様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　６年　６月２５日現在

機関番号：３２６６０
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2020～2023
課題番号：２０Ｈ０２２１１

研究課題名（和文）InGaSbチャネルを用いたテラヘルツ領域極限性能トランジスタの研究

研究課題名（英文）Development of Ultra-high Performance InGaSb Channel THz Transistors

研究代表者
藤代　博記（Fujishiro, Hiroki）

東京理科大学・先進工学部電子システム工学科・教授

研究者番号：６０３３９１３２

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　13,500,000円

研究成果の概要（和文）：テラヘルツ領域極限性能トランジスタの開発を目的として(1)界面ラフネス散乱等を考慮できる量子補正MCシミュレータとSPICEを統合したシミュレータの開発、現実的なラフネス散乱と寄生インピーダンスの下で最もfTが高くなるGaInSbチャネル構造の設計、(2) MBE成長、(3)ダメージレスプロセスの開発とHEMTの試作・評価を行った。バリア層を薄層化しダブルドープ構造とした歪みステップバッファGaInSb HEMTにおいて、Sb系トランジスタとして世界最高レベルのfT = 342 GHz(Lg = 50 nm)、fmax = 451 GHz(Lg = 70 nm)を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
光と電磁波の境界であるテラヘルツ領域は、次世代通信、未踏センシング、極限コンピューティングなどの帯域として、フォトニクス、電磁波、エレクトロニクスの分野から研究が進められており、工業・情報通信・医療・バイオ・農業・セキュリティなど様々な応用が見込まれている。本研究は、テラヘルツ領域での共通の基盤技術であるテラヘルツ領域で動作する極限性能トランジスタの開発を目的とし、Sb系トランジスタとして世界最高レベルのfT = 342 GHz、fmax = 451 GHzを実現すると共に、ナローギャップ半導体の新たな学術分野を開拓した。

研究成果の概要（英文）：To develop ultra-high performance THz transistors, (1) physical device/circuit integrated simulator, which includes quantum-corrected Monte Carlo (QC-MC) simulator that can take into account various scattering mechanisms such as interface roughness scattering and SPICE simulator has been developed. And GaInSb channel structure that maximizes fT under realistic roughness scattering and parasitic impedances has been designed. (2) Epi wafers of GaInSb HEMT structures have been grown by MBE. (3) Damage-less device fabrication process compatible with Sb-based materials has been developed and GaInSb HEMTs has been fabricated. In the double-doped strained step-buffer Ga0.22In0.78Sb HEMT with thin barrier layer and double Te δ-doped structure, we have achieved fT = 342 GHz (gate length Lg = 50 nm) and maximum oscillation frequency fmax = 451 GHz (Lg = 70 nm), which are the world's highest level of RF characteristics for Sb-based transistors.

研究分野：ナノ電子デバイス

キーワード：テラヘルツ領域　極限性能トランジスタ　GaInSb　HEMT　歪みバンドエンジニアリング　fT　fmax　遅延時間解析

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１（共通）

１．研究開始当初の背景

光と電磁波の境界であるテラヘルツ領域(30 GHz～3 THz)は、次世代通信(Beyond 5G)、未踏センシング、極限コンピューティングなどの帯域として、フォトニクス、電磁波、エレクトロニクスの分野から研究が進められており、工業・情報通信・医療・バイオ・農業・セキュリティなど様々な応用が見込まれている。エレクトロニクス分野ではテラヘルツ領域での共通の基盤技術の一つとして、テラヘルツ領域で動作する極限性能のトランジスタの開発が進められていた。

２．研究の目的

本研究は現実的なラフネス散乱と寄生インピーダンスの下で最も遮断周波数 f_T が高くなるチャネル構造は何かという「問い」を設定し、テラヘルツ領域で動作する極限性能トランジスタの開発を通して、その「解」を明らかにする。基本戦略は、$Ga_{1-x}In_xSb$ チャネルを用いて電子有効質量 m^*を InAs と InSb の間に設計し、歪みバンドエンジニアリングを駆使して、m^*の観点からデバイス構造を最適化設計することである。この最適化設計されたデバイスを試作してその高い特性を実証する。直接的には従来の性能を凌駕するテラヘルツ領域極限性能トランジスタの開発を目的とするが、Sb 系半導体に限らず全てのナローギャップ半導体においてエネルギーバンド構造が高速性、低雑音性、低電圧性等に及ぼす影響を包括的に解明することがその根本にある更なる「問い」であり、これによりワイドギャップ半導体とは異なるナローギャップ半導体の新たな学術分野を開拓する。

３．研究の方法

(1) 量子補正(QC-MC)シミュレーションによるデバイス構造設計・特性解析

バンド計算プログラムにより歪みが加わったGaInSb、AlInSb等のm^*、谷エネルギー、バンド不連続などの物性パラメータを算出し、これらを用いて界面ラフネス散乱を導入したQC-MCシミュレータにより電子移動度μ、2次元電子濃度N_s、電子速度等のキャリア輸送特性、デバイス特性を計算する。さらにQC-MCシミュレータを物理デバイスモデルとして実装したSPICEシミュレーションを行い、寄生インピーダンスの下で最もf_Tが高くなるチャネル構造を最適化設計する。

