

Symposium (Oral) | Symposium : Emergence of Novel Functions in Nitride and III/V Group Compound Semiconductor Nanostructures

📅 Tue. Sep 17, 2024 1:30 PM - 6:30 PM JST | Tue. Sep 17, 2024 4:30 AM - 9:30 AM UTC 🏨 C42 (Hotel Nikko 4F)

[17p-C42-1~11] Emergence of Novel Functions in Nitride and III/V Group Compound Semiconductor Nanostructures

Motoaki Iwaya(Meijo Univ.), Keisuke YAMANE(Toyohashi Univ. of Tech.), Hiroshi Fujioka(The Univ. of Tokyo), Takashi Matsuoka(Tohoku Univ.)

◆ English Presentation

1:30 PM - 2:15 PM JST | 4:30 AM - 5:15 AM UTC

[17p-C42-1]

[Fellow International 2024 Special Lecture] Insights on GaN bulk crystal growth and GaN-on-GaN technology.

○Michal Stanislaw Bockowski¹ (1.Institute of High Pressure Physics (IHPP) of the Polish Academy of Sciences (PAS))

2:15 PM - 2:45 PM JST | 5:15 AM - 5:45 AM UTC

[17p-C42-2]

Multiscale Characterization of Widegap Semiconductors Multilayers

○Tomoyuki Tanikawa¹, Yuya Ishii¹, Jun Yamasaki², Atsushi Tanaka³, Yoshio Honda³, Masahiro Uemukai¹, Ryuji Katayama¹ (1.Grad. of Eng., Osaka Univ., 2.Research Center for UHVEM, Osaka Univ., 3.IMaSS, Nagoya Univ.)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[17p-C42-3]

Local Structure Analysis by using an X-ray Nanobeam for Ga_{1-x}In_xN/GaN 5-quantum Shells Grown on a GaN Substrate and a Single Sample Extracted from it

○Takao Miyajima¹, Shoya Ota¹, Ryota Kobayashi¹, Nobuhiro Yasuda², Tomoyo Nakao³, Shigeo Arai³, Kazuki Nishimura¹, Koki Aoyama¹, Kazushi Sumitani², Yasuhiro Imai², Shigeru Kimura², Satoshi Kamiyama¹, Daichi Imai¹ (1.Meijo Univ., 2.JASRI, 3.Nagoya Univ.)

3:15 PM - 3:45 PM JST | 6:15 AM - 6:45 AM UTC

[17p-C42-4]

Multiscale III-V semiconductor nanostructures

○Fumitaro Ishikawa¹ (1.Hokkaido Univ. RCIQE)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[17p-C42-5]

Selective lateral MOVPE growth of InP on SOI (001) substrates for III-V/Si integration

○Hiroya Homma¹, Hiroki Sugiyama¹, Tatsurou Hiraki¹, Tomonari Sato¹, Shinji Matsuo¹ (1.NTT)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[17p-C42-6]

Selective-area MOVPE of AlInP fins on InP(111)A

○Yuki Azuma¹, Ziyi Zheng¹, Junichi Motohisa¹, Katsuhiro Tomioka¹ (1.Hokkaido Univ.)

4:15 PM - 4:45 PM JST | 7:15 AM - 7:45 AM UTC

[17p-C42-7]

Low-temperature-grown dilute bismide III-V compound semiconductors for novel functions

○Yoriko Tominaga¹, Fumitaro Ishikawa², Noriaki Ikenaga³, Osamu Ueda⁴ (1.Hiroshima Univ., 2.Hokkaido Univ., 3.Kanazawa Inst. Tech., 4.Meiji Univ.)

5:00 PM - 5:30 PM JST | 8:00 AM - 8:30 AM UTC

[17p-C42-8]

Growth of GaN-based nanocrystals and its application to light-emitting devices

○Satoshi Kamiyama¹, Tetsuya Takeuchi¹, Motoaki Iwaya¹ (1.Meijo Univ.)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[17p-C42-9]

230-nm Band Far-UV Second Harmonic Generation in Polarity Inverted AlN Bilayer Waveguide Pumped by CW Semiconductor Laser

○Hiroyuki Honda¹, Asai Akinori², Tome Kento², Morishita Keiji², Kato Shin², Fujiwara Hiroyasu², Shojiki Kanako^{3,4}, Miyake Hideto³, Uemukai Masahiro¹, Tanikawa Tomoyuki¹, Katayama Ryuji¹ (1.Osaka Univ., 2.Hamamatsu Photonics K. K., 3.Mie Univ., 4.Kyoto Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

5:45 PM - 6:00 PM JST | 8:45 AM - 9:00 AM UTC

[17p-C42-10]

Hetero-interface formation technology with high Al content difference for improving injection efficiency of AlGaIn-based UV-B LEDs

○Takumu Saito¹, Rintaro Miyake¹, Ryoya Yamada¹, Yoshinori Imoto¹, Shundai Maruyama¹, Yusuke Sasaki¹, Shogo Karino¹, Sho Iwayama¹, Hideto Miyake², Tetsuya Takeuchi¹, Motoaki Iwaya¹ (1.Meijo Univ., 2.Mie Univ.)

6:00 PM - 6:30 PM JST | 9:00 AM - 9:30 AM UTC

[17p-C42-11]

Characterization of AlGaIn-based vertical p-n diodes with distributed polarization doping

○Yoshio Honda^{1,2,3}, Takeru Kumabe⁴, Maki Kushimoto⁴, Hiroshi Amano^{1,2,3} (1.IMaSS Nagoya Univ., 2.D Center Nagoya Univ., 3.IAR Nagoya Univ., 4.Grad. Sch. Eng. Nagoya Univ.)

