

戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)  
日本－欧州共同研究  
終了報告書 概要

1. 研究課題名：「革新的高信頼性窒化物半導体パワーデバイスの開発と応用」
2. 研究期間：平成 29 年 1 月～令和 2 年 11 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	三宅秀人	教授	三重大学	AlN基板開発
主たる共同研究者	寒川義裕	教授	九州大学	第一原理計算
研究参加者	正直 花奈子	助教	三重大学	AlN基板開発、物性評価
研究参加者	上杉 謙次郎	助教	三重大学	AlN基板開発、AlGaNエピ
研究参加者	肖 世玉 (XIAO SHIYU)	助教	三重大学	AlN基板開発、構造評価
研究期間中の全参加研究者数			5名	

相手側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	Gaudenzio Meneghesso	Prof.	University of Padova	Project management
主たる共同研究者	Joff Derluyn	CTO	EpiGaN	Material and Epitaxy
主たる共同研究者	Farid Medjdoub	Senior scientist	CNRS	Device Processing
主たる共同研究者	Abhishek Banerjee	R&D Engineer	ON Semiconductor	Characterization and Reliability
主たる共同研究者	Elke Meissner	Scientific Manager	Fraunhofer IISB	Material and Epitaxy
主たる共同研究者	Cristophe Detavernier	Prof.	Ghent University	Characterization
研究期間中の全参加研究者数			6名	

#### 4. 国際共同研究の概要

本研究プロジェクトでは、ワイドギャップ窒化物半導体材料の持つ高いポテンシャルを十分に引き出して、工業用および車載用に応用可能な頑健性（ロバスト性）・高信頼性を有す高・中耐圧パワーデバイスを開発し、エネルギーの高効率利用（いわゆる省エネ）に貢献することを目的とした。目的の達成に向けて、Si 基板上の GaN および AlN テンプレート上 AlGaIn を用いて次世代 HEMT (High Electron Mobility Transistor) の開発を行った。AlGaIn 系 HEMT 開発では、三重大学が Face-to-Face 高温アニール（FFA）法を用いて作製を行った貫通転位密度  $10^8\text{cm}^{-2}$  のサファイア上 AlN テンプレートを EU グループで評価を行い、原

子レベルで平坦なことから、その有用性が共有された。また、九州大学は **Solid Source Solution Growth (3SG 法)**、昇華法により **AlN** テンプレートを開発し、EU グループで結晶性などを評価した。**2** インチ全面で高い結晶性を有しかつ平坦であることから **FFA** 法により作製した **AlN** テンプレートを用いて、**AlGaN HEMT** の開発を行った。**150 °C** を超えると電流密度が低下する **GaN** 系 **HEMT** に比べ、高温 (**200 °C**) まで安定に動作することを実証し、高耐圧であることも示した。今後、**AlGaN** 系 **HEMT** が工業用および車載用の電力変換システムにインストールされ社会実装されることが期待される。なお、プロジェクト終了後にも良好な関係を継続し、相互の情報交換を図るとともに、三重大大学の若手教員をパドバ大学でデバイス信頼性評価を研究テーマに派遣することを合意している。

## 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

**AlGaN** 系 **HEMT** の開発を推進した。開発目標として (1) **AlN** テンプレートの貫通転位密度  $10^8 \text{ cm}^{-2}$  以下、(2) **2DEG** 密度  $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  以上、(3) シート抵抗  $300 \Omega/\text{sq}$  以下、(4) 耐圧 **2.5 kV** 以上を設定した。(1) ~ (4) の設定目標に対し、(1)、(2)、(4) の課題はクリアすることに成功した。しかし、(3) については目標値を上回ることができなかった。これは **AlGaN** の混晶散乱による電子移動度の劣化に起因するものである。本プロジェクトでは、**AlGaN** の混晶組成を **50%** に設定して開発を行ったが、これを **Al** 過剰側にシフトさせることでシート抵抗の改善が見込まれる。このように、当初目標を概ね満足するデバイス開発に成功していることに加えて、研究成果を学術雑誌の論文や国際会議で発表している。また、国際スクールを開催し若手育成についても貢献した。

