.05E14/cm^3$ 、 $4.47E14/cm^3$ であるがこれらは第2章の $9.86E14/cm^3$ 、 $4.80E14/cm^3$ と比べ両面共に10%弱少ない窒素量となった。SIMSの測定精度範囲内とも言えるが、理由は明確ではない。C面のデータの半値幅が広がっているが、これは他の面に比べて界面のラフネスが大きくなっているためである。図3-2-2は表3-2-1のデータを横軸時間、縦軸窒素面密度で示したものである。このグラフ中のNO酸化は表3-2-1にまとめた今回の実験結果で、NO-POAは第2章の表2-7-1のサンプルAとEである。飽和の状況が明確に見て取れる。酸化膜中の窒素は、今回のベアウェーハの窒化サンプルの方が酸化膜付きサンプルより2倍かそれ以上濃い濃度となっている。酸化膜中の窒素の状態について本研究では詳しい考察は行

っていないが、NO-POA の段階で界面に 1 割程度の窒素と酸素の結合が見られているが (2-6-1)、酸化膜中の窒素濃度のピークが界面窒素濃度のピークの 3~7%であったことから (表 2-5-1)、界面に生成した窒素-酸素結合の多くは NO-POA によって生成された酸化膜中に引き継がれて、そこから減衰が始まると考えている。

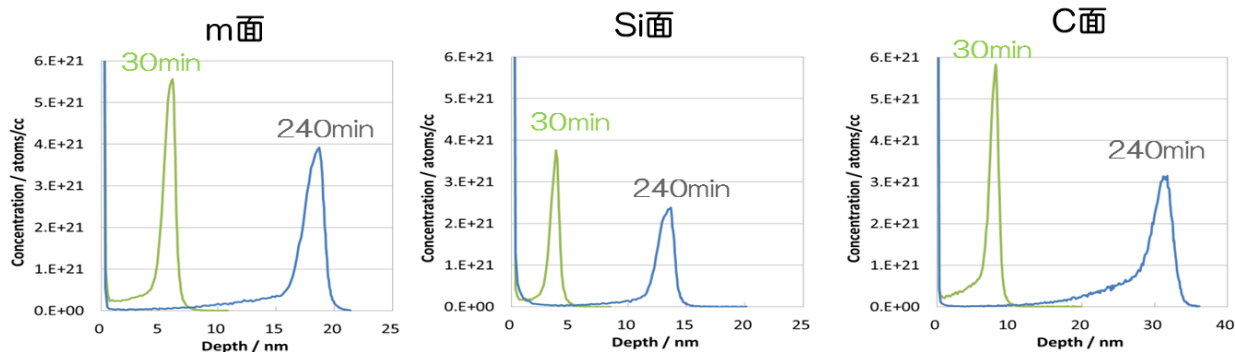


図 3-2-1 直接 NO アニールを行った SiC ベアウェーハの酸化膜界面の窒素 SIMS 測定結果

表 3-2-1 NO アニールウェーハの酸化膜厚及び窒素面密度

1300 °C	膜厚 (nm)		界面N面密度 (E14at/cm <sup>2</sup> )	
	30min	240min	30min	240min
m面	6.1	18.7	8.11	9.05
Si面	3.8	13.6	4.22	4.47
C面	8.1	31.5	10.4	10.7

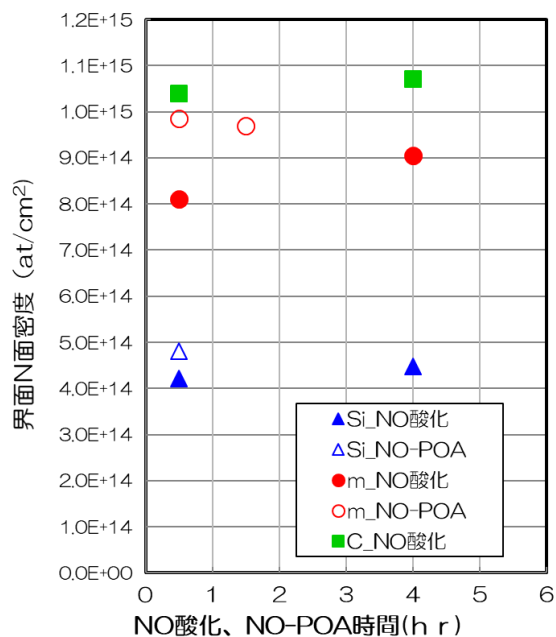


図 3-2-2 Si 面、C 面、m 面ベアウェーハの NO-POA 時間と界面窒素面密度の関係

### 3.3 SiC 界面への窒素導入初期過程

NO-POA における酸化膜が窒化に与える影響を知るために、SiO<sub>2</sub> 堆積膜有り と SiO<sub>2</sub> 堆積膜無し (ベアウェーハ) の 2 種類のサンプルに 1300°C の NO-POA を 7.5min から 90min まで時間を変えて実施し、界面窒素量を SIMS を用いて計測した。ここでは高速な昇降温の可能な RTA 炉を用いた。3.2 では堆積膜なしサンプルに対し 30min と 90min の NO-POA を施し飽和に対する傾向を確認したが、ここでは 7.5min, 15min, 30min, 90min の 4 水準の NO-POA 時間で実験を行った。この実験により、堆積膜の有無による窒化進展の違い以外に、堆積膜なしサンプルの短時間 NO-POA 実験より酸化初期の窒素導入過程についての検討が可能となる。図 3-3-1 に実験結果を示す。SiO<sub>2</sub> 堆積膜有りのサンプルでは、15min ではほぼ窒素面密度は飽和するが 7.5min の時点ではまだ飽和していないと思われる。厚い堆積酸化膜のせいで酸素ガス供給律速となり酸化レートが下がり同時に窒化も遅れていると考えられる。(この時の酸化量については、この 3.3 の最後の部分で少し考察を行う。) 一方、SiO<sub>2</sub> 堆積膜無しサンプルは、最短の 7.5min で既に窒素濃度は飽和しており、約 4nm の酸化の初期においても飽和値まで窒化が進行していることが確認できた。これらの結果より、酸化と窒化はほぼ同時に起きていると推測される。堆積酸化膜の有無で窒素面密度を比較した場合、堆積膜が有る場合のほうが、無い場合よりも界面窒素面密度が 1 割程度多いことが確認されたが、これは酸化が遅いことによって、酸化に続いて起こる窒化反応時に窒素の供給が律速されず確実に起こるからではないかと推測しているが、明らかではない。

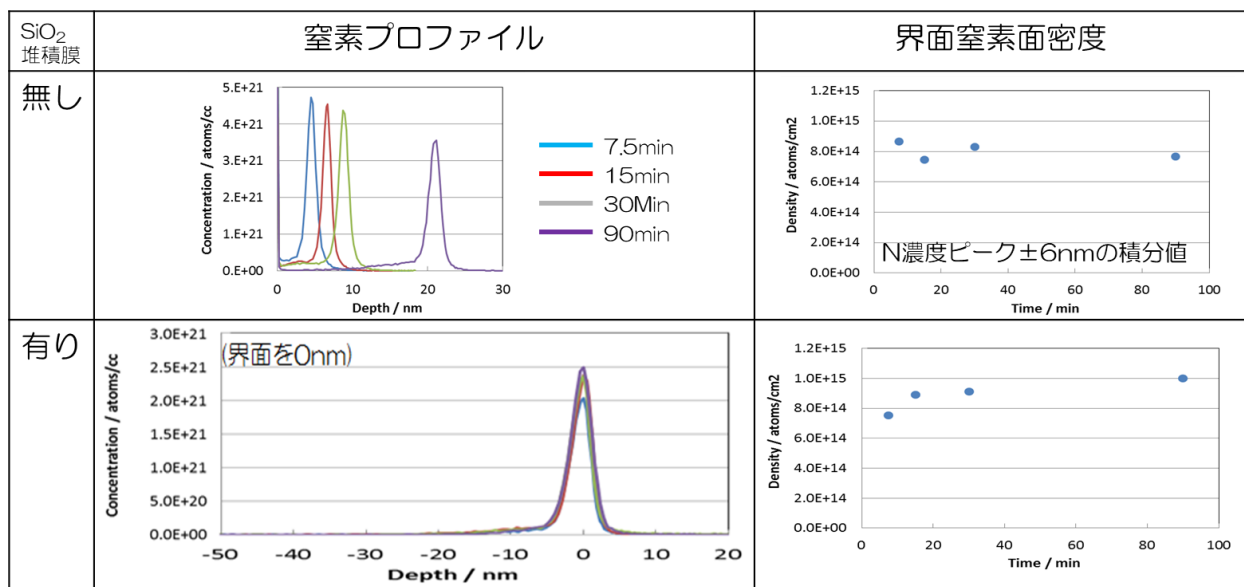
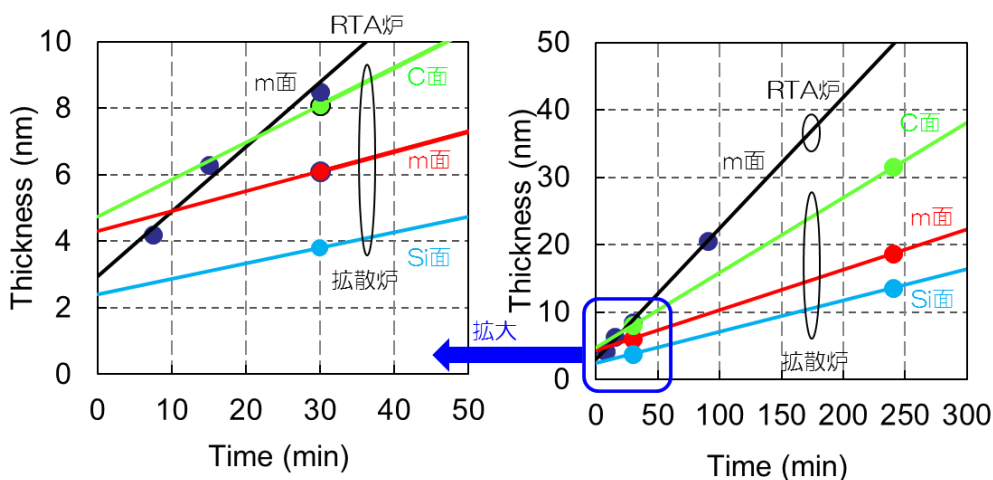


図 3-3-1 SiO<sub>2</sub> 堆積膜有無サンプルによる NO-POA 時間と界面窒素面密度の関係

m 面の酸化初期における酸化量と窒素飽和について少し考察を行う。3.2 と 3.3 の酸化膜無しサンプルの、NO-POA 時間と酸化膜厚を図 3-3-2 にプロットした。(2)の右図は 300min までの全体の酸化膜の増膜の結果を示し、(1)の左図は時間で 50min、酸化膜厚で 10nm までのところを拡大したものである。今回、3.2 の実験ではファーネスタイプの拡散炉、3.3 の実験では RTA 炉、と異なるタイプの炉を用いているため、ガスや温度の装置設定条件は同じ (N<sub>2</sub> 希釈 NO10%, 常圧, 1300°C) であるが酸化レートには大きな違いが現れた。これはガス流や炉の構造に起因するウェーハ反応面におけるガスの余熱状態や酸素ガス分圧が異なるなどの影響が考えられるが、当実験におけるその詳細については明らかではない。全ての実験条件に共通してみられることは外挿線が原点を通らないことで、約 2~5nm のオフ

セットと呼ばれる酸化時間 0min における酸化膜値が見られた。これは Si でも長く議論されてきたことであるが、初期の非常に短時間の間のみ酸化レートが上がり（増速酸化）その後一定の酸化レートをとるという現象で、SiC の Si 面、C 面でも確認されている現象である。この SiC における増速酸化のメカニズムは Hijikata らにより詳細に解析されており<sup>1)</sup>、酸化膜厚 1 $\mu\text{m}$  以上の領域で高い精度で一致する Deal-Grove 酸化モデル<sup>2-3)</sup>に、Si-C emission 反応を追加した改良モデルで説明出来るとしている。一方、Kikuchi らは酸化時に放出される、酸化レートを落とす効果のある CO の排出パスの変化に酸化レートの変化の原因があるとしている<sup>4)</sup>。詳細のメカニズムについては、他の研究者の議論を待つこととするが、今回の 4nm の酸化時点においてすでに窒素量が飽和に達しているということは興味深いことである。Deal-Grove 酸化モデルで提案されている反応律速やガス供給律速における安定的な酸化に遷移する以前の、SiC emission を伴う非常に高速に酸化反応が進む状態においても窒化は滞ることなく進行している。すなわち酸化と連続または連動して窒化反応が進むということが考えられる。このデータを用いて 3.3 前半で述べた SiO<sub>2</sub> 堆積膜有りのサンプルの酸化量を推測する。酸化膜厚が増加すると酸化レートが低下することは知られており<sup>1)</sup>、SiO<sub>2</sub> 堆積膜が 75nm の場合の正確な酸化レートは確認できていないが、その時の酸化レートが仮に比較実験でレートが遅かったファーンズ炉程度であったと仮定すると、図 3-3-2(2)より m 面の酸化レートはおおよそ 0.0625nm/min 程度であり、その時 7.5min の NO-POA による酸化量は  $0.0625 \times 7.5 = 0.469\text{nm}$  となる。m 面の面間隔は約 0.2664nm であるため 1.8 面間隔となり、この酸化量ではまだ窒素面密度は飽和していない。NO-POA を 15min 実施した場合の約 0.9375nm (3.5 面間隔) 程度酸化が進むことで界面窒素面密度は飽和する。これら一連の実験事実は窒化層形成時の窒素の導入の起源を考えるうえで、重要な情報であると考えられる。

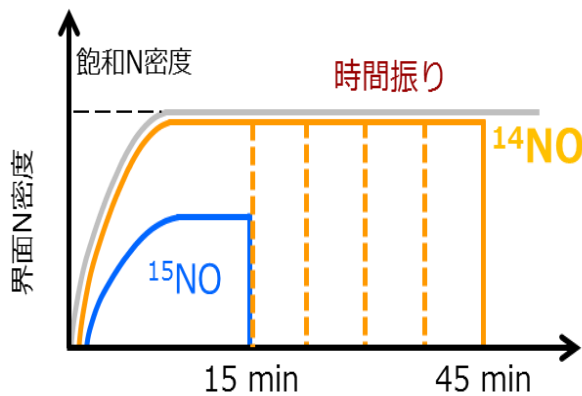


(1) NO-POA 時間 50min までの拡大データ (2) NO-POA 時間 240min までの全データ

図 3-3-2 SiO<sub>2</sub> 堆積膜無サンプルにおける NO-POA 時間と酸化膜厚の関係

### 3.4 導入済界面窒素の入れ替わり現象

3.2 並びに 3.3 では界面への窒素の導入課程、導入の起源を考察するための評価を行ったが、3.4 と 3.5 では窒素の離脱に対する実験と評価を行う。これまでの実験で、高濃度の窒素層は界面にしか存在せず、酸化界面の進行とともに位置が移動することが分かっている。界面に存在した窒素の大部分は Si と Si-N 結合により界面に安定に存在しているが、それが酸化進行に伴いどのように離脱し消失してゆくかを調べた。m 面の n 型エピタキシャル層付きベアウェーハを  $^{15}\text{NO}$ :0.64%、 $^{14}\text{NO}$ :4.36%、トータル NO:5% の混合ガスで 1300°C, 10min の NO-POA を行って十分界面に窒素を導入した後、 $^{14}\text{NO}$ , 1300°C で時間を変えて POA を行い  $^{15}\text{N}$  の減衰と移動を調べた。実験の NO-POA 時間と界面窒素面密度の時間遷移のイメージと RTA 炉ガスフロー条件を図 3-4-1 に示す。評価サンプルのトータル窒素量と  $^{15}\text{N}$  量を SIMS により求めた。



RTA炉ガスフロー条件		
	NO:N <sub>2</sub> 流量比	<sup>15</sup> NO: <sup>14</sup> NO流量比
共通処理	5 : 95	1 : 7
時間振り時	5 : 95	—

図 3-4-1  $^{15}\text{NO}$  を用いた界面窒素離脱実験イメージと RTA 炉ガスフロー条件

評価結果を図 3-4-2 に示す。左図の(1)は全窒素プロファイルを、右図の(2)は  $^{15}\text{N}$  プロファイルをそれぞれ示す。左図(1)より、界面の窒素は飽和しており、追加の NO-POA により界面は進行している。またこれまでの評価通り、界面窒素量はほぼ一定である。 $^{15}\text{N}$  が導入されたのは初期の窒化のみであるため、 $^{15}\text{N}$  は約 2nm の酸化が進んだ界面のみに存在する。それを 7.5min から 30min まで追加で NO-POA を行った時の  $^{15}\text{N}$  が右図(2)に示されている。当初  $^{15}\text{N}$  は約  $1\text{E}21/\text{cm}^3$  をピークとして界面に存在していたが、NO-POA による酸化進行に伴いその量を減らしながらも酸化膜界面の移動とともに、この実験の範囲の 3nm 程度に渡って SIMS の検出限界以上の値を保って前進している。今回の実験は 1300°C, 30min 以内で行われているため、窒素の熱拡散の可能性は低いと考えられるが、その可能性について確認しておく。

物質中の拡散現象はフィック第 2 法則で説明され、半導体中の不純物もこの法則に従うことが知られている。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3-4-1)$$

ここで C は濃度、D は拡散係数、t は時間、x は位置である。同濃度の界面進行は、

$$x = \text{SQR}(Dt) \quad (3-4-2)$$

で表される。1500°C における SiC 中の窒素の拡散係数を  $D = 10\text{E}-20\text{cm}^2/\text{s}^5$ 、 $t = 30\text{min} = 1800\text{s}$  とすると、



$$x = \text{SQR}(Dt) = \text{SQR}(10E-20 \text{ cm}^2/\text{s} * 1800\text{s}) = 0.13\text{nm} \quad (3-4-3)$$

