

財団法人新機能素子研究開発協会委託調査

GaNパワー用結晶材料・デバイスに関する技術調査

報告書(要約)

平成19年3月30日

株式会社 旭リサーチセンター

東京都千代田区内幸町1-1-1

帝国ホテルタワー17階

Tel 03 - 3507 - 2406 (代)

目 次

1. 目的.....	1
2. 高速・パワーデバイス用半導体の特性比較.....	2
2. 1 半導体材料の基本特性比較.....	2
2. 2 ワイドバンドギャップ半導体の特徴.....	2
2. 3 高速・パワーデバイスとしての性能指数.....	3
3. パワーデバイス応用分野の技術及び市場動向.....	6
3. 1 パワーデバイスの種類と変遷.....	6
3. 2 パワーデバイスの市場の現状と市場予測.....	7
4. GaN結晶材料の製法と特性.....	9
4. 1 製法と結晶特性.....	9
4. 2 薄膜成長技術.....	11
4. 3 GaNデバイス及び基板の市場とコスト.....	12
4. 4 世界のGaN基板の開発及び製造拠点.....	15
5. GaNデバイスの技術動向.....	18
5. 1 GaNデバイスの開発動向.....	18
i) GaN HFET.....	18
ii) MOS型デバイス.....	21
iii) 縦型デバイス.....	21
iv) 無極性面デバイス.....	21
5. 2 GaNデバイスの技術課題、方向性.....	22
i) GaN HFETデバイスの技術課題、方向性.....	22
ii) GaN MOS型デバイス、縦型デバイス開発の技術課題、方向性.....	24
6. まとめ.....	27

1. 目的

ワイドバンドギャップ(WBG)半導体では、耐電圧、低オン抵抗（低損失）、高温動作など物性的な特長からシリコン半導体の性能を超えるデバイスの実現が期待される。SiC 半導体デバイスは、省エネルギーデバイスとして、ショットキーバリアダイオード（SBD）、電界効果トランジスタ（FET）、インバータが期待されており、一部は製品化されている。

WBG 半導体として、物性の上で SiC と相拮抗した特長を持つ、GaN 半導体素子は、光学応用としては既に青色発光素子が製品化され、電子デバイス応用としては情報通信基地局に用いられる高周波高出力素子（HEMT）が実用化された。

GaN 電子デバイスは、高周波特性については SiC 以上の性能を有するが、高パワー化についても期待が大きい。そのため、GaN パワーデバイスの基本的な研究開発がここ 2～3 年盛んになり、高性能化の可能性を示唆する結果が次々と発表されている。本技術調査は、パワーデバイスとしての GaN デバイスの可能性と材料及びデバイスの開発課題、方向性を見極めるための知見を得ることを目的とする。

2 . 高速・パワーデバイス用半導体の特性比較

2 . 1 半導体材料の基本特性比較

表 2.1-1 に、ワイドバンドギャップ半導体、Si、GaAs、InP の基本物性一覧表を載せる。ワイドバンドギャップ半導体である、SiC、および GaN、AlN は、広いバンドギャップをもち、絶縁破壊電圧が非常に高い。IV族のワイドバンドギャップ半導体である SiC は、P型の半導体の生成が比較的簡単に得られることもあり、90年代初め頃より、高速・高耐压のデバイスとして研究開発が進められてきた。

III-V族窒化物半導体である GaN、AlN は直接遷移のバンドギャップ構造を持っている。バンドギャップは、GaN が 3.4[eV]、AlN が 6.1[eV]であり、これを光の波長に換算すると、365[nm]、203[nm]であり、それぞれ青色光と紫外光に相当する。

表 2.1-1 ワイドバンドギャップ半導体、Si、GaAs、InP の基本物性一覧表

			Si	GaAs	InP	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC	h-GaN	AlN
バンドギャップ	Eg	[eV]	1.1	1.4	1.3	2.2	3	3.26	3.39	6.1
バンドタイプ	-	-	I	D	D	I	I	D	D	D
比誘電率			11.8	12.8	12.4	9.6	9.7	10	9	8.7
電子移動度	μ_n	[cm ² /V s]	1350	8500	5400	900	370	720	900	1100
絶縁破壊電圧	Ec	[10 ⁶ V/cm]	0.3	0.4	0.5	1.2	2.4	2	3.3	11.7
電子飽和速度	sat	[10 ⁷ cm/s]	1	2	2.5	2	2	2	2.5	1.8
熱伝導度		[W/cm K]	1.5	0.5	0.7	4.5	4.5	4.5	1.3	2.5

現在、GaN は、青色～紫外光の LED (Light Emitting Diode)、LD(Laser Diode)等の材料として実用化されている。一方 SiC は、高速・パワーデバイスとして、幾つかの市販品も出ており、実用化直前にある。表 2.1-1 を見る限りでは、熱伝導度を除いて GaN のほうが高い値を示しており、放熱が問題となる用途 (大電流のスイッチング等) 以外では、GaN は、高速・パワーデバイスとして高いポテンシャルを持っていると思われる。

2 . 2 ワイドバンドギャップ半導体の特徴

ワイドバンドギャップ半導体 (WBS) と Si で同じ耐压のデバイスを作ることを考える。デバイスの耐压はドリフト層の長さ (WD) と絶縁破壊電界の積で表される。

耐压が同じであれば、絶縁破壊電圧 (Ec) が大きいほうがドリフト層の長さ (WD) を短くできる。WBS において絶縁破壊電圧は Si より 10 倍程度高いため、ドリフト層の長さを

およそ 1/10 にすることができる。不純物濃度は絶対破壊電界の 2 乗に比例するため WGS では、Si と比べ約 100 倍に高くすることができる。これらより同じ耐圧であれば、WBS のオン抵抗（通電時の抵抗）RON は、Si と比較して約 1/1000 にすることができる。

高速性を表す指標として、遮断周波数 ft という指標がある。遮断周波数はデバイスの電流利得が 1 となる周波数であり、デバイス的高速応答性を表す。この遮断周波数は、ドリフト層の長さの逆数に比例し、ドリフト層を Si の 1/10 に設定できる WBS では、Si より 1 桁高い周波数で使うことが可能である。

以上のように、WBS では、Si と比較して、オン抵抗が低く、高速性に優れたデバイスが得られる可能性がある。

2.3 高速・パワーデバイスとしての性能指数

高速・パワーデバイスとしては、電子移動度、絶縁破壊電圧、電子飽和速度等が重要なパラメータであり、これらを比較する。半導体材料の高速・パワーデバイスとしての特性を表す指標として、遮断周波数 (ft)、Jhonson の FOM (Figure of Merit)、Keyer の FOM、Baliga の FOM 等がある。これら指標の一覧を表 2.3-1 にまとめる。

表 2.3-1 高速・パワーデバイスとしての性能指数

指標	算出式		指標の内容
Jhonson s figure of Merit	$\frac{E_c \cdot v_{sat}}{2\pi}$	絶縁破壊電圧と飽和電子速度の積	高周波/ハイパワーのデバイスに対しての性能指数
Keyes s figure of Merit	$\kappa \sqrt{\frac{v_{sat}}{\epsilon}}$	熱伝導率と電子飽和速度の平方根の積	大電流スイッチングのデバイスに関する性能指数
Baliga s figure of Merit 1	$\epsilon \mu_n E_c^3$	誘電率、移動度、絶縁破壊電界の 3 乗の積	ハイパワーのスイッチングデバイスに関する性能指数
Baliga s figure of Merit 2	$\mu_n E_c^2$	移動度、絶縁破壊電圧の 2 乗の積	高速・ハイパワーのスイッチングデバイスに関する性能指数
遮断周波数 (ft) (MOS 型デバイス)	$\frac{v_{sat}}{2\pi}$	電流利得が 1 となる周波数	デバイス的高速応答性を表す指数

