

高信頼性の窒化ガリウム（GaN）結晶 要素技術を実現

名古屋大学未来材料・システム研究所の 天野 浩 教授らの研究グループは、文部科学省「省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発」事業において、以下の研究成果をおさめました。

1. 最大の成果は、pn ダイオード^{注1)}へ逆方向に高電圧を印加した際に、特性劣化の原因である漏れ電流（リーク^{注2)}の起源となるキラ欠陥^{注3)}を特定すると共に、その大幅な低減に成功したこと。
2. GaN^{注4)}の種結晶^{注5)}を成長させるためのナトリウムフラックス法^{注6)}成長において、薄液育成法^{注7)}を構築し、口径が拡大する方向に結晶成長が進行し、かつ、面全体で欠陥密度を改善したこと。
3. 気相成長法^{注8)}による厚い GaN 基板を成長させる際、結晶の口径が減少する問題の解決に目途が立ち、大口径化に向けた新たな基盤技術を開発したこと。

本研究では、GaN 基板上の GaN デバイス（GaN on GaN デバイス）の社会実装を加速するため、高い信頼性を有する GaN 基板製造技術、低コスト化を目指しており、これまでの取り組みで、その基礎技術が構築できました。これらの研究成果の一部は米国科学雑誌「Applied Physics Letters」のオンライン版に掲載されました。なお、この研究は、平成 28 年度から始まった文部科学省『省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発』の支援のもとで行われたものです。

【ポイント】

- ◎GaN 基板上の GaN の pn ダイオードにおいて、エミッション顕微鏡^{注9)}法、多光子フォトルミネッセンス^{注10)}法、化学的エッチング^{注11)}法および大角度収束電子線回折法^{注12)}を用いて、逆方向高電圧印加時のリークの起源となるキラ欠陥の特定に成功しました。また、エピタキシャル^{注13)}成長時、成長炉内の圧力を、従来の減圧条件(500hPa)ではなく大気圧(1000hPa)で行うことにより、キラ欠陥の増殖を抑制できることが明らかとなりました。
- 窒化ガリウム(GaN)結晶成長用の種結晶を育成するナトリウムフラックス法において、表面の欠陥密度の大幅な減少に成功しました。これは、従来と比べて極端に Ga-Na 溶液を薄化(薄液育成法)することにより、溶液表面から GaN 結晶に拡散する窒素濃度が増えて側面成長速度が大幅に増加したためです。
- 気相成長法による厚い GaN 結晶成長において、これまで、結晶成長に伴って結晶径が減少する問題がありましたが、側壁形状を制御し、同一径で長尺成長するための基礎技術を確立しました。

【研究背景と内容】

キラ欠陥の特定と低減 (実施機関:名古屋大学)

これまで、GaN 基板上の GaN の pn ダイオードの報告はありましたが、デバイスの信頼性にとって大きな影響を与えるキラ欠陥については検討された例がありませんでした。今回、逆方向に高電圧を印加した状態でリークしている個所をエミッション顕微鏡で確定した後、化学エッチングによりエッチピット^{注14)}形状を確認し、その個所を多光子フォトルミネッセンス法によって、欠陥の伝搬状態を三次元的に確認しました。

その結果、複数の転位^{注15)}が相互作用してできた欠陥においてリークすることを突き留めました。また、その個所について、大角度収束電子線回折法を用いて欠陥を正確に評価し、バーガーズベクトル^{注16)}が 1c の螺旋転位^{注17)}であることを世界で初めて特定しました。

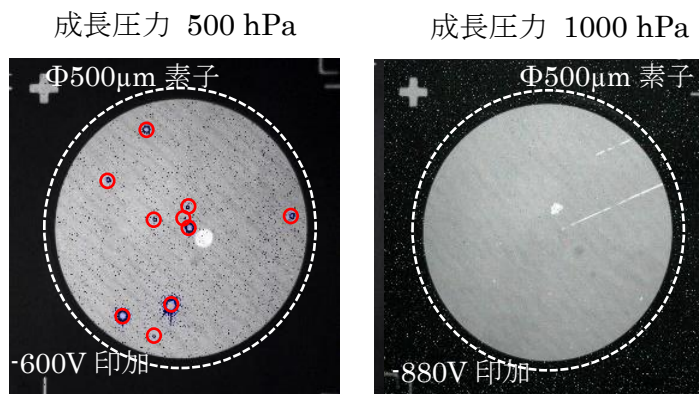


図1 従来の 500hPa(左)、及び大気圧 1000hPa(右)で成長した pn ダイオードの逆方向高電圧印加時のエミッション顕微鏡像。赤丸はリークを示すエミッション箇所。1000hPa 成長ではエミッションは観測されない。

