

GaN結晶のPEC (光電気化学) エッチング



株式会社サイオクス
事業開拓部

堀 切 文 正
福 原 昇
柴 田 真佐知

Photoelectrochemical Etching Technology for Gallium Nitride Crystals

SCIOCS Co., Ltd.

Business Development Department

Fumimasa HORIKIRI
Noboru FUKUHARA
Masatomo SHIBATA

Gallium nitride (GaN) has been intensively studied for applications in various optical and electronic devices. In terms of the device fabrication process, etching technology is one of the most important factors affecting device performance. Generally, GaN is etched by inductively coupled plasma reactive ion etching, because it has excellent chemical stability. However, plasma can easily damage GaN surfaces. This report presents photoelectrochemical etching technology with simple set-up for damage-free GaN etching.

はじめに

窒化ガリウム (GaN) は、蛍光灯を代替する白色光源用の発光ダイオード (LED) やプロジェクターの照明用レーザーダイオード (LD) などに広く使われている¹⁾。また、GaNの電子デバイスは、消費電力が少なくかつ4G-5G通信の要求する性能を満足するため、携帯基地局などへの適用も進んでいる²⁾。さらに、最近ではGaNのパワーデバイスが省エネを実現するツールとして注目され、精力的に開発が行われている。これは、GaNがSiやGaAsと比較して、高い電子移動度と広いバンドギャップを有するため³⁾、オン抵抗が低く、絶縁耐圧の高いデバイスが製造できるからである⁴⁾。

上述したような半導体デバイスの作製には、材料のエッチング技術が不可欠である。一般的な半導体材料のエッチングには、酸やアルカリなどの溶液を使ったウェットエッチングと、誘導結合プラズマ (ICP: inductively coupled plasma) を利用した反応性イオンエッチング (RIE: reactive ion etching) などのドライエッチングの技術が、その目的に応じて使い分けられている。しかし、GaNという材料は、化学的に非常に安定で、結晶欠陥を検出するための特殊なエッチングを除けば、酸やアルカリなどの溶液を使ってエッチングする技術が確立されておらず、

デバイス製造プロセスにウェットエッチングは用いられていない⁵⁾。このため、現在はドライエッチングだけでデバイスの製造が行われている。ドライエッチングは、化学的に安定な材料でも強力にエッチングできることが特長であるが、その反面、GaN表面に対するエッチングダメージが大きく、これがデバイスの性能劣化を引き起こす可能性があり、よりダメージの少ないエッチング技術が求められている。

GaNのPECエッチング技術

光電気化学 (PEC: photoelectrochemical) エッチングとは、電解液中で半導体の表面にバンドギャップより高いエネルギーの光を照射して電子正孔対を発生させ、生成した正孔を用いて半導体の表面を陽極酸化し、その酸化物をエッチングで除去するというウェットエッチング技術の1つである。GaNのPECエッチング技術は、Minskyらによって1996年にはじめて報告⁶⁾され、その後、多くの論文が発表された⁷⁻¹¹⁾。Fig. 1に、従来のPECエッチング技術の模式図を示す¹²⁾。従来のPECエッチングでは、まずエッチングする面に電解液を保持するためのシール部を設け、その中に電解液を入れる。エッチング面には、GaNのバンドギャップ以上の365 nm未満の波長を有するUV光を照射し、GaN表面の陽極酸化を起こさせる。

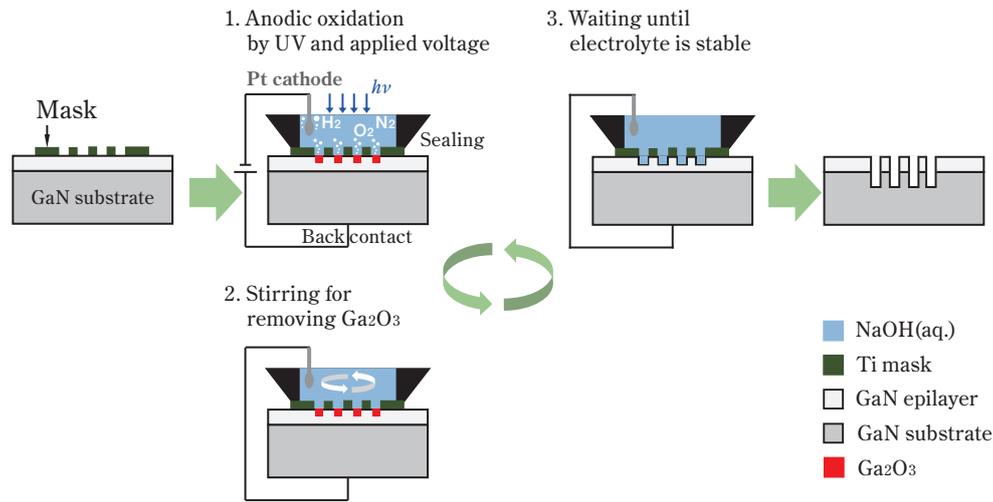
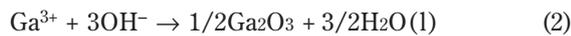
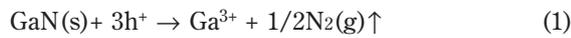


