

位相シフト実時間ホログラフィー干渉法による 面外・面内変位の同時分離測定

中 橋 末 三*¹, 一 色 真 幸*²

Simultaneous and separate measurement of in-plane and out-of-plane displacements using a phase-shifting real-time holographic interferometer

Suezou NAKADATE, Masaki ISSHIKI

Simultaneous and separate measurement of in-plane and out-of-plane displacements of a diffused object is presented, which is based on a phase-shifting real-time holographic interferometer. Phase-shifted holographic interferograms are acquired by a TV camera using each symmetrical illumination before and after displacement of the object. Phase calculation methods with these fringe patterns are presented to extract in-plane and out-of-plane displacements separately. Experimental results for two cases of only out-of-plane measurement and separation measurement are given.

1. まえがき

マイケルソンとモーレーによって始められた干渉測定は、空間のエーテルの存在を否定し、アインシュタインの相対性理論の構築に大きく寄与した。以来、多くの干渉計が発明・改良され、現在では製造業や先端科学・技術になくてはならない計測装置になっている¹⁾。一方、ガボールによって電子顕微鏡の解像力向上を目指して提案されたホログラフィーは²⁾、リースらによって当時発明されたレーザー光を用いることによって、光の波面の完全な記録・再生技術として確立した³⁾。以来、ホログラフィーを用いたディスプレイや光学素子等が生み出されたが、産業現場において現在最も良く用られるのは干渉計測技術であろう⁴⁾。ホログラフィーは、極めて細かい構造を持った粗面からの波面が記録できるので、その波面どうし

のわずかなずれを、光の波長感度で計測することができる。すなわち、被測定物体のミクロン・オーダーの変位測定が可能である。しかしながら、得られる画像が縞パターンであり、変位の方向や縞の間の補間などが問題であった。最近になって鏡面干渉法で開発された位相シフト法¹⁾が粗面干渉法にも適応されて、変位の2次元定量解析が可能になった^{4),5)}。最近では、面内変位分布を表す位相分布を直接得ようとする試みもあるが、光学系がかなり複雑で、測定にはかなりの熟練度を要する⁶⁾。

本論文では、位相シフト法の応用として特に、被測定物体に対称な2方向から照明し、物体の面内・面外変位を同時に定量解析する手法について述べる。

2. 変位測定の原理

2. 1 面外変位が支配的な場合

単純な曲げのように物体が変位するときは、物体表面の法線方向の変位が支配的である。この法

*¹ 本学光工学科, 助教授

*² 本学光工学科, 教授

1997年9月17日 受理

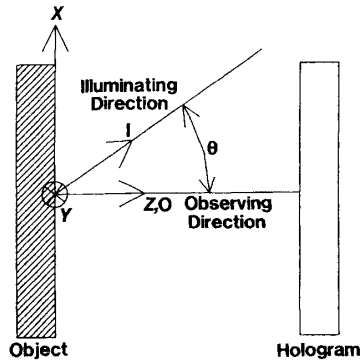


Fig.1 Cartesian coordinates for out-of-plane displacement measurement.

線方向の変位は一般に面外変位と呼ばれている。Fig.1に示すように、物体表面が x - y 面内にあり、この表面を z 軸に対して θ 傾いた x - z 面内にあるベクトル I の方向から照明し、 z 軸方向から観察する場合を考える。物体の変位ベクトル $d = (d_x, d_y, d_z)$ によるホログラフィー干渉縞 F は次のように書ける⁵⁾。

$$F = \alpha + \beta \cos(\varphi) \quad (1)$$

ここで、 α , β は干渉縞のバイアスと変調成分であり、縞の位相成分 φ は以下のように表せる⁵⁾。

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \sin \theta d_x + (1 + \cos \theta) d_z \right\} \quad (2)$$

d_z が面外変位成分、 d_x が面内変位成分であるが、いま面外変位成分が支配的 ($d_z \gg d_x$) であることを考慮に入れると、位相 φ は以下のように書き直すことができる。

