

# 酸化ガリウムを用いた ホットエレクトロントランジスタの開発

所属： 筑波大学 数理物質系 物理工学域

助成対象者：奥村 宏典

## 概要

次世代の高速無線通信として、テラヘルツ波の利用が期待されている。縦型素子、機器の小型化だけでなく、飽和ドリフト速度の物性値を最大限生かせるため、魅力的である。縦型高周波素子として、ホットエレクトロントランジスタ (HET)がある。HET用材料として、高い絶縁破壊電界強度を持ち、大面積かつ高品質の導電性基板が入手可能な $\beta$ 型酸化ガリウム( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ )に着目した。本研究の目的は、低価格の超高周波パワー素子実現を目指し、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  HETを動作させることである。 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  HETを実際に作製し、電気特性評価を行った。ベースの漏れ電流が大きく、素子動作には至らなかったものの、エミッター-ベース間に関しては想定通りの構造を実現し、 $10^3$  A/cm<sup>2</sup>のエミッタ電流が得られた。

## abstract

Vertical transistors based on unipolar electron transport, or tunneling hot electron transistors (HET), are much attractive for high frequency applications due to quasi-ballistic transport. Wide bandgap materials operate at high power density and high temperature. 4-inch high-quality *n*-type  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  wafers are commercially available. In this study, we fabricated  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  HETs with good emitter-base structure.

## 研究内容

### 「背景」

超高度情報化社会の実現には、様々なモノがインターネットに繋がった IoT が不可欠であり、その根底技術となるのが大容量高速通信である。特に、beyond 5G/6G システムに向けた高速無線通信として、テラヘルツ波の利用が期待されている。

高速通信用素子として、これまで、砒化ガリウムを用いた高電子移動度トランジスタ (HEMT) が用いられてきた。HEMT は、ヘテロ接合界面に現れる 2 次元電子ガスの存在により、高い電子移動度が得られる。最近では、大容量通信に向けた高温・高出力動作への要望が高まり、窒化ガリウム (GaN) を用いた HEMT の実用が既に始まっている。しかし、HEMT は、飽和ドリフト速度が縦型光学フォノン散乱によって制限されてしまい、テラヘルツ波帯での動作が難しい。縦型素子であれば、真性遅延が相互コンダクタンスによって決まり、飽和ドリフト速度の物性値を最大限生かすことができる。縦型高周波素子として HET がある。HET では、エミッタから放出された電子が、エミッタバリア層をトンネルした後、準バリスティック伝導によりベース層を通過し、コレクタ層に到達する。ホットエレクトロンをキャリアに用いることで、高い動作速度、電流密度、相互コンダクタンスが得られる。

HET 作製には、伝導帯エネルギー差 ( $\Delta E_c$ ) のあるヘテロ接合が必要である。私たちは、HET 用材料として、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  に着目した。 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  は結晶多型であり、熱的に最も安定であるのは  $\beta$  ガリア構造である。 $\beta$  型  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  は、高い絶縁破壊電界強度 (8 MV/cm) を持つため素子の高出力化が可能であり、溶液成長による大面積高品質基板を入手できる。また、酸化アルミニウム ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) との混晶により、最大 3.2 eV の  $\Delta E_c$  を得ることができる。これまで、 $(\text{AlGa})_2\text{O}_3$  結晶成長と素子作製に従事し [1]、世界で初めて  $(\text{AlGa})_2\text{O}_3$  層をチャネルとする電界効果トランジスタ (MESFET) の動作に成功している [2]。また、世界に先駆けて  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  共鳴トンネルダイオード (RTD) の作製に挑戦し、急峻な  $(\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85})_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$  界面が得られることを確認済みである [3]。HET は、RTD と類似の構造であるため、 $(\text{AlGa})_2\text{O}_3$  結晶に関する豊富な知識と技術を生かすことで、作製可能ではないかと考えた。

