

次世代無線通信に向けた高周波GaN系バイポーラトランジスタの研究開発



三好 実人
次世代半導体エレクトロニクス共創研究センター, 名古屋工業大学, Nagoya 466-8555, Japan

GaN系ヘテロ接合 npn バイポーラトランジスタ (HBT) は、ミリ波帯において高出力・高利得・低雑音動作が期待される一方、結晶成長およびプロセス技術の課題により実用化が進んでいない。特に、p型 GaN からなるベース領域の高抵抗性と、金属電極との高い接触抵抗が主要な要因となっている。本研究では、ベース領域に GaN/GaN MQW 多層構造による多重量子井戸 (MQW) 構造を導入し、さらに金属電極との接続には高アクセプタ濃度 p-GaN と Pd/Ni/Au 電極を用いることで、低抵抗なオーミック接触の実現を試みた。その結果、ベース領域の比抵抗は $0.9 \Omega \cdot \text{cm}$ 、ベース電極との固有接触抵抗は $0.52 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ を達成した。また、HBT の電気特性として、電流増幅率 $\beta = 21$ ($V_{BE} = 2.8 \text{ V}$)、最大電流密度 0.8 kA/cm^2 を得た。

1. 本研究開発の背景と目的

本研究は、Beyond-5G 移動体通信やミリ波レーダなど次世代無線分野への応用が期待される高周波デバイス、GaN 系ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) に関するものである。高周波トランジスタは、移動体通信、衛星通信、自動車レーダなど幅広い用途で利用されており、通信量の増加、レーダ搭載車の普及、IoT や無線電力伝送の拡大に伴い、今後も需要の増大が見込まれる。次世代デバイスには、ミリ波帯においても高出力・高利得・低雑音を実現する性能が求められ、ワイドバンドギャップ材料である GaN 系 HBT はこれらの要件を満たす有望なデバイスである。

我々はこれまで、高品質な格子整合 Al(Ga)InN/GaN ヘテロ構造技術を基盤とした GaN 系 HBT を提案してきた。本研究では、これまでの成果を踏まえ、実用レベルの HBT 実現を目指して開発を進めた。フェーズ I では、課題である p型層および電極コンタクト抵抗の低減に取組み、新たな p型ドーピング法と再成長コンタクト技術を確立。フェーズ II では、さらに GaN/GaN を組み合わせた多重量子井戸 (MQW) 構造を導入し、これらの技術を用いて HBT の設計・試作および高周波特性評価を行い、ミリ波帯に向けた有用性を実証した。

3. 提案するHBTの構造と検討方法

MQW構造をベースに備えたHBT

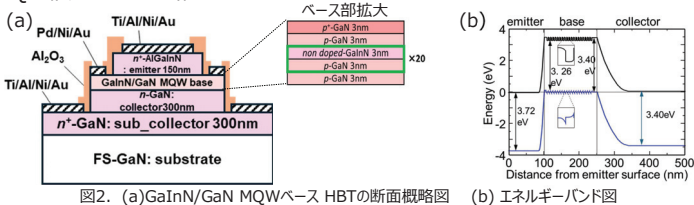


図2. (a) GaInN/GaN MQWベース HBTの断面概略図 (b) エネルギーバンド図

- ✓ Free-standing (FS)-GaN基板上にMOCVDによりコレクタ、MQWベース、エミッタを積層
- ✓ ベースのIn組成比、MQW組成は要素検討の結果による
- ✓ (b)エネルギーバンド図はMQW中のGaInN内のIn組成比5%の場合を示す
- MQW構造による低抵抗化の効果確認、p型ベース層への低接続抵抗化の要素検討を実施
- 要素検討結果を受けたHBTの試作、DCおよび高周波特性を評価

4. 結果および考察

4-1. MQW構造を備えたp型ベース層の低抵抗化

(1) MQW構造による二次元伝導の確認

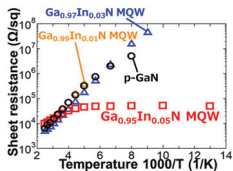


図3. GaInN/GaN MQWのシート抵抗温度特性のIn組成比依存性。

(2) MQW構造と結晶品質の確認

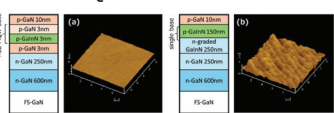


図4. AFMによる表面状態の比較。(a) GaInN/GaN MQW 3/3 nm 22組 147nm (b) GaInN 150nm

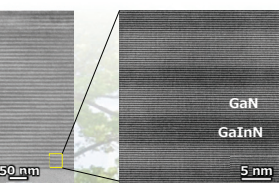


図5. MQWのTEM像
太陽電池用で作成したMQW (GaInN/GaN 5/5nm)

