

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21102008

研究課題名(和文)光を基軸とした多キュービット量子制御

研究課題名(英文)Light-based multi-qubit quantum control

研究代表者

小芦 雅斗(Koashi, Masato)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90322099

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 81,900,000円、(間接経費) 24,570,000円

研究成果の概要(和文)：様々な物理系の中で、光は、遠く離れた二地点間で量子情報をやりとりするための通信媒体として使える唯一の物理系である、という独特の役割を担っている。我々は、光の量子的な特性や、その光に載せた量子情報を保存したまま光子の波長を変える量子インターフェースを開発し、変換時の忠実度90%以上を達成した。これは、様々な物質系の量子情報を、通信用光ファイバーを用いて遠くへ伝送する際に重要となる技術である。また、我々は、通信路における雑音から量子情報を保護する高効率な方法を開発した。実証実験により、この方式は、従来の方式に比べて効率が2桁向上することが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Among various physical systems, photons play a unique role as the only physical system that can be used as a carrier of quantum information in the communication between two remote parties. We have developed quantum interface to change the wavelength of the photons while preserving quantum properties of light and the quantum information it carries, and achieved a conversion fidelity over 90%. This interface is a vital tool for transmitting quantum information stored in various physical systems to a remote place through telecom fibers. We have also developed a very efficient method of protecting quantum information from noises in communication channels. Our experimental demonstration has shown that the new method achieves an efficiency two orders of magnitude higher than the conventional method.

研究分野：量子情報

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：量子インターフェース 波長変換 量子もつれ デコヒーレンスフリー部分空間 W状態

1. 研究開始当初の背景

我々が日常目にする巨視的な現象とは異なり、微視的な物質及び光は量子力学に支配された特異な現象を示す。この性質を、計算や通信などの情報処理に積極的に応用していく可能性が広く追及されはじめていた。様々な物理系の中で、とくに光子系は次のような特色を持つ。まず、損失以外のデコヒーレンスが非常に小さい状況を容易に作り出せるため、遠く離れた2地点を結ぶ通信の媒体として唯一の選択肢である。この裏返しとして、光子間の大きな相互作用を実現することが難しく、互いに相関した複数の光子の発生はどうしても確率的となる。一方、線形光学過程の範囲であれば、偏光素子やビームスプリッタなどを組み合わせることで、状態変化を非常に高い精度で行うことができることに加え、非常に小さな暗検出のもとで光子検出を行うことが可能である。このため、光子検出が起きたという事象だけに注目(事後選択と呼ぶ)するならば、理想的な射影測定を容易に行うことが出来て、光子系の状態を高い精度で決定することができる。以上の特色から、量子力学の性質を活かした情報処理における光子系の役割としては、他の物理系に先駆けた尖兵としての多キュビット量子制御技術の開拓、及び、将来を見据えた複数地点をまたぐ量子制御における通信媒体としての機能が求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、汎用性の高い多キュビット量子制御の光による原理実証実験と、光本来の役割である通信における量子制御のふたつを柱に、理論および実験の研究を進める。前者では、ディック状態や W 状態などの特徴的な多体量子もつれ状態の発生、拡張や融合などの量子プロトコルの提案および実証実験を行う。後者では、デコヒーレンス・フリー部分空間 (DFS) を用いた量子状態保護を用いた通信法を発展させる。多光子化に伴う効率劣化の問題の解消や、量子テレポーテーションと組み合わせることにより、成功確率に原理的な制限のない形で原理実証実験を完遂することを目標とする。同時に、雑音耐性をさらに高めた DFS の利用も視野に入れる。また、通信波長帯と他の波長帯を量子的に結ぶインターフェースを開発し、波長の柔軟性を広げる。理論の課題としては、さらに、本領域で扱う他の物理系にも視野を広げ、光とは異なり損失の影響を受けにくい他の物理系と組み合わせることにより、長距離量子通信をはじめとしたさらに高レベルの量子制御を行う可能性を探る。

