

## 반도체 Bump 검사를 위한 백색광 주사 간섭계의 고속화

### A High-Speed White-Light Scanning Interferometer for Bump Inspection of Semiconductor Manufacture

고국원<sup>1</sup>, 심재환<sup>1</sup>, 김민영<sup>2,✉</sup>  
Kuk Won Ko<sup>1</sup>, Jae Hwan Sim<sup>1</sup>, and Min Young Kim<sup>2,✉</sup>

<sup>1</sup> 선문대학교 정보통신공학과 (Department of Information and Communication Engineering, Sunmoon University)

<sup>2</sup> 경북대학교 전자공학부 (School of Electronics Engineering, Kyungpook National University)

✉ Corresponding author: mykim@ee.knu.ac.kr, Tel: +82-53-950-7233

Manuscript received: 2012.9.17 / Revised: 2013.1.25 / Accepted: 2013.6.14

*The white-light scanning interferometer (WSI) is an effective optical measurement system for high-precision industries (e.g., flat-panel display and electronics packaging manufacturers) and semiconductor manufacturing industries. Its major disadvantages include a slow image-capturing speed for interferogram acquisition and a high computational cost for peak-detection on the acquired interferogram. Here, a WSI system is proposed for the semiconductor inspection process. The new imaging acquisition technique uses an 'on-the-fly' imaging system. During the vertical scanning motion of the WSI, interference fringe images are sequentially acquired at a series of pre-defined lens positions, without conventional stepwise motions. To reduce the calculation time, a parallel computing method is used to link multiple personal computers (PCs). Experiments were performed to evaluate the proposed high-speed WSI system.*

Key Words: White-light Scanning Interferometer (백색광 주사 간섭계), Wafer Bump Inspection (웨이퍼 범프 검사)

#### 1. 서론

최근 반도체 산업은 노트북, 디지털 TV, 휴대 정보기기 등 시장의 확대에 의해 급격한 발전을 하고 있으며, 초소형 전자 부품의 수요의 증가로 인하여 반도체는 미세한 패턴과 형상이 더 작아지고 복잡해지고 있다. 반도체 생산 업체에서는 이러한 변화에 발맞추기 위하여 미세 패턴을 고속으로 검사하고 기존의 VGA급 보다 더욱 넓은 면적을 검사 할 수 있으며 신속성, 정확성, 반복성을 겸비한 검사장비의 개발을 검사장비 업체에 요구 하고 있다.

현재 반도체 생산 공정에서 범프(Bump) 검사에 적용하기 위하여 검토하고 있는 검사의 방법으로

는 위상천이간섭계, 백색광 간섭계(White-light Scanning Interferometer: WSI), 공초점 측정 방식이 있다. 여러 가지 측정 방법 중 위상천이간섭계 보다 광학의 구성이 간단하고 공초점 측정 방식보다 빠른 검사속도를 장점을 동시에 가지고 있는 백색 광 간섭계가 최근 관심 대상이 되고 있다. 반도체 제조 공정에서 공초점 방식을 선호하지만, 포인트 방식으로 인하여 반드시 수평과 수직으로 이동을 해야 하여 검사 속도가 느리므로 현재는 인라인(In-Line) 검사에 적용하기 어려우며 오프라인(Off-Line) 검사에서 일부 사용되고 있다. 공초점 측정 방식도 범프 측정에 있어서 인라인에 적용하기 위하여, 측정화면의 대면적화 및 배열형 핀홀(Pinhole-array)을 이용한 대규모 병렬화등의 방법을

활용하는 연구들이 활발히 진행되고 있다. 하지만 배열형 편흔과 렌즈, 수광검출부 간의 어려운 정렬 문제를 내재하고 있어, 이로 인한 광학부의 복잡한 구성이 검사기의 가격상승에 대한 요인으로 작용하고 있어 아직까지는 인라인 검사를 위한 이의 적용이 어렵다. 이에 속도와 검사 정밀도 면에서 대안으로 제시되고 있는 것이 백색광 간섭계를 이용한 3차원 측정 방식이다. 공초점 현미경 방식과 같이 나노급의 비접촉식 광학 기반 검사방법으로 측정 고속성, 정확성, 반복성, 신뢰성 등의 관점에서 인정 받고 있으며, 면적스캐닝 방식으로 유사 3차원 검사 기법에 비하여 빠른 검사속도를 가진다는 장점이 있다.

