法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-04

デバイス試作によるワイドギャップ半導体評価

三島, 友義

(出版者 / Publisher)
法政大学イオンビーム工学研究所
(雑誌名 / Journal or Publication Title)
法政大学イオンビーム工学研究所報告 / Report of Research Center of Ion
Beam Technology, Hosei University
(巻 / Volume)
39
(開始ページ / Start Page)
25
(終了ページ / End Page)
42
(発行年 / Year)
2020-02-17
(URL)
https://doi.org/10.15002/00030277

5. デバイス試作によるワイドギャップ半導体評価

三島 友義*

第1章 序論

1.1. 研究背景

近年のエレクトロニクスに関するテクノロジーは 驚異的なスピードで進歩してきた。その大きな要因 としてSiを中心とした半導体材料と、これに基づく情 報・通信技術の進歩が挙げられる。しかし、携帯電 話基地局の乱立や消費電力の増大が深刻化し、CO₂ 低減などの環境対策を考えた、効率の良い電力生産 及び省エネルギー対策が必要になる。そこで、ワイ ドバンドギャップである II-V 族化合物半導体が注 目され、特に環境・エネルギー対策として、窒化物 半導体が脚光を浴びている。

GaNの物性値を表1.1に示す¹⁾。GaNは直接遷移型 バンド構造を有しており、バンドギャプも3.39 eVと 広いことから、現在では主に青色を中心とした発光 ダイオード (LED)として利用されている。また、絶 縁破壊電界が高く、電子の飽和ドリフト速度が大きい こと、2次元キャリアガスの利用が可能なことなど 様々な利点を有している。このためGaNを用いた半 導体素子は、SiやGaAs系材料では物性値的に不可能 な次世代電子デバイス用材料として期待されている。

1-2. 研究目的

1-2-1. 今年度のダイオードの試作・評価における研 究目的

縦型構造GaNパワーデバイスを開発することにお いて最大の懸念事項は貫通転位などの結晶欠陥であ る。貫通転位には刃状転位、螺旋転位、および、混 合転移の3種類がある。その全ての貫通転位がデバ イス特性に致命的な影響を与えるわけではないと考 えられるが、市販の低・中輝度LEDは多量の転位欠 陥を内在しながらほぼ正常な動作をしているものの、 遙かに過酷な環境で使われるパワーデバイスにおけ る影響は確実に存在すると考えるべきである。

そこで、本研究では近年開発が進められる低欠陥 密度の高品質GaN基板とGaNエピタキシャル層を用 いて縦型PN接合ダイオードを試作・評価すること で、その高品質化の有効性を実証するとともに、評 価結果を結晶成長にフィードバックすることでGaN 結晶の高品質化からパワーデバイスの特性向上に結 びつけることを基本的な目的とした。PN接合ダイ オードを評価対象とした理由は、整流特性が表面現 象であるショットキーバリアダイオード (SBD) に対 して結晶表面からp-GaN層の厚さに相当する内部で

物質	単位	GaN	4H-SiC	GaAs	Si	Sapphire	SiO 2	Cu
電子移動度	cm²∕Vs	1500	600	8500	1200	-	_	-
電子飽和速度	cm/s	2.7e+7	2.0e+7	2.0e+7	1.0e+7	-	_	-
正孔移動度	cm²∕Vs	30	50	400	450	-	_	-
高周波·高出力用	」 月途の指標	760	180	7.1	1	-	-	-
エネルキ゛キ゛ャッフ゜	eV	3.45	3.26	1.42	1.12	_	_	-
熱伝導度	W/cmK	1.5	4.9	0.46	1.5	0.4	0.1	4
破壊電界	MV/cm	4.0	2.2	0.4	0.3		10	-

表1.1 各材料の物性値

*法政大学イオンビーム工学研究所

のPN接合の現象であり、したがって表面起因の不 確定さに影響されにくく、一方で、少数キャリアデ バイスとして結晶欠陥をより敏感に反映した評価が 可能であることによる。更に本開発では、GaN結晶 の理想特性を引き出すために必要となる結晶ダメー ジの少ないプロセス開発を進めてきた。これらの技 術開発により、サイオクスで開発された高品質GaN 結晶を用いることで世界最高の耐圧や低いオン抵抗 などの優れた特性を有するGaNダイオードを作製で きることを実証することも重要な目的となる。さら に、開発した低ダメージプロセスなどの技術を基板 やエピユーザーであるデバイスメーカーに開示する ことでGaN事業全体の発展に寄与する。

1-2-2. PN接合ダイオードとGaN縦型ダイオードの 開発状況

まず、基礎知識としてダイオードについて述べる。 本節は例年改訂しながら記述している内容であるが、 デバイス特性による結晶評価、および、デバイスの 高耐圧化に至る上でのベースとなる共通事項である ため、基礎から改めて述べる。PN接合はp型半導体 とn型半導体の接合であり、p型がアノード(正極)、 n型がカソード(負極)とした整流器(ダイオード)と して機能する。図1に示すPN接合の典型的な電流-電圧特性ではp側に正の電圧を加えたとき、順バイ アスの状態に相当するが、Siでは1 V程度で、GaN では約3 Vで急激に電流が流れ、整流器としてはオ ン状態となる。このオン状態となる電圧は半導体の 基礎物性である禁制帯幅に大きく依存する。GaNは Siの約3倍の禁制帯幅を有するためこのような差が 生じる。GaNデバイスが高電界に耐えうるのは主に この差による。ダイオードに加える電圧を反転して



図1 PNダイオードの電流-電圧特性

p側に負の電圧を加えると、これは逆バイアス状態 であり、整流器としてはオフ状態である。このとき はある程度の電圧までは電流をほとんど通さないが、 ある負電圧から急激に電流が上昇する。この電圧を 降伏電圧と呼ぶ。降伏現象を除いた電流-電圧特性 は次の式であらわされる。

$$I = I_0(\exp(\frac{qv}{nkT}) - 1)$$

この式において、IOは比例定数で、半導体層の物 性、温度やダイオードの面積等によって決まる数値 である。qは単位電荷 (素電荷)、Vはバイアス電圧、 nはダイオードの理想因子と呼ばれ通常1から2の 間の値をとるが欠陥順位などが多い場合はそれ以上 の値もとりえる。理想因子はPN接合界面の結晶性 などの品質とキャリアの輸送メカニズムによって変 化する数値であり、SiのPN接合ダイオードのような キャリアの拡散により電流が支配される場合は1、 化合物半導体のような再結合電流が支配的な場合は 2に近い数値をとる。kはボルツマン定数、Tは絶 対温度である。GaNのような化合物半導体では逆方 向特性は拡散電流ではなく発生・再結合電流が支配 的になるため、この式であらわされる以上に大きな 電流値をとる。その値は結晶の欠陥の種類や密度、 さらに、プロセスによるダメージも影響するため一 般にその解析は難しい。このため、ダイオードの評 価には以下に述べる順方向のオン抵抗と逆方向の降 伏電圧で評価を進める方が結晶評価上わかりやすい 指標となる。

パワーダイオードとして求められる特性は、順方 向電流が十分に流れているときの抵抗(オン抵抗: Ron=(電圧の増加分)/(電流の増加分))の低さと、 逆方向の降伏電圧: V_B(一般に耐圧と呼ぶ)の高さ である。GaN結晶に欠陥が増えるとRonの増加とVB の低下という特性の低下が起こる。現状の市販の GaN自立基板には1x10⁶個/cm²以上の密度で貫通転 位欠陥がある。この欠陥が均一に分布していると仮 定すると直径100ミクロンの小型のダイオードでも 100個程度の転位欠陥を内包することになる。しか し、実際はサイオクス社製の基板上に作られたエピ タキシャル結晶を使う範囲では多数のダイオードで 正常な動作が観測され、すべての転位欠陥が致命的 な特性劣化を起こすキラー欠陥とは言えない。ダイ オードサイズを4倍以上に拡大すると良品の歩留ま りが低下するため、低い密度でキラー欠陥があると

