

様々なバンド不連続を有する $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{SiC}$ ヘテロ接合 バイポーラトランジスタの電流輸送機構

奥田 貴史[†] 三宅 裕樹[†] 木本 恒暢^{†,‡} 須田 淳[†]

[†] 京都大学大学院工学研究科 〒615-8510 京都市西京区京都大学桂

[‡] 京都大学光・電子理工学センター 〒615-8510 京都市西京区京都大学桂

E-mail: [†] {okuda, miyake}@semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp, [†] {kimoto, suda}@kuee.kyoto-u.ac.jp

あらまし 様々なバンド不連続を有する $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{SiC}$ ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) について、ガンメルプロットを用いて電流輸送機構を調べた。低コレクタ電流域において、ベース電流は再結合電流が支配的であり、その大きさは Al 組成ごとに異なるものの、系統的な違いはなかった。また、バンド不連続が異なるにもかかわらず、すべての Al 組成においてコレクタ電流の電流-電圧特性が一致し、その n 値は 1.0 であった。このことから、コレクタ電流はベース層での拡散が支配的であり、AlGa_N エミッタからの電子注入は余分な電圧降下なしに行われている。

キーワード 4H-SiC, AlGa_N, ヘテロ接合, HBT, ガンメルプロット

Current Transport Characteristics of Quasi- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{SiC}$ Heterojunction Bipolar Transistors with Various Band Discontinuities

Takafumi OKUDA[†] Hiroki MIYAKE[†] Tsunenobu KIMOTO^{†,‡} Jun SUDA[†]

[†] Department of Electronics Science and Engineering, Kyotodaigaku-katsura, Nishikyo, Kyoto, 615-8510, Japan

[‡] Photonics and Electronics Science and Engineering Center, Kyotodaigaku-katsura, Nishikyo, Kyoto, 615-8510, Japan

E-mail: [†] {okuda, miyake}@semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp, [†] {kimoto, suda}@kuee.kyoto-u.ac.jp

Abstract The current transport characteristics of the quasi- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{SiC}$ Heterojunction Bipolar Transistors (HBTs) with various band discontinuities were investigated in the low current range by means of Gummel plot. In the low current range, the base currents of the HBTs were dominated by recombination currents and the amount of recombination among the HBTs were different. The collector current characteristics of the HBTs were almost the same in spite of the various band discontinuities and the ideality factors n were 1.0. The collector currents were dominated by the diffusion process in the base region and electrons were injected from the AlGa_N emitter without any additional voltage drops in the low current range.

Keyword 4H-SiC, AlGa_N, Heterojunction, HBT, Gummel plot

1. はじめに

SiC バイポーラトランジスタ (BJT) は、高耐圧・低オン抵抗なパワースイッチングデバイスの実現可能性を有している[1-2]。また、大きな破壊耐量 (安全動作領域, SOA) をもち[3]、酸化膜の信頼性といった問題がないため、高耐圧・高温領域でのスイッチングデバイスとして注目が集まっている。電流駆動デバイスであるので、実用化にむけて、100 をこえるエミッタ接地電流増幅率が必要である。電流増幅率を向上させるため様々な研究が進められ[4-6]、最近、電流増幅率 257 が達成された[7]。しかし、SiC BJT では、温度上昇にともなってベース層のホール密度が増加し注入効率が低下することで、電流増幅率が低下してしまう[8]。高温でも高い電流増幅率を実現するため、増幅率のさら

なる向上が必要である。

電流増幅率の向上にむけて、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) は過去に様々な研究が行われている有用なアプローチである。ベースよりバンドギャップが大きな材料をエミッタに用いることで、ベースからエミッタへの正孔逆注入を大幅に減らし、飛躍的な電流増幅率の向上が期待される。本研究室では、エミッタに $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 疑似混晶 (AlN/GaN 短周期超格子) を用いた AlGa_N/SiC ヘテロ接合バイポーラトランジスタを提案している[9]。超格子における AlN/GaN の膜厚を変えることで、疑似的な Al 組成を変化させ、バンドオフセットの制御を実現した。様々な Al 組成を有する AlGa_N/SiC HBT を作製し、初めてエミッタ接地電流増幅動作を達成した。しかし、電流増幅率は 2 ~ 10

