SEMICONDUCTOR FRONT-END · PART 2-4

シリコン以外のウェハ — 融けない結晶を、どう育てるか（SiC・GaN・InPなど）

シリコンは、融液から直径300 mmの単結晶を育てられます。ところが、電気自動車を支えるSiCは**通常の成長条件では融液から育てられず**、青色LEDのGaNは**融ける前に分解**してしまいます。光通信のInPは、溶かすと成分が逃げ出し、結晶はすぐに「双子」になります。融けない結晶をどう育てるのか。なぜ大きくするのにこれほど時間がかかるのか。そして、原料を握るのは誰なのか。シリコン以外のウェハの作り方と、その争奪戦を見ていきます。

半導体前工程シリーズ 第2部 2-4／難易度 ★★☆（概論1-2、2-1を読んでいると理解しやすくなります）／図解・内容確認
2026年11月6日

この記事の構成

1. この回を3行でつかむ
2. 材料の「融け方」が、作り方を決める
3. SiC — 気体から積もらせる
4. GaAs・InP — ふたをして、ゆっくり冷やす
5. GaN — 融けない結晶を、3つの方法で
6. 日本発の新顔たち — 酸化ガリウム、AlN、ダイヤモンド
7. 原料は誰が握っているのか
8. まとめと、第2部のふり返り
9. 確認クイズ
10. 用語集
11. 参考資料（一次情報・技術論文・報道）
12. 主張と出典の対応表（監査）

本記事の表記ルール

事実 ＝公的機関・学術資料・企業の公式発表に記載のある内容（出典番号つき）
本稿の計算 ＝明示した前提から本記事が計算した値
推測 ＝出典から読み取れる範囲を超えた、本記事の見立て
未確定／将来 ＝計画・ロードマップであり、実績が確認できていない事項
物理の一般原理（教科書で確立している内容）の説明は、とくにタグを付けずに書いています。

この回の学習目標

- シリコン以外のウェハが、なぜシリコンのように「溶かして引き上げる」方法で作れないのかを、材料ごとに説明できる
- SiCの昇華法、GaAs・InPの封止・温度勾配の方法、GaNの3つの作り方の要点と、それぞれの難しさを説明できる
- SiC・InP・ガリウムをめぐる市場と供給のリスクを、数字とともに挙げられる

1. この回を3行でつかむ

- シリコン以外の結晶の多くは、**溶かして引き上げるのが難しい**材料です。SiCは常圧では液体にならず、GaNは融ける前に分解し、GaAsやInPは溶かすとヒ素やリンが逃げ出します。
- そこで、**気体にして積もらせる（SiC）、液体にふたをする・ゆっくり冷やす（GaAs・InP）、別の基板の上に育ててはがす・液体の溶媒から析出させる（GaN）**など、材料ごとに別の工夫が生まれました。多くはシリコンに比べて**成長速度・大口径化・欠陥の制御**が難しく、製法ごとに異なる課題があります。
- それでも需要は大きく、SiCは値崩れの中で200 mm化が進み、InPはAIの光通信で不足し、原料ガリウムの**低純度一次生産は中国が世界の99%**を占めます（2025年推計）。

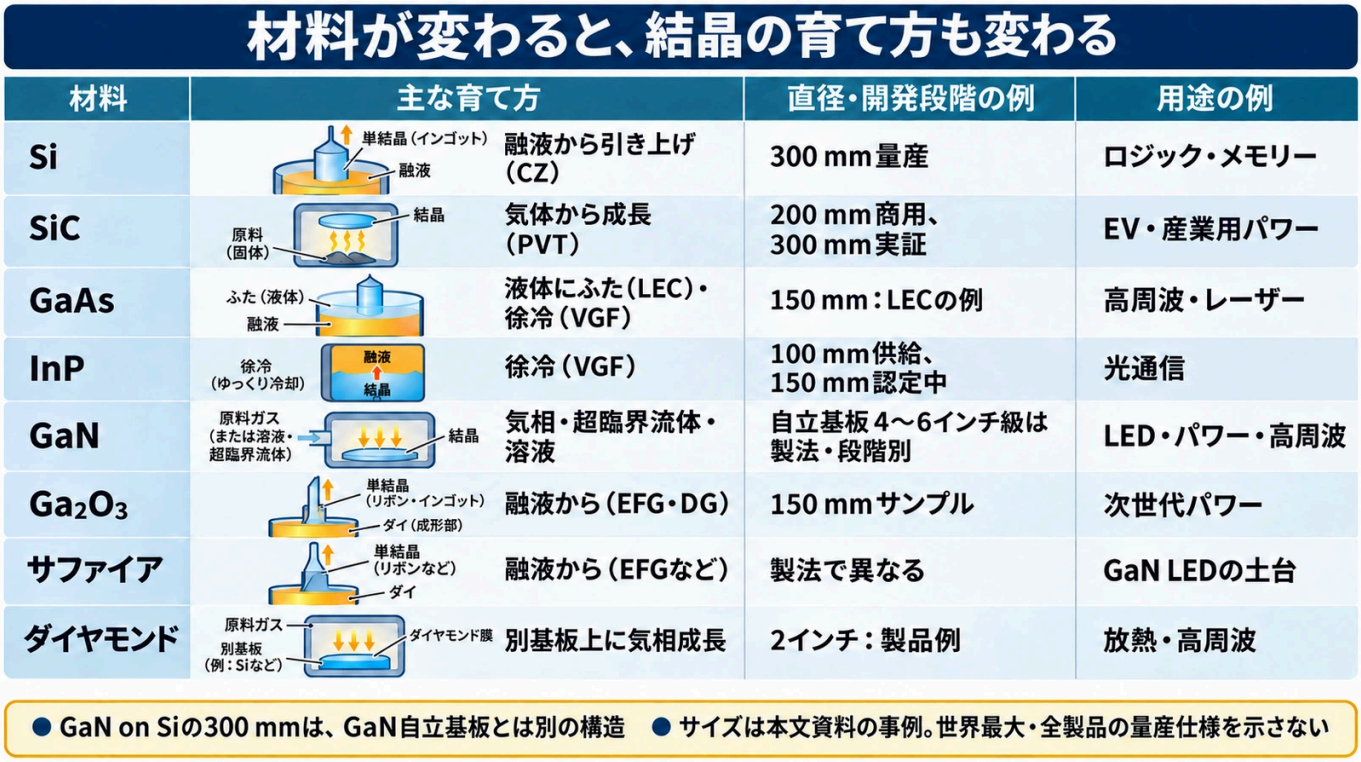


図1　ウェハの材料マップ：作り方と大きさ（概念図）

図の読み方：直径だけで「量産」と判断しない

同じ150 mmでも、継続供給できる製品、サンプル、顧客認定中、研究実証では意味が違います。また、GaN自立基板はGaNそのもの、GaN on SiはSiの上のGaN膜です。大きなSi基板を使えることと、大きなGaNの単結晶を育てられることは別の技術です。

2. 材料の「融け方」が、作り方を決める

2-1で見たように、シリコンは**1,414 ℃で融けて液体になり**、その液体から種結晶で結晶を引き上げられます。ところが、ほかの材料はそう簡単ではありません。2つの元素からできた化合物は、温度を上げたとき、**同じ組成のまま液体になってくれるとは限らない**からです 解説 。

物理のツボ①：化合物は「同じ組成のまま」融けるとは限らない

氷は0 ℃で水になります。H_2OのままH_2Oの液体になるので、話は単純です。しかし、2種類の原子でできた結晶を熱すると、**片方の原子だけが先に気体になって逃げ出す**ことがあります。そうなると、残った液体の組成がずれてしまい、元と同じ結晶を育てられません 解説 。

