

# サーモプラスチック光記録素子の空間周波数レスポンス

末 元 好 郎  
(受理 昭和57年 5月20日)

## SPATIAL FREQUENCY RESPONSE OF THERMOPLASTIC OPTICAL RECORDING PLATES

Yoshiro SUEMOTO

Thermoplastic-photoconductor optical recording plates were fabricated, in which fairly thick thermoplastic layers of about  $10\mu\text{m}$  thickness formed active layers. The method for processing the thermoplastic plates was a sequential one, in which charge, exposure and heat development proceeded sequentially. The spatial frequency response of the plates was measured in the following way: the interference fringes of various spatial frequencies exposed the plates and real-time digital differentiation of the diffracted light output from the recorded thermoplastic plates detected their peak diffraction efficiencies during heat development. The spatial frequency response measured had a band-pass region, whose center was located at the spatial frequency of about 100 lines/mm rather than several hundred lines/mm in the case of usual thermoplastic plates.

### 1. はじめに

われわれの視覚より入る情報は非常に多量である。たとえば聴覚より入る情報を時間の1次元の流れに沿う鼓膜の振動という点で1次元情報と呼べば、視覚より入る情報は2次元(画像)ないしは3次元(立体)の情報である。このような2次元、3次元の情報を記録するには、従来写真フィルムが最も多く用いられてきたが、これに代り現像が即座にでき、消去もできる素子が種種研究、開発されてきた<sup>1)</sup>。サーモプラスチック光記録素子<sup>2), 3)</sup>はこれらの素子の一つである。

サーモプラスチック光記録素子は、空間周波数レスポンスの点からホログラムの記録に最も適している。ホログラムは、3次元物体より散乱される光波と参照光が干渉してできる干渉縞を何らかの光記録素子——たとえば写真フィルム——に記録するもので、これをレーザー光で照射すればもとの3次元物体の像が再生される。この干渉縞は、物体よりの散乱光と参照光のなす角で可成り空間周波数を中心とするバンド状の空間周波数成分をもっているため、これを記録する記録素子も、そのバンドに合致する空間周波数レスポンスを示すものでなければならない。サーモプラスチック光記録素子の空間周波数レスポンスは、ちょうどその

ようなバンドパス特性を示す。

このバンドの中心周波数はプラスチックの膜厚と関係があり、膜厚を変えて空間周波数レスポンスを測定した結果の報告がある<sup>4)</sup>。この場合、プラスチックの膜厚は比較的薄く、 $1\mu\text{m}$ 前後であり、中心周波数が300~1000 lines/mmの範囲について実験が行われている。普通、ホログラムはこの程度の高い空間周波数をもつ干渉縞を記録するので、この程度の膜厚で実験をしているのは妥当である。

サーモプラスチック光記録素子では、素子もっている光導電層により、光のパターンを電荷のパターンに変換する。そして、プラスチックを加熱軟化し、電荷の静電力によってプラスチックを塑性変形しパターンを記録する。この電荷パターンを、直接TV方式による走査電子線でプラスチック上に形成し、これをもってパターンを記録することもできる<sup>5), 6)</sup>。電子ビームで記録する場合は、電子ビームの径を $10\mu\text{m}$ 程度しか集束できないので、パターンの解像力——空間周波数レスポンスの最高周波数——が100 lines/mm以下となり、サーモプラスチックの周波数レスポンスも100 lines/mm以下にする必要がある。このように比較的低い空間周波数レスポンスを得るためのプラスチック膜厚に関しては、空間周波数25 lines/mmのホログラムを電子線で書き込むのに、厚さ $18\mu\text{m}$ の

サーモプラスチックを用いている報告がある<sup>7)</sup>。サーモプラスチック光記録素子の場合も、このように厚いプラスチック層を用いて空間周波数レスポンスを測定した例があるが<sup>8)</sup>、膜厚を変えて測定を行ってはいない。