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta) d_z \quad (3)$$

したがって、後に述べる位相シフト法を用いて位相 φ を求め、照明光の角度 θ とにより面外変位 d_z を高精度で求めることができる。実際には、実時間のホログラフィー干渉縞を作るときには、ホログラム乾板をその場で現像・定着処理する。すると、ホログラム乾板の乳剤の変形・収縮などにより干渉縞が形成されるので、この影響を取り除くために、物体変位前後の位相分布 φ_0, φ_1 を位相シ

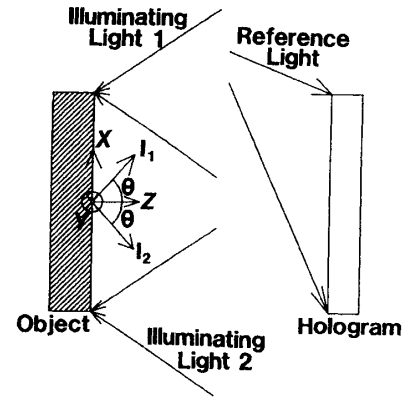


Fig.2 Cartesian coordinates for in-plane displacement measurement.

フト法で求めその差 $\varphi_1 - \varphi_0$ を求める。この位相差が(3)式の位相 φ に等しくなる。

2.2 面内・面外変位分離測定

ホログラフィー干渉縞の位相分布は、(2)式に示したように面外と面内変位の関数である。以下に述べるように被測定面を対称な方向から照明し、各方向の位相の和と差を求めることにより、面外・面内変位を分離して同時に求めることができる。測定の座標系をFig.2に示した。 x - y 面内にある被測定面を、 z 軸からの角度 θ で x - z 面内にある対称な方向 I_1, I_2 から照明する。方向1、2の干渉縞の位相分布 φ_1, φ_2 は次のように書ける。

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \sin \theta d_x + (1 + \cos \theta) d_z \right\} \quad (4)$$

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ -\sin \theta d_x + (1 + \cos \theta) d_z \right\} \quad (5)$$

したがって、これらの位相の差と和を求めると、次式のように面内変位と面外変位成分とに分離することができる。

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta d_x \quad (6)$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta) d_z \quad (7)$$

位相の和や差の計算では、計算処理後の位相分布をそのまま用いて和・差を求めると、位相の不連続箇所がさらに増えてしまい、後の位相接続処理の誤差の原因となり易い。したがって、以下に述べる計算法を用いると、位相不連続箇所の増加を押さえることができる。

位相シフト法により得られた2つの位相を φ_1 、 φ_2 とすると、位相の和・差は以下の式によって計算できる。

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{S_1 C_2 + C_1 S_2}{C_1 C_2 - S_1 S_2} \right) \quad (8)$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{S_1 C_2 - C_1 S_2}{C_1 C_2 + S_1 S_2} \right) \quad (9)$$

ここで、各位相の余弦成分を C_1 、 C_2 で、正弦成分を S_1 、 S_2 で表してある。この計算法により、位相差が小さい場合には、位相接続処理が不要になる場合もある。

2.3 位相シフト法

位相シフト法は、干渉縞の位相を既知の量ずらして縞を計算機に入力し、それら複数枚の干渉縞から位相分布を高精度に求める手法である。一般に干渉縞は(1)式のように書ける。この干渉計の参照光の位相を計算機制御して、 i 番目に $2\pi(i-1)/N$ ラジアン (i : 自然数, $N \geq 3$) になったとすると、干渉縞は次のように書ける¹⁾。

$$F_i = \alpha + \beta \cos \left(\varphi + \frac{2\pi}{N}(i-1) \right) \quad (10)$$

ここで i 番目の縞画像を F_i で表す。これらの縞画像から次式を用いて、位相 φ の余弦成分 C と正弦成分 S を計算する。

$$C = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N F_i \cos \left(\frac{2\pi}{N}(i-1) \right) \quad (11)$$

$$S = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N F_i \sin \left(\frac{2\pi}{N}(i-1) \right) \quad (12)$$