材料ごとに、次のような違いがあります。

材料	熱するとどうなるか	結晶の作り方
SiC	常圧では、Si:C＝1:1の液体が存在しない [1]	気体にして積もらせる（昇華法）
GaN	常圧の窒素の中では、融ける前に窒素の多い気体とガリウムの多い液体に分解する。約4.9 GPa（約5万気圧）の窒素の圧力をかければ融けると計算されている [10]	別の基板の上に育てる、溶液から析出させる
GaAs・InP	融けるが、ヒ素やリンの蒸気圧が高く、成分が逃げやすい [6]	液体にふたをする、圧力をかける、ゆっくり冷やす
Ga_2O_3	約1,800 ℃で融ける [15]	融液から育てる（EFG法など）
サファイア（Al_2O_3）	2,053 ℃で融ける [17]	融液から育てる（EFG法など）

GaNについては、さらに高い圧力でも融ける前に分解するという研究もあり、議論が続いています 解説 。いずれにせよ、**シリコンのように大気圧に近い条件で、溶かして引き上げる**ことができないのです。

この「融け方」の違いが、各材料のウェハの値段と大きさを大きく左右しています。以下、材料ごとに見ていきます。

3. SiC — 気体から積もらせる

昇華法：2,000 ℃を超える「黒鉛の箱」の中で

SiCは常圧では液体にならないため、**昇華法（PVT法、改良レイリー法）**で作られます。黒鉛でできたるつぼの中に、原料のSiCの粉と、種結晶のSiCの板を入れ、粉の側の温度がやや高くなるように温度差をつけて、全体を**2,000〜2,500 ℃**に保ちます [1] 事実 。

粉は、Si_2C、SiC_2、Siなどの分子になって**昇華**し、少し温度の低い種結晶の表面に届いて、結晶に取り込まれていきます。中は減圧したアルゴンで満たし、n型にするための窒素を加えます [1] 事実 。2-1のシーメンス法やエピタキシャル成長と同じく「気体から積もらせる」方法ですが、温度は2,000 ℃を超えます。

遅い：1時間に0.2〜0.4 mm

この方法の最大の弱点は、**遅さ**です。2024年の国際会議（ICSCRM）では、市販の基板は昇華法で**1時間に0.2〜0.4 mm**の速さで作られ、ほかの半導体の単結晶よりかなり遅いと報告されています [2] 事実 。三菱電機の技術解説も、融液から作るシリコンに比べて成長が遅いこと、まだ多くの転位を含むことを課題に挙げています [1] 事実 。

ディスコの資料は、直径6インチ（150 mm）、厚さ**20 mm**のSiCインゴットからウェハを切り出す例を示しています [7] 事実 。20 mmを1時間0.2〜0.4 mmで育てると、**約50〜100時間**かかる計算です 本稿の計算 。シリコンは、直径300 mm・重さ数百kgの結晶を5〜7日で引き上げます（2-1）。この例では、SiCの**厚さ2 cmを育てるだけでも数日**かかります。計算には昇温・冷却・加工の時間を含めていません。



育てた結晶を円筒形に削って整えた炭化ケイ素（SiC）のインゴット（Commonsの説明による）。シリコンの長い円柱と違い、背の低い円板の形をしています。側面の一部は平らに削られています。
画像：LaMèreVeille / Wikimedia Commons / CC BY-SA 4.0

積み方を間違えると、別の結晶になる（多形）

SiCには、もう一つ厄介な性質があります。SiとCの原子の層の**積み重ね方**に何通りもあり、積み方の違いによるエネルギーの差が小さいため、**積み方の違う結晶（多形、ポリタイプ）**ができてしまうのです。代表的なものに3C型、4H型、6H型があり、どれができるかは、作るときの温度などの条件で決まります。市販のパワー半導体用のSiC基板は、ほとんどが**n型の4H型**です [3] 事実 。結晶を育てるあいだ、条件を保って4H型だけを積み続けなければなりません 解説 。

欠陥：シリコンより制御が難しい

三菱電機によると、同社の技術解説が示す基板の例では、**マイクロパイプ**（中心が空洞になった、ずれの大きならせん転位）が1 cm²あたり**1〜10個**、転位が1 cm²あたり**10^3〜10^4個**ほどあり、シリコンより欠陥の制御が難しいと説明されています [4] 事実 。これらは資料に記された例で、現在の全製品の保証値や最良値ではありません。実際の仕様はメーカー・口径・欠陥の種類ごとに確認する必要があります。

物理のツボ②：電流を流すと「欠陥が育つ」 — 基底面転位

SiCの欠陥のうち、特に厄介なのが**基底面転位（BPD）**です。三菱電機の解説によると、基底面転位は、2本の**部分転位**にはさまれた線状の構造をしています。次のような順で、デバイスを使っているうちに欠陥が広がります [4] 事実 。

1. 基板の基底面転位が、その上に積んだエピタキシャル層（電圧を受け持つドリフト層）に引き継がれる。
2. デバイスに、電子と正孔の両方が流れる電流（バイポーラ電流）が流れると、電子と正孔が転位に捕まる。
3. 捕まった電子と正孔が再結合して**エネルギーを放出し**、そのエネルギーで部分転位が動く。動いた跡に、原子の積み方がずれた**積層欠陥**ができる。
4. 積層欠陥はさらに電子と正孔を捕まえるので、拡張が続く。積層欠陥の部分は電気を通しにくくなり、**抵抗が増える。**

つまり、**電子と正孔が再結合するエネルギーが、結晶の欠陥を押し広げる**のです。対策として、基板とドリフト層の間に適切な**バッファー層**を作り、ドリフト層の中の基底面転位を大幅に減らす方法がとられています [4] 事実 。ウェハの段階の欠陥が、何年も後のデバイスの寿命に響く例です 解説 。

