光ファイバーテラヘルツ光学変調器の開発

Development of a fiber-optic-based terahertz optical modulator

研究代表者　九州大学　准教授　財津慎一

A molecularly-modulated optical modulator operating at a frequency larger than 10 THz based on a fiber-optic devise is developed. Optimization of the termination of a hollow-core photonics fiber (HC-PCF) and an improved setup for fiber optic coupling allowed an coupling efficiency of over 20% for a continuous-wave laser and over 10% for an ultrashort pulse laser. A sealed cell to fill gaseous hydrogen into a HC-PCF was newly designed, allowing the maintain a pressure of hydrogen at 1 MPa at a beam input part and 0.4 MPa at a beam output part. A spectrum of an output ultrashort optical pulse from the hydrogen-filled HC-PCF apparently included components that imply an excitation of coherent motion of hydrogen molecules. This result will contribute to the realization of a fiber-optic optical modulator operating at the world-record frequency in the future application.

要旨

本研究では、10THz を超える周波数で動作する新しい光ファイバー型分子光学変調器を開発した。HC-PCF の端面処理の最適化と、新しいファイバーカップリング光学系を構築し、連続発振光において 20%、超短パルスレーザー光においても 10%を超える結合効率を実現した。HC-PCF へ水素ガスを充填するためのセルを新たに設計し、レーザー光入射側において 1 MPa、出射側において最大 0.4 MPa までの水素充填が可能となった。水素充填 HC-PCF へ結合した超短パルス励起光の出射光スペクトルにおいて、オルソ水素のコヒーレント分子運動が励起を示唆するスペクトル成分を初めて観測した。この研究の成果は、世界最高の動作周波数を有するファイバー型光変調器の実現へ大きく貢献するものである。

1.　研究の背景

光通信システムは、電気通信システムにおいて通常利用されるマイクロ波やミリ波に比べて 4-5 桁高い周波数を利用しており、情報の伝送能力を飛躍的に高める方式として研究されている[1]。有線通信は 1876 年の Bell による電話技術の発明に始まる。その後、1901 年の Marconi によるラジオ波の送信実験が行われ、このころから無線通信及び電磁波の高周波化の研究が進められてきた。その中で、通信品質を飛躍的に向上させたのが、Armstrong によって 1933 年に発明された周波数変調(FM)方式である。

1966 年に Kao によって低損失光ファイバーの可能性が示唆されてから、長距離レーザー導波路として光ファイバーの研究が進められた。主に赤外領域に透過率の高い幅広い波長領域を有することで、今日の電気通信分野で幅広く使われている。1980 年頃には光ファイバー伝送を用いた通信網のデジタル化が進められ、1985 年には 400 Mb/s の伝送容量を誇る F-400 M 方式が日本縦貫伝送路として導入された。これは単一モード光ファイバーを使用した世界最初の長距離大容量伝送であり、基幹伝送方式としての光通信システムの地位を不動のものにした。その後 F-400 M 方式の 4 倍の伝送容量をもつ F-1.6 G 方式が開発され、1987 年度には商用化された[1]。

光ファイバーの構造を応用し選択的な波長領域で低い減衰率を実現しているものに中空フォトニック結晶ファイバー(Hollow-Core Photonic Crystal Fiber: HC-PCF) がある。HC-PCF の起源は固体物理学および量子力学が光学に応用され始めた 1970 年代後半に遡る。1991 年に Russel によって HC-PCF の概念の提言があり、1995 年に Birks らによって理論的デモンストレーションが行われてからは、HC-PCF は二次元バンドギャップ構造の最も進んだ応用と言える[2]。HC-PCF は従来の光ファイバーと異なり、コア部が空洞になっている。そこに気体を充填可能であるため圧力による分散の調整が可能である[3]。また、ファイバー特有の形状から相互作用長を伸ばすことができ、低い入射光強度で光と気体の相互作用を起こすことが出来る。それにより自己収束や気体のイオン化を抑えることが出来るため[4]、不要な非線形光学効

果を抑えた高出力での光通信が期待されている。

情報通信量の増大化への対策のひとつとして、光変調の変調周波数を高める方法がある。光変調には、レーザー光源に変調信号を送り強度を変化させる直接変調と、変調器にレーザー光を通す外部変調がある[1]。現在広く使われているのは、電場中で屈折率が変化する結晶を変調器として用いた電気光学変調法である。しかし、この方法では最大でも GHz 程度の変調しかなされていない。

