

科学研究費補助金研究成果報告書

平成24年 5月16日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21340112

研究課題名(和文)

ナノ光ファイバー上の原子と量子ドットによる量子非線形光学の開拓

研究課題名(英文)

Development of Quantum Nonlinear Optics Using Atoms and Quantum Dots on Optical Nanofibers

研究代表者

白田 耕蔵 (HAKUTA KOHZO)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：80164771

研究成果の概要(和文)：ナノ光ファイバー(サブミクロン直径の極細光ファイバー)の近傍では電磁場のモードはファイバー導波モードへ強く閉込められる。この効果を用いればナノファイバー上の原子の蛍光の20%以上をファイバー伝播モードに放出できることを実験的に示した。更に、ナノファイバーに共振器を組み込めばその効果は90%以上まで増強できることを理論的に示し、共振器組み込み法を開発した。これらの結果は量子光学、更に量子情報技術に新しい方向性を与えるものである。

研究成果の概要(英文)：Around an optical nanofiber (ultra-thin optical fiber with sub-micron diameter), mode density of electromagnetic fields is strongly confined to the guided modes of nanofiber. We have experimentally demonstrated that, due to the strong confinement, fluorescence photons from atoms on nanofiber are efficiently channeled into the guided modes with an efficiency higher than 20%. Moreover, we have shown theoretically that this efficiency can be enhanced to 90% or higher by incorporating a cavity structure on nanofiber. Method to fabricate nanofiber cavity has also been developed. The results may open a new route for quantum optics and quantum information technologies.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2010年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2011年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：ナノ光ファイバー、量子光学、自然放出制御、冷却原子、量子ドット

1. 研究開始当初の背景

レーザー冷却や共振器量子電磁力学(CQED)に代表される原子と光のコヒーレント相互作用の研究は、この20年間に大きな発展を遂げてきた。最近ではこれらの

手法は量子情報科学・技術の流れの中で更に新しい展開を見せつつある。一方、近年の大きな流れの一つはナノ技術の革新的な進歩である。人工原子としての量子ドット

の特性は著しく改善され、量子ドットやCQEDの手法を用いる新しい量子光学分野が急速に立ち上がっている。現在では、原子による量子光学と量子ドットによる量子光学は、互いに相補的に発展を遂げつつある。

2. 研究の目的

ナノ光ファイバーの近傍では電磁場のモードはファイバー導波モードへ強く閉込められる。このナノ光ファイバーによるモード閉込め効果を用いて、原子系と量子ドット系の量子光学／量子非線形光学を開拓する。ナノ光ファイバー上の原子と量子ドットについて、それぞれの特長を生かした光学過程を設定し、量子情報分野への応用も視野に入れて研究を行う。なかでも、単一光子発生を原子系と量子ドット系に共通の目標として、両者について相互評価を行う。

3. 研究の方法

研究方法は、対象とする物質系である冷却原子と量子ドットの特長を生かしたアプローチとナノ光ファイバーの境界条件を制御するアプローチからなる。全てのアプローチについて、定量的な理論予測のもとに研究を実施した。実験面での要点は、理論モデルを実現し得る実験状況を確立することである。

4. 研究成果

以下に成果の代表例を示す。

(1) 冷却原子系：光子相関計測

レーザー冷却セシウム原子雲をナノ光ファイバーに重ね、ナノ光ファイバー伝播モードに放出されたレーザー誘起蛍光をについて光子相関を定量的に観測した。ナノ光ファイバー近傍の原子数を変化させ、光ファイバー出力光子相関 vs 遅延時間パターンの変化を観測し解析した。図1はファイバー片端の出力光をミームスプリッターで分けて計測した結果(a)とファイバーの両端の出力光について計測した結果である。片端計測(a)野場合は光子相関がアンチバンチングからバンチングに転化する様子が明瞭に見てとれる。一方、両端計測(b)の場合は一貫してアンチバンチングである。(a)の結果は原子数の増加に伴い、発生する光子が非古典的(量子的)な光から古典的なインコヒーレント光に変化する様子を示すものである。一方、両端計測ではそのような状況は現れない。理論結果は破線であり実験結果を極めて良く再現している。通常的自由空間計測では、多モードの干渉によりこのような結果は得られない。図1の結果は、ナノ光ファイバー計測が完全な空間単一モード計測であることが本質的であり、理想的な2準位系と見なし得

