

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

次々世代ワイドギャップ半導体
酸化ガリウムのデバイス実用化へ向けた
技術的課題の調査

令和 2 年 2 月

Survey of Technological Issues in Device Fabrications Processes for
Gallium Oxide as a Next-Generation Widegap Semiconductor

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2019-PP-09

概要

次々世代のワイドギャップ半導体デバイス材料として注目される酸化ガリウム (Ga_2O_3) は、低製造コストでありながら Si を超える効率で動作するだけでなく、超高耐圧動作も可能なパワーデバイス材料として実用化が期待される。そのデバイス製造のための各要素プロセスは、 Ga_2O_3 の化学的反応性や熱的な安定性を考慮して適切な条件を選択することが不可欠である。本報告では、各種の洗浄プロセスや加熱プロセス、さらにゲート絶縁膜材料の選択に伴う Ga_2O_3 への影響および MOS デバイス特性への影響について調査し、プロセス開発のための課題の抽出を行った。

今後、 Ga_2O_3 デバイスの実用化の加速のために、 Ga_2O_3 の電子構造や、結晶中での欠陥形成と電子物性の相関の解明、また Ga_2O_3 表面や絶縁膜材料との界面近傍で生じる反応の解明等に着目した研究の推進が必要である。

Summary

Gallium oxide (Ga_2O_3) is a next-generation widegap semiconductor seen as a candidate power device material than can make higher energy efficiency devices with lower production cost, as well as very high voltage operating devices. Each element process for device fabrication should be carefully designed by choosing the appropriate process conditions taking account of the chemical reactivity and thermal stability of Ga_2O_3 . In this report the influences of chemical cleaning processes and thermal annealing processes, as well as the selection of gate dielectric materials on Ga_2O_3 properties and MOS device characteristics were investigated to identify the technological issues that may arise in the Ga_2O_3 device process development.

For further development of the industrial processes of Ga_2O_3 devices, it is important to accelerate the researches for understanding of the issues including the electronic structure of Ga_2O_3 , the relationship between the defect formation and the electronic properties of Ga_2O_3 , and the reactions at the surface of Ga_2O_3 or near its interface with dielectric materials.

目次

概要

1. 酸化ガリウムの低炭素社会実現に向けて期待される役割	1
1.1 次々世代半導体によるパワーデバイスおよび電力変換システムの高効率化の期待	1
1.2 酸化ガリウムの特徴と開発状況の概要	1
2. 酸化ガリウムのウェハ表面に対するプロセスの影響	1
2.1 酸化ガリウムウェハに対する化学洗浄プロセスの適用性	1
2.2 酸化ガリウムウェハに対する加熱プロセスの適用性	3
3. 酸化ガリウムの MOS デバイスに適用可能なプロセスの考察	4
3.1 ゲート絶縁膜材料の選択と $\text{SiO}_2\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 系、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 系の熱力学的特徴	4
3.2 酸化ガリウム MOS デバイスへの $1,000^\circ\text{C}$ の熱処理の適性	6
4. まとめ	7
5. 政策立案のための提案	8
参考文献	8

1. 酸化ガリウムの低炭素社会実現に向けて期待される役割

1.1 次々世代半導体によるパワーデバイスおよび電力変換システムの高効率化の期待

低炭素社会実現のための電力利用効率の向上には高性能なパワーデバイスの普及が欠かせない。自動車の電動化はモーター駆動系や充電システムにおける電力変換の需要を急増させることが見込まれるほか、再生可能エネルギー源から供給される電力の直交変換や周波数変換の需要が高まっている。これらの電力変換における損失割合の低減のためには、パワーデバイスを従来のシリコン（Si）を用いるデバイスからワイドギャップ半導体を用いたものへ置き換える技術に期待ができる。既に次世代半導体としてシリコンカーバイド（SiC）や窒化ガリウム（GaN）の市場拡大が確実視されているが、さらにバンドギャップが大きい半導体であり、かつ低コストでの製造の可能性が期待される次々世代半導体の1つが酸化ガリウム（ Ga_2O_3 ）である[1,2]。既にデバイス応用のための研究が国内外で加速しており、SiC製のものを上回る基本特性を持つショットキーバリアダイオード[3]や、縦型MOSFET動作の実証[4]が始まっている。

1.2 酸化ガリウムの特徴と開発状況の概要[1]

