23aII5
(招待講演)

位相共役干渉法とその計測への応用
Phase Conjugate Interferometry and Its Application
to Optical Measurement

藤原裕文、中川一夫 (室蘭工業大学)

H.Fujiwara and K.Nakagawa (Muroran Institute of Technology)

1. まえがき

位相共役光とは、ある光波に対してその波面の形を変えないで光路を逆進する光波である。位相整合条件を満たしやすいという観点から、広い空間周波数を持つ光波の位相共役光を発生させるには、後進型縮退4波混合法(BDFWM)が一般的に使われる。ここで述べる色素膜はフォトリフラクティブ結晶とは光非線形性の起源が違うので、位相共役光(振幅、位相、偏光、応答時間など)も違った特徴を持っている。位相共役鏡に色素膜を用い、2種類の互いに平行あるいは直交偏光した位相共役光を発生させ、それらの干渉を利用した位相共役干渉法と、その光計測への応用例(両位相共役光の振幅や位相の差の検出、両位相共役光の時間差分など)を述べる。

2種類の異なる位相共役光を発生させるには、2枚の位相共役鏡を用いる方法¹⁾と1枚の位相共役鏡を用いる方法²⁾がある。前者では特徴ある位相共役光の組み合わせが可能となるが、個別の位相共役光の位相の調整に困難が伴う。一方後者では、例えば1種類の色素を分散させた膜から2種類の位相共役光を発生させる場合と、2種類の光非線形性の起源の違う色素を分散させた膜から2種類の位相共役光を発生させる場合がある。2種類の色素を使う方が材料の選択により位相共役光の特性に変化を持たせることができる。

2. 色素膜により発生する位相共役光の特徴

エリトロシンB(EB)やメチルオレンジ(MO)などの色素を、ポリビニルアルコール(PVA)に分散・ランダム配向させた膜は、488nm や515nmのアルゴンイオンレーザー光を吸収して、効率よく位相共役光を発生する。プローブ光と2つの対向するポンプ光の偏光方向が直交している場合を直交偏光配置と呼び、またプローブ光と2つの対向するポンプ光の偏光方向が平行の場合を平行偏光配置と呼ぶことにする。いずれの偏光配置においても、位相共役光の偏光方向はプローブ光のそれに一致する。図1に3種類の色素膜EB/PVA,

図1 平行偏光配置(Para)と直交偏光配置(Ortho)による位相共役光の過渡応答 (ON,OFF時点でプローブ光をオン、オフ)

MO/PVA, (EB + MO)/PVAを用いて、プローブ光をオン・オフしたときの位相共役光の発生例を示す。

MOを分散させたPVA膜では、強い直線偏光を照射するとその方向に主軸を持つ色素分子が異性化するので、巨視的には異方性が誘起される。この色素膜では、 1 W/cm^2 程度のポンプ光強度で位相共役光を発生させる際には、プローブ光と2つの対向するポンプ光の偏光方向が直交している場合（直交偏光配置）の方が平行の場合（平行偏光配置）よりも位相共役光の発生効率が高くなる（図1中参照）³⁾。発生効率は10%に達する。

可飽和色素であるEBを分散させたPVA膜は、 1 W/cm^2 程度のポンプ光強度において、平行偏光配置の方が直交偏光配置よりも位相共役光の発生効率は高い⁴⁾（図1左参照）。さらに、EBは強い光を照射すると褪色する。このため、EBを分散させたPVA膜は位相共役光を実時間で発生させることができるだけでなく、褪色を利用してホログラムを記録しそれから位相共役光を発生させることも可能である²⁾。これらの位相共役光の組み合わせにより、振幅や位相の差を検出することができる。発生効率は $\sim 1\%$ である。

二種類の色素EBとMOを分散させたPVA膜においては、MOは主に直交偏光配置によりまたEBは平行偏光配置により実時間で位相共役光を効率よく発生する（図1右参照）。両位相共役光の応答時間の違いを利用して、時間差分をとることができる。さらにEBにより記録されたホログラムから位相共役光を発生させることもできる。

3. 色素分散膜による位相共役干渉

最初に、EBによるホログラムからの位相共役光と、EBまたはMOにより、ほぼ実時間で発生する位相共役光とを用いた位相共役干渉法を説明する^{2) 5)}（図2参照）。

図2 ホログラム記録を利用した位相共役干渉法

位相共役干渉を利用して変位（形）前後の物体の位相の差を検出する方法を述べる。第一段階はホログラム記録である。初期状態の物体の情報 ($T_1 = |T_1| \exp(i\phi_1)$) を載せたプローブ光と一方のポンプ光を色素膜に照射する。ただしプローブ光とポンプ光の偏光方向は平行とする。2つの光波の作る干渉縞の記録がEBの褪色によってなされる。第二段階は、ホログラム記録された色素膜を用いてBDFWM法により位相共役光を発生させる過程である。変位（形）した物体の情報 $T_2 = |T_2| \exp(i\phi_2)$ を載せたプローブ光と互いに対向する2つのポンプ光を、同時にホログラム記録した色素膜に照射する。EB/PVAではEBの飽和吸収に基づいた位相共役光 (T_2^* に比例) と、ホログラム記録された初期状態の情報を持つ位相共役光 (T_1^* に比例) が同時に発生する。物体の変位（形）の前後の情報を持つ2つの位相共役光を干渉させると、その位相差を表す強度は

