

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

**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 (Vol.2)**

－ GaN 結晶と基板製造コスト－

平成 30 年 2 月

**Technological Issues and Future Prospects of GaN and  
Related Semiconductor Devices (vol.2):**

**Manufacturing Costs of GaN Crystals and Substrates**

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-FY2017-PP-11

## 概要

GaN 系半導体デバイスとして、レーザー、高輝度 LED、パワー半導体が関心を集め、研究対象となっているが、これらデバイスは GaN 基板を必要とする場合が多い。

GaN 単結晶の製造が技術的に困難なため、GaN 基板は極めて高価で、GaN 基板を利用したデバイスの実用化を阻んでいるとされている。そこで、GaN 単結晶の代表的な製造方法として、HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) 法、アモノサーマル法、フラックス法をとりあげ、現状技術レベル、実用化に至る課題、課題を克服した場合の将来コストなどについて検討した。

## Summary

GaN and related semiconductor devices have attracted attention in the application area of laser diodes, high luminance LEDs, and power devices. Commercialization of these devices has been difficult due to the unusually high prices of GaN substrates on which the devices are formed, because GaN is one of the material hard to grow single crystals. HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy), ammonothermal, and flux method will be evaluated in view of the present crystal growth technology level, hurdles for realization, and the presumable future manufacturing cost when the hurdles are cleared.

## 目次

### 概要

1. 概観.....	1
2. HVPE 法による GaN 単結晶、基板製造コスト推定.....	1
2.1 化学反応.....	1
2.2 原料.....	2
2.3 プロセス.....	2
2.4 基板化.....	5
2.5 コスト試算結果.....	5
2.6 技術的課題.....	9
3. アモノサーマル法による GaN 単結晶、基板製造コスト推定.....	9
3.1 溶解析出反応.....	9
3.2 原料.....	10
3.3 プロセス.....	10
3.4 基板化.....	11
3.5 結果.....	12
3.6 技術的課題.....	16
4. フラックス法による GaN 単結晶、基板製造コスト推定.....	17
4.1 化学反応.....	17
4.2 原料.....	17
4.3 プロセス.....	17
4.4 基板化.....	18
4.5 コスト試算結果.....	19
4.6 技術的課題.....	20
5. まとめ.....	21
6. 政策立案のための提案.....	23
参考文献.....	23

## 1. 概観

GaN は常圧では融点を持たずに分解する化合物であるため、常圧での液相が存在しない。このために通常の結晶成長で用いられるチョクラルスキー法、ブリッジマン法、ベルヌーイ法などの融液中成長法が利用できない。

現状では、CVD プロセスを利用する気相成長法 (HVPE 法)、超臨界アンモニアを利用するアモナーマル法、Na 融液を利用する Na フラックス法などが研究されている。

GaN は結晶成長時の晶癖のため、特に+C 軸方向に成長させると円錐型に直径がどんどん減少し、長い単結晶が取れないという問題もある。このため、単結晶から数枚～10 枚程度の基板しかとれず、高加工コスト、低歩留まりとなる問題もある。このように、現在の技術は、従来の既存結晶成長技術に比べて高コストとなり、また品質的にも改善の余地が大きい。ここでは上記 3 方法について、一定程度 (10t/年) の市場に供給する場合に、現状技術による製造コスト推定と、製造技術における課題の抽出、その課題が解決された場合における製造コスト推定を行った。

## 2. HVPE 法による GaN 単結晶、基板製造コスト推定

HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) 法は、石英製の反応器中で、GaN または格子定数が GaN に近い材料の単結晶基板上に GaN を気相エピタキシャル成長させるものである。

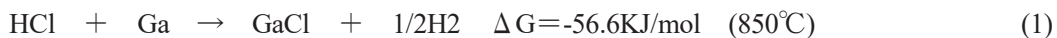
長所としては、成長速度が大きい、成長温度はやや高いが、常圧で成長できるという利点があり、大型設備の対応が可能な点が挙げられる。

短所としては、高温 (1000°C) が必要。CVD 技術なのでガスの利用効率が低い。エピタキシャル技術であるために基板が必要であり、また基板よりも大きなサイズの結晶は成長できない。結晶の欠陥密度は高いほうであり、典型的には約  $10^6\text{cm}^{-2}$ [4]から  $10^7\text{cm}^{-2}$ [5]と報告されている。基板の欠陥を引き継ぐ傾向にあるため、低欠陥密度の基板を用いないと単結晶も低欠陥にはならないとされている。

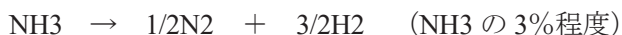
本報告では、特許[1-3]、学術雑誌[4,5]、ヒアリング[6]等の情報をもとにプロセスを組み立て、コスト試算を行った。

### 2.1 化学反応

HVPE 法は以下の化学反応式により、高温で Ga と HCl から GaCl を生成し、次いで GaCl と NH<sub>3</sub> から基板上に GaN を成長させる単結晶育成技術である。



同時に副反応として以下の反応が伴う



(2)式でわかるように GaN の生成自由エネルギー  $\Delta G$  は高温になるほど正の大きな値をとり、合成条件で GaN は安定相とは言えないので、合成には不利である。この反応を速度論的に進めるために NH<sub>3</sub> を過剰量加えていると推定されるが詳細は省略する。GaN が安定に高速に成長するために経験上 1000°C以上が必要と言われているので、より低温でエネルギー的に安定な GaN の安定条件とのバランスが必要となる[6]。

技術の特徴としては、他の方法に比べて結晶成長速度が速いこと、結晶欠陥が多いこと、基板の結晶性を原則として継承するので結晶品質は基板に依存すること、Ga 基準の収率が低いことがあげられるが、現状商業的に供給されている GaN の大部分は HVPE 法による。

## 2.2 原料

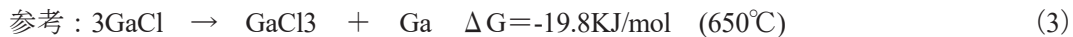
原料としては金属 Ga、HCl ガス、NH<sub>3</sub> ガス、また雰囲気ガスとして N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub> が用いられる。また、ドーピング剤として Si を SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> などとして H<sub>2</sub> ガスと流す。

基板として GaN、GaAs、サファイアなどがあげられるが実用的には GaAs か GaN 薄膜付きサファイア (GaN/サファイア) が用いられている。

## 2.3 プロセス (図 1 参照)

### (1) GaCl 製造

GaCl は高温でのみ安定で、700°C 以下では GaCl<sub>3</sub> と Ga に不均化する。従って、反応場で生成させるほうが効率が良いため、HCl を Ga と 1000°C で反応させて GaCl を生成し、ただちに NH<sub>3</sub> と 1050°C で反応させて GaN を生成するプロセスとなっている。



### (2) GaN 製造

#### ① 製造条件

成長条件は 1050°C 近辺、1 気圧で GaCl と NH<sub>3</sub> を N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub> 雰囲気中で反応させる。およそのマテリアルバランスは図 2 のようになっている。結晶成長の効率上、平衡を GaN 側にするために NH<sub>3</sub> は GaCl の 25-50 倍流すのが経験上良いとされている。NH<sub>3</sub> 自身の分解は 3% 程度 (900°C)。HCl は全量 NH<sub>3</sub> に中和され、大量の NH<sub>4</sub>Cl ができる。

低温部には NH<sub>4</sub>Cl、GaCl<sub>3</sub>、Ga が混在して析出し、配管等の閉塞他の問題が生じるため、2 段階程度のトラップを設けて最初に GaCl<sub>3</sub> と Ga、次のトラップで NH<sub>4</sub>Cl を析出させる。

また基板以外にも大量の GaN デブリが析出する。これを除くために結晶取出し後に HCl ガスを装置に流してクリーニングを行う。([2]およびヒアリング)

