

위상잠금 적외선 현미경 관찰법을 이용한 다층구조 칩의 내부결함 위치 분석

Internal Defect Position Analysis of a Multi-Layer Chip Using Lock-in Infrared Microscopy

김선진*, 이계승**, 허환**, 이학선***, 배현철***, 최광성***, 김기석****, 김건희**†

Seon-Jin Kim*, Kye-Sung Lee**, Hwan Hur**, Haksun Lee***, Hyun-Cheol Bae***, Kwang-Seong Choi***, Ghiseok Kim**** and Geon-Hee Kim**†

초 록 현대의 콤팩트 반도체 소자들은 정확한 품질검사를 위해 비파괴, 고분해능의 검사 장비가 요구되고 있다. 검사 장비 중 고분해능 적외선 대물렌즈와 적외선 센서로 구성된 초정밀 열영상 현미경은 반도체 내부의 결함에서 발생하는 국소적 열원의 위치와 깊이 정보를 얻는데 유용하게 활용되고 있다. 본 연구에서는 위상잠금기법이 적용된 적외선열영상 현미경을 이용하여 다층구조로 된 반도체 소자 내부 열원의 위치와 깊이 정보에 대해 분석하였다. 시편은 내부에 3개의 열원을 포함한 TSV(through silicon via technology) 기반 4단 적층구조로서 측정 표면으로부터 열원의 깊이는 240 μm이다. 본 실험에서는 위상잠금기법을 통해 시편 내부 열원의 위치와 깊이를 정확히 찾을 수 있는 초점면 위치, 노출시간 그리고 위상잠금주파수 등 최적의 조건을 찾고 그 조건에서 적외선 대물렌즈와 시편의 거리 변화에 따른 위상 변이와 깊이 정보에 대한 영향을 알아보았다. 이와 같은 반도체 내부결함에 의한 열원의 위치와 깊이 분석에 대한 연구는 품질검사용 열영상 분석 장비 개발에 큰 도움을 줄 것으로 예상된다.

주요용어: 열영상 현미경, 위상잠금기법, TSV, 반도체칩, 열열상분석장비

Abstract An ultra-precise infrared microscope consisting of a high-resolution infrared objective lens and infrared sensors is utilized successfully to obtain location information on the plane and depth of local heat sources causing defects in a semiconductor device. In this study, multi-layer semiconductor chips are analyzed for the positional information of heat sources by using a lock-in infrared microscope. Optimal conditions such as focal position, integration time, current and lock-in frequency for measuring the accurate depth of the heat sources are studied by lock-in thermography. The location indicated by the results of the depth estimate, according to the change in distance between the infrared objective lens and the specimen is analyzed under these optimal conditions.

Keywords: Infrared Microscope, Multi-Layer Semiconductor Chip, Lock-in Thermography

1. 서 론

물체로부터 방사되는 적외선 에너지는 스테판-볼츠만 식에 의해 물체 온도의 4승에 비례하기 때문에 온도에 따라 강한 열적작용으로 나타난

다. 열에 의해 방사된 적외선은 대기에 의한 산란과 흡 작용이 크기 때문에 미약한 신호를 검출하기가 쉽진 않았다. 하지만 최근 적외선 센서의 큰 발전으로 비파괴검사 분야를 중심으로 많은 응용이 이루어지고 있다[1,2]. 특히, 위상잠금 열

[Received: June 1, 2015, Revised: June 23, 2015, Accepted: June 23, 2015] *충남대학교 분석과학기술대학원, **한국기초과학지원연구원 광분석장비개발팀, ***한국전자통신연구원 정보통신부품소재연구소, ****서울대학교 바이오시스템·소재학부 †Corresponding Author: Center for Analytical Instrumentation Development, Korea Basic Science Institute, 169-148, Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea (E-mail: kgh@kbsi.re.kr)

영상 기법은 주위 환경에 의한 잡음 영향을 효과적으로 제거하면서 비파괴적으로 능동의 광열원을 위치 추적해줄 수 있어 반도체 내부결함에 의한 국소적 열원을 찾는 패키지 반도체 검사 장비에 많이 활용된다[3,4].

