

産業界の技術動向

窒化ガリウムは世界を救う！？ — 21世紀のスーパーヒーロー材料の現状と今後 —

住友化学株式会社
小林 雅彦




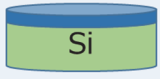
1. はじめに

2021年10月22日に開催された電気系教室懇話会では窒化ガリウム（以下 GaN と記します）を 21 世紀のスーパーヒーローであるご紹介しました。その根拠として①優れた能力（材料物性）②万能選手（光・高周波・パワーの幅広い用途で活躍）③ロバスト（結晶欠陥に鈍感）の 3 点を挙げました。本稿では、GaN が現在どのように活躍しているか、今後いかに社会に貢献していくか、そしてそれを実現する上で鍵となる高品質・低コストの GaN 基板を大量に供給していくための当社の取組みについてご紹介いたします。

2. GaN デバイスの用途

表 1 に GaN デバイスの主な用途とウェハ構造を示します。それぞれの用途の詳細については後述しますが、まず着目して頂きたいのはそのウェハ構造です。GaN は結晶を作るのが非常に難しく、単結晶基板は未だ小径で高コストであるために、代替となる結晶基板（サファイア、SiC、Si など）の上に GaN のエピタキシャル層を形成してデバイスを作っています。このような構造は半導体デバイスとしては異例と言えます。他の主な半導体デバイス、例えば Si や GaAs、SiC 等のデバイスはいずれも、同材料の結晶基板上にデバイスを形成します。異種の結晶基板上に結晶を成長させた場合、格子不整合のために多数の結晶欠陥を生じ、これによりデバイスの性能が発揮できないからです。これに対して GaN は多少の欠陥があっても十分なデバイス性能が発揮できるため、表 1 に示すように様々な代替基板の上

表 1 GaN デバイスの用途とウェハ構造

分野	ウェハ構造	用途	競合	優位性
LED		LED照明 バックライト	白熱灯 蛍光灯	高効率 長寿命
LD		Blu-Ray プロジェクタ ヘッドランプ	水銀ランプ	高輝度 高効率 長寿命
高周波		携帯基地局 レーダ 衛星通信	Si (LDMOS) 真空管	高効率 高周波動作
パワー		モバイル端末用 チャージャー	Si SiC	高周波動作 低損失

にデバイスが形成されています。但しLD（半導体レーザー）だけは、結晶欠陥が多すぎると性能が出せないために、GaN基板が使われています。

(1) LED（発光ダイオード）

現在 GaN の最も大きな用途は照明用 LED です。GaN による青色 LED とこれを用いた白色 LED 照明は、世界的に広く普及していることは皆さんご承知の通りです。図1は日本照明工業会の Lighting Vision 2030 からの引用です。現在国内の LED 照明の普及率は5割程度に達しており、フローベース（年間出荷）では9割程度がLED化しているそうです。このまま照明のLED化が進めば、2030年頃にはほぼ100%近くがLED照明となり、これにより照明用途の消費電力は50～60%削減されることが期待されます。これは日本全体の電力消費の1割程度に相当するものであり、昨今話題となっているカーボンニュートラルの実現にも大きく貢献すると期待されます。

LEDは低消費電力（高効率）である上に、寿命も長いので、製品のライフサイクル全体を考えた場合にもCO2削減効果が高いと考えられます。更に従来の蛍光灯のように水銀等の有害物質を使用しないので、環境にも優しい光源と言えます。一般照明用だけでなく、例えば液晶テレビのバックライトも現在ではLEDが当たり前になりました。また、車載用途においても、国内で販売される新車の約7割はLEDヘッドランプが搭載されているとのこと。このように、照明用途においては既に広くLEDが使われており、これからも長く社会の役に立ち続けていくと思われれます。

