

**GaN 系 npn ヘテロ接合バイポーラ  
トランジスタの研究**

**Study on GaN-based npn heterojunction  
bipolar transistors**

2024 年 3 月

間瀬 晃



# 目次

<b>第1章 序論</b>	
1.1 はじめに	1
1.2 研究背景	3
1.2.1 GaN 系半導体デバイスの特徴	3
1.2.2 HBT の発明、特徴および用途	5
1.2.3 GaN 系 HBT の課題	5
1.3 研究の目的	6
1.4 本論文の構成	6
参考文献	7
<b>第2章 研究に用いた原理および要素技術</b>	
2.1 はじめに	9
2.2 GaN 材料	9
2.2.1 結晶構造	9
2.2.2 バンド構造	10
2.2.3 結晶転位	12
2.3 GaN-HBT デバイス	13
2.3.1 GaN-HBT の構造と動作原理	13
2.3.2 $p$ -GaN へのオーミック接触	16
2.4 デバイスシミュレーション	18
2.4.1 シミュレーション原理	18
2.4.2 シミュレーションに使用したモデル	20
2.4.3 シミュレーションに使用した各種定数	23
2.5 プロセス要素技術	27
2.5.1 洗浄	27
2.5.2 有機金属気相成長 (MOCVD)	27
2.5.3 フォトリソグラフィ	28
2.5.4 反応性イオンエッチング (RIE)	29
2.5.5 スパッタ成膜	31
2.5.6 熱処理/活性化	32
2.5.7 真空蒸着法/リフトオフ	32

2.5.8 選択再成長	32
2.6 評価	34
2.6.1 原子間力顕微鏡 (AFM)	34
2.6.2 X線回折法 X-Ray Diffraction (XRD)	35
2.6.3 Hall 効果測定	36
2.6.4 Van der Pauw 法	36
2.6.5 TLM 法	37
参考文献	39

### 第3章 シミュレーションによる HBT 構造と特性の追求

3.1 はじめに	42
3.2 基本構造と各種パラメータの設定	43
3.2.1 基本構造とパラメータ	43
3.3 基本特性のシミュレーション結果と考察	46
3.4 emitter パラメータの影響	49
3.5 base パラメータの影響	54
3.5.1 base のアクセプタ濃度が特性に与える影響	54
3.5.2 ピエゾ効果分極を活用した量子井戸の効果	59
3.5.3 三元混晶 GaInN を用いた低抵抗化	65
3.6 collector ドナーキャリア濃度、膜厚の影響	68
3.7 sub-collector パラメータの影響	71
3.8 シミュレーションのまとめ	72
参考文献	73

### 第4章 要素技術の実験的探求と HBT の試作・評価

4.1 はじめに	75
4.2 base の低抵抗化～三元混晶 GaInN base 層の評価	75
4.2.1 検討方法	76
4.2.2 試作結果と考察	76
4.3 四元混晶 AlGaInN emitter の検討	81
4.3.1 検討方法	81
4.3.2 結果と考察	81
4.4 $p$ -base と電極の接触抵抗低減	83
4.4.1 Ni/Au 形成後の $N_2/O_2$ アニールの効果について	83
4.4.2 選択再成長 $p^+$ -GaInN 層による接触抵抗の低減	85

4.4.3 base 上の連続成長 $p+$ 層の効果	90
4.4.4 Mg の固相拡散による接触抵抗の低減	93
4.4.5 base コンタクト低抵抗化検討のまとめ	98
4.5 HBT 試作とトランジスタ動作の評価	101
4.5.1 素子構造と諸元	101
4.5.2 試作プロセス・検討方法	103
4.5.3 試作結果と考察	104
4.5.4 まとめと今後の進め方	109
参考文献	110
<b>第5章 差異の整理と考察</b>	
5.1 はじめに	111
5.2 差異の整理	111
5.2.1 電流密度の差	113
5.2.2 アーリー効果が顕著	116
5.2.3 オフセット電圧が高い	120
5.2.4 差異のまとめ	121
5.3 差異のシミュレーションへの反映	122
参考文献	123
<b>第6章 総括</b>	124
論文および学会発表	126
【国際会議発表】	126
【国内会議発表】	127
【知的財産】	127
【賞】	127
謝辞	128
付録 (Silvaco®: Atlas 用 計算プログラム)	129
付録 (本研究で用いた記号および定数の一覧)	148

# 第1章 序論

## 1.1 はじめに

1970年代後半、日本はかつて半導体市場シェア 70%を占め世界への半導体の供給国であった。1986年に結ばれた日米半導体協定以降下降線をたどる。その米国も 2000 年以降は大半のファブリーをアジアに依存することになり、「設計は自国で、生産はアジアで」という方針の中で生産設備への投資が削減され生産技術力の弱体化が急激に進んだ。時は進み 2019 年 12 月中国武漢で検出されたコロナウィルス(COVID-19)は世界的なパンデミックを引き起こし、人類の健康を脅かしただけでなく世界経済の大きな停滞を招くことになった。経済の停滞は原材料や部品類の生産供給が遅れることで生産活動を阻害し、とりわけ半導体を必要とする電気製品や車などの最終製品への影響は甚大であり、いまだ供給は正常状態には戻っていない。2020 年代後半、半導体企業の新規起業や TSMC の工場進出など、日本国内に国が後押しする半導体の復活が期待されている。地政学的なリスク回避から、半導体のモノづくりを含めた新たな波が動き始めている。

そのような動きの中で従来の Si 半導体に代わり次世代材料である SiC や GaN などを使った研究開発が盛んにおこなわれるようになってきた。最新の新幹線車両や高出力の電気自動車(BEV)を駆動するパワー半導体には世界で初めて SiC が使われるなど、実用化段階に入った[1]。また GaN については名古屋大学の天野教授らが 2014 年に青色発光ダイオードへの功績でノーベル賞を授与するなど[2]、世界を大きくリードする革新が起きており、今後電動化や高速化が進む電力・通信などの産業機器や自動車分野などで、日本発の大きな進歩が期待されている。図1-1は半導体が活用されている製品を半導体の駆動周波数を横軸に、出力を縦軸に表したものである。モータを駆動するなどのパワー半導体は縦軸上に沿い、携帯電話などの高速動作が必要な製品は横軸上に沿って進化しているが、今後、出力電力と高周波駆動の双方が要求される自動運転のセンサーアンプや通信基地局の増幅器などが必要となってきた。

図1-2は図1-1と同じ軸上に使用される半導体材料を示したものである。今後期待される速度と出力の双方を実現させるためには、従来の Si に代わりワイ

ドギャップ半導体である GaN などの窒化物半導体材料が必要になってくる。特に今後市場の需要が伸びる「中容量出力と中領域周波数の双方」を満足する半導体材料として、活用の可能性は高い。

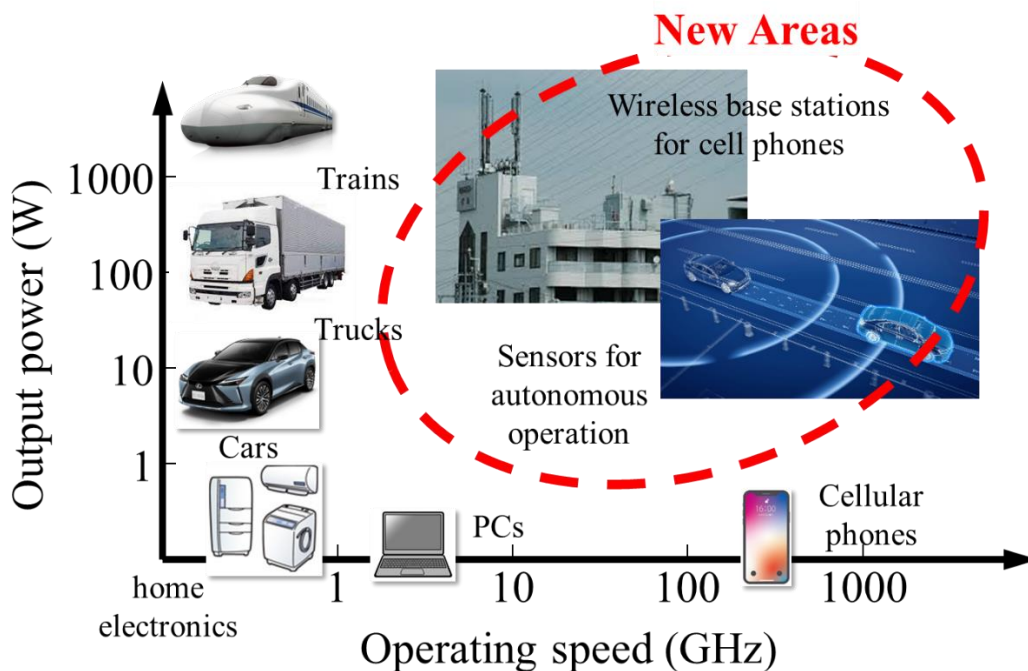


図 1-1 The products maps<sup>[\*]</sup>

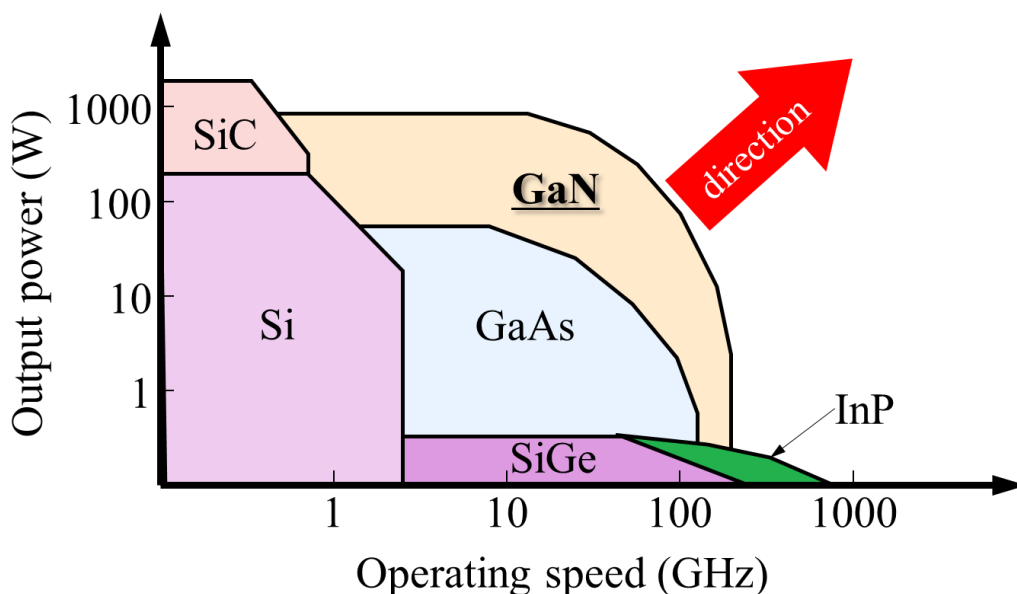


図 1-2 The semiconductors materials maps

[\*] Modify from <https://www.iue.tuwien.ac.at/phd/park/node14.html>

## 1.2 研究背景

### 1.2.1 GaN 系半導体デバイスの特徴

現在・将来も含め活用されている大多数の半導体製品には Si が使われており、今後も使われていく傾向である。半導体の用途は多岐にわたり、①画像処理など、高速に大量のデータを演算処理する CPU や FPU や高速通信端末など。②車両を駆動する電気モータなどの制御のため、高電圧・大電流をオンオフする Power Metal Oxide Semiconductor Transistors (Power-MOS) や Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) などのパワー半導体。③表示や照明用途に用いられる発光・受光ダイオードやレーザーダイオード類。④自動運転に必要なセンサーアンプ、準高速・中電力容量で動作するアンプ類がある。

①の CPU などは微細化と SiGe などの技術改革により高速化が加速している。通信端末の高速化には InP などが候補として開発が進んでいる。②のパワー半導体ではいかに電力の損失を抑えるかの開発が進んでおり、限界に近づいた Si に代わり Baliga 指数の高い SiC や GaN などのワイドギャップ半導体材料を用いた開発が進んでいる[3-8]。③の発光・受光素子では、青色 LED に代表される GaN 系の材料が多用されている。④の準高速・中電力容量の分野でも GaN や AlN などの窒化物半導体が多く用いられ、High Electron Mobility Transistors (HEMTs) や Schottky barrier diodes (SBDs)、heterojunction bipolar transistors (HBTs) が提案され、研究開発と実用化が積極的に進められている。

③④のデバイスの場合には、GaN 材料単体で使われるだけでなく、Al や In などとの三元または四元混晶があり、またそれら混晶膜は下地膜や基板との格子整合調整ができる特徴がある。第一の特徴として、格子緩和率を制御することにより、分極効果による2次元電子ガス two dimension electron gas (2DEG) や、2次元正孔ガス two dimension hole gas (2DHG) を発生させ、バルク伝導の 3D に比べて 2D の移動度の向上が実現できることが出来るため、HEMTs などの高速パワー素子を実現させている[9]。また第二の特徴として構造設計の自由度がある。図1-3 は AlN、GaN、InN を頂点とする混晶の相図である。各頂点を結ぶ弧は三元混晶



の組成比を変えた場合の格子定数と  $E_g$  の関係である。また、3頂点で囲まれた内部は四元混晶の組成比を変えた場合の相関である。特に四元混晶の場合、例えば図1-3の一点鎖線上にある組成の混晶は GaN と格子定数が同じため、 $E_g$  の異なる膜を格子整合させながら連続成膜でき、ヘテロ接合素子などの設計の自由度が高いことである。これらの特徴を有する GaN 系ワイドギャップ半導体材料は、使用用途が多岐にわたり、今後準高速・中電力容量の素子開発と普及にとって重要な位置を占めるものと期待されている。

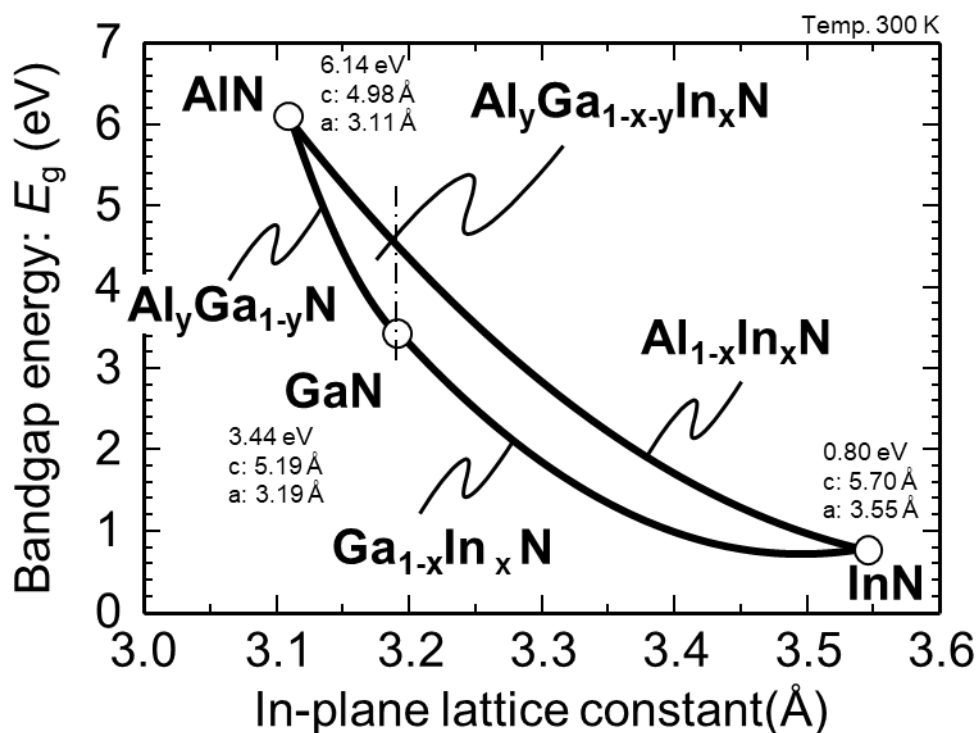


図1-3 窒化物半導体混晶 格子定数- $E_g$  関係図

## 1.2.2 HBT の発明、特徴および用途

HBT は 1951 年に W. B. Shockley がヘテロ接合の考え方『接合型トランジスタの emitter 部に base、collector 部よりも禁制帯幅の大きな半導体を用いるとキャリア注入効率が飛躍的に大きくなる』という基本特許を出願[10][11]、1957 年に H. Kroemer により HBT の動作原理が理論解析された[12]。1959 年に IBM の B. Anderson らにより研究が始まり 1960 年に発表され[13]、1961 年 H. Dierich らによって試作実証された。発明者の H. Kroemer は 2000 年に「高速エレクトロニクスおよび光エレクトロニクスに利用される半導体ヘテロ構造の開発」によりノーベル物理学賞を受賞している。

HBT の特徴として、ヘテロ接合は伝導帯下端または価電子帯上端にエネルギーの不連続が存在するため、電子ならびに正孔に対する障壁の高さが異なる。その結果バイポーラでありながら、キャリアとして電子または正孔のどちらかを多数群にすることが可能である。例えば電子の注入効率をモノ接合トランジスタよりも増加させることができる。その効果により、高周波特性の向上が可能になり、車載やドローン用ミリ波レーダー用途や通信分野用途などの高周波トランジスタを目指した研究開発が盛んになってきている。

## 1.2.3 GaN 系 HBT の課題

*npn*-GaN 系 HBT には大きく2つの課題が認識されている。

一つ目は、『base に必要なキャリア濃度が高い *p* 型 GaN が得にくい』ことが課題である。*p* 型 GaN には従来から Mg が多く用いられているが、Mg の活性化エネルギー ( $E_A$ ) は約 150-160 meV と大きく[14]、高い正孔濃度 ( $>10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) を得にくいことが大きな課題となっている。Mg は Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) による成膜の際、Mg-H 基となって膜に取り込まれ、その後の窒素ガス中のアニールにより水素が離脱し GaN ネットワークに結合することでアクセプタとして動作する。しかしながら、一般的に多用される *npn*-型 HBT の場合、base 上にある *n*-emitter に覆われるため、Mg と結合している水素の離脱が阻害されて活性化が進まない。そのために低抵抗な *p*-GaN を得ることが難しい課題がある。

二つ目は『 $p$ -GaN と電極金属とのオーミック接続が難しい』ことである。一般的に用いられている Ni は GaN 系材料とは Schottky 障壁を作る為、金属と半導体の中間層に障壁を緩和するものが必要となる。新たな層を成膜するか、熱処理などで金属を拡散させて混晶を作るか、各種の提案がされている[15]がまだ決定的な回答があるわけではない。現在は酸素アニールによる Ni-Ga-O の合金層による報告がある[16]が、更なる改善が必要である。

### 1.3 研究の目的

本研究は、三好研究室で進められている『GaN に格子整合し、ひずみと  $E_g$  を独立で制御できる四元混晶 AlGaInN』を emitter に用いることを特徴とした GaN 系 HBT の新たな構造を、シミュレーションと素子作成の両面より提案・試作・検証・解析し、良好な特性を有する HBT 構造を探求することを目的としている。

第一の着目点は、計算に用いるモデル式や物性値を明確にしたうえで、シミュレーションを使い HBT 各構成要素パラメータの敏感さと特性への影響を検討し、目指す特性を得るための限界値を求めることである。第二の着目点は、上記にて求めた要素パラメータを反映させた実試作を行い評価することで求める特性が得られていることを確認することである。第三の着目点は、シミュレーションと実試作結果の比較をすることで、その差異から課題を抽出して対策していくと同時に、シミュレーションにフィードバックして研究を進めることである。

### 1.4 本論文の構成

本論文では、今後需要が伸びる可能性のある GaN 系 HBT を提案するため、三好研究室で研究された四元混晶 AlGaInN を emitter に用いた HBT で共通の課題となる  $p$ -base の低抵抗化と、取り出し電極との接触抵抗低減のための検討・評価について述べる。本論文は5章からなる。その構成は以下の通りである。

第1章は序論である。本研究対象である GaN 系半導体を含むデバイスの従来技術と背景について述べる。さらに GaN 系半導体の特徴と課題を述べ、研究の目的を記述する。

第2章では、本研究テーマである HBT の基本的な構造や動作原理、解析モデルなどに加え、検討に必要なシミュレーションやプロセス技術、評価技術について解説をする。

第3章では、シミュレーションによって、HBT の基本構造や提案する技術に関する検討の内容と結果について解析を行った。この章の目的は、それぞれの領域に求められる要素項目とその範囲を明確に(数値化)することにある。本研究は実験的アプローチからのスタートではなく、計算に基づいた検討結果を反映させて実験を行うことを特徴としている。

第4章では、シミュレーションによって得た構造を実現するための試作と評価結果について述べ、新たに見つけられた課題とその対策を実験により求めた結果と考察を行う。

第5章では、3章の計算結果と4章の試作結果の差異から、原因の追及と対策を考察する。

第6章では、第1章から第5章までの結果についてまとめる。

また本研究のシミュレーションで用いた計算用プログラムを付録章に添付する。

## 参考文献

- [1] 上野雅之「N700S における新技術の紹介 ～技術開発成果による新技術の採用 徹底した小型軽量化による標準車両の実現～」第24回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL2017) 新潟朱鷺メッセ (2017).
- [2] H. Amano, “Nobel Lecture: Growth of GaN on sapphire via low-temperature deposited buffer layer and realization of *p*-type GaN by Mg doping followed by low-energy electron beam irradiation” *Reviews of Modern Phys.* **87** 1133 (2015).
- [3] H. Okumura, “Present Status and Future Prospect of Widegap Semiconductor High-Power Devices” *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 10A (2006) pp.7565–7586.

- [4] U. K. Mishra, L. Shen, T. E. Kazior, and Y. F. Wu, “GaN-based RF power devices and amplifiers” *Proc. IEEE* **96** 2 (2008) pp.287–305.
- [5] S. Fujita, “Wide-bandgap semiconductor materials: For their full bloom” *Jap. J. Appl. Phys.* **54** 3 (2015) pp. 030101–1–12.
- [6] 大橋 弘道、葛原 正明 編著「半導体デバイスシリーズ④ パワーデバイス」丸善出版株式会社 (2011).
- [7] 長谷川 文夫、吉川 明彦 編著「ワイドバンドギャップ半導体 光・電子デバイス」森北出版株式会社 (2006).
- [8] 特許庁:平成 26 年度 特許出願技術動向調査報告書 パワー半導体デバイス.
- [9] M. A. Khan, A. Bhattarai, J. N. Kuznia, and D. T. Olson, “High electron mobility transistor based on a GaN-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N heterojunction” *Appl. Phys. Lett.* **63** 9 (1993) pp.1214–1215.
- [10] 高橋 清, 「ヘテロ接合入門」, *応用物理学会誌* **67** (7) 831 (1998).
- [11] W. Shockley : *U. S. Patent* # 2, 569, 347, (1951).
- [12] H. Kroemer, “Heterostructure Bipolar Transistors and Integrated Circuits” *Proc. IEEE* **70** 1 (1982).
- [13] R. L. Anderson, “EXPERIMENTS ON Ge-GaAs HETEROJUNCTIONS”, *Solid State Electronics* **5** 341 (1962).
- [14] D. J. Kim, “Thermal activation energies of Mg in GaN:Mg measured by the Hall effect and admittance spectroscopy” *J. Appl. Phys.* **88** 5 (2000).
- [15] S. Lu, “Ohmic contact on low-doping-density p-type GaN with nitrogen-annealed Mg” *Appl. Phys. Lett.* **119** 242104 (2021).
- [16] J-S. Jang, “Formation of low-resistance transparent Ni/Au ohmic contacts to a polarization field-induced p-InGaN/GaN superlattice” *Semicond. Sci. Technol.* **21** (2006) L37–L39.

## 第2章 研究に用いた原理および要素技術

### 2.1 はじめに

本章では研究の前提となる原理や要素技術、特に混晶については準位など、計算に必要な前提を整理して記述する。

以下の順で記述を進める。

2.2節では GaN 材料の特徴、結晶構造や特徴的な転位について

2.3節では HBT の構造と動作原理について

2.4節ではシミュレーションの原理・モデルと前提となる混晶の準位について

2.5節では各プロセスおよび評価に必要な要素技術について、述べる。

### 2.2 GaN 材料

#### 2.2.1 結晶構造

GaN などのウルツ鉱型結晶は、六方晶系に属する。図2-1 に示すような正六角形の1辺の長さが格子定数  $a$ 、六角柱の高さが格子定数  $c$  である構造を含む六角柱を単位胞にとる。各頂点に Ga を配置すると、Ga の周りに N が正四面体的に配位したユニットが、1つの Ga-N 結合を六角柱の中心軸と平行になるように向きをそろえて配列している。六角柱の中心軸を  $c$  軸と呼び、その方向の一周期の長さが格子定数  $c$  である。 $c$  軸に垂直な面を  $c$  面と呼ぶが、ウルツ鉱型結晶において、六角柱の上下の面は同等ではない。自然な面は、 $c$  軸に平行な結合の切断によって生じるので、Ga 面(+ $c$  面、図の上面)と N 面(- $c$  面、図の下面)の区別がある。この  $c$  軸に沿った非対称性は、 $c$  軸方向の自発分極の原因となり、実際の GaN では六角柱は  $c$  軸に沿ってやや押しつぶされた形で安定化している。GaN の正四面体ユニットが正確に保たれていれば  $c = \sqrt{8/3} a = 1.633a$  であるが、実際の GaN は  $a = 0.3189 \text{ nm}$ 、 $c = 0.5185 \text{ nm}$  なので、 $c = 1.626a$  である。本結晶

面図形では、正四面体ユニットが正確に保たれているとして寸法を決めている。Ga-N 結合長を  $d$  とすると、 $d = 3c/8 = \sqrt{3/8} a = 0.612a$  である。また、本研究で用いる他の二元系混晶の格子定数は、InN : 3.548 Å、AlN : 3.112 Å としている。

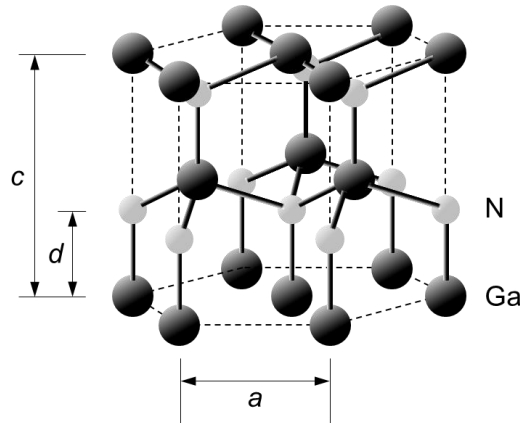


図2-1 ウルツ鉱結晶構造[1]

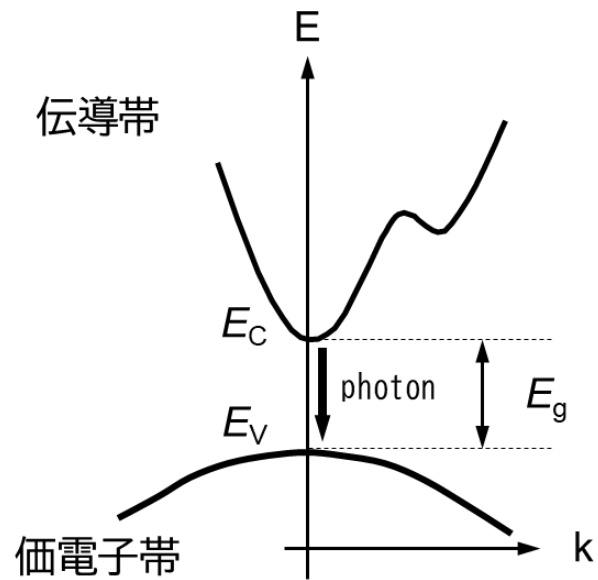
## 2.2.2 バンド構造

半導体において、電子が価電子帯と伝導帯の間を遷移には2種類の状態があり、「直接遷移」と「間接遷移」である。図2-2に直接遷移と間接遷移のバンド図を示す[2]。

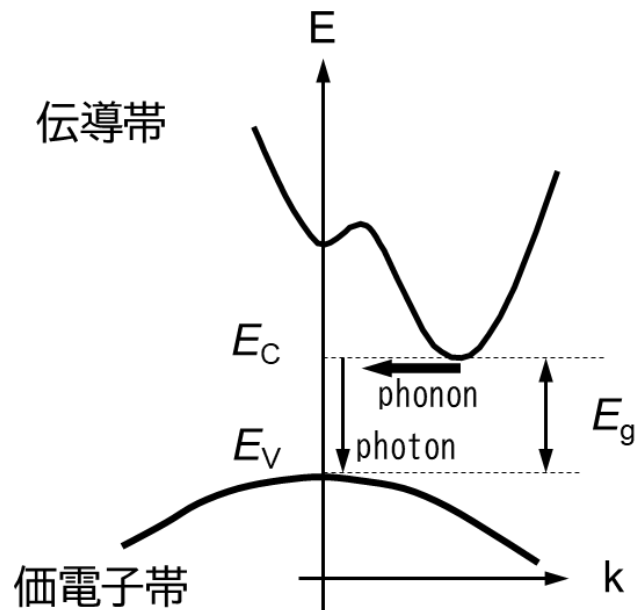
「直接遷移」は、図2-2(a)に示すように、価電子帯の頂上  $E_V$  と伝導帯の底  $E_C$  が一致しているのが特徴である。伝導帯に励起された電子は、エネルギー差であるバンドギャップ  $E_g$  を光子(フォトン)の形でエネルギー放出して価電子帯に遷移し、正孔と再結合する。直接遷移型半導体材料には、GaN、GaAs、InP、InAs などの化合物半導体がある。これらは光の発生効率が高いため、青色発光ダイオードLEDや半導体レーザーをはじめとする発光素子に用いられている。

次に「間接遷移」は、図2-2(b)に示すように、価電子帯の頂上  $E_V$  と伝導帯の底  $E_C$  が一致しない。伝導帯に励起された電子は、フォトンによるエネルギーの放出だけではなく、運動量保存の法則から運動量も放出する必要がある。また、フォトンの質量は小さく、ほとんど運動量がない。そのため、図2-2(b)の矢印で示すように、格子振動(フォノン)によって運動量を変化させた後に、フォトンとの

相互作用で価電子帯に遷移する。したがって、間接遷移型半導体では、光子の放出よりもフォノンの放出が多いため、発光効率が低くなる。



(a) 直接遷移



(b) 間接遷移

図2-2 直接・間接遷移のバンド図 [2]



### 2.2.3 結晶転位

GaN は、シリコン半導体や GaAs 系半導体と比べ、貫通転位などの結晶欠陥が数多く含まれている。転位には「貫通刃状転位」「貫通螺旋転位」「貫通混合転位」などの種類があり、デバイスにした際の影響度合いが異なる。HBT に照らし合わせてみると、安定した空乏層を得るためには collector の、パンチスルーなどの異常動作を減らすためには base の転位を減らす必要がある。

図2-3に刃状 / 螺旋転位の模式図を示す[3][4]。刃状転位は転位の移動方向とバーガースペクトル(転位移動によるすべりの単位となるベクトル)が同じ転位で、図2-3(a)に示すように、余分な半原子面が差し込まれた形をしている。螺旋転位は図2-3(b)に示すように、転位の移動方向とバーガースペクトルが直交する転位で、名称通り「螺旋状」になっている。

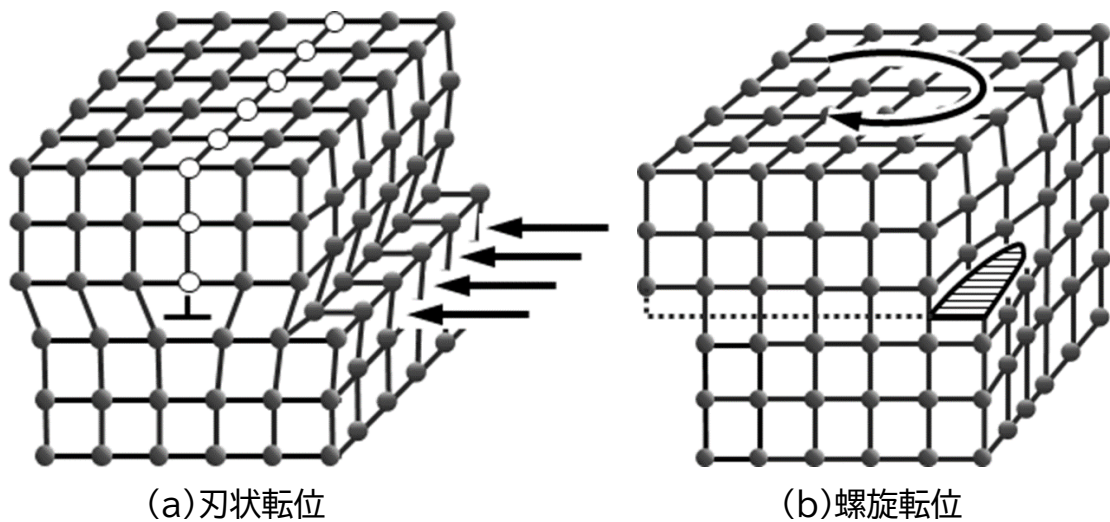


図2-3 転位の模式図 [3][4]

## 2.3 GaN-HBT デバイス

### 2.3.1 GaN-HBT の構造と動作原理

従来一般的なバイポーラトランジスタの構造や動作原理は既に多くの文献で説明されているので割愛し、本論文ではヘテロ接合バイポーラトランジスタ HBT についての解説からスタートする。

図2-4に *npn* 型の HBT の基本構造とエネルギーバンド図を示す。図左側から右方向に *n*-emitter、*p*-base、*n*-collector を接合した構造となっている。HBT の場合、emitter と base のエネルギーバンドギャップには  $E_{g\_emitter} > E_{g\_base}$  のように設計され、エネルギーバンド図にみられるように、伝導帯(実線)と価電子帯(破線)の接合部にそれぞれ  $\Delta E_C$  と  $\Delta E_V$  のバンドオフセットがあることが特徴となっている。また特に記載がなければ、解説は I 型のヘテロ接合型 HBT である。

$\Delta E_V$  は emitter-base ヘテロ接合の障壁を高くし、その結果 base から emitter への正孔の注入を抑制する。この効果によって、高い emitter 効率と電流増幅率を保ちながら base のドーパ量を上げることが出来る。base のアクセプタ濃度が高くてできれば、動作時に collector 側からの空乏層の伸びを抑制でき、パンチスルーを抑制する効果がある。同時に base 領域を薄く設計することができるので、電子が emitter から collector に到達する途中 base 内で再結合する確率を低減できるため、高速動作が出来る特徴を有している。第1.2.3項で述べたように、base のドーパ量を上げることが課題のひとつであり、ヘテロ接合のメリットを活かすためにも、対策は重要である。

emitter を接地した回路図2-5(a)を前提に動作原理の説明を進める。 $V_{BE}$  の印加により emitter からの電子①が base に注入され、base から注入された正孔②と再結合して base 電流  $I_B$ ③が流れる。 $V_{CE}$  と base 電流により emitter 側から注入された電子の多く④は、base を通過して、collector 側まで流れる大きな電流  $I_C$ ⑤となる。これら2つの電流の比  $I_C/I_B$  を電流増幅率  $\beta$  である。 $\beta$  を大きくとる為には、base 電流を小さく抑えることが重要。base 電流が流れる原因は、base 領域内での少数キャリアの再結合電流なので、base 領域で発生する再結合電流が流れ込まな

いように、base と emitter の間に障壁を作る構造がある。これが HBT 構造の特徴となるヘテロ接合である。このヘテロ接合は base 領域に流れ込む hole が emitter 領域に行かないようにすることで可能となる。この構造こそ HBT が  $\beta$  を大きくできる所以である。

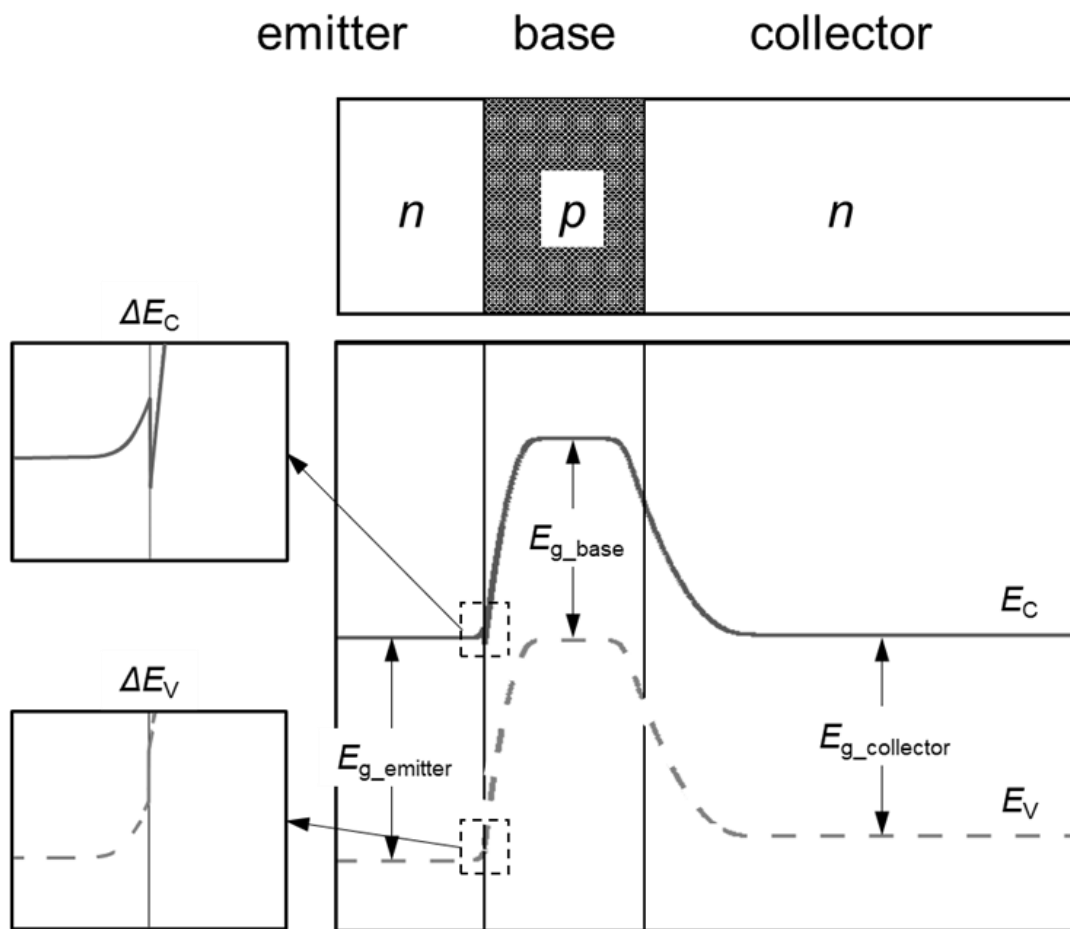
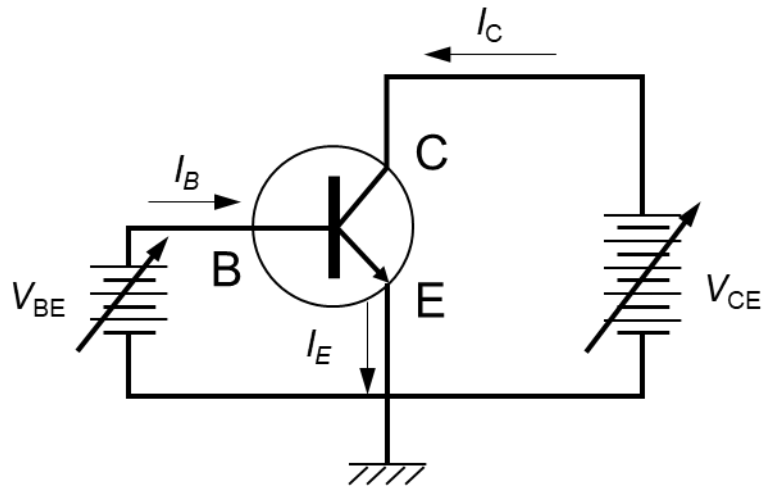
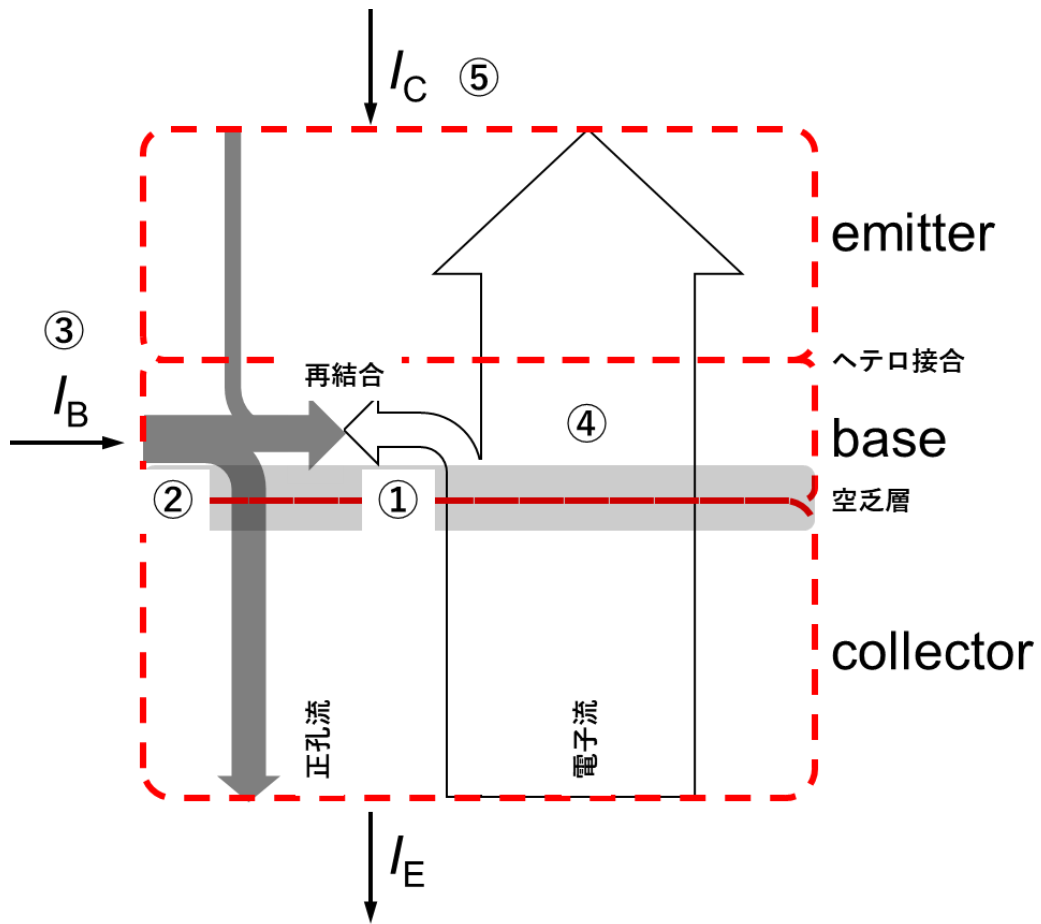


図2-4 ヘテロ接合バイポーラトランジスタの基本構造と熱平衡時のエネルギーバンド図



(a) 動作回路図



(b) 電子・正孔の流れ

図2-5 HBTの動作原理

### 2.3.2 *p*-GaN へのオーミック接触

図2-6(a)は孤立した金属と*p*型半導体のエネルギーバンド図を示したものである。ショットキー接続になるかオーミック接続になるかは金属側の真空準位からの  $E_F$  のギャップである仕事関数  $\phi_m$  と半導体の電子親和力  $\chi$  と禁制帯幅  $E_g$  の和との大小関係に依る。

$$\phi_m < \chi + E_g$$

の場合はショットキー接続、

$$\phi_m > \chi + E_g$$

の場合は、オーミック接続となる。GaNの場合  $\chi = 4.1 \text{ eV}$ 、 $E_g = 3.4 \text{ eV}$  であり[5-8]、その和は  $7.5 \text{ eV}$  となり一般的な金属の仕事関数(表2-I)と比べてみても、ショットキー接続になることは自明である。図2-6(b)は金属と*p*型半導体を接触させた場合のエネルギーバンド図を示したものである。

ショットキー障壁では電流の輸送が主に多数キャリアで行われるため、半導体側から多数キャリアが障壁を越えて金属側に熱放出するのが支配的な輸送機構である。そのために一般的にオーミック接触を実現する方法として、半導体表面に高不純物濃度領域を設けることにより、図2-6(b)図中の空乏層をきわめて薄くして、トンネル効果でオーミック接触を実現することが検討されている。具体的には L-C. Chien らによる Ni 成膜後に酸素雰囲気アニールする方法[9]、S. Lu らによる Mg 膜を成膜し、そこから固相成長を行う方法などが提案されている[10]。*n*-GaN も  $\phi_m < \chi + E_g$  は同じであるが、多数キャリアが電子であることと、Si による高ドーズが可能であることに対し、*p*-GaN では Mg の高ドーズが難しいことから、オーミック接触は大きな課題の一つとなっている。

表2-I 金属の仕事関数:  $\phi_m$  (eV) [11][12]

Mg	Al	Ni	Cu	Pd	W	Pt	Au
3.60	4.13	4.01	4.18	4.80	4.52	5.65	4.70

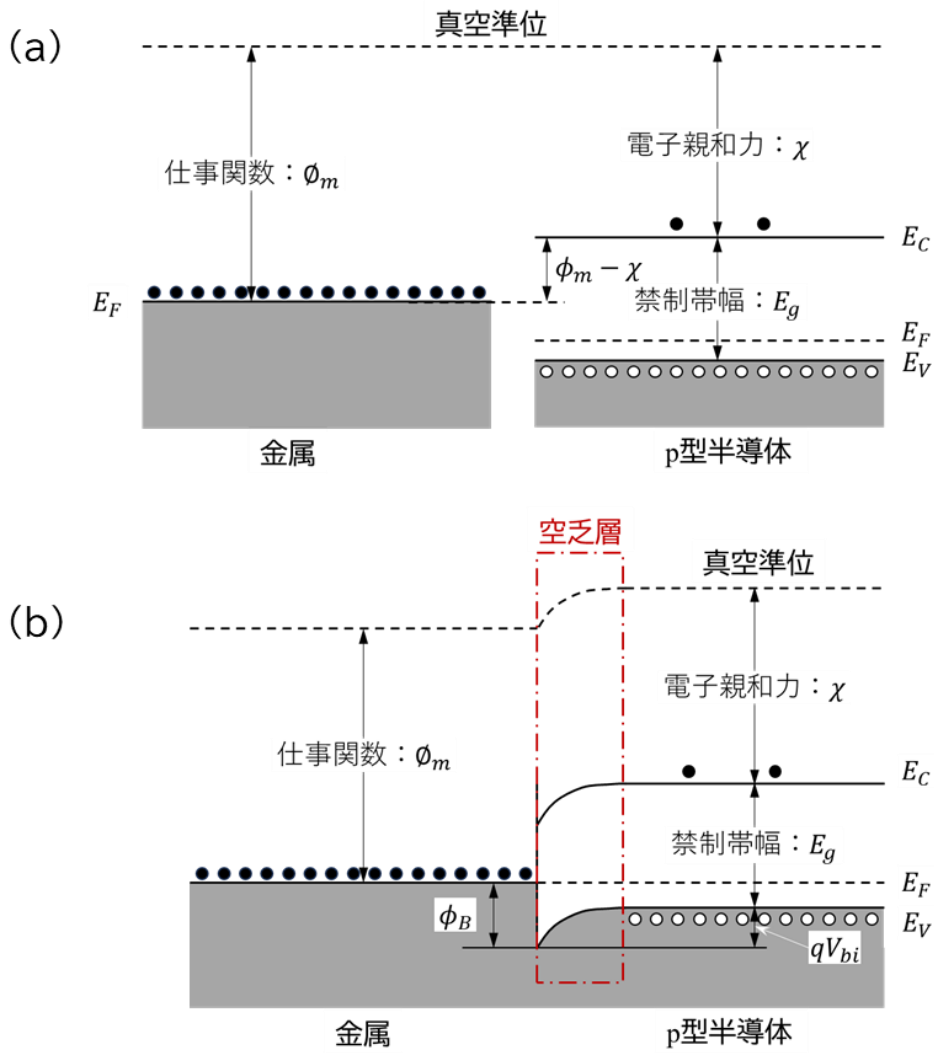


図2-6 金属と p 型半導体のエネルギーバンド図

## 2.4 デバイスシミュレーション

### 2.4.1 シミュレーション原理

本研究のシミュレーションには Silvaco<sup>®</sup> 社の Atlas を用いた。シミュレーションはデバイスのモデリングと数値解析に基づいた物理現象の予測・分析を行うことにより、半導体内部の電気伝導現象に関する三方程式(ポアソン方程式、ボルツマン方程式、電流連続の式)を数値計算手法によって解くものである。

具体的には、デバイス構造内に仮想の計算用のメッシュを定義して、メッシュの交点ひとつひとつの半導体内部の電位分布、キャリア分布を再現し、デバイスの電気的特性を解析するものである。デバイス製造を行わずにデバイスの特性を予測、デバイス構造や製造プロセスの設計・改善を効率化する、といった目的に用いることができる[13]。