### 5-2 国際共同研究による相乗効果

三重大学において開発した **FFA-AlN** テンプレートを用いて、欧州側研究機関において **AlGaN** ヘテロエピタキシャル成長、**HEMT** 構造の作製および特性評価を行った。また、欧州側研究機関において解析した縦方向リーク電流の起源を、九州大学において行った理論解析により理解することに成功した。以上のように、日本—欧州 (イタリア、ベルギー、フランス、ドイツ) の **5** ヶ国による国際共同研究の相乗効果を得ることに成功した。これを実現するために、欧州側研究機関の若手研究者を三重大学にて短期間受入れるなど、密接な人的交流を図った。**2020** 年度にはコロナ禍で、若手教員の派遣は延期せざるを得なかったが、次年度には派遣する予定であり、今後も継続的に良好な交流を継続できる関係を築けた。三重大学は結晶成長で、九州大学は成長シミュレーションなど、欧州の大学・研究機関は物性評価、欧州企業によるデバイス作製と、今後も協力により相乗効果が発揮できると期待される。

### 5-3 国際共同研究成果の波及効果と今後の展望

本国際共同研究プロジェクトには、**Bosch**、**CE+T**、**EpiGaN**、**ON Semiconductor**、**Siemens** の欧州企業 **5** 社が参画しており、それぞれの企業で研究成果が得られている。得られた研究成果を基に低損失電力変換システムを世に送り出すことができれば、持続可能社会の実現に向けたエネルギーの有効利用に寄与することができる。また、本プロジェクトでその妥当性を検証した理論解析手法が他材料開発にも波及しており、一定の効果が得られていると考える。

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

1. Project title : 「Innovation Reliable Nitride based Power Devices and Applications (InRel-NPower)」
2. Research period : 01/2018 ~ 11/2020
3. Main participants :  
Japan-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Hideto Miyake	Prof.	Mie University	AIN development
Co-PI	Yoshihiro Kangawa	Prof.	Kyushu University	ab initio-based approach
Collaborator	Kanako Shojiki	Dr.	Mie University	AIN development and characterization
Collaborator	Kenjiro Uesugi	Dr.	Mie University	AIN development and AlGaN epitaxy
Collaborator	Shiyu Xiao	Dr.	Mie University	AIN development and structural analysis
Total number of participants throughout the research period: 5				

Partner-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Gaudenzio Meneghesso	Prof.	University of Padova	Project management
Co-PI	Joff Derluyn	CTO	EpiGaN	Material and Epitaxy
Co-PI	Farid Medjdoub	Senior scientist	CNRS	Device Processing
Co-PI	Abhishek Banerjee	R&D Engineer	ON Semiconductor	Characterization and Reliability
Co-PI	Elke Meissner	Scientific Manager	Fraunhofer IISB	Material and Epitaxy
Co-PI	Cristophe Detavernier	Prof.	Ghent University	Characterization
Total number of participants throughout the research period: 6				

4. Summary of the international joint research

The purpose of this research project is to develop robust and reliable high- and medium-voltage power devices for industrial and automotive applications by fully exploiting the high potential of wide-gap nitride semiconductor materials, and to contribute to the highly efficient use of energy. In order to achieve this goal, we developed the next generation HEMTs (High Electron Mobility Transistors) using GaN on Si substrates and AlGaN on AlN templates. To develop AlGaN-based HEMTs, we first developed AlN templates by Face-to-Face high temperature annealing (FFA), Solid Source Solution Growth (3SG), and sublimation methods, and determined the superiority and inferiority of each fabrication method. Next, we developed AlGaN HEMTs using the most promising AlN template fabricated by the FFA method and succeeded in fabricating HEMTs that operate

stably up to high temperatures (200 °C). It is superior than GaN-based HEMTs whose current density decreases above 150 °C. The AlGaIn HEMTs are expected to be installed in industrial and automotive power conversion systems and implemented in society in the future.

## 5. Outcomes of the international joint research

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

We promoted the development of AlGaIn-based HEMTs. We set the following development targets: (1) threading dislocation density of the AlN template of  $10^8$  cm<sup>-2</sup> or less, (2) 2DEG density of  $2 \times 10^{13}$  cm<sup>-2</sup> or more, (3) sheet resistance of 300 Ω/sq or less, and (4) breakdown voltage of 2.5 kV or more. For the targets set in (1) through (4), we succeeded in meeting the challenges in (1), (2), and (4). However, the target value for (3) could not be exceeded. This is due to the degradation of electron mobility caused by the alloy scattering of AlGaIn. In this project, the Al composition of AlGaIn was set at 50%, but shifting this to the Al-rich side is expected to improve the sheet resistance. In any case, we have succeeded in developing a device that generally satisfies the initial target.

