



## 位相変調器と偏光プリズムを用いた新しいホログラフィ用 ビーム・スプリッターシステムの開発

山本 芳孝

東海大学開発技術研究所 〒259-12 平塚市北金目 1117

(1990年8月13日受付, 1991年1月7日受理)

### Development of New Holography Beam-Splitter System Using a Crystal Phase-Modulator and a Polarized Prism

Yoshitaka YAMAMOTO

Institute of Research and Development, Tokai University,  
1117, Kitakaname, Hiratsuka, 259-12

(Received August 13, 1990; Accepted January 7, 1991)

A new beam splitter system using a phase modulator and a polarized prism was developed for holography. This system has merits that an arbitrary intensity ratio of a reference beam and an illuminating beam is obtained with no mechanical movement and that the intensity ratio is remotely controlled apart from the beam splitter.

#### 1. はじめに

ホログラフィは記録する際には感光材料に物体からの光の他に必ず同一光源から分けた参照光を与えることが必要であり, そのためにビームスプリッターを使用する. 実時間干渉計測の場合にはホログラム作成時ばかりでなく再生干渉計測時にもホログラムに再生照明光の他に物体照明光を与えなければならない. 実時間干渉計測でなくとも, 忠実な再生のために記録時の光学配置をそのまま用いることができれば再生条件が完全に満足される. 一般に物体光と参照光の最適配分比は被写体の条件, 記録材料の寸法, ホログラム形式や記録方法等によって大幅に変わる. 本システムは電気光学結晶と偏光プリズム, および半波長板で構成されている. 結晶へ入射した単一の直線偏光レーザー光は結晶への加電圧を変えることで任意の位相変化を与えられ, 偏光プリズムによって直交二成分に分けられる. これにより機械的な運動をまったく与えずに単一レーザー光を大幅な変化比をもって二光波に分けることを可能とした.

一般に物体照明光と参照光との配分比を変える方法

は, a) 多数の透過/反射比のビームスプリッターを用意しておいて条件に合わせて取り替えて使用する. b) 固定の配分比をもったビームスプリッターと段階的な(あるいは連続的な)濃度変化をもったフィルターを組み合わせ用い, 一方の光量を固定し, 他方を変化させて配分比を調節する. c) 回転または直線移動により段階的(連続)に透過/反射比の変化するビームスプリッターを用いる. その他, d) 半波長板を機械的に回転させてレーザー光の偏光面を回転させて偏光プリズムで成分比に応じた配分をする. 等が行われている. これらの方法は, 2光波の比率を変える際, いずれも機械的な運動を伴っている. 本研究は機械的駆動部がまったくない上に, 遠隔駆動でき, 大幅な変化比がえられる実用性の高いホログラフィ用ビームスプリッター光学系の開発について報告する.

#### 2. 目的

通常の光学干渉計 (Mach-Zehender 型, Michelson, Twyman-green 型干渉計等) に使用されるビームスプリッターは一般に配分比が 50/50 (%) と一定であるが,

ホログラフィでは条件によって最適配分比が異なり、その配分比をあらかじめ決定できる場合は少ない。多くは光学調整中に任意に配分比を設定できることが望まれ、さらに物体光と参照光を測定しながら配分比を遠隔調整できることが望ましい。とくに実時間干渉では再生干渉計測時に記録時の光学配置を保存して置くことが必要なため外部からの機械的な変化をまったく伴わないで、配分比を任意にしかも大幅に変えられることが望まれていた。この研究は機械的な駆動をまったく伴わないで、大幅な変化比をもつビームスプリッターシステムを開発することを目的としている。

### 3. 動作原理

直線偏光しているレーザー光を電気光学効果(今回使用した結晶は Pockels effect を利用した)をもつ位相変調素子へ導き、素子への加電圧を変化させることで任意の楕円偏光に変える。楕円偏光しているレーザー光は偏光プリズムに入射すると、その成分比に応じた反射光、透過光となって出射する。反射光/透過光比は結晶素子への加電圧によって連続的に変化する。偏光プリズムからの透過光と反射光の偏光面はお互いに直交しているため、一方に半波長板を挿入して両波の偏光面をそろえて使用する (Fig. 1)。

