

레이저 스펙클 간섭법을 이용한 반도체 패키지의 비파괴검사

Non-destructive Inspection of Semiconductor Package by Laser Speckle Interferometry

김경석*[†], 양광영*, 강기수**, 최정구**, 이항서**

Koungsuk Kim*[†], Kwangyoung Yang*, Kiso Kang**, Jung-Gu Choi** and Hangseo Lee**

초 록 본 논문에서는 반도체 패키지 내부결합의 비파괴 정량평가를 위한 ESPI 기법을 이용한 시스템 및 검사기법을 제안하고 있으며, 검사시스템은 ESPI 검사장치, 열변형유도장치, 단일채널로 구성되어있다. 기존 초음파, X-ray 기반의 검사기법에 비하여 측정시간 및 검사방법이 용이하며, 결합의 정량검출이 가능하다는 장점이 있다. 검사결과에서 대부분의 결합이 열방출이 많은 칩 주위에서 박리결함으로 나타났으며, 원인은 층간 접착강도의 약화와 열분배 설계에서 문제점인 것으로 사료된다.

주요용어: 반도체 패키지, 전자처리스펙클패턴간섭법, 정량해석

Abstract This paper proposes a non-destructive ESPI technique to quantitatively evaluate defects inside a semiconductor package. The inspection system consists of the ESPI system, a thermal loading system and an adiabatic chamber. The technique is high feasibility for non-destructive testing of a semiconductor and overcomes the weaknesses of previous techniques, such as time-consumption and difficult quantitative evaluation. Most defects are classified as delamination defects, resulting from the insufficient adhesive strength between layers and from non-homogeneous heat spread. Ninety percent of the tested samples had delamination defects which originated at the corner of the chip and may be related to heat spread design.

Keyword: semiconductor packaging, ESPI(electronic speckle pattern interferometry), quantitative analysis

1. 서 론

반도체 부품은 각종 전자제품을 비롯하여 의료기기, 항공·우주 및 각종 군사무기 등과 같은 첨단 장비에 필수 부품으로 사용되고 있고 하루가 다르게 빠른 속도로 발전하고 있다. 따라서 만약 이와 같은 첨단 고가 장비에 들어가는 반도체에 결함이 발생한다면, 장비의 성능을 크게 저하시키거나 오

작동의 원인이 된다. 따라서 반도체의 기술개발과 함께 제품의 신뢰성을 평가할 수 있는 기술의 개발이 동시에 이루어져야 한다. 반도체 상에 발생할 수 있는 결함으로는 크게 박리(Delamination), 균열(Crack), 기포(Void), 경사(Inclination) 등이 있으며, 지금까지는 반도체의 비파괴적 평가에 있어서 초음파 검사기법, X선 기법, 광학현미경이나 전자현미경 등에 의한 광학적 육안 검사가 행해져왔다[1,2]. 특

히, HITACHI, SONIX 등과 같은 업체에서 생산하는 SAT(scanning acoustic tomography) 장비의 고성능화된 초음파검사기법을 채택하여 많은 발전을 하고 있다[3,4]. 그러나 초음파검사기법은 초음파는 고체 내에서 감쇠와 산란 등의 복잡한 거동을 갖는 특성으로 인하여 그 취급에 세심한 주의가 필요하며, 일반적인 초음파 펄스식 탐상에서는 진동자와 동기 펄스파가 이용되기 때문에 근접결합의 분리는 용이하지만, 작은 크기의 결함에서는 임피던스의 변화가 적어서 접촉면의 검출이 곤란하다. 또한 검사자의 숙련성과 많은 횟수의 샘플링 검사를 요구하고, Scanning 방식이기 때문에 전체적인 패턴을 확인하기에는 많은 시간이 소요되는 문제점을 가지고 있으며, X-Ray 검사기법은 장비자체가 고가이면서 출력세기에 따라 큰 가격 차이가 있으며 방사능에 대한 노출이라는 문제점이 따르며, 광학적 육안 검사는 분해하는 과정에서 손상이 갈 수 있을 뿐 아니라 숙련공이 아니고서는 그 결합 유무 또한 구별하기 어려운 문제점 등을 가지고 있다.