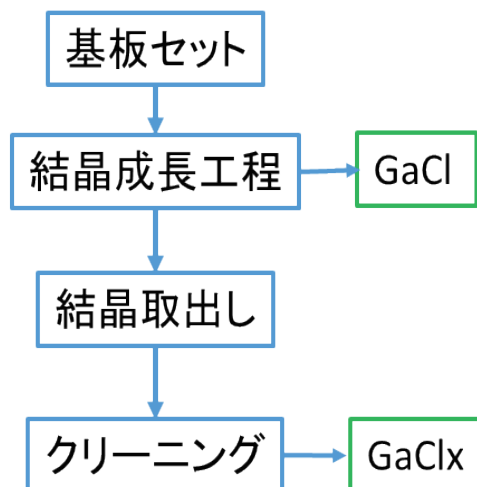


図 1 HVPE プロセスフロー

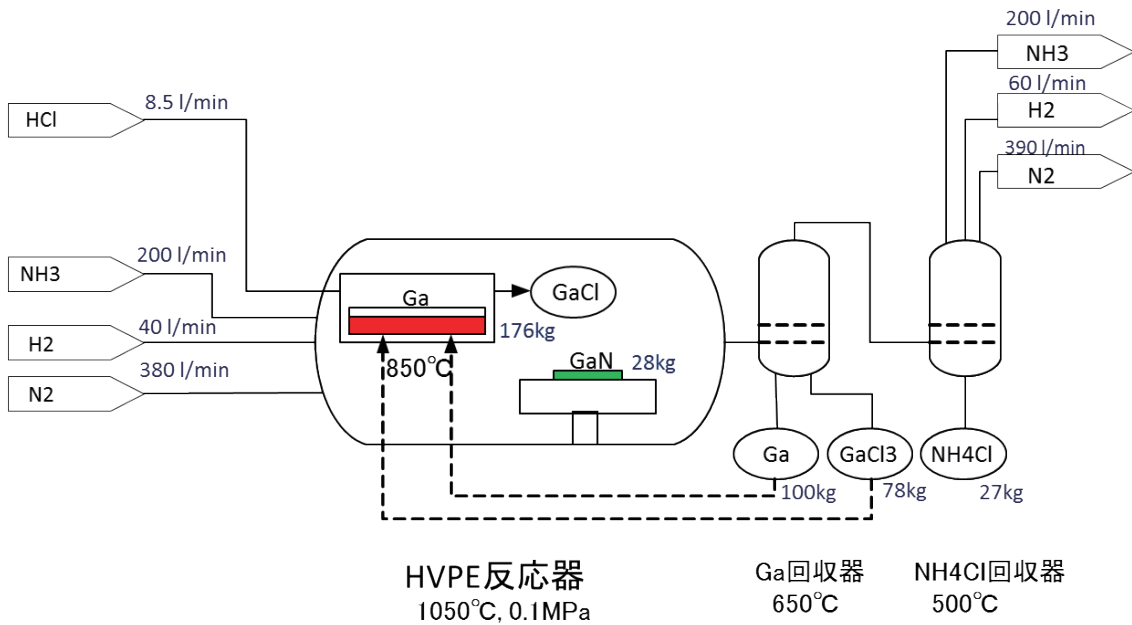


図 2 HVPE プロセス図

② 結晶成長制御

現在成長用基板としては、価格の関係から GaN エピ膜付きサファイア (0001) 基板が多く用いられているが、ミスフィットが大きいため得られる GaN 結晶の欠陥が多い。また GaN と基板の熱膨張係数や格子定数の違いで全体が反る。この反りは戻らないので、このままスライスすると結晶軸がずれるという問題がある上、応力の蓄積により厚い結晶の成長は困難である。

更に、このサファイア (0001) 成長用基板を用いると結晶成長は m 面 {10-10} の成長が早く、斜めのファセット (10-11) 面が発達する (晶癖) 結果、約 60° の角度で面積が減少する。このため、4 インチ基板を製造する場合には 4 インチを超えるサイズの成長用基板を準備する。それでも上記晶癖および GaN 結晶と基板の格子不整合、熱膨張係数差による反りのため 5 mm を超えた厚みは困難である。

以上より、GaN を成長用基板として用いるホモエピタキシャルが結晶の品質上好ましいといわれている。

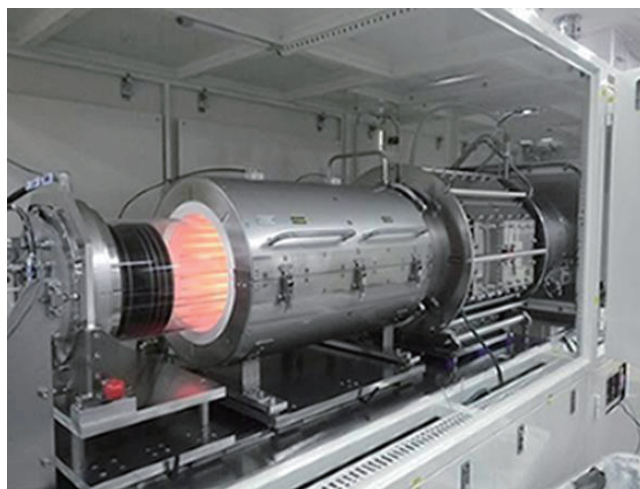


図 3 HVPE 装置写真 (沖電気 HP から)

### ③ 収率

現在の GaN の Ga 基準収率は 5%程度と言われている。これは単結晶周辺に多結晶が多量に析出するため、気相成長では本質的に未反応ガスが多いためである。析出 GaN 多結晶は単結晶と同量かそれ以上である。単結晶基板の周辺部にも付着するので 20%くらいは周辺をカットすることでロスとなる。析出物は低温部の石英や黒鉛ほか部材に付着する。

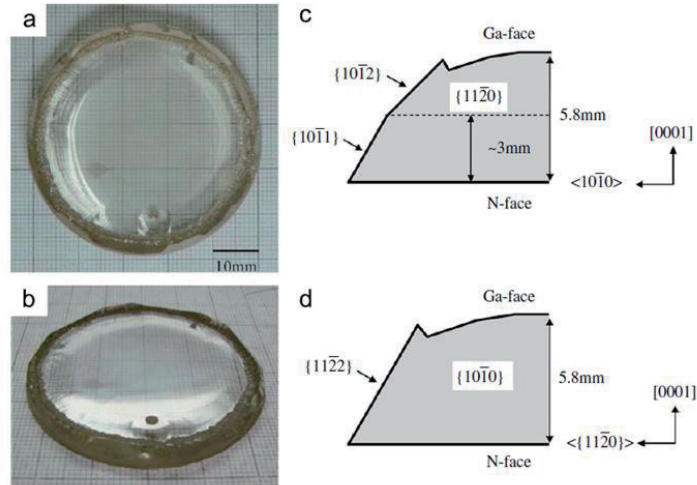


図 4 GaN 結晶とその晶癖 (文献[4])

### ④ クリーニング

析出した GaN を物理的にとるのは難しく、放置すると多結晶上に選択的に析出して、歩留まりが悪化する。また石英が割れることもある。このため、一回成長が終わると必ず濃 HCl ガスによる高温クリーニングをして GaN を全部除く。量産機なら 24 時間程度のクリーニング時間をみる。

### ⑤ コスト計算前提条件

現 状：4 インチ GaN/サファイア基板を 1 枚セットした装置で結晶高さ 5 mm に成長し、成長速度は  $300 \mu\text{m/hr}$  とした。良品率は 20% と仮定した。また、工程内での Ga リサイクルはなく、Ga 基準の収率は 16% とした。

中間段階：6 インチ基板 5 枚を成長装置に装荷できるとし、結晶成長速度も  $450 \mu\text{m/hr}$  に達するが、結晶成長高さは 5 mm のままとし、良品率は 100% とした。

将 来：6 インチ基板を 5 枚セットした装置で結晶高さ 50 mm まで成長可能とし、成長速度は  $450 \mu\text{m/hr}$  とした。また、工程内で Ga リサイクルを行い、収率は 51% とした。

この時のスケールアップ則としては、装置能力の 5 倍に対して 0.7 乗則を適用して単価を推定した。成長高さの 3 倍は装置コストに影響しないと仮定した。設備の稼働は年間 330 日とし、24 時間運転とした。

### ⑥ 本方法の問題点

既述のように大量のガスを使用して析出させるために、循環ガス量が多く、また供給原料量に対する収率は低い。さらに副反応も装置稼働効率を低下させている。



## 2.4 基板化

マルチワイヤソーを用いて基板にスライスする。マルチワイヤソーにはφ4インチ、15mmの単結晶を20個、直列にセットして、基板厚み350μm、カーフロス200μmで、1バッチで500枚を切り出せると仮定。切断速度は0.05mm/分とした。以上の前提条件でコスト試算をした。

## 2.5 コスト試算結果

### (1) 現状技術

現状で10t/年の生産ができる体制とはなっていないと考えられるが、仮にできると仮定した場合のGaN単結晶製造コストを計算した。

#### ① 固定費

基板1枚が装荷可能な反応装置は、1台250百万円という情報をヒアリングより得ている。これをベースにコスト計算前提条件の結晶高さ5mmで計算した。この場合、頻繁に結晶の取出しと基板のセッティングが必要なために装置稼働率が低く、設備費がかさむ。

表1 HVPE法製造設備費(10t/年、現状技術ベース)

機番	名 称	仕 様	材質	リサイクルなし [百万円]
Z-101	ガス供給設備	SUS	SUS	500
R-101	成長装置	石英製、20台	石英	66,250
TK-202	酸洗タンク		FRP	30
S-101	ガス分離塔	石英製、20台	石英	0
Z-301	スライサー	マルチワイヤソー		250
Z-302	水洗・乾燥機		TL	20
	クリーンルーム	1000m <sup>2</sup> 、400千円/m <sup>2</sup>		400
	排ガス処理設備	成長装置の10%		6,625
機器費小計				74,000
土木・建築・据え付け、配管、計装、電気工事等一式		機器費の146%		108,000
合計				182,000

#### ② 変動費

もともと気相法は反応収率が低いため、未反応ガスのリサイクルを行わないと変動費が非常に高くなる。現状技術では工程内リサイクルがされてないとしたため、変動費は高い。

表2 HVPE法製造変動費(10t/年、現状技術ベース)