Fig. 1 Schematic representation of the conventional PEC etching of GaN¹³⁾
Copyright (2018) The Japan Society of Applied Physics



光照射で発生した電子正孔対の内、電子は試料に外部回路を接続して電解液中に別途設けたカソードへ導かれ、ここで水素の生成反応によって消費される。



PECエッチングは、GaNを直接溶解させるのではなく、酸化してから酸化物を溶解させるというステップを経ることで、化学的に安定なGaNをウェットでエッチングすることができる。なお、上記では省略しているが、GaNのバンドギャップは水の酸化還元電位よりも大きいため、陽極では窒素に加え酸素生成反応を伴う。

PECエッチングは、ドライエッチングに比較してエッチングダメージが少なく、また、マスクを適当に選べば光を照射した領域のみを選択的にエッチングすることができる。さらに、光照射で生じる正孔の寿命が短いため、GaNを垂直に深く掘ることが可能という特長も有している¹³⁾。一方で、従来のPECエッチングでは、エッチングする面に電解液を保持する仕掛けや外部回路への接続といった煩雑さがあり、電子デバイスの試作に用いられることはあっても、量産プロセスに採用されることはなかった。

コンタクトレスPECエッチング技術の開発

前述した従来PECエッチングの煩雑さを解消するため、外部回路への接続がない（コンタクトレス）

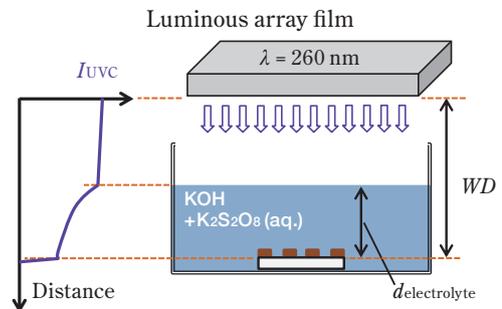
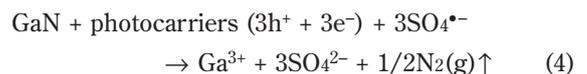


Fig. 2 Schematic illustration of the experimental setup for electrodeless PEC etching using K₂S₂O₈-containing solution under UVC illumination²¹⁾
Copyright (2019) The Japan Society of Applied Physics

PECエッチングが提唱されている^{14),15)}。コンタクトレスPECエッチングにおいては、光照射によって生じた電子を、外部回路を用いることなく、電解液中の硫酸ラジカルSO₄^{•-}に消費させることで、GaN試料を電解液中に沈めてUV光を照射するだけで、GaNのウェットエッチングを実現できる。**Fig. 2**に、コンタクトレスPECエッチング装置の模式図を示す。



硫酸ラジカルSO₄^{•-}は、強力な酸化作用を有することが知られており、一般的にペルオキシ二硫酸カリウム (K₂S₂O₈) などのペルオキシ二硫酸イオンに310 nm以下のUV光を照射することで発生させることができる。**Table 1**に、これまでに発表されているGaNのコンタクトレスPECエッチングに関する論文¹⁴⁾⁻²¹⁾のエッチング条件を一覧にして示す。

Table 1 Summary of the contactless PEC etching technologies²¹⁾
Copyright (2019) The Japan Society of Applied Physics

| Author | Electrolyte | UV source | Intensity (mW/cm ²) | Mask | Stirring | Rate (nm/min) |
|-------------------------------|---|---|---------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| G. Parish ¹⁴⁾ | KOH (pH=11.9-12.9) + 0.02-0.05 M K ₂ S ₂ O ₈ | HeCd 325 nm laser | 10 or 1000 | Pt | Stirred | 5-200 |
| | | Hg lamp (254 nm) to illuminate only electrolyte | 1.1 | | | |
| J. A. Bardwell ¹⁵⁾ | 0.08-0.1 M KOH + 0.08-0.1 M K ₂ S ₂ O ₈ | Hg lamp (500 W) | | Pt or SiO ₂ | Stirred | 43 @ Pt 4.8 @ SiO ₂ |
| | | with 254 nm mirror | 4.3 @ 254 nm 21 @ 310 nm | | | |
| | | with 365 nm mirror | 4.1 @ 310 nm 21.7 @ 365 nm | | | |
| Z. H. Hwang ¹⁶⁾ | 0.01 M KOH + 0.05 M K ₂ S ₂ O ₈ | Hg lamp (1000 W) through a water filter with mechanical chopper | 9-63 | Ti | Non | ND |
| R. T. Green ¹⁷⁾ | 0.005-0.1 M KOH + 0.1 M K ₂ S ₂ O ₈ | Hg-Xe lamp (500 W) (HeCd laser) | 70 @ 365 nm (160 @ 325 nm) | Ni or Ti | With & w/o stirring | 5-90 |
| D. H. van Dorp ¹⁸⁾ | 0.02 M KOH + 0.02 M K ₂ S ₂ O ₈ | Xe lamp (500 W) | ND | Wax | With & w/o stirring | ND |
| J. L. Weyher ¹⁹⁾ | 0.004-0.1 M KOH + 0.01-0.1 M K ₂ S ₂ O ₈ | Xe lamp (500 W) | ND | Wax | Non | ND |
| S. G. Lee ²⁰⁾ | 0.01 M KOH + 0.05 M K ₂ S ₂ O ₈ | Xe lamp (1000 W) through 345 nm long-pass filter with mechanical chopper | 100 (345-364 nm) | Ti/Au | ND | 30-60 5-15 |
| | | Q-switched 355 nm laser | 3.0 × 10 ⁵ | | | |
| F. Horikiri ²¹⁾ | 0.01 M KOH + 0.05 M K ₂ S ₂ O ₈ | Luminous array film (15 W) by pulsed driving | 4(8) @ 260 nm* | Ti or SiO ₂ | Non | 5-(17) @ Ti 1 @ SiO ₂ |

