

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 (Vol.2)**
－酸化ガリウム単結晶のエネルギーバンドダイアグラムの調査－

令和3年3月

**Survey of Technological Issues in Device Fabrications Processes for Gallium
Oxide as a Next-Generation Widegap Semiconductor (Vol. 2):**
Clarification of Energy Band Diagram of Single-Crystalline Gallium Oxides

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-FY2020-PP-11

概要

次々世代のワイドギャップ半導体デバイス材料の一つとして注目される酸化ガリウム (Ga_2O_3) は、より低損失で動作可能なパワーデバイス材料として実用化が期待されているが、その基礎物性は十分に解明されていない。一方で、近年の急速な単結晶ウェハ成長技術の進展のおかげで、電子構造等の物性を正確に評価するために必要な高品質な結晶の入手が可能となってきた。今回、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶表面に紫外線光電子分光法を適用し、真空準位を基準にしたエネルギーバンドダイアグラムを明確化するとともに、それが金属 / 酸化物 / 半導体 (MOS) デバイス特性の正確な評価に重要な役割を持つことを示した。次々世代半導体デバイス開発の加速のためには、正確なデバイス特性評価やデバイス設計の土台となる基礎物性に関する共通の理解を多くの技術者・研究者が持つことが不可欠であり、これらの材料の基礎物性を解明する研究の推進が重要である。

Summary

Gallium oxide (Ga_2O_3), which is attracting attention as a next-generation wide-band-gap semiconductor device material, is expected to find application in power devices that can operate with lower energy losses. However, its fundamental physical properties have not been fully elucidated. On the other hand, thanks to the rapid progress in single crystal wafer growth technology in recent years, it has become feasible to obtain high-quality crystal samples for the accurate evaluation of physical properties such as band structure. In this study, the energy band diagram referenced to the vacuum level was clarified by applying ultraviolet photoelectron spectroscopy to the $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ single crystal surface, and it was demonstrated that this band diagram information has an important role in the accurate evaluation of MOS device characteristics. Research aimed at clarifying the fundamental physical properties of next-generation wide-band-gap semiconductors should be promoted to accelerate the development of devices using those materials, since it is essential for engineers and researchers to share an understanding of fundamental physical properties that will form the basis for accurate device characterization and device design.

目次

概要

1. 本提案の位置づけ	1
1.1 本提案の低（脱）炭素社会実現等における位置づけ、意義	1
1.2 本提案に関連した技術・研究開発の動向等	1
1.3 本提案に関連した政策等の動向	1
2. 酸化ガリウム単結晶の紫外線光電子スペクトルによる電子構造の解明	1
2.1 β -Ga ₂ O ₃ の紫外線光電子スペクトルによる価電子帯端エネルギーの決定	1
2.2 β -Ga ₂ O ₃ のフェルミレベルの正しい推定に基づくデバイス特性の再検証	3
3. 結論	5
4. 政策立案のための提案	5
参考文献	6

1. 本提案の位置づけ

1.1 本提案の低（脱）炭素社会実現等における位置づけ、意義

「明るく豊かな低（脱）炭素社会」の実現に貢献しうる次々世代半導体材料として広いバンドギャップを有する材料が注目される [1-3]。自動車の電動化によりモーター駆動系や充電システムの高効率化への要請が高まっており、また、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高効率化も重要である。これらの電力変換における損失低減のためにはパワーデバイスを従来のシリコン（Si）からワイドギャップ半導体へ置き換える技術が不可欠である。既にワイドギャップ半導体としてSiCやGaNを用いたデバイス製造が開始されているものの、さらに高耐压応用に相応しいのが次々世代半導体である酸化ガリウム（ Ga_2O_3 ）やダイヤモンドである。これらの材料のデバイス構造やデバイス製造プロセスの適切な設計には、材料の基礎物性や各種条件下での反応性の正しい理解が不可欠であるが、その知見は未だ不十分である。本提案書では、特にデバイス実用化の期待が急速に高まる Ga_2O_3 に着目する。その電子構造を実験的に解明した上で、電子構造の正しい理解に基づいてデバイス特性を再検証すると共に、次々世代半導体材料研究における基礎物性調査の意義を明確化する。

