

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：11201

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15450

研究課題名（和文）ホッピング伝導に起因する高抵抗GaNの共振周波数緩和機構の解明

研究課題名（英文）Mechanism elucidation of unusual piezoelectric relaxation of GaN caused by hopping conduction of carriers

研究代表者

足立 寛太 (Adachi, Kanta)

岩手大学・理工学部・助教

研究者番号：50823879

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高抵抗GaNに対して共振周波数と内部摩擦の温度依存性を計測し、測定結果を振動モードの観点から系統的に調べることにより、高抵抗GaNが示す特異な圧電分極緩和現象の発現機構の解明に取り組んだ。その結果、高抵抗GaNにおける圧電分極緩和現象では複数の内部摩擦ピークが発生し、それらの大きさとピーク温度は圧電分極分布に強く依存することを明らかにした。また、圧電分極緩和に起因する共振周波数の低下は各内部摩擦ピークに応じて段階的に発生することを明らかにした。これらの成果より、高抵抗GaNにおけるキャリアのホッピング伝導の異方性が特異な圧電分極緩和現象の主要因であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、高抵抗GaNを用いた高周波・高出力・高耐熱の電子デバイスの開発が精力的に行われており、高抵抗GaNの圧電分極緩和現象はこれらのデバイスの高温度での特性に顕著な影響を及ぼす。そのため、本研究の成果は、GaN型トランジスタ内に生じるリーク電流経路の制御や、高温環境下でも性能が低下しない高耐熱GaN型弾性波フィルタの開発などにつながることを期待される。また、圧電分極緩和現象はキャリアのホッピング伝導の特性を反映するため、本研究の成果は高抵抗GaNの電気伝導特性および弾性波の伝播特性の解明にも貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we monitored the resonance-frequency and internal-friction behaviors of GaN for various vibrational modes at high temperatures and investigated the unusual piezoelectric relaxation of GaN. Our measurements revealed that GaN shows several internal-friction peaks whose amplitude and peak temperature depend strongly on piezoelectric polarization distributions. We also found that a decrease in a resonance frequency resulting from piezoelectric relaxation occurs in stages in response to each internal-friction peak. These findings suggest that the unusual piezoelectric relaxation of GaN is attributed to the anisotropy of hopping conduction of carriers.

研究分野：超音波工学

キーワード：窒化ガリウム 圧電分極緩和 ホッピング伝導 内部摩擦

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

青色発光ダイオードの基板材料として知られる GaN は電子デバイス用材料としても優れた特性を有しており、高周波・高出力・高耐熱の電子デバイスの材料として期待されている。近年、GaN 基板を用いた集積回路の開発が進んでおり、その構成要素である GaN 型トランジスタや弾性波フィルタの研究が盛んに行われている。これらの電子デバイスにはアクセプタイオンとして鉄イオンが添加された高抵抗 GaN が使用され、高抵抗 GaN における電気伝導は熱振動のエネルギーを受け取った電子が鉄イオン間をホッピング移動することにより生じる。このホッピング伝導は熱活性化現象であり、高温域のデバイス特性に顕著な影響を及ぼす。例えば、GaN 型トランジスタでは高温域でホッピング伝導に起因するリーク電流が発生し、性能が急激に低下することが知られている。そのため、GaN の電子デバイスへの応用では、高抵抗 GaN におけるホッピング伝導の特性を正確に理解することが重要となる。

ホッピング伝導のようなキャリアの熱活性化運動は圧電分極緩和を引き起こすことが知られている。従来、キャリアの熱活性化運動に伴う圧電分極緩和は誘電緩和などと同様にデバイ型の緩和現象であり、圧電分極緩和に起因する共振周波数と内部摩擦の変化はデバイ型の緩和式に従うと考えられてきた。ところが、実際に室温から高温の温度域で高抵抗 GaN の共振周波数と内部摩擦を計測すると、それらは非デバイ型の挙動を示すことが明らかとなった [1]。つまり、高抵抗 GaN のホッピング伝導に起因する圧電分極緩和は非デバイ型の緩和現象であり、その発現機構は従来の緩和モデルでは説明することができなかった。そこで、様々な振動モードの共振周波数と内部摩擦の温度依存性を計測することにより、キャリアのホッピング伝導に起因する高抵抗 GaN の特異な圧電分極緩和現象の発現機構の解明を目指した。

2. 研究の目的

高純度かつ欠陥の少ない高抵抗 GaN 試料の形状は最大でも厚さが 400 μm 程度の薄板形状に限られるため、本研究ではまず、高抵抗 GaN 試料の共振周波数と内部摩擦を室温 \sim 300 $^{\circ}\text{C}$ の範囲で高精度に計測することができる超音波共鳴法計測装置の構築を目指した。そして、高抵抗 GaN に対して様々な振動モードの共振周波数と内部摩擦の温度依存性を計測し、圧電分極緩和に起因する共振周波数と内部摩擦の変化挙動を振動モードの観点から系統的に調べることにより、高抵抗 GaN におけるキャリアのホッピング伝導の特性について新たな知見を得ることを目指した。

3. 研究の方法

薄板形状の高抵抗 GaN 試料に対して、高温で様々な共振モードの共振周波数と内部摩擦を高精度に計測するために、高温用超音波共鳴法計測装置を新たに構築した。本計測装置では従来の二点挟み込み型超音波センサではなく、三点支持型の超音波センサを使用する。試料は 2 本の針状石英ガラス棒と 1 本の針状熱電対による 3 点支持の上に設置する。試料の温度は針状熱電対により直接計測し、振動の励起と検出は石英ガラス棒に取り付けた棒状圧電振動子により行う。試料を円筒状電気炉の中に挿入することにより、高温域での計測を実現する。この手法では試料に自重以外の外力が作用せず保持力が発生しないため、共振周波数を正確に計測することができる。また、従来の接触法による内部摩擦計測では接触部から試料の振動エネルギーが漏れてしまうため、内部摩擦を過大に評価してしまうが、本研究で構築した三点支持型超音波共鳴法計測装置では理想的な自由振動状態で計測を行うことができるため、内部摩擦も正確に計測することができる。