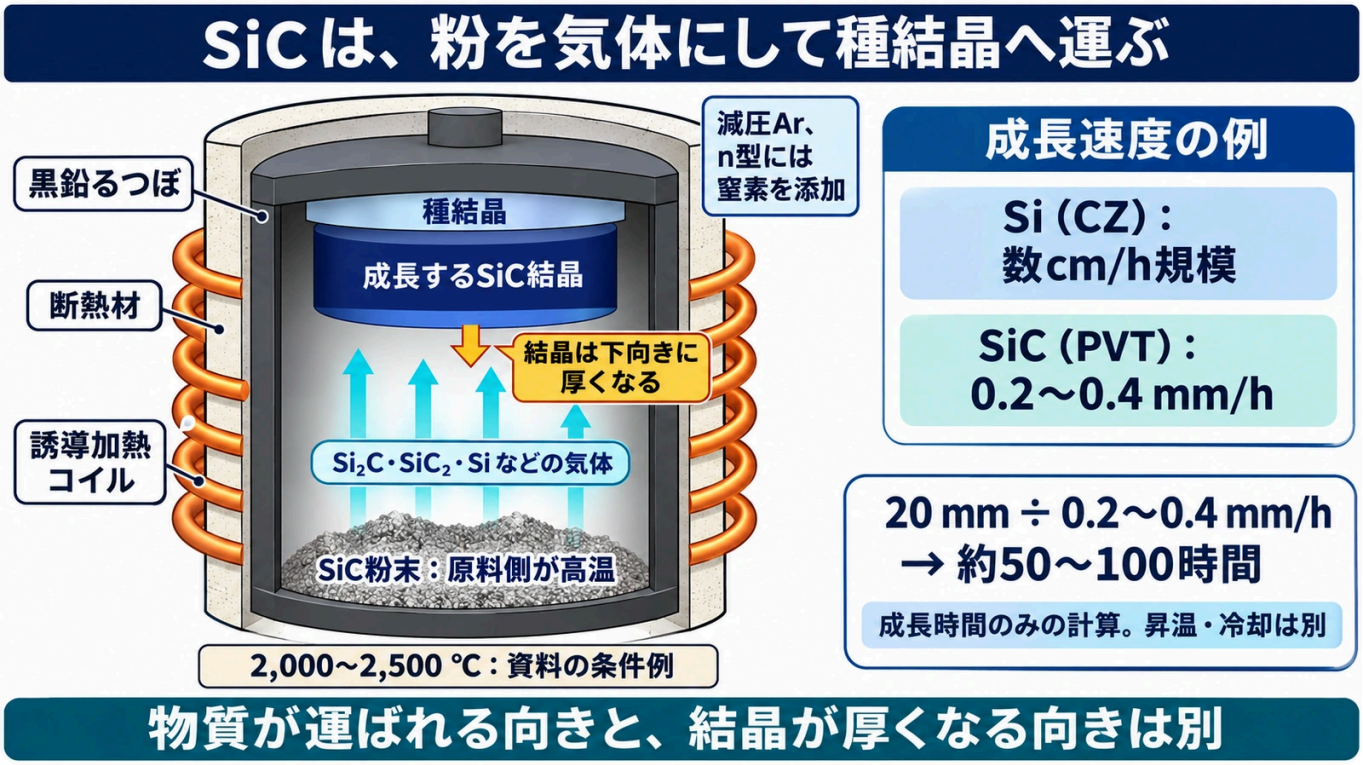


図2　SiCの昇華法（改良レイリー法）（概念図）

図の読み方：気体は上へ、結晶は種の下に厚くなる

図の青い矢印は、原料側から種側へ物質が運ばれる向きです。種結晶は上側に固定され、成長面に原子が取り込まれると、その下に結晶が厚くなります。CZ法のように融液から棒を引き上げる図とは区別して下さい。

- **硬いため、切断にも時間がかかる**

育てたSiCを切るのも大変です。SiCは、ほかの材料を削るための**砥粒そのものに使われるほど硬い**物質なので、インゴットをウェハに加工するのは長い時間がかかる難しい工程です [5] 事実 。

ディスコによると、直径6インチ・厚さ20 mmのインゴットから厚さ350 μmのウェハを切り出すと、ワイヤソーでは**1枚あたり約3.1時間、インゴット1本で約100時間**かかり、切り代として**1枚あたり約180 μm**が失われます（ユーザーへの聞き取りに基づく一般値） [7] 事実 。

これに対して、**レーザー**を使う方法が実用化されています。インゴットの上面からレーザーを当て、切りたい深さに光を集めて結晶を変質させ、その層を面全体に広げて**薄い板をはがし取る**方法です [5] 事実 。ディスコの方式では、加工時間が1枚あたり**約10分**に、失われる厚さが**約80 μm**に減り、1本のインゴットから取れる枚数は**約1.4倍**になるとしています [7] 事実 。2-2で見た「おがくず」を減らす工夫が、SiCではさらに切実なのです。

別の育て方：溶液から

昇華法以外の方法も研究されています。その一つが**溶液成長法**で、シリコンの融液にチタンやクロムなどを加えて炭素を溶けやすくし、黒鉛のるつぼから溶け出した炭素を使って、種結晶の表面にSiCを析出させます。温度は1,500〜2,000 ℃と昇華法より低く、成長の速さは**1時間に数百μm**と報告されています。結晶の成長方向に伸びる転位を横に曲げて、**結晶の側面から外へ追い出せる**のが利点です。一方で、成長をさらに速くすることや、長い結晶を作ることが課題です [1] 事実 。

市場：値崩れと大口径化

SiCウェハの市場は、ここ数年で大きく揺れています。

- 調査会社TrendForceによると、2024年のn型SiC基板の世界の売上は**10.4億ドル**（前年比9%減）でした。シェアは、米国の**Wolfspeed 33.7%**、中国の**TanKeBlue 17.3%**、**SICC 17.1%**、米国の**Coherent 13.9%**です。8インチ（200 mm）は、2030年に出荷の2割を超えると予測されています [21] 事実 （調査会社の推計）。
- 中国勢の急拡大で価格が急落しました。業界紙によると、中国製の150 mm基板は2024年半ばに**500ドルを下回り**、中国のメーカーの生産コストに近づきました。同じ頃、海外メーカーの提示価格は最高850ドルでした [22] 事実 （報道）。
- 最大手のWolfspeedは、米連邦破産法11条の手続きを経て、2025年9月に再建を完了しました。債務を**約70%減らし**、すでに設置した**200 mmの生産能力を生かして成長する**方針です [23] 事実 。同社は2025年9月に200 mmのSiC材料の商用販売を始め [24]、2026年1月には**直径300 mmのSiC単結晶ウェハを作った**と発表しています [25] 事実 。Coherentも300 mmのSiCを開発し、AIデータセンターの放熱向けに量産する計画です [26] 事実 。

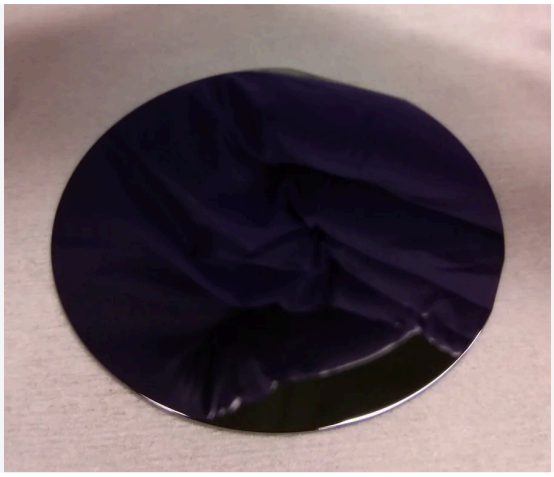
1-2で見たとおり、SiCは電気自動車のインバーターで電力の損失を減らす材料です。ウェハが安く大きくなることは、SiCのパワー半導体が広く使われる条件でもあります 解説 。一方で、作る側には、遅い成長と多い欠陥という壁が残ったまま、価格の競争が始まっています 推測 。

4. GaAs・InP — ふたをして、ゆっくり冷やす

LEC法：液体にガラスのふたをする

GaAs（ヒ化ガリウム）は融けますが、ヒ素の蒸気圧が高く、溶かすとヒ素だけが逃げていきます。そこで、ドイツのFreibergerは、融液の表面を**液体の酸化ホウ素（B_2O_3）で覆い**、ヒ素が選択的に蒸発するのを防いでいます。この方法を**LEC法**（液体封止チョクラルスキー法）と呼びます [6] 事実 。

LEC法は、2-1のCZ法に「液体のふた」と「圧力」を加えたものです。Freibergerの説明では、種結晶とるつぼを逆向きに回しながら、**0.2 MPa（約2気圧）を超える圧力**の窒素などの雰囲気の中で、**1時間に5〜10 mm**の速さで引き上げ、直径**150 mm（6インチ）**までの結晶を作ります [6] 事実 。



表面の結晶の向きが(100)の、直径2インチ（約50 mm）のGaAs単結晶ウェハ。鏡面に映る紫色は、持っている人のニトリル手袋です（Commonsの説明による）。
画像：La2O3 / Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0

VGF法：るつぼの中で、下からゆっくり固める

もう一つの方法が**VGF法**（垂直温度勾配凝固法）です。熱分解窒化ホウ素（pBN）のるつぼに、あらかじめ合成した原料と酸化ホウ素を入れ、るつぼの中で融液を**下から上へゆっくり固めて**いきます。上下方向の温度の差を**1 cmあたり5 ℃未満**と小さく保つため、**転位のとても少ない結晶**ができます [6] 事実 。米国のAXTも、独自のVGF技術でInP・GaAs・ゲルマニウムの結晶を作っています [8] 事実 。