いう現状ではあるが、パワーデバイスのような数ミ リメートル以上の大きなものとなると基板の品質に はいっそうの改善が求められる。サイオクスで開発 される現状より転位密度が数桁低い高品質GaNが切 望される所以である。

従来のGaN結晶を用いた縦型ダイオードの研究・ 開発状況を学術論文の発表より調査した結果を以下 に述べる。GaN自立基板の転位欠陥を0.6 mm程度の 間隔でストライプ状やドット状に集中させて、転位 密度の低い小面積の領域を設ける方法で平成22年以 前に製品化された基板が存在するが、パワーデバイ スのような大型素子には対応できない。また、GaN 縦型PN接合ダイオードは理想的な高性能パワーダ イオードであることが予測されていたが、高品質の GaN基板上エピタキシャル結晶の開発が遅れてお り、それに伴いプロセス技術も未発達であったこと から期待される性能が実証できない状況であった。 そのため、平成22年ごろまでは耐圧は1 kV程度に留 まっていた^{1,2)}。このような状況の下、法政大学と サイオクスはこれまで共同研究で高耐圧ダイオード の開発を進め、平成25年度には3 kV級の高耐圧ダイ オードを作製し得る技術を開発した³⁾。この数年で 海外勢、特に米国のAvogy社、ノートルダム大学や コーネル大学などが高耐圧GaN縦型PN接合ダイオー ドについて発表を行い、日本を追撃している⁴⁾。

法政大学は平成26年度において、NaフラックスGaN 種結晶上にHVPE(Hydride Vapor Phase Epitaxy) 法およびMOVPE (Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy) 法で作製したGaNウエハにPN接合ダイオー ドを試作したところ、電界緩和フィールドプレート 構造を適用することにより、最大耐圧2.3 kV、順方 向電流密度302 A/cm² (4 V) というような特性が 得られた。さらに、平成27年度ではHVPE法で作製 した基板上でも3層構造のドリフト層を有するPN 接合エピタキシャル結晶を用いて4.7 kVの耐圧を実 証した⁵⁾。ただし、オン抵抗は1.7 mΩ・cm²に上昇 し耐圧とオン抵抗のトレードオフの打破にはさらな るGaN結晶とプロセス技術の改善が必要であった。 その翌年の平成28年度において、素子を微小化し転 位欠陥分布のばらつきを利用して確率的に低転位領 域を利用することで、これまでの最高耐圧と同じ 4.7 kVのものがさらに低いオン抵抗0.93 mΩcm²と ともに得られた。さらに、平成29年度では、独自の ガードリング構造を開発し、耐圧を5.0 kVまで高め ることに成功し⁶⁾、この分野でサイオクスと本学の

成果が世界をリードし続けている。以上により、今 後大面積の低転位GaN基板の開発が進むことによっ て、高性能パワーデバイスが作製できることを実証 してきた。

第2章 今年度の実施内容

2.1 PNダイオードの作製によるGaN結晶の評価

半導体物性としてGaNがパワーデバイス応用にお いて優れることは既に広く知られるようになった が、デバイスの特性は、用いる半導体結晶の品質と デバイス設計およびプロセス技術によって支配され る。したがって、半導体結晶の品質が向上したこと によりもたらされるパワーデバイスとしての優れた 特性を実証するためには、デバイス構造設計とプロ セス技術を十分に高度化しておく必要がある。ここ では上記の優れた耐圧特性などを先んじて実証して きた本学とサイオクスの独自開発によるPNダイオー ドの設計・作製方法について述べる。なお、ここに 述べる技術内容はこれまでにプロジェクトを含めた 期間中に開発された特長技術であり、今後も継続的 に改良しながら用いるため、詳細に記す。特に今年 度は、これまでGaN結晶へのダメージを避けること ができないドライエッチングを用いたプロセスを回 避し、ダメージのないウェットエッチングプロセス をGaNパワーデバイスに世界で初めて適用すること を試みた。このプロセスについても成果のパートで やや詳細に記す。

まず、図2に本研究におけるPNダイオードの断面 構造を示す。n型のGaN基板上にn-GaN層とp-GaN層 をそれぞれ成長した構造で、p-GaN層表面にはアノー ド電極が、GaN基板表面にはカソード電極がそれぞ れ形成されている。素子分離はp-GaN層をエッチン



図2 本研究におけるPNダイオードの断面構造

グしたメサ構造を用いた。PNダイオードの形状は、 周辺部の電界分布の均一性を維持しやすい円形とし た。PNダイオードの表面保護膜は、膜形成時のダ メージがほとんど無視できるSpin on Glass (SOG)と 表面保護特性に優れたSiO²の2層構造を用いた。さ らにPNダイオードのメサ端付近の電界集中緩和のた め、メサ領域をカバーするようにフィールドプレー ト (FP) 電極を配置した。

図3に本研究におけるPNダイオードの基本作製プ ロセスフローを示す。GaN基板上にMetal Organic-Vapor Phase Epitaxy (MO-VPE) 法でn-GaN層 (Siドープ) およびp-GaN層 (Mgドープ)を成長し た後、Mg活性化のために850 $^{\circ}$ 30分 (N₂中) のア ニールを行った。次に、電子ビーム加熱 (EB) 蒸着 法でNiを蒸着し、リフトオフ法でメサエッチング用 パターンを形成し、NiをマスクとしてGaNのエッチ ングを行なった (図3(a))。エッチングはInductive Coupled Plasma-Reactive Ion Etching (ICP-RIE) 法 にて行い、反応ガスはCF₄とArの混合ガスを用いた。 コイル出力は400 W、RF出力は150 Wとした。今年



図3 本研究におけるPNダイオードの 基本作製プロセスフロー 度の新規事項として、メサ構造の形成にウエットエッ チングをICP-RIEの代わりに用いることも検討した。 この条件は後述する。その後、全面に表面保護膜で あるSOGとSiO₂を形成した。SOGは日揮触媒化成製 セラメートLNT-Kを用い、塗布後、ホットプレート にて120℃ 5分、350℃ 30分のアニールを行い形成 した。SiO₂はスパッタリング法を用いて形成した (図3(b))。コンタクトホール用のレジストパター ンを形成し、HFにてSOGとSiO₂のエッチングを行っ た。続いてEB蒸着法でPdを蒸着し、リフトオフ法 でp形オーミック電極を形成した(図3(c))。最後 に、EB蒸着法でTi/Alを蒸着し、リフトオフ法でFP 電極を形成した。最後に裏面にEB蒸着法でTi/Alを 蒸着し、n型オーミック電極を形成し完成である (図3(d))。

以上が従来からの基本プロセスであるが、サイオ クス期間中に改良した新プロセスを以下に述べる。 これは今後も継続的に用いる世界最高耐圧を実現し た肝となるプロセスであるためやや詳細に述べる。 従来プロセスの課題の一つ目は、コンタクトホール 加工後のSOGとSiO2の形状である。SOGとSiO2はHF に対するエッチングレートが異なりSOGの方がSiO2 よりエッチングレートが速いため、コンタクトホー ル加工後のエッチング形状は、図4(a)に示すよう に、SiO₂に比べSOGのサイドエッチング量が大きく なる。このような形状のコンタクトホール上に電極 金属をEB蒸着法で堆積すると、図4(b)に示すよう に、電極金属に段切れが発生することが懸念される。 段切れによりp型電極とFP電極が絶縁された場合、 FP電極によるメサ端の電界集中緩和効果は失われ、 耐圧劣化の原因となり得る。そこでコンタクトホー ル加工方法として、SOGとSiO2のエッチングレート が等しいドライエッチング法の適用を検討した。一 方、ドライエッチング法を適用した場合、p-GaN層 上に直接SOGが形成されているとSOGドライエッチ ング時p-GaN層が直接ドライエッチングに晒される ため、p-GaN層にドライエッチングダメージが発生

電極金属の段切れの懸念有





する。ドライエッチングダメージからp-GaN層を保 護するため、保護層を兼ねたp型オーミック電極の 先行作製プロセスも併せて実施した。

図5にその新規プロセスフローを示す。図3(a) に示したメサ形成プロセスと同様にメサを形成した 後(図5(a))、表面保護膜形成前にp型オーミック 電極 (Pd/Ni) をリフトオフ法で形成した (図5(b))。 PdはSiO₂やSOGとの接着性が低いため、Pd上に直 接SOGを形成するとPd上のSOGが剥がれたり、ク ラックが発生したりすることが懸念される。そこで p型オーミック電極は、後に形成するSOGとの接着 性向上のため、Pd上にNiを蒸着した2層構造とし た。その後、全面に表面保護膜であるSOGとSiO。を 形成した(図5(c))。SOGとSiO₂の形成方法は前述 の通りである。SOGとSiO2の加工用マスクパターン を形成し、ドライエッチング法でSOGとSiO2の加工 を行った(図5(d))。加工用のマスクパターンは、 日立化成製感光性ポリイミド (PIQ)を用いた。形 成条件は、塗布後120℃ 5分間のベークを行い、露 光現像後、150℃ 5分間、200℃ 30分間のベークを 行った。ドライエッチングはICP-RIE法を用いた。 エッチング条件は前述の通りである。ドライエッチ ング後、マスクであるポリイミドを同じくICP-RIE 法を用いて除去した。反応ガスはO₂を用い、コイル

出力は400 W、RF出力はポリイミド以外の膜が極 カエッチングされないように0 Wとした。それ以下 のプロセスは従来と同様である(図5(e))。

図6に従来のウエットエッチング法によるコンタ クト加工プロセス、および、本研究で検討したドラ イエッチング法によるコンタクト加工プロセス後の 断面形状観察結果を示す。ウエットエッチング法に より加工を行った場合、本試料においては金属の段 切れは観察されなかったが、金属の浮き上がりが観 られ、不安定な接触になっていると考えられる。そ れに対し、ドライエッチング法によりコンタクト領 域の加工を行った場合、緩やかな傾斜のテーパ形状 となり、良好な金属の被覆性が観察された。

従来プロセスの課題の二つ目は、ドライエッチン グ時のダメージによる特性の劣化である。前述の通 りメサエッチングはICP-RIE法により行っているが、 エッチング中に発生するイオン等の衝突によりGaN はダメージを受ける。ドライエッチング工程では装 置依存が大きいためここでは詳細な記述は省略する が、上記のようなコイル出力の調整とエッチング後 の熱処理によるダメージ回復工程を追加している。 更に根本的対処としてメサエッチングにはダメージ レスウエットエッチングも後述のように検討した。





図6 ドライエッチング工程によるコンタクトホールの 形状改善効果

図5 コンタクトホール形成を精密なドライエッチング 加工に変更した新規プロセスフロー

第3章 今年度の研究成果

3.1 低転位密度GaN基板を用いることによるPNダ イオードの特性改善効果

サイオクスで開発が進む全面低転位密度・高品質 GaN基板をパワーデバイスに適用するとどのような 改善効果が得られるかという基本的な命題に対応す るため、今年度の重要な取組として、部分的に低転 位化をした基板を用いて先行して検討を進めた。 GaN基板チームから提供された転位密度10^{4~5}/cm² のGaN結晶基板上にエピ成長を行い、高耐圧PNダイ オードを作製して転位密度がデバイス特性に及ぼす 影響の調査を実施した。その結果、転位密度の低減 が耐圧の素子間ばらつきを大幅に低減し、かつオン 抵抗を下げる効果につながることを世界で初めて明 らかにした。以下、その詳細について記す。

用いた低転位密度GaN基板は全面が低転位ではな く、高転位密度に転位が集中した領域と低転位領域 がストライプ状に交互に並んだものである。その 基板は、サイオクスにて通常の転位がほぼ均一に分 布した密度1~3x10⁶/cm²のGaN基板を種基板とし、 その上にSiO2膜をストライプ状に形成し再度HVPE 炉内で厚膜成長を行って作製したものである。SiO, 膜の幅に対して開口部の幅は小さめになるように設 定している。GaNの成長はSiO2膜上には生じないた め開口部より成長が始まり、SiO2膜の高さを超えた 時点で縦方向の成長を維持しつつSiO2膜をカバー するように横方向に成長が起こる。これをEpitaxial Lateral Overgrowth (ELO)と呼ぶ。この結果、開口 部上に断面が三角形の形状を有するGaN結晶のスト ライプが形成される。この3次元(3D)成長領域で は、GaN中の転位がこの横方向成長に沿って曲がる ため、上方に伝搬する欠陥が減り低転位領域が発生 する。この三角が隣の三角と接したときから今度は 谷を埋めるように成長が起こり、したがって、平坦 化が始まる。この谷の領域では曲げられた転位が集 まるため転位が集中する。この低転位領域と転位集 中領域の周期的繰返しは、当然ながら、最初にSiO₂ 膜のストライプを形成した周期と一致する。この方 法で成長した結晶の断面を蛍光顕微鏡で撮影した像 を図7に示す。それぞれの領域が異なった色に見え るのは、成長モードによって成長雰囲気からの不純 物の取込み効率が異なり、その不純物元素と濃度に よって発光スペクトルが変わるためである。2次元 (2D) 成長モードになり平坦化した領域から新たな



図7 ストライプELO法により成長した GaN結晶断面の蛍光顕微鏡像

基板を切り出し研磨して実験に用いた。この基板に は三角形の頂点の上部であった領域では転位密度は 低く、谷の上部であった領域では転位が集中すると いう履歴を有している。ただし、この領域では発光 色は黄色で均一であり不純物濃度は均一になってい ることが画像から想像できる。念のため、2次イオ ン質量分析 (SIMS) 法でも元素分析を行った結果、 不純物濃度に場所依存はなく、低集中領域でも低転 位領域でもドナー不純物による電子濃度は一定と なっていると言える。

この基板表面をカソードルミネッセンス (Cathode Luminescence: CL) 法により観測した像を図8に示 す。像の暗点の一つ一つが貫通転位であり、上記の ようにストライプ状に転位集中領域と低転位領域が 存在していることがわかる。転位集中領域の転位密 度は通常の基板のそれより高く、特に転位が集まっ た狭い領域で見れば1x10⁷ cm⁻²台の部分もある。転



転位集中域 低転位領域 TDD>3×10⁶ cm⁻² TDD<4×10⁵ cm⁻² 図8 ストライプELO法により作製した GaN基板のCL像 位集中領域ではいくつもの転位が列をなすように接 近したものが散見される。一方、低転位領域では平 均的な転位密度は4x10⁵ cm⁻²以下であり、特に転位 が少ないより狭い範囲を見れば、1x10⁴ cm⁻²台の部 分もある。この基板上にMOVPE法でPN接合を持つ エピタキシャル層を成長した。このエピタキシャル 層を用いて作製したPNダイオードの構造を模式的に 図9に示す。ドリフト層は1層のみの単純な階段接合 である。ルーチン的な結晶の品質評価には、MOVPE の成長時間も比較的短いこともあり、この構造を 用いている。付録の層構造の設計の項で記述した手 法による理論上の予想耐圧は2 kV程度である。メ サ端での電界集中を緩和するため先に述べたような フィールドプレート電極を設けており、メサ構造の