基本となる3種類の方程式

(A) ポアソン方程式:空間電荷密度と静電ポテンシャル分布の関係を算出

与えられた電荷の分布 $\rho$ としたときに、静電ポテンシャル $\varphi$ は次のポアソン方程式を満たす。

$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad , \quad (2-1)$$

(B) 電流連続の式:電子と正孔各々の電流を算出

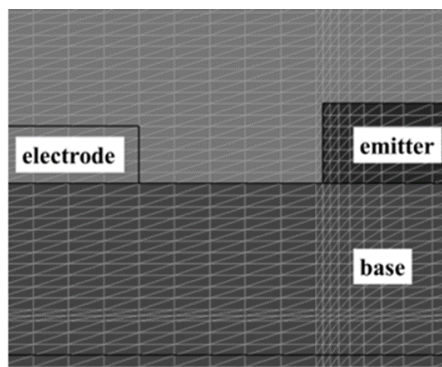
(C) ボルツマン方程式:電子と正孔の生成・再結合を算出

$$\begin{aligned} \text{電流密度} \quad j &= -q \frac{2}{(2\pi)^3} \int \frac{nk}{m} f(k) dk \\ &= \frac{nq^2\tau}{m} E \quad , \end{aligned} \quad (2-2)$$

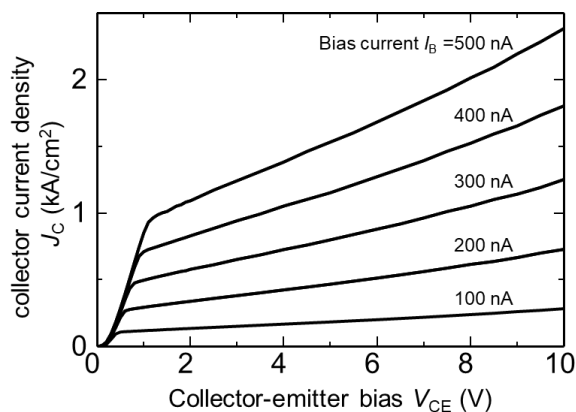
$$\text{電気伝導度} \quad \sigma = \frac{nq^2\tau}{m} \quad , \quad (2-3)$$

これらの式を用い、構造の微小領域(メッシュで分けした領域)ごとに行列式を解く作業がシミュレーションである。

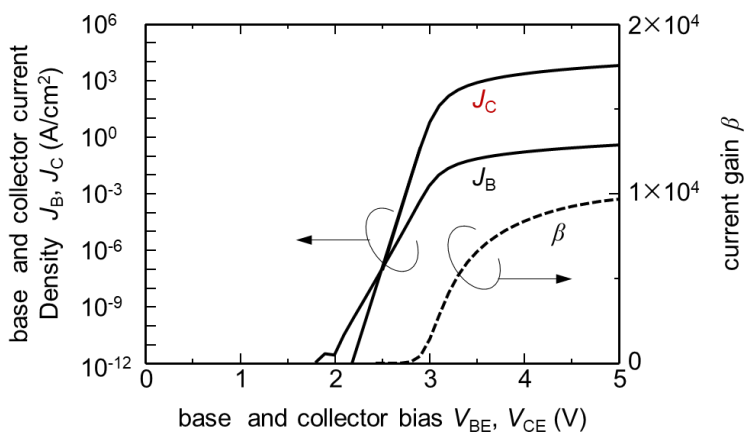
計算では、図2-3(a)のように微小領域に区分けし、領域の交点の電荷、ポテンシャル等を順に解くことにより、電気的特性を得ている。計算で得られた HBT の電気特性の一例を図2-3(b) collector-emitter bias と collector 電流密度と図2-3(c)ガンメルプロットに示す。本研究では Silvaco<sup>®</sup>の Atlas を用いた。



(a) 微小領域(メッシュ)に区分けした一例



(b) HBT デバイスの静特性



(c)ガンメルプロットの一部

図2-7 シミュレーションでの出力例



## 2.4.2 シミュレーションに使用したモデル

シミュレーションに用いた材料に関する各種定数は表2-II の通りである。文献[7][8]と研究室の実測値を基に修正を加えている。

次に使用したモデルの解説を行う。

### 【不完全イオン化モデル】

空乏層幅  $W_{dep}$  は各々の領域の不純物濃度 $[N_A][N_D]$ によって算出される。

$$W_{dep} = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}, \quad (2-4)$$

$$W_{dep} = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} (V_{bi} - V_D)}, \quad (2-5)$$

式(2-4)は無電界時、式(2-5)は順方向に  $V_D$  の電圧がかかった場合である。ここで  $V_{bi}$  はビルトイン電圧である。また式(2-5)を  $n$  型側の空乏層幅  $W_n$  と  $p$  型側の空乏層幅  $W_p$  に分離すると以下のようなになる。

$$W_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{eN_D} \frac{1}{1 + \frac{N_D}{N_A}} (V_D - V)}, \quad (2-6)$$

$$W_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{eN_A} \frac{1}{1 + \frac{N_A}{N_D}} (V_D - V)}, \quad (2-7)$$

一方、base から供給される正孔の輸送機構に関連するパラメータは hole 濃度や electron 濃度などの比抵抗に影響を受ける。また  $n$ -GaN と  $p$ -GaN で活性化率や移動度や正孔・電子濃度に差があるため、分離して考える必要がある。

### 【Shockley-Read-Hall (SRH) 再結合モデル】

Shockley-Read-Hall 再結合はトラップ支援再結合とも呼ばれる。電子はバンド間を遷移する際に、結晶中の不純物によってバンドギャップ中に作られるエネルギー状態(局在状態)を経由する。このようなエネルギー準位は深い準位と呼ばれる。局在状態はキャリア間の運動量の差を埋め合わせることができる。よってこの過程

は間接遷移型半導体で支配的である。また直接遷移型半導体でもキャリア密度が非常に低い場合は支配的である。キャリアのエネルギーは格子振動(フォノン)との間でやり取りされる。この過程の名前は、W. Shockley、W. S. Read、R. N. Hall に由来する[14-17]。

### 【Auger 再結合モデル】

Auger 再結合では、再結合で生じたエネルギーは第 3 のキャリアに与えられ、他のエネルギーバンドを動かすことなく高エネルギー準位に励起される。Auger 過程が起きた後の高エネルギー準位に励起された 3 番目のキャリアは通常、余剰なエネルギーを失って熱振動になる。この過程は 3 つの粒子間の相互作用であるため、通常はキャリア密度が非常に高い非平衡でのみ重要となる。オージェ過程は簡単には起きない。なぜなら 3 番目の粒子は不安定な高エネルギー状態で計算を始めなければならないからである[18]。

熱平衡では、オージェ再結合速度  $R_A$  は次のように表すことができる：

$$R_A = G_0 = C_n n_0^2 p_0 + C_p n_0 p_0^2 , \quad (2-8)$$

ここで  $C_n$   $C_p$  はオージェの捕獲確立である。

定常状態での非平衡オージェ再結合速度  $r_A$  とその結果生じる正味の再結合速度  $U_A$  は

$$r_A = C_n n^2 p + C_p n p^2 , \quad U_A = r_A - G_0 = C_n (n^2 - n_0^2 p_0) + C_p (n p^2 - n_0 p_0^2) , \quad (2-9)$$

オージェ寿命  $\tau_A$  は次のように与えられる[18]。

$$\tau_A = \frac{\Delta n}{U_A} = \frac{1}{n^2 C_n + 2n_i^2 (C_n + C_p) + p^2 C_p} , \quad (2-10)$$

### 【格子緩和(率)・格子整合】

GaN などのワイドギャップ半導体は基板上に MOCVD などによるエピタキシャル成長をさせることで素子を形成している。その際、下地と材料や組成比が異なると、下地基板または下地膜の持つ格子定数と成長する膜との格子定数が異なるため、エピタキシャル成長させた膜は圧縮または引張りの力を受けながら膜成長する。その模式図を図 2-8 に示す。ここで、基板の格子定数  $a_{\text{sub}}$  とエピタキシ

エピタキシャル膜の格子定数  $a_{\text{epi}}$  の差  $\Delta a$  と基板の格子定数  $a_{\text{sub}}$  の比  $\Delta a/a_{\text{sub}}$  を格子緩和率という。図2-8に示すように、エピタキシャル層の膜厚が十分薄い場合は、格子不整合が多少あったとしても、エピタキシャル層の格子が歪むことによって界面での格子の連続性を保って成長する。これをコヒーレント成長という。エピタキシャル層の格子定数が基板の格子定数と一致した状態を擬似格子整合と表現することがある。この場合、格子体積を保存しようとして、界面に垂直な方向の格子定数が変化する[19]。

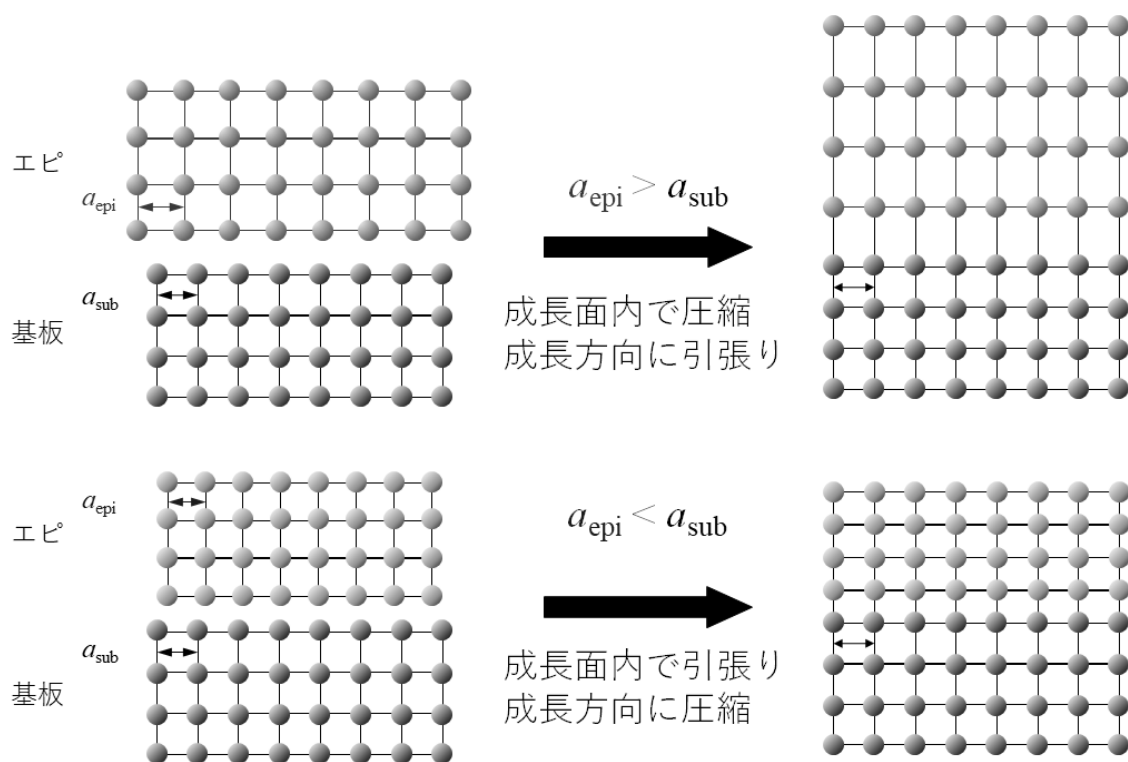


図2-8 格子緩和の模式図

### 2.4.3 シミュレーションに使用した各種定数

#### ～ 二元・三元・四元混晶の各定数の設定値 ～

二元混晶の場合には格子定数や  $E_g$ 、 $E_C$ 、 $E_V$  等の値は文献も多く、また一義的に定義もしやすい。しかしながら、三元、四元と増えるに従ってそれらの定義は難しくなる。そこで、この項では用いたシミュレータがどのような定義と計算をしているかを記述する。

#### (1) $E_g$

Atlas の計算の過程で用いられている  $E_g$  は以下のような計算式で算出されている。二元混晶(GaN、InN、AlN)は[13]、

$$E_g(\text{GaN}) = 3.507 - \frac{0.909 \times 10^{-3} T^2}{T+830.0}, \quad (2-11)$$

$$E_g(\text{InN}) = 0.824 - \frac{0.245 \times 10^{-3} T^2}{T+624.0}, \quad (2-12)$$

$$E_g(\text{AlN}) = 6.230 - \frac{1.799 \times 10^{-3} T^2}{T+1462.0}, \quad (2-13)$$

ここで、T は絶対温度(K)である。また三元混晶の場合は、

$$E_g(\textcircled{1}_x \textcircled{2}_{(1-x)} N) = E_g(\textcircled{1}N)x + E_g(\textcircled{2}N)(1-x) - bx(1-x), \quad (2-14)$$

と表すことが出来る。ここで①および②は Ga、Al、In のいずれか。また b は bowing parameter である。これから各々の三元混晶(GaInN、AlGaInN、AlInN)の場合は以下の計算式で算出されている。式(2-11) (2-12) (2-13)を用いて[13]、

$$E_g(\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}) = E_g(\text{GaN})(1-x) + E_g(\text{InN})x - 3.8x(1-x), \quad (2-15)$$

$$E_g(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = E_g(\text{GaN})(1-x) + E_g(\text{AlN})x - 1.3x(1-x), \quad (2-16)$$

$$E_g(\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}) = E_g(\text{InN})(1-x) + E_g(\text{AlN})x - 5.1x(1-x), \quad (2-17)$$

また四元混晶(AlGaInN)は以下の計算式で算出されている。

$$E_g(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{In}_y\text{N}) = E_g(\text{AlN})x + E_g(\text{InN})y + E_g(\text{GaN})(1-x-y) - 0.9x(1-x) - 1.6y(1-y), \quad (2-18)$$

これより求められる各混晶の  $E_g$  と格子定数をまとめた相図を図2-9に示す。bowing parameter を有するため、二元混晶を頂点とする3角形にはならず、弧を持つ三日月形の相図となる。

## (2) $\Delta E_V$ および $\Delta E_C$

$\Delta E_g = \Delta E_C + \Delta E_V$  であるが、 $\Delta E_C / \Delta E_V = 7 / 3$  の比として定義されている[21]。比率の変更は可能である。本研究ではこの比率をそのまま用いて検討を進めた。

## (3) 真空準位、電子親和力、 $E_V$ 、 $E_C$

真空準位は電子親和力と  $E_C$  の準位の和から定義されている。計算の基となる主だった二元～四元混晶における  $E_g$ 、 $E_V$ 、 $E_C$ 、電子親和力および真空準位の値を図2-10および表2-IIに示す。本値はシミュレーションにて求めた値である。

## (4) 格子定数

基本となる二元混晶の a 軸格子定数は、

$$\text{GaN} : 3.189 \text{ \AA}, \text{InN} : 3.548 \text{ \AA}, \text{AlN} : 3.112 \text{ \AA}$$

を用いている。また、三元、四元混晶については、該当する二元間を組成で線形補間計算して格子定数としている[13]。

## (5) bowing parameter

二元混晶の三点の結び方には、文献間においても議論が多数存在する[20-28]。特に文献毎に弧を描く軌跡も多数あり結論は出ていない。本研究では図2-9に示したシミュレーションに用意された混晶相図を基にして検討を進めた。式(2-15)-(2-17)中から bowing parameter:  $b$  は、それぞれ  $b(\text{GaInN}) = 3.8$ 、 $b(\text{AlGaInN}) = 1.3$ 、 $b(\text{AlInN}) = 5.1$  となる。本研究では、この bowing parameter を変更せずに用いて検討を進めた。加えて bowing parameter を直接指定する変数は Atlas シミュレーションには用意されていない。

## (6) その他の定数

電子および正孔の移動度、電極との仕事関数は表2-III に示した数値を使用した。これらは、文献および実験的に求めた値である。

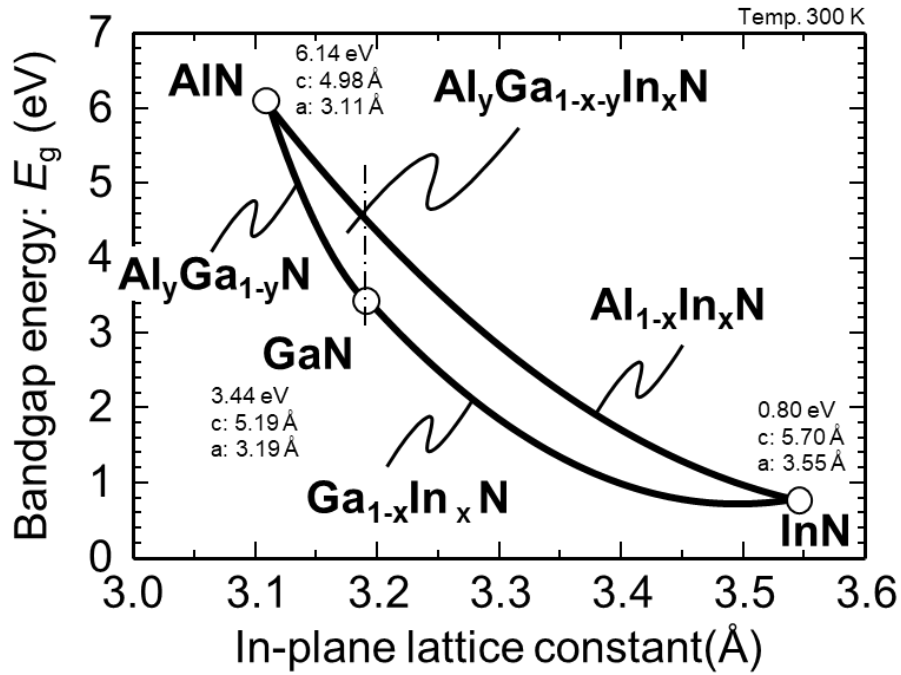


図2-9 シミュレーションで用いた窒化物混晶 格子定数と  $E_g$  の関係図

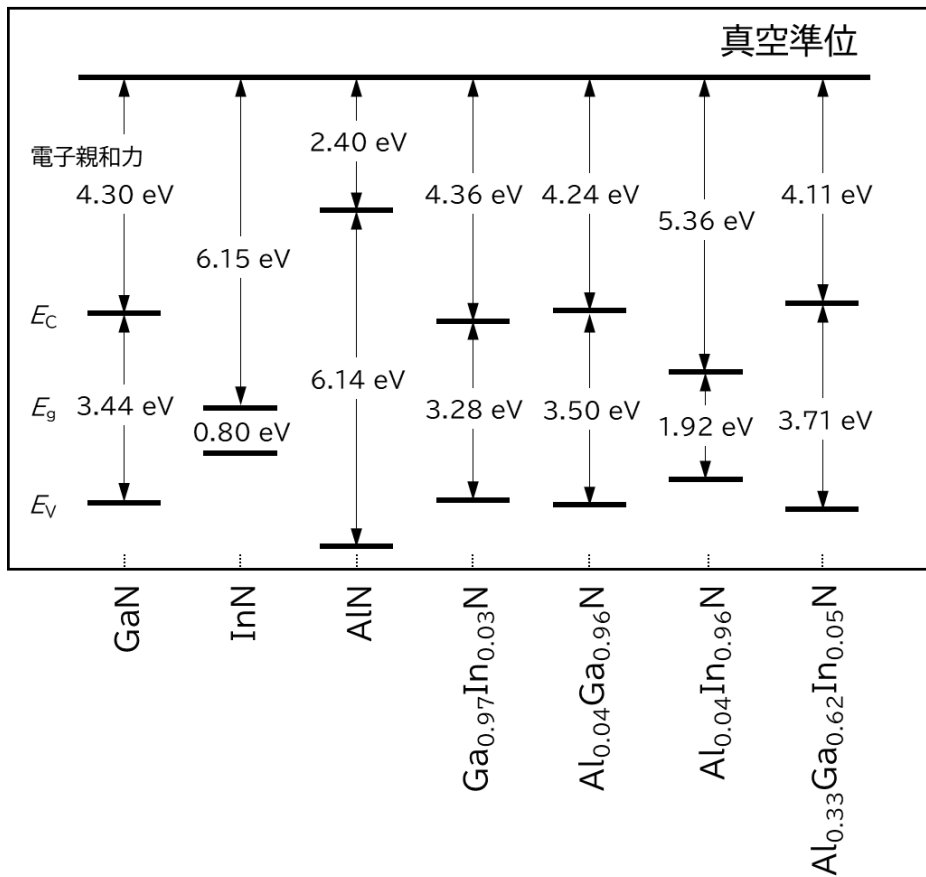


図2-10 シミュレーションで用いた窒化物半導体のエネルギー準位

表2-II シミュレーションに用いたエネルギー準位 (eV)

混晶	$E_g$	電子親和力
GaN	3.44	4.30
InN	0.80	6.15
AlN	6.14	2.40
Ga <sub>0.97</sub> In <sub>0.03</sub> N	3.28	4.36
Al <sub>0.04</sub> Ga <sub>0.96</sub> N	3.49	4.24
Al <sub>0.04</sub> In <sub>0.96</sub> N	1.92	5.36
Al <sub>0.33</sub> Ga <sub>0.62</sub> In <sub>0.05</sub> N	3.71	4.11

表2-III シミュレーションに用いた各種定数

	Unit	GaN	AlGaInN	GaInN	Ni	Ti
$E_g$	(eV)	3.44	変数*1	変数*1	-	-
電子移動度	(cm <sup>2</sup> /Vs)	400	100	400	-	-
正孔移動度	(cm <sup>2</sup> /Vs)	8	8	8	-	-
仕事関数	(eV)	-	-	-	5.22	4.33

\*1) 混合比率によって変動

## 2.5 プロセス要素技術

### 2.5.1 洗浄

半導体の各プロセス中に付着する恐れのある汚染物質やパーティクルには、レジストやポリマー化合物などの有機物、種々の金属を含む無機質、SiO<sub>2</sub>などの酸化物が挙げられ、デバイスの品質に著しく影響を及ぼす。それらの汚染物質を取り除くための洗浄工程は、対象物に合わせた薬品の選択と加工条件の適正化が除去率に影響する。表2-IVに各対象物に対する薬品のリストを示す。

また処理後は十分な水洗により薬品を除いた後に、IPAへの置換、乾燥窒素などによる水滴除去が必要である。また当然のことながら、ドラフトでの処理が必須で防護対策をしなければならない。

表2-IV 洗浄技術

薬品	洗浄/加工対象	濃度	後処理
HCl	金属	10%	水洗/乾燥
BHF	SiO <sub>2</sub>	10%	水洗/乾燥
王水 HCl+HNO <sub>3</sub>	GaN ダメージ層 金属	3:1	水洗/乾燥
アセトン+IPA	有機物/レジスト	100%	IPA 乾燥

### 2.5.2 有機金属気相成長 (MOCVD)

Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD)は、原料として有機金属錯体ガスを用いた結晶成長方法である。化合物半導体結晶を作製するのに用いられ、MOCVDでは原子層オーダで膜厚を制御することができるため、半導体レーザーや HEMTs、HBTs などの電子デバイスに用いられる。分子線エピタキシー法 (MBE) と比較し、面内での膜厚の偏差が少なく、高速成長が可能であるほか、超



高真空を必要としないために装置の大型化が容易である為、ワイドバンドギャップデバイスの商用製品の作製に多く用いられている。

MOCVD は化合物半導体の作製において、III 族元素 Al の原料ガス tri-methyl-aluminum (TMA)、In の原料ガス tri-methyl-indium (TMI)、Ga の原料ガス tri-methyl-gallium (TMG)等の有機金属原料を用いている。V 族の原料ガスには N の水素化物である NH<sub>3</sub> などが用いられている。有機金属原料は常温では液体・固体であるが、飽和蒸気圧が高い性質を利用して恒温槽で温度を一定に保った原料中に H<sub>2</sub> や N<sub>2</sub> をキャリアガスとして用いてバブリングすることで、結晶成長に十分な量の成長用原料を安定供給する事ができる。混合した原料ガスが加熱された基板に達すると、熱分解・化学反応をおこし、結晶情報を引き継いで成長(堆積)する。原料ガスの流量比・温度・圧力などを変えることによって様々な組成・物性・構造の半導体を作ることができる。

### 2.5.3 フォトリソグラフィ

リソグラフィ工程は、基板上への感光性を有するフォトレジストを塗布し、露光、現像、エッチングを行い、使用済みのレジストを除去する一連のプロセスである。

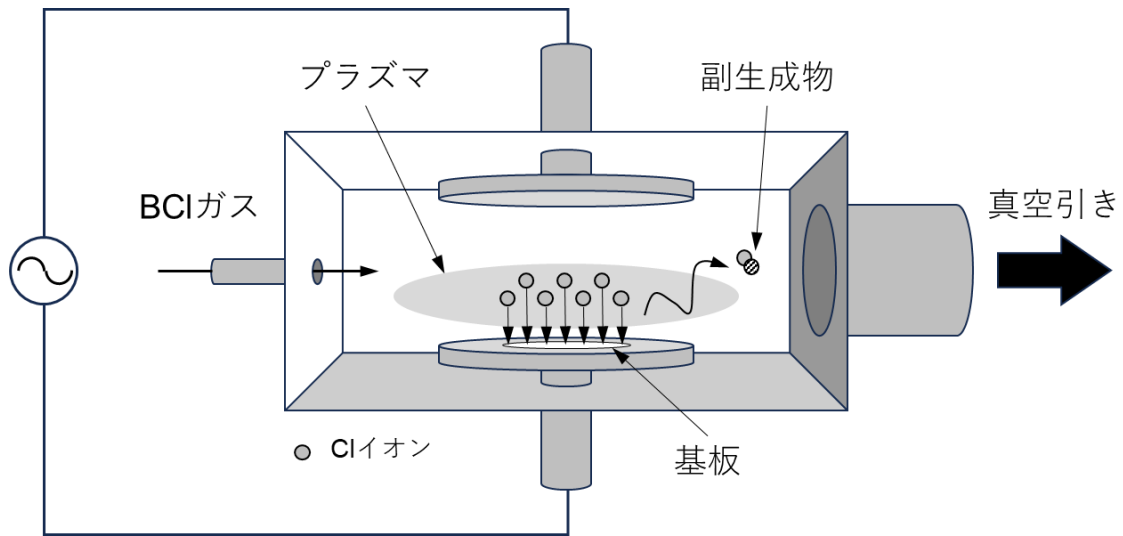
露光によるレジストパターン形成の概要を説明する。加工する基板に、光に対する感光性を持つレジストの薄膜をコートする。スピナーにて回転塗布することでウェーハ表面に薄く均等に塗布し、その後加熱して溶媒を揮発・固化させる。次に、マスクアライナーにより石英ガラス上に形成した Cr パターンを紫外線により露光転写する。露光されたレジストは、次に現像プロセスでパターンを顕在化させる。これは、レジストに含まれる感光材が紫外光によって化学変化する結果、光が当たった部分と当たらなかった部分とで現像液に対する溶解性に違いが出ることを利用している。レジストパターンが形成されると、これをマスクとしてエッチングなどの加工が加えられ、パターンが実際の加工対象となるものに転写される。加工が終われば、レジストの役割は終わりとなり、残ったレジストは剥離除去される。

## 2.5.4 反応性イオンエッチング Reactive Ion Etching (RIE)

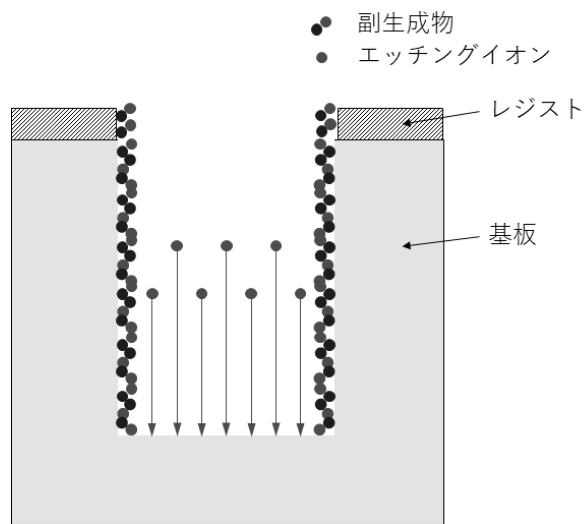
RIE は、レジストやその他のマスクパターンを用いて、マスクがない部分の加工対象物を選択的に除去するプロセスである。レジストパターンをマスクとする下地のエッチングにはガスのプラズマなどを用いるドライエッチングと溶液に浸けて化学的に溶解させるウェットエッチングの 2 つの方式がある。ドライエッチングの中でも、デバイス作製によく用いられているものに反応性イオンエッチング(RIE)がある。図2-11(a) にその設備概略構造を示す。エッチングされる材料と化学反応して揮発性の化合物を生成できるガスを導入し、プラズマを放電させる。この反応を促進するラジカルを作ると同時にイオン化したガス分子も生成しこれを基板にバイアス電圧で加速して、スパッタリングや表面化学反応励起に寄与させるものである。

図2-11(b) に RIE の加工原理概略を示す。外部より印加された電力により加工ガス(例えば  $\text{BCl}_3$ )がプラズマ化されエッチングイオンが発生する。エッチングイオンは電界により加速されて基板縦方向に突入し基板材料と反応する。反応した際にできる副生成物の気化温度以下に基板温度を下げることにより、周辺に一応に付着するが、縦方向はエッチングイオンにさらされるために被膜せず、横方向のみに被膜が形成されてエッチングを阻害する膜となるため、縦方向にエッチングが進む異方性エッチング形状が得られる。

エッチング特性には図2-12(a) 異方性エッチングと(b) 等方性エッチングがある。異方性エッチングは縦横のエッチング速度が異なるため、通常はレジストマスクの形状に合わせて縦方向に加工が進む。一方、等方性エッチングは深さ方向にエッチングが進むと同時に横方向にもエッチングされるので、マスク下に潜り込むようにエッチングされる。通常、ウェットエッチングは液体中の化学反応のみでエッチングされるので、等方性エッチングとなる。エッチング加工の微細性や寸法精度は、異方性エッチングの方がマスク形状を高精度に転写できる。

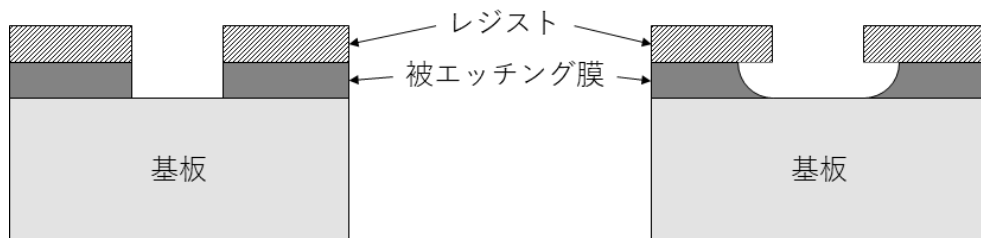


(a) RIE 装置概略構造



(b) 異方性エッチング原理

図2-11 RIE 装置概略構造と異方性エッチング原理



(a) 異方性エッチング

(b) 等方性エッチング

図2-12 エッチングにおける断面形状

## 2.5.5 スパッタ成膜

スパッタ法は膜が堆積される基板と、膜の材料となるターゲットを対向させて真空成膜容器内に置き、ここに Ar などの希ガスを減圧状態で導入し、これに外部から高周波の電磁波を導入することによりプラズマ放電を起こさせる。プラズマ内部で Ar イオンが生成されるが、これを引き寄せる方向の直流バイアス電圧の印加によって、Ar イオンがターゲット表面に衝突する。この時運動エネルギーを持った Ar イオンがターゲットの原子を表面から物理的にたたき出すスパッタリング現象が起こる。そして、たたき出されたターゲットの原子は希薄なガス雰囲気中を飛行して、基板表面に付着する。これによって基板表面に膜が堆積していく。図2-13にその概略を示す。なお、ガスに化学反応性を有するものを用い、スパッタリング中に  $O_2$ 、 $N_2$  ガスとの化学反応を起こさせてその生成化合物を堆積する反応性スパッタリングもある。13.56 MHz の高周波プラズマを用いることにより、絶縁物のターゲットから成膜を行うことができ、本研究では  $SiO_2$ 、 $MgO$ 、 $Si_3N_4$  などを成膜している。

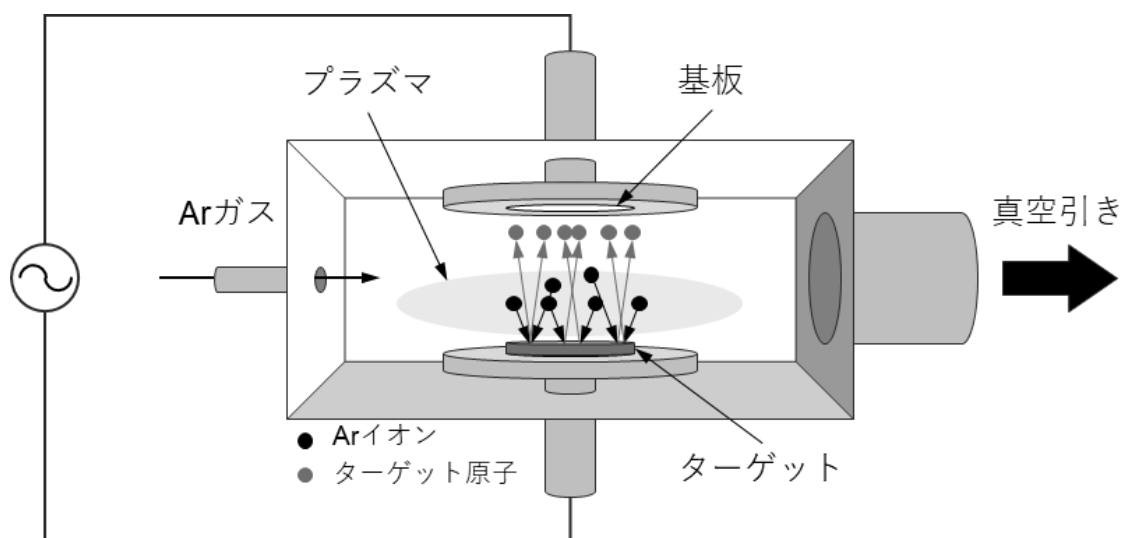


図2-13 スパッタリング装置概略構造と成膜原理

## 2.5.6 熱処理/活性化

アニール技術は、半導体デバイス製造における各複合プロセスにそれぞれ取り込まれている熱処理である。熱処理のツールとしては電気炉が用いられる装置と Rapid Thermal Annealing (RTA) と呼ばれるランプ加熱方式の装置がある。アニールは、半導体プロセスにおいて結晶性向上、界面特性向上、電気特性向上、形状改善、高純度化、欠陥除去、緻密化、安定化などを目指したものである。窒化物半導体では水素による Mg アクセプタの不活性化が起こるため、熱処理などを行うことで水素の脱離反応によりアクセプタが活性化され、*p* 型伝導が得られる。

## 2.5.7 真空蒸着法/リフトオフ

真空蒸着法に用いる電子線(EB)蒸着機の基本構造を図2-14(a)に示す。真空中に排気したチャンバ内で、膜の材料となる原料を加熱蒸発させ、この蒸気に基板表面を露出しておくことで膜堆積を行う方法である。この方法は真空中で行うので、上記となった材料の原子あるいは分子は、蒸着源から基板表面に達するまでガス分子などにほとんど衝突することなく直進する。その結果、基板表面に段差がある場合、蒸着方向によっては、被覆性が悪くなる。図2-14(b)に示すリフトオフのように、基板表面をレジストで部分的にマスクし、その上から蒸着で堆積した後に膜の不要な部分のレジストを溶解することで取り去る際、マスクのエッジの膜厚が薄くなり、蒸着との組み合わせで利点となっている。

## 2.5.8 選択再成長

選択再成長とは、必要な場所にのみ選択的に半導体膜をエピタキシャル成長させる工程である。方法として、基板表面に SiO<sub>2</sub> などの絶縁膜を形成及び選択成長させたい箇所の絶縁膜を除去するパターニングを行った後に、全面に再度エピタキシャル成長を行う。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>などの結晶面が露出している箇所には良質な結晶性を持つエピタキシャル膜が、SiO<sub>2</sub> 上には質の悪い膜が成膜される。Buffered Hydrogen Fluoride (BHF) などで絶縁膜を除去することにより、選択領域にのみ膜を形成する方法である。本研究では RIE プロセスにおけるプラズマダメージを

base 表面の電極接続をする部分に与えない emitter 選択再成長をするために用いた。図2-15にその概略を示す。

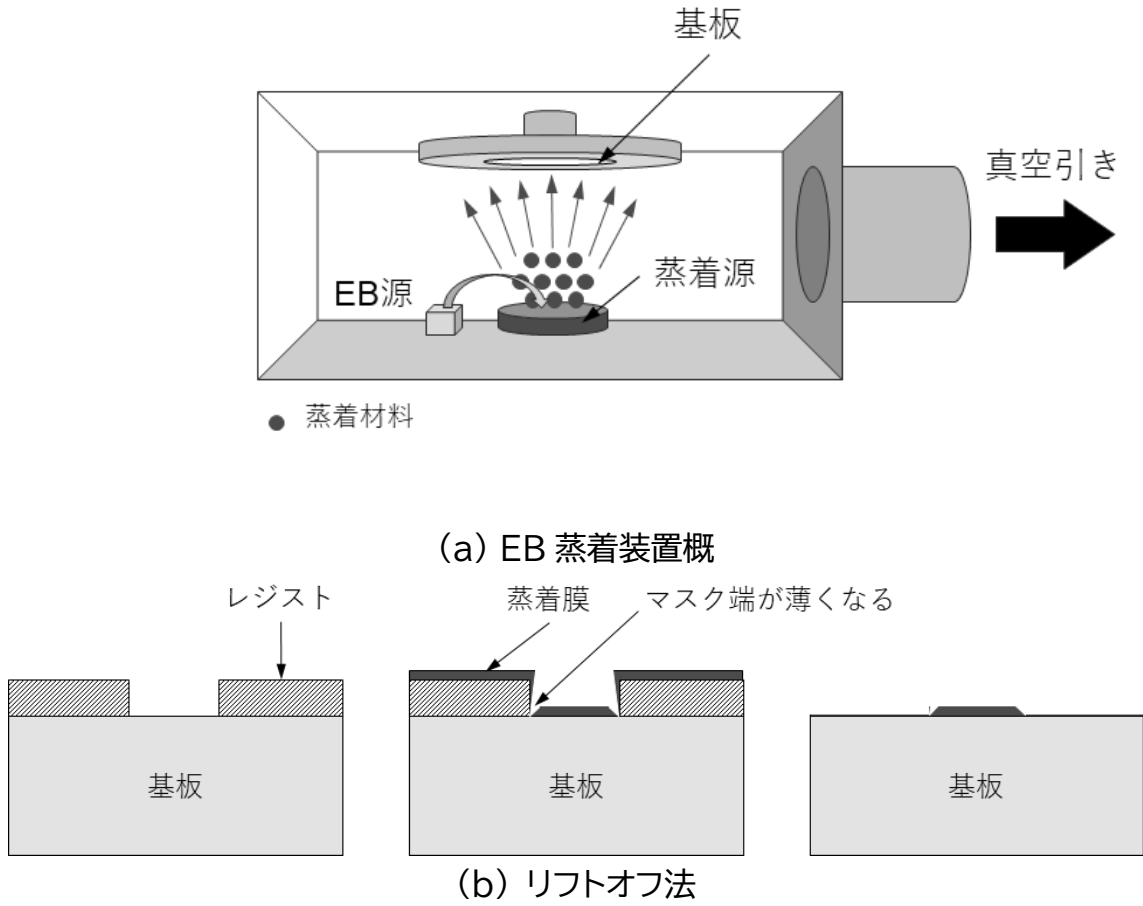


図2-14 EB 蒸着装置概要とリフトオフ法

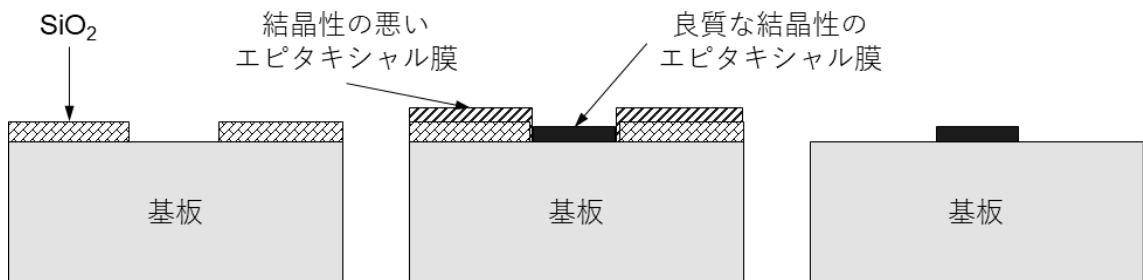


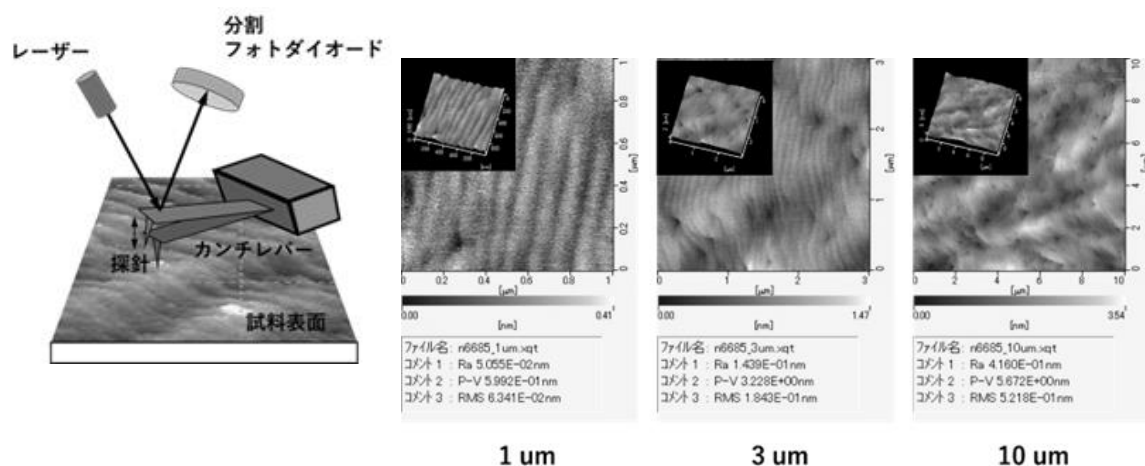
図2-15 選択領域再成長 emitter 層の形成方法

## 2.6 評価

### 2.6.1 原子間力顕微鏡 Atomic Force Microscopy (AFM)

原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscopy (AFM))は Binnig らによって発明された[29]。AFM は走査プローブ顕微鏡の一種で、先端を尖らせた針を膜の表面上で走査して、針が検知する原子間力を電気信号に変えて表面の形状を観察する。図2-16(a)に装置構成概略を示す。

その原理は、『あらゆる物質間に働く原子間』を利用している。AFM の探針先と試料の間にも原子間力が働いており、試料表面の凹凸による原子間力の変化を検出することで表面の凹凸を測定する。AFM の探針はカンチレバーと呼ばれる板バネの先端に取り付けられている。試料と探針の間に働く原子間力によって、カンチレバーがたわむ。カンチレバーの背面にレーザーを照射し、反射光を複数割されたフォトダイオードで検出する。カンチレバーがたわむとレーザー光の反射位置が変位し、分割されたフォトダイオードの光量差が変化するため、カンチレバーの変位を電流として検出する[30-36]。 図2-16(b)に観察例を示す。

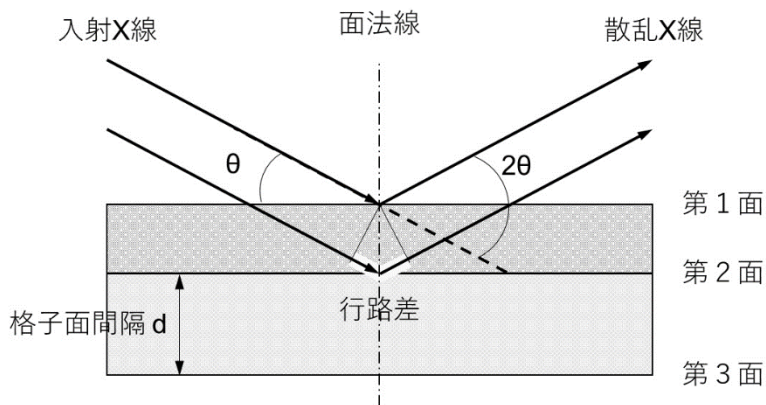


(a) AFM の構成 (b) AFM の観察結果(Sapphire 上の p-GaN 膜表面)

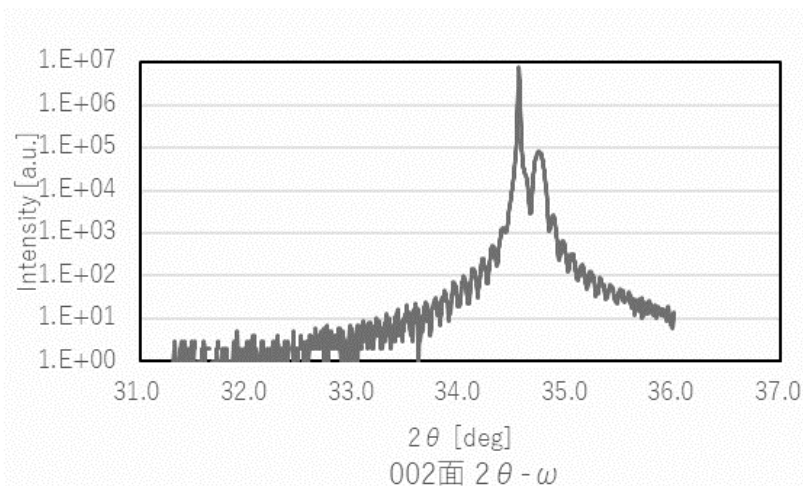
図2-16 AFM の構成と出力例

## 2.6.2 X線回折法 X-Ray Diffraction (XRD)

結晶は、物質を構成する原子の集団が3次的に繰り返し配列した状態である。X線を結晶に照射すると、結晶中の電子によりX線が散乱される(散乱X線)。散乱したX線は互いに干渉し合い、ブラッグの法則を満たしたときに強い回折X線が生じる。図2-17(a)に測定原理を示す。格子面間隔を  $d$ 、X線の入射角を  $\theta$  とした場合、第1面と第2面の行路差(黄線部分)は  $2d \sin \theta$  となる。行路差が入射X線の波長  $\lambda$  の整数倍の時に散乱X線が強め合う。図2-17(b)に AlGaInN の 002 面  $2\theta$ - $\omega$  の XRD 波形の例を示す。これにより結晶組成やさらに逆格子観察により歪緩和などの情報を得ることが出来る。



(a) XRD の測定原理



(b) XRD 波形(例: AlGaInN 100 nm 002 面  $2\theta$ - $\omega$ )

図2-17 XRD 原理と出力波形例



### 2.6.3 Hall 効果測定

Hall 効果とは「半導体試料に電流  $I$ 、電流と直交する方向に磁場  $B$  を印加すると、電流と磁場の両方に直交する方向に電場  $E$  が発生する現象」である。図2-18に原理を示す。磁場中の  $p$  型半導体の場合には、多数キャリアである正孔は同じようにローレンツ力を受け、上面に集まり正に帯電する。反対に下面は負に帯電する。結果として、上面から下面へ向かう Hall 電界が生じる。 $n$  型半導体・ $p$  型半導体により発生する Hall 電圧  $V_H$  の符号が変わるため、Hall 効果測定を行うことで、半導体の判定を行うことが出来る。また、測定により移動度や比抵抗を求められる[37]。

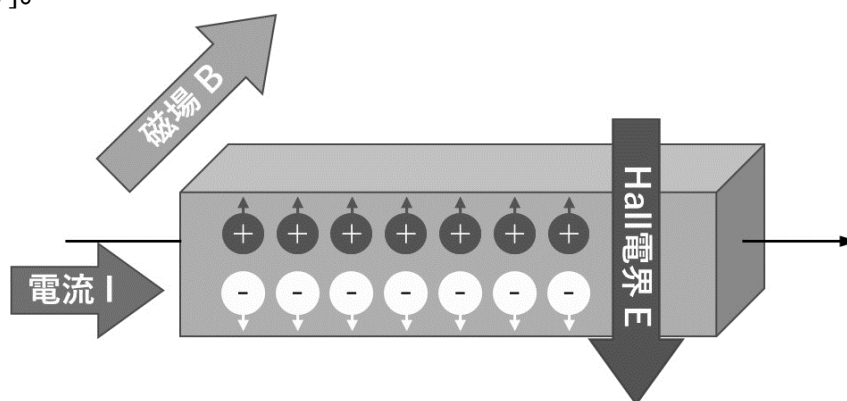


図2-18 Hall 効果の原理( $p$ 型半導体の場合)

### 2.6.4 van der Pauw 法

Hall 効果測定に用いる van der Pauw 法の原理を図2-19に示す。この測定では、四角形状(1 cm 角程度が望ましい)のサンプルを用いる。電極 AB 間に電流  $I_{AB}$  を流し、電極 DC 間の電圧  $V_{DC}$  を測定、式(2-19)より抵抗値  $R_{AB,DC}$  を求める。

$$R_{AB,DC} = \frac{V_{DC}}{I_{AB}}, \quad (2-19)$$

同様の手順で  $R_{BC,AD}$  を求め、式(2-20)から抵抗率  $\rho$  を求める。

$$\rho = \frac{\pi D}{\ln 2} \frac{(R_{AB,DC} + R_{BC,AD})}{2} f, \quad (2-20)$$

$$\left| \frac{(R_{AB,DC} + R_{BC,AD}) - (R_{AB,DC} + R_{BC,AD})}{(R_{AB,DC} + R_{BC,AD}) + (R_{AB,DC} + R_{BC,AD})} \right| = \frac{f}{\ln 2} \operatorname{arccosh} \left[ \frac{\exp \frac{\ln 2}{2}}{f} \right], \quad (2-21)$$

