

# 連続発振テラヘルツ分子光変調器の開発

所属：九州大学大学院工学研究院応用化学部門(機能)

助成対象者：財津慎一

共同研究者：なし

## 概要

現在広く用いられている光変調器は、電気光学効果を利用しており、その動作周波数は10GHz程度である。更に高速な光変調器を実現するためには、新しい原理に基づいた方法が必要である。本研究では、光変調器の動作周波数を大きく拡張する方法として、気体分子のコヒーレント運動に基づいた連続発振光波変調を報告する。コヒーレントに励起された分子運動は、その運動周波数に一致した周期的な分極率の変化を示す。この高速な分極率変化を光波に作用させると、その運動周波数での光波変調を実現できる。気体分子の運動周波数は一般的に、10~100 THz程度であるので、従来よりも3桁以上大きな周波数での光波変調が実現できる。本研究では、この分子のコヒーレント運動を、負分散鏡で構成された広帯域高フィネス共振器内で、誘導ラマン散乱過程によって励起する。その結果、共振器内分散が補償される水素充填圧力において、分子光学変調の位相整合条件が満足され、プローブ光に対して10THzを超える周波数での光波変調を実現した。この成果は、これまでの電気光学効果に基づいた光変調器における高速化の限界を打破するものであり、光通信や精密分光学といった光科学・光工学の分野で広く利用される可能性がある。

## abstract

The modulation frequency of optical modulators based an electro-optic or acousto-optic effect is generally no larger than 10 GHz, which is limited by available frequencies of external signals applied to solid-state nonlinear optical materials. Further expansion of the range of the operation frequency of optical modulators needs an entirely new approach beyond the electro-optic or acousto-optic scheme. In this research, we report the optical modulation of continuous-wave laser at an operation

frequency exceeding 10THz. This is based on molecular optical modulation (MOM) arising from coherently excited molecular motion regarded as a periodical variation of polarizability of which the frequency corresponds with that of the molecular motion. We adopt a cavity-enhanced method to excite a coherence of a molecular motion through stimulated Raman scattering induced by a cw laser beam. The modulation efficiency is dramatically enhanced by the phase matching of the optical modulation process under a condition that the total dispersion of the molecular-filled optical cavity is substantially compensated for.

## 研究内容

### [研究の背景]

科学研究の広範な分野において光を革新的に利用するためには、光の特性を巧みに操作することが必要である。周期的、または準周期的に光の特性を変化させる技術は、「光波変調」と呼ばれており、分光学・顕微観察法・光通信信号処理・超高速レーザー分野等で主要な役割を果たしている。

光波の変調は、一般的に、固体光学結晶の電気光学効果・音響光学効果を利用して実現される。この手法の変調速度は、印加交流電界（ $\sim G(10^9)\text{Hz}$ ）か音波（ $\sim M(10^6)\text{Hz}$ ）の周波数で制限される。近年、光波変調の周波数を拡大するために、シリコン-高分子ハイブリッド媒質中での超高速カー効果[1]や、テラヘルツ波照射下でのエキシトンの量子井戸内での再結合[2]といった新しい原理に基づいた光波変調法が研究されており、連続発振光に対してテラヘルツ ( $10^{12}\text{Hz}$ ) を超える周波数での光波変調が実現されている。しかしながら、これらの方法では、光波の周波数に近づく  $10\text{THz}$  ( $10^{13}\text{Hz}$ ) を超える光波変調は困難であり、そのためには新しい原理に基づいた手法が求められている。

申請者はこれまでの研究で、光共振器中に封じ込めた気体分子に対して、高い効率で非線形光学効果を誘起する新しい方法を提案した[3]。この方法を基礎とし、これまで新しい非線形光学の一分野を展開してきた。

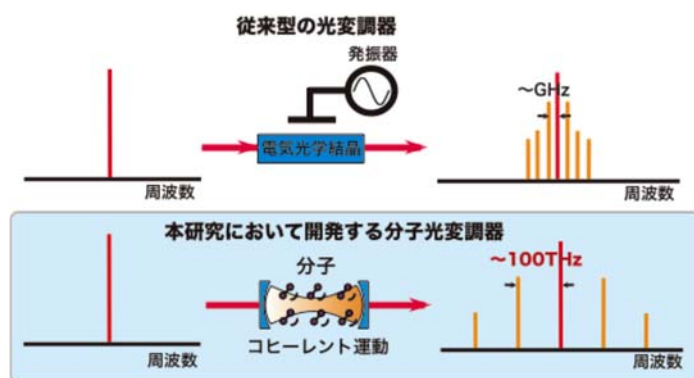


図 1. テラヘルツ分子変調光変調器の概念図

この研究を進める過程で、この独自の手法に基づき、分子のコヒーレント運動と光波を強く相互作用させることができれば、10THz を超えるかつてない高周波数の光波変調が実現できる着想を得た(図 1 参照)。

