



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



色素薄膜を用いた位相共役干渉法

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 中川, 一夫, 古川, 弘司, 藤原, 裕文 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/755

色素薄膜を用いた位相共役干渉法

中川一夫・古川弘司*・藤原裕文

Phase-Conjugate Interferometry Using Dye Film

KAZUO NAKAGAWA, KOUZI FURUKAWA, HIROFUMI FUJIWARA

Abstract

Both real-time and double-exposure phase-conjugate interferometries are demonstrated with an eosin-doped gelatin film. A xanthen dye-doped film can generate phase conjugate waves simultaneously or separately through degenerate four-wave mixing (DFWM) and holographic processes. The holographic process differs from the DFWM process in the respect that the xanthen dye-doped film can record spatial information on light like a hologram. The DFWM component has a response time of \sim msec, which is by a factor of 4 faster than that of the holographic component. The difference in their response times in the two processes is important in real-time and double-exposure phase-conjugate interferometries. Of xanthen dyes such as eosin, erythrosin and fluorescein, an eosin-doped gelatin film is most suitable for phase-conjugate interferometries.

1. はじめに

位相共役波は、もとの波に対して波面の形を変えずに、伝播してきた光路を逆に進む性質を持っており、4波混合、3波混合、誘導散乱、フォトンエコー¹⁾²⁾などの物理機構により、非線形光学媒質を用いて発生される。このような特異な性質をもった位相共役波の、光情報処理、光通信、干渉測定、レーザー共振器などの分野への広い応用が期待されている。

位相共役波を利用した干渉は位相共役干渉と呼ばれる。通常の干渉計の鏡を位相共役波を発生させる素子で置き換えることにより位相共役干渉は実現される。位相共役鏡を備えた干渉計は、従来の干渉計に比べ、いくつかの利点をもっている。たとえば、空気のゆらぎや光学素子によって生じた不均一な位相の乱れを除去できること、反射光は自動的にもときた道に戻ることに、位相共役鏡が高い利得をもつ場合には、物体からの弱い光を増幅してコントラストの高い明るい干渉パターンをつくれること、などが掲げられる。

これまでの位相共役干渉の研究では、位相共役波を発生させる物理機構としては、通常のホログラフィ³⁾のほかに、誘導ブリュアン散乱⁴⁾、3波混合⁵⁾、縮退4波混合⁶⁾⁻¹⁰⁾などが用いられ、その有効性が示された。これらの実験では、位相共役波を発生させる素子として、ホログラフィ乾板³⁾、 CS_2 ⁴⁾、 $\text{LiCHO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ⁵⁾、エオシン⁷⁾、 $\text{BSO}(\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20})$ ^{6),8)}、 BaTiO_3 ⁹⁾、およびNa蒸気¹⁰⁾

* 富士写真フィルム株式会社 (前応用物性学科)

などが使われている。

我々は、フルオレセイン、エオシン Y、エリトロシン B などのキサンテン系色素を分散させたゼラチン膜が、縮退 4 波混合とホログラフィ過程により、同時にまたは独立に位相共役波を発生させることを見出した¹¹⁾。これらの色素含有膜はアルゴンレーザー光に対する強い吸収を示す。縮退 4 波混合成分は、色素の飽和吸収によって発生し、msec 程度の時間応答をもつ。一方、ホログラフィ成分は、色素の吸収あるいは屈折率の非可逆的な光化学変化によって生じ、時間応答は縮退 4 波混合成分よりも 4 桁程度遅い。これらの色素含有膜は光に対する記録作用をもっていると考えるとよい。これらの点から、キサンテン系色素を分散させたゼラチン膜は、写真乾板のような記録特性をもち、同時に時間応答の速い位相共役波を発生させることができる新しい光学材料である。このような色素含有膜を位相共役鏡として用いれば、2つの過程（縮退 4 波混合とホログラフィ過程）を組み合わせることで、湿式の化学現象を行うことなしに実時間および二重露光位相共役干渉が可能となる。

本研究の目的は、フルオレセイン、エオシン Y、エリトロシン B などの色素のうち、どの色素が位相共役鏡として適しているかを調べるとともに、色素含有ゼラチン膜を位相共役干渉へ使うことの有効性を示すことである。

