creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:48009-200000291949

이학석사학위논문

CCD 카메라를 이용한 마이크론 및 서브마이크론 시 분해 열반사 현미경 시스템 연구

A Study on the Micron and Submicron Time-resolved Thermoreflectance Microscopy System Using CCD Camera

울 산 대 학 교
물 리 학 과
황 보 현

CCD 카메라를 이용한 마이크론 및 서브마이크론 시분해 열반사 현미경 시스템 연구

지도교수 김 석 원

이 논문을 이학석사학위 논문으로 제출함

2019년 11월

울 산 대 학 교
물 리 학 과
황 보 현

황보현의 이학석사학위 논문을 인준함

심사위원 윤 병 국 (인)

심사위원 김 석 원 (인)

심사위원 임 성 현 (인)

울 산 대 학 교

2019년 11월

국 문 요 약

CCD 카메라를 이용한 마이크론 및 서브마이크론 시분해 열반사 현미경 시스템 연구

울 산 대 학 교 대 학 원
물 리 학 과
황 보 현

최근 반도체 생산기술의 진보와 함께 낮아진 소자의 선폭은 높은 집적율과 함께 소자의 발열을 가져왔다. 소자의 발열은 소자 자체의 신뢰성 및 성능의 하락의 원인이 되기에 현대 반도체 소자 설계에서 가장 중요한 요소 중 하나가 소자의 열관리이다. 그렇기에 비접촉 및 비파괴 마이크론 이하의 공간분해능을 가지는 열분석 시스템의 필요성을 커져왔으며, 여러 종류의 온도 분포 측정 장치들이 개발되어왔다.

열반사 현미경 (thermoreflectance microscope)은 비접촉식 비파괴 방법으로 시료의 온도측정이 가능하며, 중적외선 열화상 (Infrared thermography)에 비해 높은 공간분해능을 (0.3-0.5 μm) 가진다. 이러한 열반사 현미경은 열반사계수가 매우 작기에 lock-in detection을 이용한 측정방법이 일반적이지만 이러한 측정은 정상상태 측정에 제한적이다. 그러나 실제 소자 온도 분석 중 시분해 측정이 필요한 경우가 있다.

본 연구에서는 시분해 열반사 현미경 개발 및 연구를 진행하였다 개발된 시스템의 동작 확인을 위해 제작한 직사각형, 나비넥타이 두 가지 형태의 Poly-Si 마이크로저항소자를 제작하였다. 직사각형 저항소자에서는 바이어스를 가한 후 240 μs에서 9.36 ℃로 온도가 가장 높게 측정되었으며, bias off 후 소자의 열적 완화시간이 35 μs로 측정되었다. 나비넥타이 저항에서는 반사율을 통해 Si 층으로 확산되는 열확산길이를 측정하였다. 10, 30, 50 μs 동안 열은 각각 6, 21, 32 μm 까지 퍼져나가는걸 확인할 수 있었다. 이를 통해 소자 및 집적회로(ICs) 등에 열관리 및 패키지 개발에 필요한 다양한 시분해 온도 분포 및 열확산분석 응용될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

차 례

Ⅰ. 서론 ····· 1

Ⅱ. 이론 ····· 2

1. 광학 현미경
2. 줄 발열
3. 반도체에서의 열반사

Ⅲ. 실험 ····· 8

1. 장치도
2. CCD(Charge Coupled Device)를 이용한 온도분포 측정
3. 시료 제작
4. Poly-Si 마이크로저항의 열반사 계수 측정

Ⅳ. 결과 ····· 24

1. Poly-Si Rectangle Microresistor
2. Poly-Si Bow-Tie Microresistor

Ⅴ. 결론 ····· 31

Ⅵ. 참고문헌 ····· 32

그림 차례

그림 1. 펄스전압이 가해지는 소자에서의 줄-발열 ····· 4

그림 2. 굴절률과 반사율의 관계 ····· 6

그림 3. 반도체에서의 열반사 ····· 7

그림 4. 시분해 열반사 현미경 장치도 ····· 10

그림 5. 시분해 열반사 현미경 Labview 소프트웨어 ····· 11

그림 6. LED 펄스광 파형과 변조 ····· 12

그림 7. 열반사 이미지 측정 개념도 ····· 14

그림 8. 펄스광 지연시간 τ=0일 때 전기적 변조 신호 ····· 15

그림 9. 펄스광 지연시간 τ≠0일 때 전기적 변조 신호 ····· 16

그림 10. 그림 10. Poly-Si 마이크로저항의 평면도와 측면도 ····· 18

그림 11. 열반사계수 측정 개념도 ····· 22

그림 12. 측정된 Poly-Si 마이크로저항의 열반사계수 ····· 23

그림 13.Poly-Si Microresistor의 광학 및 열반사 이미지 ····· 25

그림 14. 펄스 바이어스 신호가 인가된 이후의 사각형 Poly-Si 마이크로저항 중심에서의 시간에 따른 반사율 변화 및 온도 변화그래프 ····· 26