본 연구에서는 합선, 저항성 불량 등에 의해 국소적 열원을 갖는 다층구조의 반도체 소자들을 위상잠금기법이 도입된 적외선 현미경을 이용해 비파괴적으로 분석한다. 국소적 열원의 평면 위치는 적외선 현미경과 위상잠금 열영상기법에 의해 얻어지는 진폭이미지를 분석하여 알 수 있고 깊이 정보는 위상이미지를 분석한 데이터와 열전파이론에 의해 구해진다. 이렇게 3차원적으로 결함 위치를 예측한 데이터를 바탕으로 투과성이 좋은 X-ray를 이용해 시편 내부를 비파괴적으로 볼 수 있도록 할 계획이다. 이와 같이 연구되는 3차원적 결함 분석 방법은 차세대 반도체 소자 개발에 있어 많은 공정상 문제를 해결하는데 활용될 것이라 예상된다.

2. 위상잠금 열영상 분석기법

위상잠금 열영상 분석기법은 외부에서 시간에 따라 크기와 방향이 주기적으로 변하는 에너지를 시편에 인가하거나 시편 내부에서 주기적인 능동적 광열원을 발생시켜 표면에서 방사되는 연속적인 조화함수를 조사한다. 이 열적신호의 조화함수는 적외선 카메라로 검출하게 되고 동시에 시편에 인가한 주기적인 신호와 비교하여 이미지로 영상처리를 한다.

본 연구에서 사용된 고감도·고분해능 열영상 현미경 통합 시스템에서는 위상잠금 열영상 측정 및 분석기법을 적용하기 위하여 디지털 상관함수를 이용하는 알고리즘을 사용하였다. 디지털 상관함수기법을 적용하는 위상잠금 열영상 출력신호는 다음 식과 같이 정의 할 수 있다.

$$S_{x,y} = c \sum_{i=0}^N K(t) \cdot F_{x,y}(t) dt \tag{1}$$

여기서, N 은 한 이미지에 대한 프레임 수, $K(t)$ 는 실시간으로 계산되는 디지털상관함수이고 $F_{x,y}(t)$ 는 적외선 센서(InSb)의 픽셀(640×512) x,y에 해당하는 측정신호이다. 최종적으로 얻어지는 진폭과 위상은 다음과 같이 결정된다.

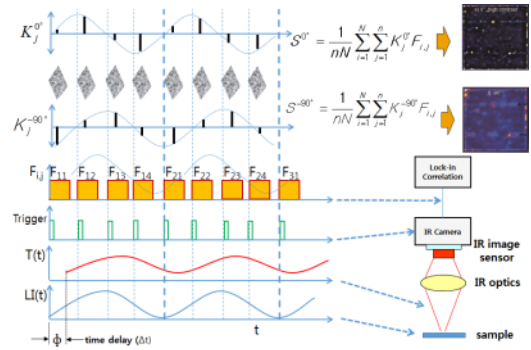


Fig. 1 Schematic flow diagram of lock-in microscopy

$$A = \sqrt{(s^{0^\circ})^2 + (s^{-90^\circ})^2} \tag{2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{s^{-90^\circ}}{s^{0^\circ}} \right) \tag{3}$$

Fig. 1은 위상잠금 열영상 측정 및 분석 방법에 대한 순서도이다.

시편 면에 초점이 맞추어진 적외선 이미지로부터 추출되는 위상이미지에서 각 픽셀(x,y)의 위상 ϕ 값은 시편에 인가된 교류신호의 위상이 시간 $t=0$ 에 위상 0° 초기신호와 비교해 시편 내부에 있는 합선이나 저항성 불량에 의한 열적반응의 적외선 신호가 시간 Δt 만큼 지연되어 출력 검출된 위상변이(phase shift)를 보여준다. 이것은 결함 부위와 시편 표면 사이의 거리가 길수록 위상 ϕ 값은 더 커진다는 뜻이다. 그래서 시편 표면과 시편 내부에서 열을 내는 결함 부위 사이의 거리인 깊이 Z 값은 열전파이론을 이용해 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Z = \phi \times \mu \tag{4}$$