2. 実験装置

位相共役干渉を行なうための光学系を図-1に示す。光源はアルゴンイオンレーザーを用い、エオシン Y、エリトロシン B の場合は $0.515\mu\text{m}$ の波長を、フルオレセインの場合は $0.488\mu\text{m}$ の波長を使用した。これらの色素はアルゴンレーザー光の波長に対して吸収断面積が大きく、励起準位の寿命も比較的に長いので、低い入力パワーで位相共役波を発生させることができる。色素薄膜に対向する平面波ポンプ光 E_1 と E_2 およびプローブ光 E_{pr} をコヒーレント照射する。透過物体をプローブ光路内の O に置き、像面 I に結像する。コントラストの高い干渉パターンを得るためには、2種類の位相共役波の減衰時定数を前もって知る必要がある。プローブ光を遮断するためのシャッター S_1 はこの目的に使われる。色素薄膜にホログラフィ成分を記録するときには、シャッター S_2 によってポンプ光の一方（実験では E_1 ）を遮断する。

色素薄膜は以下のようにして作製する。まず、10wt % のゼラチンを溶解した $40\sim 50^\circ\text{C}$ の水溶液に色素を混合させる。この際、エオシン Y、エリトロシン B は直接混合させるが、フルオレセインはエタノールに溶解してから混合する。つぎに、溶液をガラス基板上に置かれた枠内に注いでいったん冷却し、ジェリー状にした後冷却しながら乾燥させる。本実験では、試料の厚さは $60\mu\text{m}$ 、色素濃度は、エオシン Y では0.2wt %、エリトロシン B では0.4wt %、フルオレセインでは、0.15wt % のものを使用した。これら試料によって発生する位相共役波の縮退 4 波混合成分の効率（入射プローブ光に対する位相共役波の強度比）は 10^{-3} のオーダーである。

色素薄膜を用いた位相共役干渉法

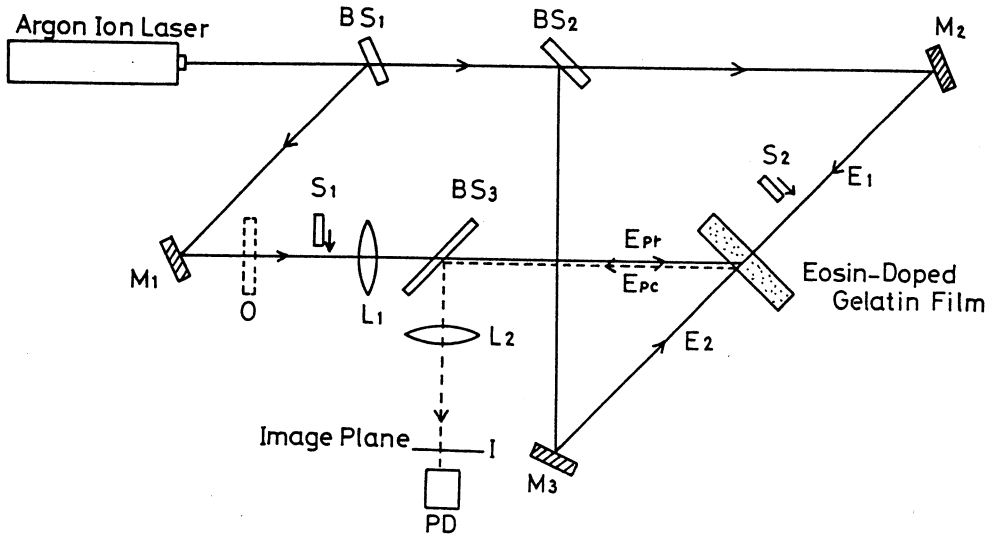


図1 位相共役波の発生と位相共役干渉の光学系

3. 縮退4波混合とホログラフィ過程

まず、エオシン Y を分散させたゼラチン膜を用いて、色素薄膜から縮退4波混合とホログラフィ成分による位相共役波が同時に発生することを実験的に示す。図-2 はプローブ光を遮断したときの位相共役波の典型的な減衰の様子を示している。時刻 A でプローブ光を遮断すると、位相共役波は速い時定数（～4 msec）で減衰し、その後遅い時定数（～30sec）で減衰していくことがわかる。さらに、時刻 B で2つのポンプ光を遮断し、5分後に時刻 C で再び入射する。時刻 C では、位相共役波強度はほぼ時刻 B の大きさにまで回復し、約30sec の時定数で減衰している。このことは、色素薄膜に記録された格子情報が2つのポンプ光による読み出しによってしだいに消されてはいるが、2つのポンプ光とプローブ光で形成された情報がホログラムとして記録されていることを示している。速い減衰と遅い減衰の位相共役波成分は、おのおの縮退4波混合およびホログラフィ成分である¹¹⁾。

