

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月20日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2007～2011

課題番号：19106007

研究課題名（和文）窒化物半導体とシリコンのモノリシック集積による光マイクロシステムの研究

研究課題名（英文）Study of optical micro systems by monolithic integration of silicon with nitride semiconductor

研究代表者

羽根 一博（HANE KAZUHIRO）

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50164893

研究成果の概要（和文）：

Si の立体構造およびマイクロアクチュエータと GaN 系光源デバイスをモノリシックに集積することで、高機能で集積度の高い光応用のマイクロ電気機械システム（MEMS）を実現した。具体的には、Si 基板上 GaN-発光ダイオード(LED) の結晶成長、微細加工を施した Si/GaN 基板上 GaN 結晶成長、GaN-LED と Si アクチュエータの集積、GaN アクチュエータの製作を行った。GaN-LED と Si-MEMS を集積した配光可変デバイスおよび蛍光分析チップなどを実現した。

研究成果の概要（英文）：

Integrating GaN light source devices with Si three-dimensional structures and micro actuators monolithically, functional micro-electro-mechanical systems (MEMS) for optical applications were developed. Crystal growth of GaN-LED on Si substrate, GaN crystal growth on micro-machined GaN/Si substrate, integration of GaN-LED with Si actuator, and fabrication of GaN actuator were carried out. Integrating GaN-LED with Si-MEMS, a variable lightning device, a micro fluorescent analysis chip etc. were demonstrated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	18,900,000	5,670,000	24,570,000
2008年度	18,300,000	5,490,000	23,790,000
2009年度	16,600,000	4,980,000	21,580,000
2010年度	15,800,000	4,740,000	20,540,000
2011年度	14,100,000	4,230,000	18,330,000
総計	83,700,000	25,110,000	108,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス、電子機器

キーワード：光デバイス、集積化、MEMS

## 1. 研究開始当初の背景

MEMS はマイクロセンサやマイクロ集積デバイスの分野において広く発展している。特に光応用の MEMS においては、レーザディスプレイ、バイオ用蛍光分析チップ、環境モニター光センサなど、光集積デバイスへの展

開が期待されている。また光通信用コンポーネントへの応用については、すでに高度なレベルに達している。しかしトータルなマイクロ光システムを実現する上で欠かせない問題は光源の搭載である。多くの応用で、光源は外部に設置するか、後付けで基板上に搭載

される。GaN 系半導体は Al, In との混晶により、紫外から赤外まで広い範囲において連続に波長を選択できる可能性がある。また GaN 系半導体は他の光源用半導体材料に比較して、異種基板においても優れた半導体特性が得られている。Si 上 GaN 半導体から発光ダイオードを製作する研究においても優れた特性が得られている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、シリコンの立体構造およびマイクロアクチュエータと GaN 系光源デバイスをモノリシックに集積することで、高機能で集積度の高い光応用のマイクロシステム(MEMS: マイクロ電気機械システム)を実現することである。

## 3. 研究の方法

- (1) 平面 Si 基板へ GaN 半導体を成長後、MEMS 加工を施す手法の確立、
- (2) Si 基板に MEMS 基本構造を加工後に GaN 半導体結晶を成長し、デバイスを製作する方法の確立。
- (3) Ga 半導体の MEMS 加工法の開発。
- (4) 具体的な GaN-Si 複合光 MEMS として、照明方向を制御できる配光光源、バイオ分析用集積型マイクロ分光システム、光スキャナー、波長可変レーザ、光インターコネクションなどを研究する。

## 4. 研究成果

Si 基板に MBE によりバッファ層を用いて GaN 系半導体を結晶成長した。MBE を用いる場合、ナノコラム状の結晶が成長しやすいが、これを成長して、コラムの隙間を SOG により埋めて、電極を形成し、発光ダイオード(LED)を試作し、電流駆動による青色発光を確認できた。

平坦な GaN 結晶の成長を目指し、MOCVD により GaN 結晶をあらかじめ成長した Si 基板をテンプレートに用いて、その後に GaN 結晶を MBE により成長する方法も実施した。これにより、平坦な GaN 結晶が得られ、電流駆動による LED を実現した。図 1 に電流による発光写真を示す。

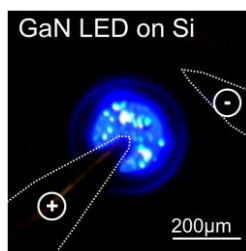


図 1 製作した Si 基板上 GaN-LED

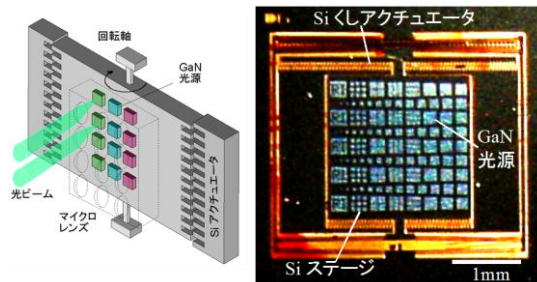


図 2 Si 上に成長した GaN 薄膜より製作した MEMS(配光可変光源)

これらの GaN/Si ウエハを用いて、MEMS 加工を実施した。Si の深堀エッチングを用いることで高い選択性が得られることを明らかにした。反応性イオンエッチング装置を改良し、塩素による GaN エッチングを可能にした。さらに、これらのエッチングとガラスの接合技術など組み合わせ、可動できるステージ構造を製作した。これらの方法により、図 2 に示す可動ステージ上に GaN 光源薄膜をパターンニングした構造を製作した。

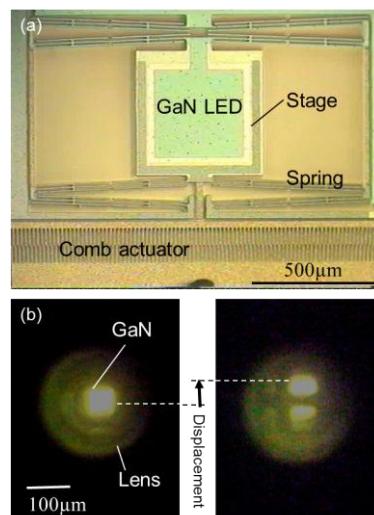


図 3 (a)製作した配光可変デバイスと(b)発光部の移動

さらに Si くし型アクチュエータを改良し、ガラスマイクロレンズも集積した。アクチュエータを駆動することで LED の照射方向を制御できる配光可変デバイスを試作し、基本動作を確認した(図 3)。アクチュエータは 90V で 50µm の比較的大きい変位を得た。

次に研究方法(2)に述べた、Si 基板を加工後に GaN 結晶を成長する方法を試みた。図 4 に MEMS 加工を行った Si-SOI 基板に MBE により GaN 結晶を堆積した結果を示す。MBE の場合、成長温度が低いので、ナノコラム状の結晶が成長しているが、量子井戸の蛍光強

度も強く、集積の方法として十分可能性があることを見出した。

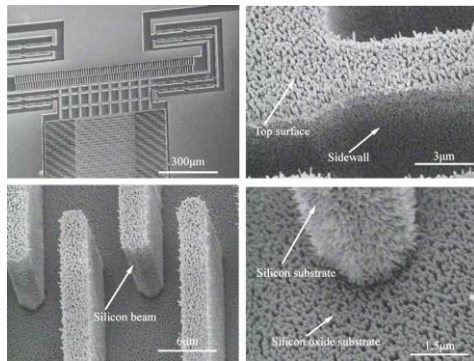
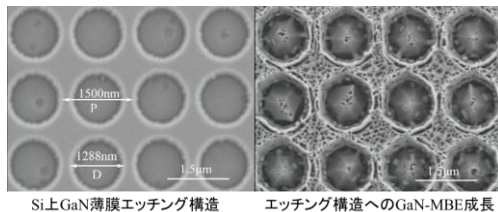


図4 加工した Si 基板上への GaN 結晶成長



Si上GaN薄膜エッチング構造 エッチング構造へのGaN-MBE成長

図5 パターン形成した基板への GaN 結晶成長

同様に微細加工した基板への GaN 結晶成長の実験を Si 上の微細加工した GaN 膜に対して実施した。図5に一例を示す。1µm レベルの微小ホールアレイを Si 基板上 GaN 結晶の上に形成し、その上に MBE により GaN 結晶および量子井戸構造を形成した。ホールの中に 6 角形状の横方向成長結晶が得られた。量子井戸をそれらの上に成長すると、強い蛍光が得られ、よい結晶が得られていることが示された。製作した周期構造はフォトニック結晶に用いることができる程度の周期であるので、新規なフォトニック構造として有用であると考えられた。

次に研究方法(3)の GaN の MEMS 加工法の研究を行った。Si 基板上の GaN 半導体薄膜の膜厚はそれぞれの材料の熱膨張係数の差等により発生する強い残留応力のため 1µm

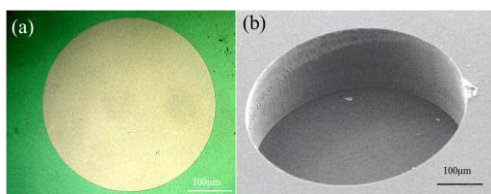


図6 GaN メンブレン LED 構造

レベルに制限される。このため、GaN の MEMS を実現するためには、薄い膜厚と強い残留応力に対する対策が必要である。まず MEMS の基本構造である自立 GaN 薄膜構造を製作した。シリコン基板をエッチングにより取り除くと、応力が解放され、強いたわみやクラックを生じる。圧縮応力が解放されて曲げが発生する問題を改善するため、HfO<sub>2</sub> 薄膜を堆積し、結晶化させて強い引っ張り応力により平坦な自立 GaN 膜を形成する方法を提案した。

図6に直径 400µm の自立 GaN 薄膜の写真を示す。圧縮応力の解放で曲がった薄膜が 20nm 以下の平坦な膜に修正できた。また量子井戸からの蛍光は基板の除去により増強した。

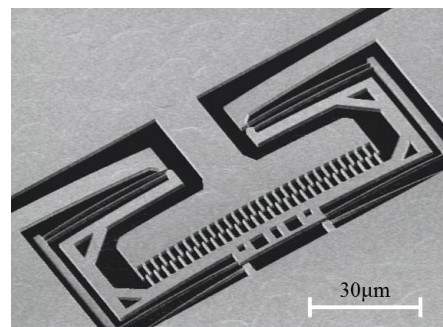


図7 GaN 櫛歯マイクロアクチュエータ

HfO<sub>2</sub> 膜による応力補償方法を利用して、GaN 薄膜の櫛型マイクロアクチュエータおよび周期可変回折格子を製作した。図7に櫛型アクチュエータの例を示す。幾分たわみが残っているが、提案した方法により残留応力を補償でき、よく動作できる GaN アクチュエータを実現できた。

さらに、提案した方法によりアクチュエータと回折格子を結合した周期可変の回折格

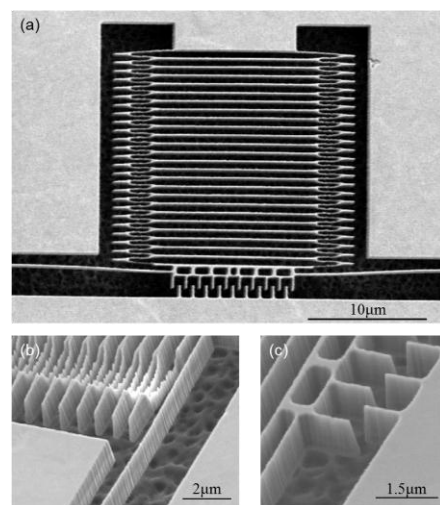


図8 GaN 周期可変格子

子を製作した。図 8 に製作結果を示す。GaN 材料で自立格子とアクチュエータを接続して製作できている。GaN 半導体のヤング率と破壊強度は Si より高いので、MEMS 構造の製作に適していると考えられた。しかし、残留応力による GaN 薄膜の変形はなお重要な問題である。また MEMS では堀エッチングが必要であるが、GaN が固く化学的に丈夫な材料であることより、エッチング速度およびマスク材料との選択性が低いことが GaN の MEMS を実現する上で問題となると考えられた。

研究方法(4)の具体的なデバイスの製作については、すでに述べたように、加工開発と同時にデバイスを試作して来た。他の例として、自立薄膜の GaN-LED とマイクロ流体デバイスを組み合わせたバイオ蛍光分析チップおよび水冷式 LED の基礎構造を試作した。図 9 にそれらの結果を示す。

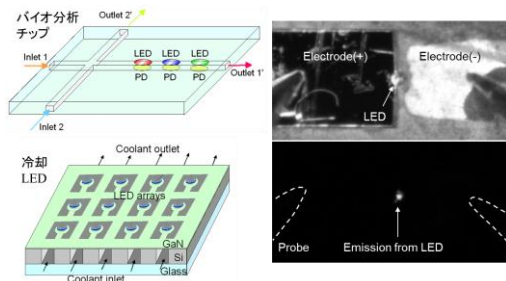


図 9 GaN 自立薄膜 LED の製作と応用

自立薄膜構造の GaN-LED を実現でき、薄膜の LED 発光を確認できた。しかし、MBE による自作 LED では発光効率は低く、実用レベルには至らなかった。

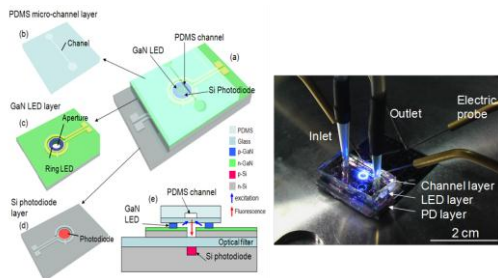


図 10 GaN-LED 蛍光分析チップ

実用レベルには Si 基板上の優れた結晶性の GaN-LED が必要であるが、一般に GaN-LED の製造に用いられている MOCVD による結晶成長が必要である。企業には優れた結晶成長技術があるが、企業に協力いただき、実用的な光源集積型デバイスを試作した。

試作したバイオ蛍光測定用集積型マイクロ分析システムを図 10 に示す。提案したマイクロ分析システムでは、GaN 光源をリング状に形成し、シリコン基板上に設けた貫通穴を

通して、蛍光を暗視野構造の検出系で測定する。蛍光検出は Si 基板上に形成したが、接合面の深い pn 接合光検出器を製作した。接合面を深く形成することで、GaN-LED の青色励起光に対する感度を減らし、蛍光の感度を保持する設計である。バイオ用の蛍光試薬 (FITC) を集積した PDMS 流路に流して測定した。最小検出感度として 470nM の濃度を検出できた。

同様に、効率の高い GaN-LED を用いて、楕型回転アクチュエータを用いた配光可変デバイスを試作し、Si-MEMS との組み合わせにより、高い機能の光応用 MEMS が実現できることを明らかにした。

そのほかに周期可変格子を用いた波長可変分布帰還型レーザの基本構造の研究およびシリコン導波路を用いた光インターコネクション等への応用研究を実施した。

今後のさらなる研究が必要であるが、本研究により、GaN 光源と Si-MEMS の融合は十分実用レベルで有効な技術となることが示されたと考えられる。Si 上の GaN-LED は結晶成長技術が最も重要である。また GaN の MEMS では Si に劣らず機械特性に優れており、エッチング技術の発展が望まれるが、将来性の高いデバイスであると考えられた。以上のように、本研究では目的の大部分を達成できた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- [雑誌論文] (計 56 件) すべて査読あり
- 1) T. Tanae, H. Sameshima, K. Hane, "Design and fabrication of GaN crystal ultra-small lateral comb-drive actuators," J. Vac. Sci. Technol. B30(1) 012001-1-7 (2012)
  - 2) Y. Wang, T. Wu, F. Hu, Y. Kanamori, H. Zhu, K. Hane, "III-nitride grating grown on freestanding HfO<sub>2</sub> gratings," Nano. Res. Lett. 6(1) 497(5pp) (2011)
  - 3) Y. Wang, F. Hu, K. Hane, "Lateral epitaxial overgrowth of GaN on a patterned GaN-on-silicon substrate by molecular beam epitaxy," Semicond. Sci. Technol. 26(4) 045015(6pp) (2011)
  - 4) Y. Wang, T. Wu, T. Tanae, H. Zhu, K. Hane, "The resonant III-nitride grating reflector," J. Micromech. Microeng. 21(10) 105025(6pp) (2011)
  - 5) Y. Wang, T. Sasaki, T. Wu, F. Hu, K. Hane, "Comb-drive GaN micro-mirror on a GaN-on-silicon platform," J. Micromech. Microeng 21(3) 035012(5pp) (2011)
  - 6) H. Sameshima, T. Tanae, K. Hane, "A GaN Electromechanical Tunable Grating on Si

- Substrate,” IEEE Photon. Technol. Lett. 23(5) 281-283(2011)
- 7) M. Wakui, H. Sameshima, F. Hu, K. Hane, “Fabrication of GaN light emitting diode membrane on Si substrate for MEMS applications,” *Microsys. Technol.* 17(1) 109-114 (2011)
  - 8) Y. Wang, F. Hu, K. Hane, “Patterned growth of InGaN/GaN quantum wells on freestanding GaN grating by molecular beam epitaxy,” *Nano. Res. Lett.* 6(1) 117(7pp) (2011)
  - 9) Y. Wang, T. Wu, F. Hu, Y. Kanamori, H. Zhu, K. Hane, “III-nitride grating grown on freestanding HfO<sub>2</sub> gratings,” *Nano. Res. Lett.* 6(1) 497(5pp) (2011)
  - 10) R. Ito, M. Wakui, H. Sameshima, F. Hu, K. Hane, “Monolithic-fabrication of Si micro-electro-mechanical structure with GaN light emitting diode,” *Microsystem Technologies* 16(6) 1015-1020 (2010)
  - 11) Y. Wang, F. Hu, Y. Kanamori, T. Wu, K. Hane, “Large area, freestanding GaN nanocolumn membrane with bottom subwavelength nanostructure,” *Optics Express* 18(6) 5504-5511 (2010)
  - 12) Y. Wang, F. Hu, Y. Kanamori, H. Sameshima, K. Hane, “Fabrication and characterization of subwavelength nanostructures on freestanding GaN slab,” *Optics Express* 18(3) 2940-2945 (2010)
  - 13) Y. Wang, F. Hu, K. Hane, “Freestanding GaN slab fabricated on patterned silicon on an insulator substrate,” *Journal of Micromechanics and Microengineering* 20(2) 027001(5pp) (2010)
  - 14) M. Wakui, F. Hu, H. Sameshima, K. Hane, “Growth of GaN LED Structure on Si Substrate by MBE and Monolithic Fabrication of GaN LED Cooling System,” *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 5(2) 171-174 (2010)
  - 15) Y. Wang, F. Hu, H. Sameshima, K. Hane, “Fabrication and characterization of freestanding circular GaN grating,” *Optics Express* 18(2) 773-779 (2010)
  - 16) Y. Wang, F. Hu, M. Wakui, K. Hane, “Freestanding GaN resonant gratings at telecommunication range,” *IEEE Photonics Technology Letters* 21(17) 1184-1186 (2009)
  - 17) M. Wakui, R. Ito, F. Hu, H. Sameshima, K. Hane, “MBE Fabrication of GaN-Based Light Emitting Diode on MOCVD Grown GaN-on-Si Template and Application for Optical MEMS,” *電気学会論文誌 E* 129(3) 77-80 (2009)
  - 18) F. Hu, H. Sameshima, M. Wakui, R. Ito, K. Hane, “GaN-based nitride semiconductor films deposited on nitrified HfO<sub>2</sub>/Si substrate by molecular beam epitaxy,” *Journal of Crystal Growth* 311 2996-2999 (2009)
  - 19) H. Sameshima, M. Wakui, F. Hu, K. Hane, “A Freestanding GaN/HfO<sub>2</sub> Membrane Grown by Molecular Beam Epitaxy for GaN-Si Hybrid MEMS,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 15(5) 1332-1337 (2009)
  - 20) F. Hu, R. Ito, Y. Zhao, K. Hane, “GaN-Si-MEMS structure fabricated from nano-column GaN quantum well crystal grown on Si substrate,” *physica status solidi (C)* 5(6) 1941-1943 (2008)
  - 21) F. Hu, Y. Kanamori, K. Ochi, Y. Zhao, M. Wakui, K. Hane, “A 100 nm thick InGaN/GaN multiple quantum-well column-crystallized thin film deposited on Si(111) substrate and its micromachining,” *Nanotechnology* 19(3) 035305(6pp) (2007)
  - 22) F. Hu, K. Ochi, Y. Zhao, K. Hane, “Nanocolumn InGaN/GaN quantum-well crystals on flat and pillared Si substrates with nitrified Ga as a buffer layer,” *Nanotechnology* 18(27) 275605(6pp) (2007)
  - 23) F. Hu, K. Ochi, Y. Zhao, K. Hane, “InGaN/GaN quantum-well nanocolumn crystals on pillared Si substrate with InN as interlayer,” *phys. stat. sol.* 4(7) 2338-2341 (2007)
- 他 33 件
- [学会発表] (計 52 件)
- 1) H. Nakazato, H. Kawaguchi, A. Iwabuchi, K. Hane, “Integrated Fluorescent Analysis System with Monolithic GaN Light Emitting Diode on Si Platform,” *IEEE MEMS 2012*, pp. 842-845, Paris, France (Jan. 30, 2012)
  - 2) K. Hane and Y. Kanamori, “Integration of MEMS actuators with nanophotonics: silicon submicron-wide waveguides for optical path changes,” *The 16th Opt-Electron. Communi. Conf. (OECC2911)* 7E1\_5, pp. 494-495, Kaohsiung, Taiwan (Jul. 7, 2011)
  - 3) K. Hane and Y. Kanamori, “Silicon submicron waveguide and MEMS tunable optical telecommunication devices,” *Int. Conf. Micro/Nano Opt. Eng. (ICOME2011)* pp.13-14 Changchun, China (Jun. 13, 2011)
  - 4) T. Tanae, H. Sameshima, K. Hane, “GaN comb-drive actuators on Si substrate,” *The 16th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, M3P.118*, pp. 486-489, Beijing, China (Jun. 3, 2011)
  - 5) Y. Wang, T. Sasaki, T. Wu, F. Hu, K. Hane, “Comb-drive III-nitride micro mirror fabricated by fast atom beam etching,” *The 16th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators*