ワイドギャップ半導体多層構造のマルチスケール評価

Multiscale Characterization of Widegap Semiconductors Multilayers

阪大院工¹, 阪大電顕センター², 名大 IMASS² ○谷川 智之¹, 石井 由也¹, 山崎 順²,

田中 敦之³, 本田 善央³, 上向井 正裕¹, 片山 竜二¹

Grad. of Eng., Osaka Univ.¹, Research Center for UHVEM, Osaka Univ.², IMASS, Nagoya Univ.³,

○T. Tanikawa¹, Yuya Ishii¹, J. Yamasaki², A. Tanaka³, Y. Honda³, M. Uemukai¹, R. Katayama¹

E-mail: tanikawa@eei.eng.osaka-u.ac.jp

多光子励起過程を利用した発光イメージングはワイドギャップ半導体材料の内部に分布する転位をはじめとした結晶欠陥の多様な分布を非破壊で可視化することができ、GaN や SiC などの貫通転位評価を中心として利用されている。この評価手法は面内方向にサブミクロン程度の空間分解能を有しつつ、レーザを走査することでウェハスケールのマクロな評価が可能である。しかし、半導体材料の大きな屈折率と屈折率差に由来して励起光は試料深さ方向に広がり、空間分解能はマイクロメートルオーダーに留まってしまう。そのため、多層構造の観察評価には課題がある。ワイドギャップ半導体多層構造の評価のために、Fig. 1 に示すような分光・多波長イメージングを行い、特定の欠陥や不純物、ヘテロ層などの発光を選択的に検出することで空間分解能の問題を一部改善できる (Fig. 2)。本講演では、GaN、SiC、InGaP、Ga₂O₃などを事例に挙げ、ワイドギャップ半導体の多層構造の評価解析について著者が実施してきた結果を概説する[1-5]。

- [1] T. Tanikawa *et al.*, APEX **11**, 031004 (2018).
- [2] M. Tsukakoshi, T. Tanikawa *et al.*, APEX **14**, 055504 (2021).
- [3] A. Ogura, T. Tanikawa *et al.*, APEX **14**, 111002 (2021).
- [4] T. Nishikawa, T. Tanikawa *et al.*, JJAP **62**, SF1015 (2023).
- [5] T. Tanikawa *et al.*, 32nd ICDCM (2022.9.4, Lisbon, Portugal).

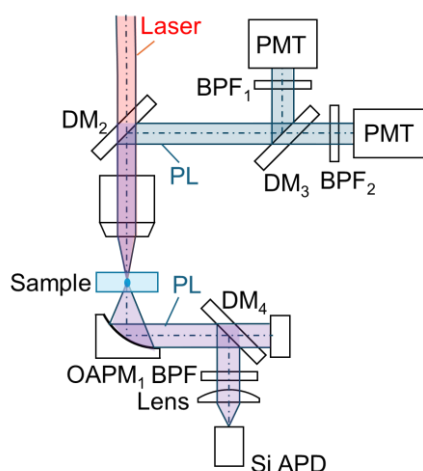


Fig. 1. Schematic of the optical system for multiphoton excitation PL imaging.

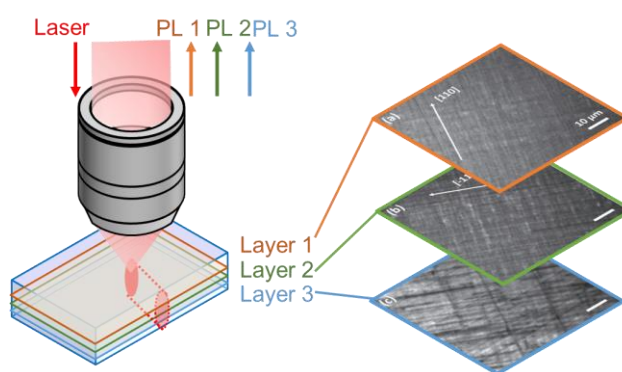


Fig. 2. Schematic diagram of characterization of multilayer structures using multiphoton excitation PL imaging.

GaN 基板上に成長した $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}/\text{GaN}$ 五重量子殻と その単一化した量子殻に対する X 線ナノビームによる局所構造解析

Local Structure Analysis by using an X-ray Nanobeam for $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}/\text{GaN}$

5-quantum Shells Grown on a GaN Substrate and a Single Sample Extracted from it

名城大理工¹, 高輝度光科学研究センター², 名大未来材料・システム研³

宮嶋 孝夫¹, 太田 翔也¹, 小林 稜汰¹, 安田 伸広², 中尾 知代³, 荒井 重勇³, 西村 一輝¹,
青山 晃己¹, 隅谷 和嗣², 今井 康彦², 木村 滋², 上山 智¹, 今井 大地¹

Meijo Univ.¹, JASRI², Nagoya Univ.³

T. Miyajima¹, S. Ota¹, R. Kobayash¹, N. Yasuda², T. Nakao³, S. Arai³, K. Nishimura¹,

K. Aoyama¹, K. Sumitani², Y. Imai², S. Kimura², S. Kamiyama¹, and D. Imai¹

E-mail: mtakao@meijo-u.ac.jp

【背景】最近になり、GaN 系多重量子殻(Multi-quantum Shells, MQS)を活性層に採用した半導体レーザーの室温パルス発振が報告された[1]。GaN 系 MQS は、直径数百 nm・高さ数 μm の六角柱状の GaN ナノワイヤの側面である m 面上に成長した $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}/\text{GaN}$ 多重量子井戸であり、半導体レーザーの活性層として用いることで、その高出力化が期待されている。なぜならば、活性層体積の増大と量子閉じ込めシュタルク効果の抑制が可能だからである。更なるデバイス特性の向上には、これらの利点を生かしながら、活性層内の In 組成分布を制御することが重要である。我々は、大型放射光施設 SPring-8 の X 線ナノビーム回折により、nm サイズの MQS の構造評価が可能であることを示した[2]。ここでは、室温パルス発振[1]に採用された GaN 基板上的 GaN 系五重量子殻(5QS)と、その 1 本を抽出した試料に対する X 線ナノビーム回折により、In 組成の分布を求めた。

【実験方法】測定試料として、MOCVD 法により、c 面 GaN 基板上に六角柱状の GaN ナノワイヤを 1600nm 間隔で形成後、その側壁である m 面を覆うように $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}/\text{GaN}$ 五重量子井戸(5QWs)が成長された。この試料を SPring-8 の 2 つのビームライン BL13XU と BL40XU にて測定した。前者の場合は、基板を劈開後、林立した 5QS の 1 つの m 面に X 線ナノビームを照射して回折測定[3]を、後者の場合は、単一の 5QS を FIB マイクロサンプリング法により抽出し、その m 面に X 線ナノビームを照射して回折測定[4]を行った。

【結果】Fig.2 に、単一の 5QS の下部、中部、上部 ($z = 0, 300, 600\text{nm}$) と 300nm 間隔で X 線ナノビームを照射した場合の 1-100 逆格子マップより抽出した $q_z // [1-100]$ に対する X 線強度プロファイルを示した。GaN および 5QWs からのサテライトピーク 0th、-1st、+1st より、下部、中部、上部の量子井戸幅は 10.8、11.4、10.8nm、井戸中の In 組成は 23.2、22.3、23.2%と求められた。