#### 3.1 縦型変調器と横型変調器<sup>1,2)</sup>

直線偏光レーザー光を任意の離心率を有する楕円偏光(極端な場合として離心率0の場合の円偏光と離心率1の場合の直線偏光も含める)に変調する位相変調器として変調器内結晶への加電圧が素子の光軸方向と等しい縦型変調方式と、光軸に対して加電圧が直交する横型変調方式がある。縦型の位相変調素子としてはパルスレーザーのQスイッチ素子に使用されてきた ADP, KDP DKDP 等をZカットした素子が用いられている。これらの結晶は位相変調用として光学的な特性に優れているが、潮解性があるために大気中では屈折率整合用にシリコン液等を併用して透明な窓を有する槽に入れて使用することが必要である。横型の位相変調素子としては縦型位相変調素子として用いた ADP, KDP 等結晶を切

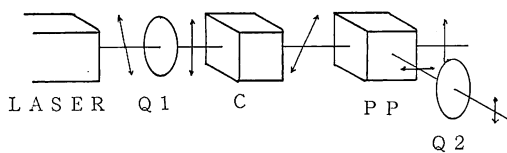


Fig. 1 Operating principle of new holography beam splitter.

り出し方向を互いに逆方向に 45° Zカットした二つ1組を用いたものが従来から使用されて来ているが、最近は多くの結晶材料が実用に供されるようになってきた。本研究においては結晶軸の X, Y 軸からそれぞれ 45° 傾けて削り出した Z カットの LiNbO<sub>3</sub> が用いられた。

位相変調器として使用する結晶に電界を加えて生ずる位相差  $\Gamma$  は結晶の光学定数と電界強度  $E$  およびレーザー光の通過距離  $L$  に比例し、(1)式となる。

$$\Gamma = 2\pi n_0^3 \gamma L E / \lambda \quad (1)$$

ここで、 $n_0$ : 屈折率,  $\gamma$ : 光学定数,  $L$ : レーザー光通過の結晶長さ,  $E$ : 電界強度,  $\lambda$ : 使用レーザー波長, である。ここで、縦型位相変調器では電界長さ<sup>と</sup>光の変調長さが等しいために結晶両端の電圧、すなわち印加電圧を  $V$  とすると、電界強度  $E = V/L$  であるから(1)式は

$$\Gamma = 2\pi n_0^3 \gamma V / \lambda \quad (1')$$

となり、位相差  $\Gamma$  は結晶の寸法にはまったく無関係となり寸法による駆動電圧の低電圧化を図ることはできない。

他方、横型位相変調器は結晶への加電圧方向が光軸方向と直交しているため、加電圧方向の寸法を  $d$  とすると(1)式は

$$\Gamma = 2\pi n_0^3 \gamma L V / (d \lambda) \quad (1'')$$

となり、寸法として  $(L/d)$  を大きくすれば  $V$  を低下させることができる。

位相差  $\Gamma$  が  $\pi/2$  となる電圧、すなわち半波長電圧 ( $V_{\lambda/2}$ ) は

$$V_{\lambda/2} = \lambda / (2 n_0^3 \gamma) \quad (2)$$

である。

#### 3.2 位相変調器への入射偏光面が変化した場合の特性

位相変調器の結晶軸と入射レーザー光の偏光面が傾いている場合には傾き角に応じた成分比をあらかじめ有することとなり (Fig. 2), 偏光プリズムからの透過光、反射光の最大、最小値の比が低下する。とくに最小値への影響が大きいことが当然予想される。

入射レーザー光の偏光面の傾きを  $\alpha$  とし、入射レーザー光の振幅を  $A$  とすると、結晶への加電圧が  $V$  であ

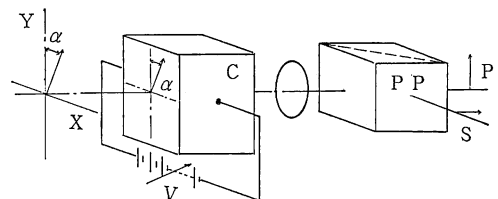


Fig. 2 Initial rotation of polarization angle.

