特別賞

Na フラックス法と OVPE 法を組み合わせた 高品質・大型 GaN 結晶成長技術

~脱炭素社会化に貢献する GaN デバイスの普及を目指して~

国立大学法人大阪大学¹ パナソニック株式会社² 豊田合成株式会社³

今西 正幸¹ 字佐美 茂佳¹ 滝野 淳一² 藤森 拓³ 隅 智亮² 山田 拓海¹ 村上 航介¹

1. 諸 言

近年、地球温暖化に代表される気候変動の抑制を目的として、温室効果ガスの排出低減が世界的に推進されている。我が国においても2020年10月、政府は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルを目指すことを宣言し¹⁾、脱炭素化に向けた動きが活発化している。脱炭素を推進するためには、電力変換効率の向上によりエネルギー消費量を抑えることが重要である。

省エネルギー社会の実現に向けた技術開発として、各種電気・電子機器に搭載されているシリコン (Si) を素材とした半導体パワーデバイスを、次世代ワイドバンドギャップ (WBG) 半導体に置き換えていく取り組みが始まっている。WBG 半導体を用いたパワーデバイスは、高電圧・大電流の電力変換に用いられ、その優れた物性値から Si デバイスと比較して、電力損失の大幅な削減が期待されている。我々も環境省「GaN 技術による脱炭素社会・ライフスタイル先導イノベーション事業」プロジェクトの中で、WBG 半導体である窒化ガリウム (GaN) のパワーデバイス応用に向けた研究開発を進めている。GaN は2014年にノーベル物理学賞を受賞した青色発光ダイオード (LED) に次ぐ応用として、高性能パワーデバイスへの適用が期待されている。しかし、そのバルク結晶化技術が未完であるため、未だ6インチ以上の大口径かつ低コストなウエハの普及には至っていない。本論文では、大阪大学と豊田合成株式会社、パナソニック株式会社と共同で GaN の高品質・大口径・低コスト化に向け開発した新たな結晶成長技術について述べる。

2. 開発背景と技術課題

2-1 GaN ウエハの高品質・大口径化

現在 GaN 系半導体デバイスは、サファイアや Si 等の異種基板上に作製されているため、デバイス層の結晶品質が悪く、材料本来の特性が得られていない。デバイス特性向上には、高品質なデバイス層の実現が不可欠であり、Si や GaAs 等のような高品質 GaN ウエハが必須となる。現在、ハライド気相成長 (HVPE) 法と呼ばれる気相法で GaN ウエハを作製する技術が実用化されてはいるものの 2,3 、サファイアなどの異種基板上に高速堆積させる方法では異種基板との熱膨張係数差の影響で湾曲してしまうため高品質化や低歪化は原理的に難しく、この歪みの存在が大口径化を困難にしている (図1)。デバイス作製の観点からは、高

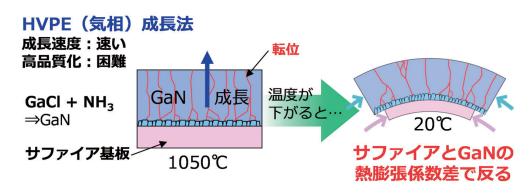


図1. サファイア基板上 HVPE 成長の模式図

品質で6インチ以上のウエハサイズが望まれているが、GaN ウエハは先述の問題のため、未だ低品質2インチウエハが主流という状況であり、近年ようやく4インチウエハが広まり始めた段階である。

2-2 GaN ウエハ普及に向けた低コスト化

低コスト化に向けて必要なのが、厚膜のバルク GaN 結晶を高速成長で作製し、製造スループットを向上することである。一度の成長で得られるバルク GaN 結晶 (GaN インゴット)を図2のようにスライスすることで多数の GaN ウエハを効率的に得ることができ、低コスト化が可能である。

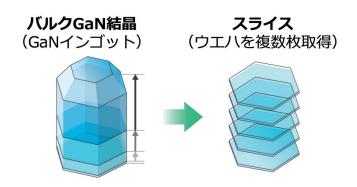


図2. バルク GaN 結晶のスライスによる GaN ウエハ多数枚取得の模式図

2-3 GaN ウエハ抵抗の低減

GaN ウエハを縦型パワーデバイスとして応用するためには、基板である GaN ウエハの抵抗をなるべく小さくする必要がある。一方、現状ドーピングによる低抵抗化と品質の結晶維持がトレードオフの関係にあり、それらを両立する技術は未だ確立されていない。

