

中空微細構造光ファイバーを利用した テラヘルツ分子光学変調器の開発

Development of Terahertz Molecular Optical Modulator Based on Hollow-Core Photonic Crystal Fiber

H25助自30

代表研究者 財 津 慎 一 九州大学 大学院工学研究院 応用化学部門 准教授
Shin-ichi Zaitu Associate Professor, Department of applied chemistry,
Graduate School of Engineering, Kyushu University

A molecular optical modulator operating at a frequency in the terahertz region based on a hollow-core photonic band gap crystal fiber (HCPCF) was proposed. The theoretical consideration revealed that the proposed scheme is achievable under feasible conditions of a pump beam power, a length of the HCPCF, and a pressure of molecules introduced in a core of HCPCF. It was also found that an interval time between pulses in a pump pulse train has a critical role to determine the efficiency for the excitation of coherent molecular motion in a HCPCF. Fortunately, the rotational transition of hydrogen ($S_0(1)$) at a pressure of around 1 atm has a dephasing time enough to maintain its molecular coherence against a commercially available mode-locked laser operating at a frequency of 1 GHz. Although the phase mismatch between the fundamental (probe) beam and sidebands or the pump beam affects the molecular modulation process significantly, we expect that it can be optimized by the use of a kagome type HCPCF that has a moderate waveguide dispersion because the phase-matching condition is satisfied under zero-dispersion regime. In the experiment, we tried to excite coherent molecular motions of pressurized hydrogen injected in the newly designed pressure-resistant HCPCF cell by a highly repetitive ultrashort-pulse laser and to probe the coherent molecular motion using a continuous-wave laser. Unfortunately, Raman sidebands as a result of the molecular modulation have not been observed at this time. However, we believe that an appropriate control of the total dispersion of the HCPCF will lead to the modulation frequency of more than 10 THz and it will open a door for excited applications in optical communication, precision physics, and other fields of optical science.

研究目的

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、これまででない高周波数領域で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。

光波変調は、「光の特性を操る」ための基本的な技術である。レーザーを利用したあらゆる分野での応用(分光、分析、イメージング、原子分子物理、光情報処理等)で利用され、レーザー装置の中にも組み込まれて利用されている。従来方法では、応用サイドからの期待に応えるために、非線形光学結晶の電気光学効果を用いた方式が広く研究されてきた。本研究提案で中心原理とする分子量子波束を利用した光波変調法は、これまでの最大変調周波数を3桁以上(10 GHz→10 THz)拡張する技術であり、その実現は当該分野に革新的なインパクトを与えることができる。本方式では、デバイスとして中空微細構造中空ファイバーを利用するので、現在広く利用されている光システムとの整合性が極めて高い。これは高速光通信などへの応用を考えた時に特に有利な特徴である。

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。これを実現するためのキーデバイスとして中空微細構造光ファイバー(Hollow-Core Photonic Crystal Fiber: HCPCF)を利用する。この新デバイスを利用し、フォトニックバンドギャップ構造内で微小空間(～数 μm)に光を閉じ込め、かつ、光の進行方向に長い距離(～数10 m)に渡ってラマン活性分子と強く相互作用させることによって、低パルスエネルギーのモード同期レーザー、ナノ秒パルスレーザー、さらには、連続発振レーザーに対して、分子量子波束による光波変調を目指す。

概 要

1. 理論的検討

分子運動の周波数より短い時間幅を有する

超短パルス光によって励起された分子のコヒーレント運動の振幅 Q_0 は、分子運動の周波数を Ω とすると、 $Q_0 = 2\pi / Mc\Omega (\partial\alpha / \partial Q) W$ の様に表され(ここで、 M は分子の実効質量、 $\partial\alpha / \partial Q$ は分子運動に対する分極率 α の変化率)、これより大きなコヒーレント分子運動を励起するためには、エネルギー密度の高い励起パルス W を入射すればよいことが分かる。ここで、 $\beta = 2\pi\omega_i N / c (\partial\alpha / \partial Q) Q_0$ と定義すると、被変調光のスペクトルは、 $|F_i(\Delta\omega)|^2 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |f_i(\Delta\omega - n\Omega)|^2 \cdot J_n^2(\xi)$ として与えられる。ここで、 $\xi = \beta l$ である。また、 $f_i(\Delta\omega) = f_i(\omega - \omega_i)$ は入射したプローブ光のスペクトルである。 $J_n(\xi)$ は n 次のベッセル関数であり、この式は $\Delta\omega$ を中心に対象に周波数間隔 Ω で等間隔に配列するコム状スペクトルを示している。サイドバンド強度を決定付ける ξ は、 $\xi = 4\pi^2\omega_i / Mc^2\Omega (\partial\alpha / \partial Q)^2 \cdot N \cdot W \cdot l$ として与えられる。この式より、分子光波変調によって発生するサイドバンドの強度は、実験によって制御可能なパラメータ N : 分子密度、 W : 励起パルス光エネルギー密度、 l : 相互作用長によって決定されることが分かる。本研究で独自に提案するHCPCFを利用した分子光波変調では、中空キャピラリー(コア径>100 μm 、長さ～1 m)に対して、長い相互作用長(>10 m)と、分子を直径数 μm のコアに充填し、励起パルス光をコアに集中させ、そのエネルギー密度を高めることができることに利点がある。

本研究の最初の目標は、制御可能なパラメータ N 、 W 、 l が、実現可能な妥当な範囲内で、 $\xi = 1$ 程度の光波変調が実現できるかどうかを評価することである。ここでは、変調媒質として水素分子を利用し、その回転準位($S_0(1)$ 、 $J=1 \rightarrow J=3$)のコヒーレンスを適用した分子光変調について検討した。この場合、変調周波数 Ω は水素分子の回転運動の周波数に対応した17.6 THzであり、この変調数波数は、我々が

共振器内位相整合光波変調によって達成した世界最高周波数の値に等しい。励起レーザーパルスの繰り返し周波数は、励起された分子コヒーレンスの緩和との関係で極めて重要なパラメータである。本研究では、繰り返し周波数1 GHzの高繰り返しモード同期レーザーを想定した。HCPCF中を伝搬する励起光、被変調光のビーム形状はガウシアンプロファイルで1/e²直径で10 μmとした。計算の結果、この領域内に $\zeta=1$ 程度を達成する実験条件が存在していることが明らかとなった。従って、本研究で提案したHCPCFを利用した高繰り返しモード同期レーザー励起連続発振光分子光変調の着想は、実際に十分実現可能であり、新しい超高速光波変調技術として極めて有望であると言える。

2. 実験と結果

実験では最初に、長さ53 cmのHCPCFに対して水素を充填した。HCPCFのレーザー光入射側のセルより水素を加圧し、ファイバーセル全体に水素を充填させた。入射側のセルの水素圧を1000 kPa付近で保持することで、230時間で出射側のセルの水素圧を943 kPaまで上昇させることができた。入射側のセルの水素圧が出射側のセルの水素圧より低くなった場合においても出射側のセルの水素圧は保持されていた。次に、長さ15 mのファイバーを用いて水素の充填を試みた。上述した場合と同様に、レーザー光入射側のファイバーセルから水素を充填させ、HCPCFを径由させてファイバーセル全体に水素を充填させた。その結果、出射側のファイバーセルには10日で最大330 kPaの水素を充填させることができた。水素を充填させた状態で励起光・プローブ光を同時にHCPCFにカップリングさせた。励起光の結合効率は16%、プローブ光の結合効率は8.7%、

であった。出射光側のセルを330 kPaで維持した状態で励起光・プローブ光のカップリングを行うことに成功した。

水素をHCPCFに充填させた状態で、励起光・プローブ光をHCPCFにカップリングさせ、その透過光スペクトルの観測を行った。しかしながら、今回はサイドバンドを観測することができなかった。これにはいくつかの要因が考えられるが、最大の要因は、分子光学変調過程の位相不整合であると考えている。現在利用しているHCPCFはフォトニックバンドギャップ型の導波路構造を有しており、カタログ値によると、導波路分散は $-1.2 \times 10^{-25} \text{ s}^2$ 程度である。この絶対値は今回実験で用いた水素分子300 kPa程度で与えられる正の分散 $3 \times 10^{-30} \text{ s}^2$ よりもはるかに大きい。従って、HCPCF中では、極めて大きな位相不整合条件下で分子光学変調が引き起こされると考えられ、これがサイドバンド発生効率の大幅な低下をもたらしていると考えられる。

— 以下割愛 —