3. 研究の方法

(1) 複数の粒子が量子力学的に強く相関した

量子もつれ状態は、粒子の数が3つ、4つと多くなるにつれて、定性的にも異なる多種多様なもつれ合いのパターンが可能になっていく。多数の粒子の量子もつれ状態を生成するには、少数の量子もつれ状態から出発して粒子数を増やす拡張操作や、量子もつれ状態2つを融合してより大きな量子もつれ状態を作る操作が有用である。とくに、通信に利用する場合、各粒子が離れた場所にあるため、このような操作はなるべく少数の粒子だけにアクセスすることで完結することが望ましい。

本研究では、とくに、ディック状態と呼ばれる量子もつれ状態に着目した。ディック状態では、各粒子が他の全ての粒子と等しく相関を持つため、あらゆる粒子対の組み合わせが互いに手を繋いでいる網の目のような構造を持つ。なかでも、手を繋ぐ強さが最も大きい状態はW状態と呼ばれ、粒子損失に対して最も耐性の高い量子もつれ状態として知られている。このような状態に粒子を追加してW状態を拡張するには、既存の全ての粒子との相互作用が必要に思えるが、量子力学の性質をうまく使うと、たった一個の既存の粒子と相互作用させるだけで、W状態の拡張が可能になる。独自に提案した光子のW状態の拡張法の実証実験を行った。また、光子のW状態の拡張や融合の可能性や原理的限界について理論的解析を行った。さらに、一般のディック状態の場合にどのような拡張操作が許されるかについても理論的解析を行った。

(2) 量子通信の様々なタスクを行うには、遠く離れた場所に量子もつれ状態を配信することが必要であり、雑音のある現実的な量子通信路での配信技術が重要となる。光ファイバーや地上-衛星間通信で想定されるようなゆっくり変化する雑音に対しては、量子情報を複数の光子に書き込むことで利用できるデコヒーレンスフリー部分空間(DFS)を用いた保護法が知られている。しかし、透過率 T の通信路で n 個の光子の DFS を利用すると、全ての光子が届く必要性から効率が T の n 乗で低下してしまう欠点がある。本研究では、2光子 DFS を用いて位相雑音から保護する場合に、効率を T の2乗から T の1乗に改善する新しい手法を提案し、実証実験を行った。また、この効率的な手法を応用して、偏光回転も含むような雑音に適用する可能性を検討した。

(3) 距離の離れた地点を結んで高度な量子制御を行うには、通信に適した光と、保存や複雑な状態操作に適した物質系を組み合わせる必要がある。光系と物質系をコヒーレントに結合する場合、物質系に固有の共鳴周波数に合った波長の光との相互作用が用いられる。しかし、光系の利点である長距離伝送に適した波長は、遠赤外の通信波長帯に限られ

る。そのため、この光の波長のギャップを埋める技術として、量子コヒーレンスを破壊することなく光の波長を変換する量子インターフェースが重要となる。本研究では、周期分極反転ニオブ酸リチウム(PPLN)を用いた差周波発生により、可視域の光子を通信波長帯へ変換する量子インターフェースを開発し、入力光の持つ様々な量子的性質がこのインターフェースによって通信波長帯の出力光に受け継がれていることを確認する実験を行った。

(4) 量子力学の性質を通信に広く応用するためには、離れた2地点に置かれた量子メモリの間に、光を媒介として量子もつれを作ることが重要である。この際、距離に応じて光ファイバの損失が増加するため、その影響をなるべく避けて生成効率と忠実度を高める工夫が求められる。本研究では、幅広い種類の量子メモリに適用できるように、光と量子メモリの相互作用についてはビット値依存位相シフトをもたらす一般的な相互作用を想定し、さらに光源としてレーザー光を用いる実用的な手法を理論的に模索した。

4. 研究成果

(1) 他の光子とW状態を形成している光子を1個入力すると、3光子が出力され、全ての光子がW状態になるような量子ゲートを作成した。この量子ゲートは、 n 光子のW状態を $(n+2)$ 光子のW状態に拡張する機能を持つ(図1)。この量子ゲートを用いた拡張操作を行い、3光子および4光子のW状態を生成し、W状態の特徴である光子対間量子もつれが全ての対に存在することを観測した。この方法は、初期状態のW状態のサイズに依らず適用可能で、しかも1個の光子だけにしかアクセスする必要がないため、多くの粒子にまたがる量子もつれを生成するための有用なツールであると考えられる。