図9 本検討で用いたPNダイオードの構造図



図10 ストライプELO法により作製したGaN基板上に 試作したダイオードのCL像 (a-c) とSEM像 (d)

形成にドライエッチングを用いたプロセスも共通で ある。図のPd電極の直径を60 μmとし、同一ウエハ 上に上記のストライプの周期よりやや長い周期で多 数配列することで、転位集中領域上に位置するもの、 低転位領域上に位置するもの、および、その中間に 位置するものを作り分けることができる。この評価 によって、1度のデバイス試作を行うだけで、転位 集中領域で特に転位が密集する高転位密度の領域を どの程度ダイオード内に含むかという視点で、ダイ オードの耐圧とオン抵抗の評価結果を考察すること ができる。これにより転位欠陥がダイオード特性に 与える影響を系統的に知ることが可能になる。

図10は耐圧測定後のダイオードに対してCL (a~c) およびSEM (d) で表面観察を行った結果である。破 壊まで耐圧評価をしているのでダイオードのメサ 端で破壊している様子がわかる。走査電子顕微鏡 (SEM)像では破壊点の中心が溶融して穴が開き周 囲にクラックが発生していることが見て取れる。 CL像では転位のストライプ状の分布がわかり、ダ イオードがどのような位置にあったか、すなわち、 高転位密度領域にどの程度かかっていたかが観察で きる。図の (a) では中央のダイオードはほぼ完全に 低転位領域に位置している。逆に(b)では大部分 が高転位密度領域上にある。(c)の中央のダイオー ドではその50~60%の面積が高転位領域上にある。 ただし、これらの像のように高転位領域には明確な 境界があるわけではなく、根を張るように周囲に伸 びているものもあるため、高転位領域が占める割合



図11 ダイオード内の高転位密度領域の割 合をパワメータとしたときの耐圧と オン抵抗の関係

を正確に定義することは難しい。このように概数で はあるが各ダイオード内の高転位密度領域の割合を パラメータとして縦軸に耐圧、および、横軸にオン 抵抗をプロットしたものが図11である。青と緑で示 す高転位密度領域の割合の小さいもの、すなわち、 低転位領域の占める割合が高いものはオン抵抗が低 く耐圧が高い良品揃いであることがわかる。高転位 密度領域の割合が高いダイオードでは耐圧が低い方 にばらつくかオン抵抗が高い方にばらついている。 この傾向をより詳細にみるために高転位密度領域の 割合を横軸にしてオン抵抗を縦軸にプロットしたも のを図12に、同様に耐圧を縦軸にしたものを図13に 示す。これらの図から上述のことを改めて確認でき るが、高転位密度領域の割合が高くてもオン抵抗が 比較的低いもの、または、耐圧が高いものもが見ら れる。この結果が示すことはすべての欠陥が耐圧に 悪影響を与えるとは限らないということである。お そらく、図8に見られたような束のようになった転 位集合体が電界強度の高いメサ端に付近に存在した







場合などのケースで耐圧が低下するのではないかと 思われる。この度合いによって耐圧が低下するため バラつきとなって観測されたと想像する。

以上の結果から、安定して高耐圧・低オン抵抗の ダイオードを作製するためには低転位領域を使用す ることが好ましく、その転位欠陥密度が1x10⁵ cm⁻² 台以下であることから、GaNパワーデバイスの量産 時にはこのような品質の基板が望まれることが明ら かになった。サイオクスで目標となっている低転位 基板のニーズが改めて実験的に示されたことになる。

3.2. GaNのウエットエッチング技術の開発とデバ イス製造プロセスへの応用

これまでGaNデバイスの構造的な加工するための 手法はドライエッチング法に限られていた^{7.8})。そ の理由は、GaNは従来材料のSiやGaAsに比べて酸や アルカリなどの薬品耐性が高くウエットエッチング が困難であったためである。したがって、加工には 真空中でのイオン照射による物理・化学的作用を利 用したドライエッチングが用いられてきた。しかし、 イオン照射によりGaN結晶はダメージを受けてしま うため⁸⁾、デバイス特性が劣化する。ダメージを少 なくするようにイオンのエネルギーを下げることも 試みられているが、エッチングレートが桁で低下す るため実用的ではない。

そこで、本年度はプラズマフリープロセスである、 光電気化学エッチングを用いて⁹⁻¹³⁾、低ダメージで のGaN加工プロセスの検討を行った。

GaNは光電気化学(PEC: Photo-assisted-Electro-Chemical)反応を用いる事で、プラズマを使わずに エッチングする事ができる。(これを今後PECエッチ ングと略す。)ここでは、基本となるGaNの陽極酸化 について述べる。GaNに溶液中でバンドギャップ以 上のエネルギーを持つ紫外光を照射すると、式(1) で示す様に窒素を発生し、Ga³⁺イオンとして溶液中 に溶解する。溶解したGa³⁺イオンは、式(2)で示す 様に溶液中のOH⁻と反応しGa₂O₃が形成される。形 成されたGa2O3が、酸およびアルカリ溶液中で溶解 されるため、GaNのエッチングが進行する。

$$\operatorname{GaN}(s) + 3\mathrm{h}^+ \to \operatorname{Ga}^{3+} + 1/2\operatorname{N}_2(g)\uparrow, \tag{1}$$

 $Ga^{3+} + 30H^- \rightarrow 1/2 Ga_2O_3(s) + 3/2 H_2O(l).$ (2)

なお、通常はGaN試料表面をアノード電極とし、 溶液とシーリングされたコンタクト電極を、外部回路 を介してPtなどのカソード電極と接続する。アノー ド電極とカソード電極のみが電解液に接触している 電気化学セルを形成し、アノード電極に紫外光を照 射し、電圧を印加することで、式(1)および(2)の 陽極酸化が起こる。一方、カソード電極では、式(3) で示す水素の牛成反応が起こる。

$$2\mathrm{H}_2\mathrm{O}(l) + 2\mathrm{e}^- \to 2\mathrm{OH}^- + \mathrm{H}_2(g) \uparrow \tag{3}$$

また、同時にGaN表面であるアノード電極では、 式(a)の窒素生成と伴に式(d)で示す酸素の生成反 応も起こる事が知られている。

$$H_2O(l) + 2h^+ \rightarrow 1/2 O_2(g) \uparrow + 2H^+.$$
 (4)

電気化学反応においては、アノード電極での反応 で消費される電荷量とカソード電極で消費される電 荷量は等しい。また、これらは外部回路を流れる電 荷量とも等しいため、陽極酸化を介してGaNの電気 化学エッチングに消費した電荷量とエッチング深さ Wrには、式(e)で示すファラデー則が成り立つ。

$$W_{\rm r} = \frac{M}{zF\rho} \int Jdt \tag{5}$$

ただし、MはGaNの分子量、zはGaNを1 mol陽極酸化するのに必要なホールmol数(価数)、Fはファ ラデー定数、 ρ はGaNの密度、Jはエッチング電流密度である。式(5)より、エッチング深さは消費した電荷量に線形に依存する事がわかる。

図14に低ダメージ加工プロセスの検討に用いた今 回検討に用いた電気化学セルと試料セットアップの 概略図を示す。電解液は0.01 M NaOH水溶液を用い、 Anode電極がn⁻-GaN、Cathode電極がPt coilとなる 構成となっている。UV光源として、Hg-Xe Lump,

1. Anodic oxidation 3. Waiting until by UV and applied voltage electrolyte is static Ĩ ↓↓↓↓ ↓ cathode Ti mask sealing GaN substrate back contact NaOH(aq.) 2. Stirring for removing Ga₂O₃ Ti mask GaN epilayer LAAAF GaN substrate $\blacksquare Ga_2O_3$

