

## 戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)

日本-V4 共同研究

終了報告書 概要

1. 研究課題名：「高 In 組成 InGaN の高品質エピタキシャル成長と次世代ディスプレイ・照明および通信用光源と高効率太陽電池」
2. 研究期間：2015 年 11 月～2019 年 3 月
3. 主な参加研究者名：  
日本側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	天野 浩	教授	未来材料・システム研究所	研究総括
主たる共同研究者	本田 善央	准教授	未来材料・システム研究所	その場観察技術開発
主たる共同研究者	新田 州吾	特任准教授	未来材料・システム研究所	成長モード制御、高品質化、国外との連携
研究参加者	出来 真斗	助教	未来材料・システム研究所	結晶特性評価
研究参加者	久志本 真希	助教	名古屋大学工学研究科	高In組成InGaNの高品質化
研究参加者 (2017年7月加入)	Yoann Robin	研究員	未来材料・システム研究所	結晶成長および評価(微傾斜基板上結晶成長)
研究期間中の全参加研究者数			8名	

## ポーランド側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	Mike Leszczynski	Professor	Institute of High Pressure Physics UNIPRESS	Head of Research
主たる共同研究者	Marcin Sarzynski	Assistant professor	Institute of High Pressure Physics UNIPRESS	Crystal Growth and optical characterization
主たる共同研究者	Ewa Grzanka	PhD student	Institute of High Pressure Physics UNIPRESS	XRD characterization
研究参加者	Robert Czernecki	PhD student	Institute of High Pressure Physics UNIPRESS	Crystal Growth
研究期間中の全参加研究者数			4名	

## チェコ側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	Vaclav Holy	Professor	Department of Condensed Matter Physics, Charles University in Prague	Head of Research

主たる 共同研究者	Lukas Horak	Research Assistant	Department of Condensed Matter Physics, Charles University in Prague	Simulation and analysis
主たる 共同研究者	Dominik Kriegner	Post-doc	Department of Condensed Matter Physics, Charles University in Prague	Simulation and analysis
研究期間中の全参加研究者数			3名	

#### 4. 国際共同研究の概要

本研究は、次世代究極効率ディスプレイおよび照明用光源、4K・8K 対応および移動体内用低コスト大容量光ファイバ通信用光源、究極効率太陽電池用の材料として期待される高 In 組成 InGa<sub>N</sub> の結晶成長技術の構築を目指して行われた。研究チームはポーランド科学アカデミー高圧物理学研究所 UNIPRESS のマイク・レスチンスキー教授をプロジェクトリーダーとして、名古屋大学の天野浩、チェコの Charles 大学のホリー・ヴァクラフ教授の各研究グループで構成される。Ga<sub>N</sub> 基板作製技術 (UNIPRESS)、InGa<sub>N</sub> 結晶成長およびその場観察技術 (名古屋大学)、X 線回折を用いた結晶構造解析技術 (Charles 大学) においてそれぞれに優れた技術を有する研究機関が、その技術を結集することにより、それぞれの独自技術の融合・進化を促進し、従来実現困難であった高品質高 In 組成 InGa<sub>N</sub> を実現する。更に長波長デバイスを試作して、社会実装への可能性の見極めを行った。

#### 5. 国際共同研究の成果

##### 5-1 国際共同研究の学術成果および実施内容

本国際共同研究においては、Ga<sub>N</sub> 基板上高品質 InGa<sub>N</sub> 結晶成長を軸として基板作製、結晶成長、その場観察、結晶評価の各分野において様々な独自研究を行った。微傾斜加工、メサ加工を行った Ga<sub>N</sub> 基板を用いることで、同一成長条件においてより長波長で発光する InGa<sub>N</sub> 量子井戸が作製でき多波長集積化が可能であることを示した。また貫通転位密度の小さい高品質 Ga<sub>N</sub> 基板を用いることで、サファイア基板上では切り分けが困難であった成長パラメータと InGa<sub>N</sub> モフォロジーの相関を明らかにし、高 In 組成 InGa<sub>N</sub> 結晶成長の高品質化を実現した。また MOVPE 成長における気相反応および結晶表面のその場観察と X 線回折を用いた新たな微細構造解析手法を開発し、InGa<sub>N</sub> 結晶成長の結晶成長および品質劣化のメカニズム解明と改善に必要な解析手法として確立した。

##### 5-2 国際共同研究による相乗効果

本研究の主課題である Ga<sub>N</sub> 基板上 InGa<sub>N</sub> の結晶成長では、UNIPRESS が有する高品質 Ga<sub>N</sub> 基板と結晶表面への微傾斜加工技術を用いることにより、UNIPRESS での同一基板上の多波長発光デバイス作製と名古屋大学でのオフ角の異なる Ga<sub>N</sub> 基板上の InGa<sub>N</sub> 結晶成長機構解明を行った。その結果から微傾斜 Ga<sub>N</sub> 基板上での In 取り込みがステップ密度とステップ成長速度に律速されるという統一結果が得られた。その場観察および結晶評価技術においては、Ga<sub>N</sub> 基板、結晶成長、構造解析のそれぞれの立場から議論を行うことにより、実用的な技術の確立が促進された。