以上より、Si ウエハ並みの品質を有する6インチ超大口径・低抵抗 GaN ウエハの低コスト作製技術が本質的課題となる。

2-4 課題の解決に向けた取り組み

大阪大学では、ナトリウム (Na) フラックス法という液相成長法により大口径かつ高品質の結晶を作製する技術を開発した $^{4.5)}$ 。近年当該技術を豊田合成株式会社に移管し、64ンチ超 GaN 結晶を作製することに成功した $^{6)}$ 。しかしながら、Na フラックス法単独では厚膜化方向への結晶成長速度が $20\mu \text{m/h}$ 程度と遅いことに加え、ドーピング制御が難しいことから、GaN 結晶の厚膜化 (バルク化) 及び低抵抗化に不向きであった。そこで、大阪大学では成長速度の大きい気相成長法である酸化物気相成長 (OVPE) 法を新たに開発した。当該手法を移管したパナソニック株式会社では、低抵抗 GaN 結晶の $200\mu \text{m/h}$ 以上での高速成長に成功した $^{7)}$ 。しかしながら、口径は種結晶 (市販 GaN 結晶) に制限され、OVPE 単独での口径は $2\sim4$ インチにとどまっている。そこで、本研究では図 3 に示すように、パナソニック株式会社及び豊田合成株式会社と共同で、Na フラックス法で作製した GaN 結晶を種結晶としてOVPE 法で成長させることで、64ンチ超大口径・低抵抗 GaN ウエハの作製する新手法を提案した。

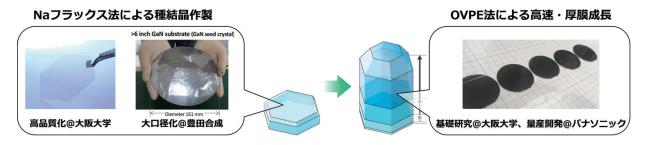


図3. 産学連携による新規バルク GaN 結晶創成技術の開発

3. Na フラックス法による大口径・高品質 GaN 結晶成長技術

大阪大学では、Na フラックス法を用いた GaN 結晶の高品質・大口径化研究を 2000年頃 から開始している。Na フラックス法は Ga-Na 混合融液に高圧 (40 気圧程度) の窒素を溶解さ せることで GaN 単結晶が成長する液相成長法である。気相成長法に比べ、横方向成長が大 きく品質の良い結晶が得られやすいという利点を有している。一方、従来の研究では GaN/ サファイア基板や市販の低品質 GaN 結晶上の成長であったため、種結晶の欠陥が伝播する ことや、図4のように割れ(クラック)の発生といった問題があり、高品質化には限界があっ た⁸⁾。そこで、我々は複数の微小種結晶から GaN 結晶を成長中に合体・単一化させ、微小 種結晶が形成されている基板からの剥離でクラックを抑制するというポイントシード技術を 開発した(図5)⁴⁾。当該技術では、GaN 結晶とサファイアの接触面積が小さいことから、結 晶成長後の冷却過程においてサファイアと GaN の熱膨張係数差に起因する熱応力により、 GaN 結晶が自然にサファイアから剥離するという利点がある。その結果、GaN 結晶中に歪 みやクラックが発生することなく、GaN 結晶を得ることが可能である。また、品質の悪い 種結晶の面積が微小であるために、成長層に伝播する欠陥が少ないのも利点である。本技術 は、サファイアの上に GaN 結晶が成長しない、即ちサファイアと GaN 結晶が接触しないこ とに加え、横方向成長速度が大きく結晶同士が合体しやすいという特徴を有する Na フラッ クス法特有の技術であるといえる。ポイントシード技術で得られた自立 GaN 結晶を図6に 示している。クラックのない状態で、4インチ口径以上の GaN 結晶が得られた。欠陥密度 も市販のGaN 結晶が 10^6cm^{-2} であるのに対し、当該技術で作製した結晶では 10^4cm^{-2} ~ 10⁵cm⁻²と1桁以上減少していることが分かった。