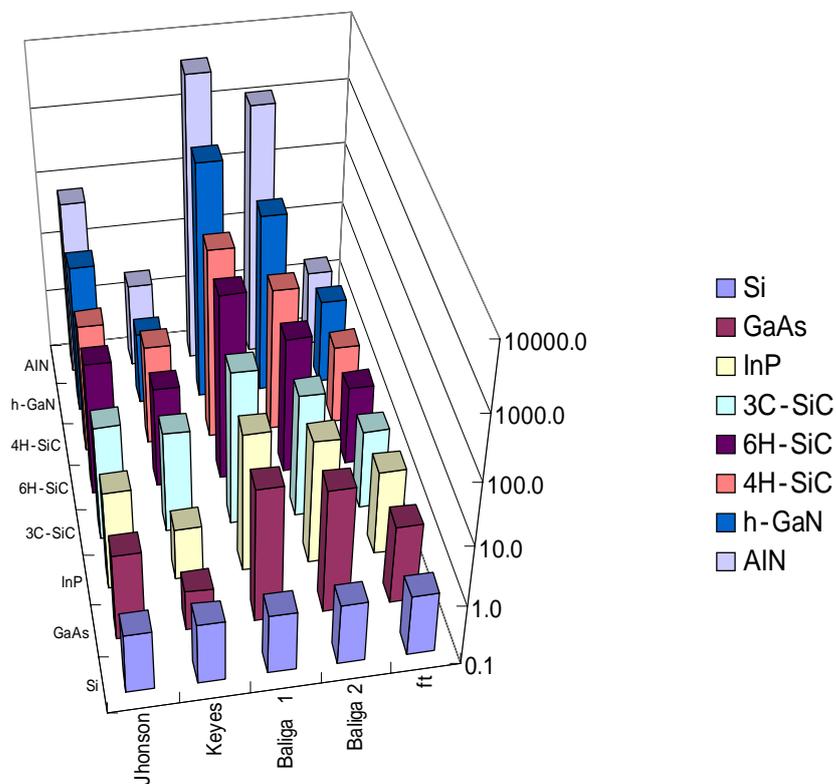


図 2.3-1 ワイドバンドギャップ半導体材料の性能指数

以上の遮断周波数と、Jhonson、Keyer、Baliga の FOM を表 2.1-1 に掲げた半導体材料について計算した結果を図 2.3-1 に載せる。各性能指数は、シリコンを基準にして計算したものである。

これらの性能指数での比較では、

- ・高周波・ハイパワーのデバイスの性能指数を表す Jhonson's FOM では

$$\text{AlN} > \text{GaN} > \text{SiC}$$

- ・大電流・高速スイッチングのデバイスに関しての性能指数を表す、Keyer's FOM では、

$$\text{SiC} > \text{AlN} > \text{GaN}$$

- ・低周波・ハイパワーのスイッチングデバイスに関しての性能指数、

Baliga's FOM では、

$$\text{AlN} > \text{GaN} > \text{SiC}$$

高周波・ハイパワーのスイッチングデバイスに関する性能指数を示す

Baliga's FOM(2)では、

$$\text{AlN} > \text{GaN} > \text{SiC}$$

となり、熱伝導性を考慮に入れる、大電流・高速スイッチングのデバイスに関する性能指数を表す、Keyer's FOM を除いては、AlN、GaN が SiC よりも高い性能を示すことが示唆される。

また遮断周波数の予想特性では、

$$\text{InP} \sim \text{GaN} > \text{GaAs} \sim \text{SiC} > \text{AlN}$$

となっている。GaN は基本物性から見ると、高速・ハイパワー・高周波と、広い範囲をカバーするデバイスが実現できる期待がある。

3 . パワーデバイス応用分野の技術及び市場動向

3 . 1 パワーデバイスの種類と変遷

1960年代、サイリスタの登場がパワーデバイス、パワーエレクトロニクスの発端であった。1970年代後半に制御可能な素子としてバイポーラ・トランジスタとゲート・ターンオフ・サイリスタ (**Gate Turn-Off Thyristor: GTO Thyristor**) が開発され、1970年代のオイルショックをきっかけにインバータ装置に最適なデバイスとして市場投入が始まり、パワーエレクトロニクス応用の重要な部品として注目が高まった。1970年代にはパワーMOSFETの登場により、特に低耐圧(200V以下)を要求する応用分野で、小型で高効率のパワーエレクトロニクスのシステム設計ができるようになった。高性能化や高信頼性を実現するため、二重拡散型MOS (**Double Diffused Metal-Oxide-Semiconductor :DMOS**) 技術やトレンチゲート(溝形成のゲート)構造技術が開発された。1980年代後半から1990年代前半に、バイポーラ・トランジスタとMOSFETの原理を組み合わせたMOSゲート構造型の新しいパワーデバイスの研究が始まり、その結果、絶縁ゲート型バイポーラ・トランジスタ (**Insulated Gate Bipolar Transistor :IGBT**) が生まれ、パワーエレクトロニクス技術のキーデバイスとして注目を集めた。IGBTはパワーMOSFETと同様の絶縁ゲート構造の特長と、バイポーラ・トランジスタと同様の導電率変調原理による低オン電圧の効果を併せ持ち、特に中容量パワーエレクトロニクス機器の高周波化応用に対応できる素子として使われている。現在、IGBTを使用したインバータ装置は、高性能化・小型化・低コスト化が進み、インバータ家電から産業用機器、電気自動車、電車に至るさまざまな分野に応用されている。

また1990年代には、横型構造のMOSFETである、LDMOS (**Lateral Diffused Metal-Oxide-Semiconductor**) が開発され、高周波用パワーアンプとして使われるようになった。ディープトレンチ、SOI (**Silicon On Insulator**) といった技術により、パワーデバイス、Bipolar、CMOS等を隣に形成することができるようになり、パワー素子と、制御素子が同一チップ上にあるインテリジェントパワーモジュール (**IPM : Intelligent Power Module**) が作られるようになっている。

3.2 パワーデバイスの市場の現状と市場予測

表 3.3-1 に現在市場に出ているパワーデバイスの一覧を示す。3.2において、パワーデバイスの種類と動作原理について概説したが、それらのデバイスの動作容量、動作周波数の範囲と用途について概要を、図 3.3-1 に表す。

表 3.3-1 パワーデバイス一覧

Power Device	Discretes	Power MOS	LDMOS
			DMOS
		IGBT	
		BJTs	
		Thyristors	SRC, TRIAC, DIAC, MTO, MCT
		GTO	
		Rectifiers	Shottky Diodes Rectifier Diodes (PN Diode)
	IPM (Intelligent Power Module)	Voltage Regulator	
		Amplifier IC	
		Comparator IC	

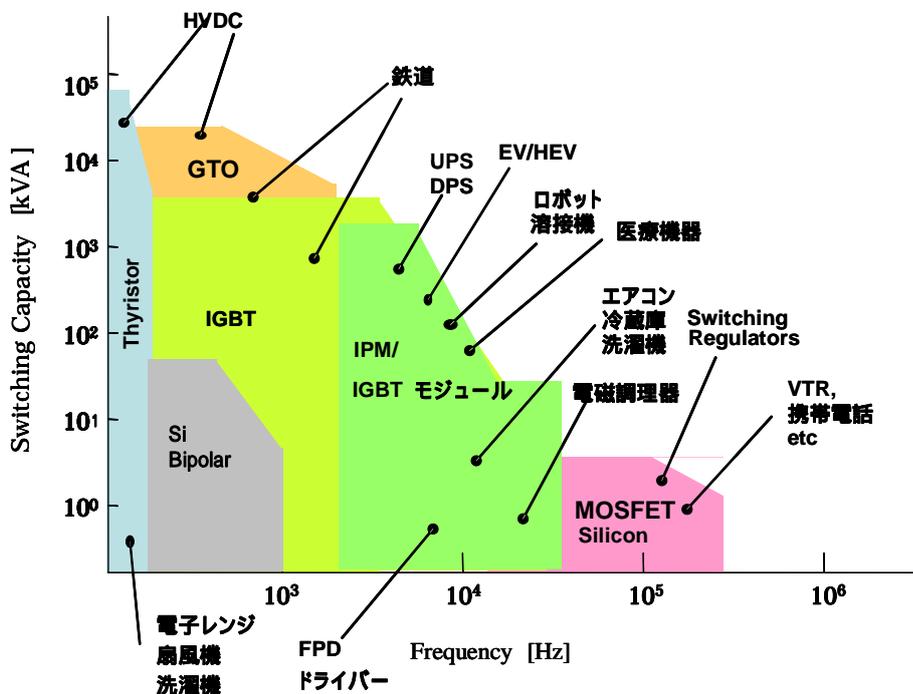


図 3.3-1 パワーデバイスの動作範囲と用途

ディスクリートパワーデバイスの 2005 年の W/W 市場規模はおよそ 110 億ドル（～1 兆 3500 億円 /1\$=120 円換算）である。Power MOSFET が約 40 億ドル、BJTs、Rectifiers が各々約 30 億ドル、Thyristors が約 9 億ドル、IGBTs が約 8 億ドルとなっている。

