

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

技術開発編

酸化ガリウムの新規ワイドギャップ半導体としての
電子デバイス応用へ向けた技術開発課題

平成 31 年 1 月

Issues Regarding the Technological Development of Gallium Oxide
as a New Wide Bandgap Semiconductor for Electron Devices Applications

Strategy for Technology Development

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-FY2018-PP-07

概要

現在、ワイドギャップ半導体として本格的な利用が進められている窒化ガリウムやシリコンカーバイドよりも、さらに大きなバンドギャップを有する酸化ガリウム (Ga_2O_3) は、超高耐圧のパワーデバイスを始めとする新しい分野への応用が期待できる半導体材料である。 Ga_2O_3 は、溶液法による大型単結晶の成長や高品質なエピタキシャル薄膜の成長の技術が急速に進展しつつある材料であり、大規模な製造の可能性も有するという特徴がある。本提案書では、電子デバイス用の結晶供給技術やデバイス動作実証の現状に基づいて、 Ga_2O_3 の本格的な産業利用のために残されている技術課題を明確化する。

Summary

Gallium oxide (Ga_2O_3) is a semiconducting material viewed with high expectations for applications in new fields, including very high voltage power devices, because of its bandgap that is larger than the other industrialized common wide bandgap semiconductors such as gallium nitride and silicon carbide. Another attractive property of Ga_2O_3 is its potential for mass production taking account of the recent development of the melt-growth techniques of large single crystals and the epitaxial growth techniques of high-quality thin films. This report is to clarify the technological challenges for a large-scale industrialization of Ga_2O_3 based on the current statuses of the growth technologies of electron-device-grade-crystals and the performance of the demonstrated electron devices.

目次

概要

1. 酸化ガリウムの低炭素社会実現における役割とその材料物性	1
1.1 ワイドギャップ半導体の採用によるパワーデバイスの高効率化.....	1
1.2 新規ワイドギャップ半導体としての酸化ガリウムとその物性.....	1
1.3 酸化ガリウム結晶中の価電子制御	2
2. 酸化ガリウム結晶の成長技術と開発課題.....	2
2.1 β -Ga ₂ O ₃ の成長技術と開発課題	2
2.2 α -Ga ₂ O ₃ の成長技術と開発課題	4
3. 酸化ガリウムパワーデバイスの開発状況と課題.....	4
3.1 ショットキーバリアダイオード (SBD) の開発状況と課題.....	4
3.2 金属-酸化物-半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) の開発状況と課題	6
4. 政策立案のための提案.....	7
参考文献.....	7

1. 酸化ガリウムの低炭素社会実現における役割とその材料物性

1.1 ワイドギャップ半導体の採用によるパワーデバイスの高効率化

パワーデバイスは、低炭素社会実現のための電力利用効率の向上のキーデバイスの1つであり、主として直流-交流の電力変換（直交変換）や、交流の電圧・周波数の調整を行うインバーターを構成するための素子である。我が国のエネルギー消費に占める電力利用の割合は年々高まっており、家庭におけるエアコンや冷蔵庫、産業分野での大型機器等、電力消費の約6割はモーター駆動で占められ、それらの利用効率がパワーデバイス性能で左右される。近年の自動車の電動化の加速によって輸送機器においても電力利用の比率が急速に高まると、特に数百ボルトの蓄電池からの直流で3相交流モーターを動作させるための変換や、系統電源で蓄電池を充電する際の直交変換の制御を行うインバーターは、電気自動車のエネルギー効率を決定する重要な部品の1つとなる。また、再生可能エネルギーの利用拡大に伴って、太陽電池や風力発電、燃料電池から供給される電力の直交変換や周波数変換など、電力変換の需要が急速に高まっているほか、余剰電力を一時的に大型蓄電池へ充電して必要時に取り出す仕組みにおいても大規模な直交変換設備の整備が欠かせない。