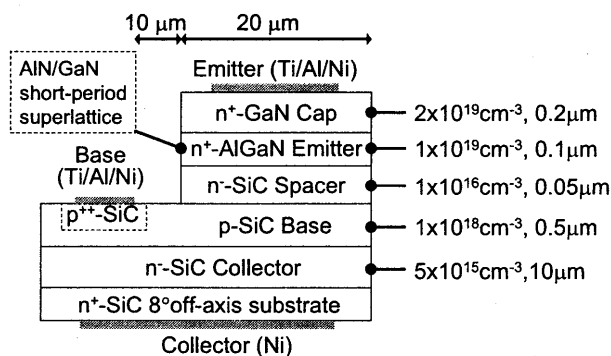


図 1. 作製した AlGaIn/SiC HBT のデバイス構造

程度と、従来の SiC BJT に対して、飛躍的な電流増幅率の向上には至っていない。電流増幅率を制限している要因の解明にむけて、電流輸送機構を明らかにする必要がある。

npn 接合のバイポーラトランジスタにおいて、コレクタ電流はエミッタから注入された電子がコレクタに到達するまでの過程を反映している。一般的な BJT では、コレクタ電流はベース層での拡散過程が支配的であるため、コレクタ電流のベース-エミッタ間電圧に対する n 値は 1.0 である。しかし、HBT では、AlGaAs/GaAs HBT で報告されているように、伝導帯の不連続によって、エミッタからの電子注入が妨げられ、余分な電圧降下を引き起こし、コレクタ電流の n 値が 1.0 より大きくなってしまふことがある[10]。そこで、本研究では、様々な Al 組成 (様々なバンド不連続) を有する AlGaIn/SiC HBT について、ガンメルプロットを用いて電流輸送機構を調べた。

2. デバイス作製プロセス

作製した AlGaIn/SiC HBT のデバイス構造を図 1 に示す。n⁺-SiC 基板上に n⁻-SiC コレクタ層、p-SiC ベース層 (0.5 μm, $N_a = 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) をエピタキシャル成長してあるものを用い、横型コールドウォール CVD (CW-CVD: Cold wall chemical vapor deposition) でアンダーレイ n⁻-SiC スペース層を 50 nm 成長した。その後、プラズマ援用分子線エピタキシー (PAMBE: Plasma-assisted molecular beam epitaxy) で Si ドープの AlIn(0.6 nm)/GaIn(0.4-1.2 nm)短周期超格子 (0.1 μm, $N_d \sim 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$) を成長し、続いて Si ドープの n⁺-GaIn コンタクトキャップ層を成長した。成長は、GaIn に比べて SiC に対する格子不整合が小さく濡れ性の良い AlIn から開始した。AlIn 層の膜厚を一定にし、GaIn 層の膜厚を変えることで様々な Al 組成を有する AlGaIn 疑似混晶を作製した[9]。エミッタのフィンガー幅は 20 μm、フィンガー長さは 100 μm である。エミッタフィンガーとベースコンタクトとの距離は 10 μm である。

表 1 に、容量-電圧測定から得られた AlGaIn/SiC ヘテロ接合の伝導帯バンド不連続と、ベース電流 I_B が 1 mA のときのエミッタ接地電流増幅率 β を示す[9]。Al 組成が 0.5 をこえる HBT では、伝導帯に電子注入に対する障壁のない Type I のヘテロ接合が実現され (図 2)、注入効率が改善されることで、1 をこえる電流増幅率が得られた。図 3 に Al 組成が 0.5 の HBT に対するエミッタ接地電流-電圧特性を示す。明瞭な飽和特性を示すエミッタ接地電流増幅動作が得られた。