(2) 分子線エピタキシー(MBE)成長

MBE法によりステップバッファ構造等の歪バンドエンジニアリングを駆使した$Ga_{1-x}In_xSb$ HEMT構造をエピ成長する。歪みステップバッファ構造は貫通転位を低減する効果を持つが、さらに成長初期核の最適化、グレーデッドバッファ、超格子構造(SLs)の導入によりミスフィット転位の発生、貫通転位の伝搬、結晶のモザイク性と成長モード等に起因する界面ラフネスの低減を図り、μを向上させる。

(3) デバイスプロセス

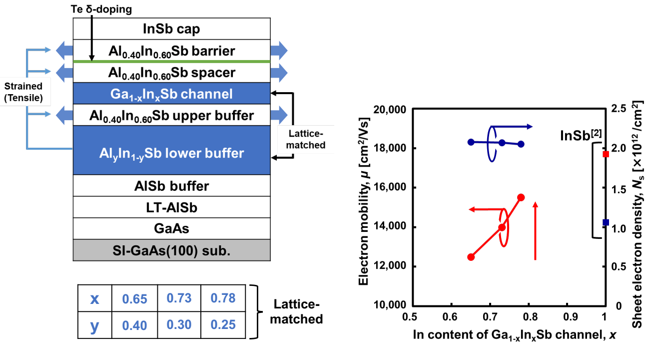
ダメージレスプロセス、低選択比エッチャント、ダブルリセス構造、オーミック電極間距離の短縮のためのプロセスを開発し、高電子移動度トランジスタ(HEMT)を試作する。

これらにより従来の性能を凌駕する $Ga_{1-x}In_xSb$ チャネルを用いたテラヘルツ領域極限性能トランジスタを実現する。

４．研究成果

(1) 歪みステップバッファ$Ga_{1-x}In_xSb$ HEMT構造の高電子移動度化の検討

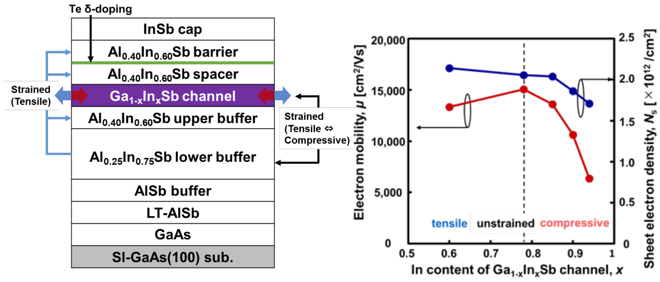
InSbはIII−V族化合物半導体の中で最もm^*が小さくμが高いが、格子整合するバリア材料がなくチャネル量子井戸深さに制限を受けるために、N_sが低いという問題がある。そこで図1(a)に示すように、チャネルを$Ga_{1-x}In_xSb$とし、InSb HEMTのチャネルに加わる圧縮歪みを低減するために考案したステップバッファ[1]を応用した歪み$Al_{0.4}In_{0.6}Sb/Al_yIn_{1-y}Sb$ステップバッファにより、チャネル量子井戸深さを確保しながら、格子整合条件を維持しつつ$Ga_{1-x}In_xSb$チャネルのIn組成比xを高めることで、高いμと高いN_sの両立に成功した(図1(b)) [2]。



(a) (b)

図 1 (a)歪み $Al_{0.4}In_{0.6}Sb/Al_yIn_{1-y}Sb$ ステップバッファ $Ga_{1-x}In_xSb$ HEMT 構造の層構造、(b) $Ga_{1-x}In_xSb$ チャネルの In 組成 x と電子移動度μ、電子濃度 N_sの関係

次にμを更に向上させるために、下層$Al_yIn_{1-y}Sb$バッファのAl組成比yを0.25とし、$Ga_{1-x}In_xSb$チャネルのxを格子整合条件の$x = 0.78$から高めることでm^*を減少させることを検討した(図2(a))。しかしながらm^*が減少したにもかかわらず、チャネルに加わる圧縮歪みにより臨界膜厚以内で貫通転位が発生し、転位散乱が増加してμが減少した(図2(b))[3]。この結果は、Sb系材料が歪みに対して脆弱であることを示唆している。

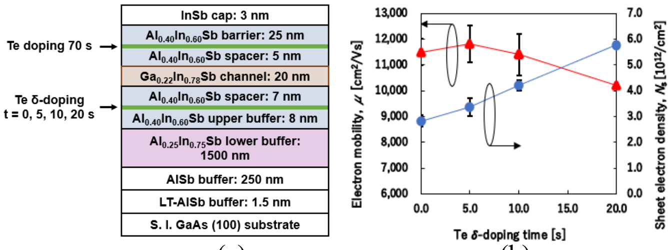


(a) (b)

