

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04239

研究課題名（和文）酸化ガリウムのトレンチ形状作製のための新製造プロセスの確立

研究課題名（英文）Establishment of gallium oxide manufacturing process for trench

研究代表者

新海 聡子（SHINKAI, Satoko）

九州工業大学・大学院 情報工学研究院・准教授

研究者番号：90374785

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）：Cl₂およびBCl₃ガスを用いて、 α -Ga₂O₃のドライエッチングを各種条件を変化させながら行った。その上で、エッチングによる表面ダメージの影響を明らかにした。基板は、UIDとSnドープの2種類を用いた。バイアス電力を変化させるとCl₂では0W、BCl₃ガスでは1Wが最も荒れた。プロセス圧力の増加に伴う表面形状の変化は確認されなかった。また、表面形状の荒れに対する不純物量の影響も、ほとんどないことがわかった。しかしながら、Cl₂ガスを用いてICP電力を変化させた場合、ICP電力の上昇に伴い、表面粗さが増すことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

酸化ガリウム（Ga₂O₃）は高い絶縁破壊電界を有しているため、高効率で低損失なパワーデバイスを実現し得る材料として極めて有望とされている。しかしながら、酸化ガリウムはここ最近注目され始めたばかりの材料で、その製造工程の各種プロセスは全く明らかとなっていない。特にトレンチ構造を形成する際に用いられるドライエッチングはプロセス上極めて重要な調査項目である。そのため、本研究により、Ga₂O₃のエッチング特性が明らかとなった学術的意義は大きい。また、本結果によりGa₂O₃デバイスの製造が進めば、大きな社会的意義を付加することができる。

研究成果の概要（英文）：The α -Ga₂O₃ was dry-etched using Cl₂ and BCl₃ gas under the various etching conditions. Then, the surface damages of α -Ga₂O₃ by dry-etching were investigated. Two types of UID and Sn-doped substrates were used. When the bias power was changed, the surface roughness was high at 0 W for Cl₂ and 1 W for BCl₃ gas. The change of surface roughness was not confirmed with increasing the process pressure. It was also found that the existence of impurities had no effect on the surface roughness. However, when the ICP power was increased using Cl₂ gas, the surface became rough with increasing the ICP power.

研究分野：半導体プロセス

キーワード：酸化ガリウム エッチング 表面粗さ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

省エネルギー技術の開発が世界規模での課題となっている。酸化ガリウム (Ga_2O_3) は大きな絶縁破壊電界を有しているため、高効率で低損失のパワーデバイスを実現しうる材料として極めて有望である。表1に各種半導体材料の物性値を、表2に2017年に発表されたパワー半導体の市場動向を示す。これより、 Ga_2O_3 は、2025年に窒化ガリウム (GaN) を抜いてシリコンカーバイド (SiC) に次ぐパワーエレクトロニクス材料に躍進することが見込まれている。しかし、 Ga_2O_3 は通常のショットキーバリアダイオード (SBD) でもリーク電流が大きく、期待された耐圧は全く出せていない[2]。一方、基板表面にトレンチと呼ばれる溝を作り込んだ Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) 型 SBD に構造を変更すると、通常の SBD からリーク電流は数桁減少し、耐圧は 240V まで上昇する。これに反し、形成したトレンチ構造が変形することにより、オン抵抗は増大する[2]。将来的に Ga_2O_3 が自身の物性値を最大限に活かした MOS 構造に発展するためには、トレンチ構造の問題を界面状態を含めて解決した新製造プロセスを早期に確立することが必要とされている。

表1. 各種半導体材料の物性値

	4H-SiC	GaN	β - Ga_2O_3
バンドギャップ [eV]	3.3	3.4	4.8-4.9
電子移動度 [$cm^2/V \cdot s$]	1,000	1,200	300 (推定)
絶縁破壊電界 [MV/cm]	2.5	3.3	8 (推定)
バリガ性能指数 (対Si)	340	870	3,444
比誘電率	9.7	9.0	10
熱伝導率 [$W/cm \cdot K$]	2.7	2.1	0.23

表2. パワー半導体の世界市場 [1]

	SiC	GaN	Ga_2O_3
2016年	205億円	14億円	—
2025年	1,410億円	450億円	700億円

[1] 2017年度版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望，株式会社富士経済，2017.3.

