

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**

平成29年3月

**Technological Issues and Future Prospects of GaN and
Related Semiconductor Devices**

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-FY2016-PP-08

概要

GaN 系半導体はその薄膜およびバルク結晶の成長技術が急速に進展しつつあり、その大きなバンドギャップと光学物性や電気特性、また組成変調した多層構造のもたらす機能によって、様々な応用展開が期待されている。そこで、GaN 系半導体の材料としての特徴や魅力を踏まえつつ、レーザーダイオード、高周波通信デバイス、パワーデバイス等の次世代デバイスへの応用のための技術開発の現状を調査し、今後に注力すべき技術開発課題を明確化した。

Summary

The recent progress of crystal growth technologies has achieved a remarkable improvement of the crystal qualities of GaN and its related semiconductors in the forms of both epitaxially-grown thin films and bulk crystals. The GaN devices are expected to be developed for various applications in near future because of the attractive physical properties of GaN including wide bandgap, optical properties and electrical properties. In this report, the current status of the researches and developments of laser diodes, high-frequency communication devices, and power devices are summarized to clarify the important technological challenges.

目次

概要

1. GaN 系半導体の物性からみた特徴.....	1
1.1 半導体としての GaN の特徴.....	1
2. GaN 系半導体の成長技術の進展と開発課題.....	3
2.1 GaN 結晶成長技術の現状と課題.....	3
2.2 ヘテロエピタキシャル成長用基板の選択.....	3
2.3 GaN バルク結晶成長法.....	4
3. GaN 系半導体を応用した次世代光デバイスと技術開発課題.....	5
3.1 GaN 系半導体レーザダイオード (LD) 技術への期待.....	5
3.2 GaN 系 LD 技術の現状と主な課題.....	5
3.3 GaN 系 LD のディスプレイ・プロジェクタ応用.....	7
3.4 GaN 系 LD のレーザ照明応用.....	9
3.5 GaN 系 LD のその他の応用.....	9
4. GaN 系半導体を利用した次世代高周波デバイスと技術開発課題.....	10
4.1 国内通信の利用状況.....	10
4.2 ミリ波通信を利用した次世代通信技術への期待.....	10
4.3 GaN 系半導体の高周波デバイス技術とその課題.....	11
4.4 高速・高周波動作のための短チャネル化技術とその技術課題.....	12
5. GaN 系半導体を利用した次世代パワーデバイスとその技術開発課題.....	13
5.1 横型 HEMT 構造と縦型構造.....	13
5.2 パワー MOSFET 作製プロセス技術の現状と課題.....	14
6. 政策立案のための提案.....	16
参考文献.....	16

1. GaN 系半導体の物性からみた特徴

1.1 半導体としての GaN の特徴

GaN 系半導体は、物性の観点から発光デバイス材料、電子デバイス材料として多くの魅力的な特徴を持つ。ワイドバンドギャップ材料であるため、発光デバイスでは青色～紫外光の発光用の候補材料となり、また電子デバイスでは高電圧下での動作に適合している。SiC を始め、ワイドバンドギャップを持つ材料は他にもあるが、GaN 系の材料には以下に挙げる応用上の特徴がある。

(1) 発光デバイス材料としての魅力

発光デバイスの波長はバンドギャップのエネルギーで決定される。GaN は 3.4 eV のバンドギャップを持ち、そこからの発光は紫外光となる。ところが、GaN の結晶格子の一部を他の元素で置換することで得られる InGaIn 及び InGaAlIn まで含めた GaN 系化合物半導体は、組成の変化に応じて連続的にバンドギャップが変化し、InN の 0.7～0.8 eV から、AlN の 6.2 eV まで制御し得ることが大きな特徴である。格子定数もまた組成に応じて連続的に変化するが、エピタキシャル成長技術を用いて互いに積層すれば、非常に広いエネルギー範囲で発光波長を制御可能となる。

また、バンドギャップの異なる材料を数 nm 間隔で積層した構造は量子井戸構造と呼ばれ、高効率な発光ダイオード (LED) やレーザダイオード (LD) の形成には不可欠な構造である。これは電界に沿って流れ込む電子とホールを空間的に閉じ込めて再結合させるものであり、上記のエピタキシャル成長技術によって組成を変調しながら繰り返し相互に成長させた構造が用いられる。

もう 1 つの大きな特徴は、直接遷移型半導体であることである。これはバンド間の電子の遷移に運動量変化を伴わない性質のことを指しており、発光デバイスには不可欠な性質である。

(2) 電子デバイス材料としての魅力

GaN 系半導体の大きな特徴として、高周波電子デバイスへの応用に有利な、AlGaIn/GaN のヘテロエピ構造を持つデバイスの作製技術が既に確立されていることが挙げられる。GaN は c 軸方向に自発分極を持つ結晶であるが、AlGaIn/GaN 界面ではこれに格子歪みに伴うピエゾ分極効果が加わって電荷が誘起され、高密度の 2 次元電子ガス (2DEG) を形成する。これをチャネル電荷として用いる構造を、高電子移動度トランジスタ (HEMT)、或いはヘテロ構造一電界効果トランジスタ (HFET) と呼ぶ。2DEG の濃度は $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ と高く、しかも $2.7 \times 10^7 \text{cm/s}$ と優れた飽和電子速度 (Si の約 2 倍以上) を持つ。そのため限界となる動作周波数 (電流利得遮断周波数) は、既に 500 GHz を超える値が実証され[1]、InP に次いで高周波動作が可能な材料である。これは、超微細加工を進めることで 100 GHz を超える Si や、携帯電話等の通信デバイスとして汎用的に用いられる GaAs 系を大きく上回る特性を期待できる。

一方、GaN をパワーデバイスとして利用する場合に、高電圧印加してもオフ状態を維持するための耐圧層の役割を果たすのはオフ時に広がる空乏層であり、設計耐圧は GaN 中にかかる電界が絶縁破壊電界強度 (臨界電界強度) を超えないように決められる。同じ印加電圧でもドーパ濃度の低いときに空乏層幅は大きく広がるため、より大きな耐圧性能が得られる一方で、ドーパ濃度を下げ過ぎるとオン動作時の導通抵抗 (オン抵抗) による損失を増大させてしまう。そのため耐圧性能とオン抵抗低減はトレードオフの関係にあり、これが限界性能を決める。そこで、材料固有の絶縁破壊電界強度やキャリア移動度の値の違いによって限界値に大きな違いが生じる。Baliga の性能指数 (BFOM) とは、ユニポーラデバイス (キャリアが電子またはホールのどちらか一方のみで動作するデバイス) における導通抵抗の下限値に基づき、Si に対する利得を数値化した係数である。絶縁破壊電界強度は、主としてバンドギャップの関数であるので、バンドギャップの大きい GaN は、まだ報告値に曖昧さがあるものの 3.5 MV/cm、或いはそれを超える大きな値を示すという期待がある[2],[3]。これを仮定すると、GaN の BFOM は～900 前後の優れた値が期

待できる。また、高周波動作時の利得を考えるには、導通損失に加え、スイッチング時の損失の低減が重要となる。後者を入力キャパシタンスによって表現し、設計耐圧や入力電圧に依存する項を除いて物性による定数部分だけを抜き出したものが、高周波の Baliga の性能指数 (BHFFOM) である。BFOM と同じく Si に対する利得係数で表わすと、GaN で ~ 100 となり、GaN は単に耐圧に優れるだけでなく、高周波動作でより優位となる材料である。これらのデバイス特性を決める重要な物性パラメータを表 1 にまとめた。

表 1 各種半導体材料の物性の比較

	ダイヤモンド	GaN	4H-SiC	GaAs	Si
バンドギャップ (eV)	5.5	3.4	3.3	1.4	1.1
臨界電界強度 (MV/cm)	8	~ 3.5	2.8	0.4	0.3
電子飽和速度 (cm/s)	2.7×10^7	2.7×10^7	2.2×10^7	2.0×10^7	1.0×10^7
電子移動度 (cm^2/Vs)	2000	~ 1000	1000	8500	1350
熱伝導度 ($\text{W}/\text{cm} \cdot \text{K}$)	20	2	4.9	0.5	1.5
Baliga のパワーデバイス性能指数 (BFM)*	13000	~ 900	500	16	1
Baliga の高周波パワーデバイス性能指数 (BHFFOM)**	1100	~ 100	65	11	1