Ga_2O_3 の結晶構造のうち、 β 相（ β - Ga_2O_3 ）は低温・常圧における安定相であり、バンドギャップは4.5~4.9 eVと大きく[2,5]、従来の半導体材料の絶縁破壊電界を上回る大きな電界下でも動作するために、高耐圧構造を形成するのに有利となる。もう1つの大きな特徴は、常圧で1,800°C付近に融点を持つためにバルク結晶の融液成長が可能であり、高品質な単結晶の育成が比較的容易に行えることである[6]。特にEFG（edge-defined growth）法では既に6インチ径のウェハ製造技術の確立が報告されている。また、デバイス形成のためにはキャリア濃度を制御したエピタキシャル成長技術も要求されるが、特にハライド気相蒸着（HVPE）法によって数 $\mu\text{m/hr}$ の比較的高速な成長[7]や、Siドーピングによる広範囲でのn型ドーピング濃度の制御が確立されている。一方で、 Ga_2O_3 は本質的にp型伝導が実現困難である点がデバイス構造を設計するうえでの大きな制約となる。p型伝導の難しさは繰り返し指摘されているが[8]、最近になって格子間に位置する水素を制御すればp型伝導も発現可能との理論計算による指摘[9]も発表されるなど、今後の進展が期待される。

2. 酸化ガリウムのウェハ表面に対するプロセスの影響

半導体ウェハとしての使用のためには各種の要素プロセス技術の確立が欠かせないが、従来のSiなどの半導体のために開発されたプロセスをそのまま適用することはできない。 Ga_2O_3 の酸化物としての物性に由来する特有の課題として、特に化学的反応性・熱的安定性等を考慮したプロセス条件の選択が必要となる。

2.1 酸化ガリウムウェハに対する化学洗浄プロセスの適用性

半導体ウェハの表面汚染除去のための化学洗浄には強酸溶液がしばしば使用される。 Ga_2O_3 のこれらの薬品に対する化学的安定性としては、表1（文献[10]および[11]を基に作成）のように調査されている。リン酸、硫酸、硝酸は室温では反応性は低いものの、加熱して熱濃リン酸や熱濃硫酸、熱濃硝酸とすることで高速な溶解が生じる。また濃フッ酸は室温においても反応性が高い。中でもウェハに対する洗浄工程として、Siウェハには硫酸やフッ酸は標準的に用いられており、熱濃硫酸に過酸化水素を混合した溶液（SPM）や、希釈されたフッ酸水溶液（DHF）、フッ酸とフッ化アンモニウムを溶解した緩衝フッ酸水溶液（BHF）などがよく知られている。 Ga_2O_3 ウェハ洗浄プロセスにこれらの既存の半導体洗浄液を流用できると都合がよい。実際にこれまでの Ga_2O_3 デバイス研究においても多くの場合、これらの洗浄の組み合わせが適用されている。

表1 主な溶液による Ga_2O_3 単結晶のエッチングレートの報告例 [10, 11]

溶液	面方位	温度	エッチングレート
85% H_3PO_4	(100)	100°C	3 nm/min
		190°C	650 nm/min
97% H_2SO_4	(100)	100°C	0.2 nm/min
		170°C	100 nm/min
60.5% HNO_3	(100)	120°C	87 nm/min
47% HF	(100)	室温	59 nm/min
	(001)	室温	31 nm/min
20% NaOH	(100)	室温	5.2 nm/min

そこで $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の表面に対する SPM 洗浄および DHF 洗浄の影響を原子間力顕微鏡 (AFM) 観察により評価した。HVPE 成長させた n 型ドープ ($\sim 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$) のエピタキシャル層を有する $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(001)$ ウェハを、①濃硫酸 (98%) : 過酸化水素水 (30%) = 4 : 1 で混合し、150°C に加熱したもの (SPM) に 5 分間浸漬、および ②希釈フッ酸 (5%) 水溶液 (DHF) 中に 10 分間浸漬し、イオン交換水ですすいだ。フッ酸については表 1 とは違い、標準的な半導体プロセスでよく適用される濃度程度に希釈して用いている。図 1 は①SPM での洗浄後のウェハ表面 (a) と、①SPM の洗浄直後に②DHF での洗浄を連続して行ったウェハ表面 (b) の AFM 像である。図 1 (a) のように SPM による 5 分間の洗浄後には、洗浄前には見られなかった規則的な細かな起伏が顕在化しており、位置・方向の選択的なエッチングが生じていると考えられる。ラフネスの二乗平均平方根 (RMS) は 0.3 nm 程度となり、平滑さがやや失われている。一方 SPM 洗浄後に DHF 洗浄を 10 分間行くと、原子レベルで平坦化した表面となり、ラフネス RMS は 0.1 nm である。従来の半導体プロセスとの互換性の点からも希釈フッ酸は表面洗浄の有力な選択肢と考えられる。表 1 では濃フッ酸が Ga_2O_3 を溶解し易いことが示されているが、5% まで希釈した溶液であればエッチングは遅く、かつ平滑な表面を得るプロセスとして有効である。特に①SPM と②DHF を連続して行う洗浄プロセスであれば、①で最表面の汚染層を除去した後に②で平滑表面を得られると考えられる。よって以降の検討では、①と②を連続して適用する工程 (SPM+DHF) をウェハ洗浄法として採用した。

