

一般セッション(口頭講演) | 15 結晶工学：15.3 III-V族エピタキシャル結晶・エピタキシーの基礎

2025年3月16日(日) 13:30 ~ 14:45 皿 K310 (講義棟)

[16p-K310-1~5] 15.3 III-V族エピタキシャル結晶・エピタキシーの基礎

西永 慈郎(産総研)

13:30 ~ 13:45

[16p-K310-1]

[第57回講演奨励賞受賞記念講演] III-V/Si集積に向けたMOVPE選択成長によるSOI (001)基板上
InPマイクロテンプレートおよびInP/InGaAsPダブルヘテロ構造の作製○本間 寛弥¹、杉山 弘樹¹、開 達郎¹、藤井 拓郎¹、佐藤 具就¹、松尾 慎治¹ (1.NTT 先デ研)

13:45 ~ 14:00

[16p-K310-2]

InAs/GaAs(111)A赤外検出器の動作機構：GaAs基板表面の影響

○間野 高明¹、石田 暢之¹、川津 琢也¹、大竹 晃浩¹、宮崎 英樹¹ (1.NIMS)

14:00 ~ 14:15

[16p-K310-3]

サファイア (0001) 基板上における AlGaAs の分子線エピタキシャル成長と特性の成長膜厚依存性

○(B)和島 颯汰^{1,3}、橋本 英李^{2,3}、佐藤 大樹⁴、西谷 智博⁴、石川 史太郎³ (1.北大工、2.北大情科院、3.北大量積セ、4.フォトエレクトロソウル)

14:15 ~ 14:30

[16p-K310-4]

GaAsBiのMBE成長時の基板温度測定法

○下村 哲¹、江口 陸¹、今井 大登¹ (1.愛媛大院理工)

14:30 ~ 14:45

[16p-K310-5]

(001)面カイネティック・ラフニングにおけるKPZ-BKT普遍クラスとその温度、駆動力依存性

○阿久津 典子¹、寒川 義裕¹ (1.九大応研)

III-V/Si 集積に向けた MOVPE 選択成長による SOI(001)基板上 InP マイクロテンプレートおよび InP/InGaAsP ダブルヘテロ構造の作製

Selective-area MOVPE growth of InP micro templates and InP/InGaAsP double heterostructures on SOI (001) substrates for III-V/Si integration

日本電信電話株式会社 NTT 先端集積デバイス研究所

○本間 寛弥, 杉山 弘樹, 開 達郎, 藤井 拓郎, 佐藤 具就, 松尾 慎治

NTT Device Technology Labs., NTT Corporation,

○H. Homma, H. Sugiyama, T. Hiraki, T. Fujii, T. Sato, and S. Matsuo

E-mail: hirova.homma@ntt.com

【はじめに】 Si 上 III-V 族半導体結晶直接成長技術による Si 導波路結合型レーザのモノリシック集積は、コストやスループットの優位性からその実現が期待されている。我々は①SOI (001)基板上に形成した中空構造内への InP 薄膜横方向成長によるマイクロテンプレート(micro template: MT)形成技術と、②MT 上への選択再成長技術を組み合わせ、メンブレンレーザを含む III-V 族半導体光デバイスのモノリシック集積実現を目指して研究を進めている (Fig. 1)。①において、我々はこれまでに積層欠陥、双晶面、Anti-phase boundaries 等の面欠陥が MT の品質劣化要因になっていることを報告してきた¹⁾。本講演ではこれまでの検討について簡単に振り返った後、高品質化した InP MT 上での InP/InGaAsP ダブルヘテロ構造 (DH)の再成長実現について報告する。

【実験】縦型 MOVPE 装置により、TMIn, TEGa, TBAs, TBP, PH₃, AsH₃ を原料に用いて結晶成長を行った。横成長用基板は、SOI (001)基板上に成膜した酸化膜に対して適当な形状で開口部を形成し、Si をサイドエッチングすることで形成した (Fig. 1a)。露出した Si を起点として InP MT を成長させた後に (Fig. 1b)²⁾、MT 上部の酸化膜を除去し、選択再成長により DH 構造を形成した (Fig. 1c)。光学顕微鏡、SEM、AFM による構造評価と顕微フォトルミネッセンス(μ PL)による光学特性評価を行った。