1.2 本提案に関連した技術・研究開発の動向等

Ga_2O_3 のパワーデバイス応用へ向けて、単斜晶構造を持つ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ とコランダム構造を持つ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の2種類の材料の検討が進められており、特にショットキーバリアダイオード（SBD）にはSiC製デバイスの特性を上回る性能の実証が進展している [4, 5]。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ はバルク結晶の融液成長が可能であり [6]、edge-defined film-fed growth (EFG) 法では6インチまでの大型単結晶ウェハ製造技術が確立されつつある。これは融液を毛細管現象によりスリット状の鋳型へ導き固化させる手法である。また、ハライド気相蒸着（HVPE）法を始めとするエピタキシャル成長技術について数 $\mu\text{m/hr}$ の比較的高速な成長 [7] と広範囲でのn型ドーピング濃度の制御技術により、SBDのほか縦型のMOSFETの動作実証 [8, 9] が進展している。一方の $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は、サファイヤ基板上にミスT CVD法によってエピタキシャル薄膜が得られ、これを金属電極上へ転写することで高耐压でありながら低抵抗なSBDの実証が行われている段階にある [5]。

1.3 本提案に関連した政策等の動向

Ga_2O_3 パワーデバイスの実用化を加速するための政策として、例えば2018年より進められている内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」（第2期）の「脱炭素社会実現のためのエネルギーシステム」の開発においては、デバイスからシステムまでの多岐に渡る研究課題の一つとして Ga_2O_3 を用いたパワーデバイスやチップの動作実証と製品化へ向けた課題抽出が進められているところである。しかしながら、 Ga_2O_3 の材料物性や反応性といった材料科学的な理解は未だ十分ではなく、それらの調査・研究の加速は今後の重要な課題となると考えられる。

2. 酸化ガリウム単結晶の紫外線光電子スペクトルによる電子構造の解明

2.1 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の紫外線光電子スペクトルによる価電子帯端エネルギーの決定

Ga_2O_3 の電子構造については光学特性の評価によって、光吸収係数やバンドギャップが詳しく議論されてきたが、価電子帯端や伝導帯端が真空準位からみてどのようなエネルギー準位となるか、すなわちイオン化エネルギーや電子親和力の値については、ほとんど評価例が見当たらない。しかし、伝導帯端のエネルギー準位やフェルミ準位を正確に把握することは、SBDやMOSFETなどのデバイス構造を設計する上で不可欠である。これまで十分な解明が行われてこなかった主な理由の一つとして、電子構造評価のためには高品質な単結晶の清浄な表面を大面積で得なければ

ばならないが従来はそのような試料の入手が容易ではなかったことが挙げられる。しかし近年の急速な大面積ウェハ成長技術やエピタキシャル形成技術の進展によって、再現性良く正確な評価が可能となる状況が生まれつつある。そこで今回、紫外線光電子スペクトル (UPS) を用いたエネルギーバンドダイアグラムの評価を $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (001) ウェハを用いて行うこととした。現在までに様々な方位の単結晶が研究対象となっているが、(001) 面は現段階で EFG 法によって最も安定にウェハが製造されている結晶方位である。

半導体表面からの UPS では、紫外線によって物質表面から放出される光電子の運動エネルギーを分析することで、価電子帯スペクトルのうち浅いエネルギー範囲のみを取得する。UPS では特に、光電子の運動エネルギーがゼロとなって検出できなくなる準位を、価電子帯中のある深さの準位 $E_{\text{cut-off}}$ としてスペクトルから定めることができ、その準位と真空準位とのエネルギー差は光源となる単色紫外線のエネルギーに対応する。そこで、最も運動エネルギーの高い準位である価電子帯端については、その真空準位を参照したときのエネルギー深さ E_V を式 (1) によって決定できる。

$$E_V = h\nu - (K_V - K_{\text{cut-off}}) \quad (1)$$

ここで、 K_V 、 $K_{\text{cut-off}}$ はそれぞれ UPS スペクトルの上端 (価電子帯端)、下端 (cut-off) における光電子の運動エネルギーを表わす。この様子を図 1 に模式的に示した。真空準位が途中で曲がるのは一般に真空準位が試料表面と検出器で異なることを考慮したものである。