### 5-2 Synergistic effects of the joint research

Using the FFA-AlN template developed at Mie University, AlGaIn heteroepitaxial growth, HEMT structure fabrication and its characterization were carried out by the European research group. We also succeeded in understanding the origin of the vertical leakage current, which was analyzed at the European research group, through theoretical analysis performed at Kyushu University. As described above, we have succeeded in achieving a synergistic effect of international joint research among five countries in Japan and Europe (Italy, Belgium, France, and Germany). To achieve this, Mie University hosted young researchers from European research group for a short period of time in order to promote close personnel exchanges.

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

Five European companies, Bosch, CE+T, EpiGaIn, ON Semiconductor, and Siemens, are participating in this international joint research project, and each company has obtained research results. If we can install a low-energy loss power conversion system based on the obtained research results, it will contribute to the effective use of energy for the realization of a sustainable society. In addition, the theoretical analysis method validated in this project is spreading to the development of other materials, and we believe that a certain effect has been achieved.

## 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）発表件数：計 3 件

・査読有り：発表件数：計 2 件

1. Martin Rittner, Ulrich Kessler, Samuel Araujo, Sebastian Mansfeld, Jörg Naundorf, Kai Kriegel, Martin Schulz, Hideto Miyake, Yoshihiro Kangawa, Gaudenzio Meneghesso, *Power module concepts for innovative reliable nitride based power devices and applications-The EU public funded project 'InRel-NPower', Proceedings of 31st International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, EVS 2018 and International Electric Vehicle Technology Conference 2018, EVTeC 2018.*
2. I Abid, R Kabouche, F Medjdoub, S Besendörfer, E Meissner, J Derluyn, S Degroote, M Germain, H Miyake, "Remarkable Breakdown Voltage on AlN/AlGaIn/AlN double heterostructure", 2020 32nd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 310-312, (2020), 10.1109/ISPSD46842.2020.9170170
3. Idriss Abid, J. Mehta, Yvon Cordier, Joff Derluyn, Stefan Degroote, Hideto Miyake and Farid Medjdoub, *AlGaIn channel High Electron Mobility Transistors with re-grown ohmic contacts*, Electronics (in press)

\*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 29 件

・査読有り：発表件数：計 21 件

1. S. Kuboya, K. Uesugi, K. Shojiki, Y. Tezen, K. Norimatsu, H. Miyake, "Crystalline quality improvement of face-to-face annealed MOVPE-grown AlN on vicinal sapphire substrate with sputtered nucleation layer", *Journal of Crystal Growth*, 125722, (2020.5), 10.1016/j.jcrysgro.2020.125722
2. D. Wang, K. Uesugi, S. Xiao, K. Norimatsu, H. Miyake, "Low dislocation density AlN on sapphire prepared by double sputtering and annealing", *Applied Physics Express*, 13,9,095501, (2020.8), 10.35848/1882-0786/ababec
3. K. Shojiki, K. Uesugi, S. Kuboya, T. Inamori, S. Kawabata, H. Miyake, "High - Quality AlN Template Prepared by Face - to - Face Annealing of Sputtered AlN on Sapphire", *physica status solidi (b)*, (2020.11), 10.1002/pssb.202000352
4. D. Yoshio, F. Shintaku, Y. Inatomi, Y. Kangawa, J.-I. Iwata, A. Oshiyama, K. Shiraishi, A. Tanaka, H. Amano, Oxygen Incorporation Kinetics in Vicinal m(10-10) Gallium Nitride Growth by Metal - Organic Vapor Phase Epitaxy, *physica status solidi (RRL)-Rapid Research Letters*, 2020, 14(6), 2000142  
DOI: 10.1002/pssr.202000142
5. F. Shintaku, D. Yoshio, Y. Kangawa, J.-I. Iwata, A. Oshiyama, K. Shiraishi, A. Tanaka, H. Amano, Computational study of oxygen stability in vicinal m (10-10)-GaN growth by MOVPE, *Appl. Phys. Express*, 2020, 13(5), 055507  
DOI: 10.35848/1882-0786/ab8723
6. Y. Inatomi, Y. Kangawa, Theoretical study of adatom stability on polar GaN surfaces during MBE and MOVPE, *Appl. Surf. Sci.*, 2020, 502, 144205  
DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.144205
7. K. Shojiki, R. Ishii, K. Uesugi, M. Funato, Y. Kawakami, H. Miyake, Impact of face-to-face annealed sputtered AlN on the optical properties of AlGaIn multiple quantum wells, *AIP ADVANCES*, 2019, 9, 125342  
DOI: 10.1063/1.5125799
8. K. Nagamatsu, X. Liu, K. Uesugi, H. Miyake, Improved emission intensity of UVC-LEDs from using strain relaxation layer on sputter-annealed AlN, *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, 58, SCCC07  
DOI: 10.7567/1347-4065/ab07a1
9. K. Shojiki, Y. Hayashi, K. Uesugi, H. Miyake, Local and anisotropic strain in AlN film on

sapphire observed by Raman scattering spectroscopy, Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58, SCCB17

DOI: 10.7567/1347-4065/ab0d07

10. S. Xiao, N. Jiang, K. Shojiki, K. Uesugi, H. Miyake, Preparation of high-quality thick AlN layer on nanopatterned sapphire substrates with sputter-deposited annealed AlN film by hydride vapor-phase epitaxy, Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58, SC1003  
DOI: 10.7567/1347-4065/ab0ad4
11. K. Uesugi, Y. Hayashi, K. Shojiki, H. Miyake, Reduction of threading dislocation density and suppression of cracking in sputter-deposited AlN templates annealed at high temperatures, Applied Physics Express, 2019, 12, 65501  
DOI: 10.7567/1882-0786/ab1ab8
12. S. Tanaka, K. Shojiki, K. Uesugi, Y. Hayashi, H. Miyake, Quantitative evaluation of strain relaxation in annealed sputter-deposited AlN film, Journal of Crystal Growth, 2019, 512, 16-19  
DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2019.02.001
13. Y. Hayashi, K. Tanigawa, K. Uesugi, K. Shojiki, H. Miyake, Curvature-controllable and crack-free AlN/sapphire templates fabricated by sputtering and high-temperature annealing, Journal of Crystal Growth, 2019, 512, 131-135  
DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2019.02.026
14. K. Uesugi, Y. Hayashi, K. Shojiki, S. Xiao, K. Nagamatsu, H. Yoshida, H. Miyake, Fabrication of AlN templates on SiC substrates by sputtering-deposition and high-temperature annealing, Journal of Crystal Growth, 2019, 510, 13-17  
DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2019.01.011
15. P. Kempisty, Y. Kangawa, Evolution of the free energy of the GaN (0001) surface based on first-principles phonon calculations, Phys. Rev. B, 2019, 100(8), 085304  
DOI: 10.1103/PhysRevB.100.085304
16. A. Kusaba, G. Li, P. Kempisty, M.R. von Spakovsky, Y. Kanawa, CH<sub>4</sub> Adsorption Probability on GaN(0001) and (000-1) during Metalorganic Vapor Phase Epitaxy and Its Relationship to Carbon Contamination in the Films, Materials, 2019, 12(6), 972  
DOI: 10.3390/ma12060972
17. R. Yoshizawa, H. Miyake, K. Hiramatsu, Effect of thermal annealing on AlN films grown on sputtered AlN templates by metalorganic vapor phase epitaxy, Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57, 01AD05  
DOI: 10.7567/JJAP.57.01AD05
18. S. Xiao, R. Suzuki, H. Miyake, S. Harada, T. Ujihara, Improvement mechanism of sputtered AlN films by high-temperature annealing, Journal of Crystal Growth, 2018, 502, 14-44  
DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2018.09.002
19. Y. Hayashi, R. Katayama, T. Akiyama, T. Ito, H. Miyake, Polarity inversion of aluminum nitride by direct wafer bonding, Applied Physics Express, 2018, 11, 31003  
DOI: 10.7567/APEX.11.031003
20. P. Kempisty, Y. Kangawa, A. Kusaba, K. Shiraishi, S. Krukowski, M. Bockowski, K. Kakimoto, H. Amano, DFT modeling of carbon incorporation in GaN(0001) and GaN(000-1) metalorganic vapor phase epitaxy, Applied Physics Letters, 2017, 11, 141602  
DOI: 10.1063/1.4991608
21. A. Kusaba, G. Li, M.R. von Spakovsky, Y. Kangawa, K. Kakimoto, Modeling the Non-Equilibrium Process of the Chemical Adsorption of Ammonia on GaN(0001) Reconstructed Surfaces Based on Steepest-Entropy-Ascent Quantum Thermodynamics, Materials, 2017, 10, 43322  
DOI: 10.3390/ma10080948

\*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）

1. Il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DEI) dell'Università di Padova punta al futuro, Italian economical newspaper Il Sole 24 ore  
[http://www.inrel-npower.eu/sites/default/files/Sole24Ore\\_showPdfFile.php-15.pdf](http://www.inrel-npower.eu/sites/default/files/Sole24Ore_showPdfFile.php-15.pdf)
2. Energy towards perfection, Italian journal Platinum, March 2017  
[http://www.inrel-npower.eu/sites/default/files/EN\\_Platinum.pdf](http://www.inrel-npower.eu/sites/default/files/EN_Platinum.pdf)