【結果】 Fig. 2(a)は横方向成長した InP MT 上に InP/InGaAsP DH 構造を選択成長した試料の断面 SEM 像である。Si を起点として成長した InP MT 上に、平坦なヘテロ界面を有する InP/InGaAsP DH が形成されている。Fig. 2(b)に同試料を上面から観察した光学顕微鏡像を示す。大面積 ($\sim 8 \times 500 \mu\text{m}^2$)に渡り、DH 構造表面には MT 由来の表面欠陥は認められなかった。AFM 測定の結果、最表面の InP クラッド層は原子レベルで平坦であった(RMS 値: 0.16 nm)。さらに μ PL 測定によって O 帯での室温 PL 発光を確認した。これらの結果は、高品質な InP/InGaAsP DH の形成に成功したことを示している。本手法は、SOI (001) 基板上 III-V 光デバイスモノリシック集積の有望な基盤技術になり得ると考えられる。

【Ref.】

[1] J. Crystal Growth 648 (2024) 127903.

[2]本間他, 秋季応物,17p-C42-5 (2024)

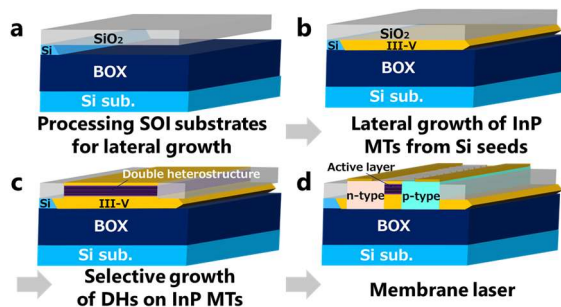


Fig. 1. Cross-sectional schematic diagram of monolithically integrating III-V membrane lasers on SOI (001) substrates.

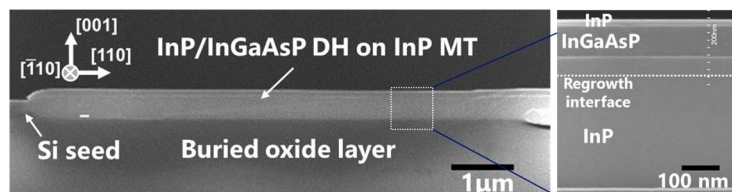


Fig. 2(a). Cross-sectional SEM images of InP/InGaAsP DH consisting of InGaAsP and InP cladding layer.

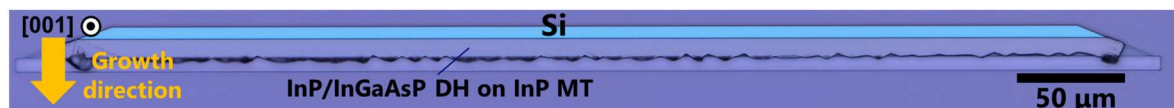


Fig. 2(b). Top-view Nomarski microscope image of InP/InGaAsP DH on InP template on SOI substrate.

InAs/GaAs(111)A 赤外検出器の動作機構 : GaAs 基板表面の影響

Operating mechanism of InAs/GaAs(111)A infrared detectors:

Effects of surfaces of the GaAs substrates

NIMS¹ ◯間野 高明¹, 石田 暢之¹, 川津 琢也¹, 大竹 晃浩¹, 宮崎 英樹¹

NIMS¹, ◯Takaaki Mano¹, Nobuyuki Ishida¹, Takuya Kawazu¹, Akihiro Ohtake¹, Hideki T. Miyazaki¹

E-mail: MANO.Takaaki@nims.go.jp

【はじめに】赤外検出器は、環境ガス計測、非破壊検査等、安心安全社会を支える重要なデバイスである。最近我々は、安価で高性能な検出器実現を目的に、高密度の転位を含む InAs/GaAs(111)A 界面構造を用いた赤外検出器を考案し、その優れた暗電流特性と高感度検出を実証した[1,2]。しかし、動作機構については、十分な理解が進んでいなかった。今回我々は、作製した素子構造の詳細な分析により、動作機構に必要な構造的な要素を明らかにしたので報告する。