*: at the surface of electrolyte

当社でもこのコンタクトレスPECエッチング技術に着目して、GaNのウェットエッチングの検討を始めた。しかし、Table 1に示した既出の論文には実験装置のレイアウトなどが開示されているものではなく、また、エッチングができたというだけでその制御性まで議論しているものもなかった。そこで、PECエッチングの基本原理に立ち返り、基礎データを取るところから検討を始めた。

コンタクトレスPECエッチング技術の要点は、電解液中のペルオキソ二硫酸イオン (S₂O₈²⁻) にUV光を照射して分解しSO₄^{•-}を発生させることにあるが、一方でGaNの表面を励起して電子正孔対を発生させる必要もある。S₂O₈²⁻の分解には、310 nm以下のUV光の照射が必要で、一方、GaNの励起には、365 nm未満のUV光の照射が必要である。これらは、光源を別けて独立に照射することもできるが、エッチング装置を簡略化するためには、310 nm以下のUV光源1つで両者を同時に行うことが望ましい。そのためには、照射したUV光をバランス良くS₂O₈²⁻の分解とGaNの励起に使えるよう、K₂S₂O₈溶液の濃度や深さを調整する必要がある。そこで、各種濃度のK₂S₂O₈溶液に

おいてUV光透過率の波長依存性を測定した。K₂S₂O₈溶液の深さが1 cmの時の透過率の測定結果をFig. 3に示す。K₂S₂O₈溶液が濃くなるほど、吸収曲線が長波長側にシフトすることが確認できる。ランベルト・ベールの法則に波長λの依存性を考慮すると、深さx cmのK₂S₂O₈溶液を透過させたGaN表面での照射強度I_x(λ)は、次の式で表すことができる。

$$I_x(\lambda) = I_0 \times 10^{-\exp(-(\lambda-\lambda_i)/b) \times (x/a)} \quad (5)$$

ここで、I₀は電解液表面における照射強度、aは電解液深さ = 1 cmである。Table 2に示すパラメータλ_iおよびbの値を用いてフィッティングした結果を、Fig. 3中に点線で示す。このような吸収曲線の波長依存性は、光源選定の際の重要な知見であった。

本測定結果を受けて、次のような構成でPECエッチング実験を行うこととした。

光源：株式会社紫光技研製フィルム型深紫外プラズマ発光光源 (SK-BUVV-0860)

発光波長260 nm (FWHM = 55 nm)

電解液：0.01 M KOH + 0.05 M K₂S₂O₈

Table 2 Transmittance fitting parameters of the 0.01–0.1 M $K_2S_2O_8$ (aq.)²¹⁾
Copyright (2019) The Japan Society of Applied Physics

| | $K_2S_2O_8$ (aq.) (M) | | | | | |
|------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.08 | 0.10 |
| λ_i (nm) | 231.1 | 241.6 | 251.7 | 259.1 | 263.4 | 267.6 |
| b (nm) | 16.3 | 17.3 | 18.5 | 19.2 | 19.5 | 20.0 |

$I_0 = 92.36\%$, $a = 1$ cm

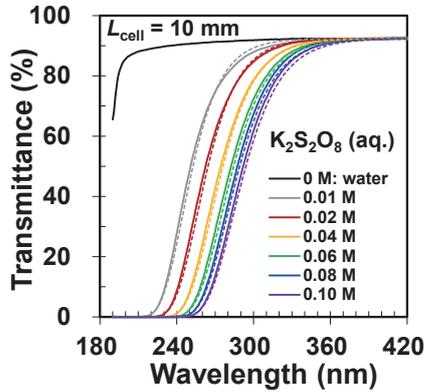


Fig. 3 Transmittance of $K_2S_2O_8$ (aq.) at various concentrations: 0 (water), 0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, and 0.10 M. A 10 mm path-cell length was used. The solid lines correspond to experimental data. The dashed lines correspond to the fitting results, which are based on Eq. (5) with parameters from Table 2.²¹⁾

Copyright (2019) The Japan Society of Applied Physics

電解液の深さ : 5 mm

光源から電解液までの距離 : 40 mm

電解液表面の紫外光強度 : 4 mW/cm² (ウシオ電機株式会社製UV照度計UIT-250にて計測)

