



## 変調器を用いた光周波数変換

末田 正・松島 朋史

大阪大学基礎工学部電気工学科 〒560 豊中市待兼山町 1-1

### 1. ま え が き

光波に限らず、電磁波の周波数を変化させて別の周波数の電磁波に変えることを、周波数変換 (frequency conversion), 周波数偏移 (frequency shifting), 周波数移動 (frequency translation) などという。ここでは、比較的狭い範囲で光周波数を変える技術について最近の状況を概観してみたい。このような技術は、レーザーのような固定周波数の光源から、周波数可変の光波を得るのに有用であり、レーザー分光、光応用計測、デジタル光通信などに応用される。

### 2. 光変調器の利用

光周波数ある値から別の値に変える方法としてすぐ考えつくことは、光変調器の利用である。一般に、周波数  $f_0$  の光波を周波数  $f_m$  の信号で変調すると、搬送波のほかに、 $f_0 \pm qf_m$  の側波帯 (サイドバンド) を生じる。ただし、 $q$  は自然数である。すなわち、元の光周波数と異なる周波数をもついくつかの光波成分が得られる。したがって、適当なフィルタによってこのうちの一つの成分 (たとえば  $f_0 + f_m$ ) を取り出すことができれば、 $f_0$  から  $f_0 + f_m$  への周波数変換あるいは周波数シフトが行なわれたことになる。

このような方法は簡便ではあるが、光パワーが不要な周波数成分にも変換されるので効率が良くない。上の例では、高次の成分は別としても、 $f_0 - f_m$  の周波数成分に同量の光パワーが変換されてしまう。変換系は複雑となるが、単側波帯 (SSB) 変調法を利用するとこの問題を解決することができる。図 1(a) はこのような系の構成例を概念的に示している。すなわち、入力光パワーを二分し、それぞれを別々に変調する。その際、両変調素子に入力される光波ならびに変調電気信号の位相を適当に調整することによって、一方の側波帯成分を打ち消し、上下いずれかの側波帯成分だけを取り出すことができる。

さて、ブリルアン散乱のような、媒質中における光波と超音波の相互作用を利用するとドップラ効果によって

光周波数を変えることができる。これを、音響光学効果を利用した超音波回折格子による光波の回折としてみると、各側波帯が空間的に (回折次数として) 分離されていることになる。とくに、ブラッグ回折を利用すると、SSB のように特定の側波帯 (回折次数) だけを効率よく取り出すことができる。このような方法はすでに確立され、数十 MHz 程度の周波数シフトに広く用いられている。ただし、原理的にシフト量の大幅な変化は困難であり、また、シフト量によって光ビーム方向 (回折方向) が異なる。したがって、一定量の周波数シフトに適しているといえる。

最も効果的な方法は、図 1(b) に示すようなセロダイン (serrodyne) 法に基づくものである。適当な光位相変調器によって、時間  $t$  に比例する光位相変化 (これを  $\phi = 2\pi f_m t$  とする) が得られると、出力光波の瞬時値  $\sin(2\pi f_0 t + \phi)$  から、周波数は明らかに  $f_0 + f_m$  となり、原理的には 100% の変換効率が得られるはずである。また、このような位相変化を無限に続けることは困難であるが、振幅 (pp 値)  $2\pi$ , 繰返し周波数  $f_m$  ののこぎり波状位相変調によっても同じ効果を得ることができる。

表 1 は、最近報告された光周波数変換器の例を示している。

### 3. 導波形デバイスの利用

高い変換効率を実現するためには、高性能の光変調器が要求される。従来のバルク形光変調器では、高い変調度を得るためには、大きい変調電力、高い変調電圧が必要となり実際的ではない。一方、ここ数年来、 $\text{LiNbO}_3$  のような電気光学結晶基板の上に作られた光導波路の利用によって、可視および近赤外領域の高性能光変調器が得られるようになった。すでに、このような導波形光変調器によるセロダイン方式光周波数変換器<sup>1)</sup>とレーザードップラ速度計への応用<sup>2)</sup>が報告されている。

また、2個の干渉計形光変調素子と3個の光移相器を一枚の  $\text{LiNbO}_3$  基板上に集積化して構成した SSB 光変調器によって、2 GHz の周波数シフトを比較的高い効

表 1 最近報告された光周波数変換器の例

方 式	周波数シフト	変換効率(%)	材 料	光の波長 ( $\mu\text{m}$ )
A/O(ファイバ形) <sup>5)</sup>	15 MHz	—	ファイバ	0.633
A/O(ブラッグ, 光導波形) <sup>4)</sup>	500 MHz	—	LiNbO <sub>3</sub>	0.633
E/O(セロダイン形) <sup>1)</sup>	4 MHz	—	LiNbO <sub>3</sub>	0.633
E/O(集積光導波形) <sup>3)</sup>	2 GHz	30	LiNbO <sub>3</sub>	0.633
E/O(光導波形) <sup>7)</sup>	90 MHz	10	LiNbO <sub>3</sub>	1.15
E/O(F-P 変調器) <sup>6)</sup>	0~2.2 GHz	—	CdTe	10.6