[研究の目的]

本研究提案では、高フィネス共振器中で励起された分子のコヒーレント運動に起因する分極率の超高速な変化を利用した 10THz を超える連続発振光の光波変調を実現する。これを実現するために独自の方式として、分散が補償された高反射鏡で構成される光共振器を用いた「共振器位相整合非線形光学」の原理を適用する。光波変調によって発生するサイドバンドの発生効率が、光波変調過程における位相整合条件を満足させることによって飛躍的に向上されること実証する。

[結果]

2 枚の負分散鏡で構成された広帯域高フィネス共振器 (反射率:  $\sim 99.98\%$  @750-930nm、分散:  $-9fs^2$ @850nm) を組み込んだチャンパー内に水素分子を充填し、挟線幅連続発振光  $\omega_{p1}$  (波長: 847.56nm) をその共振器へ結合した。共振器内で強度増強された  $\omega_{p1}$  は、水素分子の誘導ラマン散乱効果により、オルソ水素分子の回転周波数に一致する 17.6THz 離れた長波長側に新しい周波数成分  $\omega_{p2}$  (波長: 891.94nm)

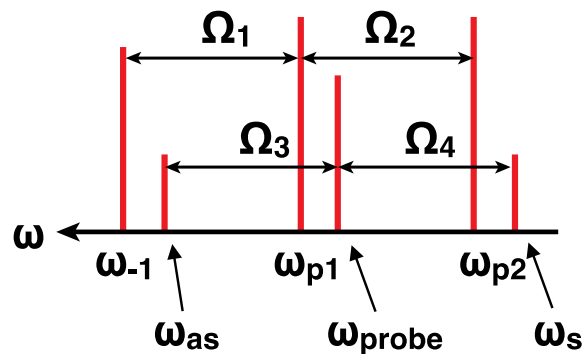


図 2. 共振器光波変調に関連する成分

を発生する。この過程において、水素分子のコヒーレントな回転運動(運動周波数: 17.6THz) が励起される。次に、この共振器にプローブ光となる  $\omega_{probe}$  (波長: 855.80nm) を結合する。このプローブ光は、共振器内で強度増強されるとともに、水素分子と相互作用し、水素分子の回転周波数 (17.6THz) 離れた周波数にサイドバンド ( $\omega_s$ ,  $\omega_{as}$ ) を発生する。ただし、この時、水素充填圧力を最適化することで、共振器内総群遅延分散をゼロにし、光波変調過程の位相整合条件を満足させる必要がある。

図 2 に、共振器内で光波変調に関連する全ての周波数成分を示している。図中の  $\Omega_1$  から  $\Omega_4$  は、各成分の関与する縦モードの差を示し、圧力に依存して変化する。図 3 に、既知の共振器分散を用いて計算した  $\Omega_1 - \Omega_2$ ,  $\Omega_3 - \Omega_2$ ,  $\Omega_3 - \Omega_4$  の圧力依存性を示す。 $\Omega_3 - \Omega_4 = 0$  (C 点) において、分子光学変調の位相整合条件が満たされ、サイドバンド  $\omega_s$  (波長:

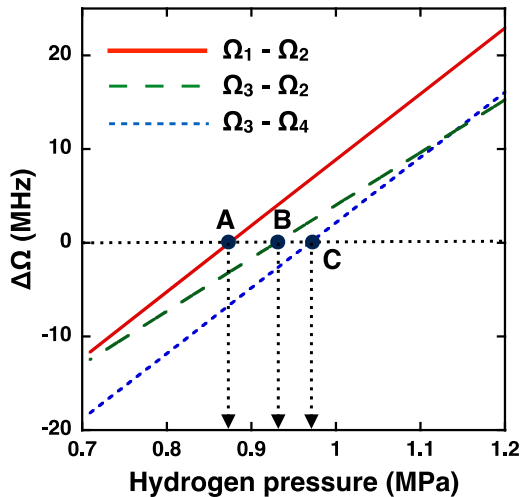


図 3. モード間隔の水素圧依存性

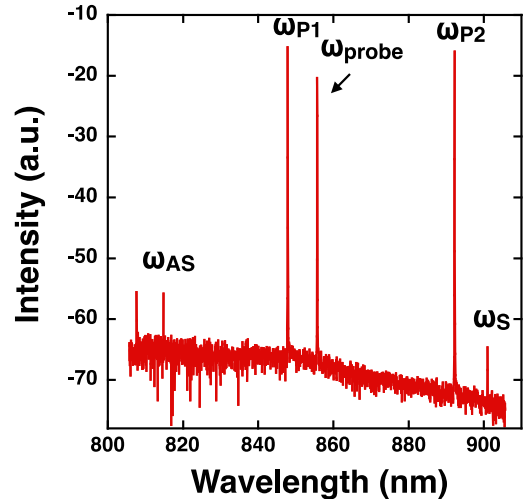


図 4. サイドバンド発生スペクトル

901.07nm)、 $\omega_{as}$  (波長: 814.86nm) が発生すると期待される。図 4 に水素充填圧力 1015 kPa において観測された出力スペクトルを示す。波長 901.07nm、814.86nm において、 $\omega_s$ 、 $\omega_{as}$  がそれぞれ観測され、これらと  $\omega_{probe}$  との周波数差は 17.6 THz に一致した。出力光に含まれるプローブ光とサイドバンド光の強度比は  $1.4 \times 10^{-4}$  であった。サイドバンド発生効率を更に向上させるために、より広い範囲で水素圧力を変化させ、位相整合条件を探索した。その結果、953 kPa において、 $\omega_{probe}$  と  $\omega_{as}$  の強度比が 50 倍程度増強されることを明らかにした。

#### [今後の展開]

本研究成果は、これまでの電気光学効果に基づいた光変調器における高速化の限界を打破するものであり、光通信や精密分光学といった光科学・光工学の分野で広く利用される可能性がある。特に、この光変調器を組み込んだ新しいレーザー光発生装置として、「分子変調モード同期レーザー」の実現が期待される。これは、分子の運動と同じ繰り返し周波数で超短光パルスが発生する装置であり、1 秒間に 10 兆回を超える繰り返し数での光パルス発生が期待できる。このような画期的な光源は、超大容量の情報を伝送するための新しい光源としてインターネットなどの情報伝送量を飛躍的に増加させる可能性があり、光と物質との新しい相互作用の探求においても、これまでにない新しい展開をもたらすと期待される。このような応用展開を実現するために、光変調効率の更なる向上が必要となる。現状の変調効率は、共振器を構成する高反射鏡の有する分散特性で制限されている。最適な分散特性を有する高反射鏡を設計・作製し、実験装置に組み込むことで、飛躍的な光変調効率の向上を実現できるであろう。このような光共振器を組み込んだ光変調器は、更なる

小型・モジュール化も可能であり、光ファイバーと一体になったデバイスとしてパッケージ化することで、インターネットなどでの大容量情報処理光システムで実際に利用できるデバイスの実現を目指した研究を展開する。

#### 引用文献

1. M.Hochberg *et al.*, Nature Materials, 5, 703 (2006)
2. B.Zaks *et al.*, Nature, 483, 580 (2012)
3. S.Zaitsev *et al.*, Physical Review Letters, 100, 073901 (2008)

#### 本助成に関わる成果

##### [論文発表]

1. Shin-ichi Zaitsev, Hiroto Izaki, Takao Tsuchiya, Totaro Imasaka,  
“Continuous-wave phase-matched molecular optical modulator,”  
Scientific Reports, Vol. 6, 20908 (2016).

##### [口頭発表]

1. “Molecular optical modulation of a continuous-wave laser based on an intracavity phase-matched process” Shin-ichi Zaitsev EMN Meeting on Photonics 2016, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, Spain, September 19-23, 2016. [招待講演]
2. 「モード同期レーザー増強共振器分光法のための可搬型広帯域共振器の開発」  
伊藤佑太郎、財津慎一 日本分析化学会第65年会、2016年9月16日、北海道大学

##### [その他]

プレスリリース 2016年2月17日 「インターネット大容量光通信への応用に期待 – 分子の回転周波数での光波変調を世界最高の効率で実現 –」