	年間使用量		単 価	GaN単結晶			GaNウェーハー		
				原単位	変動費 [円/kg]	原単位	変動費 [円/枚]		
Ga	63	[t]	50,000 [円/kg]	6.31 [kg/kg]	315,361	0.169 [kg/枚]	8,458		
4" GaN/Sapphire基板	43,725	枚	2,000 [円/枚]	0.23 [枚/kg]	457	0.117 [枚/枚]	235		
HClガス	33	[t]	22 [円/kg]	3.30 [kg/kg]	73	0.088 [kg/枚]	2		
NH <sub>3</sub>	1,282	[t]	15 [円/kg]	128.15 [kg/kg]	1,922	3.437 [kg/枚]	52		
H <sub>2</sub>	114	[Nm <sup>3</sup> ]	60 [円/m <sup>3</sup> ]	11.37 [m <sup>3</sup> /kg]	682	0.000 [m <sup>3</sup> /枚]	0		
N <sub>2</sub>	923	[Nm <sup>3</sup> ]	14 [円/m <sup>3</sup> ]	92.31 [m <sup>3</sup> /kg]	1,292	0.002 [m <sup>3</sup> /枚]	0		
Pure Water	1	[t]	33.25 [円/t]	0.05 [t/kg]	2	0.001 [kg/枚]	0		
電力	45,570	[MWh]	12.00 [円/kWh]	4556.99 [kWh/kg]	54,684	122.221 [kWh/枚]	1,467		
石英管	10	[t]	2,000 [円/kg]	1.00 [kg/kg]	2,000	0.027 [kg/枚]	54		
計装Air	1,000	[Nm <sup>3</sup> ]	4.36 [円/Nm <sup>3</sup> ]	0.10 [Nm <sup>3</sup> /kg]	0	0.003 [m <sup>3</sup> /枚]	0		
合計					376,000		10,300		



③ 製造コスト

以上から製造コストを算出した、単結晶ブールは420万円/kg、4インチ基板製造コストとして45万円/枚となった。製造した基板の良品率を20%としている。現在4インチ基板は80万円/枚といわれ、また製品の基板に欠陥が存在することから、この程度の仮定は妥当ではないかと推定している。この価格でもGaN基板が必要な高付加価値の限られた用途には使用される可能性はあるが、Si基板が数千円であることから、GaN基板の素子が広く社会に受け入れられることは難しいと考える。

表3 HVPE法製造コスト(10t/年、現状技術ベース)

売上高	GaNブール				4" GaNウェーハー			
		百万円/年	単価	円/kg		百万円/年	単価	円/枚
製造量	GaN単結晶 GaN基板(4インチ)	10 t/年		円/kg	372,848 枚/年			円/枚
設備費		181,750 百万円			182,000 百万円			
固定費	設備償却費 <sup>*1</sup>	36,350,000 千円	3,635,000 円/kg		36,400,000 千円/年	390,500 円/枚		
	労務費 <sup>*2</sup>	1,862,000 千円	186,000 円/kg		1,897,000 千円/年	20,400 円/枚		
	小計		3,821,000 円/kg			410,900 円/枚		
変動費			376,000 円/kg			41,200 円/枚		
合計			4,200,000 円/kg			452,000 円/枚		

\*1 固定費(償却=0.2)、\*2 7,000千円/年

(2) 中間段階コスト

前述の技術課題の内、基板5枚を成長装置に装荷できるとし、結晶成長速度も450μm/hrに達するが、結晶成長高さは5mmのままとして、良品率100%としたときの製造コストを推定した。

① 固定費

現在の基板1枚装荷の結晶製造装置250百万円をベースに基板5枚装荷するときのスケールアップファクターを0.7乗則で算出し、1台770百万円とした。土木、建築、配管、計装、電気工事費等設備建設にかかわる費用はこの種の設備の従来費用から経験的に機器費の146%とした。

1台で生産できる結晶量は5倍になるためコストダウンとなる。もっとも、結晶高さが低いため、頻繁な基板交換が必要となり、装置台数が多く、設備費は470億円と、依然高額となる。

表4 HVPE法製造設備費(10t/年、中間段階技術ベース)

機番	名称	仕様	材質	リサイクルあり [百万円]
Z-101	ガス供給設備	SUS	SUS	500
R-101	成長装置	石英製、19台	石英	14,668
TK-202	酸洗タンク		FRP	30
S-101	ガス分離塔	石英製、19台	石英	1,000
Z-301	スライサー	マルチワイヤソー		1,300
Z-302	水洗・乾燥機		TL	20
	クリーンルーム	1000m <sup>2</sup> 、400千円/m <sup>2</sup>		400
	排ガス処理設備	成長装置の10%		1,027
機器費小計				18,900
土木・建築・据え付け、配管、計装、電気工事等一式				機器費の146%
合計				46,500

② 変動費

未反応 GaCl およびクリーニング時に GaN の HCl との反応により生成する GaCl は全てトラップして GaCl<sub>3</sub>+Ga に不均化したのち回収して原料として再投入することにした。このため変動費は大幅に低下した。

ただし結晶高さが 5 mm であるため、必要な種結晶基板枚数が多い分が変動費増加要因となった。

表 5 HVPE 法製造変動費 (10t/年、中間段階技術ベース)

	年間使用量		単価		GaN単結晶		GaNウェーハー			
					原単位	変動費 [円/kg]	原単位	変動費 [円/枚]		
Ga	19	[t]	50,000	[円/kg]	1.63	[kg/kg]	81,325	0.166	[kg/枚]	5,788
6" GaN/Sapphire基板	17,841	枚	2,000	[円/枚]	1.78	[枚/kg]	3,567	0.111	[枚/枚]	222
HClガス	38	[t]	22	[円/kg]	3.30	[kg/kg]	73	0.235	[kg/枚]	5
NH <sub>3</sub>	50	[t]	15	[円/kg]	4.36	[kg/kg]	65	0.311	[kg/枚]	5
H <sub>2</sub>	0	[Nm <sup>3</sup> ]	60	[円/m <sup>3</sup> ]	0.00	[m <sup>3</sup> /kg]	0	0.000	[m <sup>3</sup> /枚]	0
N <sub>2</sub>	48	[Nm <sup>3</sup> ]	14	[円/m <sup>3</sup> ]	4.19	[m <sup>3</sup> /kg]	59	0.000	[m <sup>3</sup> /枚]	0
Pure Water	1	[t]	33.25	[円/t]	0.05	[t/kg]	2	0.004	[kg/枚]	0
電力	11,041	[MWh]	12.00	[円/kWh]	966.07	[kWh/kg]	11,593	68.761	[kWh/枚]	825
石英管	11	[t]	2,000	[円/kg]	1.00	[kg/kg]	2,000	0.071	[kg/枚]	142
計装Air	1,143	[Nm <sup>3</sup> ]	4.36	[円/Nm <sup>3</sup> ]	0.10	[Nm <sup>3</sup> /kg]	0	0.007	[m <sup>3</sup> /枚]	0
合計							99,000			7,000

③ 製造コスト

以上の設備費および変動費から製造コストを算出した。製造コストは6インチ基板でほぼ1インチ6万円の目標に近い67千円/枚となった。結晶は100万円/kgであった。これから、結晶サイズを大きくできなくても、リサイクル技術と複数基板による製造技術を開発すればコストダウンは相当図れることがわかる。

表 6 HVPE 法製造コスト (10t/年、中間段階技術ベース)

	GaNブール				6" GaNウェーハー				
				単価				単価	
売上高		10,190	百万円/年	円/kg	10,758	百万円/年		円/枚	
製造量	GaN単結晶 GaN基板(6インチ)	10	t/年	円/kg	160,569	枚/年		円/枚	
設備費		45,300	百万円		46,600	百万円			
固定費	設備償却費	9,060,000	千円	906,000	円/kg	9,320,000	千円/年	58,000	円/枚
	労務費	140,000	千円	14,000	円/kg	322,000	千円/年	2,000	円/枚
	小計			920,000	円/kg			60,000	円/枚
変動費				99,000	円/kg			7,000	円/枚
合計				1,019,000	円/kg			67,000	円/枚

(3) 将来コスト

前述の技術的課題が解決し、2.3 (2) ⑤の前提条件が成立し、良品率 100%としたときの製造コストの到達しうるポテンシャルを推定した。

① 固定費

装置費用は中間ケースと同じく、1台770百万円とした。その他設備建設にかかわる費用は同じく経験的に機器費の146%とした。ただし結晶高さ50mmまで成長可能となり、必要成長設備数が大幅に減少して設備費としては190億円となり、コストダウンとなった。

表 7 HVPE 法製造設備費 (10t/年、将来技術ベース)

機番	名 称	仕 様	材質	リサイクルあり [百万円]
Z-101	ガス供給設備	SUS	SUS	500
R-101	成長装置	石英製、7台	石英	5,400
TK-202	酸洗タンク		FRP	30
S-101	ガス分離塔	石英製、7台	石英	1,000
Z-301	スライサー	マルチワイヤーソー		150
Z-302	水洗・乾燥機		TL	20
	クリーンルーム	1000m <sup>2</sup> 、400千円/m <sup>2</sup>		400
	排ガス処理設備	成長装置の10%		380
機器費小計				7,900
土木・建築・据え付け、配管、計装、電気工事等一式				11,500
合計				19,400

② 変動費

Ga 回収工程に加えて、結晶高さも 50 mm となるため、必要種結晶基板枚数も低下して変動費低下要因となった。

表 8 HVPE 製造変動費 (10t/年、将来技術ベース)