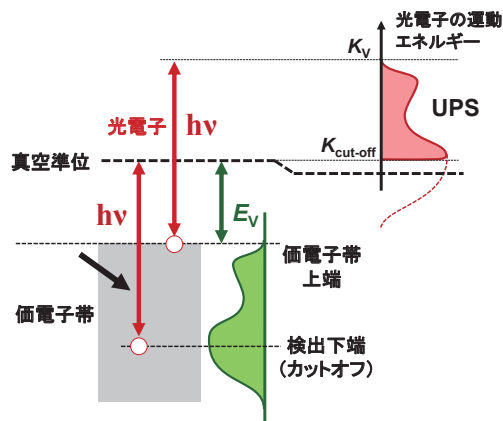


図 1 UPS 測定による価電子帯上端のエネルギー準位決定の模式図

本実験では、UPS を $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶 (001) 面のエピウェハの清浄な表面に適用することで、同ウェハ表面における価電子帯端のエネルギー準位を決定した。評価に用いた試料は EFG 法によって融液成長した $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (001) ウェハ上に、HVPE 法により $5\ \mu\text{m}$ のエピタキシャル層 (n 型、ドープ濃度 $\sim 2 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$) を成長させたものである。ウェハ洗浄は、既に 2019 年度提案書 [10] にて検討したとおり、加熱濃硫酸 + 過酸化水素中での洗浄後に、室温にて希薄 HF 溶液と純水で洗浄するという操作を行った。洗浄後は速やかに UPS 装置へ導入し、真空紫外領域の He I 線 ($h\nu = 21.22\ \text{eV}$) を光源とした光電子スペクトルの取得を行った。

図 2 が取得した UPS の例である。スペクトルの低運動エネルギー端は、試料表面において光電子の運動エネルギーがゼロとなることで決まる検出のエネルギー下限 (cut-off) を表わしており、高運動エネルギー端は価電子帯上端からの光電子を表わしている。それぞれのエネルギー端をスペクトルの直線近似によって決定したところ、cut-off は $3.5\ \text{eV}$ 、価電子帯端は $16.5\ \text{eV}$ に観察さ

れており、式 (1) から真空準位からみた価電子帯上端のエネルギー E_v が 8.15 ± 0.02 eV と推定された。また $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のバンドギャップは $4.7 \sim 4.8$ eV であることから [3]、伝導帯下端のエネルギー準位 E_c は真空準位からみて $3.4 \sim 3.5$ eV の深さであると推定された。

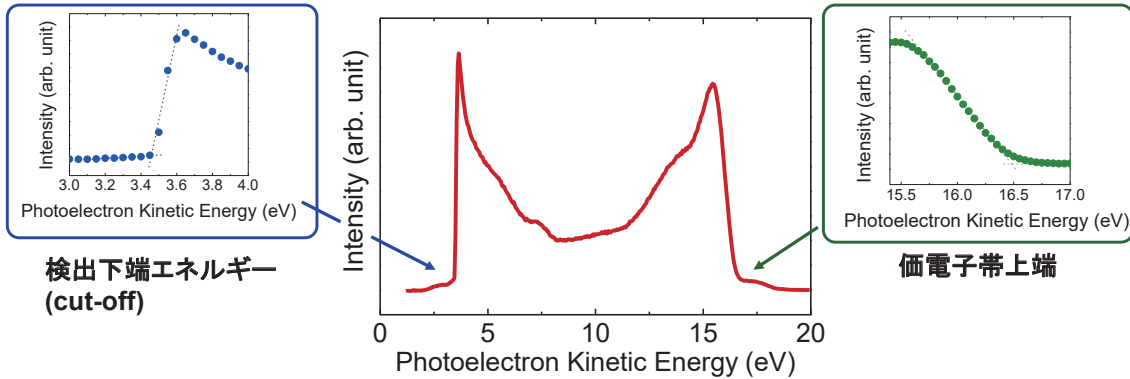


図2 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(001)$ ウェハ表面のUPSと検出下端付近(左)および価電子帯上端付近(右)の拡大図

2.2 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のフェルミレベルの正しい推定に基づくデバイス特性の再検証