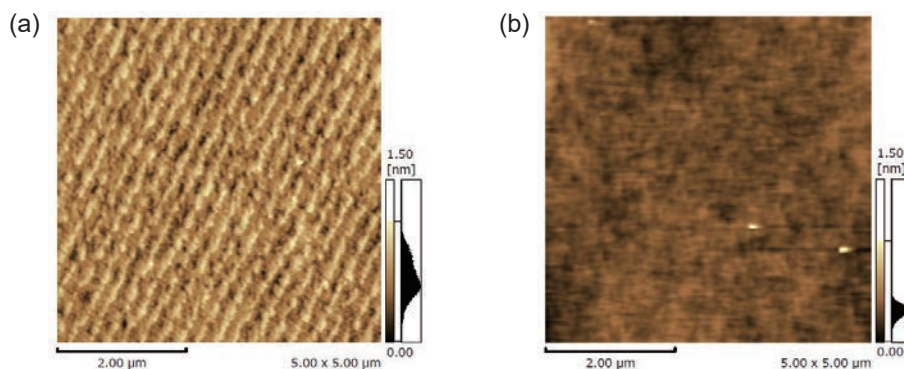


図1 (a) 150°C熱濃硫酸+過酸化水素水 (SPM) 洗浄後と、(b) 5%希釈フッ酸水溶液 (DHF) 洗浄後の $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(001)$ エピウェハ表面 AFM 像 ($5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$) の比較

2.2 酸化ガリウムウェハに対する加熱プロセスの適用性

Ga の酸化物には、 Ga_2O_3 のほかにも揮発性の強い亜酸化物 Ga_2O が存在することに注意が必要である。 Ga_2O_3 の分子線エピタキシー法による成長では、Ga と O の供給比に依存して Ga_2O が現われると指摘されている[12]。このほか高温下の Ga_2O_3 中では内因的に酸素空孔や Ga 空孔が安定形成されることも無視できず、加熱プロセスにおける雰囲気制御、特に酸素分圧の制御は重要な因子となる。そこでエピタキシャル層を有する $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(001)$ ウェハに前項の SPM+DHF 洗浄を行った後、各種雰囲気での熱処理を行って表面形状の変化を AFM で観察した。

まず O_2 および N_2 雰囲気中、 $1,000^\circ\text{C}$ にて 30 分間の熱処理を行った結果を図 2(a)および(b)に示す。 O_2 雰囲気では殆ど表面形状の変化はみられないが、 N_2 雰囲気では荒れが生じている。これとは別に 1% H_2 (He 希釈) 雰囲気中で 400°C 、30 分間の熱処理を行ったところ、低温の加熱であるにもかかわらず明らかな表面ラフネスの増大が生じた (図 2 (c))。図 3 にはそれぞれの条件での熱処理後の表面ラフネスを、測定範囲を変えて評価した結果をまとめた。これらの結果は、大気圧程度の酸素分圧の供給下での表面の化学的な変化は小さく抑えられるのに対し、酸素を含まない N_2 雰囲気中の熱処理では表面で酸素欠損が生じ易く、特に水素の存在下では低温においても表面で還元が進むことに伴って表面形状が変化したと解釈できる。水素を用いたエッチング反応[13]や、それを利用した Ga_2O_3 のパターニング技術が提唱されるなど Ga_2O_3 は水素と反応性が高く、表面が強く還元されると部分的に Ga_2O が形成されて揮発するためにラフネスの原因となることが考えられる。希釈水素を用いた低温熱処理は Si 系デバイスの形成プロセスの、特に poly-Si 電極形成後に行う標準的な処理の 1 つであるのだが、 Ga_2O_3 へ適用可能かどうかは慎重に考える必要がある。