これらから次式の逆正接を計算して位相分布 φ を求める。

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{S}{C} \right) \quad (13)$$

干渉縞を4枚使う場合では、バイアス位相差は $\pi/4$ ラジアンとなり、(13)式は以下のように単純化される。

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3} \right) \quad (14)$$

参照光の位相を変化させるには、参照光にピエゾ素子を張り付けたミラーを挿入し、その印加電圧を計算機制御することによって行うことができる。

3. 実験方法と結果

3.1 面外変位の測定

面外変位測定の実験の配置図を Fig.3 に示した。He-Ne レーザー (20 mW) からの光を半透鏡 (B.S.) で分け、物体光は対物レンズで広げられた後、物体を照明し、参照光は対物レンズで広げられた後、ホログラム乾板 (Agfa, 10E75) を照明する。この、参照光中にはピエゾ素子 (PZT) を張り付けたミラーが挿入されており、計算機からの制御電圧により、このミラーが変位し参照光の位相が変化できるようになっている。物体は縦横 90×67mm、厚さ1mm のアルミ板で、下端を固定し、上端中央部を裏面からピエゾ・アクチュエータのインチワームで視線方向に変位させた。したがって、この物体は片持ち梁の変位と類似の変位

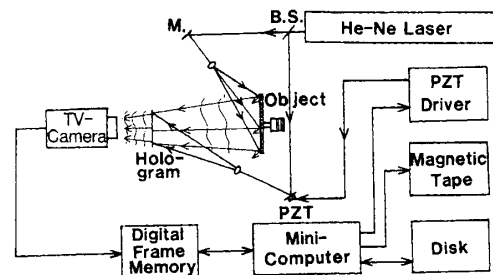


Fig.3 Real-time phase-shifting holographic interferometer for out-of-plane displacement measurement.

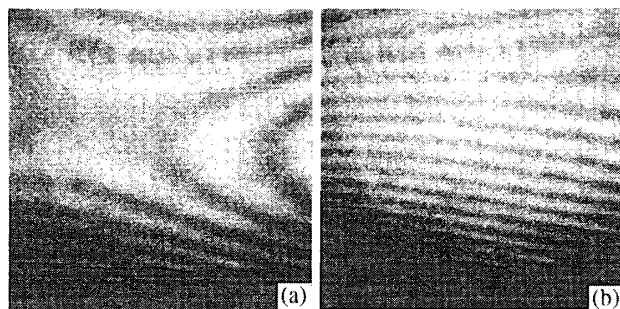


Fig. 4 Real-time holographic interferograms (a) before displacement and (b) after displacement of a cantilever-like object.

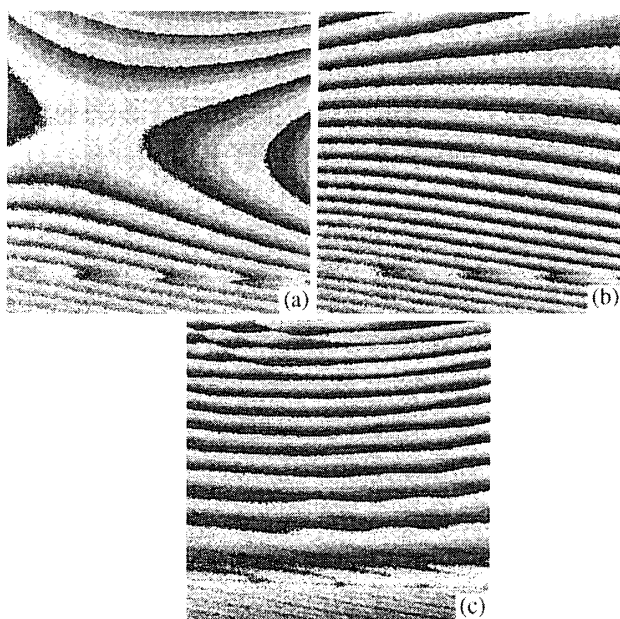


Fig. 5 Phase distributions (a) before displacement and (b) after displacement of the cantilever-like object. (c) Phase difference between the two phases of (a) and (b).

