

AlN基板を用いた高Al組成AlGaIn HEMTの開発

秋田勝史*・橋本 信・山本喜之
 矢船憲成・徳田博邦・葛原正明
 岩谷素顕・天野 浩

Development of High-Al-Composition AlGaIn-Channel High Electron Mobility Transistors on AlN Substrates — by Katsushi Akita, Shin Hashimoto, Yoshiyuki Yamamoto, Norimasa Yafune, Hirokuni Tokuda, Masaaki Kuzuhara, Motoaki Iwaya and Hiroshi Amano — High electron mobility transistors (HEMTs) with AlGaIn channel layers are promising for the next-generation high-power and high-frequency electron devices. These are expected to show higher breakdown voltage and better high-temperature characteristics than GaN-channel HEMTs since AlGaIn has a higher breakdown field and larger bandgap energy than GaN. However, epitaxial growth of the structure is difficult because of the large lattice mismatch between GaN and AlGaIn. Therefore, our group has developed the AlGaIn-channel HEMTs on freestanding AlN substrates. This report presents the epitaxial growth for the AlGaIn-channel-HEMT structures and the device characteristics of the AlGaIn-channel HEMTs.

Keywords: HEMT, GaN, AlN, AlGaIn, MOVPE

1. 緒言

現在、ガリウムヒ素 (GaAs) を動作層 (以降チャンネル層) とする高電子移動度トランジスタ (high electron mobility transistor: HEMT) が携帯電話等の高周波通信に広く普及している。一方で近年、白色発光ダイオード (light emitting diode: LED) 用途に広く利用されている窒化ガリウム (GaN) は GaAs よりもバンドギャップエネルギーが大きく、電子デバイス用途としても、高耐圧動作、高温動作といった優れた特性を示す。GaN をチャンネル層に用いた HEMT (GaN HEMT)⁽¹⁾ は住友電気デバイス・イノベーション(株)がいち早く開発・製品化を実現させ、携帯電話基地局用途といった高出力用途で市場をリードしている。

窒化アルミニウム (AlN) は、GaN の約 2 倍のバンドギャップ (6.2eV)、GaN の約 4 倍の静電破壊電界 (12MV/cm)、GaN の約 1.5 倍の熱伝導率 (2.9W/cmK) と極めて優れた材料特性を有している。よって、AlN、及び AlN と GaN との混晶である AlGaIn は、GaN の次世代の高出力、高周波デバイス材料として有望である。AlGaIn をチャンネル層とする HEMT (AlGaIn HEMT) は GaN HEMT よりも、更に高耐圧動作することが報告されている⁽²⁾。

しかし、AlGaIn HEMT に関する報告は GaN HEMT に比べて少なく、Al 組成は 40% 未満と低いものに限られている^{(3),(4)}。これは、AlGaIn のエピタキシャル成長*1 は GaN よりも難しい上に、構成原子の間隔 (格子定数) が近い、適切な基板結晶がないためである。例えば AlGaIn よりも格子定数の大きな GaN を基板に用いると、AlGaIn エピタキシャル層は GaN 基板から引っ張り歪みを受け、クラックが発生する。この問題の解決には、基板に AlGaIn

よりも格子定数の小さな AlN を用いることが有望である。AlN 基板では AlGaIn エピタキシャル層は圧縮歪みを受け、クラックの発生が抑制される。また、AlGaIn エピタキシャル層の Al 組成を増加させる程、AlGaIn と AlN 基板との格子定数差が小さくなるため、結晶品質の向上が期待できる。そこで、我々は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) プロジェクトに 2007 年から参画し、昇華法による AlN 基板の開発、AlN 基板上的 AlGaIn エピタキシャル層の成長技術開発、AlGaIn HEMT デバイスの開発と材料からデバイスまでを一貫して開発してきた。

AlGaIn エピタキシャル層の成長技術開発については、これまで Al 組成約 30% の低 Al 組成 AlGaIn HEMT エピタキシャル層の特性と AlN 基板の優位性について報告した^{(5),(6)}。本稿では、低 Al 組成 (50% 未満)、高 Al 組成 (50% 以上) の AlGaIn HEMT 構造のエピタキシャル成長と結晶評価結果、および AlN 基板上 AlGaIn HEMT のデバイス特性について報告する。