注) * 仮定したパラメータを用いて、 $\epsilon \mu_e E_c^3$ の Si に対する比を計算した (ϵ : 誘電率、 μ_e 電子の移動度、 E_c 臨界電界強度)。** 仮定したパラメータより、 $b_e \epsilon c h^2$ の Si に対する比を計算した。

(3) 電子デバイス応用のために解明すべき物性

① 絶縁破壊電界強度 (臨界電界強度)

パワーデバイスの限界性能や、高周波デバイスの出力の限界性能を決定する上で重要となる物性パラメータとして、絶縁破壊電界強度が挙げられる。これは材料中でアバランシェ降伏現象が生じ、それ以上電界が印加できないという電界のことであり、デバイスの理論上の動作限界を決める最も基本的なパラメータである。GaN は高い絶縁破壊電界強度が期待されるが、その具体的な値は未だに調査段階にあり、研究者の中でも明確な合意は得られていない。その理由の 1 つは、物性値推定に堪える品質のバルク結晶が得られていなかったことである。既に述べたとおり、縦型のショットキーバリアダイオードの研究から、実効的に 3.5 MV/cm 或いは 3.75 MV/cm といった大きな値が示唆され始めており [2],[3]、これを確定させるには高品質なバルク結晶を用いてアバランシェ過程の把握が必要である。

② 電子移動度、キャリア寿命、電子構造

結晶中のキャリア挙動はデバイス設計に欠かせない知見であるが、結晶品質の影響を直接的に受けるものであり、高品質な結晶を用いた基礎物性評価が必要な段階にある。AlGaIn/GaN のヘテロ構造に生じる 2DEG は、バルクよりもはるかに高い移動度を示すが ($1800 \sim 2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)、バルク中の電子移動度についてはおよそ $1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と Si や 4H-SiC とほぼ同等の値と考えられている。電子デバイスを設計する際には、ドーピング濃度による移動度変化の正確な把握が重要であり、また 4H-SiC 同様に超高耐圧素子のためにバイポーラ動作を想定すると、バルク結晶中のキャリア寿命についての制御技術が重要となる。

また、電子デバイス設計の基礎となる電子構造やバンドアライメントについての知見も十分ではない。組成の異なる界面での間の電位障壁の高さは 2DEG の性質に大きく影響し、影響などの

詳細な解明が待たれる。また、オーミック/ショットキー障壁の制御の観点から、各種金属電極とのアライメントの把握についても基礎的な調査が必要な段階である。これらの諸物性の系統的な調査が進み、データベース化されることが期待される。

2. GaN 系半導体の成長技術の進展と開発課題

2.1 GaN 結晶成長技術の現状と課題

異種基板上へのヘテロエピタキシャル技術の成功によって GaN のデバイス技術は開花したが、依然としてその結晶品質やヘテロ界面特性の制御がデバイス性能を制約する因子となっている。ヘテロエピタキシーでは、格子不整合に由来した欠陥が生じ、結晶品質の観点でホモエピタキシャル成長に比べて大きく劣るのだが、現状では GaN の基板は高価であり、安価な基板の上に成長させた GaN ヘテロエピ層の利用が進んでいる。一方で、電子デバイスでは、発光デバイスに比べてより厳しく結晶品質が要求されている点には注意が必要である。結晶品質がキャリアの輸送に直接的に影響を与えるだけでなく、オフ動作時の耐圧設計が欠陥を介したリーク電流の発生によって制限されるという問題がある。

高周波デバイスのようにヘテロエピタキシャル構造の利用がある一方、高耐圧のパワーデバイスでは、縦型デバイスであるために低転位密度のバルク結晶が不可欠となり、これが特性の大きな制約となっている。HVPE 法によるホモエピタキシャル成長では $\sim 10^6 \text{cm}^{-2}$ まで転位密度の低減が達成されつつあり、これを用いた優れた耐圧特性が報告され始めている。また、新たな結晶成長技術として、転位密度 $\sim 10^3 \text{cm}^{-2}$ までの低減を視野にアモノサーマル法やフラックス法等が検討されており、期待を集めている。このように、いよいよ電子デバイスグレードの結晶の製造が検討され始めた段階であり、今後の進展が注目される。

2.2 ヘテロエピタキシャル成長用基板の選択

現在までに、基板材料としてサファイヤ、GaAs、SiC、Si などを用いてヘテロエピタキシャル成長が行われている。これらのヘテロエピ結晶は格子のミスフィットにより高密度の転移欠陥が含まれるのが通常であり、理想的な結晶成長とはならない。後述するように現状の横型 HEMT 構造で、実用に堪える耐圧特性を持つパワーデバイスが実現できていることは、むしろ朗報である。GaN 成長用の基板として歴史的に長く使われてきたのはサファイヤ基板である。しかし熱伝導率が低く、特に高出力なトランジスタ応用では放熱の面で制約が生じてしまう欠点がある。一方、SiC 基板は、ミスフィットが数%と結晶構造の整合性があることから高品質結晶成長に適する。またサファイヤに比べて熱伝導率の点で優位となるが、コスト低減が課題である。また、GaAs 基板は、ミスフィットが $\sim 20\%$ と非常に大きいものの、熱膨張率が GaN と近く、成長には有利な基板である。

これらの基板に比べると Si 基板は圧倒的に低コストであり、大口径ウェハが入手できる。実際、大口径 Si ウェハ上に数 μm のエピ層を成長する技術が確立されつつあるところであり、量産性とコストの点から大きな利点がある。しかし GaN との格子ミスフィットが $\sim 18\%$ と大きく、熱膨張率の差も大きいことから良質なエピタキシャル膜の成長は容易ではない。そのため基板と GaN ヘテロ構造との間に挿入するバッファ層の制御が重要な技術となっている。従来は 10^9cm^{-2} 以上の転移が避けられないという問題があったが、近年の技術向上で結晶品質が大幅に改善されつつあり、今後の進展が期待される。

2.3 GaN バルク結晶成長法

高耐圧デバイスを設計する際に用いる縦型デバイスには、高品質なバルク結晶が必要となる。そのため大口径ウェハの大量供給技術の確立は急務となる。現在は、数種類のバルク結晶成長手法が研究開発段階にあり、代表的な手法は以下の 3 つが挙げられる。表 2 には、これらの手法の特徴をまとめてある。転位密度の低減のほか、成長時の不純物として特に酸素の混入の抑制が重要な課題となっている。

(1) HVPE 法

水素をキャリアガスとして Ga と HCl を高温で反応させて GaCl(g) を発生させ、これと NH₃ を基板上で反応させて GaN とする。成長温度は通常 1000℃～1100℃程度である。500 μm 以上の厚さにまで GaN 層を成長させてから元の基板を機械加工で除去する。GaN 基板上的ホモエピタキシャルとは違い、GaAs (格子ミスフィット～20%)、サファイヤ (格子ミスフィット～18%) 等の異種基板を用いたヘテロエピタキシャル成長のため、格子不整合に課題がある。GaAs はミスフィットが大きいものの、熱膨張率が GaN と近いため、高温での成膜に用いやすい。

近年、意図的に再表面に規則的なピット (窪み) を形成して成長を行い、欠陥をピットに局所的に集合させ、その周辺部の転位密度を～10⁴cm⁻² 台へ低減する技術が検討されている。大口径ウェハ上で低転位密度の領域を広げる手法を、現在開発中である。

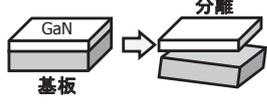
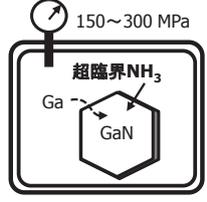
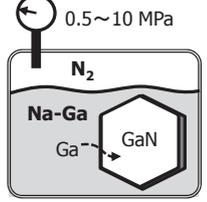
(2) アモノサーマル法

