

科学研究費助成事業(学術研究助成基金助成金)研究成果報告書

平成25年 月 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656053

研究課題名(和文) 中空微細構造光ファイバー分子光学変調器の開発

研究課題名(英文) Development of molecular optical modulator based on hollow-core microstructured optical fiber

研究代表者

財津 慎一(ZAITSU SHINICHI)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：60423521

研究成果の概要(和文)：

本研究では中空フォトニックバンドギャップ(HCP)ファイバーを用いたテラヘルツ帯周波数での動作を目指した分子光変調器を作製し、その性能を評価した。新たに設計・構築した耐圧性 HCP ファイバーセルに水素分子を封入し、高繰り返し超短パルスレーザーによって、コヒーレント分子運動を励起した。この励起された分子を、連続発振レーザー光でプローブし、本手法による分子光変調の実現可能性を評価した。分子光変調を実現するためには、より大きな相互作用長が必要であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：

A molecular optical modulator operating at a frequency in the terahertz region based on a hollow-core photonic band gap (HCP) fiber was designed and its performance was evaluated. Pressurized hydrogen molecules were injected in the newly designed pressure-resistant HCP fiber cell and coherent molecular motions of them were excited by a highly repetitive ultrashort-pulse laser. The feasibility of molecular optical modulation by this scheme was evaluated by probing the coherent molecular motion using a continuous-wave laser. It is found that a longer fiber length is necessary for efficient interaction between molecules and a laser beam in the HCP fiber.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：非線形光学

1. 研究開始当初の背景

光変調器とは、光の特性を周期的に変化させるためのデバイスであり、高速光通信や基礎科学の広い分野で利用されている。従来の電気光学効果を利用した光変調器の変調周波数は 10GHz 程度であり、最近報告されているグラフェンを用いた最新の高速度変調器でも 100GTHz 程度が限界であった。

分子の振動・回転運動をコヒーレントに重

ね合わせた量子状態は「波束」として記述することができる。励起された量子波束は、巨視的に見ると分極率の時間的な変化として発現する。従って、この量子波束を光波と相互作用させることによって、分子の運動周波数での光波の位相・振幅を変調することができる。分子の運動周波数は、テラヘルツ領域に存在するので、この新しい原理を利用した「分子光学変調器」は、これまでにない高周

波数領域での光波変調を実現する新しいデバイスとして、多くの研究者の注目を集めている。

これまで分子のコヒーレントな運動を励起するためには、分子の運動周期よりも短い時間幅を有する超短パルス光(~30fs)が用いられてきた。また、その励起効率は励起パルス光のエネルギーで決まるために、数 10 μ J まで増幅されたパルス光を使用する必要があった。これに対して、ナノ秒パルスによる 2 波長励起法では、量子干渉効果の一種である Electromagnetically Induced Transparency を利用することによって、最大値近くまでの分子コヒーレンス励起が実現された。しかし、この手法においても励起光パルスエネルギーとしては、数 10mJ 以上が必要であった。

2. 研究の目的

本研究提案では、このような分子光波変調法を、より多くの種類の光源に対して適用可能なデバイスを開発し、分子光波変調法の適用範囲の飛躍的な増大を最終的な目標としている。これまでこの手法は、増幅された時間幅 100 fs 程度の高エネルギー超短パルスレーザーのみに適用され、その応用は極めて限定されていた。本研究では、低パルスエネルギーのモード同期レーザー、さらには、連続発振レーザーに対して、コヒーレント分子運動による光波変調を実現する。

本研究では、これまで実現されてきた分子光波変調法を、光源の種類を選ばず適用可能にするという目標を設定した。この目標を達成するための本研究最大の新規性は、これまでに利用されてきた方法とは本質的に異なるアプローチを利用する点に存在する。そのためのキーとなるデバイスが「微細構造中空光ファイバー」である。従来の手法が、自由空間中に配置した分子群に対して励起光との相互作用を誘起させるシンプルな方式であったのに対し、この新デバイスを利用すると、フォトニックバンドギャップ構造に囲まれたこれまでとは異なる相互作用場において、分子コヒーレンスを励起することが可能となる。

3. 研究の方法

[STEP I] 中空微細構造ファイバーを用いた分子光学変調デバイスの作製

本研究で構想する分子光変調器を実現するためには、①微細構造光ファイバー中に 10 気圧程度の気体分子を充填し、②その状態を封じ切りで保持し、③ファイバーコアに励起光源と高効率にカップリング可能なデバイス、が必要となる。この目的を達成するために、本研究で作製する実験装置を図 1 に示す。本装置の特徴は、ファイバーを保持するため