これらの変換において、素子を電流が流れる際の抵抗発熱に伴うエネルギー損失（オン損失）と、素子にかかる電圧が切り替わる瞬間に生じる素子内の電荷分布の回復過程に伴う無駄な電流の発生は避けられない[1]。これらの損失割合は電力や周波数によって異なるが概ね数%~十数%に及ぶ。従来のシリコン(Si)を用いたパワーデバイスで素子構造の工夫が行われているものの、その物性限界によってこれ以上の損失の低減は難しい状況にあるため、物性の点からSiよりも損失を数百分の1~数千分の1の水準まで低減可能なワイドギャップ半導体の利用による高効率化への期待が大きい。これは、バンドギャップが広い材料ほど、電荷が半導体中に湧き出すのを防ぐ限界（アバランシェ降伏）の電界を表す絶縁破壊電界強度が大きくなり、より大きな電圧に耐えるデバイス構造が設計できるためである。既にシリコンカーバイド(SiC)や窒化ガリウム(GaN)を利用したパワーデバイスの利用は開始されつつあり、2030年頃には世界のパワーデバイス市場の約10%程度はこれらのワイドギャップ半導体が占めるとの予測もある[2]。新規ワイドギャップ半導体の酸化ガリウム(Ga_2O_3)は、これら先行する材料を追う立場であるが、2030年までにはGaNの市場を上回る成長をみせる可能性も期待され始めている[2]。

1.2 新規ワイドギャップ半導体としての酸化ガリウムとその物性

Ga_2O_3 は α 、 β 、 γ 、 δ 、 ε と様々な結晶構造をとることが知られているが、このうち低温・常圧における安定相である β 相と、準安定相の α 相について成長技術が確立されている。バンドギャップは α 相で5.3eV、 β 相で4.5~4.9eV程度とされ[3]、4H-SiC(3.3eV)やGaN(3.4eV)と比べてはるかに大きい。表1は代表的なパワーデバイス材料の重要な物性値を比較したものである[2][4]。表の下部にある利得係数は、Siのデバイスに対するオン損失の低減効果の期待値であり、 Ga_2O_3 が大きな可能性を有することが明白である。これはパワーデバイスで最も重要な物性である絶縁破壊電界強度がバンドギャップの大きいほど増大し、 β - Ga_2O_3 に対して7~8 MV/cmになると予想されている[5]ためである。ただし実験的には5MV/cm以上の値が示されているのみであり[6][7]、GaNの3.3MV/cm~3.8 MV/cm[4]よりもはるかに大きいことは確実と言えるものの、 Ga_2O_3 を用いたデバイス特性の理論的な限界は確定していない。

もう1つの Ga_2O_3 の特徴は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。特に β - Ga_2O_3 については常圧で融点を持ち、バルク結晶の融液からの成長が可能である。そのため縦型高耐圧素子への応用においてウェーハの供給が容易という大きな利点がある。また α 相、 β 相の双方について、ドーパ濃度を広い範囲で制御したエピタキシャル成長技術が確立されつつある。このように結晶成長が容易という利点を生かすことで、当面はSi製デバイスよりも高性能な素子

を (SiC や GaN に比べて) 低価格で供給可能という利点を生かした市場開拓が期待される。

Ga₂O₃ の物性上の欠点としては熱伝導率が SiC と比べて一桁小さく、また Si よりも劣ることが挙げられる。パワーデバイスに大電流を通電する時の発熱を十分に排出できずにデバイス内部に蓄積してしまうという弱点を持つことになり、この観点でデバイス構造に工夫が必要となる可能性がある。

表 1 パワーデバイス用半導体の物性の比較

	β -Ga ₂ O ₃	GaN	4H-SiC	Si
バンドギャップ E_g (eV)	4.5~4.9	3.4	3.3	1.1
臨界電界強度 E_c (MV/cm)	~8 (推定)	~3.5	2.8	0.3
電子飽和速度 v (cm/s)	$1.8\sim 2\times 10^7$	2.7×10^7	2.2×10^7	1.0×10^7
電子移動度 μ_e (cm ² /Vs)	300	~1000	1000	1350
熱伝導率 k (W/cm·K)	0.1~0.3	2	4.9	1.5
Baliga のパワーデバイス利得係数*	~3000	~900	500	1

*Baliga の利得係数とは $\epsilon\mu_e E_c^3$ の Si との比である (ϵ :誘電率、 μ_e :電子の移動度、 E_c :臨界電界強度)。