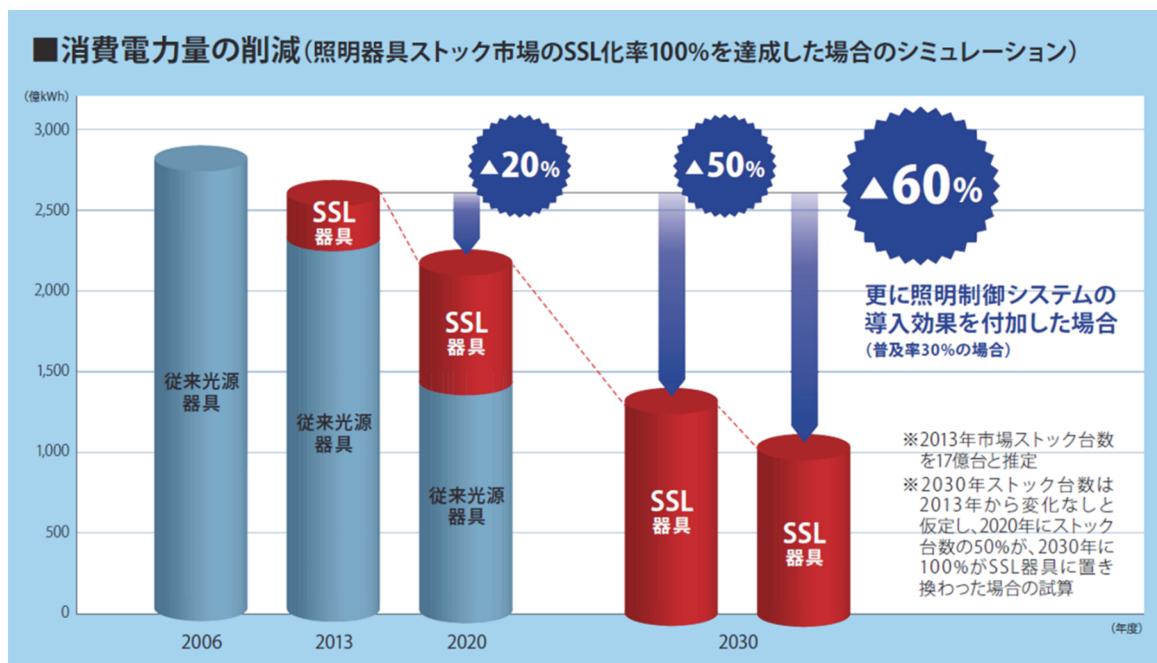


図1 照明のLED化（SSL化）による消費電力の削減効果（日本国内）

(2) LD（半導体レーザー）

GaNを用いた青色LDは当初Blu-rayの光ピックアップ用に開発されました。CD、DVDを後継する大容量光記録メディアとしてゲーム機、PC、家庭用録画装置等に広く利用されています。但し、インターネットの普及により、映像の記録・再生自体が光メディアからデータセンタとストリーミングに置き換わっていますので、今後更にこの用途が拡大することはなさそうです。

現在の青色LDの最も大きな用途はプロジェクタ用光源です。従来使われてきた水銀ランプを代替す

る新しい光源として急速に普及しつつあります。特に高輝度光源を必要とするハイエンドのプロジェクタにおいては、LD光源を用いた製品が既に主流になっています。LDを用いることにより従来以上の高輝度のハイエンド機が実現できるほかに、長寿命であるためにランプの交換が不要であること、また低消費電力である等のメリットがあります。また、装置の電源を入れてすぐに起動できますし、使用後は光源オフ後のファン冷却が不要であるなど、使い勝手にも優れています。

現在出荷されているプロジェクタ光源の一割程度が既にLD光源に置き換わっており、今後普及率が高まり2030年頃にはLD化率は50%を超えるとの市場予想もあります。なお、水銀に関する水俣条約により、水銀の使用は国際的にも厳しく規制されてきていますが、プロジェクタ用の高圧水銀ランプについては代替手段がないということで例外的に使用が認められてきました。但し、今後LD光源を用いたプロジェクタが普及していけば、代替手段がないという言い訳は通用しなくなりますので、どこかの時点で水銀ランプの使用が全廃され全てLD光源化されるようなシナリオも十分考えられます。