高温・高圧下にて超臨界状態としたアンモニア溶媒中に、前駆体として Ga 金属または GaN 粉末を溶解し、NH₄Cl 等を鉍化剤にして GaN 結晶を育成する方法である。容器の中に温度差を設けることで、片側で溶解、反対側で析出が生じさせる。種結晶からの育成であるため格子不整合の問題がない、ウェハのそりが無い等の長所があり、非常に高品質な結晶が得られる一方、高温・高圧の反応容器で数十時間をかけた生産が必要となる点が欠点である。従来のアルカリ性アモノサーマル法を改良した酸性アモノサーマル法では 150～300 MPa、500℃～650℃が必要とされる。高温・高圧を要する製造条件の改良と、結晶成長の高速化が大きな課題である。

(3) フラックス法

熔融 Na を溶媒として Ga と N₂ を溶解・析出させる方法である。Na と Ga の比を 4:1 とし、N₂ の溶解には 1000℃、100 気圧の高温・高圧条件下で、融液を流動させながら成長させる必要がある。成長を安定化し大口径で成長させるには大きな課題があるものの、成長初期には低欠陥密度の高品質結晶が得られる。そこで、フラックス法で種結晶を作成してから HVPE 法で厚膜を成長させて低欠陥密度の結晶を比較的短時間で成長する方法も試みられている。

表 2 現在検討されている主な GaN バルク結晶成長法の条件例の比較

製造手法	気相 (HVPE) 法	アモノサーマル法 (酸性アモノサーマル)	フラックス法
結晶サイズ	2~4 インチ事業化 6 インチ開発中	2 インチ	45 mm
欠陥密度	$< 3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 転位をピットに集めて成長する プロセスの実証あり。	$< 5 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$	$< 10^6 \text{ cm}^{-2}$
成長速度	$> 100 \mu\text{m/hr}$	$\sim 10 \mu\text{m/hr}$	—
合成温度	1010°C	500~650°C	800~900°C
合成圧力	0.1 Mpa	150~300MPa	0.5~10 Mpa
媒体	H ₂	超臨界 NH ₃	熔融 Na-Ga
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 高温常圧での気相成長 比較的成長速度速い GaAs 等のヘテロ基板利用 欠陥低減に課題。 	<ul style="list-style-type: none"> 高品質な結晶の可能性 大型化検討中 低成長速度 高温・高圧容器 	<ul style="list-style-type: none"> 高品質結晶 低成長速度 高温・高圧容器 (N₂ 加圧)
概略			

3. GaN 系半導体を応用した次世代光デバイスと技術開発課題

3.1 GaN 系半導体レーザダイオード (LD) 技術への期待

発光デバイスとしては既に、発光ダイオード (LED) 技術が広く普及し、特に照明分野では本格的な普及期を迎えている。その一方、次世代の発光デバイスとして GaN 系半導体のレーザダイオード (LD) の技術革新が急速に進展しており、その普及に期待が寄せられている。LD とは、半導体のキャリア再結合発光を利用したレーザであり、電子と正孔が再結合するときにバンドギャップのエネルギーに相当する波長の光を放出するのを利用する。エネルギー利用効率の観点では、白熱ランプ等の熱放出による損失が大きい発光素子よりも優れていることはもちろん、LED と比べても特に高出力動作時に高効率であるという特徴がある。そのため、照明・ディスプレイの各アプリケーションでの省エネルギー効果が期待され、コスト低減や生産性の向上で普及が期待できる段階にある。また、他のレーザ技術と比較してもエネルギー利用効率が高いという特長を生かし、産業用の大出力レーザにおいて、そのレーザの励起光源として LD を利用する (LD 励起固体レーザ) ことでも省エネルギー効果が期待できる。

3.2 GaN 系 LD 技術の現状と主な課題[4],[5]

(1) LD の効率

赤色 LD には GaAs 系半導体材料が用いられ、180 mW の出力で効率 33% が得られている。面発光の方式とすれば効率向上が見込まれる。一方、GaN 系の青色レーザは既に比較的高い変換効率が達成されており、例えば波長 455 nm、光出力 4.1 W の製品で 39% が達成されている。GaN 基板中の欠陥は発光効率の低下や低寿命化の原因となるため、高効率化のためには低転位密度の基

板が要求される。また、次に述べるとおり GaN 系の化合物組成の変調によって長波長化した際には、緑色～赤色にかけての発光効率の低下は顕著であり、その向上が課題である。

(2) GaN 系緑色 LD の開発と課題

発光層の組成を変えて長波長化して緑色を得る技術開発が精力的に進められている。原理的には InGaN の In 組成の調整によって発振波長は紫色から赤色までカバーできるはずなのだが、長波長化と共に急速に発光効率が低下する問題がある。結晶成長の工夫などの結果、532 nm の緑色で変換効率が 10% を超えたものが得られているが、その向上が必要となっている。

効率低下の理由を図 1 に模式的に示した。第一に GaN 系結晶の c 軸方向への分極の効果である。格子定数の異なる InGaN を GaN 上に成長させたときに生じる歪みによってこの分極は大きく変調され、界面には大きなピエゾ電界が発生する。In 組成を増大させるほどこの電界が増大し、発光層内での電子と正孔の分離を引き起こす方向に働くため、長波長領域になるほど必然的に発光効率が低下してしまう。また、高出力化のために電流を増大すると、注入されたキャリアによってピエゾ電界が遮蔽された結果、バンドギャップが変調されて発光波長がブルーシフト（短波長化）する問題がある。これは特に LED よりも、駆動電流の大きな LD において深刻な問題となる。この対策としては、積層構造や界面近傍の組成の工夫によってピエゾ電界を緩和させるか、或いは c 軸方向ではない結晶面を利用して、図 2 に示したような非極性面や半極性面上で形成すること（後述）が考えられる。また、第二の課題は、InGaN 結晶中の組成揺らぎによる欠陥形成である。In 凝集した領域では非発光性の欠陥を発生させるだけでなく、組成揺らぎによるバンドギャップのばらつきがレーザの閾値やスローブ効率を大きく劣化させる。そこで In 濃度の高い領域での凝集を防いだ結晶成長技術の開発が重要である。

このように緑色の GaN 系 LD は開発途上であり、そこで現在の緑色レーザの主流は赤外レーザ光（1064nm）を励起光に用いた固体レーザからの 532 nm の第 2 高調波を利用するものである。波長変換効率は、たかだか 30% 程度であるため、励起光の生成からの総合的な効率は 15–20% 程度に制約されている。このことから、緑色を直接発振できる高効率な GaN 系緑色レーザの実現が、サイズ、安定性だけでなく、効率の向上の観点からも望まれている。

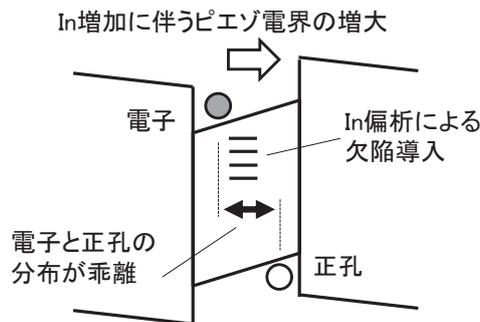


図 1 InGaN の In 濃度増大に伴う発光効率低下の説明

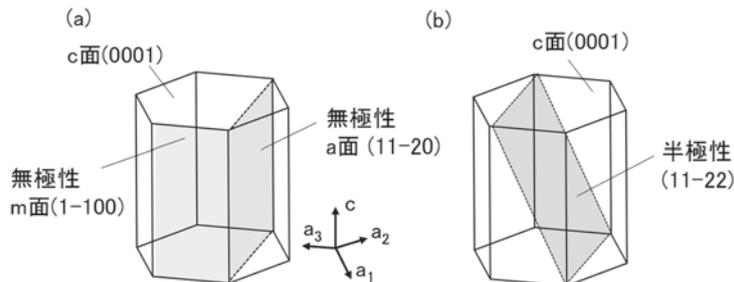


図 2 GaN 結晶の(a)非極性面と(b)半極性面

(3) 無極性、半極性面利用への期待

既に述べたとおり、GaN の c 軸方向に生じる分極は、In を加えた組成の層を成長させた界面で大きく発生し、キャリアを分離させて発光効率を低下させてしまう。この効果を回避するために、自発分極を持つ(0001)c 面に替えて、図 2 に模式的に示すような無極性面として{1-100}や{11-20}、半極性面である{11-22}、{1-101}、{20-21}の結晶面を利用することが将来技術として注目される。無極性の(1-100)m 面を用いた波長 499.8 nm の発振[6]のほか、半極性の(20-21)面での 536 nm での室温連続発振が報告されている。このとき In 組成を増大した際に生じる電流注入量増大による波長シフトの抑制だけのほか、成長条件の工夫によって、通常用いられる c 面よりも In 組成の揺らぎを抑制できる可能性も示されている[7]。しかしまだ効率の面では c 面に劣っている段階であり、これらの結晶面での結晶成長と素子特性の向上に関する基礎的な検討の進展が期待される。