	年間使用量		単 価		GaN単結晶		GaNウエーハー			
					原単位	変動費 [円/kg]	原単位	変動費 [円/枚]		
Ga	19	[t]	50,000	[円/kg]	1.63	[kg/kg]	81,380	0.116	[kg/枚]	5,786
GaN/Sapphire基板	1,786	枚	2,000	[円/枚]	0.18	[枚/kg]	357	0.011	[枚/枚]	22
HClガス	38	[t]	22	[円/kg]	3.30	[kg/kg]	73	0.234	[kg/枚]	5
NH <sub>3</sub>	50	[t]	15	[円/kg]	4.36	[kg/kg]	65	0.310	[kg/枚]	5
H <sub>2</sub>	0	[Nm <sup>3</sup> ]	60	[円/m <sup>3</sup> ]	0.00	[m <sup>3</sup> /kg]	0	0.000	[m <sup>3</sup> /枚]	0
N <sub>2</sub>	48	[Nm <sup>3</sup> ]	14	[円/m <sup>3</sup> ]	4.19	[m <sup>3</sup> /kg]	59	0.000	[m <sup>3</sup> /枚]	0
Pure Water	1	[t]	33.25	[円/t]	0.05	[t/kg]	2	0.004	[kg/枚]	0
電力	4,249	[MWh]	12.00	[円/kWh]	371.75	[kWh/kg]	4,461	26,432	[kWh/枚]	317
石英管	11	[t]	2,000	[円/kg]	1.00	[kg/kg]	2,000	0.071	[kg/枚]	142
計装Air	1,143	[Nm <sup>3</sup> ]	4.36	[円/Nm <sup>3</sup> ]	0.10	[Nm <sup>3</sup> /kg]	0	0.007	[m <sup>3</sup> /枚]	0
合計							88,000			6,300

③ 製造コスト

以上の設備費および変動費から製造コストを算出した。減価償却費は設備費の 20%とした (約 7 年償却)。また人件費は 7000 千円/人年とした。

その結果、GaN 単結晶製造コストとして 48 万円/kg、6 インチ基板製造コストとして 31 千円/枚となった。これは一般に言われている 1 インチ 1 万円以下を達成しうるコストである。

なお、この HVPE プロセスは GaN 結晶成長法の中で最も技術的には検討が進んでいて工業化に近い位置にある。

表 9 HVPE 製造コスト (10t/年、将来技術ベース)

		GaNブール				6" GaNウェーハ			
				単価				単価	
売上高		7,185	百万円/年	718,500	円/kg	7,450	百万円/年	46,350	円/枚
製造量	GaN単結晶	10	t/年		円/kg	160,740	枚/年		円/枚
	GaN基板(6インチ)								
設備費		19,250	百万円			19,400	百万円		
固定費	設備償却費	3,850,000	千円	385,000	円/kg	3,880,000	千円/年	24,100	円/枚
	労務費	56,000	千円	6,000	円/kg	77,000	千円/年	500	円/枚
	小計			391,000	円/kg			24,600	円/枚
変動費				88,000	円/kg			6,300	円/枚
合計				479,000	円/kg			30,900	円/枚

## 2.6 技術的課題

### (1) 基礎的な技術課題

2.3 (2) ②で述べたように、結晶成長の異方性のために結晶が六角錐となって成長が3-5mmで停止し、大きな結晶にならない問題がある。これでは1枚の種結晶基板からとれる基板の枚数も数枚にとどまり、生産性も低く、高コストになる。

そこで、コストダウンのためには、高さ50mmまで成長させられる結晶成長制御技術の確立が重要であり、そのための基礎研究が重要である。現在は原料にGaCl<sub>3</sub>を利用したり、基板の結晶面として(000-1)面を用いることなどによる特定結晶面の成長抑制が検討されている。

また、HVPE法は不純物の混入が他の競合方法に比べて低いものの、結晶欠陥密度が高いという問題がある。この解決策としては低欠陥密度のGaN基板の利用や結晶成長条件の検討が行われている。

### (2) 生産技術課題

副生物の系外への除去など技術的課題はあるが、他の方法のような技術的難易度は高くなく、工業化に最も近いと考える。中間段階技術のコストでわかるように、気相法に共通する低収率による過大な製造設備と高変動費対策が必要である。変動費低減のためにはリサイクル技術が、設備費のコストダウンのためには、複数基板を設置した反応器による生産性の向上が非常に重要である。

## 3. アモノサーマル法による GaN 単結晶、基板製造コスト推定

### 3.1 溶解析出反応

アモノサーマル法では超臨界アンモニアへのGaNの溶解度の温度依存性を利用して、基本的には高温部(600-750°C)でGaN原料を溶解し、低温部(500-650°C)に設置した種結晶の上にGaNを析出成長させて単結晶GaNを得る技術である。ただし、成長部と原料溶解部の温度関係が逆の場合もあり、主に鉍化剤の種類や温度、圧力の設定により異なる。本手法はR. Dwilinskiらが1995年に初めて報告し、その後多くの研究がなされている[8]。これは水晶の育成技術(水熱合成法)に極めて類似した技術である。

本技術で単結晶成長の駆動力は温度差により生じる溶解度差である。従って、溶解部と析出部の温度差が大きく、溶解度差が大きいほど成長の駆動力は大きくなる。一方で同一容器内に温度勾配を設けると、当然密度差による対流が生じて温度差は小さくなるため、温度差には限界がある。

本技術の長所としては、HVPE法に比べて原料利用効率が良く、製造コストを抑制することができるという利点があると主張されている。また成長速度が遅いため欠陥密度が低い良質な結晶が育成できるとされている。

短所としては、超臨界状態を達成するために、高温高压(600°C、200MPaなど)が必要であり、特に圧力の面から大型設備は大変困難と考えられる。また結晶成長速度が遅いため長時間運転が必須である。超臨界状態のNH<sub>3</sub>は極めて溶解性が高く浸食性があるため、不純物を取り込みやすく、耐圧容器の内側に貴金属ライニングが必要であるなど、設備材質の検討も必要である。

### 3.2 原料

アモナーマル法の原料としては、目的とする窒化物結晶と同種の多結晶や単結晶などが用いられる。このため、最初に窒化物微結晶原料を製造した後に、アモナーマル法による窒化物結晶の成長を行う[8]。

このとき、溶解度差を利用するために原料は粒径サイズの小さい窒化物多結晶が好ましい。平均粒径が1~5μm程度のGaN微結晶粉末を原料として用いてGaN結晶を成長することが好ましいと記載がある[8]。

このため製造コストはGaN価格に大きく依存する。現在低価格でGaNを入手することは困難であり、将来コストもGaNの価格に大きく依存する。したがって低価格GaNの製造法の開発が本法では重要となる。なお原料中の水、酸素の含有量は1ppm以下が好ましい。

およそのマテリアルバランスは図5のようになっている。

### 3.3 プロセス

#### (1) GaN製造 (図5,6)

##### ① 製造条件

手順としては原料GaN粉末とアンモニアを図5のような耐熱耐圧容器に液体窒素温度で充填、封入後、加熱してアンモニアを超臨界条件にする(750°C、1000気圧、または600°C、2000気圧以上)。超臨界NH<sub>3</sub>に耐えるため、Ptライニングなどが施されている。

この超臨界NH<sub>3</sub>中に原料GaN粉末を高温部で溶解し、低温部(たとえば500°C)に設置した基板に温度差による溶解度差でGaN結晶を析出させる(逆の温度条件の場合もある)。超臨界NH<sub>3</sub>中に溶解したGaNはNH<sub>3</sub>を常圧に戻すときに容易に分離が可能であるので、再度原料としての利用が可能である。

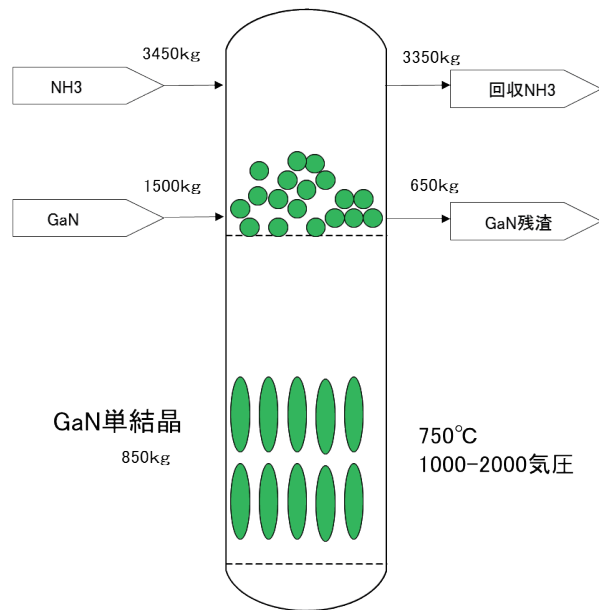


図5 アモナーマルプロセス

##### ② 結晶成長制御

種結晶はGaNを使用する。他の材料、たとえばサファイアは溶解してしまうので使用できない。アンモニアなどの窒素を含有する溶媒に対する窒化物結晶原料の溶解度が低いために、溶解度を向上させるために鉱化剤を用いる。鉱化剤としては塩基性鉱化剤としてナトリウムアミドなど、酸性鉱化剤としては塩化アンモニウムなどがあげられる。濃度はアンモニアに対するモル濃度で0.5以上10mol%以下の場合が多い[8]。

溶媒としてはアンモニアのほかにヒドラジン、尿素など窒素を含有する化合物が良い。窒化物の溶解度があることが必要である。アンモニア溶媒の場合純度は好ましくは6N以上である。



結晶成長条件はアンモニアの臨界点以上 ( $T_c=132^\circ\text{C}$ 、 $P_c=11.35\text{MPa}$ )。実際には  $150\text{--}300\text{MPa}$  と  
 いわれている。結晶成長後、ドーパントを格子位置に置換するためにアニール処理を  $900\text{--}1050^\circ\text{C}$ 、  
 $12\text{--}300$  時間行うとされている。