그림 15. 그림 15. 사각형 Poly-Si 마이크로저항에서의 바이어스 off 후 반사율 변화를 이용한 소자의 열적 완화시간 그래프 ····· 27

그림 16. 나비넥타이 Poly-Si 저항에서의 광학 및 열반사 이미지 ····· 29

그림 17. 소자에서 발생된 열의 Si 기판 표면에서 확산 그래프 ····· 30

표 차례

표 1. Rectangle Poly-Silicon Microresistor의 저항 ····· 19

표 2. Bow-tie Poly-Silicon Microresistor의 저항 ····· 20

Ⅰ. 서론

최근 반도체 생산기술의 진보와 함께 좁아진 소자의 선폭은 높은 집적율과 함께 소자의 발열을 가져왔다. 소자의 발열은 소자 자체의 신뢰성 및 성능 하락의 원인이 되기에 현대 반도체 소자 설계에서 가장 중요한 요소 중 하나는 소자의 열관리이다[1,2].

따라서 비접촉 및 비파괴 방식의 마이크론 이하의 공간분해능을 가지는 열분석 시스템의 필요성을 커져왔으며, 여러 종류의 열분석 장치들이 개발되었다. 대표적으로 scanning thermal microscopy (SThM), liquid crystal thermography (LCT), flourescence micro-thermography (FMT), Infrared thermography (IRT) 그리고 thermoreflectance microscopy (TRM)가 있다[3-8]. 이 중 반도체 산업에서 가장 많이 사용되는 측정방법은 IRT이다. 그러나 적외선 카메라의 공간분해능이 3 μm로 현대의 소자의 온도 분포 측정에는 제한적이다. TRM은 비접촉식 비파괴 방법으로서 IRT에 비해 높은 공간분해능을 (0.3-0.5 μm) 가지므로 보다 정밀한 소자의 온도분포 측정이 가능하다[9].

그러나 현재까지 개발된 대다수의 열반사 현미경은 준정적 상태에서의 온도 분포 측정만이 가능하다는 제한점을 가지고 있으며, 최근 소자의 미세화에 어려움이 많아 반도체 패키지를 통한 효율적인 열배출을 통해 소자 성능 개선 관련 연구들이 진행되면서 시분해 소자 온도 분포 측정 기술에 대한 필요성이 높아지고 있다[10].

본 연구에서는 시분해 열반사 현미경을 하드웨어, 소프트웨어를 자체 개발하여 Poly-Si 마이크로저항소자에서의 시분해 온도 분포 측정 및 열확산분석을 진행하였다. 시료는 총 2가지 형태로 제작하였으며 직사각형 및 나비넥타이 형태의 저항들을 사용하였다. 직사각형 저항에서는 특정 조건에서 시료의 시분해 온도 분포가 어떻게 변화하는지 측정하였고, 나비넥타이에서는 발생된 열이 기판을 통해 어떻게 확산되는지에 대해 분석하였다.

Ⅱ. 이론

2.1 광학 현미경

사람의 눈으로 미시세계를 바라보는 것은 한계가 있다. 1500년 스위스의 의사 Conrad Gessner에 의해 최초의 확대경이 만들어졌으며[11], 1660년 경 Antonie van Leeuwenhoek에 의해 최초의 현미경이 만들어졌다[12]. 이후 1882년부터 Karl Zeiss에 의해 렌즈 가공 기술이 개발되면서 현미경이 볼 수 있는 영역은 확장되어왔다[13]. 현미경의 대물렌즈는 5-15개 정도의 렌즈를 조립해 제작되며 각 각의 렌즈의 중심이 일치하여야 올바른 상이 맺힌다. 이론적인 현미경의 최대 배율은 3000배정도지만 실제 측정에서는 회절 및 수차로 인해 2000배 이상에서 정교한 측정이 불가능하다[14]. 일반적인 현미경에서의 공간분해능은 다음과 같이 표현한다.

$$\text{공간분해능}(Spatial\ resolution) = \frac{0.61\lambda}{NA} \tag{1.1}$$

λ는 탐침광원 파장, NA는 개구수이다. 이를 통해 이론적인 공간분해능은 탐침광원의 파장과 대물렌즈의 개구수(NA)에 의해 결정되어짐을 알 수 있다.

2.2 줄-발열

1840년 James Proescott Joule에 의해 저항이 있는 시료에 전류가 흐르면 열이 발생 될 수 있음이 처음 발표되었으며, 1842년 Herinrich Lenz에 의해 옴 발열이 연구되었다[11]. 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Q = \int I^2(t) R\, dt \tag{2.1}$$

Q는 열량, I는 전류, R은 저항 t는 전류가 흐르는 시간이다. 이를 통해 저항 있는 시료에서의 발열은 소자에 흐르는 전류와 시간 그리고 저항에 의해 결정됨을 알 수 있다. 그림 1는 순간적인 펄스 전압이 가해지는 소자에서의 줄-발열의 개략도이며, 전압이 가해진 후 전류가 급격히 상승하는 것을 알 수 있으며 이후 더 이상 전압이 가해지지 않을 때 소자의 전류가 급격히 감소한다. 따라서 발열도 전류와 같이 전압이 가해질 때 급격히 상승하다 전압이 더 이상 가해지지 않을 때 온도가 급감할 것이라는 것을 예측할 수 있다.

