

반도체 장비의 변형 진단을 위한 shearographic system의 이론적 고찰 및 위상오차해석

김수길*[†] · 홍선기*

*호서대학교 전기정보통신공학부 정보제어공학과

Theoretical analysis and Phase Error Analysis of the Shearographic System for the Deformation Evaluation of Semiconductor Equipments

Soo Gil Kim*[†] and Sun Ki Hong*

*Department of Information Control engineering, Hoseo University

ABSTRACT

We presented a new method to obtain four speckle interferograms with relative phase shift of $\pi/2$ by passive devices such as waveplate and polarizer, calculate the phase at each point of the speckle interferogram in shearography using Wollaston prism, which can be applied to the deformation evaluation of semiconductor devices, and theoretically demonstrated the feasibility of the proposed method by Jones matrix.

Key Words : Shearography, Wollaston Prism, Waveplate, Phase-shifting Technique

1. 서 론

Shearography는 레이저를 이용하여 물체의 변형 기울기를 구할 수 있는 광 계측시스템이다. 가장 중요한 레이저 스펙클 측정 방법은 스펙클 패턴 간섭계 기술(ESPI)과 스펙클 패턴 전단 간섭계 기술(shearography)이다. ESPI와 shearography에서 변형과 변형기울기를 나타내는 간섭패턴은 변형전과 변형후의 상태에 대응하는 두 개의 스펙클 패턴(speckle pattern)을 기록하고 차를 구하면 볼 수 있다. 이것은 변형과 변형의 기울기 측정을 위한 ESPI와 shearography의 기본적인 개념이다.

Shearography는 생물의 기관뿐만 아니라 반도체 장비와 같은 기계 부품, 전기기기, 그리고 토목공학 구조물의 결함 또는 불규칙성을 밝히기 위해 사용되며, 물체의 표면과 내부의 결함을 검출할 수 있다. 이것은 내부의 결함이 표면에서 매우 멀리 떨어져 있는 것이 아니라면 표면의 변형에 영향을 미치지 때문이다.

Leendertz와 Butters는 1973년에 shearography를 이용하여 변형의 1차 미분의 직접적인 측정에 대하여 발표하였다.[1] 1982년에 Hung은 이 기술을 더욱 발전시켜 면외 변형 기울기의 수치적인 해법을 발표했다.[2] 최근에 발표된 디지털 shearography는 필름에 기록하는 기술과는 대조적으로 스펙클 패턴을 변형 전후에 CCD camera에 의해 기록하고 이미지 프로세서 장치에 의해 온라인으로 처리하므로 실시간으로 shearogram을 관측하는 것이 가능하게 되었다.

디지털 shearography는 필름을 이용하는 shearography처럼 면외성분을 수치적으로 결정할 수 있으며, 많은 분야에서 응용이 이루어지고 있다.[3-6]

Shearography의 출력은 인간의 해석을 요구하는 프린지 패턴 형태이다. 관심있는 한 점에서의 변형의 기울기는 일반적으로 그 점에서의 프린지 치수와 시스템의 상수를 곱함으로써 결정되는데, 이를 자동화하는 기술이 위상천이기술이다.[7] 위상천이기술은 측정된 스펙클 패턴으로부터 interferogram의 위상분포를 결정하는 방법이다. 위상천이기술은 부가적인 위상을 3번에서 5년까지 천이시켜 3개에서 5개의 스펙클 패턴을 얻

[†]E-mail : sgkim@office.hoseo.ac.kr

고, 이로부터 스펙클 패턴의 각 지점의 위상분포를 결정하는 기술이다.[8]

Wollaston prism을 이용하는 shearography는 구조가 단순하고 외부환경에 대해 아주 강한 특성을 가지고 있어서 반도체 장비와 같은 기계장치와 반도체 칩의 회로에서의 납땀이 제대로 되어 있는지의 여부를 결정하는데 적용이 되고 있다.[9, 10] 그러나 이 방법은 위상천이기술을 적용하기가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 최근에는 이러한 단점을 개선하여 위상천이를 시킬 수 있는 방법이 보고되었다. 이것은 원통형 PZT에 고 복굴절(highly-birefringent: HiBi) 광섬유를 감고, PZT에 가하는 전압을 변화시킴으로써 광섬유에서 나오는 두 개의 직교하는 편광을 가지는 모드간에 위상차를 발생시킴으로써 위상의 변화를 일으키는 방법이다.[11]