여기서, 위상 ϕ (rad)은 깊이 Z (m)를 거리 비율로 계산하기 위해 라디안 단위를 쓴다. 열확산거리 μ 는 열적변화가 생긴 위치부터 열이 전파되어 온도 변화를 충분히 감지할 수 있는 위치까지 거리로 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\mu = \sqrt{\frac{2\lambda}{C_p \times \rho \times 2\pi f}} \tag{5}$$

여기서, λ 는 열전도율(W/mK), C_p 는 정압비열 용량(J/kgK), ρ 는 물질의 밀도(kg/m³) 그리고 f 는

위상잠금 주파수(Hz)이다. μ 는 f 가 커질수록 짧아지기 때문에 시료 두께에 비해 너무 높으면 위상과 진폭 데이터를 못 얻을 수 있고, μ 는 적당한데 f 가 부족할시 노이즈 대비 충분한 신호값을 못 얻을 수 있으니 실험 시 좋은 데이터를 얻을 수 있는 최적의 위상잠금 주파수를 찾는 것이 중요하다.

3. 실험 방법 및 결과

본 실험에 사용된 시편은 4단 적층의 TSV기반 반도체 소자이며 깊이 240 μm 에 3개의 열원이 존재한다. Fig. 2는 시편의 두께 정보와 열확산거리 μ 를 계산할 때 필요한 물성 정보를 보여준다.

Fig. 3은 시편의 가시광, 적외선 그리고 위상잠금 열영상 분석기법을 통해 얻은 진폭이미지를 각각 보여준다(exposure time = 2 ms, $f = 2$ Hz, FOV: 3.2×2.6 mm). 이 진폭이미지를 분석하면, 시편 표면 XY평면상에서 주기적인 온도 변화가 일어나는 열원의 위치를 찾아낼 수 있다.

3.1. 정확한 깊이 추정을 위한 최적조건 분석

실험에 사용된 시편의 열원의 깊이는 240 μm 로 설계 제작되었기 때문에 조건 변화에 따른 이론상의 위상값은 예측할 수 있다. 그래서 실험상 측정되는 위상값에 영향을 주는 노출시간과 위상잠금 주파수를 변화시켜 이론상의 깊이를 열전과 이론에 따라 정확하게 측정하는 조건을 찾아보았다.

Fig. 4는 1, 2, 3열원에 대해 각각 깊이 추정을 한 자료이다(최적의 f 는 86 - 90 Hz 라는 점을 보여준다.). 이 데이터의 조건은 노출시간 2 ms, 입력 교류전압은 0-15 V(시편 저항은 526 Ω , 전류는 0-28.4 mA), frame rate=100 Hz, total frame number: 2000, waveform type: sinusoidal 그리고 f 는 1~100 Hz로 각 조건당 3번씩 위상값을 반복 측정하여 각 위상잠금 주파수에 해당하는 열확산거리와의 관계를 통해 얻어진 깊이 추정 그래프이다.

측정 위상값은 각 열원마다 진폭이미지에서 제일 진폭이 센 픽셀을 찾고 위상이미지에 그 픽셀을 중심으로 9개 픽셀 영역을 정하여 9개 데이터의 평균(mean)을 구하여 얻어졌다. 높은 해상도의 열 분포 위상이미지를 얻기 위해 적어도 1000

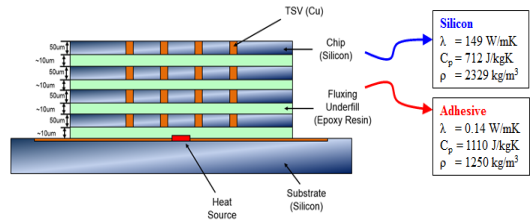


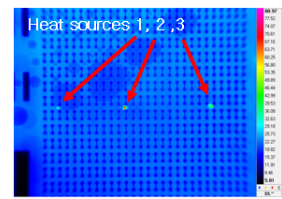
Fig. 2 Thickness and physical property information of a multi-layer chip



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 (a) visible (b) infrared (c) amplitude image

장 이상의 데이터를 누적한다. 많은 데이터를 빠르게 분석하기 위해서는 카메라 프레임 최대속도 100 Hz를 선택한다.