\*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 1 件

1. T. Matsuoka, Y. Kangawa (Eds.), Epitaxial Growth of III-Nitride Compounds: Computational Approach, Springer Series in Materials Science, vol. 269 (2018)

## 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 2 件（うち招待講演：1 件）

1. I. Abid, R. Kabouche, J. Derluyn, S. Degroote, M. Germain, S. Besendörfer, E. Meissner, H. Miyake, and F. Medjdoub, Remarkable Breakdown Voltage on AlN/AlGaIn/AlN double heterostructure, ISPSD 2020, 13-18/09/2020, Virtual Conference
2. F. Geenen, F. Medjdoub, M. Rittner, E. Meissner, J. Naundorf, J. Derluyn, P. Moens, P. Bleus, C. Detavernier, Y. Kangawa, H. Miyake, G. Meneghesso, InRel-NPower: Innovative Reliable Nitride-based Power devices and applications, Materials for Advanced Metallization, Milano (Italy) March, 18-21, 2018

\*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 32 件（うち招待講演：15 件）

1. [招待講演] 上杉謙次郎, Ding Wang, 三宅秀人, “低転位密度 AlN 膜の作製とそのテンプレート上 AlGaIn 成長”, 日本学術振興会「結晶成長の科学と技術」第 161 委員会第 114 回研究会, オンライン開催, (2020 年 5 月)
2. [招待講演] 上杉謙次郎, Ding Wang, 正直花奈子, 窪谷茂幸, 三宅秀人, “低転位密度 AlN テンプレートを用いた深紫外 LED の開発”, 第 12 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会, オンライン開催 (2020 年 7 月)
3. 白土 達也, 上杉 謙次郎, 窪谷 茂幸, 正直 花奈子, 三宅 秀人, “スパッタ法アニール処理 AlN 上 GaN 薄膜の MOVPE 成長”, 応用物理学会秋季学術講演会, オンライン開催, (2020.9)
4. [招待講演] 三宅 秀人, 正直 花奈子, 肖 世玉, 上杉 謙次郎, 小泉 晴比古, 窪谷 茂幸, “高品質 AlN 結晶の作製とその紫外線デバイス応用”, 応用物理学会秋季学術講演会, オンライン開催, (2020.9)
5. 形岡 遼志, 小泉 晴比古, 岩山 章, 三宅 秀人, “サファイア基板上へのスパッタ法を用いた h-BN の堆積と高温アニールによる結晶性向上”, 応用物理学会秋季学術講演会, オンライン開催, (2020.9)
6. 上杉 謙次郎, 王 丁, 手銭 雄太, 肖 世玉, 正直 花奈子, 窪谷 茂幸, 三宅 秀人, “高温アニールしたスパッタ成膜 AlN テンプレート上への DUV-LED 作製(2)”, 応用物理学会秋季学術講演会, オンライン開催, (2020.9)
7. 伊庭 由季乃, 正直 花奈子, 窪谷 茂幸, 上杉 謙次郎, 肖 世玉, 三宅 秀人, “ナノパターンを有するスパッタ・アニール法 AlN テンプレート上への AlN の MOVPE 成長”, 応用物理学会秋季学術講演会, オンライン開催, (2020.9)