A/O: 音響光学効果, E/O: 電気光学効果

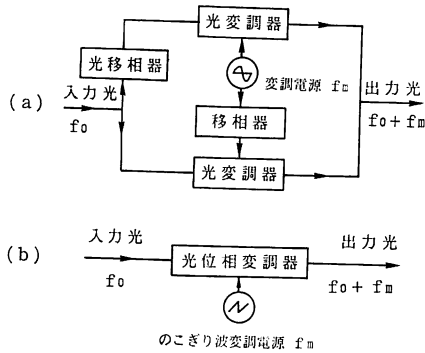


図 1 単側波帯変調法(a)とセロダイン法(b)による光周波数変換

率で行なったという報告もある<sup>3)</sup>。

超音波によるブラッグ回折を利用する場合にも、導波形の構成が有利である。この場合には、超音波として表面弾性波(SAW)が用いられる<sup>4)</sup>。

音響光学効果を利用するものとしては、最近、光ファイバ中における光波と超音波の相互作用を利用したものも報告されている<sup>5)</sup>。

#### 4. 赤外光の場合

一方、波長  $10 \mu\text{m}$  付近の中赤外域では、音響光学効果を利用したバルク形素子以外に高性能の変調器が得たいこともあり、特別な工夫が必要である。一つの方法は、多重反射によって高い変調効率の得られる F-P 光変調器(ファブリ・ペロー光共振器の中に、適当な光位相変調素子を挿入したもの)の利用である。この場合、多重反射によって帯域幅はせまくなるが、共振器の特性として、DC から始まる基本帯域だけでなく、縦モード周波数(共振器の光学長を  $L$  として  $f_L = c/2L$ )の整数倍の周波数付近でも変調可能であるという性質がある。

図 2 に示すのは、これを利用し、周波数可変 CO<sub>2</sub> レーザー(可変幅を  $\Delta f$  とする)と組み合わせて、周波数可変範囲を大幅に拡大するものである。すなわち、可変

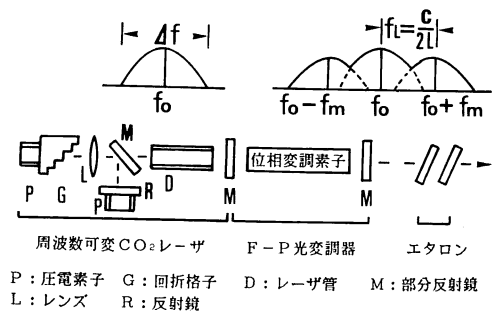


図 2 ファブリ・ペロー変調器を利用した周波数可変導波形 CO<sub>2</sub> レーザーシステム

幅  $\Delta f$  を、変調器によって  $f_L$  の整数倍だけつぎつぎにずらせていこうとするものである。 $\Delta f$  が  $f_L$  より大きければ、相隣る可変範囲がつながり、広帯域の可変周波数赤外光源が得られる。実際、高圧力導波形 CO<sub>2</sub> レーザーと、CdTe F-P 光変調器との組合せによって、2.2 GHz の範囲にわたる周波数可変の実験が報告されている<sup>6)</sup>。

#### 文 献

- 1) K.K. Wong and R.M. De La Rue: "Electro-optic waveguide frequency translator in LiNbO<sub>3</sub> fabricated by proton exchange," *Opt. Lett.*, **7** (1982) 546-548.
- 2) H. Toda, *et al.*: "Integrated-optic fiber laser Doppler velocimeter," *Tech. Dig. OFS'86* (1986) pp. 97-100.
- 3) M. Izutsu, *et al.*: "Integrated optical SSB modulator/frequency shifter," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17** (1981) 2225-2227.
- 4) C.S. Tsai and Q. Li: "Wideband optical frequency shifting using acoustooptic Bragg diffraction in a LiNbO<sub>3</sub> spherical waveguide," *Tech. Dig., IOOC-ECOC '85* (1985) pp. 129-132.
- 5) W.P. Risk, *et al.*: "Acousto-optic frequency shifting in birefringent fiber," *Opt. Lett.*, **9** (1984) 309-311.
- 6) T. Matsushima, *et al.*: "A tunable waveguide CO<sub>2</sub> laser using Fabry-Perot modulator and Fox-Smith type mode selector," *Conf. Dig., 11th IR and MM Waves* (1986) pp. 460-461.
- 7) L.M. Johnson, *et al.*: "Integrated-optical channel waveguide frequency shifter," *Tech. Dig., 7th Top. Meet. on Integrated and Guided-Wave Optics* (1984) WD4.

(1987年5月11日受理)