

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18706

研究課題名（和文）キャリアトラップサイトの原子構造とダイナミクスの解明

研究課題名（英文）Elucidation of atomic structure and dynamics of carrier trap sites

研究代表者

長 康雄（Cho, Yasuo）

東北大学・未来科学技術共同研究センター・特任教授

研究者番号：40179966

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：GaN MOS界面の評価に関して大きな進展があった。GaN界面は熱エネルギーより大きくキャリアが超えることの難しいポテンシャル障壁揺らぎが存在することが分かった。これは界面は欠陥分布も含めて均質であると信じられていた半導体業界の常識を覆す成果であり、このポテンシャル揺らぎ問題を解決する事なしには、ワイドギャップ半導体を用いた高移動度のパワーMOSデバイス実現は不可能である事を指摘した。更にSNDMRの装置開発を行い完成した。磁場は360°回転でき5000G以上までかけられ、温度は極低温（30K）から常温迄コントロール可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SNDMRの装置開発を行い完成した。磁場は360°回転でき5000G以上までかけられ、温度は極低温（30K）から常温迄コントロール可能とした。スピン反転用マイクロ波磁界の周波数可変範囲と最高強度はそれぞれ1～20GHzと0.23Gで、ESR計測に十分な値を達成している。

実際の実験条件を想定し、欠陥密度 $N_t = 10^{12} \text{cm}^{-2}$ の測定サンプルを半径150 nmの探針電極を用いて信号検出を行うという仮定のもと試算を行ったところ、 $1.3 \times 10^{-19} \text{ F/V}$ 程度の信号強度が得られるとの結果を得ており、現行のSNDMによって十分検出可能な信号強度である事が分かった。

研究成果の概要（英文）：A major breakthrough in the characterization of GaN MOS interfaces has been achieved: it has been found that GaN interfaces exhibit potential barrier fluctuations that are larger than the thermal energy and are difficult for carriers to overcome. This result overturned the common belief in the semiconductor industry that the interface is homogeneous, including the distribution of defects, and pointed out that it is impossible to realize high-mobility power MOS devices using wide-gap semiconductors without solving this potential fluctuation problem. Furthermore, he developed and completed a SNDMR apparatus. The magnetic field can be rotated 360° and applied up to 5000G or more, and the temperature can be controlled from cryogenic (30K) to room temperature.

研究分野：電気電子材料工学

キーワード：走査型非線形誘電率顕微鏡 時間分解走査型非線形誘電率顕微鏡 界面準位密度

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体の MOS 界面のキャリアトラップサイト (欠陥) はキャリアの移動度 μ_{FE} の低下や素子の閾値 V_{th} の変動をはじめとする種々の性能劣化の原因となり、高性能で安定なデバイスを実現するための大きな障害になっている。その原因を特定することは通常困難を極め、更に多くの場合欠陥の起源が一種類だけでなく空間的にもエネルギー深さ的にも分布があり、マクロで時間平均的な従来法ではその識別や起源の同定は不可能であると認識されるようになってきている。(従来概念の転換)。このような背景からナノスケールの空間分可能でトラップ分布を2次元的に可視化できる手法が学会からも産業界からも渴望されるようになってきているが、現状では、その要求に応えられる技術としては(不十分ながら)本申請者が開発した SNDM をベースとした局所 DLTS 法以外には無く、マイクロな界面準位密度 (Dit) の起源や原子レベルでの構造や欠陥に捕獲されたキャリアの原子レベルでのダイナミクスについては全く不明な状態が永遠と続いていた。

2. 研究の目的

従来解明されていなかった MOS 界面に存在する個々のキャリアトラップ (欠陥) の原子レベルでの構造の同定とダイナミクスの解明を目的に、まず世界に類のない高速走査型非線形誘電率顕微鏡法 (SNDM) を確立する。これをベースに超高速波時間分解 SNDM (TR-SNDM) を開発し更に走査型非線形誘電率常磁性共鳴顕微鏡 (SNDMR) 装置を完成させ、電子スピン共鳴により MOS 界面にトラップされた電荷の増加による空乏層の拡張を起源とした静電容量変化信号 (局所 ESR 信号 : SNDMR 信号) の検出を行う。次に SNDMR 及び TR-SNDM を統合し、欠陥の種類と同定を行いつつ、キャリア捕獲・放出過程を実時間で2次元的に観測できるようにする。この手法を種々の MOS 界面に適用し、現在まで何十年と解決されていなかった MOS 界面欠陥に起因する諸問題の原因の解明を行い高性能 MOS デバイス実現に資する研究を行う。

3. 研究の方法

超高速現象を捉える事が出来るように、超高速時間分解 (Time Resolved) SNDM 装置 (TR-SNDM) を新規に開発し、高速な静電容量変化を局所的に検出できるようにする。世界に類のない高速応答容量顕微鏡法を確立する。その後ミリ波走査型非線形誘電率常磁性共鳴顕微鏡 (SNDMR) 装置を完成させこれを用い、電子スピン共鳴により励起された反平行スピンを持つ電子が MOS 界面の1電子界面準位に更にもう一つトラップされ、トラップされた電荷の増加による空乏層の拡張を起源とした静電容量変化信号 (局所 ESR 信号 : SNDMR 信号) の検出を行う。

4. 研究成果

(1) 超高速時間分解走査型非線形誘電率顕微鏡 (Tr-SNDM) の開発

高速時間分解 SNDM 法 (Tr-SNDM) を開発した。(図1) 本手法は SNDM プロブからのマイクロ波信号を直接デジタル信号として取り込みポストプロセッシングにより FM 復調を含むデータ処理を行うデジタル方式の SNDM で従来型のアナログ SNDM に比して、広帯域・高空間分解能、復調系の校正が不要、任意入力電圧波形に対して容量の高速な応答を正確に復調可、デジタル信号処理技術との親和性が飛躍的に向上、時分割・周波数分割多重化による大量データ取得、フレキシブルなポスト信号処理が可能と言った特長があり、これを用いる事で任意の連続する電圧印加波形に対して任意時刻のキャパシタンス応答が取得できるようになった。(図2) 例えば、局所 DLTS、局所 C-V

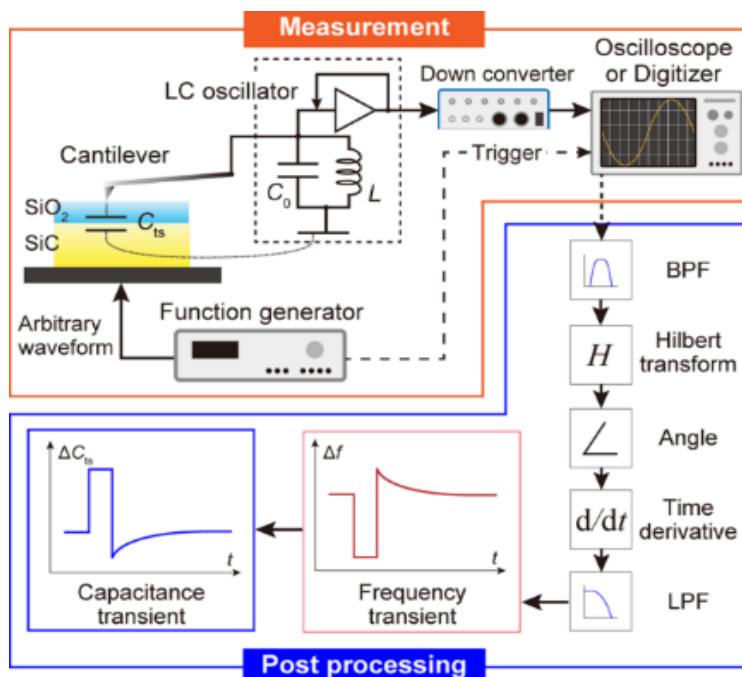


図1 Tr-SNDM のブロックダイアグラム

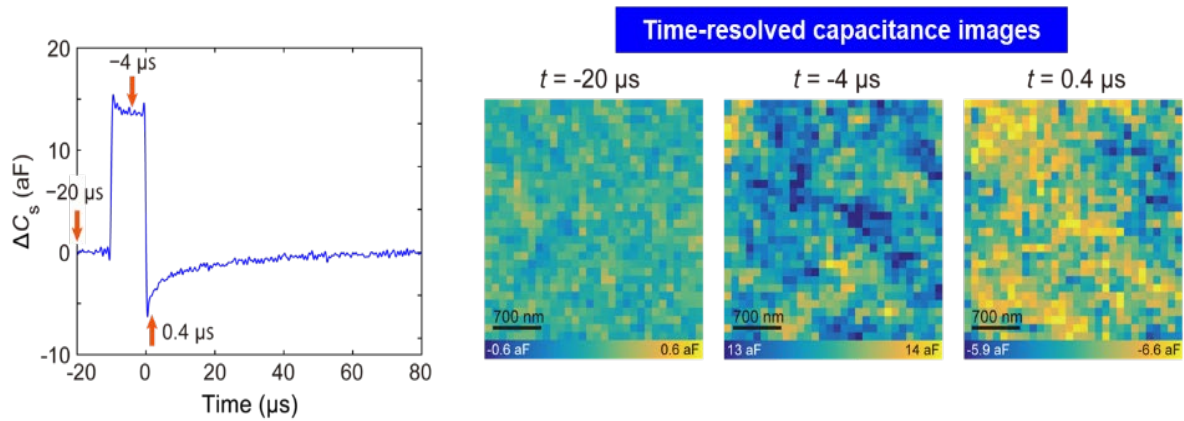


図 2 Tr-SNDM を用いた任意時刻でのキャパシタンス応答像の取得

曲線、 dC/dV - V 曲線の同一ピクセル上での同時取得等今回の多くの界面研究に本手法を用いる事ができたため、多角的な界面分析が可能になった。

(2) 走査型非線形誘電率常磁性共鳴顕微鏡の研究開発

SNDMR の装置開発を行い完成した。磁場は 360° 回転でき 5000G 以上までかけられ、温度は極低温 (30K)から常温迄コントロール可能とした。スピン反転用マイクロ波磁界の周波数可変範囲と最高強度はそれぞれ $1\sim 20\text{GHz}$ と 0 、 23G で、ESR 計測に十分な値を達成している。

実際の実験条件を想定し、欠陥密度 $N_t=10^{12}\text{cm}^{-2}$ の測定サンプルを半径 150nm の探針電極を用いて信号検出を行うという仮定のもと試算を行ったところ、 $1.3\times 10^{-19}\text{F/V}$ 程度の信号強度が得られるとの結果を得ており、現行の SNDM によって十分検出可能な信号強度である事が分かった。そこで、この装置を用いての実験を行なっているが、サンプル供給の問題も相まって現状では再現性に問題があり、確立したデータとして論文等で公表する段階には至っておらず、研究を継続中である。

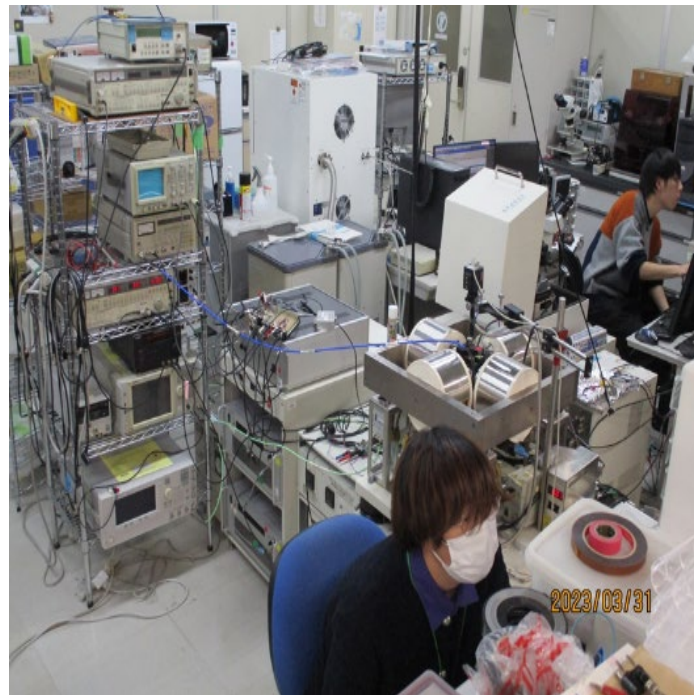


図 3 完成し運用中の SNDMR 装置

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8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 0件）

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 Yu Ogata, Kohei Yamasue, Xufang Zhang, Tsubasa Matsumoto, Norio Tokuda and Yasuo Cho | 4. 巻 1062 |
| 2. 論文標題 Microscopic Evaluation of Al2O3/p-Type Diamond (111) Interfaces Using Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Materials Science Forum | 6. 最初と最後の頁 298-303 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4028/p-n0z51t | 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 Kohei Yamasue and Yasuo Cho | 4. 巻 1062 |
| 2. 論文標題 Surface Potential Fluctuations of SiO2/SiC Interfaces Investigated by Local Capacitance-Voltage Profiling Based on Time-Resolved Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Materials Science Forum | 6. 最初と最後の頁 335-340 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4028/p-2t7zak | 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 Yoshiomi Hiranaga, Takanori Mimura, Takao Shimizu, Hiroshi Funakubo and Yasuo Cho | 4. 巻 61 |
| 2. 論文標題 Nanoscale mapping to assess the asymmetry of local C-V curves obtained from ferroelectric materials | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Jpn. J. Appl. Phys. | 6. 最初と最後の頁 SN1014-1-8 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac7f7a | 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 Kohei Yamasue Yasuo Cho | 4. 巻 135 |
| 2. 論文標題 Local capacitance-voltage profiling and deep level transient spectroscopy of SiO2/SiC interfaces by scanning nonlinear dielectric microscopy | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Microelectronics Reliability | 6. 最初と最後の頁 14588-1-8 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.microrel.2022.114588 | 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 Yoshiomi Hiranaga, Takanori Mimura, Takao Shimizu, Hiroshi Funakubo and Yasuo Cho | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 High-precision local C-V mapping for ferroelectrics using principal component analysis | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Jpn.J.Appl.Phys. | 6. 最初と最後の頁 SFFB09-1-8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac13d9 | 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 Hiroyasu Yamahara, Bin Feng, Munetoshi Seki, Masaki Adachi, Md Shamim Sarker, Takahito Takeda, Masaki Kobayashi, Ryo Ishikawa, Yuichi Ikuhara, Yasuo Cho & Hitoshi Tabata | 4. 巻 2 |
| 2. 論文標題 Flexoelectric nanodomains in rare-earth iron garnet thin films under strain gradient | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 COMMUNICATIONS MATERIALS | 6. 最初と最後の頁 95 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-021-00199-y | 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 Kenji Fukuzawa, Yoshiomi Hiranaga and Yasuo Cho | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Simulation of nanoscale domain growth for ferroelectric recording | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 AIP Advances | 6. 最初と最後の頁 115117-1-8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0074004 | 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 Kohei Yamasue and Yasuo Cho | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Boxcar averaging scanning nonlinear dielectric microscopy | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Nanomaterials | 6. 最初と最後の頁 794-1-19 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano12050794 | 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 - |