### 「目的」

本研究の目的は、低価格の超高周波パワー素子実現を目指し、 $\beta$  型  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  HET を動作させることである。

「結果」

$\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶中で最も成長速度の大きい(010)面を利用した。結晶成長には、プラズマ援用分子線エピタキシン(PAMBE)法を用いた。PAMBE法による $\beta$ -(AlGa)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>成長では固溶限界があり、Al組成は最大20%までしか取り込むことができない[1]ことを考慮して下記のHETを試作した。

本研究で作製したHETの構造を図1(a)に示す。20 nm厚n型Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>エミッタ層/10 nm厚(A<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>エミッタ障壁層/30 nm厚n型Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ベース層/50 nm厚(A<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>エミッタ障壁層/200 nm厚n型Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>コレクタ障壁層/200 nm厚n型Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>コレクタ層で構成されている。

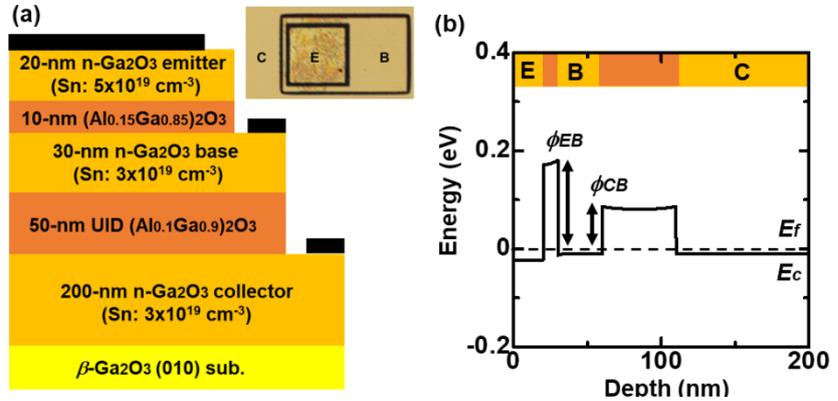


図1 : (a)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> HETの素子構造と実際に作製した素子の顕微鏡像。(b)  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> HETのバンドダイヤグラム。

ドナー不純物には、フラックス量で安定制御可能なSnO<sub>2</sub>を用いた。ベース層およびコレクタ層の(A<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>エッチングには、塩素系反応性イオンエッチング(RIE)を用いた[4]。

作製したHET構造のバンドダイヤグラムを図1(b)に示す。多数キャリアである電子は、ベースエミッタ間の電圧( $V_{BE} > 0$ )により、 $\phi_{EB}$ の過剰なエネルギーを有しながらベース層に注入される。この時、ベースコレクタ間に逆バイアス( $V_{CB} < 0$ )を付加することで、ホット電子は、電子の平均自由行程( $\lambda$ )以下の厚さのベース層を通過し、最小限の散乱でコレクタ層に到達する。電子の注入効率 $\alpha$ は、コレクタ電流 $I_C$ とエミッタ電流 $I_E$ により、 $\alpha (= \alpha_B \alpha_{BC} \alpha_C) = \frac{I_C}{I_E}$ と表される。 $I_E$ は、エミッタ層からベース層へのトンネル確率に支配されるため、主に $\phi_{EB}$ と共に増大する。今回、再現性の観点から、エミッタ障壁層のAl組成を15%としているため、 $\phi_{EB}$ は0.2 eV程度である。ベース層の注入効率 $\alpha_B$ は、 $\alpha_B = \exp(-W_B/\lambda)$ の関係により、ベース層厚 $W_B$ に強く影響を受ける。 $W_B$ は小さいことが好まれるが、薄すぎるとベース層上でエッチングを止めることが難しくなるため、30 nmとした。ベースコレクタ間効率 $\alpha_{BC}$ は、コレクタ障壁層での量子力学的反射に強く影響を受ける。 $\phi_{CB}$ は $\phi_{EB}$ よりも小さい必要があるが、 $\phi_{CB}$ が小さすぎるとベース層からコレクタ層への漏れ電流が増大してしまう。また、コレクタ層のAl組成が高い程、素子耐圧を大きくできることから、コレクタ層障壁のAl組成を10%とした。コレクタ層の効率 $\alpha_C$ はコレクタ層の散乱に依存する。作製したGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub> HETの電流-電圧測定を室温で調べた。