1.3 酸化ガリウム結晶中の価電子制御

Ga₂O₃ のデバイス応用上不可欠な性質である価電子制御性に関しては、Si や Sn ドープによって n 型となることがよく知られており、例えば β -Ga₂O₃ ではキャリア濃度が $10^{15}\sim 10^{19}\text{cm}^{-3}$ の広い範囲で制御が行われている。その一方で、p 型ドーピング技術がまったくないことは、他の半導体と比べて大きな欠点である。例えば Mg ドープは n 型伝導を低下させる働きがあるものの、p 型にはならない。電子構造の計算からは、Ga₂O₃ 中のホールは大きな有効質量を持ち、移動度が極めて小さいことで説明されるほか、ホールがポーラロンを形成して束縛されている可能性も指摘されている[3]。従って p 型層の反転層チャネルを利用した反転型 n-MOSFET の形成は困難であり、それを補うための素子構造の工夫や、代替りの p 型層の導入等の検討が必要となっている。

2. 酸化ガリウム結晶の成長技術と開発課題

2.1 β -Ga₂O₃ の成長技術と開発課題

(1) 融液からの β -Ga₂O₃ バルク結晶成長技術

単斜晶である β -Ga₂O₃ は、 α , β , γ , δ , ϵ の多形のうち常温常圧での最安定相であるために多くの結晶成長技術が検討されている。 β -Ga₂O₃ は 1800°C 付近に融点を持ち、融液からのバルク結晶の成長がチョクラルスキー (CZ) 法やフローティングゾーン (FZ) 法、EFG (edge-defined growth) 法等で実現していることは、他のワイドギャップ半導体にはない特徴である。EFG 法で得られる結晶については、2017 年より日本国内で 2 インチウェーハの製造・販売が開始され、大口径化も検討される段階にあり、2018 年時点で世界唯一の製造拠点である。

EFG 法の典型的な成長は、5N の純度を持つ粉末をイリジウム (Ir) 製のるつぼ中にて、N₂ に 2% の O₂ を加えた大気圧の雰囲気中、高周波誘導加熱により融解し、Ir 製のダイと呼ばれるスリット型の鋳型へ融液を引き込み、その上端に密着させた種結晶を、[010]方向 (注:[]は結晶中の方向を表わす方向指数) に 15 mm/hr の速度で引き上げることで連続的に行われている[8]。原料粉末中に少量の SnO₂ または SiO₂ を共存させると $10^{17}\sim 10^{19}\text{cm}^{-3}$ の範囲でドーピング濃度が制御可能である。ただし成長後に高温の熱処理を行う際に、酸素を含む雰囲気とするとドーピング濃度が大きく低減し、再度窒素中で熱処理を行うと回復する現象が見られたことから、結晶中の酸素

欠損がドーパントの活性化と関連する可能性が指摘されている[8]。EFGで成長した結晶中には、成長初期に導入される双晶が残り易いほか、 $10^3 \sim 10^4 \text{ cm}^{-2}$ の転位があると報告されている。ウェーハ中の欠陥密度がその上のエピタキシャル薄膜層中の欠陥密度に強く影響するため、引き続き欠陥密度低減のための成長技術が検討されていくものと考えられるが、現時点で既に典型的なGaNバルク結晶中での転位密度[4]と同等以上の品質の結晶が既に達成されていることは注目される。

(2) β -Ga₂O₃ ウェーハ上へのエピタキシャル成長技術

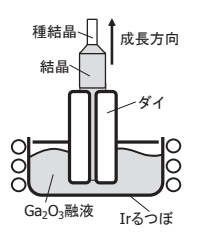
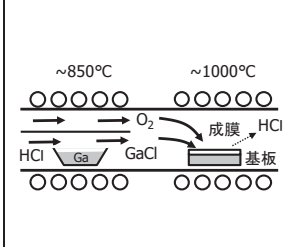
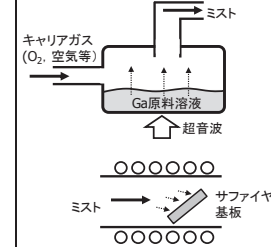
デバイス形成には低ドーピング濃度に制御された低欠陥密度層の形成が必要となり、これには上記ウェーハ上への数 $\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ 程度のエピタキシャル成長が行われる。これには有機金属気相蒸着(MOCVD)法、ハライド気相蒸着(HVPE)法、分子線エピタキシー(MBE)法など多くの試みがある。このうち数 $\mu\text{m/hr}$ の比較的高速な成長と良好なドーピング制御の両立が期待できるのはHVPE法である。EFG法で得た β -Ga₂O₃(001)ウェーハ(注:()は結晶面を表わすミラー指数)を基板として、原料ガスにGa金属と塩素の反応(850°C)で得た塩化ガリウム(GaCl)と酸素を用いて、1000°Cに保った(001)基板上への成長が行われている[9]。この条件では表面平滑性が高く、高品質なエピタキシャル結晶の成長が5 $\mu\text{m/hr}$ にて可能と報告されている。