본 연구에서는 인라인 검사에 적용되는 범프 검사장비에 요구되는 성능인 검사시간 2 sec와 측정화면 3.2 x 2.4 mm를 만족시키기 위해 검사 속도를 높이기 위한 방법으로 기존 검사장비에 적용되었던 VGA급 카메라에서 검사 영역을 넓힌 4M (2320x1726 pixel) 카메라를 적용한 대영역 광학계를 개발하고, 영상획득 속도를 높이기 위한 PZT(Piezo Actuator) 이송 동기화 영상획득 기법과 검사 처리 속도를 높이기 위한 병렬 처리 다중 PC 기법을 적용하였다. 언급된 대영역 광학계와 고속 동기화 영상획득 기법, 병렬처리 다중 PC 기법 등은 기존 VGA급 카메라가 적용된 검사기 보다 약 13배 넓은 영역의 측정 화면을 2 sec 내의 검사시간에 고속 측정함으로써 인라인 검사에 적용되기 위하여 제안되었다. 백색광 간섭계 시스템의 고속 측정 관한 선행연구는 주로 알고리즘의 개선을 통한 샘플링의 구간을 확대하는 것에 주로 피크검출 소프트웨어에 초점이 맞추어서 진행되고 있으나,<sup>1,2</sup> 이 논문에서는 하드웨어에 초점을 맞추어 개선 방법을 제시한다.

## 2. 백색광 간섭계를 이용한 측정 장치 구성

### 2.1 백색광 간섭계의 원리

백색광 주사 간섭계의 원리는 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 넓은 주파수 대의 광원을 가지고 있는 백색광이 수 마이크로 이하의 짧은 간섭 거리를 가지고 있다는 점을 이용한 것이다.<sup>3</sup>

백색광을 측정 광과 기준 광으로 분리하기 위하여 광분할기(Beam Splitter)를 사용하여 이를 측정면과 기준면에 조사하고 측정면에서 반사되어 돌아오는 광과 기준면에서 반사되어 돌아오는 광이

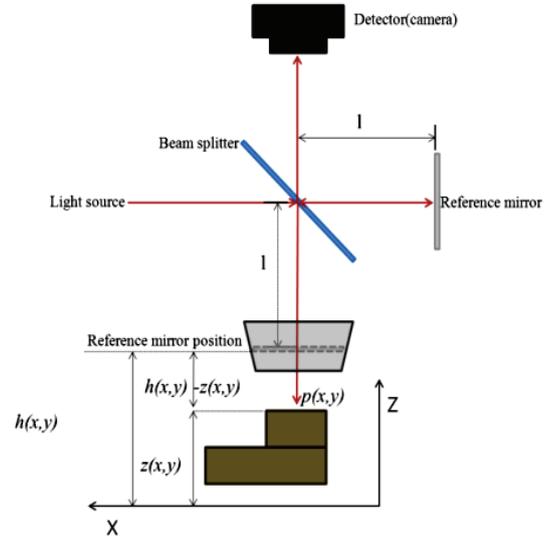


Fig. 1 Principle of white light interferometer

같은 크기의 광 경로를 가지게 되면 특정 거리에서 간섭 현상이 발생하여 간섭 무늬가 일어나고, 이 무늬의 정보를 분석하여 3차원 높이를 구하는 방법이다. 대상물의 3차원 높이를 측정하기 위해서는 PZT를  $\mu\text{m}$  또는  $\text{nm}$ 단위로 이동하면서 간섭 무늬인 Interferogram을 얻게 되고 여기서 간섭 무늬의 정점이 일어나는 위치를 계산하여 높이 정보를 구하게 된다.

백색광 간섭계의 측정기로는 1972년에 P. A. Floumoy<sup>4</sup>에 의해서 필름의 두께 측정에 이용되었으며, 1980년에 N. Balasubramanian<sup>5</sup>가 측정기를 발표하였다. 1990년대 이후에 들어와서는 고속으로 빠른 시간 내에 3차원 높이를 측정에 관한 연구가 주로 이루어지고 있다.