をするものと推測される。物体が変位する前にホログラムを作り、その場で現像・定着・乾燥した後、再び物体照明光と参照光を使って、実時間の干渉縞を得る。物体変位前でも乾板の変形により物体面上には干渉縞ができるので、PZT素子を変位させて干渉縞4枚をフレームメモリを通して計算機に入力する。次に物体に接触したインチワームで物体を視線手前に変位させ、4枚の干渉縞を計算機に入力する。変位前後の干渉縞をそれぞれ Fig. 4(a)、(b)に示した。実時間干渉縞であるので縞のコントラストは低く、また物体の照明むらがかかなりある。位相シフト法により求めたそれぞれの位相分布を Fig. 5(a)、(b)に示した。位相の $-\pi$

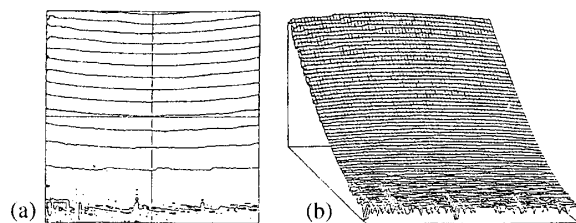


Fig. 6 Out-of-plane displacement of the cantilever-like object. (a) Contour and (b) perspective representations where the interval between two contours is $0.5 \mu\text{m}$.

$-\pi$ までをモニター上に0~255レベルとして表現したものである。縞のコントラストや照明光むらに関係なく位相分布が求められているのが良く分かる。これらの位相の引き算を(9)式を用いて求めものを Fig. 5(c)に示した。これは正味の面外変位量に比例するが、Fig. 5(a)、(b)の位相の飛びには関係なく、変位のみによる位相分布が得られている。この位相分布の不連続点の補正処理(位相のアンラップ処理)を行って(3)式により、照明光角度 θ を 47.5° として面外変位を求めたものを Fig. 6に示した。(a)、(b)はそれぞれ等高線と鳥瞰図表現であり、等高線間隔は面外変位の $0.5 \mu\text{m}$ に対応する。このように位相シフトホログラフィー干渉法を使うと、物体面全面で高精度に面外変位を測定できることが分かる。

3. 2 面外・面内変位の同時・分離測定

変位の同時・分離測定システムを Fig. 7. に示した。He-Neレーザーからの光を半透鏡により物体

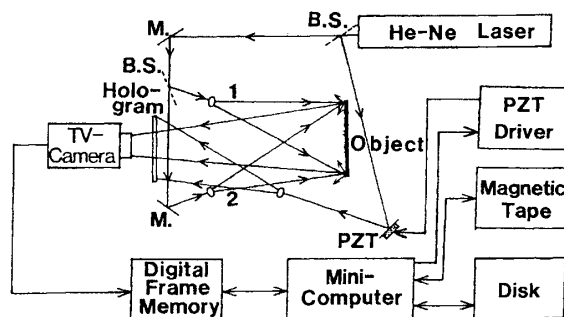


Fig. 7 Phase-shifting real-time holographic interferometer for separation measurement of in-plane and out-of-plane displacements.

光と参照光に分け、物体光はさらに半透鏡(B.S.)によって物体照明光1と2に分けられ、物体表面に対称な方向から物体を照明する。物体は長さ・幅102×20mm、厚み0.5mmのアルミ製引っ張り試験片を用い、右端を固定し左端を引っ張った。物体変形前に照明光1、2と参照光を用いてホログラムを記録し、その場で現像・定着を行って実時間の干渉縞を得る。これをTVカメラで撮像し、フレームメモリを通して計算機に記録する。参照光中にピエゾ素子を接着したミラーが挿入されており、縞の位相が計算機制御できるようになっている。計測手順は以下の通りである。物体変形前に照明光1のみで物体を照明し、ピエゾを制御して4枚の干渉縞を計算機に入力する。次に照明光を2に切り替え、同じように位相シフトした干渉縞を計算機入力する。変形後も各照明光を用いて位相シフトした縞画像を入力する。次に、(14)式を用いて各位相を計算し、(9)式を用いて各方向における位相差を計算すると、位相 ϕ_1, ϕ_2 が求められる。さらに(8)、(9)式を用いてそれらの位相の和・差を求め、さらに(6)、(7)式により面外・面内変位を求める。得られた干渉縞をFig.8に示した。照明方向1の変位前と後の縞をそれぞれFig.8(a)、(b)に示し、照明方向2のそれをFig.8(c)、(d)に示した。物体の変位前にかかなりの本数の干渉縞が出ており、物体変位後の干渉縞からは物体変位の様子とは想像できない。