본 논문에서는, 반도체장비의 변형을 진단하는데 이용될 수 있는 Wollaston prism을 이용한 shearography에서 수동소자인 파장판과 편광판을 이용하여 위상천이를 발생시킬 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 이 방법은 두 개의 파장판과 하나의 편광판의 회전각을 조절함으로써 90도씩 위상이 천이된 4개의 스펙클패턴을 얻을 수 있는 방법이며, Jones 벡터를 이용하여 이론적으로 제안된 방법의 유용성을 입증하였다.

2. Wollaston prism과 파장판을 이용한 위상천이기술

본 논문에서는 Wollaston prism을 이용한 shearography에서 온도와 외부환경에 영향을 쉽게 받는 광섬유를 사용하지 않고 수동소자만을 이용하여 위상천이를 발생시키는 새로운 시스템을 제안하고자 한다. 그림 1은 본 논문에서 제안된 시스템이며, 두 개의 파장판(waveplate)과 하나의 편광판을 이용하여 위상천이를 발생시킬 수 있는 shearography system이다. 제안된 시스템은 마이켈슨 간섭계대신에 Wollaston prism을 이용하여 전단영상을 얻는 기술이며, 그림 1에서 보는 바와 같이 Wollaston prism은 직교하는 편광을 가진 빔이 Wollaston prism의 출력단에서는 적당한 각을 가지며 분리되도록 하는 것을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 물체의 P₁점은 Wollaston prism을 통과하여 이미 지면에서의 P₁'과 P₁''점으로 투영되고, P₂점은 P₂'과 P₂''점으로 투영되며, P₁'과 P₂''은 중첩이 된다. P₁'과 P₂''에 도달하는 광파는 서로 직교하는 편광을 가지고 있으므로 두 광파가 중첩되더라도 간섭이 일어나지 않는다. 따라서, 두 광파간에 간섭을 일으키기 위해서는

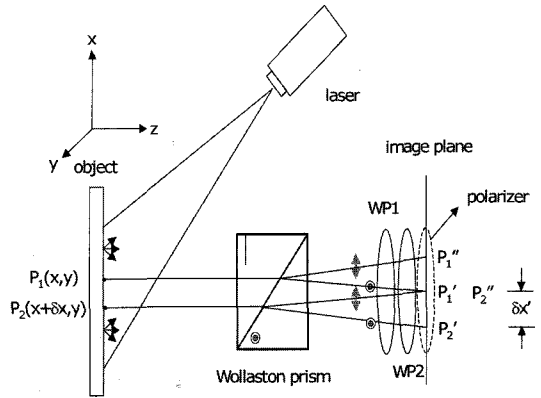


Fig. 1. Proposed shearographic system using Wollaston prism and waveplates

Wollaston prism뒤에 점선으로 표시된 선형편광판이 있어야 한다. 본 논문에서는 위상천이기술을 적용하기 위해 Wollaston prism과 편광판사이에 두개의 파장판을 위치시킴으로써 3개에서 5개의 스펙클 패턴을 얻을 수 있는 방법을 제안하였다. 그림 1에서 WP1과 WP2는 파장판을 나타낸다. 여기에서 WP1은 slow axis가 0도이고, WP2는 slow axis가 -x축에 대하여 ±45도 회전되어 있는 상태이다. 본 논문에서 제안한 시스템이 위상천이를 발생시킬 수 있다는 것을 입증하기 위해 Jones 행렬을 이용한다.[12]

그림 1의 P₁과 P₂에서 반사된 광파 U₁과 U₂가 두 개의 파장판을 통과한 후에는 다음 (1)식과 같이 표현될 수 있다. 여기서, Γ₁과 Γ₂는 파장판 wp1과 wp2의 위상 지연을 나타내며, 부호에서 -부호는 WP2의 slow axis가 -x축에 대하여 45도 회전되어 있는 경우에 대응하고, +부호는 WP2의 slow axis가 -45도 회전되어 있는 경우에 대응하는 것이다.