この条件で、次のようなエッチング実験を行った。エッチングに用いた試料は、当社製のn型GaN基板上に、有機金属気相成長法 (MOCVD : metal organic chemical vapor deposition) でSBD (Schottky Barrier Diode) 構造の結晶をエピタキシャル成長したもので、基板の上に厚さ1 μ mのn⁺中間層を介して、Si : 1 \times 10¹⁶ cm⁻³ドープのn⁻ドリフト層を成長してある。このエピウェハ上に、マスクとして厚さ330 nmのSiO₂膜をスピンオンガラス法で製膜し、フォトリソグラフィ技術で、バッファードフッ酸にてマスクパターンを形成した。また、マスクの触媒活性効果を調べるため、一部に金属Tiを100 nm蒸着し、電子ビームリソグラフィ技術を用いてマスクパターンを形成した試料も用意した。Fig. 4に、コンタクトレスPECでエッチングしたGaNのエッチング時間とエッチング深さの関係を示す。GaNのエッチング

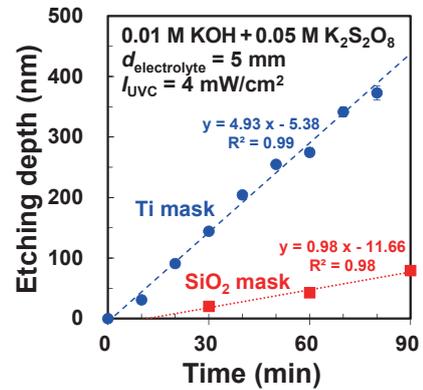


Fig. 4 Results of contactless PEC etching with a catalytic Ti mask, compared with those obtained by using an SiO₂ mask²¹⁾

Copyright (2019) The Japan Society of Applied Physics

深さは、時間に応じて線形に変化しており、制御性の良いことが確認できる。Tiをマスクに用いた時のエッチングレートは、約5 nm/minで、SiO₂マスクを用いた場合よりも5倍大きい。Van Dorpによれば、TiはコンタクトレスPECにおいてカソードとして機能し、Ti表面で電子が消費されて水素が発生すると報告されている¹⁸⁾。SiO₂マスクとTiマスクとのエッチングレートの差は、この現象に起因して生じていると推察される。即ち、絶縁性のSiO₂マスクでは、SiO₂表面での電子の消費が生じないため、GaN中に生成した電子は試料の側面や裏面がカソードとして機能することにより消費されるしかなく、これがエッチングレートの差になって現れていると考えられる。このことより、GaNのコンタクトレスPECエッチングにおいては、試料上にカソードとして機能する領域をどのように設計、形成するかが重要となることを示唆している。

コンタクトレスPECでGaN結晶を98 nmエッチングした試料表面のAFM (Atomic Force Microscopy) 像をFig. 5に示す。試料表面の粗さはRMS = 2.26 nmと非常に平坦なエッチング面が得られている。試料表面には、突起状の未エッチング領域が複数観察された。この突起は、UV照射で生成された正孔が、結晶中の貫通転位にトラップされてPECエッチングに寄与

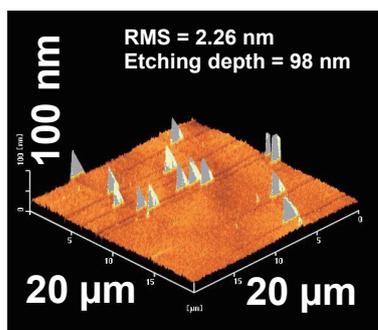


Fig. 5 AFM images of electrodeless PEC-etched GaN surface under UVC irradiation conditions for 98 nm etching depth²¹⁾
Copyright (2019) The Japan Society of Applied Physics

しないために、転位の存在する位置に対応して発生しているものと推測され、実際に突起の密度は下地基板の貫通転位密度とオーダー的に良い一致を示す。なお、これらの突起状の未エッチング領域は、PECエッチング後に85℃程度に加熱したTMAH（tetramethylammonium hydroxide）中で30～60 min処理することで、ほぼ除去できることが分かっている²²⁾。

酸系PECエッチング技術の開発

これまで報告されているGaNのPECエッチングは、コンタクトの有無にかかわらず、総て電解液としてKOHやNaOHの水溶液といったアルカリ系の液を用いている。しかし、特にコンタクトレスPECエッチングにおいては、 $S_2O_8^{2-}$ が分解して $2SO_4^{2-}$ となるため、電解液にアルカリを用いていると、UV光の照射につれて電解液がアルカリ性から酸性へと変化し、条件によってはエッチングレートが安定しないという難点がある。また、通常のデバイス作製プロセスでは、フォトレジストを用いたフォトリソグラフィが一般的に使用されているが、フォトレジストは、酸には耐性があるもののアルカリには弱く、液中で剥離してしまってもマスクとして機能しない。このため、これまでは SiO_2 やTiなどの金属膜をエピウエハに堆積させたあとで、フォトレジストを用いたフォトリソグラフィを行ってマスクパターンを形成するという手間が掛かっていた。

そこで我々は、アルカリ系のKOHに替えて、弱酸系のリン酸 H_3PO_4 を電解液に使い、酸系でのPECエッチングに取り組んだ²³⁾。実験に用いた試料は、当社製のn型GaN基板に、MOCVD法でn型のGaNをホモエピタキシャル成長したもので、エピ層のキャリア濃度、厚さ、転位密度は、それぞれ $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、 $3 \mu\text{m}$ 、 $3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ である。このエピ層の表面に、ポ