一方で、 Ga_2O_3 は熱処理によってその電気伝導性が大きく変化するとの指摘がある。例えば O_2 中 $1,100^\circ\text{C}$ で数時間の強熱をすると導電率が大きく低下し[6,14]、その後に同温度で N_2 中の加熱を追加して行えば導電率が元に回復するとの報告がある[6]。その機構は明確ではないが、 Ga_2O_3 エピタキシャル膜中の Si のドナー化は酸素空孔と複合することで促進されており、酸素空孔の濃度の低下がキャリアを減少させるとのモデルがある[14]。これらの効果を総合的に考慮すると、熱処理において酸素分圧を十分に確保することがウェハ表面のラフネス抑制には有効である一方、過剰な酸素分圧は Ga_2O_3 表面を高抵抗化させる可能性に配慮が必要となると思われる。

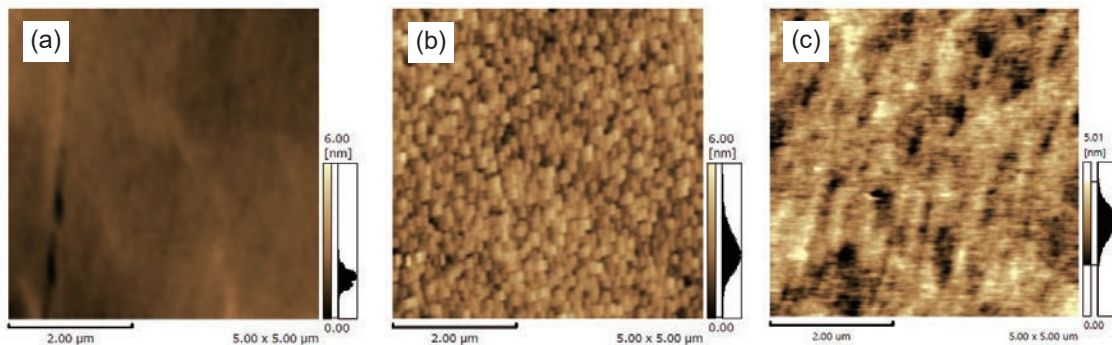


図 2 (a) O_2 中 $1,000^\circ\text{C}$ 30 分加熱後、(b) N_2 中 $1,000^\circ\text{C}$ 30 分加熱後、(c) 1%希釈 H_2 中 400°C 30 分加熱後の $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(001)$ エピウェハ表面 AFM 像の比較。加熱前は図 1(b)を参照。

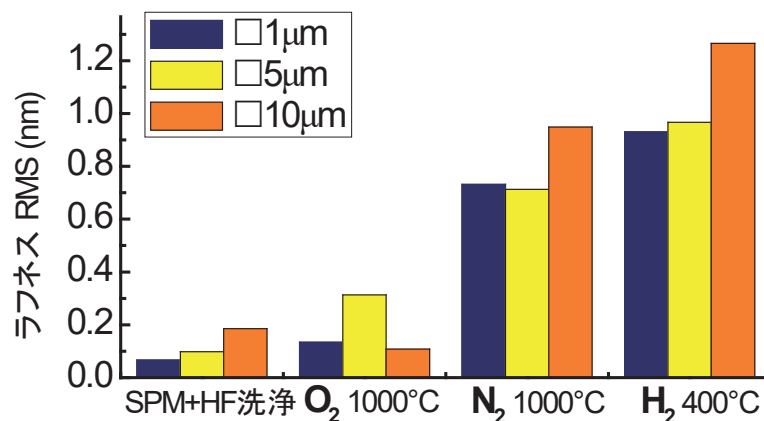


図3 SPM+DHF 洗浄後、O₂ 中 1,000℃加熱、N₂ 中 1,000℃加熱後、1%希釈 H₂ 中 400℃加熱後の β -Ga₂O₃(001)エピウエハ表面のラフネス RMS の変化。観察範囲を 1 μ m 角~10 μ m 角で変えて評価した。

3. 酸化ガリウムの MOS デバイスに適用可能なプロセスの考察

3.1 ゲート絶縁膜材料の選択と SiO₂-Ga₂O₃ 系、Al₂O₃-Ga₂O₃ 系の熱力学的特徴

MOSFET (金属—酸化物—半導体電界効果型トランジスタ) などの MOS 構造デバイスの心臓部は、半導体上にゲート絶縁膜となる酸化物を堆積し、その上に金属電極を設けたゲートスタック構造である。この項ではゲート絶縁膜の材料選択について考える。