이 문제점을 보완하기 위해서 본 연구에서는 검사의 경제적, 기술적 효율성을 증대할 수 있는 ESPI(electronic speckle pattern interferometry)를 이용하여 반도체 내부결합의 정량분석을 하고자 한다. ESPI를 이용한 비파괴검사는 복합재료 및 배관 설비의 결합검사에 많이 활용이 되어 왔으며, 본 연구에서는 반도체 결합의 정량평가에 활용하고자 검사장치를 개발하여 실제 사용중 발생한 반도체 내부결합을 정량분석하였다.

2. 면외변위 측정 ESPI 및 결합 검출원리

2.1. 면외변위 측정 ESPI

ESPI의 원리는 홀로그래피(Holography)기법과 같은 백라에서 이해가 가능하다. 즉, 간섭에 의해 물체의 정보를 기록하고, 이 기록된 정보를 재생(형상 측정) 하거나 변형 전후의 정보를 비교함으로써 변형의 측정 등으로 활용하고 있다. ESPI에서는 기존의 물체의 정보를 저장하기 위한 홀로그램을 CCD 카메라로 대체하고, 복잡한 재생의 과정을 화상처리 기술을 적용하여 물체의 변형정보를 실시간으로 상관 간섭줄무늬로 나타나게 한다. Fig. 1은 면외변위 측정을 위한 ESPI 간섭계를 나타내었다. 광원으로 부터 나온 빛은 광분리기(beam splitter)를 통하여

CCD camera에 직접 입사되는 참조광(reference Beam)과 대상체에 조사되어 반사된 빛이 CCD Camera에 입사되는 물체광(object beam)으로 나누어진다. 두 개의 빛은 카메라 앞에서 간섭을 일으키고 간섭된 이미지가 CCD cell에 결상된다. 식 (1)은 CCD Camera의 수광소자에 기록되는 변형전 (I_{before})과 변형후(I_{after}) 빛의 세기 분포식이다.[5] 여기에서 I_0 와 I_R 은 물체 빛과 기준 빛의 강도이며, ϕ 는 물체광과 참조광의 초기위상, $\Delta\phi$ 는 물체의 변위에 의한 위상차이다.

$$I_{before} = I_R + I_0 + 2\sqrt{I_R I_0} \cos \phi$$

$$I_{after} = I_R + I_0 + 2\sqrt{I_R I_0} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (1)$$

ESPI에서는 두 식의 밝기분포를 감산처리 함으로써 식 (2)와 같은 수식을 얻게 된다.

$$I = I_{before} - I_{after}$$

$$= 2\sqrt{I_R + I_0} [\cos \phi - \cos(\phi + \Delta\phi)] \quad (2)$$

이때, 모니터상에서 직접 관찰하게 되는 스펙클 상관 간섭무늬의 분포식은 식 (3)과 같이 음의 부호가 제거된 절댓치로 나타나게된다. 여기에서 K는 모니터 상수이다.

$$B = K \left| \sqrt{I_R I_0} \sin(\phi + \frac{1}{2} \Delta\phi) \sin(\frac{1}{2} \Delta\phi) \right| \quad (3)$$

이 상관간섭줄무늬는 물체의 변위분포와 관련이 있다. 본 연구에서는 표면변위의 정량화를 위해서 4단계위상이동기법과 결렬침기법(unwrapping method)을 적용하였다[6,7].

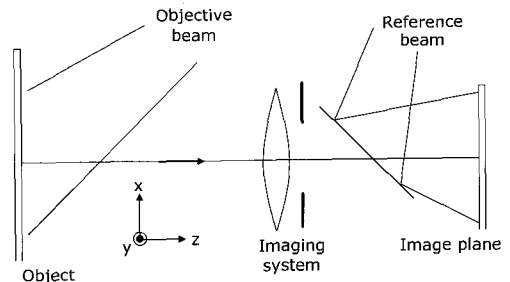


Fig. 1 Out-of-plane displacement sensitive interferometer

2.2. 결함 검출원리

ESPI의 기본 개념은 변형전후의 물체 표면상태의 비교이며, 그 정보의 전달자가 분해능이 높은 레이저가 되는 것이다. 또한, 결함의 주위에서는 외력에 의해 정상부위보다 큰 변형이 일어나게 되며, 반도체와 같은 얇은 구조에서 내부결함은 작은 외력에 대해서도 표면변위의 변화로 나타나게 된다. 이 표면변위의 변화를 ESPI에 의해 고분해능으로 측정함으로써 내부결함의 위치를 검출할 수 있으며, 또한, 표면변위의 변화는 결함의 경계면에서 기울기의 변화를 가지게 되며, 기울기변화점을 확인하여 결함의 크기를 정량적으로 평가할 수 있게 된다.