また、業務用プロジェクタの他に最近では家庭用のテレビとしてもLDを用いたプロジェクション型の製品が普及し始めています。フラットパネルテレビに比べると、100インチを超える大画面が安価かつ手軽に入手でき、軽量で、超短焦点の光学系によりスペースを取らず設置の自由度が高いのが人気のようです。

プロジェクタ以外の照明用途としては、例えばLDを使用した自動車のヘッドライトも商用化されています。LEDに比べて更に高輝度であることを活かし、ハイビーム時の照射距離をLEDの2倍以上に伸ばし、夜間走行時の視認性・安全性を向上しています。また、照明以外に今後大きく拡大が期待できる用途としては、レーザ加工分野があります。金属加工用のレーザとしては従来近赤外波長帯が使われてきましたが、金属種によっては強く反射してしまうために効率が低いという問題があります。例えば銅の場合は、青色光は近赤外光に比べ6倍程度吸収率が高く、高効率のレーザ加工が可能になります。

(3) 高周波電力増幅器

化合物半導体のヘテロ接合を用いたHEMT (High Electron Mobility Transistor) は、材料の高い電子移動度を十分活かした高周波増幅用デバイスとして広く使われています。GaNを用いたHEMTは、高い周波数での動作に加え、材料の持つ高い絶縁破壊電界特性を活かして、高出力の高周波増幅デバイスが実現できます。このような高出力の高周波増幅デバイスの用途は、無線通信やレーダがあります。

無線通信におけるGaNデバイスの最も大きな用途は携帯基地局用です。携帯電話システムは世代交代が進み現在では第五世代移动通信システムいわゆる5Gが普及しつつあります。図2に示すように5Gにおいては、従来システムに対して超高速・低遅延・多数同時接続と言った性能向上を実現するために、新しい周波数帯の利用、セルエリアの縮小、高度なアンテナ制御等の工夫をしています。新

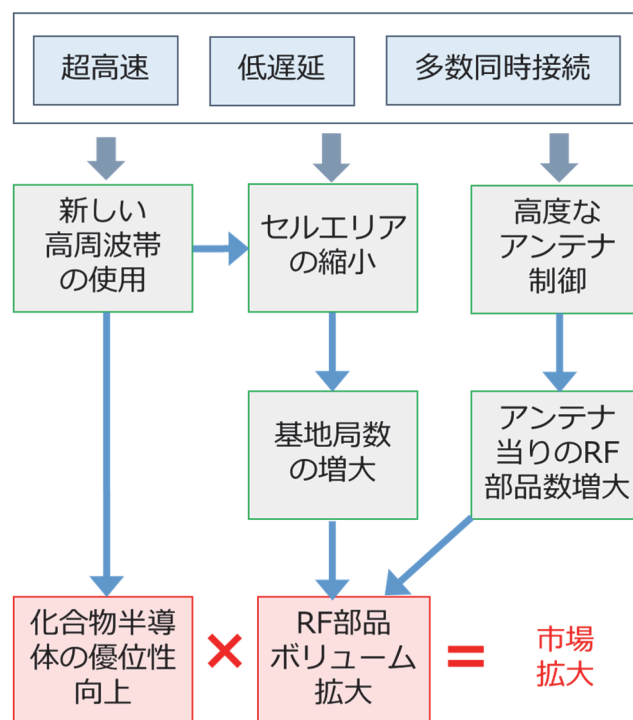


図2 5G携帯基地局におけるGaNデバイスへの期待

しい周波数は、従来の周波数より高い周波数帯、即ち sub6 と呼ばれる 6GHz 以下の高い周波数帯（日本では 3.7GHz と 4.5GHz 帯）並びに更に高いミリ波周波数帯（日本では 28GHz 帯）が割り当てられています。

周波数が高くなるほど、従来の Si デバイスに対する HEMT デバイスの優位性、特に電力変換効率における優位性が顕在化します。また、高い周波数を用いるほど電波の届くエリアが小さくなるとともに、通信のスループットを上げるためにもセルエリアを縮小しますので、必要な基地局の数が増大します。更に、基地局では Massive MIMO と呼ばれる新たな構成のアンテナを使用してスループットを高めますが、これはアンテナ内に多数のアンテナエレメント（32～128 素子）を配置しているものであり、それぞれのアンテナエレメントには高周波増幅器を含む RF 部品が接続されるため、必要となるデバイスの総数が多くなります。

