

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06014

研究課題名(和文) GaNトランジスタのリーク電流機構の解明に向けた局所リーク電流発生箇所の同定

研究課題名(英文) Identification of Local Current Leakage Location for Mechanism of Leak Current in GaN Transistors

研究代表者

分島 彰男 (Wakejima, Akio)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80588575

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：GaN/Siトランジスタに発生する局所的なリーク電流の解析をおこなった。通常用いられる金属に変え、透明であるITOをゲート電極とし、リークによる発光を透明ゲート電極を通して確認することに成功した。複数のサンプルで、ゲートリーク電流と発光によるフォトン数の大小に相関があることも確認した。ゲート部の発光箇所直下のSTEM観察を行い、バッファ層に相当する箇所で異常な成長がおこっていることを確認した。電極をつけないでリークを観察するために、AFM装置を用いてGaN系結晶の微小電流を測定することに成功した。微小電流が流れる箇所は、AFMで観察した表面形状との相関はなかった。

研究成果の概要(英文)：Local leakage current of GaN/Si transistors were evaluated. Instead of a metal based electrode, a transparent ITO base electrode was fabricated for the gate, with which we can observed current base emission through the gate electrode. Relationship between amounts of leakage current and number of photos of emission. Also, from cross-sectional STEM observation just under the gate where emission occurred, we found there are unexpected disordered epitaxial growth at the very deep area of the epitaxial structure. For the purpose of leakage current observation at the non-metalized GaN based epitaxial structure, nano-current was successfully observed using an AFM equipment. The location of the leakage current was not found to be related to the surface morphology of the sample.

研究分野：半導体 電子デバイス

キーワード：窒化物半導体 トランジスタ リーク電流 AFM

## 1. 研究開始当初の背景

SiC や GaN といったワイドバンドギャップ半導体を用いたトランジスタは、次世代低消費電力パワーデバイスとして期待されている。特にその中でも、大口径化が可能な Si 基板上の GaN 系トランジスタ (GaN-on-Si トランジスタ) に対する期待が極めて高くなっている。

GaN-on-Si トランジスタは低消費電力性能といった電気的特性においては Si パワーデバイスを凌駕する一方で、GaN 結晶中の不純物準位、ゲートリーク電流機構、結晶・絶縁膜界面の状態など結晶およびデバイス物理において多くのことが解明されていない。

このような解明されていない課題の中でも、ゲートリーク電流 (以下、リーク電流) は、製品化で求められる長期信頼性に大きく影響を及ぼすため、その低減や発生機構解明は極めて重要である。特に、今後は、低消費電力性能を一層高めるために微細化が進むことで、リーク電流が増大し、この問題が顕在化することが予想される。また、自動車用途など高信頼度が要求される製品への適用では、既存の製品よりも数段高い信頼度が要求されるからである。

デバイス製造工程の点では、GaN-on-Si トランジスタでは、現在のところ、Si パワーデバイスで一般に用いられている電界緩和のためのイオン注入技術が確立していないことも、リーク電流がこの先大きな問題になると予想する理由の一つである。

GaN-on-Si トランジスタのリーク電流解析では、バイアス電圧印加下でのエレクトロルミネッセンス、(以下、発光観察) により、理論ではゲートエッジ部で一様 (直線状) であるはずの発光が、実験では局所的に (スポット状に) ゲートエッジ部で観察される。この発光箇所付近では、局所的に大きなリーク電流 (以下、局所リーク電流) が発生していると推測している。

このような発光観察による局所リーク電流の解析の問題点は、通常、金属をゲート電極に用いているため、ゲート電極の周辺部しか光が観察できないことである。つまり、発光の基点が本当にゲートのすぐ横にあるのか、それとも、ゲートの下に発光の基点がありそこから広がった光のうちゲート電極の横から漏れた光のみを観察しているのかの判別ができないため、局所リーク電流発生箇所 (以下、局所リーク箇所) の同定すら困難なことである。実際、バイアス電圧を増加させていくと、トランジスタは破壊するが、その後の顕微鏡観察では、発光が観察されなかった箇所でも破壊されていることが多い。