電極 A から電極 C に電流  $I_{AC}$  を流し、上方から下方に磁場を印加した際に、電極 DB 間に発生する電圧  $V_{DB}$  を測定。式(2-22)から多数キャリアの移動度  $\mu$  を求める。

$$\mu = \frac{1}{qn\rho} , \quad (2-22)$$

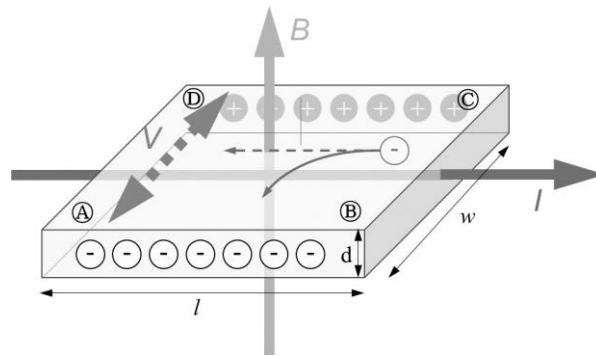


図2-19 van der Pauw 法原理

### 2.6.5 TLM 法 Transfer length method (TLM)

金属と半導体の接続状態を評価するため、Transfer length method (TLM)法を用いた。TLM 法は距離を変えた電極対を複数用意して抵抗測定を行う。試料断面模式図を図2-20に示す。二極間の抵抗  $R_T$  は、電極間距離  $L$  の関数である膜抵抗  $R_{film}(L)$  と接触抵抗  $R_C$  の和として式(2-23)のように表記できる。

$$R_T(L) = R_{film}(L) + 2R_C , \quad (2-23)$$

実際には、様々な  $L$  に対する抵抗  $R_T(L)$  を測定し、横軸を  $L$ 、縦軸を  $R_T$  としてプロットする。図2-21 に示すように  $R_T$  軸と直線との交点が  $2R_T$  となり、直線の傾きから、シート抵抗  $R_{sh}$  を求めることが出来る。ここで  $w$  は電極の幅(図2-20)の奥行方向である。加えて、円形パターンを用いた TLM 測定を Circle transmission line measurement (CTLM)と呼ぶ。CTLM の抵抗  $R_{CT}$  は以下の式(2-24)より導かれる。

$$R_{CT} = \frac{R_{SH}}{2\pi} \left[ L_T \left( \frac{1}{a_2} + \frac{1}{a_1} \right) + \ln \left( \frac{a_2}{a_1} \right) \right] , \quad (2-24)$$

ここで、 $R_{SH}$ :電極間の半導体部分のシート抵抗、 $a_1$ :リング内径、 $a_2$ :リング外形、 $L_T$ :伝搬長である。

図2-20に示したように、接続抵抗  $R_C$  は、電極の端から伝搬距離  $L_T$  まで影響を及ぼす。コンタクト抵抗  $\rho_C$  は以下のように表すことができる。

$$\rho_C = R_C \times L_T \times W = \frac{2R_{SK}L_T}{W} \times L_T \times W = R_{SH} \times L_T^2, \quad (2-25)$$

ただし、 $R_{SH}$ :電極間の半導体部分のシート抵抗、 $R_{SK}$ :電極の端から影響を与える半導体層のシート抵抗。従って、 $L_T$  が電極幅より大きな値がでた測定結果は、測定電流が横拡がりしている可能性がある為、注意が必要である。

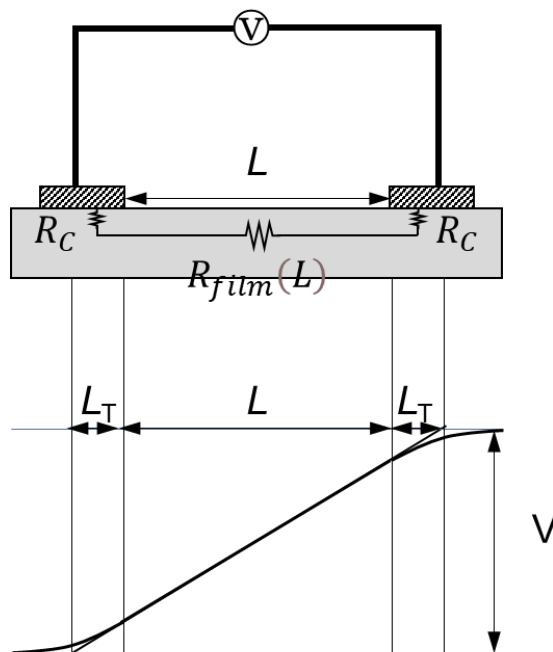


図2-20 TLM 測定原理

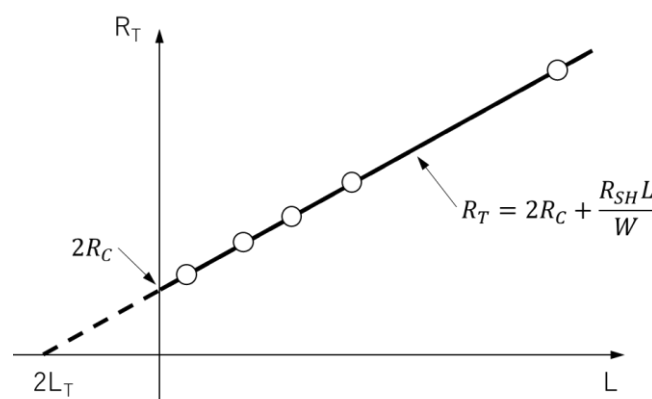


図2-21 電極間隔と抵抗の相関

## 参考文献

- [1] 尾鍋 研太郎, *応用物理学会誌* **86** 7 (2017) pp.603-605.
- [2] アイアール技術者教育研究所(<https://engineer-education.com/direct-transition-indirect-gap-semiconductor/>).
- [3] R. Sakaguchi, "Theoretical investigations of compositional inhomogeneity around threading dislocations in III–nitride semiconductor alloys" *Jpn. J. Appl. Phys.* **55** 05FM05 (2016).
- [4] 京都工芸繊維大学 講義資料「転位」より  
(<https://www.cis.kit.ac.jp/~morita/jp/class/FracStrength/4.pdf>).
- [5] S. J. Pearton, "Gallium Nitride Processing for Electronics, Sensors, and Spintronics" *Springer-Science*, New York, (2006).
- [6] T. Haneda, "Basic Properties of ZnO, GaN, and Related Materials" *Proc. Oxide and Nitride Semiconductors: Processing, Properties, and Applications*, ED., New York, (2009).
- [7] J. L. Freeouf, "Schottky barriers: An effective work function model" *Appl. Phys. Lett.* **39** 9 (1981).
- [8] J. F. Muth, "Absorption Coefficient, Energy Gap, Exciton Binding Energy, and Recombination Lifetime of GaN obtained from Transmission Measurements" *Appl. Phys. Lett.* **71** (2022) pp.2527-2574.
- [9] L-C. Chen, "Microstructural investigation of oxidized Ni/Au ohmic contact to *p*-type GaN" *J. Appl. Phys.* **86** 3826 (1999).
- [10] S. Lu, "Ohmic contact on low-doping-density *p*-type GaN with nitrogen-annealed Mg" *Appl. Phys. Lett.* **119** 242104 (2021).
- [11] M.C. Benjamin, "UV photoemission study of heteroepitaxial AlGaIn films grown on 6H-SiC" *Appl. Surf. Sci.* **104/105** 455 (1996).
- [12] C.I. Wu, "Electron affinity at aluminum nitride surfaces" *Appl. Phys. Lett.* **73** 10 (1998).
- [13] Csilvaco, "Atlas User Manual", December 15 (2020).
- [14] W.shockley, "Statistics of the Recombination of Holes and Electrons" *Phys. Rev.* **87** 835 (1952).
- [15] E. Khorasani, "Optically Excited MOS-Capacitor for Recombination Lifetime Measurement" *IEEE Elec. Dev. Lett.* **35** 10 (2014) pp986–988.

- [16] W. Shockley, “Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons” *Physical Review* **87** 5 (1952) pp835–842.
- [17] R. N. Hall, “Germanium rectifier characteristics” *Physical Review* **83** 1 (1951) pp228.
- [18] Li, Sheng S., “Submitted manuscript”, *Semiconductor Physical Electronics*. (2006) pp. 143.
- [19] 山梨大学 鍋谷暢一, “結晶工学特論第3部”, (2008)  
(<https://www.ccn.yamanashi.ac.jp/~nabetani/lecture/crystal/crystal1-3.pdf>).
- [20] M. Miyoshi, “Microstructure variation in thick AlInN films grown on c-plane GaN on sapphire by metalorganic chemical vapor deposition” *J. Crystal Growth* **506** 15 (2019) pp40-44.
- [21] T. Aschenbrenner, “Optical and structural characterization of AlInN layers for optoelectronic applications” *J. Appl. Phys.* **108** 063533 (2010).
- [22] M.J. Lukitsch, “Optical and electrical properties of Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N films grown by plasma source molecular-beam epitaxy”, *Appl. Phys. Lett.* **79** 632 (2001).
- [23] T. Peng, “Band gap bowing and refractive index spectra of polycrystalline films deposited by sputtering”, *Appl. Phys. Lett.* **71** 2439 (1997).
- [24] Q. Guo, “Growth and characterization of reactive sputtered AlInN films”, *Phys. Stat. Solidi C* **2533** (2003).
- [25] S. Yamaguchi, “Observation of photoluminescence from Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N heteroepitaxial films grown by metalorganic vapor phase epitaxy” *Appl. Phys. Lett.* **73** 830 (1998).
- [26] K.S. Kim, “Determination of the band-gap energy of Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N grown by metal-organic chemical-vapor deposition”, *Appl. Phys. Lett.* **71** 800 (1997).
- [27] M. Goano, “Band structure nonlocal pseudopotential calculation of the III-nitride wurtzite phase materials system. Part II. Ternary alloys Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, and In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>N”, *J. Appl. Phys.* **88** 6476 (2000).
- [28] J. Wu, “When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives” *J. Appl. Phys.* **106** 011101 (2009).
- [29] Binnig, “Weibel, E. Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy” *Phys. Rev. Lett.* **49** 57 (1982).
- [30] Binnig, G.; Quate, C. F.; Gerber, C., “Atomic Force Microscope”, *Phys. Rev. Lett.* **56** 930 (1986) pp.930–933.
- [31] Zhong, “Fractured Polymer/Silica Fiber Surface Studied by Tapping Mode Atomic Force Microscopy.” *Surf. Sci.* **290** 1–2 (1993) L688–L692.

- [32] Albrecht, “Frequency Modulation Detection Using High-Q Cantilevers for Enhanced Force Microscope Sensitivity.” *J. Appl. Phys.* **1** 347347 (1991).
- [33] Gross, L, “The Chemical Structure of a Molecule Resolved by Atomic Force Microscopy” *Science* **1176210** (2009).
- [34] A. Y. Jee, “Comparative Analysis on the Nanoindentation of Polymers Using Atomic Force Microscopy.” *Polym. Test.* **09** 009 (2010).
- [35] D. Wang, “Visualization of Nanomechanical Mapping on Polymer Nanocomposites by AFM Force Measurement.”, *Polymer* **3** 052 (2010).
- [36] T. Fukui, “Direct Observation and Manipulation of Supramolecular Polymerization by High-Speed Atomic Force Microscopy.”, *Angew. Chemie - Int. Ed.* **57** 47 (2018) pp. 15465–15470.
- [37] Semi journal 解説「ホール効果測定とは:キャリア移動度の測定原理」(<https://semi-journal.jp/basics/method/hall.html>).

## 第3章 シミュレーションによる HBT 構造と特性の追求

### 3.1 はじめに

本研究は手法として、「シミュレーションを用いた基本構造設計」を行い、「必要要件を得たのちに試作を進めて検証する」に沿って行った。計算結果を試作に適用し、その実験結果を再度シミュレーションに反映する、所謂『Digital Twin(デジタルツイン)』[1][2]な研究を進めることで、研究のスピードと精度を着実に高めることを目指した。研究の手順を以下のように考えている。

- ✓ 基本的な GaN 系 HBT 構造を出発点として、構造パラメータ(膜厚、混晶組成比、キャリア濃度など)と電気特性の相関を確認する。それぞれのパラメータが素子の電気特性にどれほど敏感にまたは鈍感に影響するかを探り、『高性能化』と『作りやすさ(安定性)』の指針と各構造の目標値を得る。
- ✓ シミュレーションで得た目標値を達成するための手段である要素技術(材料、組成比、加工方法、形状など)の追究と試作を具体的に実施する。これによって、短時間に目標を追い込むことを目的とする。
- ✓ シミュレーション結果に沿った試作を行い、試作結果を比較考察し、シミュレーション条件にフィードバックする。

現在、Si 半導体ではシミュレーションと試作結果がほぼ一致するが、GaN などのワイドギャップ半導体の場合は転位や結晶欠陥の指定が難しく、まだ一致率が低いのは否めない。本研究では傾向や方向性を探ることを主目的とした。

本章では以下の順で記述を進める。

- 3.2節では検討の基本構造と各種パラメータについて
- 3.3節ではシミュレーションで得た結果とその考察について
- 3.4節から3.7節では emitter から collector までのパラメータ感度について
- 3.8節ではまとめとして、あるべき姿を目標として数値化して述べる。

## 3.2 基本構造と各種パラメータの設定

### 3.2.1 基本構造とパラメータ

本研究のシミュレーションは、Silvaco® の Technology Computer Aided Design (TCAD) Atlas を用いて行った。

#### ■【計算モデル】

計算では  $p$  型 GaN または GaInN base 領域において『不純物の不完全イオン化モデル』を適用した。その理由は、空乏層の拡がり等を計算するには、アクセプタキャリア濃度を、膜の抵抗値を計算するには正孔濃度を必要とするため、各々を分けて考える必要からである。そのため本モデルは、正孔濃度は、アクセプタ結合エネルギー準位  $E_A$  [3]に従って古典的なフェルミ-ディラック統計によって決定し、アクセプタキャリア濃度 $[N_A-N_D]$ は、GaN 層は  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、および GaInN のインジウム組成が 3% の  $p\text{-Ga}_{0.97}\text{In}_{0.03}\text{N}$  base 層については  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  とした。

また、キャリアの再結合過程を記述するために、SRH モデルとオージェ・モデルを採用した。少数キャリア(電子)の寿命は、base 領域で 1 ns と仮定した。分極効果と濃度依存移動度の両方を考慮した[4][5]。フォノンとキャリアの熱的挙動は考慮していない。(2.4.2 項参照)

#### ■【計算前提】

計算に用いた格子定数や  $E_g$  などの基本的な材料のエネルギー準位は、2.4.3 項 図2-9、図2-10、表2-II、表2-IIIに記した通りである。また、GaN 層の格子緩和率は 65%に固定した。これは GaN 成長サファイアの面内格子ひずみ 0.19% に相当する。また AlGaInN-emitter は、格子歪みのない GaN 層と格子整合していると仮定した。

#### ■【素子構造】

図3-1に HBT の基本構造を示す。基板は  $c$ -軸 Sapphire または GaN 自立基板 (FS-GaN)を用いた。エピタキシャル成長により、下から上方向に buffer 層、collector 層への接続を行う sub-collector 層、collector 層、base 層、emitter 層とし、それぞれに信号取出しのための金属電極 ( $n$ -emitter,  $n$ -sub\_collector には Ti / Al / Ni / Au、 $p$ -base には Ni / Au) を設けている。表3-I (a)から(d)に基本構造各部位諸元の検討中心値を示す。また付録 Appendix 1 から 5 に、シミュレーションに使用したプログラムを示す。



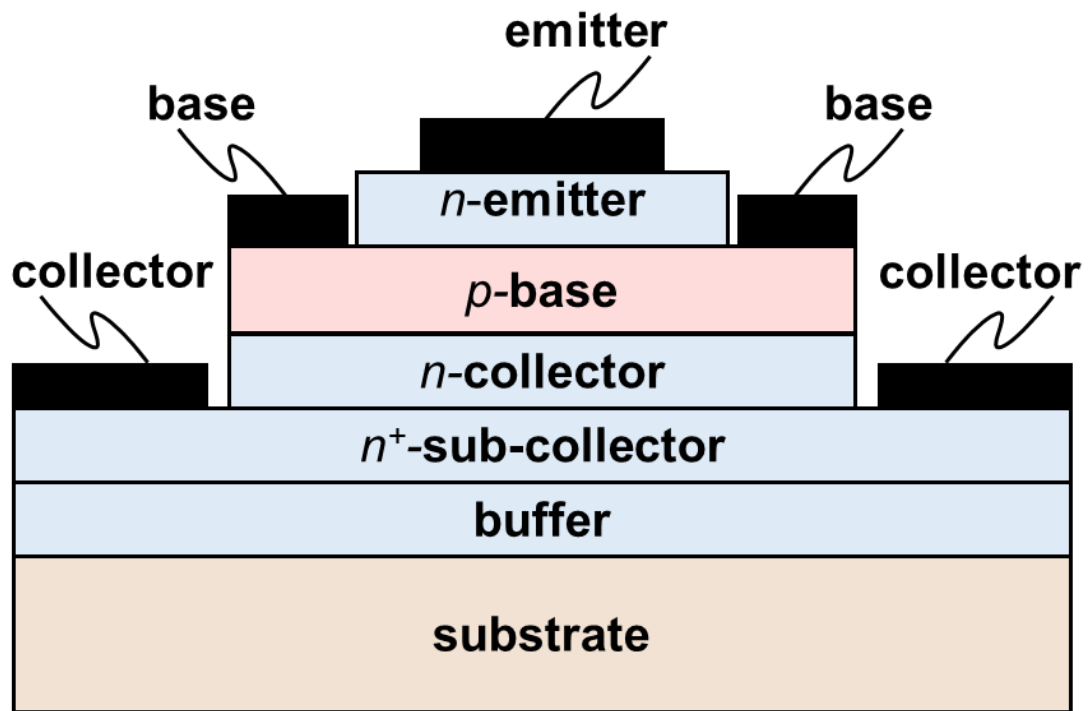


图3-1 HBT 基本断面概略图

表3-I (a) 対象部位の諸元 初期中心値

layer	film	thickness (nm)	[N <sub>A</sub> ],[N <sub>D</sub> ]density (cm <sup>-3</sup> )	Mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)
emitter	Al <sub>0.33</sub> Ga <sub>0.62</sub> In <sub>0.05</sub> N	100	2.0 × 10 <sup>19</sup>	130
base	GaN	100	1.0 × 10 <sup>18</sup>	70
	Ga <sub>0.97</sub> In <sub>0.03</sub> N		4.0 × 10 <sup>18</sup>	5
collector	GaN	300	2.0 × 10 <sup>17</sup>	1200
sub-collector	GaN	300	3.0 × 10 <sup>19</sup>	150
buffer	GaN	10	1.0 × 10 <sup>12</sup>	-
	LT-GaN	1000	1.0 × 10 <sup>12</sup>	
substrate	Sapphire FS-GaN	-	-	-

表3-I (b) その他諸元(電極との接触抵抗)

part	material	thickness (nm)	接触抵抗 (Ω·cm <sup>2</sup> )	Connection type
emitter 電極	Ti/Al/Ni/Au	15/60/12/60	1.0 × 10 <sup>-5</sup>	ohmic
base 電極	Ni/Au	10/100	1.0 × 10 <sup>-3</sup>	non ohmic
collector 電極	Ti/Al/Ni/Au	15/60/12/60	1.0 × 10 <sup>-5</sup>	ohmic
再配線 共有 pad	Ni/Au	12/60	-	-

表3-I (c) その他諸元(活性化率:不完全イオン化モデルの係数として使用)

part	dopant	activation ratio (%)
base	Mg	7.5
emitter	Si	100
collector	Si	100

表3-I (d) その他諸元(横方向 dimension)

part	distance (μm)
Emitter edge-base 電極 edge	4

### 3.3 基本特性のシミュレーション結果と考察

図3-2(a) に示した emitter 接地回路で動作させたトランジスタ特性を図3-2(b)に示す。 emitter 面積は  $177 \mu\text{m}^2$ 、base 電流  $I_B = 0 \text{ A}$  から  $100 \text{ nA}$  ステップで  $500 \text{ nA}$ 、collector-emitter 間電圧  $V_{CE} = 0 \text{ V}$  から  $10 \text{ V}$  としている。 また、図3-3(a)に示した emitter 接地回路で動作させた gummel-plot 特性を図3-3(b)に示す。

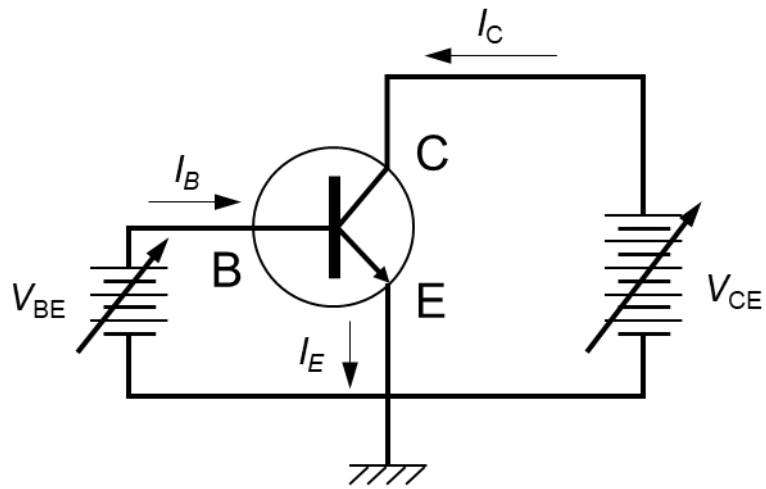
図3-2(b) のトランジスタ特性は飽和領域と能動領域を有する良好な特性を示している。 また、能動領域が右肩上がりになるアーリー効果がみられ、アーリー電圧  $V_A$  は  $5.1 \text{ V}$  である。 これは  $V_{CE}$  の増加に伴い base-collector 間の空乏層幅が増加し、真性 base 長が短くなる base 幅変調により、collector 電流が増加する現象が起きていることを意味している。 この特性から算出される本素子の出力インピーダンス  $Z_0$  は、 $V_{CE} = 4 \text{ V}$  素子面積  $177 \mu\text{m}^2$  で、

$$Z_0 = \frac{V_A + V_{CE}}{I_C} = \frac{5.1 + 4.0}{1.3 \times 10^3 \times S} = 3.9 \times 10^3 \Omega, \quad (3-1)$$

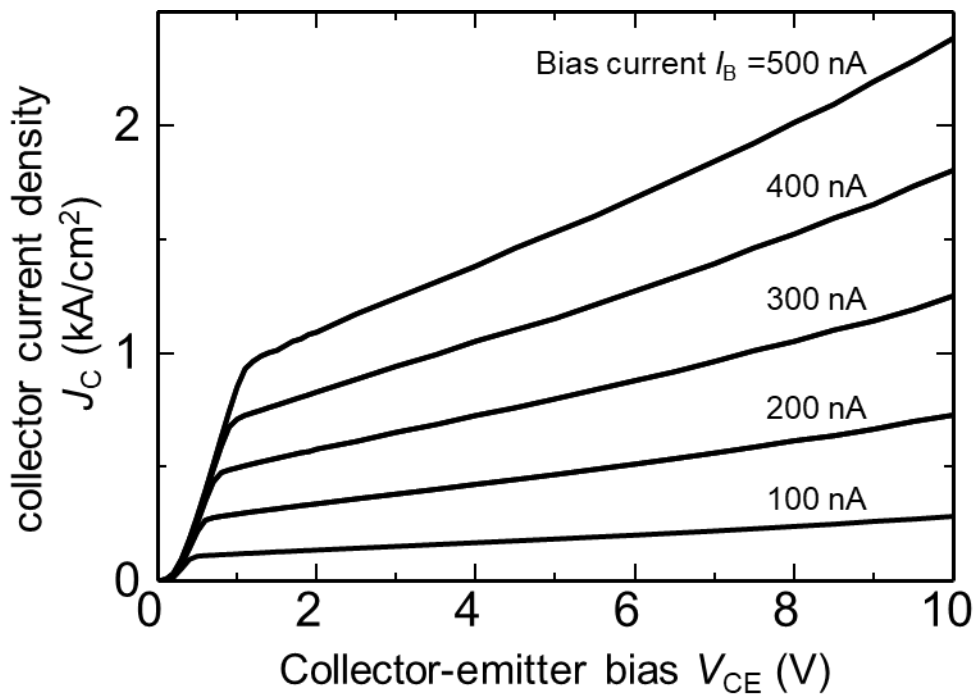
である。

また  $V_{CE}$  の増加に伴い、直線的ではなく徐々に指数的に電流が増加していることから、base-collector 間の空乏層幅は、base のアクセプタ濃度  $[N_A - N_D]$  に影響を受けるため、現在計算で使用している base のアクセプタ濃度  $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  では十分ではないことが示唆される。 従って、base のアクセプタ濃度を増加させることが必要であることが明確にできた。

この結果を検討中心値として、各層のパラメータを変化させた場合の特性の変動を 3.4 節から 3.7 節に示す。 3.4 節では emitter のキャリア濃度、厚さ、base との  $\Delta E_g$  の影響を検討した。 3.5 節では base のキャリア濃度の影響を検討した。 3.6 節では collector のキャリア濃度の影響を検討した。 そして 3.7 節では sub-collector のキャリア濃度、厚さの影響を検討した。

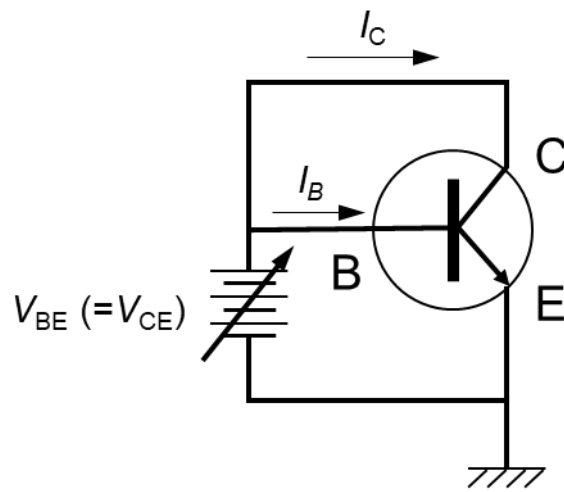


(a) 静特性の測定回路 (emitter 接地)

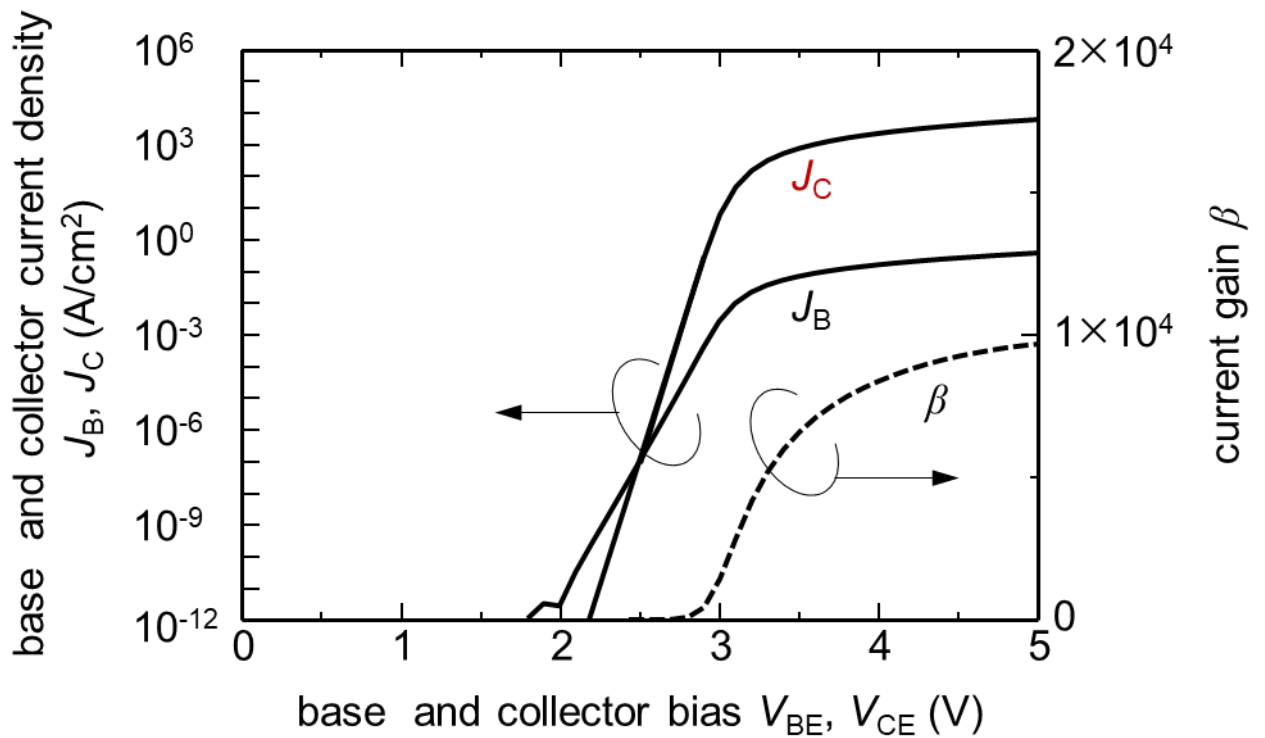


(b) トランジスタ静特性。横軸は collector-emitter 電圧  $V_{CE}$ 。縦軸は collector 電流密度  $J_C$ 。base 電流  $I_B$  は 100 nA から 500 nA まで 100 nA step で印加。電流密度は emitter 面積  $177 \mu\text{m}^2$  ( $\phi 15 \mu\text{m}$ )より算出。

図3-2 測定回路およびトランジスタ静特性



(a) gummel plot の測定回路 (emitter 接地)



(b) gummel plot。横軸は base と collector 電圧  $V_{BE}$ 、 $V_{CE}$ 。左軸は base と collector 電流密度  $J_B$ 、 $J_C$ 。右軸は電流増幅率  $\beta$  を表す。電流密度は emitter 面積  $177\mu\text{m}^2$  ( $\phi 15\mu\text{m}$ )より算出。

図3-3 測定回路および gummel-plot

### 3.4 emitter パラメータの影響

図3-4にマトリクスの横方向に emitter の膜厚、縦方向に emitter の正味のドナーキャリア濃度 $[N_D-N_A]$ を変化させた場合のトランジスタ静特性を示す。図3-5に emitter のキャリア濃度および膜厚と電流増幅率の相関、および直列抵抗への影響を示す。横軸は emitter の正味ドナーキャリア密度 $[N_D-N_A]$ 、縦軸(左)は電流増幅率  $\beta$  を示す。縦軸(右)は emitter 膜厚方向の直列抵抗  $R_F$  を示している。また emitter 膜厚をパラメータとしており、それぞれ ○は 50nm、□は 100nm、△は 150nm を示す。 $\beta$  は  $V_{BE} = V_{CE} = 3.4 \text{ V}$  の条件下、 $R_F$  は  $V_{CE} = 0.8 \text{ V}$  の傾きから求めた直列抵抗である。emitter 以外のパラメータは標準条件(表3-I 参照)で固定している。結果として、emitter のキャリア濃度が増加するにつれて、 $\beta$  に僅かな上昇がみられるが、全体的に高値を推移しており、有意な差は無いと読み取れる。加えて emitter 厚を変化させても大きな差はない結果が得られた。これらの結果より考察すると、emitter 部分は縦方向に電流が流れているので、膜厚とキャリア濃度の変動には鈍感である。結晶品質と以下に述べるヘテロ接合部のバンドギャップ差( $\Delta E_g$ )より最適な方向を求める。尚 emitter 領域内での再結合は計算に考慮していない。

本研究の特徴である emitter に四元混晶 AlGaInN を用いた場合、下地との格子整合を取りながら材料の  $E_g$  を独立に変化させることが可能である。そこで混晶の構成比を変化させて、base とのヘテロ接合部のバンドギャップ差( $\Delta E_g$ )を変化させた場合の  $\Delta E_g$  が HBT 特性に及ぼす影響について考察した。図3-6は、 $\Delta E_g$  と電流増幅率  $\beta$  の関係を示したものである。ここでは、 $\Delta E_g$  を 0.05~0.87 eV の範囲で変化させ、base の正味アクセプタ濃度 $[N_A-N_D]$ 値を  $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の一定とした。 $\beta$  は  $\Delta E_g$  の変化に対して 0.25 eV 付近にピークがある傾向を得た。HBT の発明者でありノーベル物理学賞受賞の Kroemer の理論式によれば、HBT の  $\beta$  は以下の式(3-2)のように表すことができる[6]:

$$\beta = \frac{N_e v_{nb}}{P_b v_{pe}} \exp\left(\frac{\Delta E_V}{k \cdot T}\right), \quad (3-2)$$

ここで、 $N_e$  と  $P_b$  はそれぞれ emitter と base のドーピング濃度を表し、 $\nu_{nb}$  は base 領域の emitter 側の平均電子速度、 $\nu_{pe}$  は emitter 領域の base 側の平均正孔速度である。(Kroemer の論文では  $\Delta E_V$  の変化に対する理論式が記述されているが、シミュレーションでは  $\Delta E_V = 0.3 \times \Delta E_g$  と定義しているため、簡易的に  $\Delta E_g$  にて議論を進める。) HBT の特徴として Kroemer は『 $\Delta E_g$  が増加すると  $\beta$  も増加する』ことが挙げられる。今回の結果が Kroemer の理論式を用いた結果と異なる理由を説明するには、 $\beta$  の増加を妨げる要因を特定する必要がある。

図3-7は、 $V_{CE} = 5 \text{ V}$  の際の、 $\Delta E_g$  が 0.08、0.25、0.85 eV と異なる emitter-base 間のヘテロ接合部のバンド図を拡大して比較したものである。電子の挙動について検討するため、伝導帯部を拡大している。その結果、 $\Delta E_g$  が大きくなるにつれて、emitter-base 間のヘテロ接合における伝導帯オフセット( $\Delta E_C$ )はより大きくなり、擬フェルミ準位も不連続になる。一般に、バイポーラトランジスタの collector 電流は、emitter から base への少数キャリア輸送によって制限される[7]。すなわち、 $\Delta E_C$  が十分に小さい場合、図3-7(a)に示すように、キャリア輸送では熱電子拡散過程が支配的になる。次に、図3-7(b)に示すように  $\Delta E_C$  が大きくなると、ホットエレクトロンの熱的注入も起こり、その結果、 $\beta$  が増加する。さらに、 $\Delta E_V$  と  $\Delta E_C$  が大きくなりすぎると、図3-7(c)に示すように、ホットエレクトロンさえも熱的注入を受けにくくなり、その結果、 $\beta$  が減少すると考察した。本研究では、emitter のドナー濃度を  $2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、base のアクセプタ濃度を  $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  とした。理論的には、ドナー濃度とアクセプタ濃度がこれらの値より大きい場合、ホットエレクトロンの熱的注入が増加するため、Kroemer の理論式のように  $\beta$  が増加すると考えられる。しかしながら GaN 系半導体では base のアクセプタ濃度を増加させることは容易ではないため、このような傾向になると考えられる。

以上の結果から emitter の膜厚は 100nm。正味のドナーキャリア濃度  $[N_D - N_A]$  は  $2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。emitter-base 間の  $\Delta E_g$  は 0.25 eV を中心値として以降の検討を進める。

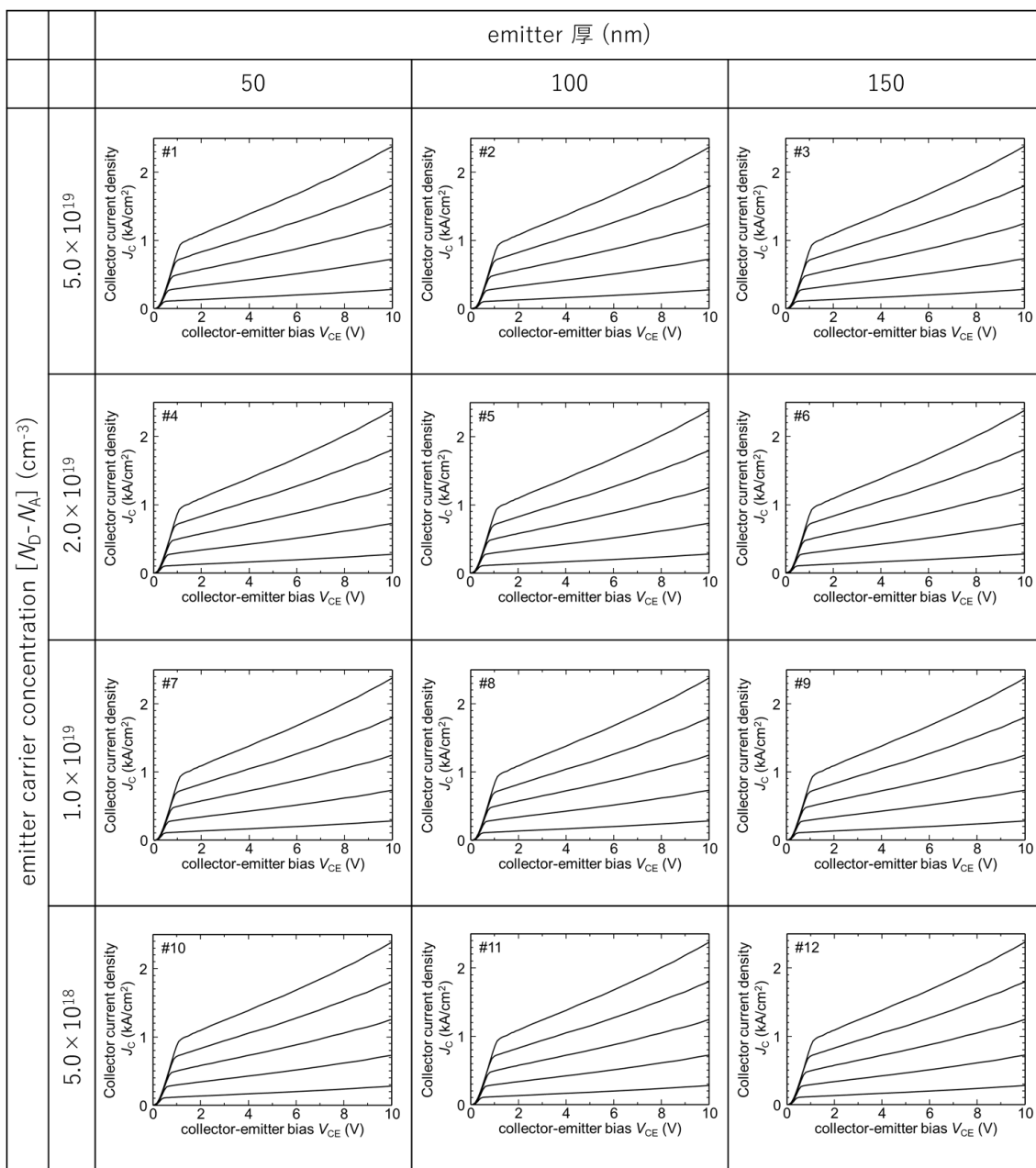


図3-4 emitter のキャリア濃度および膜厚とトランジスタ特性の相関



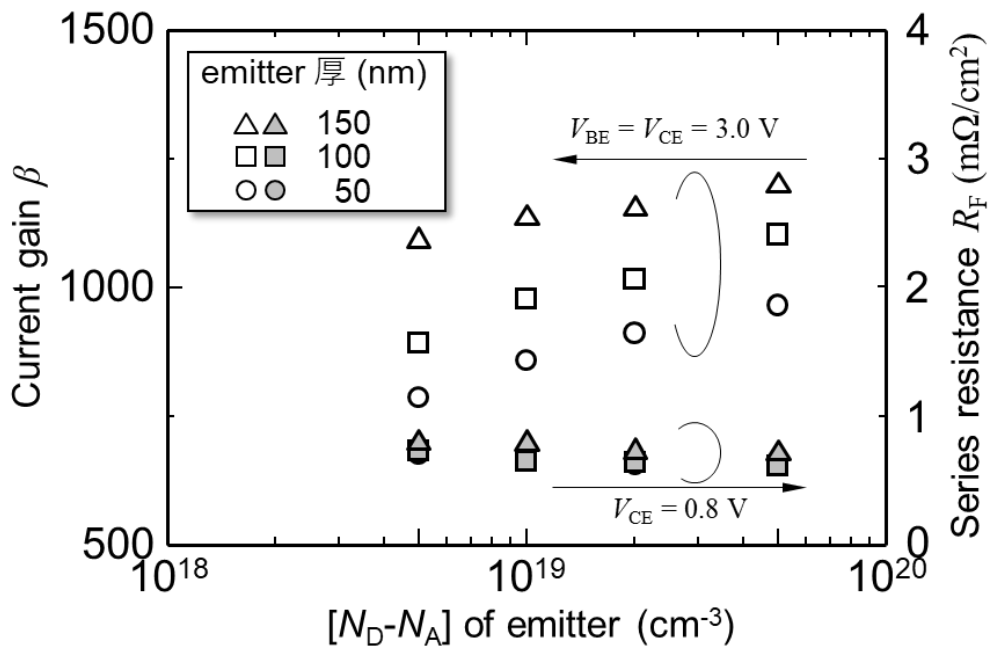


図3-5 emitter のキャリア濃度および膜厚と電流増幅率の相関、および直列抵抗への影響 横軸は emitter のキャリア密度、縦軸(左)は電流増幅率  $\beta$  を示す。縦軸(右)は emitter 膜厚方向の直列抵抗を示す。また emitter 厚をパラメータとしており、それぞれ  $\circ$  は 50nm、 $\square$  は 100nm、 $\triangle$  は 150nm を示す。  $V_{BE} = V_{CE} = 3.4$  V

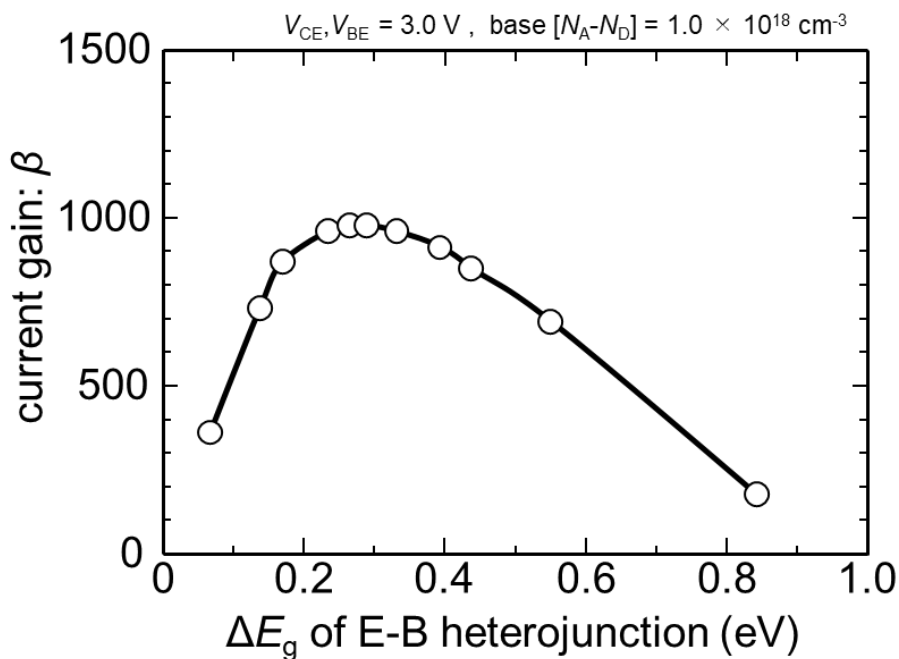


図3-6. 横下軸は  $\Delta E_g$ 、縦軸は電流増幅率  $\beta$  base の正味のアクセプタ濃度  $[N_A - N_D]$  は  $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  に設定。

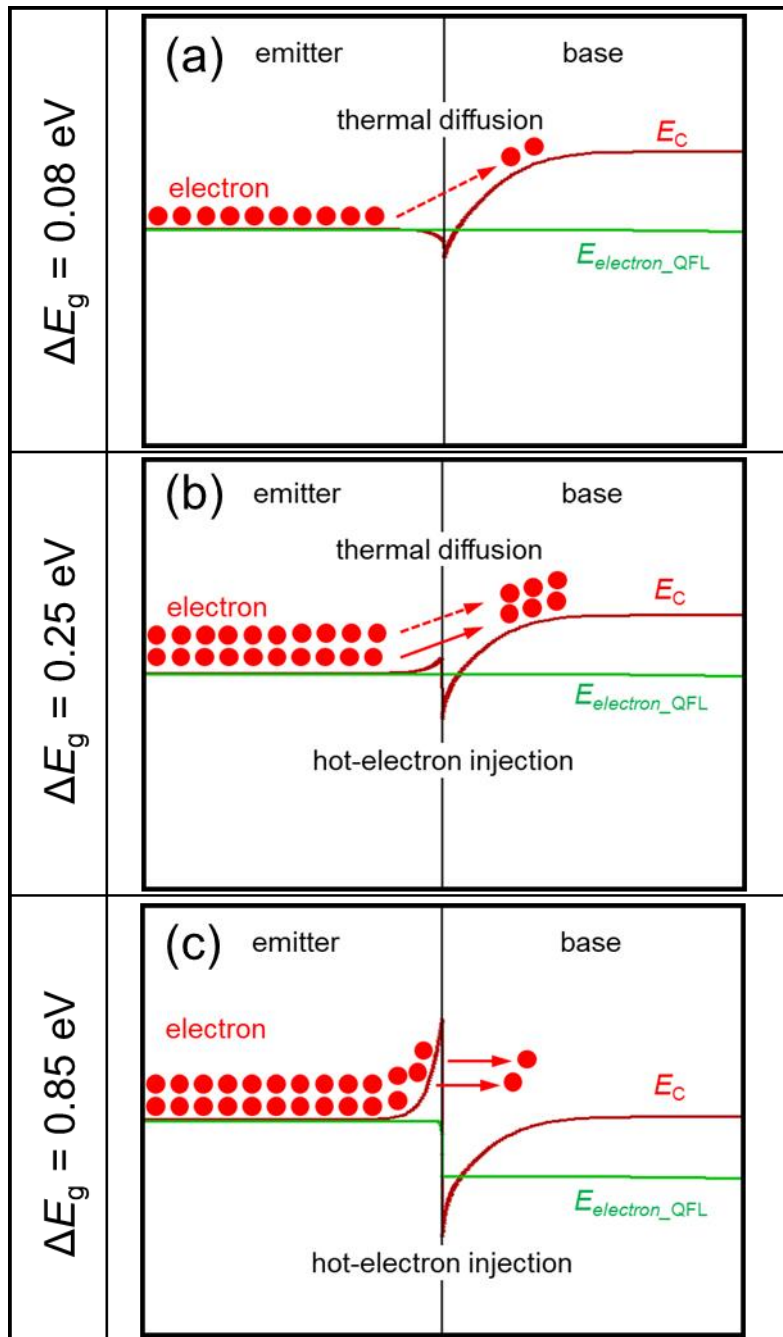


図3-7. 伝導帯( $E_C$ )と電子の擬フェルミ準位( $E_{\text{electron\_QFL}}$ )をそれぞれ赤と緑の線で表した、emitter-base のヘテロ接合の拡大バンド図。 $\Delta E_g$  値は(a) 0.08 eV、(b) 0.25 eV、(c) 0.85 eV とした。emitter は  $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.62}\text{In}_{0.05}\text{N}$  ( $E_g = 3.71 \text{ eV}$ )、base は  $\text{Ga}_{0.97}\text{In}_{0.03}\text{N}$  ( $E_g = 3.28 \text{ eV}$ )である。 $V_{\text{CE}}=5 \text{ V}$  の際のバンドイメージ。

## 3.5 base パラメータの影響

この3.5節では、以下の順で検討を行った。

3.5.1項では、基本構造を用いて、base アクセプタ濃度の特性への影響を示す。

3.5.2項では、base 抵抗の低減のため量子井戸構造の影響の検討結果を示す。

3.5.3項では、三元混晶 GaInN を base に用いた場合の低抵抗化の結果を GaN との比較を用いて示す。

### 3.5.1 base のアクセプタ濃度が特性に与える影響

ここでは、base 領域のアクセプタキャリア濃度 $[N_A-N_D]$ が HBT 特性に及ぼす影響について議論する。図3-8は、base 領域の $[N_A-N_D]$ 値が異なる HBT の典型的な collector-emitter 電流密度-電圧( $J_C-V_{CE}$ )特性を示しており、縦列に沿って $[N_A-N_D]$ の範囲を  $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  から  $2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  まで変化させ、横列に沿って base 電流( $I_B$ )を  $5.0 \times 10^{-8} \text{ A}$ 、 $5.0 \times 10^{-7} \text{ A}$ 、 $5.0 \times 10^{-6} \text{ A}$  として変化させた。 $[N_A-N_D]$ が高い HBT(図3-8の上段(a)(d)(g)参照)では、collector 電流が base 注入によって適切に変調され、高  $V_{CE}$  領域で明確な電流飽和特性を示すことが確認された。一方、 $[N_A-N_D]$ 値が低い場合(図3-8の中段(b)(e)(h)および下段(c)(f)(i)参照)には、 $V_{CE}$  印加に伴って collector 電流が増加し、最終的には base 電流注入下でも制御不能となった。この傾向は、 $I_B$  が大きくなるほど顕著になる。そこで、base 領域の $[N_A-N_D]$ が低い HBT の非飽和 collector 電流特性に着目し、キャリアダイナミクス解析を用いてこの現象の原因究明を試みた。