つぎに、位相共役波を干渉計に応用するときに非常に重要になる2つの位相共役波成分の発生の時間変化を、3種類の色素薄膜に関して調べる。時間変化は、プローブ光を5秒周期で0.5秒間断続的に遮断することにより測定した。図-3 に実験結果を示す。点線よりも上の部分は速い減衰時定数をもつ縮退4波混合成分であり、下の部分は、プローブ光を遮断しても残っているので、ホログラフィ成分である。いずれの色素の場合も、2つの成分が発生する。全体的な傾向と

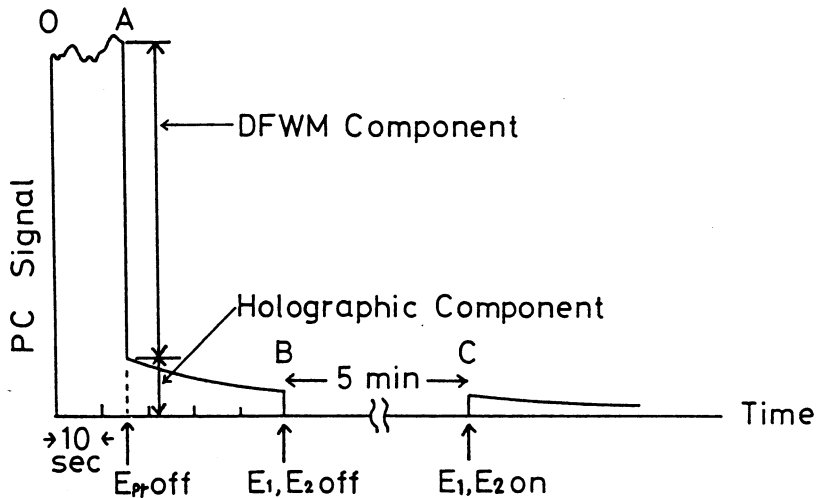


図2 プローブ光を遮断したときの位相共役波の減衰

しては、縮退4波混合成分は初期には強いがしだいに減少する。ホログラフィ成分は、縮退4波混合成分に比べて極端にその立ち上りは遅いことがわかる。両成分とも全体に減衰していくのは色素の光による退色のためである。

位相共役干渉では、物体の初期状態をプローブ光とポンプ光 E_2 によって色素薄膜上にホログラムとして記録し、その後3つの光 (E_1 , E_2 とプローブ光) を照射して縮退4波混合成分とホログラフィ成分を干渉させる。コントラストの良い干渉パターンを得るためには、2つの成分をできるだけ等しくすることが望ましい。そこで、ホログラム記録が時間とともに発達する様子を知る必要がある。このため、プローブ光とポンプ光 E_2 で記録しながら、5秒周期で0.5秒間だけもう一方のポンプ光 E_1 を照射してホログラムを読み出し、ホログラム記録の時間変化を測定した。図-4の実験結果から、エオシンY、エリトロシンB、フルオレセインとともに、時間とともにホログラム記録は発達し、それぞれ、50、40、30秒程度で最大をむかえた後、減衰していくことがわかる。

ホログラム記録後の縮退4波混合とホログラフィ成分の割合を調べるため、ホログラム記録が最大になる時間までプローブ光とポンプ光 E_2 を照射した後、図-3の結果を得たのと同じ手続きでこれら2つの成分を測定した。図-5から明らかのように、2つの成分をできるだけ等しくすることと、色素薄膜の光退色による寿命を考慮すると、エオシンYを含むゼラチン膜が位相共役鏡としては最も適していることがわかる。