となる。この結果から 1500°C、30min アニールの場合でさえ 拡散長は 0.13nm と一原子層程度の距離しか拡散しないことが分かり、1300°Cでは窒素はほぼ動かないと考えてよい。この実験より、界面の <sup>15</sup>N は酸化進行により一旦界面から離脱し、一部の <sup>15</sup>N はガスとして拡散し再反応に寄与したと考えられる。

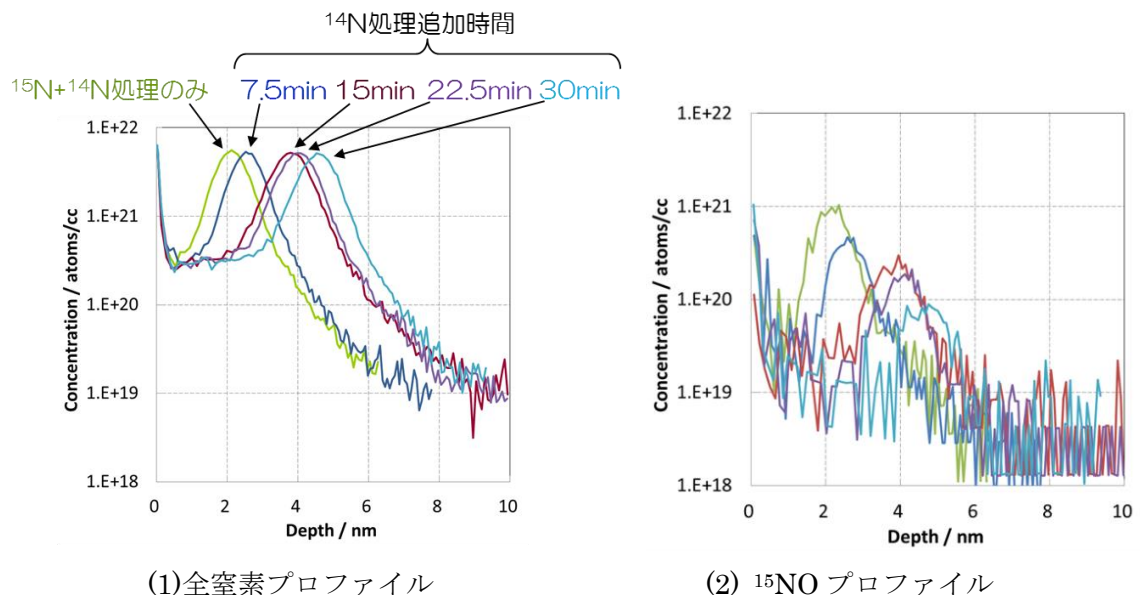


図 3-4-2 追加 NO-POA による界面 <sup>15</sup>N の離脱実験結果

この実験における、酸化膜厚、追酸化膜厚、全窒素面密度、界面 <sup>15</sup>N 面密度、<sup>15</sup>N の全窒素に対する比と <sup>15</sup>N の残存率を表 3-4-1 に示す。時間に対する窒素の残存率をプロットしたものが図 3-4-3 である。界面の <sup>15</sup>N は指数関数的に減少していることが分かる。グラフより求めた <sup>15</sup>N 残存率の近似式は

$$^{15}\text{N 残存率} = \exp(-0.87x) \quad (3-4-4)$$

で表される。例えば m 面の面間隔 0.2664nm では

$$^{15}\text{N 残存率} = \exp(-0.87 * 0.2664) = 79\% \quad (3-4-5)$$

となる。すなわち一面間隔の窒化進行したときに約 8 割の窒素が次の反応に寄与するということを意味する。一方、酸化レートが約 1nm/10min であることから 0.2664nm の酸化に必要な時間は 107 秒である。今回の実験結果は、この 107 秒間界面から離脱した窒素の 80%近い量が界面から 0.数 nm (数 Å) 以内にいることを示す。フィックの第 2 法則によると濃度勾配が存在しない系では当然濃度の変化は生じないわけであるが、その中の個々の原子ガスが移動しないことまでは規定していない。酸化膜や SiC 結晶内部における窒素ガスの移動に関わる係数が明確でないため詳細の議論は困難であるが、反応そのものに必要な時間が第一原理計算等により ps (ピコ秒) 単位であると考えられていることからすると、反応がおこる瞬間に反応基の直近に存在する必要がある、一度界面から離脱して自由に散逸可能な窒素ガスが 100 秒以上の間数 Å の領域にとどまり続けると考えることは不合理である。そこから類推される

ことは、窒素の離脱反応と次の窒化反応はほとんど同時に起こる、すなわちすでに Si と結合して界面に存在する窒素が離脱するとその直後に次の窒化が起こるということである。例えば、何かの反応がトリガーとなり、前の窒素が離脱して窒素原子ガスとなり、次の反応に備える。直後に次の窒素が入る場所の準備が整い、そこに窒素原子ガスがはまり込むというようなモデルである。窒化以外の反応としては、酸化しかありえないため、トリガーとなる反応は酸化反応であり、次の窒素がはまり込むための状態を作り出すのも酸化反応と推測される。

表 3-4-1 追加 NO-POA による界面  $^{15}\text{N}$  の離脱実験結果の読み取り値

追窒化時間 (min)	膜厚 (nm)	追酸化厚 (nm)	全界面N面密度 (atoms/cm <sup>2</sup> )	界面 $^{15}\text{N}$ 面密度 (atoms/cm <sup>2</sup> )	$^{15}\text{N}$ /全N	$^{15}\text{N}$ 残存率
0	1.93	0.00	6.65E14	1.11E14	0.167	1.000
7.5	2.40	0.47	6.23E14	5.06E13	0.081	0.488
15	3.61	1.68	7.40E14	3.57E13	0.048	0.290
22.5	3.82	1.89	7.19E14	2.41E13	0.034	0.201
30	4.40	2.47	6.92E14	1.21E13	0.017	0.105

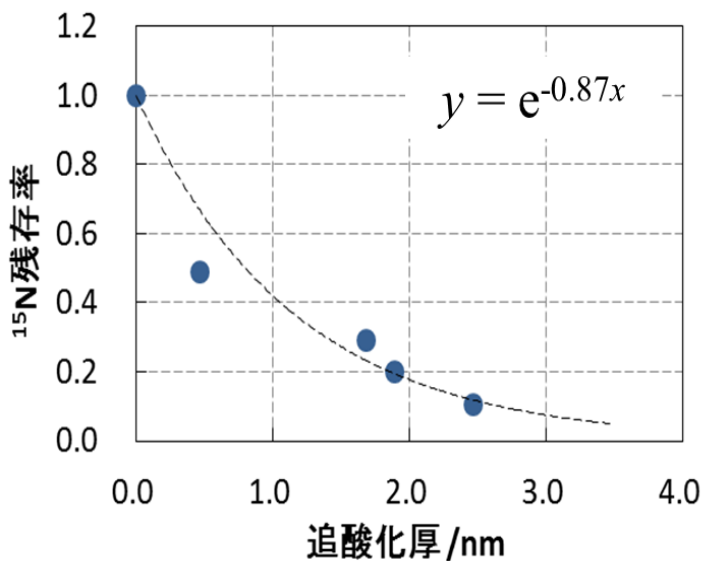


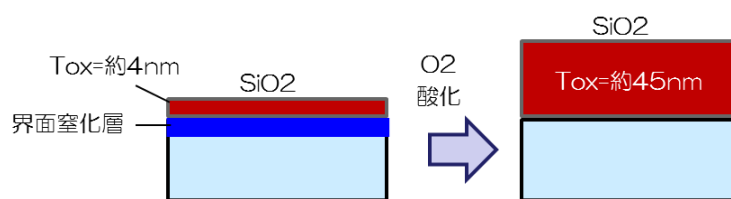
図 3-4-3 追加 NO-POA を行った時の界面  $^{15}\text{N}$  の残存率

### 3.5 導入済界面窒素の Dry 酸化による窒素離脱現象

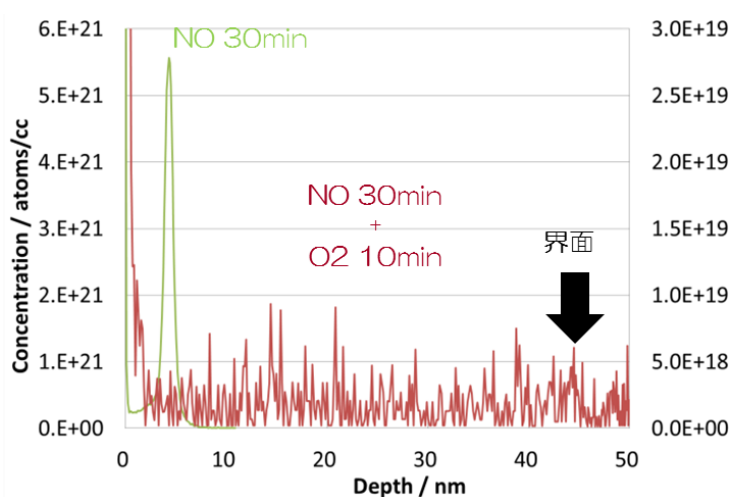
3.5 では界面窒化層を条件を変えて Dry 酸化した場合の窒素の残存量を測定し、窒素離脱について考察する。Dry 酸化の時間を変えて二種類の実験を行った。3.4 では NO-POA を追加で行ったため界面の窒素は維持されたが、今回の実験では追加の窒素が供給されないために、通常の  $^{14}\text{N}$  で初期の窒化を行いその残存量を SIMS で計測している。

#### 3.5.1 ベアウェーハ NO 酸化後の Dry 酸化

m 面の n 型エピタキシャル層付きベアウェーハを 10% の NO で 30min NO-POA を実施し約 4nm の酸化膜と飽和した窒化界面を形成する。そのウェーハを  $1300^{\circ}\text{C}$ , Dry  $\text{O}_2$  ( $\text{O}_2$  100%) で 10min 酸化し、SIMS により窒素量の分析を行った。実験の概要と、その Dry 酸化前後の SIMS 結果を図 3-5-1 に示す。実験の結果、酸化膜厚は NO-POA 後の 4nm の初期値から 45nm まで進行し、界面の窒素は全て離脱し酸化膜中にも窒素は観測されなかった。仮に式(3-4-4)が適用できたとして残存率を計算すると  $3.2\text{E}\cdot 16$  となり、初期値が  $5.5\text{E}21/\text{cm}^3$  であることから残存窒素は  $1.8\text{E}6/\text{cm}^3$  となる。この値は SIMS の測定限界以下となり、実験結果と矛盾しない。



(1) 実験概要



(2) Dry 酸化前後の SIMS 分析結果

図 3-5-1 ベアウェーハ NO-POA 後の Dry 酸化による窒素離脱

### 3.5.2 CVD 酸化膜 75nm 付ウェーハ NO-POA 後の Dry 酸化

3.5.1 で行った  $T_{ox}=4\text{nm}$  の薄い酸化膜越しに  $1300^\circ\text{C}$  で Dry 酸化を実施すると、酸化レートが速く酸化量のプロセス的な制御が難しくなるため、CVD 酸化膜を約  $73\text{nm}$  堆積させ、そのサンプルを  $850^\circ\text{C}$ 、 $950^\circ\text{C}$ 、 $1150^\circ\text{C}$ 、 $1300^\circ\text{C}$  で 100%  $\text{O}_2$ 、10min の Dry 酸化を行い、SIMS により窒素量の分析を行った。SIMS 測定結果を図 3-5-2 に、実験条件並びに酸化膜増膜値、界面窒素ピーク濃度及び界面窒素面密度を表 3-5-1 に示す。ここで酸化膜増膜値は SIMS の界面とピーク位置の差から読み取った。 $1300^\circ\text{C}$ 、10min は約  $24\text{nm}$  酸化進行し界面窒素は大幅に減少した。 $1150^\circ\text{C}$  では  $1\text{nm}$  程度と僅かではあるが酸化の進行があったと考えられ、ピーク窒素濃度も共に若干低下している。 $950^\circ\text{C}$  以下では酸化は進行していないと考えられ、窒素ピーク濃度ならびに界面窒素面密度もほとんど変化しなかった。これらの実験結果から、酸化したもののみ酸化量に応じて窒素が離脱したと考えられる。 $1150^\circ\text{C}$  と  $1300^\circ\text{C}$  の結果を 3.4 の実験式 (3-4-4) にあてはめ残存窒素面密度を見積もると、以下のような値が得られた。

$$N_{1150} = N_0 \exp(-0.87 \cdot x) = 8.57 \text{E}14 \exp(-0.87 \cdot 1) = 3.6 \text{E}14 \leq 6.17 \text{E}14$$

$$N_{1300} = N_0 \exp(-0.87 \cdot x) = 8.57 \text{E}14 \exp(-0.87 \cdot 24) = 7.3 \text{E}5 < 2.84 \text{E}13$$

ここでそれぞれ  $N_{1150}$  は  $1150^\circ\text{C}$  の、 $N_{1300}$  は  $1300^\circ\text{C}$  の残存窒素面密度である。 $1\text{nm}$  程度の酸化進行が見られた  $N_{1150}$  の場合は、この実験式を求めた時の酸化膜増膜範囲であったため、比較的良い一致が得られたが、外挿の条件である  $N_{1300}$  では大幅な乖離が見られ、計算値よりも 8 桁も多く残存していた。界面窒素の再反応については、もう少し幅広くデータをとって詳細に考察しなければそのメカニズムは明らかにできないと思われるが、今回はこれらのデータの範囲の検討とする。3.4 では NO-POA を行ったため界面には常に窒化層が維持され酸化レートが抑えられていたものが、今回の実験では Dry 酸化を行ったため窒素が減少し、そのことで酸化レートが速くなっている。3.4 の実験の  $1300^\circ\text{C}$  の NO-POA では  $30\text{min}$  で  $2.5\text{nm}$  の酸化進行であったが、この Dry 酸化実験では同じ  $1300^\circ\text{C}$  でも  $10\text{min}$  で  $24\text{nm}$  酸化が進行している。今回のような追酸化による界面窒素の減少は Dhar らにより報告されている<sup>6)</sup>。彼らの報告は Si 面、C 面、a 面に対して  $1000^\circ\text{C}$ 、 $15\text{min}$  と  $1100^\circ\text{C}$ 、 $15\text{min}$  で追酸化実験を行ったものであるが、高温であるほど窒素の減少量は多く、また酸化膜厚は報告されていないものの、酸化レートが速い C 面、a 面、Si 面の順に窒素が多く減少していた。酸化量が多いほど窒素が多く減少するということは、今回の研究の報告内容と一致する。

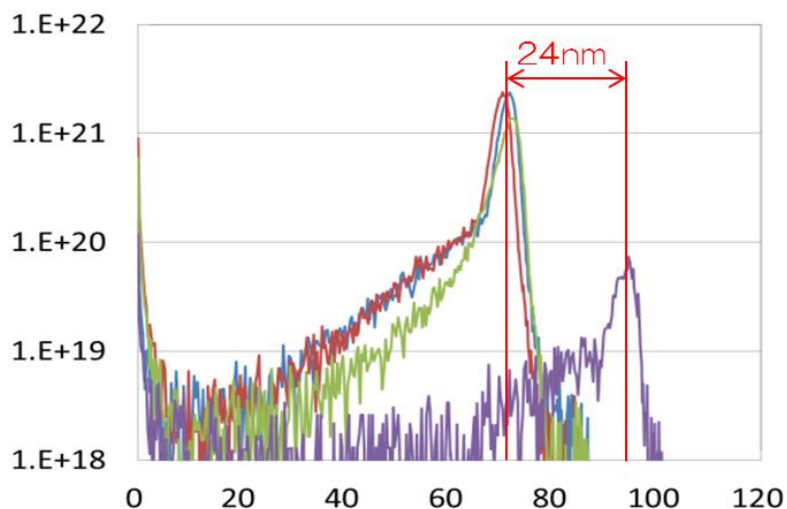


図 3-5-2 SiO<sub>2</sub> 堆積膜付きウェーハ NO-POA 後の Dry 酸化による窒素離脱

表 3-5-1 SiO<sub>2</sub> 堆積膜付きウェーハ NO-POA 後の Dry 酸化による増膜値、窒素濃度ピーク値及び界面窒素面密度

100% O <sub>2</sub> 10min	酸化膜増膜厚さ (nm)	窒素濃度ピーク値 (atoms/cm <sup>3</sup> )	界面窒素面密度 (atoms/cm <sup>2</sup> )
850°C	0	2.4E21	8.57E14
950°C	0	2.4E21	8.39E14
1150°C	1	1.4E21	6.17E14
1300°C	24	7.4E19	2.84E13

### 3.6 Si/SiO<sub>2</sub> および SiC/SiO<sub>2</sub> 界面の窒化と窒素離脱についての過去論文調査

ここまで内部の実験を中心に、4H-SiC m 面酸化膜界面における窒素導入並びに窒素離脱の評価と解析を行ってきた。次章でこれらの結果を用いて界面窒化モデルの提案を行うにあたり、Si および SiC の界面窒化及び窒素離脱に関する過去文献の情報を整理し、今回の結果と比較を行った上で SiC 界面窒化の結果に反映すべき点を考察することとする。Si/SiO<sub>2</sub> の界面窒化プロセスが SiC に対する界面窒化プロセス導入のヒントになっており、Si の微細デバイス開発のために非常に多く行われてきた Si/SiO<sub>2</sub> 界面窒化に関する研究の情報は重要である。