### 2.2 반도체 검사용 백색광 간섭계 구성

반도체 검사용 백색광 간섭계는 빠른 속도로 검사를 요구하므로 검사 영역을 최대화 하며, 영상획득 시간과 영상 처리시간을 최소화 하도록 광학계를 구성하였다. Fig. 2에는 개발된 백색광 간섭계의 사진과 Table 1에는 상세 사양을 나타내었다.

대상물체를 고속으로 검사하기 위해서, 큰 검사 영역을 확보 가능하면서 초당 200 frame/sec의 고속 영상 획득 속도를 가지는 4M 카메라를 선정하였다. 간섭 렌즈는 2.5배에서 20배의 배율을 갖는 Nikon사의 간섭 렌즈를 선택할 수 있도록 광학계를 구성하였다. 기존의 Nikon 간섭 렌즈는 렌즈

Table 1 Specification of developed WSI system

Item	Specification
Measurement technique	Broadband white light Interferometry
Range of measurement	0 ~ 150 $\mu\text{m}$
Objective Lens	Nikon 2.5x ~ 20x DI
Function and option	2D and 3D view Vibration Isolation system Visual C++ 6.0 LED Controller
Image Capture Speed	Max 200 frame/sec
Maximum Resolution	0.1 $\mu\text{m}$ (vertical)
Auto focusing	400 $\mu\text{m}$ /sec
F O V	VGA(640x480)~4M(2320x1726)
LED	Center wavelength : 600 nm Bandwidth : 58 nm Coherence length : 17 $\mu\text{m}$

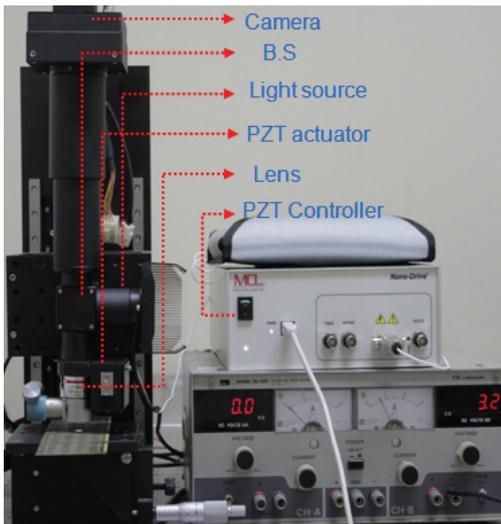


Fig. 2 Proposed white light interferometer

의 직경이 4M카메라의 CCD 보다 작으므로 카메라 CCD전 영역에 영상이 투영되도록 간섭 렌즈 후단의 광학계를 제작하여 구성하였다.

### 3. 백색광 간섭 측정계 고속화 기법

#### 3.1 PZT 동기화 고속 영상 획득 기법 개발

반도체 검사에서 요구하는 검사 속도를 만족시키기 위해 고속의 영상 획득이 필요하다. 고속 영상 획득을 위해서 카메라가 초당 200 frame을 획득