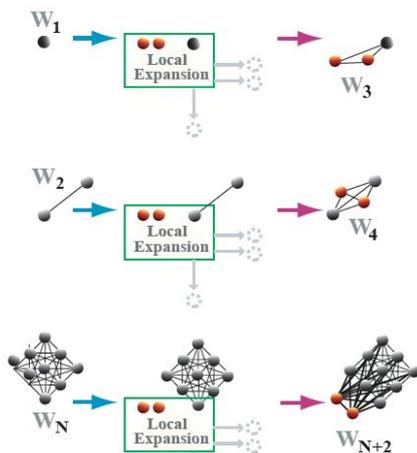


図1: W状態の拡張操作

理論的には、一般に k 光子状態と線形光学素子を用いてこのような拡張操作を行う一般論を確立し、原理的に最大の効率で拡張を

行う方法を明らかにした。また、大きなサイズの W 状態に到達するためには、融合操作がより効率的であると考えられる。光子の W 状態に対する簡単な手法を提案し、その効率を見積もり、リソースをリサイクルする機構を導入することが効率改善に有用であることを明らかにした。さらに、一般のディック状態の拡張操作について解析を行い、 W 状態とは異なり複数の光子へのアクセスが不可欠であることなどを明らかにした。これらの知見は、実際に多粒子の量子もつれ状態を生成する道筋を与えるだけでなく、異なる量子もつれ状態のもつれ合いパターンの違いを、拡張操作の難易を通して明らかにするという意義を持つ。実際、粒子対間のもつれの大きさが最も大きい W 状態が、最も狭いアクセス(1光子)だけで拡張できてしまうという事実は、直感とは逆の結果で、興味深い。

(2) 通常の2光子DFSを用いた量子状態保護の方法では、2個の光子は離接させて通信路に送り込まれる。これに対して、DFSの符号化部分の単純化を行い、さらに、量子もつれ状態の持つ対称性を利用して、雑音を受けた光子と送信者のもとに留まる光子を実効的に入れ替えるという工夫によって、2個の光子の一つを、通信路を逆走するレーザー光に置き換えることに成功した。これにより、1個ではなく多数の光子が状態保護に寄与できるようになり、忠実度 0.8 程度を維持しながら、効率を通信路透過率 T の2乗から T の1乗に改善できることを光学実験により実証した(図2)。とくに透過率が小さい場合にこの効果は顕著で、2桁に近い効率の改善が得られた。

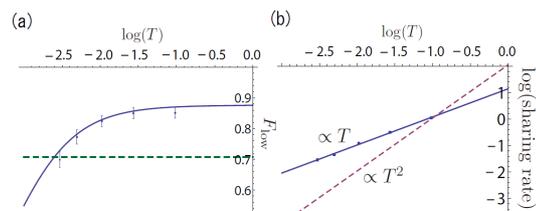


図2: 量子状態保護の忠実度(a)と効率(b)

また、この手法で任意の量子状態を送信できることを実証するために、本手法により受信者に分配された量子もつれ光子対を用いて、別に用意した量子もつれ光子対の一方を量子テレポーションによって送信し、送信後の量子もつれ光子対の忠実度 0.66 を得た。

2光子DFSは、位相雑音からの保護を与えるものであるが、偏光回転を含む雑音を生じる通常の光ファイバーでも、2本で通信路を構成することで2光子DFSを利用した量子状態保護が可能になる。上記の効率改善の考え方がこのケースにも適用できるかどうかは非自明であったが、光の伝搬の基本性質である相反性をうまく利用することで、効率改善が可能であることを理論的に明らかにし

た。

これらの成果は、百倍近い効率の改善という応用的な意義はもちろんであるが、その改善が、古典光であるレーザー光の利用や、古典光の伝搬特性である相反性と量子もつれの対称性との組み合わせによってもたらされている点も興味深い。量子系の特性と古典系の特性を組み合わせる技術や学理を今後も追及していくことが重要であろう。

(3) PPLN における差周波発生を用いて周波数の下方変換を行う量子インターフェースを作成し、波長 780 nm のピコ秒単一光子パルスを 1522 nm の光子に変換する実験を行った。まず、この出力光の強度相関測定によって、パルスに複数光子が存在する確率が古典光の 17%程度に抑えられていることを観測し、入力光の単一光子としての非古典性が出力光に受け継がれていることを確認した。次に、入力光子と別の光子とをあらかじめ量子もつれ状態に準備したうえで、下方変換を行い、波長変換後も量子もつれ状態が約 75%の忠実度で維持されていることを確認した。さらに、より高い忠実度で変換を行うために、超伝導単一光子検出器(SSPD)を導入し、励起光強度を適切に調整して実験を行い、 $93 \pm 4\%$ の高い忠実度を達成した(図3)。

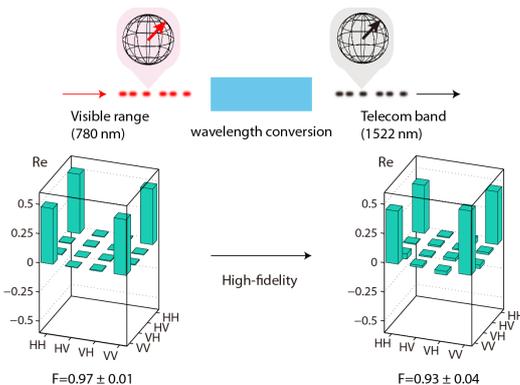


図3：波長変換における量子もつれ状態の忠実度 F の変化

量子中継器などの応用のためには、変換後の光子の時間空間モードが適切に制御されている必要がある。この点に、別々に変換された 2 個の光子の Hong-Ou-Mandel(HOM)干渉を観測することで評価できる。HOM 干渉は、2 光子が本質的に区別できないことに起因して、同時検出率にディップが現れるものである。観測されたディップの深さは、割合にして 0.76 ± 0.12 であり、古典限界の 0.5 を超えるものであった。

以上の成果は、固体素子による下方変換によって通信波長帯への変換を行う量子インターフェースを世界で初めて実現したものである。共鳴を用いない固体素子による変換は、本研究で実証されたようなピコ秒程度の高速動作という特長を持つ。また、設計を

更することで入力光の波長を選択できる点も大きな特長である。本研究で実証した波長 780nm は Rb 原子の発光波長であり、Rb 原子系と実際に結合する実験を同新領域の別の計画研究との共同研究により着手し、今後も進めていく予定である。一方、ダイヤモンドの NV センターの発光波長である 637nm を入力光とする量子インターフェースを設計し、微弱レーザー光を入力する実験により、量子インターフェースとして機能するレベルに雑音が抑制されていることを確認した。

本研究で開発した量子インターフェースは、励起光強度の調整により、変換効率を自由に設定できる。変換効率を 50%程度とし、変換されずに残った光が入力光と同じ波長で出力される状況では、入力光を 2 種の波長に分割する動作を行うとみなせる。理論的には、この過程は通常の半透鏡によるビームスプリッタと量子レベルで相似な相互作用であり、周波数の自由度におけるビームスプリッタと位置付けられる。このことを実験的に確認するため、平均光子数約 0.1 の波長 780 nm の入力光パルスを 2 つ用意し、出力された 2 つの波長、780 nm と 1522 nm のいずれも、0.98 以上の高い明瞭度で入力光の位相情報を保持していることを観測した。このような周波数領域のビームスプリッタは、周波数領域の自由度に載せた量子情報の制御に役立つと考えられる。