本論文では、比較的厚い 10 $\mu$ m 前後の厚さのプラスチック層をもつサーモプラスチック光記録素子を製作し、その膜厚を変えて空間周波数レスポンスを測定した結果について報告する。2. 実験方法では、製作した素子の構造と空間周波数レスポンス測定装置について述べる。3. 実験結果では、最適な現象加熱停止に関する実験結果ならびに種類のプラスチック膜厚の素子について測定した周波数レスポンスを示し、プラスチック膜厚と周波数レスポンスの関係について考察する。

## 2. 実験方法

### 2.1 サーモプラスチック光記録素子

サーモプラスチック光記録素子の構造を Fig. 1 に示す。ガラス基板表面には透明導電膜 (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) が形成してあり、その上に有機光導電体層、熱可塑性プラスチック層を順次形成して素子を製作した。有機光導電体層には、ポリ N ビニルカルバズル (PVK) 3.5g に増感材として 2-4-7 トリニトロ 9 フルオレノン (TNF) 0.4g を添加したもの——可視域の長波長光に対する PVK の増感のため——を、1, 1, 2 トリクロロエタン 15ml とテトラヒドロフラン 15ml の混合液に溶かしたものを用いた。これをスピナー (回転塗布機) で塗布後乾燥して膜を形成した。熱可塑性プラスチック層には、エステル樹脂であるスタベライトエステル 10(Hercules 社の商品名) 10g, 15g, 20g を n ブチルアルコール 13g に溶かした 3 種類の溶液を用いた。これを有機光導電体層の上にスピナーで塗布し、プラ

スチック膜を形成した。このように溶液の濃度を変えたのはプラスチックの膜厚を変えるためであり、でき上った素子には濃度の低いものから順に I, II, III の番号をつけた。

### 2.2 空間周波数レスポンス測定装置

空間周波数レスポンス測定装置を Fig. 2 に示す。He-Ne レーザーより出たビームは、半透鏡 B1 で 2 つに分けられ、それぞれ反射鏡 M1, M2 で反射後半透鏡 B2 を透過あるいは反射し、サーモプラスチック素子上に 2 つのビームのなす角  $\theta$  に相当する干渉縞をつくる。この干渉縞の空間周波数  $f$  は

$$f = \sin \theta / \lambda \quad (1)$$

で与えられる。ここに  $\lambda$  はレーザーの波長である。

サーモプラスチック素子表面の帯電は、コロナ・ワイヤを素子の表面上を走査して行った。コロナ・ワイヤへの電圧の印加、コロナ・ワイヤの走査、加熱現象用ヒート電流の印加はマイクロコンピュータで制御した。

素子の現象は逐次法<sup>3)</sup>——帯電、露光、再帯電、加熱現象と順次行ってゆく方法——を用いたが、その加熱現象における加熱の停止はかなり厳密を要する。このため、記録される干渉縞による回折光を光電子増倍管で監視し、その光電出力の時間微分をマイクロコンピュータで実時間で行い、最適の時点で加熱停止信号を発生する——という方法をとった。そのため、光電子増倍管の出力を A/D コンバーターを経てマイクロコンピュータへ入れるようにしてある。

素子の帯電、露光、再帯電、加熱現象のプロセスを Fig. 3 に示す。まず、コロナワイヤの走査によりサーモプラスチック上にイオンを帯電させる。次にシャッター S1 (Fig. 2 参照) を開いて露光を行い——S2 は初めから開いているので、2 つのビームによる干渉縞が素子を露光する——再びコロナワイヤの走査により帯電を行う。このようにして、サーモプラスチック表

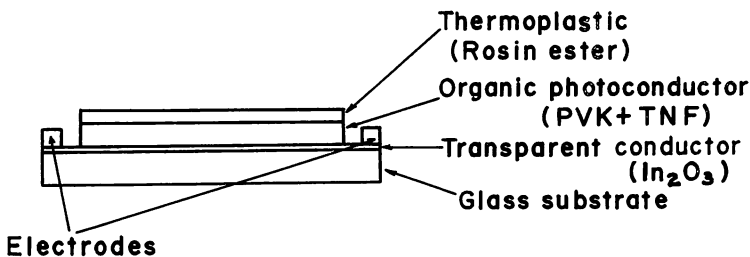


Fig. 1 Structure of thermoplastic optical recording plate.