ディスクリート市場として最も大きい MOSFET とその次の BJTs については、通信と家電用途が大きく合わせて 60%を占めている。IGBT については、自動車もしくは産業用となっている。

2005 年の半導体デバイスの市場は約 2100 億ドルである。パワーデバイスは約 220 億ドルであるから、半導体市場の中でパワーデバイスは約 10%を占める市場である。パワーデバイスの市場として今後成長が見込まれるのは、IPM (Intelligent Power Module) であり、ディスクリートは若干の伸びの予想である。IPM の成長のけん引役は、プラズマ、液晶などの FPD 用の駆動ドライバーである。ディスクリートは、MOS、IGBT 等がモジュールに組み込まれ、白物家電、情報携帯機器（電源）等で使われるものが伸びると思われる。

4 . GaN 結晶材料の製法と特性

4 . 1 製法と結晶特性

GaN 単結晶の製法には、

- GaN の Bulk 単結晶基板を直接製造する方法
- サファイア等の基板の上に GaN 単結晶を成長させ後に基板を除去し、GaN の（疑似的）Bulk 単結晶を得る方法
- サファイア等の基板の上に GaN を成長させ基板をそのまま残して、テンプレートとしてデバイス製造用途に供する方法

がある。

現在 GaN 単結晶の製法として検討されている、高温高压合成法、HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) 法、Na フラックス法、アモノサーマル結晶成長法、GVT (Ga Vapor Transport) 法について、表 4.1-1 にまとめる

表 4.1-1 GaN 単結晶の製法

製法	概要	状況
高温高压合成法	1500 、1万気圧以上の圧力下の Ga 融液に窒素を溶解し、液中に GaN 単結晶を成長させる方法生成する GaN 結晶の転位密度が 1cm ² 当たり 100 個以下と低いことであるが、一方、大結晶を得ることが困難	高品質の GaN 結晶が得られるため、実用化に対しては装置の改善、成長速度の向上などの取り組みが続けられていくと思われる
HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) 法	Cl ガスと金属 Ga を高温化で反応させることにより生成した GaCl ガスが NH ₃ と反応することで GaN 結晶がサファイア等の基板上で成長	HVPE 法は GaN 基板作成の主流となっている技術。課題は、反り、転位の制御、副生成物として NH ₄ Cl の生成、高コスト。
Na フラックス法	Na フラックス法は高温高压法に類似した方法で、Ga - Na 混合融液に窒素を溶解することにより GaN 単結晶を成長させるもの。 2 インチ径で転位密度 10 ⁴ cm ⁻² レベルの結晶が得られている。	高品質かつ低コストで GaN 基板が作れるとしている。Na フラックス法では下地基板の転位が集まるように成長するため、他の方法と比べて、転位が少ない GaN 結晶が容易に得られる。Na フラックス法は今後基板の量産性等についての検討・改善が図られていくと思われる
モノサーマル結晶成長法	GaN は非常に安定な物質であり、常圧領域では溶解度が大きい溶媒は見つからないが、超臨界状態(臨界点: 374 、217.6 気圧)のアモニアにはよく溶解するので、GaN 単結晶成長法として利用できる	原理的には大型 GaN 単結晶成長法として有望であると考えられ、今後低転位化、成長速度の向上等課題解決に向け改良・改善の検討が進められていくと思われる
GVT (Ga Vapor Transport) 法	昇華法では、Ga 源としては粉体 GaN または液体 Ga が使われ、窒素源としてはアモニアが使われる。昇華法は結晶成長速度が大きい、粉体 Ga をプリカーサーとして使用する場合には、GaN が液体 Ga と分子状窒素に分解しやすく、また粉体 GaN は高純度を要求される。	GaN 結晶成長の例は少なく、課題等はまだ良く見えていないところがある。成長速度、得られた結晶の質から見ると、今後の開発によっては有力な GaN 基板結晶材料の製法となる可能性がある

参照文献：

*1：「高周波半導体材料・デバイスの新展開」シーエムシー出版、2006年11月

*2：「Substrates for GaN-Based Devices」 Strategies Unlimited

4.2 薄膜成長技術

i) MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy)

MOVPE 法は 1970 年代に化合物半導体の薄膜成長技術として提案され、1980 年代から工業用に利用されている。原料ガスとして、TMGa (Tori Methyl Garium) や TEGa (Tori Ethyl Garium) などの有機系金属を使用することからこの名称で呼ばれる。Si ベースの半導体製造技術として使用されている MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) と類似した方法であり、同じく化学反応による結晶成長である。操作圧力は 0.05~1 気圧で、温度は 900~1100℃であり、MBE (Molecular Beam Epitaxy) 法に比べて 100 程度高い。一般には、高温にした方が酸素などの混入が少なくなるので、不純物を嫌う光デバイス用材料では、電子デバイス用に比較して 100℃程度高い温度が選ばれる。窒素源としてはアンモニアが用いられ、キャリアーガスには高純度水素が用いられる。

化学反応を利用した結晶成長で、ある一定の温度以上で温度依存性がなく、結晶の成長速度は原料ガスの供給量にのみ依存するので、量産性に優れていると云える。品質的には、サファイア基板との格子定数ギャップを緩和するために低温で成長させた AlN 層をバッファー層としてその上に GaN 結晶を成長させることにより、転位密度の減少が図られても、 $10^8 \sim 10^9 \text{cm}^{-2}$ 程度の転位密度である。

ii) MBE (Molecular Beam Epitaxy)

現在市販されているナイトライド半導体の光、電子デバイスのほとんどは MOVPE 法により成長させた単結晶を用いており、MBE 法は少数派であるが、低温成長可能な点など MOVPE 法にない利点ももっている。

MBE 法は、タンタルなどの高融点金属製の坩堝中で金属 Ga を加熱して蒸発させ分子線として基板に照射することにより結晶を成長させる方法である。窒素源としては窒素ガスを使用する場合には、窒素ガスを RF または ECR プラズマセルにより分解して窒素ラジカルとして供給するか、アンモニアガスを加熱した基板上に供給し基板上での熱分解により窒素元素を得る方法がとられる。

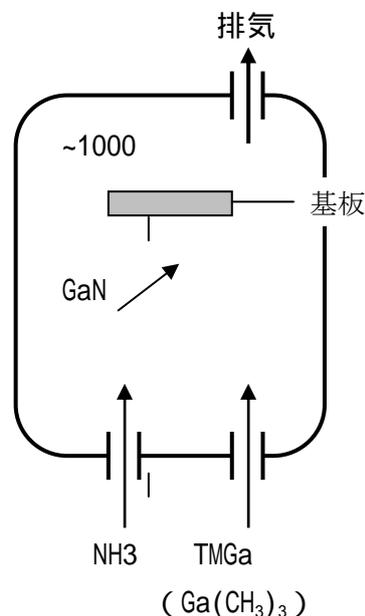


図 4.2-1 MOVPE 法概念図

一般的に MOPVE 法のほうが MBE 法と比べて、転位密度や結晶欠陥が少ない高品質の GaN 結晶を成長することが容易である。これは MOPVE 法の場合、成長温度が 1000°C 以上と MBE 法に比べて 200~300°C 程度高いこと、また、原料ガスが基板上で分解されることなどから、Ga 原子の成長再表面における取り込まれるまでのマイグレーション距離が長いためであると考えられている。MOPVE 法では、サファイア基板上で $10^8 \sim 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 程度の転位密度の GaN 結晶が得られるのに対して、MBE 法では、一桁大きい $10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 程度が普通である。

4.3 GaN デバイス及び基板の市場とコスト

GaN 基板の市場を見るためには、GaN 基板が使われる市場を解析する必要があるので、まず用途市場を概観する。

GaN 基板の用途としては、光学デバイスである高輝度 LED 及び半導体レーザ (LD) と電子デバイスがあるが、現在のところ、LED 用途がもっとも大きい。

i) LED

LED 全体で見ればその世界市場は、2005 年で 48 億ドルと推定され、2011 年には 89 億ドルに達すると予測されている。LED 市場の成長は、GaN ベースの青色 LED の発明で白色 LED が実用化されたことにより、一気にその用途が広がったことによる。

