

令和 2 年 7 月 12 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02213

研究課題名（和文）波長変換の任意操作による超広帯域単一周波数波長可変レーザーの開発

研究課題名（英文）Manipulation of nonlinear frequency conversion processes and its application to development of a single frequency widely tunable laser

研究代表者

桂川 眞幸（Katsuragawa, Masayuki）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：10251711

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,700,000円

研究成果の概要（和文）：非線形光学過程に関与する（一般に異なる複数の周波数を持つ）電磁場間の相対的な位相関係を任意の相互作用長において任意の値に操作することで拓かれる非線形光学の新しい可能性について、理論的な基盤を構築し、さらに、実験で原理実証した。真空紫外域において応用レベルで使用可能なレーザー技術確立のための土台を築くことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

60年の歴史を持つ非線形光学の体系に、非線形光学過程を様々な形態に人為的に操作するという質的に新しい可能性を付与することができた。また、真空紫外域に実用レベルで利用可能な単一周波数波長可変レーザー技術構築するための土台をつくることができた。真空紫外域は光と物質の相互作用が極めて強い波長域である。この研究で築かれた成果を土台として、原子核遷移を用いた次々世代の光周波数標準や反水素のレーザー冷却など魅力的な学術的展開が展望される。

研究成果の概要（英文）：We showed a conceptually novel idea that nonlinear optical process could be manipulated in a variety of ways by controlling the relative phases among the electromagnetic fields relevant to its nonlinear optical process. We established such basis theoretically and experimentally. We also opened a way to build a new laser technology, that is, single-frequency widely tunable laser in the vacuum ultraviolet region.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：非線形光学 非線形波長変換 真空紫外レーザー

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

非線形光学過程がそこに関与する(一般に異なる周波数を持つ)電磁場間の相対的な位相関係に強く支配されることは、約60年前、1961年に“非線形光学”という新たな学問体系が拓かれた当初より、その最初の記述から表現されてきたことではあるが、現在に至るまで、その相対位相関係を人為的に操作する自由度を組み入れた時に、非線形光学過程にどのような可能性が開かれるかということについては、ほとんど研究されてこなかった。

また、非線形波長変換技術は、コヒーレント光が使用可能な波長域を拡大する有効な手法として長年研究され、実際に有用なレーザー技術として多方面で利用されてきたが、その波長域は透明な固体が存在する波長域(紫外から近赤外)にほぼ限定されてきた。透明な固体が存在しない、真空紫外域(<200 nm)や中赤外域には、応用レベルで有用な波長変換技術はほとんど存在していなかった。

2. 研究の目的

非線形光学過程に関与する(一般に異なる周波数を持つ)電磁場間の相対的な位相関係を人為的に操作することで、非線形光学過程に新しい可能性を付与する学理を構築し、また、実際にそれを実現する光技術を確立すること、さらに、その基盤の上に、その光技術を高分解能レーザー分光をおこなうことが可能な質を持つ、“真空紫外から中赤外に渡る超広帯域をカバーする単一周波数波長可変レーザー技術”へと発展させることを目的に4年間の研究プロジェクトを進めた。

3. 研究の方法

非線形光学過程は、そこに関与する(一般に異なる周波数を持つ)電磁場間の相対的な位相関係に強く支配される。この相対位相を、非線形光学現象が時間発展する過程で、任意の相互作用長において、任意の相対位相関係に人為的に操作することで、目的の非線形光学現象を量子効率が1に近い効率で実現する非線形光学過程が可能なることを理論的に明らかにし、かつ、それを基にそれを実証する原理検証実験をおこなう。

具体的には、パラ水素分子気体を非線形光学媒質とする高次の誘導ラマン散乱光発生過程を対象として、その非線形光学過程が時間発展する過程に人為的な相対位相操作を組込むことで、特定のラマンモードにエネルギーが100%集中した非線形光学現象を実現できるかどうかを試みた。

4. 研究成果

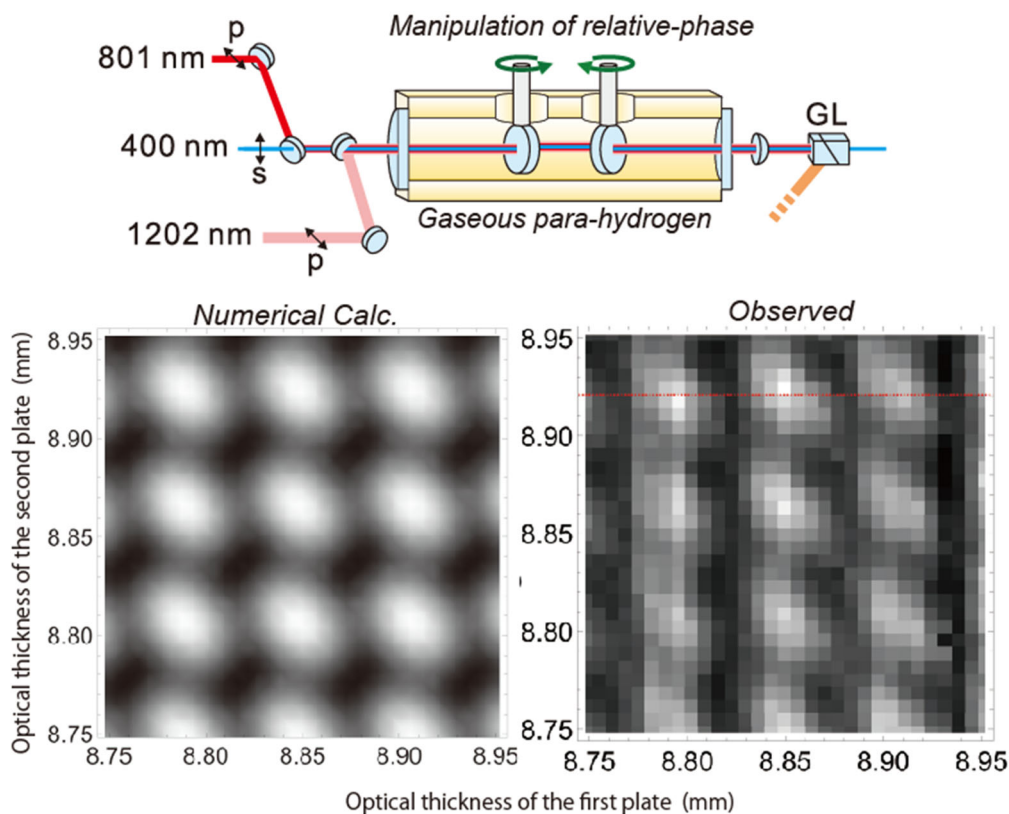


図 1. 特定のラマンモードへのエネルギーの選択的集中に関する原理実証実験、媒質中に挿入した2枚の分散プレートの厚み(縦軸、横軸)に対して、1次のアンチストークス光(白色が発生強度が高いことを示す)の発生が、ほぼ理論通りに制御されている。

パラ水素分子気体を対象物質とする高次誘導ラマン散乱過程において、選択的に特定のラマンモードへ発生エネルギーを集中させるための理論的な枠組みを構築し、それを基に、系統的な数値計算実験をおこなった。数値計算の結果は、8 次のアンチストークスモードに到ってもほぼ100%のエネルギー集中が可能なが示された。

また、この構築された理論的な枠組みと数値計算結果を指標に原理検証実験を実施した。高次誘導ラマン散乱光系列の発生過程の初段、つまり、1次のストークス光、アンチストークス光の発生過程がほぼ理論通り制御できることを実験で確かめた。さらに、その結果を真空紫外単一周波数波長可変レーザー技術へと発展させるために、高次過程へ拡張する実験を段階的に進めた。

図1は、原理検証実験をおこなった実験セットアップの概略と、得られた代表的な結果を示している。非線形光学媒質であるパラ水素気体を充填したセルに二枚の分散プレート挿入し、その厚みを精密に制御することで、一次のストークス光、アンチストークス光の発生に関与する異なる周波数間の位相関係を制御した。その下の図は、一次のアンチストークス光の発生強度が、挿入した二枚の分散プレートの厚みで制御される様子を示している。白色が、アンチストークス光が高い強度で発生されたことを表す。理論的に予想される振る舞いと、よく一致した実験結果が得られた。

この成果をもとに、さらに高次の誘導ラマン散乱光系列の発生においても、同様の制御が可能なることを実証する実験を進めた。この研究の遂行には、難易度の高い実験技術の開発が必要であったが、このプロジェクト内でそれを達成し、実際に ± 3 次までの高次誘導ラマン散乱光を対象とした、特定のラマンモードへのエネルギーの選択的集中実験を実施した。図2, および図3は、それぞれ、開発した液体窒素温度下で任意位相制御可能なラマンセルの写真と、それを用いて実施した高次誘導ラマン散乱光へのエネルギーの選択的集中実験の典型的な結果である。



図2. 開発した、液体窒素温度下で任意位相制御可能なラマンセル。

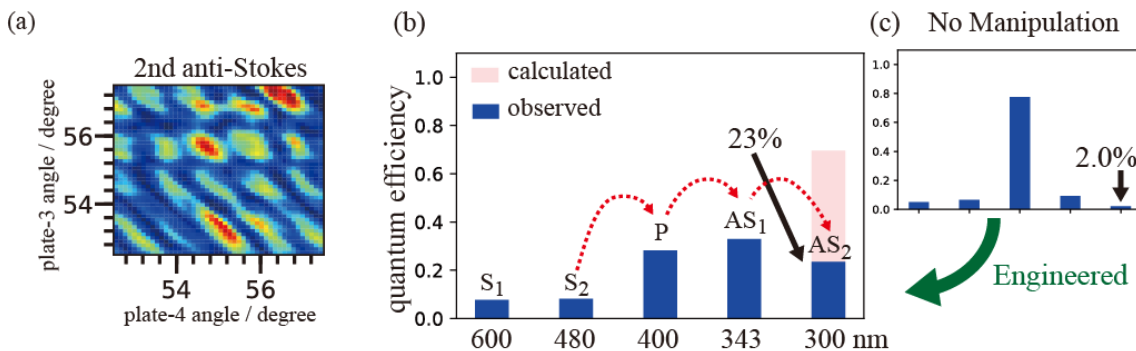


図3 +2次アンチストークス光へのエネルギー集中を試みた実験. 外部から何も位相操作を加えない場合(2%)に比べて10倍以上のエネルギー集中が実現されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Chiaki Ohae, Jian Zheng, Kimihito Ito, Masaru Suzuki, Kaoru Minoshima, and Masayuki Katsuragawa	4. 巻 26
2. 論文標題 Tailored Raman-resonant four-wave-mixing process	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 1452 1460
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1364/OE.26.001452	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 M. Katsuragawa and K. Yoshii	4. 巻 95
2. 論文標題 Arbitrary manipulation of amplitude and phase of a set of highly discrete coherent spectra	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 33846
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.95.033846	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 4件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 M. Katsuragawa, C. Ohae, J. Zheng, W. Liu, M. Suzuki, and K. Minoshima
2. 発表標題 Tailored nonlinear optical frequency conversion; Toward high resolution spectroscopy in the vacuum ultraviolet wavelength region
3. 学会等名 the International Conference on Ultrafast Optical Science (UltraFastLight) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Katsuragawa, C. Ohae, J. Zheng, C. Zhang, T. Gavara, M. Suzuki, and K. Minoshima
2. 発表標題 Linear and nonlinear optics with a highly-discrete optical frequency comb
3. 学会等名 The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Katsuragawa, J. Zheng, C. Ohae
2. 発表標題 Designability of optical processes composed of discrete spectrum
3. 学会等名 47-th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics, PQE-2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----