

令和元年6月11日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05229

研究課題名(和文) ボース凝縮体への静止ソリトンの導入とその外場計測への応用

研究課題名(英文) Generation of a soliton in a gaseous Bose-Einstein condensate and its application for measuring external fields

研究代表者

熊倉 光孝 (Kumakura, Mitsutaka)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：30324601

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：Rb原子気体のBose-Einstein凝縮体に原子波の位相ステップであるソリトンを導入し、原子の位相変化に基づく新たな高感度プローブとして応用することを目標に、本研究では誘導ラマン遷移を用いた凝縮体への位相印加に必要な実験装置の開発に取り組んだ。半導体レーザーの周波数を2枚の干渉フィルターを用いて安定化する独自の光学系を考案し、周波数線幅を15 kHz程度にまで安定化するとともに、必要な安定性をもつ周波数安定化レーザー光源を新たに開発した。また、凝縮体に位相構造を導入するため、レーザービーム波面の位相を制御する新たな光学系を構築し、その制御特性を調べたほか、誘導ラマン遷移の確認実験も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子位相の変化に基づく高感度計測器としては原子干渉計が知られているが、本研究で取り組んだ原子波ソリトンを利用する方法は、原子波の非線形性を利用する従来にない手法で、一度に多数の原子を利用するため、飛躍的に高いS/Nが期待される。本研究の成果は、その実証に必要な新たな実験装置を開発したもので、学術的に大きな意義がある。また、本研究で実現した簡便なレーザー周波数安定化の手法やレーザー波面の位相制御法は、他分野の高精度光学実験においても重要な実験手法であり、工学的な面でもその意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：With the goal of demonstrating our novel precision measurement method by utilizing an atomic wave soliton generated in a gaseous Bose-Einstein condensate, we developed new optical systems for generating the soliton through the stimulated Raman transition by laser beams with controlled wavefronts; a frequency-stabilized laser source, a laser wavefront control system, and so on. We originally designed a new frequency stabilization mechanism of a semiconductor laser with two interference filters, and constructed a 780 nm laser source with a narrow frequency linewidth of nearly 15 kHz and sufficient stability. The characteristics of the wavefront control system was confirmed in practice for several higher HG and LG modes. The stimulated Raman transition was also carried out preliminarily for Rb atoms in an atomic vapor cell at a normal temperature.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：周波数安定化レーザー レーザー波面制御 半導体レーザー レーザー冷却 Bose-Einstein凝縮

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

希薄原子気体における Bose-Einstein 凝縮体は、全体が巨視的な物質波として振る舞い、原子間相互作用に起因する非線形性から、凝縮体中にはソリトンが存在できることが知られている。このソリトンは、原子波の位相ステップに相当し、原子密度分布の窪みとして観測されるが、位相差の大きさによって窪みの深さや移動速度が変化する。我々は、このソリトンを観測することで原子と外場の相互作用を原子位相の変化を介して精密に測定する新たな計測手法を提案し、この研究課題でその検証に必要な実験装置の開発および予備実験に取り組んだ。

2. 研究の目的

Bose-Einstein 凝縮体中にソリトンを生成するためには、生成時に均一な位相を持つ凝縮体の波動関数に、人為的に制御された位相ステップを印加する必要がある。そのため本研究では、印加できる位相構造の自由度が高い、誘導ラマン遷移を利用する光学的な方法を試みることとした。この方法では、散乱による反跳エネルギーの相違を利用して、基底電子状態の同一磁気副準位間でラマン散乱を行う必要があるため、遷移に用いるレーザーは反跳エネルギーから決まる狭い周波数線幅に狭窄化される必要がある。また、この手法では誘導ラマン遷移に用いる 2 本のレーザービームの波面の位相差が凝縮体に印加されるため、ソリトンに相当する位相ステップをレーザー波面に導入する装置の開発が必要となる。本研究では、我々の研究グループで既に生成に成功している Rb 原子気体の Bose-Einstein 凝縮体に位相印加を行うことを目標に、15 kHz 程度以下の線幅に周波数安定化された新たなレーザー光源の開発や、レーザービームの波面制御装置の開発など、位相印加に必要な新たな実験装置の開発を行った。