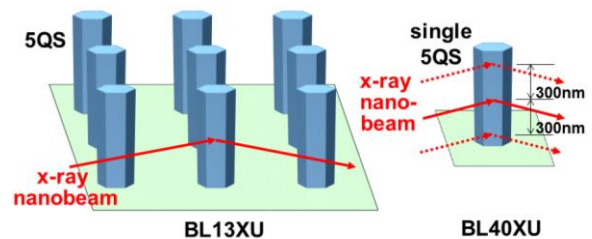


Fig.1: 各ビームラインで測定した試料の概略図

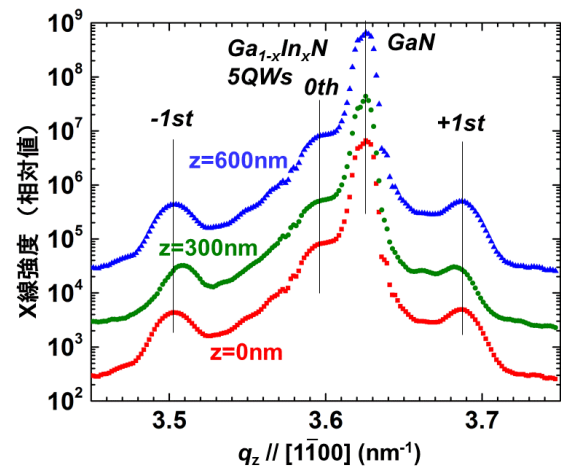


Fig.2: 下部,中部,上部の X 線強度プロファイル

謝辞 名城大の岩谷素顕教授、竹内哲也教授、赤崎勇教授に深く感謝致します。また本研究の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業、文部科学省委託事業ナノテクノロジープラットフォーム課題として名古屋大学微細構造解析プラットフォームの支援 (課題番号: JPMXP1221NU0052) により実施した。放射光実験は、高輝度光科学研究センター (JASRI) の承認を得て、SPring-8 の BL40XU 及び BL13XU で実施された (課題番号: 2021B1563, 2021A1507)。

[1] K. Okuno et al., APEX., **14**, 074004 (2021)., [2] T.Kondo et al., IWN2018., J7-3, Kanazawa (2018).

[3] 小林他, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, 10p-N101-20 (2021,名城大学)

[4] 太田他, 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 23a-C200-11 (2022,東北大学)

マルチスケールな III-V 族ナノ構造の創成

Multiscale III-V semiconductor nanostructures

北大量集セ ○石川 史太郎

Hokkaido Univ. RCIQE, °Fumitaro Ishikawa

E-mail: ishikawa.fumitaro@rciqe.hokudai.ac.jp

「ナノ構造機能をマクロスケールで有効利用できるか？」III-V 属ナノワイヤは、各種結晶成長手法で成長・応用例が報告される直径数 100nm 以下、長さ数 μm 以上程度の 1 次元細線構造で、キャリア輸送を行う極限の一次元体構造と薄膜よりも大きな実効表面積を活用した研究が進展している。III-V 属半導体は既存材料中で最高峰の電子移動度や直接遷移型のバンド構造に起因した光電変換効率を有し、トランジスタや LED、レーザー材料として現在の社会に浸透している。シリコンなどの格子定数の大きく異なる材料ともナノワイヤであれば微小接触領域から高品質エピタキシャル成長が可能で、材料間の融合性を大きく拡大できる。著者らは近年ナノワイヤを核生成させる Ga 自己触媒を適切に供給することで、シリコンウエハ全面で高品質の GaAs ナノワイヤを大容量エピタキシャル成長することに成功した (Fig. 1) [1]。同試料はワイヤ群が示す特異な光散乱で太陽光の 98%の光を吸収、既報最高水準の約 1 ns の室温キャリア寿命を有し、基板全面で GaAs 基板よりも強い発光強度が得られた。

ナノ構造結晶では、マクロなサイズの試料では得られない量子効果や、極微細な高品質結晶で発現する特長的機能を示す。本研究では、シリコンウエハ上のナノスケール III-V 族ナノ構造結晶成長とその大容量化から、ナノスケール構造機能の大出力化など、マルチスケール展開ならではの機能化と可能性について検討する。

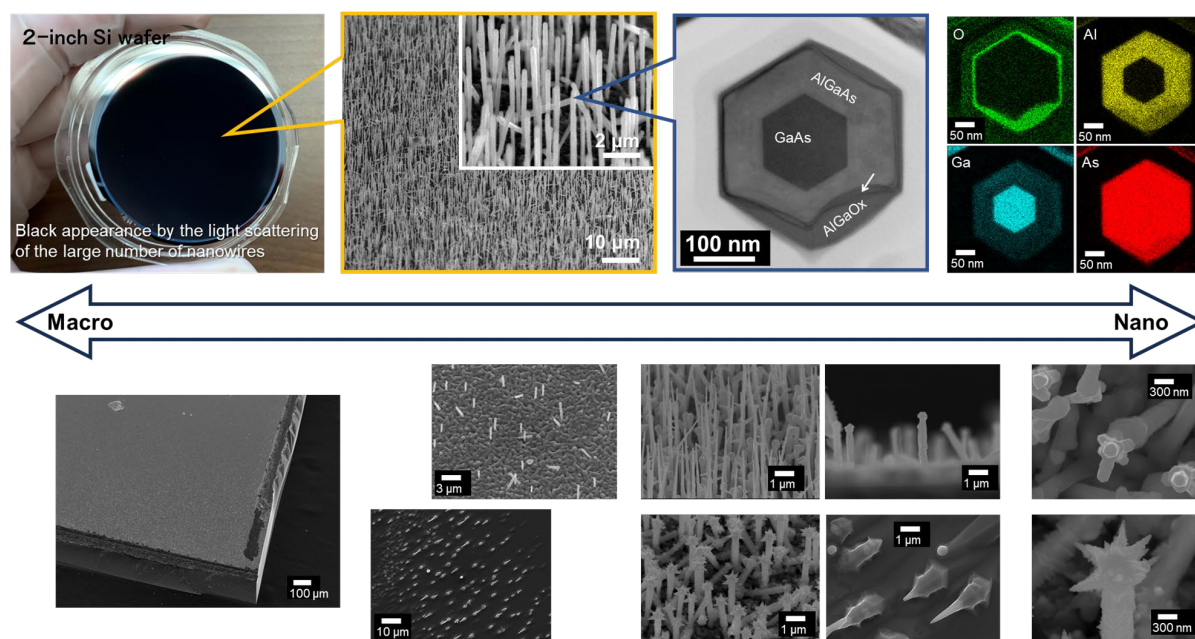


Figure 1. Multiscale III-V nanostructures

[1] Minehisa et al., Nanoscale Adv. 5, 1651, 2023.