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 23件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yasuo Cho, Beniamino Iandolo, Ole Hansen |
| 2. 発表標題 Quantitative measurement of active dopant density distribution in black silicon solar cell using scanning nonlinear dielectric microscopy |
| 3. 学会等名 49th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 49) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Koki Takano, Kohei Yamasue, Toshiaki Kato, Toshiro Kaneko and Yasuo Cho |
| 2. 発表標題 Comparative study on carrier distribution of mechanically exfoliated WSe ₂ /SiO ₂ and suspended WSe ₂ by scanning nonlinear dielectric microscopy |
| 3. 学会等名 THE 22ND INTERNATIONAL VACUUM CONGRESS IVC-22 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kohei Yamasue and Yasuo Cho |
| 2. 発表標題 Real-space analysis on surface potential fluctuations of Al ₂ O ₃ /GaN interfaces by scanning nonlinear dielectric microscopy |
| 3. 学会等名 International Workshop on Nitride Semiconductor (IWN2022) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Sachiko Jonai, Haruto Morishita, Yasuo Cho, Diego Bronneberg |
| 2. 発表標題 Experimental research on curved photovoltaic modules : effects of hot spots, interconnect schemes and curvature on electrical PV performance |
| 3. 学会等名 The 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-33) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yasuo Cho, Beniamino Iandolo, Ole Hansen |
| 2. 発表標題 Microscopic carrier distribution imaging of black silicon solar cell by scanning nonlinear dielectric microscopy |
| 3. 学会等名 The 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-33) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Koki Takano, Kohei Yamasue, Toshiaki Kato, Toshiaki Kato and Yasuo Cho |
| 2. 発表標題 Scanning Nonlinear Dielectric Microscopic Investigation of Mechanically Exfoliated WSe ₂ /SiO ₂ and Suspended WSe ₂ |
| 3. 学会等名 2022 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yoshiomi Hiranaga, Yasuo Cho |
| 2. 発表標題 Statistical analysis of local C-V map data for ferroelectric thin films |
| 3. 学会等名 7th International Symposium on Dielectric Materials and Applications (ISyDMA '7) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kohei Yamasue and Yasuo Cho |
| 2. 発表標題 Correlation analysis on local capacitance-voltage profiles of a SiO ₂ /SiC interface observed by time-resolved scanning nonlinear dielectric microscopy |
| 3. 学会等名 7th IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing(EDTM) Conference (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kohei Yamasue, Yasuo Cho |
| 2. 発表標題 Local Capacitance-Voltage Profiling and Deep Level Transient Spectroscopy of SiO ₂ /SiC Interfaces by Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy |
| 3. 学会等名 IPFA2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kohei Yamasue, Koharu Suzuki, Yasuo Cho |
| 2. 発表標題 Local capacitance-voltage profiling and high voltage stress effect study of SiO ₂ /SiC structures by time-resolved scanning nonlinear dielectric microscopy |
| 3. 学会等名 ESREF2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Koharu Suzuki, Kohei Yamasue, Yasuo Cho |
| 2. 発表標題 Nanoscale capacitance-voltage profiling of DC bias induced stress on a high- κ /SiO ₂ /Si gate stack |
| 3. 学会等名 ESREF2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kohei Yamasue, Yasuo Cho |
| 2. 発表標題 Nanoscale characterization techniques for ultra-thin van der Waals semiconductors based on scanning nonlinear dielectric microscopy |
| 3. 学会等名 The 5th international symposium on "Elucidation of Next Generation Functional Materials・Surface and Interface Properties" (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 Y. OGATA, K. YAMASUE, X. ZHANG, T. MATSUMOTO, N. TOKUDA, Y. CHO |
| 2 . 発表標題 Nanoscale evaluation of Al ₂ O ₃ /diamond MOS interfaces using time-resolved scanning nonlinear dielectric microscopy |
| 3 . 学会等名 ECSCRM 2021 (国際学会) |
| 4 . 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 K. YAMASUE, Y. CHO |
| 2 . 発表標題 Surface potential fluctuations of SiO ₂ /SiC interfaces investigated by local capacitance-voltage profiling based on time-resolved scanning nonlinear dielectric microscopy |
| 3 . 学会等名 ECSCRM 2021 (国際学会) |
| 4 . 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Kohei Yamasue and Yasuo Cho |
| 2 . 発表標題 Simultaneous interface defect density and differential capacitance imaging by time-resolved scanning nonlinear dielectric microscopy |
| 3 . 学会等名 ISTFA 2021 (国際学会) |
| 4 . 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 Yasuo Cho, Yu Ogata, Kohei Yamasue, Xufang Zhang, Tsubasa Matsumoto, Norio Tokuda |
| 2 . 発表標題 A Scanning Nonlinear Dielectric Microscopic Investigation of Al ₂ O ₃ /Diamond MOS Interfaces |
| 3 . 学会等名 2021 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会) |
| 4 . 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yasuo Cho, Kohei Yamasue |
| 2. 発表標題 Microscopic Carrier Distribution Imaging of Atomically-Thin van der Waals Semiconductors by Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy |
| 3. 学会等名 Microscopic Carrier Distribution Imaging of Atomically-Thin van der Waals Semiconductors by Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yasuo Cho, Beniamino Iandolo, Ole Hansen |
| 2. 発表標題 Scanning Nonlinear Dielectric Microscopic Investigation of Active Dopant Density Distribution in Black Silicon Solar Cell |
| 3. 学会等名 2021 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kohei Yamasue, and Yasuo Cho |
| 2. 発表標題 Nanoscale study on surface potential fluctuations of SiO ₂ /SiC interfaces by time-resolved scanning nonlinear dielectric microscopy |
| 3. 学会等名 52th IEEE Semiconductor Interface Specialists Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yoshiomi Hiranaga and Yasuo Cho |
| 2. 発表標題 Nanoscale Domain Dynamics Characterization Using Local C-V Mapping |
| 3. 学会等名 The Sixth International Symposium on Dielectric Materials and Applications (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yoshiomi Hiranaga and Yasuo Cho |
| 2. 発表標題 Recording Medium Design Aiming at Realizing Ferroelectric Probe Data Storage |
| 3. 学会等名 The Sixth International Symposium on Dielectric Materials and Applications (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Taiyo Ishizuka, Kohei Yamasue, and Yasuo Cho |
| 2. 発表標題 Local Capacitance-Voltage Profiling on MoS ₂ /SiO ₂ and MoS ₂ /h-BN/SiO ₂ by Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy Assisted with an Insulating Tip |
| 3. 学会等名 EDTM 2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Jun Hirota, Ken Hoshino, Kohei Yamasue, and Yasuo Cho. |
| 2. 発表標題 Carrier Profile Mapping in a 3D Flash Memory Cell using Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy |
| 3. 学会等名 EDTM 2022 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

| | | |
|---------------------------------------|--------------|-------------------|
| 産業財産権の名称 誘電体再生装置および誘電体記録再生装置 | 発明者 長 康雄 | 権利者 国立大学法人東北大学 |
| 産業財産権の種類、番号 特許、誘電体再生装置および誘電体記録再生装置 | 出願年 2023年 | 国内・外国の別 外国 |

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<http://d-nanodev.niche.tohoku.ac.jp/>

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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|