原子層堆積法 (ALD 法) や MOCVD 法などの成膜技術の進展により、工業的に利用可能な絶縁膜材料の選択肢は多くある。しかしながら電子構造の観点では、ゲートスタック構造中を漏れる電流 (ゲートリーク電流) を抑制するために、図 4(a)の模式図の伝導帯オフセットを十分に確保できる材料を選択する必要がある。これは伝導帯オフセットが、電界印加時に電子をブロックする障壁としてはたらき、リーク電流にはその指数関数に反比例して減少する機構が支配的に現れることが予想されるからである。図 4(b)には主要な絶縁膜材料と Ga₂O₃ の間に期待される伝導帯オフセットの大きさを予測して示した。ただし Si に対して計算で予測されている伝導帯オフセットの文献値[15]を基にしながら、Si と Ga₂O₃ の伝導帯端のエネルギーの違いを 0.05 eV と仮定して推定している。ただし、この仮定の妥当性には注意が必要であり、ここでは β -Ga₂O₃ の電子親和力の報告値 4.0±0.05 eV [16]と、Si の電子親和力 (4.05 eV) との差を用いているが、例えば Al₂O₃ を用いた場合のバンドオフセットの実験値として~1.5 eV [17]との報告もあり、図 4(b)は 1 eV 程度も過大な推定になっている可能性が考えられることに留意されたい。そうではあっても、同図から分かるとおり、概ね誘電率が高い酸化物はバンドギャップが小さい傾向があるために伝導帯オフセットも低下する。図の中では、SiO₂、Al₂O₃ などはよい候補材料となる一方、他の多くの材料は伝導帯オフセットが不十分でゲートリーク電流が顕在化することが予測される。実際、 β -Ga₂O₃ を用いた MOSFET 動作実証例の多くが ALD 法での Al₂O₃ 膜をゲート絶縁膜として採用している。SiO₂ よりも大きな誘電率を持つ Al₂O₃ は、SiO₂ に比べて絶縁膜中の電界を下げて MOSFET の動作が可能だが、その一方で、伝導帯オフセットが大きい SiO₂ の方がゲートリーク電流を抑制できる可能性がある。実際の優劣は上記の β -Ga₂O₃ 伝導帯端エネルギーの推定値の妥当性、および実際の絶縁膜の品質による。

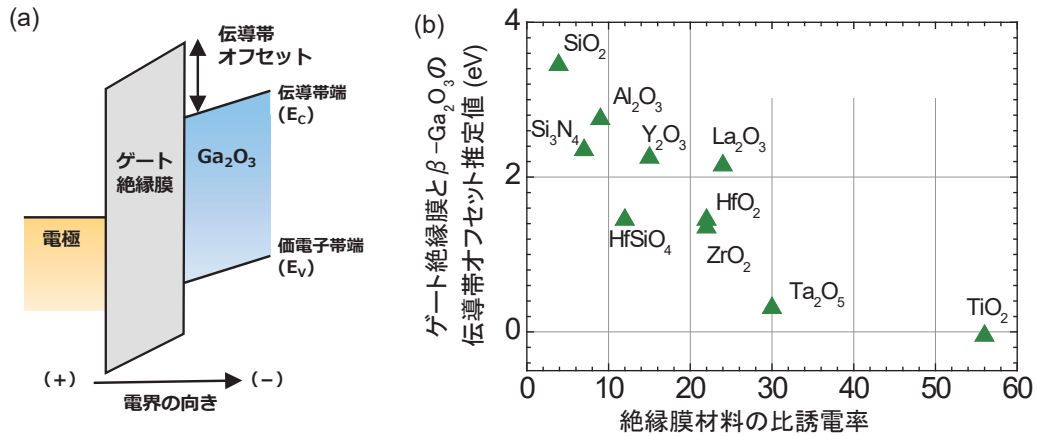


図 4 (a) ゲート絶縁膜と Ga_2O_3 の界面における伝導帯オフセットのイメージ図。(b) 各種のゲート絶縁膜材料のバンドギャップを比誘電率の関数として表示したもの。ただし文献[15]のデータおよび文献[16]の $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の電子親和力の報告値(4.0 ± 0.05 eV)を仮定した推定。