【実験方法と結果】これまで報告していた素子構造は、(1) n-GaAs(111)A 基板, (2) 50 nm-Si-GaAs ($1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$), (3) 10 nm-GaAs (undoped), (4) 5 ML-InAs, (6) 300 nm-InAs ($5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$), (7) 20 nm-InAs ($2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$) であったが、(2)の Si-GaAs 成長時に砒素供給が充分でなかったことにより Si が両性ドーパントとなり、この層が $\sim 1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ の p 型 (ほぼ半絶縁化) となっていることが明らかになった。そこで、基板を含む GaAs 層の影響を明らかにするために、成長温度の低下 ($520 \rightarrow 500$ °C) と砒素供給量の増加 ($3 \times 10^5 \rightarrow 5 \times 10^5$ Torr) により、Si-GaAs 層を設計通りの n 型化ができることを確認した上で、**試料 A** : (1) n-GaAs(111)A 基板, (2) 200 nm-n-GaAs (Si: $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$) バッファ層, (3)

60 nm-GaAs (undoped)、及び、**試料 B** : (1) n-GaAs(111)A 基板, (3) 60 nm-GaAs (undoped)、の二種類の試料を作製した。この上に成長する(4)~(7)の InAs 構造は同一である。デバイス化して電流-電圧測定を行ったところ、n-GaAs の清浄表面に undoped-GaAs を成長した試料 A では、図 1(a)に示すように、0.5V 程度の低電圧から暗電流が急峻に立ち上がり、さらに、赤外線照射しても良好な感度特性が得られないことが分かった。一方、n-GaAs(111)A 基板上に直接 undoped-GaAs 層を成長した試料 B では、高電圧まで暗電流が抑制され、赤外線照射による明確な光電流も確認された (図 1(b))。我々は、この違いは、市販の GaAs 基板の表面に酸化膜除去のための熱処理後 ($600^\circ\text{C} \times 5$ 分程度) も残留する不純物によると考え、実際に SIMS 分析を行ったところ、 $10^{13} \sim 10^{14}/\text{cm}^2$ 程度の高濃度 Si, C, O が界面に残留していることが確認された。これらの不純物はミッドギャップ付近のフェルミレベルのピン止め効果を引き起こす。その結果、GaAs の障壁構造が三角ポテンシャル (図 1(c)) ではなく矩形ポテンシャル (図 1(d)) となることにより、デバイスの低暗電流及び高感度特性が実現されていると考えられる。

【謝辞】本研究の一部は科研費 基盤研究 B (24K01367) の支援により行われた。

【参考文献】 1) T. Mano et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15**, 29636 (2023). 2) 間野他、第 84 回秋応物 20a-A311-1 (2023)

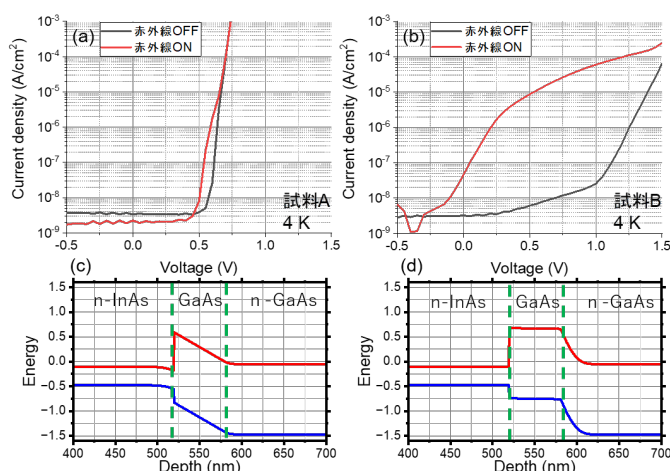


図 1 (a, b) 試料 A, B の 4 K における電流-電圧特性。黒線は赤外線照射無し、赤線は赤外線照射有りでの結果である。(c, d) 試料 A, B の界面付近のバンド構造の予測図。