温度の差が小さいと、結晶の中に生じる熱のひずみ（熱応力）が小さくなり、転位が生まれにくくなります。ただし、そのぶん、ゆっくりとしか固められません 解説 。

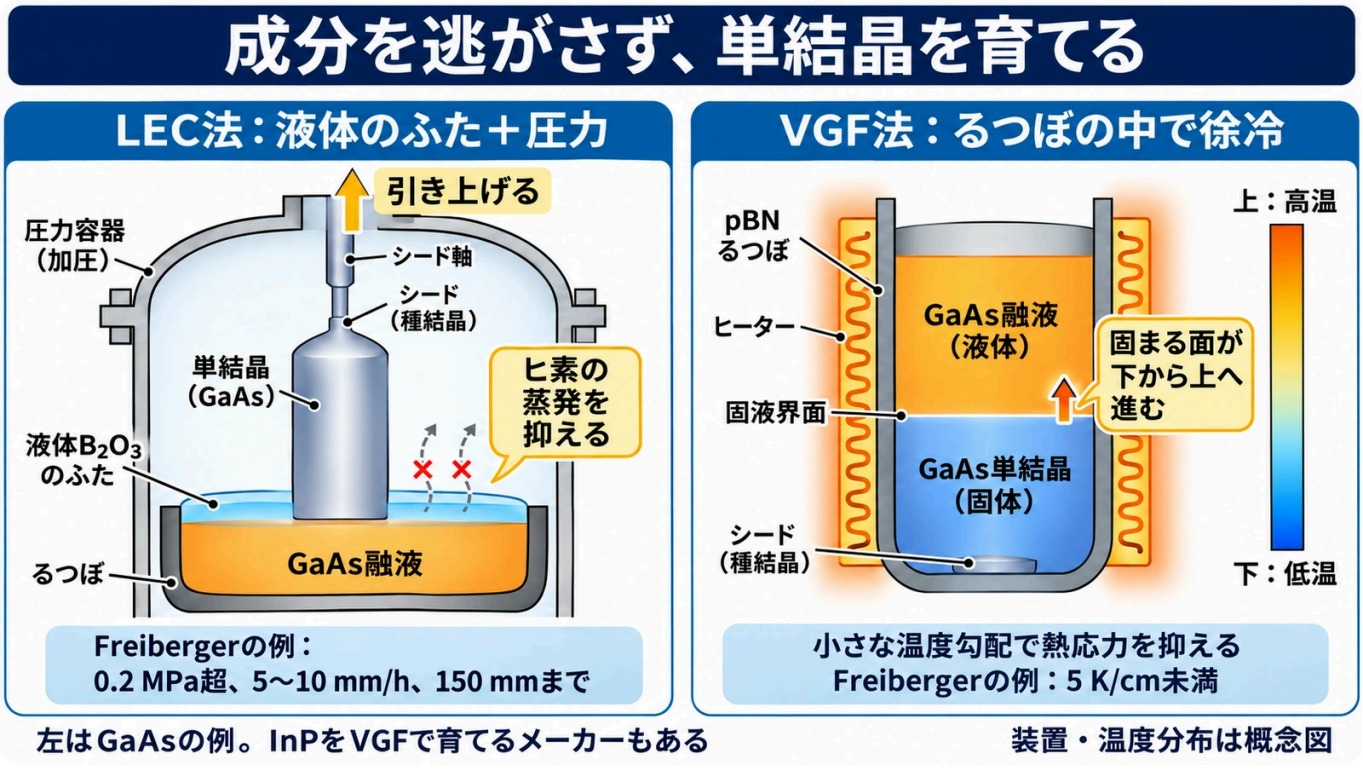


図3　GaAs・InPの2つの作り方：LEC法とVGF法（概念図）

図の読み方：LECは引き上げ、VGFは中で固める

左のLEC法では、液体のふたと容器の圧力で成分の散逸を抑えつつ、結晶を引き上げます。右のVGF法では、るつぼの中の下側が先に固まり、固液界面が上へ進みます。どちらも、単に冷やせばよいのではなく、組成と温度分布を保つ技術です。

InP：すぐに「双子」になる結晶

光通信のレーザーや受光素子に使われる**InP（リン化インジウム）**は、さらに難しい材料です。Freibergerは、構造の完全さ（転位の少なさ）を保つため、InPを**VGF法だけ**で育てています。原料の合成も、リンの高い蒸気圧に対応するため、高い圧力の下で行います [6] 事実 。

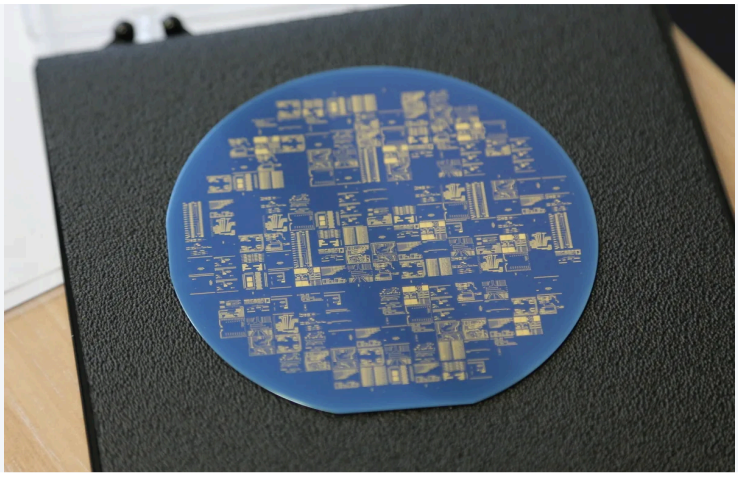
InPの最大の悩みは**双晶**です。双晶とは、結晶の途中で原子の並ぶ向きが鏡に映したように反転し、1つの結晶の中に向きの違う部分ができることです 解説 。米空軍の特許は、InPは**積層欠陥エネルギーが低い**ため双晶ができやすく、固液界面の角度を正しく保たないと高い確率で双晶が生じ、融液の乱れた対流がそれをさらに起こりやすくすると説明しています。その結果、双晶のない結晶の歩留まりが低く、ウェハの値段が高くなります [9] 事実 。

積層欠陥エネルギーが低いとは、原子の積み方を1層間違えても、エネルギーの損があまりないということです。SiCの多形と同じく、「間違えても困らない」構造ほど、結晶は簡単に間違えます 解説 。

InPは、AIで足りなくなった

AXTによると、InP基板は直径2・3・4インチで供給され、**6インチは試作と顧客の認定の段階**です。InP基板の市場は参入の壁が高く、**主な供給元はAXTを含めて3社しかない**としています。データセンターではInPのデバイスが高速の光通信に使われており、同社は**AIの普及で高速のデータ伝送の需要が増えている**と見ています [8] 事実 。

日本のJX金属は2026年6月、InP基板の生産能力を**2025年度比で7〜10倍**に引き上げる予定として、今後4年間に最大**1,200億円**を投資する方針を発表しました [27] 事実 。これは計画であり、すでにその能力へ増えたという意味ではありません。



InP（リン化インジウム）のウェハの上に、複数の企業のチップ（光回路など）の設計を相乗りで作り込んだ「マルチプロジェクトウェハ」（Commonsの説明による）。金色の配線のパターンが並んでいます。
画像：JonathanMarks / Wikimedia Commons / CC BY-SA 4.0

一方、中国は2025年2月にInP基板を輸出管理の対象に加え、AXTの中国子会社が作るGaAs・InP・ゲルマニウムの基板は、すべて輸出に許可が必要になりました [31] 事実 。

5. GaN — 融けない結晶を、3つの方法で

GaNは、常圧では融ける前に分解します [10] 事実 。そのため、GaNそのものからなる自立基板と、Siなどの上にGaN膜を積んだウェハは区別して考えます。まず、自立基板につながる代表的な3つの方法を見ます。

方法1：別の基板の上に育てて、はがす（HVPE法）

GaNの自立基板を作る方法の一つが、異種材料の基板から出発する方法です。**別の材料の基板の上にGaNを厚く育て、あとで基板からはがして**、GaNだけの基板（自立基板）を作ります。日立電線の特許は、異種基板との格子の不一致により、育てたGaNに結晶欠陥が生じやすいと説明しています [11] 事実 。この厚い成長には、HVPE法（塩化物の気体を使う気相成長）などが使われます 解説 。