得られた各方向4枚の縞画像から位相分布を計算した結果をFig.9に示した。Fig.9(a)、(b)に照明光1の変位前後の位相分布を、Fig.9(c)、(d)には照明光2のそれらを示した。縞のコントラスト

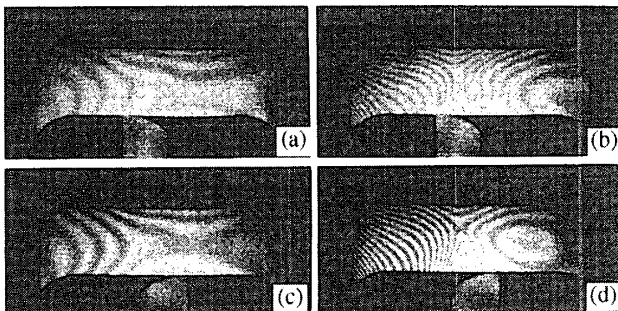


Fig.8 Fringe Patterns (a), (c) before displacement and (b), (d) after displacement of a strain test piece for each illumination direction.

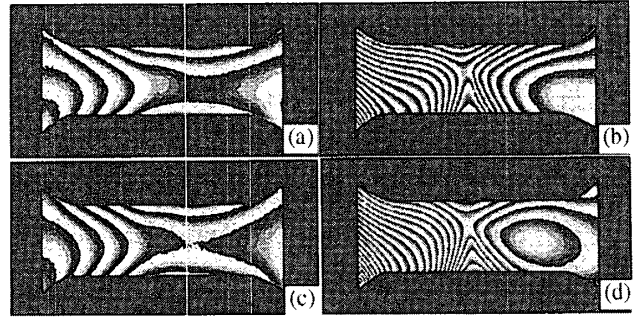


Fig.9 Phase distributions (a), (c) before displacement and (b), (d) after displacement of the strain test piece for each illumination direction.

に関係なく位相分布が計算されているのが分かる。各方向の位相差から位相 ϕ_1, ϕ_2 が求められ、さらにこれらの位相の差と和を求めたものをFig.10(a)、(b)に示した。図(a)はこの物体の面内変位分布(紙面の水平方向変位)を表し、図(b)は面外変位分布(紙面に垂直方向変位)を表す。これらの位相分布の位相の不連続点を補正し、照明角度 θ が 31.3° であることを用いて、(6)、(7)式より面内変位と面外変位を求めたものをFig.11(a)、(b)とFig.12(a)、(b)にそれぞれ示した。等高線の間隔はそれぞれの $0.5\mu\text{m}$ の変位を表す。これらの結果より、物体はほぼ一様に左側水平方向に動いて、左端では約 $5\mu\text{m}$ 動いている。これは応力が物体面内ではほぼ一様に働いているこ

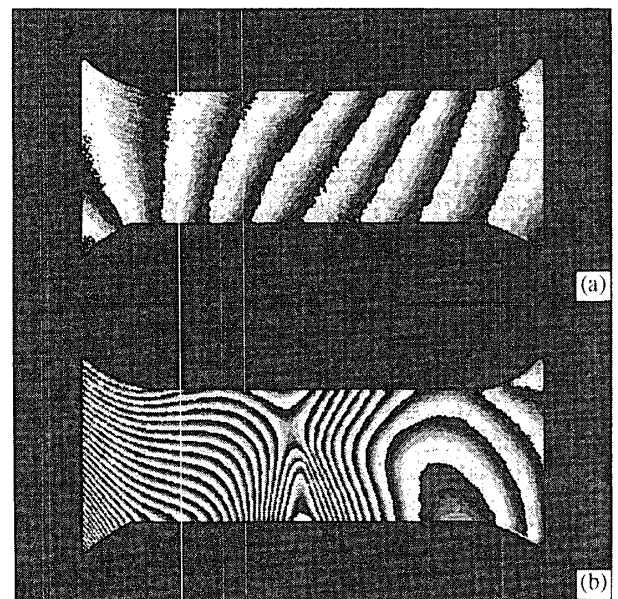


Fig.10 Phase difference distributions proportional to (a) in-plane and (b) out-of-plane displacements of the object.