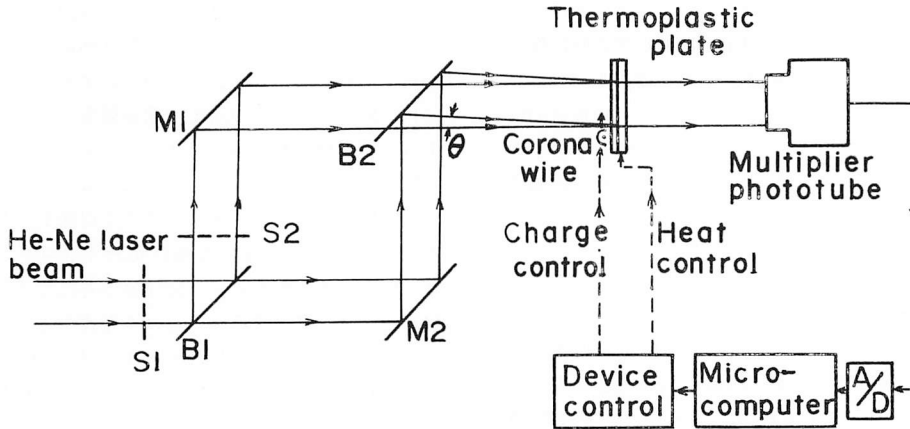


Fig. 2 Equipment for measurement of spatial frequency response of thermoplastic plate. M1, M2: mirrors, B1, B2: beam splitters, S1, S2: shutters.

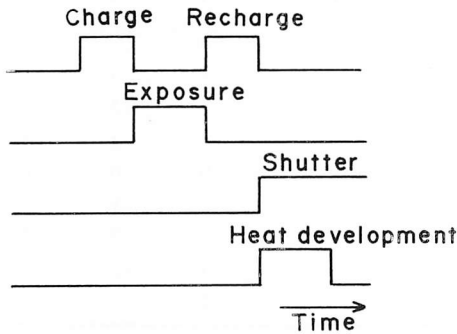


Fig. 3 Time sequence of charge, exposure and heat development for thermoplastic plate processing.

面には干渉縞の光パターンに対応する電荷分布が得られる<sup>3)</sup>。なお帯電、露光等の時間は数秒である。

次にシャッター S2 (Fig. 3 に記したシャッターはこれである) を閉じて、一方の光だけをサーモプラスチック素子に当てておく。そして、素子の透明導電膜に電流を流して素子を加熱すると、プラスチックは約 80°C で軟化し、電荷の静電力でもとの光の干渉縞に対応するプラスチックの塑性変形が起る。この変形のため素子に当ててある光の回折が起り、光電子増倍管に回折光が入射し、その強度に比例する光電出力が得られる。

### 3. 実験結果

#### 3.1 プラスチックの膜厚

素子への記録プロセスにおいて、露光を行わない場合でも、帯電・現像によって微細で方向性のランダムなしわがプラスチック表面に塑性形成される。これはフロストと呼ばれている。これは露光によってホログラムを記録後、光を当てて読出する場合、ホログラムの作り出す像に回折光として散乱光のようになって重なるので、余りよくないものであるが、プラスチック膜厚の目安をつけるのに好都合なものである。このフロスト像を Fig. 4 に示す。これはフロストの形成された素子にレーザー光を当てた場合得られた回折像である。フロストはランダムな方向を持つしわなので、回折像はリング状になっているが、そのしわの寸法が

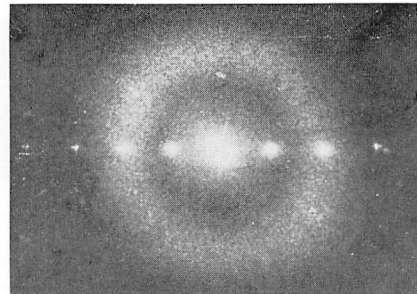


Fig. 4 "Frost pattern" diffracted from thermoplastic plate.