色素薄膜を用いた位相共役干渉法

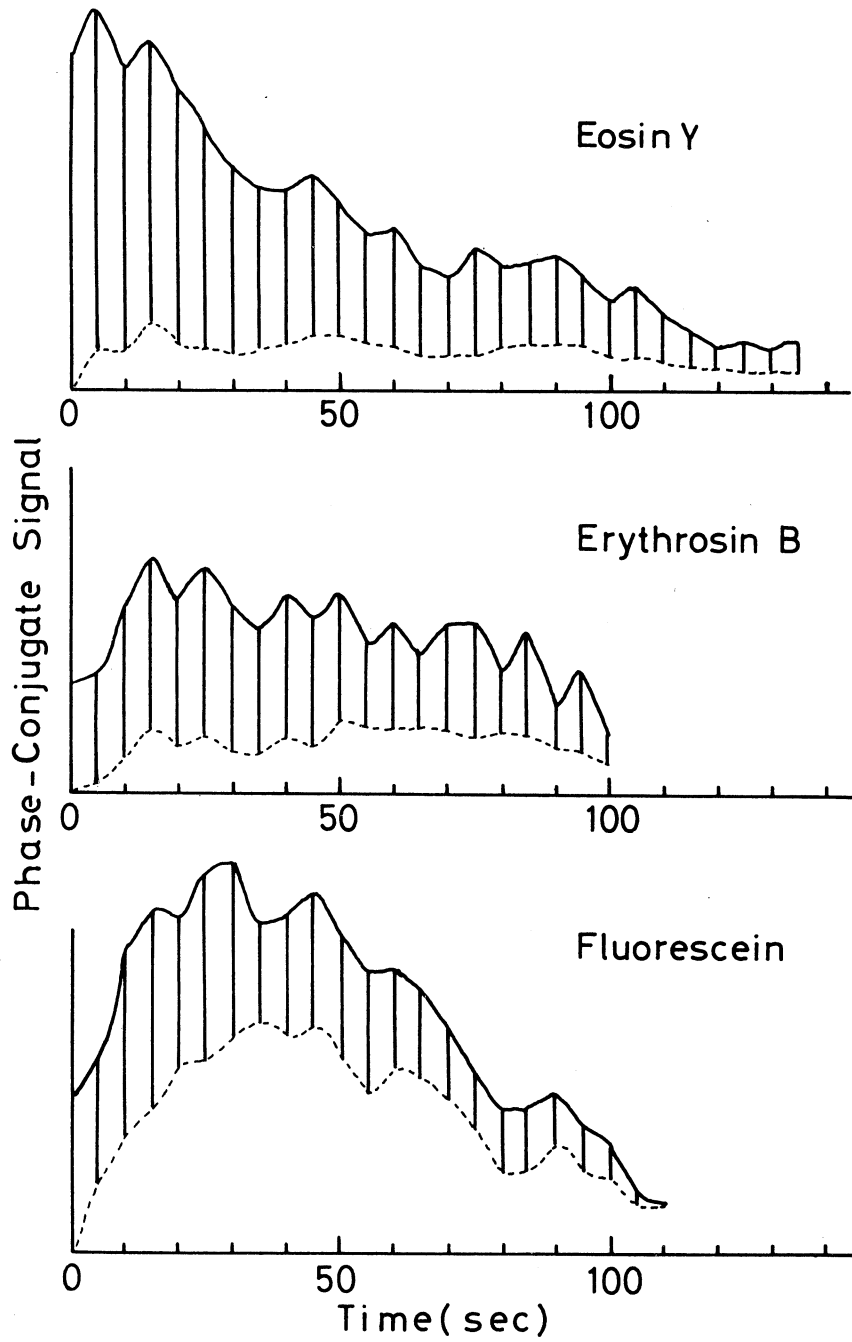


図3 2種類の位相共役波（縮退4波混合成分とホログラフィ成分）の時間変化

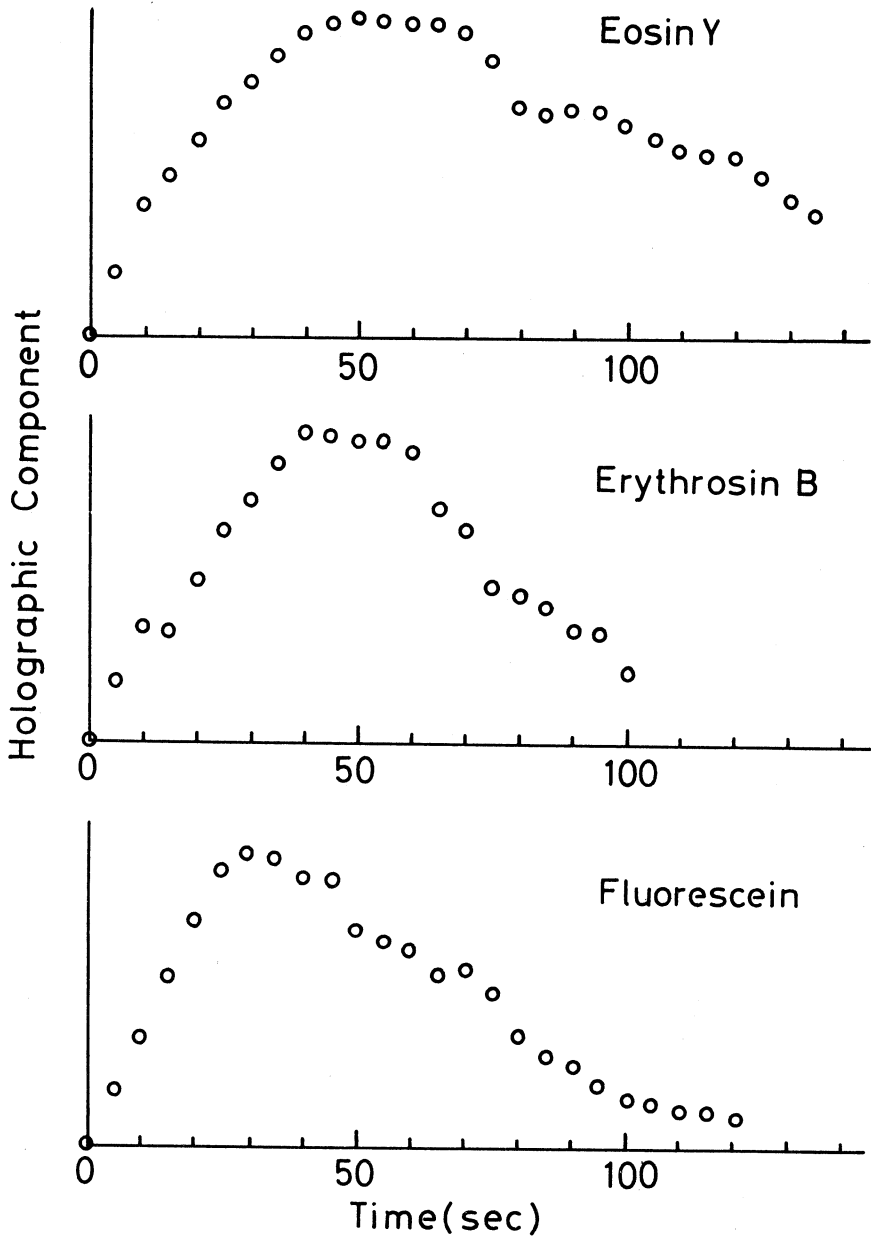


図4 ホログラフィ成分の時間変化

色素薄膜を用いた位相共役干渉法

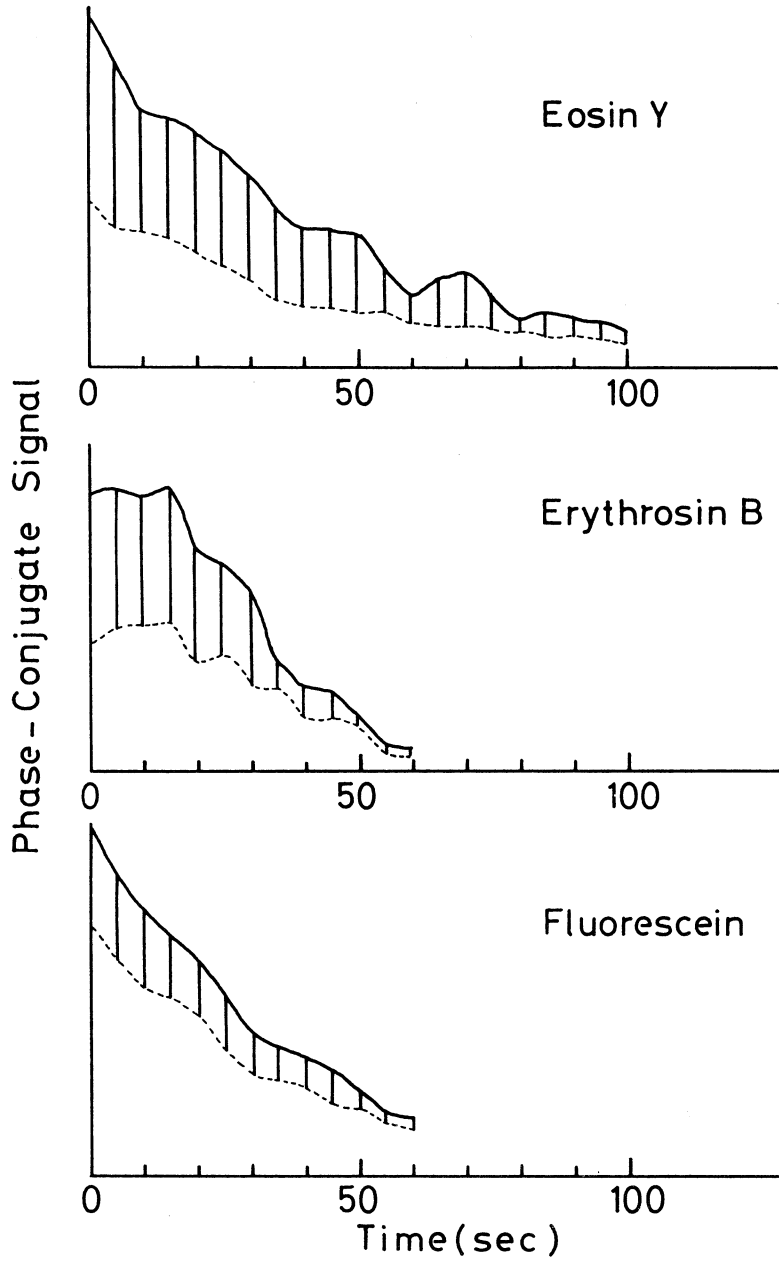


図5 ホログラム記録後の2種類の位相共役波（縮退4波混合成分とホログラフィ成分）の時間変化

4. 位相共役干渉の原理