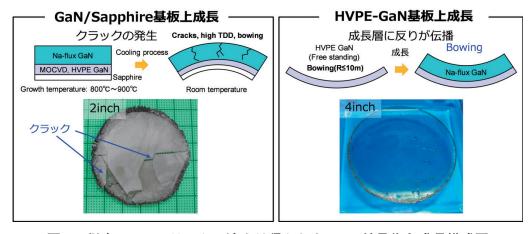


図4. 従来の Na フラックス法より得られた GaN 結晶像と成長模式図

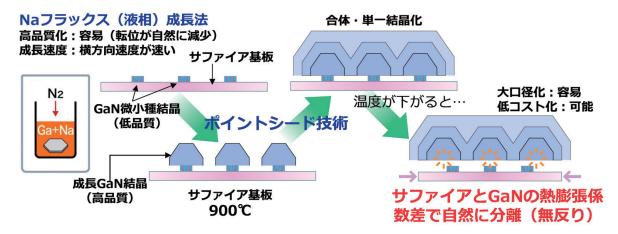


図5. 新規に開発したポイントシード技術の模式図

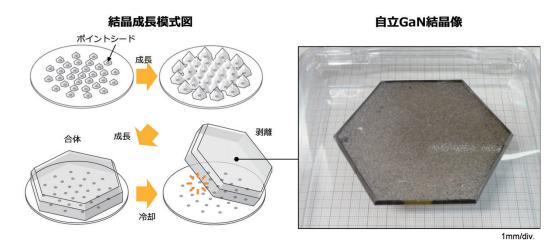


図6. ポイントシード技術の模式図と得られた GaN ウエハ

しかしながら、図7に示すように酸素不純物に起因する着色(黒色化)や個々のポイントシードから成長する結晶間で不均一性が見られるのが問題であった。これらは、結晶の横方向成長が不足しており、結晶同士が完全には合体していないことが原因であった。そこで横方向成長を促進するために注目したのが、Na-Ga融液における窒素濃度分布であった。図8に示すように、Naフラックス法では窒素原料をガスで印加するため、窒素濃度はNa-Ga融液の気液界面側で高濃度、坩堝底側で低濃度という分布が生じている。気液界面近傍の高窒素濃度領域では、結晶の成長駆動力が高く横方向成長の促進も期待できるが、実際の結晶成長が坩堝底で行うため、低窒素濃度領域での結晶成長となっていた。

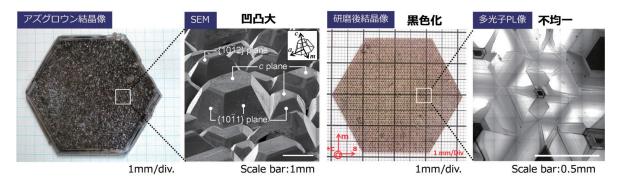


図7. 従来のポイントシード技術で得られた GaN 結晶

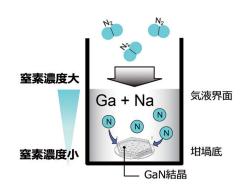


図8. Na-Ga 融液内における窒素濃度分布の模式図

そこで、図9(a)に示すように結晶成長中に坩堝内のNa-Ga融液から結晶を引き上げるFlux Film Coated (FFC)法を考案した⁵⁾。FFC 法では一定の時間融液内で結晶成長を行った後、結晶を引き上げるため、結晶間に融液が残存し、薄い融液膜が形成される (図9(b))。薄い融液膜での成長であれば、結晶成長を窒素濃度の高い気液界面近傍で実施でき、横方向成長を促進可能である。また、通常の結晶成長は融液内で行い、図9(c)に示すように六角錐形状の結晶が等方的に成長することに対し、薄い融液膜での成長では厚膜方向の成長が抑制され、融液の存在する横方向成長のみが促進されることも利点であった。一方、薄い融液膜では Ga 原料の量が少なく、結晶が長時間成長できない欠点もあった。そこで、一定の時間薄膜で結晶成長させた後、原料補充のため再度坩堝内に浸漬させる動作を繰り返すことで持続的に成長させるプロセスを確立した。この手法により、個々の結晶が綺麗に合体し、表

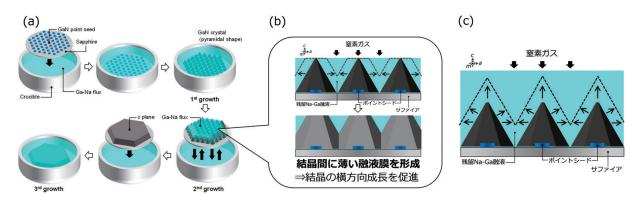


図9. (a) FFC 法の模式図と(b) 結晶引き上げ時に形成される薄い Na-Ga 融液膜の模式図。 (c) 従来の結晶成長手法で結晶が平坦化しない模式図

面が平坦、かつ均一性の高い GaN 結晶を得ることに成功した(図10)。大口径化にも取り組み、 対角線長さが 88mm 程度の六角形の GaN 結晶を得ることに成功した(図11)⁹⁾。

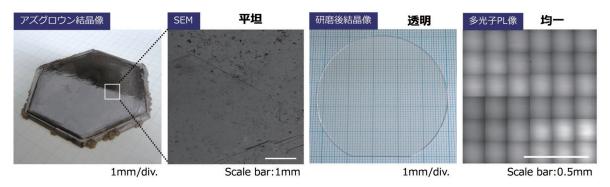


図10. FFC 法により作製した GaN 結晶

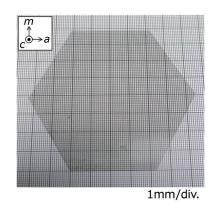


図11. FFC 法で得られたの六角形状の GaN 結晶像(対角線長さが88mm 程度)

現在では当該技術を豊田合成株式会社に移管し、GaN 種結晶製品化のフェーズに進んでいる。大阪大学のポイントシード技術を礎とし、更なる大口径及び量産化開発を行っている $^{10,11)}$ 。これまでの取り組みで、世界最大口径の $\phi161$ mm(6インチ以上)の GaN 結晶の作製に成功した(図12)。当該成果は環境省及び豊田合成株式会社よりプレスリリース発表されたところである [報道例1-3]。

>6 inch GaN substrate (GaN seed crystal)



図12. 世界最大口径の φ161 mm (6 インチ以上) GaN 結晶

上述の通り、結晶の高品質化及び大口径化には成功した一方、実用化で重要となる GaN ウエハ低コスト化においては、厚膜化(バルク化)も必要となる。そこで、次節では厚膜方向への高速成長を得意とする気相成長法による GaN 結晶研究開発について述べる。

4. OVPE 法による低抵抗 GaN 結晶高速成長技術と GaN デバイス特性

4-1 高濃度酸素ドーピングによる低抵抗化と多結晶抑制による高速成長の実現

大阪大学では、2010年ごろより GaN の高速成長技術として OVPE 法の開発に着手した。 OVPE 法は概略図を図13に示すように、酸化ガリウム (Ga_2O) とアンモニア (NH_3) の気相反応によって GaN を生成する手法である。図13中の化学反応式に示す通り、この成長手法は固体の副生成物を生じないため、従来技術である HVPE 法で課題となっていた排気管の閉塞による厚膜成長の阻害を解消し、バルク成長を実行するポテンシャルを有している。しかしながら、実際に GaN 育成を行うと基板上に多くの多結晶が観察され、開発当初は単結晶を得ることが困難であった(図14)。多結晶とは微小な単結晶が集合した状態であり、微結晶同士の境界には結晶欠陥が密集し、半導体デバイスの性能を著しく低下させる。そのため、ウエハ全域で単結晶を得ることはパワー半導体を作製するうえで非常に重要である。