(4) 空間的に離れた量子ビットに対する新たな 2 量子ビット演算方式「遠隔非破壊パリティ測定」を提案した(図4)。この方式はレーザー光と物質量子ビットの基本的な相互作用に立脚しており、様々なタイプの量子メモリに対して適用可能である。この方式によって、量子情報処理に用いられる様々な 2 量子ビット操作(量子もつれ生成、ベル測定、パリティ検知測定など)が可能となる。量子ビット間の距離は自由に選べるので、遠く離れた送信者と受信者の持つ量子ビット間のゲート操作や、チップ上に配置された量子ビット間距離を大きくしてデコヒーレンスを防ぐのに利用できる。この方式は、非共鳴相互作用と透過率 T の光ファイバを用いる方式の中で原理的に最適な手法であることを証明した。また、現実的な装置に基づく遠隔非破壊パリティ測定を仮定したとしても、長距離量子通信(量子中継)が実行可能であることを数値的に示した。この量子通信の効率は、遠隔非破壊パリティ測定に用いられる装置の進歩によって改善されるため、その進歩に応じて量子通信の到達距離を延長できる。さらには、十分高い忠実度の遠隔非破壊パリティ測定が実装されれば、量子計算も実現可能となる。このように、遠隔非破壊パリティ測定は、量子情報処理の実現に向けた新しい道筋となると考えている。

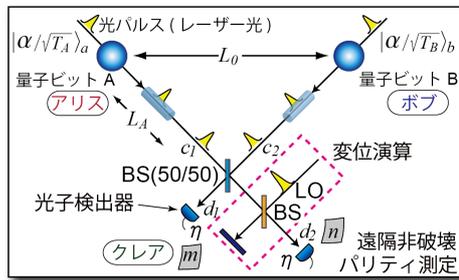


図4：遠隔非破壊パリティ測定

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 18 件)

T. Sasaki, Y. Yamamoto, and M. Koashi: Practical quantum key distribution protocol without monitoring signal disturbance, *Nature* Vol. 509, 475-478 (2014), 査読有. DOI:10.1038/nature13303

R. Ikuta, T. Kobayashi, S. Yasui, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Koashi, M. Sasaki, Z. Wang, and N. Imoto: Frequency down-conversion of 637 nm light to the telecommunication band for non-classical light emitted from NV centers in diamond, *Optics Express* Vol. 22, 11205-11214 (2014), 査読有. DOI:10.1364/OE.22.011205

T. Kobayashi, R. Ikuta, S. K. Ozdemir, M. Tame, T. Yamamoto, M. Koashi and N. Imoto: Universal gates for transforming multipartite entangled Dicke states, *New Journal of Physics* Vol. 16, 023005:1-9 (2014), 査読有. DOI:10.1088/1367-2630/16/2/023005

R. Ikuta, T. Kobayashi, H. Kato, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Koashi, M. Sasaki, Z. Wang, and N. Imoto: Observation of two output light pulses from a partial wavelength converter preserving phase of an input light at a single-photon level, *Optics Express* Vol. 21, 27865-27872 (2013), 査読有. DOI:10.1364/OE.21.027865

R. Ikuta, T. Kobayashi, H. Kato, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Koashi, M. Sasaki, Z. Wang, and N. Imoto: Nonclassical two-photon interference between independent

telecommunication light pulses converted by difference-frequency generation, *Physical Review A* Vol. 88, 042317:1-4 (2013), 査読有. DOI:10.1103/PhysRevA.88.042317

H. Kumagai, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto: Robustness of quantum communication based on a decoherence-free subspace using a counter-propagating weak coherent light pulse, *Physical Review A* Vol. 87, 052325:1-8 (2013), 査読有. DOI:10.1103/PhysRevA.87.052325

R. Ikuta, H. Kato, Y. Kusaka, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Koashi, M. Sasaki, Z. Wang, and N. Imoto: High-fidelity conversion of photonic quantum information to telecommunication wavelength with superconducting single-photon detectors, *Physical Review A* Vol. 87, 010301(R):1-4 (2013), 査読有. DOI:10.1103/PhysRevA.87.010301

K. Azuma, H. Takeda, M. Koashi, and N. Imoto: Quantum repeaters and computation by a single module: Remote nondestructive parity measurement, *Physical Review A* Vol. 85, 062309:1-7 (2012), 査読有. DOI:10.1103/PhysRevA.85.062309

R. Ikuta, Y. Kusaka, T. Kitano, H. Kato, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto: Wide-band quantum interface for visible-to-telecommunication wavelength conversion, *Nature Communications* Vol. 2, 537:1-5 (2011), 査読有. DOI:10.1038/ncomms1544

S.K. Ozdemir, E. Matsunaga, T. Tashima, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto: An optical fusion gate for W-states, *New Journal of Physics* Vol. 13, 103003:1-14(2011), 査読有. DOI:10.1088/1367-2630/13/10/103003

R. Ikuta, Y. Ono, T. Tashima, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto: Efficient decoherence-free entanglement distribution over lossy quantum channels, *Physical Review Letters* Vol. 106, 110503:1-4 (2011), 査読有. DOI: 10.1103/PhysRevLett.106.110503

R. Ikuta, T. Tashima, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto: Optimal local

expansion of W states using linear optics and Fock states,
Physical Review A
Vol. 83, 012314:1-8 (2011), 査読有.
DOI:10.1103/PhysRevA.83.012314

T. Tashima, T. Kitano, S.K. Ozdemir, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto: Demonstration of local expansion toward large-scale entangled webs,
Physical Review Letters,
Vol. 105, 210503:1-4 (2010), 査読有.
DOI:10.1103/PhysRevLett.105.210503

K. Azuma, N. Sota, M. Koashi, and N. Imoto: Tight bound on coherent-state-based entanglement generation over lossy channels,
Physical Review A
Vol. 81, 022325:1-6 (2010), 査読有.
DOI:10.1103/PhysRevA.81.022325

K. Azuma, N. Sota, R. Namiki, S. K. Ozdemir, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto: Optimal entanglement generation for efficient hybrid quantum repeaters,
Physical Review A
Vol. 80, 060303(R):1-4 (2009), 査読有.
DOI:10.1103/PhysRevA.80.060303

〔学会発表〕(計 59 件)

生田力三(代表): 分極反転デバイスの量子中継への応用, 第 61 回応用物理学学会春季学術講演会 18p-F8-6 (招待講演), 2014 年 3 月 18 日, 青山学院大学 相模原キャンパス (神奈川).

生田力三(代表): 単一光子の波長変換を利用した量子操作, 電子通信学会 2013 年ソサイエティ大会 (招待講演), 2013 年 9 月 17 日, 福岡工業大学 (福岡).

T. Yamamoto: Visible-to-telecommunication wavelength conversion of single photons and its applications, The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy (招待講演), 2013 年 4 月 9 日, Nara Prefectural New Public Hall (Nara).

K. Azuma: Entanglement shared via coherent-state transmission, Quantum Science Symposium 2012 (招待講演), 2012 年 11 月 1 日, University of Cambridge (UK).

T. Yamamoto (代表): A photonic quantum interface for visible-to-telecommunication wavelength conversion, IEEE PHOTONICS CONFERENCE

2012 (招待講演), 2012 年 9 月 26 日, Hyatt Regency San Francisco Airport (USA).

M. Koashi: Distribution and manipulation of photonic entanglement resources, ERATO Macroscopic Quantum Control Conference on Ultracold Atoms and Molecules (UCAM2011)(招待講演), 2011 年 1 月 26 日, Koshiba Hall, Univ. of Tokyo (Tokyo).

T. Yamamoto: Protection of photonic quantum states via decoherence-free subspaces (招待講演), 2010 年 6 月 4 日, Convention Center, Osaka University (Osaka).

〔その他〕
プレスリリース 2011/11/16
「量子メモリー読み書きのための光波長変換ラインナップ完成 - 実用量子計算や中継通信に道 - 」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小芦 雅斗 (KOASHI MASATO)
東京大学・工学系研究科・教授
研究者番号: 90322099

(2) 研究分担者

山本 俊 (TAKASHI YAMAMOTO)
大阪大学・基礎工学研究科・准教授
研究者番号: 10403130

(3) 連携研究者

生田 力三 (RIKIZO IKUTA)
大阪大学・基礎工学研究科・助教
研究者番号: 90626475

東 浩司 (KOJI AZUMA)
日本電信電話株式会社 N T T 物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・研究員
研究者番号: 90599549