近年この手法に代わる新たな高変調周波数を実現する方法として、分子光変調法に関する研究が行われている。この手法は、分子の振動、回転周波数である 10-100 THz に対応した高周波数変調が可能である。光が分子運動に起因する周波数で変調を受けるためには外的要因により分子運動をコヒーレントに制御する必要があり、効率よく変調を実現するための手法がこれまでに複数考案されている。

超短パルスを被変調光（プローブ光）に用いた分子光変調は、変調器に中空キャピラリーを用いた研究があり、六フッ化硫黄を用いて約 23 THz の高い変調数での変調を実現している[5]。また、プローブ光に連続発振(Continuous Wave: CW)光を用いて、光共振器内での水素との相互作用を利用した変調も実現されている[6,7]。しかし、これらの変調器は形状が剛直であり空間的制限が大きいため、光通信システムのように広範囲に普及させるには適さない。そのため空間的自由度を保ったまま高い効率で光と分子の相互作用を起こすことができる媒質が求められている。

本研究室では、柔軟な形状でありながら高い相互作用長の実現が期待できる光変調器として HC-PCF を用いた研究を考案した。これは繰り返し周波数 1 GHz のモード同期レーザーを用いて水素のコヒーレント回転運動を励起し CW 光の変調を行うものである。しかしまだ変調は確認されておらず、HC-PCF 内での光変調を確認するためには、分子運動をコヒーレントに励起するために光強度を増強し、また変調により生じた周波数成分の分散関係を制御する必要がある。

本研究では、繰り返し周波数 1 kHz の超短パルスレーザーを用いることで、水素を充填した HC-PCF 内での強い光強度を実現し、分子のコヒーレントな運動を効率的に励起して THz 領域の変調周波数を実現できる光変調器の開発を目的とした。

2．原理

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は、分子運動の緩和時間をT_2、運動の周波数をΩとすると以下の式で表される。

$$Q(t) = Q_0 e^{-\frac{t}{T_2}} \sin(\Omega t) \tag{1}$$

超短パルス光によって励起された瞬間($t = 0$)における初期振幅Q_0は励起パルス光のエネルギー密度Wによって決定され、以下の式で表される。

$$Q_0 = \frac{2\pi}{Mc\Omega}\left(\frac{\partial\alpha}{\partial Q}\right)W \tag{2}$$

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$\alpha$の変化率である。式(2)より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を入射すればよいことが分かる。

コヒーレント運動の励起された分子中を、$\mathcal{E}_i(z,t) = (1/2)E_i \exp\{\mathrm{i}(\omega_i \mathrm{t} - k_i \mathrm{z})\} + \mathrm{c.c.}$で表されるプローブ光が伝搬する場合を考える。この場合、周波数Ωで振動する分子運動は、$P_R = N(\partial\alpha/\partial Q)Q(t)E_i$を通じて、プローブ光の感じる非線形分極$P_R$に影響を与える。ここで、$N$は分子密度である。この非線形分極を考慮した波動方程式を解くと、相互作用長lの分子中を伝搬したプローブ光の振幅E_iは以下の式で表されることが分かる。

$$E_i(z,t) = E_i(0,t) exp\{-i\beta l \sin(\Omega t)\} \tag{3}$$

ここで、励起光とプローブ光の伝搬速度の差に起因する位相不整合と分子運動の緩和は、極めて小さいとして無視している。βはラマン散乱におけるラマンゲインに相当するパラメータであり、

$$\beta = \frac{2\pi\omega_i N}{c}\left(\frac{\partial\alpha}{\partial Q}\right)\cdot Q_0 \tag{4}$$

で表される。この式(4)は、大きなコヒーレント分子運動が励起された場合に大きなラマンゲインが得られる一般的なラマン散乱の解釈に一致する。

被変調光のスペクトルは、式(3)をフーリエ変換して以下のように得られる。

$$|F_i(\Delta\omega)|^2 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |f_i(\Delta\omega - n\Omega)|^2 \cdot J_n^2(\xi) \tag{5}$$

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り、プローブ光が連続発振光の場合は、$\Delta\omega = 0$で極めて狭い関数である。$J_n(\xi)$はn次のベッセル関数である。式(5)は$\Delta\omega = 0$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。被変調後の入射プローブ光および、n次のコム（以下サイドバンド）の強度は、n次のベッセル関数$J_n(\xi)$で定められる。サイドバンド強度を決定付けるξは式(2)、(4)より以下の様に表される。

$$\xi = \frac{4\pi^2\omega_i}{Mc^2\Omega}\left(\frac{\partial\alpha}{\partial Q}\right)^2 \cdot N \cdot W \cdot l \qquad (6)$$

この式(6)は、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与えられることが分かる。本研究で独自に提案するHC-PCF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。

３．実験と結果

３．１　連続発振光のHC-PCFへのカップリング

ファイバー内に効率よくレーザー光を入射するためにはファイバーの断面が平滑であることが必要である。平滑な断面を得るために以下の処理を行った。HC-PCF のコーティングを専用のファイバーストリップを用いて先端から約 3 cmだけ剥がした。コーティングを剥がした部分を専用のファイバーカッターを用いて切った。この作業を顕微鏡で平滑な断面が観察されるまで繰り返し行った。顕微鏡で見た HC-PCF の断面を図 1 に示す。本研究では左側を平滑でない断面、右側程度であれば平滑な断面とした。ファイバーセルには石英窓を設置せず、先端が飛び出した状態でステージに固定した。

本実験で使用した HC-PCF は NKT Photonics 社製 HC-800-02 であり、コア径は7.5 μm、設計波長は800 nm である。連続発振(CW)レーザーの波長は 830 nm、Ti: Sapphire レーザーの波長は800 nmであり、これらの波長での減衰値を 150 dB/km、HC-PCF の長さを 10 m と仮定すると、最大で得られる結合効率は71 %と計算された。

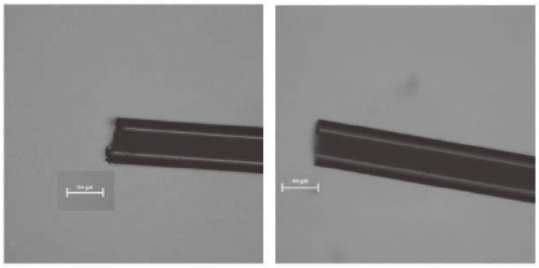

図 1. HCPCF の断面

このような準備の元、CW レーザーを HC-PCF にカップリングした。光学系を図２に示す。CW 光はミラーを通った後 HC-PCF にカップリングするために対物レンズにより集光された。レーザー光がより透過するように IR ビューアーとパワーメーターを用いながらファイバーを固定したステージの位置や角度、ミラーの角度などを調節した。対物レンズ手前と出口側の先端でパワーメーターによって入射光強度と透過光強度をそれぞれ測定した。このとき、入射光強度10.2 mW で透過光強度 2.10 mW を得ることができた。この結果より結合効率は 20.6%と計算された。これは CW レーザーをガイドとして用いるには十分な結合効率であるといえる。

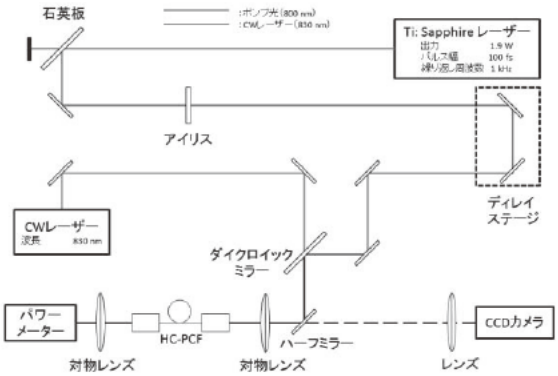

図２．連続発振光カップリング光学系

前述と同様の実験を、光源を超短パルスレーザーである Ti: Sapphire レーザーに変えて行った。このとき、入射光強度 1.83 mW で透過光強度は 5.48 μW であり、結合効率は 0.299%と計算された。