(4) 高出力 LD の開発と課題

高出力レーザが既に、赤外領域について CO₂ レーザやファイバーレーザを用いて広く利用されている。一方、高出力 LD が実用化するとコンパクト化と低コスト化が図れるほか、緑～青色の LD が期待できる。高出力レーザは加工技術への応用が期待でき、特に金属加工の場合には反射率の高い赤外領域よりも緑～青色のレーザが要求される。高出力化のために、多数の素子を並べるアレイ化も検討されているが、コストの観点からは、やはり単体の LD での高出力化の技術が重要である。高出力化のためには、低転位密度の GaN 基板が不可欠とされているが、結晶性と効率との相関は十分に解明されていない。そこで効率を決める要因についての学術的な知見の蓄積と同時に、高品質な結晶成長技術の進展が期待される。

一方、半導体レーザを励起用を用いて、これをファイバーアンプと組み合わせることで高出力なレーザを構成することはできるが、この場合のエネルギー効率は、ファイバーレーザの低い効率に制約されてしまうため、省エネの観点では高出力の LD への置き換えが期待される。

3.3 GaN 系 LD のディスプレイ・プロジェクタ応用[5],[8],[9]

(1) レーザ TV への応用

レーザ TV は、光源として光の 3 原色を構成する半導体レーザを用いたディスプレイである。レーザ TV の最大の特徴は、高い色再現性である。レーザ光源は高輝度で色純度が高いため、LED 光源に比べて優れた色再現性が実現可能である。またクロストークを減らせるために画像にぼやけが少ないという長所もあり、特に 3D 映像表示などの用途では優位性が期待できる。さらに、発光効率の高いレーザ光源を使用できれば、省エネルギーの観点でも優れている。図 3 に LED 光源と、レーザ光源のスペクトルの違いを模式的に示した。

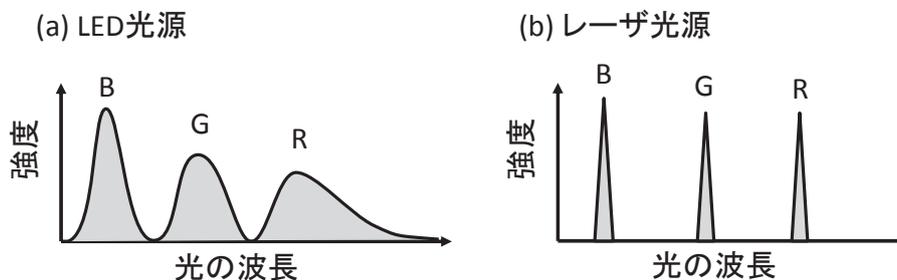


図 3 LED 光源とレーザ光源の色純度の違いの模式図

米国では背面投射型（リアプロジェクション方式）で既に大画面 TV 分野で先行しており、2010 年より国内販売も開始されている。背面投射型の光源は、従来は水銀ランプが用いられたが、これを LD の光を高速でパルス制御することで置き換えられている。一方、背面投射型ではなく、通常型のバックライト方式の液晶テレビにおいても、バックライト光源に LD を部分的に用いた製品（赤色 LD をシアン色の LED と組み合わせたハイブリッド光源）が登場している。従来の白色 LED では、青色に比べ、緑色と赤色の純度が低いという課題があったため、赤色だけの LD への置き換えでも色再現性の顕著な向上がある。将来的には、3 原色の LD への置き換えが期待される。

LD のディスプレイ応用上の障害として、レーザ特有のスペックルノイズが挙げられる。これは位相の揃ったレーザ光がスクリーン上の微小な凹凸で干渉を起こして画像に斑点状のノイズが生じるものであり、その対策が不可欠である。まずレーザ光源においては、もともと波長にばらつきのある複数の LD を組み合わせるなど波長スペクトル幅を意図的に広げること、また光学系においては時間的にスクリーン上での位相を変化させる、或いはレーザ光を直交する 2 つの偏光に分離して再度重ねるなど様々な工夫が取られ、これらを組み合わせることで許容範囲までの低減が図られている。画質向上にはスペックルノイズ低減技術の向上が重要である。

(2) レーザプロジェクターへの応用

液晶 TV と同様に、プロジェクタの光源として、従来のランプ光源に代わり LD を光源とする製品の普及が始まっている。前述のとおり、色再現性を大きく改善することが可能であるとの特徴がある。また、LD の特徴である、小型、低発熱、低消費電力の長所を生かし、携帯用のプロジェクタ（ピコプロジェクタ）が開発されており、デジタルカメラや携帯電話に収まるほど小さなプロジェクタの需要などが見込まれる。

(3) ディスプレイ・プロジェクタ応用 LD 光源の開発状況

レーザ TV は単板式であり、RGB に対応する単色映像を 1 つの画素に時分割で順次表示する方式で画像を形成する（フィールドシーケンシャル方式）。赤色レーザ光源には、波長 640nm 以下、10 W 以上程度の出力が必要とされ、GaAs 上の AlInP 系の活性層を用いた LD で実現している。DVD 用に広く生産されているレーザダイオードは波長 660 nm、出力 350mW である。これを活性層構造の調整によって短波長に最適化し、さらに多数の素子を並べたアレイとすることで高出力化を図っている。

一方、緑色レーザ光源は、青色 LD で用いられる GaN 系の長波長化が期待されているが、未だに高出力化の目途が立っていない。そこで現状では、高出力動作が可能な 1064 nm の固体レーザの内部波長変換による第二高調波によって 532nm の緑色光源を作る方式で代替している。この場合、波長変換効率等を考慮すると、励起用光源には 27 W 程度の出力が要求される。波長 808 nm を発振する GaAs 系レーザ光源を用いて 11.8 W の第二高調波が得られている。将来的には、緑色を LD から直接取り出せれば、光学系の単純化によって小型化、薄型化が可能であり、省エネルギー性も向上する。

青色レーザ光源には、波長 440nm 以上で光出力 10W の青色 LD が必要となる。ブルーレイ用に開発された GaN 系青紫色レーザダイオードの In 組成を増大させて長波長化し、442nm としたものが利用されている。出力を稼ぐために複数の素子を組み合わせることで 10W の出力を確保しているものの、今後の高出力化が期待される。

3.4 GaN 系 LD のレーザ照明応用[5],[8],[9]

(1) レーザ照明の利点

LED で面光源を構成するには、複数個の LED を面内に並べる必要がある。この点を克服し得る技術として、LD 光を点光源として用い、蛍光体を励起して面状に発光させるレーザ照明がある。ここで点光源として LD を用いるのは、強い光量を得るためである。LED で光量を増大させようとするれば発熱の影響で効率が著しく低下する欠点があるのに比べ、殆ど効率を落とさずに高強度の発光が可能なのが LD 光源の特徴である。光量が豊富で、高光束を少ない素子数で実現でき、指向性が強いためにリフレクタ等の設計が容易という長所が期待できる。実用上の問題は、LD の効率の向上と、製造コスト低減である。蛍光体を用いずに、RGB 各色の LD の強度によって照射光を制御するものも提案されている。

このほか、レーザ光源の特性である、指向性の強さや減衰しにくさを生かし、長距離の照射用の光源としても期待できる。さらに、光ファイバーを用いても損失が小さいことから光源から照射が必要な位置までファイバーで誘導する使い方もある。照射源を光源から大きく離して使うことで発熱のない照明を実現できる上、1つの光源からファイバーを分岐させて複数の箇所でも同時に取り出して使うことも可能となる。