Saks らは Si/SiO<sub>2</sub> に対し 900°C, 100%, N<sub>2</sub>O で界面窒化層を形成できることを報告している<sup>7)</sup>。ただし、界面窒化後に Dry 酸化を行っても窒素は離脱せず、酸化膜界面は進行するが窒素は酸化膜中にそのまま残存するとしている。ただしその後 N<sub>2</sub>O 窒化を追加すると、界面に窒化層は復活するが酸化膜中の窒素は離脱し消失する。これらの一連の評価により N<sub>2</sub>O は N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO に分解しており、そのなかで Si の酸化は O<sub>2</sub> によってすすめられ、NO は Si+NO→Si-N+O 反応が進み Si 界面を窒化する。さらに N<sub>2</sub>O からできる O ガスが Si(O)N の N を消失させ SiO<sub>2</sub> を生成するとしている。一方、Gusey らは 700~1000°C で 60min, 12.5% の NO で Si/SiO<sub>2</sub> 界面を窒化した場合、界面は窒化するが酸化膜中の窒素は離脱しないとしている<sup>8)</sup>。また界面の窒化層は Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> であり一層毎に増膜しているはずであると説明している。また Chatty らは 4H-SiC の Si 面、3C-SiC と Si で包括的な N<sub>2</sub>O と O<sub>2</sub> を用いた窒化と酸化の組み合わせ実験を行い、界面と酸化膜中の窒素の挙動を調べている<sup>9)</sup>。そこでは Si は N<sub>2</sub>O により界面は窒化され、酸化によって界面は進行するがそれに続く 900°C, N<sub>2</sub>O 窒化でも酸化膜中の窒素は離脱せずそのまま維持されるとしている。酸化膜中の窒素の脱離に関して整理すると、900°C で 100%, N<sub>2</sub>O を用いた Saks らは離脱するのに、700~1000°C, 12.5%, NO を用いた Gusey らと 900°C, N<sub>2</sub>O を用いた Chatty らは離脱しないとしている。N<sub>2</sub>O は NO に分解するため N<sub>2</sub>O ガスの存在以外両者のガス成分はほとんど変わらない。Gusey らの実験は Saks らのものに比べて NO 分圧が低く、また Chatty らの N<sub>2</sub>O 濃度は記述がないが酸化膜中の窒素が離脱していないことから N<sub>2</sub>O 分圧が低かったことが予想される。酸化膜中の窒素の離脱は 900°C 付近では N<sub>2</sub>O(NO)分圧の影響を強く受けると考えられる。

Chatty らの一連の実験の中で SiC 酸化膜中の窒素の挙動を調べているが、SiC の場合 N<sub>2</sub>O で界面を窒化した後 1100°C の WetO<sub>2</sub> 酸化で界面窒素は全て離脱した。Chatty らは SiC の場合酸化膜中の窒素は炭素と結合を持つため酸化により炭素が分離して同時に窒素も消失するとしているが、我々の研究のなかでは窒素と炭素の結合は見られておらず、Saks の説通り NO 中の N が酸素を離脱させていると考えると結果は合理的に解釈できる。酸化膜中の反応自体は結晶側が Si でも SiC でも大きな違いはないため、SiC における反応を考える上で参考となる情報である。

表 3-6-1 に Si と SiC の界面窒化実験の過去論文の条件と結果を一覧に整理する<sup>7,9,10</sup>。これらを見て読み取れることは、界面の窒化は Si, SiC とともに NO または N<sub>2</sub>O によって進むこと、一般に「Si の窒化では～」、「SiC の窒化では～」と語られることが多いがそもそも Si は 1000℃以下、SiC は基本的に 1000℃以上とプロセスの温度帯に大きな違いがある。界面や酸化膜中の窒素の消失の有無はガス分圧、プロセス温度の影響が大きく、界面や酸化膜の窒素の挙動を考える場合に温度と分圧は考慮すべきであるが、基本的な反応そのものは Si プロセスの反応も SiC プロセスも類似であると考えられる。ただ、一点界面窒化において明確に異なる点は、Si の場合窒素は酸化膜側に存在し、SiC の場合窒素は SiC 結晶側に存在するという点である。

表 3-6-1 Si と SiC の界面窒化実験の過去論文整理

基板	ガス	温度	界面窒素	SiO <sub>2</sub> 内部窒素	考察	出典	著者
Si	NO		記述なし	変化なし	文中説明。詳細不明	JAP, 93, 4(2003)	K.McDonald
	N <sub>2</sub> O	900	窒化	変化なし	酸化膜10~15nm付き	JEM, Vol.28, No.3(1999)	K.Chatty, TP.Chow
	Pure N <sub>2</sub> O	900	窒化	消失	窒素消失予期しなかった	APL, 67(3),(1995)	N.S.Saks and D.I. Ma
	N <sub>2</sub> O	1000	窒化	消失	文中説明。N <sub>2</sub> O->N <sub>2</sub> (60%), O <sub>2</sub> (30%), NO(10%)。N <sub>2</sub> O酸化中に窒素は界面->SiO <sub>2</sub> 。N <sub>2</sub> OのO <sub>2</sub> による再酸化では窒素は界面から脱離しない。窒素ピークは酸化膜に残る	JAP, 93, 4(2003)	K.McDonald
	DryO <sub>2</sub>	900	酸化のみ	変化ない(膜中に窒素移動)	酸化膜10~15nm付き	JEM, Vol.28, No.3(1999)	K.Chatty, TP.Chow
SiC	NO	1300	窒化	消失	30min, 酸化膜75nm付き、中心条件	自実験	
	N <sub>2</sub> O	1100	窒化	消失	NOのO原子がN剥離	JEM, Vol.28, No.3(1999)	K.Chatty, TP.Chow
	DryO <sub>2</sub>	1000	消失	消失	酸化膜10~15nm付き	JEM, Vol.28, No.3(1999)	K.Chatty, TP.Chow
	DryO <sub>2</sub>	850-1150	変化なし	変化なし(元々窒素なし)	10min, 酸化膜75nm付き。時間短い為、酸素が界面にまで十分届かず	自実験	
	DryO <sub>2</sub>	1300	消失	消失	10min	自実験	
	DryO <sub>2</sub>	1300	消失	消失	酸化膜10~15nm付き	JEM, Vol.28, No.3(1999)	K.Chatty, TP.Chow
	WetO <sub>2</sub>	1100	消失	消失	酸化膜10~15nm付き	JEM, Vol.28, No.3(1999)	K.Chatty, TP.Chow
	WetO <sub>2</sub>	950-1000	減少(酸化)	減少(酸化)	酸化膜10~15nm付き	JEM, Vol.28, No.3(1999)	K.Chatty, TP.Chow



### 3.7 考察

第3章で分かったことは、以下の通りである。m面、Si面、C面、の面方位によらず、窒素は界面にのみ多量に存在し、界面窒素飽和面密度の飽和値は面毎に異なる。今回の実験では m 面 :  $9.1E14/cm^2$ , Si 面 :  $4.5E14/cm^2$ , C 面 :  $10.7E14/cm^2$  程度であった。窒素導入に関しては、7.5min( $T_{ox}=4nm$ )の初期酸化終了直後には既に窒素濃度は飽和しており、酸化と窒化はほとんど同時に進行する。窒素離脱に関しては、界面窒素は酸化進行に伴い Si-N 結合から離脱して一旦窒素原子ガスとなった後、8割程度の窒素は次の界面の窒化反応に寄与し、他の窒素は外方に拡散する。また窒素離脱は酸化と同時にしか起こらない。このような高い確率で前の層の窒素が次の窒化反応に寄与するということは、酸化反応がトリガーとなり前の窒素が離脱して窒素原子ガスとなり、次の窒素が入る場所の C が離脱するとそこに窒素原子ガスがはまり込むという一連の反応が連続して起きている可能性が高い。Si/SiO<sub>2</sub> 界面窒化プロセスとの比較により、Si と SiC の界面窒素量は、共にプロセスにおける時間、温度、ガス分圧の影響が出るが、Si は低温プロセスが多く一方 SiC は高温長時間プロセスであることが結果に大きく影響を与えている。相互のデータや反応の考え方は活用可能で、過去論文の結果が今回の検討結果と矛盾する部分はなく、判断への影響はない。

### 3.8 参考文献

- 1) Yasuto Hijikata, Hiroyuki Yaguchi, and Sadafumi Yoshida, "A Kinetic Model of Silicon Carbide Oxidation Based on the Interfacial Silicon and Carbon Emission Phenomenon", Applied Physics Express 2 (2009) 021203
- 2) B. E. Deal and A. S. Grove, "General Relationship for the Thermal Oxidation of Silicon", Journal of Applied Physics, Volume 36, Number 12, December 1965
- 3) Y. Song, S. Dhar and L. C. Feldman, "Modified Deal Grove model for the thermal oxidation of silicon carbide", Journal of Applied Physics, Volume 95, Number 9, 1 May 2004
- 4) Richard Heihachiro Kikuchi and Koji Kita, "Interface-reaction-limited growth of thermal oxides on 4H-SiC (0001) in nanometer-thick Region", Applied Physics Letters 104, 052106(2014)
- 5) L.J.Kroko and A.G.Milnes, Solid State Electronics 9 (1966) 1125
- 6) S. Dhar, L. C. Feldman, K.-C. Chang, Y. Cao, L. M. Porter, J. Bentley, and J. R. Williams, "Nitridation anisotropy in SiO<sub>2</sub>/4H-SiC", JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 97, 074902 (2005)
- 7) N. S. Saks and D. I. MaW, B. Fowler, "Nitrogen depletion during oxidation in N<sub>2</sub>O", Appl. Phys. Lett. 67 (3), 17 July 1995
- 8) E. P. Gusev, H. C. Lu, T. Gustafsson, E. Garfunkel, M. L. Green, and D. Brasen, "The composition of ultrathin silicon oxynitrides thermally grown in nitric oxide", J. Appl. Phys. 82 (2), 15 July 1997
- 9) K. CHATTY, V. KHEMKA, T.P. CHOW, and R.J. GUTMANN, "Re-Oxidation Characteristics of Oxynitrides on 3C- and 4H-SiC", Journal of Electronic Materials, Vol. 28, No. 3, 1999
- 10) K. MacDonald, M. B. Huang, R. A. Weller, and L. C. Feldman, "Comparison of Nitrogen incorporation in SiO<sub>2</sub>/SiC and SiO<sub>2</sub>/Si structure, Applied Physics Letters, Volume 76, Number 5, 31 January 2000

## 第4章 4H-SiC 酸化膜界面窒素モデル

### 4.1 序章

第3章までの評価を通じ界面窒化層形成に対する基本的な課題があきらかとなった。ここで改めて窒素の「導入」「脱離」「飽和」にかかわることだけを再整理すると以下ようになる。

#### 【界面状態】

- ・窒素は界面にのみ多量に存在し飽和値を持つ
- ・その飽和値は各面毎に異なる
- ・窒素の多くは SiC 結晶側に存在し Si-N 結合である

#### 【窒素導入】

- ・酸化と同時に窒化が進行する

#### 【窒素脱離】

- ・窒素脱離は酸化と同時にしか起こらない

第4章の目的は以上の知見を元に、新たに 4H-SiC m 面 酸化膜界面窒化モデルを提案することである。さらにそのモデルを他面(Si 面, C 面, a 面)に適用しモデルの拡張性を検討する。

検討の手順は以下のとおりである。

- ・現状の知見の詳細の再確認と、m 面 酸化膜界面窒化基本モデルを提案する
- ・m 面における「導入」「脱離」「飽和」のメカニズムを個々に検証する
- ・m 面窒化の実験値との比較により、モデルの妥当性を検証する
- ・m 面モデル化の手順を他面 (Si 面、C 面、a 面) に適用し、モデルの拡張性を検証する

### 4.2 m 面 界面窒化モデルの提案

#### 4.2.1 飽和状態の m 面界面窒素分布推定図

これまでに得られた知見の詳細を図 4-2-1 にまとめる。図の左側は界面近傍の断面を模式化したものである。界面を挟み、上側に SiON 系の酸窒化層を挟み酸化膜が示されており、また下側に酸化反応界面を挟み SiC 結晶がある。図中に書かれたことはこれまでの実験や先行論文により確認された事項である。右側は窒素濃度のイメージを表しており、界面から結晶側に高濃度の窒素が Si-N 結合をもって分布している。また酸化膜側は前述の SiON 系の酸窒化物となって窒素が界面近傍に存在するが、そのピーク濃度は界面の窒素ピーク濃度の約 1/10 程度である。今回界面の窒素量を定めるモデルを提案することが目的であるため、この図の右側の窒素が存在する領域の厚みとピーク濃度、すなわち青色の部分の面積をモデル化することである。またこの値は飽和することが分かっているため、飽和の要件、すなわち厚み並びにピーク濃度の決定要件を得ることが必要となる。

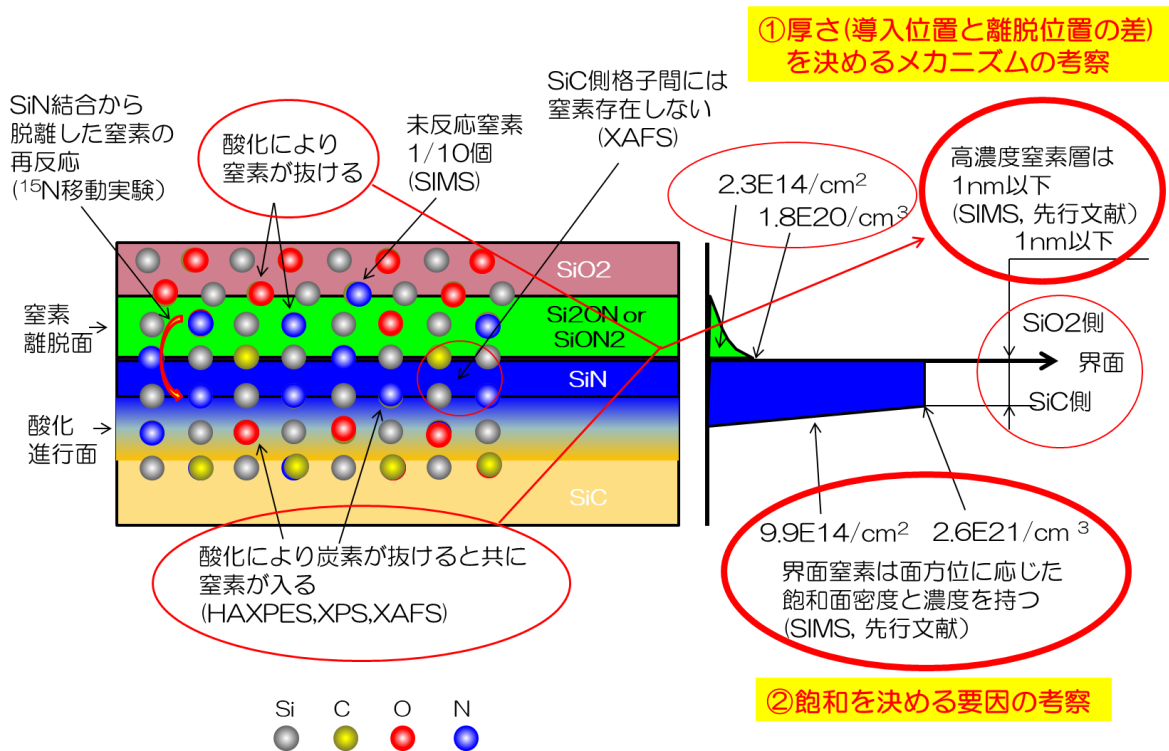


図 4-2-1 SiC 界面窒化状態推定図

#### 4.2.2 窒素導入モデル

ここでは窒素導入の課程を考察する。窒素は Si とのみ結合しているため、C が抜けた後に窒素が置換すると考えられる。G.G.Jernigan らが O 分子による 4H-SiC の Si 面と C 面の界面酸化反応式を提案している<sup>1)</sup>。彼らの提案する反応模式図を図 4-2-2 に示す。C 面の酸化の場合、まず酸素により界面にある全ての C とそこにつながる Si の結合の間に酸素が入り、CO の形で離脱(CO loss)し、その後にもう一層下の C と Si の間の結合に酸素が入り、そこでも CO loss により C が離脱する。この反応の中では、CO loss を一反応と数えた場合、二反応で 4 個の C が離脱している。一方、Si 面の場合、C とは異なり表面に最も近い C と結合している 3 つの Si のうちのひとつとの結合の間にだけ酸素が入り次の CO loss により C が離脱する。この反応では一反応で 1 個の C が離脱し、C 面の半分の離脱ペースとなっている。CO loss の速度が仮に同一であるとすると、C 面の酸化レートは Si 面のレートの 2 倍になることになるが、それは 3.2 の実験値とほぼ一致している。今回窒化反応モデル構築において、Jernigan らの酸化モデルをベースに界面窒化モデルを検討した。図 4-2-3 に C 面の窒化模式図を、式(4-2-1)に反応式を示す。この反応の特徴は、CO loss により C が抜けた直後に窒素が入るといったものである。この「CO loss 時の C が抜けた後に窒素がその場所に入る」という窒化時の反応を界面窒化モデルの【窒素導入の仮説】とする。