III-V/Si 集積に向けた SOI (001)基板上 InP 横方向 MOVPE 選択成長(3)

Selective lateral MOVPE growth of InP 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, 佐藤 具就, 松尾 慎治

NTT Device Technology Labs., NTT Corporation,

°H. Homma, H. Sugiyama, T. Hiraki, 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、ヘテロジニアス集積と比較し、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が、Si/III-V 界面で生じる欠陥により、一般にレーザ発振に必要な高品質結晶を得ることは難しい。この問題の解決に向けて、我々は SOI (001) 基板上に Si {111} 面と選択成長マスクに囲まれた中空構造を有する基板を用いて Si から III-V 族半導体を横方向に選択成長する手法により、デバイスへ適用可能な面積を有する低転位密度の InP 薄膜の形成に成功したことを報告した。しかし、選択成長時の Si 及び III-V 族半導体の {111} フロントファセットを起点として生じる回転双晶が品質劣化の要因であった¹⁾。今回我々は、成長の起点となる Si の面方位を適切に制御した新しい基板を用いることで、横方向選択成長時に生じる回転双晶を抑制できることを実証したので報告する。

【実験】成長には縦型 MOVPE 装置、III 族原料として TMI_n, TEGa, V 族原料として TBAs, TBP, PH₃ を用いた。新構造の基板は、SOI(001)基板上に成膜した酸化膜に対して、[110]方向に対して傾斜を持つ開口を形成した後に、Si をサイドエッチングすることで形成する。リファレンス用の従来構造の基板作製手法と成長条件はこれまでと同様である¹⁾。構造評価には光学顕微鏡と SEM を用いた。

【結果と考察】図 1 に加工基板の構造を示す。従来構造の(a)は Si{111} 表面から[110]方向に選択成長が進む。(b)は長手方向が[1-13]方向の開口を形成した場合で、Si{311} 表面から[310]方向に成長する。それぞれの基板を用いて InP 薄膜を成長し、薄膜上部の酸化膜除去、表面の硫酸エッチングを施した試料の光学顕微鏡像を図 2 に示す。従来構造に成長した InP の表面(a)には、[110]方向から約 33° の方向に伝搬する積層欠陥起因のエッチピットが大量に観測された。これは、双晶領域における積層欠陥の伝搬方向である¹⁾。一方、新規構造にて成長した InP の表面(b)には、同様のエッチピットは観測されず、双晶の排除に成功した事を示す。これは、Si{311} 面を起点とした[310]方向への成長であることにより InP のフロントファセットに占める {111} 面の割合が減ったためだと考えられる。

【Ref.】[1]本間他, 秋季応物,20a-A311-7 (2023).

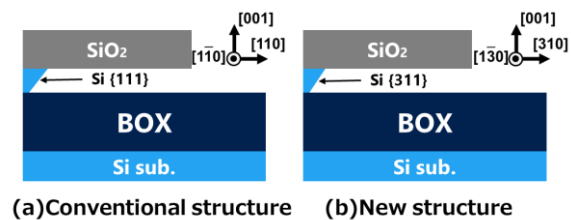


Fig. 1. Cross-sectional structure of each substrate.
(a) Conventional structure., (b) New structure.

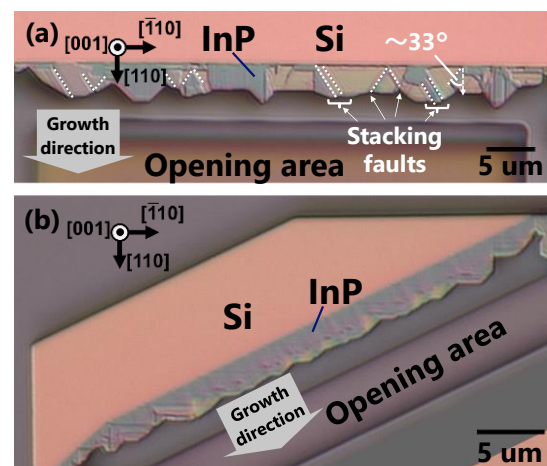


Fig. 2. Optical images of laterally grown InP.
(a) InP film grown on the conventional structure.,
(b) InP film grown on the new structure.

MOVPE 選択成長法による AlInP フィン成長と評価

Selective-area MOVPE of AlInP fins on InP(111)A

°(D)東 佑樹, (D)鄭 子ヨウ, 本久 順一, 富岡 克広

Graduate School of IST and RCIQE, Hokkaido Univ.

°Yuki Azuma, Ziye Zheng, Junichi Motohisa, Katsuhiko Tomioka

E-mail: azuma@rciqe.hokudai.ac.jp

【背景/目的】発光ダイオード(LED)材料では、緑色～黄色波長帯で高輝度、高効率で発光する材料候補が少ない課題がある。我々はこの課題を解決するため、構造相転移によるウルツ鉱型(WZ)AlInP 単結晶薄膜の高輝度 LED 応用を目指している^[1]。WZ-AlInP は直接遷移型のバンドギャップを持つため^[2]、混晶比を制御することで緑色～黄色で高輝度・高効率発光する可能性がある。今回は、WZ-AlInP 単結晶の大面积成長に向けて、AlInP フィンの選択成長とその評価を行ったので報告する。

【実験方法】InP(111)A 基板上に Si₃N₄ を 20 nm スパッタリングし、電子ビームリソグラフィとイオン反応性エッチングおよびウェットエッチングで図 1 内挿図のように開口パターンを形成した。次いで、有機金属気相選択成長(MOVPE 選択成長)法で AlInP フィンを成長した。成長条件は、原料としてターシャリーブチルホスフィン(TBP)、トリメチルアルミニウム(TMAI)、トリメチルインジウム(TMIn)、成長温度 660°C、成長時間 20 分、V/III 比 24 で、気相中での III 族原料の Al 比率は 30%とした。フォトルミネッセンス(PL)測定は室温、励起光波長 462 nm で行なった。

