

## 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25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340077

研究課題名（和文） チップ増強効果を用いた半導体量子ドット中の励起子分極のコヒーレント制御

研究課題名（英文） Exciton Polarization in Semiconductor Quantum Dots studied by Tip-Enhancement and Coherent Control Methods

研究代表者

南 不二雄（MINAMI FUJIO）

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：30200083

研究成果の概要（和文）：増強度が  $10^4$  に達するチップ増強観測装置を組み上げ、いろいろな半導体超構造の発光過程を調べた。また、Ge ナノワイヤーのチップ増強ラマン散乱測定を行い、単一 Ge ナノワイヤーにおけるフォノンの閉じ込め効果の空間分布、および、結晶化 Ge とアモルファス Ge の濃度比の空間分布などを決定した。

GaAs 量子ドットにおいてコヒーレント制御の実験を行った。励起子のパワーブロードニング過程がコヒーレント制御できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We studied the luminescence processes of various semiconductor super-structures by using tip-enhanced effects.

Tip-enhanced Raman scattering measurements were performed on a single Ge nano-wire. We observed the phonon confinement effect and estimated the Ge amorphous shell thickness.

We performed the coherent control experiments on GaAs quantum dots. It is shown that the power-broadening process of excitons is controlled by the delay time of phase-locked pulses.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	10,300,000	3,090,000	13,390,000
2011年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2012年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			0
年度			0
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：光物性

## 1. 研究開始当初の背景

単一量子ドット中の四光波混合信号は極端に弱く、ヘテロダイン検波法などの高感度検出法を用いても測定できていなかった。そこで、金属探針による電場増強効果を利用し

て、数 10nm の空間分解能を持ちながらラマン散乱光のような微弱な信号を観測できるチップ増強分光法に注目した。そのために、AFM 装置に顕微分光装置を組み合わせ、室温および液体ヘリウム温度で  $10^4$  以上のチ

ップ増強効果を持つ走査型探針装置を作製することにした。

この装置が完成すれば、既存のフェムト秒モード同期チタンサファイヤレーザーと組み合わせることで半導体量子ドットを舞台として非線形分光の独創的な研究ができると考え研究を開始した。

## 2. 研究の目的

光照射された金属探針先端に誘起される表面プラズモンが生成する局在増強場を利用することにより、探針直下のナノメートルサイズの空間領域の物質のみを強く光励起することができる新しいナノ分光法である探針増強ナノ光学分光法装置を開発し、探針直下の半導体量子ドット中の励起子をピコ秒あるいはフェムト秒レーザーパルス対でコヒーレントに制御し、この量子ドット中の励起子ダイナミクスおよびコヒーレント過渡現象の詳細を調べることを研究目的とした。

## 3. 研究の方法

AFM コントローラを用いた走査型金属探針とレーザー顕微鏡を組み合わせた走査型探針測定系を組み上げ、金属探針を試料の任意の位置に移動させることが可能で、かつ量子ドット上で  $10^4$  以上のチップ増強度を得られるような装置を組み上げて研究に用いた。

チタンサファイヤパルスレーザーシステム2台を同期させるシンクロロックシステムを購入して励起光源系を組み上げ、量子ドット中の励起子過渡現象の解明に用いた。

また、チタンサファイヤレーザー系が苦手な波長領域であるグリーン領域の励起を行うためにピコ秒半導体パルスレーザーを導入し、位相変調器を用いてコヒーレント制御の際の位相制御を行って、研究を遂行した。

## 4. 研究成果

Ge量子ドットにおいて探針の増強度が  $10^4$  程度になる装置を組み上げた。また、GaSe、ZnSe超薄膜およびCdSe量子ドットにおいても増強度が  $10^4$  に達するチップ増強効果を観測した。この超薄膜における増強効果を詳細に調べることにより、励起電場の増強効果に加え、金属探針が存在することによる輻射確率の増大効果の寄与も大きいことが判明した。

さらに、チップ増強ラマン散乱法を用いて  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  基板上的Geナノワイヤーの高空間分解ラマン散乱測定を行った。チップ増強法を用いることで空間分解能69 nmでGeナノワイヤーのラマン散乱測定を行うことができた。