3. 실험장치 구성 및 방법

3.1. Electronic Speckle Pattern Interferometry System

ESPI는 독일 Ettemeyer 사의 상용 시스템을 이용하였으며, 구성은 Fig. 2와 같이 532 nm 파장의 Nd:YAG Laser, ESPI Sensor, Nd:YAG Laser 전용 광파이버, PZT(Piezo-electric transducer) 제어장치, 화상처리장치(Image processor)로 구성하였다. ESPI 시스템은 종전의 광학정반에서 여러 가지 광학부품을 사용하여 구성한 면내 및 면외 변위 측정 간섭계를 축소하여 진동 및 기타 여러 외란요소를 최소화하여 제작된 것으로서 광학 정반에서 간섭계를 꾸며 실험했을 때보다 환경적인 영향을 적게 받는다. 최초 레이저 소스에서 광파이버를 통하여 센서 헤드로 입력되면 4개의 암으로 고르게 나누어져 대상체에 레이저 빛이 조사된다. 면외 변위 측정을 위해서는 이 4개의 암 중에서 하나를 사용하여 물체 광과 센서 내부에서 CCD로 바로 들어가는 참조광이 만나 간섭을 일으켜 면외 변위를 측정하게 된다.

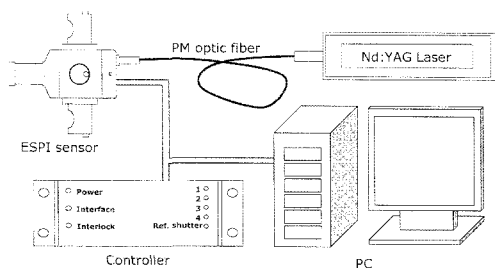


Fig. 2 Configuration of ESPI System

3.2. 반도체 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 computer interface chip, communication CPU용으로 사용되는 것으로서 파워분배, 신호분배, 회로보호, 열분해 등의 반도체 패키지의 주요 기능을 최적화한 1997년부터 국내·외적으로 꾸준한 성장률을 보이고 있고, 반도체의 핵심 파트로 자리 잡은 BGA(ball grid array)종류 중에서도 PBGA(plastic ball grid array)와 SBGA(super ball grid array)를 시험편으로 사용하였다. 반도체 패키지 내부 결함은 크게 인위적으로 인공결함을 가한 것과 자연결함이 발생한 것으로 하였다. 인공결함은 100℃의 상온에서 7분에서 12분간 두었다가 꺼내어 급랭 시키는 방법으로 열충격을 가한 방법과 물리적인 충격에 의한 방법으로 결함을 인위적으로 만들었으며, 그 결함의 크기는 자연결함에서 나타나는 크기와 패턴에 상관없이 실제 제조공정이나 사용 중에 발생할 수 있는 환경에 접근하여 만들었다. 자연결함은 제조공정 중 결함이 발생한 것과 실제 사용 중 결함이 발생한 것으로 하였다. 반도체 패키지의 제조 공정은 웨이퍼 가공, 웨이퍼 절단, Die 실장, Wire 연결, Molding 단계를 거친다. 이 제조공정 중에 발생할 수 있는 결함들로는 웨이퍼 절단시 Chip crack, Chipping이 발생할 수 있으며, Die 실장 시에는 층간 접착력의 부족으로 박리결함이 발생할 수 있으며, Wire 연결시 Grain이나 Fracture가 발생할 수 있고, Molding 시에는 Void나 층간 박리결함이 발생할 수 있다. 그리고 완성된 패키지 또는 사용도중의 패키지 상에서의 결함의 종류로는 Void, Chip 및 Molding Compound 상의 결함, Ball bonding 상의 결함, 각 층간의 박리결함 및 경사 등이 있다.