図14 電気化学セルと試料セットアップの概略図

(浜松フォトニクス LIGHTNING CURE L9566-03)を 用い、照射強度は 9 mWcm⁻²@405 nmとした。エッ チング電圧は1 V(pulse)として、エッチングを行った。 エッチングレートは条件によるが25~175 nm/min 程度であり、実用上制御しやすくかつ十分な速度を 有している。エッチングマスクにはSOGまたはTiを 用いた。まず、PECエッチングされた後のGaNの形 状を評価するため、SEM像で観察しやすいパターン をいくつか試作し実験を行った。なお、この実験で はマスクに選択比と密着性に優れることが期待され るTi膜 (厚さ90 nm)を用いている。Tiマスクは電子 ビーム蒸着法とリフトオフ法により形成した。図15 は直径90 µmの円形Tiマスクを多数配列しPECエッ チングした後のSEM俯瞰像である。エッチング深さは 20 µmを超えているが、ほぼ垂直に異方性なくマスク の形状通りにエッチングできている。ウエットエッチ ングでこのようなシャープな形状とエッチング面の 平坦性を達成した例は他にはない。一般的にこのよ うな凸部を形成する際は、エッチング液が回り込み やすいため、小さな凹部を形成するよりは容易であ る。この凹部を形成する場合にはどのような結果が 得られるか実験を行った。図16は直径1.5.10.20 um の円形状の開口部を多数配列したTiマスクを用いて PECエッチングした後のSEM俯瞰像である。良好な 円筒形の穴の形成ができている。その深さは7.7 µm



図15 円形Tiマスクを用いてPEC エッチングを行ったGaNエピタキ シャル結晶の俯瞰SEM像



図16 円形の開口部を有するTi マスクを用いてPECエッチング を行ったGaNエピタキシャル結 晶の俯瞰SEM像

である。直径1 μmの小さなパターンにも対応する 微小な穴の形成も可能であることがわかる。なお、 直径20 μmの穴の底部に見られる微小な突起は転位 欠陥によるもので、その成因は、転位部では励起光 によるキャリアの発生量がやや低くなるため、エッ チング速度がその分小さくなったことによるもので ある。エッチング時の光量を増やすことでこのよう な突起は低減できると考える。このような基本的パ ターンで良好なエッチング形状を確認できたため、 次に、将来の縦型デバイスで必要となるトレンチ (深溝)の形成を試みた。SiやSiCではトレンチを利 用したデバイスで効率を高められることが知られて いるため、元々基礎物性に優れたGaNでトレンチを 形成できれば、鬼に金棒ともいえる超高効率の3次 元構造縦型デバイスに発展できる。

図17は帯状の開口部を有するTiマスクを用いてPEC エッチングを行ってトレンチを形成したGaNエピタキ シャル結晶の俯瞰SEM像である。エッチング後にm面 で劈開した断面と表面を観察したものである。図で 一番右の溝の幅は、Tiマスクの開口部が1.4 µmに対

し、内部では2~3 umに拡がっている。深さは20 um 以上に達している。その後、様々な開口幅と深さの トレンチを作製し、断面形状を観察したものが図18 である。各トレンチの設計深さとTiマスクの開口幅 は同図内の各画像でそれぞれ、(a) 7.7 µm-1.4 µm、 (b) 7.7 μ m - 2.8 μ m, (c) 7.7 μ m - 5.6 μ m, (d) 33 μ m $-1.4 \mu m_{2}$ (a) 33 $\mu m - 2.8 \mu m_{2}$ (a) 33 $\mu m - 5.6 \mu m_{2}$ である。図中には実測したトレンチ深さWrを記載し ている。(a-c)の浅いトレンチの実験ではほぼ設計 通りの深さが得られている。これに対して、(d-f)の 深いものではWrにマスク幅依存があり、(d-e)のマ スク幅ではWrが設計よりかなり小さくなっている。 この原因はUV光とエッチング液の供給が不十分であ ることが考えられ、今後の装置改良で対処可能であ る。このような改善点はあるものの大きなアスペク ト比 (トレンチ深さ/トレンチ幅) でGaNをウエット エッチングできたことは内外で初めてである。Wr とアスペクト比をプロットしたものが図19である。 パワーデバイスプロセスで先行しているSiCの報告 値も引用した。1.4 µmの開口幅のデーターは、SiC



図17 帯状の開口部を有するTiマスク を用いてPECエッチングを行ってトレ ンチを形成したGaNエピタキシャル結 晶の俯瞰SEM像



図19 PECエッチングによるトレン チ深さとアスペクト比の関係。 (SiCの報告値も引用)



図18 PECエッチングで深堀したトレンチのSEM像

のドライエッチによるトレンチと同等の傾向の深堀 エッチングがGaNにおいてダメージのないウエット エッチングで可能であることを示している。このよ うな細く深いトレンチが形成できればパワーデバイ スには十分適用可能な技術である。

次に、このダメージレスPECエッチングをパワー ダイオードのメサ構造形成プロセス(図3(a)に対 応する工程)へ応用した結果を示す。従来のドライ エッチとPECエッチングを公平に比較するため同一 チップ内でそれぞれのエッチング法によるダイオー ドを近接して作製した。図20はそのチップ写真(サ イズ:1×1 cm²) である。赤の破線で示された円形 がPECエッチングを実施した領域、この外部と円形 領域内で一部矩形の青の破線で示した部分がICPド ライエッチングを実施した領域である。このように 隣接して2つのエッチング領域を配置することでエ ピウエハの面内分布等を排除した比較が可能であ る。図21はそれぞれのエッチング方法で形成した メサ構造をSEMで俯瞰撮影したものである。PEC エッチングでは極めて滑らかなメサの側壁が形成さ れているのに対し、ドライエッチングではすじ状の 凹凸が見られる。次にエッチングにより露出した底 面 (un-GaN層)を77 Kでの低温フォトルミネセンス (Photoluminescence: PL) 法で評価した結果を図22



図20 PECエッチングでとドライエッチ ング併存させたGaN PNダイオード の実験用チップ写真



図21 PECエッチングとドライエッチン グで形成したメサのSEM像

に示す。3.47 eVのバンド端のPL強度ではPECエッ チングで10倍以上の改善がみられ、この強度が別に 作ったun-GaN単層膜の強度同等であったことから、 ダメージレスエッチングが実施できていることが裏 付けられた。

図23 (a) は図20で示した円形のPECエッチング領 域のCL俯瞰像である。矩形を組み合わせた部分の ドライエッチング領域は、周りのPECエッチング領 域に比べて暗く、エッチングダメージで表面の結晶 品質が劣化していることを示している。この像の中 に点在しているダイオードの1つを拡大したものが 図23 (b) である。暗い多数の斑点のようなものは貫 通転位欠陥である。なお、円形のダイオードの最上 部はp-GaN層でありCLでの発光強度が低いため暗い 円板として観察されている。高電圧をダイオードに 印加した時に最も高い電界が発生するのはメサ側壁 に露出したPN接合である。この側壁に転位がある とダイオードが破壊されやすいと考えられるが、ド ライエッチングでは当然ながら転位にもダメージを 与えるため相乗効果で耐圧が劣化するのではないか と想像される。一方、PECエッチングではダメージ がない分、この劣化が改善さると期待される。これ



図22 エッチングにより露出した底面 (un-GaN層) の低温PLスペクトル



図23 PECおよびドライエッチング領域のCL像 (a) とPEC エッチング領域内ダイオードの拡大像 (b)