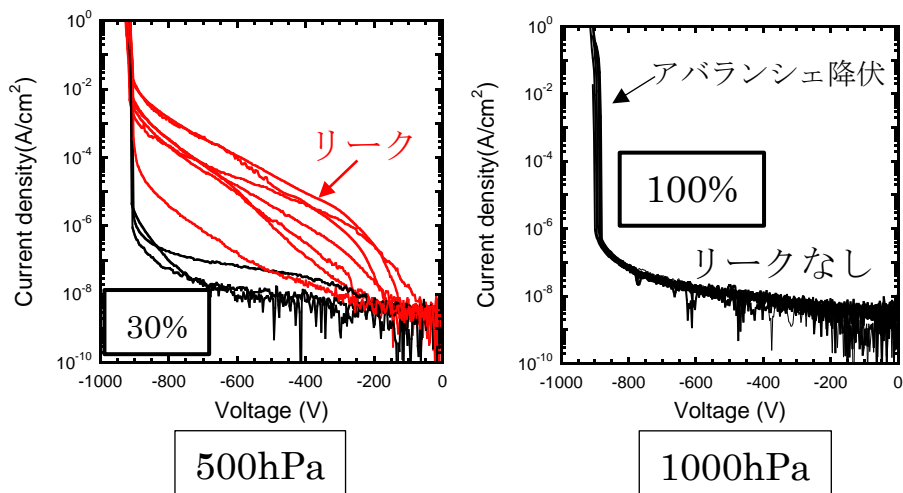


図2 pn ダイオード成長時の成長圧力を 500hPa で行った場合と 1000hPa で行った場合の逆方向リーク電流 (500hPa の場合は歩留まり 30%に対して 1000hPa の場合は歩留まり 100%)

さらに、従来は少ないガス流量で高均一性が得やすいことから、500hPa 程度の減圧成長が主でしたが、エピタキシャル層成長時の圧力を大気圧にして pn ダイオードを成長させる実験をしたところ、不純物濃度はほとんど変わらないにもかかわらず、歩留まりが大幅に向上することを初めて示しました。

薄液育成法および厚い GaN 結晶の作製技術(長尺化技術) (実施機関:名古屋大学、大阪大学)

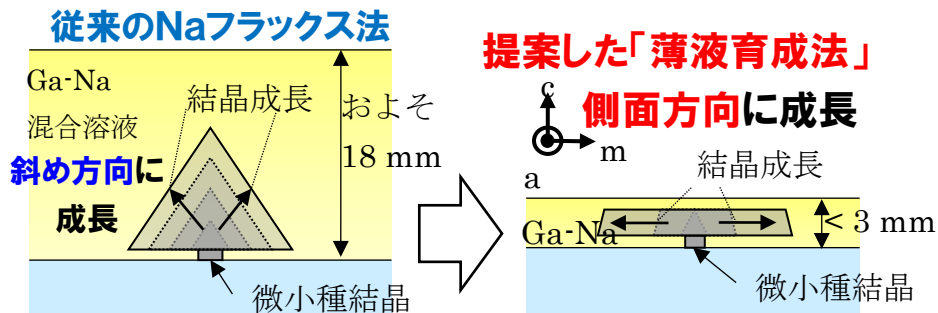


図3 従来の Na フラックス法での Ga-Na 溶液中での GaN 種結晶の成長形態と薄液成長法による GaN 種結晶の成長形態

Ga-Na 溶液中の窒素の拡散は非常に遅く、従来のナトリウムフラックス法では GaN の原料である窒素が気相から微小種結晶まで十分届かないために、結晶が斜め方向に成長していました。結晶欠陥は成長面に対して垂直方向に伝搬するため、表面に欠陥が伝搬し、信頼性の高い種結晶の育成は困難でした。そこで、Ga-Na 溶液の深さを薄くして成長させる実験を行ったところ、気相から微小種結晶への窒素の供給が十分行われるようになり、側面での成長が大幅に促進しました。これにより、欠陥は側面に伝搬して、表面の欠陥密度が大幅に減少し、信頼性の高い種結晶の育成が可能になりました。また、意識的に酸素不純物を制御して添加することによる結晶の低抵抗化が可能になりました。

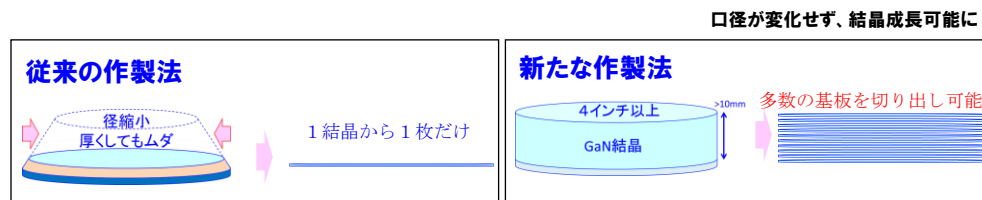


図4 気相成長法における従来の作製法と新しい作製法による GaN 基板結晶の形状の違い

また、従来 GaN 基板製造用の気相成長法では、結晶の側面が斜めになるために、厚い GaN 結晶を作製(長尺化)する場合には、成長に伴って結晶の口径が縮小し、その結果として1回の結晶成長で基板1枚しか製造することができないことが高コスト化の原因でした。今回、側面形状の制御をおこなうことにより直径を一定に保ち、長尺成長しても径が変化せず、一定の口径の結晶が得られるようになりました。そのため、1回の成長で多数の基板を切り出すための技術を構築することができました。