る位相変調器に入射し、出力側に偏光プリズムを配置してP波(透過光,  $T$ )とS波(反射波,  $R$ )に分波して出力した場合のP波出力( $P$ )およびS波出力( $S$ )の振幅は(3)式および(4)となる。

$$P = A \{ \cos \alpha \cdot \cos (V/V_\pi) - \sin \alpha \cdot \sin (V/V_\pi) \} \\ = A \cos \{ \alpha + (V/V_\pi) \} \quad (3)$$

$$S = A \{ \sin \alpha \cdot \cos (V/V_\pi) + \cos \alpha \cdot \sin (V/V_\pi) \} \\ = A \sin \{ \alpha + (V/V_\pi) \} \quad (4)$$

さらに、S波とP波の合成波強度( $S^2 + P^2$ )は常に $A^2$ と一定であることは、本方式が結晶を用いた位相変調方式のため、変調による光損失がないことがわかる。偏光面の垂直面からの角度( $\alpha$ )と加電圧( $V$ )による特性をFig. 3に示す。

#### 4. 試作装置と特性測定

##### 4.1 構成

新しいホログラフィ用のビームスプリッターシステムの構成(Fig. 4)はレーザー光源からの偏光面を回転させ、結晶軸に一致させるための半波長板( $Q_1$ )、位相変調結晶素子(C)、偏光プリズム(PP)、偏光プリズムを出た後の両光の偏光面を一致させるための半波長板( $Q_2$ )および可変高電圧電源(PS)から成り立っている。 $Q_2$ は光学軸を他方の偏光面と合わせてしまえば固定して使用される。位相板、偏光プリズムは使用波長に合わせたものを使用する必要がある。偏光プリズムは波

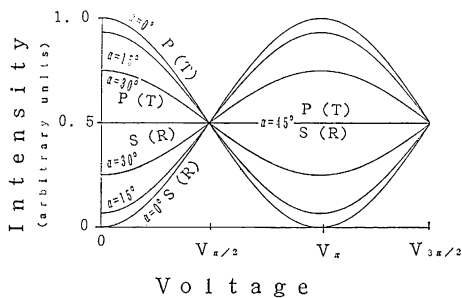


Fig. 3 Calculated intensity vs electric field density with an initial rotation of polarization angle.

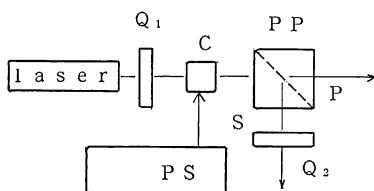


Fig. 4 Schema of new holography beam splitter system.

長に対して敏感であるが、 $Q_2$ 波長板はそれほど厳密でなくとも使用できる。可変高電圧電源は位相変調素子(C)に電界を掛けておくだけで電力を消費しないため、電源の電力量を考慮しなくともよい(Fig. 5)。

試作したビームスプリッターシステムはHe-Neレーザー用であり、半波長板( $Q_1, Q_2$ )は30mm径、厚さ2.0mm、反射防止多層膜付きの633nm用を使用した。偏光プリズム(PP)は、a)  $4 \times 5$ mmサイズの633nm用および、b)  $40 \times 40$ mmの使用波長694nm用を使用した。位相変調素子(C)は、a) 縦型用としてDKDP(正確な寸法不明)、b) 横型用として $7 \times 7 \times 7$ mmのLiNbO<sub>3</sub>を用いた。高電圧電源(PS)は通常型のBNCコネクタ使用のために最高4kVまでである。

##### 4.2 動作特性

パルスレーザーのQスイッチ用として設計されたDKDP素子を用いた縦型位相変調器によるホログラフィ用ビームスプリッターを構成し、その特性を測定した<sup>3)</sup>。DKDPは大気中では潮解性があるため2方向に窓を有する密閉容器中で使用される。容器中のシリコン油が窓と結晶の屈折率マッチングに使用されている。縦型のために電界は光軸方向と重なり有孔電極が用いられている。LiNbO<sub>3</sub>は潮解性はないので大気中で裸のまま使用できる。実験には $7 \times 7 \times 7$ (mm)の立方体結晶を用い、側面に電極を付けて横型位相変調素子として用い、その動作特性を測定した。