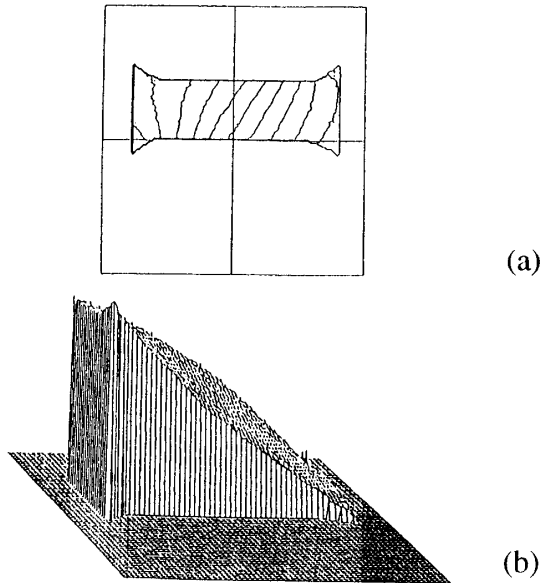


Fig.11 In-plane displacement of the strain test piece. (a) Contour and (b) perspective representation where the interval between two contours is $0.5 \mu\text{m}$.

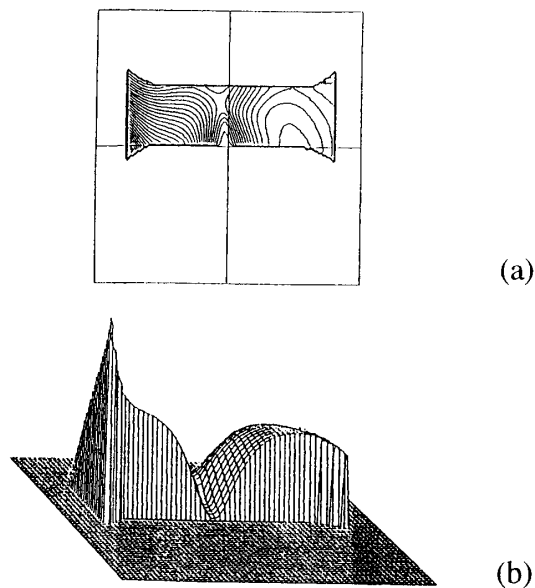


Fig.12 Out-of-plane displacement of the strain test piece. (a) Contour and (b) perspective representation where the interval between two contours is $0.5 \mu\text{m}$.

とを表しているが、試験片の上部と下部で面内変位の分布の差があり、これは物体に剪断応力が働いていることを表している。一方面外変位は引っ張り力に対して多少複雑に変化し、物体の引っ張りに対して回転する成分が表れている。これは、引っ張り試験器の移動端である左側の固定軸に遊びがあるためと思われる。

4. まとめ

位相シフトホログラフィー干渉法において、位相シフト法を用いると変位量が定量解析できることを述べてきた。特に、対称2光束照明することによって、変形物体の面外・面内変位を同時・分離測定する手法について述べてきた。ホログラムとしてこの実験では高解像力の写真乾板を使用した。そのため、化学現像処理が必要であり、実時間の干渉縞を得るのに時間と熟練が必要である。サーモプラスチックホログラムや、電気結晶を用いたホログラムを用いると簡単に縞画像を得ることができるので、より自動化された扱い易いシステムを作ることは可能である^{7),8)}。

今後は各方向の位相分布を如何に高速に得て、各方向の変位成分を計算し、実用に耐えうるようなシステム構成にすることが課題となろう。

参考文献

- 1) Daniel Malacara, ed. : "Optical Shop Testing" (Wiley, New York, 1992).
- 2) D. Gabor, Nature **161**, 777(1948).
- 3) E. N. Leith and J. Upatnieks, J. Opt. Soc. Am. **54**, 1295(1964).
- 4) 中橋末三、光学 **17**, 501(1988).
- 5) P. K. Rastogi, ed. , "Holographic Interferometry", (Springer, Berlin, 1994).
- 6) P. K. Rastogi, Appl. Opt. **34**, 7194(1995).
- 7) S. V. Miridonov, A. A. Kamshilin, and E. Barbosa, J. Opt. Soc. Am. **A 11**, 1780(1994).
- 8) D. Dirksen and G. von Bally, J. Opt. Soc. Am. **B 11**, 1858(1994).