2. AlGaIn HEMT エピタキシャル層

2-1 エピタキシャル成長と結晶評価方法

AlN、AlGaIn エピタキシャル層構造は AlN 基板上に有機金属気相成長法 (MOVPE) によって成長させた。参照用として、サファイア基板上にも成長を行った。高品質な AlGaIn の結晶成長には GaN よりも高い成長温度が必要なため、基板温度を 1400°C まで加熱可能な、高温仕様の MOVPE 装置を用いた。原料には、アンモニア (NH₃)、トリメチル

ガリウム (TMGa)、トリメチルアルミニウム (TMAI) を用いた。AlN 基板は、昇華法によって作製した、転位^{※2}密度 $1 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ 未満と低転位のものを用いた^{(7),(8)}。

図1に、AlGaIn HEMTのエピタキシャル層構造を示す。AlN基板の上にAlNバッファ層を成長させた後、AlGaInチャンネル層、アンドープAlGaInバリア層を成長させた。バリア層とチャンネル層の界面のチャンネル層側には、バリア層が受ける歪みによって誘起された電子が2次元状に蓄積し(2次元電子ガス)、電流輸送を担う。

エピタキシャル層の構造評価にはX線回折(2θ-ωスキャン、逆格子マッピング)を用いた。バリア層-チャンネル層界面に生ずる2次元電子ガスの電気的特性評価には、ホール測定、金(Au)を電極とした容量-電圧(capacitance-voltage: C-V)測定を用いた。

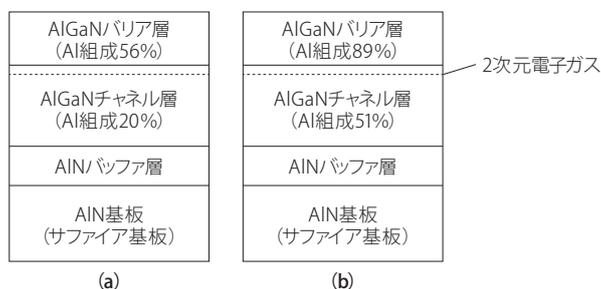


図1 AlGaIn HEMTのエピタキシャル層構造 (a) 低Al組成AlGaIn HEMT (b) 高Al組成AlGaIn HEMT

2-2 エピタキシャル層評価結果 まず、AlGaIn HEMTエピタキシャル層の結晶構造評価を行った。低Al組成AlGaIn HEMT構造と高Al組成AlGaIn HEMT構造のX線回折測定結果(2θ-ωスキャン)を図2に示す。横軸の回折角は結晶積層方向(c軸方向)の格子定数に対応する。低Al組成AlGaIn HEMT構造、高Al組成AlGaIn HEMT構造ともに回折角36.0度付近にAlNによるピークが観測された。AlGaInチャンネル層によるピークはそれぞれ、回折角34.7度、35.2度付近に観測された。AlGaInバリア層によるピークはそれぞれ、回折角35.4度、35.7度付近に観測された。以上より、AlNバッファ層、AlGaInチャンネル層、AlGaInバリア層の回折ピークが明瞭に観測されていることがわかった。このことから、図1の構造が良好な結晶品質で設計通り作製されていると言える。

低Al組成AlGaIn HEMT構造と高Al組成AlGaIn HEMT構造の(20-24)面近傍のX線回折逆格子マッピング測定結果を図3に示す。横軸は面方向(a軸方向)の格子定数、縦軸は積層方向(c軸方向)の格子定数を示している。通常エピタキシャル層は面方向の格子定数を下地結晶に合わせて成長する。しかし、図3ではともにAlGaInチャンネル層のa軸方向の格子定数は下地のAlN層と異なっている。この状態