サファイア (0001) 基板上における AlGaAs の 分子線エピタキシャル成長と特性の成長膜厚依存性

Molecular Beam Epitaxial Growth of AlGaAs on Sapphire (0001) and Its Characteristics at Different Film Thicknesses

北大工¹, 北大情科院², 北大量積セ³, フォトエレクトロンソウル⁴

○(B)和島 颯汰^{1,3}, (D)橋本 英李^{2,3}, 佐藤 大樹⁴, 西谷 智博⁴, 石川 史太郎³

Hokkaido Univ.¹, Hokkaido Univ. Info.², Hokkaido Univ. RCIQE.³, Photo electron Soul Inc.⁴

○Sota Wajima^{1,3}, Hidetoshi Hashimoto^{2,3}, Daiki Sato⁴, Tomohiro Nishitani⁴, Fumitaro Ishikawa³

E-mail: wajima.sota.d0@elms.hokudai.ac.jp

【はじめに】サファイアは紫外から赤外まで高い光学的透明性を示し、その低屈折率、機械的強度、高温安定性、絶縁性と相まって、フォトニクスやエレクトロニクスの多様な用途への応用が期待されている。一方、GaAsはダイレクトバンドギャップ材料であり、優れた半導体光源として広く利用されている。サファイアとIII-V族半導体は熱膨張係数が近く、GaAsはより高い電子移動度を持つ。最近Kumarらは、サファイア基板上に高品質のGaAsを成長させることに成功した[1]。彼らの方法は、成長の初期段階でAlAsバッファ層を採用し、その後のGaAsの成長を最適化した。AlGaAsは一般にGaAsよりも高い成長温度で形成できるため、サファイア基板上へのヘテロエピタキシャル成長に有利に働くと期待される。本研究では、GaAsよりもバンドギャップが大きく、良質なヘテロ接合を形成する可能性のあるAlGaAsをサファイア基板上に成長させる試みについて報告する。

【実験・結果】サファイア(0001)基板上に分子線エピタキシー(MBE)法で $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ を成長させ、その結晶特性と表面形態を評価した。成長は、基板温度 650°C の熱処理後、 560°C で5nmのAlAsバッファ層を成長し、 730°C で $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 層(厚さ200nmおよび500nm)を成長させた。X線回折(XRD)解析では、AlGaAs(111)回折に起因するピークが観測され、エピタキシャル成長が確認された。Fig. 1は、厚さ200nmの $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 層のAFM像である。この画像から、200nmの試料に三角形構造とステップ構造(高さ2.5nm、幅26nm)が見られた。この画像の二乗平均平方根(RMS)粗さは約7nmであった。膜厚を500nmに増加させると、三角形構造が拡大した。一方、低温で成長したGaAs試料では粗い粒状構造(RMS粗さ約9nm)が観察され、AlGaAsの優れたエピタキシャル成長特性が確認された。

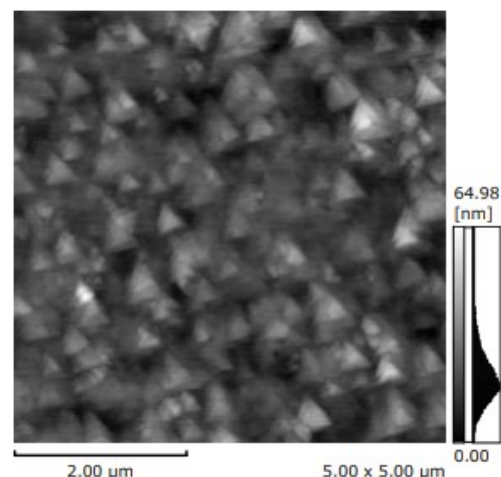


Figure 1. AFM observation of 200 nm $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ sample surface.

1. R. Kumar, S. K. Saha, A. Kuchuk, F. Maia de Oliveira, K. R. Khiantge, S.-Q. Yu, Y. I. Mazur, G. J. Salamo, Cryst. Growth Des., 23, 7385 (2023).