図 2 (a)歪み $Al_{0.4}In_{0.6}Sb/Al_{0.25}In_{0.75}Sb$ ステップバッファ $Ga_{1-x}In_xSb$ HEMT 構造の層構造、(b)$Ga_{1-x}In_xSb$ チャネルの x とμ、N_sの関係

(2) ダブルTe δドープによる歪みステップバッファ$Ga_{0.22}In_{0.78}Sb$ HEMT構造の高電子濃度化の検討

トランジスタのDC及び高周波特性を高めるには寄生抵抗の低減とゲート・チャネル間距離の短縮が重要であり、そのためにはN_sを高める必要がある。そこでチャネル層の上下にTeをδドープするダブルドープ構造とすることで、高いμを維持しながらN_sを増加させることを検討した(図3(a)) [4]。



(a) (b)

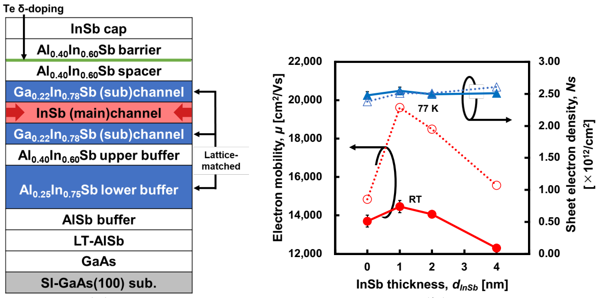
図 3 (a)ダブル Te δ ドープ歪みステップバッファ $Ga_{0.22}In_{0.78}Sb$ HEMT 構造の層構造、(b)チャネル層下側への Te ドープ時間とμ、N_sの関係

μはチャネル層下側へのドープによりN_sの増加と共にわずかに増加し、その後減少に転じた(図3(b))。μの増加はスクリーニング効果によりリモートクーロン散乱が抑制されたことを示唆している。それ以降のμの減少はリモートクーロン散乱の増加に加え、上層/下層ステップバッファ界面へのキャリア蓄積を示唆している。以上の結果から、Teドープ量を最適化することで、高いμを維持しながらN_sを増加できることを示した。

(3) $InSb/Ga_{0.22}In_{0.78}Sb$複合チャネルによる歪みステップバッファ$Ga_{0.22}In_{0.78}Sb$ HEMT構造の高電子移動度化の検討

m^*の小さいInSb層を$Ga_{0.22}In_{0.78}Sb$チャネルに挿入する$InSb/Ga_{0.22}In_{0.78}Sb$複合チャネルとすることで、

μの更なる向上を検討した(図4(a)) [5]。μはInSb層の挿入により増加したが、InSbメインチャネル層厚d_{InSb}が1 nmを越えると減少に転じた(図4(b))。同時に貫通転位密度D_{TD}が増加した。μの増加はチャネル内の平均有効質量$\overline{m^*}$が減少したことによるものと考えられる。一方μの減少は、臨界膜厚以内で発生した貫通転位により転位散乱が増加し、$\overline{m^*}$の減少の効果を上回ったことを示している。以上の結果から、挿入するInSb層を貫通転位の発生量が抑えられる厚さに制限すれば、InSb/$Ga_{0.22}In_{0.78}$Sb複合チャネルHEMT構造はμの向上に有効であることを示すことができた。

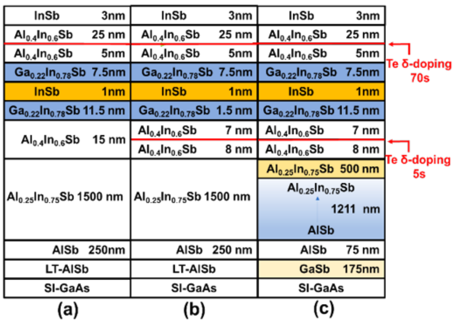


(a) (b)

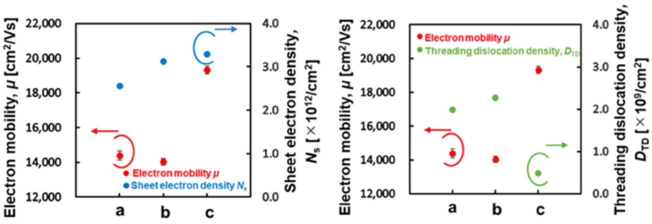
図4 (a)歪みステップバッファInSb/$Ga_{0.22}In_{0.78}$Sb複合チャネルHEMT構造の層構造、(b)InSbメインチャネル層厚d_{InSb}とμ、N_Sの関係

(4) 歪みステップバッファInSb/$Ga_{0.22}In_{0.78}$Sb複合チャネルHEMT構造のダブルTe δドープによる高電子濃度化とAl_yIn_{1-y}Sb傾斜バッファ/GaSb初期核形成層による低転位化の検討