一方で、ゲート絶縁膜の材料選択においては、絶縁膜と Ga_2O_3 との反応性の考慮も欠かせない。半導体と絶縁膜の界面近傍の欠陥準位はトランジスタ動作に直接影響するほか、絶縁膜中に存在する欠陥準位は絶縁膜を通るリーク電流の抑制や信頼性の観点で許されない。しかし Ga_2O_3 と絶縁膜酸化物の界面の反応性が高い場合には、Ga の絶縁膜中への拡散や、絶縁膜中元素の Ga_2O_3 中への拡散の抑制は難しい。図 5(a)に示す $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 系の相図[18]からは、両者を 1:1 で合わせた AlGaO_3 が安定相として存在し、またその固溶体が幅広い組成範囲で安定化することが読み取れる。即ち、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 界面では加熱処理とともに複合酸化物の形成が進行することが必然的に予想できるため、低温の熱処理条件に限定したプロセスが必要である。その一方、図 5(b)の $\text{SiO}_2\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 系の相図[19]には、中間組成での安定相はなく互いの純物質に対する僅かな固溶が許されるのみである。したがって SiO_2 を採用する場合には高温での熱処理も許容されると期待できる。

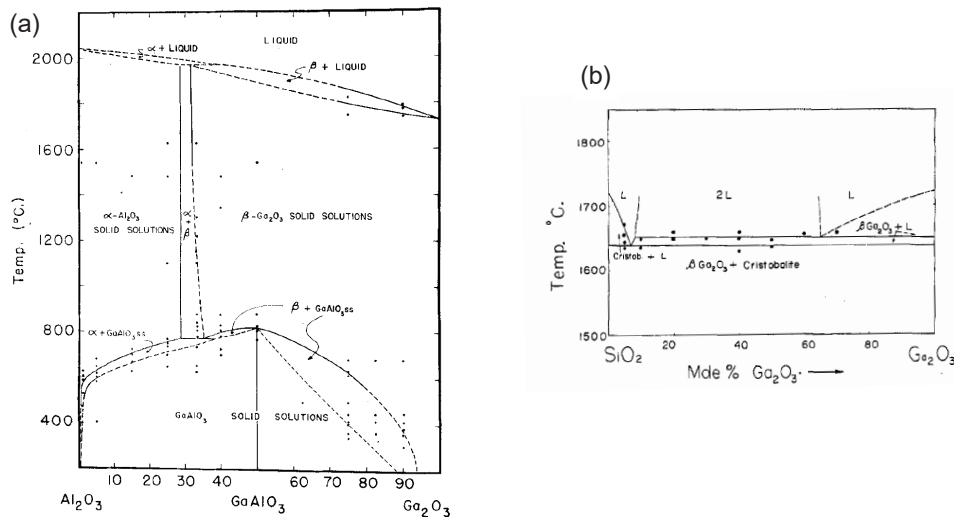


図5 ゲート絶縁膜材料の候補となる代表的な酸化物と Ga₂O₃ の平衡相図。(a) Al₂O₃—Ga₂O₃ 2 成分系 [18] (Reprinted with permission from V. G. Hill, R. Roy, and E. F. Osborn, The System Alumina-Gallia-Water, Journal of the American Ceramic Society, 35, 135-142, Copyright 1952 American Ceramic Society.) および (b) SiO₂—Ga₂O₃ 2 成分系 [19] (Reprinted with permission from P. Glasser, The System Gallium Trioxide-Silica (Ga₂O₃-SiO₂), The Journal of Physical Chemistry A, 63, 2085-2086, Copyright 1959 American Chemical Society.) について示した。

3.2 酸化ガリウム MOS デバイスへの 1,000℃の熱処理の適性

前項の検討を踏まえ、熱処理時にも安定な SiO₂ をゲート絶縁膜として選んだゲートスタック構造 (MOS キャパシタ) を形成し、その電気特性を評価した。前項と同様な洗浄を行った β-Ga₂O₃ ウェハ上に SiO₂ を電子線蒸着法にて成膜し、O₂ 雰囲気中にて 1,000℃、60 分間の熱処理条件を行った。また熱処理後に表面および裏面に金属電極を蒸着して MOS キャパシタを作製し、電気容量—電圧特性 (C-V 特性) を評価した。その結果を図 6 に示す。理想曲線に近く、また欠陥準位への電荷トラップに伴う測定周波数分散が殆ど見られず、またヒステリシスのない特性となったことから、界面欠陥の影響を殆ど受けない良好な MOS キャパシタと言える[20]。界面準位密度を評価すると概ね 10¹⁰~10¹¹cm⁻²eV⁻¹ と堆積膜を用いたスタックとしては良好な値であることから、1,000℃で 60 分間という熱処理が SiO₂/Ga₂O₃ スタックに問題なく適用できていることが分かる。既存の Si 系 CMOS プロセスでは 1,000℃前後の短時間のプロセスが多く行われるが、上記の結果は Ga₂O₃ に対しても、絶縁膜材料や酸素分圧に注意を払って設計を行えば 1,000℃のプロセスが十分に適用可能であることを示している。ただし、2.2 項で述べた酸素中での強熱による高抵抗化の影響については今後の検討が必要である。