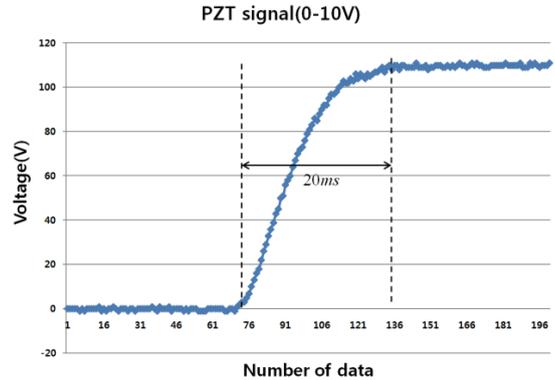


Fig. 3 Step-response graph of PZT

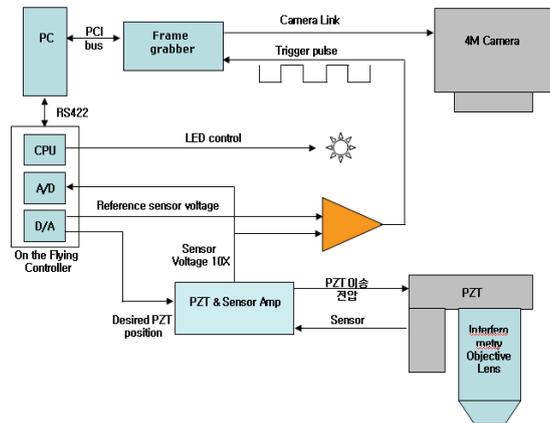


Fig. 4 Schematic diagram of on-the-flying capture

하므로, PZT는 5  $\mu\text{sec}$  이내의 응답성을 가져야 한다. 하지만, PZT의 이송 속도는 Fig. 3과 같이 정착 시간이 20 msec정도 소요되므로, 일반적으로 PZT가 안정화 되기 기다린 후 영상을 획득하는 방법으로는 초당 200 frame/sec의 고속 영상 획득을 최대한 활용하는 것은 불가능하다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 PZT를 멈춤 없이 원하는 초기 시점에서 목표치까지 한번에 이송하면서 영상을 획득하는 기술이 필요하다. PZT가 이동 중에 원하는 위치와 동기화 하여 영상을 획득하는 기법을 개발하였으며 Fig. 4에 나타내었다.<sup>6,7</sup>

먼저 영상을 획득해야 할 위치들에 대한 데이터는 미리 PC에서 계산을 해 놓은 뒤 PZT의 위치에 따른 순서대로 제어기에 다운로드 된다. 먼저 PZT이송을 위한 목표치가 D/A1을 통하여 PZT amp에 전달되면 PZT는 움직이기 시작하고 D/A2에서 영상획득에 필요한 기준 값이 출력되고 PZT의

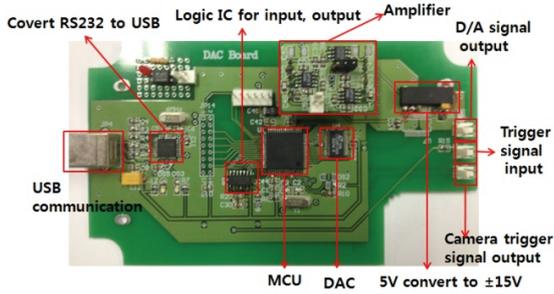
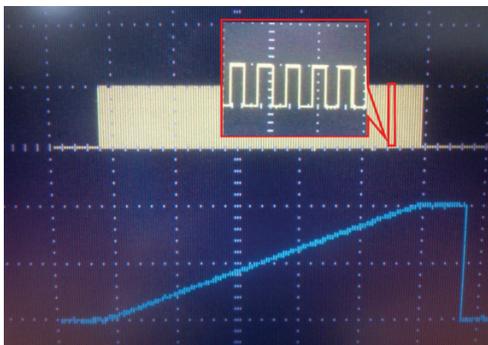
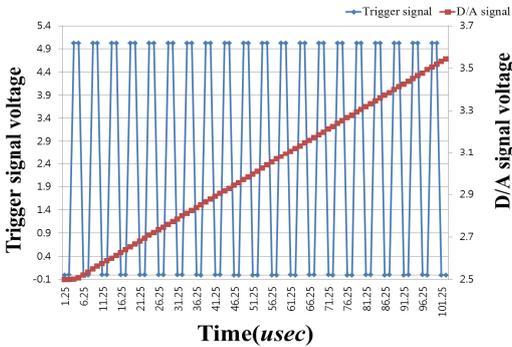


Fig. 5 Image of On-the-flying capture board



(a)

On the flying board Trigger, D/A output signal



(b)

Fig. 6 (a) PZT driving signal & Camera trigger signal acquisition (b) Plot of PZT driving signal data & camera trigger signal

위치 값은 센서 앰프를 통한 뒤 비교기에 입력되어 위치 값이 서로 일치할 때 카메라 획득에 필요한 동기화 신호가 출력된다.

A/D는 지속적으로 PZT의 위치를 모니터링 하면서 영상 획득 위치 값을 갱신하게 되며, 이러한 과정은 최종 PZT의 이동 지점에 이를 때까지 계속된다. Fig. 5는 개발된 PZT 위치 동기화 영상획득

제어기의 사진이다.