方法2：高圧のアンモニアに溶かす（アモノサーマル法）

水晶を作る「水熱合成」のアンモニア版です。高い圧力で液体と気体の区別がなくなった**超臨界のアンモニア**にGaNを溶かし、種結晶の上に析出させます。日本製鋼所と三菱ケミカルなどは、従来の約半分の**約100 MPa（約1,000気圧）**という比較的低い圧力で育てる方法を開発し、2021年に、量産の実証設備で**4インチのGaN結晶**が計画どおり育っていることを確認しました [12] 事実 。

方法3：ナトリウムに溶かす（Naフラックス法）

ナトリウムとガリウムを混ぜた液体に、**約850 ℃・約40気圧**の窒素を当てて、GaNを析出させる方法です。大阪大学などのグループは、サファイア基板の上に小さな種結晶をたくさん並べる方法で、2022年に**直径6インチ**の高品質なGaN結晶を作りました。育てたGaNは、室温に戻すと**サファイアから自然にはがれる**といいます [13] 事実 。

安くて大きい代わりに：GaN on Si

GaNの自立基板は、まだ小さく高価です。そこで、パワー半導体では、**シリコンのウェハの上にGaNの薄い膜を積む（GaN on Si）**方法が広く使われています。Infineonは2024年、既存の300 mmシリコンの生産設備を使って、**直径300 mm**のパワー用GaNウェハを開発したと発表しました。200 mmに比べ、1枚から取れるチップは**2.3倍**になるとしています [14] 事実 。

ただし、シリコンとGaNは、格子の大きさも、温度による伸び縮み（熱膨張係数）も違います。高温で育てたGaN膜を冷やすと、一般に**GaNのほうがSiより大きく縮もうとします。**しかしSi基板に接しているため自由には縮めず、GaN膜に**引っ張る応力**が生じ、ひび割れの原因になります [32] 解説 。成長中の応力も重なるため、実際の反りは層構造と工程条件で変わります。Okmeticの資料は、緩衝層の設計や、より厚いSi基板などによる応力管理の重要性を説明しています [16] 事実 。



図4　GaNのウェハの3つの作り方と、GaN on Si（概念図）

図の読み方：膜を作ることと、基板を作ることを分ける

①〜③はGaN自立基板を得るルートです。④のGaN on SiではSiが機械的な土台となり、緩衝層で不一致や応力を調整して、その上のGaN膜をデバイスに使います。図の温度・圧力・口径は資料に示された事例で、全メーカー共通の仕様ではありません。

6. 日本発の新顔たち — 酸化ガリウム、AlN、ダイヤモンド

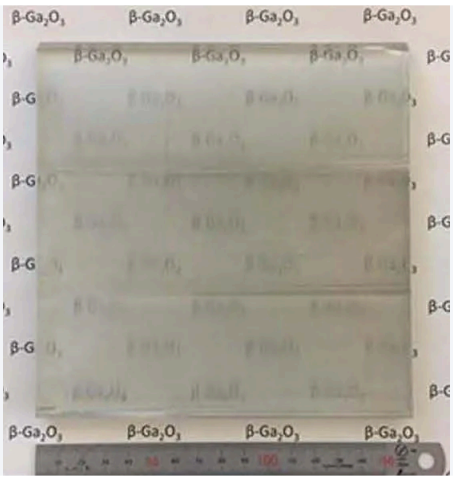
酸化ガリウム：融液から育てられる強み

酸化ガリウム（β-Ga_2O_3）は、SiCやGaNを超えるバンドギャップを持ち、次世代のパワー半導体の材料として注目されています [18] 事実 。製造面での大きな特徴は、**シリコンのように融液から結晶を育てられる**ことです。

日本のノベルクリスタルテクノロジーは、2015年から**EFG法**（細いすき間を伝って上がった融液から、板状の結晶を引き上げる方法）で基板を作ってきました。ただし、原料の融点が**約1,800 ℃**と高く、るつぼに耐熱性の高い**非常に高価な貴金属のイリジウム**を大量に使う必要があり、安くするのが難しいという課題がありました [15] 事実 。

そこで同社は、融液を**液滴で結晶の表面に供給する**新しい方法（DG法）を開発し、**イリジウムのるつぼを使わずに直径95 mm**の結晶を育てることに成功しました。基板の製造コストを**従来の10分の1**にできると試算しています [15] 事実 。2026年3月には、EFG法で作った**直径150 mm（6インチ）**の基板のサンプル出荷を始めると発表し、2029年の本格量産でDG法を導入し、2035年には**200 mm**の基板の開発を予定しています [18] 事実 。

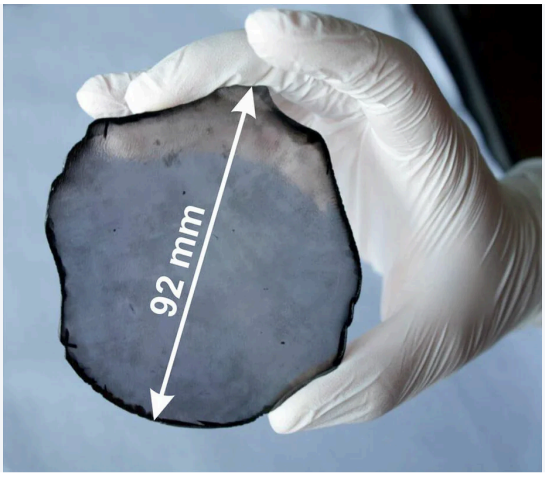
融液から育てられるということは、昇華法のSiCに比べて、速く大きく育てられる可能性があるということです 推測 。



透明な板状のβ型酸化ガリウム（β-Ga₂O₃）の結晶。下に定規が写っています（論文の図版。Commonsの説明による）。
画像：Michael A. Mastro et al. / Wikimedia Commons / CC BY 4.0

AlNとダイヤモンド

- **AlN（窒化アルミニウム）**：深紫外線のLEDなどに使われます。旭化成とCrystal ISは、2023年に**直径4インチ（100 mm）**のAlN単結晶基板の製造に成功したと発表しました。2インチの基板は、年に数千枚の規模で作っています [19] 事実 。
- **ダイヤモンド**：高周波や放熱に向く究極の材料とされます。日本のOrbrayは、表面をわずかに傾けたサファイアの上にダイヤモンドを育てる**段差流れ成長法**で、**2インチのダイヤモンドウェハ**を作り、販売しています。半導体に使える高品質なダイヤモンドを作るには、炭素を**1週間以上かけてゆっくり**合成します。同社は次の目標を4インチとしています [20] 事実 。



イリジウムなどの層を載せたシリコン基板の上に、ヘテロエピタキシー（別の材料の上での結晶成長）で合成した、磨く前のダイヤモンドの単結晶ディスク。直径は92 mm、厚さ約1.6 mmです（論文の図版。Commonsの説明による）。Orbrayとは別の研究グループのものです。
画像：Matthias Schreck, Stefan Gsell, Rosaria Brescia & Martin Fischer / Wikimedia Commons / CC BY-SA 4.0

- **サファイア：GaNのLEDの土台**

青色や白色のLEDは、主にサファイアの基板の上にGaNを積んで作られます（1-2）。サファイアは融点2,053 ℃の酸化アルミニウムの単結晶で、京セラは**EFG法**で原料を引き上げて結晶を作っています [17] 事実 。



キロプロス法で育てた、重さ35 kgの合成サファイアの結晶（Commonsの説明による）。京セラのEFG法とは別の、融液から育てる方法です。
画像：LaMèreVeille / Wikimedia Commons / CC BY-SA 4.0