結晶成長速度は HVPE 法の場合と同じで、結晶軸の方向によって異なり (たとえば  $m$  面方向が  
 速い)、 $0.1\text{--}12\ \mu\text{m/hr}$  程度が報告されている[13,15]。成長速度の大きい結晶は成長後のクラックの  
 発生などの問題がある[12,15]。

### ③ 収率

現在の 1 バッチあたりの GaN の Ga 基準  
 収率は 20%程度と言われているが、特許上  
 は 70%という記述もある[7]。将来は 80%  
 程度が目標とされている。

### ④ 反応設備 (図 6)

高温高压に耐える必要がある。材質とし  
 てはインコネル、Rene41、ハステロイなど  
 が挙げられていて、耐圧のために鍛造品を  
 くり抜いて容器が作成されている[9,10,11]。  
 また、超臨界アンモニアの溶解性が大きい  
 ために、現状では反応容器に Pt 系のライ  
 ニングがされている[13]。ただ銀のライ  
 ニングでも可能という報告もあるので、将来技  
 術では銀ライニングを採用した[14,15]。

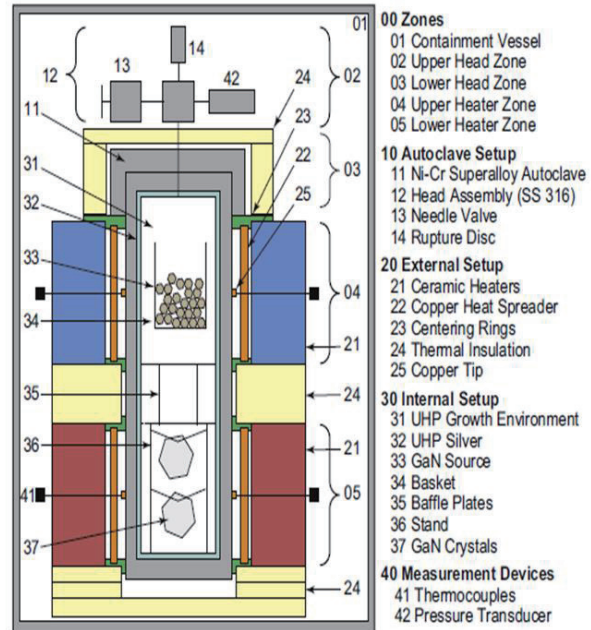


図 6 アモノサーマル反応容器[14]

### ⑤ コスト計算前提条件

現 状：100 枚程度の 4 インチ種結晶基板を設置することができ、成長速度は  $5\ \mu\text{m/hr}$ 、結晶  
 成長は 3 mm 高さとした。原料 GaN を 150 万円/kg、種結晶を 20 万円/枚として結晶高  
 さが 3 mm なので、変動費が極めて高い。また、装置も外熱式のため、インコネル鍛  
 造品を使用するため高くつく。

中間段階：100 枚程度の 6 インチ種結晶基板を設置可能とし、成長速度は  $75\ \mu\text{m/hr}$ 、ただし、  
 結晶高さは 3 mm のままと仮定した。原料 GaN を 80 万円/kg、種結晶を 10 万円/枚と  
 した。装置を内熱式として高張力鋼が使えるとしたため、大型化が可能となり、生  
 産効率が大幅に向上した。

将 来：中間段階と同じ製造設備とし、成長速度も  $75\ \mu\text{m/hr}$ 、ただし結晶高さ 90 mm まで技  
 術改良で成長可能となると仮定した。原料 GaN を 50 万円/kg、種結晶を 5 万円/枚と  
 した。結晶高さを 90 mm としたので、変動費は大幅に低下した。

## 3.4 基板化

マルチワイヤーソーを用いて基板にスライスする。マルチワイヤーソーには  $\phi 6$  インチ、100 mm  
 の単結晶を 3 個、直列にセットして、基板厚み  $350\ \mu\text{m}$ 、カーフロス  $200\ \mu\text{m}$  で、1 バッチで 540  
 枚を切り出せると仮定。切断速度は  $0.05\ \text{mm/分}$  とした。

以上の前提条件でコスト試算をした。

### 3.5 結果

#### (1) 現状技術

現状技術のままで仮に GaN 単結晶を 10t/年製造し、4 インチ基板としたときのコストを推定した。

##### ① 設備費

現状はインコネルの直径 1m の鍛造品をくり抜いて 600℃、2000 気圧の過酷な条件に耐える反応器を作成しているため、極めて高価と推定される。ここではインコネルを 6 千円/kg として反応器単体の重量から算出されるコストを 4 倍として超高压に対する安全対策費を含めるものとした。この結果反応容器 1 台あたりの価格は約 566 百万円と推定した。このため設備費は総額 765 億円と極めて大きくなった。

表 10 アモノサーマル法製造設備 (10t/年、現状技術)

機番	名称	仕様	材質	[百万円]
Z-101	N2ガス供給設備	SUS	SUS	100
R-101	成長装置		inconel	26,602
TK-202	酸洗タンク		FRP	30
Z-301	スライサー	マルチワイヤーソー		350
Z-302	水洗・乾燥機		TL	20
	クリーンルーム	500m2、200千円/m2		100
	Ga回収設備	成長装置の10%		2,660
機器費小計				29,860
土木・建築・据え付け、配管、計装、電気工事等一式		機器費の146%		43,600
超高压調整費				3,050
合計				76,500

##### ② 変動費

現在の GaN 結晶の価格情報がないため正確性に欠けるが、本研究で算出される現行 HVPE 法による GaN 単結晶が 420 万円/kg であることから、GaN デブリはその約 1/3 の 150 万円/kg と仮定した。また、種結晶基板は 4 インチで 1 枚 20 万円/kg と仮定した。以上から算出される変動費はかなり大きい。

表 11 アモノサーマル法製造変動費 (10t/年、現状技術)

	年間使用量		単価		GaN単結晶		GaNウェーハー			
					原単位	変動費 [円/kg]	原単位		変動費 [円/枚]	
GaN	18	[t]	1,500,000	[円/kg]	1.66	[kg/kg]	2,485,630	0.075	[kg/枚]	112,445
NH3	1.2	[t]	1,000	[円/kg]	0.11	[kg/kg]	114	0.005	[kg/枚]	5
種基板	72,439.0	[枚]	200,000	[円/枚]	6.67	[枚/kg]	1,333,333	0.302	[枚/枚]	60,318
98%H2SO4	3.7	[t]	20	[円/kg]	0.34	[kg/kg]	7	0.000	[m3/枚]	0
Pure Water	1	[t]	33.25	[円/t]	0.05	[t/kg]	2	0.002	[kg/枚]	0
電力	18,363	[MWh]	12.00	[円/kW]	1690.00	[kWh/kg]	20,280	76.452	[kWh/枚]	917
計装Air	1,087	[Nm3]	4.36	[円/Nm3]	0.10	[Nm3/kg]	0	0.005	[m3/枚]	0
合計							3,840,000			174,000



③ 製造コスト

以上の設備費と変動費から算出される推定製造コストは下表のように、単結晶製造コストとして565万円/kg、4インチ基板250千円/枚となった。設備費の減価償却は20%/年とした。

表12 アモノサーマル法製造コスト (10t/年、現状技術)

		GaNブール			4" GaNウェーハ				
		単価		単価	単価				
売上高		百万円/年		円/kg	7,450	百万円/年	円/枚		
製造量	GaN単結晶 GaN基板(4インチ)	10	t/年	円/kg	240,192	枚/年	円/枚		
設備費		76,150	百万円		76,500	百万円			
固定費	設備償却費	15,230,000	千円	1,523,000	円/kg	15,300,000	千円/年	63,700	円/枚
	労務費	2,030,000	千円	203,000	円/kg	2,030,000	千円/年	8,500	円/枚
	小計			1,726,000	円/kg			72,200	円/枚
変動費				3,840,000	円/kg			176,000	円/枚
合計				5,570,000	円/kg			248,000	円/枚

(2) 中間段階コスト

高温、超高压環境で外熱式反応容器はスケールアップが材料的に困難である。そこで、内熱式反応器の利用が可能となるとした。この場合、耐圧は冷却された外側高張力鋼容器で支え、必要な温度は反応容器内部にヒーターを設置することにより得られる[14,15]。

これにより反応容器のサイズの自由度は大きくなった。また種結晶を密に配置することで反応容器内部の空間の利用効率をあげたことにより、必要な反応容器の数を少なくした。

また結晶成長高さは3mmのまま、結晶成長速度も5μm/hrから10μm/hrに改善した程度として6インチ用種結晶基板を使用できるとしてコストを推定した。

また、原料のGaN結晶価格を80万円/kgまで低下するとした。

① 固定費

設備費は約122億円と大幅に低下した。これは内熱式として大型設備(20m長さ×0.4m内径)が可能となり、1バッチあたりの製造量が増加し、また容器材質をインコネルから高張力鋼に変更したためである。

表13 アモノサーマル法製造設備 (10t/年、中間段階技術)

機番	名称	仕様	材質	[百万円]	
Z-101	N2ガス供給設備	SUS	SUS	100	
R-101	成長装置		HTSS/Ag	92	
TK-202	酸洗タンク		FRP	30	
Z-301	スライサー	マルチワイヤーソー		150	
Z-302	水洗・乾燥機		TL	20	
	クリーンルーム	500m <sup>2</sup> 、200千円/m <sup>2</sup>		100	
	Ga回収設備	成長装置の10%		9	
機器費小計				501	
土木・建築・据え付け、配管、計装、電気工事等一式				機器費の146%	732
超高压調整費					3,050
合計					4,300

## ② 変動費

GaN 価格の低下の効果が大きかった。さらに結晶を6インチサイズと大型化し、更に反応器を大きくしたことによる量産効果で原料原単位が向上して変動費も低下した。

表 14 アモノサーマル法製造変動費 (10t/年、中間段階技術)

	年間使用量		単 価		GaN単結晶		GaNウェーハー			
					原単位	変動費 [円/kg]	原単位	変動費 [円/枚]		
GaN	11	[t]	800,000	[円/kg]	1.18	[kg/kg]	944,000.0	0.098	[kg/枚]	78,674.9
NH3	1.1	[t]	1,000	[円/kg]	0.11	[kg/kg]	114.0	0.010	[kg/枚]	9.5
種基板	28,728.0	[枚]	100,000	[円/枚]	3.00	[枚/kg]	300,000.0	0.250	[枚/枚]	25,002.6
98%H2SO4	3.2	[t]	20	[円/kg]	0.34	[kg/kg]	6.7	0.000	[m3/枚]	0.0
Pure Water	0	[t]	33.25	[円/t]	0.05	[t/kg]	1.7	0.004	[kg/枚]	0.1
電力	16,183	[MWh]	12.00	[円/kW]	1690.00	[kWh/kg]	20,280.0	140.848	[kWh/枚]	1,690.2
計装Air	958	[Nm3]	4.36	[円/Nm3]	0.10	[Nm3/kg]	0.4	0.008	[m3/枚]	0.0
合計							1,260,000			105,000

## ③ 製造コスト

上記検討の結果、GaN 単結晶製造コストとして約140万円/kg、6インチ基板製造コストとして114千円/枚となった。設備費の減価償却は20%/年とした。

本プロセスにおいては、生産設備の費用と原料 GaN のコスト低減が製造コストに大きな影響を与えることがわかる。

表 15 アモノサーマル法製造コスト (10t/年、中間段階技術)

	GaNプール				6" GaNウェーハー				
			単価				単価		
売上高		19,152	百万円/年	2,000,000	円/kg	19,648	百万円/年	171,000	円/枚
製造量	GaN単結晶	10	t/年		円/kg				
	GaN基板(6インチ)					114,900	枚/年		円/枚
設備費		4,150	百万円			4,300	百万円		
固定費	設備償却費	830,000	千円	867,000	円/kg	860,000	千円/年	7,500	円/枚
	労務費	119,000	千円	12,400	円/kg	119,000	千円/年	1,000	円/枚
	小計			99,100	円/kg			8,500	円/枚
変動費				1,260,000	円/kg			105,000	円/枚
合計				1,360,000	円/kg			114,000	円/枚

(3) 将来技術

① 固定費

中間段階技術と同様に内熱式反応器を採用した。この結果、設備費は相当低下した。なお超高压調整費として別途 3,050 百万円を計上した。

表 16 アモノサーマル法製造設備費 (10t/年、将来技術)

機番	名 称	仕 様	材 質	[百万円]
Z-101	N2ガス供給設備	SUS	SUS	100
R-101	成長装置		HTSS/Ag	92
TK-202	酸洗タンク		FRP	30
Z-301	スライサー	マルチワイヤソー		100
Z-302	水洗・乾燥機		TL	20
	クリーンルーム	500m <sup>2</sup> 、200千円/m <sup>2</sup>		100
	Ga回収設備	成長装置の10%		9
機器費小計				451
土木・建築・据え付け、配管、計装、電気工事等一式		機器費の146%		660
超高压調整費				3,050
合計				4,200

② 変動費

原料の GaN 結晶は 500 千円/kg とコストダウンすると仮定した。同じく種結晶となる 6 インチ GaN 基板は 50 千円/枚とした。これでも他の方法に比較すると原料 GaN の高価格の影響を受けて変動費が大きい。

表 17 アモノサーマル法製造変動費 (10t/年、将来技術)

	年間使用量		単 価		GaN単結晶		GaNウェーハー			
					原単位	変動費 [円/kg]	原単位		変動費 [円/枚]	
GaN	12	[t]	500,000	[円/kg]	1.18	[kg/kg]	590,000.0	0.076	[kg/枚]	38,100.0
NH3	1.1	[t]	1,000	[円/kg]	0.11	[kg/kg]	114.0	0.007	[kg/枚]	7.4
種基板	1,000.0	[枚]	50,000	[円/枚]	0.10	[枚/kg]	5,000.0	0.006	[枚/枚]	322.9
98%H2SO4	3.4	[t]	20	[円/kg]	0.34	[kg/kg]	6.7	0.000	[m <sup>3</sup> /枚]	0.0
Pure Water	1	[t]	33.25	[円/t]	0.05	[t/kg]	1.7	0.003	[kg/枚]	0.1
電力	16,900	[MWh]	12.00	[円/kWh]	1690.00	[kWh/kg]	20,280.0	109.138	[kWh/枚]	1,309.7
計装Air	1,000	[Nm <sup>3</sup> ]	4.36	[円/Nm <sup>3</sup> ]	0.10	[Nm <sup>3</sup> /kg]	0.4	0.006	[m <sup>3</sup> /枚]	0.0
合計							615,000			40,000

③ 製造コスト

上記検討の結果、GaN 単結晶製造コストとして 70 万円/kg、6 インチ基板製造コストとして 46 千円/枚となった。設備費の減価償却は 20%/年とした。

このプロセスは、結晶品質は優れるものの GaN を原料として使用するために変動費が他の製造方法と比較して高いという難点がある。

表 18 アモノサーマル法製造コスト (10t/年、将来技術)

		GaNプール				6" GaNウェーハ			
				単価				単価	
売上高		10,620	百万円/年	1,062,000	円/kg	10,708	百万円/年	69,150	円/枚
製造量	GaN単結晶	10	t/年		円/kg				
	GaN基板(6インチ)					154,850	枚/年		円/枚
設備費		4,100	百万円			4,200	百万円		
固定費	設備償却費	820,000	千円	82,000	円/kg	840,000	千円/年	5,420	円/枚
	労務費	105,000	千円	11,000	円/kg	105,000	千円/年	680	円/枚
	小計			93,000	円/kg			6,100	円/枚
変動費				615,000	円/kg			40,000	円/枚
合計				708,000	円/kg			46,100	円/枚

### 3.6 技術的課題

#### (1) 基礎的技術課題

結晶成長の異方性のために結晶が6角錐となって成長が停止する問題がある。高さ90mmまで成長させられる結晶成長制御技術の確立が課題となる。現在はNH<sub>4</sub>Clなどの添加剤による特定結晶面の成長制御などが検討されている。

更に原料としてGaNを使用するために極めて変動費が大きい。Gaを原料として使用できれば変動費の大幅な低下が見込まれるため、今後の課題と考えられる。

また、成長速度が5-10μm/hrと遅く、低欠陥密度を保ったまま成長速度を上げることが課題となる。

#### (2) 生産技術課題

数千気圧、800℃という過酷な条件で、安全に大量生産が可能な生産設備の開発が最も困難と考えられる。

## 4. フラックス法による GaN 単結晶、基板製造コスト推定

フラックス法はガリウム (Ga) とナトリウム (Na) の熔融物 (混合フラックス) に、加圧下で窒素又はアンモニアをフラックス中に溶解込ませて接触させて、窒化ガリウム (GaN) を析出させる技術である[16]。

本技術の長所としては、低欠陥の結晶が生成するとされている。結晶成長速度は現段階では HVPE 法の 1/5 ではあるが、アモノサーマル法の 4 倍程度で工業化可能な程度の速度を有する[17]。本技術の短所としては、高温 (900°C) 高圧 (3MPa) が必要とされていることである。この程度の条件ならば、技術的には大型設備とすることは可能と思われるが、熔融 Na を用いるので発火の危険性があり、大型設備としての安全性の問題がある。また、Na フラックス中で一部または全部、種結晶が溶解する (メルトバック) ので、メルトバックを防ぐために温度設定、表面保護など対策が必要となる。またマクロステップと言われる異常結晶成長による結晶品質の劣化が生じやすいためこの対策も必要となる[17]。

### 4.1 化学反応

フラックス法は以下の化学反応式により、高温で Na 中に溶解している Ga と、同じく Na-Ga 融液中に溶解している N<sub>2</sub> から GaN を生成する。



上記のように熱力学的には生成自由エネルギーが正であり、有利な反応とは言えない。成長温度は低いほど、N<sub>2</sub> 圧力は高いほど GaN は生成しやすい。熱力学的平衡計算からは、より低温の 1050K、N<sub>2</sub> 圧力 50 気圧で 100%GaN となる。

フラックス法の長所としては、他の方法に比べて結晶欠陥が少なく結晶の品質が優れていること、成長条件が比較的マイルドであること、結晶成長速度も適度な速度があることが挙げられる。

### 4.2 原料

原料としては金属 Ga、N<sub>2</sub> ガス、また溶媒として Na が用いられる。原料が元素で入手が容易な点、価格的にも安いことが他の結晶成長法と比較して有利である。