図4(a)に示す歪みステップバッファInSb/$Ga_{0.22}In_{0.78}$Sb複合チャネルHEMT構造(a)、ダブルドープ歪ステップバッファ複合チャネルHEMT構造(b)、及びAl組成比yを1.0から0.25に線形に変化させたAl_yIn_{1-y}Sb傾斜バッファ及びGaSb初期核形成層を導入したダブルドープ歪ステップバッファ複合チャネルHEMT構造(c)の3種類をエピ成長し、電気的特性を評価した(図4(a))[6]。ダブルドープ構造とすることにより、構造(b)のμは、構造(a)と比較して2.5%減少し、N_Sは22.3%増加した(図4(b))。わずかなμの減少はリモートクーロン散乱の増加によるものであると考えられる。Al_yIn_{1-y}Sb傾斜バッファ/GaSb初期核形成層を導入した構造(c)では、AlSb/GaAs基板界面および$Al_{0.25}In_{0.75}$Sb/AlSbバッファ界面でのミスフィット転位の発生・伝搬が抑制され[7]、構造(b)と比較して、貫通転位密度D_{TD}が31.4%減少した。これによりμは37.1%増加し、μ = 19,310 cm²/Vs、$N_S = 3.3\times10^{12}$ cm^{-2}の高い特性を実現した。



(a)



(b) (c)

図4 (a)3種類の歪みステップバッファInSb/$Ga_{0.22}In_{0.78}$Sb複合チャネルHEMT構造の層構造、(b) 3種類の構造のμとN_S、(c)μと貫通転位密度D_{TD}の比較

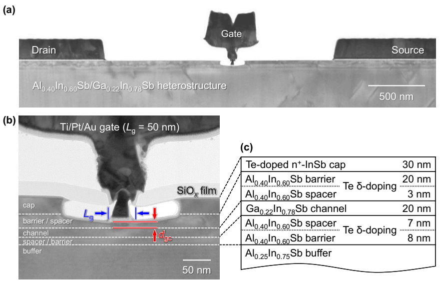


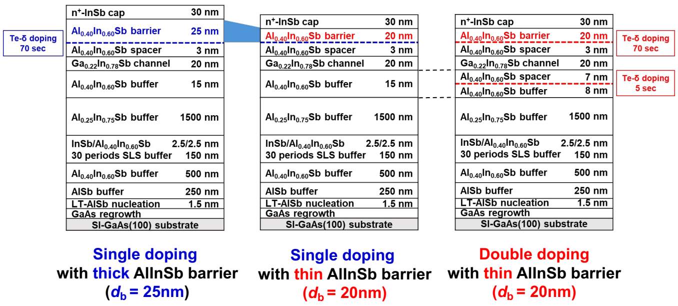
図 5 試作したダブルドープ歪みステップバッファ$Ga_{0.22}In_{0.78}$Sb HEMT の断面 TEM 像 (a)全体像、(b)リセス領域の拡大 TEM 像、(c)チャネル近傍の層構造

(5) 歪みステップバッファGaInSb HEMTの試作と評価

プラズマダメージに脆弱なSb系材料に適合した、抵抗加熱蒸着SiO_xを用いたダメージレス・デ

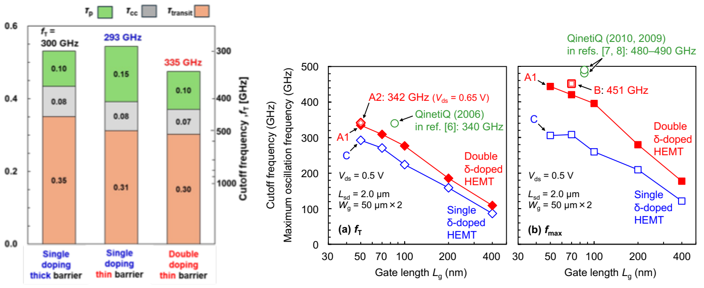
バイスプロセスを開発した[8]。素子分離、オーミック電極形成後、電子ビーム露光法を用いた3層レジストプロセスによりゲート開口部を形成し、ウェットエッチングでゲートリセスを形成した後、Ti/Pt/AuショットキーT型ゲート電極を形成して、HEMTを作製した(図5(a)、(b))。