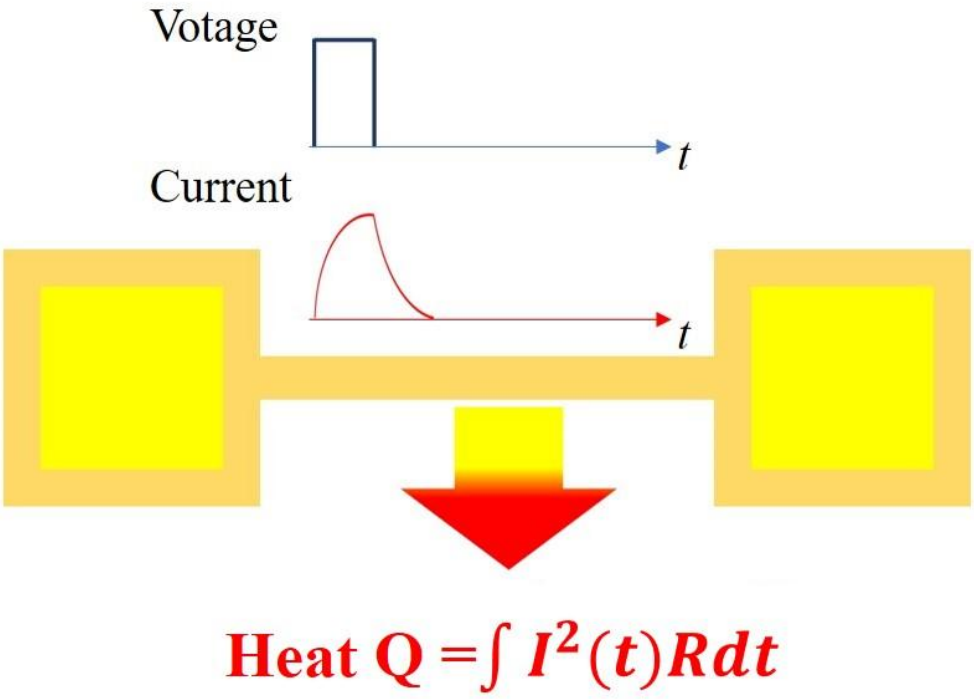


그림 1. 펄스전압이 가해지는 소자에서의 줄-발열

2.3 반도체에서의 열반사

반도체의 온도가 변화하면 격자상수 변화와 전자-포논 상화작용으로 인해 밴드 갭과 유전율이 달라진다[12]. 이러한 유전율의 변화는 시료의 반사율에 변화를 초래한다[13]. 일반적으로 비자성물질 및 흡수가 없는 물질에서 굴절률 및 반사율은 다음과 같이 표현된다.

$$n(T) = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon(T)}} \tag{2.1}$$

$$R(T) = \frac{[n(T)-1]^2}{[n(T)+1]^2} \tag{2.2}$$

n은 굴절률, ε는 유전율, T는 온도 R은 수직입사의 경우 반사율을 나타낸다. 그림 2는 굴절률과 반사율의 관계를 나타내고 있으며 국소적으로는 굴절률과 반사율의 관계는 선형적인 것을 알 수 있다. 위에서 언급한 것과 같이 유전율은 온도 변화에 따라 달라지며 결과적으로 온도에 변화에 의해 굴절률 및 반사율 변화가 생기게 된다. 이를 이용해 온도 변화를 측정할 수 있다[14].

$$\frac{\triangle R}{R} = \kappa \triangle T = (\frac{1}{R}\frac{\partial R}{\partial T})\triangle T \tag{2.3}$$

R과 T는 반사율과 시료 표면의 온도를 나타내며 κ는 열반사계수이다. 이를 통해 온도 변화와 반사율 변화 사이에는 선형적이라는 것을 알 수 있다. 그림 3은 온도 변화에 따라 달라지는 반사광을 표현하는 개략도이며 본 연구에서 사용될 프로브 광원(중심파장 : 632 nm 광원)에서는 대부분의 반도체 물질은 온도가 높아지면 시료의 반사율이 감소하게 된다.