を格子緩和状態と呼び、AlGaInチャンネル層にはAlN層から引き継いだ転位以外の新たな転位が導入されている。格子緩和度(AlGaInチャンネル層とAlN層のa軸方向の格子定数の違い)は、高Al組成AlGaIn HEMTの方が低Al組成AlGaIn HEMTよりも小さいことがわかる。このことは、AlGaInチャンネル層とAlN層の格子定数の違いによる転位の導入が、高Al組成AlGaIn HEMTの方が低Al組成AlGaIn HEMTよりも少ないことを示している。つまり、結晶品質は高Al組成AlGaIn HEMTの方が低Al組成AlGaIn HEMTよりも良好である。一方、双方でAlGaInバリア層のa軸格子定数はAlGaInチャンネル層と同じであることがわかる。この状態をコヒーレント状態と呼び、格子定数の異なる半導体層が面方向の格子定数を合わせて積層しており、新たな転位の導入が少ないことを示している。

続いて、AlGaIn HEMTの2次元電子ガスの電気特性評価

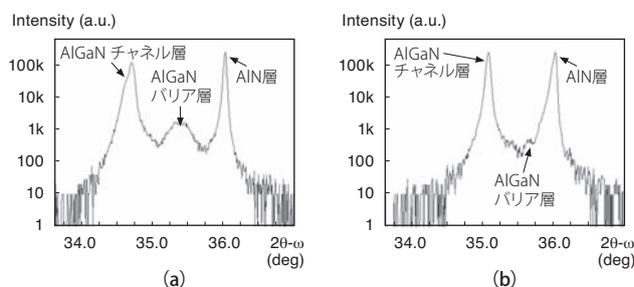


図2 AlGaIn HEMTのX線回折測定結果(2θ-ωスキャン) (a) 低Al組成AlGaIn HEMT (b) 高Al組成AlGaIn HEMT

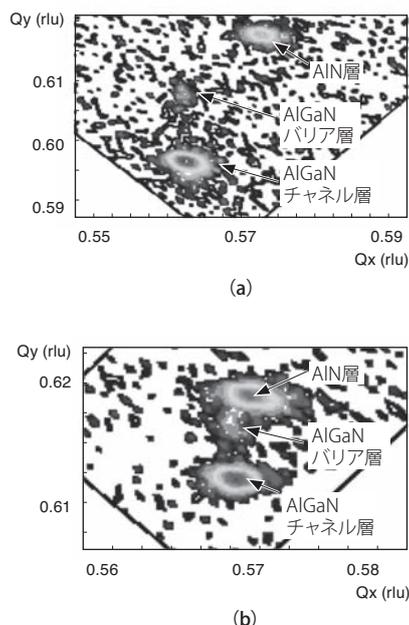


図3 AlGaIn HEMTのX線逆格子マッピング測定結果 (a) 低Al組成AlGaIn HEMT (b) 高Al組成AlGaIn HEMT

を行った。C-V測定より求めた、低Al組成 AlGaN HEMTと高Al組成 AlGaN HEMTのキャリア濃度分布を図4に示す。ともに、AlGaNバリア層とAlGaNチャンネル層の界面にあたる表面から約30nmの位置に、2次元電子ガスによる 10^{20}cm^{-3} 程度の極めて高いキャリア濃度のピークが観測された。またAlGaNチャンネル層、AlNバッファ層のキャリア濃度は低く、HEMTとして理想的なキャリア濃度分布が得られていることがわかった。