る原子系との組み合わせにより実現できた。

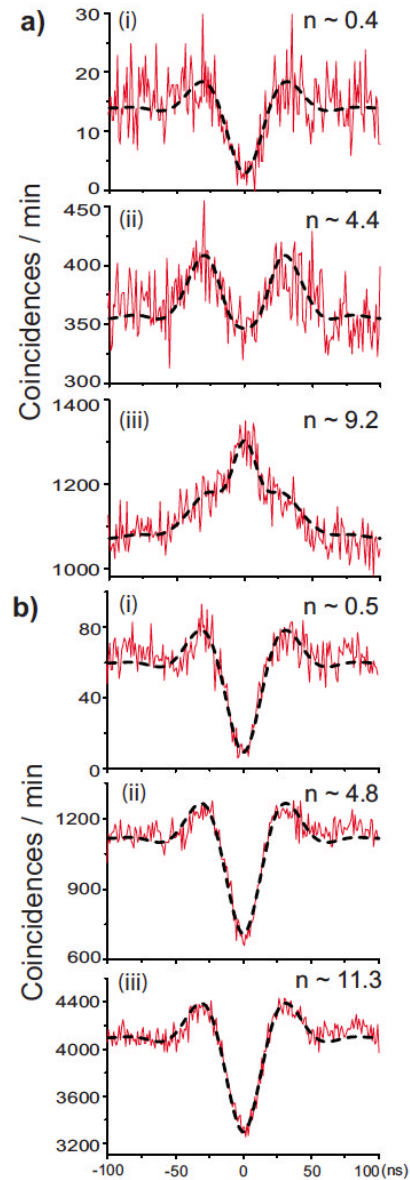


図1 ナノ光ファイバー光子相関計測

(2) 冷却原子系：ナノファイバー表面原子

ナノ光ファイバー／原子系は理論との対応、発生する光子の同一性など量子情報応用には本質的に優れている特性を有している。しかしながら、原子はナノファイバー近傍にランダムに分布しておりナノファイバー表面からの距離や原子位置を特定できない。このため、蛍光のファイバーモードへのチャンネルリング効率等を最適化することが難しい。我々が理論的に予測したようにナノ光ファイバー周囲に原子をレーザー双極子とラップすることは可能であるが、工学応用を考えれば必ずしも有効な方法とは言えない。

ナノファイバー表面をナノ加工し表面のvdWポテンシャルに極めて浅い局所ミニマムが生成できればそこに原子を捕捉すること

も可能となる。このような原子トラップが実現すれば基礎的な重要性ももちろんだが、更に工学的にも原子を利用する新しい方向性を示し得る。

我々は、ナノ光ファイバーに重ねた冷却原子雲の条件を変化させることにより、原子のレーザー誘起蛍光スペクトルが変化することを見いだした。図2はその様子を示したものである。a から d まで原子的な鋭いスペクトルが分子的なバンドスペクトルに変化して行く様子が見て取れる。d の条件で近紫外光を照射すれば a の状態に復することができる。この観測事実は極めて明瞭であるが物理的起因は完全には突き止められてはいない。しかし、ナノファイバーの表面変化により局所ミニマムを持つポテンシャルがナノファイバー表面上に生成できる多可能性はある。今後の詳細な研究が必要である。