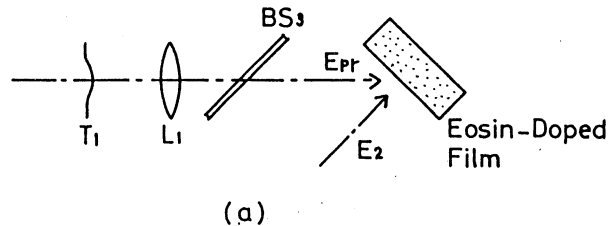
位相共役干渉の原理を図-6に示す。簡単のため、物体は透過物体とする。レンズ L_1 は物体波を色素膜上のポンプ光照射領域に集めるために用いられ、レンズ L_2 は結像のために、半透鏡 BS_3 に関して L_1 と対称的な位置に置かれる。位相共役波の性質上、レンズ L_1 と L_2 は本質的には必要ない。位相共役干渉は次に述べるような2段階の手続きを経て行なわれる。

第一段階では、物体の初期状態のホログラム記録を行なう。物体の複素振幅情報 T_1 を含むプローブ光（これが物体波である）とポンプ光 E_2 の干渉パターンを色素薄膜上に記録して透過型の体積ホログラム¹²⁾とする。このホログラムにポンプ光 E_1 を照射して読み出すと、像面に波面 T^*_1 が生じる。

第二段階は、第一段階で記録したホログラムの再生と、縮退4波混合による物体の位相共役波の発生を同時に行う。2つの段階の間で、物体の複素振幅が T_1 から T_2 に変化するか、または、別な物体 T_2 に置き換えられたとする。第二段階では、 T_2 に関する情報をもつプローブ光と2つのポンプ光を、第一段階と同じ色素薄膜上に同時に照射する。その結果、色素薄膜は、速い応答の縮退4波混合成分とすでに記録されたホログラフィ成分の2つの位相共役波を同時に発生する。この段階で、ポンプ