図3-9は、emitter-collector 間電位障壁の base アクセプタ濃度依存性の計算結果を示している。横軸は base の $[N_A-N_D]$ 、縦軸は emitter と collector の  $E_C$  の準位差  $E_{CE}$  を示す。collector-emitter 間電圧  $V_{CE}$  は 14V、base 電流  $I_B$  は 0A である。この結果から、 $[N_A-N_D]$ が  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上では安定した電位が保たれているものの、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以下の領域では  $E_{CE}$  が徐々に低下し、 $[N_A-N_D]$ が  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  以下ではほぼ 0 eV、すなわちパンチスルー状態が発生していることがわかる。この現象が collector 電流の異常な振る舞いを引き起こしたと考えられる。

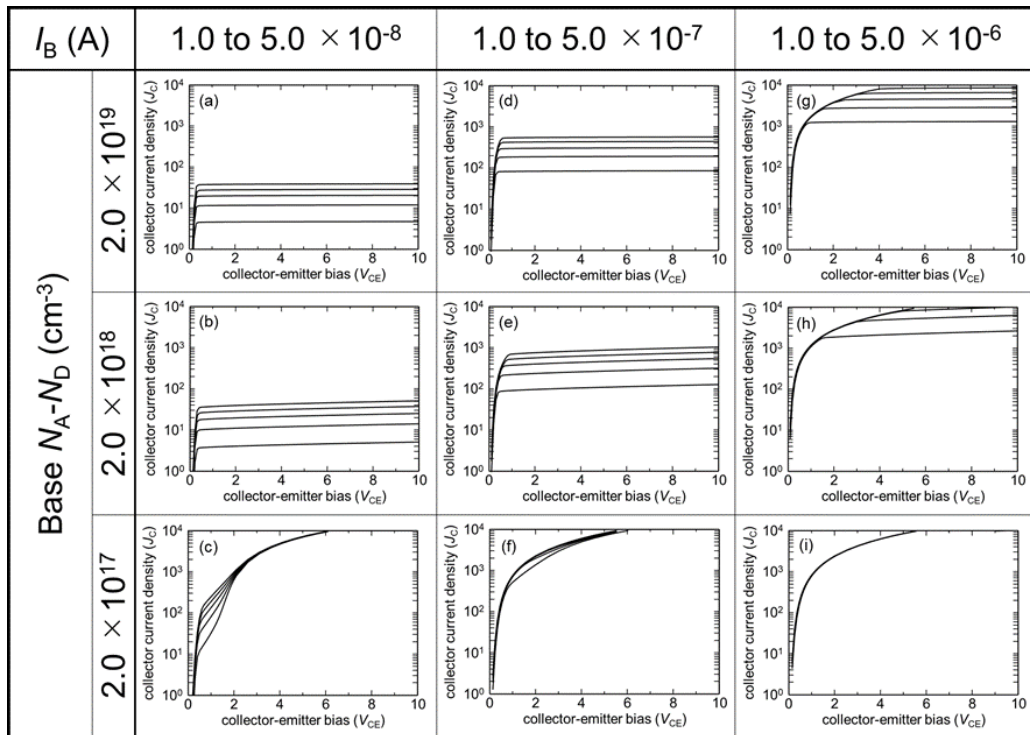


図3-8. base 領域の  $[N_A-N_D]$  値が異なる HBT の collector-emitter 間電流密度-電圧 ( $J_C-V_{CE}$ ) 特性の結果。シミュレーションは、 $5.0 \times 10^{-8}$  A、 $5.0 \times 10^{-7}$  A、 $5.0 \times 10^{-6}$  A の異なる  $I_B$  で実施した。

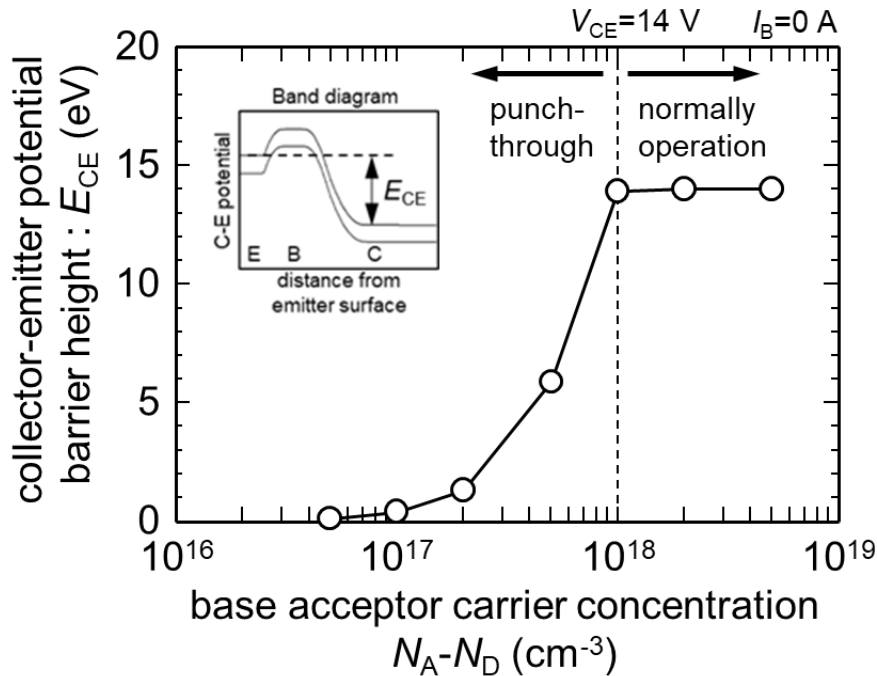


図3-9. collector-emitter 間電位障壁高さの base アクセプタキャリア濃度依存性の計算結果。collector-emitter 間電圧  $V_{CE}$  は 14V、base 電流  $I_B$  は 0A である。

図3-10は、base の $[N_A-N_D]$ が異なる HBT の正孔キャリアダイナミクスを示している。これらの図には、図3-1に示した構造および動作条件が含まれている。シミュレーションの結果、次のような特徴が浮き彫りになった。まず、 $[N_A-N_D]$ が小さくなると、base-collector 接合付近のキャリア空乏が促進され、それによって有効 base 長が短くなる。これは、青色または緑色の高正孔濃度領域によって表される。また、デバイス中心付近の正孔濃度が上昇し、collector 領域への正孔流が誘起されるという特徴的な現象が示された。また、この現象は base 電流注入量が大いほど顕著になることも示された。

ここでは、base 領域の $[N_A-N_D]$ が異なる HBT における  $I_B$  の影響について考察する。図3-11(a)、図3-11(b)、図3-11(c)、図3-11(d)は、それぞれ図3-10(a)、図3-10(b)、図3-10(c)、図3-10(d)の A-A 断面における正孔と電子の濃度分布を示す。base の $[N_A-N_D]$ が  $2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  と高い場合(図3-11(a)、(b)参照)、 $I_B$  の増加とともに電子濃度が増加し、emitter から base への電子輸送の増加がみられる。その間、base 全領域で正孔濃度は約  $4.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  と比較的高い値を維持するものの、collector 側に正孔分布は見られず base から collector への電流は発生しない。これは、HBT が正常動作していることを示している。一方、base の $[N_A-N_D]$ が  $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  と低い場合に注目すると(図3-11(c)参照)、正孔濃度は低く base 領域のかなりの部分が空乏層で占められており、 $I_B$  が低い状態でも emitter から collector への電子濃度の増加がみられる。その後、 $I_B$  が増加すると(図3-11(d)参照)、パンチスルー現象により base と collector 双方に電子と正孔の増加が顕著になり、その結果、図3-10(d)および図3-8の下段に示すような HBT の異常な挙動が生じる。

以上の結果から base 電流  $I_B$  が  $5.0 \times 10^{-7} \text{ A}$  の場合に正常動作するためには、base のアクセプタ濃度 $[N_A-N_D]$ は、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上であることが求められることが示唆された。

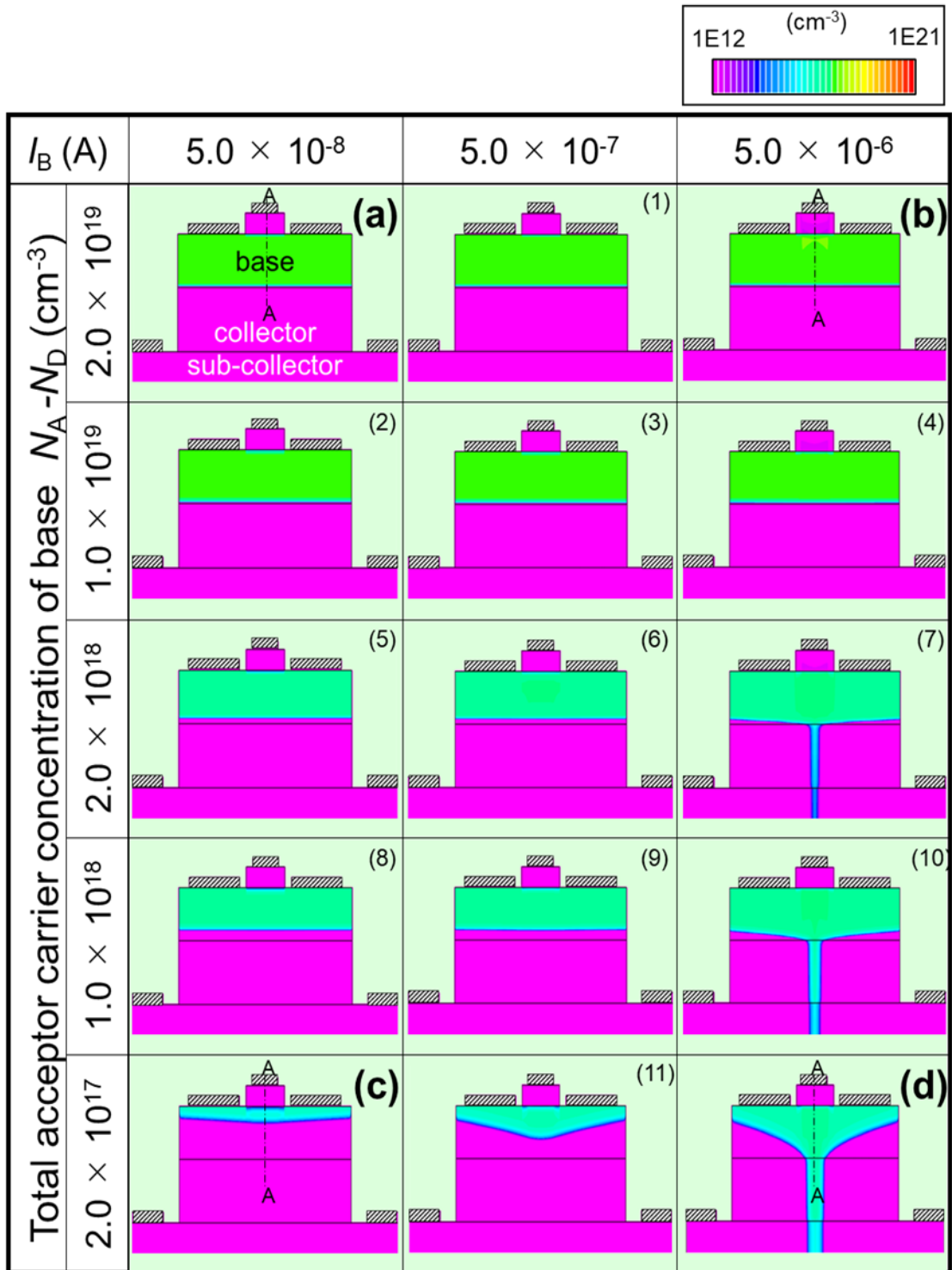


図3-10. baseの $[N_A - N_D]$ 値が異なるHBTにおける正孔キャリアダイナミクスの結果。シミュレーションは、 $V_{CE} = 20$  V、 $I_B$ は $5.0 \times 10^{-8}$  A、 $5.0 \times 10^{-7}$  A、 $5.0 \times 10^{-6}$  A。

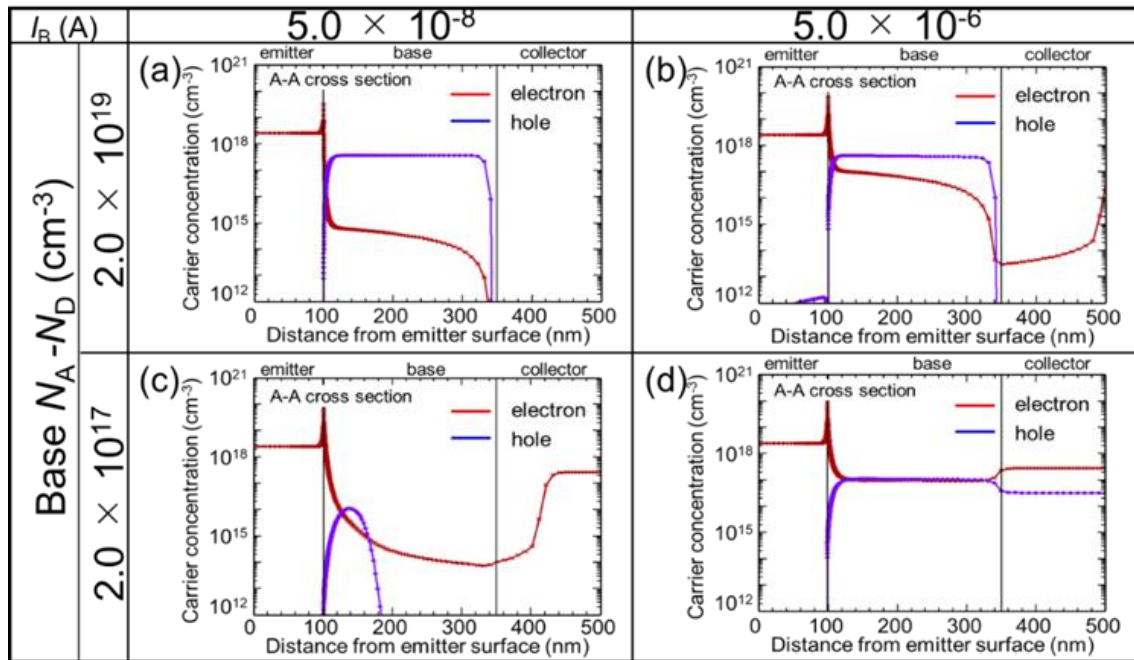


図3-11.  $[N_A - N_D]$ 値の異なる HBT を動作させ、動作中の base における正孔と電子の濃度分布を測定した結果。正孔濃度を青線、電子濃度を赤線で表す。図3-11(a)、図3-11(b)、図3-11(c)、図3-11(d)の結果は、それぞれ図3-10(a)、図3-10(b)、図3-10(c)、図3-10(d)の A-A 断面について得られたシミュレーション結果に対応している。

図3-12(a)は sapphire 基板(京セラ株式会社製、c-plane、抵抗率  $1 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$  以上)上の GaN テンプレートに  $p$ -GaN 層を成長させた試料を窒素中  $775^\circ\text{C}$ で30分間の活性化アニールをしたものである。図3-12(b)に示した SIMS 測定の結果から  $[C_{\text{Mg}}]$ は  $3.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ の濃度で膜中に含まれている。その後窒素雰囲気中  $750^\circ\text{C}$ で30分アニールした結果、アクセプタ濃度  $[N_A - N_D]$ は得られた。正味のアクセプタ濃度  $[N_A - N_D]$ は  $C-V$  法にて測定したところ  $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、Hall 効果測定法にて、 $775^\circ\text{C}$ アニールした試料の正孔濃度を測定したところ、 $3.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ を得た。これより Mg の活性化 (正孔濃度 :  $[h_{\text{Hall}}] / \text{Mg 濃度} : [C_{\text{Mg}}])$  は約 1.0 % 程度しかおこらないことが分かった。この値を計算にフィードバックした。 $p$ -GaN を base として用いる場合、emitter 層で覆われた状態で活性化する必要があり、さらに改善が必要になる。この対策として、以下の2通りの検討を進めた。3.5.2項「 $p$ -base にピエゾ効果分極を活用した量子井戸の効果」、3.5.3項「三元混晶 GaInN を  $p$  型 base 層に用いた低抵抗化の検討」である。

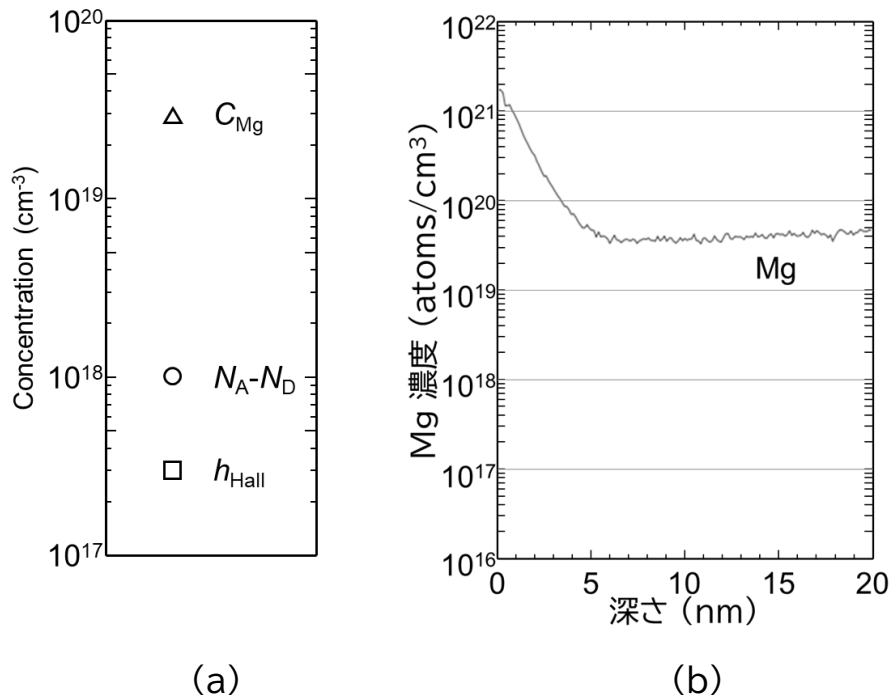


図3-12(a)活性化アニールを窒素雰囲気 775°C 30min 行った場合の  $[C_{Mg}]$ 、 $[N_A - N_D]$ 、 $[h_{Hall}]$ 濃度。 $[C_{Mg}]$ は SIMS、 $[N_A - N_D]$ は  $C-V$ 測定、 $[h_{Hall}]$ は Hall 効果測定より得た。(試料 ID N7109) (b) 窒素雰囲気 775°C 30min 活性化した GaN 中の Mg の SIMS データ (試料 ID N7109)

### 3.5.2 ピエゾ効果分極を活用した量子井戸の効果

ピエゾ効果分極の原理に基づく  $p$ -base 層についてシミュレーション検討した結果を示す。GaN 系半導体は、構成元素間のイオン性度の差が大きいことと、ウルツ鉱型構造をとることに起因して大きな分極を示す。一般にエピタキシャル成長による結晶は下地結晶の格子長を引き継ごうとするため、GaN 上の GaInN は面内圧縮歪みを内包しピエゾ分極を生じる。分極で生じた正孔は従来の3次元伝導とは異なる2次元伝導を誘発するため、Mg が活性化しにくい  $p$ -GaN においても低抵抗化が期待できる。

図3-14(a)、(b)は、それぞれ GaInN QW 挿入層を設けた場合と設けない場合の  $p$ -GaN base 周辺の HBT デバイスの一部を示している。ここでは、厚さ 5 nm、InN モル分率 0.10 の GaInN QW を  $p$ -GaN :base の底面から 20 nm の位置に配置し



た。図3-13に示す  $L_{EB}$  (emitter・アイランドの端と base 電極間の横方向の距離をパラメータとして定義) に関してデバイス特性を調べた。

図3-14 は、GaInN QW を用いた HBT の平衡状態における正孔濃度分布です。図3-14(a)は 2 次元コンターマップであり、図3-14(b)は emitter 電極下の垂直方向のラインスキャンプロファイルである。これらの図から、GaInN QW に高濃度の正孔が確実に蓄積していることが確認された。蓄積された正孔の 3 次元ピーク濃度は  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  以上、2次元シート濃度は  $1.8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  以上と見積もられた。

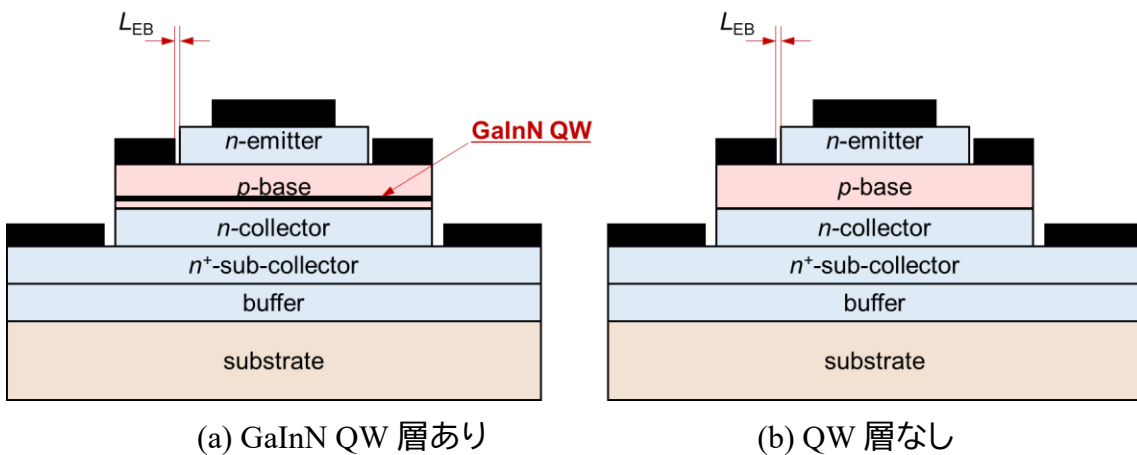


図3-13 GaInN QW 挿入層がある場合(a)とない場合(b)の  $p$ -base 層周辺の HBT デバイス部分の概略図。  $L_{EB}$  は emitter 層の端から base 電極までの距離。

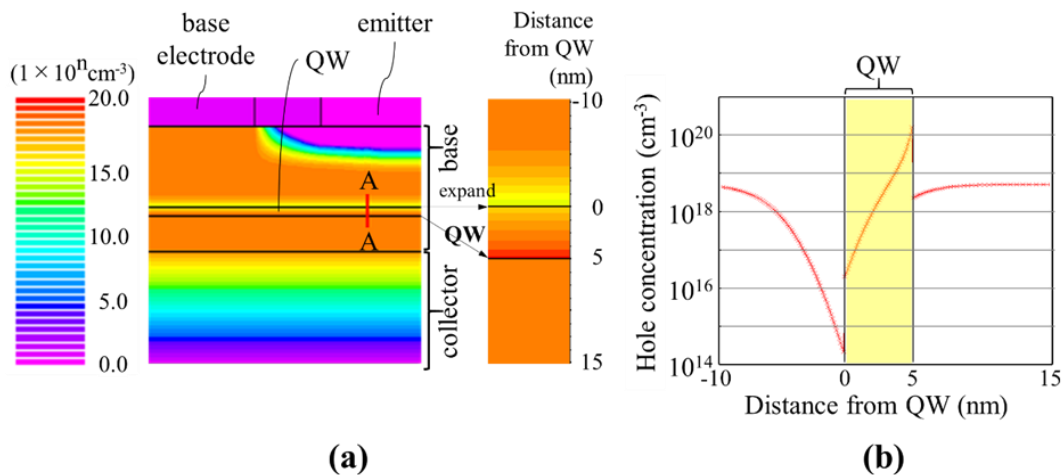


図3-14. base QW と拡大 QW 周辺の正孔濃度分布。(a)正孔濃度分布の 2 次元等高線図。(b) 図(a)の A-A 線における正孔濃度のラインスキャンプロファイル。

図3-15は、異なる設計の npn 型 AlGaInN/GaN HBT についてシミュレーションした  $J_C$ - $V_{CE}$  特性を示している。上段(a),(b)は  $p$ -GaN base に GaInN QW を形成した HBT の結果、下段(c),(d)は GaInN QW を形成しない従来の HBT の結果である。 $L_{EB}$  は、左から(a)と(c)が  $4\mu\text{m}$ 、(b)と(d)が  $20\mu\text{m}$  である。各 emitter の面積は  $177\mu\text{m}^2$ 、base 電流  $I_B$  は  $1\mu\text{A}$  から  $5\mu\text{A}$  まで  $1\mu\text{A}$  ステップで印加した。この比較は、 $L_{EB}$  というパラメータが HBT のデバイス特性に大きく影響すること、そして  $p$ -GaN base に GaInN QW を使用する利点があることを明確に示している。すなわち、GaInN QW を用いた HBT は、 $L_{EB}$  が  $20\mu\text{m}$  と大きくても最適なピンチオフ特性を維持したのに対し、GaInN QW を用いない従来の HBT は、制御不能な大 collector 電流を伴う異常特性を示した。この電流は、collector-emitter 間に発生したパンチスルー現象によるものである。

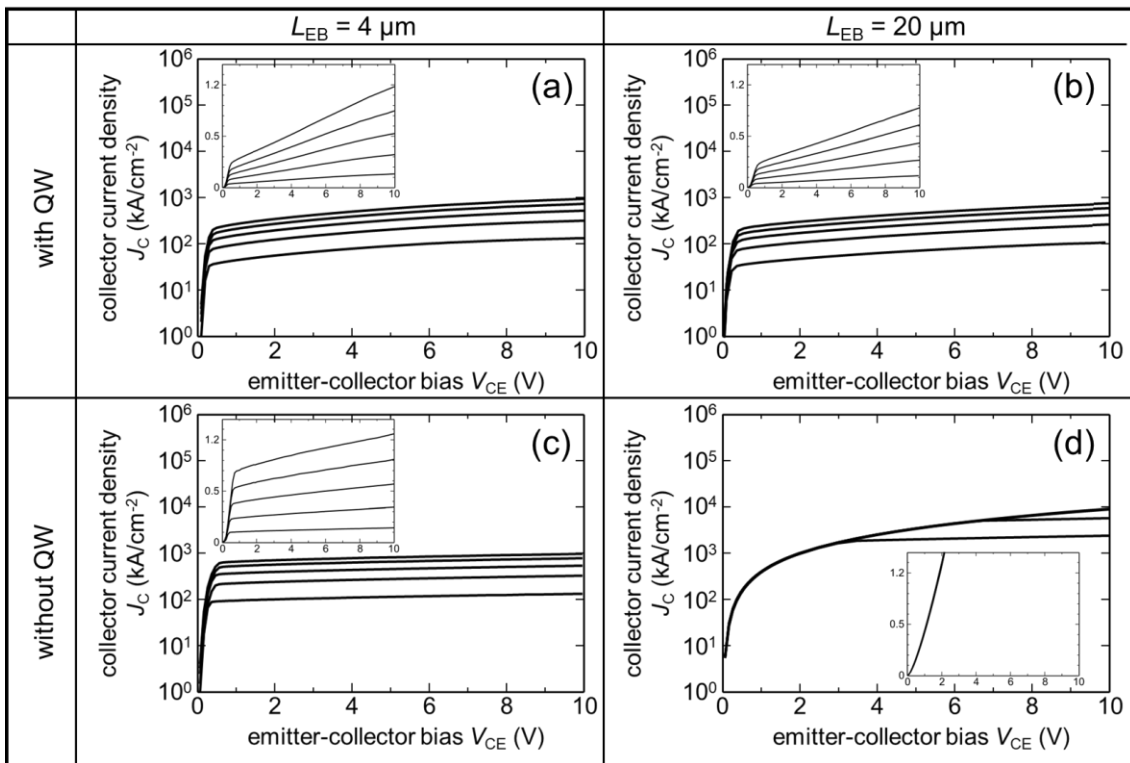


図3-15. npn 型 AlGaInN/GaN HBT の  $J_C$ - $V_{CE}$  特性。上段(a)(b)は  $p$ -GaN base に GaInN QW を形成した HBT の結果、下段(c)(d)は GaInN QW を形成しない従来の HBT の結果である。 $L_{EB}$  は、左から(a)と(c)が  $4\mu\text{m}$ 、(b)と(d)が  $20\mu\text{m}$  である。各 emitter の面積は  $177\mu\text{m}^2$ 。base 電流  $I_B$  は  $1\mu\text{A}$  から  $5\mu\text{A}$  まで  $1\mu\text{A}$  ステップで印加した。

図3-16(a)と(b)は、GaInN QW が有る HBT と無い HBT の 電子と正孔の 2 次元キャリア濃度分布の動的解析結果を比較したものである。ここでは、 $I_B = 5 \mu\text{A}$ 、 $V_{CE} = 4 \text{V}$ 、 $L_{EB} = 20 \mu\text{m}$  の条件でシミュレーションを行った。また、右端の図は、emitter 電極下の垂直方向のエネルギーバンド図である。2次元キャリア分布マッピングにより、GaInN QW を用いた HBT がシミュレーション条件で適切に動作していることが確認され、バンド図からも collector-emitter 間の電位が維持されていることが示された。しかし、QW の無い HBT の 2 次元キャリア分布マッピングについては、emitter 電極下のデバイス領域全体に電子と正孔の双方が分布していると判断された。また、エネルギーバンド図から、collector-emitter 間の電位差が有意に小さくなり、パンチスルーによる短絡電流が発生していることがわかる。これは QW 界面に局在する  $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$  以上の正孔は、2次元伝導により base 膜の横方向の伝導性を向上させる(図3-16(b))。npn 接合では、collector-emitter 間の電圧上昇に伴って collector と emitter の両側から伸びる空乏層が、正孔キャリアを持つ QW によってブロックされ、QW がパンチスルー現象を回避すると考えている。

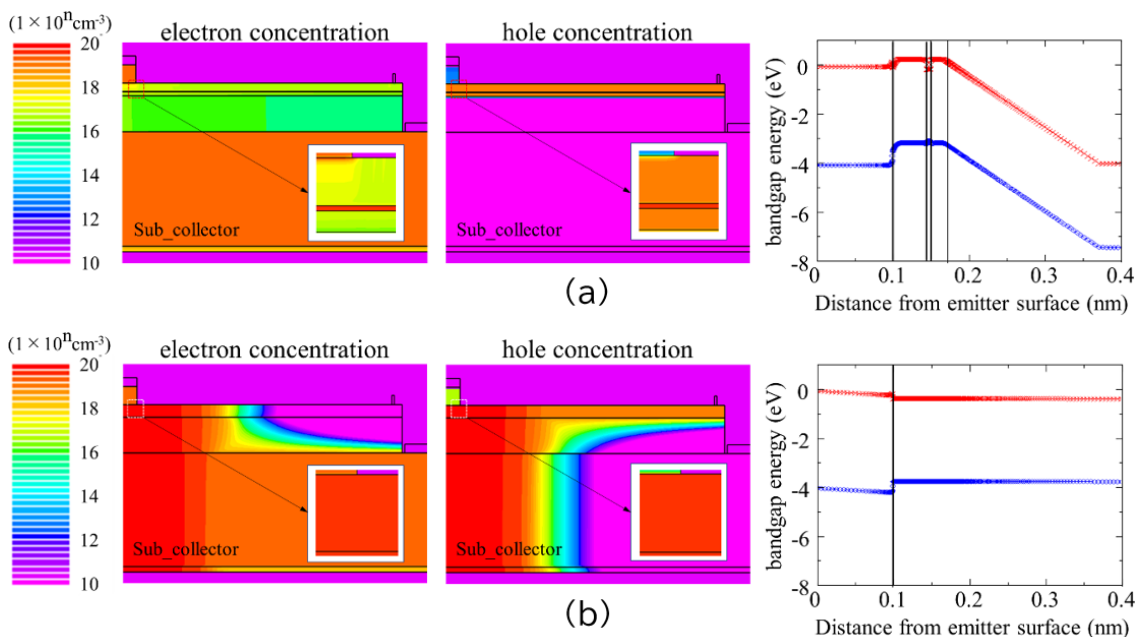


図3-16 (a)GaInN QW を有する HBT と(b)QW の無い HBT のそれぞれ左から電子と正孔の2次元動的キャリア濃度分布とバンド図。バンド図の赤線は伝導帯、青線は価電子帯を示す。シミュレーションは、base 電流  $I_B = 5 \mu\text{A}$ 、collector 電圧  $V_{CE} = 4 \text{V}$ 、 $L_{EB} = 20 \mu\text{m}$  の条件で行った。

提案した GaInN による QW が2次元伝導を行っていることを確認するため、図3-17に示した構造、と表3-IIの条件で試作した試料を van der Pauw 法に従い測定した。

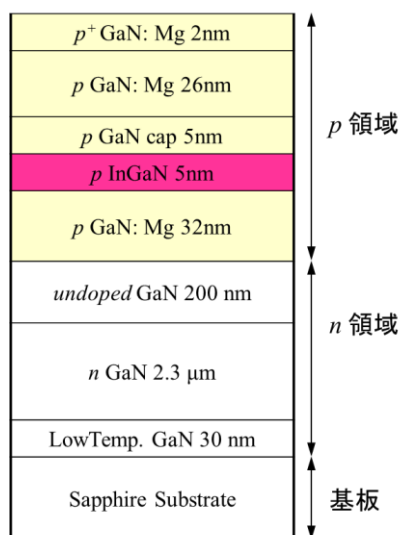


図3-17 試料断面概略図  
(試料 ID N6781)

表3-II 試料成膜条件諸元

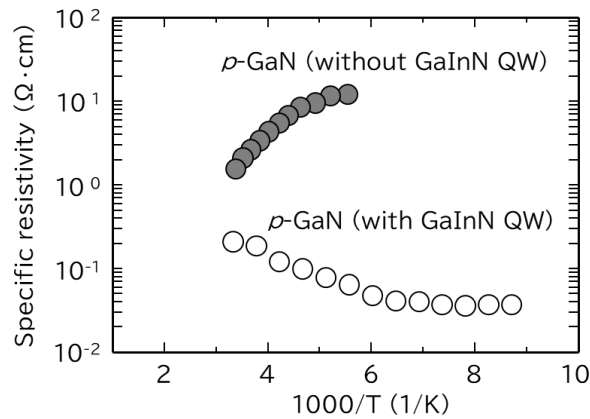
layer	Temp (°C)	Carrier	TMG (sccm)	TMI (sccm)	C <sub>p2</sub> Mg (sccm)
<i>p</i> <sup>+</sup> -GaN	1160	H <sub>2</sub>	5		200
<i>p</i> -GaN	1160	H <sub>2</sub>	10		50
<i>p</i> -GaN cap	800	N <sub>2</sub>	10	100	50
<i>p</i> -GaInN	800	N <sub>2</sub>	2		10
<i>p</i> -GaN	1160	N <sub>2</sub>	10		50

Trimethyl-gallium: TMG

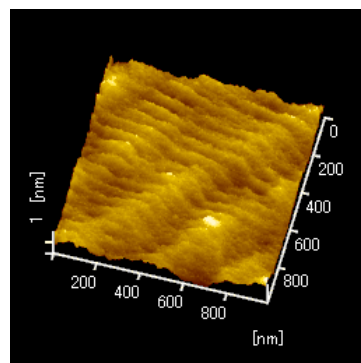
Trimethyl-indium: TMI

Bis (cyclopentadienyl) magnesium: Cp<sub>2</sub>Mg

比抵抗の温度特性を図3-18(a)に示す。量子井戸の無い試料●では、領域内に均等分散したキャリアによる3次元伝導が生じており、低温側(グラフ右側)で比抵抗が上昇する傾向を示している。一方、量子井戸を設けた試料○では、2次元伝導特有の特性である低温側で降下もしくは変化が少ない傾向を示しており、伝導機構が異なっていることが検証できた。また、常温(プロット左端 3.3)における比抵抗は、分極ドーピングを行う(○)ことで  $0.2 \Omega \cdot \text{cm}$  となり、分極ドーピングを行わない(●)が  $1.5 \Omega \cdot \text{cm}$  であることから、低抵抗化に有効であることが確認できた。本研究目標の  $0.5 \Omega \cdot \text{cm}$  を満足する結果となった。また図3-20(b)に今回成膜した膜表面の AFM 画像を示す。In 組成比が 10%であるが、 $1\mu\text{m}$  視野において周期的な格子形状がみられ、良好な結晶成長ができていることがわかる。



(a) 比抵抗の温度依存(試料 ID without QW:N6731, with QW:N6781)



ファイル名: n6800\_10um.xqt  
 コメント 1 : Ra 1.779E-01nm  
 コメント 2 : P-V 1.902E+00nm  
 コメント 3 : RMS 2.218E-01nm

(b) 試料の AFM 像( $1\mu\text{m}$  視野) (試料 ID N6800)

図3-18 比抵抗の温度依存と AFM による表面観察

### 3.5.3 三元混晶 GaInN を用いた低抵抗化

*p*-GaN-base に In を加えた三元混晶 GaInN は In の組成比により低抵抗化が期待出来ることが知られている[8–12]。この構造の HBT 動作の理論検証を行う。

図3–19に理論検証に用いた HBT の代表的な断面概要図を示す。サファイア基板上に低温成膜バッファ層、結晶品質を整えるための GaN テンプレート層、高ドープした sub-collector 層、2つの collector 層、*p* 型 base 層、emitter 層を形成した構造である。In 濃度を傾斜させた graded-collector 層と base 層は In を加えた三元混晶としている。graded-collector 層は In の組成傾斜を base 側は 3%、collector 側を 0%となるように傾斜組成させた構造を特徴とする。表3–III に計算に用いた諸元を示す。

図3–20(a)にバンド図を示す。emitter と base 間はヘテロ接合となっており、エネルギーバンドギャップ差  $\Delta E_g$  は 0.25 eV にしている。また base と collector もエネルギーバンドギャップは異なるが、graded-collector の In 濃度に傾斜をつけることで緩やかにバンド接合をしていることを特徴としている。計算の仮定として、emitter 直下の base 部分も他の部分同等に Mg の活性化が行われ、良好な *p*-base が形成されているものとしている。

図3–20(b)にシミュレーションより得た  $J_C$ - $V_{CE}$  特性を示す。3.5 節で示した単一の GaN からなる base 構造と比較して、アーリー電圧  $V_A$  は 5.1V から 32.2V と大幅に増加しており、アクセプタ濃度  $[N_A-N_D]$  が増加して base 幅変調が緩和されたと考えられる。この特性化から算出される出力インピーダンス  $Z_0$  は  $V_{CE} = 6$  V 素子面積  $177\mu\text{m}^2$  で、

$$Z_0 = \frac{V_A + V_{CE}}{I_C} = \frac{32.2 + 6.0}{3.1 \times 10^3 \times S} = 7.0 \times 10^3 \Omega, \quad (3-3)$$

となり増加がみられる。

図3–21に本項で検討した *p*-GaInN base HBT と標準 *p*-GaN base HBT の動作時のキャリアダイナミクス検証の結果を示す。測定条件は  $I_B = 5.0 \times 10^{-6}$  A、 $V_{CE} = 20$  V、 $\Delta E_g = 0.25$  eV であり、 $I_B$  は差を顕在化するために標準条件よりも大きく設定している。その結果、*p*-GaInN を base に用いた場合には3.5.1項 図3.8(g)-(i)に

みられるような base による制御が不能な状態ではなく、改善されており、*p*-GaInN base 構造が有効なことが示唆された。

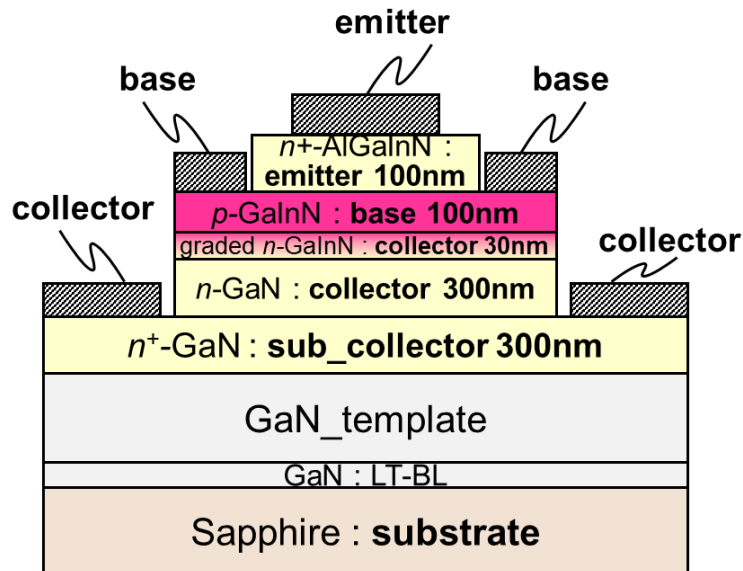


図3-19 *p*-GaInN base を有する HBT の断面概要図

表3-III 諸元

layer	type	Material Composition	thickness (nm)	carrier conc. (cm <sup>-3</sup> )
emitter	<i>n</i> <sup>+</sup>	Al <sub>0.33</sub> Ga <sub>0.62</sub> In <sub>0.05</sub> N	100	1.8 × 10 <sup>19</sup>
base	<i>p</i>	Ga <sub>0.96</sub> In <sub>0.04</sub> N	100	4.0 × 10 <sup>18</sup>
graded- collector	<i>n</i>	Ga <sub>0.96</sub> In <sub>0.04</sub> N → GaN	30	5.1 × 10 <sup>17</sup>
collector	<i>n</i>	GaN	300	2.0 × 10 <sup>17</sup>
sub-collector	<i>n</i> <sup>+</sup>	GaN	300	2.9 × 10 <sup>18</sup>

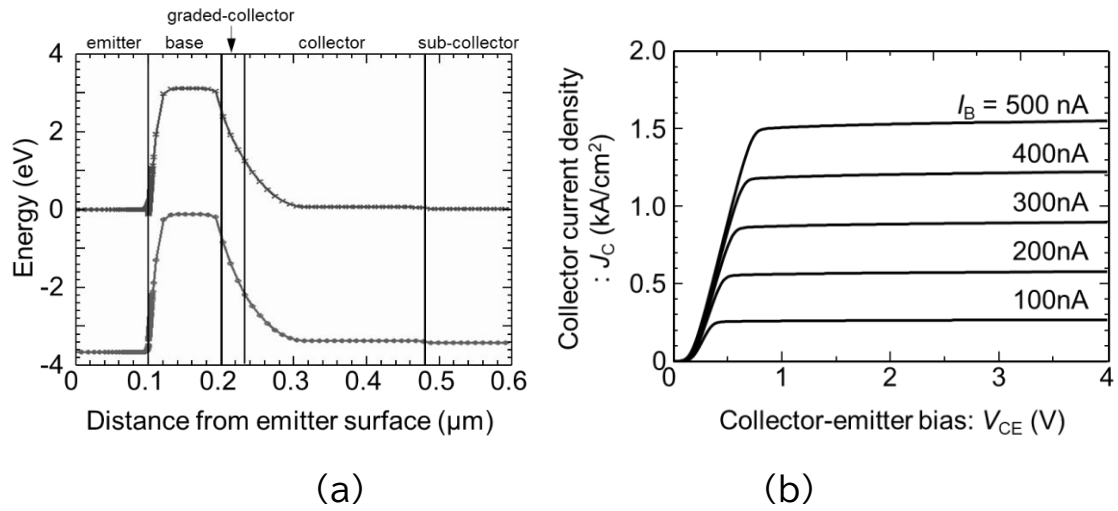


図3-20 (a)HBT バンド図  $V_{CE}=0\text{ V}$ 、 $I_B=0\text{ A}$ 、(b)シミュレーションより得た  $J_C$ - $V_{CE}$  特性

表3-IV  $[C_{Mg}]$ 、 $[N_A-N_D]$ 、 $[h_{Hall}]$ 比較

	$p\text{-Ga}_{0.97}\text{In}_{0.03}\text{N}$ concentrations ( $\text{cm}^{-3}$ )	$p\text{-GaN}$ concentrations ( $\text{cm}^{-3}$ )
$[C_{Mg}]$	Unmeasured	$3.0 \times 10^{19}$
$[N_A-N_D]$	$4.0 \times 10^{18}$	$1.0 \times 10^{18}$
$[h_{Hall}]$	$1.0 \times 10^{18}$	$3.0 \times 10^{17}$

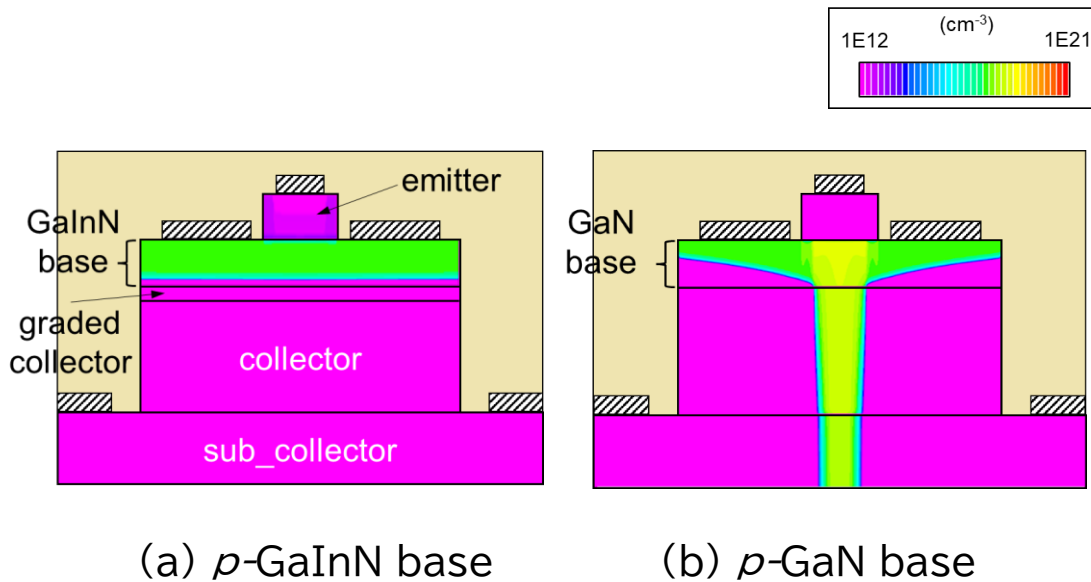


図3-21  $p\text{-GaInN}$  および  $p\text{-GaN}$  を base に有するキャリアダイナミクス解析結果。(a)  $[N_A-N_D] = 1 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$   $p\text{-GaInN}$  base。(b)  $[N_A-N_D] = 4 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$   $p\text{-GaN}$  base。 $I_B = 5.0 \times 10^{-6}\text{ A}$ 、 $V_{CE} = 20\text{ V}$ 、 $\Delta E_g = 0.25\text{ eV}$



### 3.6 collector ドナーキャリア濃度、膜厚の影響

collector は駆動電圧印加時に空乏層が伸びる(伸ばすべき)部分であり、そのキャリア濃度の base との関係が大変重要になる場所である。一般的に base と collector のキャリア濃度が  $N_A \gg N_D$  のように大小差をつけることにより、base 側に空乏層を伸ばさない設計を行い、過度なアーリー効果やパンチスルー現象を回避することが重要となる。そこで base の正味のアクセプタキャリア濃度  $[N_A - N_D]$  を  $4.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  に設定し、collector の正味のドナーキャリア濃度  $[N_D - N_A]$  を9水準 ( $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  から  $5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) 振り、パンチスルーへの影響を調べる。

図3-24 に  $E_{CE}$  の collector ドナー濃度依存性の結果を示す。collector-emitter 間電圧  $V_{CE}$  は 14 V、base 電流  $I_B$  は 0 A である。その結果、base のアクセプタ濃度に対し、1/5 を越える場合、collector-emitter 間のポテンシャルバリア高さ  $E_{CE}$  が低下し始め、パンチスルー状態に陥ることがわかる。

図3-25 に逆方向耐圧の collector 膜厚依存性を示す。それぞれ、Collector 厚 300nm (黒線)の耐圧は 130 V、500 nm (赤線) の耐圧は 183 V、700nm (青線)の耐圧は 221 V であった。本シミュレーション検討に際し、以下の工夫を行った。①リーク電流が小さいことから、領域界面のメッシュを細かく設定。②ヘテロ界面に熱電子放出モデルを適用。③collector 層に衝突イオン化モデルを適用。④微電流を扱うことによる計算の発散抑制のため、トレーランスを小さく設定。Appendix 5 に入力ファイルを添付する。

また、このリーク・メカニズムを調べるため、300~420 K での定電圧逆バイアス  $I_R$ - $V_R$  特性から  $\ln(I_R)$  と  $E_{av}$  の関係を図3-26 に示す。温度上昇に伴いリーク電流密度が増加することを示している。この関係を導くため、リーク電流と電界の相関を調べるため、ドリフト層の平均電界( $E_{av}$ )を式(3-4)で見積もった。

$$E_{av} = (V_{bi} - V_R)/W_d , \quad (3-4)$$

ここで、 $V_{bi}$  は GaN の  $p$ - $n$  接合部の内臓電圧(約 3.4V)、 $W_d$  はドリフト層(collector)の厚さである。 $\ln(I_R)$  は  $E_{av}$  に直線的に比例しており、可変レンジホッピングメカニズムに従ったリークであることがわかる[13]-[15]。

$$I = I_0 \cdot \exp\left(\frac{C \cdot E}{k_B \cdot T} \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{2}}\right), \quad (3-5)$$

ここで、 $I$  はリーク電流、 $I_0$  はプレ指数、 $C$  は定数、 $E$  は電界、 $k_B$  はボルツマン定数、 $T$  は温度、 $T_0$  は特性温度。

以上の結果より、collector の条件は、正味のドナーキャリア濃度 $[N_D - N_A]$ は  $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  以下、膜厚は 300 nm を標準とする。

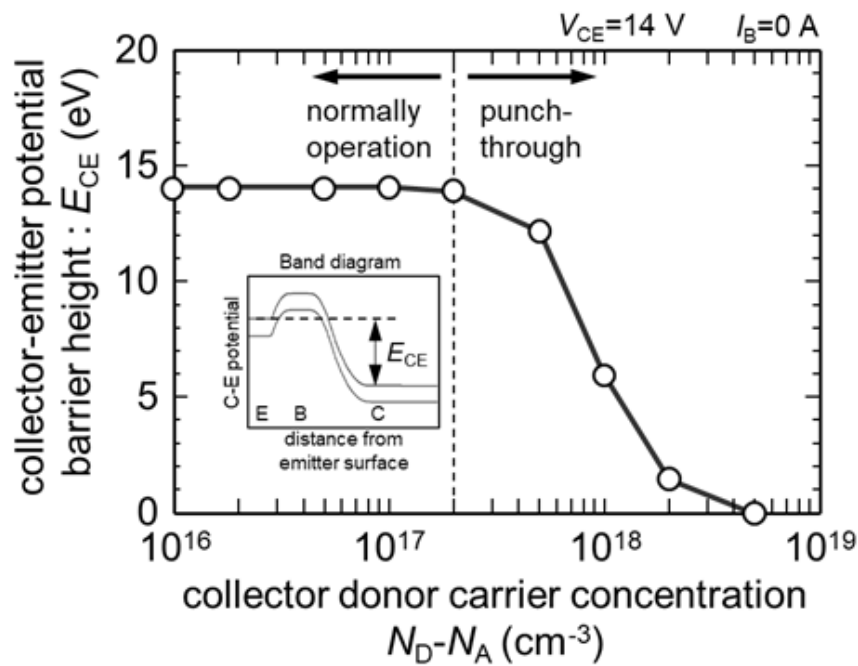


図3-24 emitter-collector 間電位障壁高さの collector ドナー濃度依存性の計算結果。emitter-collector 間電圧  $V_{CE}$  は 14 V、base 電流  $I_B$  は 0A。

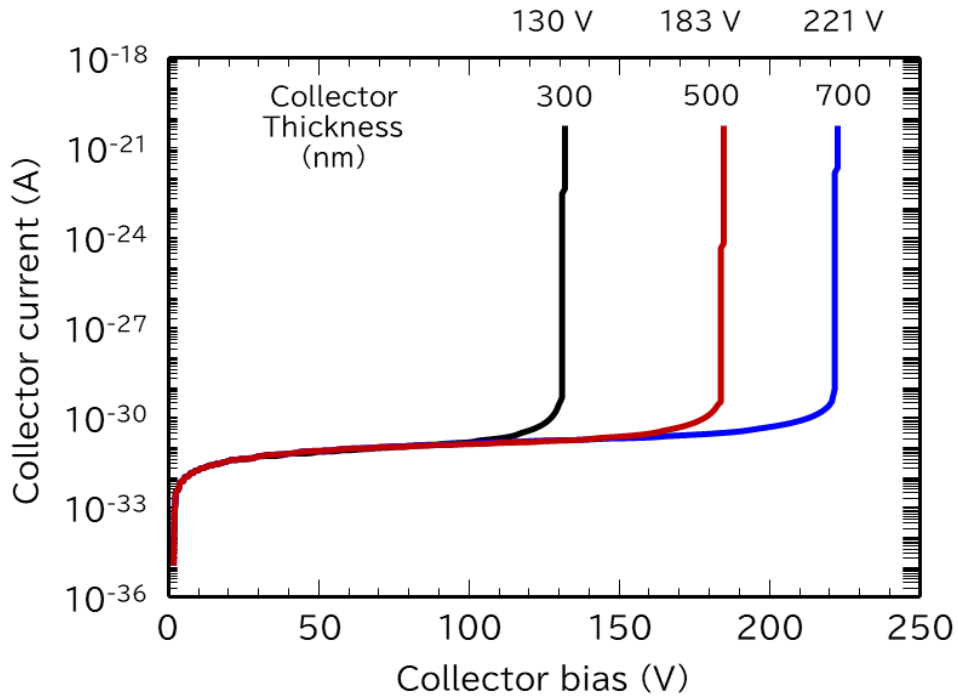


図3-25 逆方向耐圧の collector 厚依存。Collector 厚みはそれぞれ 300nm(黒線)、500nm(赤線)、700nm(青線)の結果を示す。

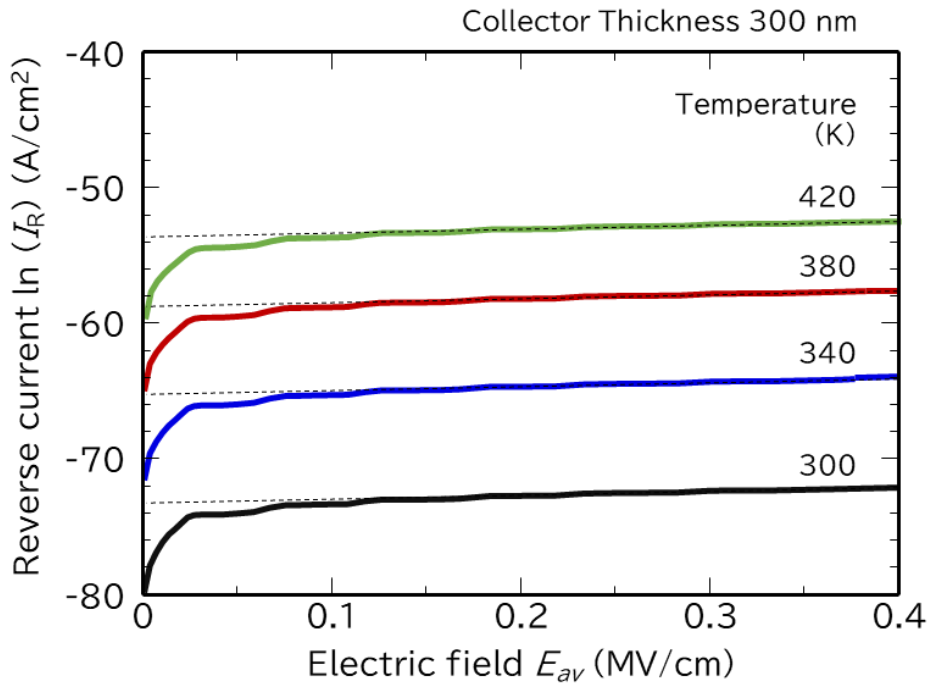


図3-26 逆方向  $\ln(I_R)$  と  $E_{av}$  の関係。直線比例しており、可変レンジホッピングメカニズムに従っていると推定される。

### 3.7 sub-collector パラメータの影響

sub-collector は collector 電流  $I_C$  を流した際、層横方向を電路となるために直列抵抗として影響する層である。図3-28は sub-collector のドナーキャリア濃度5水準と層の厚み 3 水準をパラメータとし、直列抵抗を比較したものである。直列抵抗は HBT の  $J_C$ - $V_{CE}$  特性の飽和領域である  $V_{CE} = 0.8V$  の傾きから算出した。図3-27の結果から、sub-collector 以外の抵抗成分は  $0.7 \text{ m}\Omega / \text{cm}^2$  程度であることがわかる。Sub-collector で直列抵抗目標の  $1 \text{ m}\Omega / \text{cm}^2$  以下を得るためには、厚み 300nm 以上、ドナーキャリア濃度  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  以上必要であることが確認できた。素子を島状分離するエッチングは sub-collector が露出するまで加工するため、sub-collector を減厚するばらつきを内包している。工程のバッチ内加工ばらつきは  $\pm 25\text{nm}$  あり、減厚分を考慮した設計が必要で、350 nm 以上の厚膜化が必要である。さらに低抵抗化を目指す場合には、基板裏面に collector 電極を設け、縦方向に電流を流すことも有効であると推定される。

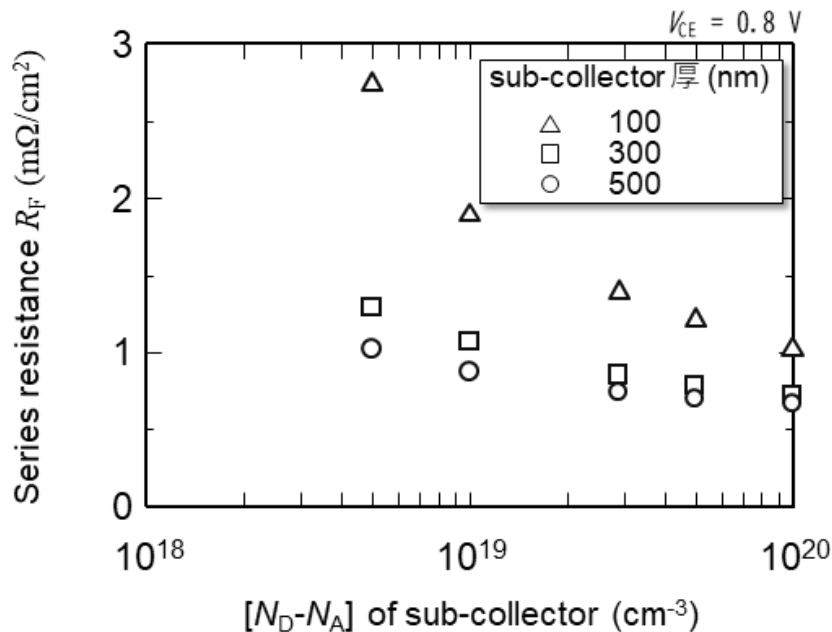


図3-27 直列抵抗の sub-collector 厚およびキャリア濃度依存。横軸は sub-collector のキャリア密度、縦軸は直列抵抗を示す。また sub-collector 厚をパラメータとしており、○は 500 nm、□は 300 nm、△は 100 nm をそれぞれ示す。  $V_{BE} = V_{CE} = 3.4 \text{ V}$ 。

### 3.8 シミュレーションのまとめ

本章では、シミュレーションにより GaN 系 *n*pn-HBT に必要な要件をまとめる。

emitter では、構造上縦方向に作用するため、膜厚の影響は少なく、結晶性の良い 100nm を標準とした。正味のドナー濃度  $[N_D - N_A]$  にも特性は鈍感で  $2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  を標準条件とした。ここで新たな知見として、emitter-base 間の  $\Delta E_g$  が 0.25 eV 付近で電流増幅率  $\beta$  の緩やかなピークを持つことが分かった。そのため中心値として以降の検討を進める。我々の知見と Kroemer の理論式との食い違いは、ヘテロ接合における伝導帯の不連続が顕著になるにつれて、base への少数キャリアの供給が減少することに起因すると考えられる。その結果、供給メカニズムが熱拡散から熱電子注入へとシフトしている可能性があることが推察された。

base では、パンチスルーを回避する要件として、正味のアクセプタ濃度  $[N_A - N_D]$  は  $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上が必要であることが分かった。HBT 特性の肝となる base の  $[N_A - N_D]$  が HBT の動作特性に与える影響を解析した。その結果、 $[N_A - N_D]$  が  $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  未満の場合には、base 電流の制御にかかわらず collector 電流が徐々に増加する傾向が見られた。これは、collector-base 接合部の空乏層が拡大することでアーリー効果とパンチスルー現象が生じ、その結果 collector 電流が base に制御されなくなったためと推察される。この傾向は、base 電流が大きくなるほど顕著になることが分かった。base 材料に GaInN を用いることで、同じ base 厚でもパンチスルーが抑制されており、有効性が確認できた。

collector では、層厚が 300nm の場合 130V の逆方向耐圧を有することが分かった。逆方向リーク・メカニズムはリーク電流と電界の相関から可変レンジホッピングメカニズムに従ったリークであることがわかった。

sub-collector では、加工ばらつきも加味した場合、厚み 350nm 以上、ドナーキャリア濃度  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  以上必要であることが確認できた。

上記検討結果より、*p*-GaInN を base に用いた HBT 構造にて試作を進める。中心条件を適用した HBT の静特性を図3-28に示す。

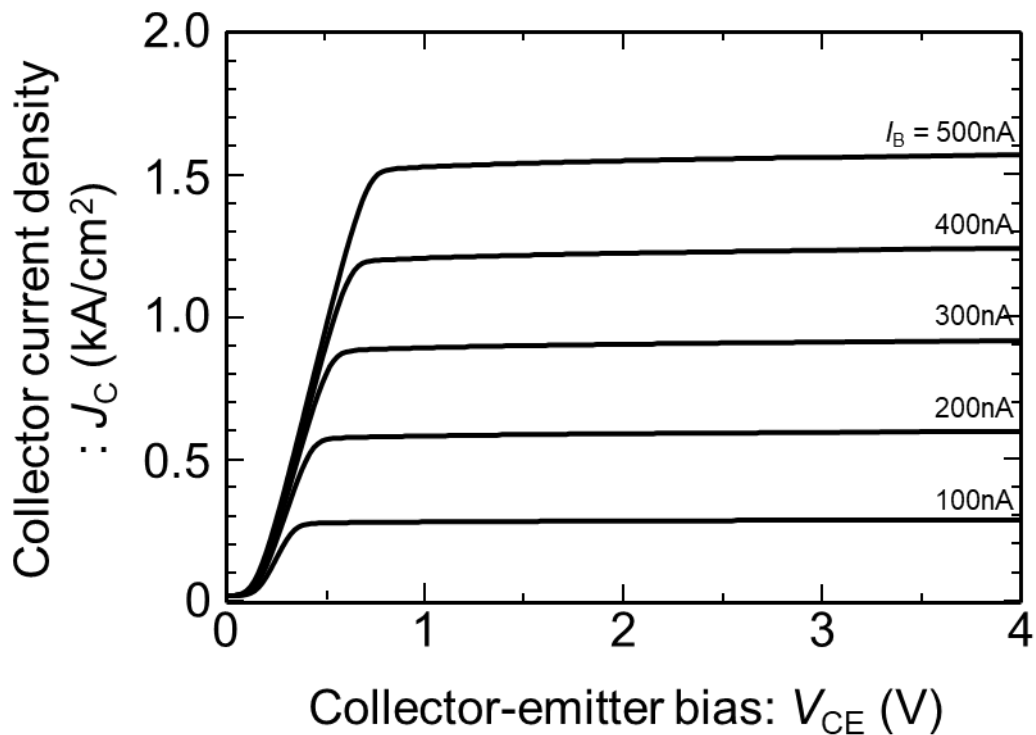


図3-28 シミュレーション検討の結果、中心条件を適用した HBT のトランジスタ特性 (図3-20(b)再掲)

## 参考文献

- [1] F. Tao, “Digital Twin in Industry: State-of-the-Art” *IEEE Tans. Industry* **15** 4 (2018) pp2405-2415.
- [2] D. Jones et al., *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* **29** (2020) pp36–52.
- [3] R. C. Jaeger, “Simulation of impurity freezeout through numerical solution of Poisson’s equation with application to MOS device behavior,” *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-27** 5 (1980) pp. 914–920.
- [4] S. A. Schwarz, “Semi-empirical equations for electron velocity in silicon: Part II—MOS inversion layer,” *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-30** 12 (1983) pp. 1634–1639.

- [5] R. E. Thomas, "Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field," *Proc. IEEE* **55** 12 (1967) pp. 2192–2193.
- [6] H. Kroemer, "Heterostructure bipolar transistors and integrated circuits" *Proc. IEEE*. **70** 1 (1982) pp.13-25.
- [7] S. M. Sze : "Physics semiconductor devices, 2nd Edition", *John Wiley & Sons*, **5** (1981) p. 255.
- [8] N. Shigekawa, "Current–voltage and spectral-response characteristics of surface-activated-bonding-based InGaP/GaAs/Si hybrid triple-junction cells", *Jpn. J. Appl. Phys.* **54** 08KE03 (2015).
- [9] A. Yamamoto, "Mapping of inhomogeneity and thermal degradation of Au/Ni/n-GaN Schottky diodes using scanning internal photoemission microscopy" *Physica Status Solidi b* **252** 5 (2015) pp.1017-1023.
- [10] A. Yamamoto, "Phase separation of thick ( $\sim 1 \mu\text{m}$ )  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x \sim 0.3$ ) grown on AlN/Si (111): Simultaneous emergence of metallic In–Ga and GaN-rich InGaN" *Appl. Phys. Express.* **7**, 035502 (2014).
- [11] A. Yamamoto, "Growth temperature dependent critical thickness for phase separation in thick ( $\sim 1 \mu\text{m}$ )  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x = 0.2\text{--}0.4$ )" *Journal of Crystal Growth* **419** (2015).
- [12] *JP2006313890A*.
- [13] Y. Zhang, *Tech. Dig. of IEEE Int. Electron Devices Meeting (IEDM)* (IEEE, 2015) p. 899.
- [14] D- P. Han "Conduction Mechanisms of Leakage Currents in InGaN/GaN-Based Light-Emitting Diodes" *IEEE Trans. Electron Devices* **62** 2 (2015) pp.587–592.
- [15] D- V. Kuksenkov, "Origin of conductivity and low-frequency noise in reverse-biased GaN junction" *Appl. Phys. Lett.* **72** 11 (1998).

## 第4章 要素技術の実験的探求と HBT の試作・評価

### 4.1 はじめに

前章にてシミュレーションで得た構造による素子を試作し特性を確認することを目的とする。また、計算では難しかった  $p$ -base 層の活性化や、コンタクト抵抗の削減などは、実験手法を用いて第4章で結果と考察を進めることとする。

本章では以下の順で記述を進める。

- 4.2節では研究課題の一つである base 低抵抗の抗化について
- 4.3節では本研究 HBT の特徴である四元混晶 AlGaInN emitter について
- 4.4節では研究課題である  $p$ -base と電極の接触抵抗の低減について
- 4.5節では HBT の試作と考察を述べる。

### 4.2 base の低抵抗化～三元混晶 GaInN base 層の評価

第3章で述べたように、base 層の低抵抗化の解決策の一つに、三元混晶  $p$ -GaInN の利用がある。熊倉、Routh らによれば GaInN 系では InN のモル分率増加に伴い、 $E_g$  が小さくなるために、活性化エネルギーが相対的に小さくなる。さらに III 族原子サイトに Mg が取り込まれやすくなるために高キャリア濃度化でき、低抵抗化を期待できることを明らかにしている[1][2]。しかしながら一方で、InN モル分率が高いエピタキシャル膜では表面状態が悪化し、emitter-collector 間の電流リーク増大などデバイス動作に悪影響を与える可能性がある。そこで、本研究では低抵抗化の可能性と、結晶品質を両立させる In 濃度を探ることを目的とした。



## 4.2.1 検討方法

$p$ -GaInN の表面状態と電気的特性を調査するため、MOCVD 法を用いて  $c$  面サファイア基板上に 30nm の LT-GaN、2.4 $\mu\text{m}$  以上の *undoped*-GaN を成長。その後  $C_{[\text{Mg}]} = 2.3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の  $p$ -GaN もしくは  $p$ -GaInN を成長させたサンプル(a)–(d) を作製した。サンプル (a)は 50nm の  $p$ -GaN、2nm の  $p^+$ -GaN、サンプル(b)–(d) は 60nm の  $p$ -GaInN、2nm の  $p^+$ -GaInN を成長した。サンプル(b)–(d)は原料ガスの流量一定で成長温度を 840°C、825°C、800°Cとすることで InN モル分率を変化させた。

作製したエピウェハは XRD 測定で組成を算出し、AFM 測定で表面形状の確認を行った。サンプルは全て  $\text{N}_2$  雰囲気中で 775°C、90 分の活性化アニールを行った。これらのサンプルに Hall 効果測定用の電極を形成、 $p$  型電極は Ni/Au (5 / 60nm) を電子ビーム蒸着により形成し、その後  $\text{O}_2$  雰囲気中で 600°C、5 分の熱処理を行いオーミック化接続した。作製したサンプルについて常温で van der Paul 法による Hall 効果測定を行い、比抵抗、キャリア濃度、移動度による評価を行った。

## 4.2.2 試作結果と考察

GaInN の成長温度を変化させることで InN のモル分率を変化させることができる。図4–1の XRD 測定から求めた GaInN 試料 (b)–(d)の InN モル分率は、それぞれ 4.1%、5.7%、11.9%であった。

図4–2に試料 (a)–(d)を AFM により 1 $\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$  視野で表面観察した鳥観図を示す。その結果、図4–3に示すように、InN モル分率の増加に伴い GaInN 膜表面の RMS 値は増加していることが分かった。試料 (a)–(c)は RMS が 0.5nm 以下と平坦であるが、図に示すように InN の取り込み量が増えるにつれ粗くなる傾向が確認できた。InN モル分率の大きい試料(d)では RMS 値が 1.052nm と大きく、ピットの形成こそ見られないものの (a)–(c)と比べて表面がより粗くなっていることが示された。この結果から、InN モル分率が 5%を大きく超えることは、base の平坦性を阻害するため、5%以下で成膜することが望ましい。

図4-4は InN モル分率と比抵抗との関係を、また図4-5は InN モル分率と正孔濃度との関係を Hall 効果測定からそれぞれ求め示したものである。活性化温度はいずれの試料も 775°C90 分間と同じであるが、試料(a)の  $p$ -GaN では  $4.54 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、試料(d)の  $p$ -GaInN (InN モル分率 11.9%) では  $6.13 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  と一桁以上の正孔濃度の増加が見られ、比抵抗の減少には正孔濃度の増加が大きく寄与している事が確認できた。これは、In の量が GaInN の結晶中に Mg が取込まれる機構に影響していることを示唆するものである。InN 比率が増加することにより  $E_g$  が小さくなり、アクセプタ側の活性化エネルギーの値が小さくなったと考えられる。

図4-6は InN モル分率と正孔移動度との関係を Hall 効果測定から求め示したものである。GaN(In モル分率 0%)と明確な差があるものの、In モル分率とは相関が小さいことがわかった。図4-6が示すように試料(a)–(d)全てで正孔移動度は約  $4.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  と大きな違いは見られなかった。これは、図4-3の AFM による表面観察結果を見ても、粗さについては大きな有意差は無いものの、GaInN の結晶粒径は小さく、結晶粒界面での不連続性による悪化ではないかと推察する。原因は In 含有による結晶性の悪化に起因するものと思われる。

以上の結果を総括すると、目標の  $0.5 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$  以下は In 比率 11% で得られることが分かった。しかしながら、5%を超える高 In モル分率の  $p$ -GaInN は特に電氣的に優れていることを示しているが、表面形状の悪化による HBT 動作への悪影響が懸念されることもわかり、InN モル分率は 5%以下が望ましい。GaN に比較して低抵抗な  $p$ -GaInN を HBT の Base 層に用いることで GaN 系 HBT の実現ができると考えられる。しかしながら、『「比抵抗の改善」と「結晶性起因の移動度低下」がどのように素子特性に影響するか』が今後の課題として見えてきた。今後本研究では、MOCVD 法における成長再現性を考慮し、InN モル分率 5.0%程度を目標組成とする  $p$ -GaInN の適用を目指す。

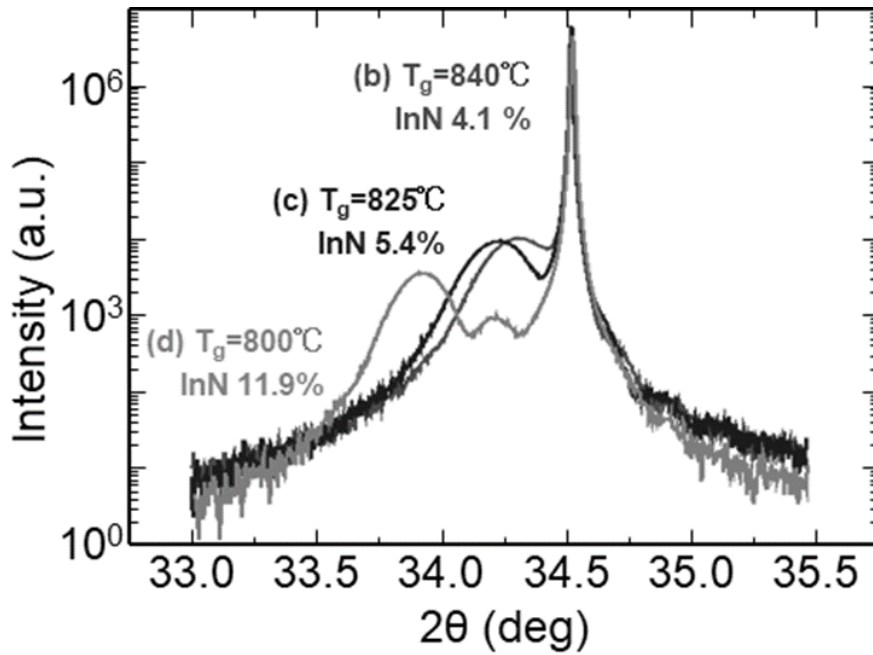


図4-1 XRD 測定結果

(試料 ID (b)  $T_g = 840^\circ\text{C}$ :N6880、(c)  $T_g = 825^\circ\text{C}$ :N6879、(d)  $T_g = 800^\circ\text{C}$ :N6874)

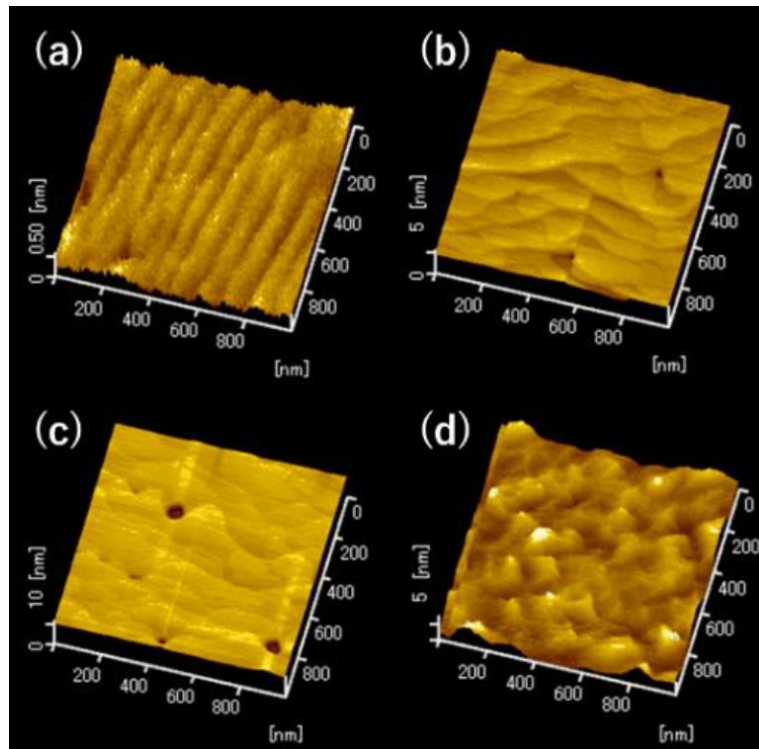


図4-2 AFM images of  $p$ -GaInN and  $p$ -GaN samples (a)—(d)

(試料 ID (a)  $T_g = 1000^\circ\text{C}$ :N6685、(b)  $T_g = 840^\circ\text{C}$ :N6880、(c)  $T_g = 825^\circ\text{C}$ :N6879、(d)  $T_g = 800^\circ\text{C}$ :N6874)

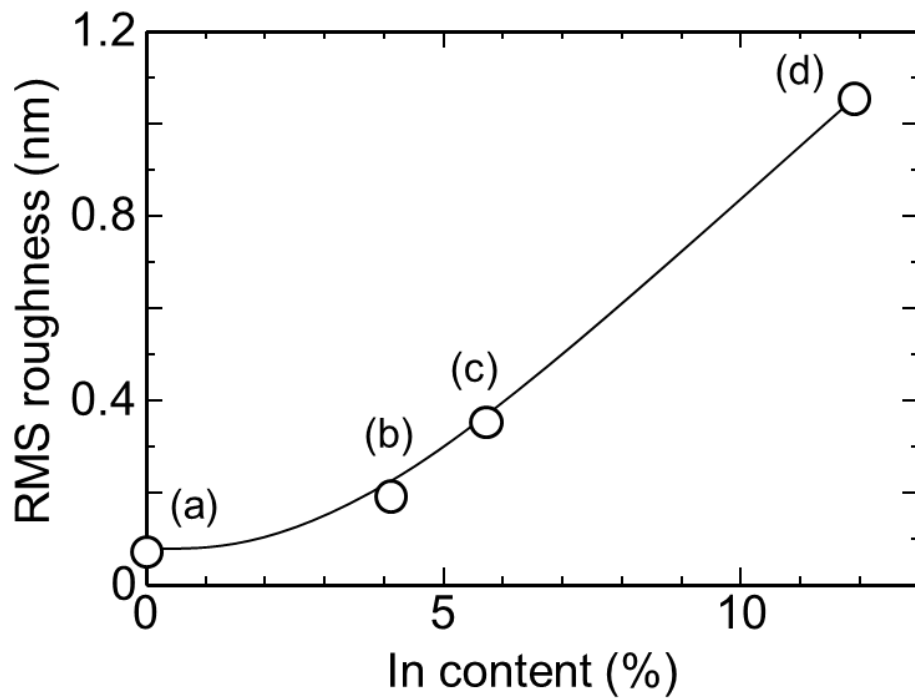


図4-3 RMS roughness as measured via AFM vs In content in  $p$ -GaIn or  $p$ -GaInN ( $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ ) (試料 ID (a) $T_g = 1000^\circ\text{C}$ :N6685、(b) $T_g = 840^\circ\text{C}$ :N6880、(c) $T_g = 825^\circ\text{C}$ :N6879、(d) $T_g = 800^\circ\text{C}$ :N6874)

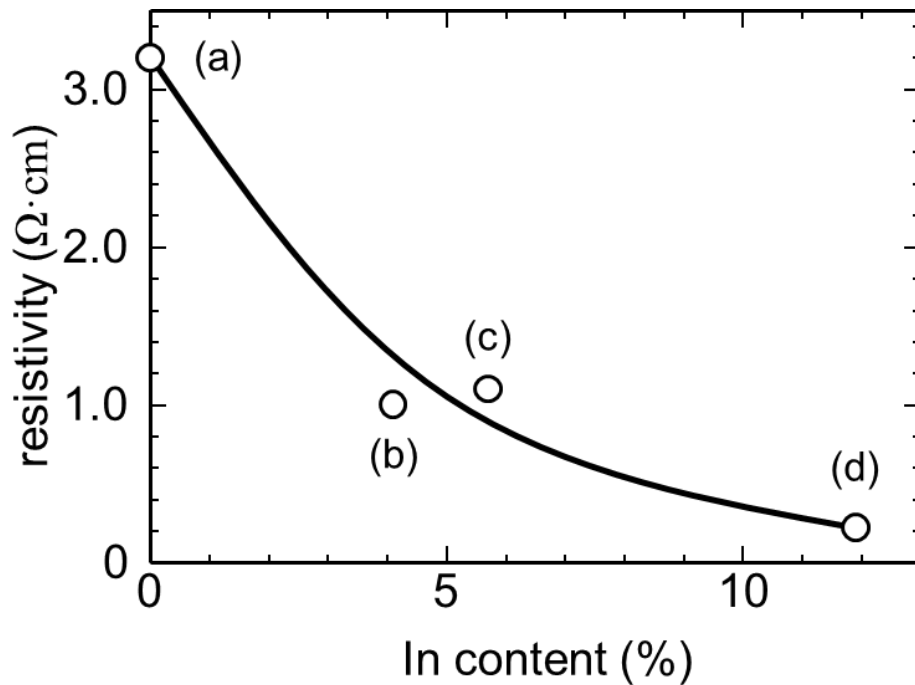


図4-4 In 組成比と抵抗率 (試料 ID (a) $T_g = 1000^\circ\text{C}$ :N6685、(b) $T_g = 840^\circ\text{C}$ :N6880、(c) $T_g = 825^\circ\text{C}$ :N6879、(d) $T_g = 800^\circ\text{C}$ :N6874)

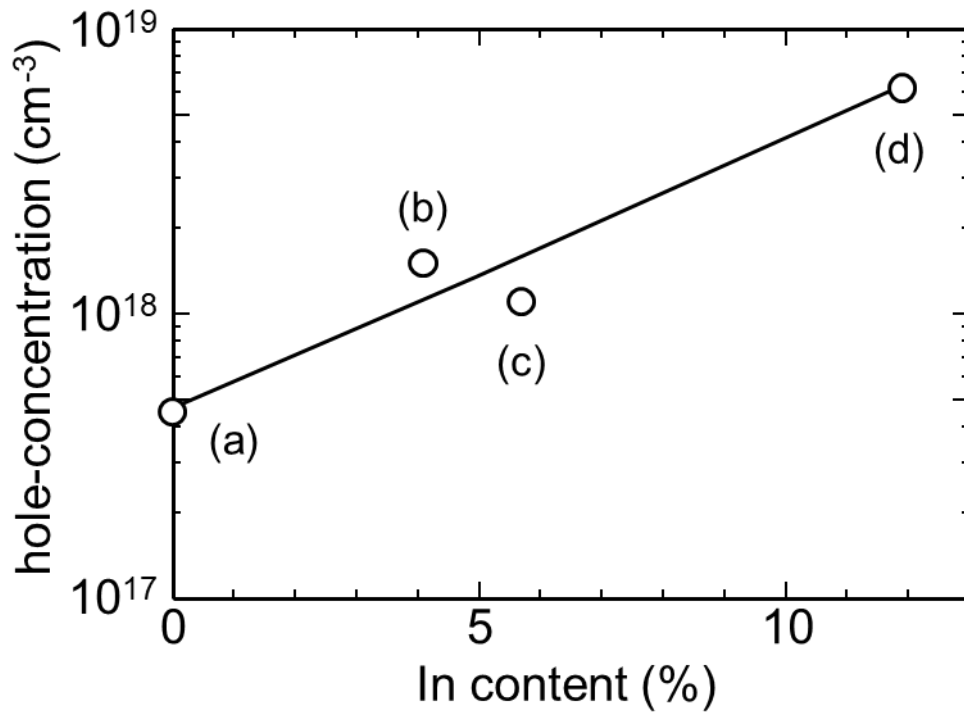


図4-5 In 組成比と hole 濃度 (試料 ID (a)T<sub>g</sub>=1000°C:N6685、(b)T<sub>g</sub>=840°C:N6880、(c)T<sub>g</sub>=825°C:N6879、(d)T<sub>g</sub>=800°C:N6874)

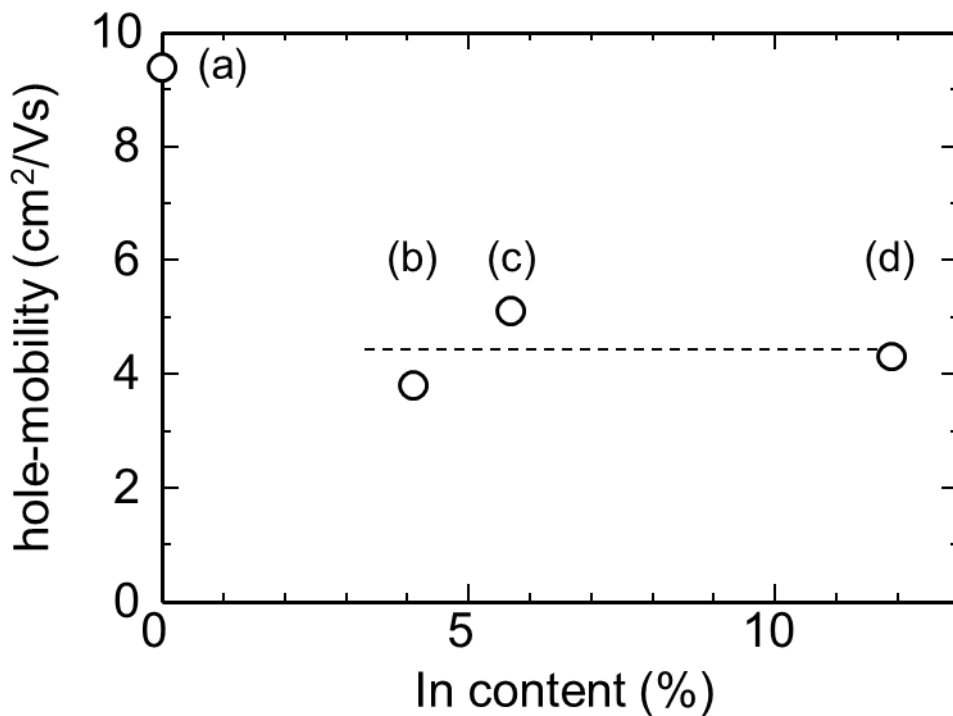


図4-6 In 組成比と正孔移動度 (試料 ID (a)T<sub>g</sub> = 1000°C:N6685、(b)T<sub>g</sub> = 840°C:N6880、(c)T<sub>g</sub> = 825°C:N6879、(d)T<sub>g</sub> = 800°C:N6874)

### 4.3 四元混晶 AlGaInN emitter の検討

第3章でシミュレーションを行った結果から、 $\Delta E_g$  が 0.20 eV~0.50 eV の範囲であれば十分な電流増幅率  $\beta$  を得られることが確認できた。本節では HBT の emitter として有効な組成比を求めることを目的とする。

#### 4.3.1 検討方法

検討はサファイア基板上の GaN テンプレートに MOCVD により AlGaInN を成長させた。その際、成膜温度は 825°C 固定、表4-I に示す TMA/TMG のガス流量比をパラメータとし、特性( $E_g$ )の Al/Ga 比依存を調べた。

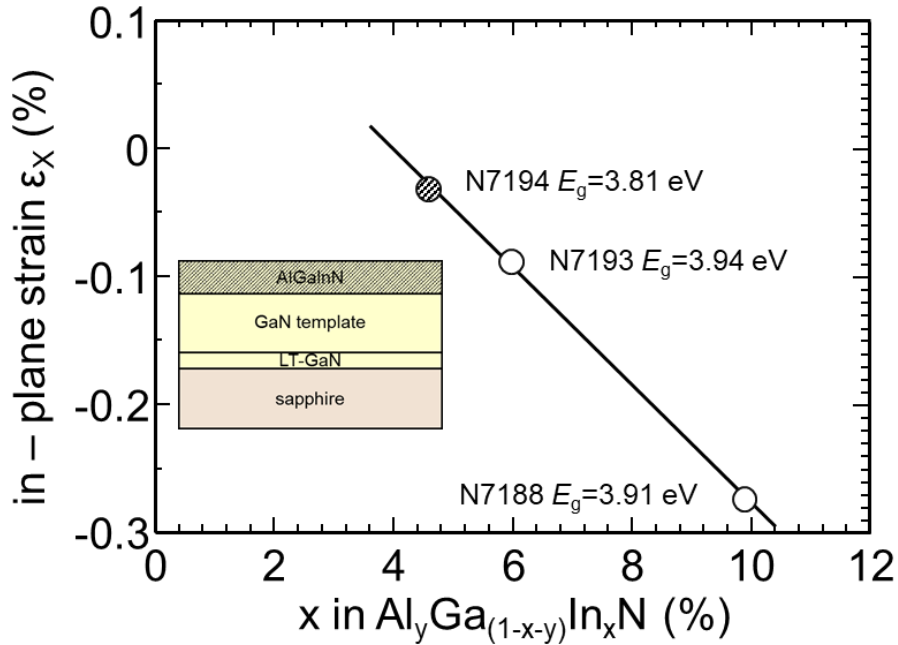
表4-I 試料作成条件:ガス流量比 (sccm)

	N7188	N7193	N7194
TMA	12.5	10.0	7.13
TMG	3.40	3.40	3.40
TMI	200	200	200
TMA / TMG 比	3.68	2.94	2.10

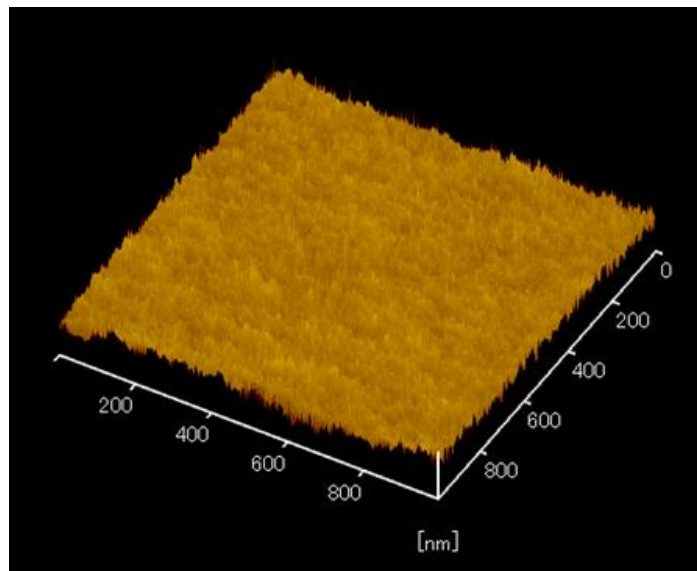
#### 4.3.2 結果と考察

図4-7は GaN テンプレート/サファイア上に成長した  $n$ -Al<sub>y</sub>Ga<sub>(1-x-y)</sub>In<sub>x</sub>N の InN モル分率  $x$  と面内歪  $\varepsilon$  の関係と AFM 像を示したものである。XRD 測定から算出した格子定数より、すべてのサンプルで下層の GaN の  $a$  軸長を引き継いでいることが確認できた。これは設計通りに面内格子歪が小さいエピタキシャル膜が成長できているためだと考えられる。以上のことから、InN モル分率 4.6%の  $p$ -GaInN base 層と最適なバンドギャップ差を持ち GaN に疑似格子整合した  $n$ -Al<sub>y</sub>Ga<sub>(1-x-y)</sub>In<sub>x</sub>N emitter 層の組成は  $y = 0.334$ ,  $x = 0.046$ -0.099 であり、実際に GaN 上に面内圧縮成長できることが確認できた。 $x = 0.046$  の場合、格子歪が最小で  $E_g$  は 3.81 eV であった。また AFM 像の RMS 値も  $5.097 \times 10^{-2}$  (nm) と小さく良好な結晶表面

であることが分かった。以上より  $y = 0.334$ ,  $x = 0.04 \sim 0.06$  の  $\text{Al}_y\text{Ga}_{(1-x-y)}\text{In}_x\text{N}$  の組成であれば最適なバンドギャップと良好な表面状態を両立できると考え、試作の標準条件とした。



(a) 面内引張ひずみの InN モル比依存性



(b) AFM 像(1 $\mu\text{m}$  視野:RMS =  $5.097 \times 10^{-2}$  (nm))

図 4.7 emitter 層  $\text{Al}_y\text{Ga}_{(1-x-y)}\text{In}_x\text{N}$  の面内引張ひずみの InN モル比依存性。(N7194: $x = 0.046$ , N7193: $x = 0.060$ , N7188: $x = 0.099$ ) と AFM 像 ( N7188 )

## 4.4 $p$ -base と電極の接触抵抗低減

$p$ -GaN または  $p$ -GaInN と金属の接合は、エッチングダメージ削減や金属成膜後の熱処理だけでは接合となり、完全に良好なオーミック接合を得ることは難しく、以下の3種類を検討する。

なお検討の前提として、金属電極 Ni/Au 形成後に  $N_2/O_2 = 4:1$  雰囲気 (550°C10min) でアニールすることを標準として考えている。これは  $p$  型 GaN と金属の接触は常に高抵抗の Schottky 接続となるため、酸素を含んだ雰囲気のアニールにより  $p$  型の特性を有する NiO 層を形成して、コンタクト抵抗を低減するためである[3-5]。これは薄くなったバリアを通してのトンネル効果に依っており、高キャリア濃度の  $p^+$ -GaN 層 との組合せが必要要件である。そこで高濃度  $p^+$ 層を得る試みとして以下を検討する。

- 4.4.1 項では Ni/Au 形成後の  $N_2/O_2$  アニールの効果について追試する
- 4.4.2 項では base と金属の間に再成長  $p^+$ -GaN 層を形成する
- 4.4.3 項では base 層上部に  $p^+$ 層の連続成長層を形成する
- 4.4.4 項では Mg の固相拡散による base 表面層の高濃度化をする
- 4.4.5 項に接触抵抗低減のまとめと考察を行う。

### 4.4.1 Ni/Au 形成後の $N_2/O_2$ アニールの効果について

$p$ -GaInN または  $p$ -GaInN と金属の界面に基本的に生じる Schottky 接続に対し、L-C. Chen らは、Ni 電極形成後に酸素を含んだ雰囲気アニールすることにより、 $p$ 型を示す Ni-O-Ga 系混晶が界面に形成でき、接続特性が改善する報告をしている。[3-6] 本構造・プロセスへの適用可否を追試検証した。

#### ■実験方法

図4-8に用いた試料の構造を示す。FS-GaN\*<sup>2</sup> 上に undoped-GaN(200nm)、 $p$ -GaN(1.0 $\mu$ m)、 $p^+$ -GaN(2nm)を 1160°Cでエピタキシャル成長をさせた。その上に、リフトオフ法と EB 蒸着法により Ni/Au(10/100nm)の電極を形成、蒸着前に塩酸 12



分間、BHF2 分間の順で前処理を行っている。その後、 $N_2/O_2$  (4:1 混合雰囲気) で5分間、処理温度を  $500^\circ C$ 、 $550^\circ C$ 、 $600^\circ C$  および  $N_2$  で5分間、処理温度  $500^\circ C$  の4水準でアニールを行い、TLM 法にて評価を行った。

\*2) FS-GaN 仕様(株式会社サイオクス製、*c*-plane、*n*型(Si)  $3.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、転位密度  $4.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ )

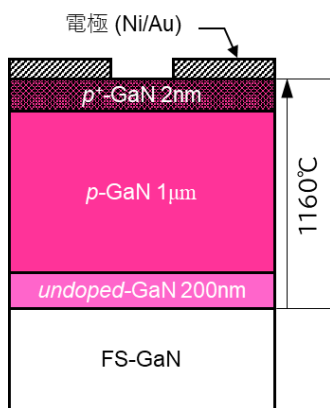


図4-8 試料断面概略図

### ■結果と考察

図4-9に CTLM  $W_{GAP} = 10\mu m$  による測定結果を示す。(a)の青線は  $N_2$  処理、赤線は  $N_2/O_2$   $500^\circ C$  処理、黒点線は  $550^\circ C$ 、黒線は  $600^\circ C$  の結果である。(b)は  $N_2/O_2$   $500^\circ C$  処理の  $\pm 100 \text{ mV}$  を拡大した結果である。 $N_2/O_2$   $500^\circ C$  処理が他に比べて有意差があることがわかった。表4-II(a)と(b)に比較結果を示す。

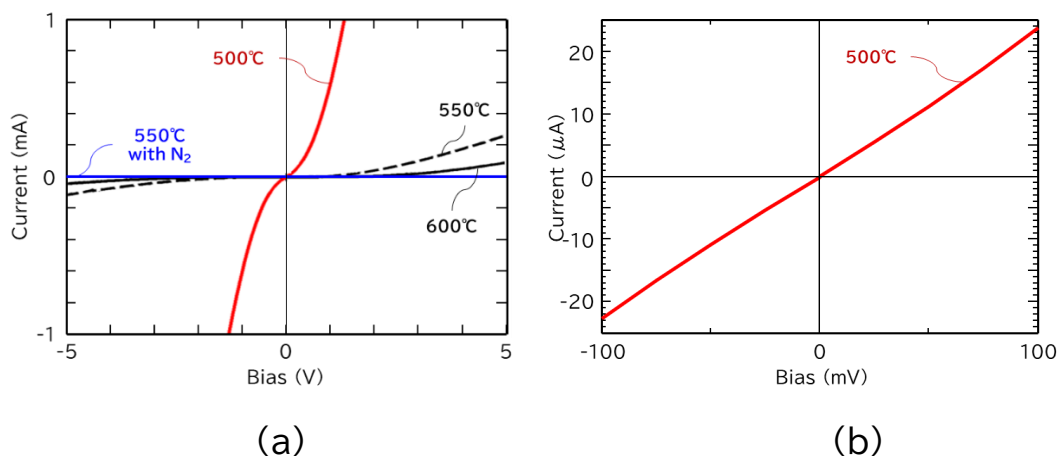


図4-9 TLMによるIV特性  $W_{GAP} = 10\mu m$  青線は  $N_2$  処理。赤線は  $N_2/O_2$   $500^\circ C$  処理、黒点線は  $550^\circ C$ 、黒線は  $600^\circ C$  の結果。(a)は  $\pm 5 \text{ V}$ 、(b)は  $N_2/O_2$   $500^\circ C$  の  $\pm 100 \text{ mV}$  の特性

その結果、N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 500°C処理したものは、最もコンタクト抵抗が低く、±100mV の特性においても原点を通るオーミック性が保たれた良好な結果を得た。L-C. Chen らは Ni-Ga-O の混晶合金がオーミック接続に関与していると解析しており、500 °C で得られた酸化 Ni の最適な微細構造が存在し、それによって固有接触抵抗が著しく低下していることを報告している[4][5]。我々の追試も同じ傾向の結果が得られており、最適条件を N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> にて 500°C 5 分間として検討を進める。

表4-II(a) アニール雰囲気と温度がコンタクト抵抗に与える影響

アニール温度 雰囲気	500°C N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	550°C N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	600°C N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	500°C N <sub>2</sub>
コンタクト抵抗 (Ω·mm)	27.5	3,519	23,951	487,012

表4-II(b) N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 500°C 処理 ±100 mV の TLM 評価結果

比抵抗: $\rho$	6.15 Ω·cm
シート抵抗: $R_{sh}$	$6.14 \times 10^4$ Ω/sq
コンタクト抵抗: $R_C$	$1.91 \times 10^3$ Ω·mm
伝搬長: $L_t$	31.0 μm
固有接触抵抗: $\rho_c$	0.59 Ω·cm <sup>2</sup>

#### 4.4.2 選択再成長 p<sup>+</sup>-GaN 層による接触抵抗の低減

4.4.1項の効果と組み合わせるため、p-GaN または p-GaInN と金属の界面に選択的にエピタキシャル再成長させた高 Mg 濃度層を挿入することにより接触抵抗を削減する検討を行った。2.3.2 項にて既述したように半導体と金属の界面には仕事関数の違いから障壁が出来ているため、単純に接触させただけでは Schottky 接続になる。界面に p<sup>+</sup>の中間層を挟むことにより、接触抵抗の削減効果を探る。

## ■実験方法

図4-10に検討に用いた試料の構造を示す。図4-10(a)は界面に中間層のないもの、(b)は選択再成長  $p^+$ -GaN 層を設けた試料である。試料は横型 MOCVD 装置(大陽日酸 SR-2000)を用いて、FS-GaN 基板の上に、 $n$ -GaN 300 nm、 $n$ -GaInN 300 nm、In の濃度傾斜を 0→4%つけた  $n$ -GaInN 30 nm、Mg を導入し  $p$  型化させた  $p$ -Ga<sub>0.96</sub>In<sub>0.04</sub>N 100 nm を下から上に成膜した。また、MOCVD 原料には、TMG、TMI を III 族原料として、NH<sub>3</sub> を V 族原料として用いた。また、 $p$  型の不純物ドーピングに Cp<sub>2</sub>Mg を用いた。(a)には抵抗加熱法により Ni/Au を 3/10 nm、(b)には MOCVD 法により 900°C および 1000°C で選択再成長させた  $p$ -GaN/ $p^+$ -GaN 層 30/3 nm を設けたのちにリフトオフ法と EB 蒸着法により Ni/Au を 10/100 nm 形成した。その後、N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> = 4/1 の雰囲気 で 500°C 5 分間アニールを行った。

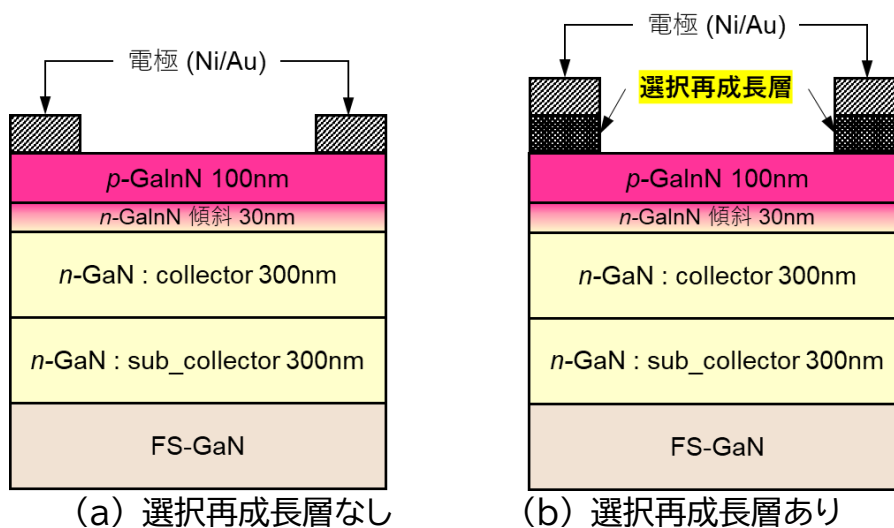


図4-10 従来構造試料(a)と選択再成長層を挟んだ試料(b)の断面概略図

## ■結果と考察

作製したサンプルを XRD 測定による(0002)面付近における  $\omega$ -2 $\theta$  scan を行った結果を図4-11に示す。この結果から、 $p$ -GaInN 層の In モル分率は 0.065 と計算できる。図4-12に  $I$ - $V$  測定結果を示す。選択再成長層を用いることにより接続抵抗の大幅な改善が見込まれることがわかった。HBT の実プロセスに適用する際の懸念点として、emitter 層を 825°C で形成したのちの 1000°C 加熱が必要であ

り、既成構造の再偏析による base-emitter 間の接合特性の劣化や接触抵抗についてはまだ大きく、更なる改善が必要である。

しかしながら、接触抵抗改善の副作用も認められた。図4-13に再成長層がない場合(黒線)と再成長温度を 900°C(青線)、1000°C(緑線)、1160°C(赤線)の場合の base-emitter 間  $p-n$  接合  $J-V$  特性を示したように、再成長温度の上昇に伴い逆方向リークが増加していることがわかった。また、再成長無し(黒線)と比べ ON/OFF 比も減少している。この結果より emitter の成膜温度よりも再成長温度が高い場合には逆方向特性の劣化を招くことが明らかにできた。

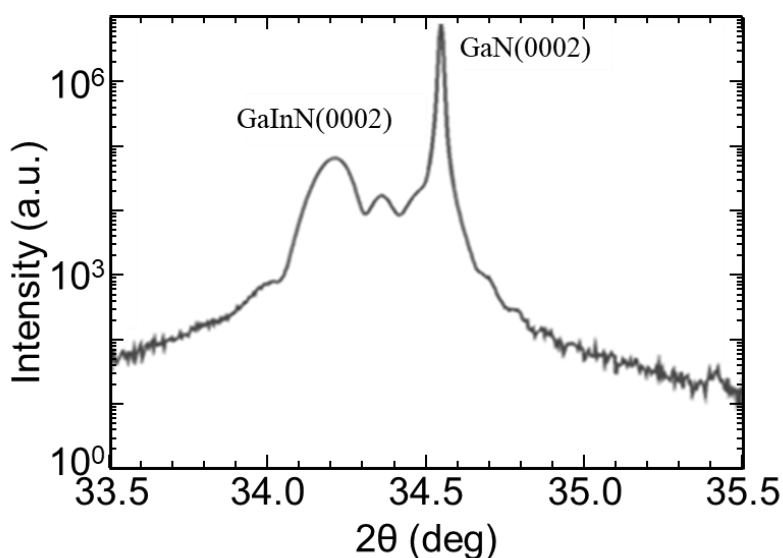


図4-11  $\omega$ - $2\theta$  scan の結果  
(試料 ID N7147 on N7118)

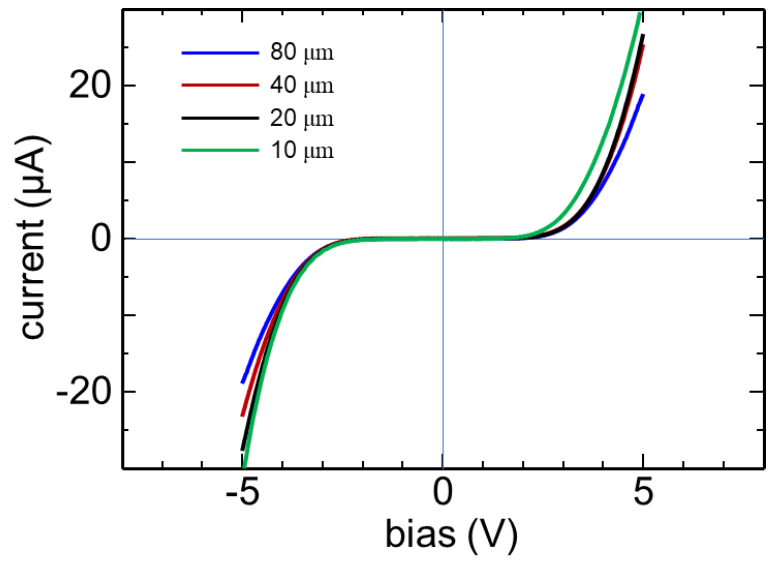


図4-12  $I$ - $V$ 特性 選択再成長  $p^+$ -GaInN 層を挿入した構造の TLM 測定結果 (試料 ID N7147 on N7118)

表4-III  $p^+$ GaN(GaInN)再成長がコンタクト抵抗に与える影響

	再成長なし	$p$ -GaN 900°C	$p$ -GaN 1000°C
コンタクト抵抗 ( $\Omega \cdot \text{mm}$ )	13,320	10,793	1,071

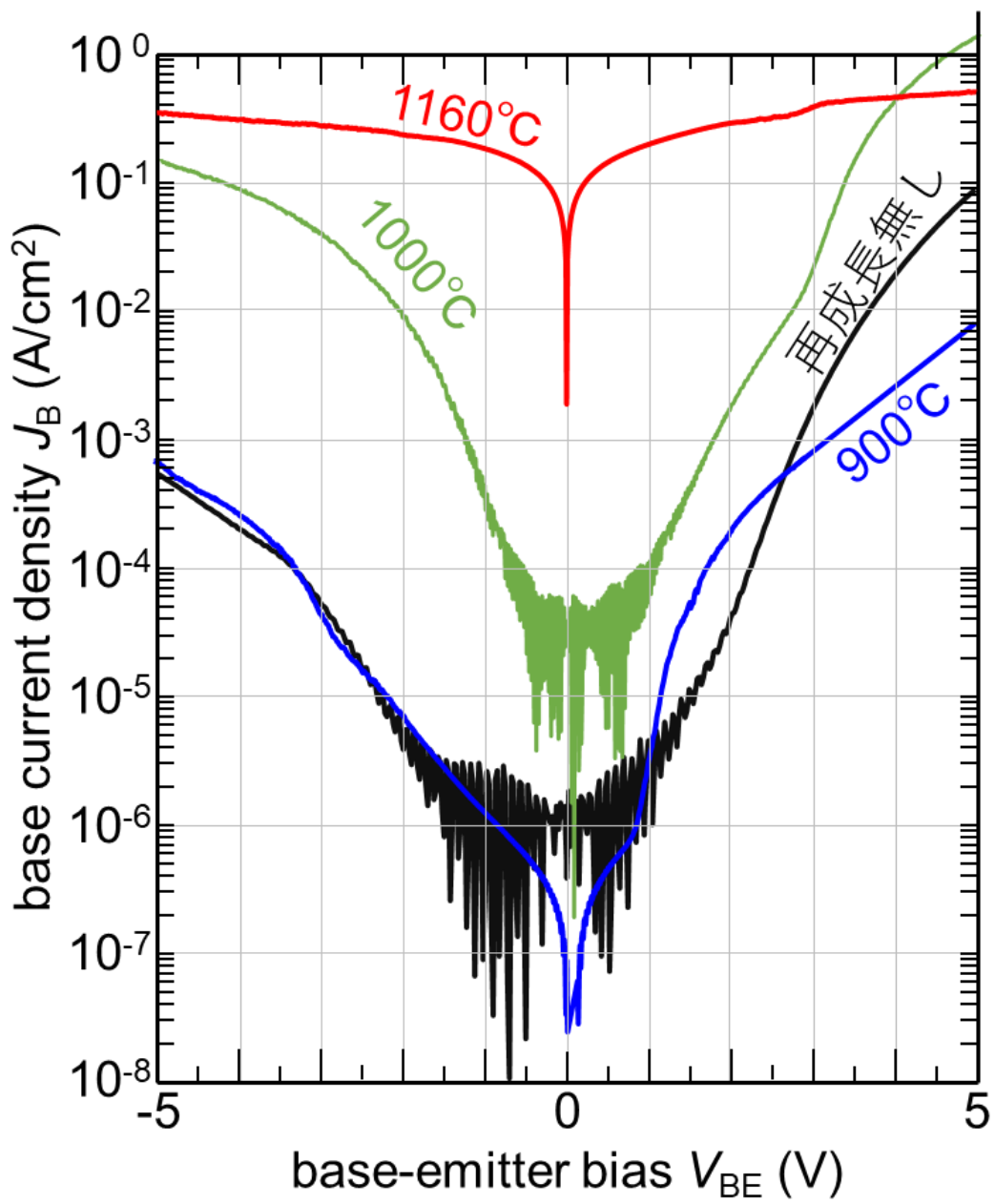


図4-13 base-emitter 間  $p-n$  接合の IV 特性  
 (試料 ID 900°C:N7118、1000°C・1160°C:N7155、再成長なし:N7073)

### 4.4.3 base 上の連続成長 $p^+$ 層の効果

4.4.2項では base と電極の界面に再成長させた  $p^+$ 界面層を設ける検討を行ったが、本項では base の成膜に連続して界面層を成膜する検討を行った。

#### ■ 実験方法

図4-14に断面の概略構造図を示す。試料は横型 MOCVD 装置(大陽日酸 SR-2000)を用いて、下から上に FS-GaN 基板の上に、 $n$ -GaN 300 nm、 $n$ -GaN 300 nm、In の濃度傾斜を  $0 \rightarrow 4\%$ つけた  $n$ -GaInN 30 nm、Mg を導入し  $p$  型化させた  $p$ -Ga<sub>0.96</sub>In<sub>0.04</sub>N 100 nm の順に成膜した。また、MOCVD 原料には、TMG、TMI を III 族原料として、NH<sub>3</sub> を V 族原料として用いた。また、 $p$  型の不純物ドーピングに Cp<sub>2</sub>Mg を用いた。連続して、30nm の  $p$ -GaN 層および Mg を  $1.8 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  含む  $p^+$ -GaN 層を連続的に成長させ、base となる  $p$ -GaInN 層と Ni の中間層を設けた。スパッタ酸化膜を堆積させた後に、emitter 部分を BHF で開口し、四元混晶 AlGaInN を MOCVD にて再成長し、不要な部分をリフトオフ法にて除去。その後、抵抗加熱法により Ni/Au を 3/10 nm を設けたのちに真空蒸着法とフォトレジストによるリフトオフ法により Ni/Au = 10/100 nm の TLM 電極を形成した。その後、N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> = 4/1 の雰囲気では 500°C 5 分間アニールした。

#### ■ 結果と考察

試作・TLM 評価を行った結果、図4-15と表4-IVに示す  $I$ - $V$  特性と値を得た。 $V_{th}$  は 5V 付近にみられるものの、TLM の距離に応じた  $I$ - $V$  特性が得られ、連続で成膜することにより、base と界面層の接合が良好で、かつ複数の素子測定をしても、安定した結果が得られることが分かった。図4-16に B-E 間  $I$ - $V$  特性を前項の  $p$ -GaN 再成長(1000°C)と比較して示す。逆方向特性でリークが抑制されていることが明確にみられ、emitter 成膜後に高温プロセスがないことの効果も支持している。また、emitter と base の界面に高濃度  $p^+$ 層が存在する懸念についての問題はみられない。しかしながら、固有接触抵抗は  $8.37 \Omega \cdot \text{cm}^2$  と大きいため、更なる改善が必要である。

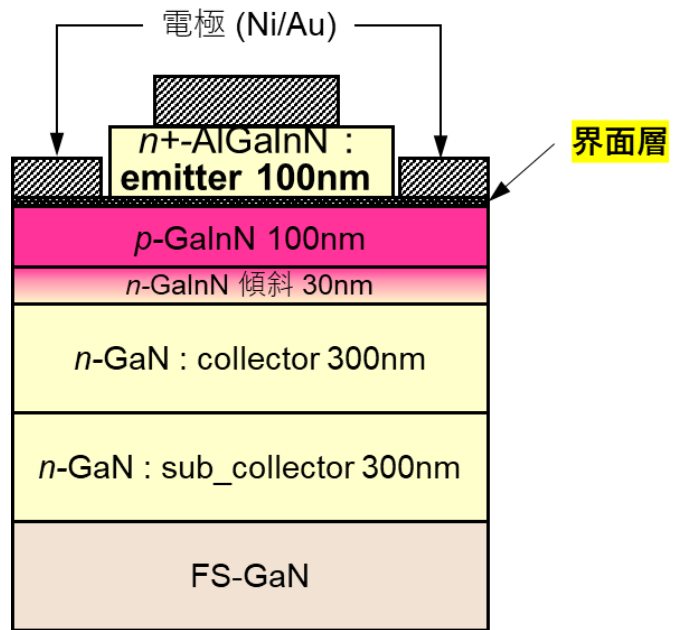


図4-14 TLM 試料断面概略図

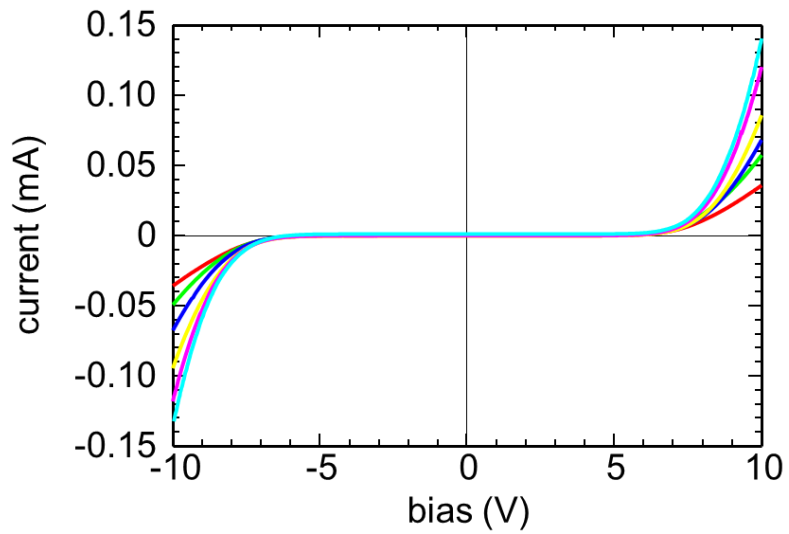


図4-15 TLM測定  $I$ - $V$ 特性  
(試料 ID N7156#2\_A)



表4-IV TLM 特性結果

比抵抗: $\rho$	4.31 $\Omega \cdot \text{cm}$
シート抵抗: $R_{\text{sh}}$	$4.31 \times 10^5 \Omega/\text{sq}$
コンタクト抵抗: $R_{\text{C}}$	$1.90 \times 10^4 \Omega \cdot \text{mm}$
伝搬長: $L_{\text{t}}$	44.0 $\mu\text{m}$
固有接触抵抗: $\rho_{\text{C}}$	8.37 $\Omega \cdot \text{cm}^2$

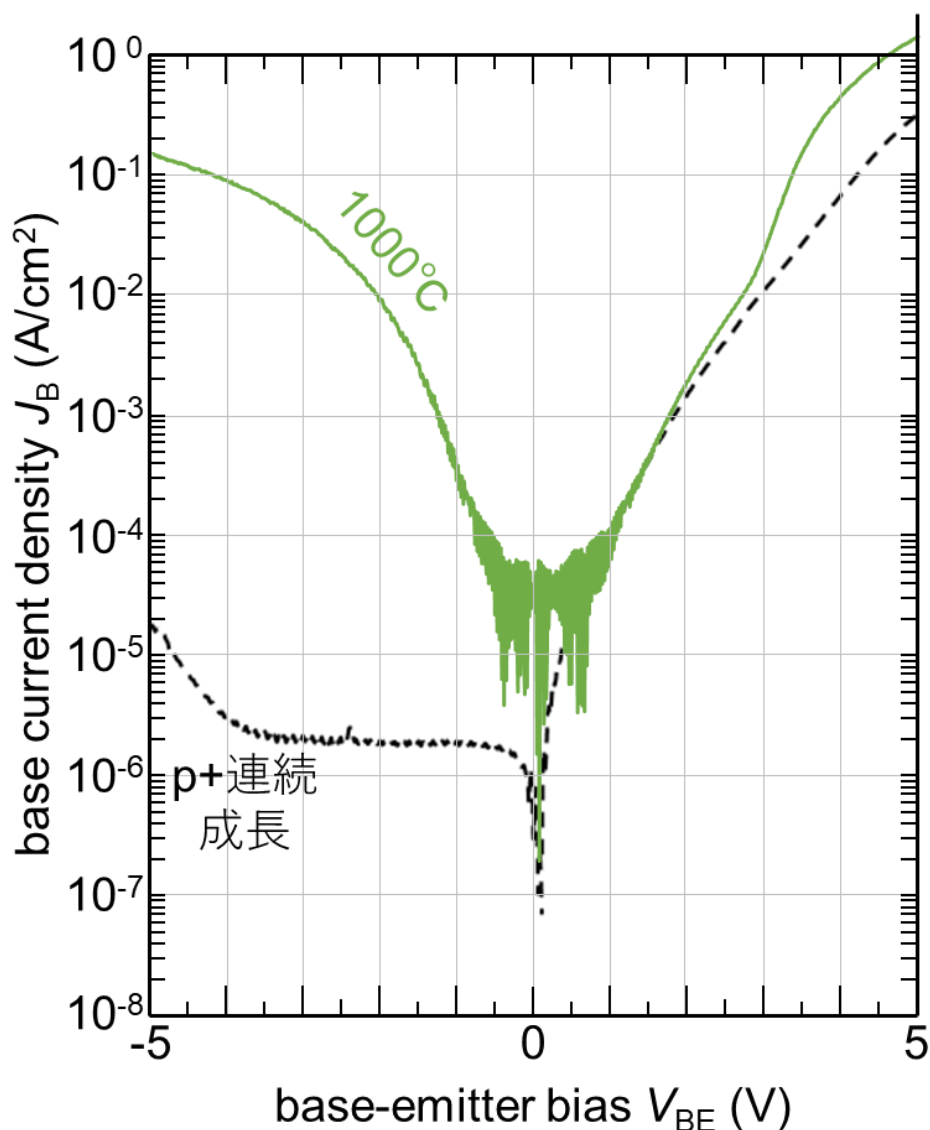


図4-16 base-emitter 間  $p-n$  接合の IV 特性 緑線は前項の  $p$ -Ga $N$  再成長を再掲。(1000°C)。点線は本項の  $p+$ 連続成長で得た B-E 間の  $I-V$  特性。  
(試料 ID 1000°C:N7155、 $p+$ 連続成長:N7156 #2\_A)

#### 4.4.4 Mg の固相拡散による接触抵抗の低減

古典的な半導体プロセスの一つに固相拡散がある。これはドーパントを含む層を拡散したい層に密着または近接させて加熱することにより、ドーパントを拡散させる方法である。Y. Ito らは、Mg/Ni/Au なる電極構造を提案しており、Mg を成膜した後に Mg を熱拡散させ、薬液処理の後に Ni/Au を成膜する工程と構造を提案している[7]。しかしながら S. Lu の論文にもあるように Mg は酸化しやすく扱いが難しい為[8]、我々は「RF スパッタで成膜した MgO 膜を拡散源とした Mg の固相拡散」を考案した。プロセスの安定性に富むだけでなく、エピタキシャル成長でガスから Mg を取り込んだ場合には Mg-H ペアで膜中に取り込まれるものとは異なり、Mg 単体で GaN の結晶ネットワークに取り込まれる別のメカニズムが可能ではないかと考えている。

##### ■ 拡散係数の把握

図4-17に示す構造を作り、SIMS 測定により Mg の拡散プロファイル調べた。FS-GaN 基板の上に MOCVD により undoped-GaN を 300nm 成長させた後に *p*-GaN を 1000nm (N7202)、HBT の base を模した GaInN を 200nm (N7203) 成膜した。その表面に RF スパッタに設置した MgO ターゲットから MgO を Ar ガス 12 sccm、プラズマ出力 100W、0.5 Pa で 50nm 成膜 (図4-17(a))。引き続き熱アニール炉により 800°C / 60 分間で Mg の拡散を行った。その後、BHF に 15 分間浸漬して固溶源の MgO 膜を全て剥離した(図4-17(b))。

図4-18に2つの試料の SIMS 測定による Mg プロファイルと拡散方程式からフィッティングした計算結果を示す。グラフの横軸は試料表面からの距離、縦軸は Mg 濃度 ( $[C_{Mg}]$ ) で、実線が *p*-GaN (N7202)、点線が *p*-GaInN (N7203) への拡散プロファイルである。拡散方程式より導いたシミュレーション結果を図4-18に *p*-GaN (白丸)、*p*-GaInN (黒丸) で示す。拡散方程式[9-11]:

$$C(x, t) = C_S \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right), \quad (4-1)$$

より求められた  $C_s$  と  $D$  は以下の通りである。ここで、 $C(x,t)$  は表面からの距離： $x$  と拡散時間： $t$  による濃度を表す。 $C_s$  は固溶源の Mg 濃度、 $D$  は拡散係数である。シミュレーションの結果として、 $C_s$  と  $D(800)$  は以下の値を得た。

$$C_s(\text{GaN}) = 1.40 \times 10^{21} \text{ (cm}^{-3}\text{)}, \quad (4-2)$$

$$D(800^\circ\text{C\_GaN}) = 2.00 \times 10^{-15} \text{ (cm}^2\text{/sec)}, \quad (4-3)$$

$$C_s(\text{GaInN}) = 1.40 \times 10^{21} \text{ (cm}^{-3}\text{)}, \quad (4-4)$$

$$D(800^\circ\text{C\_GaInN}) = 1.30 \times 10^{-15} \text{ (cm}^2\text{/sec)}, \quad (4-5)$$

SIMS プロファイルとシミュレーションの Mg プロファイルには表面付近で乖離がみられる。GaN では表面より 75nm 付近まで、GaInN では表面より 45nm 付近まで Mg、Ga、N、などからなる混晶類の存在を推定している。この表面層の電気的特性如何で表面処理の必要性を判断する必要がある。

構造設計として、Mg 濃度が濃い領域は表面より 100nm 以下で、MOCVD にてドーピングしたレベル ( $p$ -GaN では  $5.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、 $p$ -GaInN では  $1.3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) に達するアニール条件を求める。SIMS と拡散方程式の計算結果より求めた拡散時間は 20 分間であることがわかった。

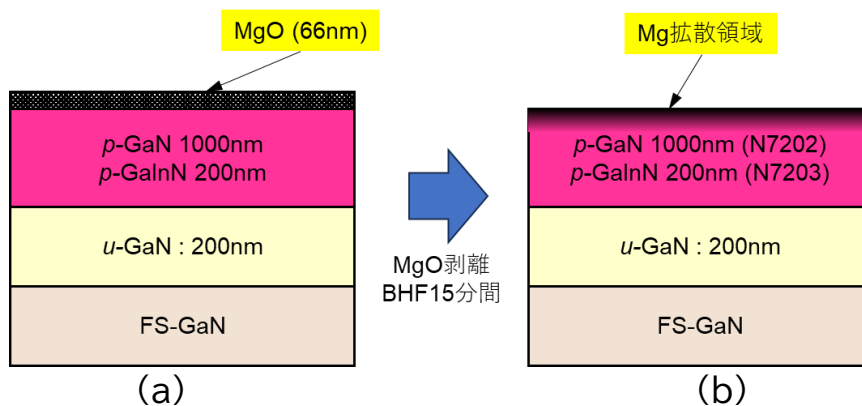


図4-17 試作の断面構造概略図

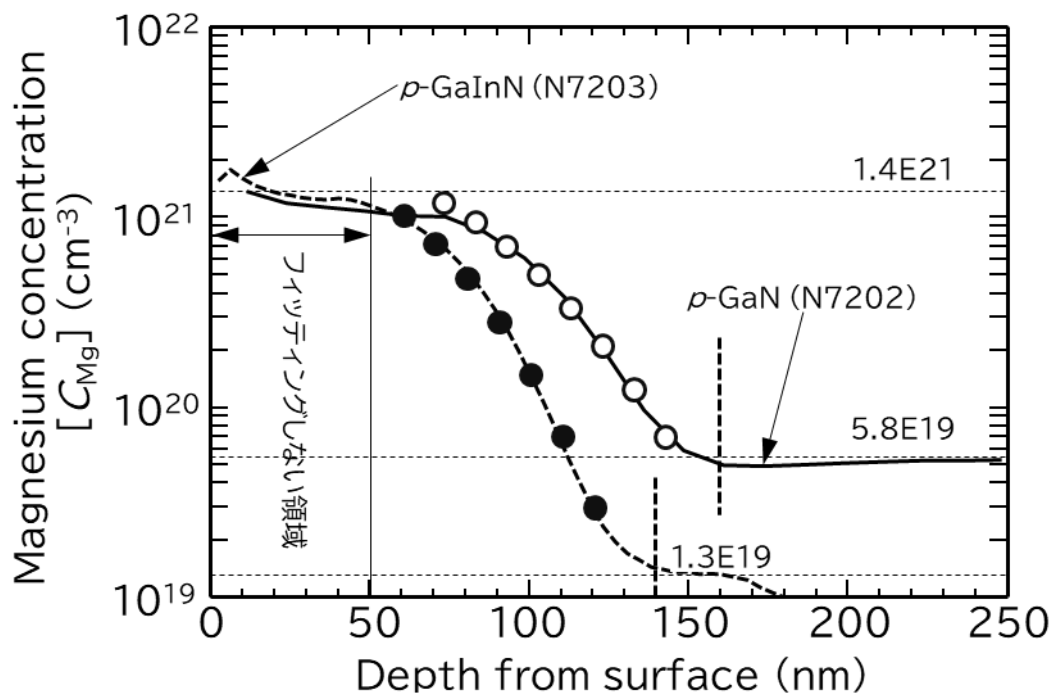


図4-18 SIMSによるMgプロファイルとシミュレーション結果

#### ■ 接続特性評価の実験方法

FS-GaN基板上にMOCVDにより $p\text{-GaN}$ を1000nm、HBTのbaseを模したGaInNを200nm成膜した試料を用いた。作製は①RFスパッタに設置したMgOターゲットからMgOをArガス12 sccm、プラズマ出力100W、0.5 Paで66nm成膜する。②熱アニール炉により800°C 20分間の拡散を行った。その後、③BHFに15分間浸漬して固溶源のMgO膜を全て剥離した。最後にリフトオフ法と蒸着法により、Ni/Au = 10/100nmの電極を付け、その後 $\text{N}_2/\text{O}_2 = 4/1$ の雰囲気中で525°C 5分間アニールし、室温にてCTLM法による評価を行った。

#### ■ 実験結果と考察

CTLM測定の結果を表4-Vに示す。その結果、図4-21に示すように、オーミック特性の改善が見られた。具体的な数値は表4-Vに示すようにコンタクト抵抗値は $9.72 \times 10^1 \Omega \cdot \text{mm}$ 、固有接触抵抗は $3.30 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ であった。加えて伝搬長も小さく、良好な接続が可能であることを示している。図4-19に素子の動作電圧付近である $\pm 5\text{V}$ で測定したCTLMの結果を、図4-20に $\pm 100\text{mV}$ で測定し

た CTLM の結果を示す。測定電圧が増えることにより接続界面でのドリフト電流が流れるために非線形で固有接触抵抗が低めに算出されるが、 $\pm 100\text{mV}$  では完全な線形特性のオーミックが観察されるため、本接続構造・方法の有効性が確認できた。

表4-V CTLM 特性

	<i>p</i> -GaN	
	$V = \pm 5\text{V}$ 測定	$V = \pm 100\text{mV}$ 測定
比抵抗: $\rho$	$2.86 \Omega \cdot \text{cm}$	$16.9 \Omega \cdot \text{cm}$
シート抵抗: $R_{\text{sh}}$	$2.86 \times 10^4 \Omega/\text{sq}$	$1.69 \times 10^2 \Omega/\text{sq}$
コンタクト抵抗: $R_{\text{C}}$	$9.72 \times 10^1 \Omega \cdot \text{mm}$	$5.91 \times 10^2 \Omega \cdot \text{mm}$
伝搬長: $L_{\text{t}}$	$3.40 \mu\text{m}$	$3.49 \mu\text{m}$
固有接触抵抗: $\rho_{\text{C}}$	$3.30 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$	$2.06 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$

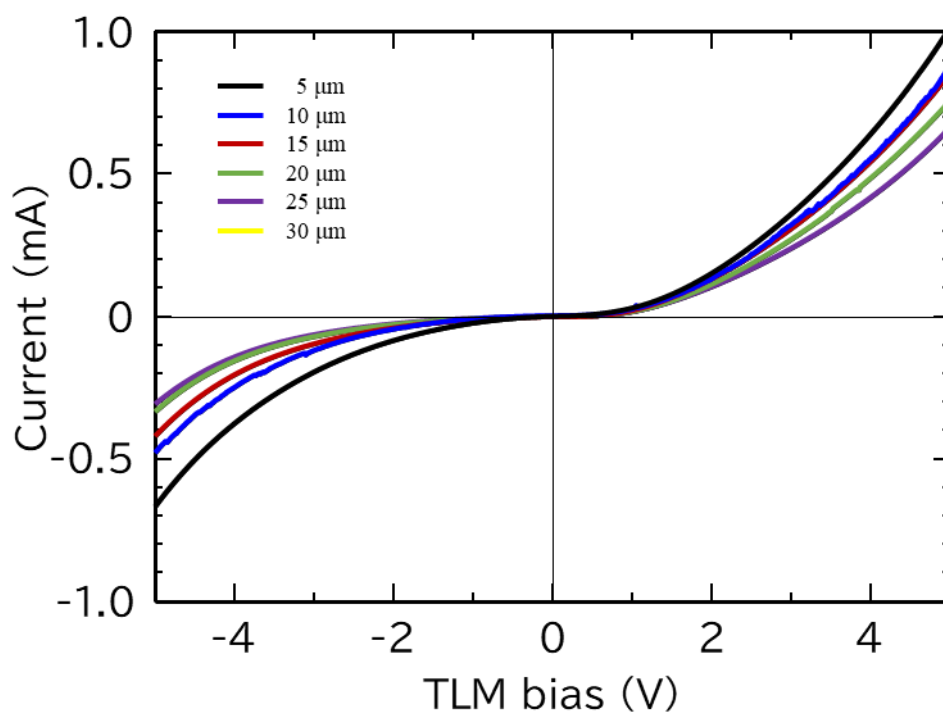


図4-19 CTLM 測定結果 ( $V = \pm 5\text{V}$ )

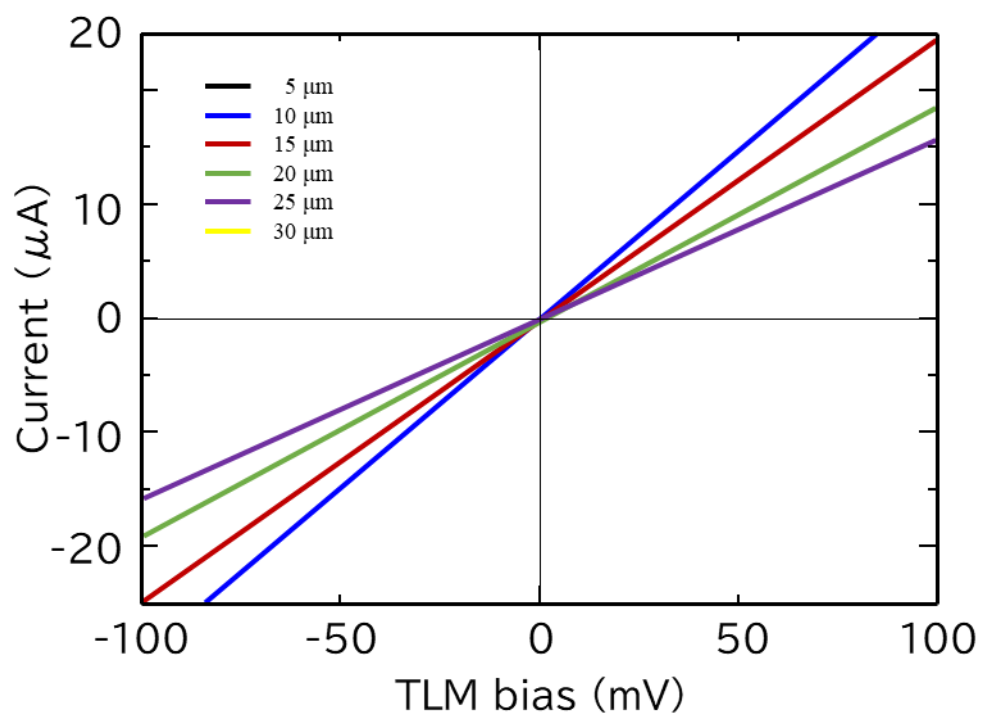


圖4-20 CTLM 測定結果 ( $V = \pm 100\text{mV}$ )

#### 4.4.5 base コンタクト低抵抗化検討のまとめ

Base コンタクトの低抵抗化について3つの試みを行った。(a) base と金属電極の間に  $p^+$ -GaN 層を選択再成長させる、(b) base 成長後に連続的に高濃度の  $p^+$ -GaN を成長させる、(c) MgO スパッタ膜からの Mg 拡散による表面高濃度層の形成である。各々の TLM の結果を表4-VI に示す。

この結果より、それぞれの接続抵抗と固有接触抵抗は、「(a)  $p^+$ 層再成長： $2.05 \times 10^4 \Omega \cdot \text{mm} / 13.0 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 」 $>$ 「(b)  $p^+$ 層連続成長： $1.90 \times 10^4 \Omega \cdot \text{mm} / 8.37 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 」 $>$ 「(c) Mg 拡散： $9.72 \times 10^1 \Omega \cdot \text{mm} / 3.30 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 」となり、明らかな有意差があることがわかった。Ni 電極が接する素子界面の Mg 濃度に大きな差はないにも関わらず大きな差がでた理由は、これらの構造が作られる工程にあるのではないかと推定している。つまり、(a)は複数の工程を経たのちの  $p^+$ 再成長であり、(b)は連続成長であるが、層としての界面を有している。(c)は Mg の固相拡散であるために全く界面が存在しない。界面に存在するダングリングボンドや不純物等の界面準位による障壁が存在するためではないかと考えた。そこで界面準位が無い場合と設けた場合のシミュレーションで比較し、そのメカニズムと理由を探る。

#### ■ 試行方法

図4-23に示すように、(a)は  $p$ -GaN 再成長を模した界面に界面準位を設けたものの、(b)は  $p$ -GaInN /  $p$ -GaN の連続成長、(c)は Mg の固相拡散を模した界面に準位が無いものの3通りで計算を進める。ダイオード構造をなし、上部電極をアノード、下部電極をカソードと称する。なお、実際の界面準位の絶対値は不明の為、(a)では一般的な  $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、(b)では一桁少ない  $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 、(c)では界面準位が無いもの、と仮定して実施した。試行に用いたシミュレーションプログラムを Appendix 4 に添付する。

#### ■ 結果と考察

図4-24に計算結果を示す。この図は横軸がアノード電位、縦軸にアノード電流としている。その結果、界面準位を導入した(a)、(b)の場合には、界面準位の無

い(c)の場合に比べ、電流が抑制されていることが分かる。これは接触抵抗が大きい試作の結果と大小傾向は同一である。この理由を以下に考察する。図4-25は、横軸を電極と  $p^+$ -GaN 層境界面を0とした時の深さ方向の距離、縦軸を価電子帯  $E_V$  のエネルギー準位としたものである。その結果、界面準位が存在する(a)では、下地の  $p$ -GaIn と後から再成長させた  $p$ -GaN の界面に、伝導帯が高エネルギー側に突起し、明らかに正孔の流れの妨げになっていることが分かった。界面はあるが、連続成長のために準位が少ない(b)の場合には突起量は小さく、正孔の流れの妨げの影響も限定的である。さらに(c)では突起がみられず、正孔の流れの妨げとなるバンド構造は見られない。これが抵抗成分の増加要因となって、図4-24に示した抵抗成分の原因であることが示唆された。つまり、工程で作りこまれた層界面に存在する「界面準位」が、コンタクト抵抗を増加させていると考えられる。

表4-VI base 低抵抗化検討の TLM 結果

項目	未処理	(a) $p^+$ 層再成長	(b) $p^+$ 層連続成長	(c) Mg 拡散 GaN
比抵抗 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	-	-	4.31	2.86
シート抵抗 ( $\Omega/\text{sq}$ )	$4.84 \times 10^5$	$3.24 \times 10^5$	$4.31 \times 10^5$	$2.86 \times 10^4$
コンタクト抵抗 ( $\Omega \cdot \text{mm}$ )	$2.05 \times 10^4$	$2.05 \times 10^4$	$1.90 \times 10^4$	$9.72 \times 10^1$
伝搬長 ( $\mu\text{m}$ )	90.5	63.3	44.0	3.40
固有接触抵抗 ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	39.6	13.0	8.37	$3.30 \times 10^{-3}$



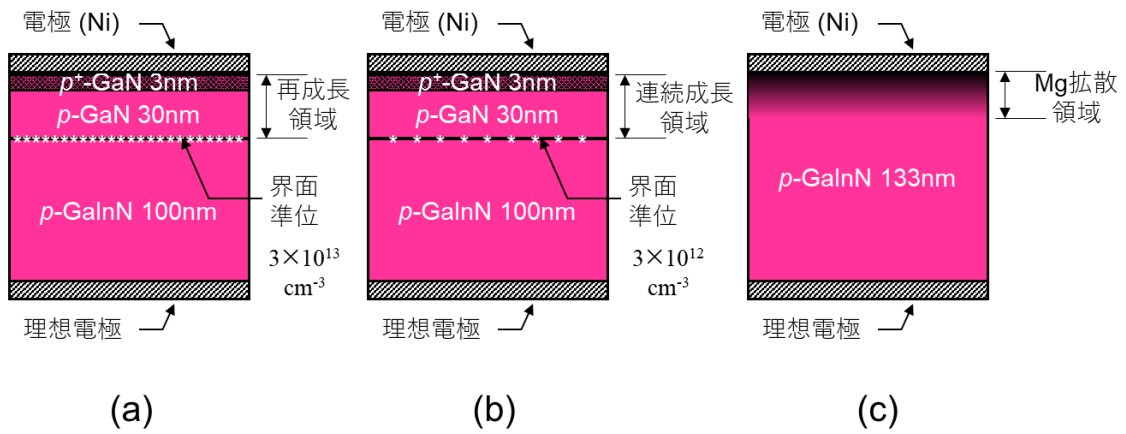


図4-23 シミュレーションに用いた接続部分の構造模式図

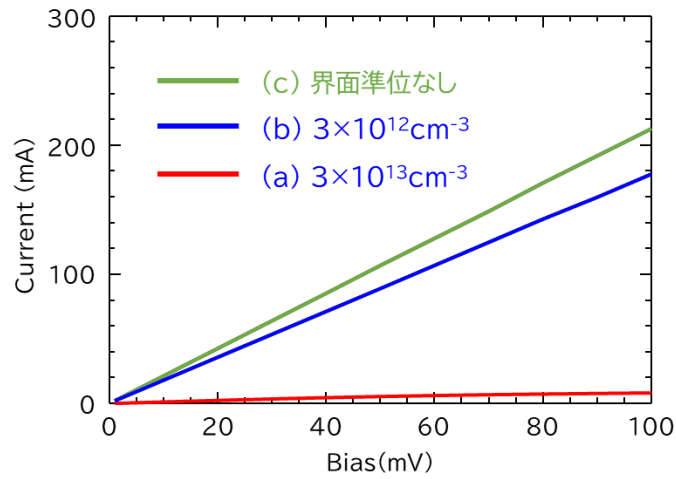


図4-24 電流電圧特性の界面準位密度依存

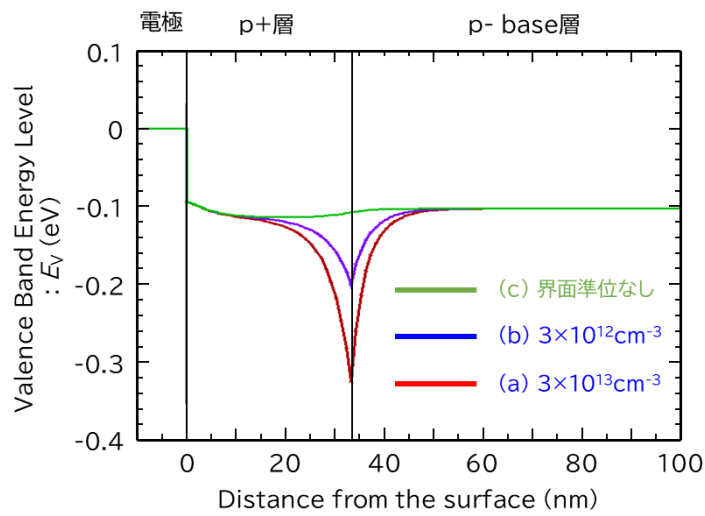


図4-25 価電子帯(バンド図)の界面準位密度依存

## 4.5 HBT 試作とトランジスタ動作の評価

シミュレーションと個別要素研究結果にて求めた HBT 構造諸元に沿った試作を実施し、性能評価を行うことを目的とする。

### 4.5.1 素子構造と諸元

図4-26に素子の断面模式図を示す。また各構造の諸元を表4-VIIに示す。構造は下から上方向に、FS-GaN 基板の上に MOCVD を用いて sub-collector 層としてドナー濃度  $2.9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の  $n^+$ -GaN を 300nm、collector 層としてドナー濃度  $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  の  $n$ -GaN を 300 nm、In 濃度を (0% → 5%) 傾斜を持たせて  $E_g$  を膜厚方向に傾斜させた graded-collector 層を 30 nm、base 層としてアクセプタ濃度  $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の  $p$ -お を 100 nm、emitter 層として、ドナー濃度  $1.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の、四元混晶  $n^+$ -Al<sub>0.41</sub>Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.12</sub>N を 100 nm エピタキシャル成長させた縦型 HBT である。emitter の面積は  $4.9 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$  であり、電流密度はこの面積を基に算出している。また、接続抵抗改善のため、 $p$ -GaInN base 層と取出し電極 (Ni/Au 10/100 nm) の間に、選択的にエピタキシャル成長をさせた  $p^+$ -GaN 層 (30 nm /  $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、2 nm /  $1.8 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ) を挿入している。図4-27に設計時にシミュレーションした HBT のバンド図を示す。B-E 間がヘテロ接合、B-C 間は緩やかに接合させている。

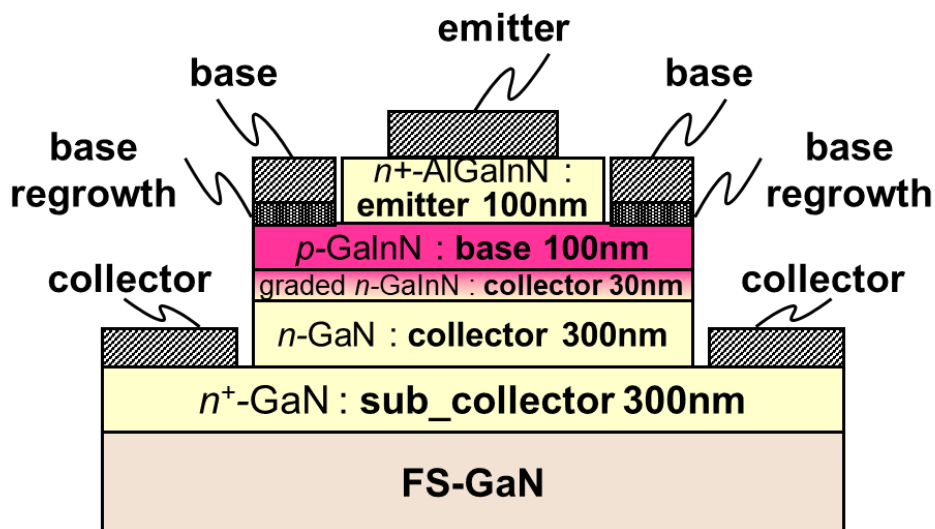


図4-26 試作した HBT の断面模式図

表4-VII HBT 諸元

名称	極性	材料	厚さ (nm)	キャリア濃度 ( $\text{cm}^{-3}$ )
emitter	$n^+$	$\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.62}\text{In}_{0.05}\text{N}$	100	$2.0 \times 10^{19}$
base	$p$	$\text{Ga}_{0.97}\text{In}_{0.03}\text{N}$	100	$4.0 \times 10^{18}$
graded- collector	$n$	$\text{Ga}_{0.97}\text{In}_{0.04}\text{N} \rightarrow$ GaN	30	$5.1 \times 10^{17}$
collector	$n^-$	GaN	300	$2.0 \times 10^{17}$
sub- collector	$n^+$	GaN	300	$2.9 \times 10^{18}$
base- regrowth	$p^+$	GaN/GaN	30/2	$1.0 \times 10^{18}$ $1.8 \times 10^{21}$

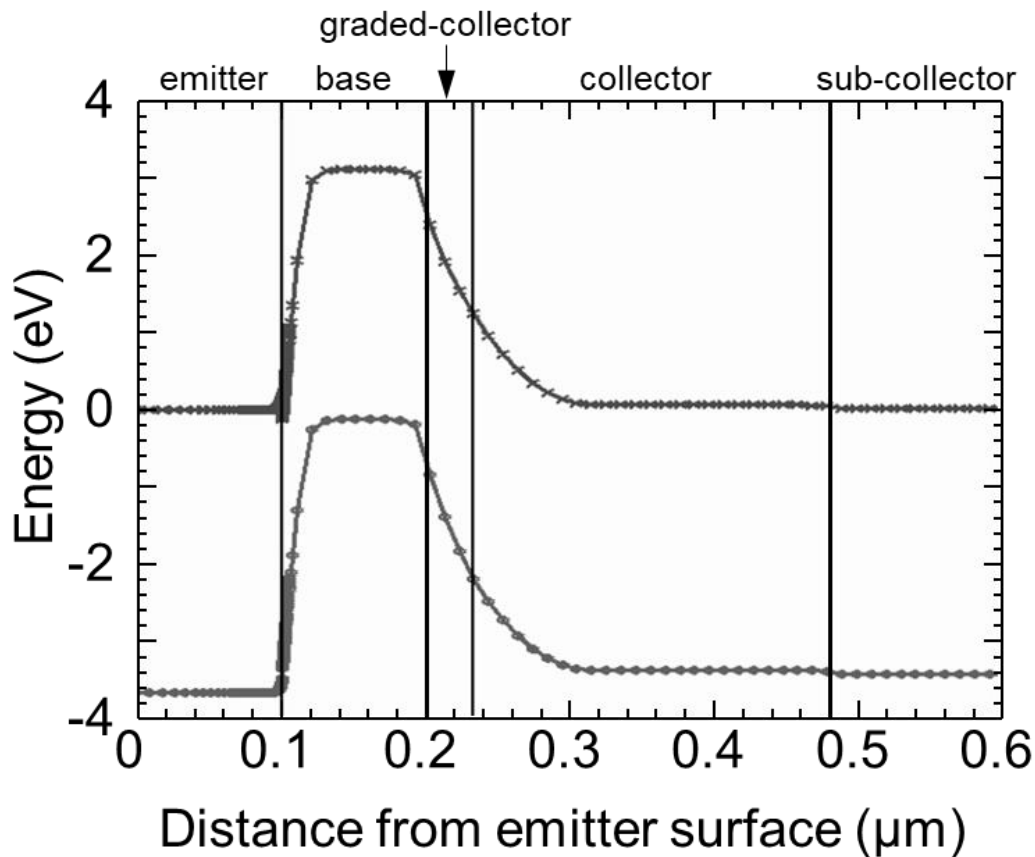


図4-27 試作した HBT のバンド図 ( $V_{CE} = 0 \text{ V}$ ,  $I_B = 0 \text{ A}$ )