GaAsBi の MBE 成長時の基板温度測定法

A method for measuring substrate temperature during MBE growth of GaAsBi

愛媛大学院理工, °下村 哲, (M2)江口 陸, (M2)今井 大登

Ehime Univ., °Satohi Shimomura, Riku Eguchi, Hiroto Imai

E-mail: simomura.satoshi.mu@ehime-u.ac.jp

GaAsBi は GaAs に近い組成領域で Bi 1%あたりバンドギャップが 88 meV 減少する. Bi 組成がわずかに 11%で, 光通信帯レーザで使われる $1.55 \mu\text{m}$ の波長の光子エネルギー (0.8 eV) に等しいバンドギャップを有する半導体発光材料が実現できることを示している. GaAsBi が注目されるのは GaAs 基板上に光通信帯のレーザが実現でき, 面発光レーザへの応用も容易になると考えられているからである. Bi は 400°C 以上の基板温度で結晶相に取り込まれない. 基板温度を下げれば Bi 組成は増えるが, 一方で光学的品質が下がる. このため, 現在多くの研究者は光学的特性の高い試料を作るときには, 350°C 前後の成長温度で GaAsBi 結晶の MBE 成長をおこなっている. 今回, 350°C 帯の基板温度の測定法について議論する.

これまで, GaAs 基板温度の測定に, 波長 $0.8 \mu\text{m}$ の熱線を検出する Si のフォトダイオードも用いたピロメータを使用してきた. 波長 $0.8 \mu\text{m}$ は GaAs 基板で吸収されるため GaAs 基板が透けて下のヒーターが見えないからである. しかしながら, このピロメータが測定できる温度は 460°C 以上で, それより低い基板温度は, 基板下の熱電対の示す温度とピロメータの $460 \sim 600^\circ\text{C}$ の温度関係を外挿して熱電対の示す温度で決めてきた. 今回, 大気窓の波長 $7.5 - 14 \mu\text{m}$ の熱線を検出し 温度測定範囲が $-60 \sim 650^\circ\text{C}$ にあるサーモグラフィを用いて基板温度測定が可能か確認した.

図1に示すように 真空装置内に基板ヒーター (熱源), その上に 2 inch の GaAs 基板をのせ, 真上に上からサーモグラフィ, 横にビデオカメラを配した. GaAs 基板の裏面に Al を蒸着しヒーターの熱線が透けないようにした. GaAs 基板上のインジウム (融点 156.6°C) で温度較正を行い, 放射率 $\epsilon = 0.21$ を得た. 原理的に GaAs 基板温度が測定できることを確認した.

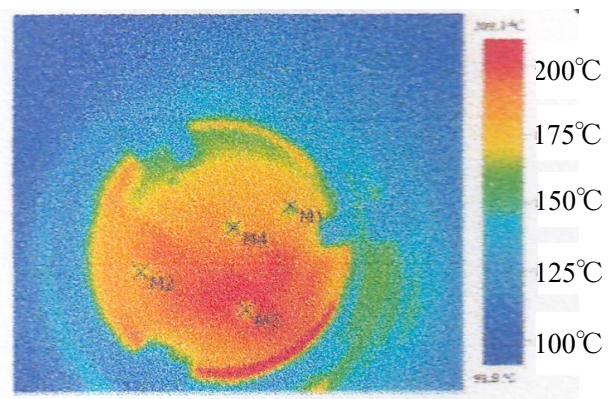
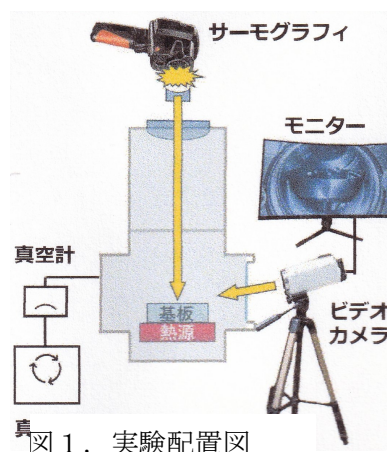