光 E_1 は、縮退4波混合過程のポンプ光の役目だけでなく、第一段階で記録されたホログラムの読み出し光としての役目も果たす。この結果、 T^*_1 と T^*_2 の干渉パターン $|T^*_1 + T^*_2|^2$ が像面で観察される。 T_2 が時間とともに変化する場合には、実時間で T_1 から T_2 の位相変化分を観察することができるので、実時間位相共役干渉と呼ばれる。

1st Step: Hologram-Recording



2nd Step: Real-Time Interferometry

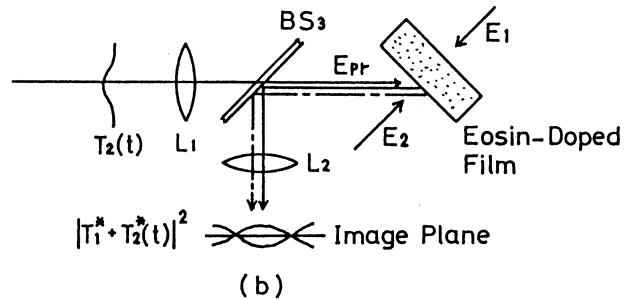


図6 位相共役干渉の原理

5. 実時間および二重露光位相共役干渉

エオシン Y を含むゼラチン膜が位相共役干渉において位相共役鏡として有効であることを実験で示す。そのためにまず、実時間位相共役干渉の実験例を示す。第一段階では、空のガラスセル（振幅透過率を T_1 とする）のホログラムをエオシン膜上に記録する。第二段階では、ガラスセル中に温水を注ぎ、エオシン膜から同時に発生した空のガラスセル (T_1) と温水を注いだガ

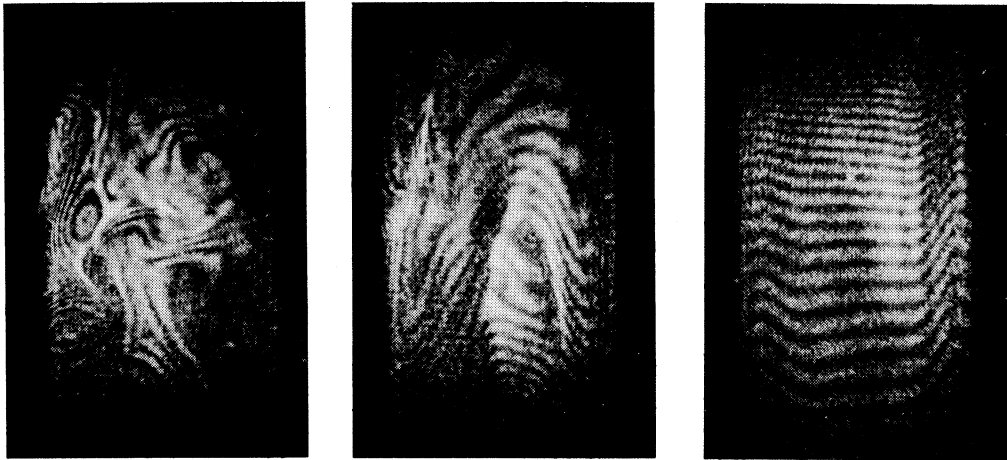


図7 ガラスセルに温水を注いだときの実時間位相共役干渉パターン

ラスセル (T_2) の情報をもつ2つの位相共役波（ホログラフィ成分と縮退4波混合成分）を像面で重ね合わせる。ホログラフィ成分 (T_1^*) と縮退4波混合成分 (T_2^*) の間の干渉パターン $|T_1^* + T_2^*|^2$ を図-7 に示す。これらの干渉パターンの写真は左から右に、ガラスセルに温水を注いだ後1, 5, 10秒後に撮影したものである。これらの写真から、ガラスセル内の各点で屈