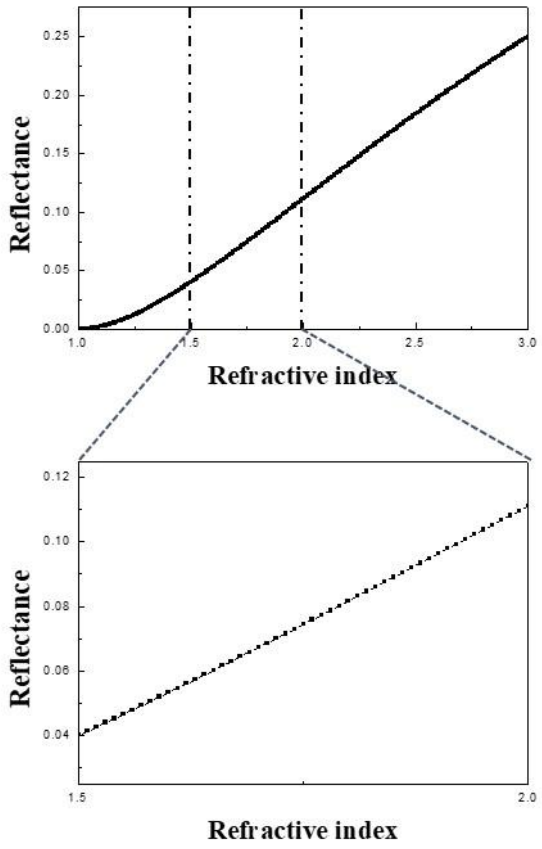


그림 2. 굴절율과 반사율의 관계

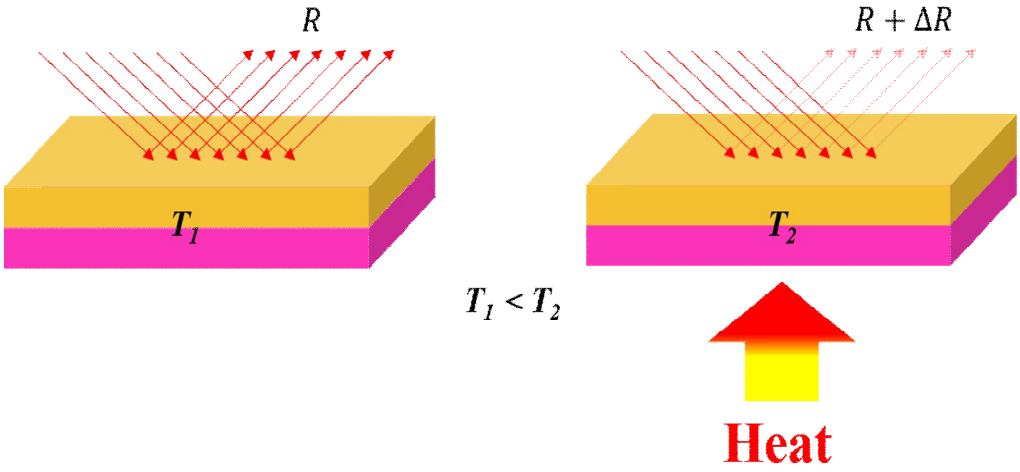


그림 3. 632 nm 파장을 이용한 반도체에서의 열반사

Ⅲ. 실험

3.1 실험장치

본 연구에서 구성한 열반사 현미경 장치도는 그림 4와 같다. 정확한 시분해 이미지 측정을 위한 필수적인 요소는 각 장비간의 동기화이다. 각 장비들이 동기화가 안 될 경우 정확한 시분해 측정이 불가능하다. 우선 함수 발생기와 CCD 카메라 (PCO-1600) 동작을 동기화시키기 위해 DAQ-Board (NI PCIe-6353)를 사용하여 동기화된 트리거 신호를 발생시켰다. DAQ-Board에서 발생된 트리거 신호가 함수발생기 (Tektronix AFG-3022B)에 인가되면 동기화된 LED 펄스광의 트리거 신호와 바이어스 신호가 출력된다. DAQ-Board와 함수 발생기의 연결을 위해 BNC-Block (NI BNC-2110)을 사용하였으며, 프로브(probe) 광원으로 사용한 LED (중심파장 : 632 nm)의 펄스광의 동작을 위해 전류발생원(Gardasoft-RT200)을 사용하였다. 이렇게 발생된 펄스광은 광분배기에서 반사되어 대물렌즈를 지나 시료에 입사된다. 입사광은 시료에서 반사되어 대물렌즈 및 광분배기를 지나 CCD 카메라에 도착하여 이미지를 형성한다. 마지막으로 함수발생기에서 발생되는 바이어스 전압의 최대 출력전압(±8V)이 제한적이기에 전압 증폭기 (Accel Instruments-TS200)를 이용하여 동작전압이 높은 소자에 인가되는 바이어스 전압을 증폭시킬 수 있다. 동기화된 3개의 신호(LED 펄스광, 바이어스 그리고 CCD 동작)는 동시에 동작을 시작하여 측정이 끝날 때 동시에 동작이 멈춘다.

그림 5은 장비를 조정하기 위한 Labview 프로그램이며 함수 발생기부, CCD 부, DAQ 보드부, 이미지 획득 및 처리부, 총 4부로 나누어져있다.