$$\begin{aligned}
 U &= \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma_2}{2} & Fi \sin \frac{\Gamma_2}{2} \\ Fi \sin \frac{\Gamma_2}{2} & \cos \frac{\Gamma_2}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\Gamma_1}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \\
 &= e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma_2}{2} U_1 Fie^{i\Gamma_1} \sin \frac{\Gamma_2}{2} U_2 \\ \mu \sin \frac{\Gamma_2}{2} U_1 + e^{i\Gamma_1} \cos \frac{\Gamma_2}{2} U_2 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{1}$$

광파가 x축 편광판을 통과한 후에 이미지 면에서의 복소진폭은 다음과 같이 주어진다.

$$U_{wp2 \pm 45} = e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \left\{ \cos \frac{\Gamma_2}{2} U_1 Fie^{i\Gamma_1} \sin \frac{\Gamma_2}{2} U_2 \right\} \tag{2}$$

첫 번째로, 두 개의 $\lambda/4$ 파장판을 이용할 경우에는 위상지연이 $\Gamma_1=\Gamma_2=\lambda/2$ 이므로 식 (2)는 다음 식과 같이 된다.

$$U_{wp2\pm 45} = \frac{\sqrt{2}}{2} e^{-i\frac{\pi}{4}} \{U_1 \pm U_2\} \quad (3)$$

식 (3)에 대한 intensity는 다음 식과 같이 주어진다.

$$I_1 = U_{wp2+45} U_{wp2+45}^* = 1/2[(a_1^2 + a_2^2) + 2a_1 a_2 \cos\phi] \\ = I_o[1 + \gamma \cos\phi] \quad (4)$$

$$I_3 = U_{wp2-45} U_{wp2-45}^* = 1/2[(a_1^2 + a_2^2) - 2a_1 a_2 \cos\phi] \\ = I_o[1 - \gamma \cos\phi] = I_o[1 + \gamma \cos(\phi + 180)] \quad (5)$$

여기서, ϕ 는 두 광파 U_1 과 U_2 의 위상차를 나타낸다. 두 번째는 WP1과 WP2의 slow axis를 각각 0도와 45도 (또는 -45도)로 유지하고, 편광기의 축을 -x축에 대하여 45도와 -45도로 한 경우에 편광판을 통과한 후의 복소진폭을 구하면 각각 식 (6) 및 식 (7)과 같이 주어진다.

$$U_{p+45} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma_2}{2} & -i \sin \frac{\Gamma_2}{2} \\ -i \sin \frac{\Gamma_2}{2} & \cos \frac{\Gamma_2}{2} \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\Gamma_1}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \\ = \frac{1}{2} e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \left(\cos \frac{\Gamma_2}{2} - i \sin \frac{\Gamma_2}{2} \right) \begin{pmatrix} U_1 + i e^{i\Gamma_1} U_2 \\ U_1 + i e^{i\Gamma_1} U_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$U_{p-45} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \frac{\Gamma_2}{2} & -i \sin \frac{\Gamma_2}{2} \\ -i \sin \frac{\Gamma_2}{2} & \cos \frac{\Gamma_2}{2} \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\Gamma_1}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \\ = \frac{1}{2} e^{-i\frac{\Gamma_1}{2}} \left(\cos \frac{\Gamma_2}{2} + i \sin \frac{\Gamma_2}{2} \right) \begin{pmatrix} U_1 - i e^{i\Gamma_1} U_2 \\ -U_1 + i e^{i\Gamma_1} U_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$\Gamma_1=\Gamma_2=\pi/2$ 인 경우에 식 (6)과 식 (7)에 대한 intensity는 다음 식과 같다.

$$I_2 = U_{p+45} U_{p+45}^* = 1/2[(a_1^2 + a_2^2) - 2a_1 a_2 \sin\phi] \\ = I_o[1 - \gamma \sin\phi] = I_o[1 + \gamma \sin(\phi + 90)] \quad (8)$$

$$I_4 = U_{p-45} U_{p-45}^* = 1/2[(a_1^2 + a_2^2) + 2a_1 a_2 \sin\phi] \\ = I_o[1 + \gamma \sin\phi] = I_o[1 + \gamma \sin(\phi + 270)] \quad (9)$$