4G 以前の携帯基地局においても GaN-HEMT が採用されていました。従来使われていた Si デバイス（LDMOS）に比較して、電力変換効率が高いために消費電力を小さく抑えることが可能であり、従って放熱のために必要なヒートシンクを小さくでき、基地局、特に RRH（Remote Radio Head）と呼ばれる無線送受信部や、これをアンテナと一体化したアクティブアンテナを小型軽量化して設置を容易にすることが可能になりました。今後本格的に 5G システムが普及していく際には、前述したような背景により、これまで以上に GaN を用いた HEMT デバイスが大量に必要になることが予想されます。携帯基地局以外の無線通信用途としては、衛星通信や基地局とコアネットワークを繋ぐバックホール通信等にも使用されており、これらの用途も今後拡大が期待できます。

一方のレーダ用については、その探知精度・探知距離を高めるためには無線通信用よりも更に高い出力が必要であり、従来は真空管が用いられていました。これらは GaN-HEMT の登場と高出力化により、置き換えが進んでおり、デバイスの長寿命化、不要発射の低減、周波数の安定化などのメリットを享受しています。高出力のレーダは、気象観測や航空管制などに用いられていますが、最も大きな用途は防衛用です。艦載レーダや航空機上レーダ、地上レーダなど様々な種類と形態があります。イージス艦等に使われる最先端の設備では、アクティブフェーズドアレイ型のレーダが用いられ、一面あたりに 5000 個前後もの送受信機が並べられており、それぞれの送信機に GaN-HEMT が搭載されています。

(4) パワー半導体

スイッチング電源回路を構成するトランジスタやダイオードなどのパワー半導体は、現在はそのほとんどが Si デバイスですが、更に性能を高めるために SiC や GaN 等の化合物半導体を用いたデバイスも採用され始めています。これらの化合物半導体材料は Si に比べて絶縁破壊電界などの材料物性が優れているために、Si パワー半導体を凌駕する高性能のパワー半導体の実現が可能です。この新しいパワー半導体を用いることにより、電源回路の損失を低減したり、電源を大幅に小型軽量化することができるので、電力消費を抑えカーボンニュートラルに大きく貢献することが期待されます。

SiC パワー半導体は、テスラ社の Model3 に本格採用されたことを契機に、各社の EV への採用が広がっています。一方で GaN パワー半導体は、Si 基板上に GaN エピ層を形成した GaN-on-Si 構成のデバイスが普及し始めています。これは前節で紹介した高周波デバイスである HEMT 構造を流用していますので、スイッチング周波数を高くすることができます。スイッチング周波数を高めると、電源回路のパス部品（インダクタ、キャパシタ）を小さくできますので、電源回路の大幅な小型化が可能になります。この特徴を活かして、GaN パワー半導体は携帯端末の充電用 AC アダプター（ファーストチャージャー）での採用が始まりました。今では多くの携帯機器の付属アダプターとして、あるいは別売のアクセサリとして市場に普及しつつあり、さらにノート PC 等の電子機器用にも広がりつつあります。これらは従来のアダプターに比べ、半分以下の重量、サイズ、電力損失を実現しています。

3. GaN デバイスの今後の可能性

ここまで述べてきたように、GaN を用いたデバイスは既に光、高周波、パワーの各用途において広く利用されています。しかしながら、半導体レーザーを除いて、これらのデバイスはサファイア、SiC、Si などの異種基板上に形成されたものであり、GaN の有する能力を十分発揮できているとは言えません。もし、大口径の GaN 基板が大量に安価に供給されれば、これらのデバイスは全て GaN 基板上に形成された、いわゆる GaN-on-GaN のホモエピタキシャル構造にすることができ、これによりデバイスの結晶品質が格段に向上し、その結果デバイスの性能が大きく向上することが期待できます。