ジ型のフォトレジスト（Megaposit SPR 6810）をスピンコーターで950 nm塗布し、フォトリソグラフィ技術を用いて幅 $10 \mu\text{m}$ のストライプパターンを形成した。コンタクトレスPECエッチングに用いる電解液は、 $0.01 \text{ M } H_3PO_4 + 0.05 \text{ M } K_2S_2O_8$ を用いた。また、比較のため、 $0.01 \text{ M } KOH + 0.05 \text{ M } K_2S_2O_8$ の電解液を用いた実験も行った。これら以外のエッチング装置の構成は、前章で述べたものと同じである。

Fig. 6に、 H_3PO_4 系の電解液とKOH系の電解液にUV光を照射した際の、電解液のpHの経時変化の様子を示す。これより、 H_3PO_4 系の電解液は、時間の経過に伴うpHの変化が小さく、安定にエッチングが行えることが確認できた。なお、KOH系の電解液において、pHの経時変化は、硫酸イオンラジカル $SO_4^{\bullet-}$ の消費に伴い生成される H^+ イオンによる中和滴定として、

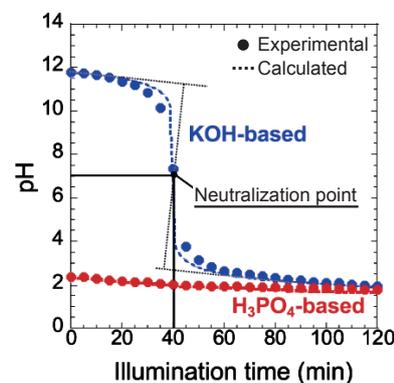


Fig. 6 Correlation between pH value of solution and illumination time of UVC light
Dashed lines indicate theoretical curves obtained with the H^+ ion production rate of $1.54 \times 10^{-4} \text{ M/min}$ ²³⁾
Copyright (2019) The Japan Society of Applied Physics

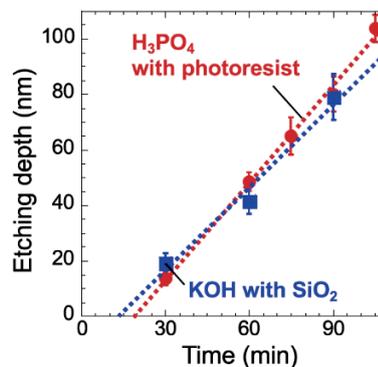


Fig. 7 Etching depth plotted as a function of etching time using H_3PO_4 -based solution and KOH-based solution²³⁾
Copyright (2019) The Japan Society of Applied Physics

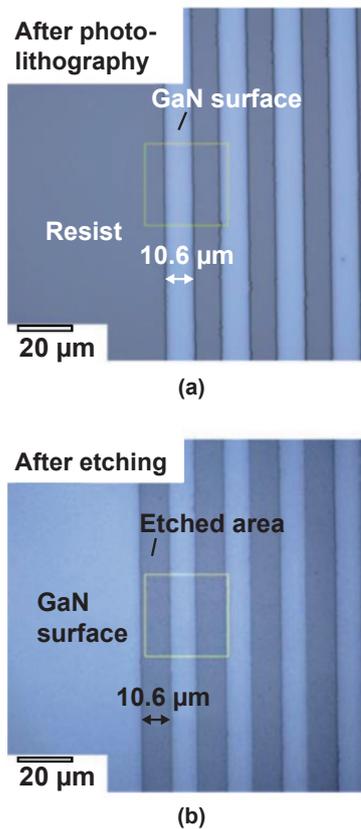


Fig. 8 Top-view images of sample with patterned-photoresist film (a) before and (b) after the etching²³⁾
Copyright (2019) The Japan Society of Applied Physics

解析することができる²⁴⁾。Fig. 7に、両電解液を用いてエッチングを行った際の、エッチング時間とエッチング深さの関係を示す。どちらの電解液でもほとんど差のないエッチングレートが得られており、グラフの線形性すなわちエッチング深さの制御性も良好である。Fig. 8に、 H_3PO_4 系の電解液を用いてエッチングを行った試料のエッチング前後の表面光学顕微鏡像を示す。Fig. 8(a)は、エッチング前のGaN表面にレジストマスクが付いている状態、(b)は、エッチング後にレジストマスクを除去した後のGaNの表面である。これにより、フォトリソをマスクに用いたエッチングでも、 SiO_2 マスクなど同様のきれいな選択性が得られることが確認された。以上の検討から、コンタクトレスのPECエッチングにおいて酸系の電解液が利用可能であることが確認でき、PECエッチングの応用範囲が格段に広がった。例えば、高周波電子デバイスとして用いられる高電子移動度トランジスタ（HEMT：high electron mobility transistor）のゲート部分の薄化（リセス形成）にコンタクトレスの酸系PECエッチングを適用した事例²⁵⁾などが既に報告され始めている。