식 (4), (5), (8), (9)에서 보는 바와 같이 파장판 두개와 하나의 편광판을 이용함으로써 각각 90도의 위상천이를 가지는 4개의 간섭패턴을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

$\lambda/2$ 파장판과 $\lambda/4$ 파장판의 조합을 통해서도 90도의 위상천이를 가지는 4개의 간섭패턴을 얻을 수 있다. $\Gamma_1=\pi$, $\Gamma_2=\pi/2$ 인 경우에 식 (2)는 식 (10)과 같이 된다.

$$U_{wp2\pm 45} = -\frac{\sqrt{2}}{2} i \{U_1 \pm i U_2\} \quad (10)$$

식 (10)에 대한 intensity는 다음 식과 같이 주어진다.

$$I_2 = U_{wp2+45} U_{wp2+45}^* = 1/2[(a_1^2 + a_2^2) - 2a_1 a_2 \sin\phi] \\ = I_o[1 - \gamma \sin\phi] = I_o[1 + \gamma \cos(\phi + 90)] \quad (11)$$

$$I_4 = U_{wp2-45} U_{wp2-45}^* = 1/2[(a_1^2 + a_2^2) + 2a_1 a_2 \sin\phi] \\ = I_o[1 + \gamma \sin\phi] = I_o[1 + \gamma \cos(\phi + 270)] \quad (12)$$

그리고, 두 번째는 WP1과 WP2의 slow axis를 각각 0도와 45도(또는 -45도)로 유지하고, 편광판의 축을 -x축에 대하여 45도와 -45도로 한 경우에 편광판을 통과한 후의 복소진폭은 식 (6) 및 식 (7)과 같이 주어진다. $\Gamma_1=\pi$, $\Gamma_2=\pi/2$ 인 경우에 식 (6)과 (7)에 대한 intensity는 다음 식과 같다.

$$I_3 = U_{p+45} U_{p+45}^* = 1/2[(a_1^2 + a_2^2) - 2a_1 a_2 \cos\phi] \\ = I_o[1 - \gamma \cos\phi] = I_o[1 + \gamma \cos(\phi + 180)] \quad (13)$$

$$I_1 = U_{p-45} U_{p-45}^* = 1/2[(a_1^2 + a_2^2) + 2a_1 a_2 \cos\phi] \\ = I_o[1 + \gamma \cos\phi] \quad (14)$$

앞에서 알 수 있는 바와 같이 수동소자인 $\lambda/4$ 파장판 두개와 편광판 한개 또는 $\lambda/2$ 와 $\lambda/4$ 파장판과 편광판 한개의 조합을 통해 90도의 위상천이를 가지는 4개의 간섭패턴을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 앞에서 구한 4개의 간섭패턴으로부터 각 지점의 위상은 다음 식에 의해 계산될 수 있다.

$$\phi = \arctan \frac{(I_4 - I_2)}{(I_1 - I_3)} \quad (15)$$

3. 위상오차 해석

위상천이기술에서 가장 주요한 잠재적인 오차원인은 편광소자들의 불완전성이다. 본 논문에서는 $\lambda/2$, $\lambda/4$ 파장판 조합과 $\lambda/4$ 파장판 두개의 조합의 경우에 대한 스펙클 패턴을 얻는 방법을 이야기하였으며, 편광소자들의 불완전성에 의한 위상오차도 두 가지 경우에 대하여 고려할 것이다. 그림 1에서 출력단에서의 빔은 Jones 행렬을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{out} = A(\phi_3)WP2(\phi_2)WP1(\phi_1)E_{in} \quad (16)$$

여기서, E_{in} 은 입력광파를 나타내며, $A(\phi_3)$, $WP2(\phi_2)$, $WP1(\phi_1)$ 는 각각 편광판, $WP2$, $WP1$ 의 Jones 행렬을 나타내며, 다음과 같다.