8. 稲森 崇文, 石原 頌也, 白土 達也, 窪谷 茂幸, 正直 花奈子, 上杉 謙次郎, 三宅 秀人, “高温アニール AlN 上 AlGaIn 成長における超格子構造導入による歪み緩和”, 応用物理学会秋季学術講演会, オンライン開催, (2020.9)
9. 伊庭由季乃, 正直花奈子, 窪谷茂幸, 上杉謙次郎, 肖世玉, 三宅秀人, “ナノストイブパターン加工した低転位密度 AlN テンプレート上への MOVPE 成長と結晶性評価”, 電子情報通信学会 エレクトロニクスソサイエティ レーザ・量子エレクトロニクス研究会 (LQE), オンライン開催 (2020 年 10 月)
10. 白土 達也, 上杉 謙次郎, 窪谷 茂幸, 正直 花奈子, 三宅 秀人, “高電子移動度トランジスタのための原子層平滑な AlN テンプレート上への GaN 成長”, 電子情報通信学会 エレクトロニクスソサイエティ レーザ・量子エレクトロニクス研究会 (LQE), オンライン開催, (2020 年 10 月)
11. Takafumi Inamori, Shigeyuki Kuboya, Shoya Ishihara, Tatsuya Shirato, Kenjiro Uesugi, Kanako Shojiki and Hideto Miyake, “Control of strain in AlGaIn films on AlN templates by AlN/GaN superlattices”, The 12th International Workshop on Regional Innovation Studies 2020 (IWRIS2020), Mie Japan, (October 15, 2020)
12. Yukino Iba, Kanako Shojiki, Shigeyuki Kuboya, Kenjiro Uesugi, Shiyu Xiao and Hideto Miyake, “Effect of MOVPE Growth Conditions on Crystallinity of AlN films on Nano-Patterned Annealed Sputtered AlN Templates”, The 12th International Workshop on Regional Innovation Studies 2020 (IWRIS2020), Mie Japan, (October 15, 2020)
13. 河端一輝, 窪谷茂幸, 上杉謙次郎, 正直花奈子, 三宅秀人, “高温アニール AlN テンプレートを用いた分極ドープ深紫外 LED 作製”, 第 49 回結晶成長国内会議(JCCG-49), オンライン開催, (2020 年 11 月)
14. 土堀泰征, 上杉謙次郎, 三宅秀人, “AlN の結晶性向上に向けたサファイア基板表面の大気雰囲気アニールによる平坦化”, 第 49 回結晶成長国内会議(JCCG-49), オンライン開催, (2020 年 11 月)
15. 川端心, 正直花奈子, 窪谷茂幸, \*上杉謙次郎, 三宅秀人, “選択 MOVPE 成長による原子層レベルの AlN 表面形態制御”, 第 49 回結晶成長国内会議(JCCG-49), オンライン開催, (2020 年 11 月)
16. Shiyu Xiao, Kanako Shojiki, Hideto Miyake, “Thick AlN layers grown on macro-scale patterned sapphire substrates with sputter-deposited annealed AlN films by hydride vapor-phase epitaxy”, The Virtual Workshop on Materials Science and Advanced Electronics Created by Singularity, online, February 1-3, (2021.2)
17. [INVITED] Y. Kangawa, Unintentional doping in GaN MOVPE: A new theoretical model, 1st International Workshop on AlGaIn based UV-Laserdiodes, Berlin, 2019.8.26-8.30
18. [INVITED] Y. Kangawa, P. Kempisty, K. Shiraishi, A new theoretical approach to nitride crystal growth: impurity incorporation mechanism, 13th International Conference on Nitride Semiconductors 2019 (ICNS-13), Bellevue, Washington, 2019.7.7-12.
19. [INVITED] Y. Kangawa, Ab initio-based approach to crystal growth of nitride semiconductors: alloy composition and impurity concentration, 4th Intensive Discussion on Growth of Nitride Semiconductor (IDGN-4), Sendai, 2018.11.17-20.
20. T. Akiyama, M. Uchino, K. Nakamura, T. Ito, S. Xiao, H. Miyake, Structural analysis of polarity inversion boundary in sputtered AlN films annealed under high temperatures, International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN), NOV 11-16, 2018, Kanazawa, JAPAN
21. K. Shojiki, Y. Hayashi, K. Uesugi, H. Miyake Local and anisotropic strain in AlN film on sapphire observed by Raman scattering spectroscopy, International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN), NOV 11-16, 2018, Kanazawa, JAPAN
22. S. Xiao, N. Jiang, K. Shojiki, K. Uesugi, H. Miyake, Preparation of high-quality thick AlN layer on nanopatterned sapphire substrates with sputter-deposited annealed AlN film by hydride vapor-phase epitaxy, International Workshop on Nitride