ほぼ一定の大きさをもっているのでリングはほぼ一定の直径をもっている。なお Fig. 4 の点状の回折像は露光により記録した干渉縞によるものである。

フロストの形成を流体力学と静電気学とで理論的に取扱った論文<sup>9)</sup>によると、フロスト像のリングの平均直径に張る回折角  $\alpha$  とプラスチック膜厚  $h$  との間には

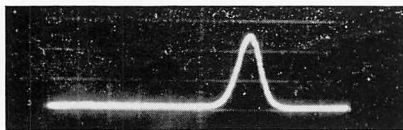
$$h \doteq \frac{a}{2}, \quad a = \frac{\lambda}{\sin \alpha} \quad (2)$$

の関係がある。ここに  $\lambda$  はレーザー光の波長である。そして  $a$  は、(2) の第2式の示す回折角の関係から考えると、フロストのしわの平均の寸法を示すものとなっている。(2) の第2式は、プラスチック膜厚  $h$  の素子はほぼ  $2h$  の寸法のフロストを形成することを示している。

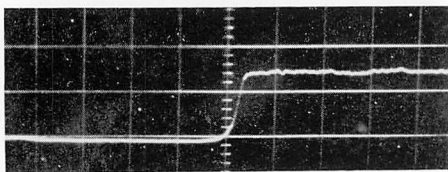
作製した素子 I, II, III の膜厚を、それぞれの素子の作るフロスト像より (2) 式を用いて計算すると、それぞれ  $3\mu\text{m}$ ,  $7\mu\text{m}$ ,  $12\mu\text{m}$  となった。これは機械的に実測した膜厚ではないので、一応の目安である。

### 3.2 現像加熱の最適停止

現像のプロセスで述べたように、一方のレーザー光だけ素子に当て素子よりの回折光を光電子増倍管で監視しながら、加熱現象を開始すると、Fig. 5 (a) のような回折光の光電出力波形が得られる。これは、加熱によりプラスチックが軟化し、帯電・露光により記録された電荷パターンの静電力によりプラスチックの塑性変形が起り回折光が強くなるが、加熱をそのまま続



(a)



(b)

Fig. 5 Diffracted light intensity wave form (a) when heat development proceeds; (b) when stopped at an optimum time. Horizontal scale 1 sec/div.

けているとプラスチックがさらに軟らかくなり、表面張力によって再び表面が平らになり回折光が減少するからである。従って回折効率の高いホログラムを得るには、回折光の最大の所で現像加熱を停止する必要がある。空間周波数レスポンスのデータも、この最も回折光の高い値をとらなくてはならない。

光電出力がピークに達する時点で現像加熱を停止するため、光電出力波形の微分をマイクロコンピュータにより実時間で行い、微分値が零になる所で現像停止パルスを発生する——という方式をとった。微分は光電出力をサンプルしたデータ点に Table 1 に示す整数群をコンボリュートして行った。Table 1 に

Table 1. Integer groups for convolution with data points to obtain 1st derivatives.

Data points	9	7	5
	4		
	3	3	
	2	2	2
	1	1	1
Integer groups	0	0	0
	-1	-1	-1
	-2	-2	-2
	-3	-3	
	-4		

示す整数群は、最小二乗法でサンプリングデータに2次式を適合する場合のものである。実験では、データ点数5の最も簡単な場合について行った。この方式で最適の現像停止を行った場合の光電出力波形を Fig. 5 (b) に示す。これを見れば最大回折効率の時点で現像が停止されているのが分る。

### 3.3 空間周波数レスポンス

Fig. 2 の光学系で反射鏡 M2 と半透鏡 B2 を少し回転することにより、2つのレーザービームのなす角  $\theta$  を少しずつ変えてゆくことができる。それに対応して、(1) 式で与えられる空間周波数をもつ干渉縞がサーモプラスチック素子上に形成される。これで露光すれば、その空間周波数の縞が記録される。そして、最も回折効率が高くなるように加熱現象を停止して、回折光の強さを読み取った。4枚のサーモプラスチック素子——内2つは同一膜厚——について記録した干渉縞の空間周波数と得られた回折効率の関係を測定してプ