パルス光を入射した場合、CW レーザーをカップリングしたときに比べ非常に低い結合効率となった。原因として、ファイバー断面の損傷が考えられる。平

滑なファイバー断面にポンプ光を照射し続けると、断面が損傷する可能性がある。これはHC-PCFの微細構造がポンプ光によって溶解するためである。ファイバー断面に損傷があると、断面が平滑であってもレーザー光が入射しにくくなり結合効率を大きく減少させる原因となる。パルス光がHC-PCF断面に与える損傷を確かめるために、次の手順で実験を行った。まず、Ti: Sapphire レーザーの出力を十分に弱めた状態で透過光強度が最も高くなるようにHC-PCFの位置とミラーを調節した。その状態でレーザーの強度を3.79 mWまで上げ、そのまま 1 時間待ち、その後HC-PCFの断面をCCD カメラで観察した。Fig. 4-3 に(a)レーザー照射前、(b)1 時間照射後 のHC-PCF断面を示す。これよりクラッド部に変化があったことが分かる。これは高強度のパルス光によりHC-PCFの断面が損傷したためと考えられる。

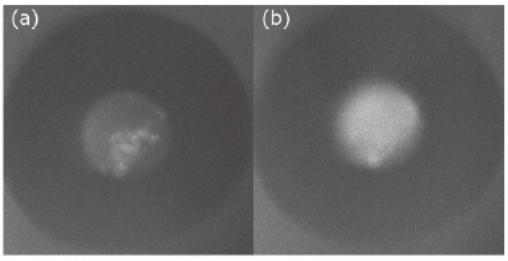

図3．HC-PCF断面をCCDカメラで撮影した画像.
(a)実験前、(b)3.79 mWのパルス光を1 時間照射した後

上の実験により高い強度のパルス光をファイバーに当て続けると断面が損傷する恐れがあることが確かめられた。そこで、光学系に拡大系を組み込み、ビーム径を調節することでクラッド部にビームが当たらないようにしつつ、コアへビームを入射できるようにした。

3．3　後方からのCW光を利用したパルス光のカップリング

ファイバー内の気体とポンプ光が相互作用するには、ファイバーとポンプ光が高い効率で結合していることが重要であるが、セルに石英窓を取り付けた後の結合効率は非常に低くなりやすい。これは窓による散乱やファイバー先端を目視できないといった理由からである。この問題を解決するために、ファイバー後方からレーザー光を透過させ、その透過光に合わせて別のレーザー光を調節し透過させる方法がある。石英窓を取り付けた状態でパルス光とファイバーの高い結合効率を達成するために、先に述べた方法をCW レーザーを用いて行った。図4に実験で用いた光学系を示す。ミラーとステージを動かしパワーメーターで確認しながら調節を行うことで前方にのみ石英窓を取り付けたHC-PCFとCW レーザーをカップリングさせたところ、前方の石英窓からCW光が透過している様子が観察された。

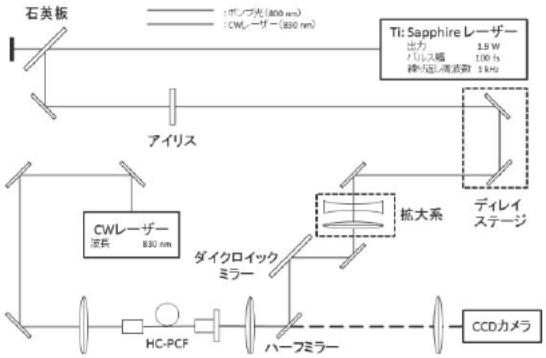

図7. 水素充填配管系

図4．超短パルス光のカップリング光学系

3．4　石英窓装着HC-PCFへのカップリング

前節で透過したCW 光を利用してパルス光を窓の付いたHC-PCFへカップリングさせた。まず、ファイバー後方からCW レーザーを透過させた状態を保ったまま、ファイバー前方でCW レーザーとパルス光が重なるように光学系を調節し、パルス光を透過させた。さらに前方のセルと光学系は動かさずに後方のセルにも石英窓を付け、パルス光がHC-PCF内を透過していることを確認した。パワーメーターを用いてパルス光の入射強度と透過強度をそれぞれ測定したところ、入射光強度は121 μW、透過光強度は13.0 μW であり、結合効率は最大で10.7%と計算された。このことから、今回用いた方法は高い結合効率を得るのに有用であるとわかった。