の 2 重管構造を組み込んだフランジ付き容器に、結合効率の低下を抑制する厚さ 1mm の薄型サファイヤ窓を設置出来ること、及び、ファイバー被覆と容器のシールを保証するために、ガスクロマトグラフィーで利用されるベスベルフェラルを転用する点である。これらの工夫により、結合効率 70% を超える分子充填中空微細構造光ファイバーセルを構築する。

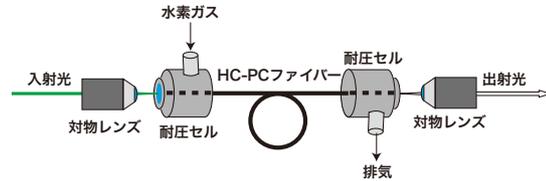


図 1. 中空微細構造光ファイバーセルの構成

[STEP II] モード同期レーザーパルス光による分子コヒーレント運動の励起

分子コヒーレンスを生成させるためのターゲット量子準位としては、水素(オルソ水素:パラ水素=3:1)の回転準位を用いる。この媒質を用いれば、オルソ水素(17.6 THz)、および、パラ水素(10.6 THz)の回転周波数に一致する周波数での光波変調を実現することができる。気体水素を STEP I で完成させたファイバーセルへ最大 10 気圧充填する。ここでは励起光源として、モード同期チタンサファイヤレーザー(既設、パルス幅: 30 fs、中心波長: 800 nm)を用いる(図 2 参照)。この励起光源は、分子回転の 1 周期よりも時間幅が短いために、分子運動は衝撃的(インパルス)に励起される。17.6THz、10.6THz の 2 種類の分子コヒーレンスを同時に励起することで、それらを重ね合わせた分子量子波束を生成させる。

生成された量子波束は偏光ビームスプリッターによって結合された連続発振光(波長可変連続発振チタンサファイヤレーザー: ライン幅: <100kHz、出力: ~1 W、波長範囲 700nm ~900nm)によってプローブする。このプローブ光の変化をマルチチャンネル分光器、および光スペクトラムアナライザによって測定することで、コヒーレント分子運動による光波変調特性について評価を行う。

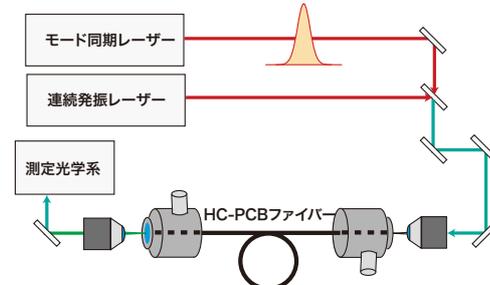


図 2. HC-PCB fiber での分子光波変調観測系

4. 研究成果

4.1 耐圧性ファイバーセルの設計

図3.に耐圧性ファイバーセルを示す。HCP-ファイバーに圧力を印加し、HCP-ファイバー内に水素を充填させるために石英窓付きの耐圧性ファイバーセルを作製した。

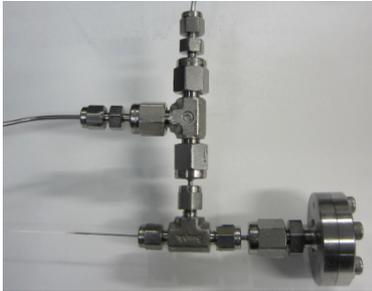


図3. 高耐圧 HCP ファイバーセル

この装置には、高圧下で HCP-ファイバーにレーザー光を高効率にカップリングさせるための二つの特徴がある。ファイバーコアを保持するために二重構造を組み込んだフランジ付き容器に結合率低下を抑制する 1 mm の薄型石英窓を設置した。また、ファイバー接合部でのファイバー被覆と容器のシールを保証するために、ガスクロマトグラフィーで利用されるベスペルフェラルを使用した。この二つの特徴により高効率でのレーザー光カップリングを目指した。

この耐圧性ファイバーセルを一組作製し、一方を入射部、他方を射出部とした。入射部と射出部のファイバーセルを HCP-ファイバーにより接続し、入射部のファイバーセルを真空にした後、射出部のファイバーセルから水素を封入することにより、ファイバーセル全体に圧力をかけたまま水素を充填させた。図4に入射部の時間に対する圧力変化を示す。