図2. 熱画像 ×印に In がある。

(001) 面カイネティック・ラフニングにおける KPZ-BKT 普遍クラスとその温度、駆動力依存性

KPZ-BKT Universal Class for Kinetic Roughening on (001) Surface and its Temperature and Driving Force Dependence

九大応力研 ○阿久津 典子、寒川 義裕

RIAM, Kyushu Univ. ○Noriko Akutsu, Yoshiriko Kangawa

E-mail: akutsu@riam.kyushu-u.ac.jp

(001) 面において平衡状態近傍における 2 次元多数核形成結晶定常成長は低温で Kardar-Parisi-Zhang (KPZ) 普遍クラスに属することが RSOS モデルのモンテカルロ計算により示された [1]。この結果はまた、原子スケール荒さ [2] と熱力学的荒さ [3] は区別する必要があることを意味する。それでは、温度上昇に伴い原子スケール荒さが増加したら KPZ 普遍クラスに属していた表面はどのように熱的ラフニング転移である Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 荒さ面へ移行していくのか？モンテカルロ法による結果 [4] を報告する。

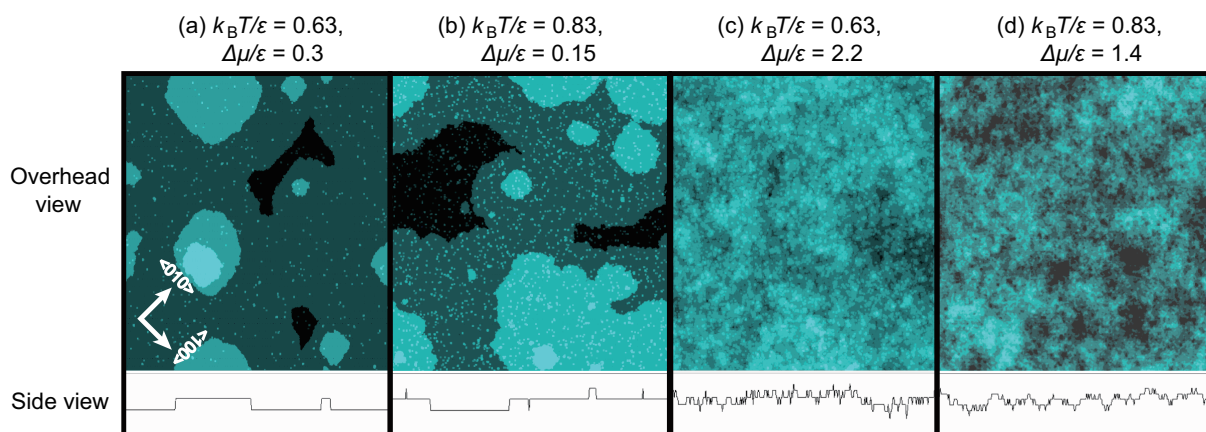


図 1: Examples of KPZ (panels (a) and (b)) and BKT (panels (c) and (d)) rough surfaces at 4×10^8 MCS/site [4]. Upper figures show overhead views where the surface height is indicated by brightness. Lower figures show side views. In the side views, the lines indicate the surface height at the bottom line of the overhead views. $L = 320\sqrt{2}$. These figures are licensed under CC BY 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

参考文献

- [1] Akutsu, N. *Sci. Rep.*, **2023**, *13*, 16086, 1–13.
- [2] Nishinaga, T.; Sasaoka, C.; Chernov, A.A. *Morphology and Growth Unit of Crystals*; Sunagawa, I., Ed.; Terra Scientific Publishing Company: Tokyo, Japan, 1989, pp.139-151.
- [3] Chui, S.T.; Weeks, J.D. *Phys. Rev. B* **1976**, *14*, 4978–4982. Weeks, J.D. *Ordering in Strongly Fluctuation Condensed Matter Systems*; Riste, T., Ed.; Plenum: New York, NY, USA; London, UK, 1980; p. 293.
- [4] Akutsu, N; Kangawa, Y. *Sci. Rep.*, **2024**, *14*, 29662, 1–14.