$V_{BE} = 3 \text{ V}$ における、様々な膜厚のエミッタ障壁層を有する  $n\text{-Ga}_2\text{O}_3/(\text{AlGa})_2\text{O}_3/n\text{-Ga}_2\text{O}_3$  バリア構造のバンドダイアグラムと  $V_{BE}-I_E$  の実験結果を図 2 に示す。エミッタ障壁層を薄くするほど、トンネル確率が増大することから、想定通りに  $I_E$  が増大した。 $V_{BE} = 2 \text{ V}$  付近で飽和し始めており、バンドダイアグラムの計算結果と合致する。このことから、エミッタ層およびベース層までの構造は、ほぼ想定通りの試料ができていると考えられる。

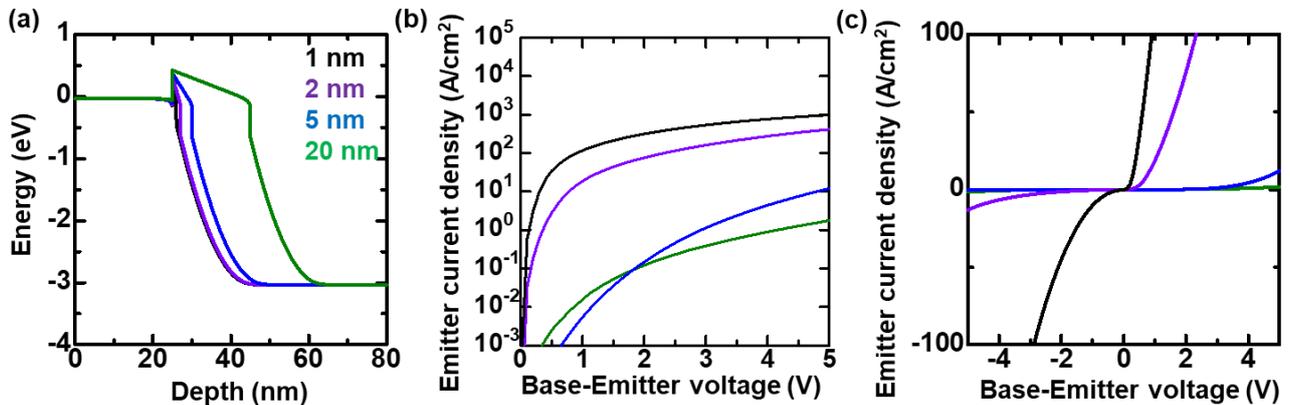


図 2 : (a)  $n\text{-Ga}_2\text{O}_3/(\text{AlGa})_2\text{O}_3/n\text{-Ga}_2\text{O}_3$  バリア構造のバンドダイアグラム。(b)(c)  $n\text{-Ga}_2\text{O}_3/(\text{AlGa})_2\text{O}_3/n\text{-Ga}_2\text{O}_3$  バリア構造の電流電圧特性。

$V_{CB} = -5 \text{ V}$ における、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  HET の  $V_{BE}-J_C$  および  $V_{BE}-J_B$  を図 3(a) に示す。 $V_{BE}$  を増大させても  $J_C$  は増大せず、 $J_B$  のみ増大した。 $V_{CB} = -5 \text{ V}$ における、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  HET の  $V_{CB}-I_C$  を図 3(b) に示す。 $I_B$  を増大させても  $I_C$  に変化はなかった。これらの結果は、ベース層での漏れ電流が大きく、ホット電子がコレクタ層に到達していないことを示唆している。