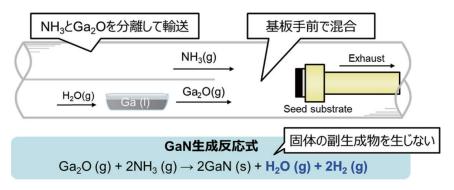


図13. OVPE 法の概略図

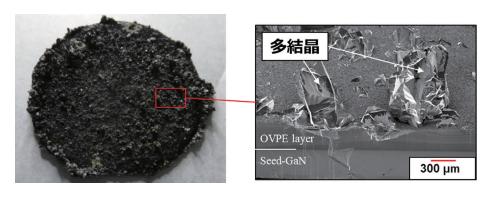


図14. 開発初期の OVPE-GaN 結晶写真と多結晶の SEM 像

そこで我々は、第一段階として多結晶抑制に取り組んだ。多結晶を発生させる要因について他の気相成長手法との差について精査したところ、GaN 生成の化学反応自体にたどり着いた。化合物半導体の気相成長では、原料輸送中に化学反応が進行することを防ぐため原料を分離して輸送し、基板直前で混合させることが一般的に行われる。しかし、混合されたガ

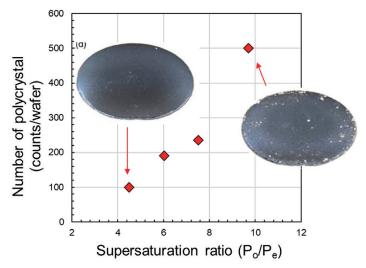


図15. Ga₂O 過飽和比と多結晶量の関係

GaN 基板の製造には多結晶抑制に加え、成長速度の高速化による生産性の向上が低コスト化には必須である。そこで OVPE-GaN の高速成長に取り組むこととした。しかしながら、Ga 源の供給量を増やして高速成長を行うと、多結晶が再び増加に転じ高速成長と多結晶抑制の両立が新たな課題として浮上することとなった。ガス条件の変更のみでは成長速度の向上に限界を迎えたため、成長温度のパラメータを含めて熱力学解析より条件探索を行った。その結果、成長温度を上昇させることで高速成長条件下においても多結晶を抑制できることが示唆されたため、我々は1300 $^{\circ}$ という GaN 成長では通常用いられない温度帯にて育成を試みたところ、図16示すように200 $^{\circ}$ μm/h と量産に十分な成長速度において多結晶を抑制することに成功した 70 。

また、本成長条件で作製した結晶の酸素濃度を分析したところ酸素濃度は 10^{20} cm⁻³と超高濃度に混入していた。しかしながら、結晶の品質は種結晶と同等であり、高濃度ドーピング下においても OVPE-GaN は結晶品質の劣化を生じないという他の結晶材料には見られない稀有な特性を有していることが明らかとなった。また、酸素はGaN 結晶中でドナー(電子供給源)として働くため、基板抵抗率が $10^{-4}\Omega$ cm 台と市販基板よりも一桁低い超低抵抗な自立基板の作製が可能となることがわかった130。

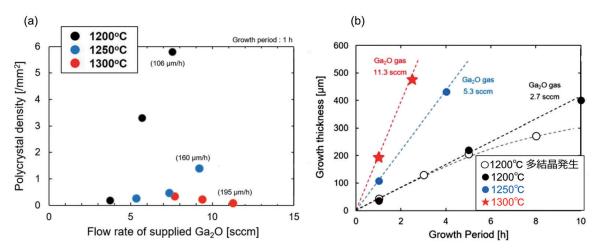


図16. (a)成長温度と多結晶量の関係、(b)各成長温度において多結晶抑制に最適化した成長 条件における膜厚と成長時間の関係

4-2 3次元成長による欠陥の自発的減少

上記多結晶抑制条件を適用した OVPE-GaN 結晶の表面を観察したところ、図17 (a) に示すように全面逆錘状のピットで覆われた特異的な 3次元成長形態を呈することが分かった。OVPE 法では市販の自立結晶を種基板として使用しているが、通常の GaN 自立基板は1平方センチメートルあたり百万個程度の結晶欠陥を含んでいる。種結晶中の欠陥は上層のOVPE 層に引き継がれ、結晶表面まで貫通しながら伝播していくが、形成されたピットの斜面に沿って欠陥の伝播方向が曲げられるため、図17 (b) の模式図に示すようにピットの中心に欠陥が集約される。その結果、欠陥同士が会合して対消滅を起こし、厚膜成長後の最終的な欠陥密度は 10^4 cm⁻²台と種結晶よりも 2桁程度低い欠陥密度となることが分かった(図 17 (c) $)^{7,140}$ 。つまり、OVPE 法は高品質かつ低抵抗な自立基板を作製可能な手法であることが示された。