PECエッチング技術のデバイスプロセス応用

上述のコンタクトレスPECエッチング技術の開発と並行して、PECエッチングがGaNのデバイスプロセスに対してどこまで応用できるかという見通しを立てると同時に、当社の顧客であるデバイスメーカーに対してPECエッチングの有効性をアピールする目的で、コンタクト有りのPECエッチングを使って種々のパターン加工のデモンストレーションを行った^{12),13),22)}。また、実際にPNダイオードの作製プロセスにおける素子分離および電界強度緩和のための台形加工（メサ形成）にPECエッチングを適用し、従来のドライエッチングで作製したダイオードと特性の比較を行った²⁶⁾。本章では、これらの結果について紹介する。

Fig. 9は、PNダイオード構造のエピに円形のTiマスクを着けてPECエッチングを行った試料のSEM像である。鉛直に切り立ったシリンダー型のパターンがきれいに得られており、サイドエッチングはほとんど

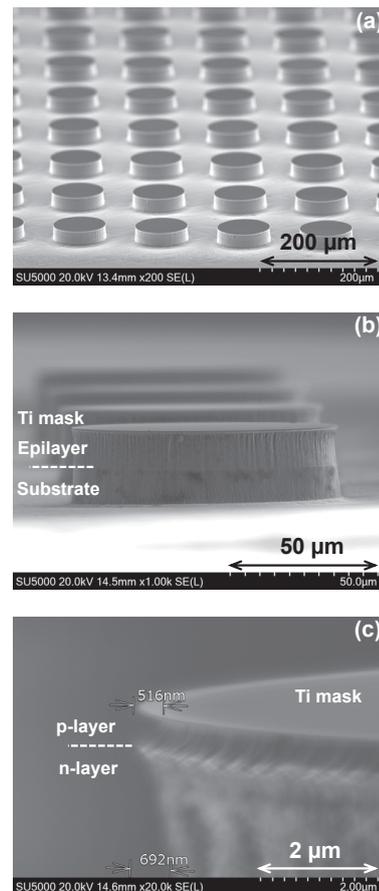


Fig. 9 SEM images of PEC-etched cylinder patterns: (a) Overhead view, (b) side view, and (c) near Ti mask and pn-junction¹³⁾
Copyright (2018) The Japan Society of Applied Physics

ど見られない。これは、GaN中に生成した正孔の寿命が短いことに起因しており、UV光が照射された部分だけが選択的にエッチングできることを示している。Fig. 10は、SBD構造のエピに、 ϕ 1、5、10、20 μm の円形の開口マスクパターンを付けて深さ7.7 μm のエッ

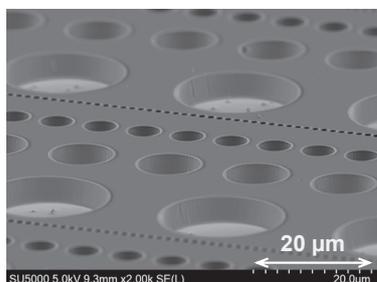


Fig. 10 SEM image of PEC-etched GaN SBD with an etching depth of approximately 7.7 μm . The diameters of the circular cavities were designed to be 1, 5, 10, and 20 μm .¹³⁾

Copyright (2018) The Japan Society of Applied Physics

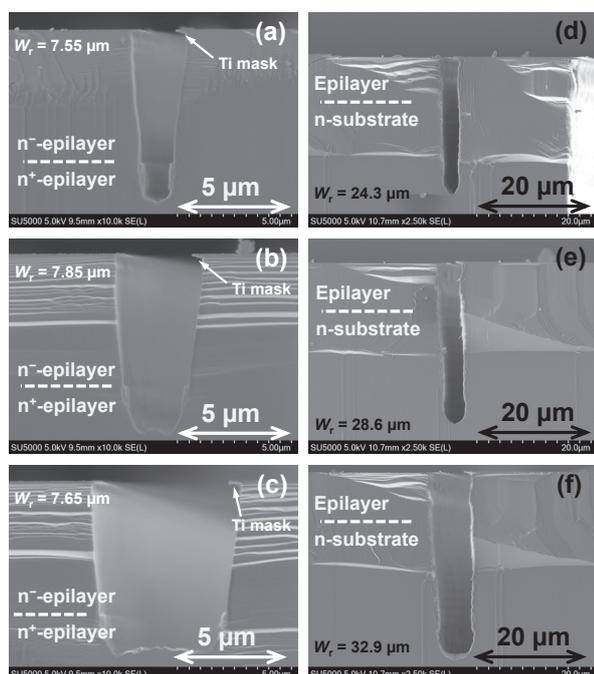


Fig. 11 Typical cross-sectional SEM images of the PEC etched trench patterns. The design PEC etching depth and Ti mask width were (a) $W_r=7.7 \mu\text{m}$ and 1.4 μm , (b) $W_r=7.7 \mu\text{m}$ and 2.8 μm , (c) $W_r=7.7 \mu\text{m}$ and 5.6 μm , (d) $W_r=33 \mu\text{m}$ and 1.4 μm , (e) $W_r=33 \mu\text{m}$ and 2.8 μm , (f) $W_r=33 \mu\text{m}$ and 5.6 μm , respectively.¹³⁾

Copyright (2018) The Japan Society of Applied Physics

チングを行った試料のSEM像である。また、Fig. 11は、SBD構造のエピに、幅1.4、2.8、5.6 μm のストライプマスクパターンを付けてエッチングを行い、トレンチ溝を掘った試料の断面SEM像である。溝の深さが33 μm に達するまできれいにエッチングができており、PECエッチングがリセス構造やメサ構造の形成だけでなく、素子のアイソレーションやスーパー Junction構造の溝形成など幅広く応用できる可能性が示された。Fig. 12は、PECエッチング技術を使ってGaNで形成した当社のロゴである。このような微細な構造のエッチングも可能である。