また、結晶が破壊されてしまうと、もはや、その場所に転位など結晶上の不具合があったかどうかの判別ができないことも問題である。

一方、局所リーク電流に限らず、一般的な

リーク電流の低減施策としては GaN 結晶の成長時の基板温度や成長速度といったパラメータ (以下、成長パラメータ) を変えた GaN-on-Si エピ結晶を用いたトランジスタを作製し、そのリーク電流特性を結晶成長条件にフィードバックしており、時間や労力が多く必要となっている。

以上のように、GaN-on-Si トランジスタにおいてリーク電流は極めて重要な特性であるにも関わらず、その機構はおろか発生箇所すら同定できていない。

そこで、本研究課題において、局所リーク箇所を同定し、その場所を結晶学的に解析することが可能となれば、リーク電流低減やリーク電流機構解明に大きく貢献できるものと考えている。

## 2. 研究の目的

以上から、GaN-on-Si トランジスタのリーク電流低減においては、①局所リーク箇所の同定、②局所リーク電流機構の解明、③リーク電流低減手法の確立といったステップが必要であると考えている。

本研究課題においては、まず、①局所リーク箇所の同定に取り組む。ここで重要なことは、次の②局所リーク電流機構の解明につなげることである。②では透過電子顕微鏡 (TEM) による観察 (TEM 観察) を想定しているが、発光観察で絞り込める  $1\mu\text{m}$  程度の領域に転位が概ね 5 個以上含まれてしまい、転位が局所リーク電流発生に寄与しているかどうか判定することが困難であると予想している。そこで、①においては、さらに 1 桁小さい  $0.1\mu\text{m}$  程度に局所リーク箇所を絞りこむことが必要であり、その手法として発光箇所を中心に原子間力顕微鏡ならびにそれに付属するケルビン力顕微鏡、微小電流顕微鏡を用いて、表面凹凸、表面の電位、表面を流れる電流情報から、局所リーク箇所の絞り込みを行う。②については、TEM 観察にて、発光箇所ならびに局所リーク箇所と GaN 結晶中の転位といった結晶構造との対応までを行う。

## 3. 研究の方法

まずリーク電流機構の結晶学的解析を進めるのに必要となる、リーク電流発生箇所の同定を行う手法を検討する。ここでは、ゲート電極下を含めた領域を観察可能な透明ゲート電極 AlGaIn/GaN HEMT を発光観察に適用することを試みた。また、発光解析により同定したリーク発生箇所について構造評価 (TEM) と EDX を行った。

## 4. 研究成果

### 透明ゲート電極を用いたリーク解析

ゲート部におけるリークの可視化に向けて透明電極である ITO をゲート電極として用いることを試みた。デバイス特性比較の為、Pd/Ti/Au ゲート HEMT を合わせて作製した。

図1に作製した透明ゲートの断面構造とデバイスの表面写真を示す。エピタキシャル構造は、MOCVD法によりSi基板上に成長したものである。エピタキシャル構造は、歪超格子を含むバッファ層、厚さ1  $\mu\text{m}$  のGaNチャンネル層、厚さ1 nmのAlNスペーサ層及びAl組成20%、厚さ20 nmのAlGaIn障壁層からなる。GaNチャンネル層、AlNスペーサ層及びAlGaIn障壁層はUID層となっている。ITOの膜厚は60 nmである。