図 4.3-1 に、1995 年~2005 年の GaN ベース LED の売上経緯を示す。

2005 年において、金額的には市場の成長は鈍っているが、これは、用途別で最も数量の多い携帯電話市場 (図 4.3-2 参照) における LED の急激な価格下落によるもので、数量的にはまだまだ伸びており、基板の需要はますます増大すると思われる。

GaN ベース LED は、主として携帯電話機のメイン液晶ディスプレイ用 (白色) に使われ始めたが、輝度と効率の向上により、携帯電話機のカメラ用フラッシュ、液晶ディスプレイバックライト、照明用、最近では自動車のヘッドライトの用途へと、急速に市場シェアを伸ばしている。現在では、携帯電話機用が 60% 程度であり、携帯電話機の価格低下に伴い単価下落を余儀なくされているが、数量的には価格下落を補って伸びているので売上全体としては成長を継続しており、GaN 基板の需要が伸びている。

ii) 半導体レーザ (LD)

1999 年に日亜化学が GaN ベースの青紫色 LD をサンプル出荷し始めて以来、少量アプリケーション用途にコマーシャルベースで販売されてきたが、2003 年から光学ストレージ用途に使われ始められることによりにわかに脚光を浴びるようになった。し

かしながら、サファイア基板上の GaN ベースの LED 収率が思うように上がらず、2005 年までは目覚しい立ち上がりは見られなかった。GaN 基板の品質が徐々に向上し、市場での入手が容易になるにつれて、2006 年には HD-DVD 及びブルーレイディスクプレーヤーが、家電メーカーにより相次いで発売されるようになったが、ソニーのプレイステーション 3 の発売延期は GaN 基板の品質が商業生産に耐えるほど十分には安定していないことを示している。

GaN ベースの LD の世界市場は、2006 年度で 5 億ドル程度とみられるが、家電メーカーによる HDD-DVD、ブルーレイディスク、大容量ビデオレコーダー及びビデオゲームプレーヤー販売予測から推定すると 2010 年には 25 億ドル程度に達するものと予測される。

LD を作るには GaN バルク基板が必要であり、LD において欠陥の存在は、デバイスの寿命、信頼性に大きく影響する。欠陥が多いとレーザ発振しないか、発振したとしても寿命が短い。このため基板の転位密度に対しては 10^3cm^{-2} 以下にすることが収率、コストの面から必要であると見られており、基板供給メーカーでは欠陥を減らすこと、欠陥を偏在させ欠陥が少ない部分を作るといったことを行っている。

現在使われている GaN 結晶は c 軸方向に積層された結晶である。GaN は結晶の c 軸方向に極性を持つため、発光層となる、InGaN、GaAlN 層との界面で生じる歪によりピエゾ分極が発生する。この分極によりバンド構造に歪みが生じ、電子の再結合確立が低下し発光効率が下がる。現状の発光効率は 70%程度といわれている。極性を持たない方向に積層された結晶を使うことができれば、界面でのピエゾ分極は起こらないため、発光効率を高くできると考えられている。現在この無極性方向に成長させた GaN 結晶基板の研究開発が進められている。

iii) 電子デバイス

GaN ベースの電子デバイスへの期待

通信では携帯電話基地局や固定無線局への応用、工業、宇宙、航空、自動車、軍事用途では、パワー変換、パワー制御への応用が期待されている。その期待から、数年前には、2006 年には 1 億ドル程度の市場になると予測されていたが、現実には、1 千万ドル程度とみられる。今後の GaN 基板の品質向上と価格低下の期待から、今後は急速に成長して 2010 年には 2 億 5 千万ドル程度に達すると予測されているが、その 90%以上は高周波／マイクロ波領域におけるアプリケーションと見られる。

GaN ベース電子装置市場は今後目覚しい成長を遂げることが期待されているが、今までは電子装置用途に関して差し迫った市場のニーズがなかったことにより、市場に現れてこなかった。換言すれば、従来はシリコンやガリウム砒素の半導体で十分対応できてい

たということである。今後は、新しい電子装置に関して増大する高出力、高温、高周波数という条件を満たす GaN（さらには窒化アルミニウム：AlN）ベースの半導体が必要とされる。GaN ベースの高出力電子装置への応用には、通信（携帯電話基地局、固定無線基地局、衛星地上局）、電力変換、また、作業、軍事、航空宇宙、自動車、航空機システム用の制御と保護が含まれる。中でも、高周波（RF）とマイクロ波への応用は、GaN ベースデバイス市場において最大のシェアを占めることが予想されており、市場規模は 2009 年には 2 億ドルに達するとされている。

iv) GaN 基板

現在のところ、堆積法により製造され、その後サファイア等の物質を除去した GaN 基板の欠陥密度は $10^4 \sim 10^5 \text{cm}^{-2}$ であるが、商業生産に必要とされる 10^3cm^{-2} 以下の欠陥密度を持つ基板の登場を待つまでもなく、Kyama、住友電工、Samsung 及び Cree などの基板メーカは、顧客に対して LD の収率及び信頼性の向上策を提案している模様である。

GaN によるデバイスの市場予測をベースに、また、①トップサプライヤと目される住友電工が 2006 年末には月産 1000 枚（2 インチ）体制を整えている、②Cree 社の GaN 基板は殆んど全て内製用に消費される、③2007 年から 2008 年に掛けて、Kyama、Samsung、Corning、Lumilog 及び TDI (Technologies and Devices International) などのメーカが量産体制に入るという前提で予測すると、2006 年の GaN 基板市場は 5 千万ドル弱であるが、2010 年には 4 億ドル程度まで成長すると見られる。

参考文献

*1 : 「LED for Lighting Applications」 bcc research, Sep.6, 2006

*2 : 「Substrates for GaN-Based Devices」 Strategies Unlimited

*3 : 「高周波デバイスの現状と将来市場」 FED Review, vol1, No.1, 20 August 2001

*4 : NIKKEI NET (2007/03/12)

4.4 世界の GaN 基板の開発及び製造拠点

GaN は、GaAs の守備範囲を一桁高いレベルでカバーし、更にパワー系の SiC から高速系の InP の守備範囲をもカバーできる、いわばオールラウンドプレーヤとしての性能をもつ。あとは経済性だけが唯一最大のハードルであり、いかに経済的な基板を実現できるか、すなわち、欠陥の少ない大サイズの基板をどれほど低コストで生産できるかが鍵となる。

○主な生産（開発を含む）・供給者及び GaN 関連製品

表 4.3-1、図 4.3-1 に GaN 基板材料の主な生産（開発を含む）・供給者の一覧を載せる。

表 4.4-1 GaN 基板材料の主な生産者・供給者

生産(開発を含む)・供給者	開発内容
GE Global Research Center [米]	HPHT バルク GaN 結晶成長 15x18mm (2004 年時点) 転位密度 <200 cm ⁻²
TopGaN/Unipress [ポ]	Unipress (Institute of High-Pressure Physics in Warsaw からのスピンオフ)、HPHT バルク GaN 結晶成長、1cm 径。転位密度 <100 cm ⁻² 。2cm 径 HVPE 積層自立 GaN
Cree, Inc. [米] (NCSU ファミリ)	2004 年、ATMI の GaN 基板事業と技術を買収 ほとんど自社 LED 製品向け自家消費。少量の 2 インチ基板を外販。
Kyma Technologies, Inc. [米] (NCSU ファミリ)	2 インチ GaN 基板、18mm SI GaN 基板、GaN エピウエハ、無極性 GaN 基板、2、3、4 インチ GaN-on-Sapphire HVPE プロセス 欠陥密度 10 ⁵ 10 ⁴ cm ⁻²
Nitronex [米] (NCSU ファミリ)	GaN-on-Si SIGANTEC 技術
TDI (Technologies and Devices International, Inc.) [米]	GaN テンプレート (GaN-on-Sapphire, GaN-on-SiC),
住友電工	GaN 結晶成長、GaN 基板、ADEEP(Advanced deposited inverse pyramidal pits)技術
古河電子(古河機械金属)	GaN on Sapphire テンプレート
Samsung Corning, Ltd. [韓]	2 インチ GaN 基板、2 インチ無極性 GaN ウエハ(開発中)。