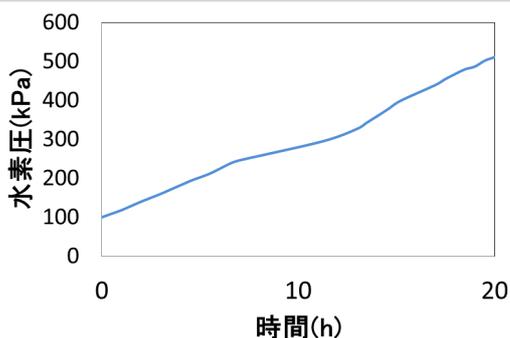


図4. 入射部の時間に対する圧力変化

射出部の水素圧は 125 kPa/h のペースで減少していた。そのため 30 分ごとに射出部のセルの水素圧を 1000 kPa に保つように調整した。入射部の水素圧は、20 kPa/h のペースで増加していた。入射部の水素圧を 20 時間で 535 kPa まで上昇させることができた。このままのペースで増加すると仮定すると、入射

部のセルを目的の 1000 kPa に保つためには 50 時間程度かかることになる。しかし、実際は 2 つのセル間の圧力が減少すると圧力増加率も低下すると考えられるので 50 時間以上の時間がかかると予想される。現状では射出部のセルからのリークがあるので圧力増加率が抑制されていると考えられる。そのため、ファイバーセル全体のリークを減少させることにより圧力増加率が増加すると考えられる。したがって、射出部のリークを抑えることができれば圧力増加率が増加し、より短時間でファイバーセル全体を 1000 kPa で保持することができると考えられる。

4.2 フェムト秒レーザー光によるコヒーレント分子運動の励起

コヒーレント分子運動による分子光変調を達成するために、分子運動の準位と同等のスペクトル帯域を有する超短パルス光を用いた。そのための図5に実験の光学系を示す。

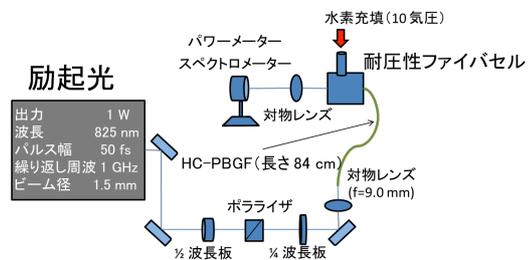


図5. 実験光学系

この光学系では、1/2 波長板により直線偏光の入射光の偏光面向きを連続的に変換させている。ポラライザ (PBS 結晶) の前に 1/2 波長板を置くことにより、単色の直線偏光レーザー光を可変比率で分岐することができる。1/2 波長板とポラライザを組み合わせることにより、モード同期レーザー光の出力調整を行った。また、1/4 波長板を用いることにより直線偏光を円偏光に変換させた。直線偏光を円偏光に変換することにより、水素分子運動のうち回転運動を励起させやすくしている。対物レンズによりレーザー光を集光し HCP-ファイバーにカップリングさせた。対物レンズによるレーザー光の集光は次の(1)式による。

$$d = 4rfM^2 / (pD) \quad (1)$$

r : レーザーの波長 (nm)、f : レンズの焦点距離 (mm)、D : 入射ビーム径 (mm)

この式によると入射レーザー光の内径 1.5 mm、焦点距離 9.0 cm、20 倍の対物レンズを用いた場合の集光ビーム径は 6.3 μm になる。これは HCP-ファイバーのコア径 8 μm に対し十分にカップリングできるビーム径である。