3．5　ファイバーセルの構築

ファイバー両端に石英窓を取り付けた状態でパルス光の透過が確認できたので、HC-PCF のコア内への気体水素の充填を試みた。本研究ではWuらの報告[9]を参考に、新しくファイバーセルの設計から行った。セルの写真と断面の模式図を図5に示す。

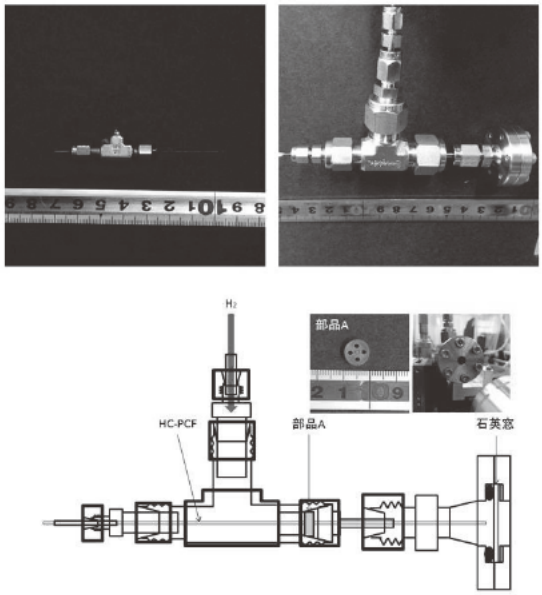

図５（左上）従来のセル、（右上）新しいセルと

（下）断面の模式図

従来の研究で用いていたファイバーセルは、破損しやすいという問題があった。これは部品が小さいこと、石英窓を支える部分が細く弱いことなどが原因であると考えられる。この問題を解決するために、まず、セルを構成する部品一つ一つを大きいものに置き換えた。また、新たな部品（図５中の部品 A）を設計しセル内に組み込んだ。これは円盤状の部品で、中央にファイバーが通る穴があいており、その周りに気体を通すための穴があいている。この部品は、セル内でファイバーを支えながらも上部から注入される水素がセル内を充填するのを妨げない。この部品の使用によってセルの大型化が可能になった。さらに、ファイバーセルをステージに固定するための台座を設計した（図６）。

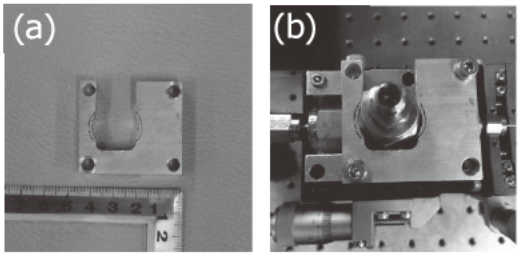

図６．ステージ固定用台座

３．６　HC-PCF 内への水素の充填

HC-PCF 内への水素の充填は、ファイバーの両端にセルを取り付け、そのセルに水素を加圧することで行う。今回は、前方・後方セルともに水素の漏れがないかを確認し、その後 HC-PCF 内へ両端から加圧したとき、充填にどれほどの時間がかかるのかを調べるために実験を行った。図７に水素ボンベからセルまでの配管系を示す。

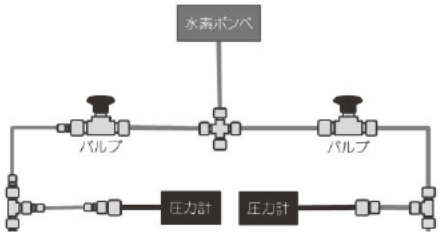

図９．セル８時間加圧時の圧力変化

図７．水素充填配管系

（１）漏れの確認

図８にセルを 0.2 MPa で加圧した際の圧力の時間変化を示す（5 分ごとに 120 分記録）。この結果から、前方・後方セルともに水素の漏れがないことを確認できた。

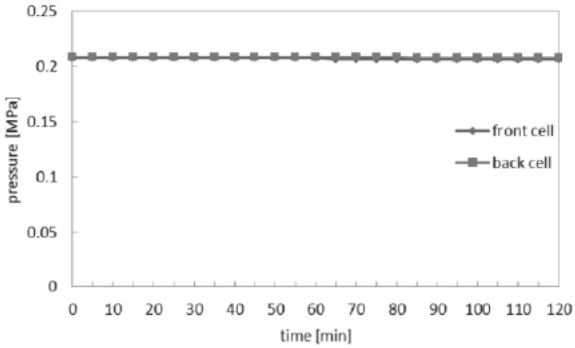

図８．両セル内の圧力の時間変化

（２）HC-PCF 内への加圧

① HC-PCF 内を真空にし、両方のバルブを開いてセルを 1 MPa で加圧した。両方のバルブを閉じ、その後の圧力の変化を 8 時間記録した。1 時間ごとに両方のバルブを開けて加圧しなおした。結果を図 9 に示す。セル内の圧力減少の仕方に大きな変化は見られなかったため、8 時間ではコア内を完全に充填することは出来ないと考えられた。

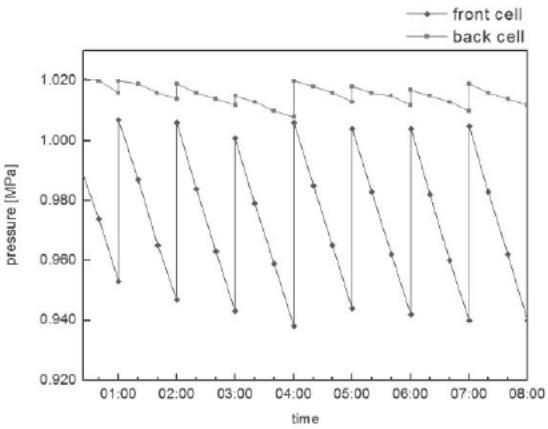

図 9. セル 8 時間加圧時の圧力変化

② ①と同様の手順で圧力の変化を 3 日間記録した。加圧は 1 日に 2 回両方のバルブを開くことで行った。結果を図 10 に示す。この結果より、コア内を完全に充填するにはさらに長い時間が必要であると考えられる。

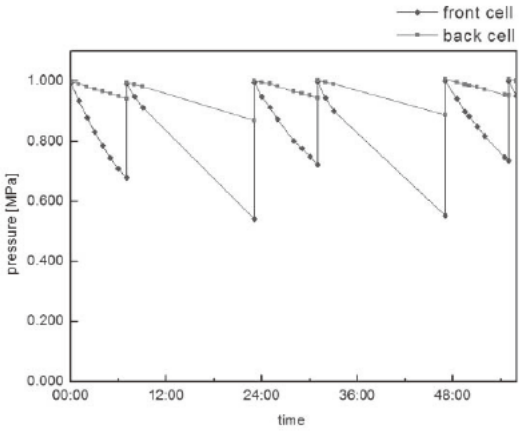

図 10. セル 3 日間加圧時の圧力変化

③ ①と同じ手順で 1 週間に一度後方セルに 1 MPa 加圧しながら、両セルの圧力を 1 日ごとに記録した。その結果を図 11 に示す。前方セルの圧力が上昇していることから、後方セルの水素がコアを通り前方セルまで達していることが分かる。今回は前方セルを最大で 0.395 MPa まで加圧できた。これよりコア内に水素を充填できていると考えられる。また、加圧をしてから 2-3 日後に前方セルの圧力は極大値をとっているため、これに合わせて加圧を 3 日に一度行うことでさらに効率良く充填ができると考えられる。

3．7　HC-PCF 透過超短パルス光の観察

（1）HC-PCF 透過超短パルス光ビーム形状の観察

ファイバー後方へ透過した超短パルス光を対物レンズで集光し、ビームプロファイラを用いてビーム断面を観察した。実験に用いている HC-PCF はシングルモードで光を伝搬する構造となっているので、透過光はシングルモードになる。測定されたビーム形状を図 12(a)に示す。透過ビームの遠視野像は、図 12(b)に示したクラッドの六角形の形状を反映したガウス型分布であることが明らかになった。これは、超短パルス光はHC-PCF 内をシングルモードで伝搬していることを反映している。しかし、図 12(a)の右上方には、ビームの一部遮蔽とそれに伴う回折パターンが見られる。これは、HC-PCF 端面がファイバーセル窓の中央部に位置しておらず、セル窓枠によってビーム周縁が遮られているためである。ただし、透過ビームに対するこの効果は、低強度のビーム辺縁部に限られているので、ほとんど無視できると考えられる。

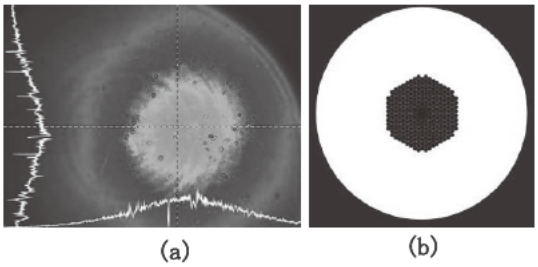

図 12. (a) HC-PCF 透過ビームプロファイル

(b) HC-PCF の断面図

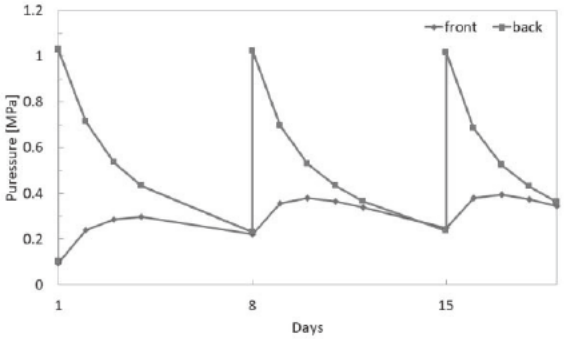

図 11. セル 19 日間加圧時の圧力変化

（2）HC-PCF 透過超短パルス光スペクトルの観察

ファイバー内の水素とパルス光が相互作用しているかを確認するために、透過光のスペクトルを測定した。十分な相互作用があればラマン散乱光が観察できると考えられる。HC-PCF は 107 cm のものを用いた。CW レーザーを後方から透過させガイドとして用

いることでパルス光をHC-PCFに結合した。この時のパルス光の入射光強度は270 μW、透過光強度は6.5 μWで透過率は2.4%であった。スペクトロメーターを用いて入射光、透過光のスペクトルをそれぞれ測定した。結果を図13(a),(b)にそれぞれ示す。

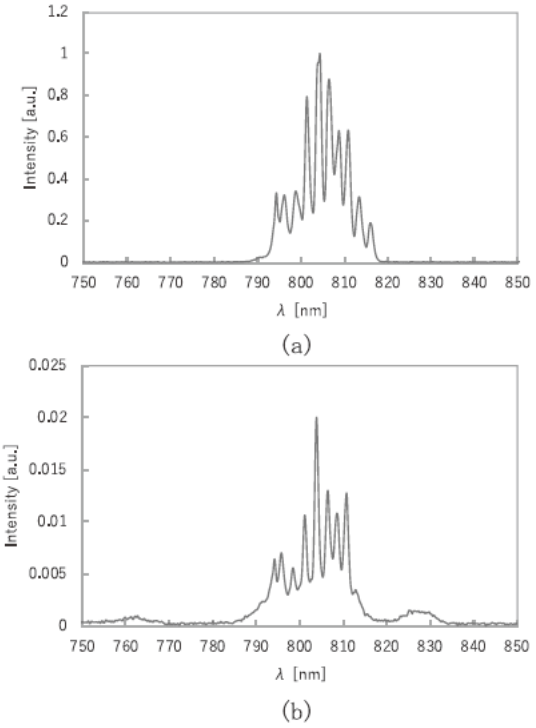

図13. (a) 水素充填HC-PCF入射光スペクトル

(b) 水素充填HC-PCFからの出射スペクトル

この時、出射側のファイバーセルの窓は解放し、HC-PCF 中に残余した水素ガスとの超短パルス光の相互作用を観察した。入射光・出射光スペクトル共に周期的な構造を有しているが、これは、再生増幅器内の干渉フィルターによるスペクトル干渉の結果であり、水素ガスと超短パルス光の相互作用によるものではない。ここで注目すべきは、このような状況においても、透過光スペクトルの828 nm付近と762 nm付近に、入射光には含まれていないスペクトル成分が観測されたことである。オルソ水素の回転ラマンシフト周波数は587 cm-1である。従って、これらの成分が超短パルス光と水素ガス(オルソ水素)の回転準位を介したラマン相互作用の結果であると仮定すると、828 nmと762 nmのスペクトル成分はそれぞれ、790nmと 798nm からのストークス成分およびアンチストークス成分であると帰属することができる。水素の充填されたHC-PCFへ入射した超短パルスレーザー光は、基本光となる 800nm 付近の波長成分を含んでいる。従って、図13(b)において観測されたスペクトル成分は、オルソ水素の回転準位を介して新たに発生したコヒーレントラマン散乱光の可能性が高い。もしそうであるならば、水素分子のコヒーレント回転運動が励起されていることを意味しており、このような分子集団にプローブ光となるレーザー光を相互作用させることで、HC-PCFを用いた10THzを超える光学変調器の実現が期待できる。