##### 5-3 国際共同研究成果の波及効果と今後の展望

本研究では情報化社会の発展、省エネルギー化の要求に答えうる長波長光デバイスの実現に必要な不可欠である高品質高 In 組成 InGa<sub>N</sub> の結晶成長機構の解明と高品質 Ga<sub>N</sub> 基板を用いた高品質化に関する検討を行った。また InGa<sub>N</sub> 結晶成長の評価解析に不可欠な結晶成長のその場観察技術、X 線回折による結晶微細構造解析技術の開発を行い、それを用いて InGa<sub>N</sub> の高品質化に必要な知見を得た。これらの知見と技術は今後の InGa<sub>N</sub> 系光デバイスの発展に大きく貢献するものである。

Strategic International Collaborative Research Program (SICORP)  
 Japan – V4 Joint Research Program  
 Executive Summary of Final Report

1. Project title : 「New generation of InGaN layers, quantum wells and wires grown on vicinal GaN substrates for optoelectronics」
2. Research period : November 2015 ~ March 2019
3. Main participants :  
 Japan-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Hiroshi Amano	Professor	IMaSS (Institute of Materials and Systems for Sustainability) Nagoya University	Head of Research
Co-PI	Yoshio Honda	Associate Professor	IMaSS (Institute of Materials and Systems for Sustainability) Nagoya University	Development of in situ monitoring system
Co-PI	Shugo Nitta	Designated Associate Professor	IMaSS (Institute of Materials and Systems for Sustainability) Nagoya University	Growth mode control Contact with other countries
Collaborator	Manato Deki	Assistant Professor	IMaSS (Institute of Materials and Systems for Sustainability) Nagoya University	Crystal property evaluation
Collaborator	Maki Kushimoto	Assistant Professor	Graduate School of Engineering Nagoya University	High quality InGaN growth
Collaborator	Yoann Robin	Researcher	IMaSS (Institute of Materials and Systems for Sustainability) Nagoya University	Growth and characterization
Total number of participants throughout the research period:				8

Poland-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Mike Leszczynski	Professor	Institute of High Pressure Physics UNIPRESS	Head of Research
Co-PI	Marcin Sarzynski	Assistant professor	Institute of High Pressure Physics UNIPRESS	Crystal Growth and optical characterization
Co-PI	Ewa Grzanka	PhD	Institute of High	XRD

		student	Pressure Physics UNIPRESS	characterization
Collaborator	Robert Czernecki	PhD student	Institute of High Pressure Physics UNIPRESS	Crystal Growth
Total number of participants throughout the research period:				4

Czech-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Vaclav Holy	Professor	Department of Condensed Matter Physics, Charles University in Prague	Head of Research
Co-PI	Lukas Horak	Research assistant,	Department of Condensed Matter Physics, Charles University in Prague	Simulation and analysis
Co-PI	Dominik Kriegner	Post-doc	Department of Condensed Matter Physics, Charles University in Prague	Simulation and analysis
Total number of participants throughout the research period:				3

4. Summary of the international joint research

This international research project is established for high quality high-In content InGaN growth which realizes next generation displays, general lightings, high speed and mobile optical fiber communication, and solar cells. The research team are composed of Nagoya University in Japan, Institute of High Pressure Physics, UNIPRESS in Poland, and Charles University in Czech. The original technologies from each institute, such as high quality GaN substrates and their surface process technologies from UNIPRESS, InGaN crystal growth and in situ monitoring technologies from Nagoya University, and three dimensional fine structure analysis by X-ray diffraction from Charles University, played important roles effectively on the comprehensive and fusional research to perform high quality high In content InGaN growth.

5. Outcomes of the international joint research

5-1 Scientific outputs and implemented activities of the joint research

5-2 Synergistic effects of the joint research

5-3 Scientific, industrial or societal impacts/effects of the outputs

GaN substrates with vicinal miscut angle surface are prepared by UNIPRESS. UNIPRESS performed a multi wavelength LED fabricated on a patterned GaN wafer, which is a base technology of multi wavelength laser diodes for high speed optical communication. Nagoya University clarified that surface supersaturation defined by growth temperature, V/III ratio and step density dominates the InGaN growth mode on a GaN substrate. Both results show that In incorporation in step growth mode on a GaN substrate is governed by step growth speed. We clarified control of miscut angle is a critical parameter to control growth mode and structural and optical quality of InGaN. The new in situ monitoring system and XRD diffraction method are developed to analyze precise growth mechanism and fine structure of InGaN crystal. This research results are necessary to develop future InGaN optoelectronic devices.

## 国際共同研究における主要な研究成果リスト

### 1. 論文発表等

\*原著論文 (相手側研究チームとの共著論文)

・査読有り：発表件数：計 0 件

※(参考) 投稿済みおよび投稿予定論文

1. Marcin Acta Materialia, sent 2018

2. Zhibin Liu et al., Japanese Journal of Applied Physics, to be submitted

・査読無し：発表件数：計 0 件

\*原著論文 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの論文)：発表件数：計 7 件

・査読有り：発表件数：計 7 件

1. Tetsuya Yamamoto, Akira Tamura, Shigeyoshi Usami, Kentaro Nagamatsu, Shugo Nitta, Yoshio Honda and Hiroshi Amano, "Evaluation of excess In during metal organic vapor-phase epitaxy growth of InGaN by monitoring via in situ laser scattering", special issue of the Japanese Journal of Applied Physics, 55, 05FD03 (2016).

2. Y. Robin<sup>1</sup>, M. Pristovsek, H. Amano, F. Oehler, R. A. Oliver, and C. J. Humphreys, "What is red? On the chromaticity of orange-red InGaN/GaN based LEDs", Journal of Applied Physics 124, 183102, 2018.

3. Yoann Robin, Yaqiang Liao, Markus Pristovsek, Hiroshi Amano, "Simultaneous Growth of Various InGaN/GaN Core - Shell Microstructures for Color Tunable Device Applications", Phys. Status Solidi A 215, 1800361, 2018.

5. Zhibin Liu, Shugo Nitta, Shigeyoshi Usami, Yoann Robin, Maki Kushimoto, Manato Deki, Yoshio Honda, Markus Pristovsek, Hiroshi Amano, "Effect of gas phase temperature on InGaN grown by metalorganic vapor phase epitaxy", Journal of Crystal Growth Volume 509, Pages 50-53, 2019.

6. Zhibin Liu, Shugo Nitta, Yoann Robin, Maki Kushimoto, Manato Deki, Yoshio Honda, Markus Pristovsek, Hiroshi Amano, "Morphological study of InGaN on GaN substrate by supersaturation", Journal of Crystal Growth Volume 508, Pages 58-65, 2019.

7. Zheng Ye, Shugo Nitta, Kentaro Nagamatsu, Naoki Fujimoto, Maki Kushimoto, Manato Deki, Atsushi Tanaka, Yoshio Honda, Markus Pristovsek, and Hiroshi Amano, "Ammonia Decomposition and Reaction by High-Resolution Mass Spectrometry for Group III-Nitride Epitaxial Growth", Journal of Crystal Growth, Journal of Crystal Growth 516, 63, 2019.

4. Yoann Robin, Francois Hemeret, Gillian D'Inca, Markus Pristovsek, Agnes Trassoudaine and Hiroshi Amano, "Monolithic integration of tricolor micro-LEDs and color mixing investigation by analogue and digital dimming", Japanese Journal of Applied Physics 58, SCCC06, 2019.

・査読無し：発表件数：計 0 件

\*その他の著作物 (相手側研究チームとの共著総説、書籍など)：発表件数：計 0 件

\*その他の著作物 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの総説、書籍など)：発表件数：計 0 件

## 2. 学会発表

\* 口頭発表 (相手側研究チームとの連名発表)

発表件数 : 計 1 件 (うち招待講演 : 0 件)

\* 口頭発表 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表)

発表件数 : 計 16 件 (うち招待講演 : 2 件)

\* ポスター発表 (相手側研究チームとの連名発表)

発表件数 : 計 0 件

\* ポスター発表 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表)

発表件数 : 計 7 件

## 3. 主催したワークショップ・セミナー・シンポジウム等の開催

1. Seminar on growth of bulk GaN 日本、名古屋、名古屋大学、IB 電子情報館、2016 年 3 月 9 日
2. Seminar on Bulk Nitrides and Thermal Management of Nitride Devices 日本、名古屋、名古屋大学、VBL ホール、2016 年 8 月 5 日
3. CIRFE Symposium on Nitride Semiconductors for Future Electronics 日本、名古屋、名古屋大学、ES ホール 2016 年 9 月 9 日
4. NC State University - Nagoya University research collaboration seminar 日本、名古屋、名古屋大学、VBL ホール 2017 年 11 月 20 日

## 4. 研究交流の実績 (主要な実績)

1. 2015/12/9~2015/12/14 : ポーランド、ワルシャワ、キックオフミーティング(3 カ国)
2. 2016/3/6~2016/3/11 : 日本、名古屋大学 研究会(2 カ国))
3. 2016/5/21~2016/5/25 : チェコ共和国、プラハ、プロジェクトミーティング(3 カ国)
4. 2016/8/4~2016/8/13 : 日本、名古屋大学、研究会、プロジェクトミーティング(2 カ国)
5. 2018/6/2~2018/6/13 : 日本、奈良、プロジェクトミーティング(2 カ国)
6. 2018/8/4~2018/8/11 : ポーランド、ワルシャワ、プロジェクトミーティング(3 カ国)

## 5. 特許出願

研究期間累積出願件数 : 0 件

## 6. 受賞・新聞報道等

2015 応用物理学化合物半導体エレクトロニクス業績賞 (赤崎勇賞) 天野浩 2016/3/19

## 7. その他

特になし