

平成 21 年 5 月 14 日現在

研究種目：基盤研究（S）
 研究期間：2004～2008
 課題番号：16106005
 研究課題名（和文） ピラミッド微小光共振器を用いた量子ドット励起子状態のコヒーレント制御に関する研究
 研究課題名（英文） Study on coherent control of exciton states in quantum dots embedded in pyramidal microcavities

研究代表者 末宗 幾夫 (SUJEMUNE IKUO)
 北海道大学・電子科学研究所・教授
 研究者番号：00112178

研究成果の概要：

微小光共振器中で量子ドットの励起子と光子の結合を強め、励起子状態をコヒーレントに制御することを目指して研究し、発光寿命より 10 倍長いスピンプリップ時間、磁場印可無しで光子円偏光—電子スピナー—光子円偏光へ効率 92% の高い量子状態変換、金属共振器の開発とこれによる量子ドット励起×光子取り出し効率の 40 倍改善などの成果を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004 年度	27,300,000	8,190,000	35,490,000
2005 年度	24,800,000	7,440,000	32,240,000
2006 年度	15,900,000	4,770,000	20,670,000
2007 年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2008 年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
総計	84,700,000	25,410,000	110,110,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子電気材料工学

キーワード：量子ドット、共振器、コヒーレンス、スピン反転、光子、円偏光

1. 研究開始当初の背景

電子系の波動関数をコヒーレントに制御することは、光子を用いた量子計算や量子暗号通信を進める重要な研究ステップであり、半導体量子ドットはその舞台となる。しかしフォノンなどによる緩和が激しい、また空間的な広がり数 nm の量子ドットと数 100nm の光子では空間的な重なり積分が小さく両者の結合が小さい課題がある。

2. 研究の目的

当該研究では、量子ドットと微小共振器の結合増強と、これを用いた光子と励起子スピン間の効率のよい量子状態変換と制御をコヒーレントに行うための基盤技術を開発する。

3. 研究の方法

量子ドット作製の最適化（そのための MBE 設備の購入）、量子ドットを内包した微小光共振器の開発（そのための蒸着源の購入）、量子ドットを円偏光励起してスピン保持時間を測定（そのための励起レーザ購入）、量子ドットから単一光子を発生していることの確認（そのための光子相関測定系の購入）、微小光共振器中に埋め込んだ半導体量子ドットの励起効率、発生した光子の外部取り出し効率の見積もり、光子円偏光から電子スピンへの変換効率の評価、発生した光子のコヒーレンス時間の測定とこれによる量子ドットと光子の相互作用におけるコヒーレンスの評価等の研究方法を用いた。

4. 研究成果

(1) 量子ドット埋め込み金属微小共振器の開発

研究開始当初、II-VI 族半導体 DBR 表面に選択成長したピラミッド微小共振器の作製を目指したが、GaAs 表面に比べると選択成長が困難であった。そこで、特に微小な半導体柱状構造(GaAs 系)を金属(Nb)中に埋め込んだ金属微小共振器の開発を進めた。金属による微小領域への光場の閉じ込めによる相互作用の増強と、共振器へ入出力する光子の結合効率の改善を検討し、実測において、入射光子が量子ドットを励起する効率と発生

した光子を取り出す総合効率で、従来に比べ 40 倍の大きな特性改善を実現した。

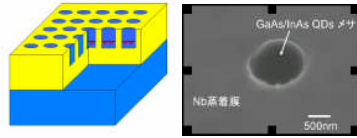


図 2 Nb へ埋め込んだ GaAs 柱状構造

(2) InAlAs 系単一量子ドットにおける単一光子の発生

コヒーレントに制御された単一光子列を発生するためには、まず単一量子ドットから単一光子の発生を確認する必要があった。そこで現在主に使われているシリコン単一光子検出器が高い量子効率を示す波長 700nm 帯で発光する InAlAs 自己形成量子ドットを用いた。光子相関測定によって 2 次光子相関関数 $g^{(2)}(0)$ の明瞭な低下を観測し、単一光子の発生を確認した。しかし量子ドットの光励起強度の増加によって $g^{(2)}(0)$ は明瞭な増大を示し on-demand 光子発生には大きな障害になると思われた。光子発生過程のレート方程式解析ならびに光子相関測定系の解像度等の詳細な検討により、こうした問題が測定系に依存する要素と、量子ドットから光子発生過程の本質的な問題に別れることが分かった。その結果、ある励起強度(励起子分布としては~33%)まではほぼ純粋な単一光子の発生が可能であることが分かった。InAlAs 系量子ドットにおいて励起子状態からの単一光子の発生、励起子分子・励起子の時系列発光による光子バンチング特性を確認したことは、InAlAs 系量子ドットでは世界初である。