ワイヤーの直径が10, 15, 20 nmにおける、チップ増強ラマン散乱スペクトルを図1に示す。ナノワイヤーの直径が小さくなるとフォノン

の閉じ込め効果により結晶化Geのピークは低

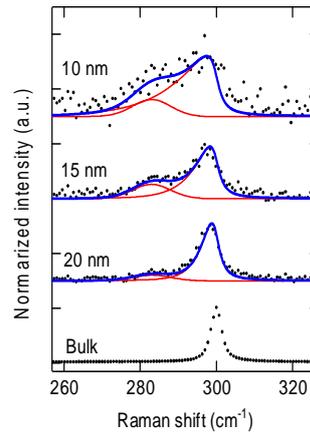


図1 GeナノワイヤーとバルクGeのチップ増強ラマン散乱スペクトル。(298  $\text{cm}^{-1}$ のピークは結晶Geナノワイヤーに由来し、283  $\text{cm}^{-1}$ のピークはアモルファスGeに由来する。)

エネルギー側にシフトし、非対称にピークが広がる。フォノンの閉じ込め効果を考慮することにより、ワイヤーの直径をパラメータとして図1実線のようにスペクトルを再現することができる。283  $\text{cm}^{-1}$ においてはアモルファスGeに由来するラマン信号も重畳する。このピークを図1のようにガウス関数でフィッティングすることで、アモルファスGeと結晶化Geの積分信号強度比を得、これらの体積比を見積ることが出来る。中心に結晶化Geがあり、その周りにアモルファスGeがある、コアシェル構造を仮定することで、アモルファスシェルの厚さは0.3-0.6 nm (2-6層)であることがわかった。

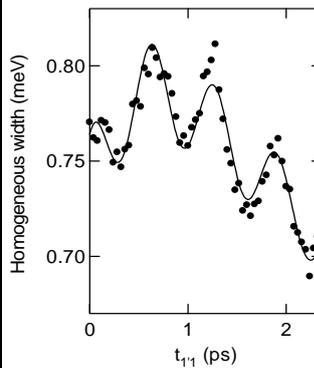


図2 GaAs量子ドットにおける励起子線の均一幅の  $t_{1,1}$  依存性 (実線は理論値)

GaAs量子ドットにおいてフェーズロックパルス対を用いたコヒーレント制御法を行うことにより、量子ドット中の励起子・励起子散乱過程を制御できることを明らかにした。

パワーブロードニングしている励起子線の均一幅のフェーズロックパルス対の時間間隔 ( $t_{1,1}$ ) に対する依存性を図2に示す。均一幅はパルス対の時間間隔により変化していることがわかる。0.66 psで振動する成分はヘビーホール・ライトホール (HH-LH) 散乱によるも

のであり、 $t_{1,1}$ の増加とともに減少する成分はヘビーホール・ヘビーホール (HH-HH) 散乱によるものである。また $t_{1,1}$ が小さい場合に均一幅が小さくなるのはHH-HH散乱の非マルコフ効果によるものである。Weakly interacting bosonモデルによる散乱の計算(実線)から、HH-HH散乱の相関(メモリー)時間は0.43 psであることがわかった。