##### 4.2.1 変調器への加電圧と偏光プリズムからの出力特性

DKDPを位相変調素子として試作したホログラフィ用ビームスプリッターシステムの透過光強度( $T$ )と反射光強度( $R$ )の変調器への加電圧による特性をFig. 6およびFig. 7に示す。位相変調器への最大加電圧は4kVで、図中の $T$ は偏光ビームスプリッターからの

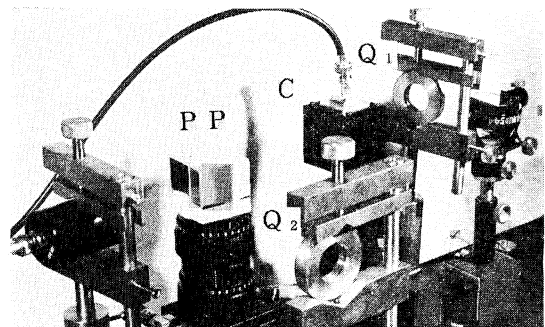


Fig. 5 Optical arrangement of new beam splitter system.

透過光強度を、 $R$  は反射光強度を示す。レーザー光の偏光面を回転させる半波長板の回転により、垂直入射特性 (Fig. 6) および水平入射の特性 (Fig. 7) を示す。実測値から本装置は約 2 kV で  $\pi/4$  の予想より高い位相変化が得られている。初期調整により、最大光強度に対する最小値を 2% 程度、すなわち強度比を 50:1 までにすることが可能であることを示した。

$\text{LiNbO}_3$  を位相変調素子に用いた横型変調器によるホログラフィ用ビームスプリッターの加電圧に対する透過/反射特性を Fig. 8 に示す。Fig. 8 はレーザーと位相変調素子の間に置いた半波長板を 1/8 回転させてレーザー光の偏波面を  $\pi/2$  (90 度) 変えて入射した場合の特性をしめしている。実測値によると約 2.5 kV で  $\pi/4$  の位相変化を示した。

4.2.2 ミスアライメントによる特性の変化

偏光面が位相変調素子結晶の軸と一致していない場合には 3.3 項に示したように加電圧がゼロであっても漏れ光があり、したがって、その影響は低光量側においてとくに大きい (Fig. 3 参照)。位相変調素子へのレーザー

光入射のミスアライメントは上記の偏光面と結晶軸との他に入射結晶平面 ( $X, Y$  面) への傾きも考えられるが、数度以内であればとくに大きな影響はないものと考えられる。

4.2.3 偏光プリズムの入射角度による特性

位相変調素子を通じたレーザー光は偏光プリズムに入射する際は接合面に対して 45 度となるようにする (反射光と入射光のなす角は 90 度) のが一般的な使用であるが偏光プリズムによっては入射角度の誤差に対して敏感な場合があり、ビームスプリッター特性に影響を与える場合がある。Fig. 9 に示す A 偏光プリズム<sup>5)</sup>は、その特性から水平面内に数度回転した状態で使用することが好ましいことがわかる。また B 偏光プリズムは水平面内の誤差に対しては鈍感であり、数度以内ならば特性に影響を与えないことがわかる。

4.2.4 分割比の変化による分割光間の位相差

本ビームスプリッターを使用してホログラフィ干渉計測を行った際に、参照光と物体光間の位相差が分割比の変化によって変わる量が大いこと干渉測定精度を低下さ

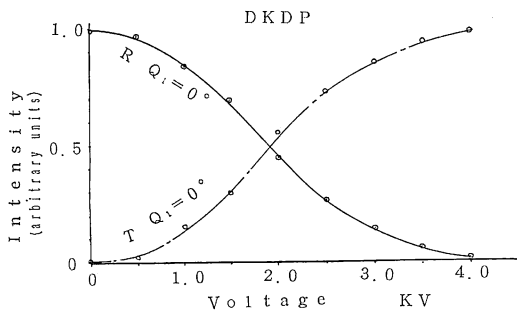


Fig. 6 Experimentally obtained output intensity of transmission and reflection (arbitrary units) vs applied voltage of modulator, with initial rotation of polarization is zero.