(3) β -Ga₂O₃ 結晶中の欠陥により導入される準位

MBE法での成長過程の観察からは、Ga₂O₃と同時に昇華性のGaOが同時に生成し易くGaとOの供給比によって成長速度が著しく影響を受けることが指摘されており[10]、MBE法に限らず一般に酸素欠損の導入が容易であり、成長条件の選択が結晶中の酸素欠損の量に大きく影響する可能性が高い。

β -Ga₂O₃結晶中の欠陥構造に関する第一原理計算によれば、酸素空孔は格子中の位置によって異なる準位をとるが、最も浅いものでも伝導帯端から $\sim 1\text{eV}$ の深いドナー準位と推定されている。従って、一般的な酸化物半導体とは異なり、酸素空孔のn型伝導への寄与は小さい[11]。結晶中に存在する深い準位については、実験的には古くからGa₂O₃が紫外域(3.2–3.6eV)、青色(2.8–3.0eV)、緑色(2.4eV)の発光帯が知られていたが、各発光帯の帰属は明確ではない[3]。ショットキーダイオードの光応答を用いた測定[12]から示唆された伝導帯端から $\sim 0.8\text{eV}$, 2.0eV, 2.7eV等の欠陥準位がこれらに対応している可能性がある。これらの欠陥準位の形成はキャリア生成や捕獲、またデバイス界面特性の制御の上で重要であり、その理解と制御技術の進展が期待される。

表 2 デバイス開発に用いられている主な β -Ga₂O₃, α -Ga₂O₃ 結晶成長技術

結晶の種類	β -Ga ₂ O ₃		α -Ga ₂ O ₃		
	バルク/エピ	バルク結晶成長	エピタキシャル成長	バルク結晶成長	エピタキシャル成長
主な成長法		EFG 法 (他に CZ, FZ 等)	HVPE 法 (他に MOCVD, MBE 等)	—	ミスト CVD 法
特徴		<ul style="list-style-type: none"> 融点 ~1800°C 15mm/hr (EFG) 転位密度 10³~10⁴ cm⁻² 2 インチウェーハ市販 	<ul style="list-style-type: none"> (001)ウェーハ上のホモエピ 1000°C付近で平滑な成長 5 μm/hr (HVPE) 2 インチウェーハ上で実証 >1 kV 耐圧 SBD 実証 	<ul style="list-style-type: none"> バルク結晶の成長は困難 	<ul style="list-style-type: none"> 大気圧で低コスト ~500°Cのサファイヤ基板上へテロエピ 4 インチ基板で実証 成膜技術が事業化 SBD 製造
手法概要					

2.2 α -Ga₂O₃ の成長技術と開発課題

コランダム構造をとる α -Ga₂O₃ は、常温常圧下では準安定相である。ミスト CVD 法と呼ばれる大気圧下での成長法を用いるとサファイヤ基板上でエピタキシャル成長することが実証されている[13]。現在は国内ベンチャー企業が世界で唯一の製造拠点として製品開発を活発化させている状況にある。

ミスト CVD 法は真空を必要とせずに酸化物を大気圧下で成長させる手法で、有機金属錯体等を純水やメタノール等に溶解した溶液を超音波振動でミスト状態としたものを酸素や空気等のキャリアガスで炉内へ導入して行われるものであり、大気圧下であるために安価な製造が可能であるという長所がある。低温・大気圧下のプロセスであるため基板表面での原子のマイグレーションが抑制されており、コランダム構造のサファイヤ基板上には、同じコランダム構造の α -Ga₂O₃ が選択的に得られる。当初は原料にガリウムアセチルアセトナートが用いられたが、炭素不純物の混入を避けるためにはガリウムハライドが用いられる[14]。500°Cに加熱したサファイヤの c 面を基板としてドーパ濃度 1×10¹⁷~3×10¹⁹ cm⁻³ で制御した成長が可能であり、4 インチのサファイヤ上にて原子レベルで平坦な成長が報告されている。