7. 原料は誰が握っているのか

シリコン以外のウェハには、もう一つの弱点があります。**原料の産地の偏り**です。

- **ガリウム**（GaAs、GaN、Ga_2O_3の原料）：米国地質調査所（USGS）によると、低純度の一次ガリウムの世界生産の**99%を中国**が占めています（2025年の世界生産は推計約900 t） [28] 事実 。中国は2023年8月にガリウムの輸出を許可制にし、2024年12月には米国への輸出を禁止しました。中国商務部の2025年第72号公告は、2024年第46号公告の第2項（対米向け措置）の実施を**2026年11月27日まで停止**すると定めています [30] 事実 。これはガリウムなどの輸出許可制そのものの撤廃とは別です。ここでは2026年11月6日に確認した公告の文面を示しています。
- **インジウム**（InPの原料）：2025年の世界の精製生産の**70%を中国**が占め、2025年2月に新たな輸出規制の対象になりました [29] 事実 。

ガリウムやインジウムは、亜鉛やアルミニウムなどの鉱石を精錬するときの副産物として取り出されます。そのため、需要が増えたからといって、すぐに増産できるものではありません 解説 。



純度99.999%のガリウムの結晶（Commonsの説明による）。GaAs、GaN、酸化ガリウムの原料になります。
画像：en:user:foobar / Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0



重さ40 gのインジウムのインゴット（Commonsの説明による）。InPの原料になります。
画像：Hi-Res Images of Chemical Elements / Wikimedia Commons / CC BY 3.0

2-1で見た高純度石英や多結晶シリコンと同じく、ウェハの供給網は、**原料の段階で特定の国や地域に集中しているのです。**

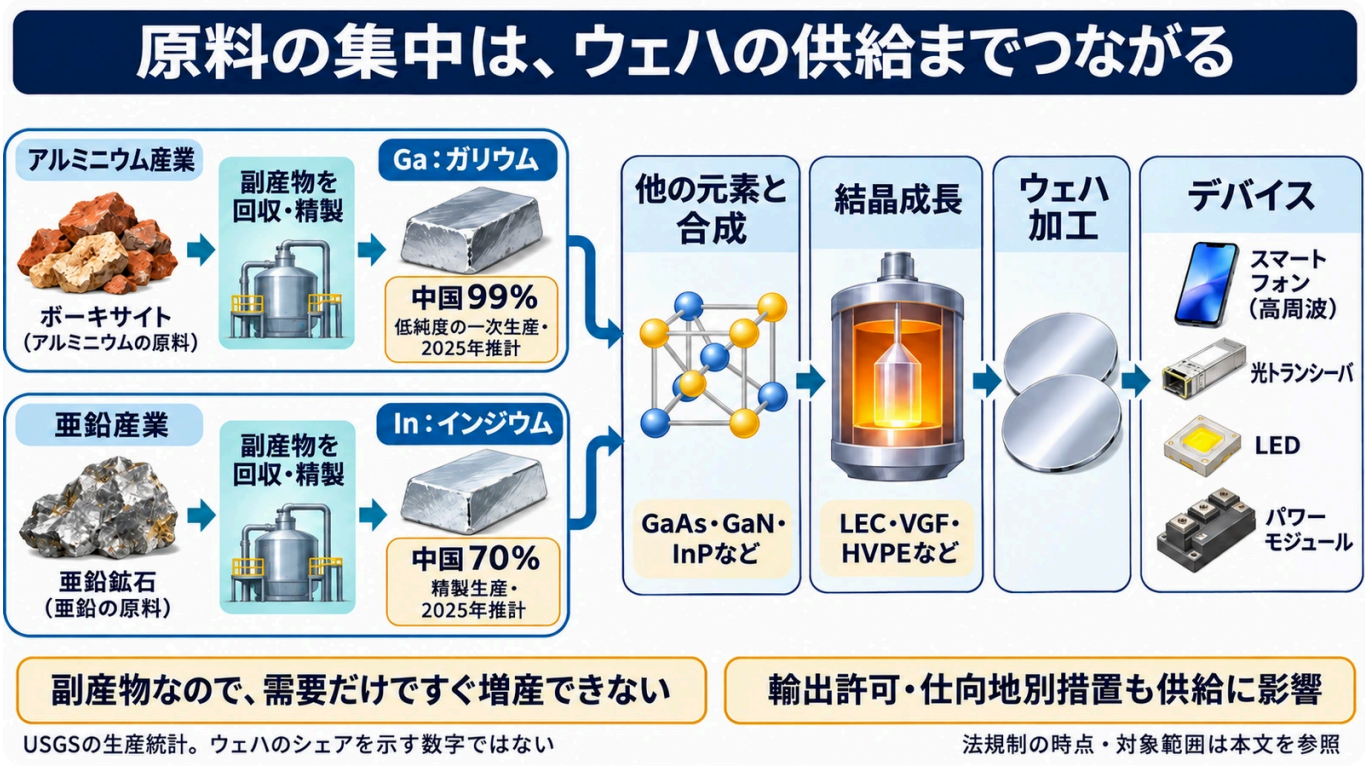


図5　化合物半導体のウェハの「原料から製品まで」（概念図）

図の読み方：原料の生産シェアと、ウェハのシェアは別

99%は低純度の一次ガリウム、70%は精製インジウムの2025年生産統計です。高純度化、化合物合成、結晶成長、ウェハ加工は別の段階で、同じ国が同じ割合を占めるとは限りません。GaはGaAsやGaNなどへ、InはInPなどへ使われ、全製品でGaとInを混ぜるという意味でもありません。

8. まとめと、第2部のふり返り

材料	作り方	直径・開発段階の例	難しさ	主な用途
Si	融液から引き上げ（CZ法）	300 mm	—	ほぼすべて
SiC	昇華法（2,000〜2,500 ℃）	200 mmを商用化、300 mmは実証	遅い（0.2〜0.4 mm/h）、多形、欠陥、硬い	EV・産業用のパワー
GaAs	LEC法・VGF法	150 mm（LEC）	ヒ素が逃げる	スマホの高周波、レーザー
InP	VGF法	AXTの供給例100 mm、150 mmは認定中	リンが逃げる、双晶	データセンターの光通信
GaN	HVPE、アモノサーマル法、Naフラックス法／GaN on Si	自立基板：4インチ実証（2021）、6インチ研究例（2022）。GaN on Si：300 mm開発例（2024）	融けない、格子・熱膨張の不一致	LED、充電器、パワー、高周波
Ga_2O_3	融液から（EFG法→DG法）	150 mmのサンプル	高価なイリジウムるつぼ	次世代のパワー
ダイヤモンド	サファイア上に気相成長	Orbrayの2インチ製品例	合成に1週間以上	高周波、放熱

第2部では、ありふれた石からイレブンナインのシリコンを作り（2-1）、それを鏡のウェハに仕上げ、結晶を積み、貼り合わせ（2-2）、その産業の勢力図を見て（2-3）、最後にシリコン以外の材料のウェハを見てきました。

次回からは**第3部「工程別」**です。最初の**3-1「洗浄」**では、2-2で少し触れたRCA洗浄を入り口に、ウェハの表面から汚れを取り除く化学を見ていきます。第3部では、このウェハの上に、トランジスタと配線を作っていきます。

9. 確認クイズ

1. SiCのウェハを、シリコンのように融液から引き上げて作れないのはなぜですか。

▼ 答えを見る

SiCは常圧では、SiとCが1:1の液体が存在しないからです。そのため、2,000〜2,500 ℃で粉を昇華させ、種結晶の上に積もらせる昇華法で作ります。

2. 厚さ20 mmのSiCインゴットを、1時間に0.2〜0.4 mmの速さで育てると、何時間かかりますか。

▼ 答えを見る

約50〜100時間です（20 ÷ 0.4 ＝ 50、20 ÷ 0.2 ＝ 100）。

3. SiCの基底面転位が、デバイスを使っているうちに抵抗を増やすのはなぜですか。

▼ 答えを見る

バイポーラ電流で電子と正孔が転位に捕まり、再結合で放出したエネルギーで部分転位が動いて、積層欠陥が広がるからです。積層欠陥の部分は電気を通しにくくなります。

4. GaAsのLEC法で、融液の表面を酸化ホウ素で覆うのはなぜですか。

▼ 答えを見る

ヒ素の蒸気圧が高く、溶かすとヒ素だけが選択的に蒸発してしまうからです。液体の酸化ホウ素のふたと圧力で、それを防ぎます。

5. InPの結晶で双晶ができやすいのはなぜですか。

▼ 答えを見る

InPは積層欠陥エネルギーが低く、原子の積み方を間違えても損が小さいからです。固液界面の角度がずれたり、融液の対流が乱れたりすると、双晶が生じやすくなります。

6. GaN on Siのウェハが反ったり、ひびが入ったりするのはなぜですか。

▼ 答えを見る

格子や熱膨張の違いによる応力が原因です。冷却時には一般にGaNがSiより大きく縮もうとしますが、Si基板に拘束されるため、GaN膜に引っ張る応力が生じてひび割れにつながります。反りは成長中の応力や緩衝層の設計にも左右されます。