3. 研究の方法

Rb 原子気体の Bose-Einstein 凝縮体に位相印加を行うために、主に以下のような実験装置の開発を行った。

(1) 周波数安定化半導体レーザーの開発

Rb 原子気体の Bose-Einstein 凝縮体では、多段階の誘導ラマン遷移を防ぐために、反跳エネルギーから決まる 15 kHz 程度以下の線幅に周波数を安定化する必要がある。そこで、このような狭い周波数線幅が比較的容易に得られると報告されている、干渉フィルターを用いた周波数安定化半導体レーザー光源の開発に取り組んだ。この手法では、従来、1 枚の干渉フィルターを共振器中に挿入して周波数安定化を行っているが、本研究では、これに加えて、干渉フィルターを 2 枚利用した新たな安定化機構を考案し、その特性の比較も行った。

(2) レーザー波面の位相制御装置の開発

誘導ラマン遷移を利用すると、用いる 2 本のレーザーの波面の位相差が凝縮体波動関数に導入される。そのため、この手法で静止ソリトンを導入するには、通常の HG₀₀ 基本ガウスモードのビームとともに、HG₁₀ モードのレーザービームを用いる必要がある。また、運動するソリトンを導入するには、位相差が凝縮体中のソリトンの形状に合わせて連続的に変化するレーザービームを用意する必要がある。このようなレーザービームを生成するため、本研究では空間位相変調器を用いて波面位相の制御を行う新たな装置の開発を行った。凝縮体の長軸方向のサイズは数十 μm であり、模擬的な入射集光系も併せて構築し、照射位置での光強度分布の評価などを行った。

(3) 誘導ラマン遷移

運動状態間のラマン遷移は、冷却原子では原子数が少ないため、原子の運動状態変化を直接観測すること以外に確認が難しい。そこで、この実験の前段階として、常温の原子蒸気を用い、磁場を印加して分裂させた磁気副準位間で誘導ラマン遷移の確認を行った。

4. 研究成果

3. で述べた課題について得られた成果を、以下にそれぞれ紹介する。

(1) 周波数安定化半導体レーザーの開発

図 1 に本研究で製作した周波数安定化レーザー光源の概略図を示す。半導体レーザーからの出射光は、干渉フィルター 2 枚を通過した後、ミラーによって反射され、共振器が形成される。半波長板と偏向ビームスプリッターを用いて、共振器中の光の一部を出射光として取り出し、高フィネスの外部共振器（周波数分解能 > 20 kHz）によって周波数線幅を測定した。測定されたレーザー周波数の線幅は 30 kHz 程度であり、外部共振器自身の線幅を差し引いた 10 kHz 程度以下にまで出力光周波数が狭窄化されたことが確認できた。この外部共振器の共鳴からのエラー信号を半導体レーザー素子の電流にフィードバックすることにより、レーザー周波数を外部共振器の共鳴にロックすることにも成功し、運動状態間の誘導ラマン散乱に必要な線幅の狭いレーザー光を用意することができた。

この装置の開発にあたり、当初は干渉フィルター 1 枚を用いた従来の周波数安定化法に従ってレーザーの開発を進めていたが、この方法では安定化以前の周波数変動が大きく、モードホ

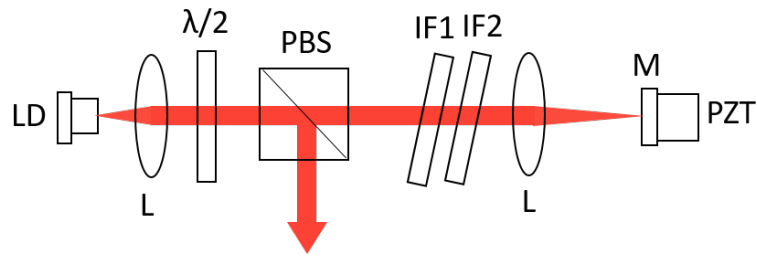


図1 .周波数安定化半導体レーザー (LD: 半導体レーザー素子, L: レンズ, $\lambda/2$: 半波長板, PBS: 偏向ビームスプリッタ, IF1, IF2: 干渉フィルター, M: ミラー, PZT: ピエゾ素子)

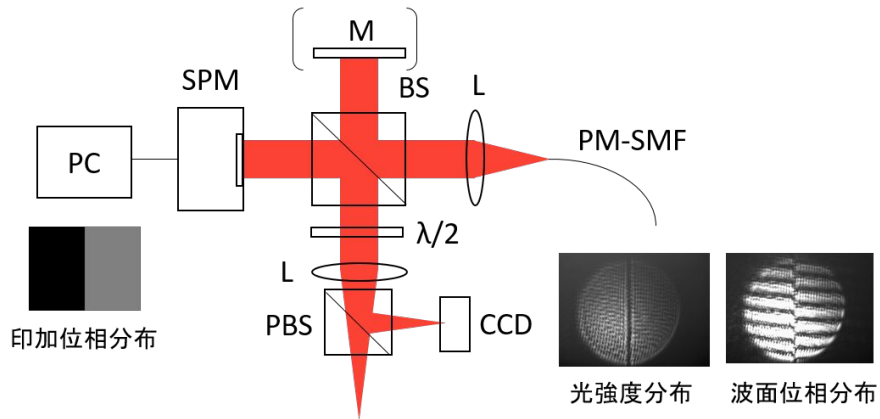


図2 .レーザー波面制御装置 (PC: コンピュータ, SPM: 空間位相変調器, M: ミラー, BS: ビームスプリッタ, $\lambda/2$: 半波長板, L: レンズ, PBS: 偏向ビームスプリッタ, PM-SMF: 偏波保存シングルモードファイバー)

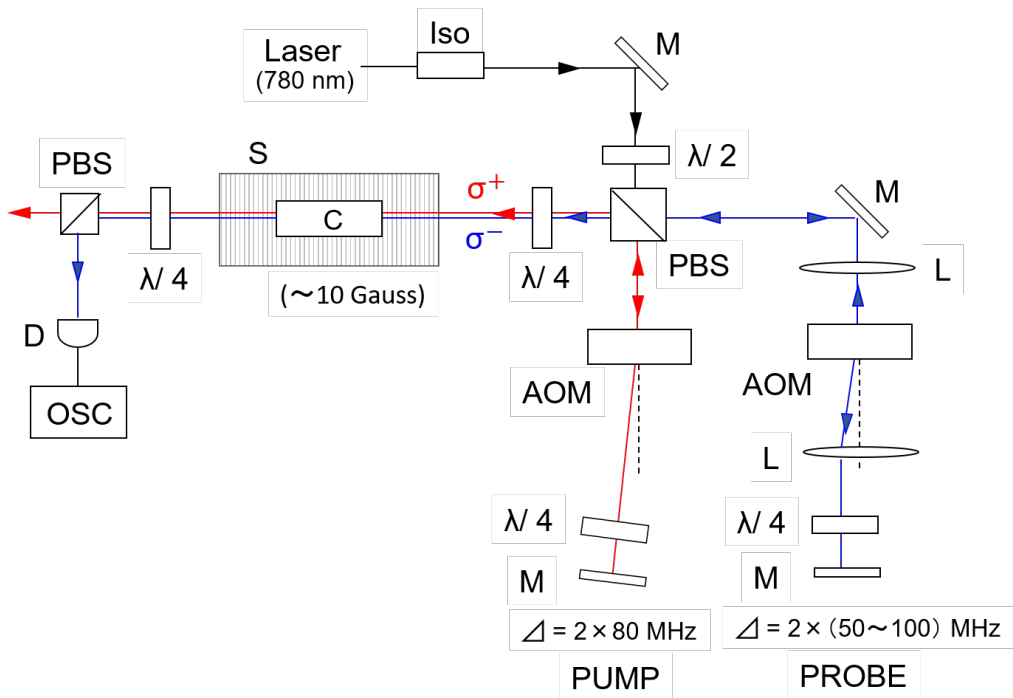


図3 .誘導ラマン散乱実験装置 (Iso: アイソレータ, M: ミラー, $\lambda/2$: 半波長板, PBS: 偏向ビームスプリッタ, AOM: 音響光学変調器, $\lambda/4$: 1/4 波長板, L: レンズ, S: ソレノイド, C: Rb 原子蒸気セル (Ne 6 Torr), D: 光検出器, OSC: オシロスコープ)

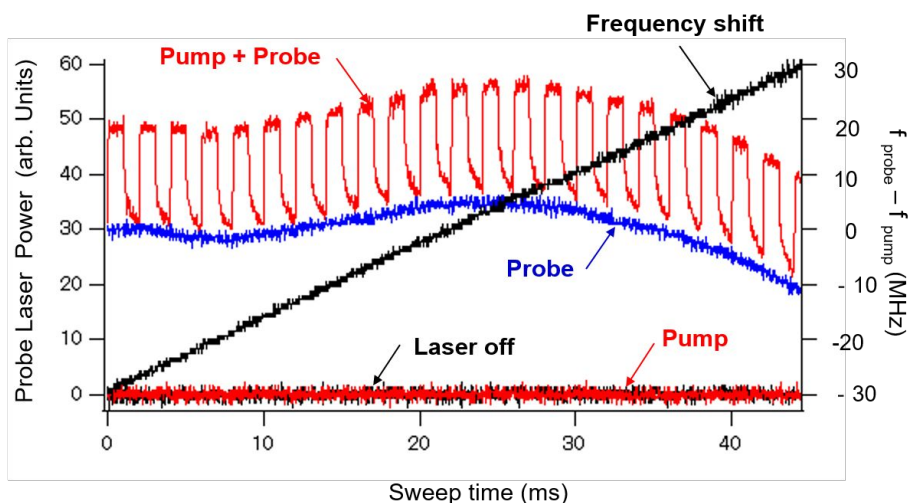


図4 誘導ラマン散乱の実験結果 ポンプ光をスイッチしながら、プローブ光周波数をラマン遷移の共鳴付近で掃引した。プローブ光の強度変化はレーザーの出力強度の変化によるものである。ドップラー効果のため、100 MHz以上にわたるポンプ光とプローブ光の周波数差の範囲で、誘導ラマン効果によるプローブ光の強度の増加が観測された。

ップが頻繁に起こり、周波数の安定化が困難であった。本研究では、互いにわずかに共鳴の異なる2枚の干渉フィルターを用いることで、モードホップフリーな周波数領域を拡大することを新たに試み、実際に周波数を外部共振器にロックできるまで安定性が向上することを実証した。

(2) レーザー波面の位相制御装置の開発

波面の位相分布を制御したレーザー光を生成するため、空間位相変調器を用いた図2のような実験装置を製作した。光源から出力されたレーザー光は、偏波保存シングルモードファイバーを通ることによって波面が整えられたのち、空間位相変調器に入射される。空間位相変調器からの出射光はレンズで集光され、焦点位置付近に配置した CCD 素子によって光強度分布を観測した。また、入射光の一部を出射光と重ね合わせることで、出力レーザービームの波面の位相分布も観測した。凝縮体中の静止ソリトンに対応する HG₁₀ モードの位相をレーザービームに印加した例を図2に同時に示した。ビーム中央に見られる光強度の線状の窪みが位相ステップに相当し、制御された波面を持つレーザービームを生成することができた。

(3) 誘導ラマン遷移

図3のような実験装置を構築し、⁸⁵Rb 原子の 5s²S_{1/2} (F=2) 状態の磁気副準位間を利用して、誘導ラマン遷移の確認を行った。ポンプ光 (~10 mW/mm²) とプローブ光 (~10 μW/mm²) の周波数は 5s²S_{1/2} (F=2) 5p²P_{3/2} (F=1) の共鳴から長波長側に約 3.2 GHz ほど離調した。それぞれの周波数差を磁気副準位間 (Δm = 2) のエネルギー差に共鳴させて、ポンプ光をスイッチしながらプローブ光強度を観測した結果が図4である。ポンプ光の入射に伴い、プローブ光の強度が増加しており、誘導ラマン散乱によってプローブ光にゲインが生じていることが確認できた。

本研究で実現された以上の装置は、Rb 原子の凝縮体に対して位相印加を行うために必須のシステムであり、今後のソリトン生成実験の基盤を準備することができた。なお、本研究と並行して、磁気トラップなどのレーザー冷却技術をナノ粒子に応用する共同研究にも参画し、レーザー冷却技術の他分野への展開にも寄与することができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)

M. Kumakura, A. Kinan, and T. Moriyasu, "Dispersion of quantum dots into gases toward their optical manipulation", Proc. SPIE (査読無) 10712, 107121I (2018). DOI: 10.1117/12.2316339

J. Naoi, Y. Takahashi, M. Takamune, Y. Nakamura, M. Kumakura, M. Ashida, F. Matsushima, and Y. Moriwaki, "Property of magnetic trapping of superconducting sub-micron particles", Proc. SPIE (査読無) 10712, 107120K (2018).

DOI: 10.1117/12.2316795

M. Ashida, Y. Minowa, M. Kumakura, Y. Takahashi, F. Matsushima, and Y. Moriwaki, “Optical fabrication and trapping of superconducting nanoparticles in superfluid helium”, Proc. SPIE (査読無) 10347, 103471X (2018).

DOI: 10.1117/12.2273278

K. Masuda, S. Nakano, D. Barada, M. Kumakura, K. Miyamoto, and T. Omatsu, “Azo-polymer film twisted to form a helical surface relief by illumination with a circularly polarized Gaussian beam”, Opt. Express (査読有) 25(11), 12499-12507 (2017).

DOI: 10.1364/OE.25.012499

Y. Takahashi, J. Suzuki, N. Yoneyama, Y. Tokawa, N. Suzuki, F. Matsushima, M. Kumakura, M. Ashida, and Y. Moriwaki, “Magnetic trapping of superconducting submicron particles produced by laser ablation in superfluid helium”, Appl. Phys. Express (査読有) 10(2), 022701/1-4 (2017).

DOI: 10.7567/APEX.10.022701

〔学会発表〕(計 33 件)

馬場 宥太, 下村 昂之, 浅野 理貴, 松永 康平, 守安 毅, 瀧山 貴之, 亀山 達矢, 鳥本 司, 熊倉 光孝, “液滴を利用した量子ドットの緩衝気体中への分散”, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 11p-PB1-10 (2018).

直井 淳, 高宗 雅人, 松島 房和, 熊倉 光孝, 芦田 昌明, 森脇 喜紀, “液体 He 中でレーザーアブレーションによって生成された超伝導微粒子の磁気トラップ”, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 10pA316-12 (2018).

M. Kumakura, D. Koide, T. Shimomura, Y. Baba, T. Takiyama, T. Kameyama, T. Torimoto, and T. Moriyasu, “Non-destructive dispersion of quantum dots into gases”, 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018), P0082 (2018).

M. Kumakura, A. Kinan, and T. Moriyasu, “Dispersion of quantum dots into gases toward their optical manipulation”, The 5th Optical Manipulation and Structured Materials Conference (OMC2018), OMCp-3 (2018).

J. Naoi, Y. Takahashi, M. Takamune, Y. Nakamura, M. Kumakura, M. Ashida, F. Matsushima, and Y. Moriwaki, “Property of Magnetic Trapping of Superconducting Sub-micron Particles”, The 5th Optical Manipulation and Structured Materials Conference (OMC2018), OMC4-1 (2018).

〔その他〕

ホームページ等

<http://t-profile.ad.u-fukui.ac.jp/profile/ja.4c5e17e064af41dc.html>

<https://www.u-fukui.ac.jp/wp/wp-content/uploads/viewbook2020.pdf>

6 . 研究組織

該当事項なし。

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。