여기서 유의사항이 있다. 100 Hz 프레임 속도로 데이터를 얻을 시 100의 약수인 1, 2, 4, 5, 10, 20, 25, 50, 100 Hz에 해당하는 위상잠금 주파수는 조화함수에 의한 상관기를 이용하는 위상잠금 열영상 분석 시에 배수에 해당하는 위상값을 잘못 누적하여 결과값에 큰 오류를 줄 수 있으므로 100의 약수 해당하는 주파수는 적어도 0.1 Hz 이상 차이를 줘서 측정을 한다.

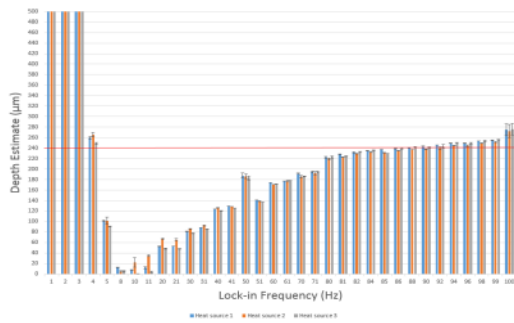


Fig. 4 Depth estimate graph (exposure time = 2 ms)

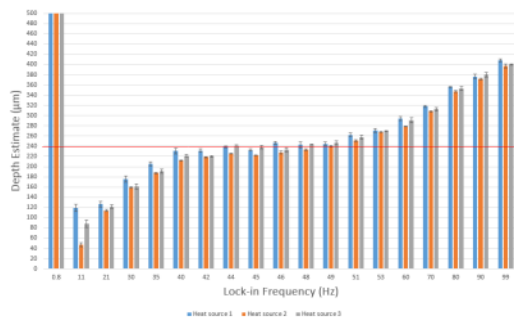


Fig. 5 Depth estimate graph (exposure time = 3 ms, amplitude level = 5 V)

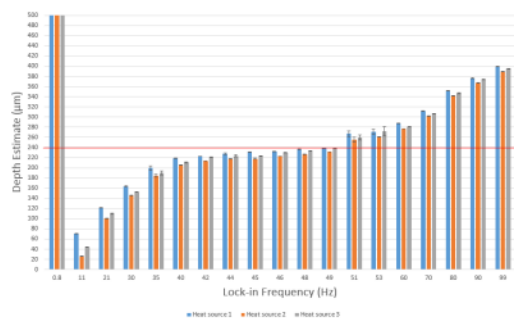


Fig. 6 Depth estimate graph (exposure time = 3 ms, amplitude level = 10 V)

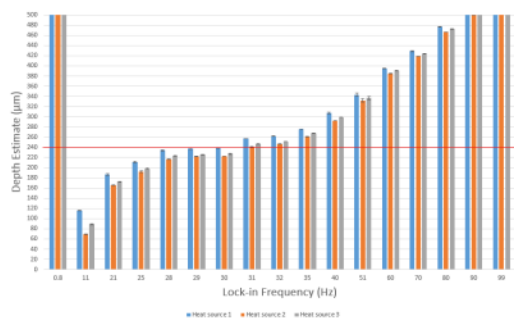


Fig. 7 Depth estimate graph (exposure time = 4 ms)

Fig. 5는 노출시간 3 ms, 입력 교류전압은 0 - 5 V(전류는 0 - 9.5 mA) 나머지 실험조건은 Fig. 4와 같은 조건에서 얻은 깊이 추정 그래프이다. Fig. 6은 Fig. 5 조건에서 입력 교류전압만 다르게 나머지는 같은 조건에서 얻은 깊이 추정 그래프이다. 두 그래프를 비교해보면, 깊이 추정 데이터가 비슷하다(두 개의 그래프 모두 최적의 f 는 48-51 Hz 라는 점을 보여준다).

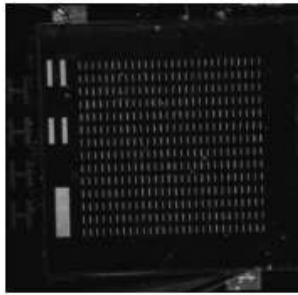
이러한 사실을 봤을 때, 충분한 SNR(signal to noise ratio)을 줄 수 있는 입력 power라면, 깊이 추정 시에 크게 고려하지 않아도 되는 조건이라는 점을 알 수 있다. 실험상 반도체 시편에 큰 무리를 주지 않으면서 좋은 데이터를 얻는 조건은 최대 전류값이 3 mA ~ 30 mA에 해당하는 입력 교류전압값을 선택하면 괜찮다는 점을 알 수 있었다.