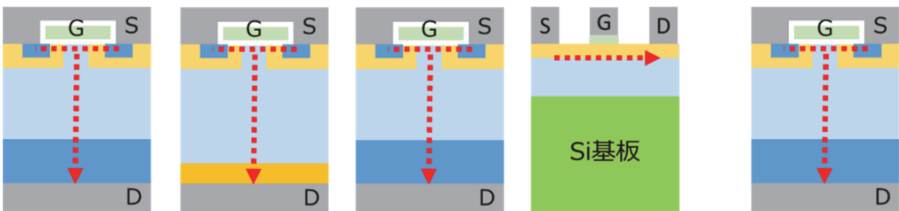
このような性能向上は、GaN デバイスの応用範囲の更なる拡大をもたらします。LED は更なる輝度の向上、効率の向上が期待でき、ヘッドランプ等をよりコンパクト、高輝度にできます。また、プロジェクタ用の光源なども、一部は LD から LED にすることが可能になります。

LD は青や緑の VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) を大口径基板上に大量に安価に製造できますので、照明、ディスプレイ、センシング、通信用など多様な用途に展開が可能になります。また LD が大量に安価に製造できれば、照明用においては従来の概念を覆すようなユニークなデザインの照明機器が可能になりますし (例えば光ファイバ等により導光することにより、発光部と照明部を隔離したデザインも可能になります)、光を高速に変調することができますので、これを応用した LiFi (WiFi 通信と同様の機能を、無線ではなく照明光で実現) なども可能になります。

高周波デバイスの性能向上は、今後更に進歩・世代交代する移動通信システム (Beyond 5G/6G) に対応する高周波、高効率のデバイスの実現に寄与しますし、通信以外の新たな用途への展開も期待できます。例えばマイクロ波加熱 (電子レンジ等) は、現在真空管の一種であるマグネトロンが用いられていますが、これを半導体デバイスで置き換えることができれば、小型化だけでなく、周波数の安定化により加熱対象の精密な選択や制御が可能になり、工業用途においても有用です。また、高周波を用いたワイヤレス給電や、更にはマイクロ波送電なども視野に入るとでしょう。

パワー半導体については、GaN-on-GaN 構造の採用により、前記した GaN-on-Si 構造とは全く別のデバイスが実現できるので、GaN-on-Si 構造ではファーストチャージャー等に限定されていた用途を大きく拡大することが可能になります。表 2 に各種材料を用いたパワー半導体 (トランジスタ) の構造と性能の比較をまとめます。デバイスの構造や動作の説明は割愛しますが、Si や SiC のパワートランジスタは、電子が基板上面から裏面へと流れる、いわゆる縦型構造のデバイスです。このような構造とするこ

表 2 パワートランジスタの構造と性能比較



	Si MOSFET	Si IGBT	SiC MOSFET	GaN-on-Si HEMT	GaN-on-GaN
耐圧	△	○	◎	△	◎
動作周波数	△	×	○	◎	◎
コスト	○	○	×	△	○

とにより、電流密度を高く（従ってデバイス面積を小さく）することができ、またデバイスの厚さ（高電圧のかかるドリフト層）を厚くすることにより高耐圧が実現できます。

これに対し GaN-on-Si では前述したように、高周波用の HEMT 構造を流用しているため、電流は基板表面近傍を流れます。このような構造では、動作速度は速い一方で、デバイスの面積を小さくすることは難しく、また耐圧にも制約を受けます。GaN-on-GaN 構成では、Si や SiC デバイスと同様に縦型構造とすることができますので、小型化、高耐圧化に優れています。なお、GaN-on-GaN デバイスが SiC デバイスより低コストにできるのは、絶縁破壊電界等の材料物性が SiC より優れているために、デバイスをより小型化できることによります。試算では、GaN 基板のコストが SiC 基板の 2 倍であっても、デバイスコストを 1/2 とすることが可能であり、Si デバイスのコストにも比肩し得るレベルが期待できます。GaN-on-GaN パワーデバイスの普及により、データセンターのサーバー、太陽光発電や電気自動車の電源回路がより小型・高効率になり、省エネルギーを通じてカーボンニュートラルに大きく寄与することが期待できます。