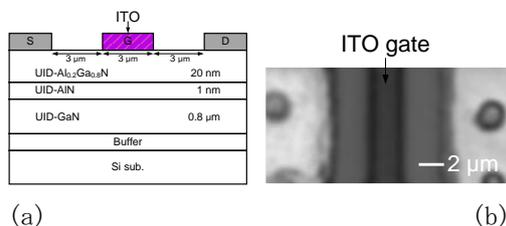


図1(a) 透明ゲートAlGaIn/GaN HEMTの断面構造 (b) デバイスの表面写真

図2にITOゲートHEMTの $I_d$ - $V_d$ 特性を示す。

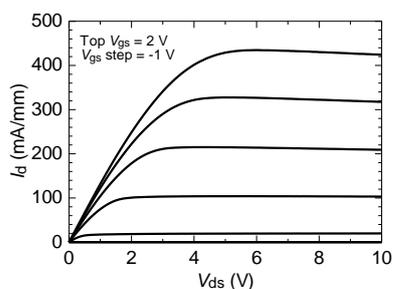


図2 ITOゲートAlGaIn/GaN HEMTのI-V特性

図3に作製したITOゲートHEMTの逆方向ゲートリーク電流を示す。両デバイスともに1桁以上の逆方向ゲートリーク電流のばらつきが見られた。 $V_g = -30$  Vにおけるゲートリーク電流は $10^{-6}$  A/mmから $10^{-5}$  A/mmであった。今回作製したITOゲートHEMTにおけるリーク電流は、金属ゲートHEMTと遜色のないものである。

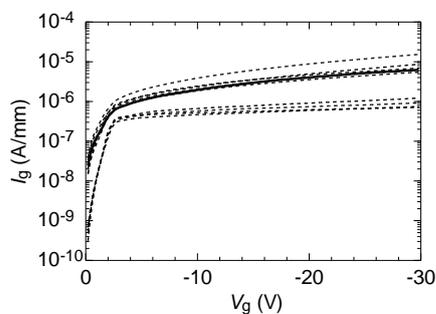


図3 ITOゲートトランジスタの2端子ゲートリーク電流 ( $n = 10$ )

太線は後に示す発光観察に用いた素子の特性である。

発光観察には、エミッション顕微鏡(浜松ホトニクス社製 PHEMOS-1000)を用いた。発光解析による局所ゲートリークの可視化を行うためには、発光の正確な位置を特定することが求められる。今回、CCDの空間分解能を考慮し、発光の位置を特定するためにゲート幅が数 $\mu\text{m}$ の素子を測定に用いた。数 $\mu\text{m}$ のゲート幅を有する素子では、発光が生じた場合に、それがゲート電極の中で生じているのかゲート端で生じているのかを特定可能であると考えている。

図4に透明ゲートAlGaIn/GaN HEMTの表面からのEL像を示す。EL観察は、 $V_{ds} = 45$  V、 $V_{gs} = -10$  Vを印加したピンチオフ状態で行った。ITOゲート電極を通して、スポット状のELを捉えた。発光を観察したゲート電極部は、通常、金属で覆われており、発光が観察されていなかった箇所である。このことから、ITOゲート構造は、基板構造に依らずAlGaIn/GaN HEMTの発光解析に有効であるといえる。

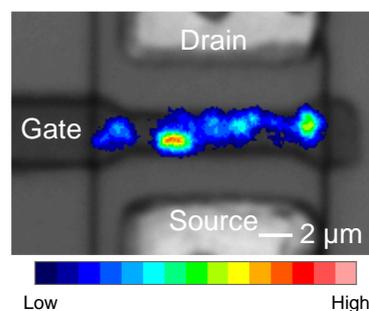


図4  $V_{ds} = 45$  V、 $V_{gs} = -10$  V印加時における透明ゲートAlGaIn/GaN HEMTのEL分布の疑似カラー像

図5にEL分布を示す。ゲートリーク電流値の大きな素子は小さな素子と比較するとおおむね発光強度が大きいことがわかる。ピークの発光強度を見るとゲートリークの大きな素子で $7.9 \times 10^3$  counts/s、小さな素子では $6.5 \times 10^3$  counts/sであった。また、ソースからドレイン電極端にかけて積算した発光強度は、ゲートリークの大きい素子が33%大きな値を示した。