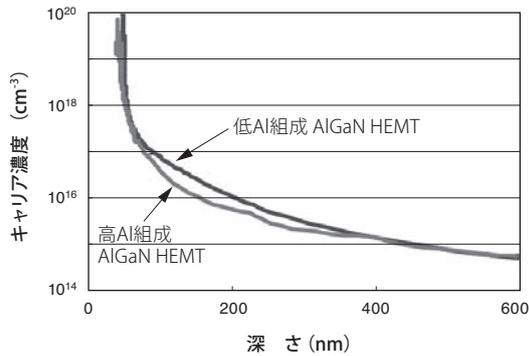


図4 C-V測定により求めたAlGaN HEMTのキャリア濃度分布

ホール測定により求めたAlGaN HEMTのシートキャリア濃度、キャリア移動度、シート抵抗を表1に示す。ともに、 $2 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ を超える、高いシートキャリア濃度が得られた。しかし、高Al組成 AlGaN HEMTでは、低Al組成 AlGaN HEMTに比べてキャリア移動度が低下した。これは、Al組成が50%に近づく程、AlGaNチャンネル層におけるキャリアの散乱が大きくなること（合金散乱効果）が原因と考えられる。しかし、シートキャリア濃度が高いため、シート抵抗としてはデバイス動作可能と考えられる低い値が得られた。

表1 AlGaN HEMTの2次元電子ガス特性

	低Al組成 AlGaN HEMT	高Al組成 AlGaN HEMT
シートキャリア濃度 (cm^{-2})	2.45×10^{13}	2.48×10^{13}
キャリア移動度 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	259	143
シート抵抗 ($\Omega/\text{sq.}$)	981	1740

3. AlGaN HEMT デバイス

3-1 低Al組成 AlGaN HEMTのデバイス特性 これまでに述べた、AlGaNエピタキシャル層を用いてAlN基板上にデバイスを作製した⁽⁹⁾。図5にAlN基板上の低Al組成 AlGaN HEMT (Al組成24%)のデバイス構造断面図を示

す。AlGaN HEMTではGaN HEMTで広く用いられているTi/Al系の電極ではオーミック特性を得ることができないため、ソース、ドレイン電極にはZr/Al/Mo/Au (膜厚15nm/60nm/35nm/50nm)を用い、温度950度で熱処理を行った。ゲート電極にはNi/Au (膜厚100nm/150nm)を用いた。ゲート長、ゲート幅はそれぞれ $3\mu\text{m}$ 、 $515\mu\text{m}$ である。表面パッシベーション膜は用いていない。デバイス特性はSi基板上のGaN HEMTと比較した。

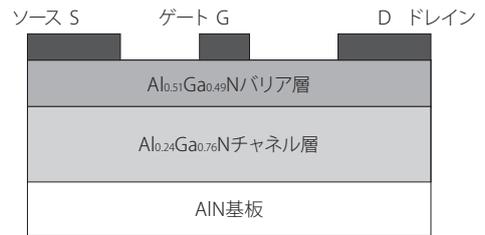


図5 低Al組成 AlGaN HEMTのデバイス構造断面図

図6にこのHEMTの室温および300°Cで測定したドレイン電流-電圧 (I-V) 特性を示す。AlN基板上としては初めてのトランジスタ動作が確認された。双方の測定温度で良好なピンチオフ特性と飽和特性が得られている。室温における最大ドレイン電流は $130\text{mA}/\text{mm}$ 、最大相互コンダクタンス (gm) は $25\text{mS}/\text{mm}$ と、過去の報告例⁽³⁾よりもチャンネル層のAl組成が高いにもかかわらず、同等の値が得られた。

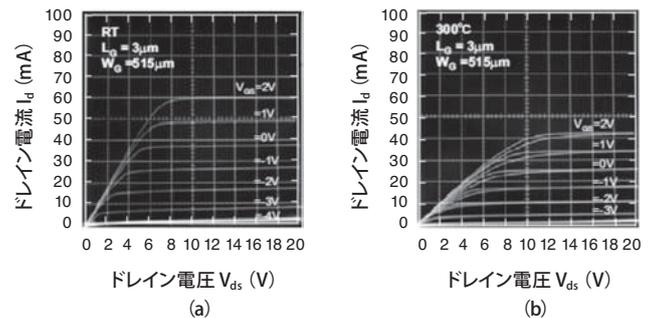


図6 低Al組成 AlGaN HEMTのドレインI-V特性 (a) 室温測定 (b) 300°C測定

AlN基板上低Al組成 AlGaN HEMTとSi基板上 GaN HEMTとの、室温の値で規格化したドレイン電流 ($V_{ds} = 10\text{V}$, $V_{gs} = 0\text{V}$)の環境温度依存性の比較を図7に示す。双方のHEMTで、環境温度上昇に伴い、規格化ドレイン電