MOS デバイスではゲート電圧の印加によって半導体中の荷電状態が蓄積状態や空乏状態に変化するが、両者の境界となる電圧がフラットバンド電圧 (V_{fb}) である。これは本来的に半導体のフェルミ準位 $E_{F, semi}$ とゲート電極のフェルミ準位 (= 仕事関数) Φ_{gate} の差で決まるものである。これを理想フラットバンド電圧と呼び、 $V_{fb(ideal)}$ と表わす (式2)。

$$qV_{fb(ideal)} = \Phi_{gate} - E_{F, semi} \quad (2)$$

ここで q は電子素量を表わす。しかしながら、これに加えて V_{fb} はゲート絶縁膜中や界面近傍での捕獲電荷によって左右され、捕獲電荷が増えるほど $V_{fb(ideal)}$ から遠ざかる性質を持つ。捕獲電荷の主な起源の一つに、界面の固定電荷と呼ばれる捕獲されたまま界面に残留し続けているものが挙げられる。ワイドギャップ半導体においては、ゲート電圧による半導体表面電位の変化幅に比べてバンドギャップがはるかに大きく、深いエネルギーの欠陥準位が高密度に存在した場合に、そこに捕獲される電荷はゲート電圧を掃引してもほとんど応答せず、固定電荷として振る舞う。即ち、深い準位が高密度に形成されて大量の固定電荷が観察される可能性が常に疑われる。今、 V_{fb} の理想値からの乖離の原因が、絶縁膜 / 半導体界面に存在する固定電荷だけであるとみなすとき、面積あたりの界面固定電荷の密度 N_{int} を正しく検出するには、実験的に観察される理想値からの V_{fb} シフト量 $\Delta V_{fb} = V_{fb} - V_{fb(ideal)}$ を正しく計測することが必要となる (式3)。

$$N_{int} = \left| \frac{C_{ox} \Delta V_{fb}}{q} \right| = \frac{\epsilon_{ox}}{qT_{ox}} |V_{fb} - V_{fb(ideal)}| \quad (3)$$

ここで、 C_{ox} 、 ϵ_{ox} 、 T_{ox} はそれぞれ酸化膜の電気容量 (単位面積あたり)、誘電率、物理膜厚を表わす。なお、式 (3) は ΔV_{fb} が正のときには負の固定電荷、負のときには固定電荷の密度を表わすことに留意されたい。この関係式を用いれば、 Ga_2O_3 MOS キャパシタの C-V 特性から実験的に V_{fb} を求めることで、実際のデバイス構造中の N_{int} を感度よく評価し、固定電荷の原因となる界面欠陥準位密度を定量的に議論できる。

そこで本実験では、n 型の $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(001)$ 面のエピタキシャルウェーハ上にゲート絶縁膜として SiO_2 を成膜し、さらにゲート電極として Au を蒸着した $\text{Au/SiO}_2/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(001)$ からなる MOS キャパシタを作製して N_{int} を定量的に評価することにした。同キャパシタの作製プロセスは既に

2019年度提案書 [10] にて報告したとおりであり、SiO₂ 成膜後に酸素雰囲気中で 1,000°C と比較的高温でのアニール処理を施している点が特徴となっている。さて、式 (2) から分かるように評価の際の基準点となる $V_{fb(ideal)}$ を正しく求めるには、ゲート電極の仕事関数、および Ga₂O₃ エピタキシャル膜のフェルミ準位を知る必要がある。そこで、前項の UPS にて決定した Ga₂O₃ のエネルギーバンドダイアグラムに基づき、フェルミ準位を決定することが重要となる。n 型半導体の場合、フェルミレベル E_{F, Ga_2O_3} と伝導帯端エネルギー E_C の差分が、伝導帯端の有効状態密度 N_C と実際の半導体中のキャリア濃度 n の比と直接的に相関することを示す関係式から算出できる。一方で、Ga₂O₃ 中の電子の有効質量の推定値に基づいて N_C を求めることができるので、以下の式 (4) の関係が成り立つ。

$$N_C = n \times \exp\left(\frac{E_C - E_{F, Ga_2O_3}}{k_B T}\right) = 2 \times \left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