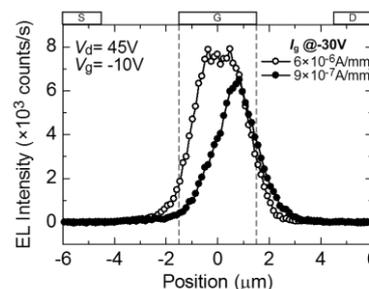


図5  $V_{ds} = 45$  V、 $V_{gs} = -10$  V印加時におけるゲートリーク値の異なる2素子間のソースドレイン電極間発光強度分布

発光強度は、ゲート電極の中央付近でピークを持ちソース電極及びドレイン電極端に向かって徐々に減少していく傾向を示した。この結果は、観察された発光がゲート幅に対して優位な大きさを有していることと発光の主要因と考えられる欠陥や転位がゲート電極下で不均一に分布していることを考えると妥当な結果であるといえる。また、両デバイスともにゲート電極部から外れた発光が観察された。ゲートリーク電極の大きな素子に着目すると、ゲート電極端から漏れた発光強度は、総発光強度の 11%であった。この結果より、ゲート電極端からのスポット発光を観察した場合には、ゲート電極下に発光の大部分が隠れている可能性がある。このことは、発光の定量解析にむけてゲート電極下を含めた領域を観察することの重要性を示唆するものである。

図 7 に、図 6 の点線(X-X')に示した箇所の断面明視野 STEM 像および EL 強度分布を示す。図 7(a)に示すように、EL 強度が最も強く現れた箇所の SLS バッファ層において、V 字のコントラストが明瞭に観察された。さらに、図 6 で観察された発光分布と V 字のコントラストはよく一致することがわかる。図 7(a)の V 字のコントラスト領域の底部において、比較的厚い暗コントラストの層を観察した。これは、島状成長の一種と考えられる不均一なエピタキシャル成長がその箇所で生じていることだと考えられる。観察した不均一なエピタキシャル成長は窒化物半導体の成長のどの箇所においても引き起こされると思われるが、短周期構造を有する SLS 層においてその成長が生じたため、明確に観察されたものだと考えている。V 字のコントラストが観察された箇所のギャップは約 40 nm であった。V 字のコントラストにおける不均一なエピタキシャル成長が観察された箇所の SLS 層のペア数と不均一なエピタキシャル成長が観察されなかった箇所の SLS 層のペア数は同じである。

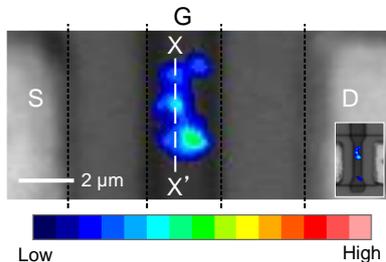


図 6 STEM 観察に用いたトランジスタの発光観察

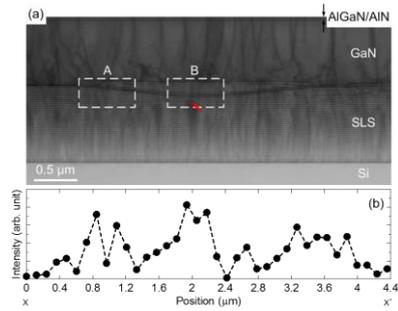


図 7 発光部直下の STEM 観察

今回観察した発光と結晶構造の関係は、高バイアス印加時にゲート端に沿って現れる EL スポット箇所で AlGaIn 表面に形成される V 字ピットとは異なる結果である。これは、観察した V 字の領域がエピタキシャル成長時に生じたものであることから支持されるものである。また、V 字のコントラストが観察された位置を考慮すると、Si 基板上的 GaN 成長の初期段階において生じる Si のメルトバックエッチングとは異なる現象である。