4. GaN 基板への当社の取組み

前述したように、GaN-on-GaN のデバイス構造は、GaN の有する材料ポテンシャルをフルに引き出し、光・高周波・パワーの多様な用途に活用されることが期待されます。しかしながら、その実現には高品質で大口径・安価な GaN 基板が大量に供給されることが条件となります。

結晶成長と言うと、原料をるつぼ等に入れて高温に熱して溶かし、これを部分的に融点以下に温度を降下させて析出させるようなプロセスを一般にイメージされると思いますが、GaN は残念ながらそのような製法は困難です。現在世の中で商用化されている GaN 基板は、殆どが HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) という気相成長法を用いています。結晶成長速度が速く (>100um/h)、結晶の純度も比較的高く、成長のコントロールが容易であるという利点があります。

当社は HVPE 法を用いた独自の VAS (Void Assisted Separation) という製法を用いて GaN 基板を製造しています。図 3 にその製造プロセスの概要を示します。まずサファイア基板の上に薄い GaN 結晶層を成長し、これに Ti を蒸着した後に熱処理することにより、微細な隙間 (Void) だらけの基板が

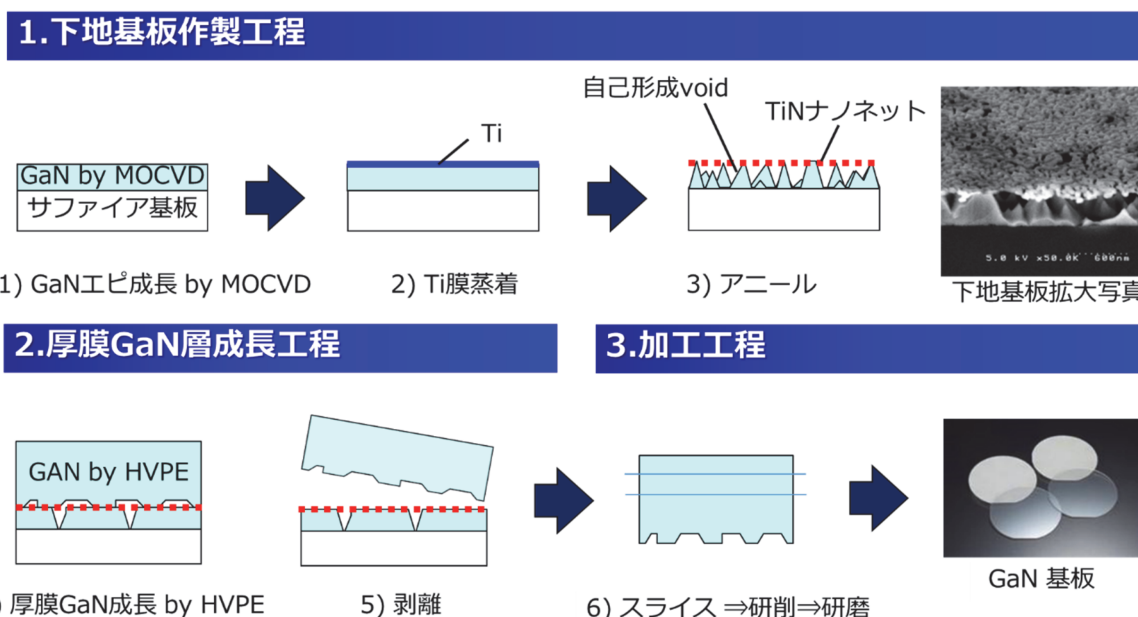


図3 GaN 基板製造プロセス (VAS 法)

出来ます。これを下地として、この上にHVPE法によりGaN結晶を厚く成長します。下地と厚いGaN結晶の間には隙間が形成されたまま成長しますので、成長後はGaN結晶が下地基板から容易に剥離します。剥離した結晶をスライス、研磨し、基板が完成します。