Fig. 7은 입력 교류전압은 0 - 10 V, 노출시간은 4 ms, 나머지 조건은 Fig 4, 5, 6과 같은 실험 조건에서 얻은 깊이 추정 그래프이다. 이 그래프에서는 최적의 f 가 29-32 Hz라 보여주고 있다. 전체적으로 Fig 4-7 그래프를 보았을 때 노출시간이 길수록 정확한 깊이 추정을 하는 최적의 f 는 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향을 보았을 때, 노출시간과 f 는 독립적인 관계이지만 정확한 깊이 추정을 위한 최적의 실험조건을 찾을 때 둘의 상관관계를 고려해줘야 한다는 점을 알 수 있다.

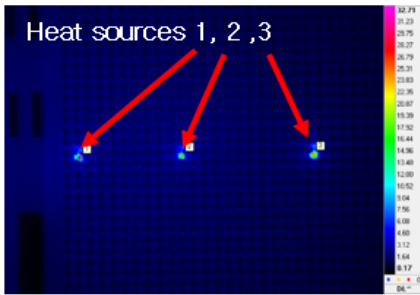
3.2. 정확한 깊이 추정을 위한 최적조건 분석

Fig. 8은 Fig. 4-7에서 보았던 첫 번째 시편과 똑같이 깊이 240 μ m에 3개의 열원이 존재하도록 설계된 두 번째 시편의 가시광선 이미지와 진폭 이미지이다. 첫 번째 시편과 다른 점은 저항이 1.5 k Ω 으로 3배 더 크다. 이렇게 구성 물질은 같고 저항은 다른 두 번째 시편에 대하여 알고자 하는 부분은 첫 번째 시편에서 구했던 최적의 실험조건이 두 번째 시편에서도 적용되는지에 대한 테스트이다.

Fig. 9는 입력 교류전압은 0 - 20 V (전류는 0 - 13.3 mA), 나머지는 Fig. 5, 6 그래프와 같은 실험 조건에서 얻은 깊이 추정 그래프이다. 이 그래프를 보면 Fig. 5, 6에서 얻은 결과와 같이 최적의 f 는 48-51 Hz라는 점을 보여준다. 3번 열원이



(a)



(b)

Fig. 8 (a) visible (b) amplitude image (2nd specimen)

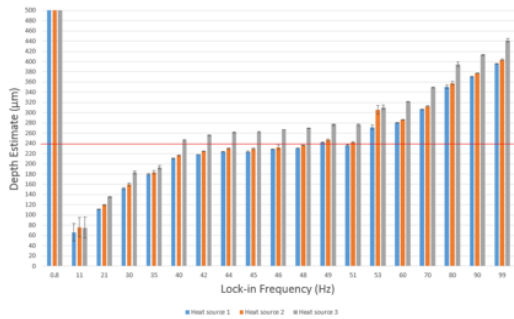


Fig. 9 Depth estimate graph of 2nd specimen (exposure time = 3 ms)

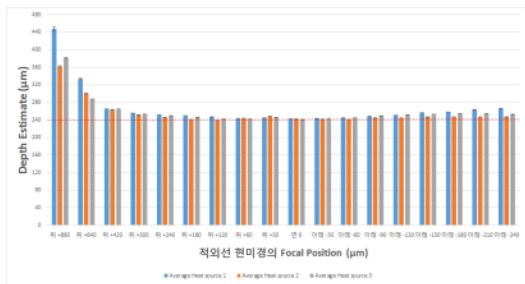


Fig. 10 Depth estimate graph according to the focal plane position of an infrared microscope



Fig. 11 Phase graph according to the focal plane position of an infrared microscope

다른 열원보다는 깊이가 더 깊게 추정되는 원인으로서는 다른 열원들에 비해 열원을 느리게 확산시키는 물질들이 위로 있거나 공정상의 차이로 1, 2번 저항에 비해 크게 되면서 느리게 열원을 발생시키는 것으로 추정된다. 이러한 결과를 봤을 때, 정확한 깊이 추정을 하는 최적의 조건이 있는 시편에 대해서는 구성 물질이 같은 시편에 대해 여러 번의 추가 실험 없이 최적의 측정 조건을 이용해 결함의 위치를 빠르게 추정할 수 있다는 가능성을 보여준다.