#### 4.5.2 試作プロセス・検討方法

FS-GaN 基板の上に、MOCVD 法を用いて sub-collector、collector、graded-collector、base の順に成膜。成膜中に Si および Mg を添加し  $n$  型、 $p$  型それぞれを作り分けられている。フォトリソ工程と  $\text{BCl}_3$  ガスを使った反応性イオンエッチング工程により、base、graded-collector、collector までをパターン分離し、sub-collector 表面を露出。スパッタ成膜した  $\text{SiO}_2$  膜に設けた開口部分に MOCVD 法により emitter を選択成長させた。同じ方法で base 電極を形成する箇所に中間層を  $1000^\circ\text{C}$  で選択成長させた後、リフトオフ法により不要部分の剥離を行った。その後、base 中の Mg を活性化するため窒素中  $775^\circ\text{C}$  でアニールを 90 分行う。最後に電極として、 $n$ -emitter と  $n$ -collector には Ti/Al/Ni/Au 15/60/12/60nm を、 $p$ -base には Ni/Au (10/100nm) を電子ビーム蒸着法により形成する。オーミック性の確保のため  $p$ -base に形成した Ni/Au には、 $\text{N}_2:\text{O}_2 = 4:1$  雰囲気中で  $550^\circ\text{C}$  10 分間のアニールを行った。

素子評価は以下の項目を行った。

(1)  $I$ - $V$  特性評価

- ・ トランジスタ3端子特性: emitter 接地、 $V_{CE} = 0-4V$ 、 $I_B = 100-500$  nA
- ・ 電流増幅率: gummel-plot 特性
- ・  $p$ - $n$  接合特性: B-E 間、B-C 間

(2) オーミック接合特性評価

- ・ 接触抵抗特性: TLM 素子による測定  
(電極間隔 5/10/20/40/80/160  $\mu\text{m}$ )

### 4.5.3 試作結果と考察

#### (1) HBT の電流電圧特性

##### ■ トランジスタ特性

図4-28にトランジスタ3端子測定の結果を示す。  $V_{th} = 1.0$  V 付近から立ち上がり、base 電流信号に応じた変調が collector 電流にみられるトランジスタ特性を示した。  $I_B = 100$  nA、 $V_{CE} = 4$  V での電流密度は約  $2.0$  A $\cdot$ cm<sup>-2</sup> である。 アーリー効果特性がみられることから、collector 側からの空乏層の伸びによる base 幅変調が生じている可能性が高い。 また、図4-29に示した gummel plot から、 $V_{CE} = V_{BE} = 3$  V での電流増幅率  $\beta$  は 64 であった。

直流測定をしているので、ジャンクション温度が上昇して電流が増加している可能性がある。 アーリー効果がみられることから、その分  $I_c$  が加算されている可能性が除けていない。

##### ■ B-E 間、B-C 間の $p$ - $n$ 接合特性

図4-30に B-E 間  $p$ - $n$  接合、及び B-C 間  $p$ - $n$  接合特性を示す。 いずれも整流特性を示すものの、それぞれの  $n$  値は  $V_{CE} = 2V$  の傾きから算出すると  $n(\text{B-E}) = 2.8$ 、 $n(\text{B-C}) = 1.6$  であり、直列抵抗が大きいことを示している。 加えて、逆方向リークが認められる。 推定原因として、emitter の成膜温度が  $825^\circ\text{C}$ 、base 再成長の成膜温度が  $1000^\circ\text{C}$ 、であり、短時間であっても B-E 界面に影響が出ている可能性が考えられる。

## (2) *p*-base – 電極間接続の接合特性

図4-31および表4-VIII に TLM 法による接合特性を示す。再成長させた *p*-GaN 層を挿入した場合、挿入しない場合と比較して接触抵抗が改善できることが確認できた。完全なオーミック接合ではないため、今後も改善を続けるべき課題である。固有接触抵抗 ( $\rho_c$ ) は  $13.0 \Omega \cdot \text{cm}^2$  であった。

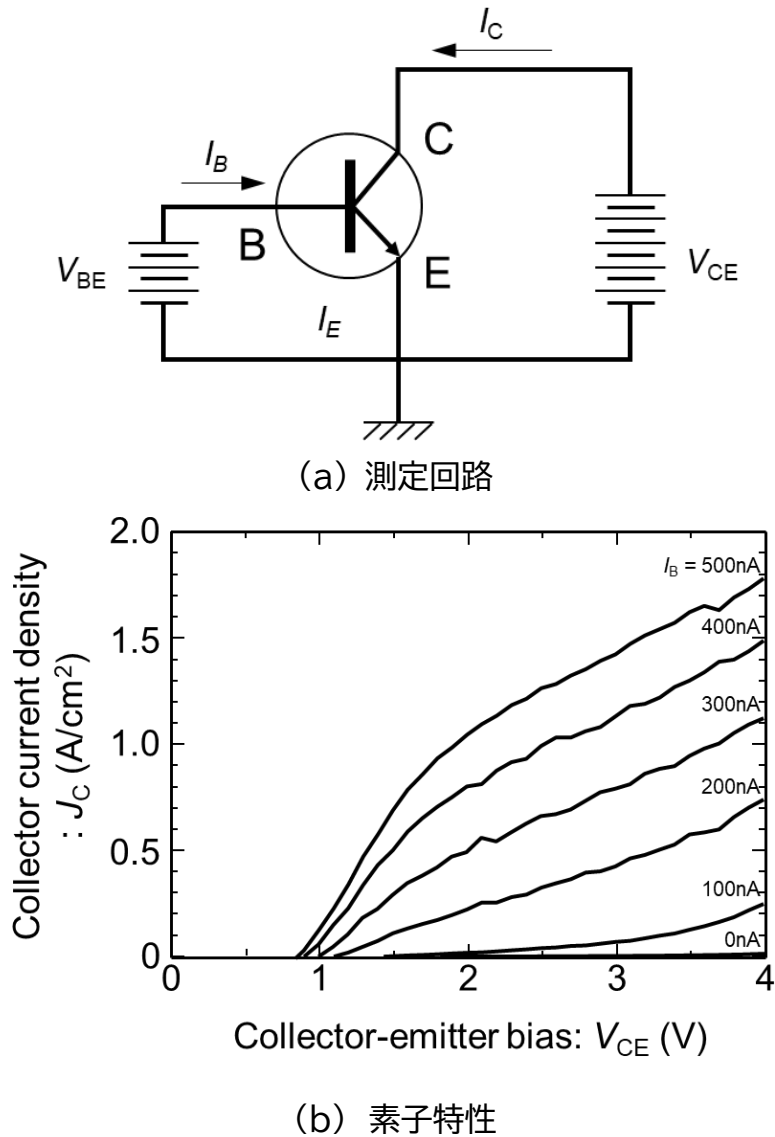
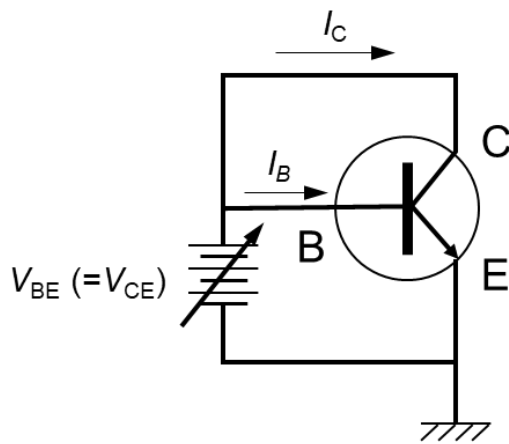
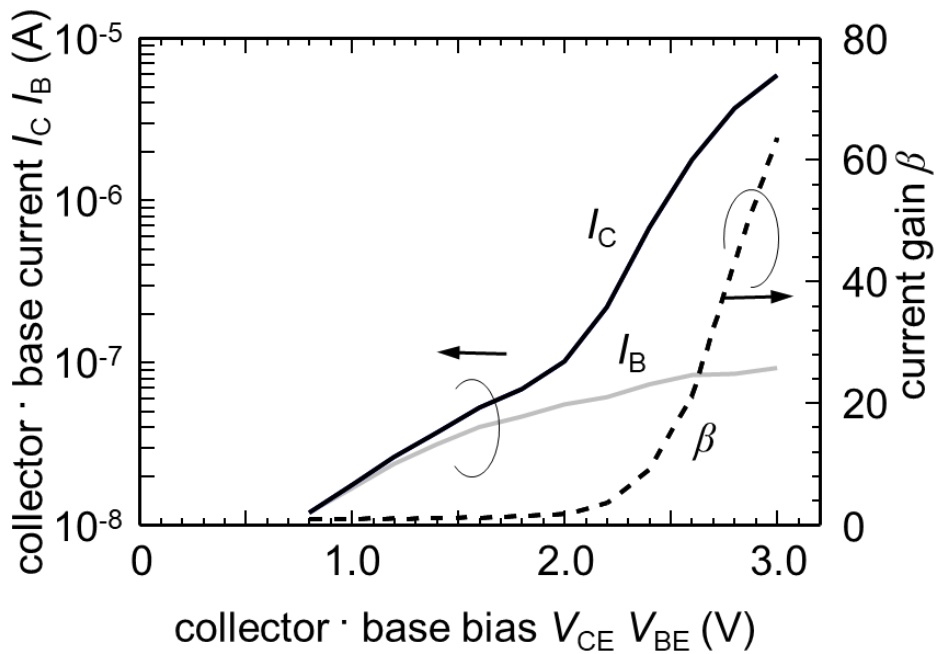


図4-28 測定回路とトランジスタ3端子特性。横軸は collector・emitter 電圧  $V_{CE}$ 、縦軸は collector 電流密度  $J_C$  である。base 電流  $I_B$  は  $0\text{nA}$  から  $100\text{nA}$  ステップで  $500\text{nA}$  まで印加。また電流密度は emitter 面積  $4.9 \times 10^{-6} \text{cm}^2$  ( $\Phi 25\mu\text{m}$ ) にて算出。(試料 ID N7147 on N7118 #2\_f'5)

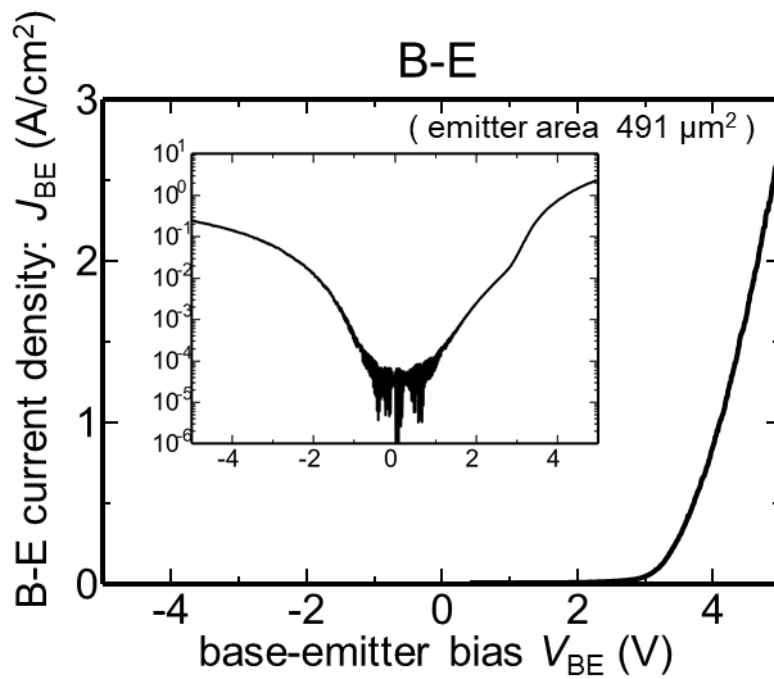


(a) 測定回路

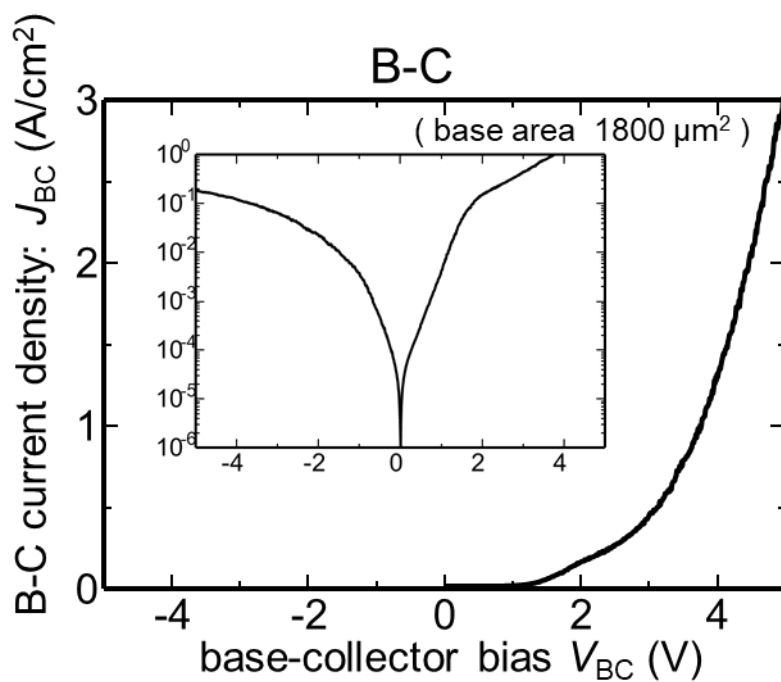


(b) gummel plot

図4-29 測定回路と gummel-plot 横軸は collector  $V_{CE}$ 、電圧と base 電圧  $V_{BE}$ 、縦左軸は collector 電流  $I_C$  と base 電流  $I_B$  である。縦右軸は電流増幅率  $\beta$ 。(試料 ID N7147 on N7118 #2\_f'5)



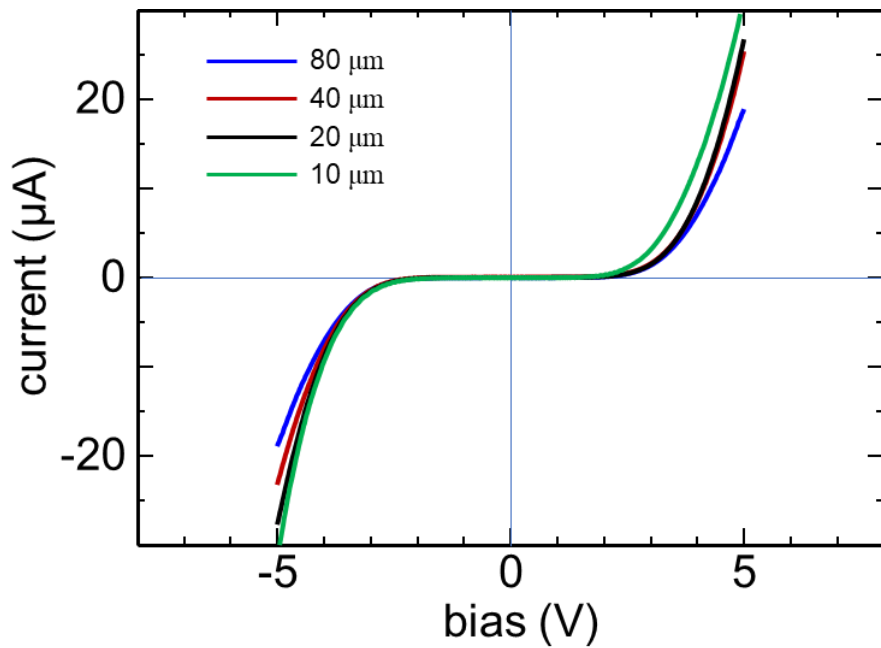
(a) B-E 間特性



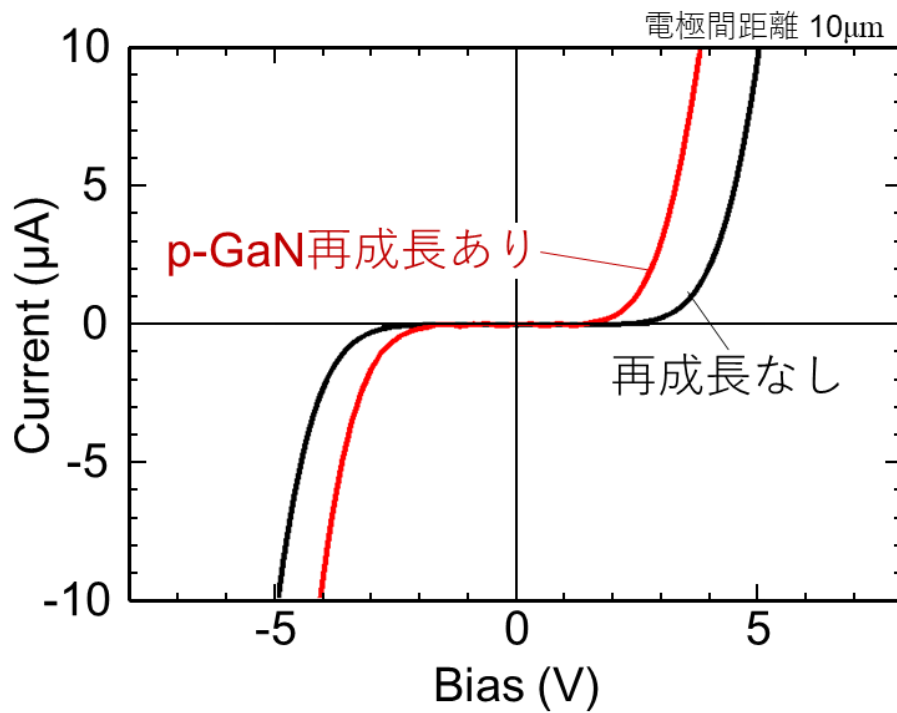
(b) B-C 間特性

図4-30 base-emitter 間  $p-n$  接合、及び base-collector 間  $p-n$  接合特性  
(試料 ID N7147 on N7118 #2\_f'5)





(a) *p*-GaN 再成長層を base と電極間に形成した素子の TLM 特性



(b) *p*-GaN 再成長の有無の比較

図4-31 TLM 法による *p*-GaInN/*p*+GaN/Ni/Au 接続特性の測定結果  
(試料 ID N7147 on N7118 #2\_f'5)

表4-VIII 接触抵抗結果の比較

項目	単位	<i>p</i> -GaInN 再成長有	再成長なし
シート抵抗: $R_{sh}$	$\Omega/sq$	$3.24 \times 10^5$	$4.84 \times 10^5$
コンタクト抵抗: $R_C$	$\Omega \cdot mm$	$2.05 \times 10^4$	$4.38 \times 10^4$
伝搬長: $L_t$	$\mu m$	63.3	90.5
固有接触抵抗: $\rho_C$	$\Omega \cdot cm^2$	13.0	39.6

(試料 ID N7147 on N7118 #2\_f'5)

#### 4.5.4 まとめと今後の進め方

シミュレーションによる構造設計、要素研究で行った base 層の低抵抗化、base 接続の低抵抗化の検討結果を反映させ試作を行った。

その結果、要素技術では、base 層の低抵抗化は GaInN を用いた場合、結晶品質と低抵抗化を両立するものとして、InN のモル分率を 5%とすることで良好な base が得られることがわかった。また、base 電極接続の低抵抗化については、*p*-GaInN base と金属電極 Ni/Au の間に 1000°Cで再成長させた *p*-GaInN を挿入することで固有接触抵抗を約 1/3 に低減出来ることがわかった。

HBT の試作では、 $V_{th} = 1.0$  V 付近から立ち上がり、base 電流信号に応じた変調が collector 電流にみられるトランジスタ特性を示した。 $I_B = 100$  nA、 $V_{CE} = 4$  V での電流密度は約  $2.0$  A $\cdot$ cm<sup>-2</sup> である。アーリー効果特性がみられることから、collector 側からの空乏層の伸びによる base 幅変調が生じている可能性が高い。また、gummel plot から  $V_{CE} = V_{BE} = 3$  V での電流増幅率  $\beta$  は 64 であった。

この HBT 試作を通じて、残留する課題が抽出できた。ひとつは *p*-GaInN base と電極の接続で、接触抵抗特性に完全なオーミック接続が出来ていないことが挙げられる。継続的な探求が必要である。ふたつめは、シミュレーションで求めた特性と実際の試作結果との乖離である。本件については第5章で考察を進める。

## 参考文献

- [1] E. L. Routh, “P-type  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  semibulk templates ( $0.02 < x < 0.16$ ) with room temperature hole concentration of mid- $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  and device quality surface morphology” *Appl. Phys. Lett.* **119** 122101 (2021).
- [2] K. Kumakura, “Activation energy and electrical activity of Mg in Mg-doped  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x < 0.2$ )” *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** (2000) L337.
- [3] L-C. Chen, “Microstructural investigation of oxidized Ni/Au ohmic contact to *p*-type GaN”, *J. Appl. Phys.* **86** (1999) pp. 3826–3832.
- [4] J-K. Ho, “Low-resistance ohmic contacts to *p*-type GaN achieved by the oxidation of Ni/Au films” *J. Appl. Phys.* **86** (1999) pp. 4491–4497.
- [5] L-C. Chen, “Oxidized Ni/Pt and Ni/Au ohmic contacts to *p*-type GaN”, *Appl. Phys. Lett.* **76** (2000) pp. 3703–3705.
- [6] Y. Koide, “Effects of annealing in an oxygen ambient on electrical properties of ohmic contacts to *p*-type GaN” *J. Electronic Materials* **28** 3 (1999).
- [7] Y. Ito, “Substitutional diffusion of Mg into GaN from GaN/Mg mixture”, *Appl. Phys. Express* **15** 116505 (2022).
- [8] S. Lu, “Ohmic contact on low-doping-density *p*-type GaN with nitrogen-annealed Mg”, *Appl. Phys. Lett.* **119**, 242104 (2021)
- [9] S.M. Sze, “Semiconductor Devices Physics and Technology 2nd Edition“ pp405.
- [10] H.C. Casey, "Diffusion in Semiconductors", *Point Defects in Solids*, **2** Plenum, New York, (1975).
- [11] J.P. Joly, "Metallic Contamination of Silicon Wafers", *Microelectron. Eng.* **40** 285 (1998).

## 第5章 差異の整理と考察

### 5.1 はじめに

3章と4章でシミュレーションおよび実験手法により、GaN 系 *npn*-HBT に必要な要件と確認を行ってきた。本章ではそれぞれの結果の差異を整理し、課題原因の追究と対策を考察する。

本章では以下の順で記述を進める。

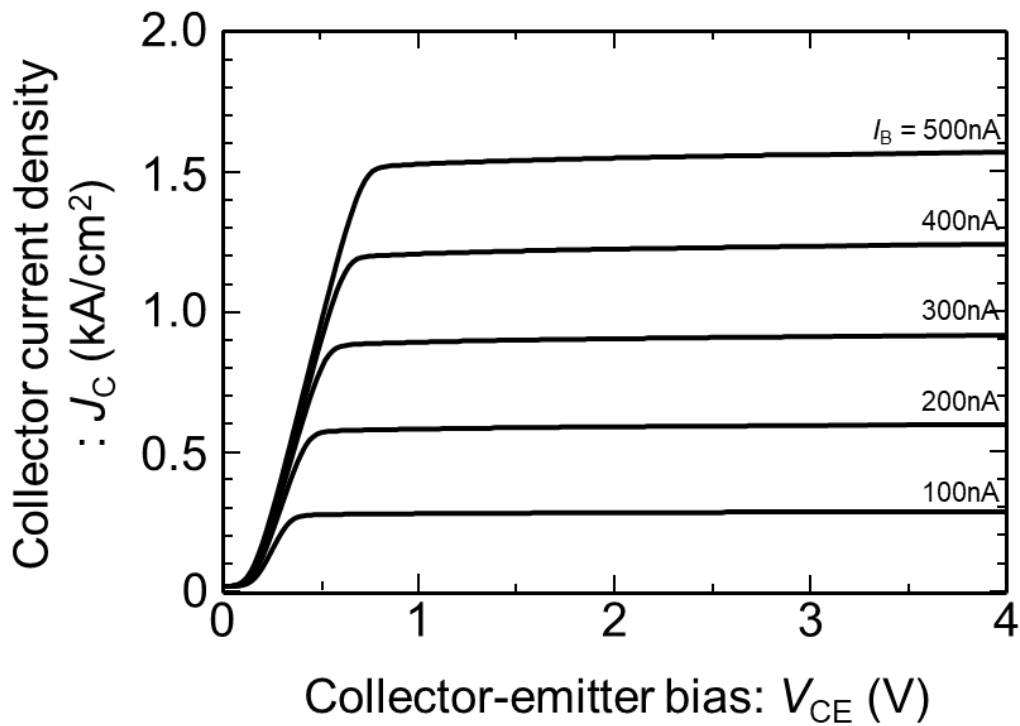
5.2節では差異の整理と原因を推定

5.3節ではシミュレーションに反映させ、原因を特定する。

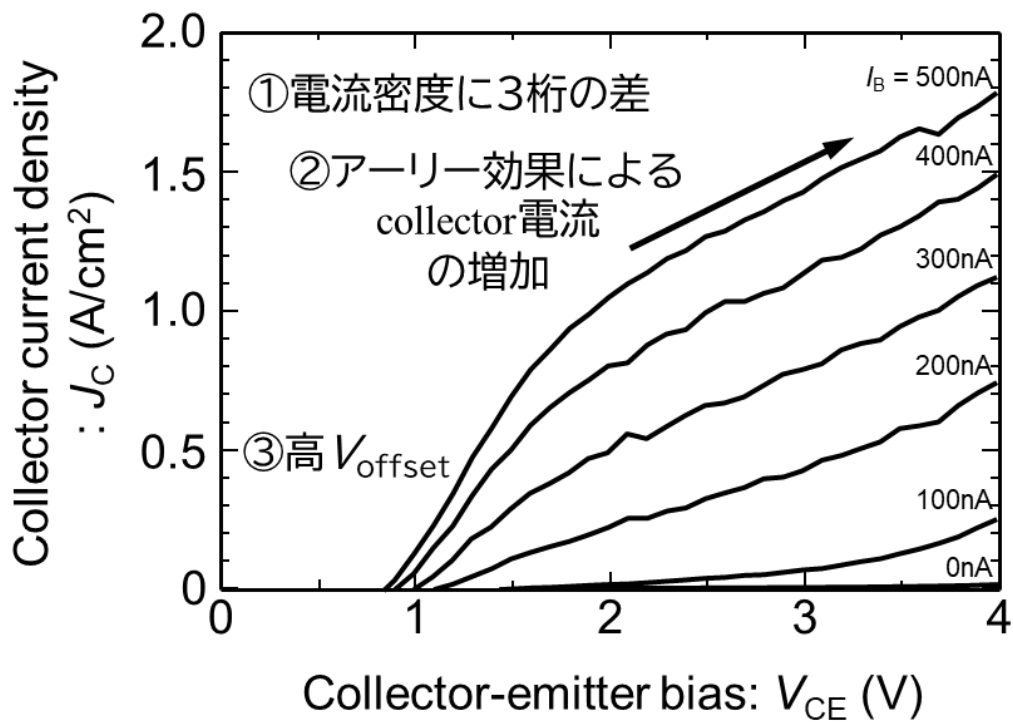
### 5.2 差異の整理と原因の推定

図5-1(a)および(b)に素子構造設計時のシミュレーション結果と試作結果を再掲する。シミュレーション結果では飽和領域と能動領域が明確に現れており、良好な HBT 特性であるが、実試作した素子ではオフセット電圧も高く、また能動領域でも collector 電圧の増加に伴い電流の増加がみられる。顕著な差異は以下の三点である。

- ① 電流密度に3桁の差がある
  - ② 活性領域において collector 電圧の増加に伴い collector 電流が増加する「アーリー効果」が顕著である。
  - ③ collector 電流が立ち上がるオフセット電圧  $V_{\text{offset}}$  が高い
- これらの差異について、以下に考察を進める。



(a) シミュレーション結果



(b) 試作結果

図5-1 HBT 特性のシミュレーション結果と試作結果(再掲)

## 5.2.1 電流密度の差

試作した HBT を測定する際、base 電流  $I_B$  を 0-500 nA (100nA step) に制限した理由は、3. 5. 1項で考察したように、 $I_B$  を増やすことによりパンチスルー状態に到達、かつ base 電流による変調が出来ないため  $I_B$  を 500nA に制限している。結果的にシミュレーションで得られた kA レベルの collector 電流密度を得るための  $I_B$  は投入できていない。基本的には base の  $[N_A-N_D]$  が高く出来ないことが主原因である。図5-2(a)に base 電流  $I_B$  を 0-500 nA (100nA step) で駆動した場合、図5-2(b)に base 電流  $I_B$  を 0-50  $\mu$ A (10 $\mu$ A step) で駆動した場合の静特性をそれぞれ示す。 $I_B$  は 100 倍投入しているが、 $J_C$  の増加は約 10 倍に留まっている。主原因ではあるが、他要因が潜在している可能性が考えられる。

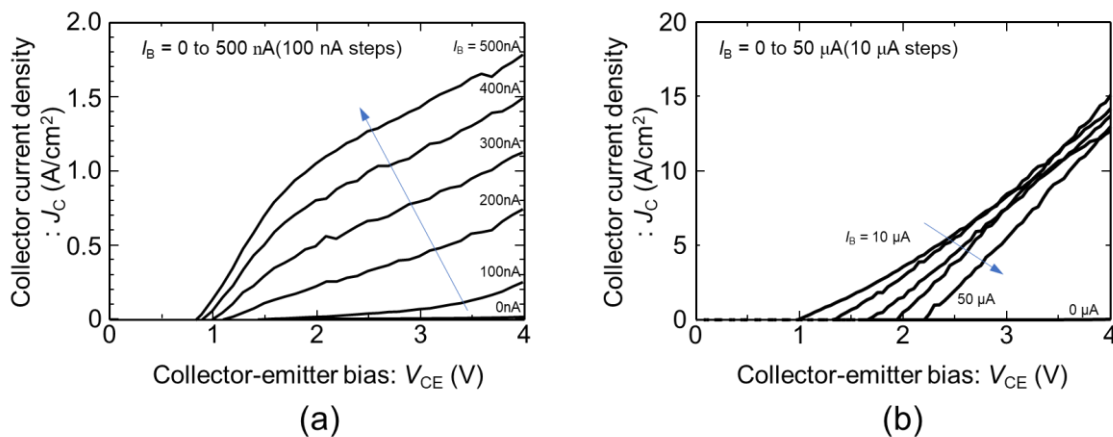
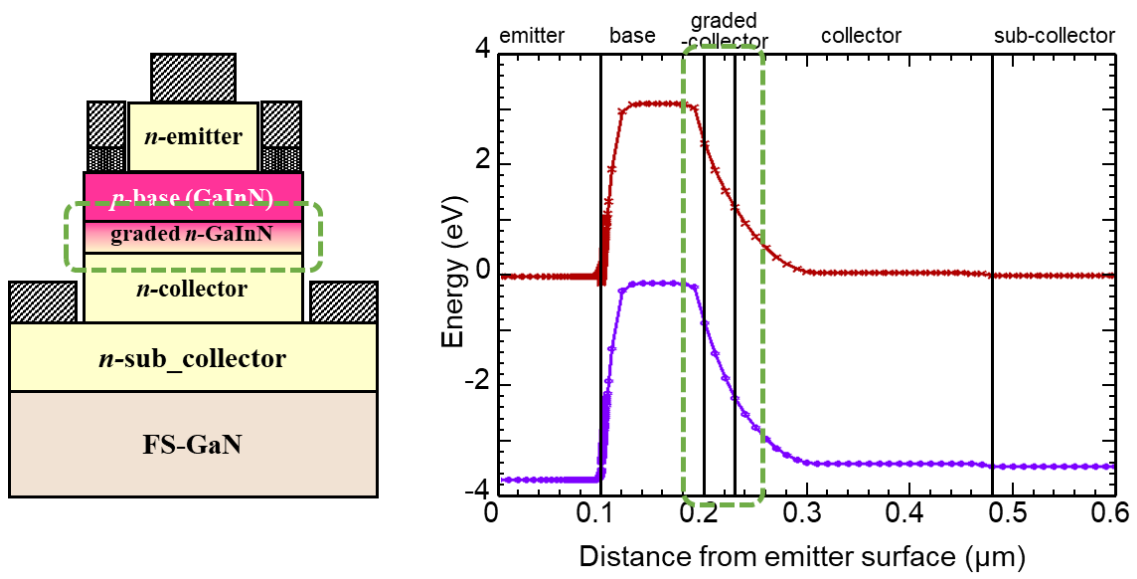


図5-2  $I_B$  を変化させた場合の HBT 静特性の変化

他の要因として、ヘテロ接合の段差に着目した。ヘテロ接合部に段差が存在する場合には、その障壁で電子・正孔の流れが阻害され電流が減衰することを仮定し、2通りの検討を行った。

### ■ Base-collector 間接合部のヘテロ接合

本研究では図5-3(a)の構造と(b)のエネルギーバンド図に示したように base に GaInN を用いており、GaN-collector とのバンドギャップを InN の組成比に傾斜をつけた滑らかな接合の設計としている。この部分に step 接合が存在した場合の  $\Delta E_g$  と collector 電流密度の関係を図5-4に示す。



(a) (b)

図5-3 (a)構造図と (b)エネルギーバンド図

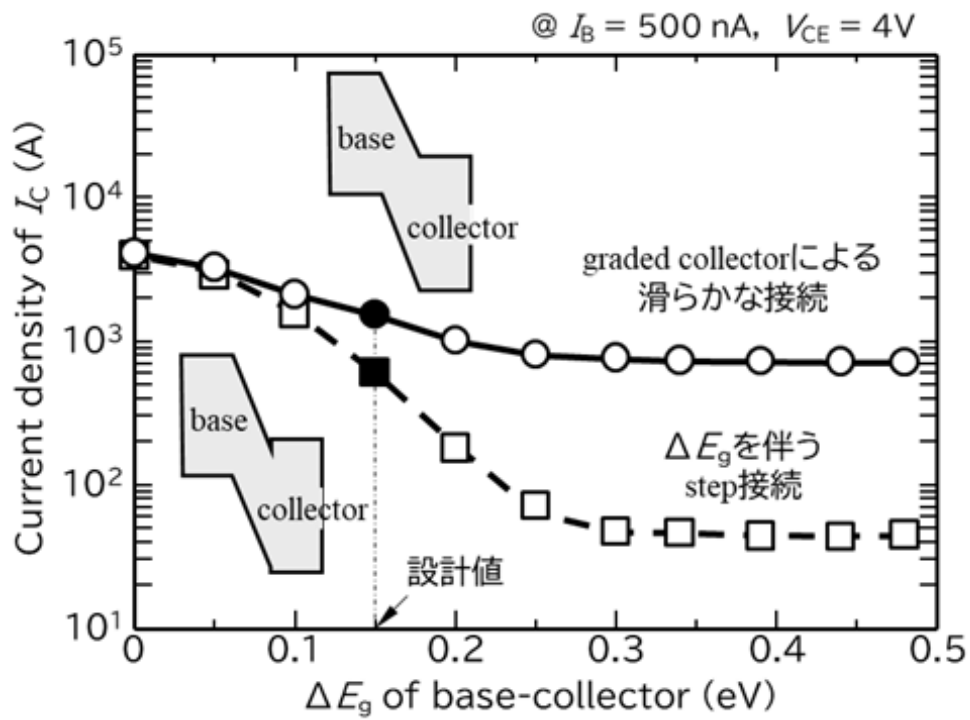


図5-4 collector 電流の B-C 間接続  $\Delta E_g$  依存

ここで○は greded-collector による滑らかな接続、□は step を伴う接続で、0.15eV が設計値である。その結果、collector 電流は減少するものの半減程度の影響である。

## ■ Base-emitter 間のヘテロ接合

本研究では図5-5(a)の構造と(b)のエネルギーバンド図に示したように、base-emitter 間にヘテロ接合を用いている。試作結果の emitter の  $E_g$  が組成比のずれにより設計地である 3.71 eV よりも小さくなった場合の挙動をシミュレーションで考察した結果を図5-6に示す。横軸は collector 電圧、縦軸は collector 電流密度である。グラフは  $I_B = 500$  nA の際の静特性を示している。この結果は emitter の  $E_g$  が base よりも大きい場合には kA オーダの電流密度が確保されているのに対し、大小関係が逆転するに従い電流密度が桁落ちして減少する状態が観察された。

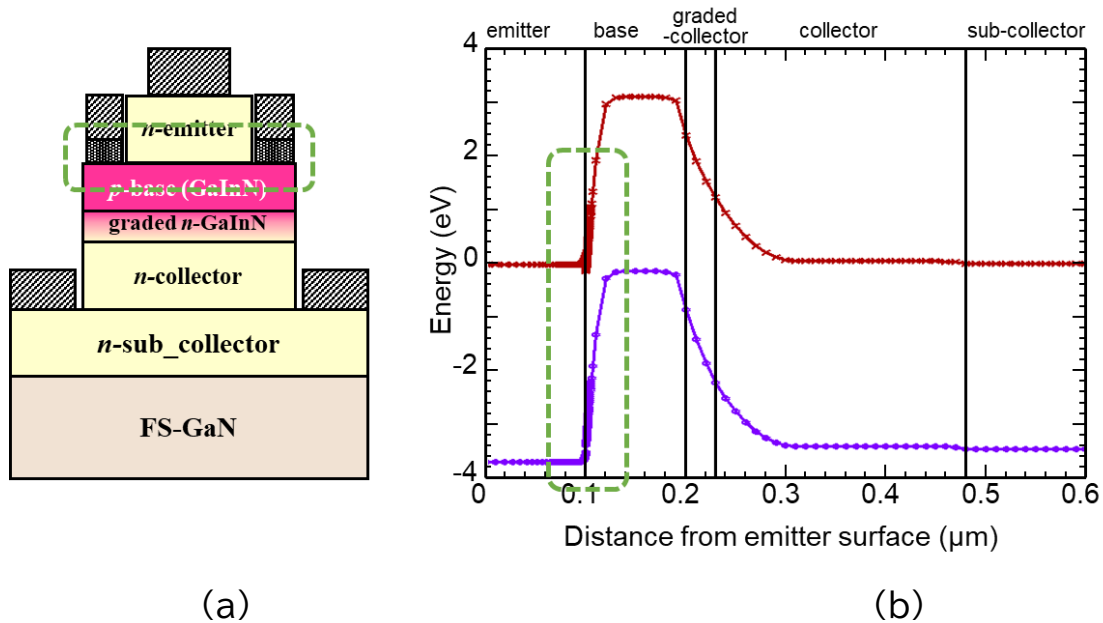


図5-5 (a)構造図と (b)エネルギーバンド図



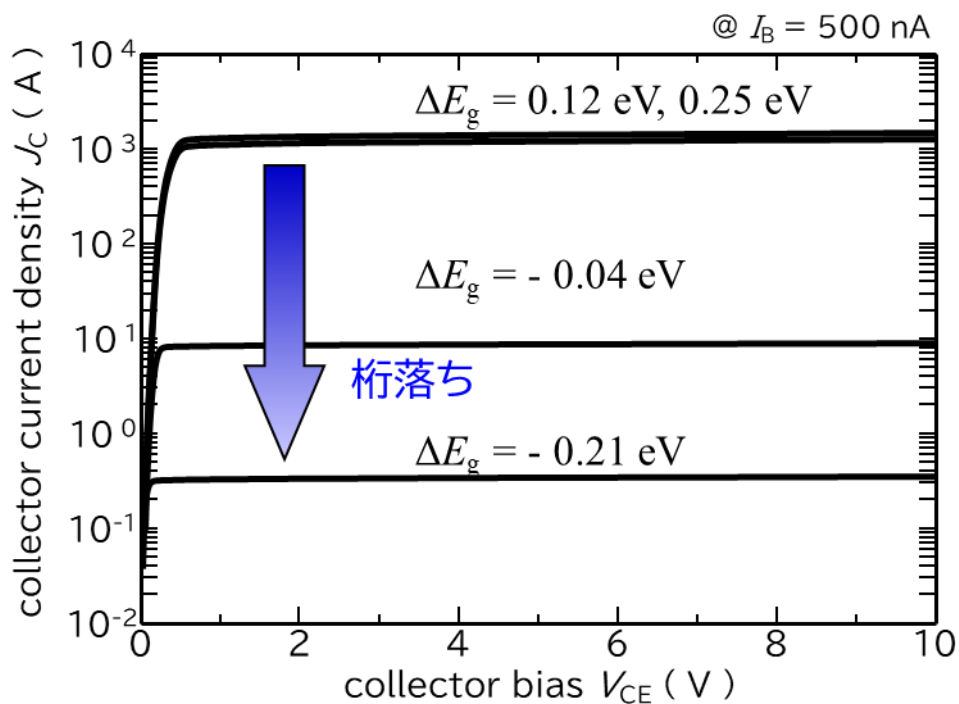


図5-6 collector 電流密度の B-E 間  $\Delta E_g$  依存

### 5.2.2 アーリー効果が顕著

着目点のひとつとして、*p*-GaN の持つ課題の一つに Mg の活性化がある。活性化は単に Mg を結晶の Ga サイトに取り込むだけでなく、Mg-H の水素を取り除くことに重点が置かれている。これについて中村らは、『400°C以上で NH<sub>3</sub> が解離して生成する原子状水素が正孔補償機構に関係していることを示している』と報告している[1]。また成田らは、『サイトにある水素だけでなく、格子間に存在する水素原子も正孔を補償してしまうため、Mg ドープ層からの除去が重要である。*p*-GaN 表面が覆われていた場合には水素原子の除去が困難になる。逆に *p*+キャップ層などの存在は、*p*+/*p*-接合にかかる電界により、*p* 型層からの H 原子の効果的かつ迅速な除去を可能にする』と報告している[2]。また W. Götz らは、『熱処理により抵抗率は 6 桁減少し、*p* 型伝導は活性化エネルギー 170 meV のアクセプタによって支配されることがわかった。このアクセプタは GaN 格子の Ga を Mg で置換したものであり、その活性化過程は電氣的に不活性な Mg-H 錯体の解離と一致する』と報告している[3]。いずれの報告も emitter 成膜時に NH<sub>3</sub> によって不活性化された

*p*-GaN 層中の Mg を活性化するために、如何に水素原子を脱離させるかが重要なことに着目したものである。さらに HBT の場合、水素離脱による Mg 活性化のプロセスは構造上 emitter を形成したのちに行われるため、emitter 直下の水素脱離が困難である課題を有している[1]、[4-6]。また我々の実験で得た結果も上記報告を裏付けるものとなっている。図5-7は逆方向リークと(a)emitter 面積と(b)emitter 円周長さとの相関を示すデータである。もし結晶欠陥起因であれば(a)の面積に一次比例、周辺の加工ダメージや表面伝導であれば(b)emitter 円周長さに一次比例する筈であるが異なる。消去法ではあるが、emitter 直下にある base 層内の水素は、emitter 端部からしか水素の離脱が起きず、面積の大きな HBT 素子は emitter 中央部に水素が多く残留していることを支持するものである。それによって emitter 中央部はアクセプタキャリア濃度 $[N_A-N_D]$ が低く、B-E 間の *pn* 接合が不完全で、リーク電流が増加していると推察した。

図5-8(a)は活性化アニール前の状態と(b)アニール途中を想定した断面概略図である。emitter 直下の領域の水素は emitter 端部からのみ外方拡散すると仮定として拡散方程式を解くと、図5-9に示す正味のアクセプタ濃度 $[N_A-N_D]$ 分布となる。ここでは base 成膜時に含まれる base 中の Mg ( $C_{[Mg]} = 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) と同量の水素が Mg-H として含まれると仮定した。また桑野らによれば、GaN 中の水素の拡散係数は 725°C で  $9.6 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{sec}$  であり、式(5-1)に示す拡散方程式の計算にはこの値を用いた[7]。その結果、最も活性化し難い emitter 中央部直下の base では、Mg のアクセプタ濃度は  $5.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  となる。また中心から emitter 端部に向かい補誤差関数 (erfc) に沿った濃度勾配が付く結果となった。

$$C(x, t) = C_s \left( 1 - \text{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \quad (5-1)$$

ここで、 $C_s$  は活性化アニール前の Mg-H 濃度:  $3.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、 $x$  は emitter 中心からの距離 ( $\mu\text{m}$ )、 $t$  はアニール時間 5400 秒、 $D$  は拡散係数  $9.6 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{sec}$  である。

これらの濃度分布の結果を反映させて正孔濃度と電子濃度のシミュレーションを行った結果を図5-10に示す。当初予想していた空乏層の拡がりとは異なり、emitter 中央直下に伸びた空乏層がアーリー効果、ひいてはパンチスルーに陥る原因となる可能性が示唆された。

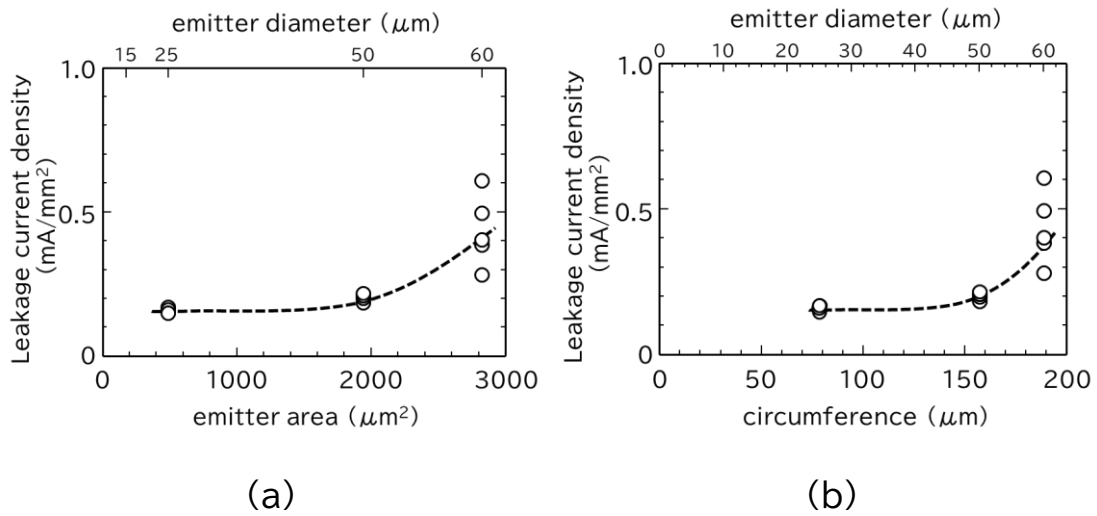
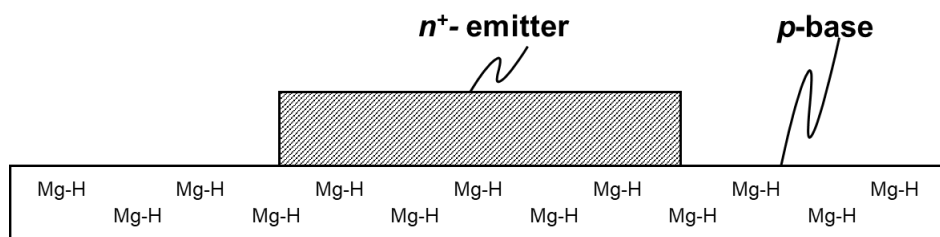
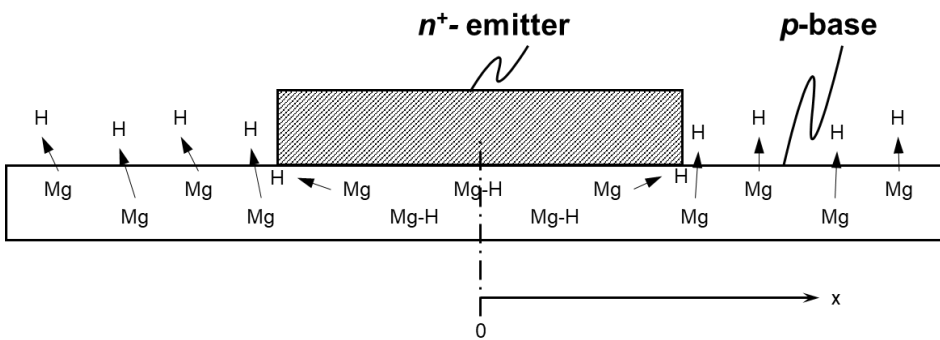