#### 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 27 件)

- 1 Y. Ogawa, H. Tahara, F. Minami, "Non-Markovian nature of exciton-exciton scattering in a GaAs single quantum well observed by phase-locked laser pulses", Phys. Rev. B, 査読有, **87**, 165305 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevB.87.165305
- 2 H. Tahara, Y. Ogawa, F. Minami, K. Akahane, and M. Sasaki, "Anisotropic optical properties of excitons in strain-controlled InAs quantum dots", Phys.Rev.B, 査読有,**87**, 035304 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevB.87.035304
- 3 Y. Ogawa, S. Takahashi, D. Nakajima, and F. Minami, "Imaging of surface plasmon polariton propagation on a Au thin film by using tip-enhanced Rayleigh scattering", J. Lumin., 査読有, **133**, 145-148 (2013). doi:10.1016/j.jlumin.2011.12.035
- 4 H. Tahara, M. Bamba, Y. Ogawa, and F. Minami, "Observation of a dynamical mixing process of exciton-polaritons in a ZnSe epitaxial layer using four-wave mixing spectroscopy", Phys. Rev. B, 査読有, **86**, 235208 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevB.86.235208
- 5 Y. Arashida, Y. Ogawa, and F. Minami, "Polarization-correlated three-photon emission from charged triexcitons in a single quantum dot", Phys. Rev. B, 査読有, **85**, 235318 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevB.85.235318
- 6 A.A. Toropov, T. V. Shubina, K. G. Belyaev, S. V. Ivanov, and P. S. Kop'ev, Y.Ogawa, F.Minami, "Enhancement of excitonic emission in semiconductor heterostructures due to resonant coupling to multipole plasmon modes in a gold particle", Phys. Rev. B, 査読有, **84**, 085323 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevB.84.085323
- 7 Y. Ogawa, Y. Yuasa, F. Minami, and S. Oda, "Tip-enhanced Raman mapping of a single Ge nanowire", Appl. Phys. Lett., 査読有, **99**, 053112 (2011). doi:10.1063/1.3621856
- 8 Y. Arashida, Y. Ogawa, and F. Minami, "Four-photon cascade from quadexcitons in a single GaAs quantum dot", Phys. Rev. B, 査読有, **84**, 125309 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevB.84.125309
- 9 G. Kawata, Y. Ogawa, and F. Minami, "Density dependence of photoluminescence lifetime of CdSe/ZnS core-shell colloidal quantum dots", J. Appl. Phys., 査読有, **110**, 064323 (2011). doi:10.1063/1.3642074
- 10 H. Tahara, Y. Ogawa, and F. Minami, "Non-Markovian Dynamics of Spectral Narrowing for Excitons in the Layered Semiconductor GaSe Observed Using Optical Four-Wave Mixing Spectroscopy", Phys. Rev. Lett., 査読有, **107**, 037402 (2011). DOI:10.1103/PhysRevLett.107.037402
- 11 Y. Ogawa, T. Toizumi, F. Minami, and A. V. Baranov, "Nanometer-scale mapping of the strain and Ge content of Ge/Si quantum dots using enhanced Raman scattering by the tip of an atomic force microscope", Phys. Rev. B, 査読有, **83**, 081302(R) (2011). DOI: 10.1103/PhysRevB.83.081302
- 12 K. Katayama, Y. Ogawa, F. Minami, T. V. Shubina, and A. A. Toropov, "Tip-Enhancement Effect on the PL of Localized Excitons in an InGaN Thin Film", J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, **302**, 012033 (2011). doi:10.1088/1742-6596/302/1/012033
- 13 Y. Arashida, T. Hanazawa, Y. Ogawa, and F. Minami, "Sequential Photon Emissions from Quad-excitons in Single GaAs Quantum Dots", J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, **302**, 012035 (2011). doi:10.1088/1742-6596/302/1/012035
- 14 H. Tahara, Y. Ogawa, and F. Minami, "Spectral narrowing of four-wave mixing signals for excitons in the layered semiconductor GaSe", J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, **302**, 012036 (2011). doi:10.1088/1742-6596/302/1/012036
- 15 Y. Arashida, Y. Ogawa, and F. Minami, "Polarization-correlated photon pairs from charged biexciton in a single