### 4.3 プロセス

#### (1) GaN 製造 (図 7)

##### ① 製造条件

結晶成長温度は 860°C (800-1000°C)、30 気圧の熔融 Na を溶媒として Ga と N<sub>2</sub> の反応を行う。溶媒としては、Li、K などとも使用可能とされている。結晶成長の効率上、N<sub>2</sub> の溶解度を高くするためには、モル比で Ga:N<sub>2</sub>=1:5 程度にすることが好ましいことが分かっている。N<sub>2</sub> は外部から反応器中に圧入する。およそのマテリアルバランスは図 7 のようになっている。

##### ② 結晶成長制御

結晶の成長速度は現行 50 μm/hr 程度だが、これを更にあげることは可能である。もっとも結晶成長速度が速くなると、媒体の融液を結晶中に取り込むインクルージョンが生じるため好ましくない。

GaN は種結晶の上に成長する。GaN は 0001 の成長用基板を用いると HVPE、アモノサーマル法の場合と同じく、晶癖の関係で約 60° の角度で面積が減少する。このため現在よく用いられている GaN/サファイアでは、GaN を格子配置に島状に残してエッチングしたものを利用する。そうすると種結晶の GaN 上に成長した GaN が互いに重なって成長するために、面積の減少が緩和され、結晶欠陥も減少する。

欠陥密度の低減のために添加剤が利用される。特に炭素を若干混合する (0.01-2mol%)。炭素は触媒的に作用し、成長した GaN にはほとんど取り込まれない[17,18]。結晶成長速度は、40 μ m/hr 程度である[19, 20]。

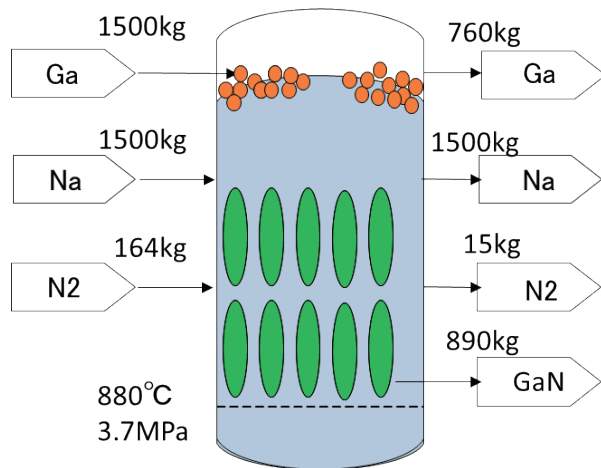


図 7 フラックス法プロセス図

### ③ 収率

現在の 1 バッチあたりの GaN の Ga 基準収率は 50%程度と言われ、最大 80%程度の実績もあるという。原理的には Na-Ga 融液の再使用は可能であり、Ga 基準収率は変動費基準では 90%程度と仮定してもよさそうである。

### ④ 反応設備

フラックス用のるつぼとしてはアルミナ、イットリア、YAG があげられる[18,19]。圧力容器はステンレス製で、その内部に反応容器とヒーターを有している。反応容器はステンレス製でその内部にるつぼを有している。るつぼは融液濃度を均一とするために回転可能で Na 蒸発を抑制するために蓋付きが良い[18]。

### ⑤ コスト計算前提条件

今回、現状技術では、結晶成長高さは 5 mm くらいであるが、まだ量産コストを推算するにはデータが不十分であるため、現状技術によるコスト推定は行わなかった。

将来的には成長容器サイズを内径 50cm、長さ 9m、成長領域を 6m とし、6 インチ基板を 84 枚/台、結晶高さ 100 mm まで技術改良で成長可能となると仮定した。成長速度は 100 μ m/hr とした。

GaN の m 面を成長用基板として用いるホモエピタキシャルが結晶の品質上好ましいとされている。

### ⑥ 本方法の問題点

本件技術は熔融 Na を溶媒に用いる点、また常に Na を熔融状態で取り扱うため、安全性の点に相当の注意が必要であり、安全対策に費用が掛かると考えられる。本件では反応器につき、材料重量価格の 100 倍とし、それに安全対策として 30 倍、最後の設備費合計に安全対策として現状は 3 倍、将来技術では同額を加えたが、これで十分かどうかは不明である。

## 4.4 基板化

マルチワイヤーソーを用いて基板にスライスする。マルチワイヤーソーには φ 6 インチ、100 mm の単結晶を 3 個、直列にセットして、基板厚み 350 μ m、カーフロス 200 μ m で、1 バッチで 540



枚を切り出せると仮定。切断速度は0.05 mm/分とした。

以上の前提条件でコスト試算をした。

#### 4.5 コスト試算結果

##### (1) 現状技術による単結晶製造コスト

現在、ラボで基礎研究を行っている段階であり、現行の技術をベースにして10t/年の設備を考えるための情報が不足しているためコスト試算は行わなかった。

##### (2) 将来技術

###### ① 設備費

反応条件は800℃、30-50気圧であり、それほど過酷な条件とは言えないため、設備機器費用はあまりかからないようにも思える。しかし大量の溶融Naを常時プロセス内で安全に扱うためには相当の安全対策が必要と考えられる。このため本検討では材料ステンレスの価格(330円/kg)の100倍を反応容器価格とし、更にこれに30倍して反応装置価格とした。更に全体設備に対して機器費の100%をシステム安全対策として計上した。

表19 フラックス法製造設備費(10t/年、将来技術)

機番	名 称	仕 様	材質	[百万円]
Z-101	N2ガス供給設備	SUS	SUS	100
R-101A/B	成長装置		SUS/alumina	930
TK-101A/B	Na-Gaタンク	2m3、2基	SUS	40
TK-202	酸洗タンク		FRP	30
Z-301	スライサー	マルチワイヤーソー		150
Z-302	水洗・乾燥機		TL	20
	建屋	1000m2、100千円/m2		100
機器費小計				1,370
土木・建築・据え付け、配管、計装、電気工事等一式		機器費の146%		2,000
ナトリウム対策		総額の100%		3,200
合計				6,600

###### ② 変動費

フラックス法プロセスは溶融Na+Gaを循環して使用可能とするとGaの原単位が非常によくなる可能性があり、変動費が低いという特徴がある。

表20 フラックス法製造変動費(10t/年、将来技術)

	年間使用量		単 価		GaN単結晶		GaNウェーハー			
					原単位	変動費 [円/kg]	原単位		変動費 [円/枚]	
Ga	10	[t]	140,000	[円/kg]	0.91	[kg/kg]	127,596	0.055	[kg/枚]	7,749
Na	0.3	[t]	1,000	[円/kg]	0.03	[kg/kg]	33	0.002	[kg/枚]	2
種基板	958.0	[枚]	2,000	[円/枚]	0.09	[枚/kg]	184	0.006	[枚/枚]	11
N2	14	[Nm3]	14	[円/m3]	0.00	[m3/kg]	0	0.000	[m3/枚]	0
Pure Water	1	[t]	33.25	[円/t]	0.05	[t/kg]	2	0.003	[kg/枚]	0
電力	19,017	[MWh]	12.00	[円/kWh]	1806.58	[kWh/kg]	21,679	179,709	[kWh/枚]	1,317
アルミナ管	11	[t]	20,000	[円/kg]	1	[kg/kg]	20,000	0.061	[kg/枚]	1,215
計装Air	1,053	[Nm3]	4.36	[円/Nm3]	0.10	[Nm3/kg]	0.0	0.006	[m3/枚]	0
合計							169,000			10,300



③ 製造コスト

下表のように GaN 単結晶製造コストとして 30 万円/kg、6 インチ基板製造コストとして 18 千円/枚となった。

表 21 フラックス法製造コスト (10t/年、将来技術)

		GaNブール				6" GaNウェーハ			
		10t/年		単価				単価	
売上高		4,473	百万円/年	430,000	円/kg	4,715	百万円/年	27,200	円/枚
製造量	GaN単結晶	10	t/年	430,000	円/kg				
	GaN基板(6インチ)					173,336	枚/年		円/枚
設備費		6,450	百万円			6,600	百万円		
固定費	設備償却費	1,290,000	千円	124,000	円/kg	1,320,000	千円/年	7,600	円/枚
	労務費	112,000	千円	11,000	円/kg	112,000	千円/年	600	円/枚
	小計			135,000	円/kg			8,200	円/枚
変動費				169,000	円/kg			10,300	円/枚
合計				304,000	円/kg			18,500	円/枚

4.6 技術的課題

(1) 基礎的技術課題

結晶成長の異方性のために結晶が六角錐となって成長が停止する問題がある。高さ 100 mmまで成長させられる結晶成長制御技術の確立が課題である。現在は C などの添加剤による特定結晶面の成長抑制などが検討されている。