このように製造された基板の転移欠陥密度は $10^6/\text{cm}^2$ 程度、基板サイズは4インチ径までが製品化されています。1平方センチ当たり百万個の結晶欠陥というのは大変多いように感じられるかもしれませんが、それでも異種基板上に形成されるGaN層に比べると2~3桁小さく、LD等の電流密度の高いデバイスであっても十分な信頼性を確保できます。一方で、GaNコンソーシアムのロードマップによれば、2030年頃には基板サイズ6インチ径、欠陥密度 $10^4/\text{cm}^2$ が必要とされています。これがGaN-on-GaNデバイスの更なる本格普及に向けた一つの目安と考えられます。

欠陥密度については、成長するGaN結晶の厚さを増すことにより、これに反比例して低減することが知られています。これは結晶の成長に従ってランダムウォーク的に伝搬する結晶欠陥同士が会合して低減するためです。図4にその一例を示します。図中のAからDは結晶の成長条件を変えて厚く成長できるように工夫したものです。図4のグラフを外挿すると、欠陥密度 $10^4/\text{cm}^2$ を得るには結晶厚さ100mm以上が必要となり、また通常の成長プロセス（結晶軸の+c面方向への成長）では成長に従い外径が小さくなるという問題もあります。

そこで、欠陥密度を低減する方法として、マスクレス3D法という成長方法を考案しました。図5に本方法を用いて成長させた結晶の断面の蛍光顕微鏡写真を示します。通常の結晶成長は基板面と平行に平坦に積み上がって行きますが、ここでは途中で故意にデコボコに成長させ、再び平坦な成長に戻して