$$E_{in} = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 e^{-i\theta_1} \\ a_2 e^{-i\theta_2} \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$A(\phi_3) = \begin{pmatrix} \cos^2 \phi_3 & 1/2 \sin 2\phi_3 \\ 1/2 \sin 2\phi_3 & \sin^2 \phi_3 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$WPj(\phi_j) = \begin{pmatrix} 2i \sin^2 \phi_j \sin \frac{\Gamma_j}{2} + e^{-i\frac{\Gamma_j}{2}} & i \sin 2\phi_j \sin \frac{\Gamma_j}{2} \\ i \sin 2\phi_j \sin \frac{\Gamma_j}{2} & -2i \sin^2 \phi_j \sin \frac{\Gamma_j}{2} + e^{i\frac{\Gamma_j}{2}} \end{pmatrix} \quad (19)$$

여기서, $j=1, 2$ 이며, 1과 2는 각각 $WP1$ 과 $WP2$ 에 대한 Jones 행렬을 나타내는 첨자이다. 그리고, 위 식에서 ϕ_3 , ϕ_2 , ϕ_1 는 각 편광소자들의 방위각을 나타낸다.

파장판의 불완전성에 의한 위상오차를 구하기 위해 식 (16)에서 편광판과 파장판의 방위각이 다음과 같은 4가지 경우에 대하여 4개의 intensity를 구한다.

i) 편광판의 방위각이 0도, $WP2$ 와 $WP1$ 의 방위각이 각각 45도, 0도인 경우

$$I_1 = a_1^2 \cos^2 \frac{\Gamma_2}{2} + a_2^2 \sin^2 \frac{\Gamma_2}{2} + 2a_1 a_2 \cos \frac{\Gamma_2}{2} \sin \frac{\Gamma_2}{2} \sin(\phi + \Gamma_1) \quad (20)$$

ii) 편광판의 방위각이 45도, $WP2$ 와 $WP1$ 의 방위각이 각각 45도, 0도인 경우

$$I_2 = 1/2[(a_1^2 + a_2^2) + 2a_1 a_2 \cos(\phi + \Gamma_1)] \quad (21)$$

iii) 편광판의 방위각이 0도, $WP2$ 와 $WP1$ 의 방위각이 각각 -45도, 0도인 경우

$$I_3 = a_1^2 \cos^2 \frac{\Gamma_2}{2} + a_2^2 \sin^2 \frac{\Gamma_2}{2} - 2a_1 a_2 \cos \frac{\Gamma_2}{2} \sin \frac{\Gamma_2}{2} \sin(\phi + \Gamma_1) \quad (22)$$

iv) 편광판의 방위각이 45도, $WP2$ 와 $WP1$ 의 방위각이 각각 45도, 0도인 경우

$$I_4 = 1/2[(a_1^2 + a_2^2) - 2a_1 a_2 \cos(\phi + \Gamma_1)] \quad (23)$$

식 (15)와 식 (20), (21), (22), (23)을 이용하여 광파 U_1 과 U_2 의 위상차를 구하면 식 (24)로 표현할 수 있다.

$$\tan \phi' = \frac{(I_4 - I_2)}{(I_1 - I_3)} = \frac{-\cos(\phi + \Gamma_1)}{\sin \Gamma_2 \sin(\phi + \Gamma_1)} \quad (24)$$

불완전한 $\lambda/4$ 파장판에 대하여 우리는 $\Gamma_1 = \pi/2 + \gamma_1$, $\Gamma_2 = \pi/2 + \gamma_2$ 으로 놓을 수 있으며, 여기서 γ_1, γ_2 는 파장판에 의해 도입되는 상대적인 위상지연에 있어서의 오차를 의미한다. 오차를 포함한 위상지연을 식 (24)에 대입하면 위상차는 다음과 같이 표현된다.

$$\tan \phi' = \frac{\tan \phi + \gamma_1 \sec^2 \phi}{1 - 1/2 \gamma_2^2} \quad (25)$$

위상오차가 포함된 $\tan \phi'$ 는 식 (26)과 같이 표현할 수 있다.

$$\tan \phi' = \tan(\phi + \Delta\phi) = \tan \phi + \Delta\phi \sec^2 \phi \quad (26)$$

따라서, 식 (25)와 식 (26)을 이용하면 불완전한 파장판에 의한 위상오차 $\Delta\phi$ 는 식 (27)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\phi = \gamma_1 + 1/4 \sin(2\phi) \gamma_2^2 \quad (27)$$

변형전과 후의 위상은 각각 위상오차를 가지게 되는데, 변형전과 후의 위상을 빼주게 되면 1차 위상오차항은 없어지게 된다.