次に、PNダイオードの試作結果を示す。Fig. 13は、作成したPNダイオードの構造を示す断面模式図である。このダイオードのメサ加工に、PECエッチングを適用した。Fig. 14に、PECエッチングで形成したメサ形状のSEM写真を示す。比較のため、ICP



Fig. 12 PEC etched logo pattern of our company “SCIOCS”

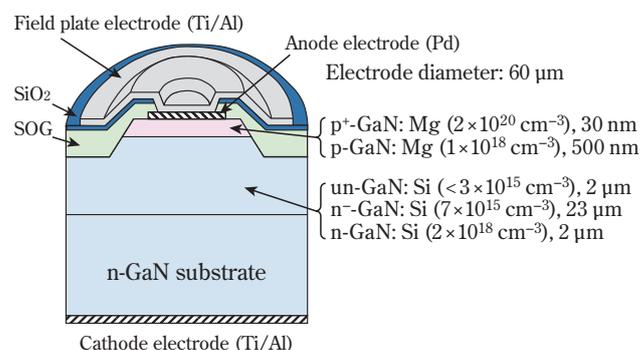


Fig. 13 Schematic cross-sectional structure of the GaN PN junction diode

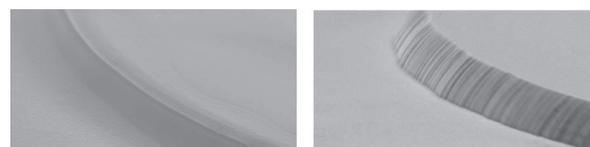


Fig. 14 SEM images of the mesa areas by PEC etching (left) and dry etching (right)²⁶⁾
Copyright (2019) The Japan Society of Applied Physics

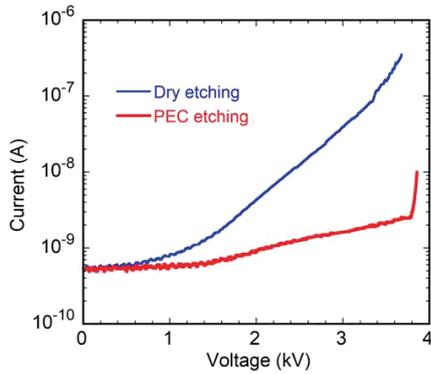


Fig. 15 Reverse I-V characteristics of the diodes fabricated by PEC etching and dry etching²⁶⁾
Copyright (2019) The Japan Society of Applied Physics

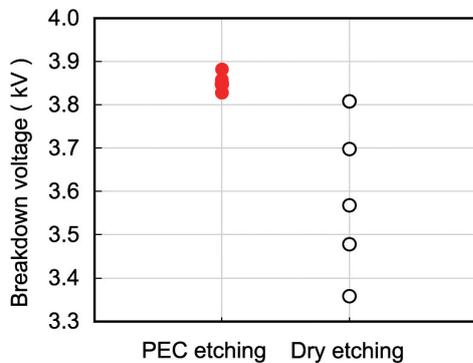


Fig. 16 Variations in the breakdown voltage of the diodes fabricated by PEC etching and dry etching²⁶⁾
Copyright (2019) The Japan Society of Applied Physics

ドライエッチングで形成したメサ形状も併せて示す。PECエッチングの方が滑らかな表面が得られ、また、フォトルミネッセンス測定の結果からもエッチングダメージが少ないことが確認できている。作製したダイオードのI-V特性を比較したところ、順方向ではほとんど差が見られなかったが、逆方向耐圧に顕著な差が生じた。**Fig. 15**は、PECエッチングとドライエッチングで作製したPNダイオードの逆方向I-V特性を示すグラフである。PECエッチングで作製したダイオードの方が、リーク電流が少なく、高い耐圧が得られていることが分かる。**Fig. 16**は、各6個のダイオードで測定した逆方向耐圧のばらつきを示すグラフである。PECエッチングで作製したダイオードの方が、明らかに逆方向耐圧が高く、かつ、ばらつきも少ない。これは、メサ端のエッチングダメージが電流のリークパスを与えるきっかけになっており、これの少ないPECエッチングが、デバイスの信頼性向上に大いに寄与することを示すものである。

PECエッチング技術の普及に向けて

GaNのコンタクトレスPECエッチングは、既に公知の技術ではあるが、それに関係した特許出願はこれまでにほとんどなく、まだまだ基本特許の権利化が狙える状況にある。もしも、特定のデバイスメーカーに基本特許を抑えられてしまうと、PECエッチングの普及は難しくなり、GaNデバイス市場拡大への貢献も見込めなくなる。そこで、デバイスメーカーに自由にPECエッチングを使ってもらえるよう、考えられる基本的なPECエッチング技術、装置に関する特許を精力的に出願している²⁷⁾。

SANMEI GROUP IDENTITY

SCIOCS sanmei

PEC Etching Apparatus: commercially available



PEC-6

Fully-automated PEC process apparatus

- Sequence : Programmable control
Light: ON/OFF
Light exposed time, Cycle number
Electrolyte: Supply/dispose
- Sample size : Chip Φ150 mm
- Light source : 3 types
 - Hg-Xe
 - UVB-LED
 - UVC
- Electrolyte : Automated supply
- Dispose : Spin dry
 - (to 20 L buffer tank)
- Handling : Manual, Single wafer type

SEMICON[®] JAPAN

Dec. 11-13, 2019. Tokyo.