[2] IEEE ELECTRO DEVICE LETTERS, VOL. 38, No. 6, JUNE 2017, pp.783-785

2. 研究の目的

トレンチを形成した Ga_2O_3 の MOS 型 SBD では、通常の SBD よりオン抵抗が 26% 上昇する[2]。これは界面でファセット散乱が発生して移動度が低下し、結果的にオン抵抗が増大したものと考えられる。したがって、 Ga_2O_3 のパワーデバイスへの適用で重要となるオン抵抗の低減を実現するためには、トレンチ形状を作製する際に使用するドライエッチング技術においていかに生成するダメージを低減させることができるかという点にある。(図1)そこで本研究では、トレンチ形状作製の際に需要となるドライエッチング技術において、バイアス電力、ICP(誘導結合プラズマ: Inductively Coupled Plasma)電力、プロセス圧力を変化させて、表面粗さの変化を評価した。

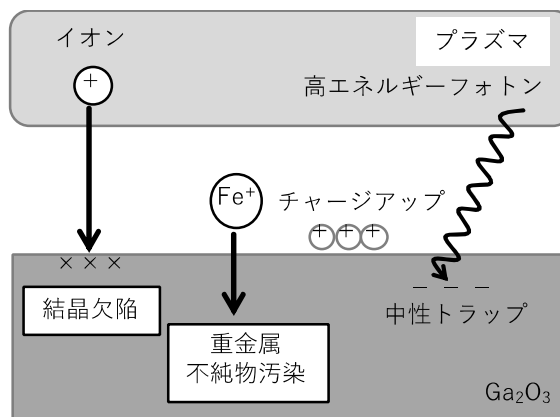


図1 ドライエッチングによって生じるダメージ

3. 研究の方法

BCl₃ および Cl₂ ガスを用いて Ga_2O_3 のドライエッチングを行った。基板は UID(unintentional doping)と Sn ドープの 2 種類の Ga_2O_3 ウエハ (2 インチ) を 5mm 角に切り出して使用した。基板に HPM(Hydrochloric acid-hydrogen peroxide mixture cleaning)洗浄を施し、誘導結合型反応性イオンエッチング (ICP-Reactive Ion Etching: ICP-RIE) 装置を用いてエッチングを行った。エッチングは、ガス流量 10[sccm]、プロセス時間 10[min]に固定した。その上で、バイアス電力を変化させた場合は ICP 電力 100[W]、プロセス圧力 1[Pa]に固定し、バイアス電力を 0 から 50W まで、ICP 電力を変化させた場合はバイアス電力 20[W]、プロセス圧力 1[Pa]に固定し、ICP 電力を 100 から 300[W]まで、プロセス圧力を変化させた場合は ICP 電力 100[W]、バイアス電力 20[W]に固定し、プロセス圧力を 1 から 4[Pa]まで変化させた。

エッチング後の表面は走査電子顕微鏡 (SEM) およびタッピングモードを使用した走査プローブ顕微鏡 (SPM) を用いて観察した。表面結合状態は X 線光電子分光 (XPS) 分析を用いて評価した。

4. 研究成果

はじめに、多結晶 α -Ga₂O₃ 基板を用いて、Cl₂ と BCl₃ ガスにおけるバイアス電力の影響を調べた。その結果、エッチングガスが結晶粒界に入り、サイドエッチングを増加させるような現象はいずれのガスにおいても見られなかった。

次に、単結晶 α -Ga₂O₃ 基板を用いて、Cl₂ と BCl₃ ガスによるドライエッチングを行い、 α -Ga₂O₃ の表面形態に及ぼすプラズマダメージの影響を明らかにした。単結晶基板は、UID と Sn ドープの 2 種類を用いたが、 α -Ga₂O₃ のドライエッチングにおいては UID と Sn ドープで結果はほとんど変わらなかった。GaN においては不純物の有無がドライエッチングの結果に大きく影響するが、 α -Ga₂O₃ においては不純物の有無によりエッチング結果は変わらないという新しい知見が得られた。

図 1 に Cl₂ ガスと BCl₃ ガスにおけるバイアス電力の増加に伴う表面粗さの変化の様子を示す。これより、Cl₂ では 0W が最も表面が荒れそれ以降のバイアス電力では、エッチング前と同等もしくはエッチング前より表面粗さが低くなることがわかった。また、BCl₃ ガスは 1W で最も表面が荒れ、それ以降は Cl₂ ガスと同様、エッチング前の表面粗さより表面がなめらかになることがわかった。表面状態を詳細に調べるため、エッチング後の XPS 分析を行ったところ、Cl₂ ガスでは 0W と 1W で Si-O の結合が存在することが確認された。これは Cl₂ ガスにより ICP の天板や台座で使用されている石英がエッチングされ、試料表面に堆積したものであると思われる。なお、バイアス電力 2W 以降では Si-O の結合が見られなくなる。このことを考慮すると、0 および 1W の Cl₂ ガスで表面形状が荒れたのは、表面に堆積した Si-O が原因で、Si-O がなくなった 2W 以降、つまり α -Ga₂O₃ が表面に露出している状態では 50W までバイアス電力を増加させても、表面粗さは変化しないことがわかった。一方、BCl₃ ガスで 1W で最も表面が荒れた原因はイオンとラジカルによるエッチングの競合が 1W で起きているものと考えられる。また、それぞれのエッチングガスにおけるエッチングレートを調べたところ、Cl₂ ガスに比べ BCl₃ の方が倍のエッチング速度を持つことがわかった。

加えて、プロセス圧力と ICP 電力が α -Ga₂O₃ の表面形態に及ぼすドライエッチングの影響を調べた。その結果、プロセス圧力を変化させてもいずれのガスにおいても表面形態に変化はみられなかった。一方、ICP 電力を変化させると、図 2 に示すように BCl₃ ガスでは変化は見られなかったものの、Cl₂ ガスを用いると ICP 電力の上昇に伴い、表面粗さが増すことがわかった。なぜ、Cl₂ ガスを用いた場合のみ、ICP 電力を増加させると表面粗さが変化したのかという理由は本研究課題の期間中に明らかにすることができなかったが、 α -Ga₂O₃ においては ICP 電力が基板に及ぼすダメージに深く関わっていると推察できる。そのため、この点については今後も引き続き検討を行い、原因を明らかにする予定である。

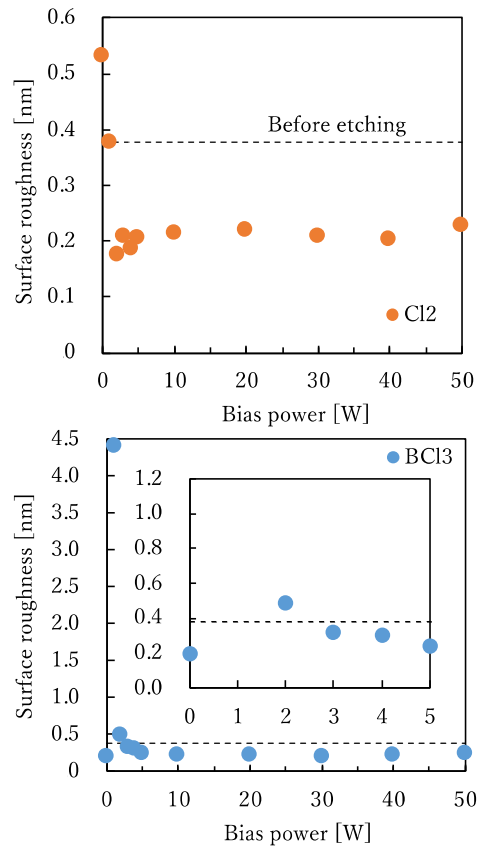


図1 バイアス電力の増加に伴う表面粗さの変化の様子

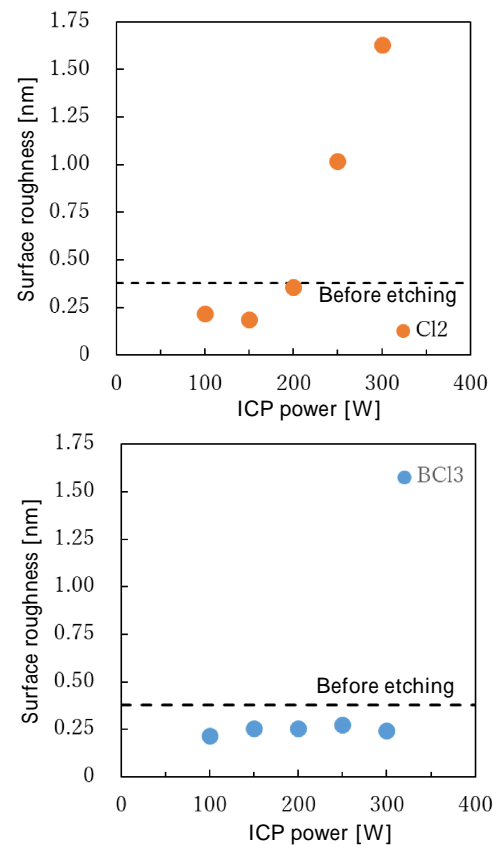


図2 ICP電力の増加に伴う表面粗さの変化の様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 森山裕貴, 新海聡子
2. 発表標題 -Ga203ドライエッチングにおけるドーブ種の影響
3. 学会等名 第80 回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森山裕貴, 新海聡子
2. 発表標題 エッチング条件による -Ga203表面形態への影響
3. 学会等名 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 宇崎滉太, 穴井宏樹, 川棚湧貴, 新海聡子
2. 発表標題 ICP-RIEを使用したスキャロップ削減方法の検討
3. 学会等名 平成30年度 日本表面真空学会 九州支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森山裕貴, 西山和輝, 宇崎滉太, 川棚湧貴, 新海聡子
2. 発表標題 低バイアスドライエッチングによる多結晶 -Ga203の表面粗さ評価
3. 学会等名 平成30年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西山和輝, 森山裕貴, 新海聡子
2. 発表標題 ミストCVD法によって成膜したGa2O3の結晶性評価
3. 学会等名 平成30年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宇崎 滉太, 新海 聡子, 大槻 秀夫
2. 発表標題 低バイアスICP-RIEによるn-GaN表面粗さ評価
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018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	松本 聡 (MATSUMOTO Satoshi) (10577282)	九州工業大学・大学院工学研究院・教授 (17104)	

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
---------	---------