3.3. 검출시스템 구성 및 방법

대기의 대류에 의한 외란을 피하고 전체적인 분위기 온도에서 대상체에 변형을 유도하기 위해 자체 개발한 검출시스템은 전압조절장치에 의해 미세 온도조절이 가능하고 챔버 내 온도는 대기의 온도에서 100℃ 이상까지 가열이 가능하다. 열에 의한 대류 및 열 영향에 의한 외란 요소를 방지하기 위해 가열판 및 센서, 센서 가이드 모두를 1 cm 두께의 챔버 속에 넣고 밀폐시켰다. 또한 관내의 내부 반사를 최소화 하기 위해 전체적으로 무광택 스프

레이로 도색하였으며, 한 면은 실험 과정을 관찰하기 위해 투명한 상태로 두었다. Fig. 3은 반도체 결합검출 시스템의 전체구성을 보여 주고 있다. 결합검출과정은 먼저 가열판 위의 3점 지지가 되어있는 Ceramic plate 위에 반도체 패키지를 올려놓고, ESPI 센서의 Zoom Lens를 조절해 줌으로써 화면상에 적절한 위치와 초점을 맞춘다. 그런 다음 ESPI 센서의 물체광과 참조광의 양을 알맞게(간섭이 잘 일어나게) 조절하고 챔버를 덮어 밀폐시킨 다음 1차, 2차 전압조절 장치로 전압을 조절하여 챔버 내의 온도가 충분히 올라가도록 약 25분 정도 가열하였다. 25분이 지난 후 Heating device의 전원을 차단하고 챔버 내부 온도가 대기와의 온도차로서서히 냉각되면서 온도 구배가 적고 대류가 거의 없는 상태로 될 때까지 다시 약 25분 정도 기다렸다가 변형 전의 이미지를 저장하고 다시 반도체 패키지에 변형이 생기면 화면상에 선명하게 보이는 스펙클패턴을 저장하여, 결합 정보를 가지고 있는 위상지도(Phase map)를 얻어, 이 위상지도에 가지고 여러 가지 화상처리를 통해 결합의 해석을 용이하게 하였다. 최초 가열판을 가열하였다가 식히면서 챔버 내의 전체적인 온도분포 상태를 확인한 결과, 처음 가열할 시에는 부분적인 온도차와 불안정한 상태를 보였으나 가열판의 전원을 끄고 식는 과정에서 점차 대류가 없어지고 전체적으로 안정된 온도 분포를 나타내는 걸 확인하였다. 실험에서는 안정적인 면과 시간적인 면을 고려해 최초 챔버 내부를 가열 한 후, 식는 시작점에서 약 25분이 지난 약 40~50℃ 사이에서 결합을 검출해 냈다.

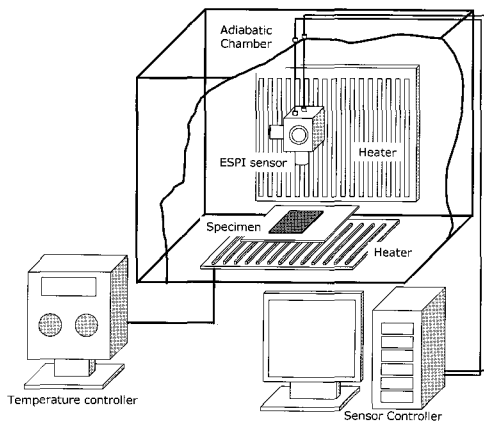


Fig. 3 Configuration of inspection system

4. 실험결과 및 고찰

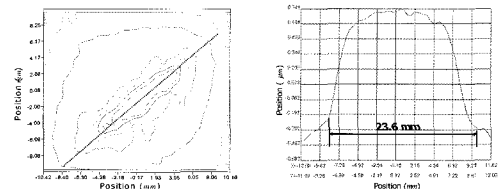
실험은 먼저 인공결함을 이용하여 초음파 검사기법과 비교하여 신뢰성을 확보하였으며, 실제 결합에 적용하기 위해 제조공정 중 발생한 결합 검사, 사용 중 발생한 결함을 분류하여 적용하였다. 위상 이동기법을 적용하여 물체의 변형정도가 정량분석이 되고, 이 정보로부터 Contour line(윤곽선 추출)과 Line profile를 그어 결합의 크기를 정량적 분석하였다.

4.1. 인공 결함을 이용한 비교실험

인공결함은 100℃의 상온에서 7분에서 12분간 두었다가 꺼내어 급랭시키는 방법으로 열 충격을 가한 방법과 물리적인 충격에 의한 방법으로 결함을 인위적으로 만들었다. 충격결함이 가해진 반도체 패키지와 박리가 일어난 반도체 패키지를 대상으로 초음파 검사기법으로 많이 사용하고 있는 C-Scan 기법을 사용하여 Die 저면에 포커스를 맞추어 반도체 패키지 내부의 각 계면에서 반사되어 되돌아오는 신호의 크기와 위상을 측정하여 검사하고자 하는 수평 단층의 화상을 Fig. 4에 결과를 나타냈다. 정량해석 결과 기존 초음파검사기법과 약 6% 이내의 오차율을 보였다. 초음파검사기법은 탐촉자와