마지막으로 프로그램에서 설정한 조건이 정확하게 출력되는지를 확인을 위해 시료 스테이지에서 광검출기(Thorlabs-DET02AFC)를 이용하여 펄스광 트레인 출력 및 형태와 시분해 측정에 필요로 하는 바이어스 전압과 펄스광 사이의 지연시간이 정상적으로 동작하는지 확인하였다. 그림 6는 함수발생기에서 트리거 신호가 LED에 인가될 때 발생되는 펄스광 트레인 및 선폭을 확인하기 위해 측정한 그래프들이다. 그림 6의 A, B를 통해 함수발생기로 입력한 트리거 신호와 같은 조건((주파수 : 1 kHz, 사용률 : 1%[펄스폭 : 10 μs])을 가지는 펄스광 트레인을 출력되는 것을 확인하였다. C는 시

분해 열반사 이미지를 얻기 위한 펄스광과 바이어스 전압 사이의 지연이 정상 동작하는지 확인을 위해서 측정한 그래프이다. 여러 개의 펄스광들이 존재하는 것을 알 수 있는데, 이는 펄스광과 지연시간을 달리한 펄스광들이며 이를 통해 프로그램에서 입력한 지연시간이 정상적으로 동작하는 것을 확인할 수 있었다.

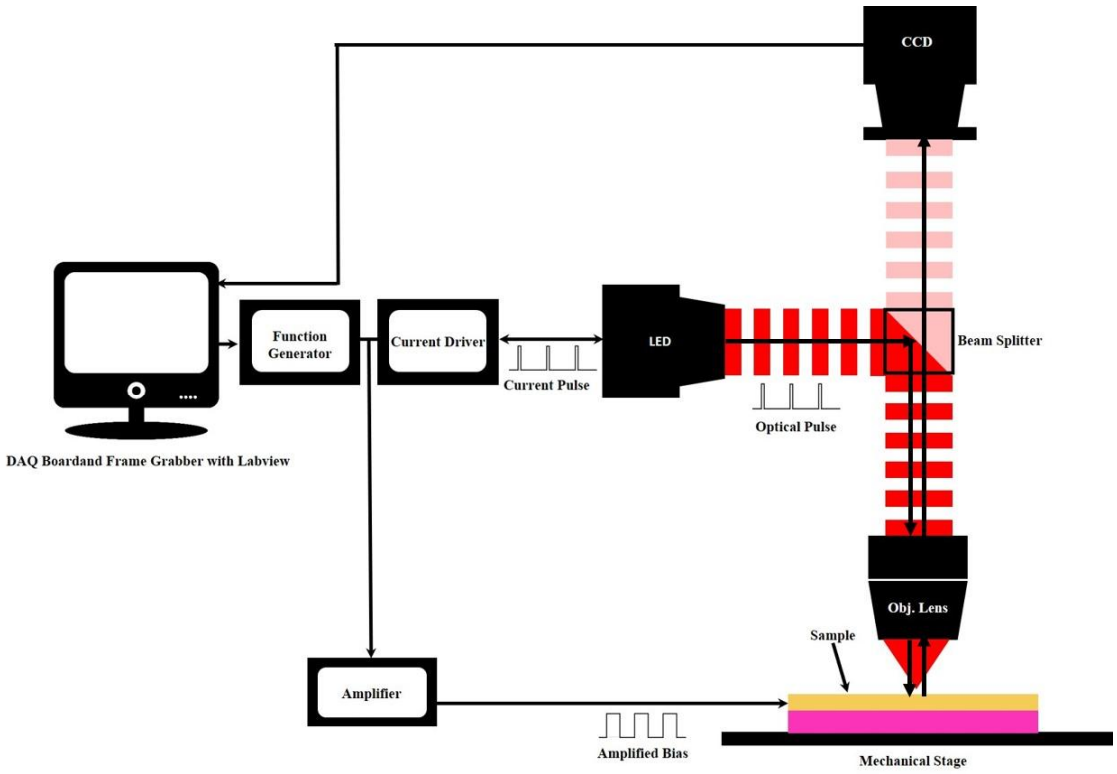


그림 4. 시분해 열반사 현미경 장치도.