図6に、バリア層厚d_b = 25 nmのシングルドープ歪みステップバッファ$Ga_{0.22}In_{0.78}Sb$ HEMT構造(a)、d_b = 20 nmのシングルドープ$Ga_{0.22}In_{0.78}Sb$ HEMT構造(b)、d_b = 20 nmのダブルドープ$Ga_{0.22}In_{0.78}Sb$ HEMT構造(c)の層構造を示す。この3種類のHEMTを試作して特性を評価した[9]。図7 (a)に、ゲート長L_g = 50 nmのHEMTの遅延時間解析を行った結果を示す。構造(b)は、構造(a)と比較して、d_bを薄層化したことによりゲート・チャネル間距離が短縮され、真性遅延時間τ_{int} (=ゲート走行時間τ_p+チャネル充電時間τ_{cc})が0.43 psから0.39 psに短縮された。しかしながら、N_Sの減少により寄生抵抗が増加したために、寄生遅延時間τ_pが0.10 psから0.15 psに増加し、f_Tは300から293 GHzに低下した。一方、ダブルドープ構造(c)では、N_Sの増加により寄生抵抗の増加が抑えられたためにτ_pが0.10 psに短縮され、またゲート・チャネル間距離も短縮されてτ_{int}が0.37 psに短縮され、f_Tは335 GHzに増加した。図7に、シングルドープ構造(b)とダブルドープ構造(c)のHEMTのf_T (b)と最大発振周波数f_{max} (c)のL_g依存性を示す[9、10]。構造(c)は構造(b)よりもf_Tが14–25%、f_{max}が34–52%高い値を示した。構造(c)は特に短いL_gの領域でf_Tとf_{max}が高く、短チャネル効果が抑制されていることが分かる。構造(c)のダブルドープ歪みステップバッファ$Ga_{0.22}In_{0.78}Sb$ HEMTのf_Tの最高値は342 GHz (L_g = 50 nm)、f_{max}の最高値は451 GHz(L_g = 70 nm)であった。これらの特性は、Sb系HEMTにおいてこれまで報告されている最も高い高周波特性の一つである。以上により、Sb系トランジスタとして世界最高レベルの高周波特性を実現することができた。



(a) (b) (c)

図6 (a)シングルドープ歪みステップバッファ$Ga_{0.22}In_{0.78}Sb$ HEMT構造(バリア層厚d_b = 25 nm)、(b)シングルドープ$Ga_{0.22}In_{0.78}Sb$ HEMT構造(d_b = 20 nm)、(c)ダブルドープ$Ga_{0.22}In_{0.78}Sb$ HEMT構造(d_b = 20 nm)の層構造



(a) (b) (c)

図7 (a)3種類の歪みステップバッファ$Ga_{0.22}In_{0.78}Sb$ HEMTの遅延時間解析の結果の比較(ゲート長L_g = 50 nm)、(b)シングルドープ構造(b)及びダブルドープ構造(c)のHEMT(d_b = 20 nm)の遮断周波数f_Tと(c)最大発振周波数f_{max}のL_g依存性

＜引用文献＞

[1] S. Fujikawa *et al.*, J. Cryst. Growth **425**, 1, 64 (2015).
[2] M. Hiraoka *et al.*, Phys. Status Solidi A **217**, 1900516 (2020).
[3] A. Endoh *et al.*, Phys. Status Solidi A **220**, 8, 2200529 (2023).
[4] 尾曽他, 第70回春季応用物理学会講演予稿集, 15p-PA05-3 (2023).
[5] T. Jinnai *et al.*, CSW2024.
[6] 中島他, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会発表予定.
[7] R. Ebihara *et al.*, CSW2023, TuC1-4.
[8] K. Isono *et al.*, CSW2016 WeD1-5.
[9] R. Kouno *et al.*, CSW2024.
[10] R. Machida *et al.*, TWHM2024, to be presented.

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計15件（うち査読付論文　8件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　1件）

１．著者名 T. Jinnai, T. Oba, W. Nakajima, R. Ebihara, R. Machida, I. Watanabe, Y. Yamashita, S. Hara, A. Kasamatsu, A. Endoh and H. I. Fujishiro	４．巻 -
２．論文標題 Enhanced electron mobility in InSb/Ga0.22In0.78Sb composite channel HEMT structure	５．発行年 2024年
３．雑誌名 Proc. Compound Semiconductor Week 2024 (CSW2024)	６．最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

１．著者名 R. Kouno, R. Yoshida, R. Ebihara, T. Jinnai, R. Machida, I. Watanabe, Y. Yamashita, S. Hara, A. Kasamatsu, A. Endoh and H. I. Fujishiro	４．巻 -
２．論文標題 High fT and fmax of double δ-doped GaInSb channel HEMTs	５．発行年 2024年
３．雑誌名 Proc. Compound Semiconductor Week 2024 (CSW2024)	６．最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

１．著者名 河野 亮介, 海老原 怜央, 吉田 陸人, 神内 智揮, 町田 龍人, 渡邊 一世, 山下 良美, 原 紳介, 笠松 章史, 遠藤 聡, 藤代 博記	４．巻 -
２．論文標題 AlSb/GaSb バッファ層を用いたGaInSb HEMT 構造の低転位化	５．発行年 2024年
３．雑誌名 国立研究開発法人情報通信研究機構2023年度先端ICTデバイスラボ成果報告書	６．最初と最後の頁 19-1 - 19-2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

１．著者名 神内 智揮, 海老原 怜央, 吉田 陸人, 河野 亮介, 町田 龍人, 渡邊 一世, 山下 良美, 原 紳介, 笠松 章史, 遠藤 聡, 藤代 博記	４．巻 -
２．論文標題 InSb/Ga0.22In0.78Sb複合チャネルHEMT構造の高電子移動度化	５．発行年 2024年
３．雑誌名 国立研究開発法人情報通信研究機構2023年度先端ICTデバイスラボ成果報告書	６．最初と最後の頁 20-1 - 20-2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