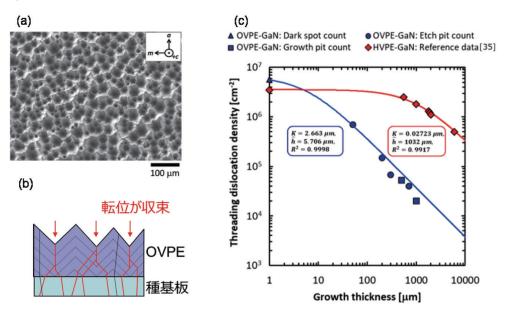


図 17. (a) OVPE 成長表面の SEM 像、(b) 結晶欠陥伝播の模式図、(c) 成長膜厚増加に伴う 欠陥密度の推移

4-3 低抵抗 OVPE 基板上 GaN パワーデバイスの特性

上記より、高品質かつ超低抵抗な OVPE 自立基板の作製が可能となったため、その基板上にパワーデバイスを作製し電気特性に与える効果について検証した。基板の影響を確実に評価するため、作製したパワーデバイスは最も単純な縦型 pn 接合ダイオードとした。作製した pn ダイオードの模式図を図18(a)に示している。OVPE 基板の適用により基板抵抗が小さくなる分、デバイスのオン損失が小さくなることを期待した。作製した素子の順方向特性を測定したところ、図18(b)の IV 特性に示すように、急激な電流増大が観測され、損失が基板抵抗削減分以上に低減されることが明らかとなった 150。また図18(c)に示すように逆方向耐圧の劣化も見られず、OVPE 基板上に問題なくデバイスを作製できていることがわかる。図19に今回作製した素子の耐圧オン抵抗のベンチマークを示すように、GaN 縦型デバイスにおいて世界最高の性能を記録した。この伝導度の変化は高キャリア濃度であるOVPE 基板上で初めて観測された現象であり、新たなデバイス創成が期待される画期的な成果と言える。このように OVPE 法は脱炭素社会実現に向けた有望な手法であることが示された。

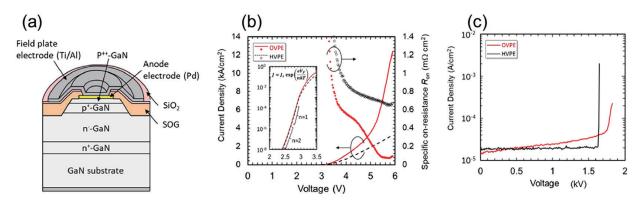


図 18. (a) OVPE 基板上縦型 pn ダイオード模式図、(b) 順方向 IV 特性とオン抵抗、(c) 逆方向 IV 特性

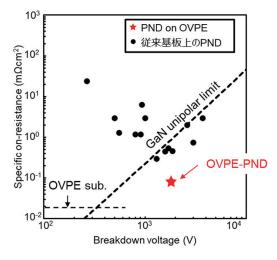


図19. 耐圧 vs オン抵抗のベンチマーク

5. Na フラックス法と OVPE 法の組み合わせによる新規バルク GaN 結晶 成長技術

最後に、Na フラックス法で作製した GaN 結晶 (Na-flux GaN) を種結晶とした OVPE 法によるバルク成長の基礎技術開発について述べる。Na-flux GaN 中にはインクルージョンと呼ばれる融液成分を取り込んだ欠陥が存在する。インクルージョンは Na フラックス法に比べて約 300 \mathbb{C} 程度高温である OVPE 成長条件下において膨張・破裂し、結晶を破壊する (図 20 (a)) ことが知られており、組み合わせの際にはそのインクルージョンの低減が課題であった。近年大阪大学では、3節で述べた Na フラックス FFC 法を改良し、モデュレーション FFC 技術を開発した 8 。当該技術では、インクルージョンとなる巨大ステップの成長を抑制し、結晶内のインクルージョンを大幅に低減することに成功した。