ここで T は温度であり、 k_B はボルツマン定数、 h はプランク定数、 m_e^* は電子の有効質量 ($=0.28 m_0$ [11]; m_0 は真空中での電子の質量) である。式 (4) より、 β -Ga₂O₃ エピタキシャル膜中のキャリア濃度が $n \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 前後であれば $E_C - E_{F, Ga_2O_3}$ はおよそ 0.1 eV 程度となる。一方で、前項の通り UPS で決定した価電子帯の上端 E_V は真空準位から 8.15 eV の深さであり、バンドギャップの値を考慮すると伝導帯下端 E_C は真空準位から 3.4~3.5 eV と推定された。つまり本実験で用いた β -Ga₂O₃ (001) エピタキシャル膜の E_{F, Ga_2O_3} は、真空準位から 3.5~3.6 eV の深さにあると推定される。これらのエネルギー準位の推定値を図 3 のバンドダイアグラムに示す。

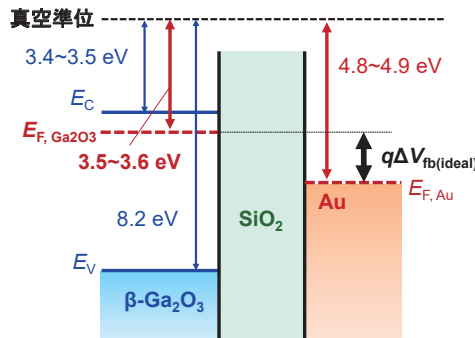


図 3 真空準位を基準とした β -Ga₂O₃(001) ウェハおよび作製した MOS キャパシタのバンドダイアグラム

過去に β -Ga₂O₃ の単結晶のエネルギーバンドダイアグラムを物理測定に基づいて正確に評価した報告例は少ないものの [12]、Al₂O₃ や SiO₂ など他の酸化物薄膜との界面バンドオフセットに関して X 線光電子分光測定を用いた計測は多数行われてきた [13-15]。Al₂O₃ や SiO₂ のエネルギーバンドに関する既存の知見を参照すれば、これらの文献値から Ga₂O₃ のエネルギーバンドダイアグラムを間接的に推定することも可能だが、報告値が大きくばらついており、これだけではどの値が適切なのか判断できない。報告によっては、Ga₂O₃ の伝導帯下端が真空準位から 4 eV 以上と Si の伝導帯下端と同程度か、それ以上に深い準位が推定されてしまう。これに対し、本実験で得られた 3.5~3.6 eV という値は、比較的浅く合理的なエネルギー範囲にあり、既存の界面バンドオフセット評価結果のうちの一部の報告例 [14] とよく整合する。本実験は高品質結晶に対して直接的な物理評価を適用したことで曖昧さなくエネルギーバンドダイアグラムが決定されているものと考えられる。

最後に、これらの考察を基にして、実際に作製した MOS キャパシタの C-V 特性から界面固定電荷密度を算出する。Au の仕事関数は、同じく UPS 測定を用いて実験的に 4.8 ~ 4.9 eV であると判明しているため、 $V_{fb(ideal)}$ は式 (2) より 1.3 ~ 1.4 V の位置にあると推定される。この MOS キャパシタ全体のバンドダイアグラムは図 3 に示す通りである。一方、図 4 は 1,000°C での O₂ アニール時間を 5 min から 1 hr まで変えて作製した Au/SiO₂ (膜厚 ~ 30 nm) /β-Ga₂O₃ MOS キャパシタを用い、1 MHz の高周波 C-V 特性から V_{fb} を実測したものである。アニール時間が短い場合は正方向への ΔV_{fb} が観察されて負電荷の存在が示唆されるものの、アニール時間を長くすると V_{fb} は理想値に近づき、1 hr のアニール後には $\Delta V_{fb} \sim 0.1$ V 程度とほぼ理想値に一致することが分かった。このとき式 (3) から推定される N_{im} はたかだか $\sim 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ と小さく抑えられている。以上のことから、本報告で試作した MOS キャパシタにおいて 1,000°C のアニールは深い準位への電荷捕獲に起因する界面固定電荷を抑制するはたらきがあり、アニール時間の延長がその低減に効果的であることが明確となった。これは今回、エネルギーバンドダイアグラムを明確化することで初めて得られた結論である。