1．著者名 R. Ebihara, G. Ogane, M. Hiraoka, T. Hayashi, M. Kunisawa, R. Machida, I. Watanabe, Y. Yamashita, S. Hara, A. Kasamatsu, A. Endoh and H. I. Fujishiro	4．巻 -
2．論文標題 Reduction of Defects in GaInSb HEMT Structure by Using AlSb/GaSb Buffer	5．発行年 2023年
3．雑誌名 Proc. Compound Semiconductor Week 2023 (CSW2023)	6．最初と最後の頁 TuC1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 ―

1．著者名 R. Machida, N. Kishimoto, Y. Isomae, T. Hayashi, M. Kunisawa, A. Endoh, H. I. Fujishiro, Y. Yamashita, S. Hara, A. Kasamatsu, I. Watanabe	4．巻 -
2．論文標題 Performance Comparison of Al0.40In0.60Sb/Ga0.22In0.78Sb HEMT with Undoped- and Doped-cap Layers to Improve RF Characteristics	5．発行年 2023年
3．雑誌名 Proc. Compound Semiconductor Week 2023 (CSW2023)	6．最初と最後の頁 P2-015
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 ―

1．著者名 藤代 博記 , 遠藤 聡 , 羽鳥 小春, 吉武 優輔, 吉田 陸人, 海老原 怜央, 町田 龍人, 渡邊 一世, 山下 良美, 原 紳介, 笠松 章史	4．巻 -
2．論文標題 GaInSb n-チャネル HEMT 構造におけるチャネル歪みの電子輸送特性への影響	5．発行年 2023年
3．雑誌名 国立研究開発法人情報通信研究機構2022年度先端ICTデバイスラボ成果報告書	6．最初と最後の頁 23-1 - 23-2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 ―

1．著者名 A. Endoh, K. Hatori, N. Kishimoto, M. Hiraoka, Y. Kemmochi, Y. Endoh, K. Osawa, T> Hayashi, R. Machida, I. Watanabe, Y. Yamashita, S. Hara, A. Kasamatsu and H. I. Fujishiro	4．巻 220
2．論文標題 Effect of Strain in Channel on Electron Transport Properties of Ga1−xInxSb High Electron Mobility Transistor Structures with Strained-Al0.40In0.60Sb/Al0.25In0.75Sb Stepped Buffer	5．発行年 2023年
3．雑誌名 PHYSICA STATUS SOLIDI A-APPLICATIONS AND MATERIALS SCIENCE	6．最初と最後の頁 2200529
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/pssa.202200529	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 ―

1．著者名 A. Endoh, N. Kishimoto, Y. Isomae, T. Hayashi, M. Kunisawa, K. Sawamura, T. Kawasaki, Y. Satou, I. Watanabe, Y. Yamashita, R. Machida, S. Hara, A. Kasamatsu and H. I. Fujishiro	4．巻 -
2．論文標題 Development of GaInSb n-Channel HEMTs Using Experiments and Simulations	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Abstracts of 14th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM2022)	6．最初と最後の頁 12-3
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

1．著者名 K. Hatori, N. Kishimoto, M. Hiraoka, Y. Endoh, K. Osawa, T. Hayashi, Y. Kemmochi, R. Machida, I. Watanabe, Y. Yamashita, S. Hara, A. Kasamatsu, A. Endoh and H. I. Fujishiro	4．巻 -
2．論文標題 Effect of Strain in Channel on Electron Transport Properties of Ga1-xInxSb HEMT Structures with Strained-Al0.40In0.60Sb/Al0.25In0.75Sb Stepped Buffer	5．発行年 2022年
3．雑誌名 Proc. Compound Semiconductor Week 2022 (CSW2022)	6．最初と最後の頁 67
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

1．著者名 藤代博記、遠藤　聡、礒前雄人、吉武優輔、國澤宗真、羽鳥小春、渡邊一世、山下良美、町田龍人、原紳介、笠松章史	4．巻 -
2．論文標題 エピタキシャル構造に対してスケーリングを施したGaInSbチャネルHEMT	5．発行年 2022年
3．雑誌名 国立研究開発法人情報通信研究機構2021年度先端ICTデバイスラボ成果報告書	6．最初と最後の頁 28-1 - 28-2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

1．著者名 Y. Isomae, N. Kishimoto, T. Hayashi, M. Kunisawa, I. Watanabe, Y. Yamashita, R. Machida, S. Hara, A. Kasamatsu, A. Endoh and H. I. Fujishiro	4．巻 -
2．論文標題 Device Performances and Delay Time Analysis of GaInSb-Channel HEMTs Scaled to Epitaxial Structures	5．発行年 2021年
3．雑誌名 Proc. Compound Semiconductor Week 2021 (CSW2021)	6．最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

1．著者名 礒前雄人、岸本尚之、林　拓也、國澤宗真、渡邊一世、山下良美、町田龍人、原　紳介、笠松章史、遠藤聡、藤代博記	4．巻 121
2．論文標題 エピスケーリングを施したGaInSb-HEMTの特性評価と遅延時間解析	5．発行年 2021年
3．雑誌名 信学技報	6．最初と最後の頁 44 - 47
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