図5-7 base-emitter 間リーク電流密度の(a) emitter 面積依存と(b)emitter 円周長さ依存 ( $V_{BE} = -5\text{ V}$ ) ( 試料 ID : N6780 )



(a) 拡散アニール前の状態の想定図



(b) 拡散途中の状態の想定図

図5-8 活性化アニール(a)前と(b)途中の Mg-H のイメージ断面図

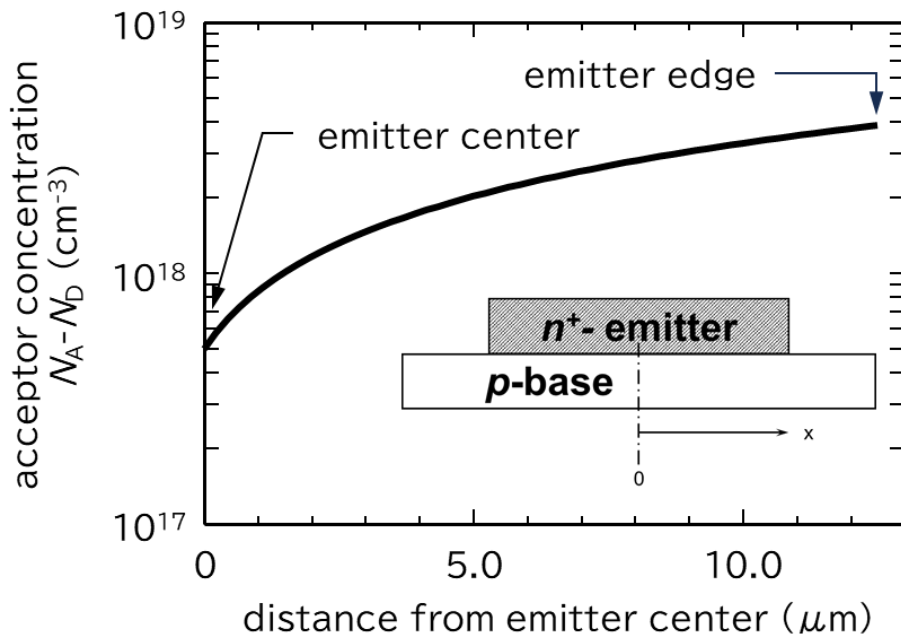
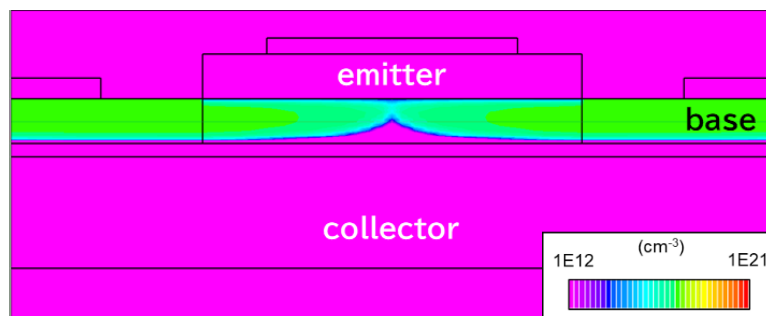
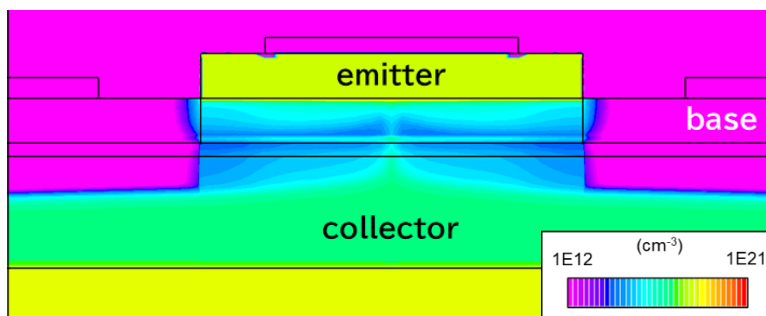


図5-9 活性化された Mg のアクセプタキャリア濃度の位置依存。横軸は emitter 中心部を 0 とした際の距離、縦軸はアクセプタキャリア濃度  $[N_A - N_D]$ 。水素脱離は emitter 端部のみから外方拡散すると仮定。



(a) 正孔濃度分布



(b) 電子濃度分布

(c) 図5-10 アクセプタキャリア濃度分布を反映させた正孔および電子濃度分布。(  $V_{CE} = 5V$ 、 $I_B = 500nA$  )

### 5.2.3 オフセット電圧が高い

L. S. MaCarthy らによれば、HBT 素子の等価回路は、図5-11のように表すことができる[8]。つまり HBT 素子のトランジスタ部分【A】と base からの配線部分【B】に分離できる。またオフセット電圧  $V_{offset}$  は等価回路【B】の部分の base 接触抵抗  $R_{contact}$  と base 領域が emitter の直下までに存在する抵抗成分  $R_{base}$  及び S-C. Lee らが述べている『オフセット電圧は emitter-base 間ヘテロ接合と base-collector 間接合のターンオン電圧(  $V_{th}$  )差  $\Delta V_{th}$  が影響している』[9]を反映して式(5-2)のように表記することができる。

$$V_{offset} = (R_{contact} + R_{base}) \times I_B + \Delta V_{th} , \quad (5-2)$$

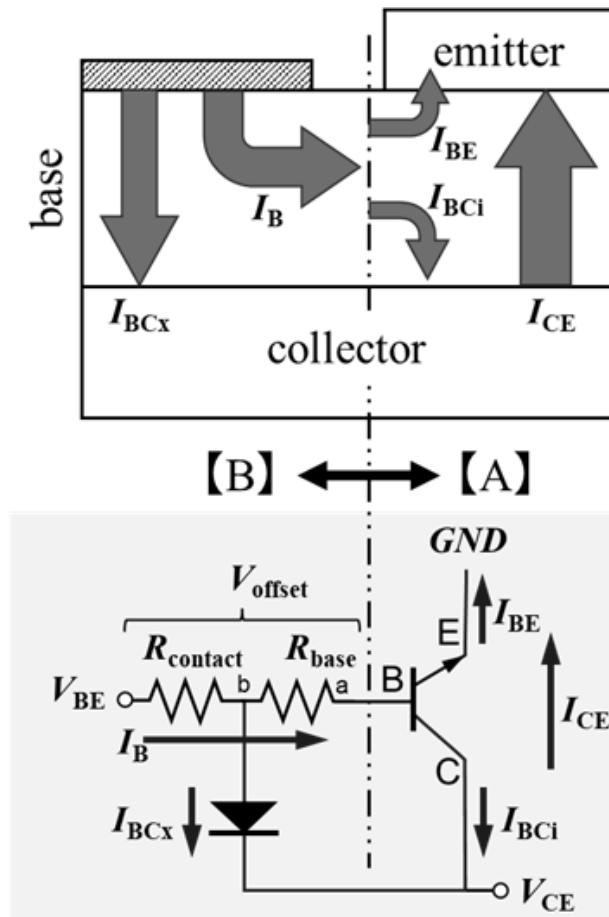


図5-11 HBT 素子の等価回路 HBT 素子は emitter 直下の正味のトランジスタ部分【A】と base 配線部分【B】に分離することができる。

実測から求めた 0.85V は。個別に実測値から得た特性値を式 5-2 に代入した合計により 0.86V と計算でき、実測の  $V_{\text{offset}}$  とほぼ整合することが確認できた。

#### 5.2.4 差異のまとめ

表5-I にシミュレーションに用いた値と、試作後の測定評価でわかった値の比較を行った。ここでは先の項で考察した要素以外にも InGaN base と電極との接触抵抗の値も見直している。当初は開発目標であった  $1.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$  を用いていたが、第4.5.3項に記した実験より得た固有接触抵抗値  $13.0 \Omega \cdot \text{cm}^2$  を用いることとした。

表5-I 変動要因

部位	要因	計算値	試作結果	理由
B-E 間 ヘテロ接合	$\Delta E_g$	0.45 eV	0 eV	emitter 組成比のずれ
base 領域	$[N_A - N_D]$	$4.0 \times 10^{18}$ $\text{cm}^{-3}$	5.2.2 項 結果反映	活性化不均 —
base 電極接合	固有 接触抵抗	$1.0 \times 10^{-3}$ $\Omega \cdot \text{cm}^2$	$13.0 \Omega \cdot \text{cm}^2$	TLM 結果

### 5.3 差異のシミュレーションへの反映

5.2節で抽出した差異(表5-I)をシミュレーションに反映させた。図5-12に、図5-4で示したアクセプタ濃度分布を計算に反映させた場合の正孔および電子濃度分布のコンター図を示す。この結果から、emitter 直下の base 中央部で、空乏層がアクセプタ濃度分布に応じて変形し、中央部分は実質 base 厚が極端に薄くなっていることが分かった。これは  $V_{CE}$  が低電圧でアーリー効果およびパンチスルーが起きやすいことの原因となっている可能性を示すものである。また、図5-7に試作の  $V_{CE}$ - $J_C$  特性結果を実線で、シミュレーション結果を白丸で示す。その結果、HBT 特性の傾向の一致が確認できた。これにより、想定した「Mg の活性化」と「base 電極の接続抵抗値」が当初の想定とは乖離していることが証明できた。今後の課題として継続検討する。

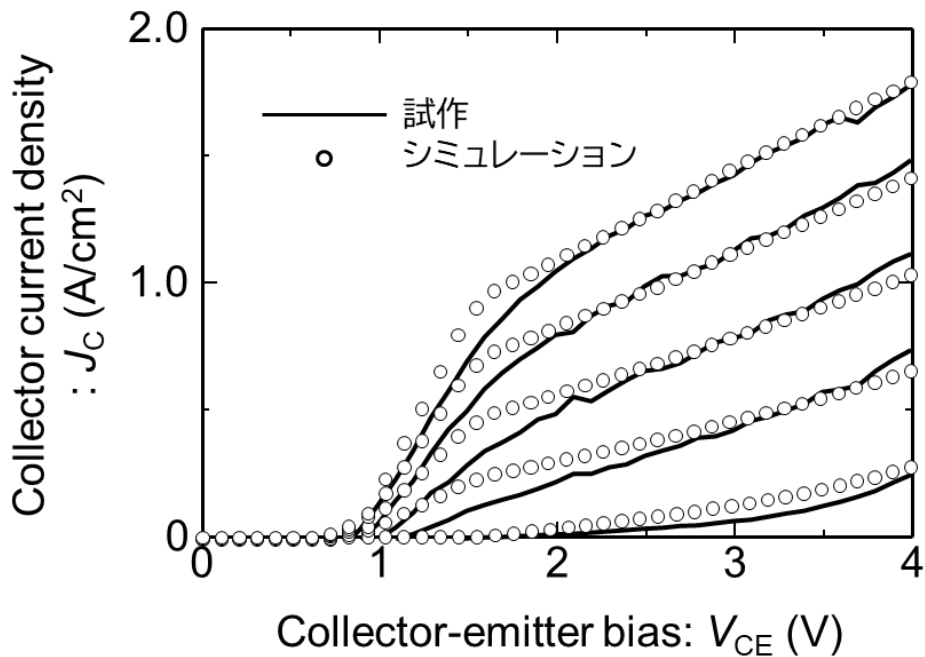


図5-12 シミュレーションの試作結果へのフィッティング結果。実線は試作の測定値、○はシミュレーション。

## 参考文献

- [1] S. Nakamura, "Hole Compensation Mechanism of *p*-Type GaN Films", *Jpn. J. Appl. Phys.* **31** 1258 (1992).
- [2] T. Narita, "Progress on and challenges of *p*-type formation for GaN power devices", *J. Appl. Phys.* **128** 090901 (2020).
- [3] W. Götz, "Activation of acceptors in Mg-doped GaN grown by metalorganic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.* **67** 2666 (1995).
- [4] W. Götz, "Local vibrational modes of the Mg–H acceptor complex in GaN", *Appl. Phys. Lett.* **69** 3725 (1996).
- [5] S. Nakamura, "Thermal Annealing Effects on *p*-Type Mg-doped GaN Film", *Jpn. J. Appl. Phys.* **31** 139 (1992).
- [6] W. Götz, "Activation of acceptors in Mg-doped GaN grown by metalorganic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.* **68**, 667 (1996).
- [7] Y. Kuwano, "Lateral Hydrogen Diffusion at *p*-GaN Layers in Nitride-Based Light Emitting Diodes with Tunnel Junctions", *Jpn. J. Appl. Phys.* **52** 08JK12 (2013).
- [8] L. S. MaCarthy et al., "GaN HBT: Toward an RF Device", *IEEE Trans. Electron Devices* **48** 3 (2001) pp.543-551.
- [9] S-C. Lee, "Origin of high offset voltage in an AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistor", *Appl. Phys. Lett.* **45** (1984) pp.1114-1116.



## 第6章 総括

本章では全体の総括を行う。

本研究では、次世代の準高速・中出力デバイスとしてのアプリケーション応用の可能性を持った GaN 系 HBT のデバイスシミュレーションを通じた解析を行い、その解析のもとに試作検討を行った。以下に、主な結論を述べる。

第1章では、総論として半導体を取り巻く環境から、GaN 系 HBT の可能性のある応用として、今後需要が伸びていく中容量中高速駆動を両立する半導体デバイスと GaN 系 HBT の位置づけを考えていることを述べた。最後にシミュレーションによる構造の必要要件の絞り込みと、試作による検証が本研究の目的であることを簡潔に示した。

第2章では本研究に用いた要素技術の解説を行った。GaN 材料では結晶構造、バンド構造、結晶転位について。GaN-HBT デバイスでは構造と動作原理、オーミック接触について。デバイスシミュレーションでは計算原理、使用したモデルとエネルギー準位やバンドの考え方など、計算の基となる要素について。プロセス要素技術では洗浄、MOCVD、フォトリソグラフィ、RIE、スパッタ、アニール、蒸着リフトオフ、選択再成長について。評価では AFM、XRD、Hall 効果測定、四端子測定、TLM の原理について。それぞれ述べた。

第3章では、シミュレーションによって、HBT の基本構造や提案する技術に関する検討の内容と結果と考察を行った。その結果、emitter では新たな知見として、emitter-base 間の  $\Delta E_g$  は 0.25 eV 付近で電流増幅率  $\beta$  のピークを持つことが分かった。ヘテロ接合における伝導帯の不連続が顕著になるにつれて、base への少数キャリアの供給が減少することに起因すると考えられる。base では、パンチスルーを回避する要件として、正味のアクセプタ濃度  $[N_A - N_D]$  は  $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上を必要であることが分かった。本条件を満たさない場合には、base 電流の制御にかかわらず collector 電流が徐々に増加するアーリー効果およびパンチスルー現象が生じ、この傾向は、base 電流が大きくなるほど顕著になることが分かった。また、base 材料に GaInN を用いることの有効性が確認できた。collector では、base のアクセプ

タ濃度に対し、1/5 を越える場合、collector-emitter 間のポテンシャルバリア高さ  $E_{CE}$  が低下し始め、パンチスルー状態に至る。また、300nm 厚で 130V の逆方向耐圧を確認。逆方向リークは可変レンジホッピングメカニズムに従うことがわかった。sub-collector では、厚み 300nm 以上、ドナーキャリア濃度  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  以上必要であることが確認できた。

第4章では、シミュレーションによって得た構造を実現するための試作と評価結果について考察をおこなった。その結果、要素技術では、base 層の低抵抗化は GaInN を用いた場合、結晶品質と低抵抗化を両立する、InN のモル分率が 5%とすることで良好な base が得られることがわかった。また、base 電極接続の低抵抗化については、*p*-GaInN base と金属電極 Ni/Au の間に 1000°C で再成長させた *p*-GaN を挿入することで固有接触抵抗を約 1/3 に低減出来ることがわかった。HBT の試作では、base 電流信号に応じた変調がみられるトランジスタ特性を示した。  $I_B = 100 \text{ nA}$ 、 $V_{CE} = 4 \text{ V}$  での電流密度は約  $2.0 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  である。アーリー効果特性がみられることから、base 幅変調が生じている可能性が高い。また、gummel plot から  $V_{CE} = V_{BE} = 3 \text{ V}$  での電流増幅率  $\beta$  は 64 であった。残留する課題は *p*-GaInN base と電極の接続に完全なオーミック接続が出来ていないこと、シミュレーションで求めた特性と実際の試作結果との乖離である。

第5章では、シミュレーションと試作結果との乖離理由の考察をおこなった。当初シミュレーションでは emitter 直下の Mg 活性化は base 領域均一である想定で行っていたが、emitter 成膜時に再結合した Mg-H 結合の H の脱離拡散が進みにくいために活性化が不完全であるという仮定から、アクセプタキャリア濃度の分布を拡散方程式より導いた。その結果、emitter 中央直下の base では、base が露出している部分のアクセプタキャリア濃度と比較して、10%~15%程度しか活性化していないと推定できた。キャリアダイナミクス解析を行った結果、 $V_{CE}$  が低電圧でアーリー効果およびパンチスルーが起きやすいことの原因となっている可能性を示す結果を得た。加えて base と電極とのコンタクト抵抗を、試作で得た結果を代入することで、特性の一致が進むことが分かった。これらの推定現象をシミュレーションで再現できたことにより、実特性への課題が明確にできた。

課題に対してさらに個別の要素研究を進めることが必要である。

## 論文および学会発表

### 【査読付き論文】

- 1) “ Simulation Study on Novel GaN-Based *n-p-n* Hetero-junction Bi-polar Tran-sistors with a Quarter-nary AlGaInN Emitter and a Two-Dimensionally Con-ductive Base”, Akira Mase, Yutaka Nikai, Yusuke Iida, Takashi Egawa, and Makoto Miyoshi, PHYSICA STATUS SOLIDI A, 2022,219, pp.2100397-1-2100397-5, DOI: 10.1002/pssa.202100397.
- 2) “ Improved reverse-bias breakdown behavior in fully-vertical GaN-on-Si Schottky barrier diodes with a thin AlN layer within the GaN drift layer “, Akira Mase, Pradip Dalapati, Ryosuke Hayafuji, Toshiharu Kubo, Makoto Miyoshi, and Takashi Egawa, Semicond. Sci. Technol. 38 095005 (2023), DOI: 10.1088/1361-6641/aceaa2.
- 3) “ Simulation analyses of carrier dynamics in *npn*-type GaN-HBTs with different-hole-concentration *p*-base layers “, Akira Mase, Yusuke Iida, Masaya Takimoto, Yutaka Nikai, Takashi Egawa and Makoto Miyoshi, Journal of Vacuum Science & Technology B, 41, 052206 (2023), DOI:10.1116/6.0002577

### 【国際会議発表】

- 1) “ Simulation Study on a novel GaN-based npn HBT with a quaternary AlGaInN Emitter Layer and a Two-Dimensionally Conductive Base layer “, Akira Mase, Yutaka Nikai, Yusuke Iida, Takashi Egawa, and Makoto Miyoshi, Compound Semiconductor Week 2021 (CSW2021), STOCKHOLM, SWEDEN, P7 (11 May 2021)
- 2) “ Effect of a Thin AlN Layer Inserted into the GaN Drift Layers on Reverse Breakdown Behavior for Fully Vertical GaN-on-Si Schottky Barrier Diodes “, Akira Mase, Pradip Dalapati, Toshiharu Kubo, Makoto Miyoshi and Takashi Egawa, ISPlasma2022, Nagoya, Japan, 09P-16 (9 March 2022)
- 3) “ Simulation analyses of carrier dynamics in *npn*-type GaN-HBTs with different-hole-concentration *p*-base layers “, Akira Mase, Yutaka Nikai, Yusuke Iida, Masaya Takimoto, Takashi Egawa and Makoto Miyoshi, Compound Semiconductor Week 2022 (CSW 2022), Ann Arbor, Michigan, USA, P2.18 (3 June 2022)
- 4) “ Carrier Dynamics Simulation and Device Design of GaN-based npn HBTs with Quaternary AlGaInN Emitter and GaInN Base “, Akira Mase, Yusuke Iida, Masaya Takimoto, Yutaka Nikai, Takashi Egawa and Makoto Miyoshi, 14th Topical

Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM2022), Hiroshima, Japan, P8-5 (1 September 2022)

- 5) “ Fabrication of GaN HBTs using a quaternary AlGaInN emitter and a GaInN base “, Masaya Takimoto, Akira Mase, Tomoki Kojima, Takashi Egawa and Makoto Miyoshi, 14<sup>th</sup> International Conference on Nitride Semiconductors ICNS14, Fukuoka Japan, MoP-OD-18 (14 November 2023)

### 【国内会議発表】

- 1) “ 四元混晶 AlGaInN エミッタと量子井戸を組み込んだベースを特徴とする GaN npn HBT のシミュレーション解析 “, 二階 祐宇, 飯田 悠介, 間瀬 晃, 江川 孝志, 三好 実人, 第 68 回応用物理学会春季学術講演会, オンライン, 19p-P06-8 (2021 年 3 月 9 日)
- 2) “ GaN 系 HBT に向けた *p*-GaInN ベース層と四元 AlGaInN エミッタ層の検討 “, 飯田 悠介, 間瀬 晃, 滝本 将也, 二階 祐宇, 江川 孝志, 三好 実人, 電子情報通信学会 CPM/ED/LQE 研究会, pp.57-60. (2022 年 11 月 24 日)
- 3) “ 四元混晶 AlGaInN エミッタと *p* 型 GaInN ベースを用いた GaN 系 HBT の作製 “, 滝本 将也, 間瀬 晃, 小嶋 智輝, 江川 孝志, 三好 実人, 応用物理学会秋季大会, 熊本城ホール 熊本県, 21a-P06-7 (2023 年 9 月 21 日)
- 4) “ 四元混晶 AlGaInN エミッタと *p* 型 GaInN ベースを用いた GaN 系 HBT の作製 “, 滝本 将也, 間瀬 晃, 小嶋 智輝, 江川 孝志, 三好 実人, 電子情報通信学会 ED 研究会, アクトシティ浜松 静岡県, ED-2 (2023 年 11 月 30 日)

### 【知的財産】

- 1) “ 半導体装置および半導体装置用エピタキシャル基板 “, 三好実人, 間瀬晃, 二階祐宇, 飯田悠介, 特願 2021-026922, (令和 3 年 2 月 24 日出願)

### 【賞】

- 1) “ Best Presentation Award in the area of Nitride Semiconductors “, ISPlasma2022.

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご指導ご鞭撻、お力添えご協力を賜りました。この場をお借りして、深く感謝申し上げます。

指導教員である 三好 実人 教授 には、研究に対する姿勢や考え方、研究方針の検討から議論、結果の捉え方、学会資料や論文の作成から発表のご指導まで、ありとあらゆる場面で明確なご助言とご指導をいただき深謝申し上げます。「とことん考え抜いて研究に反映せよ！」と言われた先生の熱意には衝撃を受けました。三好研究室の一員として GaN 研究に携わることが出来たことを感謝致します。

江川 孝志 教授には大所高所よりのご指導、GaN デバイスの大局な見地をいただき心より感謝申し上げます。先生が生涯追求された GaN on Si の素晴らしさをお聞きした際には、感銘を禁じえませんでした。

久保 俊晴 准教授には、シミュレーションを始め、日々の研究に対するご支援・ご指導をいただき、研究を進めることが出来ました。心より感謝申し上げます。

また、博士論文の審査をご担当頂きました豊田工業大学 岩田 直高 教授、名古屋工業大学 加藤 正史 教授には、ご丁寧なご指導・ご助言をいただき、より深い考察を行うことが出来ました。心より感謝申し上げます。

同時期に共に研究生生活を過ごし、お世話になった三好研究室および久保研究室の皆様方に厚く感謝いたします。特に HBT について日々議論し、支えあった 二階 祐宇氏、飯田 悠介氏、滝本 将也氏、小嶋 智輝氏、井上 諒星氏に感謝いたします。研究員の Pradip Dalapati 博士、胡 楠 博士に感謝いたします。

遥か遠い現役学生時代に、私を半導体の世界に導いていただいた同志社大学 大鉢 忠先生に心より感謝申し上げます。先生のお陰で半導体を生涯の生業とし、この研究活動を始める意思を固めることが出来ました。

仕事を通じ『半導体事業』の困難を共に乗り越え、モノづくりの感動を一緒に味わったトヨタ自動車株式会社・株式会社トヨタプロダクションエンジニアリングの上司・先輩・同僚・後輩の方々。会社人生活最後に「生涯チャレンジし続けるべし」と背中を強く押していただいた宗像 RC の皆様に心より感謝申し上げます。

最後に、私のわがままを許し応援してくれた家族、日々支え続けてくれた妻に心より感謝します。

ありがとうございました。

## 付録 (Atlas®: devEdit 用 計算プログラム)

### Appendix 1. Basic program\_01 (先頭に#ある行はコメント行)

```
# Basic HBT.in
#####
# Basic program for HBT
# 20230705
#####
# SECTION 00: Common Parameter set
#####
# Carrier Concentration [ $N_A$ ] [ $N_D$ ] ( $\text{cm}^{-3}$ )
    set cemitter          = 1.8e19
    set cbase             = 1.0e18
    set ccollector       = 2.0e17
    set csubcollector    = 2.9e19
    set cbuffer          = 1.0e12
    set cltgan           = 1.0e12
    set cdonor           = 1.0e12
    set cbase_contact1   = 1.0e18
    set cbase_contact2   = 7.0e20
# Thickness of layer and size ( $\mu\text{m}$ )
    set temitter         = 0.100
    set tbase            = 0.100
    set tcollector       = 0.300
    set tsubcollector    = 0.300
    set tbuffer          = 1.000
    set remitter         = 7.5
# Mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )
    set memitter         = 130
    set mbase            = 70
    set mcollector       = 1200
    set msubcollector    = 150
```

```

        set cgainn_comp          = 0.03

# Sweep increment (V)
        set vstart              = 0
        set vstop               = 10
        set vinc                 = 0.5

# Sweep Ibase (A)
        set current_base        = 1.0e-7

# Set measurement temp (°C)
        set m_temp              = 300

go atlas
# start dev-edit program with this magic word
#####
# SECTION 0: Individually Parameter Set
#####
# AlGaInN Concentration
        set c_alcomp            = 0.400
        set c_incomp            = 0.100
#####
# SECTION 1: Mesh specification
#####
        mesh width              =12
# x plane meshing (l:start point s:mesh step) (µm)
        x.m l=-50               s=0.5
        x.m l=-38.5             s=0.5
        x.m l=-32.5             s=0.5
        x.m l=-28.5             s=0.5
        x.m l=-11.5             s=0.5
        x.m l=-7.5              s=0.1
        x.m l=-7.6              s=0.5
        x.m l=-5.5              s=0.5
        x.m l=-4.0              s=0.5

        x.m l=50                s=0.5
        x.m l=38.5              s=0.5

```

```

x.m l=32.5      s=0.5
x.m l=28.5      s=0.5
x.m l=11.5     s=0.5
x.m l=7.5       s=0.1
x.m l=7.6       s=0.5
x.m l=5.5       s=0.5
x.m l=4.0       s=0.5

# y plane meshing (upside is y=0, down direction is +y)
y.m l=-0.2      s=0.05
y.m l=0.000     s=0.01
y.m l=0.095     s=0.001
y.m l=0.205     s=0.001
y.m l=0.210     s=0.01
y.m l=1.820     s=0.01
y.m l=1.900     s=0.1
y.m l=3.000     s=0.1

#####
# SECTION 2: Structure definition
#####
##### Frame (It's need for simulation frame )
region num=1 x.min=-50 x.max=50 y.min=-0.2 y.max=3.0 mat=air
##### Emitter
region num=2 x.min=-7.5 x.max=7.5 y.min=0 y.max=$emitter mat=InAlGaN
x.comp=$c_alcomp y.comp=$c_incomp donor=$cemitter
##### Base p-GaN
region num=3 x.min=-25-$remitter x.max=25+$remitter y.min=$emitter
y.max=$emitter+$tbase mat=GaN accept=$cbase
#####Collector1 graded
region num=4 x.min=-25-$remitter x.max=25+$remitter
y.min=$emitter+$tbase y.max=$emitter+$tbase+$tcollector1 mat=InGaN
x.comp=0.0 donor=$ccollector1
#####Collector drift
region num=4 x.min=-25-$remitter x.max=25+$remitter y.min=$emitter+$tbase
y.max=$emitter+$tbase+$tcollector mat=GaN donor=$ccollector
#####sub_Collector n-GaN

```



```

region num=5 x.min=-42.5-$remitter x.max=42.5+$remitter
y.min=$emitter+$tbase+$tcollector
y.max=$emitter+$tbase+$tcollector+$tsubcollector mat=GaN
donor=$csubcollector
#####buffer u-GaN (substrate は基本となる格子定数の場所に付ける)
region num=6 x.min=-42.5-$remitter x.max=42.5+$remitter
y.min=$emitter+$tbase+$tcollector+$tsubcollector
y.max=$emitter+$tbase+$tcollector+$tsubcollector+$tbuffer mat=GaN
donor=$cbuffer substrate
#####LT-GaN
region num=7 x.min=-42.5-$remitter x.max=42.5+$remitter
y.min=$emitter+$tbase+$tcollector+$tsubcollector+$tbuffer
y.max=$emitter+$tbase+$tcollector+$tsubcollector+$tbuffer+0.030 mat=GaN
donor=$cltgan
#####substrate Sapphire
region num=8 x.min=-42.5-$remitter x.max=42.5+$remitter
y.min=$emitter+$tbase+$tcollector+$tsubcollector+$tbuffer+0.030
y.max=3.000 mat=Sapphire

# Electrode make
##### emitter
elec num=1 name=emitter x.min=-1*$remitter+2.5 x.max=$remitter-2.5 y.min=-
0.050 y.max=0.0
##### base right
elec num=2 name=base x.min=$remitter+4 x.max=$remitter+21.0
y.min=$emitter-0.050 y.max=$emitter
##### base left
elec num=3 name=base x.min=-1*$remitter-21.0 x.max=-1*$remitter-4
y.min=$emitter-0.050 y.max=$emitter
##### collector right
elec num=4 name=collector x.min=$remitter+31.0 x.max=$remitter+42.5
y.min=$emitter+$tbase+$tcollector-0.050 y.max=$emitter+$tbase+$tcollector
##### collector left
elec num=5 name=collector x.min=-1*$remitter-42.5 x.max=-1*$remitter-31.0
y.min=$emitter+$tbase+$tcollector-0.050 y.max=$emitter+$tbase+$tcollector
##### substrate

```

```

elec num=6 name=substrate x.min=-1*$remitter-42.5 x.max=$remitter+42.5
y.min=3.0 y.max=3.0
# contact resistance (specify)
contact num=2 name=base con.resist=1.0e-3
contact num=3 name=base con.resist=1.0e-3
# Fix ionization ratio
models print srh incomplete bound.trap
material mater=GaN edb=0.03 eab=0.15
material mater=InGaN edb=0.03 eab=0.14
material mater=InAlGaN edb=0.03 eab=0.17
# Fix mobility
models print
mobility region=2 mun0=$memitter
mobility region=3 mup0=1.3
mobility region=4 mun0=$mcollector
mobility region=6 mun0=$msubcollector
# Fix model
model polarization calc.strain polar.scale=0.65
models temperature=$m_temp
output con.band val.band charge polar.charge band.par qss e.mob h.mob
method newton trap maxtrap=20

##### In composition distribution specified by C-Interpreter function.#####
doping reg=4 f.composit=xcomp26.c

#####
# SECTION 3.1: Measurement & gummel plot
#####
solve vcollector=0.1 prev
solve vcollector=0.5 vstep=0.5 Vfinal=10 name=collector
log outf=gummel.log
solve vbase=0.05 prev
solve vbase=0.1 vstep=0.1 vfinal=5 name=base
tonyplot gummel.log
#####
# SECTION 3.2:DC  $I$ - $V$  Measurement & Plot

```

```
#####
```

```
    solve init
    solve prev
    save outf=init.str master
# v check the initial structure (check interface with mesh ! )
    tonyplot init.str
# v calcrete Ib point
    log outf=IbVb0.log
    solve vbase=0.05 prev
    solve vbase=0.1 vstep=0.10 vfinal=3.4 name=base
    log off
```

```
# make structure at each Ib
    contact name=base current
    solve ibase=$current_base
    save outf=ib1.str
    solve ibase=2*$current_base
    save outf=ib2.str
    solve ibase=3*$current_base
    save outf=ib3.str
    solve ibase=4*$current_base
    save outf=ib4.str
    solve ibase=5*$current_base
    save outf=ib5.str
```

```
# calcrete  $I-V$  at Ib1(1*current_base1)
    load inf=ib1.str master
    log outf=IcVce_ib1.log
    solve vcollector=0.01 prev
    solve vcollector=0.1 vstep=0.1 vfinal=2 name=collector
    solve vfinal=5.0 vstep=$vinc name=collector
    save outf=ib1.str
    solve vfinal=$vstop vstep=$vinc name=collector
    log off
```

```
# calcrete  $I-V$  at Ib2(2*current_base1)
    load inf=ib2.str master
    log outf=IcVce_ib2.log
```

```

solve vcollector=0.01 prev
solve vcollector=0.1 vstep=0.1 vfinal=2 name=collector
solve vfinal=5.0 vstep=$vinc name=collector
save outf=ib2.str
solve vfinal=$vstop vstep=$vinc name=collector
log off
# calcrete  $I-V$  at Ib3(3*current_base1)
load inf=ib3.str master
log outf=IcVce_ib3.log
solve vcollector=0.01 prev
solve vcollector=0.1 vstep=0.1 vfinal=2 name=collector
solve vfinal=5.0 vstep=$vinc name=collector
save outf=ib3.str
solve vfinal=$vstop vstep=$vinc name=collector
log off
# calcrete  $I-V$  at Ib4(4*current_base1)
load inf=ib4.str master
log outf=IcVce_ib4.log
solve vcollector=0.01 prev
solve vcollector=0.1 vstep=0.1 vfinal=2 name=collector
solve vfinal=5.0 vstep=$vinc name=collector
save outf=ib4.str
solve vfinal=$vstop vstep=$vinc name=collector
log off
# calcrete  $I-V$  at Ib5(5*current_base1)
load inf=ib5.str master
log outf=IcVce_ib5.log
solve vcollector=0.01 prev
solve vcollector=0.1 vstep=0.1 vfinal=2 name=collector
solve vfinal=5.0 vstep=$vinc name=collector
save outf=ib5.str
solve vfinal=$vstop vstep=$vinc name=collector
save outf=ib5a.str
log off
# plot all results "tonyplot" is plotting program, **.log for  $I-V$ , **.str for structure

```

```
tonyplot -overlay IcVce_ib5.log IcVce_ib4.log IcVce_ib3.log IcVce_ib2.log
IcVce_ib1.log
tonyplot ib5a.str
```

```
#####
# SECTION 3.3: Frequency domain AC analysis up to 100 GHz & Plot
# ( format 参照の為”hbtex06_2.str”が” Basic HBT.in”と同 folder に在ること)
#####
# Initial solution
    output con.band val.band
    solve init
# Calculate Gummel plot and AC parameters versus Vbe (Vce) at 1 MHz
    solve prev
# 1 - emitter  2 - base  3 - collector
    log outf=hbtex06_1.log
    solve v2=0.01  v3=0.01  ac freq=10 direct
    solve v2=0.025 v3=0.025 vstep=0.025 electr=23 nstep=2 ac freq=1e6 direct
    solve v2=0.1   v3=0.1   vstep=0.1   electr=23 nstep=5 ac freq=1e6 direct
    solve v2=0.65  v3=0.65  vstep=0.05  electr=23 nstep=6 ac freq=1e6 direct
    solve v2=0.975 v3=0.975 vstep=0.05  electr=23 nstep=6 ac freq=1e6 direct
    solve v2=2.0   v3=2.0   vstep=0.1   electr=23 nstep=11 ac freq=1e6 direct
    save  outf=hbtex06_2.str
# for gummel plot x-axis make
    solve v2=3.2 v3=3.2 vstep=0.1 electr=23 nstep=4 ac freq=1e6
    log outf=hbtex06_3.log s.param gains inport=base outport=collector width=50
# Frequency domain AC analysis up to 100 GHz
    load inf=hbtex06_2.str master.in
    solve  previous ac freq=1 direct
    solve  ac freq=10 fstep=10 mult.f nfstep=8 direct
    solve  ac freq=2e9 direct
    solve  ac freq=5e9 direct
    solve  ac freq=1e10 direct
    solve  ac freq=2e10 direct
    solve  ac freq=5e10 direct
    solve  ac freq=1e11 direct
    solve  ac freq=2e11 fstep=2e11 nfstep=5 direct
```

```

# Extraction of parameters
    extract init inf="hbtex06_1.log"
# Maximum cutoff frequency
    extract name="Ft_max" max(g."collector""base"/(6.28*c."base""base"))
# Base bias at maximum cutoff frequency
    extract name="Vbe@Ft_max" x.val from curve (v."base",
    g."collector""base"/(6.28*c."base""base" )) where y.val="$Ft_max"
# Input (base) capacitance at maximum cutoff frequency
    extract name="Cbb@Ft_max)" y.val from curve (v."base", abs(c."base""base" ))
    where x.val="$Vbe@Ft_max"
# Transconductance at maximum cutoff frequency
    extract name="Gm@Ft_max)" y.val from curve (v."base",
    abs(g."collector""base" )) where x.val="$Vbe@Ft_max"

# AC Gummel plot
    tonyplot hbtex06_1.log -set hbtex06_1_log.set
# AC current gain versus frequency
    tonyplot hbtex06_3.log -set hbtex06_4_log.set
# S12 & S21 polar coordinates
    tonyplot hbtex06_3.log -set hbtex06_4_s12.set
# S11& S22 Smith chart
    tonyplot hbtex06_3.log -set hbtex06_4_s11.set
# magic word of finish

quit

```

## Appendix 2. graded-collector In 傾斜組成用 C プログラム

```
#xcomp26.c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <ctype.h>
#include <malloc.h>
#include <string.h>
#include <template.h>
/*
 * -----
 * ATLAS Parser Function Template
 * ATLAS Version 5.28.1.R
 * c 1993 - 2019 SILVACO Inc.
 * All rights reserved.
 * -----
 */
/*
 * Position dependent composition fractions.
 * Statement: DOPING
 * Parameter: F.COMPOSIT
 * Note: This functions can only be used with BLAZE
 * Arguments:
 * x      location x (microns)
 * y      location y (microns)
 * *xcomp composition fraction x
 * *ycomp composition fraction y
 */
int composition(double x,double y,double *xcomp,double *ycomp)
{
    *xcomp = 0.04 - 0.04 / 0.030 *(y-0.200);

    return(0);          /* 0 - ok */
}
}
```

### Appendix 3. emitter 下 base のキャリア分布指定用 (第5.3節)

```
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <ctype.h>
#include <malloc.h>
#include <string.h>
#include <template.h>
/*
 * ATLAS Parser Function Template
 */
/*
 * Position dependent net doping.
 * Statement: DOPING
 * Parameter: F.DOPING
 * Arguments:
 * x      location x (microns)
 * y      location y (microns)
 * *nnet  net doping concentration (per cc)
 */
int doping(double x,double y,double *nnet)
{
/* Acceptor concentration is represented by negative value with *nnet. */
    double C0 = -3.0e17;
    double CA = -4.0e18;

    if (x <= 3.0){
        *nnet = C0 + (CA - C0)/7.5*x;
    }else{
        *nnet = CA;
    }

    return(0);          /* 0 - ok */
}
```



## Appendix 4. 界面準位の影響評価(第4.4.5項)

```
#####  
# SECTION 00: Common Parameter set  
# Concentration and thickness  
set cbase1          = 2.0e19  
set cbase2          = 4.0e18  
set cbase3          = 1.0e19  
set tbase1          = 0.003  
set tbase2          = 0.030  
set tbase3          = 0.967  
set mbase1          = 130  
set mbase2          = 70  
set mbase3          = 10  
set base3_in_comp   = 0.04  
# Sweep increment  
set vstart          = -10  
set vstop           = 10  
set vinc            = 0.5  
  
# Set measurement temp  
set m_temp          = 300  
  
go atlas  
#####  
# SECTION 1: Mesh spectification  
mesh width=1000  
# x plane meshing (l:start point s:mesh step)  
x.m l=0             s=0.5  
x.m l=10            s=0.5  
# y plane meshing  
y.m l=-0.010        s=0.001  
y.m l=0             s=0.0001  
y.m l=0.010         s=0.001  
y.m l=0.133         s=0.001  
y.m l=0.433         s=0.001
```

```

y.m l=1.000                                s=0.001
#####
# SECTION 2: Structure definition
##### p1
region num=1 x.min=0 x.max=10 y.min=0 y.max=$tbase1 mat=GaN
accept=$cbase1
##### p2
region num=2 x.min=0 x.max=10 y.min=$tbase1 y.max=$tbase1+$tbase2
mat=GaN x.comp=$base3_in_comp accept=$cbase2
##### p3
region num=3 x.min=0 x.max=10 y.min=$tbase1+$tbase2
y.max=$tbase1+$tbase2+$tbase3 mat=GaN accept=$cbase3
# Electrode make
electrode name=cathode bottom
electr name=anode x.min=0 x.max=10 y.min=-0.010 y.max=0.0 mat=Ni

inttrap s.s donor e.level=0.3 density=3e13 degen.fac=1 sign=2.84e-15 sigp=2.84e-14 intregion="2/3"

# Fix lifetime
models print srh incomplete bound.trap
contact name=anode surf.rec mh.tunnel=0.2
output con.band val.band charge band.param polar.charge qss e.mob h.mob
material mater=GaN edb=0.03 eab=0.15
material mater=InGaN edb=0.03 eab=0.14
material mater=InAlGaN edb=0.03 eab=0.17
##### mobility
models print
mobility region=2 mun0=$mbase1
mobility region=3 mup0=$mbase2
mobility region=3 mun0=$mbase3
model conmob fldmob srh auger bgn
#model polarization calc.strain polar.scale=0.65
models temperature=$m_temp
method newton trap maxtrap=20

```

```
#####
```

```
# SECTION 3:Plot & Measurement
```

```
solve init
solve prev
save outf=init_wIntTrap.str
tonyplot init_wIntTrap.str
log  outfile=iv_wInTrap.log
solve vanode=0.001 prev
solve vanode=0.01 vstep=0.01 vfinal=0.1 name=anode
log off
tonyplot iv_wInTrap.log
tonyplot init_wIntTrap.str

quit
```

## Appendix 5. 界逆方向耐压の検討(第 3.7 節)

```
#####  
# test_HBT(20231018a BVCEO with STD HBT GaInN base)  
#####  
# SECTION 00: Common Parameter set  
# Concentration and thickness  
set cemitter          = 1.8e19  
set cbase             = 4.0e18  
set cbase2            = 5.0e17  
set cbase3            = 5.0e17  
set ccollector1       = 5.1e17  
set ccollector2       = 2.0e17  
set csubcollector     = 2.9e19  
set cltgan            = 1e12  
set cdonor            = 1e12  
set c_alcomp          = 0.334  
set c_incomp          = 0.046  
set temitter          = 0.100  
set tbase             = 0.100  
set tcollector1       = 0.030  
set tcollector2       = 0.300  
set tsubcollector     = 0.600  
set remitter          = 7.5  
set memitter          = 130  
set mbase             = 10  
set mcollector        = 1200  
set msubcollector     = 150  
set cgainn_comp       = 0.04  
# Set measurement temp  
set m_temp            = 300  
go atlas simflags="-160 -P 4"  
#####  
# SECTION 1: Mesh spectification  
mesh width=12  
# x plane meshing (l:start point s:mesh step)
```

```
x.m l=4      s=0.25
x.m l=5      s=0.25
x.m l=7.5    s=0.25
x.m l=9.5    s=0.5
x.m l=11.5   s=0.5
x.m l=14     s=1
x.m l=26     s=1
x.m l=28.5   s=0.5
x.m l=30.5   s=0.5
x.m l=32.5   s=0.1
x.m l=35.5   s=1
x.m l=38.5   s=0.5
x.m l=42     s=2
x.m l=50     s=2
```

```
# y plane meshing
```

```
y.m l=-0.2  s=0.05
y.m l=-0.05 s=0.025
y.m l=0      s=0.01
y.m l=0.05   s=0.01
y.m l=0.1    s=0.001
y.m l=0.15   s=0.01
y.m l=0.2    s=0.001
y.m l=0.215  s=0.005
y.m l=0.23   s=0.001
y.m l=0.28   s=0.02
y.m l=0.48   s=0.02
y.m l=0.53   s=0.001
y.m l=0.7    s=0.1
y.m l=1.0    s=0.1
y.m l=1.13   s=0.01
y.m l=1.16   s=0.01
y.m l=1.5    s=0.25
y.m l=3      s=0.25
```

```
#####
```

```
# SECTION 2: Structure definition
```

```

#Frame (It's need for simulation frame )
  region num=1 x.min=0 x.max=50 y.min=-0.2 y.max=3.0 mat=air
##### Emitter
  region num=2 x.min=0 x.max=7.5 y.min=0 y.max=$emitter mat=InAlGaN
  x.comp=$c_alcomp y.comp=$c_incomp donor=$cemitter
##### Base p-GaInN
  region num=3 x.min=0 x.max=25+$remitter y.min=$emitter y.max=$emitter+$tbase
  mat=InGaN x.comp=$cgainn_comp accept=$cbase
#####Collector1 graded
  region num=4 x.min=0 x.max=25+$remitter y.min=$emitter+$tbase y.max
  =$emitter+$tbase+$tcollector1 mat=InGaN x.comp=0.0 donor=$ccollector1
#####Collector2 drift
  region num=5 x.min=0 x.max=25+$remitter y.min=$emitter+$tbase+$tcollector1
  y.max =$emitter+$tbase+$tcollector1+$tcollector2 mat=GaN donor=$ccollector2
#####sub_Collector n-GaN
  region num=6 x.min=0 x.max=42.5+$remitter y.min = $emitter +$tbase +$tcollector1
  +$tcollector2 y.max=$emitter+$tbase+$tcollector1+$tcollector2+$tsubcollector
  mat =GaN donor=$csubcollector
#####LT-GaN
  region num=7 x.min=0 x.max=42.5+$remitter y.min =$emitter +$tbase +$tcollector1
  +$tcollector2+$tsubcollector y.max =$emitter +$tbase +$tcollector1 +$tcollector2
  +$tsubcollector +0.030 mat=GaN donor=$cltgan substrate
#####substrate
  region num=8 x.min=0 x.max=42.5+$remitter y.min =$emitter +$tbase +$tcollector1
  +$tcollector2 +$tsubcollector+0.030 y.max=3.000 mat=GaN
# Electrode make
  elec num=1 name=emitter x.min=-1*$remitter+2.5 x.max=$remitter-2.5 y.min=-0.050
  y.max=0.0
  elec num=2 name=base x.min=$remitter+4 x.max=$remitter+21.0 y.min=$emitter-
  0.050 y.max=$emitter
  elec num=3 name=collector x.min=$remitter+31.0 x.max=$remitter+42.5 y.min
  =$emitter+$tbase+$tcollector1+$tcollector2-0.050 y.max =$emitter +$tbase
  +$tcollector1+$tcollector2
  elec num=4 name=substrate x.min=-1*$remitter-42.5 x.max=$remitter+42.5
  y.min=3.0 y.max=3.0

```

```

interface s.s thermionic
# In composition distribution specified by C-Interpreter function.
  doping reg=4 f.composit=xcomp26a.c
# Acceptor concentration distribution specified by C-Interpreter function.
  doping reg=3 f.doping=doping02.c
# Fix lifetime
  models print srh incomplete bound.trap
  material mater=GaN edb=0.03 eab=0.15
  material mater=InGaN edb=0.03 eab=0.14
  material mater=InAlGaN edb=0.03 eab=0.17
##### mobility
  models print
  mobility region=2 mun0=$memitter
  mobility region=3 mup0=1.3
  mobility region=4 mun0=$mcollector
  mobility region=5 mun0=$mcollector
  mobility region=6 mun0=$msubcollector
  model polarization calc.strain polar.scale=0.65
  models temperature=$m_temp
  impact region=5 selb gradqfl icrit=1e-15
  output con.band val.band charge band.param polar.charge qss e.mob h.mob
  method climt=1e-4 weak=1 itlimit=35 px.tol=1e-15 cx.tol=1e-15 pr.tol=1e-40
  cr.tol=1e-31
#####
# SECTION 3:Plot & Measurement
  solve init
  solve prev
  save outf=init.str master

  contact name=base current
  solve ibase=0 prev

  log outf=bvceo.log
  solve vcollector=0.01 prev
  solve vcollector=0.1 vstep=0.1 vfinal=1 name=collector
  solve vstep=0.25 vfinal=5 name=collector

```

```
solve vstep=0.5 vfinal=10 name=collector
solve vstep=1 vfinal=1500 name=collector ¥
    compl=1e-29 cname=collector
save outf=compl.str

contact name=collector current
solve imult istep=1.5 ifinal=1e-20 name=collector prev
save outf=final.str

quit
```



## 付録（本研究で用いた記号および定数の一覧）

記号	名称	定数	単位
k	ボルツマン定数	$1.38066 \times 10^{-23}$	( J/K )
		$8.61733 \times 10^{-5}$	( eV/K )
q	素電荷	$1.60218 \times 10^{-19}$	( C )
$\epsilon_0$	真空誘電率	$8.85418 \times 10^{-14}$	( F/cm )
a	格子定数		( Å )
$\mu_n$	電子移動度		( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )
$\mu_p$	正孔移動度		( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )
$\rho$	比抵抗		( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
$E_g$	バンドギャップエネルギー		( eV )
$E_c$	伝導帯準位		( eV )
$E_v$	価電子帯準位		( eV )