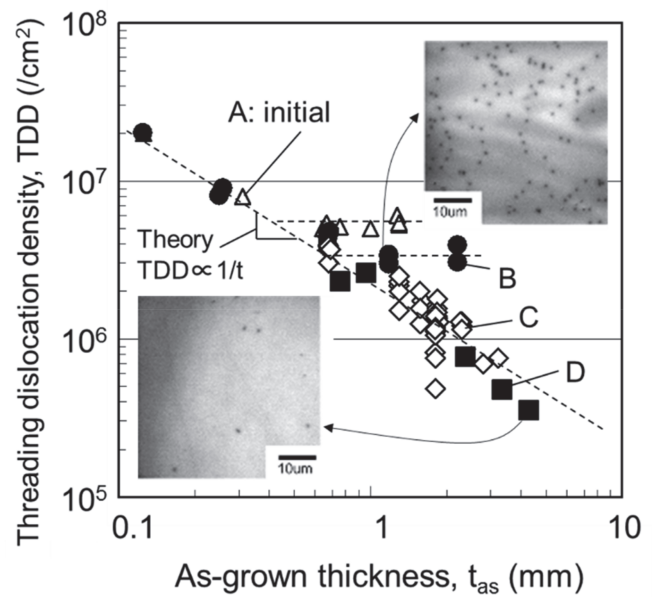


図4 結晶成長厚さと転移欠陥密度の関係

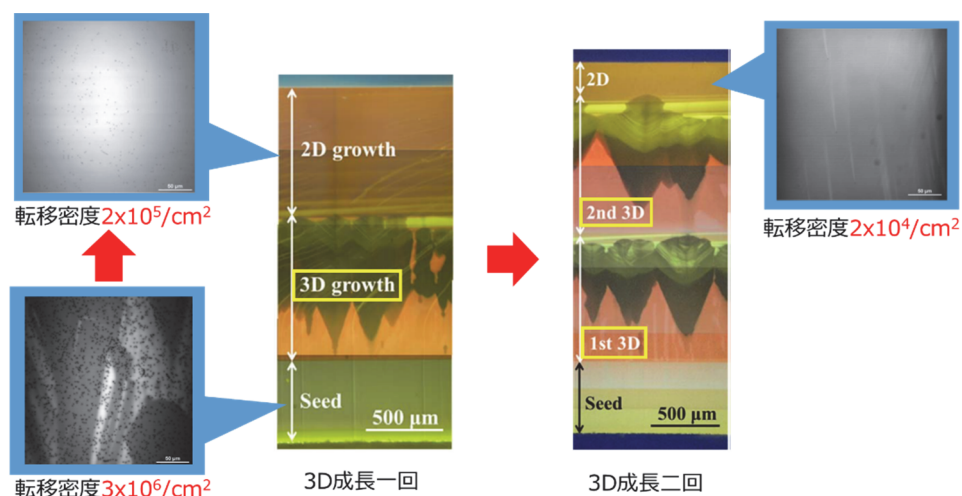


図5 マスクレス3D法による転移欠陥の低減

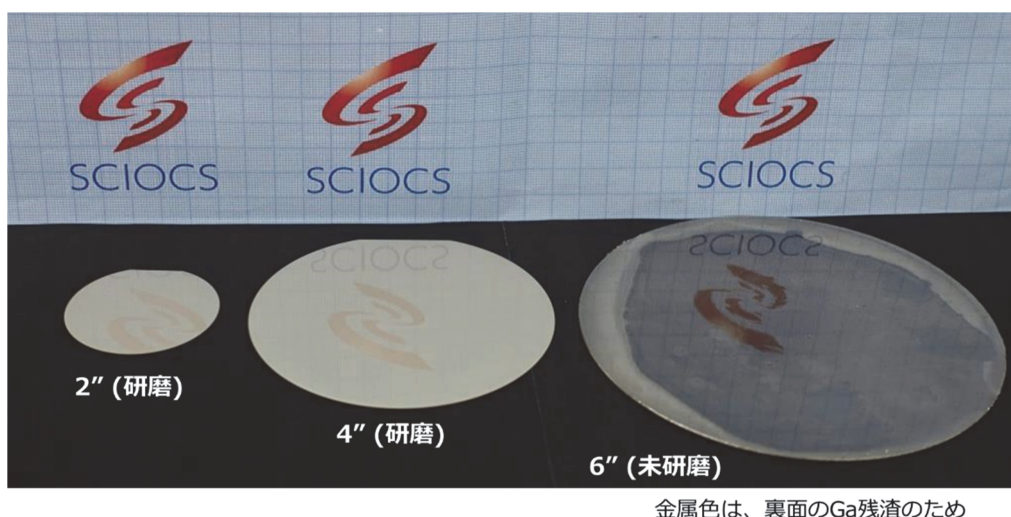


図6 GaN 単結晶基板の外観

います。デコボコの成長領域では、欠陥の伝搬の方向が変わり会合による低減の効果が高まりますので、1mm程度の成長厚さで欠陥密度が一桁低減しています。これを繰り返すことにより更に欠陥密度が一桁低減し $10^4/\text{cm}^2$ 台の欠陥密度が得られました。

大口径化については、6インチ径までの基板を試作しています。図6にその外観写真を示します。6インチ径の基板の外観が他のサイズの基板と異なって見えるのは表裏の研磨を施していない状態であるため、裏面には金属Gaの残渣があるために着色が見えますが、基本的には2インチ径、4インチ径と同等の結晶品質の基板が得られています。今後は量産技術を更にブラッシュアップし、6インチ径の基板を市場に提供して参ります。

5. おわりに

世界はカーボンニュートラルへと大きく舵を切り始めました。その実現にはエネルギーのより効率的な利用が欠かせません。ここでご紹介してきたようにGa_Nは光・高周波・パワーの広い領域で、エネルギーを効率よく利用する上で鍵となるデバイスを提供しており、その活用範囲・領域はGa_N-on-Ga_N構造のデバイスの普及とともに更に広がっていくことでしょう。私共は、高品質で大口径・安価なGa_N基板を大量に提供することで、その実現に貢献していく所存です。

参考文献・参考資料

- [1] 一般社団法人日本照明工業会 照明成長戦略2030：<https://jlma.or.jp/about/vision/index.htm>
- [2] 一般社団法人Ga_Nコンソーシアム Ga_Nロードマップ2021：<http://www.gan-conso.jp/report/road.html>
- [3] 藤倉他、「Ga_N単結晶基板の開発」技術誌 住友化学 2018
- [4] Takehiro Yoshida and Masatomo Shibata, Jpn. J. Appl. Phys. 59 071007 (2020)