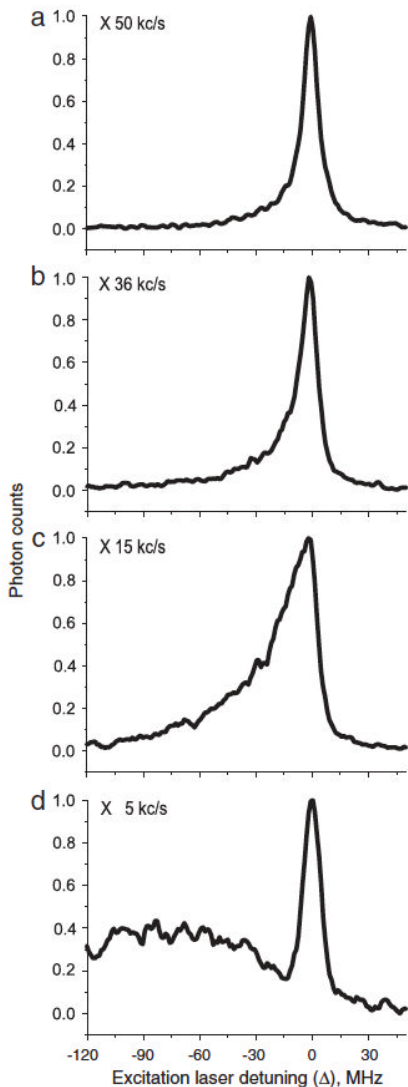


図2 ナノファイバー表面変化によるレーザー誘起スペクトルの変化

(3) 量子ドット：単一ドット配置方法

量子ドットは原子に比べればその量子性は低い、ナノファイバー上に単一ドットを担持出来ればナノ光ファイバー伝播モードへのチャンネルング効率を実験的に評価でき、また単一光子発生への工学応用面でも需要である。

我々は、倒立顕微鏡上にサブピコリットルディスペンサーを配置し、ミクロンサイズのニードル先に付着させた量子ドット溶液の微小液滴をナノ光ファイバーに接触させる方法を開発した。この方法により、ナノ光ファイバー上に単一の量子ドットを5ミクロン以内の空間精度で配置できる。図3はナノファイバー上に配置した量子ドットの蛍光信号である。ナノファイバー上に規則的に精度良く配置されているのが分かる。光子計数測定に現れるブリンキングの振る舞いと光子相関計測によるアンチバンチングディップの深さ計測の結果によれば、④と⑥の位置は2個の量子ドットであるがその他の6点は単一の量子ドットである。

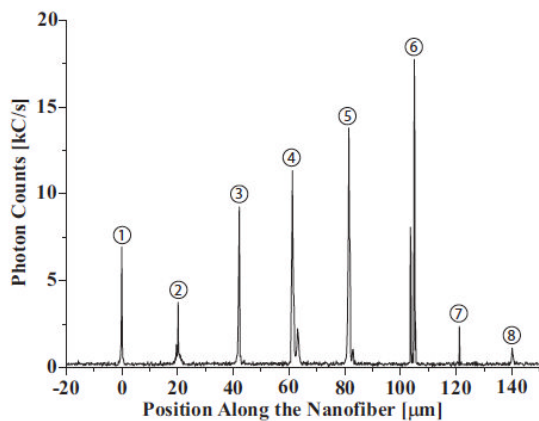


図3 ナノファイバーへの量子ドット担持

更に各担持点の量子ドットからのレーザー誘起蛍光についてファイバー端において、光子相関パターンと光子計数レートの励起レーザー強度依存性を測定すれば、ファイバーモードへのチャンネルング効率と量子ドットの発光の量子効率の積が求められることを示した。

(4) 量子ドット：伝播モードへのチャンネルング効率

ナノ光ファイバー上に担持した単一量子ドットの蛍光をファイバー伝播モードと放射モードの特定の立体角成分の双方について同時測定することにより、ファイバー伝播モードへのチャンネルング効率を測定した。更に、様々な直径のナノファイバーについて同様の測定を行いチャンネルング効率の直径依存性を実験的に求めた。図4にその結果

を示す。

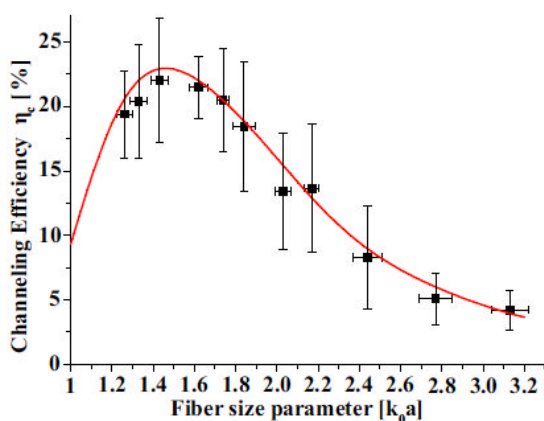


図4 ナノファイバー上の量子ドット蛍光ファイバー伝播モードへのチャネリング効率のファイバー直径依存性

チャネリング効率は最大で22%に達している。赤線は理論計算の結果であり、実験と理論結果は測定誤差の範囲で完全に一致している。ファイバー伝播モードへのチャネリング効率22%は現状の諸手法の中でもトップクラスの値である。理論と実験の極めて良い一致はナノ光ファイバーの方法が理論的にデザイン可能な方法になり得ることを示している。このことは工学応用にとって極めて重要である。