(3) MQW構造による低抵抗化

表1. 比抵抗のMQW組数依存性。

MQW組数	比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)
20p (133nm)	0.93
12p (85nm)	1.41
GaN単層	783

図6. TLM I-V特性

シート抵抗の温度依存性 (図3) c 面サファイア基板上に MOCVD成長のMgドープGaInN/GaN MQW (井戸 3 nm/バリア 3 nm $\times 20$ 組)

- ✓ In組成比 1~3%では温度低下とともにホール濃度が増加し3D輸送が支配的
- ✓ In組成比 5%のみホール濃度が一定となる領域が現れ、2D伝導の発生を確認

➢ HBTベース層には In組成比 $\geq 5\%$ が必要

MQW は界面の歪み緩和効果により、転位の伝播を抑制する。

- ✓ MQW 20組 : RMS 0.16 nm (平坦)
 - ✓ 単層GaInN : RMS 0.55 nm (粗い)
- 表面平坦性改善に寄与

過去、太陽電池用に作成したMQWのTEM像を示す。(図5)

- ✓ GaInN/GaN 5/5nmをエピタキシャル成長
- ✓ GaInN層とGaN層が交互に整然と成長している様子を観察

➢ MQWが結晶品質の向上に寄与

M. Miyoshi et al. Solid-State Electronics 129 (2017)
M. Miyoshi et al. AIP Advances 11, 095208 (2021)

Transfer Length Method (TLM)測定の結果、

- ✓ MQW20組と12組および従来構造GaInN単層の TLM測定時のI-V特性を図6示す。(電極間隔50 μm)
- ✓ 比抵抗のMQW組数依存性を表1に示す

➢ MQWベース層の比抵抗 $0.93 \Omega \cdot \text{cm}$ を得た

2. 新たな提案と取組み内容

従来からの課題に対し、本研究では以下の新たな取組みを実施した。

[1] MQW構造を備えたp型ベース層の低抵抗化

p-GaN においては、アクセプタである Mg の活性化率が低いため、低抵抗化が困難である。本研究では、GaInN/GaN MQW構造をベース層に導入することで生成される二次元ホールガス (2DHG) を利用し、ベース層の低抵抗化を図る手法を提案した。この構造を用いた HBT の試作および評価を行い、ベース層の抵抗低減効果を検証した。

(目標 比抵抗値 : $1 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下)

[2] p型ベース層の電極コンタクト抵抗低減

p-GaN 系材料と金属との間には仕事関数差が大きく、良好なオーミック接触の実現が難しい課題がある。そこで本研究では、高濃度 Mg を含む GaN 薄膜層上に Pd/Ni/Au の多層金属電極を形成し、酸素を含む雰囲気中でアニールする手法を検討した。TLM 法による評価を行い、接触抵抗の低減効果を確認した。

(目標 固有接触抵抗値 : $1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下)

4-2. p型ベース層の電極コンタクト抵抗低減

p-GaN 系材料と金属との間には仕事関数差が大きく、良好なオーミック接触の実現が難しい課題がある。そこで本研究では、高濃度 Mg を含む GaN 薄膜層上に Pd/Ni/Au の多層金属電極を形成し、酸素を含む雰囲気中でアニールする手法を検討した。TLM 法による評価を行い、接触抵抗の低減効果を確認した。

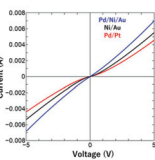


図7. 各電極材料別 I-V特性。

表2. 固有接触抵抗比較。

電極材料	固有接触抵抗 ($\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$)
Pd/Ni/Au (60/10/30nm)	0.52
Ni/Au (10/100nm)	33.0
Pd/Pt (60/50nm)	28.0

高濃度Mg薄膜 + Pd/Ni/Au電極により、GaN系HBTのp型ベースに必要な低コンタクト抵抗を実現。0.52 $\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ を得た