$\lambda/2$, $\lambda/4$ 파장판 조합에 의한 위상오차도 앞에서 유

도한 방법으로 얻을 수 있으며, 위상오차는 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta\phi = \gamma - 1/4 \sin(2\phi)\gamma^2 \quad (28)$$

여기서, γ 는 $\lambda/2$ 파장판에 의한 위상오차를 의미한다. 변형전과 후의 위상차를 구하면 $\lambda/2$ 파장판에 의한 위상오차도 사라진다. 위상오차의 해석을 통해 위상오차의 1차항은 없어진다는 것을 확인할 수가 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 Wollaston prism을 이용한 shearography에서 수동소자인 두 개의 파장판을 추가함으로써 90도의 위상천이를 발생시켜 4개의 간섭패턴을 얻고, 이로부터 스펙클 패턴의 각 점에서의 위상을 얻을 수 있는 방법을 제시하였다. 본 논문의 연구결과를 통해 $\lambda/2$, $\lambda/4$ 파장판 조합과 $\lambda/4$ 파장판 두개의 조합의 경우에 있어서 90도의 위상천이를 가지는 4개의 스펙클 패턴을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

변형전후의 간섭패턴을 각각 4개씩 얻고 이로부터 각 지점에서의 위상을 얻은 후에, 위상차를 구함으로써 반도체 장비의 변형에 대한 기술기 정보를 얻을 수 있다. 또한, $\lambda/2$, $\lambda/4$ 파장판 조합과 $\lambda/4$ 파장판 두개의 조합의 경우에 있어서의 파장판의 불완전성에 의해 발생하는 위상오차에 대한 해석을 하였으며, 해석을 통해 위상오차의 1차항의 영향은 무시될 수 있다는 것을 알 수가 있었다.

본 시스템은 수동소자를 추가함으로써 위상천이를 발생시킬 수 있는 shearographic 시스템을 제시함으로써, 반도체장비의 변형을 진단할 수 있는, 구조가 간단하고 저가이며 외부환경에 강인한 shearographic 시스템을 구성하는데 일조할 것으로 생각한다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 호서대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. J.A. Leendertz and J.N. Butters, "An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments," J. Phys. E. vol. 6, pp. 1107-1110, 1973.
2. Y.Y. Hung, "Shearography, a new optical method for strain measurement and nondestructive testing," Opt. Eng. vol. 21, no.3, pp. 391-395, 1982.
3. W. Steinchen, "Quality control of fiber-reinforced composites by means the shearographic and holographic method," Proc. SPIE vol. 1756, 1992.
4. S.L. Tol, F.S. Chau, V.P.W. Shim, C.J. Tay, and H.M. Shang, "Application of shearography in nondestructive testing of composite plates," J. Mater. Process. Technol. vol. 23, pp. 267-275, 1990.
5. W. Steinchen, L.X. Yang, M. Schuth, G. Kupfer, "Application of shearography to quality assurance," J. Mater. Process. Technol. vol. 52, no.1, pp. 141-150, 1992.
6. F.S. Chau and T.W. Ng, "A real-time digital shearing speckle interferometer," Measure. Sci. Technol., vol. 3, pp. 381-383, 1992.
7. Y. Y. Hung, "A phase shift technique for automation of phase determination in digital shearography," Proc. 1994 SEM spring Conf., Baltimore, MD, 6-7 June 1994, pp. 233-240.
8. W. Steinchen and L. Yang, *Digital shearography*, SPIE Press, 2003.
9. Y.Y. Hung, "Shearography fo non-destructive evaluation of composite structures," Optics and Lasers in Engineering vol. 24, pp. 161-182, 1996.
10. S. Dilhaire, S. Jorez, A. Cornet, L.D. Patino Lopez, W. Claeys, "Measurement of the thermomechanical strain of electronic devices by shearography," Microelectronics Reliability vol. 40, pp. 1509-1514, 2000.
11. V.M. Murukeshan, O. L. Seng, and A. Asundi, "Polarization phase shifting shearography for optical metrological applications," Optics & Laser Technology vol. 30, pp. 527-531, 1998.
12. A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals* (Wiley, New York, 1984), Chap. 5.