この結果は「ナノファイバーへのチャネリング効率は理論計算値を用いて良い」ことを示すものである。このことは、(3)で求められた「チャネリング効率と量子ドットの発光の量子効率の積」から量子ドットの発光量子効率を一個の量子ドットについて容易に求められることを示すものである。実際に解析を行った結果によれば、量子ドットの発光量子効率は90%に達するものもある。また、数十日の経過後には量子効率は20%程度までに低下することも分かった。

(5)チャネリング効率の向上

ファイバー伝播モードへのチャネリング効率22%は優れた値ではあるが、工学的応用を考えれば80%以上のチャネリング効率が望まれる。我々は理論的に、ナノファイバー上に共振器構造を組込めば、チャネリング効率は90%以上に達することができることを示した。必要となる共振器のフィネスは30程度と極めて低い値で良い。

共振器組込みにより自然放出を制御するのはCQEDの標準的な手法であるが、通常ファブリーペロー共振器を用いる場合は必要となるフィネスは100,000以上である。しかし、ナノファイバー法ではわずか30で良い。これは、ナノファイバー法ではナノファ

イバー近傍の電磁場モードが波長以下の領域に強く閉込められていることによるものである。

(6)ナノ光ファイバー共振器の作製

チャネリング効90%以上を実現するためにはナノ光ファイバーに共振器を組込む必要がある。ナノ光ファイバーにブラッググレーティングを作り込めば実現できる。しかし通常のファイバーブラッググレーティング(FBG)の加工方法はナノファイバーには適用できない。我々は、集束イオンビーム(FIB)加工によりナノファイバー上にFBGを作り込む方法を開発した。図5は作成したナノファイバーFBGのSEM画像である。直径560nmのナノファイバーの両側面にピッチ360nm、幅150nm、深さ100nmの周期的な溝構造(FBG)が見て取れる。

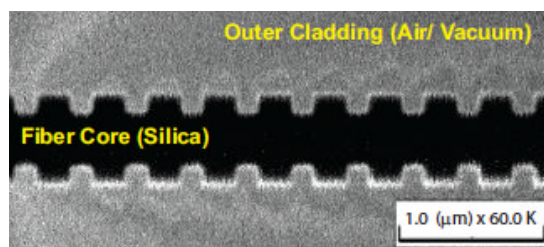


図5 ナノファイバーFBG加工例

ナノファイバー上にFIBにより一組のFBGを加工することにより共振器を組込むことに成功した。共振器長は数mmから数十μmまで容易に加工できる。共振器の透過特性例として共振器長50μmの例を図6に示す。中心に鋭い線幅1cm⁻¹の共振ピークが見て取れる。フィネスは35であり、ピーク透過率は80%である。

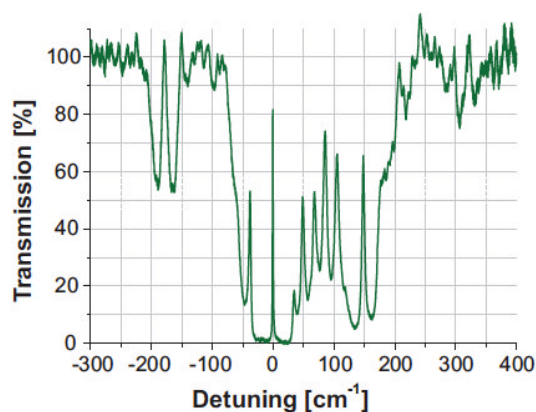


図6 ナノファイバー共振器透過特性

本研究期間においてナノファイバー共振器作成技術は基本的には確立したが、作製再現性や中心波数の設定精度等には解決すべき問題はあ。しかし今後は、冷却原子系も

しくは量子ドット系とナノファイバー共振器を組み合わせて量子光学実験を行うことが極めて重要な課題である。予測通りの結果が得られれば量子光学／量子情報工学に大きなインパクトを与えることになる。更に、ナノファイバーFBG 加工法としてフェムト秒パルスレーザーを用いた多光子加工法も検討すべきである。FIB 加工より簡便で高い制御性が期待できる。