1．著者名 藤代博記、遠藤　聡、林　拓也、岸本尚之、國澤宗真、礒前雄人、渡邊一世、山下良美、町田龍人、原紳介、笠松章史	4．巻 -
2．論文標題 AlSb/GaSbバッファがGaInSb HEMTの電気的特性に与える影響	5．発行年 2021年
3．雑誌名 国立研究開発法人情報通信研究機構2020年度先端ICTデバイスラボ成果報告書	6．最初と最後の頁 26-1 - 26-2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

1．著者名 藤代博記、遠藤　聡、林　拓也、岸本尚之、國澤宗真、礒前雄人、渡邊一世、山下良美、町田龍人、原紳介、笠松章史	4．巻 -
2．論文標題 AlSb/GaSbバッファがGaInSb HEMTの電気的特性に与える影響	5．発行年 2021年
3．雑誌名 国立研究開発法人情報通信研究機構2020年度先端ICTデバイスラボ成果報告書	6．最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 －

〔学会発表〕　計20件（うち招待講演　0件／うち国際学会　8件）

1．発表者名 R. Machida, R. Yoshida, R. Kouno, R. Ebihara, T. Jinnai, I. Watanabe, Y. Yamashita, S. Hara, A. Kasamatsu, A. Endoh, H. I. Fujishiro
2．発表標題 Double δ-doped Al0.40In0.60Sb/Ga0.22In0.78Sb HEMTs with over 450 GHz-fmax
3．学会等名 15th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM2024)（国際学会）
4．発表年 2024年

１．発表者名 R. Kouno, R. Yoshida, R. Ebihara, T. Jinnai, R. Machida, I. Watanabe, Y. Yamashita, S. Hara, A. Kasamatsu, A. Endoh and H. I. Fujishiro
２．発表標題 High fT and fmax of double δ-doped GaInSb channel HEMTs
３．学会等名 Compound Semiconductor Week 2024 (CSW2024)（国際学会）
４．発表年 2024年

１．発表者名 T. Jinnai, T. Oba, W. Nakajima, R. Ebihara, R. Machida, I. Watanabe, Y. Yamashita, S. Hara, A. Kasamatsu, A. Endoh and H. I. Fujishiro
２．発表標題 Enhanced electron mobility in InSb/Ga0.22In0.78Sb composite channel HEMT structure
３．学会等名 Compound Semiconductor Week 2024 (CSW2024)（国際学会）
４．発表年 2024年

１．発表者名 吉田陸人，河野亮介，海老原怜央，神内智揮，渡邊一世，山下良美，町田龍人，原紳介，笠松章史，遠藤聡，藤代博記
２．発表標題 300 GHz 超fT，fmax ダブルドープ構造GaInSb HEMT
３．学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
４．発表年 2024年

１．発表者名 吉田陸人，河野亮介，海老原怜央，神内智揮，渡邊一世，山下良美，町田龍人，原紳介，笠松章史，遠藤聡，藤代博記
２．発表標題 GaInSb HEMT のバリア層薄膜化による真性遅延時間低減
３．学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
４．発表年 2024年

１．発表者名
町田 龍人、岸本 尚之、礒前 雄人、林 拓也、國澤 宗真、遠藤 聡、藤代 博記、山下 良美、原 紳介、笠松 章史、渡邊 一世

２．発表標題
アンドープキャップAl0.40In0.60Sb/Ga0.22In0.78Sb HEMTの特性

３．学会等名
第84回応用物理学会秋季学術講演会

４．発表年
2023年

１．発表者名
R. Machida, N. Kishimoto, Y. Isomae, T. Hayashi, M. Kunisawa, A. Endoh, H. I. Fujishiro, Y. Yamashita, S. Hara, A. Kasamatsu, I. Watanabe

２．発表標題
Performance Comparison of Al0.40In0.60Sb/Ga0.22In0.78Sb HEMT with Undoped- and Doped-cap Layers to Improve RF Characteristics

３．学会等名
Compound Semiconductor Week 2023 (CSW2023)（国際学会）

４．発表年
2023年

１．発表者名
R. Ebihara, G. Ogane, M. Hiraoka, T. Hayashi, M. Kunisawa, R. Machida, I. Watanabe, Y. Yamashita, S. Hara, A. Kasamatsu, A. Endoh and H. I. Fujishiro

２．発表標題
Reduction of Defects in GaInSb HEMT Structure by Using AlSb/GaSb Buffer

３．学会等名
Compound Semiconductor Week 2023 (CSW2023)（国際学会）

４．発表年
2023年

１．発表者名
神内 智揮, 羽鳥 小春, 海老原 怜央, 尾曽 雅宗, 河野 亮介, 遠藤 聡, 藤代 博記

２．発表標題
InSb/Ga0.22In0.78Sb 複合チャネルHEMT構造の電気的特性

３．学会等名
第70回応用物理学会春季学術講演会

４．発表年
2023年

１．発表者名
尾曽 雅宗、羽鳥 小春、海老原 怜央、神内 智揮、河野 亮介、遠藤 聡、藤代 博記

２．発表標題
ダブルTe ドープGaInSb HEMT構造の電気的特性

３．学会等名
第70回応用物理学会春季学術講演会

４．発表年
2023年

１．発表者名
A. Endoh, N. Kishimoto, Y. Isomae, T. Hayashi, M. Kunisawa, K. Sawamura, T. Kawasaki, Y. Satou, I. Watanabe, Y. Yamashita, R. Machida, S. Hara, A. Kasamatsu and H. I. Fujishiro