- Semiconductors (IWN), NOV 11-16, 2018, Kanazawa, JAPAN
23. [INVITED] Y. Kangawa, Ab initio-based approach to crystal growth of nitride semiconductors: alloy composition and impurity concentration, 4th Intensive Discussion on Growth of Nitride Semiconductor (IDGN-4), Sendai, Japan, 2018.11.17-20
  24. [INVITED] Y. Kangawa, P. Kempisty, K. Shiraishi, Ab initio based-approach to impurity incorporation mechanism in GaN MOVPE, The 6th Japan-China Symposium on Crystal Growth and Crystal Technology, Osaka, Japan, 2018.10.21-24.
  25. [INVITED] Y. Kangawa, Influence of surface reconstruction on the impurity incorporation in GaN MOVPE, Mathematical Aspects of Surface and Interface Dynamics 16, Tokyo, Japan, 2018.10.17-19.
  26. [INVITED] Y. Kangawa, P. Kempisty, K. Shiraishi, Theoretical study: Impurity incorporation in GaN MOVPE, International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-7), Warsaw, Poland, 2018.08.05-10.
  27. [INVITED] Y. Kangawa, P. Kempisty, S. Krukowski, K. Shiraishi, K. Kakimoto, Surface reconstruction and impurity incorporation in GaN MOVPE: Ab initio-based modeling, 19th International Conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-XIX), Nara, Japan, 2018.06.03-08.
  28. K. Uesugi, Y. Hayashi, K. Shojiki, S. Xiao, K. Nagamatsu, H. Yoshida, H. Miyake, Fabrication of AlN templates on SiC substrates by sputtering-deposition and high-temperature annealing, 19th International Conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE), JUN 03-08, 2018, Nara, JAPAN
  29. [TUTORIAL] Y. Kangawa, P. Kempisty, K. Shiraishi, Modeling and process design of III-nitride MOVPE the 6th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (LEDIA '18), Yokohama, Japan, 2018.04.23-27.
  30. [INVITED] Y. Kangawa, P. Kempisty, K. Shiraishi, K. Kakimoto, Theory of GaN MOVPE process considering surface reconstruction, SPIE Photonics West OPTO, San Francisco, USA, 2018.01.27-02.01.
  31. [INVITED] Y. Kangawa, Introduction of case study of Horizon 2020: InRel-NPower, H2020 workshop, Tokyo, JP, November 8, 2017
  32. [INVITED] Y. Kangawa, Introduction of case study of Horizon 2020 “Innovative Reliable Nitride based Power Devices and Applications” (InRel-NPower), H2020 work programme 2018-2020: Coop. opportunities for researchers in Japan, Tokyo, JP, November 24, 2017

\*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 1 件

1. M. Rittner, U. Keßler, S. Araujo, S. Mansfeld, J. Naundorf, K. Kriegel, M. Schulz, H. Miyake, Y. Kangawa, G. Meneghesso, Power Module Concepts for Innovative Reliable Nitride based Power Devices and Applications, 31st International Electric Vehicle Symposium, Kobe, Japan, 02.10.2018

\*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 3 件

1. 森隆一, 上杉謙次郎, 正直花奈子, 窪谷茂幸, 白土達也, 三宅秀人, “低転位密度 AlN テンプレート上 Si ドープ AlGaIn の電氣的・光学的特性評価”, 第 12 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会, オンライン開催, (2020 年 7 月)
2. 伊庭由季乃, 正直花奈子, 窪谷茂幸, 上杉謙次郎, 肖世玉, 三宅秀人, “ナノパターン加工したスパッタ・アニール法 AlN テンプレート上の MOVPE 成長 AlN 膜の結晶性評価”, 第 12 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会, オンライン開催 (2020 年 7 月)
3. 杉浦雅紀, 上杉謙次郎, 三宅秀人, “高温アニールに伴う SiC 基板上スパッタ AlN の結晶性と歪み評価”, 第 12 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会, オンライン開催

(2020年7月)

### 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. International Workshop on Creation of Singularity Structures、主催者：三重大学、三重大学地域イノベーションホール、三重、日本、2020年10月15日～16日
2. Materials Science and Advanced Electronics Created by Singularity、主催者：新学術、オンライン開催

### 4. 研究交流の実績（主要な実績）

#### 【合同ミーティング】

- ・ 2017年1月9～12日 キックオフミーティング、パドバ大学 (UniPD)、イタリア
- ・ 2018年9月20～21日 中間評価ミーティング、ブリュッセル会議場、ベルギー

#### 【オンライン会議】

- ・ 2020年11月20日 最終評価委員会。オンライン

#### 【ワークパッケージミーティング】

- ・ 三宅・寒川と WP1 E.Meissner 博士との打合せ：2017年7月23-28日 (ICNS, Strassburg, Franceにて)
- ・ 三宅・寒川と WP1 E.Meissner 博士・Besendörfer 氏との打合せ：2018年11月11-16日 IWN2018、金沢にて)
- ・ 三宅と Martin Rittner (BOSCH) との打合せ：2018年10月(三重大学)