サファイヤ基板上にヘテロエピタキシャル成長させるため、結晶中の欠陥密度が十分に低減できるのかどうかは課題であるが、後述するショットキーバリアダイオードでの実証結果を見る限り、現在の品質であっても比較的大きな絶縁破壊電界強度が容易に得られているようである。異種基板を用いているため、耐圧に利点のある縦型 MOSFET 構造への展開には不利となる。

3. 酸化ガリウムパワーデバイスの開発状況と課題

3.1 ショットキーバリアダイオード (SBD) の開発状況と課題

(1) β -Ga₂O₃ ウェーハ上の SBD

β -Ga₂O₃ の SBD は、EFG 法で得られた単結晶ウェーハ上に、10 μ m 前後の Si ドープのエピタキシャル層を成膜した上に、Ni や Pt をショットキー電極として成膜するものであり、既に 1kV を超える耐圧の実証が行われている。ウェーハ裏面のオーミックコンタクトとしては Ti/Au が用

いられることが多い。高耐圧特性は結晶中の欠陥によって制約されているため、電極を小面積(直径 $20\mu\text{m}$)とすると 1.6kV の耐圧が実証されるが(特性オン抵抗 $25\text{m}\Omega\text{cm}^2$)、低抵抗化のために直径 $500\mu\text{m}$ とした場合は 250V しか得られないと報告されている[15]。

耐圧特性を制約する一因は電極端部の電界集中にあるため、これを回避するためのフィールドプレート (FP) と呼ばれる構造を電極の周縁部に沿って導入することが効果的である。HVPE 法で成長したドーパ濃度 $2\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ のエピタキシャル層を用いた SBD において、電極周縁部に SiO_2 を堆積する FP 構造を導入することで耐圧を 2 倍近く改善でき、 1.08kV の耐圧で特性オン抵抗 $5.1\text{m}\Omega\text{cm}^2$ となる。この時のダイオード特性の理想係数は室温で 1.04 という良好な動作が実現している[6]。尚、この素子の内部での電界分布をシミュレーションすると、最大で 5.1MV/cm の電界に耐えていることが推定された。まだ物性から期待される絶縁破壊電界強度には至らないものの、現在の結晶品質であっても既に GaN や SiC よりもはるかに大きい絶縁破壊電界強度が実証されていると考えてよい。

SBD では、耐圧特性の向上に加えて逆方向電圧印加時のリーク電流の抑制も課題である。このリーク電流量はエピタキシャル層中の欠陥密度、特に転位密度と関連して増大している。[010]方向に成長したエピタキシャル層を用いている場合には、その膜厚方向に沿って伸びる転位のみがリーク電流に関与し、[102]方向に形成されたものは影響しないとの結果が報告されている[16]。従って、結晶中に形成される転位の方向を考慮したデバイス結晶面の選択が重要となっている。

(2) $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ を用いた SBD

$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 製 SBD については、既に前述の国内ベンチャー企業より汎用パッケージに実装された製品が発表され、量産開始間近と期待される段階である[17]。従来の主流なパワーダイオードである Si 製 pn ダイオードを置き換える高耐圧 SBD として、現在は SiC 製 SBD が市場を獲得しつつあるものの、製造コストに課題があるため、置き換えが進まない分野も多くある。これに対し、安価に製造が可能なミス CVD エピタキシャル結晶を用いた $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 製 SBD には、高耐圧でありながら安価という大きな利点を生かした市場開拓が期待される。

ミス CVD 法では熱伝導率の小さなサファイヤ基板が用いられるため、このままデバイスを形成したのでは動作時の放熱に問題がある。そこで $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ を一旦サファイヤ基板上に成長させた後に基板から剥離し、Ti/Au からなる金属層にボンディングする技術が採用されている[14]。その結果、パッケージ化された製品の熱抵抗は 13.9°C/W となり、SiC 製 SBD の典型的な熱抵抗値よりも多少劣るものの遜色ない水準であると説明されている[17]。

2016 年の発表では、 531V 耐圧で $0.1\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 855V 耐圧で $0.4\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ となっており、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ に先んじて低抵抗化が進んでいるだけでなく、同じ耐圧であれば典型的な SiC 製 SBD と同等な特性が達成できていると言える[14]。ただし逆方向電圧印加時のリーク電流抑制にはヘテロエピタキシー由来の欠陥の低減や、剥離プロセスに伴って導入された表面欠陥の不活性化するための酸化膜堆積技術が重要であることが指摘されている。

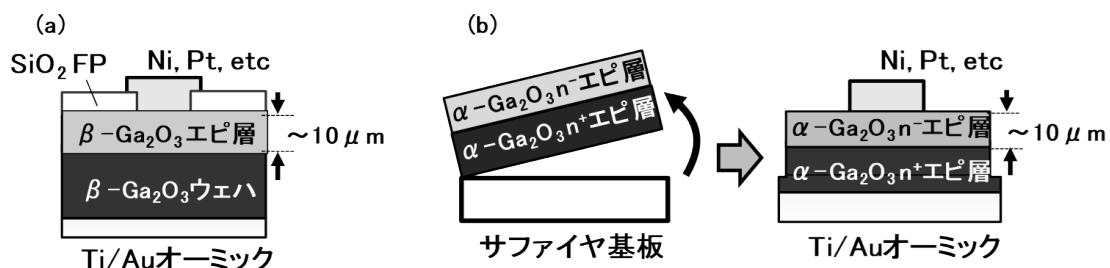


図1 典型的な SBD 構造の断面の模式図 (a) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 製 SBD (b) $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 製 SBD

3.2 金属-酸化物-半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) の開発状況と課題

(1) β -Ga₂O₃ ウェーハ上の横型 MOSFET 開発状況と課題

β -Ga₂O₃ はバルク結晶が得られるため、上部にソース電極、裏面にドレイン電極を形成した縦型 MOSFET が実現できる。この構造は、薄膜上の横型 MOSFET に比べて厚さ方向の大きな電圧に対する耐圧設計を行う上で有利であり、Si や SiC の高耐圧パワー MOSFET でも採用されている。

β -Ga₂O₃ の MOSFET 動作は現在のところ、その多くは横型構造で実証が開始されており、Fe や Mg ドープによって半絶縁性とした β -Ga₂O₃ 基板上に、チャンネル層をエピタキシャル成長させて行われている[18]。ソースやドレインのコンタクト抵抗を低減するための技術としては、高濃度な Si のイオン打ち込みと 900°C~1000°C 程度の活性化アニールを行って n⁺層を形成してから Ti/Au 電極でオーミックコンタクトを形成する手法が広く採用されている。また、ゲート絶縁膜には ALD 法による Al₂O₃ を用いたものが標準的に用いられている。ただし、これらの動作実証はまだ駆動電流が 10~100mA 程度の小さな範囲に留まり、チャンネル部分のエピタキシャル層中の欠陥低減や、ゲート絶縁膜との界面欠陥の低減によるチャンネル特性の大幅な改善が次なる課題となっている。耐圧については 5.3MV/cm を得たとの報告[7]もある。

ただし、これらの実証の多くは、ノーマリーオンと呼ばれる、ゲート電圧がゼロのときにはソースとドレインが通電するオン状態であり、ゲート電圧を印加したときの空乏層の広がりによって電流を遮断する動作によって行われており、このままではパワーデバイス応用上好ましくない。中には、FinFET 構造 (先端 CMOS で用いられている立体型のチャンネルの周囲をゲート電極で囲むトランジスタ) への微細加工によってノーマリーオフ動作を実現した報告もある[19]。以上のように、実用レベルの MOSFET 実現にはチャンネル層の結晶成長技術とプロセス制御によるチャンネル高品質化と界面欠陥の低減、ノーマリーオフ動作のためのチャンネル構造の工夫の進展が待たれる状況である。

(2) β -Ga₂O₃ ウェーハ上の縦型 MOSFET 開発状況と課題

一方、高耐圧デバイスを目指した縦型のトランジスタ動作実証の試みも開始されており、まだ実施例は数少ないものの今後の進展が期待される。最初の例は、表面のソース電極と裏面のドレイン電極との電気的な分離のために、電流ブロック層と呼ぶ Mg イオンのインプランテーションで絶縁的にした層を導入しながら、そのゲート直下のみを開口させておき、そこを流れる電流をゲート電圧によって生じる空乏層の広がりによって制御する構造 (CAVET 構造) であり、ゲート変調が実証されている[20]。本来であれば電流ブロック層は p 型層で形成すべきところであるが、Ga₂O₃ では p 型が得られない問題があり、現在の条件ではオフ状態でのリーク電流が多く残る課題がある。また、チャンネルとなるエピタキシャル層にトレンチ構造の加工を施した縦型 MOSFET も試みられている[21]。低ドープ層は 2 μ m のメサと 4 μ m のトレンチが繰り返された構造となっている一方、メサ上部のソースコンタクト部分には高ドープ濃度の層を堆積して抵抗を低減することにより、オン抵抗は 3.7m Ω cm² へと低減されている。オン/オフ比が 10³ へと改善されており、トレンチ部分の絶縁膜形成プロセスの工夫次第でさらに改善できる期待がある。この構造は将来的にはトレンチの設計によって 0.5m Ω cm² までの達成の可能性がある上、トレンチの微細化によってノーマリーオフ動作の可能性もあるとされている。これらの縦型 MOSFET の動作実証は、まだ始まったばかりであり、今後も高耐圧で低抵抗な動作へ向けたデバイス構造やプロセスの進展が期待される。

(3) α -Ga₂O₃ を用いた MOSFET の開発状況と課題

α -Ga₂O₃ はサファイヤ基板の薄膜として得られるため、高耐圧用の作製に有利な縦型 MOSFET 構造の形成は容易ではない。現在までに横型 MOSFET の試作が行われている段階である。

Ga_2O_3 はn型伝導しか示さないために、一般的なn-MOSFETのようにp型層の反転層チャネルを利用した構造は形成できない。そこで $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ と同じミストCVD法で成長が可能な他のp型伝導を示すワイドギャップ半導体を探索し、それらを組み合わせる検討が進められている。最近、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ に対する格子ミスマッチが0.3%と小さいコランダム構造でありp型半導体となる酸化イリジウム($\alpha\text{-Ir}_2\text{O}_3$) [22]に着目し、これをチャネル層として導入した横型MOSFETによって $\alpha\text{-Ir}_2\text{O}_3$ の反転層形成によるノーマリーオフ(ゲート電圧がゼロのときにオフ状態となる)型の動作が実証された[23]。これまでのところp型の伝導を示すワイドギャップ半導体として知られるものは殆どなく、 $\alpha\text{-Ir}_2\text{O}_3$ もバンドギャップは2.3eV程度に留まっており、今後はさらなるp型のワイドギャップ半導体の材料探索が期待される。

4. 政策立案のための提案

次世代のパワーデバイス的一端を担うことが期待される新規ワイドギャップ半導体である Ga_2O_3 について、現状と技術課題の要点をまとめた。今後の本格的な産業化と普及を促進するための課題は、以下の(1)～(3)のようになる。

(1) $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 結晶, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 結晶の基礎物性の把握

Ga_2O_3 の基礎材料物性にはまだ不明な点も多く、低欠陥密度の結晶の成長技術と共に進展することが期待される。特にデバイス性能を正しく予測するために重要な物性パラメータとして、絶縁破壊電界強度の把握は必須である。またドーピング制御には結晶中の不純物の挙動の把握が重要であり、ドーパントや意図しない不純物、内因性の欠陥等の形成する欠陥準位の理解を進める必要がある。

(2) Ga_2O_3 高品質結晶成長技術

パワーデバイスにおける耐圧性能には、結晶中の転位密度が直接的に影響するため、ウェーハ中やエピタキシャル膜中の転位密度低減技術の進展は必須であるほか、ウェーハ大口径化や高速成長技術の進展が期待される。また、デバイスで使用する結晶面の選択は重要である。どの結晶面の使用が最適となるかを判断するため、欠陥制御性とデバイス特性の両面から知見を集める必要がある。

(3) デバイス形成技術

SBDは既に実用レベルが達成されつつあるが、今後も耐圧の向上のための技術開発が期待される。一方、MOSFET形成プロセスの要素技術の開発はまだこれからである。p型層が形成できないことに由来する困難の克服のため、ノーマリーオフ動作となる構造や材料の検討、縦型デバイス動作をさせるための構造の開発が必須である。またチャネル特性の向上には、特にゲート絶縁膜形成プロセスに関してチャネルとの界面に生じる欠陥準位の低減が重要な開発課題である。

参考文献

- [1] 松波弘之, 木本恒暢, 中村孝, 大谷昇, ”半導体SiC技術と応用”, 日刊工業新聞社, 2011.
- [2] “2018年版 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, 2018.
- [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] 低炭素社会実現に向けた政策立案のための提案書 技術開発編「GaN系半導体デバイスの技術開発課題とその新しい応用の展望」LCS-FY2016-PP-08, 2017.
- [5] M. Higashiwaki, K. Sasaki, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Koukitu, A. Kuramata, T. Masui and S.

- Yamakoshi, *Semicond. Sci. Technol.* 31, 034001, 2016.
- [6] K. Konishi, K. Goto, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Kuramata, S. Yamakoshi and M. Higashiwaki, *Appl. Phys. Lett.* 110, 103506, 2017.
- [7] 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.
- [8] A. Kuramata, K. Koshi, S. Watanabe, Y. Yamaoka, T. Masui, and S. Yamakoshi, *Jpn. J. Appl. Phys.* 55, 1202A2, 2016.
- [9] 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.
- [10] P. Vogt, and O. Bierwagen, *Appl. Phys. Lett.* 106, 081910, 2015.
- [11] J. B. Varley, J. R. Weber, A. Janotti, and C. G. Van de Walle, *Appl. Phys. Lett.* 97, 142106, 2010.
- [12] Y. Nakano, *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 6, 615, 2017.
- [13] S. Fujita and K. Kaneko, *J. Crystal Growth*, 401, 588, 2014.
- [14] M. Oda, R. Tokuda, H. Kambara, T. Tanikawa, T. Sasaki and T. Hitora, *Appl. Phys. Express* 9, 021101, 2016.
- [15] J. Yang, S. Ahn, F. Ren, S. Jang, S. J. Pearton and A. Kuramata, *IEEE Electron Device Lett.* 38, 906, 2017.
- [16] K. Nakai, T. Nagai, K. Noami, and T. Futagi, *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 015201, 2015.
- [17] 株式会社 FLOSFIA, プレスリリース 2016 年 10 月 4 日.
- [18] M. Higashiwaki, K. Sasaki, T. Kamimura, M. H. Wong, D. Krishnamurthy, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, *Appl. Phys. Lett.* 103, 123511, 2013.
- [19] M. J. Tadjer, N. A. Mahadik, V. D. Wheeler, E. R. Glaser, L. Ruppalt, A. D. Koehler, K. D. Hobart, C. R. Eddy, Jr. and F. J. Kub, *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 5, 468, 2016.
- [20] M. H. Wong, K. Goto, A. Kuramata, S. Yamakoshi, H. Murakami, Y. Kumagai, and M. Higashiwaki, *IEEE Device Research Conference 2017*, South Bend.
- [21] K. Sasaki, Q. T. Thieu, D. Wakimoto, Y. Koishikawa, A. Kuramata, and S. Yamakoshi, *Appl. Phys. Express* 10, 124201, 2017.
- [22] R. K. Kwar, P. S. Chigare and P. S. Patil, *Appl. Surf. Sci.* 206, 90, 2003.
- [23] 株式会社 FLOSFIA プレスリリース, 2016 年 9 月 28 日.

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

技術開発編

酸化ガリウムの新規ワイドギャップ半導体としての
電子デバイス応用へ向けた技術開発課題

平成 31 年 1 月

**Issues Regarding the Technological Development of Gallium Oxide
as a New Wide Bandgap Semiconductor for Electron Devices Applications**
Strategy for Technology Development,
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2019.1

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 (Koji KITA)
- 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/>

© 2019 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。