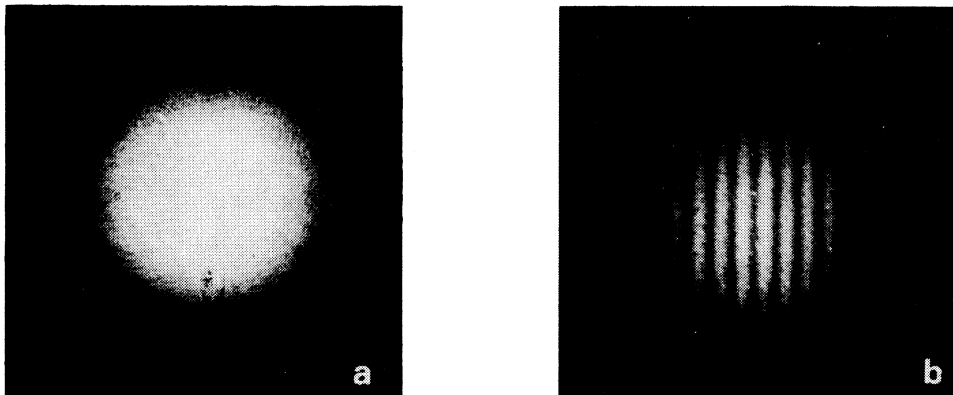


図8 レンズを横ずらししたときの二重露光位相共役干渉パターン

折率が時間とともに変化して、しだいに一様になっていくのがわかる。

つぎに、二重露光位相共役干渉の実験例を示す。焦点距離300cmの平凸レンズの中心部分を透過物体として用いた。第一段階と第二段階の間で、レンズをわずかに横ずらしさせた。図-8aは第一段階で記録された像の位相共役像であり、図-8bは縮退4波混合とホログラフィ成分の干渉パターンである。予想されるように、レンズからの波面は球面なので、等間隔の干渉縞がレンズをずらした方向に垂直に生じている。

6. ま と め

キサnten系色素を含むゼラチン膜により、縮退4波混合成分とホログラフィ成分による位相共役波を同時に又は別々に発生させることができた。また、実時間および二重露光位相共役干渉には、エオシンYを含むゼラチン膜が適していることが確かめられた。

これまで、多くのホログラフィ記録材料が開発されてきた¹³⁾。しかし、1つの材料で同時に異なる機構により速い応答と遅い応答を示す位相共役波を発生する材料は見当らない。この点からも、エオシンYを含むゼラチン膜は新しいタイプの光学材料と考えられる。さらに、エオシン膜は、現像が化学処理を必要とせず光照射によってなされること、大きな面積の試料が容易に得られること、などの利点をもっている。しかし、位相共役波の発生効率は低く、退色し易いなどの欠点をもっている。光に対する堅牢性はアゾ色素を使うと改良される¹⁴⁾。さらに高い発生効率をもつ材料の探索が望まれる。

参考文献

- 1) B. Ya. Zel'dovich, N. F. Pilipetsky and V. V. Shkunov: Principles of Phase Conjugation (Springer-Verlag 1985)
- 2) D. M. Pepper: Laser Handbook p.333 (Elsevier Science Publisher B. V. 1985)
- 3) Y. Fainman, E. Lenz and J. Shamir: Appl. Opt. **20**, 158 (1981)
- 4) N. G. Basov, I. G. Zubarev, A. B. Mironov, S. I. Mikhalov and A. Yu. Okuliv: Sov. Phys. JETP **52**, 847 (1980)
- 5) P. V. Avizonis, F. A. Hopf, W. D. Bomberger, S. F. Jacobs, A. Tomita and K. H. Womack: Appl. Phys. Lett. **31**, 435 (1977)
- 6) J. P. Huignard, J. P. Herriau and T. Valentin: Appl. Opt. **16**, 2796 (1977)
- 7) I. Bar-Joseph, A. Hardy, Y. Katzir and Y. Silberberg: Opt. Lett. **6**, 414 (1981)
- 8) O. Ikeda, T. Suzuki and T. Sato: Appl. Opt. **21**, 4468 (1982)
- 9) J. Feinberg: Opt. Lett. **8**, 569 (1983)
- 10) N. Tan-no, K. Kawachi and K. Yokoto: J. Opt. Soc. Am. **B3**, 60 (1986)
- 11) H. Fujiwara and K. Nakagawa: Optics Comm. **55**, 386 (1985)
- 12) H. Kogelnik: Bell Syst. Tech. J. **48**, 2909 (1969)
- 13) H. M. Smith: Holographic Recording Materials (Springer-Verlag 1977)
- 14) H. Fujiwara and K. Nakagawa: Optics Comm. **66**, 307 (1988) in press