7. 酸化ガリウムのウェハが、SiCやGaNに比べて製造で有利になりうる点は何ですか。また、その課題は何でしたか。

▼ 答えを見る

融液から結晶を育てられる点です。課題は、融点が約1,800 ℃と高いため高価なイリジウムのるつぼが必要なことで、るつぼを使わないDG法でコストを10分の1にする試算が示されています。

8. GaAsやGaNの原料のガリウムについて、供給のリスクを説明してください。

▼ 答えを見る

2025年推計では、低純度一次ガリウムの99%を中国が占めます。輸出許可制と対米向け措置は別で、2025年第72号公告は対米向け措置の第2項を2026年11月27日まで停止するとしています。副産物として回収されるため、需要に合わせてすぐには増産できません。

10. 用語集

昇華法（PVT法）
原料を高温で気体にし、温度の低い種結晶の上に積もらせて単結晶を作る方法。SiCで使われる。

改良レイリー法
種結晶を使う昇華法。SiCの基板の生産に広く使われる。

多形（ポリタイプ）
同じ組成で、原子の層の積み重ね方が違う結晶。SiCには3C型、4H型、6H型などがある。

4H-SiC
パワー半導体に使われる、4層周期の六方晶のSiC。

マイクロパイプ
SiCの結晶にできる、中心が空洞になったずれの大きならせん転位。

基底面転位（BPD）
SiCの基底面にある転位。バイポーラ電流で積層欠陥に広がり、デバイスの抵抗を増やす。

積層欠陥
原子の層の積み方が一部でずれた欠陥。

バッファー層
基板とドリフト層の間に作る層。SiCでは基底面転位をドリフト層に引き継がせないために使う。

溶液成長法
溶媒に原料を溶かし、種結晶の上に析出させて結晶を育てる方法。

レーザー剥離
レーザーで結晶内部に変質した層を作り、薄い板をはがし取る加工。

LEC法
融液の表面を液体の酸化ホウ素で覆い、圧力をかけながら引き上げる方法。GaAsで使われる。

VGF法
るつぼの中の融液を、小さな温度差で下から上へゆっくり固める方法。転位の少ない結晶ができる。

pBN
熱分解窒化ホウ素。GaAsやInPの結晶成長のるつぼに使われる。

双晶
結晶の途中で原子の並ぶ向きが鏡に映したように反転した部分を持つ結晶。

積層欠陥エネルギー
原子の積み方を間違えたときに生じるエネルギーの損。低いほど積層欠陥や双晶ができやすい。

自立基板
別の基板からはがした、GaNなどの材料だけでできた基板。

HVPE法
塩化物の気体を使って、GaNなどを速く厚く気相成長させる方法。

アモノサーマル法
超臨界のアンモニアに原料を溶かし、種結晶の上に析出させる結晶成長法。

超臨界流体
高温・高圧で、液体と気体の区別がなくなった状態の物質。

Naフラックス法
ナトリウムとガリウムの液体に窒素を溶かし込み、GaNを析出させる結晶成長法。

GaN on Si
シリコンのウェハの上にGaNの膜を積んだウェハ。

熱膨張係数
温度が1度変わったときに、材料がどれだけ伸び縮みするかを表す値。

EFG法
細いすき間を毛細管現象で上がってきた融液から、決まった形の結晶を引き上げる方法。

DG法
融液を液滴で結晶の表面に供給して育てる、ノベルクリスタルテクノロジーの結晶成長法。

イリジウム
高い融点を持つ貴金属。高温の融液を入れるるつぼに使われる。

段差流れ成長法
表面をわずかに傾けた基板の段差を起点に、結晶を横に広げながら育てる方法。

副産物
主な製品を作る過程で、あわせて得られるもの。ガリウムやインジウムは鉱石の精錬の副産物として回収される。

11. 参考資料（一次情報・技術論文・報道）

1. **三菱電機**「SiCレクチャーシリーズ 6. SiCバルク単結晶の成長技術（2025年1月）」 — 資料を開く
2. **ICSCRM 2024**「Program, 2024年10月1日（Jeong ほか：昇華法の成長速度）」 — 資料を開く
3. **三菱電機**「SiCレクチャーシリーズ 3. SiCの結晶構造」 — 資料を開く
4. **三菱電機**「SiCレクチャーシリーズ 5. SiC結晶の欠陥」 — 資料を開く
5. **三菱電機**「SiCレクチャーシリーズ 7. SiCウエハの加工」 — 資料を開く
6. **Freiberger Compound Materials**「Technology（LEC法とVGF法）」 — 資料を開く
7. **ディスコ**「KABRA（レーザーによるSiCインゴットのスライス）」 — 資料を開く
8. **AXT（米国SEC提出 Form 10-K、2025年度）**「製品の直径・用途・供給元の数」 — 資料を開く
9. **米空軍（米国特許 US5431125A）**「InPの双晶に関する記述」 — 資料を開く
10. **A. V. Davydov ほか（NIST）**「Thermodynamic assessment of the gallium-nitrogen system, Phys. Status Solidi (a) 188, 407（2001年）」 — 資料を開く
11. **日立電線（米国特許 US7288830）**「GaN自立基板の製法に関する記述」 — 資料を開く
12. **NEDO（2021年11月19日）**「世界最大級のGaN基板製造実証設備で4インチGaN結晶の成長を確認」 — 資料を開く
13. **JST Science Japan（2022年7月29日）**「大阪大学などが6インチの高品質GaN結晶を作製」 — 資料を開く
14. **Infineon（2024年9月11日）**「Infineon pioneers world’s first 300 mm power gallium nitride technology」 — 資料を開く
15. **NEDO・ノベルクリスタルテクノロジー（2025年12月22日）**「貴金属の使用量を大幅に削減した結晶育成法の開発に成功しました」 — 資料を開く
16. **Okmetic**「White paper: Power and RF GaN substrate wafers（2025年6月）」 — 資料を開く
17. **京セラ**「単結晶サファイア カタログ」 — 資料を開く
18. **EE Times Japan（2026年3月3日）**「150mm酸化ガリウムウエハーをサンプル出荷、ノベルクリスタル」 — 資料を開く
19. **旭化成（2023年8月21日）**「Crystal IS and Asahi Kasei Announce First 4-inch Aluminum Nitride Substrate」 — 資料を開く
20. **Orbray**「Diamond（製品ページ）および公式マガジン（段差流れ成長法）」 — 資料を開く
21. **Semiconductor Today（2025年5月12日）**「Silicon carbide substrate revenue falls 9% to $1.04bn in 2024, says TrendForce」 — 資料を開く
22. **SemiMedia（2024年10月16日）**「China's 150mm SiC substrate prices plunge」 — 資料を開く
23. **Wolfspeed（米国SEC提出 8-K 添付資料、2025年9月29日）**「再建の完了」 — 資料を開く
24. **Wolfspeed（2025年9月10日）**「Commercial launch of 200mm silicon carbide materials portfolio」 — 資料を開く
25. **Wolfspeed（2026年1月13日）**「Wolfspeed Achieves 300mm Silicon Carbide (SiC) Technology Breakthrough」 — 資料を開く
26. **Semiconductor Today（2025年12月4日）**「Coherent develops 300mm silicon carbide」 — 資料を開く
27. **JX金属（2026年6月16日）**「インジウムリン基板の大幅な生産能力増強に向けた設備投資方針を決定」 — 資料を開く
28. **USGS**「Mineral Commodity Summaries 2026: Gallium」 — 資料を開く
29. **USGS**「Mineral Commodity Summaries 2026: Indium」 — 資料を開く
30. **中国商務部 公告2025年第72号（2025年11月9日）**「公告2024年第46号の第2項の実施停止（公式公告）」 — 資料を開く
31. **AXT（米国SEC提出 目論見書補足 424B5、2025年12月29日）**「中国による輸出管理（2025年2月4日、InP基板を追加）」 — 資料を開く
32. **M. Suzuki ほか**「Mechanism of stress control for GaN growth on Si using AlN interlayers, Journal of Crystal Growth 464, 148–152（2017年）」 — 資料を開く