(2) レーザ照明へ期待される応用例

レーザ照明は家庭照明や施設照明にも利用できるが、特に高輝度において利点のある照明であることを考慮すると、工場や店舗施設の照明、特に大規模空間の屋外照明の用途が相応しく、例えば水銀灯 (HID) の置き換えが考えられる。また、LED よりも約 1000 倍もの明るさを実現できることから、省エネルギーな自動車ヘッドライトへの応用が有望である。安全性の観点からは、高い光密度での照射による発熱や材料損傷を防ぐための照射の仕方を工夫する必要がある。

3.5 GaN 系 LD のその他の応用[4],[5]

(1) LD の近未来農業への応用

果実や種子を生産するための植物工場での栽培に必要となる高強度の光源としても LD は有望である。例えばイネであれば青色光 400~500nm や、光合成を促す 670~685 nm によって成長が促進されることがわかっており、波長選択的にレーザ光を長時間照射することによって、例えばイネの植え付けから 3 か月で収穫が可能となるなど効率的な栽培が実現する。電力の安価な供給がある地域であれば実際の栽培手段としての可能性がある。

また、イネの場合、遺伝子解析によって幼苗の時点で育種目的に沿った遺伝子を持つ株を選別することが可能であり、レーザ光による栽培促進で短期間で品種開発も可能になると考えられる。その他にも、紫外光の照射が遺伝子発現を誘導し、紫外線ストレスへの耐性や病害耐性が向上する例など、発育を制御する応用も可能である。

(2) 高出力レーザの加工技術への応用

パワーレーザと呼ばれる高出力レーザの重要な応用分野の 1 つが微細加工への応用である。これには切断、溶接、マーキング等のほか、医療用レーザメスのような用途もある。レーザ加工は多品種少量生産において強みを持ち、スマートフォンの製造ラインから自動車まで欠かせない技術である。現在の加工用レーザ光源の主流は、波長 10.6 μm の CO₂ レーザ、1 μm 帯のファイバーレーザ、900 nm の LD、などであるが、出力が大きいものの赤外波長域である。この波長域では反射率の高い金属加工においては反射損失が大きく、吸収剤を塗布するなどの前処理が必要となったり、より高い出力のレーザが必要となることがある。そこで、反射率を相対的に抑制できる波長 600 nm 以下の青~緑色の高出力 LD が求められる。青色 (450 nm) であれば、赤外光よりも吸収率が 1 桁改善するなど劇的な効果が期待される。

以上のように様々に挙げた LD の有望な用途について、LD を光源として用いることの効果を以下の表 3 にまとめておく。

表 3 レーザダイオードの主な応用における特徴（文献[5]に基づき作成）

	低消費電力	演色性	小型化	高輝度	備考
レーザ TV	◎	◎	○		
レーザ照明	○		○	○	ファイバー利用による自由な配置
中～大プロジェクタ	○	◎	○	◎	
携帯プロジェクタ	◎		◎		

4. GaN 系半導体を利用した次世代高周波デバイスと技術開発課題

4.1 国内通信の利用状況

携帯電話、LAN 利用による既存周波数帯の利用率が切迫しており、利用周波数帯の再配置を含めた、周波数の効率的な利用が必要である。その中で、ミリ波（30-300 GHz）は未利用な周波数帯が広く残された帯域であり[11]、大容量通信や高速通信での利用に適している。既に無線通信サービスなど高周波帯域の利用が徐々に開始されているが、今後は大容量通信などミリ波の特徴を生かした有効利用が期待される。

4.2 ミリ波通信を利用した次世代通信技術への期待[10]

ミリ波帯は、一般に Ka 帯（26-40 GHz）、V 帯（40-75 GHz）、W 帯（75-111 GHz）等に分類される。その特徴は、広帯域利用が可能であり大容量通信に利用できることである。それ以外にも短波長ゆえの指向性を持ち、それを生かして同一空間で同一周波数帯の利用率を向上させるなども期待される。周波数帯が上がるほど信号処理・通信デバイスへの要求も厳しく、特に長距離無線通信における伝送距離や、広周波数帯域通信での通信容量は電力で制約されているため、高出力、低損失で動作する GaN 系半導体デバイスへの期待が大きい[12]。各種の高周波通信用デバイス材料の動作周波数と出力によるすみ分けについて、図 4 に示した。車線部の広い周波数範囲で高出力用途を担うことができるのが GaN である。

例えば W 帯では高周波数域の特性を生かし、従来は光ファイバー以外では不可能であった 5～10 Gbps 級の超高速無線伝送システムが期待されている。大気中での散乱が少ない帯域であるため、河川や海で隔てられた遠隔地や山間部との長距離での高速通信システムにも期待できる。Ka 帯についても、W 帯同様に比較的長距離での大容量無線通信への利用が期待され、衛星など長距離通信への応用も含まれる。一方、V 帯は大気中での散乱を受け易く長距離通信には適さないが、短距離大容量無線通信システムへの応用が想定される。このような応用は、例えば交通制御システムでの車両間通信や、車載レーダーなどの用途である。

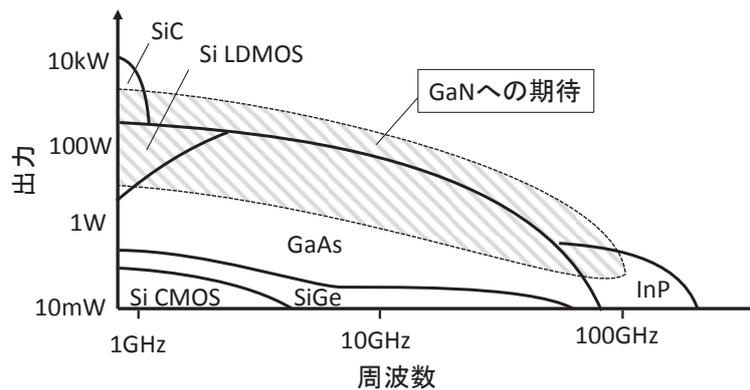


図 4 周波数と出力による通信デバイス用半導体材料のすみ分け（文献[12]を基に作成）

4.3 GaN 系半導体の高周波デバイス技術とその課題

(1) GaN 系半導体を用いた高周波デバイスの特徴

ミリ波帯域では、高周波ゆえに各回路構成部品を結ぶ伝送の整合条件が厳しく、多段増幅や出力合成回路を構成するのは損失の原因となる。そこで高利得、高耐圧特性を持つトランジスタ一段だけの単純な回路構成にて、十分な出力を得られるようなデバイスの開発が必要である。十分な利得を持ちながら高出力・高効率とするには、大きな絶縁破壊強度と高い飽和電子速度を兼ね備えた GaN は理想的である。既に述べたとおり、AlGaIn/GaN 界面の分極効果によって発生させた 2DEG をチャンネルとした HEMT 構造では電子のドリフト速度がバルクよりも速く、これが高周波動作を実現する。また、高濃度の 2DEG はソース・ドレイン抵抗等の高周波で顕在化し易い寄生抵抗成分を抑制できる。

高周波特性の基本的な性能指数は、電流利得がゼロとなる限界の周波数（電流利得遮断周波数 f_T ）で表わされる。GaN HEMT では既に 500 GHz の f_T が達成されるなど、ミリ波領域での高出力動作を含めた様々な周波数帯に対応可能なデバイスとしての期待は大きい[1],[13]。 f_T は、トランジスタ動作における各部分で生じる遅延時間の合計で決定される。遅延時間には主に、(i) ゲート直下の電子走行通時間に相当するトランジット遅延、(ii) ドレイン電極側のゲート電極端から伸びる空乏層での遅延時間に相当するドレイン遅延、(iii) 寄生抵抗や寄生容量に起因する RC 時定数に相当するチャージング遅延、の 3 成分がある[10]。このうち(i)の遅延がネックとなるため微細化（短チャンネル化）によって低減が試みられている（後述）。一方、(iii)の寄生成分は、GaN 系の場合には高濃度の 2DEG によって最小化されるが、(ii)のドレイン遅延については、GaN デバイスではドレイン電圧を比較的高く設定する必要があって完全に解消するのが難しい成分となっている。