(3) 光子円偏光-励起子電子スピン間の量子状態変換

量子ドットの光子によるコヒーレント制御は、光子 Qubit と電子スピン Qubit をつなぐ重要なステップである。そこでまず、光子円偏光と電子スピン間の量子状態変換を検討した。これに関連して、励起子分子-励起子時系列発光に関する偏光相関測定を行い、これから中性励起子ではスピン反転時間が

3.6ns と、発光寿命の 1ns より 3.6 倍長いことを確認した。さらに正の荷電励起子におけるスピン反転時間はさらに長く、発光寿命の 10 倍、10ns を超えることを確認した。また中性励起子、荷電励起子等、異なる励起子はそれぞれ準共鳴励起を行うことで、ほぼそれぞれの純粋な励起子を励起できることを確認した。この正の荷電励起子の 1LO フォノン上のエネルギーを準共鳴励起することで、円偏光→電子スピン→円偏光の総合変換効率 92% を達成した。これは磁場印可無しの状態での世界最高の変換効率である。

(4) 励起子コヒーレンス状態の検討

上記で電子スピン状態を維持する時間は 10ns と長いことが確認できたが、コヒーレント制御のためには、励起子がコヒーレンスを維持できるコヒーレンス時間(位相緩和時間)を測定する必要がある。そこで、干渉光学系を作製し、量子ドット励起子からの発光に関する 1 次の自己相関関数を測定することによって位相緩和時間の評価を進めた。その結果、光励起強度を上げると位相緩和時間が 20ps 以下と短くなり、急速にコヒーレンスを失うことが分かったが、200nW 以下の弱励起にすることで、励起子発光線のエネルギー広がり幅と位相緩和時間がフーリエ限界にある理想的な特性が得られた。

(5) 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

開発した金属微小光共振器は、本研究独自のユニークな共振器であり、40 倍の効率増大は特筆される効率改善である。光子と電子スピンの状態変換において、光子円偏光-量子ドット励起子スピン-光子円偏光と量子状態変換する効率を 92% まで高めた研究成果は、外部磁場無しで世界最高値というだけでなく、状態重ねあわせが本質的に重要な量子情報応用には、大きな波及効果をもたらさずである。

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 28 件) 全て査読有

① S. Adachi, H. Sasakura, N. Yatsu, R. Kaji, K. Yamada, S. Mito, H. Kumano, I. Suenne: “Fourier Spectroscopy of Decoherence of Exciton and Their Complexes in Single InAlAs QuantumDots” phys. stat. sol. (c), Vol. 5, Issue 1 (January 2008) pp. 351-355.

② H. Kobayashi, H. Kumano, M. Endo, M. Jo, I. Suenne, H. Sasakura, S. Adachi, and S. Mito: “Highly Circular-polarized Single Photon Generation from a Single Quantum Dot at Zero

Magnetic Field" *Microelectronics Journal*, Vol. **39** (2008) pp. 327-330.

③ H. Kumano, H. Kobayashi, Y. Hayashi, M. Jo, I. Suenune, H. Sasakura, S. Adachi, and S. Mito: "Single Photon Emission with High Degree of Circular Polarization from a Single Quantum Dot Under Zero Magnetic Field" *Physica E* Vol. **40** (2008) pp. 1824-1827.

④ J. Ibanez, R. Cusco, E. Alarcon-Llado, L. Artus, A. Patane, D. Fowler, L. Eaves, K. Uesugi, and I. Suenune: "Electron Effective Mass and Mobility in Heavily Doped n-Ga(As)N Probed by Raman Scattering" *Journal of Applied Physics*, Vol. **103** (2008) pp. 103528-1~5.

⑤ H. Kumano, H. Kobayashi, S. Ekuni, Y. Hayashi, M. Jo, H. Sasakura, S. Adachi, S. Mito, and I. Suenune: "Optical-phonon Mediated Exciton Energy Relaxation with Highly Preserved Spin States in a Single Quantum Dot" *Phys. Rev. B* **78**, 081306-1-4 (R) (2008).9)

⑥ M. Jo, Y. Hayashi, H. Kumano, and I. Suenune: "Exciton-phonon Interactions Observed in Blue Emission Band in Te-delta-doped ZnSe" *J. Appl. Phys.* Vol. **104** (2008) 033531-1~4.