Fig. 6은 개발된 제어기를 통하여 0-100 μm을 이송하면서 영상을 획득하였을 때의 구동 전압과 카메라 영상획득을 위한 트리거 신호(trigger pulse)를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 오실로 스코프의 영상이며, Fig. 6(b)는 Unicorn 사의 UP-3005T 오실로 스코프를 사용하여 얻은 데이터를 그래프로 표시한 것이다. 이때 가로축은 시간을 1.25 μsec 로 데이터를 획득하였으며 세로축은 전압을 나타낸 것이다. 제어기는 시작점에서 등간격으로 몇 장을 획득할 것인가를 설정하게 되면 이에 적합하게 영상획득을 위한 펄스를 발생하게 된다. 본 실험에서는 0-100 μm를 이동하면서 200개의 영상을 획득하도록 명령을 주었으며, Fig. 6(b)는 이 중 20개의 트리거 파형만 표시하였다.

### 3.2 PZT 정점 검출 고속화

백색광 주사간섭계의 높이 추출을 위한 간섭 무늬의 정점 검출에 관한 많은 방법이 연구되어 왔다.<sup>8</sup> 가장 기본적인 방법은 FFT (Fast Fourier transform)<sup>9</sup>과 Inverse FFT를 이용하며 정밀도는 상당히 높지만, 계산에 상당히 많은 시간이 걸리므로 속도를 요하는 검사기에 적용이 어렵다. 이를 개선하고자 무게 중심 법,<sup>10</sup> 가시도 상관 분포 법, Squared-envelope function Estimation by Sampling Theory (SEST)<sup>2</sup>등이 많이 연구가 되고 있다. 기존의 FFT 을 이용한 방법은 대용량의 연산으로 많은 시간이 걸리는데 반하여 본 연구에서 사용한 SEST 방법은 샘플링 이론을 바탕으로, Interferogram에서 얻은 적은 양의 샘플 데이터 값에 대하여, 넓은 샘플링 구간을 가지고 squared-envelope function을 이용하여 간섭 신호의 정점을 빠른 속도로 구하는 방법이다. 식(1)의  $c$ 는 수직 Z축 방향으로의 Interferogram 의 밝기값  $g(z_n)$  의 평균이다.  $n$ 은 각 샘플링 포인트를 나타낸다. 식(2)를 통하여 평균을 기준으로 밝기값을 낮춘 뒤에 식(3)에 적용하여 정점을 검출한다.

$$c = \frac{1}{n} \sum_{n=0}^{N-1} g(z_n) \tag{1}$$

$$f_n = g(z_n) - c \tag{2}$$

$$r_n(z_j) = (f_j)^2 + \frac{4}{\pi^2} \left[ \sum_{n=-(j+1)/2}^{[(N-j-2)/2]} \frac{f_{j+2n+1}}{2n+1} \right]^2 \tag{3}$$

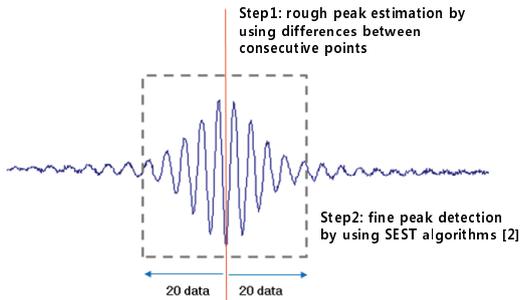


Fig. 7 Peak detection concept

SEST방법의 경우 FFT를 이용한 방법 보다는 정밀도 대비 속도면에서 우월한 성능을 보이지만, 공정에서 요구하는 검사 속도를 만족시키기에는 연산량이 비교적 많다. 따라서 Fig. 7과 같이 전 영역에서 샘플링을 하는 방법 보다는 간섭 무늬의 이웃하는 밝기 값들의 차이 값이 최대가 되는 점을 찾은 뒤 그 지점을 기준으로 하여 좌우 총 40개의 데이터를 추출하고, 여기에 SEST 알고리즘을 적용하여 정점을 찾는 방법을 제안함으로써, 기존방법보다 빠른 속도와 높은 정밀도를 얻을 수 있었다.<sup>6</sup>