(2) 生産技術課題

常に 200°C 程度の大量の溶融 Na+Ga をプロセス中で移送、ろ過、貯蔵の必要があり、安全に取り扱う技術の確立が最大の課題となる。

## 5. まとめ

以上から、各結晶成長法の現状技術および課題解決時の将来技術についてのまとめを下表に示す。

表 22 各結晶成長法の現状技術および将来技術の比較

各種結晶成長法	HVPE 法		アモノサーマル法		フラックス法	
	現状	課題解決時	現状	課題解決時	現状	課題解決時
成長温度(°C)	1060	1060	600	750	870	870
反応圧力(Mpa)	0.1	0.1	200	100	3	3
バッチ時間(hr)	16.7	111.1	600	1200	200	1000
成長速度 ( $\mu\text{m/hr}$ )	300	450	5	75	50	100
最終結晶高さ (mm)	5	50	3	90	10	100
結晶重量(kg)	0.6	5.6	0.3	10.1	0.25	11.2
バッチサイズ (kg-GaN)	0.6	28	3	650	1	890
欠陥密度	$10^6\text{cm}^{-2}$	$10^4\text{cm}^{-2}$	$10^4\text{cm}^{-2}$	$10^4\text{cm}^{-2}$	$<10^6\text{cm}^{-2}$	$10^4\text{cm}^{-2}$
原料	Ga	Ga	GaN	GaN	Ga	Ga
種結晶基板	GaN/サファイア	GaN/サファイア	GaN	GaN	GaN/サファイア	GaN
基板サイズ	4 インチ	6 インチ	4 インチ	6 インチ	2 インチ	6 インチ
基板装荷数/B	1	5	100	100		1000
GaN 結晶収率 (Ga 基準)	5%	16%	17%	67%	50%	59%
特記		GaN デブリが 単結晶と同量		アンモニア溶 解分がロス		Ga+Na 融液 で再使用
Ga 収率(変動費)	5%	33%	20%	90%	?	90%
反応器材質	石英 /SUS304	石英 /SUS304	インコネル	HITEN980	SUS304	SUS304
ライニング	なし	なし	Pt	Ag	アルミナ	アルミナ
反応器長さ(m)		2		20		9

更に、各結晶成長法のそれぞれの技術的課題がほぼクリアされた時点での推定製造コストを下表に示す。技術進歩の内容は表中に記載した。生産量としては年間 10t を想定した。これは 6 インチ基板にして年間 16 万枚程度の規模である。

生産技術としての課題をクリアするために相当の進歩を見込んでいるが、いずれの方法でも、6 インチ基板として数万円程度までは達成可能と考えられる。

実際には現状技術レベルで 10t 製造することは困難であるが、比較のために、製造可能と仮定し、収率も実験室レベルでの高い数値を採用して、製造コストも HVPE 法、アモノサーマル法について試算して示した。いずれの場合も基板 1 枚 10 万円を超え、これを用いた製品の競争力はかなり弱いと推定される。フラックス法は現状量産コストを試算するデータが得られていないので除いた。

現状技術レベルからは、量産にいちばん近いのは HVPE 法と考えられる。アモノサーマル法は 1000 気圧、750°C の製造条件の改善が、フラックス法では溶融 Na をトン単位で輸送貯蔵する技術の確立が課題と考えられる。

表 23 各種結晶成長法による GaN 単結晶の推定製造コスト  
(6 インチ基板用、現状技術と課題解決後の技術)

	HVPE法	アモノサーマル法	フランク法
現在技術による製造コスト (円/kg)	4,200,000	5,600,000	現状でデータ不足
(変動費: 円/kg)	380,000	3,840,000	
(固定費: 円/kg)	3,820,000	1,730,000	
結晶成長速度 ( $\mu$ /hr)	300	5	5
結晶高さ (mm)	5	3	1.5
Ga収率 (%)	16	85%	95
一定の技術進歩を見込んだ製造コスト (円/kg)	480,000	710,000	300,000
(変動費: 円/kg)	90,000	620,000	170,000
(固定費: 円/kg)	390,000	90,000	130,000
技術進歩の内容	HVPE装置に5枚基板設置と結晶成長高さが5mmから50mm	結晶成長高さが3mmから90mm	結晶成長高さが10mmから100mm
結晶成長速度 ( $\mu$ /hr)	450	75	100
結晶高さ (mm)	50	90	100
Ga収率 (単結晶段階)	33%	85%	90%
Ga収率 (基板段階)	14%		
製造設備費	190億円	41億円	64億円
更なるコストダウンにつながる技術進歩の可能性	結晶成長速度の向上 (300 $\mu$ /hrから450 $\mu$ /hrへ大口径化)、Ga収率アップ	低圧化、安価GaN	結晶成長速度の向上 (100 $\mu$ /hrへ大口径化)、熔融Na取扱い設備の見直し

表 24 GaN 6 インチ基板推定製造コスト  
(現状技術と課題解決後の技術)

	HVPE法*1	アモノサーマル法*2	フランク法
現在技術による製造コスト (円/枚)	452,000	248,000	現状データ不足
(変動費: 円/枚)	41,000	176,000	
(固定費: 円/枚)	411,000	72,000	
結晶成長速度 ( $\mu$ /hr)	300	5	15
結晶高さ (mm)	5	3	5.0
Ga収率 (%)	16	85%	90
一定の技術進歩を見込んだ製造コスト (円/枚)	31,000	46,000	18,000
(変動費: 円/枚)	6,000	40,000	10,000
(固定費: 円/枚)	25,000	6,000	8,000
技術進歩の内容	HVPE装置に5枚基板設置と結晶成長高さ50mm	成長速度が75 $\mu$ /hr、結晶成長高さが90mm	成長速度が100 $\mu$ /hr、結晶成長高さが100mm
結晶成長速度 ( $\mu$ /hr)	450	75	100
結晶高さ (mm)	50	90	100
Ga収率 (単結晶段階)	33%	85%	90%
Ga収率 (基板段階)	20%	53%	56%
製造設備費	190億円	42億円	66億円
更なるコストダウンにつながる技術進歩の可能性	結晶成長速度の向上 (300 $\mu$ /hrから450 $\mu$ /hrへ大口径化)、Ga収率アップ	低圧化、安価GaN	結晶成長速度の向上 (100 $\mu$ /hrへ大口径化)、熔融Na取扱い設備の見直し

\*1 現状技術は4インチ

\*2 現状技術は2インチ

## 6. 政策立案のための提案

1. 将来的な単結晶製造コストは、HVPE 法で 48 万円/kg、アモノサーマル法で 71 万円/kg、フラックス法で 30 万円/kg と推定され、6 インチ基板としては表 24 のような結果となった。これから、どの方法を採用しても目標とされる 1 インチ 1 万円をクリアできる可能性があることがわかった。
2. この目標に到達するためには、基礎研究レベルでは、共通の課題として GaN 結晶成長時約 60 度の角度で角錐型に結晶が成長して面積が減少し、必要結晶面積が確保できない傾向(晶癖)が強く、結晶高さが得られにくい点があげられる。また種結晶と成長させる GaN 結晶の格子間隔のずれ(不純物などによる)から生じる結晶の反りも大きな結晶が得られない問題となっている。個別技術では HVPE 法では欠陥密度の低減と良好な基板の確保、アモノサーマル法では成長速度向上と不純物(特に酸素)の低減、フラックス法では Na インクルージョンの防止などが課題と考えられる。
3. 量産化技術の観点からは HVPE 法では原料ガスの製品転換率の向上が、アモノサーマル法は 700°C、1000 気圧の反応条件を安全に達成する大型反応設備の製作可能性が、フラックス法では空気と接触すると発火する溶融 Na を数 t の規模で、常に安全に取り扱える設備、技術の確立(Na が漏れない設備、漏れた場合の対応設備など)が課題と考えられる。
4. 今回取り上げた 3 方法の長所を生かす試みとして、たとえばアモノサーマル法やフラックス法で製造した結晶性の高い(欠陥の少ない)基板の上に高速かつ高純度な成長が可能な HVPE 法で結晶成長させる方法などのアイデアが出されているが、今後の検討項目と考える。
5. 中間段階技術評価により、結晶サイズ(結晶成長高さ)が現行のままであっても、量産技術が完成し、歩留まりも高ければ、6 インチ基板で 7-11 万円/枚程度の製造コスト達成が可能と推定された。
6. 6 インチ基板で 15 万枚/年程度に相当する単結晶製造設備(10t/年)の建設費は 50-200 億円程度と推定される。当該研究に対する研究投資の目安としては、この設備投資額に本件技術の波及効果を加味して考慮されたものが妥当と考えられる。

## 参考文献

- [1] 特開 2013-155108 号公報
- [2] 特開 2016-160151 号公報
- [3] 特開 2014-043388 号公報
- [4] K. Fujito et al., J. Cryst. Growth 311, 3011-14 (2009)
- [5] J. A. Freitas, Jr., et al., Cryst. Growth Des. 15, 4837-42 (2015)
- [6] ヒアリング(東京農工大、村上研究室)
- [7] R. Dwilinski, et. al, ACTA PHYSICA POLONICA A, vol.88[5], 833-36 (1995)
- [8] 特許第 4229624 号
- [9] 特開 2016-121064 号公報
- [10] 特表 2003-511326 号公報
- [11] 特表 2007-509507 号公報
- [12] ヒアリング(東北大、秩父研究室)
- [13] 特開 2016-222540 号公報
- [14] W. Jiang, et. al, J. Cryst. Growth 403, 18-21 (2014)
- [15] S. Pimputkar, et. al, J. Cryst. Growth 403, 7-17 (2014)
- [16] H. Yamane, et. al, Chemical Materials 9, 413 (1997)

- [17] ヒアリング (大阪大、森研究室)
- [18] 特開 2016-108185 号公報
- [19] 特開 2011-136898 号公報
- [20] Y. Mori et. al, J. Cryst. Growth 350, 72-4 (2012)

---

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

**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 (Vol.2)**  
－ GaN 結晶と基板製造コスト－

平成 30 年 2 月

**Technological Issues and Future Prospects of GaN and  
Related Semiconductor Devices (Vol.2):  
Manufacturing Costs of GaN Crystals and Substrates  
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,  
2018.2**

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 主任研究員 三枝 邦夫 (Kunio SAEGUSA)  
上席研究員 岩崎 博 (Hiroshi IWASAKI)  
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/>

© 2018 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。

---