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 16 件) 全て査読付き

- (1) K. P. Nayak, M. Das, Fam Le Kien, and K. Hakuta, "Spectroscopy of Near-Surface Atoms Using an Optical Nanofiber," Optics Communications, in press.
- (2) R. R. Yalla, K. P. Nayak, K. Hakuta, "Fluorescence photon measurements from single quantum dots on an optical nanofiber," Opt. Express Vol. 20, No. 3, 2932-2941 (2012). DOI: 10.1364/OE.20.002932
- (3) K. Hakuta, K. P. Nayak, "Manipulating single atoms and photons using optical nanofibers", Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 3, 015005 (2012). DOI: 10.1088/2043-6262/3/1/015005
- (4) Fam Le Kien and K. Hakuta, "Deterministic generation of a pair of entangled guided photons from a single atom in a nanofiber cavity", Physical Review A, Vol. 84, 053801 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevA.84.053801
- (5) Fam Le Kien, K. P. Nayak, and K. Hakuta, "Nanofiber with Bragg gratings from equidistant holes", Journal of Modern Optics, Vol. 59, pp. 274-286 (2012). DOI: 10.1080/09500340.2011.628128
- (6) K. P. Nayak, Fam Le Kien, Y. Kawai, K. Hakuta, K. Nakajima, H. T. Miyazaki, and Y. Sugimoto, "Cavity formation on an optical nanofiber using focused ion beam milling technique", Optics Express, Vol. 19, pp. 14040-14050 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.014040
- (7) Fam Le Kien and K. Hakuta, "Triggered generation of single guided photons from a single atom in a nanofiber cavity", Physical Review A, Vol. 83, 043801 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevA.83.043801
- (8) M. Das, A. Shirasaki, K. P. Nayak, M. Morinaga, Fam Le Kien, and K. Hakuta, "Measurement of Fluorescence Emission Spectrum of Few Strongly Driven Atoms Using an Optical Nanofiber", Optics Express, Vol. 18 (6), 17154-17164 (2010). DOI: 10.1364/OE.18.017154
- (9) Fam Le Kien and K. Hakuta, "Motion of an atom in a weakly driven fiber-Bragg-grating cavity: Force, friction, and diffusion", Physical Review A, Vol. 81, 063808 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevA.81.063808
- (10) Fam Le Kien and K. Hakuta, "Effect of an atom on a quantum guided field in a weakly driven fiber-Bragg-grating cavity, Physical Review A, Vol. 81, 023812 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevA.81.023812
- (11) Fam Le Kien, K. P. Nayak, and K. Hakuta, "Second-Order Correlations of Fluorescence from an Atomic Gas into a Nanofiber", Communications in Physics, Vol. 19, Special issue, pp. 35-48 (2009). <http://vjs.ac.vn/index.php/cip/>
- (12) Fam Le Kien and K. Hakuta, "Cavity-enhanced channeling of emission from an atom into a nanofiber", Physical Review A, Vol. 80, 053826 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevA.80.053826
- (13) Fam Le Kien and K. Hakuta, "Microtraps for atoms outside a fiber illuminated perpendicular to its axis: Numerical results", Physical Review A, Vol. 80, 013415 (2009) [6 pages]. DOI: 10.1103/PhysRevA.80.013415
- (14) Fam Le Kien and K. Hakuta, "Intracavity electromagnetically induced transparency in atoms around a nanofiber with a pair of Bragg grating mirrors", Physical Review A, Vol. 79, 043813 (2009) (8 pages). DOI: 10.1103/PhysRevA.79.043813
- (15) K. P. Nayak, Fam Le Kien, M. Morinaga, and K. Hakuta, "Antibunching and bunching of photons in resonance fluorescence from a few atoms into guided modes of an optical nanofiber", Physical Review A, Vol. 79, 021801(R) (2009). DOI: 10.1103/PhysRevA.79.021801
- (16) Fam Le Kien and K. Hakuta, "Slowing down a guided light field along a nanofiber in a cold atomic gas", Physical Review A, Vol. 79, 013818 (2009) (12 pages). DOI: 10.1103/PhysRevA.79.013818

[学会発表] (計 4 2 件)

国際会議基調講演／招待講演を以下に記す。

- (1) K.P. Nayak, Fam Le Kien, K. Hakuta, "Manipulation of Light Propagation Using Optical Nanofiber Cavities," SPIE Photonics West, Jan. 21-26, 2012 (San Francisco, U. S.