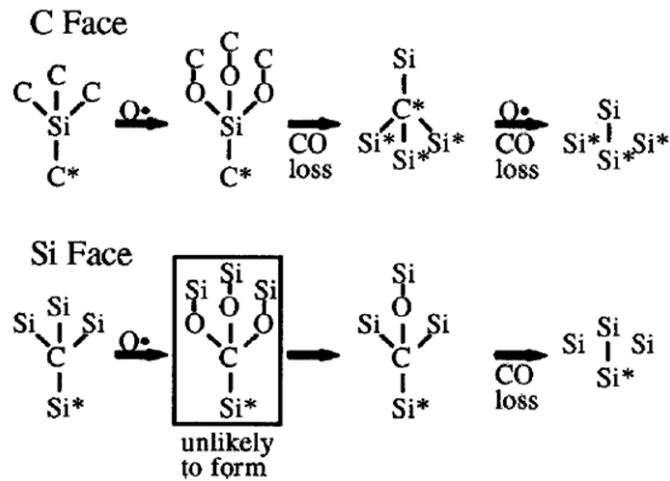


図 4-2-2 4H-SiC C 面、Si 面の酸化反応模式図

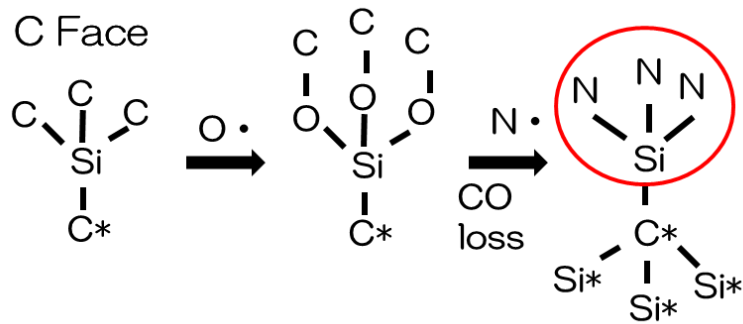


図 4-2-3 今回提案する界面窒化反応模式図 (C 面)

#### 4.2.3 窒素離脱モデル

Sake らが Si/SiO<sub>2</sub> 界面の酸化による窒素の離脱反応を式(4-2-2)のように提案している<sup>2)</sup>。



彼らはこの反応は必要なエネルギーレベルが低いと非常に起こり易いとしている。SiC の界面における窒素も上記の反応により離脱すると考えられる。この窒素の離脱反応がいつ起きるかということについて考察する必要がある。実験結果と照らし合わせると、この反応は先ほどの窒化の模式図でいうところの 2 原子層目の C (再表面の C はすでに窒素に置き換わっているため実質的には最も表面に近い側の C) が酸化した時に起こると考えられる。その反応模式図を図 4-2-4 に、想定する窒素離脱反応式を式(4-2-3), (4-2-4), (4-2-5)に示す。窒素離脱反応において、式(4-2-3)と(4-2-4)の 2 反応で窒素離脱は完了しており、式(4-2-5)は窒素導入式(4-2-1)と同種の反応である。

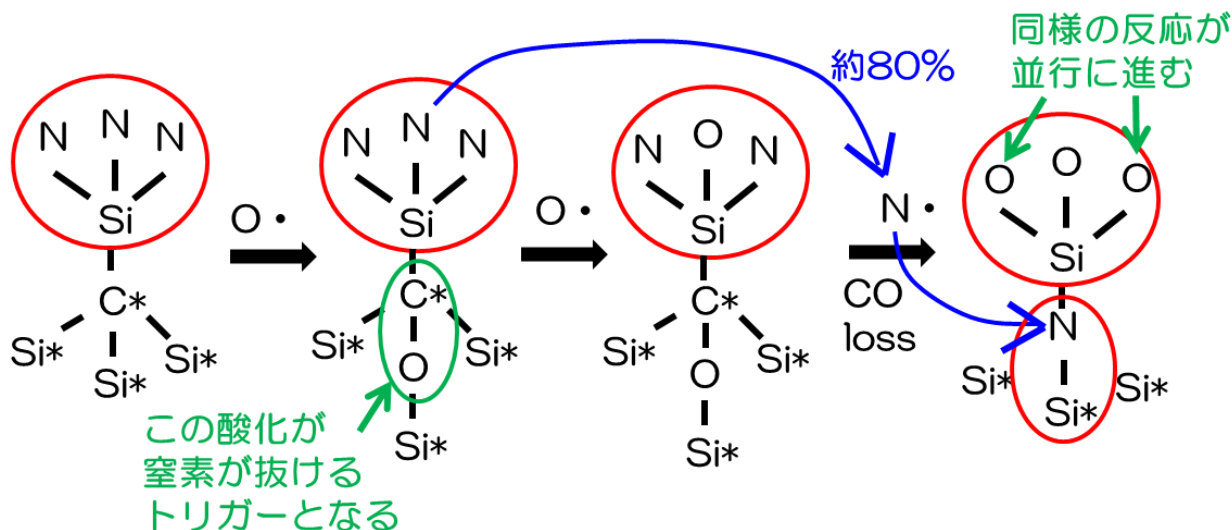


図 4-2-4 今回提案する界面窒素離脱反応模式図 (C 面)



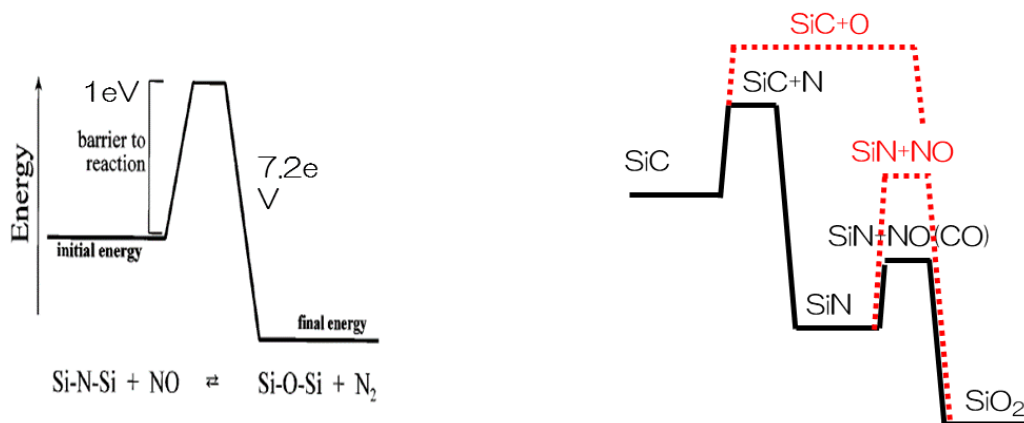
以下に反応を説明する。界面が窒化した安定状態からスタートする。まず次の反応のトリガーとして酸素が次の層の C と Si の間に入る (酸化)。窒素の電気陰性度は 3.04 で C の 2.55 よりも大きいので、界面側の窒素とつながる電気陰性度 2.55 の Si の電子は窒素側に偏在する。この系に 3.44 とさらに大きい電気陰性度を持つ酸素が入る場合、電子の存在確率が希薄となっている窒素に近い側の Si-C 結合側よりも、比較的電子存在確率が均等化されている SiC 結晶内部側の Si-C 結合側に優先的に入ると考えられる。これは窒素導入モデルと同じ位置関係であり特に矛盾はない。酸化されるまでは (酸素が Si と C の間に入るまでは) 界面側にある窒素は安定である。しかしこの酸化が起こった段階で、窒素から見たときに Si の反対側の状態が変化し窒素側の反応性が高まる。ここで式(4-2-2)にあるように、NO の O· が窒素の一つと反応し置き換わり窒素はここで N· として離脱する。ここまでで窒素の離脱は一旦完了する。次に O と C が CO loss という形で結合から切り離され、その後に窒素が入る。最後の反応は窒素導入式と同種の反応である。これで界面が窒化された安定状態に戻る。

前半の反応の課題は、窒素離脱と次の層の窒化が同期するメカニズムの検証である。比較的起こり易いと考えられている式(4-2-2)の NO の O· による窒素の直接の置換反応よりも、次の層の SiC の間に O· が入る酸化反応の方が先に起きるかということであるが、式(4-2-2)の場合、O· が Si-Si 間に入るためには強固な SiN ボンドを 3 本切断し窒素と置換する必要があるが、Si と C の間に入る酸化反応では、強固といえども SiC の結合を 1 本切りそこに入るだけなので、比較的起こり易いと考えられている式(4-2-2)の反応よりもさらに反応に要するエネルギーが相対的に低くなり、この提案の反応は十分起こり得ると考える。

後半の反応の課題は、窒素が離脱するトリガーの可能性として①(前半の課題で指摘した)酸化反応、②次の層の窒化反応、③窒素導入と窒素離脱を繋ぐトリガーとなる反応は存在せず窒素導入と窒素離脱はそれぞれ別の要因で進行する、④窒素は離脱しない、の 4 つのケースが考えられる。まず③については、もし窒素導入と窒素離脱を繋ぐトリガー反応のようなものがないとすると、反応のエネルギーの異なる二種類の反応が同時に進み、界面の窒化層の厚みや濃度・密度があらゆる条件において安定に決まるとは考えにくい。非常に均質な界面窒化層が再現よく形成されるといふ実験事実から、一連の反応に

は何かの連続性、もしくはそれらを結びつける何かの反応が存在すると考える。次に④は③のバリエーションの一つと言えるが、仮に窒素離脱が起こらないもしくは起こりにくいとすると、窒化層が厚みを重ねる可能性が高いということの意味する。その結果、界面の窒素量は終わりなく増加する。また面方位毎の特徴は界面にしか存在しないため、窒化層の厚みが増すにつれて面方位の特徴は少なくなるはずである。しかし実際にはそれぞれの面方位が特徴を持った窒素面密度（窒素濃度）を持ち続けるということは、一層もしくは極薄の層しか窒素が存在しないということ逆を説明することになる。それ以外に、反応速度的には窒化層は酸化レートを落とす効果があることも、窒素離脱面を引き離して厚い窒化層を形成することを抑制するよう働いている可能性もある。最後に①と②のどちらの反応が窒素離脱のトリガーとなるかということであるが、もし②の次の層の窒化がトリガーとなり窒素が離脱すると考えた場合、それでは高い確率で窒化層にあった窒素が次の反応に寄与するということの説明が困難になると考える。3.4 で述べたように、窒化層があると酸化レートは非常に遅くなり、1 格子面間隔の 0.2664nm 酸化進行するのに 107 秒かかる。それにもかかわらず約 80%の窒素が次の反応に寄与するということは、離脱後の窒素原子ガスが次の反応が起きるまでの 107 秒間界面近傍の 0.数 nm に留まらなくてはならず、合理的と考えにくい。ここで窒化がトリガとなるとすると、離脱した窒素は 2 面間隔 0.5328nm 先すなわち一層遠いところにある C と高い確率で入れ替わる必要が出てくるため、高確率での再窒化はより一層困難となる。従って、(窒化安定状態) →トリガーとしての酸化→窒素離脱→CO loss→窒化 (=窒化安定状態) と一連の反応中に酸化をトリガとして窒素離脱と再窒化が連続的に進むと考える方が合理的であると考え、上記の一連の反応を想定した。この一連の反応「窒素脱離は次の層の酸化がトリガーとなり起こり、その直後の CO loss に続き次の層が窒化する」というものを、【窒素脱離の仮説】とする。

図 4-2-5 の(1)に Saks らが提案した Si-N-Si と NO の反応エネルギーモード図を、(2)にその反応エネルギーモード図を参考に今回の一連の反応のエネルギー関係を表すモード図を示す。界面に NO ガスが存在すれば、SiC から直接 SiO<sub>2</sub> に反応するより一旦 SiN へ変化の方が反応に必要なエネルギーは小さく、また SiN から SiO<sub>2</sub> に反応が進む時に SiN から NO により直接 SiO<sub>2</sub> に反応するより、二層目に酸化(CO と表記)が先に起こった方が SiO<sub>2</sub> へ進む反応エネルギーが小さくなると推測している。今回一連の反応は Jernigan らの C 面の反応をベースに提案しているが、個別の反応そのものには面方位の特徴が大きく現れることではなく、この反応は全ての面において一般化されると考える。この反応により、窒素が存在する界面の厚みは 1 反応層となる。



(1) Saks らの提案する Si-N-Si の NO による窒化反応エネルギーモード図  
(2)の右半分の破線部分の反応)

(2) 今回提案する SiC の NO による窒化から酸化までの一連の反応のエネルギーモード図  
(SiC+NO(CO))は窒素が抜けるトリガとなる次の層の酸化反応)

図 4-2-5 今回提案する界面窒化反応の反応エネルギーモード図



#### 4.2.4 窒素飽和モデル

ここでは m 面の窒素飽和すなわち反応界面において窒素が存在可能な数を考察する。第 2 章や第 3 章における観察と考察を通じて窒素は SiC の C と置換していることが分かっている。従って窒素の存在可能な数を考察する上で、まず C の数によって評価を行うこととする。m 面は Si 面や C 面に対して垂直で、a 面とよく似た関係にある。ただ m 面だけの特徴の一つに、一つの単位格子内で C の存在する面が三面存在し、またその面上に現れる C 数が 2 個, 1 個, 1 個の繰り返しとなる点がある。m 面のボールアンドスティック構造モデルを図 4-2-6 に示す。ここで黄色は C、灰色が Si を示す。また三回現れる面の内 C が 2 個現れる面から、便宜上第 1 面、第 2 面、第 3 面と名付ける。4-2-3 の考察により、窒化界面は一反応層しかないという仮説を立てたが、この特殊な繰り返し面をもつ m 面における一反応層を定義する必要がある。

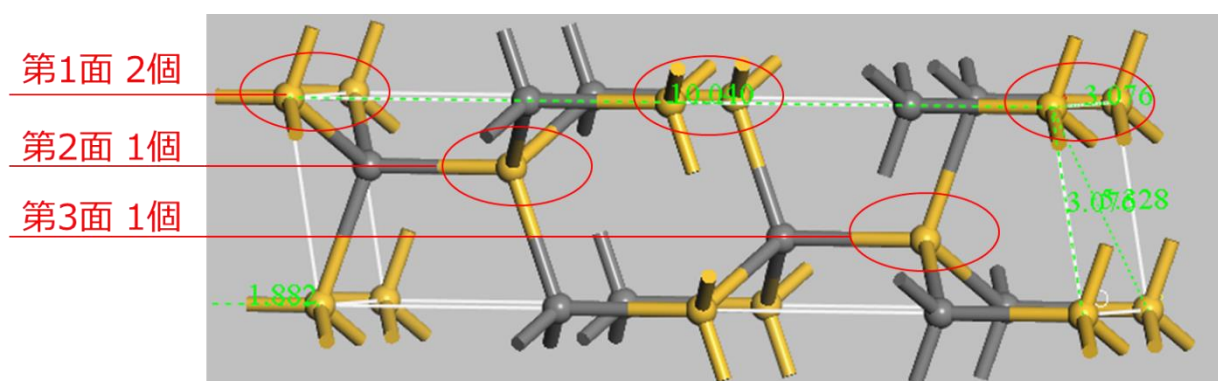


図 4-2-6 4H-SiC m 面のボールアンドスティック構造モデル

第 1 面に存在する炭素の面密度は  $6.47E14/cm^2$  であり、例えば実験 2-5 で得られた  $9.86E14/cm^2$  の約 2/3、逆に言えば m 面の窒素の面密度実測値は第 1 面の C (カーボン) 面密度計算値の約 1.5 倍である。そこで m 面の面密度を決める反応層の定義として、「第 1 面と第 2 面が単一面のように同時に窒化する」【m 面反応層の仮説】とする。この仮説が成り立てば、計算上は計算値と実測値がほとんど完全に一致する。仮説の成立の可能性の考察を行う。まず第 1 面の C は、C 面の C と類似の配置になっている。すなわち結晶外部に露出しているため 1 本もしくは 2 本のダングリングボンドを持ちうる位置にあり、近隣の Si との結合の間に酸素が入ることで優先的に CO loss となりうる。したがって第 1 面の C は反応性高く優先的に窒化反応を起こすと考える。次に第 2 面の C は全ての結合が Si とつながっており Si 面の C と状況に近いが、近接する Si のうち第 1 面側の 2 つの Si は第 1 面の窒素と結合しているため、4-2-3 で述べた電気陰性度の関係により電子が高い確率で界面窒素側に存在するようになり、第 1 面の Si と第 2 面の C の結合は弱まる可能性を持つ。一方、第 3 面の C も第 2 面の C 同様回りは全て Si と結合しているが、反応性の高いと思われる第 1 面の Si との結合が 1 本であり距離も離れているため、より Si 面における最表面の C に近いすなわち結晶内部の C に近い結合状態となり、反応性は第 2 面と比較すると低いと思われる。すなわち第 2 面と第 3 面の C は明らかに異なる結合状態にあり第 2 面の C の方が反応性は高いと考えられることから、第 1 面と第 2 面の C が優先的に同時に窒素する可能性は高く、【m 面反応層の仮説】はあり得ると考える。

窒素導入面の繰り返しと面当たりの窒素数を、格子面を用いた構造図を用いて図 4-2-7 に表示する。左図(1)は鳥瞰図、右図(2)は単位格子 3 つをまとめて六方晶とした上面図である。上面図では、単位格子を真上から見た時の第 1 面、第 2 面、第 3 面の位置とそこに含まれる C 原子の位置を表示している。



なお青色は単位格子の外側に面する C を、黒色は単位格子内部に位置する C 原子をそれぞれ表している。これらの図において第 1 面と第 2 面が同時に窒化すると、面密度としては第 1 面の面積中に 3 個の C が現れ、濃度としては第 1 面と第 3 面で挟まれた空間に 3 個の C が存在するという場合を考えることとなる。

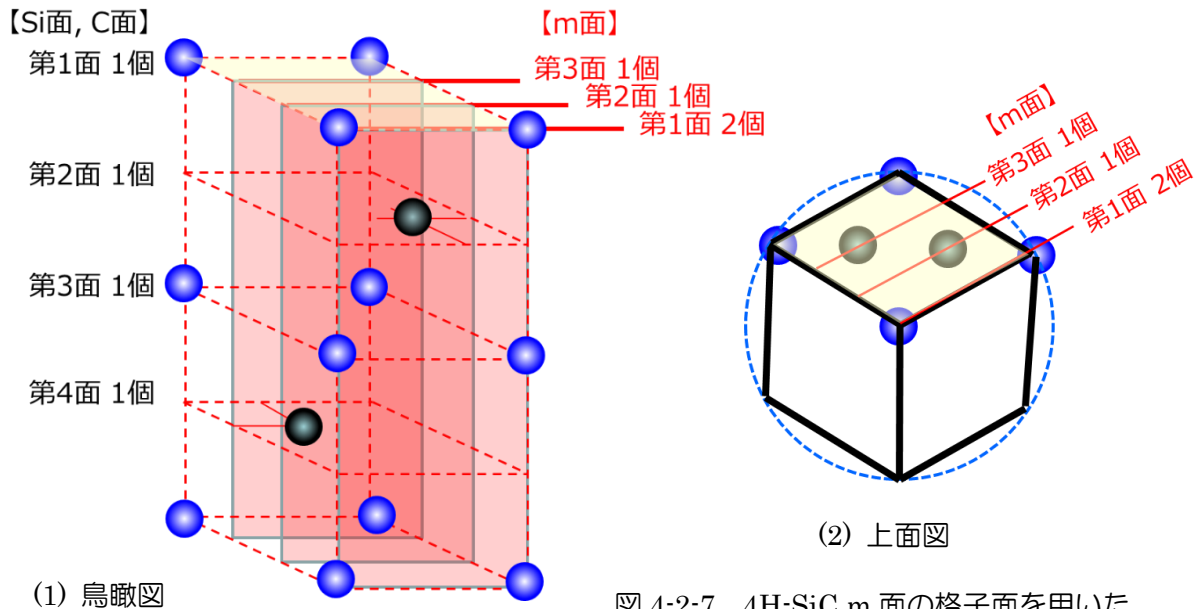


図 4-2-7 4H-SiC m 面の格子面を用いた面当たりの窒素数説明図

#### 4.2.5 導入窒素量の検証

今回提案する m 面の窒化モデルは、下記の 3 つの仮説を合わせたものである。

①厚さ(導入位置と離脱位置の差)を決めるメカニズム

【窒素導入の仮説】「CO loss 時の C が抜けた時に、抜けた C の所に窒素が入る」

【窒素離脱の仮説】「窒素脱離は次の層の酸化がトリガーとなり起こり、その直後の CO loss に続き次の層が窒化する」

②飽和を決める要因の考察

【m 面反応層の仮説】「第 1 面と第 2 面が単一面のように同時に窒化する」

この m 面界面窒化モデルのもとに、導入された窒素の面密度と濃度を計算する。単位格子を示した構造図に寸法を入れた鳥瞰図を図 4-2-8 に、また面密度と濃度計算シートを表 4-2-1 に示す。第 1 面の面積は  $1004\text{nm} \times 0.3076\text{nm} = 0.30883\text{nm}^2$  となる。そこに 3 個の窒素が存在するとした場合、面密度の計算値は  $9.71\text{E}14/\text{cm}^3$  となり実験値の  $9.86\text{E}14/\text{cm}^3$  とほぼ一致する。これは当初の仮説をたてた背景通りである。一方濃度計算に用いる単位格子の  $2/3$  の体積は  $0.30883\text{nm}^2 \times 0.1776\text{nm} = 0.5485\text{nm}^3$  となり、そこに 3 個の窒素があるとすると、濃度の計算値は  $5.47\text{E}22/\text{cm}^3$  となり実験値の  $2.58\text{E}21/\text{cm}^3$  は計算値の 0.047 倍となり大きな差が発生した。濃度については再検討が必要であることが分かった。

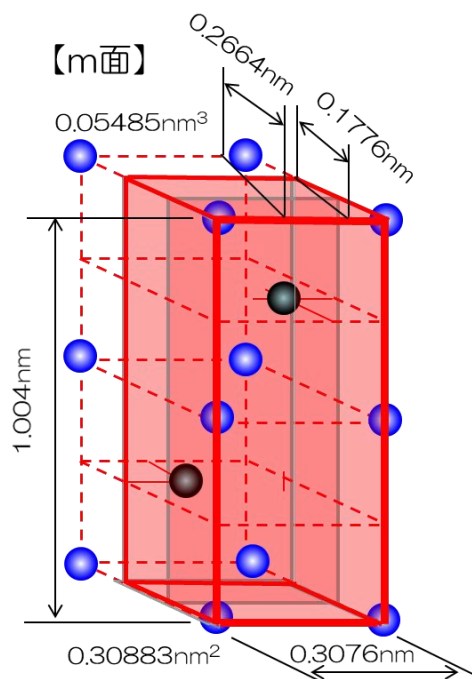


表 4-2-1 4H-SiC m 面界面窒素の飽和面密度、飽和濃度計算シート

	項目	単位	m面
面密度	面積当たり窒素数	個	3
	単位面積	(nm <sup>2</sup> )	0.30883
	面密度 (計算値)	(個/cm <sup>2</sup> )	9.71E+14
	面密度 (実験値)	(個/cm <sup>2</sup> )	9.86E+14
	面密度比 (実験値/計算値)		1.02
濃度	体積当たり窒素数	個	3
	単位体積	(nm <sup>3</sup> )	0.05485
	濃度 (計算値)	(個/cm <sup>3</sup> )	5.47E+22
	濃度 (実験値)	(個/cm <sup>3</sup> )	2.58E+21
	濃度比 (実験値/計算値)		0.047

図 4-2-8 4H-SiC m 面の単位面積及び繰り返し面間隔計算の為に結晶単位格子基本寸法並びに計算結果<sup>3)</sup>

濃度の誤差について考察を行う。計算では全ての窒素が面間隔 0.1776nm の中に存在しているとして計算しているが、SIMS の計測上の半値幅は 3.4nm であった。SIMS で計測された窒素がこの 0.1776nm 幅にボックス型に分布していると仮定して再計算を行う。その場合窒素が分布する体積は 0.1776/3.4 倍となるため、濃度は  $2.58E21(\text{cm}^3)/(0.1776/3.4)=4.94E22(\text{cm}^3)$  となる。SIMS で得られる濃度分布の計測上の広がり誤差を補正することにより、実験値の計算値に対する比は 0.90 と良好な一致を見せた。結果を表 4-2-2 に示す。この差は、SIMS の絶対値誤差(±20%)を考慮すると、十分精度の高い値であるといえる。従って、実際の界面に存在する窒素の量と今回の仮説より計算した窒素量 (m 面の第 1 面と第 2 面が同時に窒化し窒化層はその単一層だけである) が高い精度で一致した。

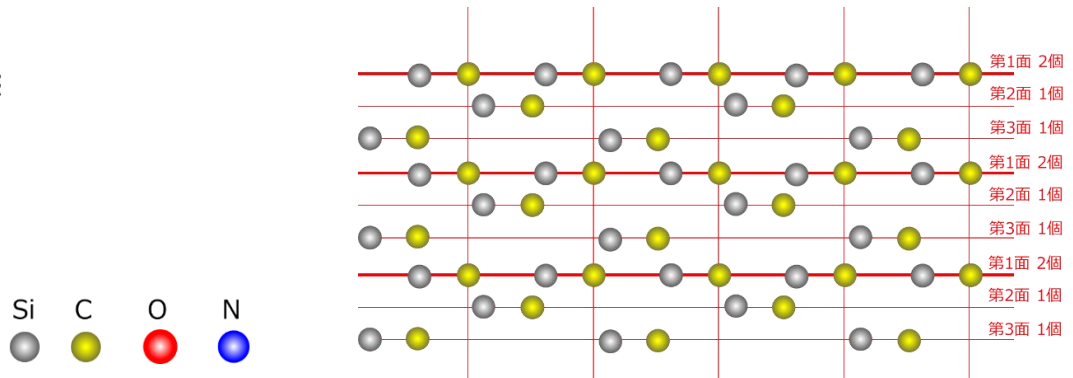
表 4-2-2 4H-SiC m 面窒素の飽和濃度の SIMS がり計測誤差補正濃度

	項目	単位	m面
濃度	体積当たり窒素数	個	3
	単位体積	(nm <sup>3</sup> )	0.05485
	濃度 (計算値)	(個/cm <sup>3</sup> )	5.47E+22
	濃度 (実験値：3.4nm に分布したと仮定)	(個/cm <sup>3</sup> )	2.58E+21
	窒素分布面間距離	(nm)	0.1776
	濃度 (修正実験値：窒素分布面間距離に分布したと仮定=実験値×3.4/窒素分布面間距離)	(個/cm <sup>3</sup> )	4.94E+22
	濃度比 (修正実験値/計算値)		0.90

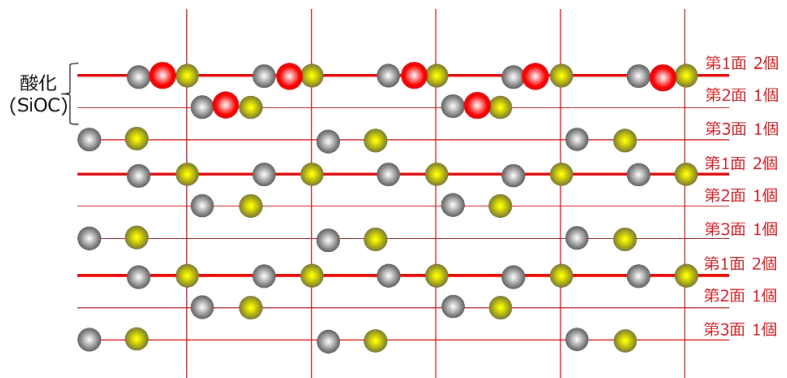
#### 4.2.6 m 面窒化モデルの確認

今回提案する m 面の窒化モデルの窒化進行イメージを図を用いて解説する。図中の記号は  
 灰色 : Si, 金色 : C, 赤 : O, 青 : N である。

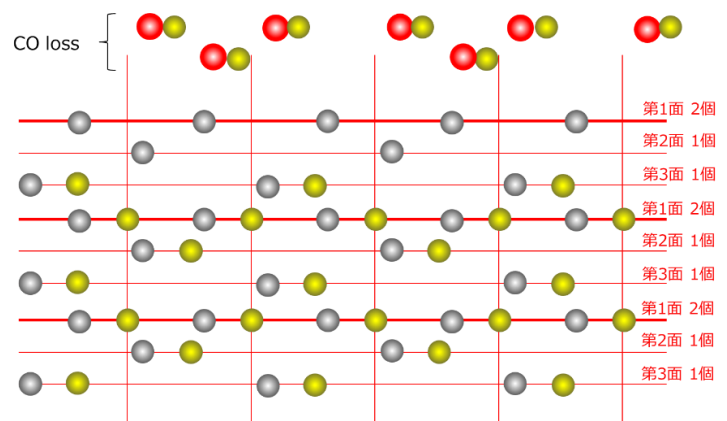
(1) 初期状態



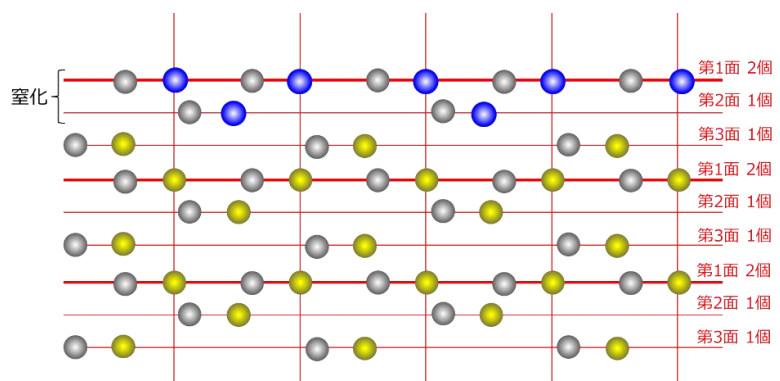
(2) 第1面と第2面のCが酸化  
 (SiOC 形成)



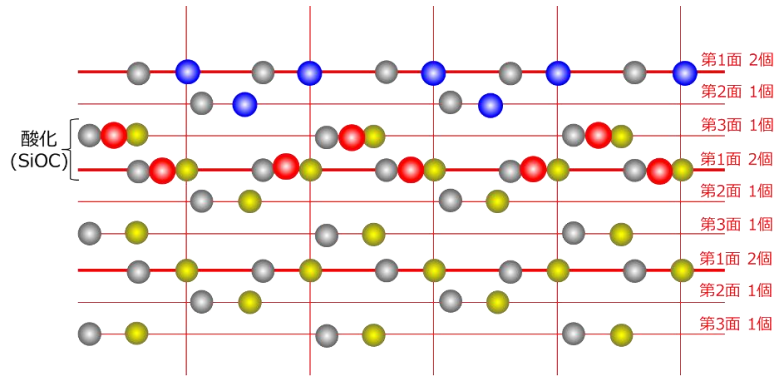
(3) CO loss



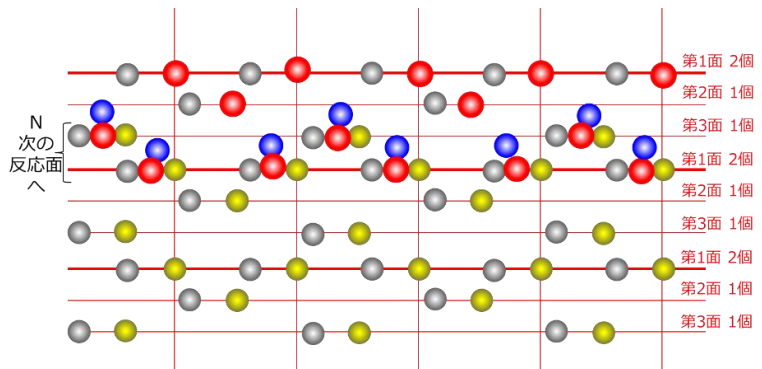
(4) C が抜けたあとに窒素が入り、  
 第1面と第2面窒化完了



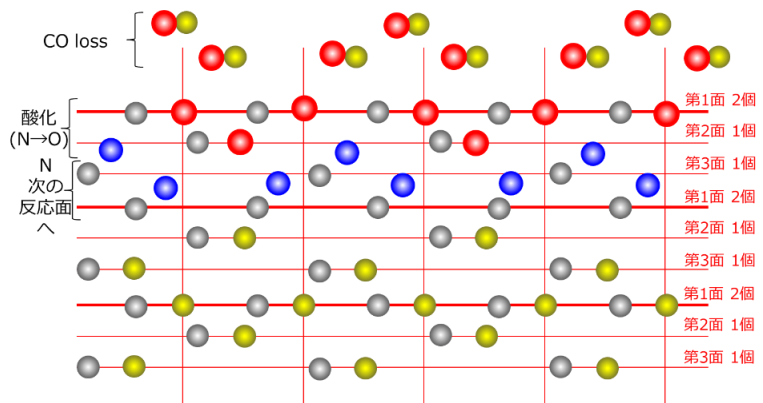
(5) 第3面と次の第1面酸化  
(SiOC 形成)



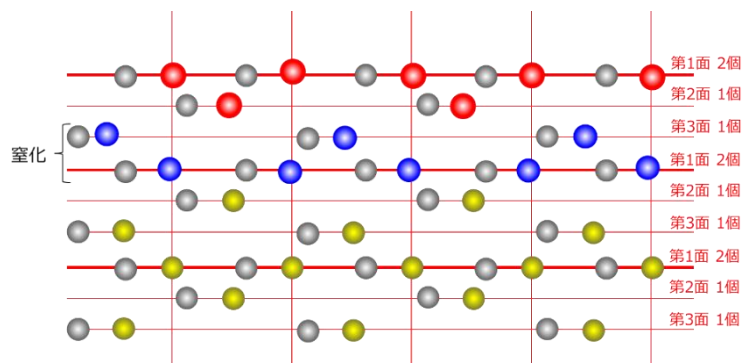
(6) 第3面と次の第1面酸化が  
トリガーとなり、窒素脱離しそこ  
に酸素入り SiO<sub>2</sub> 形成  
窒素は窒素原子ガスとなり界面  
近傍を浮遊



(7) CO loss



(8) C が抜けたあとに窒素が入り、  
第3面と次の第1面窒化完了



### 4.3 界面窒化モデルの他面(Si 面, C 面, a 面) への適用

#### 4.3.1 他面(Si 面, C 面, a 面)へのモデル適用の検討

4H-SiC m面界面窒化モデルを、Si 面、C 面、a 面に適用し、4H-SiC の界面窒化に対する一般化の検証を行う。m 面モデルを適用する場合、各面の表面に現れる炭素数、単位格子内で炭素が現れる繰り返し面の定義と間隔、そこから計算される炭素面密度及び濃度の計測値との乖離、の情報が必要である。

結晶単位格子 (図 4-3-1) より、各面に現れる炭素数ならびに繰り返し面の面積と間隔は以下のよう整理される (図 4-3-2, 表 4-3-1)。

- Si 面、C 面：単位格子内に同じ特性の面が 4 回現れ、各面は 1 個の炭素を持つ
- a 面：単位格子内に同じ特性の面が 2 回現れる。各面は 2.67 個の炭素を持つ

各面の表面最近傍の炭素数は Si 面と C 面では同じとなる。ただ Si 面の場合、C 原子は表面に露出せず Si 原子の半層下に現れるところが異なる。一方、2-5 の実験では Si 面の窒素面密度は C 面の約 0.4 倍であった。また Xu らの報告によると Si 面の窒素は C 面の窒素の約 1/3 程度との報告もある<sup>4)</sup>。従って今回のモデルを 4H-SiC 全ての面に適用するためには、m 面で行ったように、その面にのみ起きる個別の窒化現象を考察し織り込む必要がある。

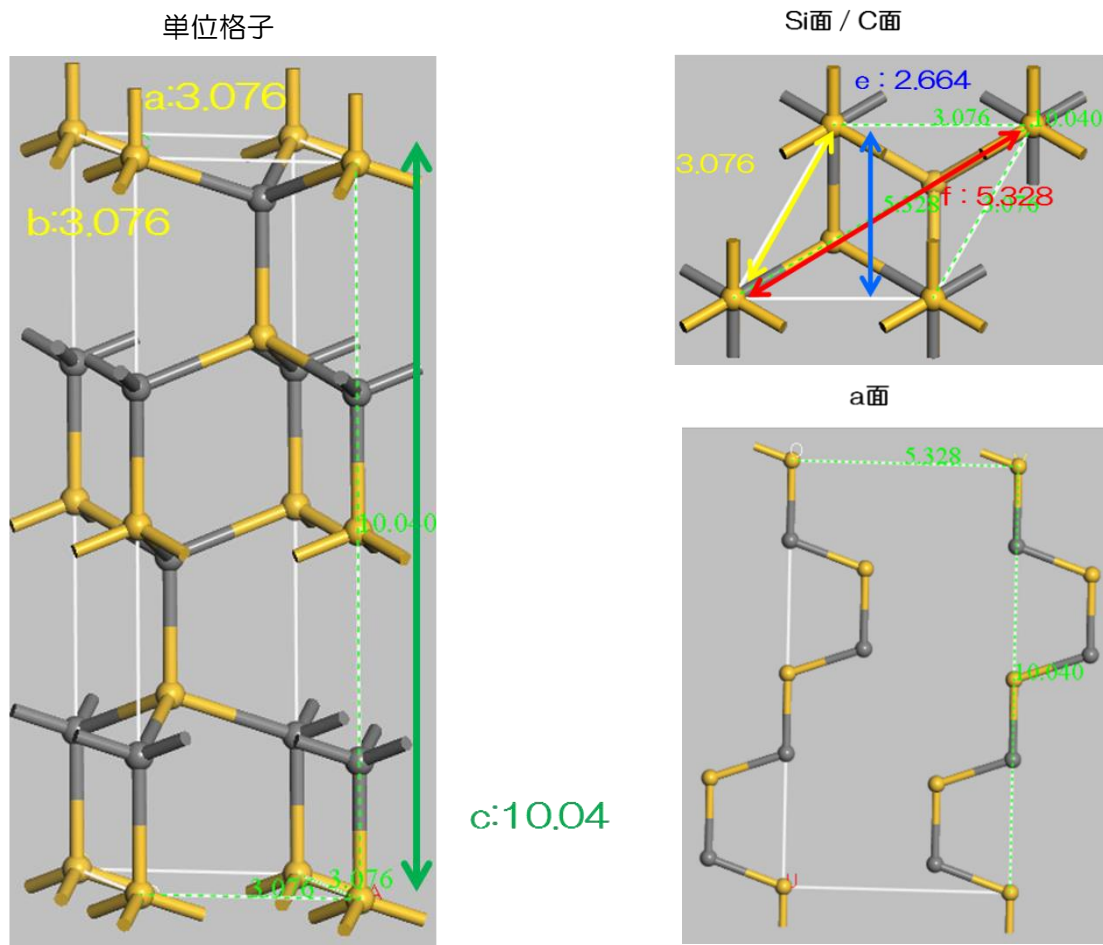


図 4-3-1 4H-SiC 単位格子図並びに Si 面、C 面、a 面の単位面積及び繰り返し面間隔算出のための結晶格子の基本寸法 (図中数値の単位はÅ)



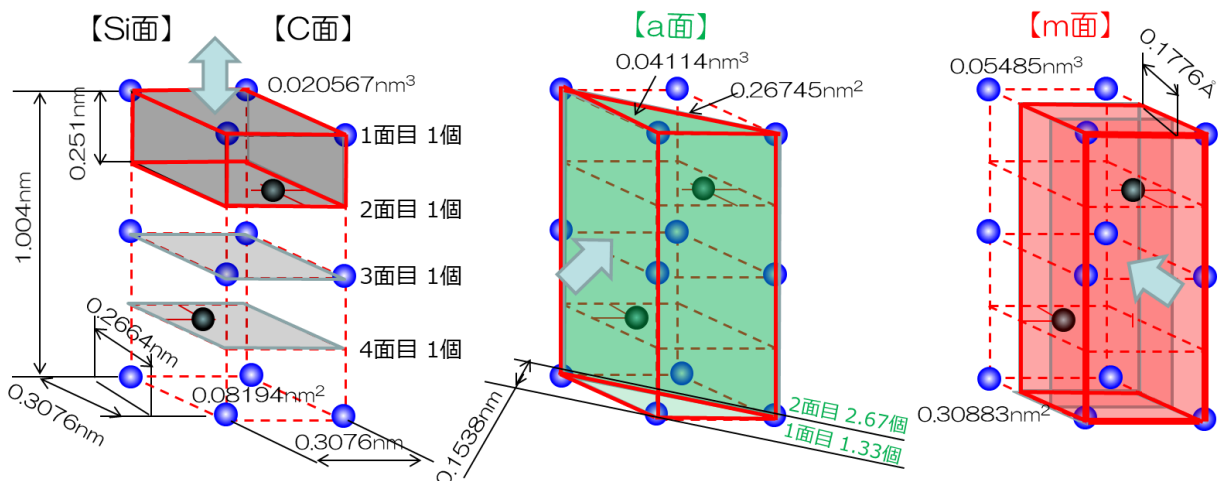


図 4-3-2 4H-SiC Si 面、C 面、a 面の単位面積及び繰り返し面間隔計算の為の基本寸法並びに計算結果

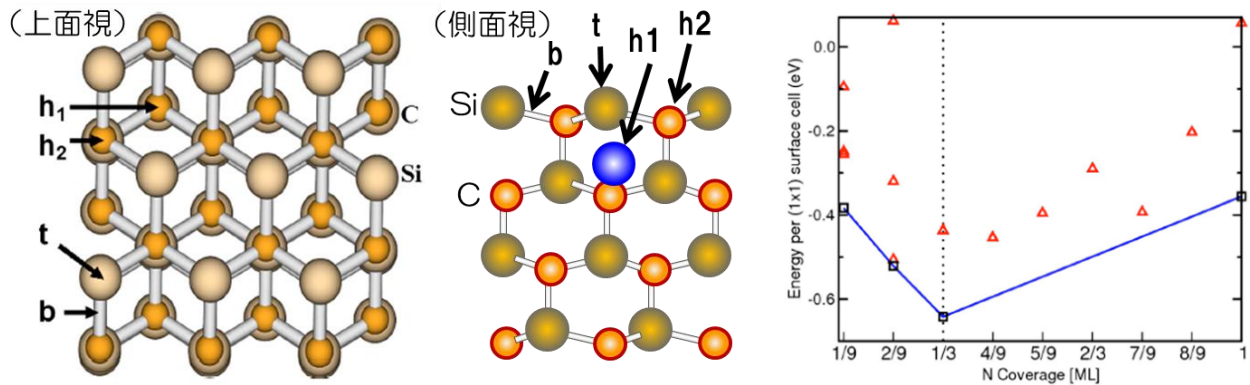
表 4-3-1 4H-SiC Si 面、C 面、a 面の単位面積及び繰り返し面間隔計算値

項目	単位	Si面	C面	a面	m面
単位体積当り窒素数	個	0.333	1	2.670	3
単位面積	(nm <sup>2</sup> )	0.08194	0.08194	0.26745	0.30883
窒素分布面間距離	(nm)	2.510	2.510	1.538	1.776
単位体積	(nm <sup>3</sup> )	0.020567	0.020567	0.04114	0.05485

#### 4.3.2 Si 面 窒素飽和モデルの考察

「Si 面では面中 1/3 個程度の C が窒化し次の 1/3 の窒化時に前の窒素が抜ける。これを繰り返すため窒素量は常に表面炭素面密度の 1/3 となる」【Si 面窒素許容数の仮説】の可能性の検証を行う。Pennington らは、4H-SiC の Si 面において最表面の Si 原子 9 個あたり特定の位置に 3 個の窒素を配置するときエネルギーが最低となるということを第一原理計算を用いて算出している<sup>5)</sup>。図 4-3-3 の(1)に Pennington らが計算で用いた 3×3=9 個の Si 原子を含む結晶構造モデルの上面視、(2)に理解を助けるために補足として筆者が作成した側面視、(3)にエネルギーの計算結果を示す。最も安定な位置とは、最表面の Si と直接結合する一層目の C ではなくそのもう一層下に現れる二層目の C の直上の位置で、図中で h1 で示されている位置である。Pennington らは h1 以外に最表面の Si と直接結合する表面に最も近い C の直上(h2)、さらに最表面の Si 直上(t)、最表面の Si とその下の二層目の C を繋ぐ結合の上(b)など、多くの位置に 1~9 個の窒素を配置したが、h1 の位置に Si 原子 9 個あたり 3 個、すなわち C 原子 9 個あたり 3 個の窒素が存在する場合が最も安定と述べている。そこはポテンシャルのポケットになり窒素原子の存在確率が高くなる位置である。面当たり 1/3 の窒素数が一番安定でその直近で反応した CO loss のみが窒化し、他の部位には窒素は到達することができず酸素が先に結合し SiO<sub>2</sub> を形成する可能性が高い。従って Si 面のみ界面炭素数の 1/3 個の炭素のみが窒化し、残りの 2/3 の炭素は窒化せずに直接酸化し SiO<sub>2</sub> となる窒化メカニズムが存在すると考えられる。





(1) Pennington らが計算で用いた  $3 \times 3 = 9$  個の Si 原子を含む結晶構造モデル上面視

(2) 筆者が補足として作成した側面視

(3) エネルギーの計算結果

図 4-3-3 4H-SiC Si 面 Pennington らによる第一原理計算モデルと計算に用いた窒素配置位置 (h1, h2, t, b) とエネルギー計算結果. 9 個所中 3 個所に窒素を配置する場合が最も安定<sup>5)</sup>

#### 4.4 4H-SiC 界面窒化モデルの検証と考察

4.3.2 の考察より、Si 面の窒素数は最表面の炭素数の  $1/3$  (0.333 個) であるとし、面密度並びに濃度を算出した。また m 面と Si 面については 2.5 (SiO<sub>2</sub> 堆積膜 75nm、1300°C、30min、NO-POA)、C 面については 3.2 (ベアウェーハ、1300°C、240min、NO-POA) で得られた窒素面密度と濃度をあわせて記載し、その計算値に対する実験値の比を算出した (表 4-4-1)。面密度の実験値と計算値との誤差は Si 面で +18%、C 面で -13% となり、SIMS の精度を考慮すると許容の範囲であった。濃度は窒素が 3.4nm にボックス型に広がって計測されたと仮定し、m 面同様反応界面にのみ窒素が存在しているとして再計算した。C 面は酸化量が 31.5nm、界面のラフネスが 9.56nm と Si 面や m 面の酸化量、ラフネスと比べると大きく<sup>6)</sup>、SIMS 半値幅も 3.4nm より大きい 3.7nm であった。そこで界面に存在する窒素が 3.7nm にボックス型に広がって計測されたと仮定し、炭素一層の反応界面にのみ窒素が存在したものととして再計算した。濃度は Si 面、C 面、m 面全ての面で誤差 ±10% 以内の素晴らしい一致を見せた。

今回のモデルにより得られた面密度並びに濃度の計算値を他の実験水準のや文献値と比較を行う。図 4-4-1 に比較結果をグラフで、表 4-4-2 に実験値/計算値も算出した測定データを表で示す。縦軸に Si 面、C 面、a 面、m 面の界面窒素面密度を、横軸にサンプル No. を示す。サンプル No.1 は今回のモデルを用いた計算結果である。a 面に関しては実験データが存在しない。表 4-4-2 にみられるように、大部分の測定データは計算値に対する差が 20% 以内の差であったが、一部のサンプルで 20% 以上の差となった。また一般的傾向としてベアウェーハを直接酸化したサンプルの界面窒素面密度が低いように見える (表 4-4-2 に該当サンプル記載)。サンプル No.6 はベアウェーハの面密度が高いが、このサンプルは 3.2 で述べたように 7.5min の NO-POA と時間が短いものでベアウェーハの方が酸化量が多くその分窒化も進行しているためである。それ以外のベアウェーハは低い窒素面密度が得られている。サンプル No.6, 7, 8, 9 の SIMS は一括で計測したことで測定誤差は数%程度と考えられるため、そのような相対的な傾向が存在する可能性は高い。全般的には SIMS の測定精度を考慮すると許容範囲内であると言えるが、今回把握しきれていない界面窒化のメカニズムが存在している可能性は高い。また、モデルの正確な検証のためには SIMS だけではなく、より絶対精度の高い計測技術を合わせて用いる必要があると

考える。

表 4-4-1 4H-SiC Si 面、C 面、a 面、m 面の今回提案した界面窒化モデルを用いて計算を行った飽和面密度と飽和濃度並びに実験値との比較表

項目	単位	Si面	C面	a面	m面	
面密度	面積当たり窒素数	0.333	1	2.670	3	
	単位面積	(nm <sup>2</sup> )	0.08194	0.08184	0.26745	0.30883
	面密度 (計算値)	(個/cm <sup>2</sup> )	4.07E+14	1.22E+15	9.98E+14	9.71E+14
	面密度 (実験値)	(個/cm <sup>2</sup> )	4.80E+14	1.07E+15		9.86E+14
	面密度比 (実験値/計算値)	-	1.18	0.87	-	1.02
濃度	窒素分布単位体積当たり窒素数	0.333	1	2.670	3	
	窒素分布単位体積	(nm <sup>3</sup> )	0.020567	0.020567	0.04114	0.05485
	濃度 (計算値)	(個/cm <sup>3</sup> )	1.62E+22	4.86E+22	6.49E+22	5.47E+22
	濃度 (実験値 : 3.4nmに分布したと仮定)	(個/cm <sup>3</sup> )	1.27E+21	3.17E+21	-	2.58E+21
	窒素分布面間距離	(nm)	0.2510	0.2510	0.1538	0.1776
	濃度 (修正実験値1 : 窒素分布面間距離に分布したと仮定=実験値×3.4/窒素分布面間距離)	(個/cm <sup>3</sup> )	1.72E+22	4.29E+22	-	4.94E+22
	濃度比 (修正実験値/計算値)	-	1.06	0.88	-	0.90
	濃度 (修正実験値2 : 実験値の分布幅が3.7nmで、それが窒素分布面間距離に分布したと仮定=実験値×3.7/窒素分布面間距離)	-	-	4.67E+22	-	-
	濃度比 (修正実験値/計算値)	-	-	0.96	-	-

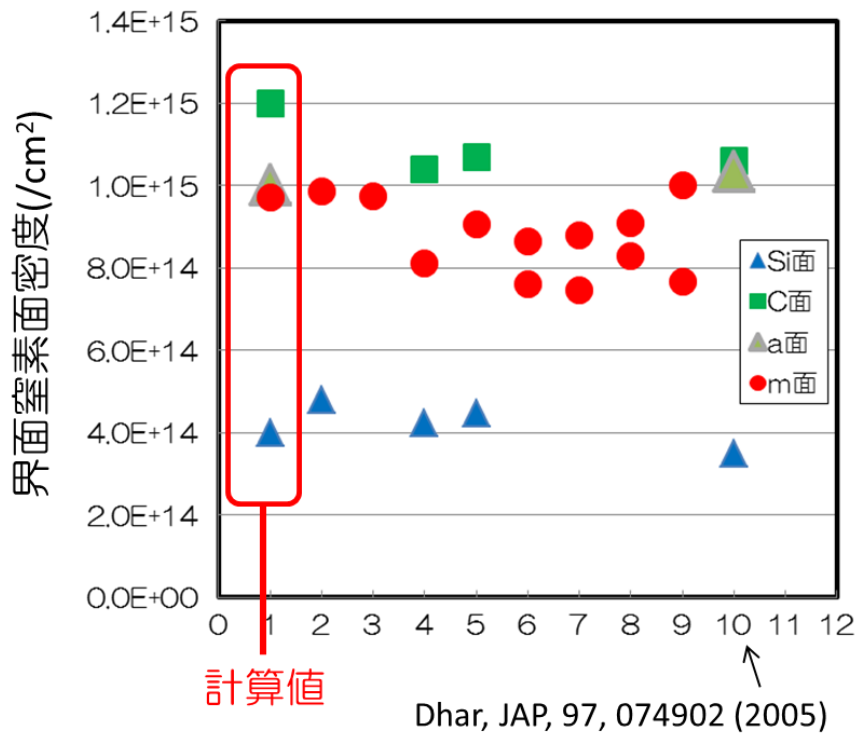


図 4-4-1 今回提案のモデルを用いて計算した各面の界面窒素面密度と実験値比較

表 4-4-2 今回提案のモデルを用いて計算した各面の界面窒素面密度と実験値比較

No.	Si面		C面		a面	m面		ウェーハ	出典
	測定値	測定値/ 計算値	測定値	測定値/ 計算値		測定値	測定値/ 計算値		
1	4.0E+14		1.2E+15		1.0E+15	9.7E+14			計算値
2						9.9E+14	1.02		2.5
3	4.8E+14	1.20				9.7E+14	1.00		
4	4.2E+14	1.06	1.0E+15	0.87		8.1E+14	0.84	ペア	
5	4.5E+14	1.12	1.1E+15	0.89		9.1E+14	0.93	ペア	3.2
6						8.7E+14	0.89	ペア	
						7.6E+14	0.78		3.3
7						7.5E+14	0.77	ペア	
						8.8E+14	0.91		
8						8.3E+14	0.86	ペア	
						9.1E+14	0.94		
9						7.7E+14	0.79	ペア	3.3
						1.0E+15	1.03		
10	3.5E+14	0.88	1.1E+15	0.88					7)

最後に 4-2-1 で示した界面窒化模式図を用いて改めて図 4-4-2 に窒化界面状態を示す。まず図右側の窒素分布について、1nm 以下の線分解能の窒素分布計測は一般に困難であるが、今回提案する窒化モデルを用いた計算値が SIMS の測定広がり を考慮すると実験値と良い一致を示したことから計算値を記載すると、窒素分布幅は 0.251nm (Si 面、C 面)、0.1538nm (a 面)、0.1776nm (m 面) と計測値よりも相当シャープな分布である。ピーク濃度も 1.62E22/cm<sup>3</sup> (Si 面)、4.86E22/cm<sup>3</sup> (C 面)、6.49E22/cm<sup>3</sup> (a 面)、5.47E22/cm<sup>3</sup> (m 面) であると推測される。図左側に示すように、飽和窒素量は面毎に特徴のある窒素導入数に起因した値となる。窒化反応中の窒素の導入と離脱はともに酸化反応がトリガーとなり発生する。また界面に一度導入された窒素は、高い比率で再窒化に寄与する。

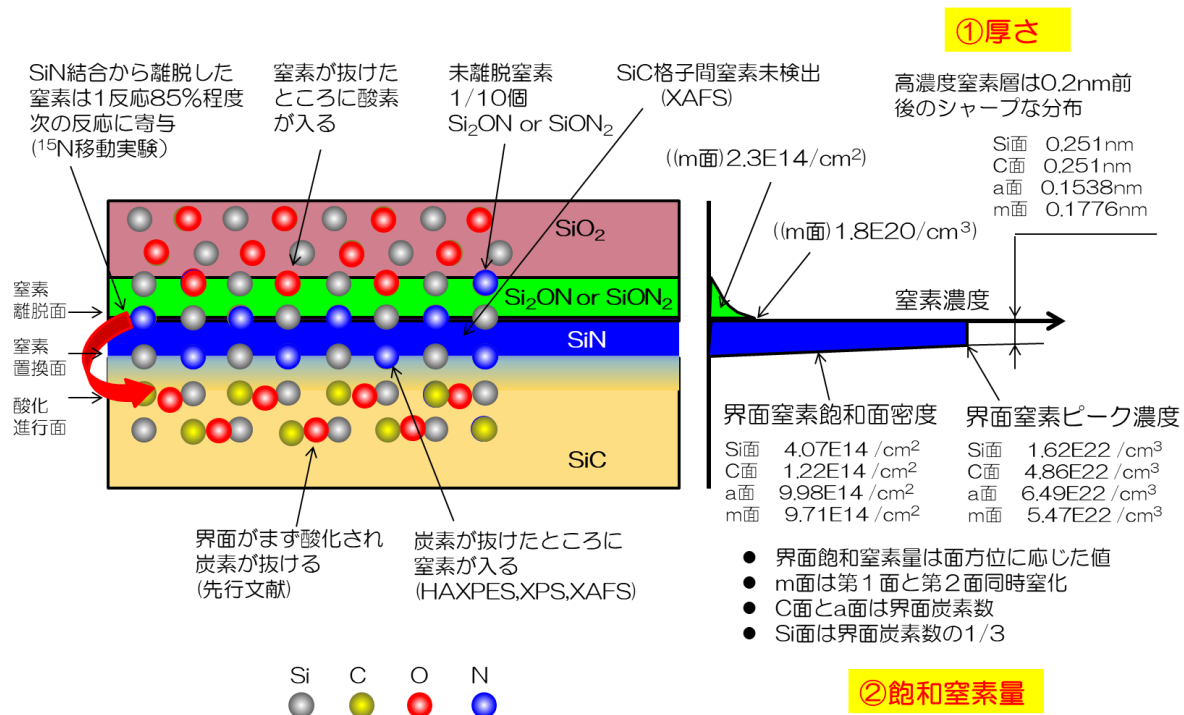


図 4-4-2 SiC 界面窒化推定図 (修正版)

#### 4.5 参考文献

- 1) G. G. Jernigan, R. E. Stahlbush, and N. S. Saks, "Effect of oxidation and reoxidation on the oxide-substrate interface of 4H- and 6H-SiC", Appl. Phys. Lett., Vol. 77, No. 10, 4 September 2000
- 2) N. S. Saks and D. I. MaW, B. Fowler, "Nitrogen depletion during oxidation in N<sub>2</sub>O", Appl. Phys. Lett. 67 (3), 17 July 1995
- 3) Goro Honjo, "On the Anomalous Structures of Silicon Carbide", Journal of the Physical Society of Japan, July 15, 1949, Vol. 4, No. 4-6, pp. 352-352
- 4) Y. Xu, X. Zhu, H. D. Lee, C. Xu, S. M. Shubeita, A. C. Ahyi, Y. Sharma, J. R. Williams, W. Lu, S. Ceesay, B. R. Tuttle, A. Wan, S. T. Pantelides, T. Gustafsson, E. L. Garfunkel, and L. C. Feldman, "Atomic state and characterization of nitrogen at the SiC/SiO<sub>2</sub> interface", JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 115, 033502 (2014)
- 5) G. Pennington and C. R. Ashman, "Nitrogen passivation of (0001) 4 H - Si C silicon-face dangling bonds", APPLIED PHYSICS LETTERS 91, 072106 (2007)
- 6) 本論文付録【NO-POAによる界面荒れ評価】

## 第5章 結論

4H-SiC m 面トレンチ MOSFET の移動度向上を目的に、m 面界面への窒素の「導入」「脱離」「飽和」現象を詳細に調査し、他の面にも適用可能な窒素導入モデルを提案した。モデルの概要は下記のとおり。

- ・ 界面窒素面密度が高い方が移動度は高く、C-V 特性も良好な値を示す。
- ・ ただし界面窒素面密度は飽和し、Si 面、C 面、a 面、m 面の各面で異なる飽和値を持つ。
- ・ 窒化は酸化面で酸化により C が抜けた時 (CO loss 時)に窒素が元 C が存在していたサイトに入り Si と結合することにより起こる
- ・ 窒素脱離は次の面の C が酸化した時におこる
- ・ 従って Si と窒素が結合した界面は、酸化反応界面の一単位面にしか存在しない
- ・ 窒素が入る場所は面方位特有のものであり、厚みは窒化の繰り返し面間隔である
- ・ m 面は第 1 面と第 2 面の 2 面で一単位界面形成、Si 面は一面の炭素数の 1/3 しか窒化しない。C 面、a 面は面方位に応じた面単位で全炭素を窒素置換して窒化進行
- ・ 上記モデルで窒素面密度は約 20%以内、濃度は 10%以下で実験値と良い一致を示した
- ・ 実験データを取得した SIMS の測定精度を考慮すると、優れた一致であると言える

### 【実用化への貢献】

- ・ 今回の結果より、移動度向上のための NO-POA による界面への窒素導入には限界がありすでにその飽和値に達していることがわかった
- ・ 当面の NO-POA の活用においては酸化膜側の性能向上に主眼をおいた開発テーマが有効
- ・ 界面の窒素の働き（終端効果、ドナー化等）を明確にすることで新しい改善の可能性はある
- ・ 窒素濃度を上げるには酸素を用いない窒素導入法、すなわちイオン注入、プラズマ窒化、超高温 N<sub>2</sub> 窒化などの非酸化プロセスが必要
- ・ 今後は窒素以外のリンやバリウムなど新たな材料と、その性能向上メカニズムの研究が必要

### 【今後の課題】

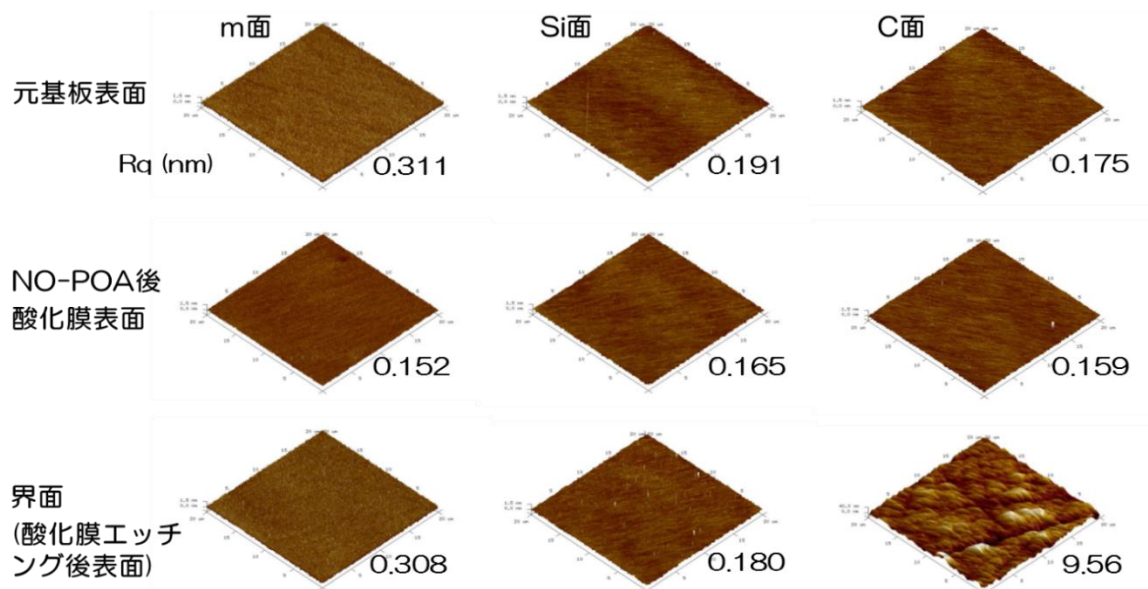
全般的には SIMS の測定精度を考慮すると許容範囲内であると言えるが、今回把握しきれていない界面窒化のメカニズムが存在している可能性は高く、より詳細な解析と考察による高精度モデル開発の余地が残る。また、モデルの正確な検証のためには SIMS だけではなく、より絶対精度の高い計測技術を合わせて用いる必要があると考える。

今回は移動度にテーマを絞って目標設定を行い、そこから界面の窒化モデルの確立を目指し研究を進めたが、産業的に MOSFET の特性向上策を考えた場合、移動度すなわちオン抵抗以外に閾値の安定性や高閾値の設定などの課題が存在する。閾値の安定性には電子並びにホールトラップ現象が深くかかわっていることは知られており、2.5.2 でも述べたように移動度向上と閾値安定にはトレードオフが存在する。今回あまり深く考察することができなかったが、HAXPES や XPS の結果より窒素は導入時にすでに結晶側で約 1 割程度は Si<sub>2</sub>NO や SiNO<sub>2</sub> の形で存在しており、界面直近の酸化膜側に 10%弱の窒素が存在していることも確認できたことから、この酸素と結合している窒素の多くがその結合を維持したまま酸化膜側に移行していく可能性もあると考えている。界面近傍の酸化膜側の窒素は、特性の悪い酸化窒化膜を形成し各種トラップ順位を形成しゲート特性を悪化させる可能性があるため低減することが望ましい。(Si デバイスでは閾値安定性のために酸化膜中に形成される窒化膜は、界面から少し離れたところに形成される。) この界面直近の窒素濃度を決めるメカニズムが明確になれば、閾値安定性の改善も可能となるのではないかと期待する。

## 付録

### 【NO-POA による界面荒れ評価】

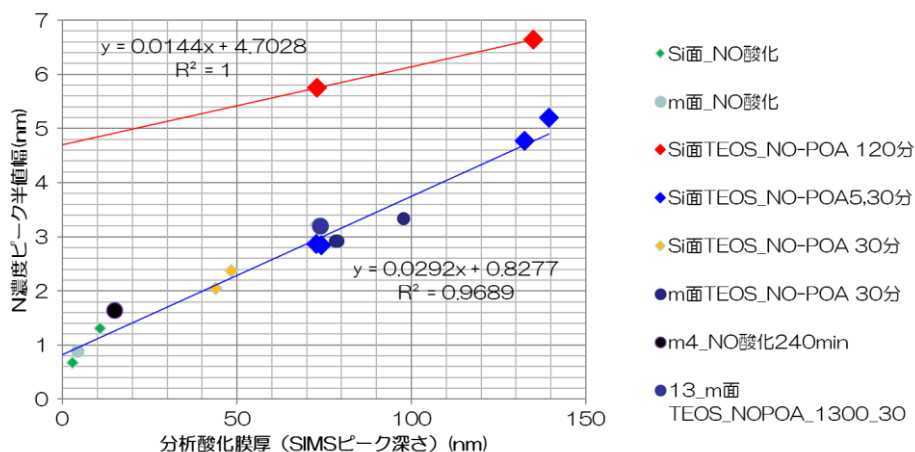
3.2 で行ったベア SiC ウェーハ(m 面、Si 面、C 面)の NO-POA240min サンプルの表面ラフネス計測結果。NO-POA 前、NO-POA 後の酸化膜表面、NO-POA 後の酸化膜剥離後の界面のラフネスを AFM を用いて計測（視野： $20\mu\text{m}$ □、z 幅： $\pm 1.5\text{nm}$ ）。



NO-POA 後の酸化膜表面は、元の基板表面と同等の荒れかむしろ平滑化されている。NO-POA 後の界面のラフネスは、m 面、Si 面では元基板表面と同等であり SIMS 深さ方向プロファイル形状に影響を与えないが、C 面ではラフネスが  $9.56\text{nm}$  に増加しており明らかにプロファイルに影響を与える。

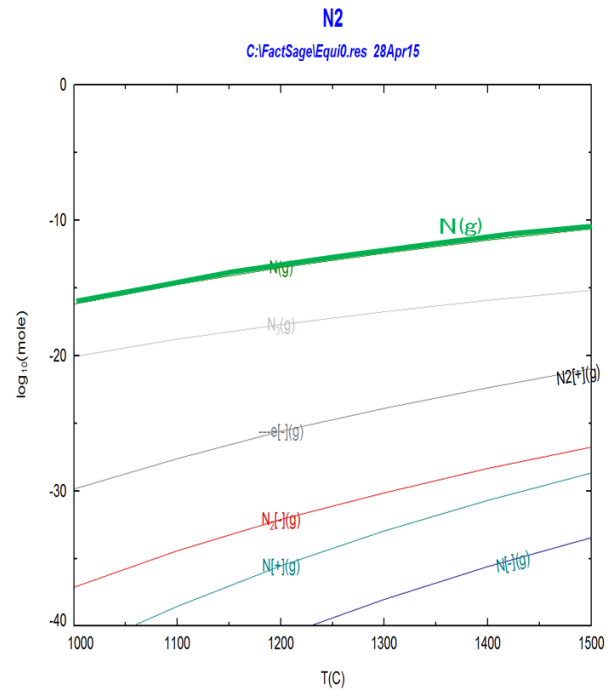
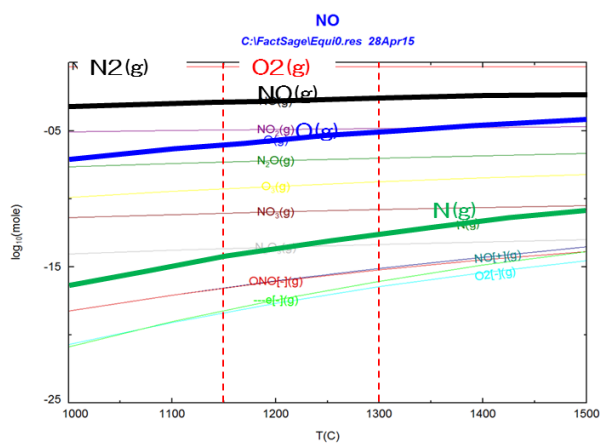
### 【SIMS N 半値幅と分析酸化膜厚の関係】

SIMS 分析における分析酸化膜厚さと計測データの半値幅の関係を求めた。サンプルは全て Si 面と m 面であるため、C 面に発生する界面ラフネスの影響は考慮されていない。赤線で示されるデータのみ大きく傾向が異なるが理由は不明。ここでは除外して考えることとする。サンプル数の多い酸化膜厚  $75\text{nm}$  近傍の半値幅はおよそ  $3\text{nm}$  となった。また酸化膜厚  $0\text{nm}$  の y 切片は  $0.8\text{nm}$  となり、この計測方法が持つ深さ方向の限界解像度を示している。



## 【NO と N2 の熱平衡計算】

酸化、窒化、還元などの作用は反応に寄与するガスの分圧の影響が大きい。NO ガスの場合、NO の形で存在するガスは微量であり、多くは N2, O2 の形で存在する。またそれ以外に N, O などの形で存在するが、存在比率は小さいと考えられている。その状況を把握するために、NO ガスと N2 ガスの熱平衡状態の計算を実施した。その結果、NO ガス 1300℃でも大部分は N2, O2 の形で存在し、NO ガスで 1E-3、O ガスで 1E-5、N ガスで 1E-10 程度の比率となることが分かった。





## 謝辞

本研究は筑波大学大学院 数理物質科学研究科 山部紀久夫教授とトヨタ自動車株式会社共同で実施されたもので、学位取得にかかる論文執筆は山部紀久夫教授のご指導のもと行われました。山部教授の適切かつ時に時間を忘れての情熱的なご指導に感謝いたします。山部教授の豊富な研究経験に裏付けられたご助言・ご指導なくしては、この論文シナリオの完成はなかったと思います。

本研究を進めるに当たり、実験計画、実行、分析などの企画から実務まで幅広く全面的に助言ならびに協力をいただいた、職場同僚で m 面 MOS ゲート W/G メンバーである三上主幹、成岡主幹、藤原GM、大西主幹、朽木氏全員に深く感謝いたします。この W/G の存在なくして、この研究の進展はありませんでした。特に自分の基礎知識の不足を痛感したことから輪講の提案を行ったところ全員快く賛同いただき、そこからの一年に渡る毎週の輪講により飛躍的に知識が充実し、研究にドライブがかかりました。またここで読み込んだ論文構成を良く検討することで、自身の論文構成構築の参考になりました。特に三上主幹は博士号をお持ちであることから、実験計画、分析手配、結果の解釈から査読論文内容の精査まで幅広くご指導いただき、多くの助言をいただきました。三上主幹の存在なくしては、この論文の完成はなかったと確信しております。本当にありがとうございました。また第一原理計算にチャレンジいただき、本論文の考察のヒントを与えていただきました永吉氏にも感謝いたします。永吉氏提供のボールアンドスティックモデルを用いて窒化状態を考察することで、この論文のクライマックスともいえる m 面独特の界面窒化モデルの発見につながりました。デバイスシミュレーションでパワーMOSFET の抵抗計算の協力をいただいた齋藤主幹に感謝いたします。また忙しいなかこの研究活動にご理解をいただき室員の工数を配慮いただきましたプロセス先行開発室の伊藤室長、プロセス開発で協力いただきました SiC プロセス開発担当メンバーの皆さんに感謝いたします。

産総研のプロセス設備を借用させていただくに当たって、快く設備利用を承認いただきました産総研の原田様、小杉様に感謝いたします。産総研に出向中に産総研の設備を用いて実験に協力いただいたプロセス先行開発室の辻村氏と岩橋氏に感謝いたします。

SiC デバイスやプロセスの共同開発を行っているトヨタ中央研究所とデンソーの SiC ゲート W/G チームメンバーの皆様には、実験や分析を進める上で、助言やデータの共有をさせていただき考察を深めることができました。感謝しております。

すでにトヨタ自動車を離れて、現在車いす開発のベンチャー企業 Whill 株式会社でご活躍中の佐藤圭悟さんには、この論文テーマ設定で協力と助言をいただきました。大変感謝しております。

筑波大学に入学を承諾いただきました 2014 年入学当時部長の井上さん(住友電装(株))に感謝いたします。また、論文提出最終段階では審査向けプレゼンテーション資料作成や論文執筆に膨大な時間が必要となってしまう、短期間に大量の年休を取得せざるを得なくなったにも関わらず、快く年休取得承認をしていただきました篠島部長にも感謝いたします。

そして何よりも、仕事と学業および論文執筆で忙しい日々を心身共に全面的に支え励まし、私のことを何よりも大切に考え、すべてに優先してこの 2 年半の日々の暮らしと学業を支えてくれた最愛の奥さん晴ちゃんに最大限の感謝の気持ちと、すべての愛を捧げます。

## 発表論文と学会リスト

### 【査読付き学術論文】

Masayasu Ishiko, Koji Hotta, Sachiko Kawaji, Takahide Sugiyama Tomoyuki Shouji, Takeshi Fukami and Kimimori Hamada, “Investigation of IGBT turn-on failure under high applied voltage operation”, *Microelectronics Reliability* 44 (2004) 1431-1436

高谷秀史, 宮城恭輔, 濱田公守, ” フローティングP型パワーMOSFET(FITMOS)のAC動作時のオン抵抗改善”, *電気学会論文誌D (産業応用部門誌)*, 130(2), 144-149, 2010-02-01

Kimimori Hamada, “Present Status and Future Prospect of Electronics in EVs/HVs and Expectation for Wide-bandgap Semiconductor Devices”, *Physical status solidi, Silicon Carbide, Vol. 2: Power device and Sensors*, 2010, pp. 1-19, ISBN: 978-3-527-40997-6.

Hidefumi Takaya, Kyosuke Miyagi and Kimimori Hamada, “Improvement of AC characteristics of FITMOS”, *IET Electronics Letters* Vol.46, No.2, 21 January 2010, pp.172-173

西田秀一, 庄司智幸, 大西豊和, 藤川東馬, 野瀬昇, 石子雅康, 濱田公守, “ハイブリッド車用パワー半導体の宇宙線耐量”, *電気学会論文誌 C, Vol.130, No.6*, pp.934-948, 2010-06-01

Hidefumi Takaya, Kyosuke Miyagi and Kimimori Hamada, ” Power metal oxide semiconductor field effect transistors with accurate current sensing function over a wide temperature range”, *IET Power Electronics*, 2011, Vol.4, Iss.5, pp.503-507

Hidefumi Takaya, Kyosuke Miyagi and Kimimori Hamada, ” Improvement of floating island and thick bottom oxide trench gate metal-oxide-semiconductor field-effect transistor”, *IET Power Electronics*, 2011, Vol.4, Iss.8, pp.860-866

Tomoyuki Shoji, Shuichi Nishida, Toyotazu Ohnishi, Tsuma Fujikawa, Noboru Nose, Kimimori Hamada and Masayasu Ishiko, “Reliability Design for Neutron Induced Single-Event Burnout of IGBT”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.131 No.8 pp.992-999, 2011

Takeshi Ueta, Masaru Nagao and Kimimori Hamada, “Application of Electrical Circuit Simulations in Hybrid Vehicle Development”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, TED-2012-06-0683-SI.R2, Vol.60, Issue:2, p544-550

Hirokazu Fujiwara, Hideki Naruoka, Masaki Konishi, Kimimori Hamada, Takashi Katsuno, Tsuyoshi Ishikawa, Yukihiko Watanabe, and Takeshi Endo, “Relationship between threading dislocation and leakage current in 4H-SiC diodes”, *Applied Physics Letters* 100, 242102 (2012)

Hirokazu Fujiwara, Hideki Naruoka, Masaki Konishi, Kimimori Hamada, Takashi Katsuno, Tsuyoshi Ishikawa, Yukihiko Watanabe, and Takeshi Endo, “Impact of surface morphology above threading dislocations on leakage current in 4H-SiC diodes”, *Applied Physics Letters* 101, 042104

(2012)

Angus Bryant, Nii-Adotei Parker-Allotey, Dean Hamilton, Ian Swan, Philip A. Mawby, Takashi Ueta, Toshifumi Nishijima and Kimimori Hamada, “A Fast Loss and Temperature Simulation Method for Power Converters, Part I: Electrothermal Modeling and Validation”, IEEE Transactions on Power Electronics (2012), Volume: 27, Issue: 1  
Pages: 248 - 257

Ian Swan, Angus Bryant, Philip A. Mawby, Takashi Ueta, Toshifumi Nishijima and Kimimori Hamada, “A Fast Loss and Temperature Simulation Method for Power Converters, Part II: 3-D Thermal Model of Power Module”, IEEE Transactions on Power Electronics (2012), Volume: 27, Issue: 1, Pages: 258 – 268

Tomoyuki Shoji, Shuichi Nishida and Kimimori Hamada, “Triggering Mechanism for Neutron Induced Single Event Burnout in Power Devices”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 52, Number 4S, 22 April 2013

Tomoyuki Shoji, Shuichi Nishida, Kimimori Hamada, and Hiroshi Tadano, “Experimental and simulation studies of neutron-induced single-event burnout in SiC power diodes”, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 04EP03 (2014)

Tomoyuki Shoji, Shuichi Nishida, Kimimori Hamada and Hiroshi Tadano, “Cosmic ray neutron-induced single-event burnout in power devices”, IET Power Electronics 2015, Volume: 8, Issue: 12, Pages: 2315 – 2321

Tomoyuki Shoji, Shuichi Nishida, Kimimori Hamada and Hiroshi Tadano, “Analysis of neutron-induced single-event burnout in SiC power MOSFETs”, Microelectronics Reliability, Volume 55, Issues 9–10, August–September 2015, pp. 1517-1521

Kimimori Hamada, Masaru Nagao, Masaki Ajioka, Kawai, Fumiaki, “SiC - Emerging Power Device Technology for Next-Generation Electrically Powered Environmentally Friendly Vehicles” , Transactions on Electron Devices, Vol: 62, Issue: 2, 2015, pp. 278-285

Tomoyuki Shoji, Shuichi Nishida, Kimimori Hamada and Hiroshi Tadano, “Observation and Analysis of Neutron-Induced Single-Event Burnout in Silicon Power Diodes”, IEEE Transactions on Power Electronics, Special Issue on Robust Design and Reliability in Power Electronics, May 2015, Vol. 30, Number 5, p.2474, ISSN 0885-8993

Kimimori Hamada, Akira Mikami, Hideki Naruoka and Kikuo Yamabe, “Analysis of Nitrogen State on MOS Interface of 4H-SiC m-Face after Nitric Oxide Post Oxidation Annealing (NO-POA)”, e-Journal of surface science and nanotechnology, Vol.15 (2017) 1-5

【口頭発表及び講演等】

K. Hamada, F. Kawai, T. Kushida, A. Kawahashi, “A 60V BiCDMOS device technology for Automotive Applications”, in Proc. IAS, 1995 Annual Meeting, pp.986-990, vol.2

K. Hamada, T. Kushida, A. Kawahashi, M. Ishiko, “A 600V 200A Low Loss High Current Density Trench IGBT for Hybrid Vehicles”, in Proc. ISPSD, 2001, pp.449-452

濱田公守、榑田知義、川橋憲、” ハイブリッド車用 600V 200A 低損失高電流密度トレンチ I G B T ” , 電気学会 電子デバイス半導体電力変換合同研究会 (2001) 沖縄

K. Hotta; T. Fukami; K. Hamada; T. Sugiyama; M. Ishiko, “An abnormal turn-off surge suppression concept for PT-IGBTs at high voltage operation”, 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Pages: 591 - 596 Vol.1

Hidefumi Takaya, Kyosuke Miyagi, Kimimori Hamada, Yasushi Okura, Norihito Tokura and Akira Kuroyanagi , “Floating Island and Thick Bottom Oxide Trench Gate MOSFET (FITMOS) -60V Ultra Low ON-Resistance Novel MOSFET with Superior Internal Body Diode-“, in Proc., 2005 17th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD),

Kimimori Hamada, Takeshi Ueta, Kaoru Torii, Takashi Kijima, “Development of power electronics circuits simulation for hybrid vehicle inverters”, in Proc. SIA-APE, 2006

Kimimori Hamada, “Evolution of Hybrid Electric System and its support technologies”, IEEE IAS,in Proc. APEC 2007, Anaheim, 28 February 2007

Kimimori Hamada, “Future Automotive Technologies and Potential of SiC for Sustainable Mobility”, SiC Users Forum 2007 Copenhagen, ECPE, (Keynote)

Kimimori Hamada, “Power Electronics Stage Design Driven by Era and System Requirements”, in Proc. SIA-APE, 2007

Kimimori Hamada, “Present Status and Future Prospect of Electronics in Evs/HVs and Expectation for Wide-bandgap Semiconductor Devices”, Materials Science Forum, Vols. 600-603, 2009, pp. 889-893, in ICSCRM (2007), (Keynote)

Kimimori Hamada, et al., “Advanced Floating Island and Thick Bottom Oxide Trench Gate MOSFET (FITMOS) with reduced RonA during AC operation by passive hole gate and improved BVdss RonA trade-off by elliptical floating island”, in Proc. SIA-APE, 2007

Kimimori Hamada, “Present Status and Future Prospect of Electronics in EVs/HVs and Expectation for Wide-bandgap Semiconductor Devices –The latest version 2009”, ECPE SiC Workshop 16, June, 2009

Kimimori Hamada, Takeshi Ueta and Koji Hotta, “Low loss High Ruggedness PT-IGBT for 500V variable Voltage Hybrid System”, in Proc. IPEC Niigata, 2010,

Kimimori Hamada, “Toyota's Activity on Power Electronics for Future Mobility”, 14th European Conference on Power Electronics and Application (2011), Birmingham, (Keynote)

Kimimori Hamada, “SiC Device and Power Module Technologies for Environmentally Friendly Vehicles”, 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems(CIPS2012), ECPE, Nurnberg, (Keynote)

Kimimori Hamada, “The Role of Advanced Automotive Electronics: Recent Progress & Developments”, SEMICON China 2012, SEMI, CECC, Shanghai, (Invite)

Kimimori Hamada, “The Role of Advanced Automotive Electronics: Recent Progress & Developments”, in Proc.ISAP 2012, Nagoya, pp.1-2, IEEE Antennas and Propagation Society, (Keynote)

Hidefumi Takaya, Jun Morimoto, Kimimori Hamada, Toshimasa Yamamoto, Jun Sakakibara, Yukihiko Watanabe and Narumasa Soejima, “A 4H-SiC trench MOSFET with thick bottom oxide for improving characteristics”, in Proc., 2013 25th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD), Pages: 43 – 46

Kimimori Hamada, “Challenge of Adopting TCAD in the Development of Power Semiconductor Devices for Automotive Applications”, in Proc. SISPAD 2014 Yokohama, IEEE EDS, (Keynote)

Kimimori Hamada, “Expectation of great potential of SiC devices for environmentally friendly vehicles”, ISiCPEAW 2014, SiC Power Center, Srocholm, (Keynote)

濱田 公守, “サステイナブルモビリティへの対応と SiC 実用化に向けた取り組み”, CEATEC 2014, JEITA, 2014 年 10 月 8 日, 幕張メッセ

濱田 公守, “SiC 実用化に向けたトヨタ自動車の取り組み”, 応用物理学会 先進パワー半導体分科会シンポジウム, 応用物理学会, 2014 年 11 月 19 日, ウィンクあいち

濱田 公守, “ハイブリッド車用パワーエレクトロニクス技術と次世代パワーデバイス開発への取り組み”, 愛知地域スーパークラスター成果報告会, 科学技術交流財団, 2014 年 12 月 2 日, トヨタ産業記念会館 大ホール

濱田 公守, “ハイブリッド車用パワーエレクトロニクス技術と SiC 実用化に向けた取り組み”, 第 2 回筑波大学パワーエレクトロニクス未来技術研究会, 筑波大学 パワーエレクトロニクス研究室, 2014 年 12 月 4 日, 筑波大学東京キャンパス

Kimimori Hamada, “Great Potential of SiC Devices for environmentally friendly vehicles”, APE 2015, SIA, 14<sup>th</sup> April 2015, Paris, France

Tomoyuki Shoji, Shuichi Nishida, Kimimori Hamada, Hiroshi Tadano, “Analysis of neutron-Induced single-event burnout in SiC power MOSFETs”, 26<sup>th</sup> European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis, ESREF, Toulouse, France

Kimimori Hamada, “Toyota’s challenge of applying SiC power semiconductors to environmentally friendly vehicles”, ECPE SiC & GaN User Forum, European Center for Power Electronics, 20<sup>th</sup> April 2015, University of Warrick, Coventry, England

Kimimori Hamada, “Installation of all-SiC Inverter System to Hybrid Electric Vehicle”, ICSCRM2015, Institute for Microelectronics and Microsystems, Giardini Naxos, Italy, (Keynote)

Kimimori Hamada, “Toyota’s challenge of applying SiC power semiconductors to environmentally friendly vehicles”, PCIM-ASIA 2016, Mesago PCIM, 24<sup>th</sup> Jun. 2015, Shanghai, China

濱田 公守, 杉浦和利, 谷田篤志, 田村和孝, “トヨタの環境対応車両への SiC パワーデバイス適用に向けた取り組み”, モーター技術シンポジウム, 日本能率協会, 2015 年 5 月 22 日, 幕張メッセ

濱田 公守, “環境対応車両開発視点からみたワイドバンドギャップ半導体への期待”, スーパークラスター国際フォーラム, JST, 2015 年 12 月 3 日, 京都リサーチパーク

濱田 公守, “SiC パワー半導体の環境対応車両への適用に向けたチャレンジ”, SEMICON Japan 2015, SEMI Japan, 2015 年 12 月 16 日, 東京ビッグサイト

Kimimori Hamada, “Toyota’s challenge of applying SiC power semiconductors to environmentally friendly vehicles”, SEMICON Korea 2016, SEMI Korea, 27<sup>th</sup> Jan. 2016, Seoul, Korea

濱田 公守, “SiCの開発の現状と車載への展望”, 日経BP カーエレクトロニクスの最新動向を二日間でおさえる, 2016 年 3 月 15 日, ラーニングスクエア新橋

Kimimori Hamada, “Toyota’s challenge of applying SiC power semiconductors to environmentally friendly vehicles”, SEMICON China 2016, SEMI China, 28<sup>th</sup> March 2016, Shanghai, China

濱田 公守, “ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第162委員会 第100回研究会 記念シンポジウム”, 日本学術振興会, 2016 年 6 月 1 日, 東京大学 生産技術研究所 コンベンションホール

Takashi Okawa, Hiroomi Eguchi, Masato Taki and Kimimori Hamada, “2000 V SOI LDMOS with new drift structure for HVICs”, 2016 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), pp.435 – 438

Kimimori Hamada, “Power Electronics technologies for environmentally friendly vehicles”, European Space Power Conference (ESPC) 2016, 3<sup>rd</sup> Oct. 2016, European Space Agency, Thessaloniki, Greece

Kimimori Hamada, “Toyota’s challenge of applying SiC power semiconductors to environmentally friendly vehicles”, Power Electronics Conference, SEMI Taiwan, 14<sup>th</sup> Oct. 2016, TWTC Nangang, Taiwan

Kimimori Hamada, “Challenge of applying SiC power semiconductor devices to HEVs/FCVs and new technologies of the latest electrified environmentally friendly vehicles”, Vehicle Power and Propulsion Conference) 2016, IEEE VTS, 18<sup>th</sup> Oct. 2016., Hangzhou, China, (Keynote)

#### 表彰等

2005 17th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Best Paper Award;

“Floating Island and Thick Bottom Oxide Trench Gate MOSFET (FITMOS) -60V Ultra Low ON-Resistance Novel MOSFET with Superior Internal Body Diode- “,  
Hidefumi Takaya, Kyosuke Miyagi, Kimimori Hamada, Yasushi Okura, Norihito Tokura and Akira Kuroyanagi

2014 電気学会振興賞 論文賞; “Reliability Design for Neutron Induced Single-Event Burnout of IGBT”