

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340118

研究課題名(和文)画像共振器による「遅い画像」と「速い画像」

研究課題名(英文)Slow image and fast image in image resonators

研究代表者

富田 誠 (Tomita, Makoto)

静岡大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70197929

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円、(間接経費) 4,380,000円

研究成果の概要(和文)：光パルスビームの断面にエンコードした2次元画像が画像共振器を伝播する様子を調べた。フーリエ解析によると、画像の空間的、時間的なバンド幅が画像共振器の振幅位相透過関数の持つバンド幅よりも十分に狭い場合には画像は共振器を大きな変形を受けることなく通過し、共振器の急峻な分散関係を反映して画像は時間的に遅れる、あるいは進む、つまり「遅い画像」や「速い画像」を作り出す。弱結合ならびに強結合条件下の単一共振器、あるいは、結合共振器誘起透明化窓において、「遅い画像」、「速い画像」を実験的に実証した。

研究成果の概要(英文)：We investigated the propagation of transverse two-dimensional images encoded on optical pulses through image resonators. The Fourier method shows that as long as the spatial and temporal Fourier components of the image were within the bandwidth of the amplitude and phase transfer functions, image can propagate through the resonator successfully and the relevant steep dispersion of the cavity can yield delayed or advanced images, that is, "slow image" and "fast image". The slow and fast images were experimentally demonstrated in the single stage image resonator on the over- or under-coupling condition, as well as in an induced transparency frequency window of a coupled-image-resonator.

研究分野：原子・分子・量子エレクトロニクス

科研費の分科・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：遅い光 速い光 画像 共振器 回折

1. 研究開始当初の背景

近年、「速い光」、「遅い光」など、光の速度を制御する研究が進められている。これらは系の分散を制御し、特殊な光の伝播状態を実現させるものである。「速い光」は、真空中の光速度よりも速くパルスが伝播するもので、特殊相対性理論における因果律や情報速度の観点から興味もたれている。一方、「遅い光」は、著しく遅い光の伝播を実現しようとするもので、冷却された Na 原子中の超低速度 17m/s の光パルス伝播や、電磁誘導透過(EIT=Electromagnetically Induced Transparency)を示す原子系などで観測されている。

我々のグループではこれまでに、微小球共振器を用いその系での分散制御によって「速い光」と「遅い光」を実現してきた。この従来の研究では、誘電体ナノ構造として、非晶質ガラスによって極めて真球度の高い微小球(直径数 $10\ \mu\text{m}$)を作製し、その急峻な周波数特性を利用して、いわゆる「速い光」と「遅い光」を作りだすことに成功している。また、結合した微小球を用いることで EIT に類似した現象、すなわち、結合共振器誘導透過 (CRIT=Coupled Resonator Induced Transparency) を、全光学系で実現することに成功している。

2. 研究の目的

さて、従来の光の伝播制御の研究では、断面がきれいなガウス形(=横シングルモード)をしたビームのみが用いられてきた。本研究では、この横モードの中に画像を埋め込み、単一の共振器の中に 2 次元画像を閉じ込め、共振器固有の周波数分散を利用して画像の伝播時間を制御する新しい試みを進める。すなわち、「速い画像」、「遅い画像」を世界で初めて実現する。さらに、2 つの共振器を結合させた結合画像共振器を構築し、画像を伝播させることを試みる。これは、上記の原子

系における EIT や微小共振器における CRIT を画像領域に拡張したものとなる。2 つの共振器の結合の強さを制御することで、分散をコントロールすることが可能である。

画像を共振器構造によって制御することは、基礎物理学的に新しい取り扱いが必要ならばだけでなく、実現された場合は応用上もさまざまな意義があると考えている。全光学的手法で画像を遅延させる技術は、(1) 画像処理に必要な不可欠な位相情報も保存し、画像処理などへ高い可能性を有している。また、(2) 画像共振器は、単一光子レベルで画像の情報を保持することができる。保持された画像情報は、量子コンピューターと同様な原理で、適切なユニタリー操作と検出基底の選択によって、単一光子レベルでの画像処理能力をもつ可能性がある。

3. 研究の方法

画像を閉じ込める画像共振器としてはいくつもの構造を考えることができる。最も簡単な構造として 2 枚の高精度反射率鏡を配置した Fabry-Perot 共振器を対象にして研究を開始した。通常の透過型配置のほか、入射面から反射する光を利用する反射型配置も利用する。従来の単一モードのレーザービームの透過特性と比較して、画像伝播特性には回折の影響を明らかにすることが重要である。この結像特性を解析する方法として 2 つのアプローチをもちいる。(1) 「実空間」アプローチでは、2 次元画像を画素に分解し、各要素からの光を球面波の足し合わせとしてフレネル回折の原理を用いて解析し、レンズ系の結像理論にもちいられる光学伝達関数 OTF(Optical Transfer Function)と類似した手法で解析する。(2) 一方、「波数空間」アプローチでは、画像を波数フーリエ成分によって表現し、伝播特性を波数と周波数の 2 次元で解析する。

単一の画像共振器と比較してより高度な機

能を持った系として2つの画像共振器が結合した結合共振器も研究対象として取り上げる。さまざまなバリエーションの中で、科費の期間内では、Fabry-Perot 共振器の第二面鏡の背後にさらに共振器を配置し、2つの Fabry-Perot 共振器をタンデムに配列した構造を考える。この配置では、第1の共振器のみを伝播する光と、第2の共振器もあわせて伝播する光の干渉によって CRIT 型のスペクトル構造が作り出されることが期待できる。この結合共振器構造では、画像は原理的に減衰も増幅も、波形の変形もなく第2の共振器の Q 値で決まる大きな時間遅延をもって透過してくると予想される。さらに、原子系での EIT 現象を利用した画像の凍結と同様に2つの共振器の結合をダイナミック（共振器の Q 値/ ω : 共鳴周波数）、よりも速い動作）に変化させることができれば画像の凍結も実現できると考えている。

4. 研究成果

(1) 理論解析

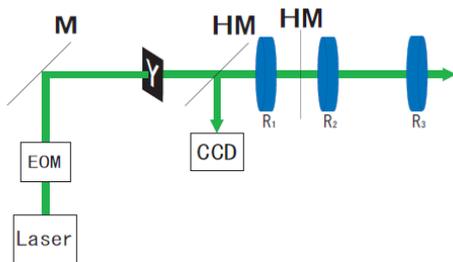


Fig.1 画像共振器の概念図

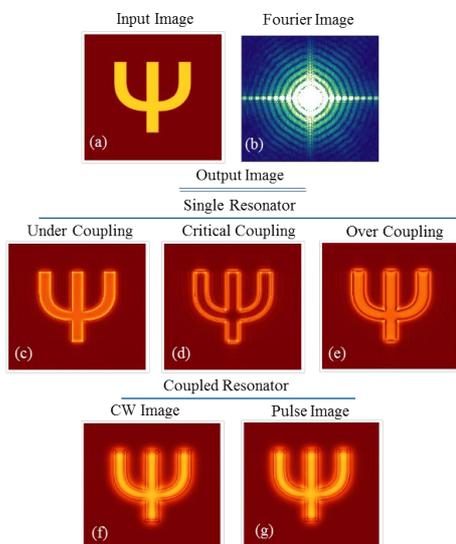


Fig.2 画像共振器を透過した2次元画像のシミュレーション結果

Fig.1は画像共振器の概念図である。平行に設置した2枚のミラーにパターンマスクを通したレーザー光を入射させ、CCD カメラを用いて反射光、および透過光の観測を行う。R1とR2から構成される1段の画像共振器を以下では単一画像共振器とよぶ。また、R3を追加し、2つの画像共振器を直列に配列した配置を結合画像共振器とよぶ。

Fig.2 は画像共振器を透過する2次元画像を伝達関数を用いて計算した結果である。Fig.2(a)は $x-y$ 領域における入射画像で、ここでは、「 Ψ 」の文字を例に取ってある。Fig. 2 (b)はこの入射画像のフーリエ変換である。Fig.2(c)、(d)、(e)は反射型の配置に置いて under coupling, critical coupling, over coupling 条件下での透過画像である。2次元透過画像について以下の特徴が観測される。under coupling 条件下では画像のエッジ領域が強く現れている。このエッジ増強効果は臨界結合でもっとも顕著に表れている。また、over coupling 条件下では画像の周りに回折現象によるハロー像が現れている。Fig.2(f)、(g)は結合画像共振器を透過した2次元画像のシミュレーション結果である。このシミュレーションでは入射ビームとしては連続光と半値全幅 25 ns、のパルスビームを仮定している。画像の持つ時間的、空間的バンド幅が画像共振器のバンド幅内に収まっている条件では、2次元画像は大きく変形することなく画像共振器を通過してくることが確認できる。

(2) 実験結果

単一画像共振器

Fig.3 は画像共振器を伝播した2次元画像を観測した実験結果である。Fig.3 の (a),(b),(g),(h) は透過画像、(c),(d) は Over coupling 条件下での反射画像、(e),(f)は Under coupling 条件下での反射画像である。透過画

像は、共鳴時に明るくなり、反射画像は非共鳴時に明るい。そして、理論解析で議論した回折現象によって現れる画像の特徴 (Fig.2) もよく現れていることが観測できる。ここで、Fig.4 の(g),(h) は、(a),(b) に比べ小さいマスク($\times 0.5$)を使っている。このとき、回折効果が大きくなっていることが分かる。また、Fig.4 の(i) は、ICCD カメラを使いフォトンカウンティングモードで観測した画像である。この実験は、画像共振器が潜在的には画像情報を単一レベルで共振器に閉じ込めることを示す。

Fig.4 は画像のある1点の光を光ファイバーで抽出して時間分解観測した結果である。実線は非共鳴時、点線は共鳴時のパルスを規格化したものである。また、横軸は通過時間で、非共鳴時の時間を0とした。ここで、(a) は、反射画像の時間分解の結果で、赤点線は Under coupling 条件、青点線は Over coupling 条件である。(b) は透過型の結果である。観測された時間遅延は、 Under coupling 条件下で -6.0 (ns)、すなわち画像が現れる時刻が 6.0 (ns)進んでおり「速い画像」が観測されている。Over coupling 条件下で $+8.1$ (ns)、すなわち画像が現れる時刻が $+8.1$ (ns)遅れており「遅い画像」が観測されている。

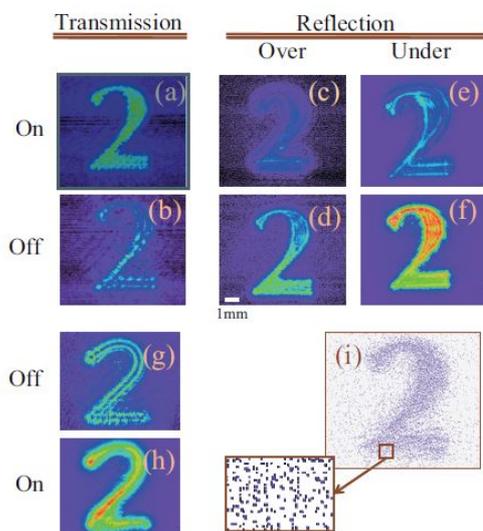


Fig.4 画像共振器を伝播した2次元画像を観測した実験結果

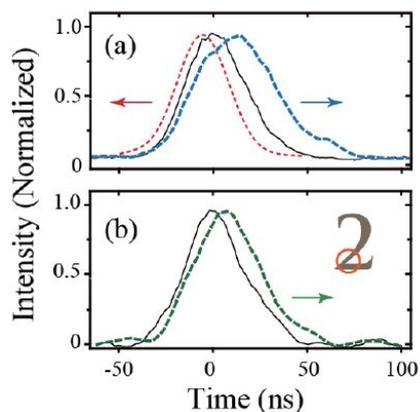


Fig.4 画像共振器を伝播した画像を時間分解測定した実験結果。

結合画像共振器

Fig.5 は、結合画像共振器からの反射スペクトルである。Fig. 5(a)を見ると共鳴時、つまりディップ中に急なピークが観測されることが分かる。Fig. 6 の(a),(b)における透過ピーク結合共振器誘導透過(CRIT)を示している。このときの2つの共振器の離調周波数を $\Delta\nu = 0$ としている。(a) $R2 = 0.90$ から(b) $R2 = 0.80$ に変化させると誘導透過領域が広がる。このとき、分散曲線の傾きがなだらかになる。つまり、 $R2$ を変えることで遅延時間を制御できることになる。また、(c),(d) では、 $\Delta\nu \neq 0$ のとき誘導透過中に左右非対称なピークが現れる。これは、Fano 効果によるものと考えられる。Fig.6 の(A), (B), (C), (D)は、それぞれ Fig. 6(a) の各 A,B,C,D の位置での画像である。A は非共鳴周波数、B は透過前の最小時周波数、C は誘導透過中心時周波数、D は透過後の最小時周波数における画像である。Fig.5 (a) の B,D の周波数領域において、反射画像は暗い。しかし、Fig.6 の C では誘導透過により、非共鳴時 A の本来の明るさを取り戻していることが分かる。

Fig.7 はFig.6における画像のある1点からの光を光ファイバーで抽出して時間分解観測した結果である。実線は非共鳴時、点線は共鳴時のパルスを規格化したものである。緑の波線は非共鳴時 [Fig. 5(a)の A] 赤の実線

は共鳴時 [Fig. 5(a) の C] のパルスである。すなわち、この結合共振器構造では、誘導透過窓の中で画像は原理的に減衰も増幅も、波形の変形もなく第2の共振器の Q 値で決まる時間遅延をもって透過してくる「遅い画像」が実現されている。

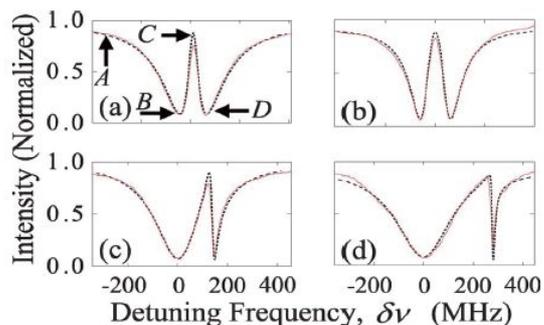


Fig.5 結合画像共振器の CRIT 型のスペクトルを測定した実験結果。

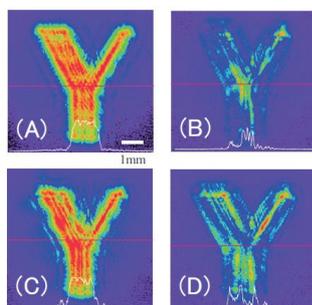


Fig.6 結合画像共振器を伝播した 2 次元画像を観測した実験結果

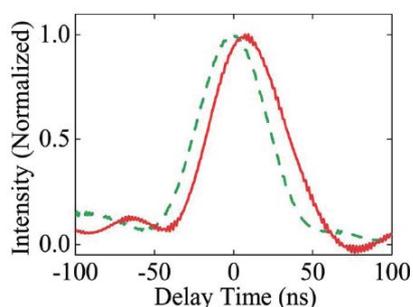


Fig.7 結合画像共振器を伝播した画像の時間分解測定した実験結果。

(3) まとめ

単一画像共振器、結合画像共振器を用いて、「速い画像」と「遅い画像」を実現した。こ

れにより、位相情報を持ったまま画像の時間制御が可能となる。今後の展望としては、共振器内を通過する画像をファイバプレートで制限し、回折現象を抑え、導波路型の並列共振器構造による「速い画像」「遅い画像」実現や量子画像のもつ将来的な可能性も探索していくことが考えられる。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 16 件)

“Direct observation of a pulse peak using a peak-removed Gaussian optical pulse in a superluminal medium”, Makoto Tomita, Heisuke Amano, Seiji Masegi and Aminul I. Talukder,, **Physical Review Letters** 112, 093903 (2014).

”Transition from an optical precursor in coupled-resonator-induced transparency to coherent energy exchange in Autler-Townes splitting”, Tohru Oishi, Ryuta Suzuki, Aminul I. Talukder, and Makoto Tomita, **Physical Review A** 88, 023847, (2013)

“Inverted coupled- resonator-induced transparency”, Tohru Oishi, and Makoto Tomita, **Physical Review A** 88 13813(2013)

“Propagation of the centroid of Poynting vector in transversely phase modulated optical beams in spatially dispersive media”, A.I. Talukder, Tsuyoshi Matsuo, Takahiro Matsumoto and Makoto Tomita, **Physical Review A**, 88, 063842 (2013).

“Causal propagation of bending nonanalytical points in fast- and slow-light media“, Ryuta Suzuki and Makoto Tomita, **Physical Review A**, 88 ,053822 (2013).

“Perfect blackbody radiation from a graphene nanostructure with application to high-temperature spectral emissivity measurements”, Takahiro Matsumoto, Tomoaki

Koizumi, Yasuyuki Kawakami, Koichi Okamoto, and Makoto Tomita, **Optics Express**, Vol. 21 Issue 25, pp.30964-30974 (2013).

"「速い光」、「遅い光」と群速度”、富田誠、**日本物理学会誌**(解説)、8、516-523 (2013) .

“Optical precursors in coupled-resonator-induced transparency”, Tohru Oishi, Ryuta Suzuki, Parvin Sultana, and Makoto Tomita, **Opt. Lett.**, 37, 2964-2966 (2012) .

“Necessary conditions for two-lobe patterns in field emission microscopy”, Yoichiro Neo, Takahiro Matsumoto, Makoto Tomita, Masahiro Sasaki, and Hidenori Mimura, **Japanese Journal of Applied Physics**. 51 115601(2012). .

“Fourier analysis of slow and fast image propagation through single and coupled image resonators”, Parvin Sultana, Takahiro Matsumoto, and Makoto Tomita, **International Journal of Optics** Article ID 960985 (2012). (9pages) .

“Causal information velocity in fast and slow pulse propagation in an optical ring resonator”, Makoto Tomita, Hiroyuki Uesugi, Parvin Sultana, and Tohru Oishi., **Physical Review A** 84, 043843 (2011). .

“Slow optical pulse propagation in an amplifying ring resonator”, M. Tomita, T. Ueta, and P. Sultana, **Journal of Optical Society of America B**. 28, 1627 (2011). .

”Complex-number asymmetry parameters of the optical Fano effect in ring resonators”, Makoto Tomita and Hideo Ebihara, **Optics Communications**, 24, 5513-5516 (2011). .

“Revealing real images of cloverleaf pattern emission sites by using field ion microscopy”, Yoichiro Neo, Takahiro Matsumoto, Makoto Tomita, Masahiro Sasaki,

Toru Aoki, and Hidenori Mimura, **Journal of Vacuum Science and Technology**, B 28, C2A1 (2010) .

“Delayed optical images through coupled-resonator-induced transparency”, Parvin Sultana, Akira Takami, Takahiro Matsumoto, and Makoto Tomita, **Optics Letters**, (2010) .

”Advanced and delayed images through an image resonator”, Makoto Tomita, Parvin Sultana, Akira Takami, and Takahiro Matsumoto, **Optics Express** 18, 12599-12605 (2010) .

[学会発表](計9件)

”Advanced and delayed optical images through single and coupled image resonators”, Parvin Sultana; Takahiro Matsumoto; Makoto Tomita CLEO: 2011 in Baltimore, Maryland. JTuI34 USA (2011)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

富田 誠 (TOMITA MAKOTO)

静岡大学・理学研究科 教授

研究者番号 : 7 0 1 9 7 9 2 9

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし