

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04578

研究課題名（和文）GaNパワーデバイス実用化に向けたデバイス内部の電界強度分布直接観察に関する研究

研究課題名（英文）Direct observation of electric field distribution in GaN power devices

研究代表者

田中 敦之（Tanaka, Atsushi）

名古屋大学・未来材料・システム研究所・特任准教授

研究者番号：30774286

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：多光子PL-OBICという新手法による、GaNの衝突電離係数評価を行ったり、順方向通電中のGaNダイオード中のキャリア分布の観察を試みたり、GaN基板の無転位領域を用いたPiNダイオードの漏れ電流を詳細に解析し、転位の影響を詳しく調べたり等、GaNをパワーデバイスに用いる際に必要だが、未解明な物性の解明に取り組んだ。その結果として、これまでは得られていなかった広い不純物濃度範囲での衝突電離係数が明らかにすることができた。また、デバイスキラーとなるような転位が含まれていない場合には転位の漏れは無転位の場合と比べると微々たるものであること、ただし漏れのモデルは異なることを明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今後GaNを用いたパワーデバイスが社会に実装されていくことが予想されるが、そのような情勢を考慮すると今回の研究成果の意義は大きいと考えている。まず、広い不純物濃度範囲での衝突電離係数を明らかにしたことについては、今後様々なデバイスが設計されると予想されるが、その耐圧設計の際の重要な指標となる。さらにこの衝突電離を深く研究したことが発展してテラヘルツ発振素子となるGaN-IMPATTの研究にもつながっている。また、転位に関する内容では、パワーデバイスに用いる場合無転位まで行かなくてもGaNデバイスは実用可能であることを示したことになり、今後のGaN基板開発の方向性に示唆を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：Using a new method called multiphoton PL-OBIC, we evaluated the impact ionization coefficient of GaN, observed carrier distribution in a GaN diode during forward biased state, and performed a detailed analysis of the leakage current in a PiN diode using a dislocation-free region of the GaN substrate. These are necessary but unexplored physical properties for using GaN in power devices. As a result, impact ionization coefficients over a wide range of impurity concentrations, which had not been obtained previously, were revealed. It was also found that the leakage of dislocations is negligible compared to the no-dislocation case when device-killing dislocations are not included; however, the model of leakage is different.

研究分野：パワーデバイス

キーワード：GaN 窒化ガリウム パワーデバイス 衝突電離係数 転位

1. 研究開始当初の背景

窒化ガリウム (GaN) はパワーデバイスの分野では次世代ワイドバンドギャップ半導体材料として徐々に実用化も始まっているが普及は進んでいなかった。その理由の一つとして単純な pin ダイオードを題材としても、実際に作製したデバイスの逆方向電圧印加時の耐圧やリーク電流は T-CAD 等のシミュレーションで得られる値に比べて悪い特性を示していた。つまり GaN の衝突電離係数やリーク電流の発生メカニズムを正しく理解できていないため、シミュレーションでの内部にはモンテカルロ計算等から出て来たとりあえずの物性値が入っているのみで、とりあえず計算はできるが、実用的なデバイスを設計しようとした際に、十分な精度で設計することはできない状態であった。また、シミュレーションに入ってくる問題として特異点=結晶欠陥である転位がどの程度逆方向特性に影響を与えるかもわかっていなかった。GaN の実用化を目指している我々にとってまずはここを改善したいと考えていた。一方我々の手持ちの手段として、多光子 PL 顕微鏡を用いてデバイス内部の電界強度を三次元的に直接観察する方法を開発しつつあった。転位に関しては本研究の一つ前の科研費テーマの時から取り組んでおり、X 線トポ、複屈折顕微鏡、3D アトムプローブ、TEM 等様々な評価手法の蓄積があった。

2. 研究の目的

本研究の目的としては、上記の多光子 PL 顕微鏡を用いた OBIC 的な手法により GaN デバイス内部の電界強度分布観察方法を確立し、それらを用いた衝突電離係数の測定により、より正確な GaN パワーデバイスの設計を可能にすることである。これによって GaN パワーデバイスのより早い、より広範な実用化である。また、結晶欠陥である転位がどの程度悪影響を及ぼすか、ということも明らかにし、安心して実用化に進められるようにすることである。