(a) Ultrasonic scanning image (b) ESPI Phase map



(c) Contour line of surface (d) Quantitative evaluation deformation by ESPI from line profile of (c)

Fig. 4 Comparison of ultrasonic and ESPI result in the impact-damaged semi-conductor

대상체를 접촉시키지 않은 상태에서 검사하는 수침법을 이용하였다. Fig. 5는 물리적 충격에 의해 발생한 결함을 측정된 결과로 내부에 손상이 일어나 약 2.5 mm의 결함이 발생한 것을 알 수 있다. 또한, 열충격에 의한 결함은 Fig. 6과 같이 내부 박리 결함으로 나타났다. 실험에서 결함의 정량화는 윤곽선 추출과 프로파일을 그어 변위의 급변점을 찾음으로서 결함을 정량적으로 확인하였다. 그러나, 표면변위를 가지고 분석하는 이 실험에서는 결함의 깊이의 측정이 불가능하였다.

4.2. 제조공정 중 발생한 내부결함 검사

최근 국제적인 환경친화 정책에 의해 국제환경단체에서 기존의 환경저해요소가 있는 패키지 재료

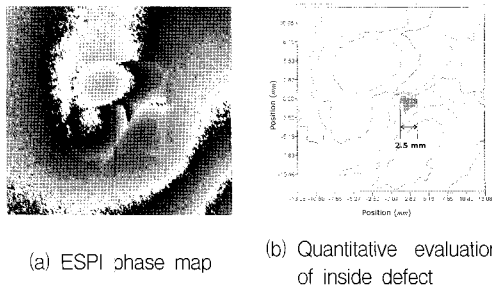


Fig. 5 Inspection of the impact-damaged semi-conductor

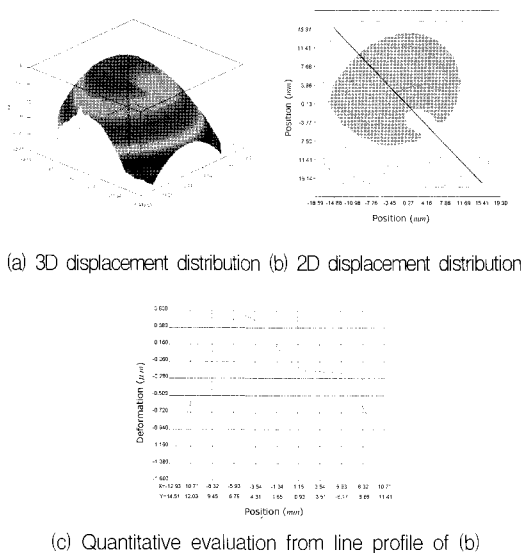


Fig. 6 Inspection of the thermo-damaged semi-conductor

나 접착본드의 사용을 규제함으로써 생산업체에서는 새로운 대체 패키지 재료나 접착본드를 사용할 수밖에 없어 전체적인 작업 공정상의 온도가 높아져 불량률이 높아졌으며, 생산품에서 박리결함의 문제가 빈번하게 발생하게 된다. Fig. 7은 실제 제조공정 상에서 나타나는 박리결함을 측정된 결과로 내부 중앙에 약 6.5 mm의 박리가 나타나 있는 것을 확인하였다

4.3. 사용 중 발생한 내부 결함검사

실제 사용중 자연결함이 발생한 반도체 패키지를 대상으로 실험한 결과이다. 제조과정이 끝난 반도체 패키지 상의 자연결함으로는 고온이 되었다가 급냉되면서 칩 및 Molding Compound 상에 크랙이 발생하는가 하면 박리결함이 발생하고, 칩과 Molding 부의 냉각 속도가 다르기 때문에 층간에 내부 응력이 생겨 Ball bonding 부에 fracture가 발생하고, 물리적인 충격에 의해 전체적인 경사결함, 박리결함, 칩 및 Molding Compound 상에 크랙이 발생하게 된다. 반도체 패키지의 수명 상태를 살펴보면 초기 고장, 우발적인 고장, 마모에 의한 고장 단계로 나눌 수 있다. 초기고장은 사용 과정에서 반도체 부품 자체의 결함 및 부적절한 전압 공급, 미숙한 오작동으로 약 10% 정도의 고장율을 보이고, 우발적인 고장은 사용 중 사용자의 잘못 또는 환경적인 영향으로 인해 약 60%의 고장율을 보이고, 마모에 의한 고장은 반도체 패키지 자체의 내구성 약화로 약 30%의 고장율을 보인다. Fig. 8은 실제 사용 중에 발생한 결함을 검사한 결과로서 내부에 박리결함이 발생하였으며, 제조상의 결함과 실제 사용 중에 발생한 결함의 95% 이상이 박리결함으로 조사되었다.

