

音響光学効果変調素子を用いた 光ヘテロダイン・レーザ顕微鏡

Optical Heterodyne Microscope with Acoustooptic Frequency Translator

藤井陽一*・鈴木輝義*

Yoichi FUJII and Teruyoshi SUZUKI

1. はじめに

光ヘテロダイン検波の有する結像作用を利用したものが、光ヘテロダインレーザ顕微鏡である。光ヘテロダイン検波では、2つの周波数の異なる光の間の差周波数を検出するものであるが、両光の位相差が受光面全体で一致しているときのみビート成分が検出され、一致していないときには受光器全体としては打ち消され検出されない。図1に示すように角周波数 $\omega + \Delta\omega$ の球面波の光を参照光とし、角周波数 ω の光を照明光とすると、照明された試料の各点から出る球面波の中で、その試料内の点のビームスプリッタによる鏡像が、参照光の中心と一致する点からの光と参照光とのビート成分のみが検出される。本研究においては、周波数を $\Delta\omega$ シフトさせる周波数変換器に注目する。従来、電歪振動子を用いていたが、今回これを超音波光変調器 (AOM) にして、従来のものとの違いを比較した。

2. 音響光学効果変調素子

音速 v_s で動いているミラーに、ブラッグ条件式 ($2\lambda_s \sin \theta = \lambda$) を満足する角度で入射する光ビームがドップラシフトを受けると考える。動いている物体からの反射波のドップラ周波数推移の公式は

$$\Delta\omega = 2\omega v/c \quad (1)$$

である。ただし、 ω は光の角周波数、 v は物体の速度の光波伝搬方向成分である。 $v = v_s \sin \theta$ であるから

$$\Delta\omega = 2\omega v_s \sin \theta / c \quad (2)$$

$2\lambda_s \sin \theta = \lambda$ より $\sin \theta$ を消去して

$$\Delta\omega = 2\pi v_s / \lambda_s = \omega_s \quad (3)$$

となることより、入射ビームの角周波数を ω 、回折ビームの角周波数を ω_d とすると

$$\omega_d = \omega + \omega_s \quad (4)$$

となる。上式から判るように、回折ビームの周波数は、

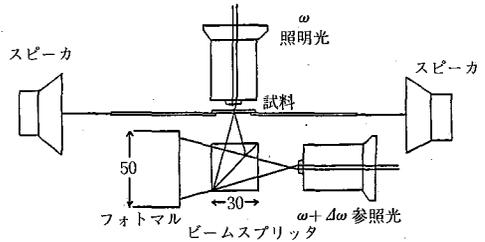


図1 光ヘテロダインレーザ顕微鏡の結像部

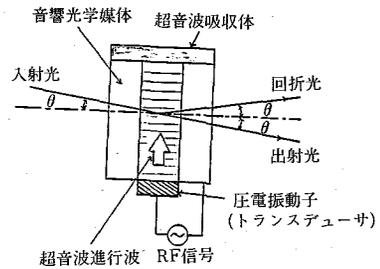


図2 AOMの構造

音波の周波数分だけ推移する。音波の伝搬の向きが逆転し、入射光ビームから遠ざかってゆく場合には、ドップラシフトの符号は反転し、回折ビームの角周波数は

$$\omega_d = \omega - \omega_s \quad (5)$$

となる。

今回用いた AOM は、NEC の OD-8810 (駆動周波数 80 MHz) であり、その構造図を図2に示す。高周波の電気信号は、音響光学媒体上に結合された圧電振動子により、超音波信号に変換され音響光学媒体内を進行する。この超音波信号は、媒体の屈折率を周期的に変化させ、光に対して回折格子の役割を果たす。このようにブラッグ回折現象を利用したものが AOM である。ブラッグ回折では、超音波の波面に対して $\sin \theta = v_s \lambda / 2v_s$ で与えられるブラッグ角 θ で入射する光が、波面と同じ角度をなす方向に回折される。つまり、入射光は超音波の波面によって反射され、反射光は入射角が角度 2θ 偏向された

* 東京大学生産技術研究所 第3部

研 究 速 報

表 1 AOM仕様

項 目	AOM	項 目	AOM
駆動周波数	80MHz	消光比	1000 : 1 以上
駆動帯域幅	50%以上	インピーダンス	50Ω
回折効率*	80%以上	立上がり時間**	20ms以下
温度安定度	0.1%/℃以下	***	150ms以下

*633nm(ビーム径0.3mmφ), **ビーム径70μmφ,
***ビーム径0.8mmφ

ものとして取り扱うことができる。

3. 音響光学効果変調素子の特性測定

(1) AOM (NEC OD-8810) の主な特長

- a. 音響帯域幅が広いため圧電素子の駆動が容易。
- b. 消光比が大きい。
- c. 変調速度が速い。
- d. 駆動電力が小さい (0.4~2 W)
- e. 温度安定度が良好。
- f. 小型、軽量で取り扱いが容易。