図には示していないが、熱処理雰囲気を N₂ に変更した場合には、界面に固定電荷が発生することは示唆されたが、界面準位密度は大きく劣化しなかった。これは、2.2 項で懸念された酸素分圧の影響は SiO₂ で表面を覆うことで緩和されており、例えば表面ラフネスが発生するような変化は顕在化しにくくなっているためと考えられる。

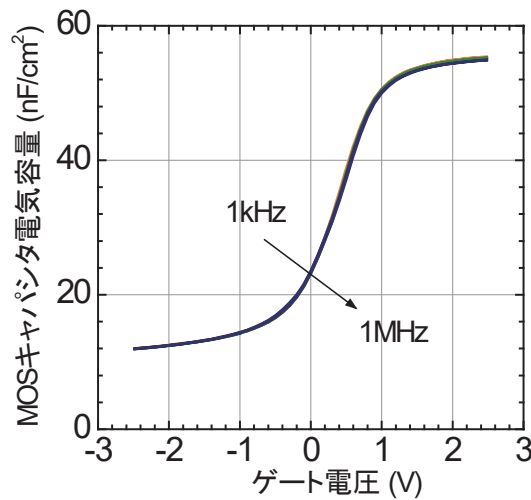


図6 SiO_2 ゲート絶縁膜を用いて $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ウェハ上で $1,000^\circ\text{C}$ プロセスにて形成した MOS キャパシタの良好な C-V 特性の実証例 [20]。SPM+DHF 洗浄工程と、 SiO_2 堆積後の O_2 $1,000^\circ\text{C}$ 、1hr の熱処理を適用した。両方向に掃引してもヒステリシスがなく、測定周波数依存性もほぼ見られない。

4. まとめ

次々世代ワイドギャップ半導体 Ga_2O_3 のデバイスプロセス開発には様々な知見が必要であるが、特に今回の調査からはウェハ洗浄や、様々な加熱処理のプロセスにおいて Ga_2O_3 表面での化学的反応性や熱的安定性に起因した制約が生じることが明らかとなった。これらのことから Ga_2O_3 のデバイスプロセス開発には、以下のような解明すべき課題が考えられる。

- (1) 各種の酸溶液中での表面化学反応による平滑性への影響について：
熱濃硫酸による Ga_2O_3 表面荒れの機構と、希釈フッ酸溶液中での原子レベル平坦化の機構の解明等、洗浄溶液のより正しい選択のための表面化学反応の高度な理解が必要である。
- (2) 加熱プロセスによる Ga_2O_3 表面物性への影響について
加熱後に Ga_2O_3 表面で増減すると推定される酸素欠損について、酸素空孔の密度やサブオキサイド発生等の観点で、プロセス中の酸素や水素の分圧の与える影響の定量的な解明が必要である。さらにこれと表面高抵抗化との相関の解明も必要である。
- (3) ゲート絶縁膜界面での反応と構造変化によるデバイス特性への影響について：
 Ga_2O_3 上にゲート絶縁膜を形成した後の熱処理に伴う界面構造変化の理解が必要である。また、酸化物同士の界面における絶縁体から半導体への遷移について、 Ga_2O_3 の高抵抗化層の存在の可能性も考慮した MOS チャネルの実体の解明が重要である。
- (4) ゲート絶縁膜材料の選択と、 Ga_2O_3 やゲートスタックの電子構造の理解について：
 Ga_2O_3 自身の伝導帯端、価電子帯端のエネルギーレベルの把握や、 SiO_2 、 Al_2O_3 等のゲート絶縁膜とのバンドアライメントの解明が必要である。それに基づいたゲート絶縁膜材料の選択指針の明確化とゲートリーク電流の伝導機構の把握も重要である。

5. 政策立案のための提案

上記のまとめで示したとおり、 Ga_2O_3 デバイスの実用化の加速のためには Ga_2O_3 の物性や反応性に関する基礎的研究、特に Ga_2O_3 の電子構造や、結晶中での欠陥形成と電子物性の相関の解明、また Ga_2O_3 表面や絶縁膜材料との界面近傍で生じる反応の解明等に着目した研究が必要である。

参考文献

- [1] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提案書, 技術開発編, “酸化ガリウムの新規半導体としての電子デバイス応用へ向けた技術開発課題”, LCS-FY2018-PP-07, 2019.
- [2] M. Higashiwaki, K. Sasaki, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Koukitu, A. Kuramata, T. Masui and S. Yamakoshi, *Semicond. Sci. Technol.* 31, 034001, 2016.
- [3] K. Konishi, K. Goto, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Kuramata, S. Yamakoshi and M. Higashiwaki, *Appl. Phys. Lett.* 110, 103506, 2017.
- [4] A. J. Green, K. D. Chabak, E. R. Heller, R. C. Fitch, Jr., M. Baldini, A. Fiedler, K. Irmscher, G. Wagner, Z. Galazka, S. E. Tetlak, A. Crespo, K. Leedy, and G. H. Jessen, *IEEE Electron Device Lett.* 37, 902, 2016.
- [5] S. J. Pearton, J. Yang, P. H. Cary, F. Ren, J. Kim, M. J. Tadjer, and M. A. Mastro, *Appl. Phys. Rev.* 5, 011301, 2018.
- [6] A. Kuramata, K. Koshi, S. Watanabe, Y. Yamaoka, T. Masui, and S. Yamakoshi, *Jpn. J. Appl. Phys.* 55, 1202A2, 2016.
- [7] H. Murakami, K. Nomura, K. Goto, K. Sasaki, K. Kawara, Q. T. Thieu, R. Togashi, Y. Kumagai, M. Higashiwaki, A. Kuramata, S. Yamakoshi, B. Monemar, and A. Koukitu, *Appl. Phys. Express* 8, 015503, 2015.
- [8] E. Chikoidze, C. Sartet, H. Mohamed, I. Madaci, T. Tchelidze, M. Modreanu, P. Vales-Castro, C. Rubio, C. Arnold, V. Sallet, Y. Dumonta and Amador Perez-Tomas, *J. Mater. Chem. C*, 7, 10231, 2019.
- [9] M. M. Islam, M. O. Liedke, D. Winarski, M. Butterling, A. Wagner, P. Hosemann, Y. Wang, B. Uberuaga and F. A. Selim, arXiv 1911.02717, 2019.
- [10] S. Ohira and N. Arai, *Phys. Stat. Sol. (c)* 5, 3116–3118, 2008.
- [11] T. Oshima, T. Okuno, N. Arai, Y. Kobayashi, and S. Fujita, *Jpn. J. Appl. Phys.* 48 040208, 2009.
- [12] P. Vogt, and O. Bierwagen, *Appl. Phys. Lett.* 106, 081910, 2015.
- [13] R. Togashi, K. Nomura, C. Eguchi, T. Fukizawa, K. Goto, Q. T. Thieu, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Kuramata, S. Yamakoshi, B. Monemar, and A. Koukitu, *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 041102, 2015.
- [14] T. Oshima, K. Kaminaga, A. Mukai, K. Sasaki, T. Masui, A. Kuramata, S. Yamakoshi, S. Fujita, and A. Ohtomo, *Jpn. J. Appl. Phys.* 52 051101, 2013.
- [15] P.W. Peacock and J. Robertson, *Appl. Phys. Lett.* 92, 4712, 2002.
- [16] M. Mohamed, K. Irmscher, C. Janowitz, Z. Galazka, R. Manzke, R. Fornari, *Appl. Phys. Lett.* 101, 132106, 2012.
- [17] T. Kamimura, K. Sasaki, M. H. Wong, D. Krishnamurthy, A. Kuramata, T. Masui, S. Yamakoshi, and M. Higashiwaki, *Appl. Phys. Lett.* 104, 192104, 2014.
- [18] V. G. Hill, R. Roy, and E. F. Osborn, *J. Am. Ceram. Soc.* 35, 135, 1952.
- [19] F. P. Glasser, *J. Phys. Chem.*, 63, 2085, 1959.
- [20] K. Kita, E. Suzuki, and Q. Mao, *ECS Transactions*, 92 (1) 59-63, 2019.

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

次々世代ワイドギャップ半導体 酸化ガリウムのデバイス実用化へ向けた技術的課題の調査

令和2年2月

Survey of Technological Issues in Device Fabrications Processes for Gallium Oxide as a Next-Generation Widegap Semiconductor

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2020.2

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 特任研究員 喜多 浩之 (KITA Koji)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2020 JST/LCS

許可無く複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