Fig. 17 Poster of the PEC etching apparatus presented in SEMICON JAPAN 2019 by SANMEI Co., Ltd.

PECエッチング技術は、当社の製品であるGaN基板、GaNエピウェハを用いてデバイスを作製する際に、その性能を最大限に引き出すための技術である。即ち、PECエッチング技術は、当社の製品生産に寄与するものではなく、当社の顧客にお使いいただき初めて効果を発揮する。このためには、PECエッチングの有効性を学会発表や論文投稿を通じてGaNデバイス関係者に広めることも重要だが、実際に使っていたいただくためのハードルを下げるべく、コンタクトレスPECエッチング用の専用装置を開発し、安価に市場に提供することも重要である。そこで、マスクライナーやナノインプリント装置などを製造販売している株式会社三明にPECエッチングの技術指導を行い、上述の特許をライセンスして、PECエッチング装置の開発を行っていただいている。Fig. 17は、2019年度のセミコンジャパンで株式会社三明の出展ブースに掲示した開発中のPEC装置のポスターである。この装置は、2020年度中旬に市場投入すべく、現在準備中である。

おわりに

GaNは、同じワイドバンドギャップ材料であるSiCと比較して、研究開発のスタートが遅かった分、プロセス技術の開発が遅れており、物性的には優位なポジションにありながら、なかなかパワーデバイス分野での普及が進んでいない。本稿で紹介したコンタクトレスPECエッチング技術は、GaNのプロセス方法の選択肢を大きく広げ、より高いデバイス性能を引き出すものであり、これを普及させることでGaNデバイスの市場が大きく広がることを期待している。

謝辞

本稿で述べた開発成果の一部は、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」の委託を受けたものです。また、北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター 佐藤 威友 准教授との共同研究および法政大学イオンビーム工学研究所 三島 友義 教授との共同研究の成果を含んでおり、ここに記して感謝を申し上げます。

引用文献

- 1) S. Fujita, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 54, 030101 (2015).
- 2) F. Yamaki and S. Sano, *Proc. CS ManTech*, 004-5 (2018).
- 3) W. Saito *et al.*, *Solid-State Electron.*, 48, 1555 (2004).
- 4) H. Amano *et al.*, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 51, 163001 (2018).
- 5) D. Zhuang and J. H. Edgar, *Mater. Sci. Eng., R* 48, 1 (2005).
- 6) M. S. Minsky *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 68, 1531 (1996).
- 7) C. Youtsey *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 71, 2151 (1997).
- 8) H. Lu *et al.*, *J. Electrochem. Soc.*, 144, L8 (1997).
- 9) H. Cho *et al.*, *J. Electron. Mater.*, 28, 290 (1999).
- 10) I. M. Huygens *et al.*, *J. Electrochem. Soc.*, 147, 1797 (2000).
- 11) J. Skriniarova *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol.*, B19, 1721 (2001).
- 12) F. Horikiri *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 57, 086502 (2018).
- 13) F. Horikiri *et al.*, *Appl. Phys. Express*, 11, 091001 (2018).
- 14) G. Parish *et al.*, *Proc. SPIE*, 4592 (2001).
- 15) J. A. Bardwell *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 89, 4142 (2001).
- 16) Z. H. Hwang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 84, 3759 (2004).
- 17) R. T. Green *et al.*, *J. Electron. Mater.*, 36, 397 (2007).
- 18) D. H. van Dorp *et al.*, *J. Electrochem. Soc.*, 156, D371 (2009).
- 19) J. L. Weyher *et al.*, *J. Cryst. Growth*, 312, 2607 (2010).
- 20) S. G. Lee *et al.*, *Appl. Phys. Express*, 10, 011001 (2017).
- 21) F. Horikiri *et al.*, *Appl. Phys. Express*, 12, 031003 (2019).
- 22) F. Horikiri *et al.*, *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, 32, 489 (2019).
- 23) M. Toguchi *et al.*, *Appl. Phys. Express*, 12, 066504 (2019).
- 24) F. Horikiri *et al.*, *Appl. Phys. Express*, 13, 046501 (2020).
- 25) K. Miwa *et al.*, *Appl. Phys. Express*, 13, 026508 (2020).
- 26) N. Asai *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 58, SCCD05 (2019).
- 27) 例えば、(株)サイオクス、住友化学(株), JP 6625260 B1 (2019), JP 6668545 B1 (2020) など。

PROFILE



堀切 文正
Fumimasa HORIKIRI

株式会社サイオクス
事業開拓部
博士（工学）



柴田 真佐知
Masatomo SHIBATA

株式会社サイオクス
事業開拓部



福原 昇
Noboru FUKUHARA

株式会社サイオクス
事業開拓部