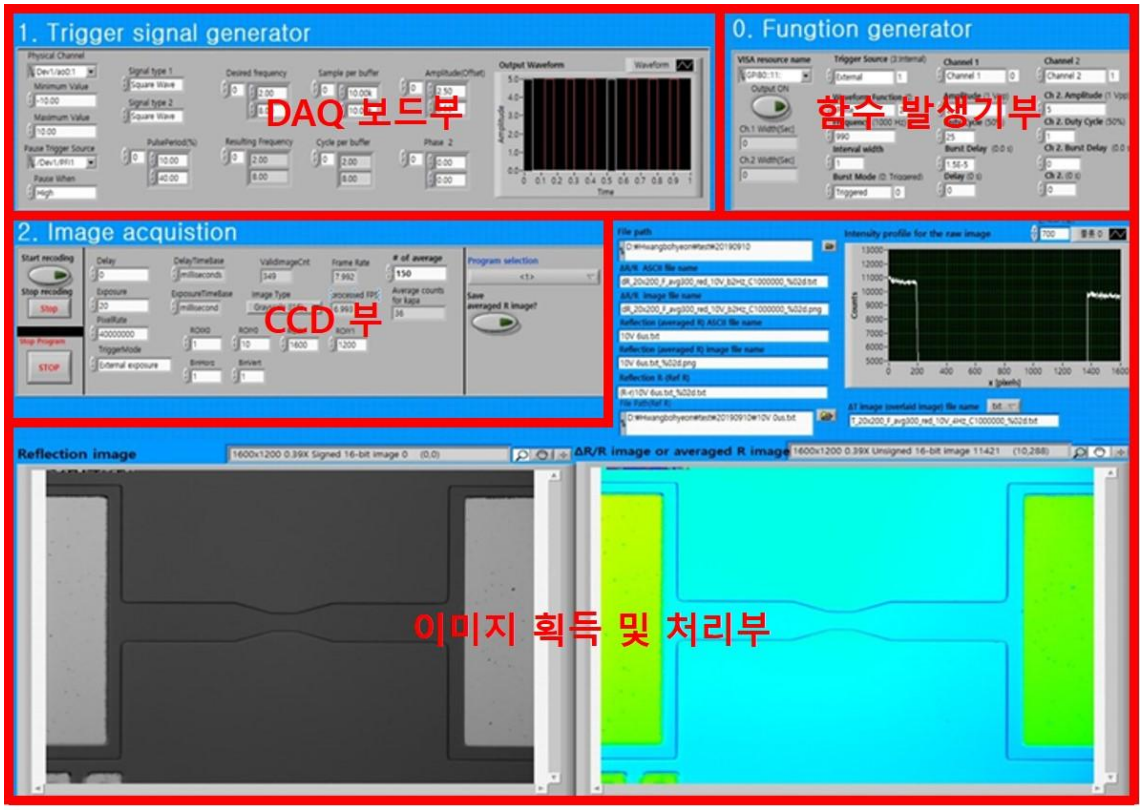


그림 5. 시분해 열반사 현미경 Labview 소프트웨어

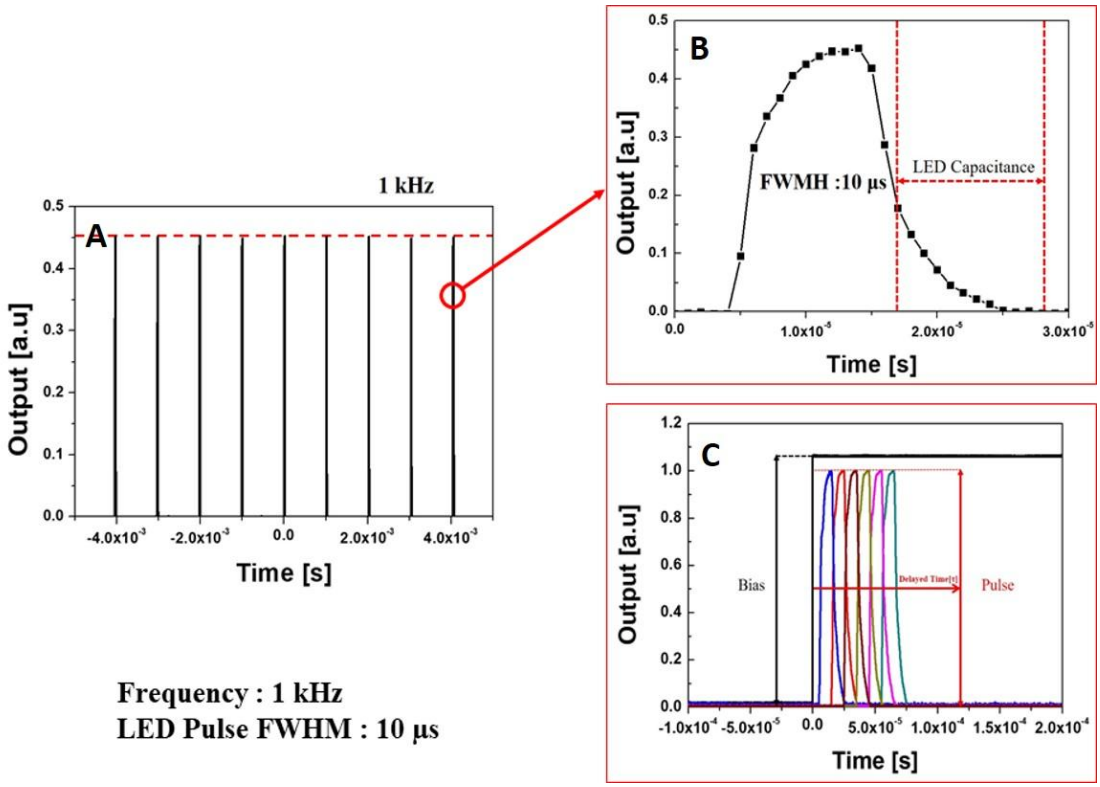
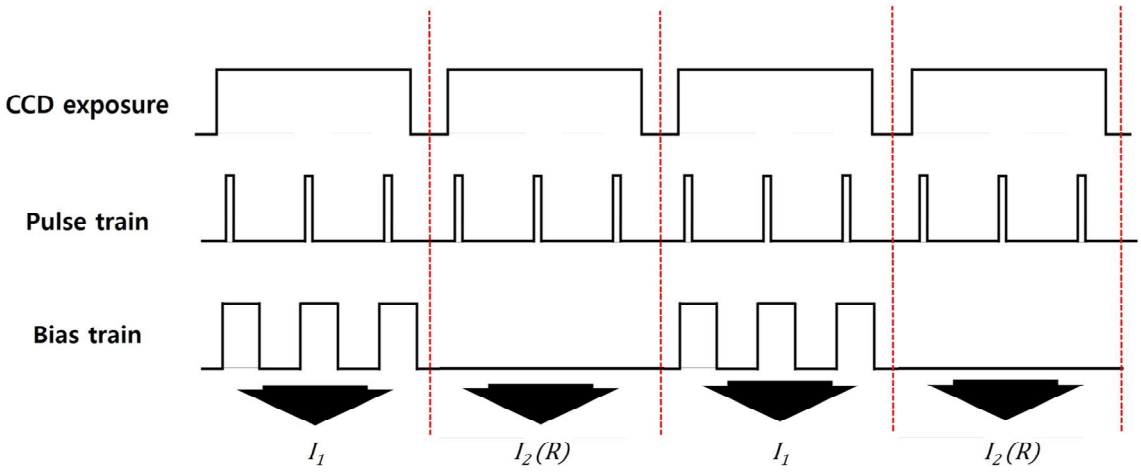