3.3. 적외선 현미경의 Focal Position 변경에 따른 깊이 추정 분석

Fig. 10과 Fig. 11은 적외선 현미경의 초점이 시편 면에 맞추어지지 않았을 때 얼마나 깊이 추정에 오류를 주는지 보여주는 위상과 깊이 추정 그래프이다. 이 그래프들은 Fig. 4에서 얻은 최적의 실험조건인 노출시간 2 ms, 위상잠금 주파수는 88 Hz에서 1 μm 단위로 위치 변화를 감지할 수 있는 Z축 인디케이터를 이용해 시편과 적외선 현미경 사이의 거리를 변경하여 측정 위상값과 깊이값의 변화를 보았다. 위상 그래프에서 시편의 표면에 초점이 맞추어진 상태에서 -90 μm 이상 아래로 내리게 되면 1°이상의 오류가 생기게 되었다. 먼 위로는 +240 μm만큼의 거리 변화를 줘야 위상 1°이상 오류를 준다는 점을 알 수 있다. 위상 1°차이는 $f = 88 \text{ Hz}$ 조건에서 깊이 측정에 약 10 μm 오류를 준다. 이러한 차이를 봤을 때, focal position이 면의 위가 아닌 복잡한 구조의 시편 내부에 맞추어지게 된다면 깊이 측정에 더 큰 오류를 줄 수 있다는 사실을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 열원의 진원지가 이미 설계 제작된 4단 적층 TSV기반 반도체 시편을 이용하여 3차원적으로 정확한 결함의 위치를 추정하는 실험조건을 찾았다. 위상잠금 저주파수 (< 3 Hz) 조건에서 얻은 진폭이미지를 통해 시편 표면 평면 상에서 주기적인 온도 변화가 일어나는 열원의 위치를 찾아냈고 그 x,y 좌표에 해당하는 열원 위치에서 Z축에 해당하는 깊이 정보를 추정하였다. 그리고 적외선 현미경의 초점이 시편 면에 맞추어지지 않았을 때, 어느 정도의 깊이 측정 오류를 주는지에 대해서도 알아보았다. 이러한 실험을 통해 첫 번째 시편에 대한 최적의 측정 조건들을 두 번째 시편에도 적용한 결과 정확한 결함 깊이를 추정하는 측정조건이 같게 나온다는 점을 알 수 있었다. 결론적으로 구성 물질이 같은 다른 시편들에 대해 미리 기준시편에 의해 최적의 측정조건을 알고 있다면 여러 번의 측정 없이 빠르게 결함의 위치를 추정할 수 있다는 가능성을 보였다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부 / 국가기술연구회 융합연구사업 그리고 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음 (B551179-12-04-00 & 2014, 연구장비엔지니어양성사업, 2013R1A6A9067028).

참고문헌

- [1] Y. J. Cho, and S. I. Han, "Optimization of lock-in thermography technique using phase image processing," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 26, No. 5, PP. 25-30 (2012)
- [2] Y. J. Cho, "An exploratory study on the optimized test conditions of the lock-in thermography technique," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 31, No. 2, pp. 157-164 (2011)
- [3] C. Schmidt, F. Altmann, R. Schlangen and H. Deslandes, "Non-destructive defect depth determination at fully packaged and stacked die devices using lock-in thermography," 17th IEEE International Symposium on Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA), July 5-9, Singapore, pp. 1-5 (2010)
- [4] R. Schlangen, H. Deslandes, T. Lundquist, C. Schmidt, F. Altmann, K. Yuc, A. Andreasyan and S. Li, "Dynamic lock-in thermography for operation mode-dependent thermally active fault localization," *Microelectronics Reliability*, Vol. 50, pp. 1454-1458 (2010)