２．発表標題
Development of GaInSb n-Channel HEMTs Using Experiments and Simulations

３．学会等名
14th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM2022)（国際学会）

４．発表年
2022年

１．発表者名
K. Hatori, N. Kishimoto, M. Hiraoka, Y. Endoh, K. Osawa, T. Hayashi, Y. Kemmochi, R. Machida, I. Watanabe, Y. Yamashita, S. Hara, A. Kasamatsu, A. Endoh and H. I. Fujishiro

２．発表標題
Effect of Strain in Channel on Electron Transport Properties of Ga1-xInxSb HEMT Structures with Strained-Al0.40In0.60Sb/Al0.25In0.75Sb Stepped Buffer

３．学会等名
Compound Semiconductor Week 2021 (CSW2022)（国際学会）

４．発表年
2022年

１．発表者名
海老原怜央、國澤宗真、羽鳥小春、吉田陸人、渡邊一世、町田龍人、山下良美、原　紳介、笠松章史、遠藤　聡、藤代博記

２．発表標題
Ｘ線回折極点図測定を用いたGaInSb HEMT構造中の双晶評価

３．学会等名
第69回応用物理学会春季学術講演会

４．発表年
2022年

１．発表者名
吉田陸人、國澤宗真、羽鳥小春、海老原怜央、渡邊一世、町田龍人、山下良美、原　紳介、笠松章史、遠藤　聡、藤代博記

２．発表標題
GaInSb HEMT構造の電気的特性への熱処理の影響

３．学会等名
第69回応用物理学会春季学術講演会

４．発表年
2022年

１．発表者名
礒前雄人、岸本尚之、林　拓也、國澤宗真、渡邊一世、山下良美、町田龍人、原　紳介、笠松章史、遠藤　聡、藤代博記

２．発表標題
エピスケーリングを施したGaInSb-HEMTの特性評価と遅延時間解析

３．学会等名
電子情報通信学会電子デバイス研究会「ミリ波・テラヘルツ波デバイス・システム」

４．発表年
2021年

１．発表者名
Y. Isomae, N. Kishimoto, T. Hayashi, M. Kunisawa, I. Watanabe, Y. Yamashita, R. Machida, S. Hara, A. Kasamatsu, A. Endoh and H. I. Fujishiro

２．発表標題
Device Performances and Delay Time Analysis of GaInSb-Channel HEMTs Scaled to Epitaxial Structures

３．学会等名
Compound Semiconductor Week 2021 (CSW2021)（国際学会）

４．発表年
2021年

１．発表者名
林拓也、平岡瑞穂、大金剛毅、國澤宗真、岸本尚之、渡邊一世、山下良美、原　紳介、町田龍人、笠松章史、遠藤　聡、藤代博記

２．発表標題
AlSb/GaSbバッファがGaInSb HEMTの電気的特性に与える影響

３．学会等名
第68回応用物理学会春季学術講演会

４．発表年
2021年

１．発表者名 國澤宗真、林　拓也、平岡瑞穂、大金剛毅、渡邊一世、山下良美、原　紳介、町田龍人、笠松章史、遠藤　聡、藤代博記
２．発表標題 歪超格子バッファを用いたGaInSb HEMTの電気的特性と膜厚の評価
３．学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
４．発表年 2021年

１．発表者名 岸本尚之、礒前雄人、林　拓也、國澤宗真、渡邊一世、山下良美、町田龍人、原　紳介、笠松章史、遠藤　聡、藤代博記
２．発表標題 エピスケーリングを施したGaInSb-HEMTの特性評価と遅延時間解析
３．学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
４．発表年 2021年

１．発表者名 林　拓也、平岡瑞穂、大金剛毅、國澤宗真、岸本尚之、渡邊一世、山下良美、原　紳介、町田龍人、笠松章史、遠藤　聡、藤代博記
２．発表標題 AlSb/GaSbバッファがGaInSb HEMTの電気的特性に与える影響
３．学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
４．発表年 2020年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

－

６．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究分担者	遠藤　聡 (Endoh Akira) (60417110)	東京理科大学・先進工学部電子システム工学科・教授 (32660)	

6．研究組織（つづき）

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究分担者	渡邊　一世 (Watanabe Issei) (20450687)	国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所小金井フロンティア研究センター・室長 (82636)	
研究分担者	町田　龍人 (Machida Ryuto) (50806560)	国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所小金井フロンティア研究センター・研究員 (82636)	

7．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

8．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関