⑦ P. Thilakan, G. Sasikala, and I. Suenune: "Fabrication and Characterization of a High Q Microdisc Laser Using InAs Quantum Dot Active Regions" *Nanotechnology* Vol. **18** (2007) 055401-1~4.

⑧ M. Jo, M. Endo, H. Kumano, and I. Suenune: "Luminescence Study on Evolution from Te Isoelectronic Centers to Type-II ZnTe Quantum Dots Grown by Metalorganic Molecular-beam Epitaxy" *J. Cryst. Growth* Vol. **301-302** (2007) pp. 277-280.

⑨ M. Ebihara, S. Tanaka, and I. Suenune: "Nucleation and Growth Mode of GaN on Vicinal SiC Surfaces" *Japanese J. Applied Physics*, Vol. **46**, No. 15 (2007) pp. L348-L351.

⑩ R. Kaji, S. Adachi, H. Sasakura, S. Mito, H. Kumano, and I. Suenune: "Detailed Measurements of Nuclear Spin Polarizations in a Single InAlAs Quantum Dot Through Overhauser Shift of Photoluminescence" *J. Supercond. Nov. Magn.* Vol. **20** (2007) pp. 447-451.

⑪ Z. G. Yao, X. Q. Zhang, I. Suenune, S. H. Huang: "Room-temperature Stimulated Emission from ZnO Thin Films Grown by Radio-frequency Magnetron Sputtering" *J. Luminescence* Vol. **122-123** (2007) 825-827.

⑫ X. Q. Zhang, I. Suenune, H. Kumano, Z. G. Yao, S. H. Huang: "Room Temperature Ultraviolet Lasing Action in High-Quality ZnO Thin Films" *J. Luminescence* Vol. **122-123** (2007) 828-830.

⑬ I. Suenune, G. Sasikala, H. Kumano, K. Uesugi, Y. Nabetani, T. Matsumoto, J.-T. Maeng, and T.-Y. Seong: "Role of a Nitrogen Precursor Supplied on InAs Quantum Dots Surfaces in Their Emission Wavelengths" *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. **45**, No. 21 (2006) pp. L529-L532.

⑭ W. Zhang, K. Uesugi, and I. Suenune: "Application of InGaAs/GaAsN Strain-compensated Superlattice to InAs Quantum Dots" *J. Appl. Phys.* Vol. **99**, No. 10 (2006) pp. 103103 1-7.

⑮ H. Kumano, S. Kimura, M. Endo, I. Suenune, H. Sasakura, S. Adachi, S. Mito, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usuki: "Triggered Single Photon Emission and Cross-correlation Properties in InAlAs Quantum Dot" *Physica E: Low-Dimensional Systems & Nano-Structures* Vol. **32** (2006) pp. 144-147.

⑯ H. Kumano, S. Kimura, M. Endo, H. Sasakura, S. Adachi, S. Mito, and I. Suenune: "Deterministic Single-photon and Polarization-correlated Photon-pair Generations from a Single InAlAs Quantum Dot" *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics* Vol. **1** (2006) pp. 39-51. (*Invited Review Paper*)

⑰ X. Q. Zhang, Z. G. Yao, S. H. Huang, I. Suenune, and H. Kumano: "Intrinsic Exciton Transitions in High-Quality ZnO Thin Films Grown by Plasma-enhanced Molecular-beam Epitaxy on Sapphire Substrates" *J. Appl. Phys.* Vol. **99** (2006) 063709-1~4.

⑱ I. Suenune, H. Kumano, S. Kimura, H. Sasakura, S. Adachi, S. Mito, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usui: "Origin of Asymmetric Splitting of a Neutral Exciton in a Single Semiconductor Quantum Dot" *phys. stat. sol. (c)* Vol. **3**, No. **11** (2006) pp. 3908-3911.

⑲ S. Kimura, H. Kumano, M. Endo, I. Suenune, T. Yokoi, H. Sasakura, S. Adachi, S. Mito, H. Z. Song, S. Hirose,

and T. Usuki: "Photon Antibunching Observed from an InAlAs Single Quantum Dot" Jpn. J. Appl. Phys. Express Lett. Vol. 44, No. 25 (2005) pp. L793-L796.

⑳ K. Hayashi, S. Mizuno, S. Tanaka, H. Toyoda, H. Tochiyama, and I. Suemune: "Nucleation Stages of Carbon Nanotubes on SiC (0001) by Surface Decomposition" Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 44, No. 25 (2005) pp. L803-L805.

21) Y. Nabetani, T. Matsumoto, G. Sasikala, X. Q. Zhang, and I. Suemune: "Theoretical Studies of Strain States in InAs Quantum Dots and Dependence on Their Capping Layers" J. Appl. Phys. Vol. 98, No. 6, 063502-1~7

22) S. Kimura, H. Kumano, M. Endo, I. Suemune, T. Yokoi, H. Sasakura, S. Adachi, S. Mito, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usuki: "Single-Photon Generation from InAlAs Single Quantum Dot" phys. stat. sol. (c) No. 11 (2005) pp. 3833-3837.

23) S. Mito, S. Adachi, T. Yokoi, S. Kayamori, H. Sasakura, and I. Suemune: "Photon-spin Qubit-conversion Based on Overhauser Shift of Zeeman Energies in Quantum Dots" Appl. Phys. Lett. Vol. 87, No. 11 (2005) 112506.

24) H. Kumano, Y. Hitaka, and I. Suemune: "Dynamical properties of atom-like emissions from single localized states in ZnCdS ternary mesa-shaped structures" phys. stat. sol. (b) Vol. 241, No. 3 (2004) pp. 503-506.

25) D. Nakaya, Y. Hitaka, S. Kimura, H. Kumano, and I. Suemune: "Study of Optimal Coupling of ZnS Pyramidal Microcavities with Distributed Bragg Reflectors" phys. stat. sol. (c) Vol. 1, No. 4 (2004) pp. 1034-1037.

26) Makoto Kurimoto, A. B. M. Almanun Ashrafi, Masato Ebihara, Katsuhiko Uesugi, Hidekazu Kumano, and Ikuo Suemune: "Formation of ohmic contacts to p-type ZnO" phys. stat. sol. (b) Vol. 241, No. 3 (2004) pp. 635-639.

27) I. Suemune, A. B. M. Almanun Ashrafi, M. Ebihara, M. Kurimoto, H. Kumano, T.-Y. Seong, B.-J. Kim, and Y.-W. Ok: "Epitaxial ZnO Growth and p-Type Doping with MOMB" phys. stat. sol. (b) Vol. 241, No. 3 (2004) pp. 640-647. (Invited Paper)

28) X. Q. Zhang, I. Suemune, H. Kumano, J. Wang, and S. H. Huang: "Surface-emitting Stimulated Emission in High-quality ZnO Thin Films" J. Appl. Phys. Vol. 96, No. 7 (2004) pp. 3733-3736.

[学会発表] (計 27 件)

① I. Suemune, H. Kumano, Y. Hayashi, M. Jo, and Y. Idutsu: "Photon Generations from Semiconductor Quantum Dots and Their Applications to Next-Generation Information Technology" 2008 International Symposium on Global COE Program of Center for Next-Generation Information Technology based on Knowledge Discovery and

Knowledge Federation (COE-NGIT 2008, Hokkaido University) January 22-23, 2008, Sapporo, Japan.

② Y. Idutsu, H. Sato, S. Ito, and I. Suemune: "Development of Nanofabrication Techniques for Nanophotonic Structures and Devices" 2008 RIES-Symposium, January 28-29, Sapporo, Japan, P41.

③ M. Sato, M. Takada, Y. Idutsu, H. Kumano, and I. Suemune: "Growth and Characterization of Semiconductor Nanostructures with Type-I and Type II Heterojunctions" 2008 RIES-Symposium, January 28-29, Sapporo, Japan, P24.

④ H. Kumano, S. Ekuni, H. Kobayashi, H. Sasakura, I. Suemune, S. Adachi, and S. Mito: "Optical-phonon Mediated Efficient Spin-state Transfer Between Electron Spin and Photon Polarization with a Single Quantum Dot without External Field" International conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCNS), April 7 - 11, 2008, Tokyo, Japan, WeP-9, p. 64.

⑤ S. Adachi, R. Kaji, K. Yamada, S. Mito, H. Sasakura, H. Kumano, I. Suemune: "Nuclear Field-mediated Measurement of Effective g factors of Quantum Dots" International conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCNS), April 7 - 11, 2008, Tokyo, Japan, TuB-3, p. 28.

⑥ H. Kumano, H. Kobayashi, S. Ekuni, H. Sasakura, I. Suemune, S. Adachi, and S. Mito: "Spin-flip Quenching during Energy Relaxation Processes Mediated by Optical-phonons in a Single Quantum Dot" 5th International Conf. on Semiconductor Quantum Dots, May 11-16, 2008, Gyeongju, Korea, TH-P-030.

⑦ H. Kobayashi, H. Kumano, M. Endo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, and S. Mito: "Highly Circular-polarized Photon Generation from a Single Quantum Dot at Zero Magnetic Field" Sixth International Conference on Low Dimensional Structures and Devices (LDS2007), April 15 -20, 2007, San Andres, Mexico.

⑧ Y. Idutsu, M. Endo, K. Uesugi, and I. Suemune:

“Surface Passivation Effect of Electron-beam Resist on InAs Quantum Dots and Their Improved Luminescence Efficiency” 19th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM’ 07), May 14-18, 2007, Matsue, Japan, PB21, Conference Proceedings, pp. 285-288.

⑨ K. Uesugi, M. Sato, Y. Idutsu, and I. Suemune: “Growth Process of GaAs Cap Layers on GaSb/GaAs Quantum Dot Surfaces” 19th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM’ 07), May 14-18, 2007, Matsue, Japan, ThA1-4, pp. 462-465.

⑩ Ikuo Suemune: “Photon Generation Processes from Single Quantum Dots” International Symposium for the Promotion of Academic Exchange, Sapporo, March 22 (2007).

⑪ H. Kumano, H. Kobayashi, Y. Hayashi, M. Endo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, and S. Muto: “High Degree of Circular Polarization Single Photon Emission from a Single Quantum Dot Under Non-Resonant Excitation and Zero Magnetic Field” International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems and Modulated Semiconductor Structures, Genova, Italy, July 15-20 (2007), S. M2, pp. 18-20.

⑫ N. Yatsu, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, H. Kumano, and I. Suemune: “Fourier Spectroscopy of Decoherence of Exciton and Exciton Complexes in Single InAlAs Quantum Dots” 15th International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors (HCIS-15) Tokyo, July 23-27 (2007).

⑬ H. Kumano, S. Kimura, M. Endo, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, and I. Suemune: “Polarization Preservation between Photon Pairs from a Biexciton-Exciton Cascaded Decay Process in a Single InAlAs Quantum Dots” 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, Vienna, Austria, July 24-28, 2006.

⑭ T. Mukumoto, T. Yokoi, S. Adachi, H. Sasakura, H. Kumano, S. Muto and I. Suemune: “Optically Pumped Nuclear Spin Polarization in a Self-assembled Quantum

Dot” 4th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-IV), August 15-18, 2006, Sendai.

⑮ H. Nishida, S. Kayamori, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, and I. Suemune: “Time-resolved Photoluminescence in Annealed Self-assembled InAs Quantum Dots” 4th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-IV), August 15-18, 2006, Sendai.

⑯ M. Jo, M. Endo, H. Kumano, and I. Suemune: “Luminescence Study on Evolution from Te Isoelectronic Centers to Type-II ZnTe Quantum Dots Grown by Metalorganic Molecular-beam Epitaxy” 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Waseda University, Tokyo, Japan, 3-8 September, 2006.

⑰ M. Fujii, S. Tanaka, and I. Suemune: “Self-organized Nanofacets on Vicinal 4H-SiC (0001) Surfaces” The 8th RIES-Hokudai International Symposium, December 11-12, 2006, Sapporo

⑱ H. Kobayashi, H. Kumano, M. Endo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, and S. Muto: “Spin Splitting of Neutral Exciton Emission from a Single Quantum Dot” The 8th RIES-Hokudai International Symposium, December 11-12, 2006, Sapporo.

⑲ H. Kumano, S. Kimura, M. Endo, I. Suemune, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, T. Usuki: “Single Photon Emission from a Single InAlAs Quantum Dot” International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (NNIC2005) Jan. 30-Feb. 2, 2005, Atsugi.

⑳ I. Suemune, G. Sasikala, K. Uesugi, N. Matsumura, Y. Nabetani, and T. Matsumoto: “Role of Nitrogen on Emission Wavelength of InAs Quantum Dots: InAs/GaAs Interfaces and Strain-compensating GaAsN Burying Layers” APS March Meeting, 21-25 March, LA, 2005, Symposium on Dilute Nitride Semiconductors: from Atoms to Devices.

21) N. Matsumura, S. Muto, S. Ganapathy, I. Suemune, K. Numata, and K. Yabuta: “Anisotropic Lattice Deformation of InAs Self-assembled Quantum Dots Strain Compensated with GaAsN Burying Layers” 47th TMS 2005 Electronic Materials Conference, June 22-24, 2005, University of California Santa Barbara, MB.

22) T. Yokoi, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, H. Kumano, and I. Suemune: “Overhauser Shift in a Self-assembled

Quantum Dot” Spintech III, Awaji Island, August 1-5, 2005.

23) S. Kimura, H. Kumano, M. Endo, I. Suemune, T. Yokoi, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, H. Z. Song, S. Hirose, and T. Usuki: “Highly Pure Single Photon Generation from Single Quantum Dot” 5th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, June 8-11 (2005) Glasgow, Scotland, S11-2.

24) K. Uesugi, W. Zhang, and I. Suemune: “Bright Luminescence from InAs/GaAs Open Quantum Dots at Room Temperature: Dependence on GaAs Surface Reconstructions” The 23rd International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS-23) July 24 - July 29, 2005, Awaji Island, Hyogo, Japan, ThP-81.

25) P. Thilakan, G. Sasikala, H. Kumano and I. Suemune: “Improved Optical Quality in GaAsN-strain-compensated InAs Quantum Dots and Room Temperature Stimulated Emission from InAs QDs Embedded in a GaAs Microdisk Cavity” the 5th International Conference in Low Dimensional Structures and Devices (LDS2004), December 12-17, 2004, Cancun - Mayan Riviera, Mexico, We-04, p. 35.

26) G. Sasikala, I. Suemune, H. Kumano, and K. Uesugi, Y. Nabetani, and T. Matsumoto: “Improved Structural Homogeneities and Luminescence Efficiencies of InAs Quantum Dots with Nitridation on Dots Surfaces” 8th International Symposium on Contemporary Photonics Technology, January 12-14, 2005, Tokyo, Japan.

27) H. Kumano and I. Suemune: “Formation of Single Localized States in ZnCdS Alloys Semiconductor and Their Time-resolved Properties” First International Symposium on Nanometer-scale Quantum Physics, January 26-28, 2005, Ookayama.

〔図書〕(計 5 件)

① 末宗幾夫: 「発光・受光の物理と応用」培風館 小林洋志監修、2008年3月25日(分担執筆)423ページ。第6章 半導体発光デバイス 6.6 量子ドット光デバイス, 微小共振器光デバイス pp. 246-256.

② I. Suemune: “Modern Wide Bandgap Semiconductors and Related Optoelectronic Devices” Edited by K. Takahashi et al, 2007 Springer-Verlag 500page, 2.2.2, pp. 63-67.

③ H. Kumano and I. Suemune: “Modern Wide Bandgap Semiconductors and Related Optoelectronic Devices” Edited by K. Takahashi et al, 2007 Springer-Verlag, 5.1.1 pp. 281-287.

④ 末宗幾夫: 「ワイドギャップ半導体 光・電子デバイス」森北出版 高橋青監修、2006年3月(分担執筆)421ページ, 2.2.4 ワイドギャップ半導体の量子構造 pp. 79-84.

⑤ Ikuo Suemune, Katsuhiko Uesugi, and Sasikala Ganapathy: “Dilute Nitride Semiconductors” Edited by M. Henini, 2005 Elsevier Ltd. Chapter 4, pp. 137-156. (総ページ数: 630)

〔産業財産権〕

○ 出願状況 (計 3 件)

・ 3 件とも国内特許

①平成21年(2009) 1月28日提出

特願2009-016212 半導体発光素子

末宗 幾夫 田中 和典 井筒 康洋

超伝導電極からクーパー対を注入し、量子もつれ合い光子対を生成する超伝導発光素子

②平成19年(2007) 7月17日提出

特願2007-185948

半導体発光素子 末宗 幾夫 田中 和典

量子ドットを含んだJFET構造超伝導発光素子

③平成18年(2006) 6月21日提出

特願2006-171184

半導体発光素子 末宗 幾夫 赤崎 達志 田中 和典

半導体量子ドット領域を含んだ半導体層に超伝導電極を形成したことを特徴とする半導体発光素子。

【公開番号】特開2008-4672

【公開日】平成20年1月10日

〔その他〕

ホームページ

<http://opmac06.es.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末宗 幾夫 (SUEMUNE IKUO)

北海道大学・電子科学研究所・教授

研究者番号: 00112178

(2) 研究分担者

熊野 英和 (KUMANO HIDEKAZU)

北海道大学・電子科学研究所・准教授

研究者番号: 70292042

(3) 連携研究者

植杉 克弘 (UESUGI KATSUHIRO)

室蘭工業大学・工学部・准教授

研究者番号: 70261352

※平成20年, 分担研究者から連携研究者へ変更