【結果と考察】図 1 に AlInP フィン選択成長結果を示す。AlInP フィンは開口部に従って

基板垂直方向に成長するとともに、横方向にも成長することで、図 1 に示すように隣接するフィン同士でコアレセンスした。また、フィンのファセット側面は平坦ではなく、{-110}微小面で構成された波状のファセットが形成された。これは Al 吸着原子の表面拡散長が短く、{-211}面上で AlInP が多核成長したためと考えられる。さらに、Al 原子がフィン側面に吸着することで横方向成長が促進されコアレセンスしたと考えられる。

図 2 に AlInP フィンアレイの PL スペクトルを示す。作製したフィンは、室温で 1.340 eV、1.430 eV、1.575 eV、1.771 eV にピークを持つ発光スペクトルを示すことがわかる。発光起源について、1.340 eV は ZB-InP、1.430 eV は WZ-InP、1.575 eV は ZB-InP 基板と AlInP フィンの界面、1.771 eV は AlInP フィンのバンド端発光に由来すると考えられる。今、WZ-AlP のバンドギャップを 2.97 eV とすると^[2]、1.771 eV の発光ピークから固相中の Al 組成は 33%と計算される。

PL スペクトルから作製した AlInP フィンには、WZ 相と ZB 相が混在している可能性がある。

当日は AlInP フィン選択成長と Al 組成制御や結晶構造について考察する。

【参考文献】

- [1] F. Ishizaka *et al*, Nano Lett. **17**, 1350 (2017).
[2] A. De *et al*, Phys. Rev. B **81**, 155210 (2010).

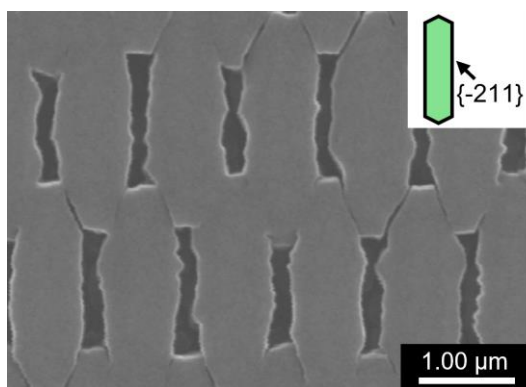


Fig. 1 SEM image of the AlInP fins. Inset is schematics of the mask openings.

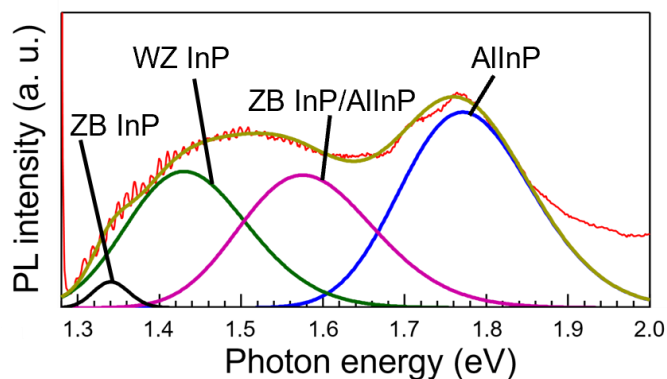


Fig. 2 PL spectra of the AlInP fin array.

新規機能発現に向けた低温成長 Bi 系 III-V 族半導体混晶

Low-temperature-grown dilute bismide III-V compound semiconductors for novel functions

広大先進理工¹, 北大量集セ², 金沢工大³, 明治大⁴

○富永 依里子¹, 石川 史太郎², 池永 訓昭³, 上田 修⁴

AdSE, Hiroshima Univ.¹, RCIQE, Hokkaido Univ.², Kanazawa Inst. Tech.³, Meiji Univ.⁴

○Yoriko Tominaga¹, Fumitaro Ishikawa², Noriaki Ikenaga³, Osamu Ueda⁴

E-mail: ytominag@hiroshima-u.ac.jp

GaAsBi に代表されるビスマス (Bi) 系 III-V 族半導体混晶は、Bi をわずかに数パーセント GaAs 結晶の中に取り込むだけで、禁制帯幅が急激に小さくなる、価電子帯上端が高エネルギーシフトする、禁制帯幅の温度依存性が低減するといった特異な物性を発現することが知られている[1-3]。結晶成長の観点からは、Bi の原子半径が Ga、As 両原子のものよりも大きいことから、Bi 系 III-V 族半導体混晶を成長するには 400℃以下の低温成長が元来必要であることも当該混晶の特徴の一つである[4]。本研究グループでは、最終的な研究対象を四元混晶の InGaAsBi に定め、分子線エピタキシー (MBE) 法を用いた低温領域の中でも更に低温の 300℃以下の成長に取り組んでいる[5-7]。この低温成長により、InGaAsBi 結晶内に意図的に点欠陥を取り込み、テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) における代表的な THz 波発生検出素子である光伝導アンテナ (PCA) 用半導体に求められる短キャリア寿命、高抵抗、高移動度の 3 つの物性を同時に得ようとしている[8]。

近年、2030 年に実用開始が目標とされている第 6 世代移動通信システム (6G) 時代の到来に向け、利用が想定されている 300 GHz 付近までのサブテラヘルツ帯の周波数帯域に関する研究開発が盛んになっている。6G の発展に伴い、THz 技術分野において長く使用され発展してきた THz-TDS を、こうしたサブテラヘルツ帯におけるトランジスタ等の素子用の電子材料の物性評価システムに応用するという要望がある。本研究で取り組んでいる低温成長 InGaAsBi は、GaAs 結晶に In、Bi 両原子を取り込むことで禁制帯幅を近赤外域に位置させることが可能であることから、前述の 3 つの物性を同時に得ることで、光通信帯光源を駆動源とした THz-TDS 用 PCA を実現できる可能性を秘めている。これにより THz-TDS システム全体を省スペース化、低コスト化したいと考えている[8]。

本講演では、低温成長 GaAsBi の MBE 成長条件からその結晶内に存在していると考えられる点欠陥、更には低温成長 InGaAsBi の MBE 成長条件に至るまでを総括する。当該 PCA の実現には In、Bi 両原子の組成制御に加えて点欠陥制御が要となるが、その制御を試みる過程で、従来から提唱されている Bi 原子の結晶成長時のサーファクタント効果が発揮されている傾向があるようにみえたため、そのことについても触れる予定である。

謝辞：本研究は、科研費 19H04548、21H01829、21H05566、21K04910 ならびに池谷科学技術振興財団の助成によって遂行された。

[1] K. Oe, Jpn. J. Appl. Phys., **41**, 2801 (2002). [2] A. Janotti et al., Phys. Rev. B, **65**, 115203 (2002). [3] Y. Zhang et al., Phys. Rev. B, **71**, 155201 (2005). [4] M. Yoshimoto et al., Jpn. J. Appl. Phys. **42**, L1235 (2003). [5] Y. Tominaga et al., J. Cryst. Growth, **544**, 125703 (2020). [6] Y. Tominaga et al., Appl. Phys. Express, **15**, 045504 (2022). [7] O. Ueda et al., J. Cryst. Growth, **601**, 126945 (2023). [8] 富永依里子、応用物理、**92**、617 (2023).

GaN 系ナノ結晶の成長と発光デバイスへの応用

Growth of GaN-based nanocrystals and its application to light-emitting devices

名城大理工 ○上山 智、竹内 哲也、岩谷 素顕

Meijo Univ., Satoshi Kamiyama, Tetsuya Takeuchi, Motoaki Iwaya

E-mail: skami@meijo-u.ac.jp

基板上に絶縁膜マスクを堆積し、その開口を形成することで、選択成長により周期的に配置された GaN 系のナノワイヤ、ナノピラミッドなどのナノ結晶が成長できる[1]。これは 3 次元光波モードの位相が制御された単一モードの半導体レーザー[2]や、非極性面、または半極性面を利用した多重量子井戸（多重量子殻:MQS）を有する長波長の LED が実現できる可能性がある[3]。結晶成長に関しても、薄膜成長、あるいはミクロンスケールの選択成長とは大きく異なる成長機構を有し、低温で AlGaN や GaInN などの混晶の選択成長が可能であることや、比較的高温で非常に InN モル分率の高い GaInN 混晶が得ることができるなど、興味深い特長を持つ。これらの性質を利用できれば、超高出力単一モード半導体レーザーや、高性能の長波長域（黄色～赤色）の LED などの実現が期待される。

本講演では、GaN ナノワイヤ (Fig.1) と $\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.35}\text{N}$ ナノピラミッド (Fig.2) の結晶成長や、これらをベースとした多重量子殻を含むコアシェル構造 (Fig.3) の形成、さらにナノ結晶の発光デバイスへの応用について、議論を行う。

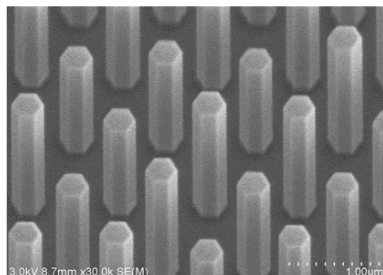


Fig.1. GaN nanowires
(350nm(D)×1.5μm(H))

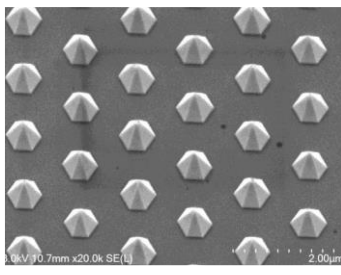


Fig.2. $\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.35}\text{N}$ -nanopyramid
(500nm(D))

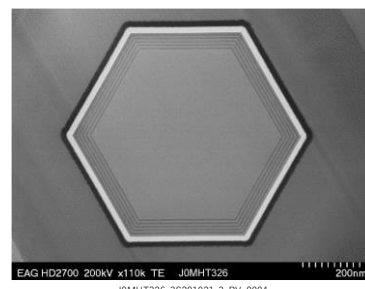


Fig.3. Horizontal cross-section of
GaN nanowire/GaInN-MQS

参考文献

- [1] S Kamiyama, et al., ECS Journal of Solid State Science and Technology 9, 015007 (2020).
- [2] K. Okuno, et al., Appl. Phys. Express, 14, 074004 (2021).
- [3] W. Lu, et al., Appl. Surf. Sci., 539, 148279 (2021).

謝辞

本研究の一部は JST-CREST(No. 16815710)、JST-A-STEP (JPMJTR201D)、NEDO 先導研究、および科学研究費補助金基盤研究 A (22H00304) の援助により実施した。

2 層極性反転 AlN 導波路を用いた CW 半導体レーザ励起による 230 nm 帯遠紫外第二高調波発生 230-nm Band Far-UV Second Harmonic Generation in Polarity Inverted AlN Bilayer Waveguide Pumped by CW Semiconductor Laser

阪大院工¹, 浜松ホトニクス², 三重大院工³, 京大院工⁴

○本田 啓人¹, 浅井 昭典², 當銘 賢人², 森下 桂嗣², 加藤 伸藤², 藤原 弘康²,
正直 花奈子^{3,4}, 三宅 秀人³, 上向井 正裕¹, 谷川 智之¹, 片山 竜二¹

Osaka Univ.¹, Hamamatsu Photonics K. K.², Mie Univ.³, Kyoto Univ.⁴,

○H. Honda, A. Asai, K. Tome, K. Morishita, S. Kato, H. Fujiwara,

K. Shojiki, H. Miyake, M. Uemukai, T. Tanikawa and R. Katayama

E-mail: honda.h@qoe.eei.eng.osaka-u.ac.jp

AlN は遠紫外光に対する透明性と強い光学非線形性を有しているため遠紫外第二高調波発生 (SHG) に使用することができ、AlN の極性反転構造とモード分散位相整合 (MDPM) を組み合わせた横型擬似位相整合 (QPM) によって高効率な SHG が可能である。我々はこれまでに、2 層極性反転 AlN チャンネル導波路を高い尖頭値と広いスペクトル幅のフェムト秒パルスレーザで励起することで遠紫外 SHG を実証した[1]。しかし、フェムト秒パルスレーザの筐体は大きいと、光源としての小型化には半導体レーザとの集積が不可欠である。そこで本研究では、波長 460 nm 帯 CW 波長可変半導体レーザを励起光源に 2 層極性反転 AlN チャンネル導波路による遠紫外 SHG の実証を行った。

2 層極性反転 AlN 構造はスパッタリング法と Face-to-Face アニールによって形成され[2]、励起レーザの波長可変域を補うために異なる幅を持つ導波路を作製した。長さ 3.3 mm の導波路入射端面に CW 波長可変半導体レーザを励起光として対物レンズで結合させ、反対側の端面から出射された導波光を紫外対物レンズと軸外し放物面ミラーで光電子増倍管 (PMT) に集光した。PMT は可視光に比べ紫外光への感度が高いものを使用し、さらに遠紫外バンドパスフィルタを 3 枚マウントしたため、励起光の信号は検出限界以下である。厚さ 360 nm、上面の幅が 500 nm、下面の幅が 800 nm の導波路において励起波長を変えると、波長 461.5 nm のとき PMT の出力が増加した (図 1)。このとき PMT の出力がレーザパワーの 2 乗に比例したことから、CW レーザ励起による AlN 導波路を用いた遠紫外 SHG が確認された (図 2)。

参考文献: [1] H. Honda *et al.*, APEX **16**, 062006 (2023). [2] K. Shojiki *et al.*, Mater. Sci. Semicond. Process. **166**, 107736 (2023).
謝辞: 本研究は科研費 JP23KJ1512, JP23K26572, JP22K14612, JP22H01970、及び JST-SICORP JPMJSC22C1, JST-FOREST JPMJFR203I, NEDO Intensive Support for Young Promising Researchers 21502153-0, NEDO Leading Research の支援を受けたものです。デバイス作製に関して立命館大学 藤原康文教授および大阪大学フotonicsセンターの協力を得ました。

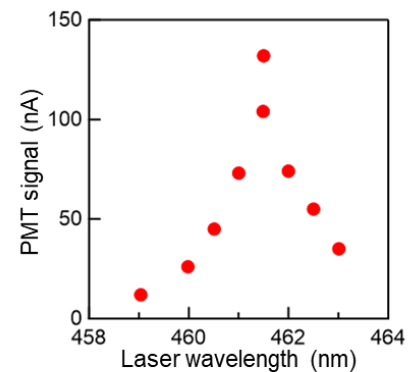


図 1 PMT 信号の波長依存性

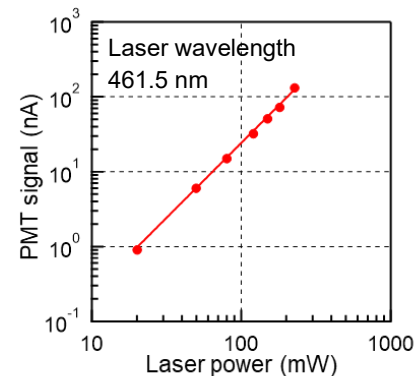


図 2 PMT 信号のレーザパワー依存性

AlGa_N 系 UV-B LD の注入効率向上に向けた高 Al 組成差のヘテロ界面形成技術 Hetero-interface formation technology with high Al content difference for improving injection efficiency of AlGa_N-based UV-B LDs

(M1) 齋藤巧夢¹、三宅倫太郎¹、山田凌矢¹、井本圭紀¹、丸山竣大¹、佐々木祐輔¹、狩野祥吾¹、
岩山章¹、三宅秀人²、上山智¹、竹内哲也¹、岩谷素顕¹

¹名城大・理工、²三重大・院・工

Takumu Saito^{1,*}, Rintaro Miyake¹, Ryoya Yamada¹, Yoshinori Imoto¹, Shundai Maruyama¹,
Yusuke Sasaki¹, Shogo Karino¹, Sho Iwayama¹, Hideto Miyake²,

Satoshi Kamiyama¹, Tetsuya Takeuchi¹, Motoaki Iwaya¹

¹Meijo University, ²Mie University,

E-mail: 200443034@ccalumni.meijo-u.ac.jp

我々は、AlGa_N 系 UV-B レーザーダイオード (LD) の室温パルス発振に成功し、ピーク光出力 150mW を達成した。しかし、この LD のキャリア注入効率(η_i)はわずか 10% であり、GaInN、AlGaInP、AlGaInAs などの他の半導体材料を用いた LD に比べて著しく低い。さらなる光出力向上に向けて η_i 改善が重要な課題である。本研究では、デバイスシミュレータ SiLENSe を用いた LD 層構造の設計と MOVPE 成長条件の最適化について検討を行った。

まずシミュレーションを行った。本シミュレーションでは、電子ブロッキング層 (EBL) とガイド層の Al 組成差および急峻性を検討した。その結果、EBL/ガイド層のヘテロ接合において大きな Al 組成差を持ち、急峻な界面を形成することが、 η_i の向上に不可欠であることが示された。また、Al 組成差を 55% に設定した急峻な界面を作製することで、 η_i が 80% を超えることが示唆された。

次に、上記のようなヘテロ界面を作製する条件について調査した。この実験では、ガイド層、EBL、p-AlGa_N クラッド層の温度を図 2 に示すように系統的に変化させた。これらの試料を断面 TEM 観察すると、図 4 のような傾向を示すことが確認された。結果として、ガイド層、EBL、p-AlGa_N クラッド層の成長温度を 1000°C とした場合、EBL とガイド層の界面に、約 25nm の意図しない組成傾斜構造が形成された。一方、これらの層を全て 850°C で成長させると、意図しない組成傾斜構造は形成されず、急峻なヘテロ界面を実現した。また AlGa_N 層を積層後に組成傾斜層が形成されていることからこの傾斜層は固相拡散によるものであることが示唆された。

謝辞：本研究の一部は、科研費・基盤研究 A (22H00304)、JST REST(JPMJCR16N2)、NEDO 先導研究、および JST A-STEP 事業(JPMJTR201D) の援助によって実施された。

Reference: [1] R. Kondo et al. Appl. Phys. Lett. 121, 253501 (2022).