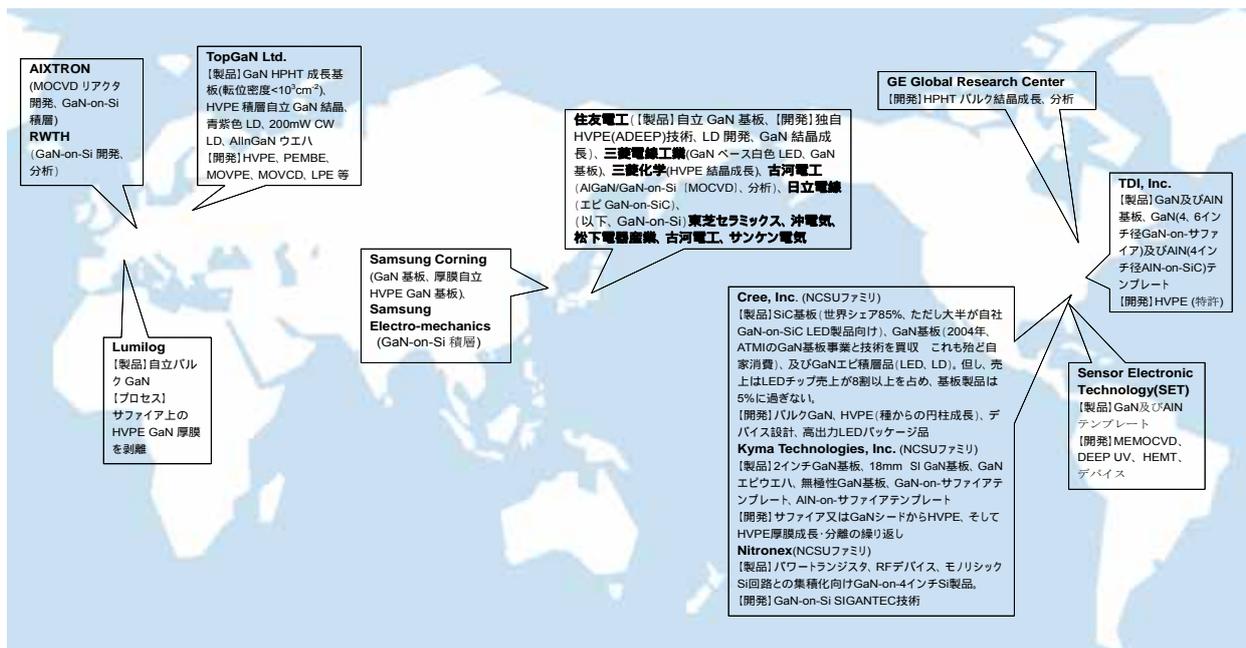


図 4.4-1 GaN 基板材料の主な生産者・供給者

GaN 基板材料特性データ例

表 4.4-3 に GaN 基板材料特性データ例を載せる

表 4.4-3 GaN 基板材料特性データ例

項目	特性
基板サイズ	HPHT、アモノサーマル等の真正バルク結晶では 1 - 2cm。HVPE による自立基板 (擬似バルク) では 2-3 インチ。MOVPE、MBE によるサファイア、SiC 上のエピ成長基板では 4 インチまでが入手可能になりつつある。
欠陥密度	HPHT (GEGRC、TopGaN) による真正バルク結晶で転位密度 $10^2 - 10^3\text{cm}^{-2}$ というデータがあるが、HVPE 法を中心とする実用レベルの擬似バルク基板では $10^5 - 10^4$ (住友電工、Kyma) cm^{-2} 辺りが現在のトップレベル (近時、HVPE で厚膜成長した後には基板を除去することで作製される 2 インチ径自立 GaN 基板がひとつの中心になっている)。サファイア、SiC、Si 上のヘテロエピ成長基板では $10^6 - 10^8\text{cm}^{-2}$ と比較的高いが、選択成長や厚膜成長により、転位密度の低減が急速に進んでいる。
基板成長速度	~ 100 $\mu\text{m/h}$ (HPHT、HVPE)
電子移動度	1000 ~ 2000 cm^2/Vs
ホール移動度	100 ~ 150 cm^2/Vs (RT)
飽和速度	$2.5 \sim 2.7 \times 10^7\text{cm/s}$
絶縁破壊電圧	$3.5 \sim 5.0 \times 10^6\text{V/cm}$

(参照資料)

1. "Substrates for GaN-Based Devices" Strategies Unlimited September 2006
2. "Present Status and Future Prospect of Widegap Semiconductor High-Power Devices" Hajime Okumura
Japanese Journal of Applied Physics Vol. 45, No. 10A, 2006, pp. 7565-7586
3. 「ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイス技術調査研究報告書」光産業技術振興協会 2006
4. "Wide Bandgap Semiconductor Devices and MMICs: A DARPA Perspective" Mark Rosker
Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)
5. 「GaN 高周波デバイスと今後の展望」名西徳之/立命館大学 素子協フォーラム 2006
6. "2006 IEDM Points Way For Device Power And Speed" Jack Browne ED Online ID #14040 November 2006
7. "European Material Research Society 2006 Spring Meeting / Material Science and Technology of Wide Bandgap Semiconductors"
8. 「IWN2006 速報」成川幸男/日亜化学 光産業技術振興協会
9. National Compound Semiconductor Roadmap ホームページ Office of Naval Research
10. "Growth and Characteristics of Freestanding Gallium Nitride Substrates" Xueping Xu, Robert P. Vaudo, Allan Salant, Joseph Malcarne, Jeffrey S. Flynn, Edward L. Hutchins, Joe A. Dion, and George R. Brandes ATMI, Inc.
11. 「格子歪の無い GaN 自立基板の作製に成功」東北大学学際科学国際高等研究センター、東北大学金属材料研究所 報道発表 平成19年1月29日
12. "Kyma goes non-polar with native GaN substrates" Compound Semiconductor. Net 21 March 2006
13. 「世界初の無極性青紫半導体レーザー UCS 中村氏らが開発に成功」日経エレクトロニクス/Tech-On!
2007/01/31
14. 「中村氏らが開発した非極性 LED と半極性 LED, 詳細が明らかに」日経エレクトロニクス/Tech-On! 2007/02/13
15. 「ソルボサーマル法により高品質窒化ガリウム基板結晶作製に成功」東北大学多元物質科学研究所 報道発表
2007/02/9
16. 「ソルボサーマル法を用いた高品質バルク GaN 単結晶の作製技術の開発」東北大学/福田研究室ホームページ
17. "Ammonothermal Growth of GaN on an over-1-inch Seed Crystal" Tadao Hashimoto, Kenji Fujito, Makoto Saito, James S. Speck and Shuji Nakamura/UCSB, 三菱化学 Japanese Journal of Applied Physics Vol. 44, No. 52, 2005, pp. L1570-L1572

5 . GaN デバイスの技術動向

5 . 1 GaN デバイスの開発動向

) GaN HFET

Ⅲ－Ⅴ族化合物半導体である GaN がⅣ族のワイドバンドギャップ半導体である SiC と最も異なる点は、ヘテロ接合が可能であるところにある。AlGaN/GaN のような接合が可能であり、AlGaAs/GaAs 等と同じように、界面に二次元電子ガス（2 DEG：2 Dimension Electron Gas）の生成ができ、HFET（Hetero-junction Field Effect Transistor）素子を作ることができる。GaN は、ウルツ鉱型の結晶構造を持つため、反転対称を持たないため、内部に自発分極を持っている。自発分極はヘテロ界面に正の分極を生じ、デバイスにバイアスをかけた状態と等価になり、2次元電子ガスが生じる。また GaN はピエゾ効果（歪により分極電荷が誘起される）があり、GaN 上に格子定数の小さな AlGaN を成長させると、AlGaN に引っ張り歪が生じ AlGaN 界面に圧電分極による電界が生じる。この結果 AlGaN/GaN の界面の GaN 側に電子が誘起される。自発分極の効果とあわせ、AlGaN/GaN 界面に高い電子密度が得られる。この構造において、高い電子移動度が得られており、高速かつ大電流・大電力動作のデバイスが期待される。