3. 結果と考察

様々なバンド不連続を有する AlGaIn/SiC HBT の電流輸送機構について、ガンメルプロットを用いて調べた。ただし、ベース-エミッタ間電圧 V_{BE} が 2.7 V を超える領域では、ベース直列抵抗による電圧降下が無視

表 1. Al_xGa_{1-x}N/SiC ヘテロ接合での伝導帯バンド不連続とエミッタ接地電流増幅率 (ベース電流 $I_B = 1 \text{ mA}$)

Al comp. x	ΔE_c (eV)	Gain β
0.33	0.56 (Type II)	0.22
0.4	0.42 (Type II)	0.53
0.5	0.17 (Type I)	2.2
0.6	1.10 (Type I)	2.4

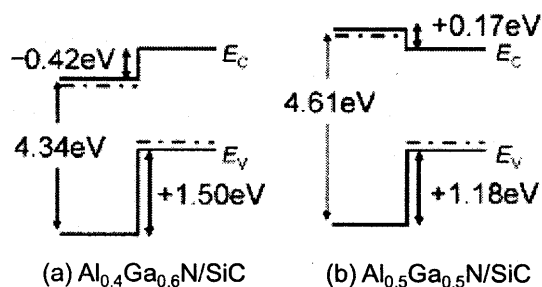


図 2. Al_xGa_{1-x}N/SiC ヘテロ接合のフラットバンドラインナップ

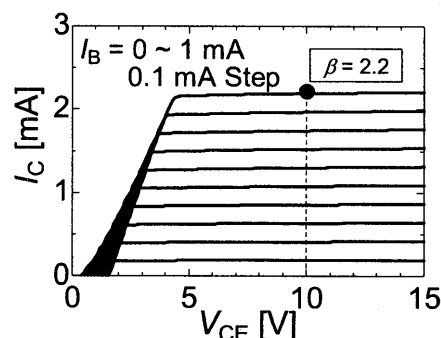


図 3. Al_{0.5}Ga_{0.5}N/SiC HBT のエミッタ接地電流-電圧特性

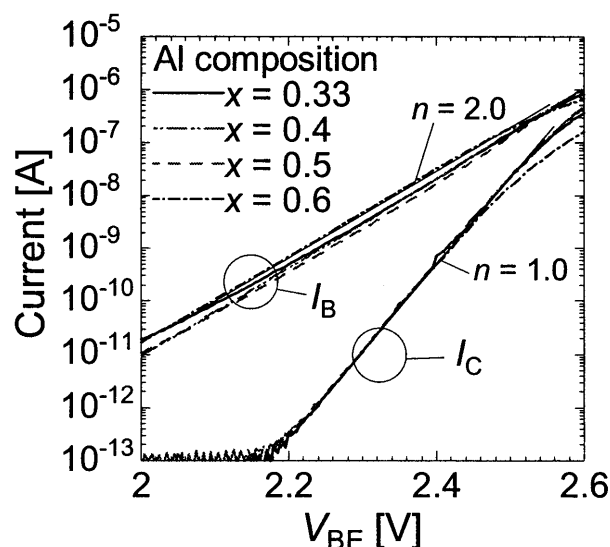


図 4. Al 組成が 0.33, 0.4, 0.5, 0.6 である AlGaIn/SiC HBT のガンメルプロット. ベース-コレクタは短絡である.