- A.).
- (2) K. Hakuta, "Optical Nanofibers: New Tool for Manipulating Atoms and Photons", 3rd International Conference on Current Developments in Atomic, Molecular, Optical and Nano Physics (CDAMOP 2011), Dec. 14-16, 2011 (Delhi, India). (Plenary Talk)
 - (3) K. Hakuta, "Optical Nanofibers for Manipulating Single Photons", International Conference on Advanced Photonic Polymers (ICAPP2011), Dec. 1-2, 2011 (Yokohama, Japan).
 - (4) K. Hakuta, "Spontaneous emission manipulation using optical nanofibers and optical nanofiber cavities", 20th International Laser Physics Workshop (LPHYS'11), July 11-15, 2011 (Sarajevo, Bosnia & Herzegovina).
 - (5) K. Hakuta, "Spontaneous emission manipulation using optical nanofibers and optical nanofiber cavities", International Workshop on Micro-Cavities and Their Applications, May 24-27, 2011 (Busan, Korea).
 - (6) K. Hakuta, "Optical nanofibers for probing atom-surface interactions", SNU Workshop on Quantum Optics, May 23 (Seoul, Korea).
 - (7) K. Hakuta, "Manipulation of Spontaneous Emission Using Optical Nanofibers", 4th International Conference on Quantum Optics and New Materials, January 26-30, 2011 (Beijing, China).
 - (8) K. Hakuta, K. P. Nayak, Fam Le Kien, "Manipulating slow light propagation using optical nanofibers with low finesse cavity" SPIE Photonics West, January 2011, (San Francisco, California, U.S.A.).
 - (9) K. Hakuta, "Manipulating Single Atoms and Photons Using Optical Nanofibers", 6th International Conference on Photonics and Applications, November 8-12, 2010 (Hanoi, Viet Nam).
 - (10) K. Hakuta, "Optical Nanofiber Technology With Photonic Polymers: New Route For Single-Photon Generation", 11th Chitose International Forum on Photonic Science & Technology (CIF 11), October 14-15, 2010 (Chitose, Hokkaido, Japan).
 - (11) K. Hakuta, Fam Le Kien, and K. P. Nayak, "Manipulating single-photon generation using optical nanofibers", 5th Asia Pacific Conference in Quantum Information Science (APCQIS-5), August 22-24, 2010 (Taiyuan, Shanxi, China).
 - (12) K. Hakuta, Fam Le Kien, and K. P. Nayak, "Manipulating single-photon generation using optical nanofibers", 19th International Laser Physics Workshop (LPHYS'10), July 05-09, 2010 (Foz do Iguacu, Brazil).
 - (13) K. P. Nayak, Fam Le Kien, K. Hakuta, "Manipulating Quantum States of Light and Matter using an Optical Nanofiber", OFC/NFOEC 2010 (San Diego, USA), March 21-26, Workshop entitled "Micro/Nanofibers: Are They Here to Stay?"
 - (14) K. Hakuta, "Atoms on an Optical Nanofiber for Slow Light Propagation", SPIE Photonics West, January 2010, (San Francisco, California, U.S.A.).
 - (15) K. Hakuta, "Near-Field Quantum Optics Using Optical Nanofibers", The 7th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNFO-7), November 25-27, 2009 (Jeju Island, Korea).
 - (16) K. Hakuta, "Optical Nanofibers for Manipulating Atoms and Photons", International Workshop on Microcavities and Their Applications (WOMA2009), August 25-28, 2009 (Seoul, Korea).
 - (17) K. Hakuta, Fam Le Kien, and K. P. Nayak, "Manipulating and controlling atoms and photons using optical nanofibers", 18th International Laser Physics Workshop (LPHYS'09), July 13-17, 2009 (Barcelona, Spain).
- [図書] (計 1 件)
- (1) 白田耕蔵 "量子干渉と量子コヒーレンス: 量子非線形光学"、『光科学研究の最前線 2』, p. 136, 光科学研究の最前線編集委員会編 (強光子場科学研究懇談会、2009 年)
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
白田 耕蔵 (HAKUTA KOHZO)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授
研究者番号: 8 0 1 6 4 7 7 1
 - (2) 研究分担者
ファム レ キエン (PHAM LE KIEN)
電気通信大学・フォトニックイノベーション研究センター・特任教授
研究者番号: 5 0 3 7 7 0 2 4
 - 森永 実 (MORINAGA MAKOTO)
電気通信大学・レーザー新世代研究センター・助教
研究者番号: 6 0 2 3 0 1 4 0