流は低下していくことがわかる。しかし、AlGa_{0.76}N HEMT の規格化ドレイン電流の低下率は GaN HEMT の約 1/2 である。これは AlGa_{0.76}N HEMT のキャリア移動度の温度依存性が、GaN HEMT に比べて小さいことに起因していると考えられる。このことから、AlGa_{0.76}N HEMT は GaN HEMT に比べて高温特性に優れていることがわかった。

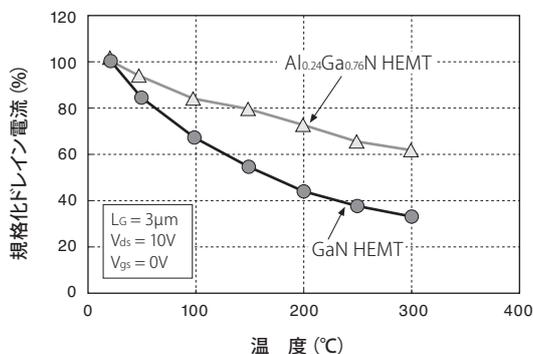


図7 低Al組成AlGa_{0.76}N HEMTとGaN HEMTの規格化ドレイン電流の温度依存性

最大相互コンダクタンス (g_m) は 4.7mS/mm と低 Al 組成 AlGa_{0.76}N HEMT の約 1/5 の値であった。これは、表1に示したシート抵抗の増加によるチャネル抵抗の増加が原因と考えられる。しかしながら、低 Al 組成 AlGa_{0.76}N HEMT 同様に良好なピンチオフ特性と飽和特性が観測された。

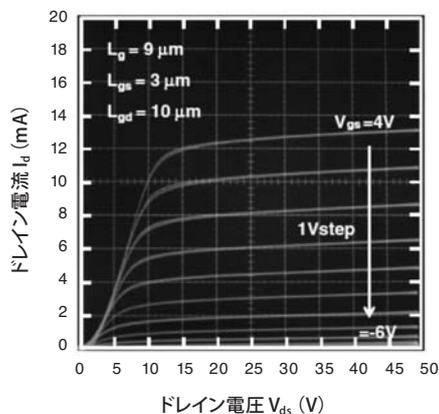


図9 高Al組成AlGa HEMTのドレインI-V特性

3-2 高Al組成AlGa_{0.51}N HEMTのデバイス特性 2章で示したように、AlGa_{0.51}N HEMTの結晶品質はAlGa_{0.51}Nチャネル層のAl組成を上げるほど良好となる。そこで我々は、世界初となるAl組成50%を超える高Al組成AlGa_{0.51}N HEMTの作製を行った⁽¹⁰⁾。図8に高Al組成AlGa_{0.51}N HEMT (Al組成51%)のデバイス構造断面図を示す。低Al組成AlGa_{0.76}N HEMTと同様に、ソース、ドレイン電極にはZr/Al/Mo/Auを、ゲート電極にはNi/Auを用いた。ゲート長 (L_g)、ゲートソース間距離 (L_{gs})、ゲート幅は、それぞれ9μm、3μm、515μmである。ゲートドレイン間距離 (L_{gd}) は5μmから15μmまで変化させたデバイスを作製した。デバイス特性はSi基板上のGaN HEMTと比較した。

高Al組成AlGa_{0.51}N HEMTの室温で測定したドレインI-V特性を図9に示す。室温における最大ドレイン電流は25mA/mm、

ゲートドレイン間耐圧 (V_{br}) の L_{gd} 依存性を図10に示す。ゲート電圧 (V_{gs}) は-20Vとチャネルは完全にピンチオフした状態の耐圧である。 V_{br} は L_{gd} に比例してほぼ線形に増加し、 $L_{gd} = 15\mu\text{m}$ で1800Vに到達した。この値はAlGa_{0.51}N HEMTとしては過去最高の値であり、チャネル層の高Al組成化の効果と考えられる。

