

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04204

研究課題名(和文) シリコン基板を用いた「酸化ガリウム高電子移動度トランジスタ」の開発

研究課題名(英文) Development of gallium oxide high electron mobility transistors on Si substrates

研究代表者

小山 政俊 (Koyama, Masatoshi)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：30758636

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)：本研究では、その結晶構造により自発分極を有する $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の分極電荷を利用した高電子移動度トランジスタ(HEMT)を目標に研究を行った。 Si (111)基板上に有機金属気相堆積法で成膜した 3C-SiC (111)上にファインチャンネル型ミスト化学気相堆積法によって Ga_2O_3 を成膜し、 $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ を成膜する基礎検討を行った。 $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ HEMTを実現するために必要な平坦な薄膜成膜条件の模索を行い、成膜中に発生するパーティクル抑制のための成膜装置の改良、原料溶液の濃度、ミスト供給量を最適化することによって、平坦な $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜が 3C-SiC 上に成膜できることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究期間全体を通して、最終目標である Ga_2O_3 HEMTの試作までは至らなかったが、 Si 基板上にorthorhombic構造の $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜を成長するためのバッファ層として 3C-SiC が有用であること、また、 3C-SiC 上に $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜を成膜するための有用な知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we targeted to develop high electron mobility transistors using the polarization charges of $\text{-Ga}_2\text{O}_3$, which has spontaneous polarization due to its crystal structure. A basic study on the deposition of $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ on 3C-SiC (111) deposited on Si (111) substrates by metal-organic vapor deposition was carried out using fine-channel mist chemical vapor deposition. The flat thin film deposition conditions necessary to realize $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ HEMT were explored, and it was found that flat $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films could be deposited on 3C-SiC by improving the deposition equipment to suppress particles generated during deposition, optimizing the concentration of the precursor solution and mist supply rate.

研究分野：半導体工学

キーワード：酸化ガリウム Ga_2O_3 ミストCVD 3C-SiC 分極 HEMT

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

酸化ガリウム (Ga_2O_3) は半導体材料としては極めて広い約 5.0 eV のバンドギャップを有し、そのバンドギャップを活かした深紫外線検出器や、ショットキーバリアダイオード、MOSFET といったパワーデバイス、また、これらのデバイスの高温下や宇宙環境といった極限環境での動作が期待され、既存のシリコン (Si) やパワーデバイスとして実用化がなされた炭化ケイ素 (SiC)、窒化ガリウム (GaN) では実現できない動作条件でも動作する次世代の電子デバイス材料として注目されている。近年、 Ga_2O_3 ショットキーバリアダイオードや MOSFET 応用の研究報告が飛躍的に増加し、実用化に向けた研究開発がより活発化している。これら報告される Ga_2O_3 デバイスの結晶構造は、熱力学的に最も安定な結晶構造であり、バルク単結晶基板が市販されている。- Ga_2O_3 が最も多いが、最近では、高周波アンプ用途の砒化ガリウム (GaAs) や GaN トランジスタで採用されてきた高電子移動度トランジスタ (HEMT) を - Ga_2O_3 を用いたヘテロ構造で形成する研究も進んでいる。- Ga_2O_3 の場合、- Ga_2O_3 バルク基板上にホモエピタキシャル成長された - Ga_2O_3 と、より広いバンドギャップを有する - $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 層に不純物ドーピング (変調ドーピング) を行った層を積層したヘテロ構造の HEMT が報告されている。

2. 研究の目的

本研究では、 Ga_2O_3 -HEMT をより低コストで、既存の Si 半導体工場でプロセス処理が容易に行うことが可能である Si 基板上で実現することを目的とした。 Ga_2O_3 -HEMT を形成するためのヘテロ構造は、GaN-HEMT と同様にヘテロ界面の分極電荷の差による生じる高濃度の 2 次元電子ガス (2DEG) 形成を目指し、 Ga_2O_3 の 5 つの結晶構造の中で唯一、分極効果を持つ - Ga_2O_3 をチャネル層に用いた HEMT を目指した。この分極効果による 2DEG は、変調ドーピングを用いた HEMT 構造よりも電子濃度を高められる可能性がある。- Ga_2O_3 -HEMT を Si 基板上で実現するために重要となる - Ga_2O_3 結晶成長のための基礎的な検討として、本研究では、Si 基板上に有機金属気相成長法で成長した 3C-SiC テンプレートを用い、3C-SiC 上に高品質な - Ga_2O_3 薄膜をミスト CVD 法で成膜する検討を行った。

3. 研究の方法

Si (111) 基板上に MOCVD 法で約 $1\ \mu\text{m}$ 成膜した 3C-SiC (111) テンプレート基板 (エアウォーター製) を用い、有機溶媒で洗浄後、3C-SiC 表面の自然酸化膜を除去するためにフッ化水素酸で表面処理を行った。 Ga_2O_3 薄膜の成膜は、図 1 に示す構成のファインチャネル (FC) 型ミスト CVD 装置を用いて行った。原料溶液の溶質は、Ga アセチルアセトナート ($\text{Ga}(\text{acac})_3$ 、分子式: $[\text{CH}_3\text{COCH}=\text{C}(\text{O}-)\text{CH}_3]_3\text{Ga}$ 、純度: 99.9%、SIGMA ALDRICH 社製) を用いた。溶媒には超純水 (和光純薬社製) を用いた。ここで、 $\text{Ga}(\text{acac})_3$ を溶液に完全に溶解させるために塩酸 (和光純薬製) を 0.6% 添加した。原料溶液のミストの搬送に用いたキャリアガス、希釈ガスは、窒素 (N_2) を用いた。成長温度、および、キャリアガス、希釈ガスの流量を変化させて Ga_2O_3 薄膜の成膜を行った。 Ga_2O_3 薄膜の評価は、X 線回折 (XRD) 測定によって結晶構造の評価を行い、原子間力顕微鏡 (AFM) によって Ga_2O_3 薄膜表面のモフォロジーの評価を行った。

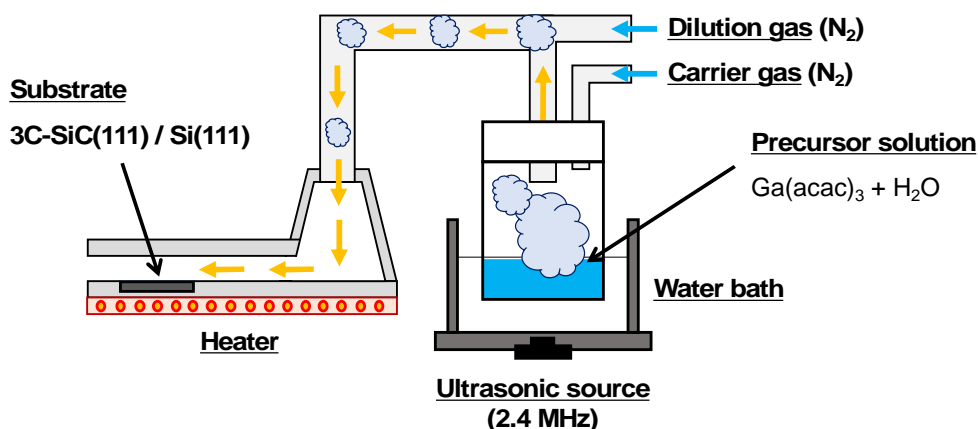


図 1. ファインチャネルミスト CVD 装置

4. 研究成果

種々の成膜条件を変化させて、3C-SiC テンプレート基板上に Ga_2O_3 薄膜成膜の検討を行った。原料溶液ミストを搬送するキャリアガスの流量 1.0 L/min、希釈ガスの流量 1.0 L/min の条件において、成膜温度を 300~470 の範囲で変化させて成膜した Ga_2O_3 薄膜の結晶構造解析結果を図 2 に示す。成膜時間は 60 分である。成長温度 300、310 では約 100 nm の薄膜が成膜していることを断面電子顕微鏡 (SEM) 観察で確認できたが、XRD スペクトルに Si 基板、3C-SiC テンプレートに由来する回折ピークのみが観察されたことから、これらの薄膜はアモルファス Ga_2O_3 薄膜であることがわかった。320~460 の範囲では $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (002)、(004)、(006) 回折のピークが明瞭に確認された。成膜温度の増加に伴って、320 を膜厚の最大値 (約 200 nm) としてそれ以上の成膜温度では膜厚が減少し、470 では断面 SEM 観察において薄膜が確認できなかったことから、原料溶液のミストが基板上で反応する前に蒸発し、基板上で反応していないことが示唆される。これらの薄膜の表面モフォロジーを AFM によって観察した結果、XRD スペクトルにおいて $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$ に由来する回折ピークが得られた薄膜は、いずれも柱状の 3 次元的に成長した粒子 (粒径約 200~500 nm) の集合であることがわかった。

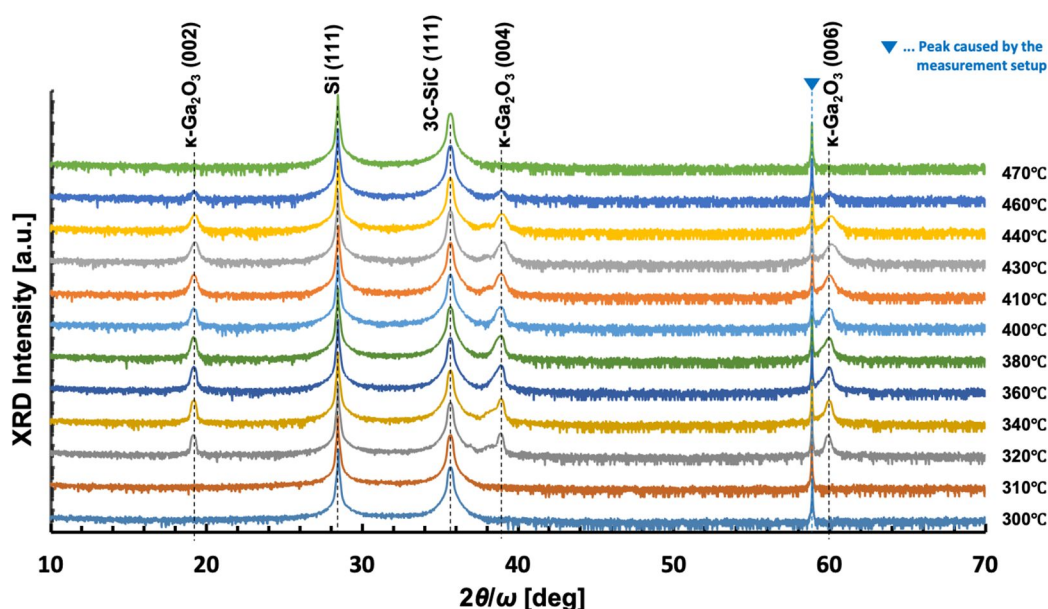


図 2. XRD 2 / スキャン結果 (成膜温度依存性)

これらの結果から、平坦な 2 次元状の薄膜を成膜するために、原料溶液のミストの供給量を増加させた条件での成膜の検討を行った。原料溶液のミストを増加させるために、キャリアガスの流量を 1.5~2.5 L/min と変化させ、希釈ガスの流量は 0.5 L/min で固定して成膜を行った。この時、原料溶液のモル濃度を 0.02 M、0.05 M の 2 条件の溶液を用いた。成膜時間は 60 分、基板温度は 350 である。XRD 測定によって作製した Ga_2O_3 薄膜の結晶構造の解析を行った結果を図 3

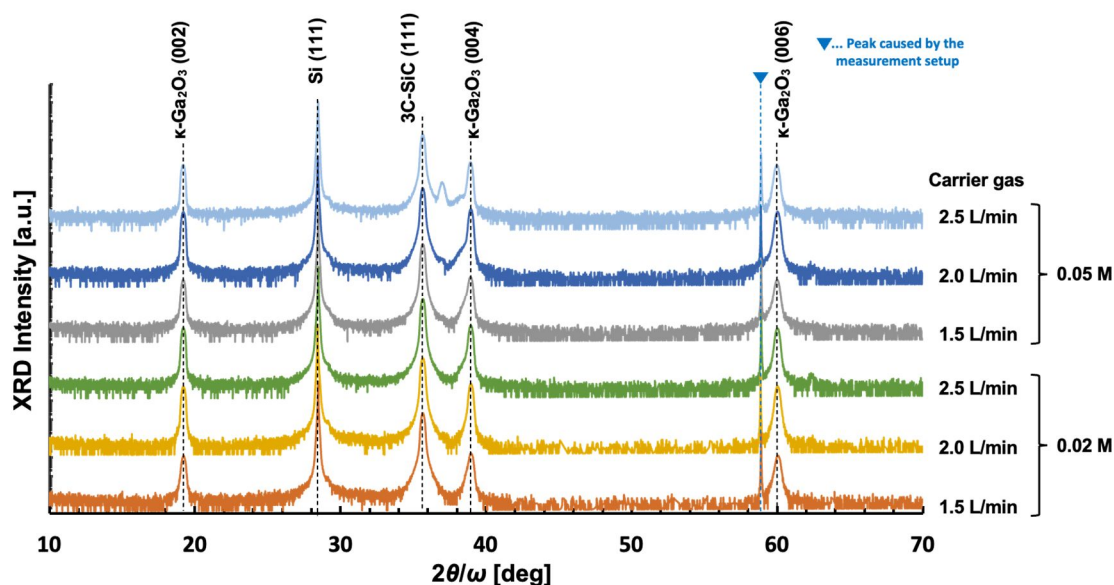


図 3. XRD 2 / スキャン結果 (キャリアガス流量、モル濃度依存性)

に示す。いずれの条件で成膜した薄膜においても、回折スペクトルは $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (002)、(004)、(006)回折のピークが明瞭に確認され、相が支配的な薄膜が成膜できたことがわかる。これらの薄膜の表面モフォロジーをAFMによって調べた結果、原料溶液のモル濃度が0.05 Mで成膜した条件では、キャリアガス流量が1.0 L/minで成膜した薄膜同様に柱状の3次元的な粒子が成長していた。一方、原料溶液のモル濃度が0.02 Mで成膜した場合、図4に示すように比較的平坦な表面モフォロジーを有する薄膜が成膜できることが明らかになった。

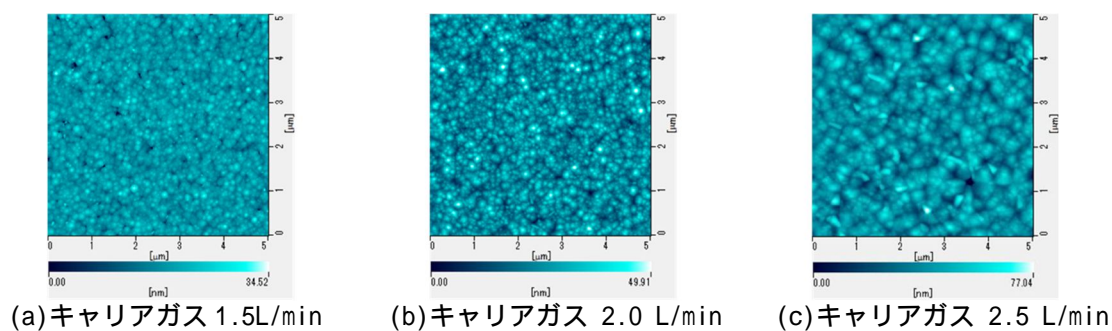


図4. AFMによる表面モフォロジー観察結果

本研究で、 $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ -HEMTをSi基板上で実現するために、Si基板上に有機金属気相成長法で成長した3C-SiCテンプレート上への Ga_2O_3 薄膜の成膜条件の検討を行い、3C-SiCテンプレート上に $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜が成膜できる条件を見出した。成膜した $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の分極特性や、電子供給層とのヘテロ構造化によるHEMT構造の試作と評価は研究期間内に検討することができなかったが、Si基板上の $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ を利用したデバイス応用のための有用な知見が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kazuyori Oura, Toshihiro Kumatani, Hideo Wada, Masatoshi Koyama, Toshihiko Maemoto and Shigehiko Sasa	4. 巻 61
2. 論文標題 Repeated bending durability evaluation of ZnO and Al-doped ZnO thin films grown on cyclo-olefin polymer for flexible oxide device applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 101001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac9024	査読の有無 無
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 大浦紀頼, 和田英男, 小山政俊, 前元利彦, 佐々誠彦, 竹添法隆, 清水明宏, 伊藤寛泰	4. 巻 65
2. 論文標題 溶液プロセスを用いた酸化インジウム薄膜のエキシマ光による低温形成と薄膜トランジスタの特性評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 表面と真空	6. 最初と最後の頁 41-46
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1380/vss.65.139	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 Kazuyori Oura, Hideo Wada, Masatoshi Koyama, Toshihiko Maemoto, and Shigehiko Sasa	4. 巻 23
2. 論文標題 Improved electrical performance of solution-processed zinc oxide-based thin-film transistors with bilayer structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Information Display	6. 最初と最後の頁 105-113
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/15980316.2021.2011443	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 豊田 和晃、溝口 達也、宮崎 愛美、河野 裕太、小山 政俊、廣芝 伸哉、小池 一步
2. 発表標題 溶液塗布熱分解法で成膜した 相Ga2O3薄膜の成膜とソーラーブラインド光検出特性
3. 学会等名 応用物理学会 関西支部 75周年記念講演会 兼 2022年度 第2回講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小山政俊、豊田和晃、大内涼介、廣芝伸哉、小池一步
2. 発表標題 溶液塗布熱分解法によって成膜したc面サファイア基板上 -Ga2O ₃ の物性評価
3. 学会等名 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 扶川泰斗, 豊田和晃, 大内涼介, 小池一步, 小山政俊, 和田英男, 河原正美
2. 発表標題 MOD法によるガラス基板へのVO ₂ 薄膜の成膜と特性評価
3. 学会等名 第19回 赤外放射応用関連学会等年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊田 和晃, 大内 涼介, 小山 政俊, 廣芝 伸哉, 小池 一步
2. 発表標題 スピンコート法によるサファイア基板上への 構造 酸化ガリウム薄膜の作製と構造および光学特性評価
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大浦紀頼, 和田英男, 小山政俊, 前元利彦, 佐々誠彦
2. 発表標題 COP基板上に形成した酸化亜鉛系薄膜の繰り返し曲げ耐久性評価
3. 学会等名 電気学会 電子材料研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤元章, 井須亮太, 柏木行康, 玉井聡行, 小山政俊, 小池一步
2. 発表標題 酸化インジウムナノ粒子を修飾したグラフェンのガスセンシング
3. 学会等名 日本材料学会半導体エレクトロニクス部門委員会 2021年度 第2回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 豊田和晃, 扶川 泰斗, 大内 涼介, 小池 一步, 小山 政俊, 和田英男, 河原正美
2. 発表標題 HZOバッファ層を用いたMOD法によるR 面サファイア基板上への V02 薄膜の作製
3. 学会等名 第30回(2021年度)日本赤外線学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮崎 愛実, 山崎 伊織, 田中 悠馬, 小山 政俊, 藤井 彰彦, 前元 利彦
2. 発表標題 ミスT-CVD成長した非晶質Ga2O3薄膜のアニール処理による結晶構造の変化と深紫外線応答特性
3. 学会等名 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2023年~2024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
---------	---------