and Microsystems, M3P.118, pp. 486-489, Beijing, China (Jun. 3, 2011)

- 6) H. Sameshima, T. Tanae, K. Hane, "GaN pitch-variable grating fabricated on Si substrate," Proc. Optical MEMS and Nanophotonics pp. 79-80, Sapporo, Japan, (Aug. 10, 2010)
- 7) Y. Wang, F. Hu, K. Hane, "Nanoscale epitaxial growth of GaN on freestanding circular GaN grating," Proc. Optical MEMS and Nanophotonics pp. 163-164, Sapporo, Japan, (Aug. 11, 2010)
- 8) F. Hu, M. Wakui, H. Sameshima, R. Ito, K. Hane, "Monolithically integration of GaN light-emitting diode and Si substrate with AlN/GaN superlattice and interlayer," 2009 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conf. Micromechatronics for Information and Precision Equipment, Tsukuba, Japan, HCH-05, pp. 347-348 (Jun. 20, 2009)
- 9) M. Wakui, R. Ito, H. Sameshima, F. Hu, K. Hane, "GaN-LED grown on Si substrate by MBE/MOCVD and monolithic fabrication of a light distribution variable device," The 15th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Denver, U.S.A. pp. 1349-1352 (Jun. 23, 2009)
- 10) M. Wakui, F. Hu, H. Sameshima, K. Hane, Monolithic fabrication of GaN LEDs on Si wafer and GaN membrane structure for cooling system, " Proc. Power MEMS 2008+microEMS2008, Sendai, Japan, pp. 217-220, (Nov. 10, 2008)

他 42 件

[図書] (計 7 件)

- 1) K. Hane, M. Sasaki, "Comprehensive Microsystems," Elsevier, "Micro-Mirrors", pp. 1-63 (2008)

他 6 件

[その他]

ホームページ等

<http://www.hane.mech.tohoku.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

羽根 一博 (HANE KAZUHIRO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50164893

### (2) 研究分担者

胡 芳仁 (HU FANGREN)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50396545

### (3) 連携研究者

金森 義明 (KANAMORI YOSHIAKI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10333858

佐々木 実 (SASAKI MINORU)

豊田工業大学・工学部・教授

研究者番号：70282100