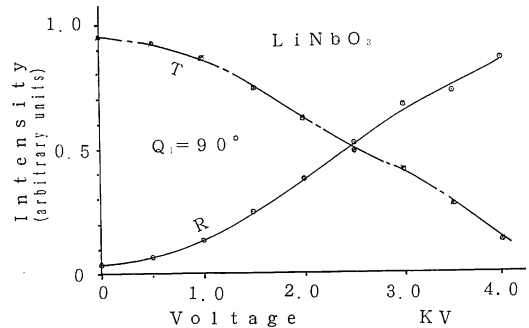


Fig. 8 Same as Fig. 6, but modulator made by  $\text{LiNbO}_3$ .

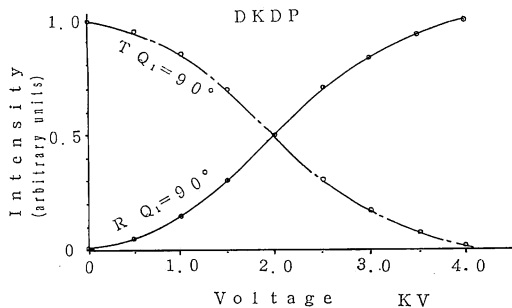


Fig. 7 Same as Fig. 6, but initial rotation of polarization is  $\pi/2$ .

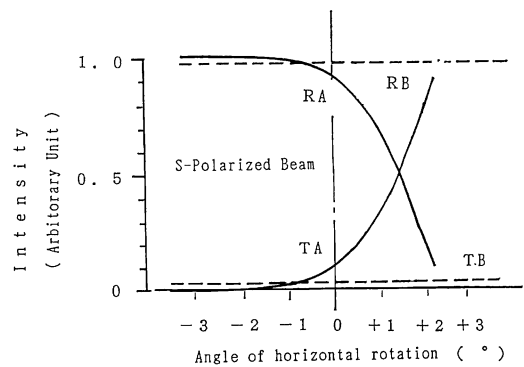


Fig. 9 Experimentally obtained output intensity vs angle of horizontal rotation of polarized prism.

せることとなる。そこで偏向プリズムによって2方向に分割されたレーザー光を用いてマッハ-ツェンダー型干渉計とし、位相変調素子への加電圧を変えながら干渉縞の間隔と位置を観察した結果、分割比 10:90~70:30 までの範囲では位相差は 1/10 波長以内であることを確認した。

## 5. ホログラフィ干渉への応用

試作した新しいホログラフィ用ビームスプリッター光学系を用いて、実時間干渉実験を行い、干渉実験中に干渉縞の visibility を任意に変化させることが可能であり、しかも変化の前後で干渉縞の位置に変化が生じないことを確認することができた<sup>4)</sup>。光学系配置は Fig. 10 に示す。被写体は大気中においた半田鐓の加熱による周囲大気の変位変化である。再生干渉像記録に際し、位相変調素子への電圧で透過/反射比を変え、干渉縞の visibility が変化していることを示している (Fig. 11)。

## 6. 検 討

試作した新しいホログラフィ用ビームスプリッターシ

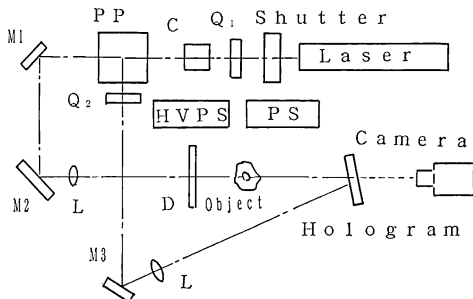


Fig. 10 Optical arrangement of real time holographic interferometry.

ステムは位相変調電圧によって透過反射特性が変わり、理想的には半波長電圧まで調整可能なことがのぞましい。DKDP を用いた縦型変調器と光源に He-Ne レーザーを併用した場合の半波長電圧 ( $V_{\lambda/2}$ ) は 5.6 kV になると計算されたが実験結果から、半波長電圧は約 4 kV であった。他方、横型変調器用素子として使用した LiNbO<sub>3</sub> の半波長電圧は約 4.1 kV と推定されたが、実測値は約 5 kV であった。

本システムでは位相変調素子となる結晶軸と入射レーザー光の偏光面が一致することが大切であり、とくに高い配分比の場合に影響が大きく結晶軸と偏光面のずれは、分けた2光束の内の最小値を高める効果となり、配分比を低下させる結果となる。入射光の結晶平面への傾きによる誤差も漏れ光の増大につながり、できるだけ厳密に合わせる大切であることがわかった。しかし、一度最適値に設定できればシステムとして変化させる必要は、ほとんどないものと考えられる。