観察した V 字の領域について、エネルギー分散型 X 線分光法 (Energy-Dispersive X-ray spectroscopy : EDX) による元素分析を行った。観察領域は、図 7 の A、B の部分である。SLS 層の短周期構造に由来する明暗のコントラストが観察された。明コントラストでは、Ga 成分を多く含まれていることがわかる。また、暗コントラストでは、Al 成分が多く含まれていることがわかる。V 字の領域をみると、図 8(a)、(d)の明コントラストがその位置にあたり、Ga の信号が強くなっていることがわかる。その領域で、Al の信号が弱くなっていることがわかる。したがって、不均一なエピタキシャル成長は Ga リッチであることがわかった。

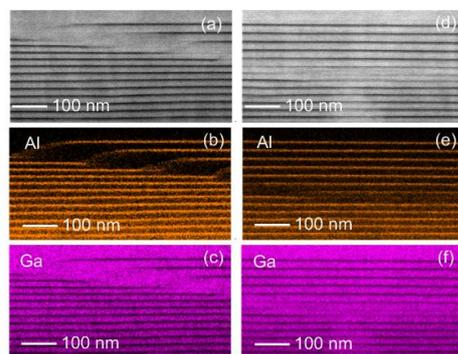


図 8 図 7 の A と B の箇所の EDX による元素マッピング

#### 表面リークの直接観察

GaN 系 HEMT のリーク箇所の特定を行うために、原子間力顕微鏡に微小電流測定ができるようにセットアップし、表面の局所電流を測定した。

表面像と同じ箇所の電流像（白い点状の部分が電流が流れている箇所）を図 9 に示す。この図から、表面像との相関はほとんど確認できないものの、明らかに電流が大きく流れる箇所が存在することを確認できた。

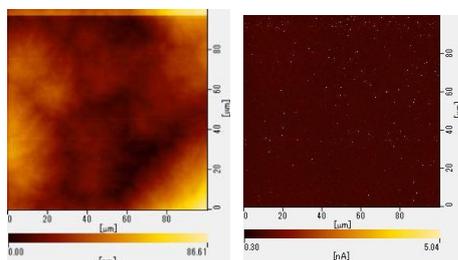


図 9 AlGaIn/GaN HEMT on Si の表面リーク観察

上記のような試料では、電流を十分に確認することができないため、あえてリーク電流が多くなるような試料(InAlN/GaN HEMT 構造)を作製した上、再度評価を行った(図 10)。

表面形状において転位線が確認できるものの、転位線箇所でリーク電流が多く流れるわけではないこと、平坦と思われる箇所でリークが流れることがこの結果からも確認できた。

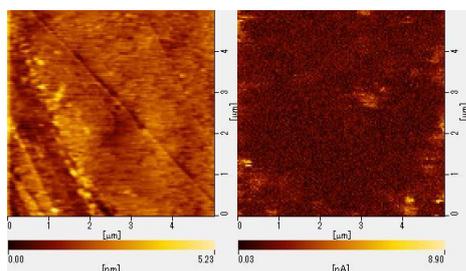


図 10 AlGaIn/GaN HEMT on Si の表面リーク観察

以上のように、GaN 系 HEMT 構造の局所的なリーク箇所を電流として直接的に観察することに成功した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

・ Tomotaka Narita, Akio Wakejima and Takashi Egawa, “Local gate leakage current induced by inhomogeneous epitaxial growth in AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors”, Appl. Phys. Express 9, P. 31002 (2016), 10. 7567/APEX. 9. 031002

・ Tomotaka Narita, Yuichi Fujimoto, Akio

Wakejima and Takashi Egawa, “Observation of 8600 K electron temperature in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors on Si substrate”, Semicond. Sci. Technol., 31, p. 35007 (2016), 10. 1088/0268-1242/31/3/035007

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

分島 彰男 (Akio Wakejima)  
名古屋工業大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：80588575

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

(4) 研究協力者

( )