(2) 高周波通信デバイスの開発状況

高周波 GaN 系 HEMT は、モノリシックマイクロ波集積回路（MMIC）として通信装置に利用される。GaN 系デバイスを利用した MMIC は、高周波数・高出力動作を小型装置で実現でき、無線通信基地局の用途では既に普及が始まっている。国内で 75 GHz での 3 段増幅回路を用いた 1.3W の MMIC の実証例[14]は、汎用的な GaAs ベースの MMIC に比べ出力が 16 倍であり、これを無線通信可能な距離に直すと 6 倍程度が期待できる結果である。

4.4 高速・高周波動作のための短チャネル化技術とその技術課題

(1) GaN 系半導体高周波トランジスタの短チャネル化の課題

高速動作のためには、図 5 の(a)に示すように微細加工によってゲート長さを短縮し、トランジスト遅延を最小化する必要がある。しかし、短チャネル化することで、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、という通常の FET スケーリングと同様の問題が生じる[15]。ショートチャネル効果の抑制には、ゲート方向の電界を相対的にチャネル方向の電界よりも強めればよいので、ゲート金属—チャネル間の物理的な距離を近づけて、ゲート長とのアスペクト比を低下させる必要がある。HEMT ではゲートとチャネルの間には AlGaIn 層が挟まれるため、チャネル長を 100 nm 以下までスケールアップするためには、AlGaIn 層の厚さを従来から用いられている 20~30 nm よりも薄膜化することが必要であるのだが、薄膜化し過ぎるとピエゾ電界が弱まって AlGaIn/GaN 界面の 2DEG 濃度が低下する問題がある。

(2) ゲートリセスエッチング技術

効果的にゲート—チャネル間を物理的に近づけてショートチャネル効果を抑制するのに有効な技術として、ゲート電極部分の直下の AlGaIn 層だけをエッチングして掘り込む方法がある。この構造を図 5 の(b)に示す。ゲート直下以外の部分の AlGaIn 層を厚く残しておけば、それらの領域の 2DEG 濃度は高く保たれるので、寄生成分であるソース・ドレイン抵抗を抑制したままショートチャネル効果を低減できる。しかも、電界が集中するドレイン側のゲート電極端部を AlGaIn 表面から離すことになるため、AlGaIn 表面準位への電子トラップによって生じるとされる電流コラプス現象（後述）の抑制にも貢献する。しかしながら、GaN 系半導体には選択エッチングの方法がなく、HCl 系の反応性イオンエッチングを時間制御してリセス深さを制御するしかなく、リセス深さの均一性、再現性や確実性、エッチング表面の平滑性などに課題がある。

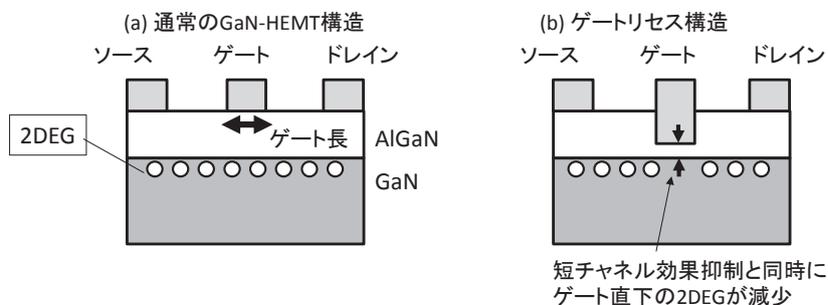


図 5 (a) HEMT 構造におけるゲート長短縮と(b)ゲートリセス構造の模式図

(3) ダブルヘテロ構造の利用[10]

ダブルヘテロ構造とは、2DEG を発生させる AlGaIn/GaN 界面の下部にもう 1 つ組成の異なる層を挿入してエネルギー障壁を新たに設けた構造であり、これによってチャネルへの電子閉じ込めを強化し、短チャネル効果を抑制することが期待できる。例えば、上下に同じ障壁層を持たせた AlGaIn/GaN/AlGaIn 構造や、p 型層を挿入した AlGaIn/n-GaN/p-GaN などが考えられる。これらのプロセスには積層技術に加え、ドーピングや活性化に関する要素技術の確立が求められる。

5. GaN 系半導体を利用した次世代パワーデバイスとその技術開発課題

5.1 横型 HEMT 構造と縦型構造

前節で述べた高周波デバイスは、横型 HEMT 構造の AlGaIn/GaN 界面でのピエゾ分極を利用することで、高周波でも低損失で動作させることができる特徴があった。同時に GaN はワイドギャップ半導体であるために高い電界までアバランシェ機構による絶縁破壊が生じないことから、高耐圧パワーデバイスへの応用が期待できる。高耐圧でありながら、他のパワーデバイスにはないほどの低抵抗、高周波動作が可能なトランジスタを目指すのが HEMT 構造のパワーデバイスであり、また GaN のバルク結晶が持つ高い絶縁破壊強度によって超高耐圧トランジスタを目指すのが縦型構造のパワーデバイスである。この 2 つの構造のそれぞれの特徴について表 4 にまとめた。

(1) 横型 HEMT 構造のパワーデバイス

前述の HEMT 構造の恩恵は、高キャリア濃度、高移動度によってオン抵抗を大きく低減できるだけでなく、高い飽和電子速度を持つために限界となる動作周波数が高いこと、さらに 2DEG 濃度が $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 以上と非常に高いためにソース・ドレイン部分での寄生抵抗を小さくできることである。そこで通信端末、通信基地局など、大出力でありながら高周波で動作するパワーデバイスとしての利用が期待できる。さらに、低抵抗のパワーデバイスとしての特徴を生かせれば、従来のシリコンパワーデバイスを置き換えるような数百 V までの用途として、家庭電器や産業機器のパワーコンディショナ分野での応用にも大きな可能性、また、高周波・大電力の非接触充電・給電のコントローラの応用も考えられる。

ただし、縦型ではバルク部分でのアバランシェ機構によって耐圧性能を持たせる構造であるのに対し、横方向に面内で電界のかかる HEMT 構造での耐圧の向上の指針は明確ではない。横方向に $100 \mu\text{m}$ を超える長いチャンネルを持つ HEMT 構造であれば既に 10kV を超える耐圧までが実証されているものの[16]、小型化という観点で現実的な短いチャンネルでの耐圧を考えると数百 V 程度までの応用に限定される。各機関で報告されている横型 HEMT での耐圧と、ゲート・ドレイン間距離（ドリフト長さ）との相関からは、実効的な破壊電界強度はおよそ $0.6 \sim 1.6 \text{ MV/cm}$ 相当に制限されている[17]。これにはゲート電極下のチャンネル部分やショットキー電極界面など、デバイス内にアバランシェ機構よりもはるかに小さな電界にしか耐えられない箇所が存在するためと思われる。その原因解明には不純物濃度や転位密度の違いが GaN 中の衝突イオン化係数に影響を与えるなど、結晶品質と破壊電界強度の相関を明確にする必要がある。

パワーデバイス応用という観点では、上記の 2DEG HEMT 構造は低抵抗化をもたらす一方で、デメリットがある。それは 2DEG の形成がゲートバイアスを必要としないため、ゲート電圧の印加がなくてもチャンネルが導通状態となる、いわゆるノーマリーオンのデバイスとなることである。このことは電源遮断時に回路が遮断できない点で、応用上の大きな障害となる。特にインバータ応用ではノイズ対策のためのマージンも考慮して $3 \sim 5 \text{ V}$ の閾値電圧が要求されることが多い。

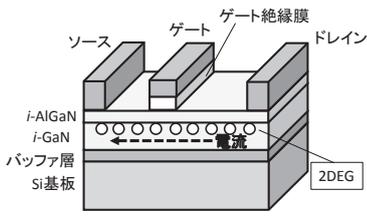
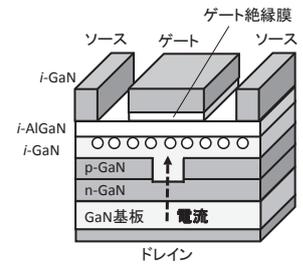
(2) 縦型構造のパワーデバイス

高耐圧、大電流用のパワーデバイスとするためには、耐圧構造が相対的に作りやすく、またチップ面積当たりの電流密度を大きく稼げる縦型構造が有利である。前述したとおり GaN の絶縁破壊強度は大きいと期待されており、GaN バルク基板を利用した縦型構造であれば SiC を上回る超高耐圧トランジスタが実現可能と期待される。ただし、この実用化には高品質な自立基板の形成が必須であり、大口径のバルク結晶成長技術の確立が待たれる。

国内外から、既に縦型デバイスでの超高耐圧動作実証が開始されており、ショットキーバリアダイオードの動作特性から $3.5 \text{ MV/cm} \sim 3.75 \text{ MV/cm}$ 絶縁破壊電界強度が観察されている[2],[3]。これは、4H-SiC の 2.8 MV/cm に比べて格段に大きく、GaN が超高耐圧動作において本質的にメ

リットを持つ可能性が示唆される。実際、最新の研究成果では縦型の MOSFET について、高耐圧でありながら、低いオン抵抗を示す動作が実証され始めている[18],[19]。2016 年 12 月には、素子構造の工夫によって 4H-SiC のドリフト抵抗によって制約される理論限界性能を超える、耐圧 1.7 kV、オン抵抗 1.0mΩ の縦型 MOSFET 動作実証が報告されている[18]。

表 4 GaN パワーMOSFET の横型/縦型の2つの素子構造とその特徴

各 MOSFET の模式図	横型 (HEMT 構造) MOSFET	縦型 MOSFET
		
各 MOSFET の特徴	低抵抗, 高周波動作	高出力, 高耐圧用の素子設計
結晶成長法と品質	Si 基板上ヘテロエピ結晶 欠陥密度低減が課題だが安価	高品質バルク結晶 結晶成長技術は研究途上
オン抵抗と動作周波数	チャネル抵抗, 寄生抵抗の低さ により高周波動作が可能	ドリフト層 = 高耐圧層 ドリフト電流が性能の限界
重要な技術課題	<ul style="list-style-type: none"> ヘテロエピ膜の結晶品質向上 ノーマリーオンの解消法の確立 電流コラプスの抑制 	<ul style="list-style-type: none"> 大口径バルク結晶製造技術の開発 ドーピング, イオン打ち込みと活性化等のデバイス要素技術確立

5.2 パワーMOSFET 作製プロセス技術の現状と課題

デバイス形成技術の確立には結晶成長技術と共に、多くの要素技術の確立が必要である。歴史的に要素技術が確立されているシリコンとは違い、GaN では多くの要素技術について開発途上である。例えばエピ成長中のドーピング制御技術、イオン注入とドーパント活性化技術、ゲート絶縁膜形成と界面特性制御、低抵抗オーミックコンタクト形成技術、エッチング加工技術などが挙げられる。ここでは、特にパワーMOSFET の作製技術の大きな課題について述べる。

(1) MOS 界面制御技術

パワーデバイスにおいて、特に整流素子（ショットキーバリアダイオード、PN 接合）と共にインバータを構成するスイッチを担うのが MOSFET である。MOSFET では、電流のオンとオフのスイッチングをゲート電極によって行う。ゲート電極と電流チャネルの間を電氣的に絶縁する層としてゲート絶縁膜と呼ばれる酸化層が GaN (AlGaIn) 上に成膜されて用いられる。GaN チャネルに対する電界効果と、絶縁膜の信頼性との兼ね合いで通常は数十～数百 nm の厚さで形成されて用いられる。Si や SiC の MOS デバイスのゲート絶縁膜には通常、熱酸化による低欠陥密度で清浄な SiO₂ 膜が用いられるが、GaN では熱酸化によって高品質な絶縁膜が期待できないため、ALD、MOCVD 法による Al₂O₃ や SiO₂ 堆積膜を用いている。しかしながら、これらの堆積膜と GaN の界面に導入される欠陥準位の密度は大きく、これがゲート電極による制御性、MOSFET の動作信頼性を大きく損なう大きな原因の 1 つとなっている。

多くの III-V 系半導体では MOS 界面で半導体表面が酸化することで界面欠陥を導入すると説明されることも多いが、GaN に対しては酸化の制御が重要である可能性も示唆されている。このように MOS 界面の高品質化のためには、従来の半導体界面制御技術の知見を生かした基礎研究が必要な段階である。

(2) MOSFET のノーマリーオフ化と閾値電圧の制御の試み

電力制御の用途では、システムのフェールセーフの要求から、ゲート電圧を印加しない状態の MOSFET がオフ状態となってシステムの電流を遮断することが要求される。これをノーマリーオフと呼ぶ。シリコンにおいてはチャンネルのドーパ濃度とゲート電極の仕事関数の選び方によって広く制御が可能であるのだが、AlGaIn/GaN 界面では 2DEG によるチャンネルが自発的に形成されるためゲート電圧を印加しない状態においてもチャンネル中に電荷が存在し、ノーマリーオンになってしまう。そこで現在のところ、ノーマリーオフ型の Si MOSFET と直列接続したカスコード構造によって実質的な閾値の制御が行われているが、素子抵抗が増えてしまい AlGaIn/GaN デバイスの長所を消してしまう点から好ましい解決方法ではない。

ノーマリーオフ化のための取り組み[20]として代表的なものは、既に述べたリセス構造と呼ばれる、ゲート直下の AlGaIn エピ層を掘り込む手法である。ノーマリーオフとするには、ぎりぎりまで薄膜化して自発分極を減らし、2DEG を消す必要がある。エッチングダメージがチャンネル特性を劣化させてしまう問題があるほか、完全に 2DEG を打ち消すのは難しい問題がある。そこで、さらに深いリセス構造によって、ある部分の AlGaIn 層を完全に取り去って MOS 部分だけを GaN に直接形成した構造とする試みもある。しかし現在のところ、チャンネル抵抗を大幅に増大させるほか、閾値の不安定を増してしまう欠点が避けられていない。次に提案されているのはゲート部分に p 型の AlGaIn 層を導入、pn 接合の空乏層を作ることで 2DEG を消す方法でゲート注入型トランジスタ (GIT) と呼ばれている[16],[18]。この手法の問題点を挙げるとすれば、ゲート電圧を増大させ過ぎると大きなリーク電流を生じる構造のため pn 接合の内蔵電圧を超えない小さな範囲での閾値の設定しかできないという制約のある点である。これらの方法によってノーマリーオフ動作が実現しているものの、より高い閾値電圧 (3~5V) が要求される用途も多く、制御技術の確立が重要である。

(3) HEMT 構造における電流コラプス現象の抑制の試み

電流コラプスとは、MOSFET においてソースドレイン間に高電圧が印加されているオフ状態からオン状態へ切り替えたとき、過渡的にオン抵抗が大きくなる現象であり、AlGaIn/GaN HEMT 構造では頻りに観察される[21]。まだその原因は不明確だが、ゲートやその周辺の絶縁層 (表面側) やエピ層下部の AlGaIn バッファ層 (基板側) に起因する応答の遅い電子トラップへ、高電界によって加速された電子が捕獲され、過渡的に放出される過程が関与していると考えられている。存在位置や種類の異なる、複数種類のトラップが関与したものとするのが妥当であり、原因となるトラップの解明と、それらの密度を大幅に削減するための対策が必要である。

例えば表面側のトラップに対する対策としては、電界が集中し易いドレイン端部分での電界緩和のため、フィールドプレート電極技術 (後述) を応用することや、表面パッシベーションの適用によって緩和が図られている。現在までに一定の劣化抑制効果は確認できているものの、解決策の確立は実用化へ向けた大きな研究課題である。

(4) フィールドプレートによる高耐圧化技術

高耐圧化を進める上での大きな課題は、電界集中によって絶縁破壊の起こり易いゲート端部の保護である。そのため、シリコン系パワーデバイスではフィールドプレートと呼ばれる電極層をゲート周辺部に配置し、その電極に電圧を印加しておくことによってゲート端部での電界を抑制し、電界集中を緩和させる技術が採用される。AlGaIn/GaN HEMT 構造で数百 V の高耐圧素子を形成、または縦型構造で超高耐圧素子を形成する上ではフィールドプレート電極の配置の最適化設計と、その形成プロセスを確立することが不可欠である。

