

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03522

研究課題名(和文) ビーム実験による次世代半導体Ga203のプラズマエッチング表面反応機構の解明

研究課題名(英文) Analysis of reactive ion etching surface reactions of Ga203 for the development of next-generation semiconductor devices

研究代表者

伊藤 智子 (Ito, Tomoko)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10724784

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本課題は、質量分離イオンビーム装置を用いた反応性イオンビーム照射実験によりGa203のエッチング特性の評価を行うことで、Ga203の反応性プラズマエッチングプロセス開発の支援の目的とした。反応性イオンとしてCl⁺およびCF₃⁺イオンビームをGa203表面に照射しエッチングイールド測定及びX線光電子分光装置による表面分析を行った結果、Cl⁺イオンでは、ほとんど物理的スパッタにより、エッチングが進行することが判明した。CF₃⁺イオンに関しては、Ar⁺より高いエッチングイールドを示していることが明らかとなり、イオン反応においては、CF₃⁺イオンの方が高効率なエッチングが可能であるという知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

酸化ガリウム(Ga203)は、次世代パワーデバイス用ワイドギャップ半導体材料として、近年、非常に注目を集めている材料である。将来、Ga203パワーデバイスの実用化にあたっては、従来の半導体材料で用いられてきた反応性プラズマエッチングプロセスの適用が必要不可欠である。本課題において質量分離イオンビーム装置を用いて明らかとなった反応性(ハロゲン)イオンとGa203表面とのエッチング反応に関する実験結果は、Ga203の反応性プラズマエッチングプロセス開発において、高効率なエッチャントを探索するうえで非常に重要な価値があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, reactive ion beam injection experiments using a mass-separated ion beam system were performed to clarify the etching reactions for developing Ga203 reactive plasma processes. The etching yields of Ga203 by Cl⁺ and CF₃⁺ ion beam injections were measured, and surface analysis using X-ray photoelectron spectroscopy was also conducted. It was found that Ga203 etching by Cl⁺ ions progressed primarily through physical sputtering rather than chemical etching. As for, CF₃⁺ ion beam injections exhibited a higher etching yield compared to Ar⁺ ion beam injections. These results provide valuable insights into the etching mechanisms of Ga203, contributing to the advancement of Ga203 reactive plasma processes.

研究分野：プラズマ応用

キーワード：反応性プラズマエッチング 半導体プロセス イオンビーム ガリウムオキシド

1. 研究開始当初の背景

酸化ガリウム(Ga_2O_3)は、炭化ケイ素(SiC)と窒化ガリウム(GaN)に続く「第3のパワーデバイス用ワイドギャップ半導体」として、近年、急激に注目をされる半導体材料である。 Ga_2O_3 は、他の半導体材料に比べて、圧倒的に高耐圧で低損失であることが明らかにされており、さらに、他のパワー半導体ウェハーと異なり、高品質・大容量化ウェハーの製作が可能であることで製造コストが圧倒的に低価格に抑えられることから、2012年頃から Ga_2O_3 パワーデバイスの研究レベルでの試作開発が進められてきた。しかしながら、 Ga_2O_3 パワーデバイスでは、微細化に必須とされる垂直トレンチ加工(エッチング)が未だにウェットエッチングでなされているため、実用的な微細構造デバイスの道筋が見えていない。今後、 Ga_2O_3 の垂直トレンチ加工においても微細構造化のためには反応性プラズマプロセスで対応していかなければならないと考えられているが、これまでに Ga_2O_3 のプラズマエッチングに関する研究は、ほとんどなされておらず、有効な反応性ガスやプラズマプロセスパラメーターは、ほとんど明らかにされていないのが現状である。

従来のプラズマエッチングプロセス開発の為にプラズマ固体表面反応の研究では、プラズマ照射実験が盛んに用いられてきた。ガス流量や投入電力等の変化でプラズマ状態を変化させたプラズマを照射してエッチング速度やトレンチ形状との相関を調べるプラズマ照射実験はエッチングプロセス条件の探索には有効であったが、反応現象の把握に留まる研究であり、反応機構を解明するものとは言えなかった。プラズマ照射下の固体表面では、多種多様なプラズマ活性種が様々なエネルギーを持って固体表面に同時に入射し、それらプラズマ活性種が固体表面と同時に反応を起こすことから、プラズマ活性種の数だけ反応素過程が大量に存在する。また、表面で生成された反応生成物がプラズマ気相中で再度反応を起こすことから、反応生成物を明らかにすることが非常に難しい。これまで用いられてきたプラズマ照射実験では、プラズマ活性種毎の反応素過程を切り分け、反応生成物を評価する手法がなかったことから、プラズマ固体表面反応はブラックボックス化され、Si半導体材料における反応性プラズマエッチングプロセス技術が確立されている現在であっても、新しい構造のデバイスが提案される度に、反応性ガスの種類、混合比および投入電力等のプラズマパラメーターを経験的に決めて、尚且つプラズマ照射実験を繰り返し行うことで、プラズマエッチングプロセスの構築を行っている。こうした現状を打開していくには、多種多様なプラズマの活性種と固体表面の原子とが起こす複雑な表面反応を活性種毎の反応素過程を切り分けて定量的に評価し、それらを統合することでプラズマ固体表面反応全体の理解を進め、学術的に再構築していく必要がある。

2. 研究の目的

本課題は、 Ga_2O_3 における反応性プラズマエッチング反応機構を実験的に明らかにすることで、次世代パワーデバイス材料である Ga_2O_3 の反応性プラズマエッチングプロセス開発の支援を目的とした。具体的には、反応性プラズマ活性種の中でエネルギーを持って基板に入射する反応性イオンが最もエッチング反応に寄与すると考えられることから、反応性イオン固体表面反応に着目し、質量分離イオンビーム装置を用いて反応性イオンビーム照射による、 Ga_2O_3 に対するエッチング特性の明らかにする。

3. 研究の方法

(1) イオンビーム実験

プラズマ固体表面反応を理解するには、どのようなプラズマ活性種が、どのようなエネルギーを持って表面に入射し、どのような反応を、どのような割合で起こすのかといった活性種毎の反応素過程を定量化する必要がある。そこで、研究代表者は、プラズマ中の個々の活性種に着目して、ビーム実験によりプラズマ活性種毎の反応素過程の解明を行う。ビーム実験の場合、活性種毎に試料に対して活性種ビーム照射を行うという非常にシンプルな系であり、活性種の入射エネルギー制御も可能であることから、表面反応が生じる閾値エネルギーも求めることが可能である。

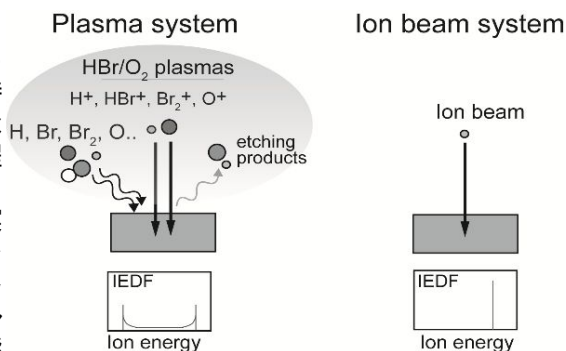


図1: 左図 プラズマ照射実験
右図 ビーム実験

(2) 質量分離イオンビーム装置

本研究には、イオン、分子およびラジカルビームを独立に制御して試料に照射可能なマルチビーム装置を用いた[1,2]。本装置は、イオン生成部、質量分離部、ビーム輸送部および照射室から成り立っており、イオンビームの照射の際は、まず、イオン生成部にてアーク放電により導入ガスをプラズマ化しイオンを発生させる。イオン源で生成されたイオンは、質量分離部の偏向マグネットにより所望の質量のイオンのみ分離される。イオンビームは空間電荷効果による発散を抑

制するため、イオン生成部後の引き出し部から減速電極までの間、25 kV の高電圧で輸送される。イオン源と照射室の間のビーム輸送部は、イオンビームのエネルギー等のパラメーターを調整する目的で設けられており、高エネルギーで輸送されたイオンビームは、照射室手前の減速電極で所望のエネルギーのイオンビームに減速後、照射室にて試料に照射される。本装置では、100 eV-2 keV までの範囲のエネルギーのイオンビームを照射可能である。また、ビーム輸送部は、中性粒子の除去する役割も担っており、3 段階の差動排気ステージにより、イオン源部で生成された中性粒子(ラジカル、分子等)および輸送の際に生じる高エネルギー中性粒子の照射部への到達を防ぎ、照射室を超高真空($\sim 10^{-10}$ Torr)に保持している。

(3) 反応性イオンビーム照射実験条件

エッチング反応の評価には、エッチングイールドを用い、入射イオン 1 個当たりの試料構成原子の脱離数と定義とし、イオンビーム照射の前後に試料位置のファラデーカップで測定したイオンビーム電流と、イオンビーム照射による試料のエッチング深さを基に算出した。イオンの照射量は、 $\sim 1 \times 10^{17}$ ions/cm² とし、入射イオンエネルギーは、1000 eV から 4000 eV とした。また、試料は、 β -Ga₂O₃ の単結晶を用いた。Ga₂O₃ のプラズマエッチングに用いられる反応性ガスとして BCl₃ やフロロカーボンガスが挙げられることから Cl⁺イオンおよび CF₃⁺イオンを用いた。

4. 研究成果

(1) ハロゲンイオンビーム照射による Ga₂O₃ エッチングイールド

図 2 に Ar⁺イオン、Cl⁺イオンおよび CF₃⁺イオンビームに対する Ga₂O₃ のエッチングイールドの入射エネルギー依存性を示す。縦軸は、エッチングイールド、横軸に入射イオンのエネルギーとしている。いずれのイオン種においてもエッチングイールドはイオン入射エネルギーの増加とともに増加している。Cl⁺イオンのエッチングイールドは Ar⁺イオンのイールドに比べてほとんど変わらない。Cl⁺イオンの質量 (mass 35.5) は Ar⁺イオンの質量 (mass 40) に近いため、ほとんど同じ運動エネルギーで試料表面に入射すると仮定した場合、Ar⁺イオンのエッチングイールドは物理的なスパッタによるものであるため、Cl⁺イオンのイールドは、物理的なスパッタリングによりエッチングが進行していると考えられる。CF₃⁺に関しては、Ar⁺イオンより高いエッチングイールドを示し、Cl⁺イオンよりも高効率なエッチングが可能であるということが明らかとなった。

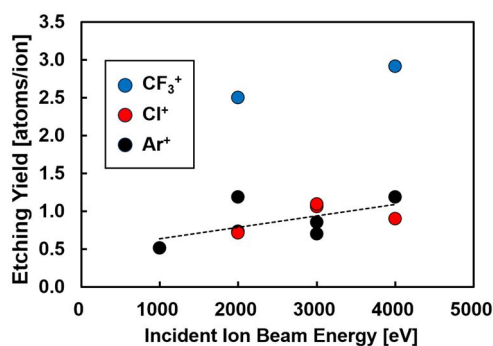


図 2 各種イオンビームによる Ga₂O₃ のエッチングイールド

(2) X 線光電子分光装置(XPS)によるハロゲンイオンビーム照射後の Ga₂O₃ 試料の表面分析
 前述のエッチングイールド測定結果において、CF₃⁺イオンビームによるエッチングイールドが Ar⁺イオンビームと比較して高いイールドを示したことから、CF₃⁺イオンビーム照射による Ga₂O₃ 表面の化学結合状態の変化を、XPS を用いて評価した。図 4 に CF₃⁺イオンビーム照射後の Ga₂O₃ 最表面の C1s スペクトル波形を示す。291eV 付近に CF₃ 由来のピークが観測された。また、図 4 に 4000 eV の CF₃⁺イオンを照射した場合の深さ方向分析結果を示す。横軸は、XPS に搭載されている Ar⁺イオン銃の照射時間である。CF₃⁺イオン照射では、試料深くなるにつれてフッ素と比較して炭素の組成が低くなっており、Ga₂O₃ を構成している酸素と反応して炭素が除去され、揮発性高いフッ化物が生成されてエッチングが進行している可能性がある。

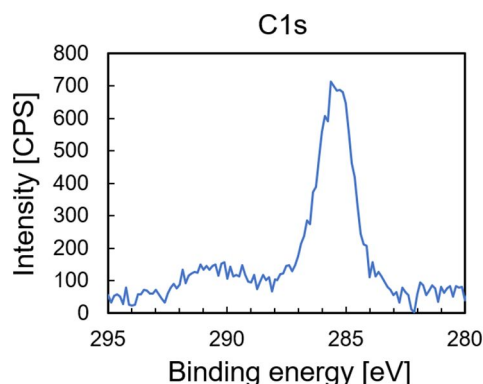


図 3 CF₃⁺イオン照射後の C1s スペクトル波形

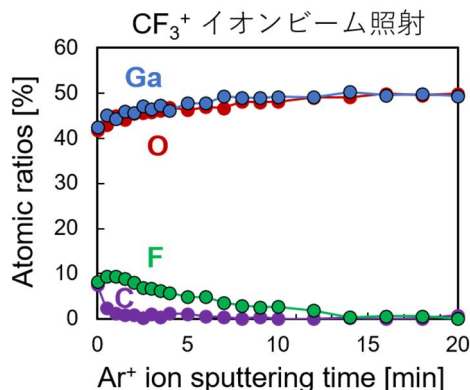


図 4 Ga₂O₃ の深さ方向プロファイル

参考文献

- [1] K. Karahashi, and S. Hamaguchi, J. Phys. D: Appl. Phys. **47**, 224008 (2014).
- [2] K. Karahashi et al., J. Vac. Sci. Technol. **A22**(2004), 1166.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tomoko Ito, Kazuhiro Karahashi, Satoshi Hamaguchi
2. 発表標題 Effects of Low-Energy Ion Injection in Atomic Layer Processes
3. 学会等名 14th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '22 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤智子, 唐橋一 浩, 浜口智志
2. 発表標題 原子層プロセスにおける低エネルギーイオン照射誘起表面反応
3. 学会等名 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------