図24 エッチング方法の違いを評価するためのPN ダイオードの構造

を実証するためPNダイオードの試作を継続し図24 のような構造のダイオードを作製して電流-電圧特性 を評価した。このダイオードの設計耐圧は約4 kVで ある。

まず順方向のI-V特性を図25に示す。電圧が2 Vよ りやや上の低電流領域において、ドライエッチングに よるダイオードでは欠陥起因によると思われるリー ク電流でPECエッチングのダイオードより多めの電 流が流れている。この領域でのPECエッチングによ るダイオードでは理想因子nが低欠陥の直接遷移半 導体で期待される2になっている。さらに、3 V付 近では拡散電流によって電流輸送が支配されるn=1 の理想状態も確認できた。これによりPECエッチン グで理想的な順方向特性が得られることが示され た。なお、3 V以上での大電流密度領域で電流の増 加が鈍るのはダイオードの抵抗成分によるもので一 般的な現象である。

次に、PECエッチングおよびドライエッチングで 作製したダイオードを各6個ずつについて逆方向耐 圧の評価を行った。その耐圧値をプロットしたのが



図25 PNダイオードの順方向I-V特性



図26 エッチング方法の違いによるPNダイオード の耐圧の分布

図26である。それぞれ6点内容に見えるのは耐圧値 が重なっているもがあるためである。PECエッチン グによるものの方が耐圧値が高くその値も揃ってい ることがわかる。一方、ドライエッチングによるもの では耐圧の低下とバラつきの増加がみられた。これ は、上述のようにメサ端のダメージを受けた転位が 原因ではないかと思われる。一方、ダメージフリーの PECエッチングではメサ端の転位も耐圧にほとんど 影響を与えないことが本実験で初めて明らかになっ た。以上のようにPECエッチングはパワーデバイス はもちろんのこと光デバイスにも適用できる低コス ト・低ダメージ・量産対応の優れたポテンシャルを 有する新技術であり、サイオクス全体に展開してそ の成果に貢献できると考える。

以上のPECエッチングはサイオクスの直径3 mmに 対応する小型のエッチング装置を用いた検討である が、法政大ではこの技術のコンセプトに倣い、1 cm 角のチップに対応するPECエッチング装置を試作し た。図27はその模式図である。テフロン性のビーカー



図27 1 cm角対応PECエッチング装置の模式図



図28 1 cm角対応PECエッチング装置 によるエッチング面のSEM像

を加工したこのようなシンプルな装置でも20分間で 3 μmのエッチングが可能であった。エッチング面の SEM像を図28に示す。初期検討にもかかわらず平坦 なエッチング面が得られている。所々にヒロックが 見られるが、UV光の条件を変えることで除去でき る見通しを得ている。今後はサイオクスと協力しな がら4インチ径以上の量産工程でも利用可能な装置 を開発してく予定である。

3.3. フォトンリサイクリング効果~低転位化によっ てもたらされるオン抵抗の低減理由

今年度パナソニック内で作製されたOVPE (Oxide Vapor Phase Epitaxy) 基板上にサイオクスがMOVPE 成長したPNダイオードエピウエハを用いてダイオー ドを試作し、OVPE基板を用いた効果について検証 した。現在進行中の詳細な詳細については次年度の 報告書に述べる予定である。同基板には10⁴ cm⁻²台 の極めて転位密度が低い領域が存在し、その上に作 製したダイオードは従来のサイオクスのVAS法によ る基板上のもと比較して、順方向特性においてより 低いオン抵抗が得られた。これは先に述べたELO法 による低転位密度GaN基板を用いた効果と同様であ り、改めて低転位化がGaNデバイスの特性改善に重 要であることが示された。なお、耐圧に関しては同 等の値を示した。今後、OVPE基板の面内分布の均 一化や低ピット化などが進むとGaNパワーデバイス に大きな貢献がなされるものと期待できる。

ここで、低転位化によってオン抵抗が減少した理 由を考察する。GaNのような直接線型半導体ではPN 接合ダイオードに順方向電流を流すと、n-GaNから 注入された電子とp-GaNから注入された正孔が再結 合し半導体の禁制帯幅に近いエネルギーを有する光 子が発生する(発光が生じる)。この光子がp-GaN層 内のMgアクセプタに価電子を励起して新たな正孔 を発生させる。これをフォトンリサイクリングと呼

ぶ。p-GaN層のMgアクセプタはエネルギー順位が 価電子帯上端から約0.2 eVと深い位置にあり、常温 の熱エネルギー0.026 eVではMg濃度の5~10%の低 い濃度の正孔しか発生できない。これに対し、上記 の光子は3eV以上のエネルギー有しているため価電 子帯中の電子を励起しMgアクセプタをイオン化す ることで正孔を発生することができる。したがって、 光子の発生量により増加する正孔の量が左右される。 この発光によってもたらされるオン抵抗の減少を説 明するため、フォトンリサイクリングの全体の過程 を図29に示す。正孔の増加により、p-GaN中の導電 率の上昇、n-GaN中への正孔の注入量の増加 (n-GaN 層の導電率変調)、および、p-GaNと電極のコンタク ト抵抗の減少の3つの恩恵が得られる。これによっ てダイオードの電流が上昇しポジティブフィードバッ クがかかる。これらの過程で結晶品質が大きく影響 するのが発光の部分である。通常のダブルヘテロ接 合の発光ダイオードと異なり、全てGaNで作られた ホモ接合のダイオードでは発光効率は結晶欠陥に敏 感に左右される。また、n-GaN中に注入された正孔 がどの程度の深さまで再結合せずに伝導に寄与でき るかという要素(少数キャリアの移動度、寿命、拡 散長)も結晶欠陥に依存する。したがって、上述の ように低転位密度な基板上に作製したダイオードで オン抵抗が減少しているのはこれらの改善効果であ ると言える。



図29 PNダイオードにおけるフォトンリサイクリ ングの説明図

フォトンリサイクリング効果を直接実証すること は、ダイオード内での複雑な物理現象であるため容 易ではないが、以下の方法で発光によりp-GaN層の 抵抗およびコンタクト抵抗が大幅に下がることを実 験的に明らかにした。図30は実験に用いたダイオー



図30 フォトンリサイクリングの実証実験構造図

ドの構造図で、挿入の平面構造図でもわかるように 表面のp-GaN層上に3つの矩形電極を配置している。 左右の電極間に電圧を加えると赤い矢印で示すよう な経路で電流が流れる。この経路における抵抗成分 は、左の電極とp-GaNとのコンタクト抵抗Rel、目明 き部分の抵抗Rsl、中央の電極の左端でのコンタクト 抵抗Re2、同じく右端でのコンタクト抵抗Re3、第2の 目明き部分の抵抗Rs2、右の電極でのコンタクト抵抗 Retである。中央の電極に基板に向かって順方向電 流を流しながら、すなわちこの電極の直下で発光が 起きている状態において、左右の電極間のI-V特性 を評価した。

その結果を図31に示す。中央の電極への電流量を 増やすにしたがって左右の電極間の電流量が増えて いる。なお、原点付近で傾きが急な部分があるが、 ここではn-GaN層の並列伝導が起こるためである。 電圧の絶対値が0.3 V程度以上では並列伝導の寄与 はなくなり、赤い矢印の経路のみになる。中央の電 極に電流を流していないときと90 mAを流した時で は微分抵抗が1/4になっている。フォトンリサイクリ ングによって抵抗が下がるのはコンタクト抵抗Re2、 Rc3、および、目明き部分の抵抗Rs1とRs2の中央電極 寄りであり(GaNバンド端発光の吸収長は0.4 µmで あるため発光の及ぶ範囲は1 um程度)、ほかの抵抗 成分は影響を受けない。このことは中央付近での抵 抗成分が桁で小さくなったことを示している。この ような現象は直接遷移半導体であるGaNであるから こそ生じたもので、間接遷移半導体であるSiやSiC では期待できないものである。フォトンリサイクリ