12. 主張と出典の対応表（監査）

本文の主張	根拠	区分
SiCは常圧でSi:C＝1:1の液相がない、昇華法、黒鉛るつぼ・粉と種結晶・2,000〜2,500 ℃、Si_2C・SiC_2・Siで昇華、減圧Ar・窒素ドープ、成長が遅く転位が多い、溶液成長（Ti・Cr、1,500〜2,000 ℃、数百μm/h、転位を側壁から掃き出す、課題）	三菱電機 [1]	事実
市販基板は昇華法で0.2〜0.4 mm/h	ICSCRM 2024 [2]	事実
積層順のエネルギー差が小さく多形ができる、3C・4H・6H、条件で決まる、市販のパワー用はほぼn型4H	三菱電機 [3]	事実
マイクロパイプ1〜10個/cm^2・転位10^3〜10^4個/cm^2、マイクロパイプは中心が空洞、BPDは部分転位対、バイポーラ電流で積層欠陥が拡張し抵抗増、再結合エネルギーで部分転位が移動、バッファー層で低減	三菱電機 [4]	事実
SiCは砥粒に使われるほど硬く加工に長時間、レーザーで改質層を作り剥離	三菱電機 [5]	事実
LEC：液体B_2O_3でヒ素の選択蒸発を防ぐ、0.2 MPa超、5〜10 mm/h、最大150 mm。VGF：pBNるつぼ、温度勾配5 K/cm未満で低転位。InPはVGFのみ、高圧で合成	Freiberger [6]	事実
6インチ・厚さ20 mmのSiCインゴット、ワイヤで1枚約3.1時間・1本約100時間、カーフロス約180 μm、レーザーで1枚約10分・ロス約80 μm・取り枚数約1.4倍	ディスコ [7]	事実
AXTはVGFでInP・GaAs・Geを育成、InPは2・3・4インチ供給・6インチは試作と認定、主な供給元は3社、AIで高速伝送需要	AXT [8]	事実
2025年2月4日に中国がInP基板を輸出管理対象に追加、中国子会社のGaAs・InP・Ge基板はすべて輸出許可が必要	AXT [31]	事実
InPは積層欠陥エネルギーが低く双晶ができやすい、界面角度と対流、歩留まりと価格	米空軍特許 [9]	事実
GaNは常圧で分解、約4.9 GPaの窒素圧で融ける計算	NIST [10]	事実
異種基板上でGaNを育てて分離する製法と、格子不一致による欠陥の課題	日立電線の特許 [11]	事実
低圧酸性アモノサーマル法、約100 MPa（従来の約半分）、4インチGaN結晶の成長を確認	NEDO [12]	事実
Naフラックス法、850 ℃・約40気圧、6インチ、マルチポイントシード、室温でサファイアから自然に分離	JST [13]	事実
Infineonが既存の300 mmシリコン設備で300 mmのパワーGaNウェハを開発、チップ数2.3倍	Infineon [14]	事実
Ga_2O_3の融点約1,800 ℃、EFG法でイリジウムを大量使用、DG法でイリジウムるつぼなしに95 mm、コスト10分の1の試算、2015年からEFG法	NEDO [15]	事実
GaNとSiの熱収縮の差、冷却時にGaNに引っ張る応力、緩衝層・基板厚による対策	研究論文 [32]・Okmetic [16]	事実

本文の主張	根拠	区分
サファイアはEFG法、融点2,053 ℃	京セラ [17]	事実
Ga_2O_3はSiC・GaNを超えるバンドギャップ、150 mmのサンプル出荷、2027年エピのサンプル、2029年量産でDG法、2035年200 mm	EE Times Japan [18]	事実（報道）
AlN 4インチの製造に成功、2インチを年数千枚	旭化成 [19]	事実
ダイヤモンド：傾けたサファイア上の段差流れ成長、2インチ、1週間以上の合成、次は4インチ	Orbray [20]	事実
2024年のn型SiC基板の売上10.4億ドル（−9%）、Wolfspeed 33.7%・TanKeBlue 17.3%・SICC 17.1%・Coherent 13.9%、2030年に8インチが2割超	TrendForce（Semiconductor Today） [21]	事実（調査会社の推計）
中国製150 mm基板が2024年半ばに500ドル未満、海外は最高850ドル	SemiMedia [22]	事実（報道）
Wolfspeedが2025年9月に再建完了、債務約70%削減、200 mmの能力を活用	Wolfspeed [23]	事実
200 mmのSiC材料の商用販売開始	Wolfspeed [24]	事実
300 mmのSiC単結晶ウェハを作製	Wolfspeed [25]	事実
Coherentが300 mmのSiCを開発、量産計画、AIデータセンターの放熱	Semiconductor Today [26]	事実（報道）
JX金属がInPの生産能力を2025年度比7〜10倍、最大1,200億円	JX金属 [27]	事実（投資計画）
ガリウムは中国が一次生産の99%、2023年8月許可制・2024年12月米国向け禁止・2025年11月から1年停止、2025年の世界生産約900 t	USGS [28]	事実
インジウムは中国が70%、2025年2月に輸出規制	USGS [29]	事実
停止期限は2026年11月27日	中国商務部 [30]	事実
20 mmを0.2〜0.4 mm/hで約50〜100時間	上記の出典値による計算	本稿の計算
SiCは遅い成長と多い欠陥の壁が残ったまま価格競争、Ga_2O_3は昇華法のSiCより速く大きく育てられる可能性	本稿の推測	推測
化合物が同じ組成のまま融けるとは限らないこと、GaNの融解には議論があること、多形の制御、BPDがデバイスの寿命に響くこと、LEC法とCZ法の関係、温度差と熱応力、双晶の意味、積層欠陥エネルギーの意味、アモノサーマル法と水熱合成の関係、GaN on Siが広く使われる理由、ガリウム・インジウムが副産物であること	一般的な原理と業界の一般的な説明	解説

図解・内容確認：2026年11月6日／結晶成長は各社（三菱電機・Freiberger・AXT・Wolfspeed・ディスコ・京セラ・Orbray・旭化成）の公式情報と技術資料、NEDO・JST・NIST・USGS（米国地質調査所）の資料、特許を出典としています。市場の数字は調査会社の発表や業界紙の報道を含み、本文中に明記しています。物理の一般原理の説明と、本稿の計算・推測は、本文中のタグで区別しています。図5点はOpenAI Image Genで作成した教育用の概念図です。図の読み方を補い、量産・試作・実証の区別とGaN on Siの熱応力の説明を整理しました。市場・製品サイズは各資料の対象年・発表時点の事例であり、全社の最新仕様を網羅するものではありません。

© 2026 Troy Technical
当サイトの文章・図版・動画のうち、著作権法で保護される部分の無断転載・再配布・再アップロードを禁じます。ただし、法令上認められる引用等を除きます。
引用資料・商標等の権利は各権利者に帰属します。記事へのリンクによるご紹介は歓迎します。転載・二次利用についてはお問い合わせください。