그림 6. LED 펄스광 파형과 지연시간 변조 A. 펄스광 트레인 B. 펄스광의 형태 C. 바이어스 전압과 펄스광 사이의 지연

3.2 CCD(Charge Coupled Device)를 이용한 온도분포 측정

본 연구에서 개발된 열반사 현미경의 측정 개념도는 그림 7과 같다. 발열을 야기하기 위한 바이어스 전압 트레인과 탐침을 위한 펄스광 트레인은 동기화되어있다. 펄스광이 시료에 입사되면 시료 표면에서 반사된 광이 CCD 카메라의 모여 이미지를 형성하는데, 열반사 이미지는 시료에 바이어스가 인가되었을 때 CCD 카메라의 노출시간동안 얻은 이미지 "I_1"과 바이어스가 인가되지 않았을 때 CCD 카메라의 노출시간동안 얻은 이미지(R) "I_2"와의 차이에 의해 얻을 수 있다. 이러한 차이는 바이어스 전압에 의해 온도가 높아진 시료의 반사율 변화($\triangle R$)에 의한 것이며 이를 이용해 열반사 이미지를 얻게 된다.

그림 8은 지연시간이 $\tau=0$ 일 때 장치의 전기적 구동라인이며 그림 9은 지연시간 $\tau \neq 0$일 때 장치의 전기적 구동라인이다. 우선 그림 8을 보면 펄스광이 입사될 때 시료의 온도구간 상승 구간은 시료에 바이어스 전압이 인가된 바로 직후이다. 이때는 상대적으로 온도가 높지 않아 CCD 카메라의 모여지는 반사광 세기 변화가 크지 않지만 그림 9와 같이 바이어스 전압이 인가되고 시간이 지난 경우의 펄스광이 입사되게 되면 반사광의 변화가 인가된 직후보다 상대적으로 크다. 이를 이용하여 본 연구에서 개발된 시스템을 이용하여 소자의 시분해 온도 분포 측정이 가능해지며 소자 주변의 열에 의한 반사율 변화를 이용하여 열확산분석에도 사용할 수 있다.