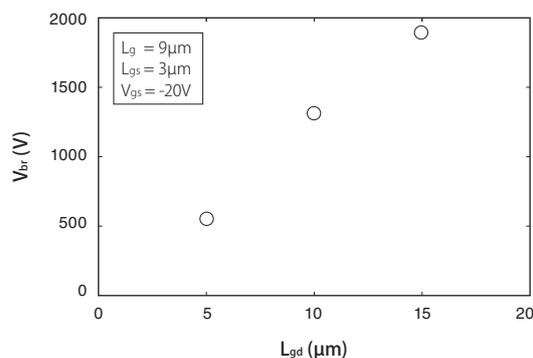


図10 ゲートドレイン間耐圧のゲートドレイン間距離依存性

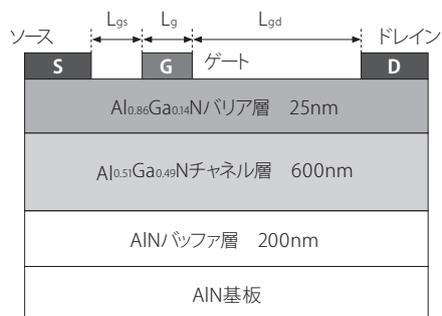


図8 高Al組成AlGa_{0.51}N HEMTのデバイス構造断面図

AlN基板上高Al組成AlGa_{0.51}N HEMTとSi基板上GaN HEMTの、室温の値で規格化したドレイン電流 ($V_{ds} = 15V$, $V_{gs} = 0V$) の環境温度依存性を図11に示す。環境温度300°Cにおける室温に対するドレイン電流の低下率は、GaN HEMTでは約80%に対し、AlGa_{0.51}N HEMTでは20%以下に

まで抑制されていることがわかる。このような AlGaIn HEMT の良好な高温特性は、高温安定動作が必要な様々な用途に有効と考えられる。

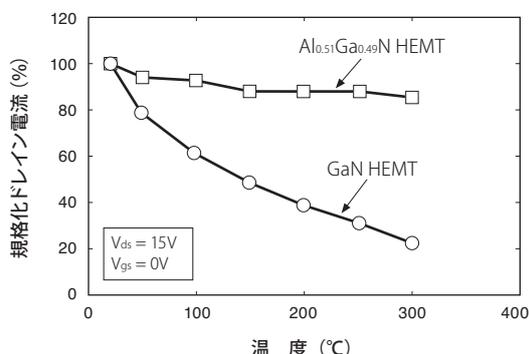


図 11 高 Al 組成 AlGaIn HEMT と GaN HEMT の規格化ドレイン電流の温度依存性

4. 結 言

低 Al 組成、高 Al 組成の AlGaIn をチャネル層とする HEMT 構造を高温仕様の MOVPE 装置を用いてエピタキシャル成長し、その結晶品質を評価した。X 線を用いた構造評価により、設計通りのエピタキシャル構造が良好な結晶品質で形成されていることを確認した。また、電気的特性評価により、バリア層-チャネル層界面に形成された 2 次元電子ガスの良好な特性を確認した。

このエピタキシャル構造を用いて、AlN 基板上に AlGaIn HEMT デバイスを作製し、GaN HEMT と比較した。AlN 基板上で初めてとなるトランジスタ動作に成功し、AlN 基板上 AlGaIn HEMT では Si 基板上 GaN HEMT に比べて高温でのドレイン電流低下率が低いことが明らかとなった。特に高 Al 組成 AlGaIn HEMT では室温から 300°C へのドレイン電流低下率が 20% 以下と低く、極めて優れた高温特性を示すことが確認された。AlN 基板と AlGaIn HEMT は、高温安定動作が必要とされる、高出力、高周波用途の次世代デバイスの実現に有望と考えられる。

5. 謝 辞

本研究は「NEDO ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術の開発-窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発プロジェクト」の委託を受けて行われた。

用語集

※1 エピタキシャル成長

基板結晶の上に薄膜結晶層（エピタキシャル層）を形成すること。エピタキシャル層は基板結晶の結晶方位や構成原子の間隔（格子定数）といった情報を引き継いで形成される。

※2 転位

結晶中に含まれる結晶欠陥のひとつで、結晶格子の原子配列のずれが線状になっている結晶欠陥のこと。

参 考 文 献

- (1) 井上和孝、佐野征吾、館野泰範、八巻史一、蛭原要、宇井範彦、川野明弘、出口博昭、「携帯電話基地局用窒化ガリウム電力増幅器 (GaN HEMT) の開発」、SEIテクニカルレビュー第177号、p.p. 97-102 (2010)
- (2) T. Nanjo, M. Takeuchi, M. Suita, T. Oishi, Y. Abe, Y. Tokuda, and Y. Aoyagi, "Remarkable breakdown voltage enhancement in AlGaIn channel high electron mobility transistors", Appl. Phys. Lett. 92 (2008) 263502.
- (3) T. Nanjo, M. Takeuchi, M. Suita, Y. Abe, T. Oishi, Y. Tokuda, and Y. Aoyagi, "First Operation of AlGaIn Channel High Electron Mobility Transistors", Appl. Phys. Express 1, 011101 (2008)
- (4) A. Raman, S. Dasgupta, S. Rajan, J. S. Speck, and U. K. Mishra, "AlGaIn Channel High Electron Mobility Transistors : Device Performance and Power-Switching Figure of Merit", Jpn. J. Appl. Phys. 47, 3359 (2008)
- (5) S. Hashimoto, K. Akita, T. Tanabe, H. Nakahata, K. Takeda, and H. Amano, "Study of two-dimensional electron gas in AlGaIn channel HEMTs with high crystalline quality", Phys. Stat. Sol. (c) 7, 1938 (2010)
- (6) 橋本信、秋田勝史、田辺達也、中幡英章、竹田健一郎、天野浩、「AlN 基板を用いた AlGaIn チャネル HEMT エピタキシャル成長の開発」、SEIテクニカルレビュー第177号、p.p. 92-96 (2010)
- (7) I. Satoh, S. Arakawa, K. Tanizaki, M. Miyayama, and Y. Yamamoto, "Sublimation growth of nonpolar AlN single crystals and defect characterization", Phys. Stat. Sol. (c) 7, 1767 (2010)
- (8) 佐藤一成、荒川聡、谷崎圭祐、宮永倫正、櫻田隆、山本喜之、中幡英章、「窒化アルミニウム単結晶基板の開発」、SEIテクニカルレビュー第177号、p.p. 87-91 (2010)
- (9) M. Hatano, N. Kunishio, H. Chikaoka, J. Yamazaki, Z. B. Makhzani, N. Yafune, K. Sakuno, S. Hashimoto, K. Akita, Y. Yamamoto and M. Kuzuhara, "Comparative high-temperature DC characterization of HEMTs with GaN and AlGaIn channel layers", CS MANTECH Conference, p.101 (2010)
- (10) H. Tokuda, M. Hatano, N. Yafune, S. Hashimoto, K. Akita, Y. Yamamoto and M. Kuzuhara, "High Al Composition AlGaIn-Channel High-Electron-Mobility Transistor on AlN Substrate", Appl. Phys. Express 3, 121003 (2010)

執筆者

秋田 勝史* : 半導体技術研究所 主席 博士 (工学)
化合物半導体エピタキシャル結晶の研究
開発に従事



橋本 信 : 半導体技術研究所

山本 喜之 : 半導体技術研究所 グループ長

矢船 憲成 : 一般財団法人 金属系材料研究開発センター

徳田 博邦 : 福井大学 大学院工学研究科 電気・電子工学専攻
特命助教 工学博士

葛原 正明 : 福井大学 大学院工学研究科 電気・電子工学専攻
教授 工学博士

岩谷 素顕 : 名城大学 理工学部 材料機能工学科
准教授 博士 (工学)

天野 浩 : 名古屋大学 大学院工学研究科 電子情報システム専攻
教授 工学博士

* 主執筆者