図31 左右の電極間のI-V特性

ングをバイポーラGaNパワーデバイスに積極的に応 用することで従来の予想を大きく上回る超高効率化 が可能となると思われる。

4. 謝辞

本研究は環境省「未来のあるべき社会・ライフス タイルを創造する技術イノベーション事業」の委託 を受けてなされた。」

付録:

高耐圧PNダイオード用エピタキシャルウエハの 層構造設計

ここでは一般的な半導体工学の教科書にも記され ていることから発展し、サイオクスにおいて世界最 高耐圧のGaN PNダイオードの実現につながった3 層ドリフト構造の設計指針を述べる。結晶グループ によって改良され続けている高品質GaNエピタキシ ャル層を用いて、今年度以降もこの設計指針により 開発したオン抵抗の犠牲を最小限に努めつつ高い耐 圧を有しながら高い破壊耐量を有する理想的なGaN パワーダイオードを実現し、結晶の高品質化による デバイス特性の向上を実証していく。

PN接合ダイオードはその名の通りn型基板上にn層、 p層を順次形成したものが基本的な構造である。こ のような単純なPN接合の構造例とそこに発生する電 界分布を定性的に図F1に示す。この電界分布を定 量的に理論解析する。一般に、高耐圧のPN接合ダイ オードを実現するためにはドナー濃度 (ND)、アクセ



【図F1】PN接合の構造例と接合部に発生する 電界分布

プタ濃度(NA)のいずれかを他方よりも約10倍以上 大きくすれば良い。後に詳細な計算で明らかにする ように濃度が薄い導電性を有する側の層は、逆バイ アス時に空乏層が広がり、その空乏層に加わる電圧 が大きくなるようにして耐圧を持たせる。したがっ て濃度が薄い導電性を有する側の層は膜厚が大きく なるので、順方向特性の観点から抵抗率がなるべく 低いことが必要である。p-GaNはアクセプタ準位が 深いためNAに対するホール濃度は室温では約2桁 小さく、またホールの有効質量は電子よりも大きい ために移動度も低いため、n型層と比べると同じ不 純物濃度でも抵抗が著しく高い。このためオン抵抗 を下げるためには濃度が低い側の層はn型層にした ほうがよい。すなわちGaN系PN接合ダイオードで はND≪NAとすることになる。

n層全体のドナー濃度NDが一定、かつ、p層全体 でのアクセプタ濃度NAが一定のPN接合を階段接合 と呼ぶ。同一材料のホモ接合における階段接合は最 も基本的なPN接合でありポアソン方程式を解析的 に解くことができ、GaNの物性定数を用いることで 実際のGaN系PNダイオードの膜厚や不純物濃度の設 計をすることができる。以下、実際に計算をしてゆ く。一様にドーピングされたn層とp層のホモ接合に は自由電子や正孔が少ない空乏層が生じる(図F1に おけるW)。空乏層ではイオン化したドナーとアクセ プタによる固定電荷が図のように分布している。ド ナー、アクセプタ濃度をND、NAとし、n層、p層側 の空乏層幅をxn、xpとすると、接合面近傍での電 荷 ρ は式 (F1) (F2) で、また空乏層内での電荷の条 件が式 (F3) で、空乏層全体の厚さWは式 (F4) で与 えられる。xはPN接合界面を原点としたときの膜厚 方向の距離である。なおgは素電荷である。

$$\rho(\mathbf{x}) = qN_D \quad (-\mathbf{x}_n \le \mathbf{x} \le 0) \tag{F1}$$

$$\rho(\mathbf{x}) = -qN_A \quad (0 \le \mathbf{x} \le \mathbf{x}_p) \tag{F2}$$

$$N_D x_n = N_A x_p \tag{F3}$$

$$W = x_n + x_n \tag{F4}$$

ポアソン方程式は式 (F5) (F6) で与えられるので 式 (F1) (F2) (F3) (F4) から式 (F7) (F8) が得られ る。Vは電位、Eは電界である。ここで ɛ₀は真空中 の誘電率、 ɛ₅はGaNの比誘電率である。

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_s \varepsilon_0} \tag{F5}$$

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx}$$
(F6)

$$\frac{dE(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = \frac{qN_D}{\varepsilon_s \varepsilon_0} \quad (-\mathbf{x}_n \le \mathbf{x} \le 0) \tag{F7}$$

$$\frac{dE(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = -\frac{qN_A}{\varepsilon_s\varepsilon_0} \quad (0 \le \mathbf{x} \le \mathbf{x}_p) \tag{F8}$$

式(F7)(F8)を積分し式(F3)を用いて変形する と式(F9)(F10)が得られる。式(F9)(F10)から 直ちにx=0(すなわちPN界面)で電界強度は最大と なることが分かる。これをEmaxと置く。

$$E(x) = \frac{qN_D}{\varepsilon_s \varepsilon_0} (x + x_n) = \frac{qN_D}{\varepsilon_s \varepsilon_0} x + E_{\max} \quad (-x_n \le x \le 0)$$
(F9)

$$E(x) = \frac{qN_D}{\varepsilon_s \varepsilon_0} (x - x_p) = -\frac{qN_A}{\varepsilon_s \varepsilon_0} x + E_{\max} \quad (0 \le x \le x_p)$$
(F10)

$$E_{\max} = E(0) = \frac{qN_D x_n}{\varepsilon_s \varepsilon_0} = \frac{qN_A x_p}{\varepsilon_s \varepsilon_0}$$
(F11)

式 (F9) (F10) を積分し、境界条件として $x=-x_n$ におけるポテンシャルをゼロ、すなわち $V(-x_n)=0$ とし、 $V(x_p)=V(<0)$ として、式 (F11) を用いて変 形すると式 (F12) (F13) が得られる。またx=0での 連続の関係から式 (F14) が得られる。

$$V(x) = -\frac{E_{\max}}{2x_n} (x + x_n)^2 \quad (-x_n \le x \le 0)$$
(F12)

$$V(\mathbf{x}) = \frac{E_{\max}}{2x_p} \left(\mathbf{x} - x_p \right)^2 \qquad (0 \le \mathbf{x} \le \mathbf{x}_p) \tag{F13}$$

$$V = -\frac{E_{\max}(x_n + x_p)}{2} = -\frac{E_{\max}W}{2}$$
(F14)

PN接合での電位差Vは、式 (F15) (F18) で与えら れる。ただしVbi (<0) はPN接合のビルトインポテ ンシャル、Vbiasはバイアス電圧である。

 $|V| = |V_{bi} + V_{bias}| > |V_{bi}| \quad (逆バイアス) \tag{F15}$

$$|V| = |V_{bi} + V_{bias}| > |V_{bi}| \quad (逆バイアス) \tag{F16}$$

PN接合の耐圧設計計算をするため逆バイアス時 のみを考える。式(F13)(F14)(F15)より、式(F17) が得られる。符号はVbi<0とし、Vbiasの値は逆バイア スで負値になるため、このようになる。

$$-V = V_{bi} + V_{bias} = \frac{q}{2\varepsilon_s \varepsilon_0} \left(N_D x_n^2 + N_A x_p^2 \right)$$
(F17)

式 (F17) に式 (F3) を代入してxn、xpについて解 くと式 (F18) (F19) が得られる。これは任意の逆バ イアス電圧Vbiasにおけるn層及びp層の空乏層幅であ る。ここで式 (F4) を用いれば任意の逆バイアス電 EVbiasにおける空乏層全体の幅Wが式 (F20) で与え られる。

$$x_n = \sqrt{-\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 N_A}{q N_D (N_D + N_A)} (V_{bi} + V_{bias})}$$
(F18)

$$x_{p} = \sqrt{-\frac{2\varepsilon_{s}\varepsilon_{0}N_{D}}{qN_{A}(N_{D} + N_{A})}(V_{bi} + V_{bias})}$$
(F19)

$$W = x_n + x_p = \sqrt{\left(x_n + x_p\right)^2} = \sqrt{-\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0}{q} \left[\frac{N_D + N_A}{N_D N_A}\right]} (V_{bi} + V_{bias})$$
(F20)