**3.3 Multi-thread 병렬 처리 기법**

4M 카메라를 이용하여 높이 추출에 사용된 영상은 평균적으로 200개가 되며 800M의 영상 분량이다. 이러한 대용량의 메모리를 한번에 순차적으로 처리하기에는 많은 시간이 걸리므로 검사 영역별로 나누어서 각 영역에 소프트웨어 thread를 할당하여 계산을 하여 전체 영상에 대한 계산 속도를 높일 수 있는 방법을 제안하였다. Fig. 8은 5배의 간섭 렌즈를 사용한 4M 영상으로 3.2 x 2.4 mm의 크기의 영상이다. 획득한 영상을 4개의 대영역(1~4영역)을 나누고 4개의 영역은 또 다시 세로 방향으로 8개의 영역(1-1~1-8영역)으로 나누어 최대 32개의 검사 영역으로 나누었다. 각 영역으로 나누어 백색광 간섭계의 간섭 무늬의 최대 정점을 찾는 thread를 구성하여 실행이 되도록 알고리즘을 구성하였다.

**4. 실험 및 결과**

**4.1 고속 이송 PZT 실험**

고속 PZT이송의 위치 정확도를 살펴보기 위해서 기존의 Stop-And-Go 방식과 제안된 방법의 위

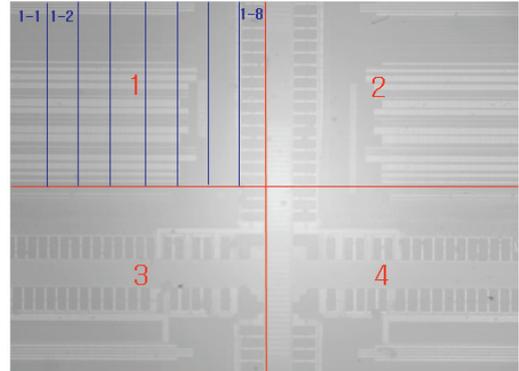


Fig. 8 Inspection area segmentation for multi-thread algorithms

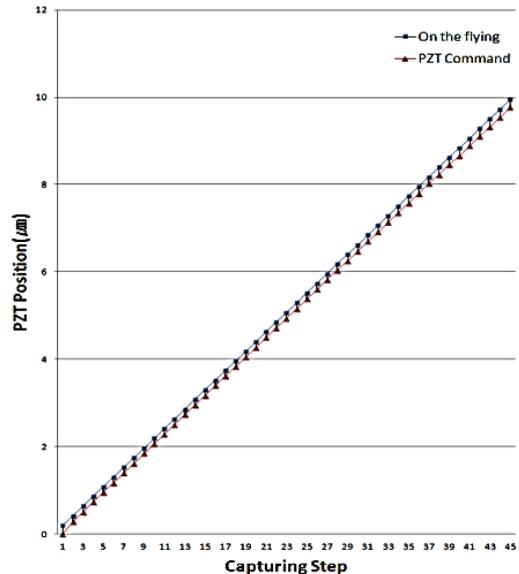


Fig. 9 Comparison plot of PZT positions

치를 비교하였다. 이때 20 bit의 A/D 변환기를 사용하여 PZT에 부착된 센서의 전압 값을 측정하였다.<sup>4</sup> 실험 조건은 100 μm를 0.5 μm 마다 영상을 획득하였으며, 영상획득 조건에서의 PZT의 위치 값의 일부를 Fig. 9에 나타내었다.

기존의 Stop-And-Go 방식의 영상 획득 방법과 본 논문에서 제안한 On-The-Flying 방식을 비교해 볼 때 PZT오차는 0.010 ± 0.004 μm이내 오차로 영상 획득이 되었음을 알 수 있었다. 신뢰성 검사를 위해서는 100번의 비교 실험을 통하여 데이터를 수집하였다. Table 2에 10스텝에 대한 실제 대표 데이터를 나타내었다.

Table 2 Comparison data of PZT positions

Capturing step	Average (μm)	Standard Deviation(μm)
1	0.005	0.0035
2	0.008	0.0017
3	0.011	0.0049
4	0.007	0.0036
5	0.013	0.0034
6	0.012	0.0022
7	0.011	0.0036
8	0.014	0.0059
9	0.011	0.0044
10	0.010	0.0042
Average	0.010	0.0037

Table 3 PC specification for speed test

Item	PC environment 1	PC environment 2
CPU	i7(Hex)	i7(Quad)
Memory	4GB	4GB
VGA	NVidia 512M	NVidia 512M
Frame Grabber	Silicon Software (200 fps)	Silicon Software (200 fps)

Table 4 Speed test results

No. of Thread	PC1(sec)	PC2(sec)
1	22.46	26.78
2	20.13	26.24
4	16.21	23.85
8	10.24	15.24
16	6.05	10.37
32	3.26	6.45
64	3.27	11.24

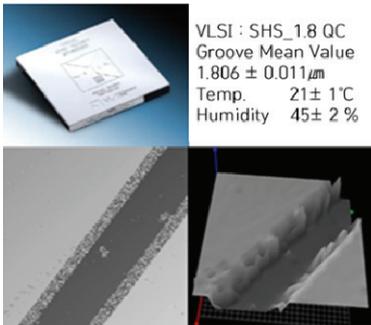


Fig. 10 Specifications of the target

Table 5 Accuracy of developed WSI system on VLSI target

Measurement Result	VLSI target (SHS - 1.8 QC) Calibrated Height : 1.806 μm ± 0.011μm Mean value Expanded Uncertainty		
	Average	No. of experiments	Standard deviation
	1.876 μm	200	0.070 μm

### 4.2 Thread 수의 최적화

연산 속도는 CPU의 수와 간섭 무늬의 정점을 찾기 위한 검색 함수의 수에 직접적인 관련이 있다. 정점을 찾기 위한 검색 함수는 multi-thread를 통하여 구현되며 함수의 수를 최적화에 사용하기 위해서 실험에 사용된 PC의 사양을 Table 3에 나타내었다. 4M의 크기를 가지는 200장의 영상을 사용하여, 영상 전영역을 대상으로 thread의 수에 따라 계산 영역을 나누고, 이에 대한 연산 결과를 Table 4에 나타내었다. 32개의 thread로 수행을 했을 때 최적의 시간을 얻었다.

### 4.3 측정 실험

개발된 백색광 간섭계의 측정 정밀도를 시험을 위하여 VLSI에서 제작된 표준 시편을 사용하여 먼저 정밀도를 측정하였다. 표준시편의 사양과 측정 부위의 측정 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

Thread 최적화 실험을 위하여 Table 3과 같이 i7(Hex)와 i7(Quad) 2대의 PC를 구성 하였으며 3차

Table 6 Accuracy test of developed WSI system on NIST certified target

Result	NIST target	Olympus	Proposed WSI	Error (%)
Volume [μm <sup>3</sup> ]	29,850,000	29,829,000	30,098,000	0.83
Area [μm <sup>2</sup> ]	197,500	198,100	199,200	0.86
Height [μm]	151.15	151.18	151.10	0.29

원 연산을 위한 thread 구성은 32개의 thread가 최적화된 thread임을 Table 4의 결과로 알 수 있다.

1.806 μm ± 0.011μm의 평균측정치와 확장불확도를 가지는 VLSI 표준 시편은 Table 5와 같이 개발된 백색광 간섭계에서 약 200회 정도의 반복측정 하였을 때 평균 1.876 μm와 표준편차 0.070 μm의 측정결과치를 보였다. NIST에서 제작한 bump시편을 사용하여 측정된 비교 결과를 Fig. 11과 Table 6