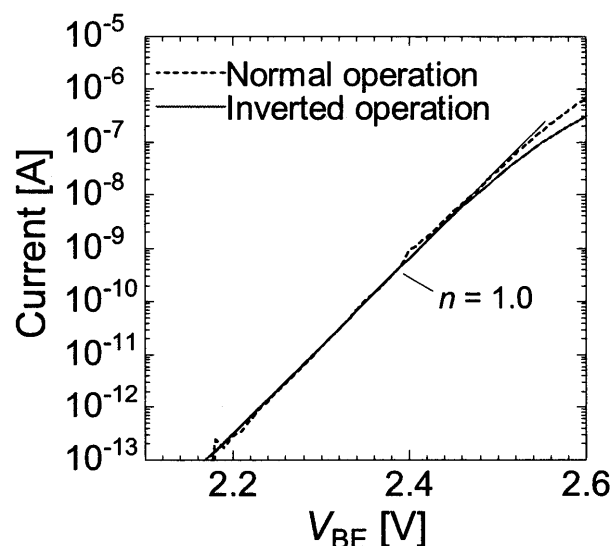


図 5. $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{SiC}$ HBT のガンメルプロットとリバースガンメルプロット. ベース-コレクタは短絡である.

できず、実際のベース-エミッタ接合にかかる電圧が印加した電圧よりも低くなってしまうため、ガンメルプロットを単純に比較することはできない。そのため、本研究では、2.0 ~ 2.6 V の電圧領域でガンメルプロットを比較した。

図 4 に Al 組成が 0.33, 0.4, 0.5, 0.6 の HBT のガンメルプロットを示す。ベース電流の大きさは Al 組成により最大で 2 倍程度異なるが、Al 組成に対して系統的な違いは見られない。しかし、どの Al 組成に対しても、ベース電流の n 値は 2.0 であった。これより、ベース電流は、ベース-エミッタ接合での界面再結合電流が支配的であると考えられる。

一方で、コレクタ電流の電流-電圧特性は、すべての Al 組成に対して低電流域で完全に一致し、また、ベース-エミッタ間電圧に対する n 値は 1.0 であった。これより、コレクタ電流はベース層での拡散過程が支配的である。つまり、伝導帯のバンド不連続によらず、ベース層中の拡散による電子輸送に対して、エミッタからベースへ十分速やかに電子が注入（供給）されていることを示している。すなわち、AlGaIn エミッタからベース-エミッタ接合の空乏層における電子の擬フェルミ準位が一定であり、拡散過程をきめる空乏層端での電子濃度がベース-エミッタ間電圧 ($\exp(eV_{\text{BE}}/kT)$) だけ増加している。

表 1 に示したように、Al 組成が 0.5 をこえる $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{SiC}$ ヘテロ接合は、Type I のヘテロ接合であり、伝導帯のバンド不連続によって電子注入に対するポテンシャルスパイクが生じる。しかし、AlGaIn エミッタのドーピング濃度は $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ であり、SiC ベースのドーピング濃度 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ に比べて大きく、順バイアス下ではエミッタ側の空乏層（ポテンシャルスパイク）が十分に薄い ($< 1 \text{ nm}$) ことから、ポテンシャルスパイクは電流輸送機構に影響しなかったと考えられる。

次に、エミッタとコレクタを入れ替えて測定するリバースガンメルプロットによる評価を行った。これより、 $n\text{-AlGaIn}$ から $p\text{-SiC}$ への電子注入と、 $n\text{-SiC}$ から $p\text{-SiC}$ への電子注入を比較することができる。図 5 に Al 組成が 0.5 の HBT のガンメルプロットとリバースガンメルプロットのコレクタ電流を示す。コレクタ電流の電流-電圧特性は一致し、その n 値は 1.0 であった。

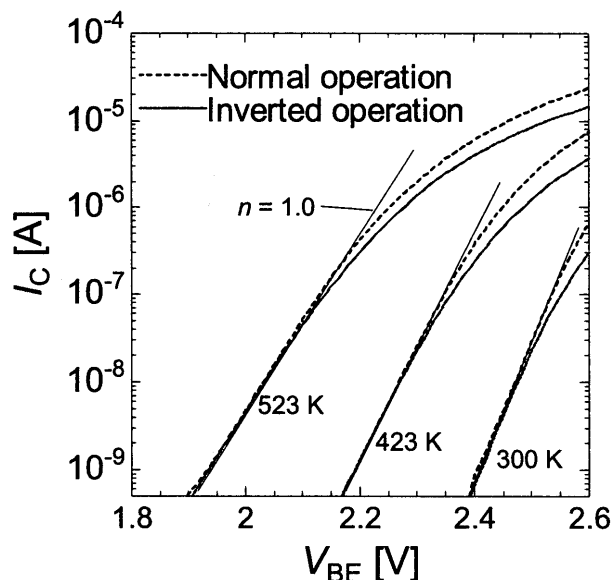


図 6. $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}/\text{SiC}$ HBT のガンメルプロットとリバースガンメルプロットの温度依存性.

他の Al 組成 HBT でも同様に電流-電圧特性は一致していた。これより, AlGa_N/SiC ヘテロ接合でのバンド不連続は電流輸送機構に影響せず, 電子注入は SiC ホモ接合と同様で理想的であると考えられる。

図 6 に, Al 組成が 0.5 の HBT のガンメルプロットとリバースガンメルプロットの温度依存性を示す。測定温度は 300 K, 423 K, 523 K である。すべての温度で, ガンメルプロットとリバースガンメルプロットのコレクタ電流は一致し, 高温でもコレクタ電流の n 値は 1.0 のままであった。他の Al 組成の HBT でも同様に電流-電圧特性は一致した。これより, AlGa_N エミッタからの電子注入は, 高温領域でもホモ接合と同様で理想的に行われていると考えられる。

4. 結論

様々なバンド不連続を有する Al_xGa_{1-x}N/SiC HBT の電流輸送機構について, ガンメルプロットを用いて調べた。その結果, 少なくとも低電流域では, バンドの不連続がコレクタ電流の輸送機構に影響を与えていないことが明らかになった。コレクタ電流は, ベース層での拡散過程が支配的である。ベース電流は AlGa_N/SiC ヘテロ接合の界面再結合電流が支配的である。今後, 高電流域での電流輸送機構を明らかにするとともに, AlGa_N/SiC ヘテロ接合での界面再結合の原因解明と抑制が課題である。

文 献

- [1] Q. J. Zhang and A. K. Agarwal: Phys. Stat. Sol. (a) vol.206 pp.2431-2456 (2009).
- [2] Y. Gao, A. Q. Huang, S. Krishnaswami, J. Richmond, and A. K. Agarwal: IEEE Electron Device Lett. vol.44 pp.887-893 (2008).
- [3] Y. Gao, A. Q. Huang, A. K. Agarwal, and Q. Zhang: IEEE Trans. Electron Devices vol.55 pp.1887-1893 (2008).
- [4] Q. J. Zhang, A. K. Agarwal, A. Burk, B. Geil, and C. Scozzie: Solid-State Electron. vol.52 pp.1008-1010 (2008).
- [5] K. Nonaka, A. Horiuchi, Y. Negoro, K. Iwanaga, S. Yokoyama, H. Hashimoto, M. Sato, Y. Maeyama, M. Shimizu, and H. Iwakuro: Phys. Stat. Sol. (a) vol.206 pp.2457-2467 (2009).
- [6] H. Miyake, T. Kimoto, and J. Suda: IEEE Electron Device Lett. vol.32 pp.285-287 (2011).
- [7] H. Miyake, T. Kimoto, and J. Suda: IEEE Electron Device Lett. vol.32 pp.841-843 (2011).
- [8] S.-H. Ryu, A. K. Agarwal, R. Singh, and J. W. Palmour: IEEE Electron Devices Lett. vol.22 pp.124-126 (2001).
- [9] H. Miyake, T. Kimoto, and J. Suda: IEEE Electron Device Lett. vol.31 pp.944-946 (2010).
- [10] S. Tiwari, S. L. Wright, and A. W. Kleinsasser: IEEE Trans. Electron Devices vol.34 pp.185-198 (1987).