$|T_1^* + T_2^*|^2 = |T_1|^2 + |T_2|^2 + 2|T_1| \cdot |T_2| \cos(\phi_1 - \phi_2)$ (1)
となり、変位(形)前後の物体の位相共役像の位相差 $\phi_1 - \phi_2$ を得ることができる。

位相共役干渉を利用して振幅の差を検出する方法を述べる。第一段階は上に述べたと同じである。第二段階のBDFWM法でプローブ光の偏光方向をポンプ光のそれに直交させた直交偏光配置を用いると、 T_1^* に比例した位相共役光はポンプ光の偏光方向に平行となるが、 T_2^* に比例した位相共役光はポンプ光の偏光方向に直交する。適切な方位の検光子を置くと、変位(形)前後の物体の振幅の差を表す位相共役像の強度

$|T_1^* - T_2^*|^2 = |T_1|^2 + |T_2|^2 - 2|T_1| \cdot |T_2| \cos(\phi_1 - \phi_2)$ (2)
を得る。こうすることにより、変位(形)しない共通部分($T_1^* = T_2^*$ となる部分)の位相共役光を消去することができる。

拡散反射物体を用いた位相共役干渉の例を図3に示す。物体にステンレス製の片持梁を用い、片持梁の自由端側に紙面に垂直に荷重を加えた(図3(a))。位相共役鏡としてEB/PVAを使用した。その変形前後の位相共役光間の干渉縞(位相差の検出に相当)を行った結果を図3(b)に示す。片持梁の固定端に近い部分と参照用の固定されたスケールの一部にプローブ光を照射し、拡散反射した光を色素膜に導き、変形前のホログラムを記録し、変形後に位相共役光を発生させた。変形前後の片持梁(下部)の位相共役像間の干渉縞と固定スケールの目盛(上部)が得られている⁷⁾。

図3 (a)ステンレス製の片持梁と参照用の固定スケール (b) 片持梁の変形前後の位相共役干渉による位相差の検出

2色素混合膜を用いても振幅と位相の差を検出することができる⁶⁾。第一段階では、干渉縞のホログラム記録にEBの褪色を利用する。第二段階のBDFWM法では、プローブ光の偏光方向をポンプ光の偏光方向に対し直交させて2色素混合膜((EB+MO)/PVA膜)に照射する。MOによる光誘起異方性により実時間の位相共役光(ポンプ光の偏光方向に直交)と、ホログラム記録された初期状態の物体の情報を持つ位相共役光(ポンプ光の偏光方向に平行)が同時に発生する。適切な方位の検光子を通過させて、変形前後の物体の位相共役像の振幅の和および差を得ることができる。

次に(EB+MO)/PVA膜による位相共役光の時間応答が平行・直交偏光配置で異なること(図1右参照)を利用して、入力物体光の時間差分をとる演算を述べる。簡単のために、両偏光配置における定常状態での位相共役光強度を等しいとする。プローブ光の偏光方向をポンプ光の偏光方向に対して45°傾けると、位相共役光はポンプ光の偏光方向に平行と直交した成分に分けらる。検光子を用いて互いに直交偏光した两位相共役光成分の差を検

出ることにより、近似的に時間差分を得ることができる⁶⁾。

4. まとめ

2種類の色素EBやMOの単分散PVA膜あるいは2色素の混合分散PVA膜を位相共役鏡として使った位相共役干渉法を述べてきた。2色素混合膜においては、色素の混合比を変えることにより、互いに直交偏光した位相共役光の強度を等しくしたり、色素膜の実質的な3次の非線形感受率の実部と虚部の比を変えることも可能である⁸⁾。

本方法における問題点を挙げておく。

(1)ホログラム記録を利用した位相共役干渉法では、第二段階で光照射と共にホログラム記録が徐々に消滅する。

(2)色素膜の光吸収波長域を利用しているために、位相共役光には実部と虚部の非線形感受率に起因する位相が附加される。

(3)色素膜の光吸収のために、位相共役鏡が熱膨張する。

ここで述べた位相共役干渉法はホログラフィ干渉法と類似した特徴を持つ。

(1)共通光路干渉の配置である。

(2)光路中の揺らぎや光学素子の歪みを補正できる。

(3)粗面物体光や拡散照明の干渉を行わせることができる。

(4)異なる時点での波面の干渉が可能である。

発生機構	色素	ポンプ・プロ ー光の偏光	応用例	表1 色素膜の光複合機能を利用した位相共役干渉法
飽和吸収	エリトロシンB	*平行 直交	位相差・振幅和	
光褪色	エリトロシンB	*平行	振幅の差	
光異性化	メチルオレンジ	*直交 平行	時間差分	

参考文献

- 1.A.Chen,S.Fan,H.Ding and C.Wu,Appl.Opt.33(1994)2998.
- 2.K.Nakagawa and H.Fujiwara, Opt.Commun.70 (1989) 73.
- 3.C.Egami,K.Nakagawa and H.Fujiwara,Jpn.J.Appl.Phys.31(1992)2937
- 4.S.Miyanaga,K.Nakagawa and H.Fujiwara,SPIE 1319 (1990) 71
- 5.H.Fujiwara, K.Nakagawa and T.Suzuki,Opt.Commun.79 (1990) 6
- 6.中川一夫、武田知明、藤原裕文、応用物理、64 (1995) 908
- 7.T.Takeda,M.Murakami and H.Fujiwara,SPIE 2778 (1996)880
- 8.T.Takeda,M.Yamada,K.Nakagawa and H.Fujiwara,Nonlinear Optics 15 (1996) 451