4. まとめ

本研究では、超短パルスレーザーを励起光およびプローブ光として用いた、光ファイバー型分子光学変調器の開発を目的とした。この新しい発想に基づいた光学変調器は、従来の光学変調器を 3 桁上回る10THzの周波数で動作するものである。これを実現するために、HC-PCF の中空コアに充填された水素分子のコヒーレントな運動を励起し、その分子コヒーレンスをHC-PCFのゼロ分散波長の超短パルスレーザー光でプローブするという方式を採用した。まず、HC-PCF への効率的なレーザー光のカップリングを達成するために、HC-PCF の端面処理の最適化と、対物レンズおよび精密差動ステージを用いたファイバーカップリング光学系を構築した。その結果、連続発振光において 20%を超える結合効率を実現した。しかしながら、より高強度の超短パルスレーザー光のカップリングにおいては、光吸収による断面の損傷が観測された。これは、コア周辺の微細構造を有するクラッド部への高強度光の照射に伴うものであり、コアだけをターゲットとしたより高精度はカップリング光学系の必要性を示唆していた。そのために、連続発振光をHC-PCF出射側から入射し、入射側から得られるビームをガイド光とした新しいファイバーカップリング系を考案した。これによって、石英窓装着時の超短パルスレーザー光のカップリングにおいても、10%を超える結合効率を実現し、水素分子のコヒーレント運動を励起するために十分と考えられる強度のレーザー光のカップリングを達成した。HC-PCF へ水素ガスを充填するために必要な窓付きセルは、これまでの問題点を解決するために新たに設計し、接続部等からの気体漏洩を最小限に抑えることに成功した。この新しいセルを用いることによって、HC-PCFのレーザー光入射側において0.1 MPa、出射側におい

て最大 0.4 MPa までの水素充填が可能となった。このように高密度気体充填されたHC-PCFを用いて、本研究の目的となるファイバー型分子光変調器の原理実証を実施した。水素充填HC-PCFへ結合した超短パルス励起光は、中空コア内をシングルモードで伝搬していることを明らかとし、HC-PCF からの出射光スペクトルを測定した。測定されたスペクトルには、長波長側・短波長側の両方に、入射光には含まれていなかった成分が現れていることが判明した。これらは、オルソ水素分子の回転準位を介したコヒーレントラマン散乱光であり、HC-PCF 内の水素分子と超短パルスレーザー光の相互作用で、オルソ水素のコヒーレント分子運動が励起されていることを示唆している。この研究実施期間内では、プローブ光の導入による分子運動に起因した超高速光変調の実証までは至らなかったが、この研究の成果は、世界最高の動作周波数を有するファイバー型光変調器の実現へ大きく貢献するものであると考えている。

５．謝辞

本研究は、九州大学大学院工学府化学システム専攻の田辺拓巳氏の寄与が含まれている。この場を借りて感謝の意を表明する。

発表論文

なし

参考文献

（1） 末田正・神谷武志編『超高速光エレクトロニクス』培風館 (1991).
（2） F. Benabid, Pill. Trans. R. Soc. A., 364, 3439 (2006).
（3） Mohammed F. Saleh, Fabio Bioncalana, Opt. Lett., 40, 4218 (2015).
（4） J. Nold, et al, Opt. Lett., 35, 2922 (2010).
（5） A. Nazarkin, et at, Phys. Rev. Lett., 83, 2560 (1999).
（6） K. Ihara, et al, Appl. Phys. Lett., 88, 074101 (2006).
（7） S. Zaitsu, et al, Sci. Rep. 6, 20908 (2016).
（8） C. Wu, “Raman optical frequency comb generation in hydrogen filled hollow-core fiber,” a dissertation for the University of Oregon (2010).