今回の実験ではレーザー光入射光側にファイバーセルを設置せずにレーザー光射出光側のみにファイバーセルを設置した。図 6

に入射光のスペクトルを、図 7 に HCP-ファイバー中で水素分子と相互作用した後の、出射光のスペクトルを示す。

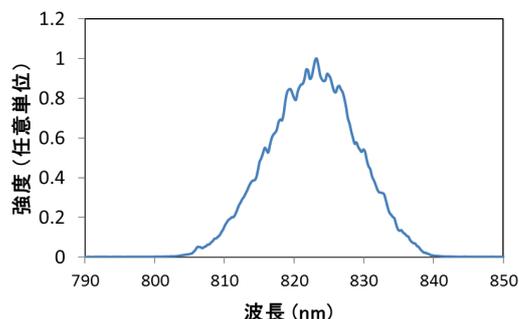


図 6. 入射レーザースペクトル

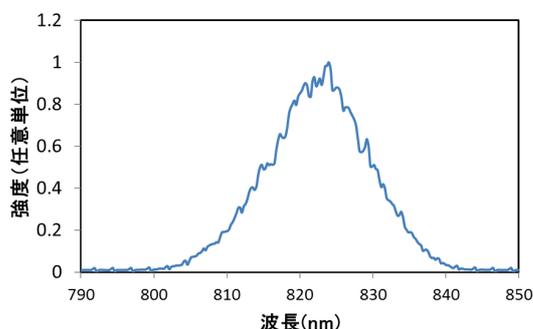


図 7. 出射レーザースペクトル

入射レーザー光の出力が 980 mW に対し、HCP-ファイバ出射レーザー光出力は 144 mW であった。ファイバー入射光に対するファイバー出射光の割合は 15% であった。入射光と出射光でのスペクトル形状に関する大きな変化は見られなかった。これは入射レーザー光によって水素の分子運動が十分に引き起こされていないことが原因だと考えられる。この要因として、①入射側に耐圧セルを取り付けることができなかつたためコア中に十分な水素分子を充填させることができなかつた、②HCP-ファイバーの長さが短く相互作用長が十分でなかつた、③HCP-ファイバーへの結合効率が小さかつた、などが考えられる。①では入射部のファイバーのセルは完成しているが、耐圧性ファイバーセルをつけた状態での HCP-ファイバーとレーザー光のカップリングが困難であつたため入射部のファイバーセルをつけた状態でのカップリングは行っていない。カップリングが困難であつた要因は、20 倍の対物レンズの焦点距離が短い点にある。今回の実験では HCP-ファイバーと対物レンズの距離が 4 mm ほどしかなかつた。HCP-ファイバーに耐圧性ファイバーセルをつけた場合、対物レンズと HCP-ファイバーの距離は 1 cm 程度必要になるので焦点距離の長い対物レンズを準備する必要がある。

②については現在使用している 1 m のファイバーから 10 m 以上のファイバーを用いる。これにより長い距離での分子と光波の相互作用を実現することができる。ただし、光ファイバーを長くした場合伝送損失や群速度分散等の分散の影響が懸念される。しかし、HCP-ファイバーを用いた場合 20 ~ 30 m 程度の長さのファイバーを用いても光の伝送損失や分散の影響が小さく、また光ファイバーの特性としてある程度の塑性は可能である。ファイバーが折れない程度の塑性であれば束にすることができ、実験スペースを確保することができる。③は①と同様に焦点距離の長いレンズを用いるなどの工夫を行うことで対処することができる。また、ファイバーを切断する際、切断面によって結合効率は大きく変化する。そのため、ファイバー専用のカッターによりファイバーの切断を行う。今後、これらの問題を解決することにより、HCP-ファイバー中において十分に大きな水素のコヒーレントな分子運動が誘起できると期待される。

4.3 連続発振レーザーによるコヒーレント分子運動のプロープ

フェムト秒レーザー光によりコヒーレント分子運動を励起させて、CW レーザー光の位相変調を観測した。図 8 に得られたスペクトル波形を示す。

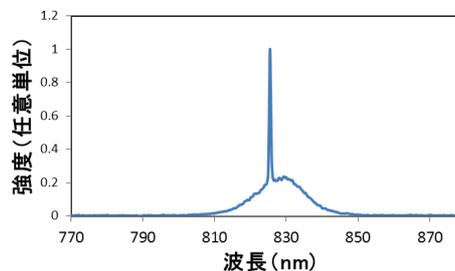


図 8. 連続発振光の被変調スペクトル

得られた波形からサイドバンドの発生は確認できなかった。連続発振光が水素のコヒーレント分子運動により位相変調された場合、水素の回転運動周波数 (17.6 THz) だけ変調される。周波数 825 nm のレーザー光を変調した場合、短波長側 (786 nm) にアンチストークス光、長波長側 (866 nm) にストークス光が発生する。今回の実験ではアンチストークス光、ストークス光どちらも確認できなかった。この要因は、発生したサイドバンドの出力がスペクトルメーターの検出感度以下だつたことが考えられる。サイドバンドを発生させるためには、①HCP-ファイバーとレーザー光の結合効率を上昇させる、②HCP-ファイバー中に高圧で水素を充填させる、③検出器

の感度を上げる、等の工夫を行う。①は励起光のみを入射した場合と同様に焦点距離の長い対物レンズやファイバクターを利用することにより達成できる。②はHCP-ファイバーの両端にファイバセルを取り付け水素を充填させることにより達成できる。そのためには、出射部のファイバセルでの水素の漏れを抑制する必要がある。出射部の漏れ検査はスヌープを吹きかけることや水素ディテクターにより行ったが、これらを用いて検出できる限界が水素の流出量を上回っている場合漏れが発生している場所を特定することができない。そのため、高感度なリークディテクターを準備するなどして対処する。

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 0 件)

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

財津慎一 (ZAITSU SHINICHI)

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号 : 60423521

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :