

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：83906

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05049

研究課題名(和文)4H-SiC非極性面の欠陥と表面形状が酸化膜へ及ぼす影響の検討

研究課題名(英文)Effects of defects and surface structure on oxide film on non-polar 4H-SiC plane

研究代表者

石川 由加里(Yukari, Ishikawa)

一般財団法人ファインセラミックスセンター・その他部局等・主席研究員

研究者番号：60416196

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：4H-SiCの非極性面から基底面転位を電子線励起し、その拡張挙動を観察することによってSiCを使ったデバイスの性能劣化の原因とされる積層欠陥の生成と拡張が、1)直接に基底面転位や積層欠陥を励起しなくても電子正孔が供給されれば生じること、2)積層欠陥の直接励起よりも部分転位の励起の方が励起効果が大きいこと、3)動かないとされてきたC-core転位も閾値以上の電子正孔の供給によって可動化することを初めて示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SiCパワーデバイスの順方向ドリフトの原因となる積層欠陥の生成メカニズムに関して新たな知見を得た。これは、電気自動車、電力変換、電車等社会インフラに必要な電力変換素子の信頼性、性能維持に必要な情報となる。また、学術的には光や電子線の照射によって転位が可動化するメカニズムに新たな知見を加えるものである。転位はデバイスだけではなく材料の力学的特性を決めるものであり、光・放射線照射下(宇宙・原子炉等の加工環境下)での材料物性の変化の予測、解明に役立つことが期待される。

研究成果の概要(英文)：We observed the generation and expansion of single Shockley stacking faults which cause the forward voltage drift in 4H-SiC PiN diode from basal plane dislocations in a 4H-SiC from the non-polar plane under electron beam irradiation. We found that 1) not only direct excitation but also indirect excitation which provide electron-hole can generate and expand stacking fault from basal plane dislocation, 2) indirect excitation of partial dislocation is more effective than direct excitation of stacking fault for expand stacking fault and 3) C-core partial dislocation become mobile after supplying a threshold number of electron-hole pairs.

研究分野：材料工学

キーワード：4H-SiC 非極性面 転位 CL 積層欠陥

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

SiC パワーデバイスには(0001)Si 面上に作製するプレーナー型(図1)から開発が進んだため、(0001)Si 面上で欠陥がデバイス特性に及ぼす影響、酸化膜界面の界面準位に関する研究は豊富で十分な知見の蓄積がある。一方、微細化・低オン抵抗化を解決するために開発された、トレンチ型 MOSFET (図1)は(0001)面に

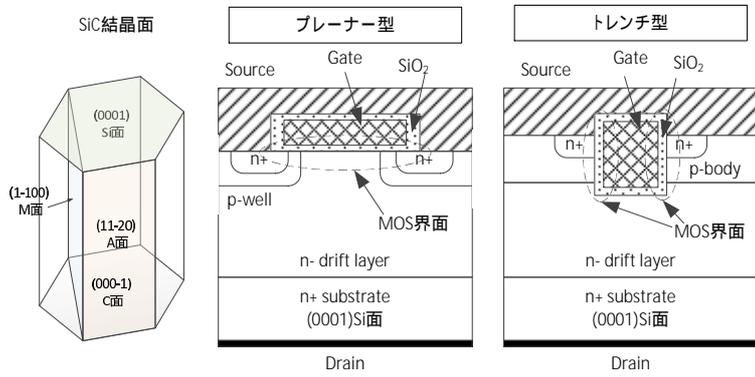


図1 MOSFET の構造を SiC 結晶面の関係

に対して垂直な非極性面({11-20}面(A面)、{1-100}面(M面))をチャネル層として動作する。界面準位密度や移動度の面方位依存性に関する報告は多いものの、A、M面のチャネル層を横切る欠陥の挙動やデバイスの信頼性や寿命に直結する酸化膜の完全性に関する報告は申請者らの知る限り殆どない。

(0001)Si 面では図2に示す様に貫通転位がほぼ垂直に交わり、基底面転位や積層欠陥がほぼ平行な配置を取る。貫通転位が表面に露出した場所に形成される微小なピットやエピ成長時のステップバンチング等の凹凸が酸化膜の異常成長などを引き起こしデバイスの信頼性やリークをもたらすことが知られている。また、基底面転位の拡張やエピ成長プロセスの不完全性によって生じた積層欠陥は量子井戸として働きリークパスとなることが知られている。

一方、A、M面をチャネル層とすると、(1)基底面転位と積層欠陥は面とほぼ垂直に交差するが、貫通転位は面にほぼ平行となる(図2)、(2) Si、Cの両原子が表面にあり、Si層とC層が積層しSiのみが表面に露出している(0001)Si面と異なる。(1)により、(0001)面で凶悪度の高いとされてきた基底面転位および積層欠陥の影響がA、M面でより顕著になると考えられる。また、貫通転位とは異なり、わずかに拡張していることの多い基底面転位がA、M面に露出すると表面に形成される原子配列の乱れ構造が(0001)面の貫通転位とは異なるため、表面に発生するピット構造やそれを原因に引き起こされる酸化膜の異常成長が異なることが予測される。(2)により、(0001)面とはSi酸化およびC排出プロセスが異なることが予測される。以上のことから、A、M面における、欠陥の挙動や構造および結晶面の原子配列とその酸化膜への影響を明らかにすることはトレンチ型 MOSFET 設計における重要な指針となる。

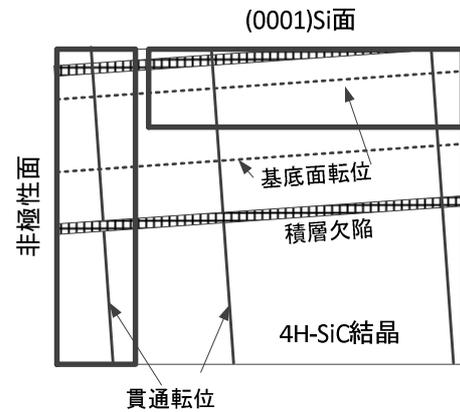


図2 結晶面と欠陥の方位関係

2. 研究の目的

パワーデバイスの微細化・低オン抵抗化という問題を解決するため、トレンチゲート MOSFET の開発が進められている。トレンチ型では研究が進んだ(0001)極性面ではなく{11-20}および{1-100}の非極性面を MOS 界面して用いる。残念ながら、非極性面の酸化膜の完全性に結晶欠陥や表面構造が及ぼす影響に関する知見は殆どなく、デバイス設計の指針を立てにくい。本提案では、4H-SiC の非極性面における欠陥の挙動を明らかにするとともに、欠陥やプロセスが誘起する表面構造が酸化膜の品質に及ぼす影響を調べ、その知見を基にデバイス設計の指針とすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

(0001)面上に成長したエピ膜には基底面転位が少なく、A,M 面における基底面転位の挙動を統計的に評価することが難しい。そこで、A,M 面上のエピ成長膜をモデル試料とする。貫通転位がA,M 面成長で基底面転位に変換するため数千  $\text{cm}^{-2}$  の密度となる。転位の励起と拡張の観察を同時に行うことのできるカソードルミネッセンスマッピング(CLM)でモデル試料を測定し、A、M 面における転位の拡張挙動 (拡張速度、拡張する転位割合、拡張形状)を調べる。全面の電子線走査による観察だけでなく、固定電子線照射による転位の拡張挙動も調べた。電子線照射位置と発光スペクトルの相関から、励起対称と範囲を同定した上で転位拡張挙動を調べた。得られた結果を基に、A,M 面での拡張挙動の差や(0001)面に対する特徴を抽出する。

### 4. 研究成果

(1) A,M 面での電子線走査による基底面転位の拡張 (積層欠陥の生成・拡張) の確認

4H-SiC(11-20)A 面モデル面に露出した基底面転位を電子線で A 面から電子線を走査照射し、転位が拡張しないもの、拡張するが途中で止まるもの、拡張を続けるものの 3 種類があることを確認した。拡張した転位が a 転位であり積層欠陥となることを CL、EBIC、TEM を用いて証明した。a 転位の中にバーガスベクトルが面の垂線と並行ならせんタイプの $\pm 1/3[11-20]$ と平行でない混合タイプの $\pm 1/3[1-210]$ ,  $\pm 1/3[2-1-10]$ があり、前者は拡張が途中で止まり、後者は拡張を続ける。後者について単位時間当たりの転位の拡張幅は電子線の電流密度に比例したが、ある電流密度範囲では拡張が止まり、電流値が閾値を超えると再度拡張を開始した。M 面でも同様に電子線の電流密度に比例して転位は拡張したがその拡張幅は A 面に比べると小さい。また、A 面では転位拡張の閾値は確認できなかったが M 面では確認された。(図 3)

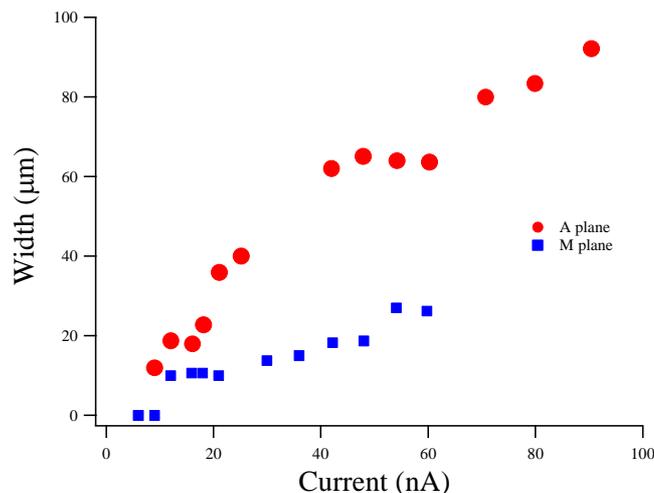


図 3 積層欠陥幅の電流依存性

(2) A 面での固定電子線照射による基底面転位の拡張 (積層欠陥の生成・拡張)

拡張した基底面転位 (積層欠陥) に対し、Si-core 部分転位を中心とした半径  $10\mu\text{m}$  の半円上 (図 4) に固定電子線を照射し CL スペクトルを得た。その結果、積層欠陥上 A を励起した場合は  $420\text{nm}$  の積層欠陥の強い発光と  $390\text{nm}$  の GaN バンド端の弱い発光が検出された。積層欠陥の直接励起に加えて、電子線の直径 (sub- $\mu\text{m}$ ) が積層欠陥幅 ( $0,75\text{nm}$ ) より大きいため積層欠陥の周囲も同時励起されるためである。時計回りに照射位置を移動していく (B C D) と  $390\text{nm}$  の強い発光と  $420\text{nm}$  の弱い発光の組み合わせに替わった。位置 B-D では照射位置と積層欠陥および Si-core 部分転位との間に遮るものはないため電子線励起によって発生した電子正孔対は両方に到達している。Si-core 部分転位を挟んで積層欠陥と対称となる測定位置 (E) では  $420\text{nm}$  発光は検出されなかった。Si-core 部分転位が電子線励起で発生した電子正孔をトラッ

ブしてしまうため積層欠陥発光が認められない。上記の実験で、電子線の照射位置が異なると励起対象が異なることを確認した上で、1minあたりの拡張量を調べた(表1)。その結果、積層欠陥上(A)の励起での拡張量が最も小さく、B-Eに移動するにつれて拡張量が増加することが分かった。特にEでの拡張量は大きかった。これは、積層欠陥の拡張はSi-core部分転位における電子-正孔対の再結合量に比例すると考えると説明が可能である。

表1 励起位置と拡張率の相関

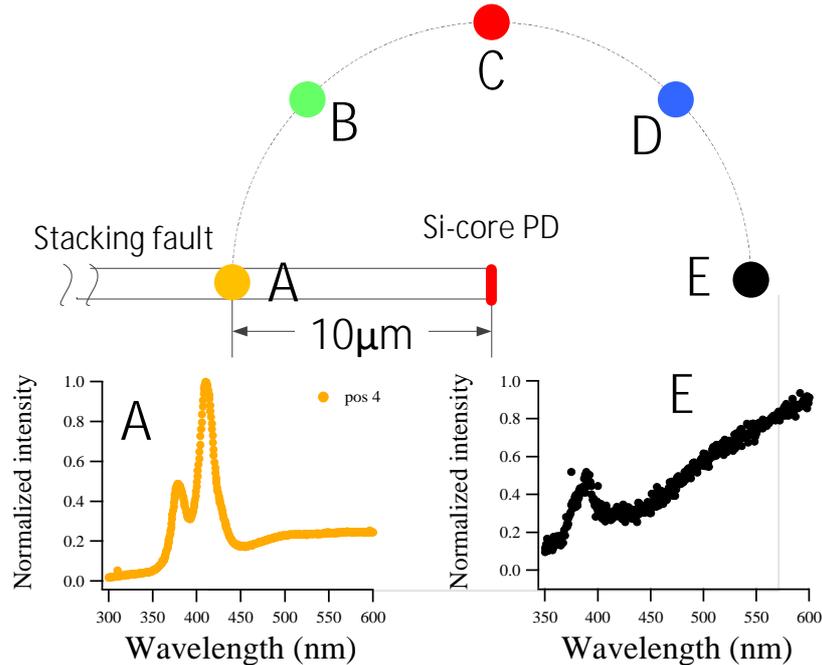


図4 電子線の照射位置とCLスペクトル

表1 電子線照射位置と拡張率の相関

位置	励起方法	励起対象	拡張率(12nA)	拡張率(29nA)
A	直接	積層欠陥	2.4	3.5
B	間接	積層欠陥,Si-core 部分転位	2.4	4.8
C	間接	積層欠陥,Si-core 部分転位	2.4	8.1
D	間接	積層欠陥,Si-core 部分転位	3.0	8.5
E	間接	Si-core 部分転位	>10	10>

### (3) C-core 部分転位の可動化の確認

積層欠陥のC-core部分転位の外側10μmの位置に電子線を照射しCLスペクトルを取得した。

390nmのバンド端発光のみで420nmの積層欠陥による発光は検出されなかった。Si-core部分転位の外側(図4)と同じく、部分転位で電子-正孔がトラップされてしまうため、積層欠陥が励起されない。以上を確認した上で電子線の照射、積層欠陥幅の測定を繰り返した。その結果、図5に示す様にある閾値までは、積層欠陥の拡張はないが閾値を超えると拡張を開始することがわかった。拡張量は同条件でのSi-core部分転位に比べ小さい。また、閾値や拡張量は励起条件によって異なった。不動とされていたC-core部分転位

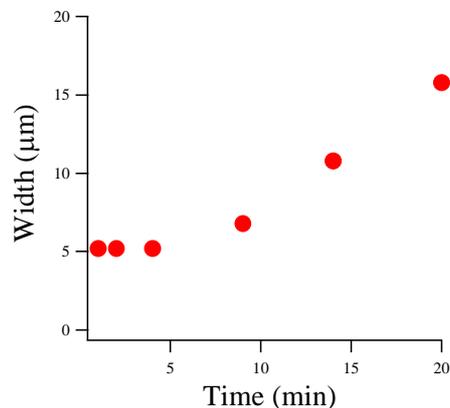


図5 積層欠陥幅と電子線照射時間の相関

位が可動する様になったのは、電子—正孔の長時間照射によってピンングの原因となる何等かの不純物（例えば N）が転位芯から放出されたためと推定している。

## 5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Masaki Sudo, Yukari Ishikawa, Yongzhao Yao, Yoshihiro Sugawara, and Masashi Kato	4. 巻 924
2. 論文標題 Expansion of Basal Plane Dislocation in 4H-SiC Epitaxial Layer on A-Plane by Electron Beam Irradiation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 151-154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.924.151	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yukari Ishikawa, Masaki Sudo, Yongzhao Yao, Yoshihiro Sugawara, and Masashi Kato	4. 巻 123
2. 論文標題 Expansion of a single Shockley stacking fault in a 4H-SiC (11-20) epitaxial layer caused by electron beam irradiation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5026448	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yongzhao Yao, Yukari Ishikawa, and Yoshihiro Sugawara	4. 巻 126
2. 論文標題 X-ray diffraction and Raman characterization of $\alpha$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> single crystal grown by edge-defined film-fed growth method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 205106-1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0007229	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yongzhao Yao, Yoshihiro Sugawara and Yukari Ishikawa	4. 巻 59
2. 論文標題 Observation of dislocations in $\alpha$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> single-crystal substrates by synchrotron X-ray topography, chemical etching, and transmission electron microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 045502-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab7dda	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計7件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 石川由加里, 須藤正喜, 菅原義弘, 姚永昭, 加藤正史, 三好実人, 江川孝志
2. 発表標題 4H-SiC, GaNの基底面転位のm面電子線照射による挙動
3. 学会等名 2019年第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川由加里, 須藤正喜, 姚永昭, 菅原義弘, 加藤正史
2. 発表標題 4H-SiCのA面における基底面転位の電子線照射による拡張挙動
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石川由加里, 須藤正喜, 姚永昭, 菅原義弘, 加藤正史
2. 発表標題 4H-SiC A面電子線励起による基底面転位の拡張挙動
3. 学会等名 先進パワー半導体分科会 第4回講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaki Sudo, Yukari Ishikawa, YongZhao Yao, Yoshihiro Sugawara, and Masashi Kato
2. 発表標題 Expansion of basal plane dislocation in 4H-SiC epitaxial layer on A-plane by electron beam irradiation
3. 学会等名 2017 International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石川 由加里、菅原 義弘、横江 大作、姚 永昭
2. 発表標題 HVPE-GaN基板上に形成したピッカース圧痕周囲の転位構造
3. 学会等名 2020年第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yao, Yongzhao, Sugawara, Yoshihiro, Yukari, Ishikawa, Takahashi, Yumiko, Hirano, Keiichi
2. 発表標題 Synchrotron X-Ray Topography Observation and Classification of Dislocations in b-Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> single crystal substrates grown by EFG
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	菅原 義弘  (Sugawara Yoshihiro)  (70466291)	一般財団法人ファインセラミックスセンター・その他部局 等・上級研究員   (83906)	
研究 分担者	姚 永昭  (Yao YongZhao)  (80523935)	一般財団法人ファインセラミックスセンター・その他部局 等・上級研究員   (83906)	