位相変調器の駆動電源は比較的高い電圧を取り扱わなくてはならないことは、しいて欠点といえることができる。しかしシステムとして完成させた場合には、たんに電圧を掛けるだけで電力として消費しないため、比較的小型に纏めることは可能と考える。とくに高電圧を取り扱うことを嫌う場合には LiNbO<sub>3</sub> を用いた例で示した横型位相変調器とし、 $d/L$  の値を低下させることで大幅な駆動電圧の低下を図ることが可能となる。

## 7. 結 論

本システムは、機械的な駆動なしで大幅に参照光と物体光の比を変えることが可能なため、ホログラムの処理を行ってから再び記録に使用した光学系を用い、電圧調整により参照光の強度を高めて再生像の観察、記録を行

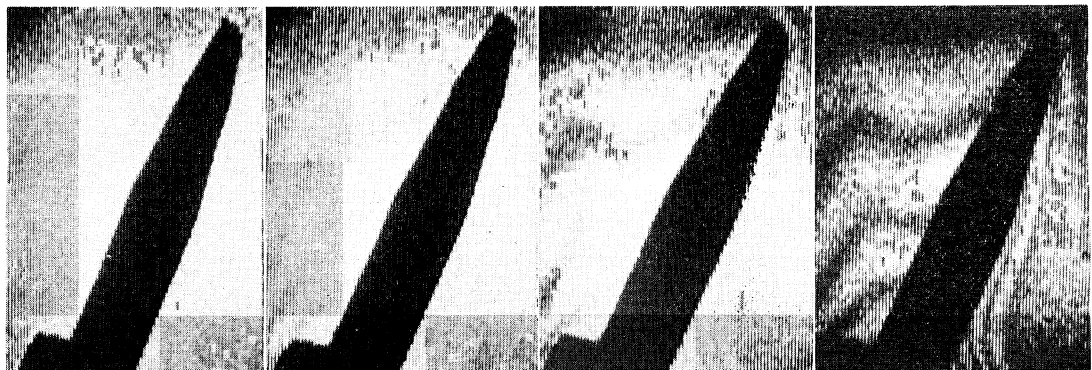


Fig. 11 Photographic results of real time holographic interferometry. (Object: Heating soldering iron).

うことで再生条件を完全に満足した歪のない明るい画像を得ることが可能となった。とくに実時間干渉計測法に使用するビームスプリッターとして、機械的な動きを伴わないために、干渉縞に悪い影響を与えず、最適なホログラム再生光と物体照明光の比を与えることが可能となった。

ホログラム作成時に被写体の条件に応じてホログラム面、反射鏡、その他の光学素子への光量を計測しながら最適配分比になるように遠隔制御できることは実用上、大変に有効である。このことは実時間干渉計測時に干渉縞を観察しながら縞の最適条件を確認できる点でも有効である。

本システムがすべて位相制御で行われていることは理論的にもレーザー光の損失が少ないことであり、このことも本方式の特徴である。ただし、駆動に電源を必要と

し、しかも高電圧であることは欠点であるが電力消費はきわめて少ない点の特徴である。

以上の結果からホログラフィに使用される新しいビームスプリッターの開発が行われ、実用性の高いシステムであることが証明されたものとする。

#### 文 献

- 1) 皆方 誠：“光と物質の相互作用—XI. 光と電界”，光学，**17** (1988) 593-601.
- 2) レーザ学会編：レーザハンドブック，光変調（オーム社，東京，1982）pp. 386-392.
- 3) 山本芳孝，水野重智，金指康雄：“実時間ホログラフィ用ビームスプリッター”，1989年度精密工学会春期大会講演会講演論文集（1989）pp. 961-962.
- 4) 山本芳孝，水野重智：“LiNbO<sub>3</sub>を位相変調器に用いたホログラフィ用ビームスプリッターの開発”，第37回応物学会予稿集（1990）p. 920.
- 5) 山本芳孝：“2コマ撮り高速度ホログラフィシステムの開発”，精密工学会誌，**53** (1987) 1215-1219.