- GaAs quantum dot", *Physica E*, 査読有, **43**, 804-807 (2011).  
doi:10.1016/j.physe.2010.07.056
- 16 K. Katayama, Y. Ogawa, and F. Minami, "Tip-enhanced photoluminescence mapping of InGaN thin film", *Physica E*, 査読有, **43**, 808-810 (2011).  
doi:10.1016/j.physe.2010.07.057
- 17 M. Tagaya, T. Ikoma, T. Yoshioka, S. Motozuka, Z. Xu, F. Minami, and J. Tanaka, "Synthesis and luminescence properties of Eu(III)-doped nanoporous silica spheres", *J. Colloid Interface Sci.*, 査読有, **363**, 456 (2011).  
DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2011.07.066
- 18 M. Tagaya, T. Ikoma, T. Yoshioka, S. Motozuka, F. Minami, and J. Tanaka, "Efficient synthesis of Eu(III)-containing nanoporous silicas", *Mater. Lett.*, 査読有, **65**, 2287 (2011).  
DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2011.04.011
- 19 Y. Ogawa, D. Nakajima, F. Minami, Y. Abate, and S. R. Leone, "Nanometer-scale Mapping of Dielectric Constant of Ge/Si Quantum Dots by Using Apertureless Near-field Scanning Optical Microscopy", *AIP Conf. Proc.*, 査読有, 1399, 557 (2011).  
doi: 10.1063/1.3666501
- 20 Y. Ogawa, K. Katayama, and F. Minami, "Tip-Enhanced Rayleigh Scattering and Photoluminescence from Semiconductor Nanoparticles", *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 査読有, **11**, 11055 (2011).  
DOI:http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2011.4080
- 21 T. Toizumi, Y. Yuasa, Y. Ogawa, K. Katayama, F. Minami, and A. V. Baranov, "Strain and Intermixing in Single Ge/Si Quantum Dots Observed by Tip-enhanced Raman Spectroscopy", *AIP Conf. Proc.*, 査読有, 1399, 553 (2011).  
doi: 10.1063/1.3666499
- 22 Y. Arashida, T. Hanazawa, Y. Ogawa, F. Minami, "Polarization-entangled Photon Pairs From A Single GaAs Quantum Dot", *AIP Conf. Proc.*, 査読有, 1399, 475 (2011).  
doi: 10.1063/1.3666460
- 23 H. Tahara, Y. Ogawa, and F. Minami, "The Excitonic Wave-packet Motion In GaSe Probed By Spectrally Resolved Four-wave Mixing Spectroscopy", *AIP Conf. Proc.*, 査読有, 1399, 39 (2011).  
doi: 10.1063/1.3666247
- 24 A. Sato, F. Minami, H. Hori, and K. Kobayashi, "Spin Information Achieved by Energy Transfer via Optical Near Fields Between Quantum Dots and Its Robustness", *J. Comput. Theor. Nanosci.*, 査読有, **7**, 1707 (2010).  
DOI:http://dx.doi.org/10.1166/jctn.2010.1534
- 25 Y. Arashida, Y. Ogawa, and F. Minami, "Correlated photons from multi-carrier complexes in GaAs quantum dots", *Superlattices and Microstructures*, 査読有, **47**, 93 (2010).  
doi:10.1016/j.spmi.2009.07.015
- 26 H. Tahara, Y. Ogawa, and F. Minami, "Damped oscillations of exciton wave packets in the layered semiconductor GaSe observed by four-wave mixing spectroscopy", *Phys. Rev. B*, 査読有, **82**, 113201 (2010).  
DOI: 10.1103/PhysRevB.82.113201
- 27 Y. Ogawa, F. Minami, Yohannes Abate, and S. R. Leone, "Nanometer-scale dielectric constant of Ge quantum dots using apertureless near-field scanning optical microscopy", *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, **96**, 063107 (2010).  
doi:10.1063/1.3309692
- [学会発表] (計 39 件)
- 1 反町直弘, 田原弘量, 小川佳宏, 南不二雄, 時間積分六光波混合による ZnSe の位相緩和過程の抑制, 日本物理学会 第 68 回年次大会 (広島大学 東広島キャンパス 2013 年 3 月 26 日~29 日)
- 2 野村春之, 小川佳宏, 南不二雄, 自己形成型 CdSe/ZnSe 量子ドットの発光およびラマン散乱におけるチップ増強効果, 日本物理学会 第 68 回年次大会 (広島大学 東広島キャンパス 2013 年 3 月 26 日~29 日)
- 3 城市知輝, 嵐田雄介, 小川佳宏, 南不二雄, 干渉法による単一 GaAs 量子ドットの励起子分極の緩和時間の測定, 日本物理学会 第 68 回年次大会 (広島大学 東広島キャンパス 2013 年 3 月 26 日~29 日)
- 4 嵐田雄介, 小川佳宏, 南不二雄, 単一 GaAs 量子ドットにおける多励起子状態の励起過程, 日本物理学会 第 68 回年次大会 (広島大学 東広島キャンパス 2013 年 3 月 26 日~29 日)

- 5 田原弘量, 小川佳宏, 南不二雄, 赤羽浩一, 佐々木雅英, 六光波混合法を用いた InAs 量子ドットの励起子分子ビートの制御, 日本物理学会 第 68 回年次大会 (広島大学 東広島キャンパス 2013 年 3 月 26 日~29 日)
- 6 Fujio Minami, “Semiconductor Nano-Structures probed by Tip-Enhanced Raman Scattering”, IUMRS-ICEM2012 (基調講演) (Yokohama, Japan Sept. 23-28, 2012)
- 7 田原弘量, 小川佳宏, 南不二雄, 赤羽浩一, 佐々木雅英, 多重積層 InAs 量子ドットにおける励起子状態の歪み依存性, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (横浜国立大学常盤台キャンパス, 2012 年 9 月 18 日~21 日)
- 8 小川佳宏, 田原弘量, 南不二雄, GaAs 量子井戸における励起子間散乱による位相緩和のコヒーレント制御, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (横浜国立大学常盤台キャンパス, 2012 年 9 月 18 日~21 日)
- 9 反町直弘, 田原弘量, 小川佳宏, 南不二雄, ZnSe/ZnMgSSe 超格子の周波数分解四光波混合, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (横浜国立大学常盤台キャンパス, 2012 年 9 月 18 日~21 日)
- 10 城市知輝, 嵐田雄介, 小川佳宏, 南不二雄, 自己形成型単一 CdSe/ZnSe 量子ドットの多励起子発光, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (横浜国立大学常盤台キャンパス, 2012 年 9 月 18 日~21 日)
- 11 嵐田雄介, 小川佳宏, 南不二雄, 単一 GaAs 量子ドットにおける第二レベル発光の偏光状態, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (横浜国立大学常盤台キャンパス, 2012 年 9 月 18 日~21 日)
- 12 H. Nomura, Y. Ogawa, and F. Minami, Tip-enhanced photoluminescence in GaSe (ICPS 2012 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, Zurich, Switzerland, July 29th to August 3rd, 2012)
- 13 Y. Arashida, Y. Ogawa, and F. Minami, Generation of Polarization-Correlated three Photons from a Single Semiconductor Quantum Dot (ICPS 2012 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, Zurich, Switzerland, July 29th to August 3rd, 2012)
- 14 H. Tahara, M. Bamba, Y. Ogawa, and F. Minami, Coherent Spectral Change of Four-wave Mixing Signals from Excitonpolaritons in ZnSe Epitaxial Layer (ICPS 2012 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, Zurich, Switzerland, July 29th to August 3rd, 2012)
- 15 Y. Ogawa and F. Minami, Control of the dephasing process due to many-body interactions among excitons by using non-Markovian effect in GaAs single quantum well (ICPS 2012 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, Zurich, Switzerland, July 29th to August 3rd, 2012)
- 16 嵐田雄介, 小川佳宏, 南不二雄, 単一量子ドット内の荷電三励起子分子による三光子偏光相関, 日本物理学会 第 67 回年次大会 (関西学院大学 2012 年 3 月 24 日~27 日)
- 17 小川佳宏, 南不二雄, GaAs 量子井戸における励起子間散乱のコヒーレント制御, 日本物理学会第 67 回年次大会 (関西学院大学 2012 年 3 月 24 日~27 日)
- 18 青柳翔, 小川佳宏, 南不二雄, 散乱型 ANSOM 法による金ナノ構造のヘテロダイーン測定, 日本物理学会 第 67 回年次大会 (関西学院大学 2012 年 3 月 24 日~27 日)
- 19 野村春之, 小川佳宏, 南不二雄, GaSe 薄膜におけるチップ増強発光の観測, 日本物理学会 第 67 回年次大会 (関西学院大学 2012 年 3 月 24 日~27 日)
- 20 K. Katayama, Y. Ogawa, F. Minami, T. V. Shubina, and A. A. Toropov, Tip-Enhancement Effect on the PL Dynamics of InGaN Thin Film (16th International Conference on Luminescence & Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL11), University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA June 27-July 1, 2011)
- 21 Y. Arashida, T. Hanazawa, Y. Ogawa, and F. Minami, Higher Multi-Excitonic Complexes in Single GaAs/AlGaAs Quantum Dots Studied by Photon Correlation Spectroscopy (16th International Conference on Luminescence & Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL11), University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA June 27-July 1, 2011)
- 22 H. Tahara, Y. Ogawa, and F. Minami, Non-Markovian Dephasing In The Layered Semiconductor GaSe (16th International Conference on Luminescence & Optical Spectroscopy of Condensed Matter

- (ICL11), University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA June 27-July 1, 2011)
- 23 Y. Ogawa, S. Takahashi, D. Nakajima, and F. Minami, Imaging of Surface Plasmon Polariton Propagation on a Gold Thin Film by Using Tip-enhanced Rayleigh Scattering (16th International Conference on Luminescence & Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL11), University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA June 27-July 1, 2011)
- 24 中島大樹、小川佳宏、南不二雄: 散乱型 ANSOM 法による金薄膜の近接場光の強度と位相の観測; 日本物理学会第 66 回年次大会 (新潟大学、2011 年 3 月 25-28 日)
- 25 田原弘量、小川佳宏、南不二雄: 四光波混合法による ZnSe 薄膜の励起子ラビ振動の観測; 日本物理学会第 66 回年次大会 (新潟大学、2011 年 3 月 25-28 日)
- 26 片山浩一、小川佳宏、南不二雄: InGaN 薄膜の発光ダイナミクスにおけるチップ増強効果 II; 日本物理学会第 66 回年次大会 (新潟大学、2011 年 3 月 25-28 日)
- 27 嵐田雄介、花澤孝宏、小川佳宏、南不二雄: 強度相関法による GaAs 量子ドット内の多励起子状態の微細構造; 日本物理学会第 66 回年次大会 (新潟大学、2011 年 3 月 25-28 日)
- 28 小川佳宏、高橋聡、中島大樹、南不二雄: 散乱型 ANSOM 法による金薄膜の表面プラズモンポラリトンの観測; 日本物理学会第 66 回年次大会 (新潟大学、2011 年 3 月 25-28 日)
- 29 Y. Ogawa and F. Minami: Tip-enhanced Rayleigh and Raman scatterings from Ge/Si quantum dots; The 6th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2011) (Kaohsiung, Taiwan, February 20-23, 2011)
- 30 Y. Arashida, T. Hanazawa, Y. Ogawa, and F. Minami: Sequential Photon Emissions from Quad-excitons in Single Semiconductor Quantum Dots; International Symposium "Nanoscience and Quantum Physics 2011" (nanoPHYS'11) (Tokyo, Japan, January 26-28, 2011).
- 31 K. Katayama, Y. Ogawa, F. Minami, T. V. Shubina, and A. A. Toropov: Tip-Enhancement Effect on the PL of Localized Excitons in an InGaN Thin Film; International Symposium "Nanoscience and Quantum Physics 2011" (nanoPHYS'11) (Tokyo, Japan, January 26-28, 2011).
- 32 H. Tahara, Y. Ogawa, and F. Minami: Spectral narrowing of four-wave mixing signals for excitons in the layered semiconductor GaSe; International Symposium "Nanoscience and Quantum Physics 2011" (nanoPHYS'11) (Tokyo, Japan, January 26-28, 2011).
- 33 湯浅譲、小川佳宏、南不二雄: チップ増強ラマン分光法を用いた半導体ナノ構造の観察; 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学 2010 年 9 月 23-26 日)
- 34 河田剛、小川佳宏、南不二雄: 顕微分光法による CdSe/ZnS Core-Shell 型半導体量子ドットのスペクトル拡散の測定; 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日)
- 35 花澤孝宏、嵐田雄介、小川佳宏、南不二雄: 単一 GaAs 量子ドットの多励起子準位構造の研究; 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日)
- 36 田原弘量、小川佳宏、南不二雄: 四光波混合法による ZnSe の時間分解スペクトルの測定; 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日)
- 37 片山浩一、小川佳宏、南不二雄: InGaN 薄膜の局在励起子発光におけるチップ増強効果; 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学 2010 年 9 月 23-26 日)
- 38 嵐田雄介、花澤孝宏、小川佳宏、南不二雄: 異方的量子ドット内の荷電励起子分子による量子もつれ光子対の観測; 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学、2010 年 9 月 23-26 日)
- 39 中島大樹、小川佳宏、南不二雄、山本直克、赤羽浩一: 散乱型 ANSOM 法による InAs 量子ドットからの誘電率分布の観測; 日本物理学会 2010 年秋季大会 (大阪府立大学、2010 年 9 月 23-25 日)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

南 不二雄 (MINAMI FUJIO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 30200083

### (2) 研究分担者

小川 佳宏 (OGAWA YOSHIHIRO)

東京工業大学・理工学研究科・助教  
研究者番号: 50372462

### (3) 連携研究者 なし