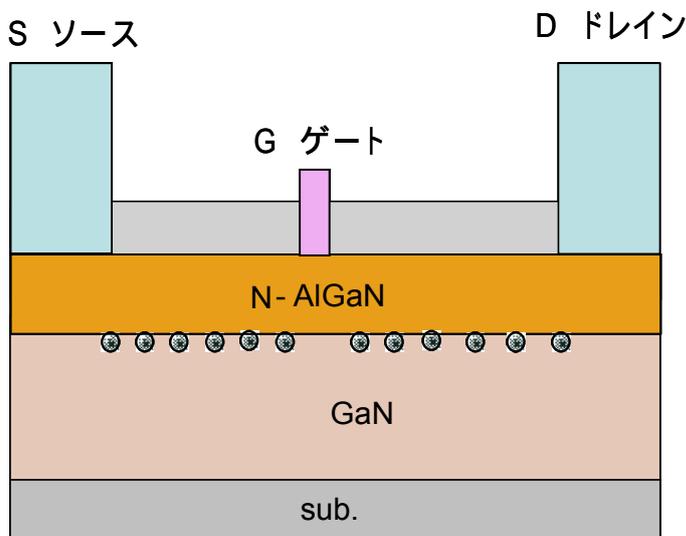


図 5.1-1 GaN HFET の構造

a) GaN HFET 高周波デバイスへの適用

GaN の HFET デバイスは、90 年代の半ば頃から検討がなされてきており、現在携帯電話基地局用のパワーアンプとして実機に用いられ始めたところである。携帯電話の基地局では出力が 100W 近い出力が要求される。この出力を得るには、

50V 近い電圧をパワーアンプに加え駆動させると非常に効率がよくなる。これまでパワーアンプには MOS、LDMOS、Bipolar、あるいは GaAs が用いられていたが、電圧をそこまでかけることはできない^(*)。GaN を用いて高い電源電圧をかけられることにより、出力の効率化を実現できるようになる。

GaN のデバイスに置き換えることにより、低消費電力化、実装面積・部品点数削減等のメリットが出ている。高周波 HFET での問題点として、ゲートと GaN 半導体間のポテンシャル障壁が低いためゲート漏れ電流が生じる。ゲート漏れ電流は出力（ゲート印加電圧）に依存し、出力が高いときにゲート漏れ電流が大きいと、信号に歪が現れる。パワーアンプを効率よく使うため、飽和電力の近くまで出力電力を高くして使いたいため、ゲート漏れ電流は抑制する必要がある。方策としてはゲートと GaN 間に絶縁体膜を設ける MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) 構造のデバイスが開発されており^(*)2, 3, 4)、実用化が目前となっている。

携帯電話、WLAN 等に代表されるように、無線通信利用の拡大は電波資源を使い尽くし、30GHz 以下の周波数には、大容量・高速通信のための新たな電波利用への割り当てが困難になっている。電波資源を有効利用するために周波数利用率を上げる努力もされているが、高度情報化社会へ向けては 30GHz 以上の電波利用は不可避であると考えられる。このような社会的な要請から、衝突回避レーダ、高度交通システム、車間通信などに使われる移動体無線へ電波の割り当て (60GHz、76GHz) も行われようとしている。しかしこういったミリ波帯を実際に利用しようとする動きは、予想よりは遅くなっている。この理由としては、ミリ波帯で安価で高出力送信を可能にするデバイスが無いことが挙げられる。30GHz 以上の電波に対して、GaAs/InAs/InP 系のデバイスでは、0.1W 程度の出力が限界である。高度交通システム、車間通信等においては、さらに大きなパワーが必要になってくるはずである。現状パワーの出るデバイスが無いため、無線通信システムも実現可能な範囲でのアプリケーションを考えざるを得ない状況にあると思われる。GaN は 30GHz~100GHz の間において 1W 以上のパワーを出せる可能性がある殆ど唯一のデバイスである GaN は、30GHz 以上の電波の有効利用の鍵を握るデバイスの 1 つである。この帯域に対して GaN デバイスを実現させ、有用性を示すことが必要であると思われる。

GaN HFET のミリ波対応としては、他の半導体と同じく、ゲート長の短縮による高周波対応である。これに対する課題としては、ショートチャンネル効果による相互コンダクタンス、閾値電圧のシフト、ゲート容量の飽和、ドレインコンダクタンスの緩和などが出てくる。これらは構造上の工夫、ヘテロ界面に InGaN の薄い膜を挿入するなどの試みがなされている。

b) GaN HFET パワーデバイスへの適応

AlGaN/GaN HFET では、チャンネル抵抗を低くでき、耐圧を保持するゲート-ドレイン間も二次元電子ガス層で構成できるため、きわめて低いオン抵抗の実現が期待される。ただ現実には、オン抵抗は理論予想値よりも高い値になっている。これは耐圧構造が不十分であること、電極の接触抵抗が高いことなどが上げられる。(図 5.1-2) また、AlGaN 層に対し電子がトラップされ電流が減る、電流コラプスの問題もある。

パワーデバイスとして大電流が流せることが必要であるが、ゲート幅を広くしても、飽和ドレイン電流は減少することなくほぼ一定の値で得られ、ゲート幅を広くすることで大電流動作することが確認されている。さらに、飽和ドレイン電流として 32A が得られた報告⁵⁾、AlGaN/GaN HFET で 150A の動作といった報告⁶⁾が出てきている。

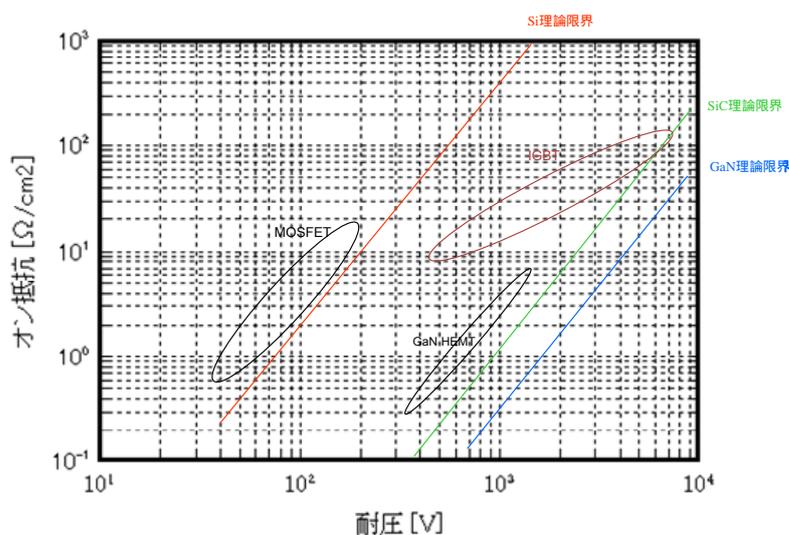


図 5.1-2 GaN HFET のオン抵抗

電源回路、モータ制御においては、制御デバイスの回路は電源と直結をする。このため回路の動作を止めたときに回路が電氣的に開放状態とさせないため、デバイスはオフ状態にある必要がある。GaN HFET では、電圧を印加せずともゲート直下に二次元電子ガスが存在しているため、ノーマリー・オンのデバイスである。ゲート近傍の AlGaN 層の厚さを薄くするリセス構造をとることで実現させる試みがなされている。ゲート電圧を引火しないときに空乏層が AlGaN 層下の GaN 層まで広がりこの部分で二次元電子ガスが消えるためノーマリーオフが実現される⁷⁾。この方法は二次元電子ガスの密度(オン抵抗に影響)とのトレードオフ

となるが、素子構造の工夫などにより実現されてくると思われる。HFET 構造でなく、縦型の構造をとりノーマリーオフを実現した報告も出ている⁸⁾。

) MOS 型デバイス

MOS 構造ではノーマリーオフのデバイスが期待できる。GaAs 等と同じく、GaN においても MOS 構造が作れないとされていた。しかし近年ノーマリーオフのデバイス実現を目指し、GaN 界面状態を工夫し、MOS 構造のデバイスを作る研究がなされている。アンドープ GaN 膜の上に MOS 構造を作成し、ノーマリーオフ作の報告がされている⁸⁾。移動度は $45\text{cm}^2/\text{Vs}$ と低い。その他様々ゲート膜を使った報告がされている^{10,11,12)}。p-GaN 膜上にソース、ゲート電極をショットキー接合させた MOS 構造のデバイスの報告もなされている¹³⁾。MOS 構造デバイスに関しての試みはまだ検討の余地が多いと思われ、その可能性が判断できるのはまだまだ先の事であろう。

) 縦型デバイス

これまで GaN では、サファイア、SiC 等の異種基板上での結晶成長しかできなかったため、開発・研究されていたのは、横型のデバイスであった。大電力用途のデバイスは、サイリスタ、IGBT、DMOS 等の縦型のデバイスが用いられている。これは配線、パッケージングの容易さ、面積効率の高さから来るものが大きい。GaN で縦型デバイスを実現するには、高品質の導電性基板が必要である。結晶欠陥の少ない GaN の基板が入手可能になってきてはいるが¹⁴⁾、縦型デバイスの検討した報告は少ない^{15,16,17)}。開発としては、耐圧に対し欠陥がどのように影響を及ぼしているか、貫通転位の電流の影響など解決すべき課題がある。また基板に対しては導電性をコントロールすること、高抵抗基板、低抵抗基板を実現する必要がある。縦構造デバイスを実現するための検討が始まったところである。

) 無極性面デバイス

無極性デバイスは、現在光デバイス向けに開発が盛んに進められている。無極性面の成長は、サファイアの R 面 ($(10\bar{1}2)$ 面)、SiC の M 面 ($(10\bar{1}0)$ 面) や γ -LiAl₂O₃ 基板を用いている。安価な ZnO 基板を用いて成長させた報告もある¹⁸⁾。電子デバイスでの適応を考えると、HFET においては、界面に分極、歪による電荷の形成が無いため、ノーマリーオフデバイスがそのまま実現できると考えられる¹⁹⁾。また MOS デバイスでもゲートの形成が容易になることが予想される。このため無極性面を使った HFET、MOS においてより特性の優れた GaN デバイスが期待できる。

5.2 GaN デバイスの技術課題、方向性

) GaN HFET デバイスの技術課題、方向性

表 5.2-1 に GaN デバイスの問題点と現状についてまとめた。

表 5.2-1 GaN HFET デバイスの問題点と現状

デバイス	問題点、他	状況
GaN HFET 高周波デバイス (30GHz～ミリ波デバイス)	<p>・ショートチャンネル効果</p> <p>ゲート電極長とゲート電極-チャンネル間距離のアスペクト比を高くすることが必要。GaN HFET においては、ゲート電極-チャンネル間距離を短くする (AlGaIn 層を薄くする) と 2 次元電子ガスが減少し、ソース、ドレイン抵抗が増加する問題</p>	<p>AlGaIn 層のゲート電極を接する部分を凹状に形成しゲートとチャンネル間の距離を短くする。AlGaIn 層の Al 組成を増やし、AlGaIn 層の分極を大きくすることにより、AlGaIn 層を薄くしても 2 次元電子ガスの濃度を維持させる等の報告がある</p> <p>また、薄い AlGaIn 層について、2 次元電子ガスの濃度を維持するには、AlGaIn 層の表面バリアが重要で、SiN パッシベーションが有効といわれている。</p> <p>～2GHz 迄の高周波デバイスに関しては、移動体通信基地局用として実用化されている。</p>
GaN HFET パワーデバイス	<p>ノーマリー・オフ</p> <p>分極、歪により 2 次元電子ガスを得る GaN HFET デバイスは、通常ノーマリー・オンであるが、電源回路、モータ制御等のパワーデバイスとして使うにはノーマリー・オフであることが必須</p>	<p>ゲート近傍の AlGaIn 層を局所的に薄くすることでノーマリー・オフを実現する検討がされている。この方法では高い電流が取れない、オン抵抗が高くなるといったこととトレードオフになっている。</p> <p>耐圧については、ゲート、ドレイン端の電界集中を緩和するフィールドプレートを設置することにより、高耐圧のデバイスが実現されている。これは、電流コラプスの改善にも効果がある。また絶縁ゲート構造により高耐圧を実現した報告がある。</p> <p>AlGaIn 層の上に n-GaN 層を設ける等 AlGaIn 層表面を安定化させ電流コラプスを改善する事が試みられている。(耐圧、電流コラプスについてはノーマリーオン型での検討)</p>
	<p>耐圧</p> <p>絶縁破壊は、ゲートのドレイン側の端部に電界が集中することにより発生。</p>	
	<p>オン抵抗</p> <p>GaN HFET では、低いオン抵抗の実現が予測されている。現状は理論限界値よりもまだ高い値になっている。</p>	
	<p>電流コラプス</p> <p>AlGaIn 層表面の電子トラップにキャリアが捕獲され、電流が減る。</p>	

GaN HFET 高周波デバイスに関して、～2GHz 迄の高周波デバイスでは、移動体通信基地局用として実用化されており、開発はさらなる高出力化、高効率化が行われている。市場予想に見られるように、基地局用途として既存のデバイスを置き換えていくと予想される。10GHz において、100W 近い出力の得られるパワーデバイスも試作されており²⁰⁾、10GHz 以下の、携帯電話基地局、データ通信用無線局等において適応が広まっていくと思

われる

30GHz 以上のミリ波対においては、デバイス実現のための検討がなされている。高周波対応にはゲート長を短くすることで対応するが、相互コンダクタンスの低下、閾値電圧のシフト、ゲート容量の飽和、ドレインコンダクタンスの増加等デバイスの特性を悪化させる効果が現れる。これらはショートチャンネル効果と呼ばれている。ゲート長短縮による高周波特性を改善するには、ゲート長とゲート-チャンネル間距離の比を高く保つことが重要と言われている²¹⁾。しかし GaN HFET においては、AlGaIn 層を厚くすることにより分極効果を高くし、高い 2 次元電子ガス濃度を得、シート抵抗を低く保っている。短ゲート化においてゲート長とゲート-チャンネル間距離の比を保つには、AlGaIn 層の厚さを薄くする必要がある。しかし AlGaIn 層の厚さを薄くすることは、2 次元電子ガスの濃度を下げることになり、チャンネルのシート抵抗が高くなる。GaN HFET には、ゲート長とゲート-チャンネル間距離の比と 2 次元電子ガス濃度に関しトレードオフがある。これに関する取り組みとしては、AlGaIn 層のゲート電極を接する部分を凹状に形成しゲートとチャンネル間の距離を短くする^{22,23,24)}、AlGaIn 層の Al 組成を増やし、AlGaIn 層の分極を大きくすることにより、AlGaIn 層を薄くしても 2 次元電子ガスの濃度を維持させる等²⁵⁾の試みがなされている。

ミリ波帯対応 (30GHz~100GHz) については、現在日本、米国、欧州においてそれぞれナショナルプロジェクトとしても研究開発が進められている。GaN の他に、ハイパワーの送信機を構成できる材料は無いため、高度情報化社会実現のためにも実用化させることは必須である。

GaN HFET パワーデバイスについては、ノーマリーオフ、耐圧、オン抵抗、電流コラプス等の問題が解決されれば、実用化になってくる。特にノーマリーオフは電源回路、モータ駆動等への適用には必須である。ゲート近傍の AlGaIn 層を局所的に薄くすることでノーマリーオフを実現する検討がされている。この方法では高い電流が取れない、オン抵抗が高くなるといったこととトレードオフになっている。このほか

耐圧については、ゲート、ドレイン端の電界集中を緩和するフィールドプレートを配置することにより、高耐圧のデバイスが実現されている²⁶⁾。これは、電流コラプスの改善にも効果がある。また絶縁ゲート構造により高耐圧を実現した報告がある^{27),28),29)}。

電流コラプスについては、先に述べたフィールドプレートの配置、AlGaIn 層の上に n-GaN 層を設ける等 AlGaIn 層表面を安定化させ特性を改善する事が試みられている³⁰⁾。

GaN HFET パワーデバイスについては、ノーマリーオフ耐圧、オン抵抗、電流コラプス等の問題が解決されれば、実用化になってくる。実用となるのは、Si で実現できていない、MHz 帯でのスイッチング部分であると考えられる。

) GaN MOS 型デバイス、縦型デバイス開発の技術課題、方向性

GaN では、他のⅢ－Ⅴ族化合物半導体と同様に、MOS 構造を作りにくい、ノーマリーオフデバイス実現を目指し、MOS 型デバイスの検討する試みがなされ始めている。移動度等 GaN 本来の特性が得られていない。現状は MOS 界面の改善、素子構造の工夫などで GaN MOS 型デバイスの可能性を探っている状況である。

Si の大電力用デバイスでは、配線、パッケージングの容易さ、面積効率の高さから縦型構造をとっている。GaN についても同様に、縦型デバイスが GaN 大電力用デバイスの実現の鍵となると考えられる。縦型デバイスの検討した事例はそれほど多くなく、これらの検討では、欠陥が多いため漏れ電流等があり、耐圧の測定が満足にできていない。耐圧に対し欠陥がどのように影響を及ぼしているか、貫通転位の電流の影響など解決すべき課題があり、縦型デバイスは開発の端に着いたところである。

表 5.2-2 GaN の MOS 型デバイス、縦型デバイス開発の現状と問題点

デバイス	問題点、他	状況
MOS 型デバイス	MOS 構造形成	GaN では、他のⅢ－Ⅴ族化合物半導体と同様に、MOS 構造を作りにくい、MOS 型デバイスの検討する試みがなされ始めている。
縦型デバイス	低抵抗化のための高不純物濃度化 結晶欠陥の低減	結晶欠陥の少ない GaN バルク基板が入手可能になってきたこともあり、縦型デバイスの検討がされ始めた。他に、無極性面基板の開発がされ始めている。電子デバイスにおいてがノーマリーオフの HFET が期待ができる。

ハイパワーの領域では、デバイスの構造上縦型デバイスとすることが必須であろう。GaN においては縦構造デバイスを実現するための検討が始まったところであり、その可能性は未知である。低欠陥の低抵抗基板が実現したとすれば、GaN の特性からみて SiC がカバーすると予想されている領域のかなりの部分が GaN デバイスで実現できる可能性がある。

参考文献)

- 0)U.K.Mishra,P.Oarikh,Y-F.Wu AlGaN/GaN HEMTs –An Overview of Device Operation and Applications Proc. Of The IEEE Vol.90,No6 June 2002
- 1) <http://www.chronix.co.jp/chronix/library/pdf/cellular.pdf>
- 2) T.Kikkawa, K.Imanishi, M.Kanamura, and K.Joshin Recent Progress of Highly Reliable GaN-HEMT for Mass Production 2006 CS-MANTECH Technical Digest 171-174(2006)
- 3)T.Kikkawa,T.Maniwa,H.Hayashi,M.kumakawa,S.Yokokawa
M.Nishi,N.Adachi,M.Yokoyama,Y.Tateno and K.Joshin “An Over 200-W Output Power GaN HEMT Push-Pull Amplifier with High Reliability” IEEE Int Microwave Symp. Dig,1347-1350(2004)
- 4)T.Kikkawa and K.Joshin,“High Power GaN-HEMT for Wireless Base Station Applications” IEICE Transactions on Electronics, Vol.E89-C,608-615
- 5)上田博之、杉本雅弘、上杉 勉、藤島 修、副島成雅、加地 徹 : SiC 及びワイドバンドギャップ半導体研究会 第 13 回講演会予稿集、p144(2004)
- 6) M.Hikita,M.Yanagihara,K.Nakazawa,H.Ueno,Y.Hirose,T. Ueda, Y. Uemoto, T. Tanaka, D. Ueda and T. Egawa :Tech. Dig. Int. Electron Devices Meet., San Francisco, 2004,p.803.
- 7)V.Kumar, A.Kuliev, T.Tanaka ,Y.Otoki, and I.Adesida; Electronics Letters,39(2003),1758
- 8)Morita, T.; Nakazawa, S.; Ueda, T.; Tanaka, T. Device Research Conference, 2006 proceedings P: 97 - 98
- 9) K.MOtocha,T.P. Chow and R.J. Gutumann ; Master, Sci. Forum 457/460, 1633(2004)
- 10) S. C. Binari, “GaN FETs for high-temperature and microwave applications,” Proc. Electrochem. Soc., vol. 21, pp. 136–143, 1995.
- 11) F. Ren, S. J. Pearton, C. R. Abernathy, A. Baca, P. Cheng, R. J. Shul, S. N. G. Chu, M. Hong, M. J. Schurman, and J. R. Lothian, “GaN metaloxide semiconductor field effect transistors,” Solid State Electron., vol.43, pp. 1817–1820, 1999.
- 12) R. Therrien, H. Niimi, T. Gehrke, G. Lucovsky, and R. Davis, “Charge redistribution at GaN-Ga O interfaces: A microscopic mechanism for low defect density interfaces in remote plasma processed MOS devices prepared on polar GaN faces,” Microelectron. Eng., vol. 48, pp. 303–306, 1999.
- 13) A. Kinoshita, C. Tanaka, K. Uchida, and J. Koga, “High performance 50-nm-gate-length schottky-source/drain MOSFETs with dopant-segregations,” in *Symp. VLSI Tech. Dig.*, 2005, pp. 158–159.
- 14) 碓井彰:SiC および関連ワイドギャップ半導体研究会第 13 回講演会予稿集 , p. 4 (2004)
- 15) I. I. Ben-Yaacov, Y. K. Seck, U. K. Mishra and S. P. Den-Baars:J. Appl. Phys. 95, 2073 (2004).
- 16) Y. Gao, A. R. Stonas, I. I. Ben-Yaacov, U. K. Mishra, S. P.DenBaars and E. L. Hu :J. Appl. Phys. 96, 6925 (2004).
- 17) 副島成雅,杉本雅裕,上田博之,藤島修,上杉勉,加地徹:第65回応用物理学会学術講演会講演予稿集 , p. 1252 (2004).
- 18) http://www.eetimes.jp/contents/200701/13919_1_20070109214029.cfm
- 19) <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20070226/128183/>

- 20) <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20061114/123555/>
- 21) Y. Awano et al., IEEE Trans. Electron Devices, 36, 2260 (1989)
- 22) T. Egawa et al. Appl. Phys. Lett. 76,121 (2000)
- 23) A. Kulier et al. Solid State Electron. 47,117 (2003)
- 24) T. Paracios et al. IEEE Electron Device Lett., 27, 13 (2006)
- 25) M. Higashwaki et al. Jpn. J. Appl. Phys. 43 L1147 (2004)
- 26) <http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn060627-1/jn060627-1.html>
- 27) 斉藤 涉 他 : 電子情報通信学会技術研究報告 ED2003-159 (2003)
- 28) T. Hashizume et al Appl. Phys. Lett. 83,2592 (2003)
- 29) M. Ochiai et al Jpn Appl. Phys 42, 2278 (2003)
- 30) C.S. Oh et al Appl. Phys. Lett,85 4214 (2004)
- 31) Kanamura et al. Electron Devices Meeting, 2004. IEDM Technical Digest. Page(s):799

6. まとめ

i) GaN の半導体材料としての特性

GaN の物性値を SiC と比較すると、熱伝導度を除くと、殆ど変わらない。絶縁破壊電圧においては、SiC より 1.5 倍ほど高く、パワーデバイスの通電損失を比較する Baliga's FOM は、1 桁近く高くなる。GaN はパワーデバイスとしても高いポテンシャルを持つ材料であるといえる。

ii) パワーデバイスの現状

Power MOS、IGBT、BJTs、Thyristors、GTO、Rectifiers (PN/schottky Diode) 等が使われている。単体では MOS の需要が多いが、大電力用以外はモジュール化が進んでいる。市場として伸びていくのはモジュールである。

iii) GaN 結晶材料

GaN 結晶材料は、バルク、擬似バルク（サファイア基板上に GaN を成長させ、基板をはずしたもの）、テンプレート（サファイア、SiC 基板上に GaN の膜をエピ成長させたもの）で供給されている。基板として提供されているのは、擬似バルク、テンプレートである。また転位密度は擬似バルクで、 $10^4 \sim 10^5 \text{cm}^{-2}$ 程度である。電子デバイス用途では、3 インチ以上の大口径でかつ転位密度が低いものが望まれる。

iv) GaN デバイス、基板の市場

GaN 基板が使われるのは、LED、LD 用途が殆どである。電子デバイスとしては、携帯電話基地局用のパワーアンプが、2006 年より市場に出たところである。

v) GaN 電子デバイスの開発動向

a) GaN HFET 高周波デバイスについては、携帯電話用基地局用に実用化されている。市場予想に見られるように、基地局用途として既存のデバイスを置き換えていくと予想される。

ミリ波帯対応については、研究開発が進められている。GaN の他に、ハイパワーの送信機を構成できる材料は無いため、高度情報化社会実現のためにも実用化させることは必須である。

b) GaN HFET パワーデバイスについては、ノーマリーオフ耐圧、オン抵抗、電流コラプス等の問題が解決されれば、実用化になってくる。実用となるのは、Si で実現できていない、MHz 帯でのスイッチング部分であると考えられる。

- c) ハイパワーの領域では、デバイスの構造上縦型デバイスとすることが必須であろう。**GaN** においては縦構造デバイスを実現するための検討が始まったところであり、その可能性は未知である。低欠陥の低抵抗基板が実現したとすれば、**GaN** の特性からみて **SiC** がカバーすると予想されている領域のかなりの部分をカバーできると予想される。