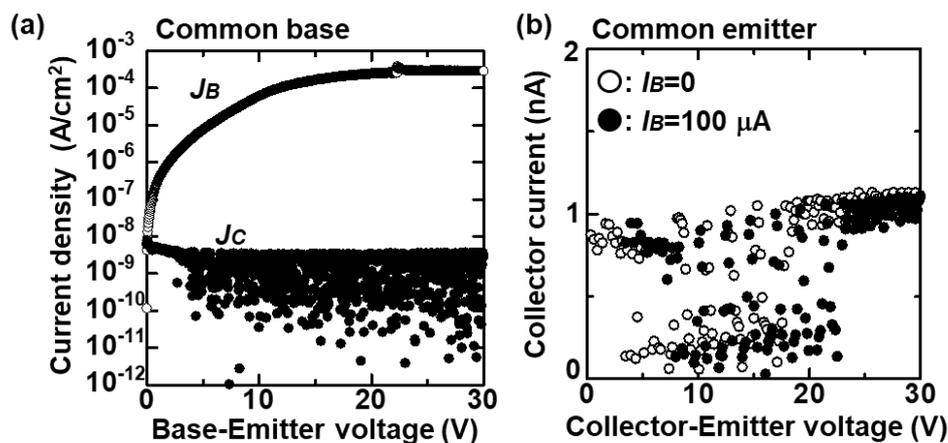


図 3 : (a) コモンベースにおける  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  HET の 3 端子測定。(b) コモンエミッタにおける  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  HET の 3 端子測定。

「今後」

熱電子放出電流を低減するため、まずは低温測定を試みる。高いベース電流は、ホットエレクトロンの多くが、コレクタ層に入る前に、散乱および量子力学的反射により、ベース層中で熱を持ちすぎていたためと考えられる。 $(\text{AlGa})_2\text{O}_3$  コレクタ障壁層に組成傾斜をつけ、更に、ベース層を薄くすることで改善が期待できる。素子作製技術の観点からベース層厚を 30 nm としたが、エッチング速度を厳密に制御することで、今後は 10 nm 以下のベース膜厚を目指す。ベース層厚およびコレクタバリア高さを小さくすることで、ベース層での散乱確率が低減し、素子動作だけでなく、電流増幅率の増大が期待できる。

本研究は、衛星通信用などの高周波発振器の小型軽量化に繋がる、実用的な研究である。GaN と比較して、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  は低価格かつ結晶欠陥密度が小さいため、同程度の高周波かつパワー素子性能を維持しながら、実用性の高い素子を実現できる点が意義深い。また、ベース層の厚さ制御により、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  層中のバリスティック輸送の平均自由工程が間接的に明らかになる事から、学術的にも興味深い。 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  層を用いた量子構造の物性を調べた報告はまだ寡少であることから、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  HET に関する研究は非常に独創的と言える。これまで、テラヘルツ帯で動作するパワー素子作製技術は確立されておらず、今後、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  HET の動作と特性改善が実現すれば、次世代の高速通信用素子分野を大きく変革させる潜在性を有する。

#### 引用文献

- [1] H. Okumura, “Electrical properties of heavily Sn-doped  $(\text{AlGa})_2\text{O}_3$  layers on  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  (010) substrates”, Jpn. J. Appl. Phys. **60**, 065504 (2021).
- [2] H. Okumura, Y. Kato, T. Oshima, T. Palacios, “Demonstration of lateral field-effect transistors using Sn-doped  $\beta$ - $(\text{AlGa})_2\text{O}_3$  (010)”, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, SBBD12 (2019).
- [3] H. Okumura, “Growth of double-barrier  $\beta$ - $(\text{AlGa})_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$  structure and heavily Sn-doped  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  layers using molecular-beam epitaxy”, Jpn. J. Appl. Phys. **59**, 075503 (2020).
- [4] H. Okumura and T. Tanaka, “Dry and wet etching for  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  Schottky barrier diodes with mesa termination”, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 120902 (2019).

本助成に関わる成果物

なし