【成果の意義】

◎これまで信頼性に致命的な影響を与えてきたキラ欠陥を特定し、低減したことは、安心して使えるデバイスの実現に必須の成果です。また、エピタキシャル層の成長条件でキラ欠陥の伝搬が変わることを明らかにしたことにより、エピタキシャル成長によっても信頼性の向上が可能であることを示した画期的な成果です。

○GaN 基板作製の種結晶を育成するための Na フラックス法において、薄液育成法が有効であると判明したことにより、GaN 基板中の欠陥密度を大幅に低減することが出来るようになります。また、長尺 GaN の形状制御では、1回の成長で何枚も基板を切り出すことが可能となり、現在、社会実装の抑制要因となっている GaN 基板の高コストの問題を解決し、GaN 基板上の GaN デバイスの社会実装を加速することができる大きな可能性を有する成果です。

【用語説明】

- 注1) GaN: 金属ガリウムと窒素の化合物。青色 LED や次世代パワーデバイス、高周波デバイス用半導体結晶
- 注2) pn ダイオード: p 型と n 型の半導体を接合して出来たダイオードで、整流性がある。
- 注3) リーク: ここでは、pn ダイオードの逆方向に電圧を加えた時、理論値と比べて沢山の電流が流れる現象をさす。
- 注4) キラ欠陥: リークを生じさせる欠陥部。
- 注5) 種結晶: 基板として用いる長尺結晶を育成するための種として使用する結晶。
- 注6) ナトリウムフラックス法: 金属ナトリウム(Na)に金属ガリウム(Ga)を溶かし、高圧の窒素雰囲気下で加熱することにより、Na-Ga 溶液中に置かれた微小 GaN 種結晶から大型の GaN 種結晶を成長させる結晶成長方法。
- 注7) 薄液育成法: ナトリウムフラックス法において、Na-Ga 溶液を 3mm 以下と通常の 18mm 以上よりも薄くすることによって、種結晶表面での窒素濃度を大幅に増加することにより、側面での成長速度を上げる方法。
- 注8) 気相成長法: 気相から結晶を成長させる方法。原料によりさまざまであるが、ここでは金属 Ga と塩

化水素の反応により生成された塩化ガリウムとアンモニアの反応により GaN を成長するハロゲン原料による気相成長法を指す。

- 注9) エミッション顕微鏡:ダイオードに電圧を加え、発光の様子を顕微鏡観察する装置。リークする欠陥個所を見つけるために用いる。
- 注10) 多光子フォトルミネッセンス法:通常フォトルミネッセンスでは、励起用に用いる光源は被観察用半導体のバンドギャップよりも大きなエネルギーを持つ光子が用いられるが、本方法では、小さなエネルギーの光子を用い、誘電感受率の非線形光学効果を用いて等価的にバンドギャップ以上の光で励起したのと同じ作用を誘発させる。これにより、半導体内部で焦点を結ぶことが出来るようになるために半導体内部のフォトルミネッセンスの三次元分布を観察可能になる。
- 注11) 化学的エッチング:特定の化学薬品で結晶を削ること。結晶の中での欠陥、たとえば転位部は完全な箇所と比べて化学的な性質が異なることを利用すると、転位部に穴が開く。それをエッチピット(注14)と呼ぶ。
- 注12) 大角度収束電子線回折法:Large Angle Convergent Beam Electron Diffraction LACBED 法ともいう。転位のバーガーズベクトルを一意に決定することができる。
- 注13) エピタキシャル:基板結晶の原子配列に従って、成長層を構成する原子が配列する現象。
- 注14) エッチピット:化学薬品の種類によっては、特に転位部において、無転位部と比べて早く食刻されるために、転位部が穴になる。そのような穴をエッチピットと呼ぶ。
- 注15) 転位:結晶中に含まれる、線状の結晶欠陥。完全結晶の原子配置とは異なる位置に原子が配列されること。一般に螺旋転位、刃状転位、混合転位に分類される。
- 注16) バーガーズベクトル:転位の原子のずれの方向とその大きさを示すベクトル。
- 注17) 螺旋転位:バーガーズベクトルと転位線が平行の転位のこと。

【論文情報】

雑誌名 : Applied Physics Letters, Vol.112 Issue 18

論文タイトル : Correlation between dislocations and leakage current of p-n diodes on a free-standing GaN substrate

著者名 : Shigeyoshi Usami, Yuto Ando, Atsushi Tanaka, Kentaro Nagamatsu, Manato Deki, Kushimoto Maki, Shugo Nitta, Yoshio Honda, and Hiroshi Amano

DOI : [10.1063/1.5024704](https://doi.org/10.1063/1.5024704)