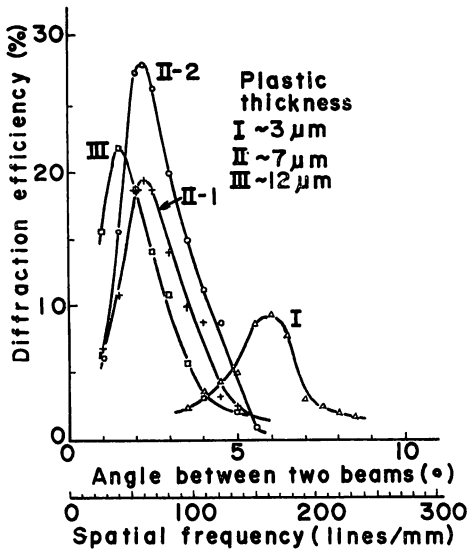


Fig. 6 Diffraction efficiency of thermoplastic plates as a function of spatial frequency of recorded pattern and corresponding angle between two beams with parameters of plastic film thickness.

ロットしたものを Fig. 6 に示す。回折効率の値としては、回折光と入射光の強度比をとってある。また空間周波数と対応して、露光時における2つのレーザー・ビームのなす角  $\theta$  を合わせて記してある。

これをみれば、サーモプラスチック素子の空間周波数レスポンスはバンドパス特性を示していることが分かる。そしてその中心周波数——回折効率の最大値に対応する——は I, II, III の素子に対してそれぞれ、164, 62, 41 lines/mm であり、これを縞間隔に換算すればそれぞれ、6, 16, 24 μm である。いまこれら縞間隔を  $l$  としてプラスチック膜厚  $h$  との関係で

$$l = Kh \tag{3}$$

とすれば、 $K$  はそれぞれ 2.0, 2.3, 2.0 となる。これを、プラスチック膜厚の薄い場合の実験結果<sup>4)</sup>  $K = 2.5 \sim 3.0$  にくらべると少し小さい値になっている。しかし膜厚の正確な値を得ることが困難なことから、素子製作における相異などを考えると、それらのばらつきの範囲内では妥当な値といってもよい。

最後に回折光の強度の絶対値に関して述べる。薄いプラスチック膜の場合 10% 程度の回折効率が普通である——素子 I がその例である。それにくらべ厚いプラスチック膜の素子は高い回折効率が得られる——ということがこの実験で分かった。素子 II-1, II-2 は同一膜厚であるのにかなり異った回折光強度を示しているが、これはサーモプラスチック素子の個個のばらつきである。サーモプラスチックのような位相型ホログラムの回折効率は理論上最大 32% であるから、素子 II-2 は特に回折効率のよい素子であった——ということがいえる。

#### 4. おわりに

プラスチック膜の比較的厚い素子の空間周波数レスポンスを測定した。その結果、薄い膜の素子の場合と類似の結果——(1) 空間周波数特性がバンド・パス特性をもつこと、(2) その中心の空間周波数が膜厚と一定の関係をもつこと——を示すことが分かった。

この場合バンドの中心の空間周波数とプラスチック膜厚の間の関係式の比例定数——(3) 式の  $K$ ——が求められ、低い空間周波数に応答する素子の製作のための設計規準が得られた。

#### 参考文献

- 1) D. Casasent: Proc. IEEE **65** (1977) 143.
- 2) J. C. Urbach and R. W. Meier: Appl. Optics **5** (1966) 666.
- 3) L. H. Lin and H. L. Beauchamp: Appl. Optics **9** (1970) 2088.
- 4) D. S. Lo, L. H. Johnson and R. W. Honebrink: Appl. Optics **14** (1975) 820.
- 5) R. J. Doyle and W. E. Glenn: IEEE Trans. Electron Devies **ED-18** (1971) 739.
- 6) R. J. Doyle and W. E. Glenn: Appl. Optics **11** (1972) 1261.
- 7) T. Minemoto and T. Takahashi: Opt. Commun. **38** (1981) 243.
- 8) W. S. Colburn and B. J. Chang: Opt. Eng. **17** (1978) 334.
- 9) H. F. Budd: J. Appl. Phys. **36** (1965) 1613.