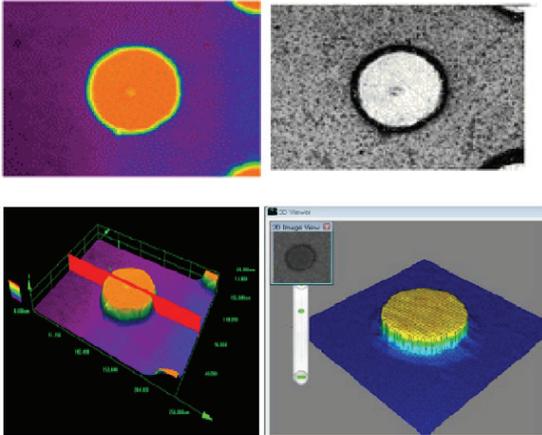


Fig. 11 Result of measurement (target certified by NIST)

에 나타내었다. NIST 시편의 측정은 10회 평균이며 5배 배율을 사용하여 검출한 것이다. 측정 결과는 높이, 면적, 체적의 관점에서 0.8% 이내의 오차 결과를 나타낸다.

### 5. 결론

반도체 검사를 위하여 백색광 간섭계를 적용하여 검사기를 만드는데 있어서 제일 문제점이 되고 있는 검사 속도를 높이기 위하여 4M 카메라를 이용하여 광학계를 구성하였으며 검사 FOV를 최대화 하였으며, 기존의 문제점인 연산 속도를 높이기 위하여 정점 추출 방법을 개선하였으며, 검사 영역을 나누어 thread를 적용하여 병렬 처리가 가능하도록 구성하여 검사 속도를 높일 수 있었다. 4M의 카메라를 사용하여 200장의 이미지를 처리하는데 있어서 걸리는 시간은 영상획득에 사용된 시간은 1000 msec 이내와 계산 시간에는 1개의 PC를 사용하여 3264 msec의 계산이 걸렸다. 측정 정밀도는 VLSI 표준시편을 사용하여 실험 하였을 때 평균오차 0.07  $\mu\text{m}$ 로 인라인 검사에서의 필요한 정밀도에 만족하는 것으로 보였으며 검사 속도는 인라인 검사에 요구하는 영상획득 시간에 2 sec를 만족하기 위해서는 다소 부족하나, 전체 영상이 아닌 일부 범프가 위치한 부분 영상일 경우 전체 영상의 40% 이내이므로 다중 PC를 사용하거나 Region of Interest (ROI) 기반으로 검사 알고리즘을 구성할 경우에는 2 sec 이내로 만족할 수 있다고 예상된다.

### 후 기

본 연구는 산업통산자원부 지방기술혁신사업 (RTI04-01-02) 지원으로 수행되었음.

### 참고문헌

- Hirabayashi, A., "Fast Surface Profiling by White-Light Interferometry Using Symmetric Spectral Optical Filter," IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E93.A, No. 2, pp. 542-549, 2010.
- Hirabayashi, A., Ogawa, H., and Kitagawa, K., "Fast surface profiler by white-light interferometry by use of a new algorithm based on sampling theory," Applied Optics, Vol. 41, No. 23, pp. 4876-4883, 2002.
- Malacara, D., "Optical Shop Testing," John Wiley & Sons, pp. 711-743, 3<sup>rd</sup> Ed., 2007.
- Flounoy, P. A., McClure, R. W., and Wyntjes, G., "White-light interferometric thickness gauge," Applied Optics, Vol. 11, No. 9, pp. 1907-1915, 1972.
- Balasubramanian, N., "Optical system for surface topography measurement," US Patent, No. 4340306, 1982.
- Cho, S. Y., "A study on fast Algorithm for White-Light interferometry to Semiconductor Inspection," M.Sc. Thesis, Department of Mechanical and Control Engineering, Sunmoon University, 2008.
- Ko, K. W., Ko, K. C., and Kim, J. H., "Pole Height Inspection on LCD Glass via High Speed White Light Interferometry," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 24, No. 4, pp. 21-28, 2007.
- Tian, A., Wang, C., Jiang, Z., Wang, H., and Liu, B., "Study on key algorithm for scanning white-light interferometry," Proc. of the SPIE, Vol. 7155, 2008.
- Cooley, J. W. and Tukey, J. W., "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series," Mathematics of Computation, Vol. 19, No. 90, pp. 297-301, 1965.
- Recknagel, R. J. and Notni, G., "Analysis of white light interferograms using wavelet methods," Optics Communications, Vol. 148, No. 1-3, pp. 122-128, 1998.