4-3. HBTの試作と評価結果

(1) HBTの試作

要素検討結果を反映、HBTを試作 (図8)、各層の諸元は以下

- エミッタ : $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{In}_{0.05}\text{N}$ [Si] = $2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 100nm
- ベース : $\text{Ga}_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{N}$ /GaN 3/3nm 20組MQW GaN/バリア層のみ [Mg] = $2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 上下に図2(a)に示すp-GaN層あり 総厚129nm
- コレクタ : GaN [Si] = $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 250nm
- サブコレクタ : GaN [Si] = $3.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 600nm
- 電極 Ti/Al/Ni/Au (15/60/12/60nm) p電極 Pd/Ni/Au (60/10/30nm)

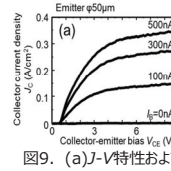


図8. 2インチ基板HBT

(2) DC特性評価結果

エミッタ面積 $50 \mu\text{m}$ 径の J-V 特性と Gummel plot を図9に示す。

- ✓ ベース電流によるコレクタ電流の変調と、飽和領域に続く明確な活性領域を確認した。
- ✓ Gummel plot より、電流増幅率 $\beta = 21$ ($V_{BE} = 2.8 \text{ V}$)

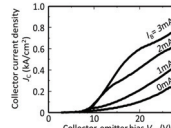


図9. (a) J-V特性および(b) Gummelプロット

(3) 高周波特性評価結果

ミリ波ネットワークアナライザ (Agilent Technologies PNA-X N5247A) を用いて、試作 HBT 素子の高周波特性を評価 (図10)

- ✓ ベース層の抵抗低減により、高いベース電流 (1~3 mA) でもコレクタ電流変調を確認 (図10)
- ✓ 最大電流密度は 0.8 kA/cm^2 ($I_B = 3 \text{ mA}$, $V_{CE} = 30 \text{ V}$)

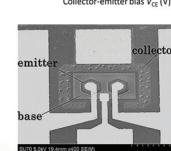


図10. 大電流投入時のJ-V特性 ($I_B = 3 \text{ mA}$, $V_{CE} = 30 \text{ V}$)

(3) 高周波特性評価結果

ミリ波ネットワークアナライザ (Agilent Technologies PNA-X N5247A) を用いて、試作 HBT 素子の高周波特性を評価 (図12)

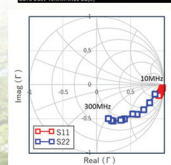


図11. 高周波測定用HBTの表面SEM像 (エミッタ面積 $2000 \mu\text{m}^2$)

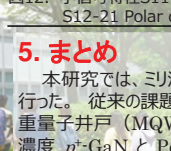


図12. 小信号特性S11-S22 Smith chart, S12-21 Polar chart

- ✓ 高周波測定用HBTの表面SEM像 (図11)。エミッタを2つ配置、その周囲をベースが囲む構成。S11側をベース、S22側をコレクタ、コモンをエミッタに配置
- ✓ 小信号特性S11-S22およびS12-S21から求めたカットオフ周波数は約10MHzであった。
- ✓ 当初予測よりかなり低い値であり、原因追及を継続する

5. まとめ

本研究では、ミリ波帯において高出力・高利得・低雑音動作が期待されるHBTの研究開発を行った。従来からの課題に対する新たな提案として、ベース領域への GaInN/GaN 多層構造による多重量子井戸 (MQW) 構造の導入、さらに金属電極との低抵抗なオーミック接続には高アクセプタ濃度 p-GaN と Pd/Ni/Au 電極を用いる検討を行った。その結果、MQWに用いたGaInNのIn組成比が5%以上で二次元伝導を生じることがわかった。加えて、MQW構造はベースの結晶品質向上にも寄与していた。ベース領域の比抵抗は $0.9 \Omega \cdot \text{cm}$ 、ベース電極との固有接触抵抗は $0.52 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ と改善でき、当初目標を達成した。また、HBT の電気特性として、電流増幅率 $\beta = 21$ ($V_{BE} = 2.8 \text{ V}$)、最大電流密度 0.8 kA/cm^2 を得た。小信号評価で得たカットオフ周波数は約10MHzであった。予測よりも大幅に低い値であったため、原因追及と改善を継続する。