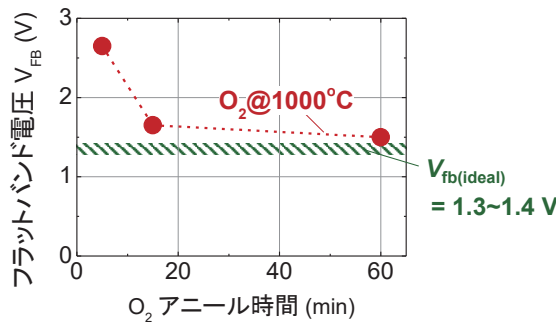


図 4 Au / SiO₂(膜厚 ~ 30 nm) / β-Ga₂O₃ MOS キャパシタの V_{fb} と O₂ アニール時間の関係

3. 結論

β-Ga₂O₃ (001) エピウェハの洗浄後表面の UPS 測定により、真空準位を基準とした β-Ga₂O₃ の価電子帯上端、伝導帯下端のエネルギー準位およびフェルミ準位を決定した。これに基づいて Au/SiO₂/β-Ga₂O₃ (001) MOS キャパシタのエネルギーバンドダイアグラムを正確に求め、 V_{fb} シフト量から界面固定電荷の密度を推定したところ、 $\sim 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 程度と小さく抑制されていることが示された。このように、次々世代半導体のエネルギーバンドダイアグラムを正確に把握することは、デバイス特性の正しい評価に重要な役割を持つといえる。

4. 政策立案のための提案

Ga₂O₃ やダイヤモンドなど次々世代半導体の基礎物性評価は、粉末や多結晶を用いたデータこそ蓄積されているものの、高品質な単結晶に対する信頼性の高いデータは限定的である。ところが、これらの物性の理解が不十分なまま、世界中でデバイス動作実証が先行して開始されているのが現状である。本提案書で検証した通り、Ga₂O₃ のエネルギーバンドダイアグラムは、その正しい理解によって初めてデバイス特性の正しい評価が可能となる。これはデバイスプロセスの検討において必要な知見となるだけでなく、デバイス動作の正しい予測やデバイス設計においても不可欠なパラメーターである。次々世代半導体デバイス技術の構築のためには、デバイス動作実証だけを加速するのではなく、これらの半導体材料の性質に対する技術者・研究者間の知識基

盤を整備するための、バンド構造などの基礎物性や、反応性などの化学的性質を把握するための基礎研究を充実させていくことが重要である。

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, “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”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2019年3月.
- [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] 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.
- [4] K. Konishi, K. Goto, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Kuramata, S. Yamakoshi and M. Higashiwaki, *Appl. Phys. Lett.* 110, 103506, 2017.
- [5] M. Oda, R. Tokuda, H. Kambara, T. Tanikawa, T. Sasaki and T. Hitora, *Appl. Phys. Express* 9, 021101, 2016.
- [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] 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.
- [9] M. H. Wong, H. Murakami, Y. Kumagai, and M. Higashiwaki, *IEEE Electron Dev. Lett.* 41, 296 (2020).
- [10] 低炭素社会の実現に向けた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”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2020年3月.
- [11] K. Irmscher, Z. Galazka, M. Pietsch, R. Uecker, and R. Fornari, *J. Appl. Phys.* 110, 063720 (2011); doi: 10.1063/1.3642962.
- [12] M. Mohamed, K. Irmscher, C. Janowitz, Z. Galazka, R. Manzke, R. Fornari, *Appl. Phys. Lett.* 101, 132106, 2012.
- [13] P. H. Carey, IV, F. Ren, D. C. Hays, B. P. Gila, S. J. Pearton, S. Jang, and A. Kuramata, *Jpn. J. Appl. Phys.* 56, 071101, 2017.
- [14] Z. Liu, J. Yu, P. Li, X. Wang, Y. Zhi, X. Chu, X. Wang, H. Li, Z. Wu, and W. Tang, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 52, 295104, 2019.
- [15] K. Konishi, T. Kamimura, M. H. Wong, K. Sasaki, and A. Kuramata, S. Yamakoshi, and M. Higashiwaki, *Phys. Status Solidi B* 253, 623, 2016.

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 (Vol.2)
－酸化ガリウム単結晶のエネルギーバンドダイアグラムの調査－

令和3年3月

Survey of Technological Issues in Device Fabrications Processes for Gallium
Oxide as a Next-Generation Widegap Semiconductor (Vol. 2):
Clarification of Energy Band Diagram of Single-Crystalline Gallium Oxides

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2021.3

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/>

© 2021 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。