構築した計測装置を用いて室温 \sim 300 $^{\circ}\text{C}$ の温度域で共振スペクトル計測を行い、各共振ピークにローレンツ関数をフィッティングし、共振周波数と内部摩擦(ピークの半値幅から決定)の温度依存性を評価した。

4. 研究成果

高抵抗 GaN 試料に対する共振スペクトルの温度依存性の計測例を図 1 に示す。温度の上昇に伴い共振周波数は低下することが分かる。また、ピーク形状に関しては、温度が上昇するにつれて一度鈍くなり、その後再び鋭くなっていることが分かる。ピーク形状のこのような変化はこの温度域に内部摩擦ピークが存在することを示唆する。これらの共振スペクトルから算出した共振周波数と内部摩擦変化を図 2 に示す。ここで、左側の縦軸は温度変化に伴う共振周波数変化を差し引き、圧電分極緩和に起因する共振周波数変化を抽出した形で表している。図 2 より、内部摩擦ピークは 90 $^{\circ}\text{C}$ 近傍、120 $^{\circ}\text{C}$ 近傍、140 $^{\circ}\text{C}$ 近傍に 3 つ存在しており、単一の内部摩擦ピーク

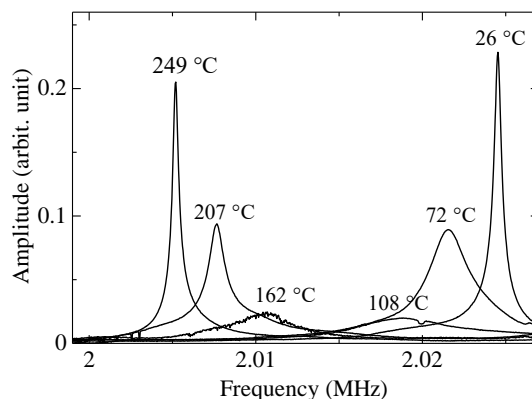


図 1 共振スペクトルの温度依存性

を表すデバイ型の緩和式とは異なる挙動であることが分かる。また、圧電分極緩和に起因する共振周波数の低下は一様に発生せず、各内部摩擦ピークに応じて段階的に低下することが確認できる。他の共振モードに対しても同様に複数の内部摩擦ピークが観測され、内部摩擦ピークの大きさとピーク温度は共振モード、つまり、圧電分極分布に強く依存していた。また、全ての共振モードに対して、共振周波数の低下は各内部摩擦ピークに応じて段階的に発生した。これらの結果より、高抵抗 GaN におけるキャリアのホッピング伝導の異方性が特異な圧電分極緩和現象の主要因であることが示唆された。

また、観測された複数の内部摩擦ピークがデ

バイ型の内部摩擦ピークの重ね合わせで記述できると仮定して、各内部摩擦ピークに対するアレニウスプロットを算出し、高抵抗 GaN におけるキャリアのホッピング伝導の活性化エネルギーを算出した。その結果から、今回観測した特異な圧電分極緩和現象が確かにキャリアのホッピング伝導に起因していることが確認できた。さらに、活性化エネルギーの値が内部摩擦ピーク毎に大きく異なることから、高抵抗 GaN におけるキャリアのホッピング伝導は広範囲ホッピング伝導であることが示唆された。

本研究で得られた知見は、GaN 型トランジスタ内に生じるリーク電流経路の制御や、高温環境下でも性能が低下しない高耐熱 GaN 型弾性波フィルタの開発などにつながることを期待される。

<引用文献>

- [1] K. Adachi, H. Ogi, A. Nagakubo, N. Nakamura, M. Hirao, M. Imade, M. Yoshimura, and Y. Mori, Piezoelectric coefficients of GaN determined by hopping conduction of carriers, Applied Physics Letters 109, 182108 (2016).

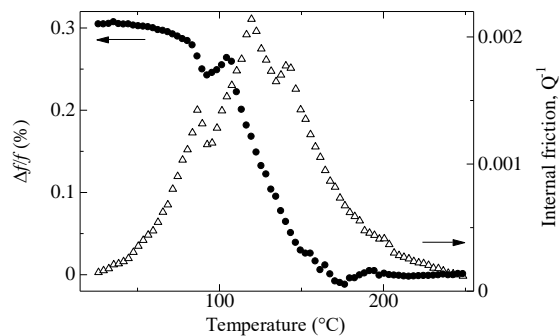


図2 共振周波数と内部摩擦変化

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 Adachi Kanta, Waki Hiroyuki	4. 巻 28
2. 論文標題 Anisotropic Elasticity of APS and HVOF CoNiCrAlY Coatings Studied by Resonant Ultrasound Spectroscopy with Laser Doppler Interferometry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Spray Technology	6. 最初と最後の頁 1017 ~ 1024
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11666-019-00878-w	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 K. Adachi, H. Waki, and H. Ogi
2. 発表標題 Carrier dynamics of hopping conduction in high-resistance GaN studied by resonant ultrasound spectroscopy
3. 学会等名 The 40th Symposium on Ultrasonic Electronics（国際学会）
4. 発表年 2019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
---------	---------