3. 研究の方法

(1) 多光子 PL-OBIC

デバイス内部の電界分布の測定に関しては本科研費テーマオリジナルの手法である多光子 PL-OBIC を用いて測定を行った。多光子 PL-OBIC とは多光子励起光を用いることで電圧をかけたデバイス中の任意の位置に電子正孔対を発生させ、その光誘起電流を外部回路で測定することによって、多光子励起光焦点位置の情報を得るものである (図 1)。これを用いて逆方向電圧印可中の pin ダイオード内の電界分布及びその際の増倍電流等を調べ、各電界での衝突電離係数を調べた。

(2) 転位と漏れ電流

転位と漏れ電流の関係に関しては本テーマでは局所的 (最低でもデバイスの大きさ=500um φ 程度) に無転位領域がある低転位の GaN 基板と、通常の $1e-6[cm^2]$ 台の GaN 基板を用いて pin ダイオードを作製し、逆方向耐圧時の漏れ電流を詳細に比較することを行った。pin ダイオードの作製プロセスではデバイスメサまで進んだところで放射光設備に持っていき、X 線トポでデバイス内の転位数を確認しつつ進める等工夫を行った。

4. 研究成果

(1) 多光子 PL-OBIC を用いた研究

GaN の衝突電離係数に関して、正孔の増倍係数の方が大きく、アバランシェ降伏の発生に支配的なことがわかっており、正孔の衝突電離係数評価がまず重要となってくる。正孔の衝突電離係数評価のためには逆方向電界印可中の pin ダイオードの奥の n 層に発生させた正孔が n 層を走ってくる際にどのように増倍するかを測定する必要がある。これまで奥の n 層に正孔を発生させる手法が様々に発案され、衝突電離係数の評価は行われていたが、そのどれもが実際のデバイスとの乖離や結晶性の問題、狭い電界範囲内での評価しか行えない等の問題があった。しかし今回多光子 PL-OBIC という新手法を用いることで、実際のデバイスで衝突電離係数が評価でき、さらにこれまでにない低電界領域 (高耐圧パワーデバイスを設計するときに重要になる領域) でも

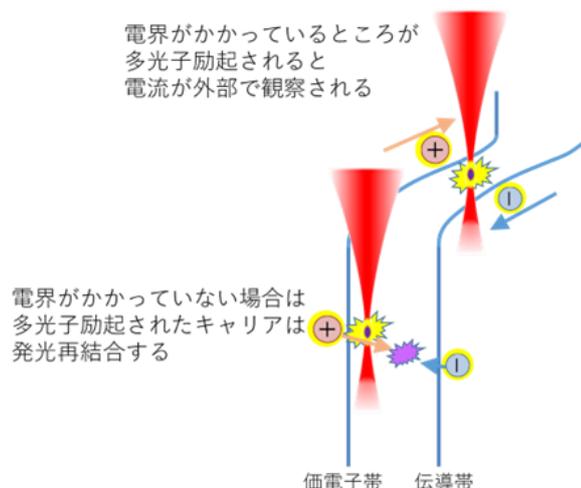


図 1. 多光子 PL-OBIC 原理概念図

評価を行う事が出来た。

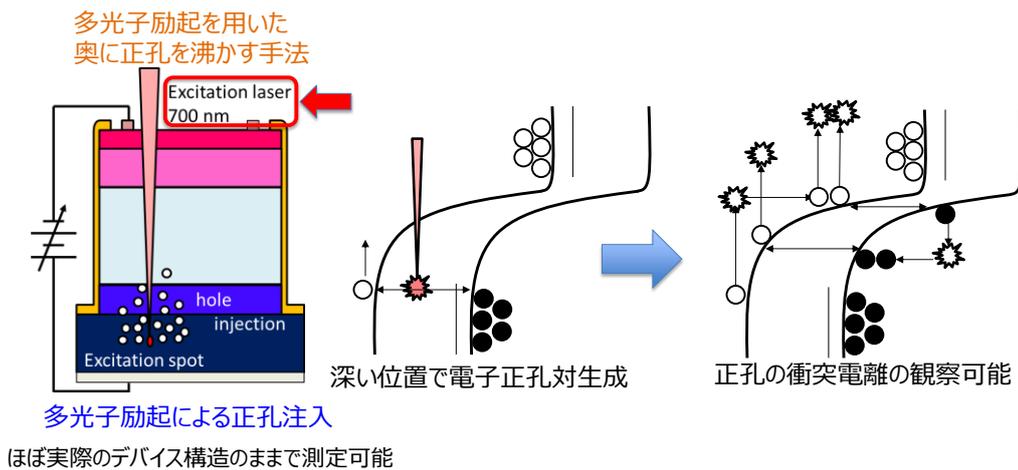


図 2. 多光子 PL-OBIC による衝突電離係数評価の概念図

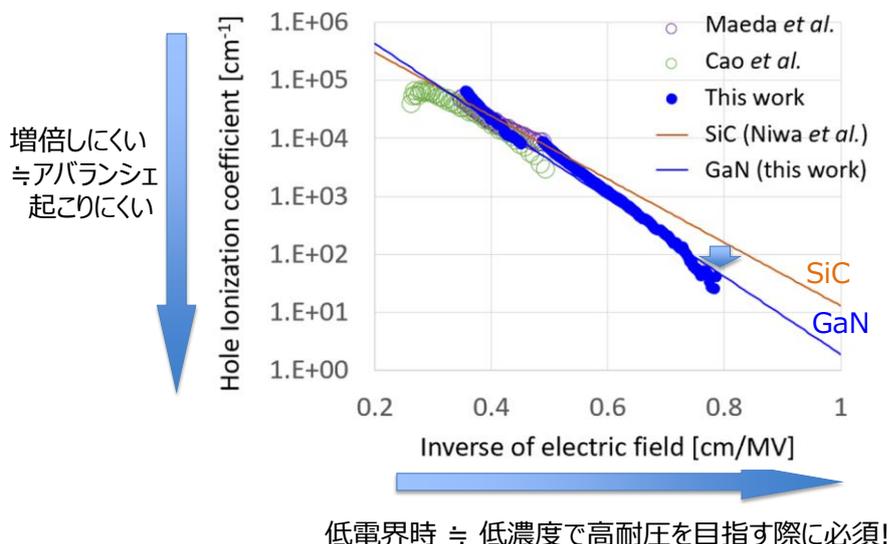


図 3. 多光子 PL-OBIC により得られた正孔の衝突電離係数

また、ここで得られた GaN のアバランシェ増倍に関する知見をもとにテラヘルツ発振素子となる可能性のある IMPATT ダイオードの研究などが始まっている (図 4)。

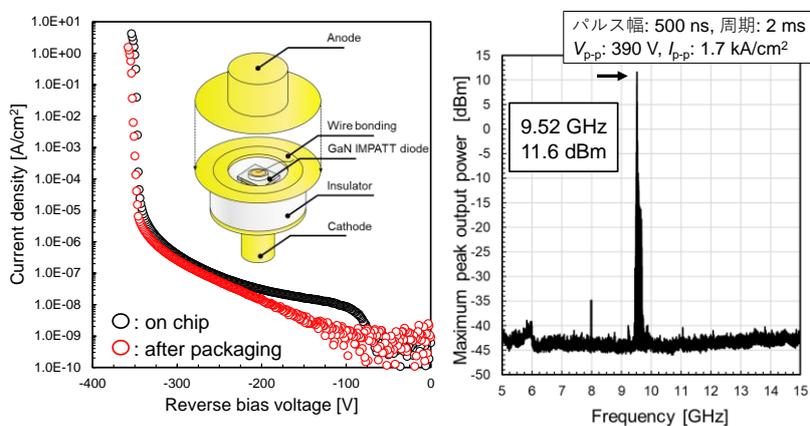


図 4. IMPATT ダイオードの逆方向 I-V 特性とパッケージの様子 (左) と発振スペクトル (右)

(2) 転位と漏れ電流に関する研究

当初は上述の多光子 PL-OBIC を用いて転位周りの電界分布観察から、転位の電気的特性に迫る予定であったが、多光子 PL-OBIC では転位の周りとは、無転位の領域について発生させたキャリアの流れ方等に有意な差は認められなかった。そこで転位が1個も入っていないデバイス、1, 2個入っているデバイス、沢山転位が入っているデバイスを作製し、その電気特性の違いを詳しく調べることにした。その結果、無転位デバイスと、1, 2個の転位を含有するデバイスでは大きな違いは見いだせなかったが、複数の転位 (10^5cm^{-2} 台) があるデバイスでは良品デバイスであっても逆方向 I-V の形状および温度特性が違ふ事を見出した。詳細な解析によって無転位デバイスではサーミオニックエミッションモデルに従った漏れ電流であるのに対して、転位がある場合には転位部がトラップとして働くのかプールフレンケルモデルに従っていることが分かった。ただし、実用上定量的にはほぼ差がないとしてよいレベルであり、キラー欠陥となるような転位がない場合には 10^5cm^{-2} 台以下の転位密度では問題が起きないことが示された。

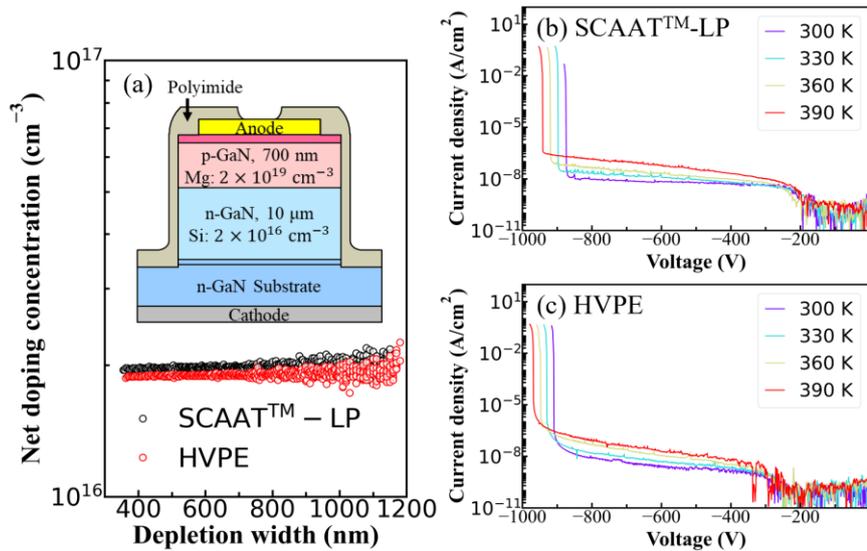


図 5. 作製した pin ダイオードの模式図及びドリフト層不純物濃度 (a) と無転位デバイス(b)、有転位デバイス(c)の逆方向 I-V 特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kwon Woong, Kawasaki Seiya, Watanabe Hirotaka, Tanaka Atsushi, Honda Yoshio, Ikeda Hirotaka, Iso Kenji, Amano Hiroshi	4. 巻 early access
2. 論文標題 Reverse leakage mechanism of dislocation-free GaN vertical p-n diodes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Electron Device Letters	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LED.2023.3274306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Woong Kwon, Seiya Kawasaki, Atsushi Tanaka, Hirotaka Watanabe, Yoshio Honda, Hirotaka Ikeda, Kenji Iso, Hiroshi Amano
2. 発表標題 Reverse leakage mechanism of 900 V-class GaN vertical p-n junction diodes with and without threading dislocations
3. 学会等名 International workshop on Nitride semiconductors 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 權熊、川崎晟也、渡邊浩崇、田中敦之、本田善央、池田宏隆、磯憲司、天野浩
2. 発表標題 900V級縦型GaN p-n接合ダイオードにおける貫通転位の有無による逆方向リーク電流のメカニズム
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 八木誠、川崎晟也、隈部岳瑠、安藤悠人、田中敦之、出来真斗、久志本真希、新田州吾、本田善央、天野浩
2. 発表標題 多光子励起OBICを用いたGaN縦型p-nダイオード駆動中におけるキャリア濃度分布測定手法の提案
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 川崎晟也、安藤悠人、渡邊浩崇、田中敦之、出来真斗、新田州吾、本田善央、天野浩
2. 発表標題 多光子励起を用いたGaNの正孔の衝突イオン化係数の測定
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本田善央、田中敦之、川崎晟也、出来真斗、天野浩
2. 発表標題 GaNによるpn接合ダイオード中の光学的手法及び電気的手法による欠陥評価
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関