一般に、AO変調素子として要求される条件は次のとおりである。

- a)ブラッグ反射における偏向感度,超音波帯域幅が大きいこと(屈折率,光弾性定数が大きく音速が小さいこと)。
- b)材料の超音波吸収係数が小さいこと。
- c)音速の温度変化の小さいこと。

このような条件を満たす材料としてOD-8810ではモリブデン酸鉛(PbMo₄)を用いている。また,トランスデューサにはリチウムナイオベート(LiNbO₃)の高結合トランスデューサを用いている。

(2) AOMの駆動周波数および駆動電力の決定

AOMの性能を示す指標は,回折効率と変調帯域幅或いは,立上がり特性である。AOMを使用するのに問題となるのが,AOMの駆動周波数および駆動電力の決定である。今回使用しているAOMは,駆動周波数80MHzとなっているが,これではフォトマルあるいは増幅器等の回路上に無理が生じてしまう。そこでAOMの音響帯域幅が50%以上あることにより,回折効率および音響帯域幅の測定により,なるべく低い周波数で最適な回折効率を得られるような駆動周波数と駆動電力を決定することにする。以下の実験により次のように定めた。

駆動周波数 60 MHz, 駆動電力 0.8 W

a) 透過率の測定

レーザ光を1mmφのピンホールを通し,透過光量が最大になるようにAOMを微動させて調整する。次に,減光板にて,レーザ光量を1mWに調整する。このときのAOMを透過してきた第0次回折光の光量を光パワ

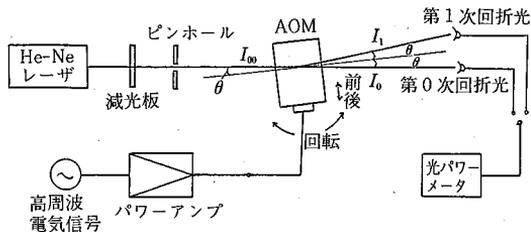


図 3 透過率,回折効率,変調帯域幅の測定構成図

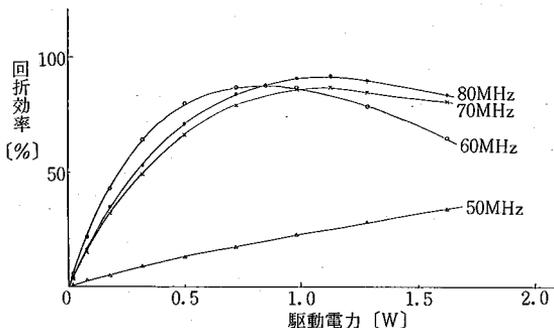


図 4 回折効率特性 (Bragg角はおおのの周波数にて調整)

ーメータで読み取り,下式に代入すれば光透過率 T が求まる。

$$\text{透過率} = \frac{0 \text{ 次光量 } (I_0)}{\text{レーザ光量 } (I_{00})} \times 100$$

今回の測定における透過率は 97% であった。

b) 回折効率の測定

初めに,レーザ光の光量を1mmφ,1mWにしておく。次にAOMに250mW程度のRF信号を入力し,第1次回折光の光量が最大になるようにAOMを回転,上下,前後に微調整する(すなわち,ブラッグ角の調整である。駆動周波数を80MHzとした場合のブラッグ角は約0.4degである)。この状態で発振器の出力レベルを変変して第1次回折光の光量の最大値を光パワーメータにより読み取り,下式に代入すると,回折効率 η が求まる。

$$\text{回折効率 } \eta = \frac{\text{第1次回折光}}{\text{第0次回折光}} \times 100$$

測定は,80MHzにてブラッグ角を調整,固定し,そのときの50,60,70,80MHzの各周波数における回折効率と,ブラッグ角を50,60,70MHzのおおのの場合について調整したときの各周波数における回折効率を求めた。(図4)