#### 【学生の受入】

- ・ 博士後期課程学生 Besendörfer 氏を三重大学で受け入れた 2018年11月19-23日

### 5. 特許出願

研究期間累積出願件数：7件

1. 特願 2018-037571「基板および基板の製造方法」2018/3/2、林 侑介、三宅 秀人
2. 特願 2017-198914「窒化物半導体基板、窒化物半導体基板の製造方法、窒化物半導体基板の製造装置及び窒化物半導体デバイス」2017/10/2、林 侑介、三宅 秀人、片山 竜二
3. 特願 2018-155448「半導体基板および半導体基板の製造方法」2018/8/22、永松 謙太郎、吉田 治正、三宅 秀人
4. 特願 2018-164953「窒化物半導体基板の製造方法および窒化物半導体基板」2018/9/3、林 侑介、三宅 秀人
5. 特願 2018-192188「窒化物半導体の製造方法、窒化物半導体、及び発光素子」2018/10/10、上杉 謙次郎、三宅 秀人
6. 特願 2019-030603「窒化物半導体基板の製造方法および窒化物半導体基板」2019/2/22、上杉 謙次郎、三宅 秀人
7. 特願 2020-032268「窒化物半導体基板、半導体素子及び窒化物半導体基板の製造方法」2020/2/27、三宅秀人、王丁、上杉謙次郎

### 6. 受賞・新聞報道等

1. 学生ポスター賞、第49回結晶成長国内会議 (JCCG-49)、用正大地、新宅史哉、稲富悠也、寒川義裕、岩田潤一、押山 淳、白石賢二、田中敦之、天野浩、「微傾斜 m-GaN MOVPE における酸素混入機構：量子論に立脚した BCF モデル」、オンライン、2020.11.9-11.
2. 発表奨励賞、第12回ナノ構造エピタキシャル成長講演会、用正大地、新宅史哉、稲富悠也、寒川義裕、岩田潤一、押山淳、白石賢二、田中敦之、天野浩、「微傾斜 m(101-0) 面 GaN-MOVPE における酸素混入のモデリング」、オンライン、2020.07.30-31.
3. 学生ポスター賞、第48回結晶成長国内会議、稲富悠也、寒川義裕、「窒化物半導体に

- におけるステップバンチング発生機構の解明」、大阪、2019.10.30-11.01.
4. 若手ポスター賞、第42回結晶成長討論会、稲富悠也、寒川義裕、「吸着原子の拡散距離が表面モフォロジーに与える影響」、大阪、2019.8.29
  5. 発表奨励賞、第11回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会、新宅史哉、寒川義裕、岩田潤一、押山淳、白石賢二、田中敦之、天野浩、「m面 GaN-MOVPE における酸素混入量の基板傾斜方向依存性の理論解析」、広島、2019.6.13-15
  6. LEDIA Student's Paper Award, Yamaguchi Masahito Award, Y. Inatomi, A. Kusaba, Y. Kangawa, K. Kojima, S. F. Chichibu, Formation mechanism of singular structure in AlInN layer grown on m-GaN substrate by MOVPE, Yokohama, 2018.04.27.
  7. 第46回結晶成長国内会議 学生ポスター賞 (日本結晶成長学会)、草場 彰、李冠辰、マイケル・ヴォン・スパコフスキー、寒川義裕、柿本浩一、「GaN(0001)におけるNH<sub>3</sub>吸着過程の非平衡量子熱力学モデリング：付着係数の理論解析」、浜松、2017.11.29
  8. Outstanding Presentation Award of International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2017 (ICMaSS 2017), "Thermodynamic Modeling of GaN MOVPE: Contribution of Surface State", A. Kusaba, Y. Kangawa, P. Kempisty, K. Shiraishi, K. Kakimoto, A. Koukitu., Nagoya, 2017.10.1.
  9. 第9回ナノ構造エピタキシャル成長講演会 発表奨励賞、稲富悠也、寒川義裕、伊藤智徳、柿本浩一、AlInN 薄膜における格子不整合と組成取込み効率の相関、2017.07.14.

## 7. その他

### 【YouTubeによる動画配信】

<https://www.youtube.com/watch?v=mYLOgYPE6Y4&t=11s>

### 【市民向けアウトリーチ活動】

1. 卓越型リサーチセンターシンポジウム 2017年5月18日開催  
報道：伊勢新聞 (2017年5月19日)
2. 地域活性化連携 2017年7月20日 報道：中日新聞 (2017年8月20日)
3. リフレッシュ理科教室 2018年8月26-27日 報道：毎日新聞 (2018年8月28日)
4. JST ジュニアドクター育成塾 三重大学 運営委員、講師 2018年～