そこで、本研究では Na-flux GaN 結晶を種結晶として初めて OVPE 法による再成長を実施した。従来の Na-flux GaN 結晶 (インクルージョンを多量に含む) 及び新技術により作製した Na-flux GaN (インクルージョンが減少) を種結晶として得られた GaN 結晶像をそれぞれ図 20 (a) 及び図 20 (b) に示している。結晶にインクルージョンの破裂痕は見られず、モデュレーション FFC による低減効果を確認することができた。また、品質 (欠陥密度) を評価したところ、 $2\times10^5{\rm cm}^{-2}$ 程度と種結晶の欠陥密度を引き継いでいることが分かった。4-2節において述べた対消滅による欠陥減少効果と組み合わせることで更なる高品質化も期待できる。

以上より、液相成長技術である Na-flux 法と OVPE 法のそれぞれの長所を活用した新規 バルク GaN 結晶成長技術の開発に初めて成功した。今後は、豊田合成株式会社で作製した 高品質6インチ GaN 結晶を種結晶とし、パナソニック株式会社にて OVPE 法により低抵抗 GaN 結晶を $200\mu m/h$ 以上の高速成長で厚膜化することで、縦型パワーデバイス用 GaN ウエハの量産を目指していく。

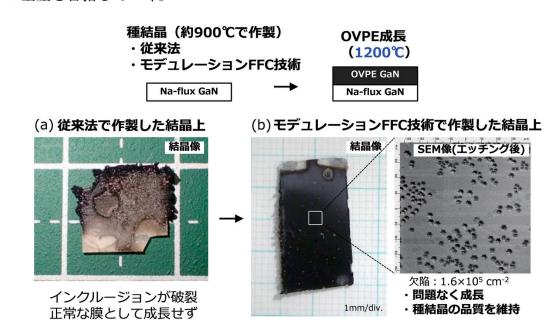


図 20. (a) 従来法で作製した Na-flux GaN 及び(b) モデュレーション FFC 技術で作製した Na-flux GaN を種結晶とした OVPE 成長で得られた GaN 結晶像

6. 結 言

本論では、これまでのNaフラックス法及びOVPE法によるGaN 結晶研究開発について述べたのち、2つの手法の組み合わせによる新規バルクGaN 結晶技術の創出について論じた。Naフラックス法では6インチ以上(世界最大級の口径)かつ高品質のGaN 結晶を作製することに成功した。OVPE法においても $200\,\mu\text{m/h}$ 以上の高速結晶成長を実現するとともに、OVPE基板上GaN 縦型デバイスにおいてオン抵抗を大幅に低減できることを実証した。また、大口径かつ高品質バルクGaN 結晶を実現する手段として、上記2つの結晶成長手法を組み合わせることが可能であることを本論において初めて実証した。当該新規バルクGaN 結晶技術は個々の結晶成長手法では成しえなかった理想のバルクGaN 結晶を実現するブレークスルーとなり、今後GaN 基板の大幅なコストダウンも期待できる。

今後は、大阪大学で開発された GaN 結晶成長技術を根幹とし、パナソニック株式会社および豊田合成株式会社で培われた量産技術を組み合わせることにより高品質・厚膜の GaN 結晶を量産する。GaN ウエハの販売価格をインチあたり1万円程度まで低減することが目標である。本研究成果により、GaN ウエハが高価であることから進展しなかった GaN デバイス研究を加速させることができる。

GaN ウエハのアプリケーションとなるデバイスは多く、そのマーケットも大きい。電力 損失が Si の1/10以下のパワーデバイスをはじめ、携帯電話の1,000倍の速度・通信容量を 実現する超高速動作トランジスタや、緑色をはじめ、赤〜紫外領域の高出力発光ダイオード やレーザーダイオード等の新技術が創出される。太陽電池に用いれば、その発電効率の大幅 な向上も期待できる。

以上のように、GaN 結晶およびそのデバイスの世の中への普及を促進することで社会の省エネルギー、脱炭素化に貢献していきたいと考えている。

謝辞

本研究は環境省「GaN技術による脱炭素社会・ライフスタイル先導イノベーション事業」 および JST-ALCA プロジェクト (JPMJAL1201) の支援のもとに実施されたものである。また本研究の一部は、伊藤忠プラスチックス株式会社との共同研究のもと実施されたものである。また最後に、国立大学法人大阪大学、パナソニック株式会社、豊田合成株式会社、および共同研究機関の関係者のご協力に心より感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 環境省(脱炭素ポータル)「カーボンニュートラルとは」 https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon neutral/about/ (参照 2022-03-21).
- 2) H. Fujikura, Y. Oshima, T. Megro, T. Saito: J. Cryst. Growth **350** (2012) 38.
- 3) K. Motoki, T. Okahisa, R. Hirota, S. Nakahata, K. Uematsu, N. Matsumoto: J. Cryst. Growth **305** (2007) 377.
- 4) M. Imade, M. Imanishi, Y. Todoroki, H. Imabayshi, D. Matsuo, K. Murakami, H. Takazawa, A. kitamoto, M. Maruyama, M. Yoshimura, and Y. Mori: Applied Physics Express 7 (2014) 035503-

1-3.

- 5) M. Imanishi, K. Murakami, T. Yamada, K. Kakinouchi, K. Nakamura, T. Kitamura, K. Okumura, M. Yoshimura, and Y. Mori: Appl. Phys. Express **12** (2019) 045508.
- 6) 豊田合成株式会社(2022)「次世代パワー半導体向け「GaN 基板の大口径化」に成功」 https://www.toyoda-gosei.co.jp/news/detail/?id=1061(参照 2022-03-21).
- 7) A. Shimizu, S. Usami, M. Maruyama, I. Kawanami, A. Kitamoto, M. Imanishi, M. Maruyama, M. Yoshimura, M. Hata, M. Isemura, and Y. Mori: Appl. Phys. Express **15** (2022) 035503.
- 8) 今西 正幸、村上 航介、宇佐美 茂佳、丸山 美帆子、吉村 政志、森 勇介:日本結晶成長 学会誌48巻(2021)3号.
- 9) M. Imanishi, K. Murakami, T. Yamada, K. Kakinouchi, K. Nakamura, T. Kitamura, K. Okumura, M. Yoshimura, and Y. Mori: Appl. Phys. Express **13** (2020) 085510.
- 10) 守山ら:豊田合成技報, 56(2014)61.
- 11) 守山ら:豊田合成技報, 62 (2020) 31.
- 12) 後藤芳彦著, (2003年) 『結晶成長』内田老鶴圃, pp. 29-35.
- 13) J. Takino et al., Jpn. J. Appl. Phys. 58, SC 1043 (2019).
- 14) J. Takino et al., Jpn. J. Appl. Phys. 60, 095501 (2021).
- 15) J. Takino et al., Appl. Phys. Express 13, 071010 (2020).

関連の報道事例

- 1. 日刊自動車新聞「豊田合成、大阪大学と共同で GaN 基板大口径化に成功 世界最大級 6 インチ超」、2022年3月17日
- 2. プレスリリース「次世代パワー半導体向け「GaN 基板の大口径化」に成功」環境省、2022 年 3 月 15 日
- 3. プレスリリース「~省エネルギー社会の実現に寄与する新技術~次世代パワー半導体向け「GaN 基板の大口径化」に成功」豊田合成株式会社、2022年3月15日
- 4. COMPOUND SEMICONDUCTOR [Slashing on-resistance in p-n diodes]、2020年8月
- 5. TV 報道「超省エネ社会の実現へ!次世代パワー半導体」NHK サイエンス ZERO 2020年 4月

関連の受賞

- 1. 第42回応用物理学会優秀論文賞: Promotion of lateral growth of GaN crystals on point seeds by extraction of substrates from melt in the Na-flux method、公益社団法人 応用物理学会 (2020)
- 2. 第12回ナノ構造エピタキシャル成長講演会研究奨励賞: Na フラックスポイントシード 法による低転位・大口径 GaN 結晶成長、日本結晶成長学会ナノ構造エピタキシャル成長 分科会(2020)