6. 政策立案のための提案

GaN 系半導体が次世代に応用されていくことが期待される重要な分野として、発光デバイス、高周波通信デバイス、パワーデバイスの 3 つに関して現状と乗り越えるべき技術開発課題を整理した。今後注力していくべき課題には、どのデバイスにも共通して以下に挙げる 3 つの段階の要請がある。

(1) GaN 系半導体結晶の基礎物性の把握

まず第一に、GaN 系半導体結晶の基礎材料物性を明らかにすることである。特にデバイス性能を正しく予測するために重要な物性パラメータの解明が望まれる。発光デバイスにおいては高注入条件下での波長シフトなど、光学物性の組成や電界による変調を正しく把握する必要がある。パワーデバイスにおいては絶縁破壊電界強度の把握は必須であるほか、ドーピング技術の確立には GaN 結晶中の不純物の挙動に関する理解が求められる。既に確立されつつある高品質結晶の成長技術を利用しながらこれらの基礎物性を明確化し、GaN 系半導体デバイス特性を正しく予測・設計できるようにすることが必要である。

(2) GaN 系半導体の高品質結晶成長技術の高度化

第二には、GaN 系半導体の高品質結晶の成長技術と、量産技術を確立することである。発光デバイスでは組成を制御したエピタキシャル成長において、特に LD の高効率化には転位密度の低減が必須となっているほか、緑色波長域の LD 開発には InGaN 成長技術の進展が不可欠である。電子デバイスにおいても、結晶中の転位密度が低減されなければ印加できる電界が制約されてしまう。横型 HEMT ではシリコン基板上のヘテロエピタキシャル膜の高品質化、また高耐圧パワーデバイスでは高品質な GaN バルク結晶を大口径、高速で行う技術の確立が求められるなど、結晶成長手法の研究を進めることが必要である。

(3) GaN 系半導体デバイスプロセス技術の確立

第三には、各デバイス特性を制御するための要素技術の開発を進めることである。発光デバイスでは、組成変調に伴う効率低下要因の抑制には界面構造の工夫が不可欠となっており、また高速デバイスの性能向上のためには、短チャネル効果を抑制するデバイス形成技術が求められている。パワーデバイスでは耐圧性向上に加えて、閾値の制御や欠陥構造による電荷捕獲の抑制が課題となるなど、新たなアイデアを取り入れたデバイス構造やプロセスについての研究が必要である。

参考文献

- [1] K. Shinohara, D. C. Regan, Y. Tang, A. L. Corrión, D. F. Brown, J. C. Wong, J. F. Robinson, H. H. Fung, A. Schmitz, T. C. Oh, S. J. Kim, P. S. Chen, R. G. Nagele, A. D. Margomenos, and M. Micovic, “Scaling of GaN HEMTs and Schottky Diodes for Submillimeter-Wave MMIC Applications”, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 60, no. 10, p.2982-2996, 2013.
- [2] I. C. Kizilyalli, A. P. Edwards, H. Nie, D. Disney, and D. Bour, “High Voltage Vertical GaN p-n Diodes With Avalanche Capability”, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 60, No. 10, p.3067-3070, 2013.
- [3] A. M. Ozbek and B. J. Baliga, “Planar Nearly Ideal Edge-Termination Technique for GaN Devices”, IEEE Electron Device Letters, Vol. 32, No. 3, p.300-302, 2011.

- [4] 日本学術振興会 ワイドギャップ半導体 光・電子デバイス第162委員会編, “ワイドギャップ半導体 あげぼのから最前線へ”, 培風館, 232p, 2013.
- [5] 日本光学会レーザーディスプレイ技術研究グループ企画, 黒田和男, 山本和久編, “解説 レーザー照明・ディスプレイ 一究極の照明・ディスプレイを目指して”, オプトロニクス社, 14p, 2016.
- [6] K. Okamoto, J. Kashiwagi, T. Tanaka and M. Kubota, “Nonpolar m-plane InGaN multiple quantum well laser diodes with a lasing wavelength of 499.8 nm”, Appl. Phys. Lett., Vol. 94, No. 7, p.071105-071107, 2009.
- [7] Y. Yoshizumi, M. Adachi, Y. Enya, T. Kyono, S. Tokuyama, T. Sumitomo, K. Akita, T. Ikegami, M. Ueno, K. Katayama, and T. Nakamura, “Continuous-Wave Operation of 520 nm Green InGaN-Based Laser Diodes on Semi-Polar {2021} GaN Substrates”, Appl. Phys. Express, Vol. 2, No. 9, p.092101, 2009.
- [8] 省エネルギー効果が期待される半導体レーザー応用技術に関する検討 報告書, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2012年3月.
- [9] レーザー学会レーザーディスプレイ技術専門委員会調査, “照明・レーザーディスプレイ最新動向調査報告書 完成版”, オプトロニクス社, 44p, 2015.
- [10] 日本学術振興会 ワイドギャップ半導体 光・電子デバイス第162委員会編, “ワイドギャップ半導体 あげぼのから最前線へ”, 培風館, 336p, 2013.
- [11] 総務省, “我が国の電波の使用状況 1.周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴”, <http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/index.htm#4000293> (アクセス日 2016年12月1日).
- [12] 平野嘉仁, “高周波光デバイスの変遷と今後の展開”, 三菱電機技報, Vol. 88, No. 9, p.102-105, 2014.
- [13] D. S. Lee, X. Gao, S. Guo, D. Kopp, P. Fay, and T. Palacios, “300-GHz InAlN/GaN HEMTs With InGaN Back Barrier”, IEEE Electron Device Letters, Vol. 32, No. 11, p.1525-1527, 2011.
- [14] 総務省, “電波資源拡大のための研究開発の実施 平成21年度終了課題の成果”, <http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/21endo/index.htm> (アクセス日 2016年12月1日).
- [15] G. H. Jessen, R. C. Fitch, J. K. Gillespie, G. Via, A. Crespo, D. Langley, D. J. Denninghoff, M. Trejo, and E. R. Heller, “Scaling of GaN HEMTs and Schottky diodes for submillimeter-wave MMIC applications”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 54, No. 10, p.2589-2597, 2007.
- [16] H. Ishida, D. Shibata, H. Matsuo, M. Yanagihara, Y. Uemoto, T. Ueda, T. Tanaka, and D. Ueda, “GaN-based natural super junction diodes with multi-channel structures”, Technical Digest of IEEE International Electron Device Meeting, p.145-148, 2008.
- [17] M. Kuzuhara and H. Tokuda, “Low-Loss and High-Voltage III-Nitride Transistors for Power Switching Applications”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 62, No. 2, p.405-413, 2015.
- [18] D. Shibata, R. Kajitani, M. Ogawa, K. Tanaka, S. Tamura, T. Hatsuda, M. Ishida, and T. Ueda, “1.7 kV /1.0 mΩcm² Normally-off Vertical GaN Transistor on GaN substrate with Regrown p-GaN/AlGaIn/GaN Semipolar Gate Structure”, Technical Digest of IEEE International Electron Device Meeting, p. 248-251, 2016.
- [19] T. Oka, T. Ina, Y. Ueno, and J. Nishii, “1.8 mΩ-cm² vertical GaN-based trench metal-oxide-semiconductor field-effect transistors on a free-standing GaN substrate for 1.2-kV-class operation”, Applied Physics Express, Vol. 8, No. 5, 054101, 2015.
- [20] T. Kachi, “Recent progress of GaN power devices for automotive applications”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 53, p.100210, 2014.

- [21] M. Meneghini, P. Vanmeerbeek, R. Silvestri, S. Dalcanale, A. Banerjee, D. Bisi, E. Zanoni, G. Meneghesso, and Peter Moens, “Temperature-Dependent Dynamic RON in GaN-Based MIS-HEMTs: Role of Surface Traps and Buffer Leakage”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 62, No. 3, p.782-787, 2015.

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

平成29年3月

**Technological Issues and Future Prospects of GaN and
Related Semiconductor Devices**
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,
2017.3

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 特任研究員 喜多 浩之 (Koji KITA)
主任研究員 三枝 邦夫 (Kunio SAEGUSA)
- 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/>

© 2017 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。