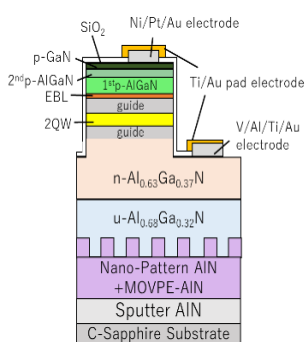


Fig.1 Device Structure

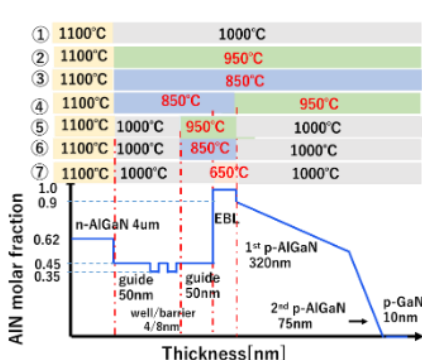


Fig.2 Growth sequence

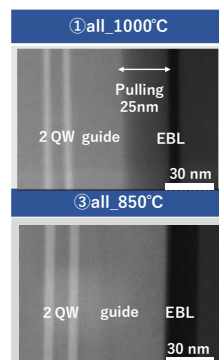


Fig.3 Cross-sectional STEM image

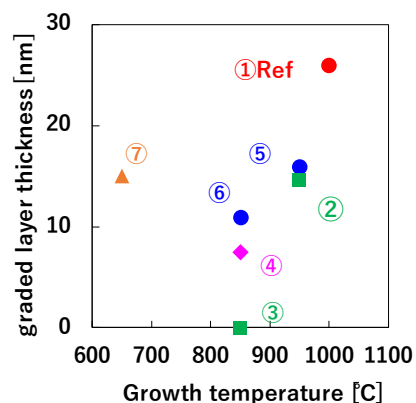


Fig.4 Dependence of pulling

layer thickness on growth

分布型分極ドーピングを用いた AlGaN 系縦型 p-n ダイオードの特性評価

Characterization of AlGaN-based vertical p-n diodes with distributed polarization doping

名大未来研¹, 名大 D センター², 名大 IAR³, 名大院工⁴,

○本田 善央^{1,2,3}, 隈部 岳瑠⁴, 久志本 真希⁴, 天野 浩^{1,2,3}

IMaSS¹, D Center², IAR³, Grad. Sch. Eng.⁴, Nagoya Univ.,

○Yoshio Honda¹, Takeru Kumabe¹, Maki Kushimoto¹, and Hiroshi Amano¹

E-mail: honda.yoshio.h4@f.mail.nagoya-u.ac.jp

【背景】多くのワイドギャップ半導体は p 型、n 型いずれかの作製が困難である単極性を有することが多い。また超ワイドギャップ半導体においては、絶縁体との境界が曖昧であり、伝導性制御自体が困難となってくる。窒化物半導体に当てはめると、GaN では p 型伝導性制御が困難であり、Al 組成の増加につれて p 型制御はより困難さを増すとともに n 型制御にも問題を生じる。ワイドギャップ半導体は絶縁破壊電界が高く、低消費電力パワーデバイスへの利用において大きな利点があり、このような伝導性制御の問題を打破することが急務となっている。本報告では、分布型分極ドーピング(DPD)[1,2]を利用し、p-n 接合ダイオードを作製してきた結果を紹介する。

【実験方法】(0001)GaN 基板上へ UID-GaN 層を介して、n-DPD 層の成長を行った。n-DPD 層として、GaN から Al 組成を徐々に増加する傾斜組成層を利用した。続いて p-DPD 層の成長を行った。p-DPD 層は一方で、AlGaIn から Al 組成を徐々に減少させ最後に p⁺⁺-GaIn:Mg を成長し、p-n ダイオードを作製した。得られたサンプルに対して、SIMS による Al の分布に対して、キャリア密度の理論的[3,4]な考察を行うとともに、C-V 測定により整合性の評価を行った。I-V 測定の温度特性、キャリアトランスポート特性、絶縁破壊メカニズム、p-DPD 中の電子のライフタイム及び拡散係数、またホール測定よりキャリア散乱のメカニズム等の評価を行った。

【結果と考察】DPD の一例として、図 1 に DPD 型 p-n ダイオードの SIMS 測定結果を示している。Si、Mg を用いず、Al 組成を単調に増減させたノンドーパ型の構造となっている。C-V 測定より p-n 接合界面からのチャージを計測すると、図 2 に示すように分極から計算される値を極めて一致しており、DPD 層が設計通り機能していることわかる。ここで、PN1 が図 1 で示したダイオードであり、PN2、PN3 においては、傾斜組成層の膜厚を薄くしたものである。図 3 では I-V 測定結果を示している。明確な整流性がみられ、理想因子が 473 K において、 $n=1.6$ 程度の p-n ダイオードが得られていた。他の特性から評価しても、ドーピングを上回る特性が得られており、DPD によるデバイス応用が現実的であることを示す結果となった。

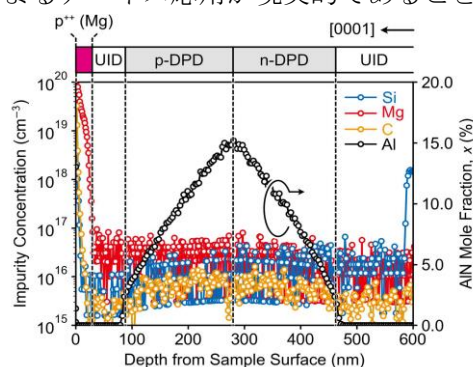


Fig. 1 SIMS measurements of DPD p-n diode structure.

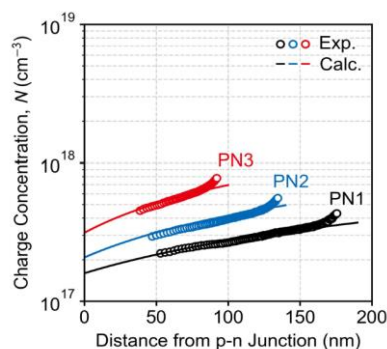


Fig. 2 Charge density in DPD p-n diode.

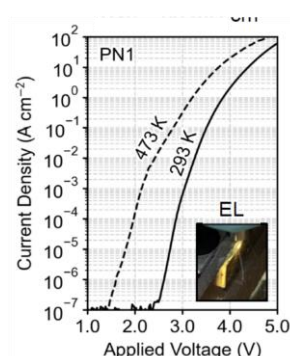


Fig. 3 I-V characteristics of DPD-p-n diode

【参考文献】 [1] D. Jena *et al.*, APL **81**, 4395 (2002). [2] D. Jena *et al.*, Phys. Stat. Solidi A **208**(7), 1511 (2011). [3] J. Pal *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 085211 (2011). [4] M. Yamaguchi *et al.*, J. Appl. Phys. **85**, 8502 (1999).