式 (F1) に式 (F18) (F19) を代入することでE_{max} が式 (F21) で与えられる。式 (F9) (F10) (F21) か ら、任意のxにおける電界E (x) が分かる。

$$E_{\max} = \frac{qN_D}{\varepsilon_s \varepsilon_0} \sqrt{-\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 N_A}{qN_D (N_D + N_A)} (V_{bi} + V_{bias})}$$
$$= \frac{qN_A}{\varepsilon_s \varepsilon_0} \sqrt{-\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 N_D}{qN_A (N_D + N_A)} (V_{bi} + V_{bias})}$$
(F21)

Emaxを求めるためには予めVbiを計算しておく必要 がある。Vbiは式 (F22) で与えられ、真性キャリア密 度niは式 (F23) で定義される。伝導帯及び価電子帯 の有効状態密度Ne、Nvは式 (F24)、式 (F25) で与え られる。ここでqは素電荷、me、mbは電子及びホー ルの有効質量、kbはボルツマン定数、hはプランク定 数、Tは温度、Egはバンドギャップである。したがっ て式 (F22)~(F25) によりVbiを求めることができる。

$$\left|V_{bi}\right| = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) \tag{F22}$$

$$n_i^2 = N_c N_V \exp(-\frac{E_g}{k_B T})$$
(F23)

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e k_B T}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$$
(F24)

$$N_{V} = 2 \left(\frac{2\pi m_{h} k_{B} T}{h^{2}}\right)^{\frac{3}{2}}$$
(F25)

以上より一様なドーピングがされたn層とp層のGaN ホモ接合(階段接合)において、任意の逆バイアス 電圧における電界分布、電位分布、空乏層幅を求め ることができることが示された。デバイスの耐圧設 計の観点からはEmax値が、GaNがブレークダウン(ア バランシェ降伏)するときの電界強度よりも小さい ことが必要である。また、逆バイアス電圧を上昇さ せてゆくと空乏層幅が広がってゆくため、n層及び p層の厚さがxn及びxpより大きくなければならない。

次に実際にGaN系PNホモ接合ダイオードにおけ る計算例を示す。計算に使用したパラメータは以下 の通りである。素電荷q=1.602 x 10⁻¹⁹ [C]、プラン ク定数h =6.626 x 10⁻³⁴ [J·s]、GaNのエネルギーバ ンドギャップEg=3.39 [eV]、GaNの比誘電率 ε_s =9.5、 真空中の誘電率 ε_0 =8.854 x 10⁻¹² [F·m⁻¹]、電子の 有効質量me=0.19mo、ホールの有効質量mh=1.65mo、 電子の静止質量mo=9.109 x 10⁻³¹ [kg]、ボルツマン 定数kB= 1.381 x 10⁻²³ [J·K⁻¹]、T=300 [K] とする とVhi=3.15 [V] であった。

まずN_D≪N_Aとしたときの空乏層幅を計算した。 高電圧印加時は|V_{bi}|≪|V_{bias}|であるから、式(F18)



(F19) より、n層側の空乏層幅xn及びp層側の空乏層 幅xpは、逆バイアス電圧のほぼ平方根に比例するこ とは明らかである。Np=2x10¹⁶ cm⁻³、Na=5x10¹⁷ ~2x10¹⁹ cm⁻³のときn層側の空乏層幅xnはNaにほ とんど依存しなかった。逆バイアス電圧2000 Vで xn=10.1 μ mとなり、n層側をかなり厚くしなければな らない。またp層側の空乏層幅xpはNaに大きく依存 し、Na=5x10¹⁷ cm⁻³のとき逆バイアス電圧2000 V でxp=0.402 μ mに達した。

次にN_A=5 x 10¹⁷ cm⁻³、N_D=1 x 10¹⁶~4 x 10¹⁶ cm⁻³ において逆バイアス電圧を1000 V加えたときの電 界分布を計算した (図F2)。N_D値によってn層側の 空乏層幅xnが大きく変化することや、最大電界強 度Emaxが変化することが視覚的に理解できる。Emax はGaNがアバランシェブレークダウンするときの 電界 (約3.3 MV/cm) よりも小さくなるようにしな ければならない。この計算からMOVPE成長には N_D=1 x 10¹⁶ cm⁻³程度の低濃度の制御が必要である ことがわかった。

以上のように単純なPN接合では電界分布の形状 は3角形になり、空乏層中の電界はPN接合界面付 近で最大となる。図F2からもアバランシェブレー

クダウンしないようにするためには最大電界強度が 3.3 MV/cmに到達しないようにNDを下げることが 有効であるが、一方で順方向特性を考えると電子濃 度の減少によりオン抵抗が増加してしまうというト レードオフが顕著になる。そこで、PN接合界面付 近のNDを減少し、それ以外の部分のNDを増加する ことで、n-GaN層の抵抗増大を極力抑制したうえで 耐圧向上が可能となる。このようにNDの異なる2 層のドリフト層を持つPNダイオードは、ダブルド リフト層構造PNダイオードと呼ばれる。図F3にダ ブルドリフト層構造PNダイオードのn層側空乏層中 の電界強度分布を計算した結果を赤線で示す。PN 接合界面付近のみのNDを減少することで、青線で 示した従来構造に比べてPN接合界面付近の電界強 度のみ減少している事が分かる。さらなる高耐圧化 のためにはPN接合界面付近のNpをいっそう減少す る必要がある。しかし、低濃度層を厚膜化した場合 n-GaN層の抵抗増大が再び顕著になる。耐圧向上と オン抵抗増大抑制を行うため、ドリフト層中に中間 の濃度を持つ層を1層加えたトリプルドリフト層構 造を考案した。図F4にこの構造で計算した電界強 度分布を緑線で示すPN接合界面付近で電界強度が



【図F3】ダブルドリフト層構造PNダイオードの空乏層内の電界強度分布



【図F4】トリプルドリフト層構造PNダイオードの空乏層内の電界強度分布

最大となるのは他の構造と同様であるが、ドリフト 層中の他の位置での電界強度がトリプルドリフト層 構造ではより平均化され、7000 V印加でも破壊電界 に到達していない。サイオクスで検討し続けている 3000 V以上の高耐圧ダイオードにはこのようなマル チドリフト層構造を採用している。

参考文献

- 1) Y. Yoshizumi et.al., *Journal of Crystal Growth* 298 (2007) 875.
- 加地徹 他、電気学会研究会資料(平成21年10月 29~30日)EFM-09-41
- Y. Hatakeyama, Jpn. J. Appl. Phys., 52 (2013) 028007.
- 4) I. C. Kizilyalli et.al., *IEEE Trans. Electron Devices*, 60 (2013) 3067.
- 5) H. Ohta et.al., *IEEE Electron Device Letter*, 36 (2015) 1180.
- 6) H. Ohta et.al., Jpn. J. Appl. Phys., 57 (2018) 04FG09.
- 7) R. J. Shul et al., Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 1119.
- N. Medelci et al., J. Electron. Mater. 29 (2000) 1079.
- 9) C. Youtsey et al., Appl. Phys. Lett. 71 (1997) 2151.
- J. A. Bardwell et al., J. Appl. Phys. 89 (2001) 4142.
- D. H. van Dorp et al., J. Electrochem. Soc. (2009) D371.
- F. Horikiri et al., Jpn. J. Appl. Phys. 57 (2018) 086502.
- F. Horikiri et al., Appl. Phys. Express 11 (2018) 091001.