c) 帯域幅特性

ブラッグ角は80MHzにて調整し,固定する。80MHz時の回折効率を100%とすると,これが50%に低下する帯域幅は約40MHzであった。

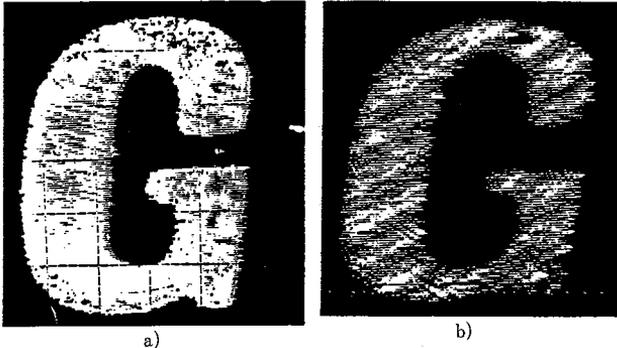


図5 周波数変換器の違いによる再生像の比較
a) 電歪振動子 b) AOM

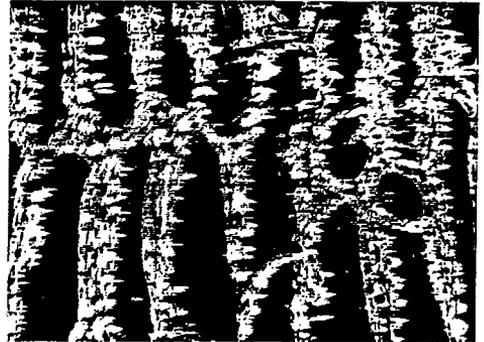


図6 玉ネギの細胞 (AOM 使用)

4. 実験結果

1) AOM 特性

ブラッグ角を 60 MHz において調整したときの回折効率(図4)を見てみると、60 MHz における最大回折効率の値は、80 MHz におけるそれより、わずかに 4% ダウンと、なかなか良い値を示しているのがわかる。

これらのことより、駆動周波数を 60 MHz とし、駆動電力は、最大回折効率を示した 0.85 W と決定し、以下の実験を行った。

2) 分解能の測定

a) 横方向分解能

信号光と参照光は共に 40 倍の光学顕微鏡用対物レンズで集束し、参照光を光軸方向に対し垂直に手動送りして測定した。実験的分解能は $1.82 \mu\text{m}$ であった。なお分解能は曲線の頂点から 3 dB 下がった位置の全幅値で定義している。

b) 奥行方向分解能

横方向と同様にして行ったが、この場合は参照光を光軸方向に対し平行に手動送りして測定した。得られた実験的分解能は、 $2.35 \mu\text{m}$ であった。

3) 試料の再生像

図5は、マイクロフィルム上の英字“G”の再生像である。字の大きさは、縦方向 0.6 mm 、横方向 0.3 mm である。(a)は周波数変換器に電歪振動子を用いたものであり、(b)はAOMを用いたものである。どちらも約 100 倍の像として得られた。

図6は、AOMを用いたときの玉ネギの細胞を映し出したものである。

5. 結 論

以上のように音響光学効果変調素子を周波数トランスレータとして用いた光ヘテロダインレーザ顕微鏡を試作

しその特性を明らかにすることができた。

この方式は、従来の振動鏡を周波数トランスレータとして用いるものに比べ、光学軸上の調整が多少困難になるが、振動鏡の場合と異なり、干渉による像の乱れが除去できるので、画質の改善に効果のあることが分かった。

(1984年7月2日受理)

参 考 文 献

- 1) 藤井・滝本：光ヘテロダインによる結像，電気談話会報告，Vol. 22, No. 27, Oct. 26 (1972)
- 2) 藤井・滝本：光ヘテロダインを用いたレーザ顕微鏡，電気談話会報告，Vol. 25, No. 7 (1975)
- 3) 藤井・滝本：光ヘテロダイン検波を用いた画像検出，電通全国大会 857 (1975)
- 4) 藤井・滝本：球面波光ヘテロダイン法による速度分布の測定，電気学会全国大会 497 (1975)
- 5) 藤井・滝本：光ヘテロダインによる結像，OQE 72-48 (1972-10)
- 6) 藤井・滝本：光ヘテロダイン検波を用いた結像特性の解析，OQE 74-19~27 (1974-06)
- 7) 藤井・滝本：光ヘテロダインによるレーザ顕微鏡，OQE 74-84 (1975)
- 8) 藤井・滝本：ガウス波を参照光源としたレーザ・ヘテロダイン顕微鏡の極限分解能，OQE 75-61 (1975)
- 9) 藤井・五十嵐：レーザ顕微鏡，電気四学会連合大会，117 (1978)
- 10) 藤井・五十嵐：高速走査によるヘテロダイン・レーザ顕微鏡，電子通信学会 769 (1978)
- 11) 藤井・五十嵐：光ヘテロダイン・レーザ顕微鏡，電子通信学会 871 (1979)
- 12) 藤井・五十嵐：物体走査型光ヘテロダイン・レーザ顕微鏡，電子通信学会 844 (1980)
- 13) 藤井・五十嵐：三次元光ヘテロダインレーザ顕微鏡，電気談話会報告 Vol. 29, No. 29 (1979)
- 14) 藤井・樫田：光ヘテロダイン・レーザ顕微鏡，応物，9 P-N-2 (1981)
- 15) 藤井・樫田：光ヘテロダインレーザ顕微鏡の立体分解能，電気学会研究会資料 LAV-82-24 (1982)