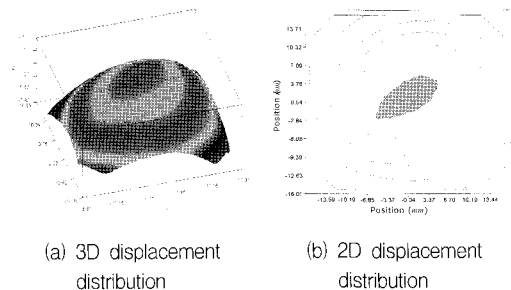


Fig. 7 Inspection of real defect in manufacturing processing

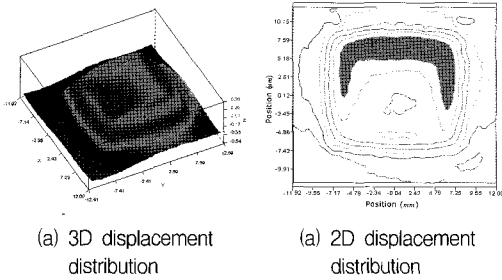


Fig. 8 Inspection of real defect in service

5. 결론

본 논문에서는 기존에 반도체 패키지 결함 검사에 행해져왔던 광학적 육안검사, 초음파 검사기법, X-Ray 검사 기법 대신 비접촉 전자처리스펙클간섭법(ESPI)을 이용하여 검사시스템을 개발하고 반도체 패키지의 내부 결함을 검사하였다. 실험결과에서 결함의 종류는 거의 모두 박리결함으로 나타났으며, 이는 최근 국제적인 환경 친화정책에 의해 환경 저해 물질 사용을 규제함으로써 전체적인 작업 공정의 온도가 높아짐으로 인한 요소도 있지만, 반도체 패키지를 구성하고 있는 각 경계층이 상대적으로 취약하기 때문인 것으로 사료된다. 이와 같은 고집적도 반도체 패키지 산업에 분해능이 우수하고, 검사 조건이 필요 없는 본 ESPI 검사 시스템을 적용한다면 공정 단계별 샘플링 검사 시간을 획기적으로 줄일 수 있으며, 많은 샘플링으로 보다 신뢰성 있는 데이터를 제공할 수 있고, 조기에 결함을 찾아내어 그 영향인자들을 분석하여 공정상의 문제점을 수정·보완한다면 반도체 패키지 산업의 발전에 크게 기여하리라고 사료된다.

후 기

이 논문은 2005년도 조선대학교 레이저응용 신기술 개발연구센터의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김훈조, "반도체 결함의 패턴인식을 위한 신경 회로망 운영과 디지털 초음파 탐상원리의 응용", 조선대 대학원 박사학위 논문, (2001)
- [2] Young-Ho Kim and Soon-Bok Lee, "Reliability to Electronic Package," (2003)
- [3] K. Y. Jhang, H. S. Jang, B. G. Park, J. Ha, I. K. Park and K. S. Kim, "Wavelet analysis based deconvolution to improve the resolution of scanning acoustic microscope images for the inspection of thin die layer in semiconductor," NDT & E International, Vol. 35, pp. 549-557, (2002)
- [4] J. Y. L. Goh, M. C. Pitter, C. W. See, M. G. Somekh and D. Vanderstraeten, "Sub-pixel image correlation: an alternative to SAM and dye penetrant for crack detection and mechanical stress localization in semiconductor packages," Microelectronics Reliability, Vol. 44, pp. 259-267, (2004)
- [5] R. Jones and C. Wykes, "Holographic and Speckle Interferometry," Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, (1983)
- [6] A. V. Henri and Ad. A. M. Mass, "Image processing algorithms for the analysis of phase-shifted speckle interference pattern," Applied Optics, Vol. 30, No. 13, pp. 1636-1641, (1999)
- [7] G. L., Cloud, "Optical Methods of Engineering Analysis," Cambridge University Press, Cambridge, (1995)