$$\frac{\Delta R(x,y)}{R(x.y)} = \kappa \cdot \Delta T = \frac{I_1 - I_2}{I_2}$$

그림 7. 열반사 이미지 측정 개념도

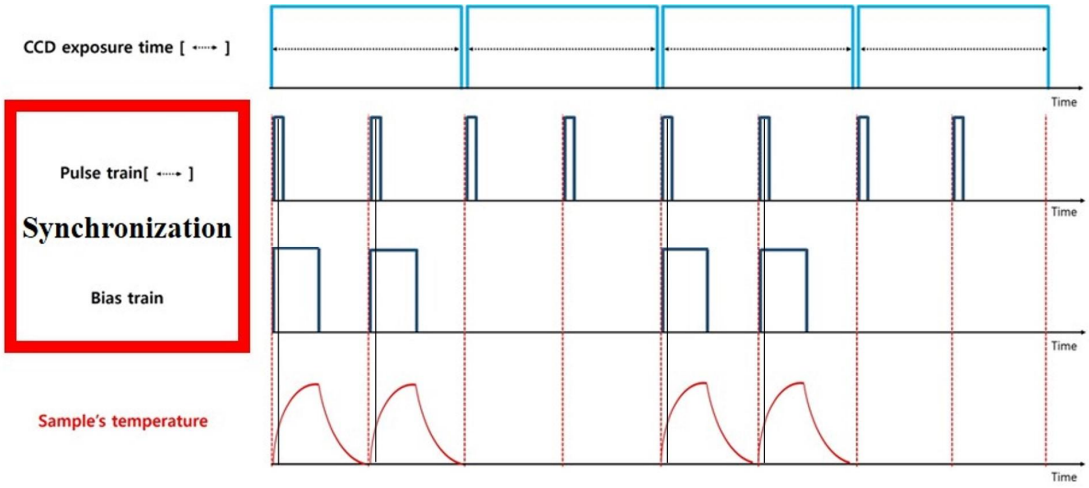


그림 8. 펄스광 지연시간 τ=0일 때 전기적 변조 신호

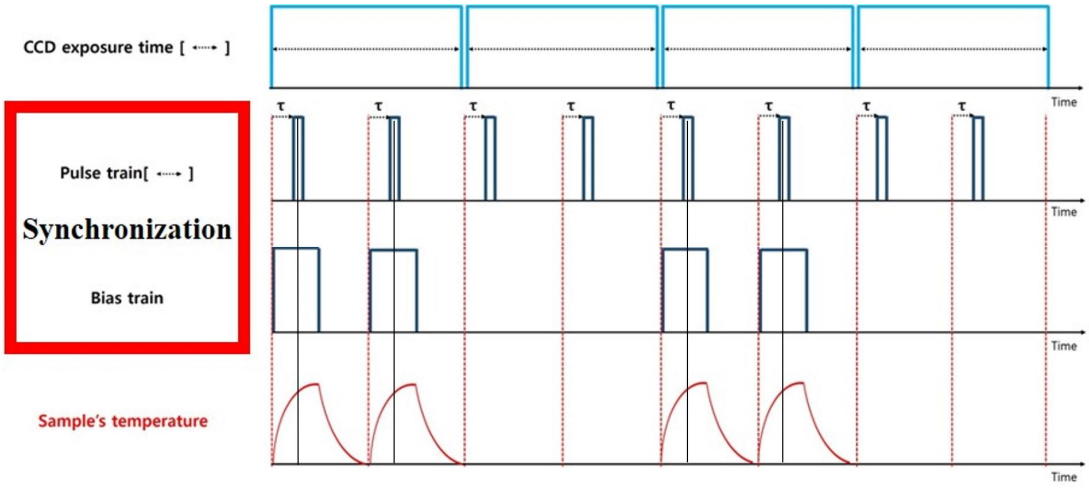


그림 9. 펄스광 지연시간 τ≠0일 때 전기적 변조 신호

3.3 시료 제작

본 연구에서 개발된 열반사 현미경의 작동 및 열확산 분석 가능성을 확인하기 위해 시료를 제작하였다. 시료의 조건에는 쉽게 제작이 가능하고 전압이 가해지면 충분한 발열이 나야하는 시료이어야 하므로 위의 조건에 맞는 물질을 선정하였다. 선정된 물질은 Poly-Si이며 이를 이용하여 마이크로저항소자를 제작하였다. 제작은 대전 나노종합기술원에 의뢰하였다. 만약 소자의 너무 저항이 높아 전류가 안 흐를 경우를 대비하여 N-type을 도핑하여 제작하였다. 시료의 기판은 Si Wafer를 사용하였는데 기판과 시료 사이의 절연층 생성이 쉬워서 선택하였다. Cr/Au 층은 시료에 전압을 가할 때 사용하는 금속탐침(EB-050VR)에 의한 소자 손상을 최소화하기 위해 쌓았다. 시료의 모양은 직사각형 및 나비넥타이 형태로 제작하였다. 표 1은 직사각형 마이크로저항소자의 길이와 선폭을 달리하여 제작한 시료의 저항표이다. 직사각형 저항소자는 시료의 길이가 길어질수록 저항이 커지며 선폭이 커질수록 저항이 감소하는 걸 확인할 수 있다. 표 2는 나비넥타이 저항소자의 저항이며 소자 가운데의 발열원이 커질수록 저항이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

본 실험에서는 그림 10의 마이크로저항소자을 사용하여 실험을 진행하였다. 두 시료의 가장 큰 차이는 SiO_2 층의 유무이다. SiO_2는 절연체이기에 시료의 열확산을 최소화하여 소자에서 온도를 상승시키는 요소가 되며 반사율이 크게 변해서 선명한 열반사 이미지 얻을 것이라 예상하였다. 나비넥타이 저항소자의 경우 SiO_2 층이 없는데 소자 발생된 열이 Si 기판을 통해 쉽게 확산이 되기에 연속적인 온도 분포 측정을 통해 열확산 분석이 가능할 것이라 예상하여 제작하였다.

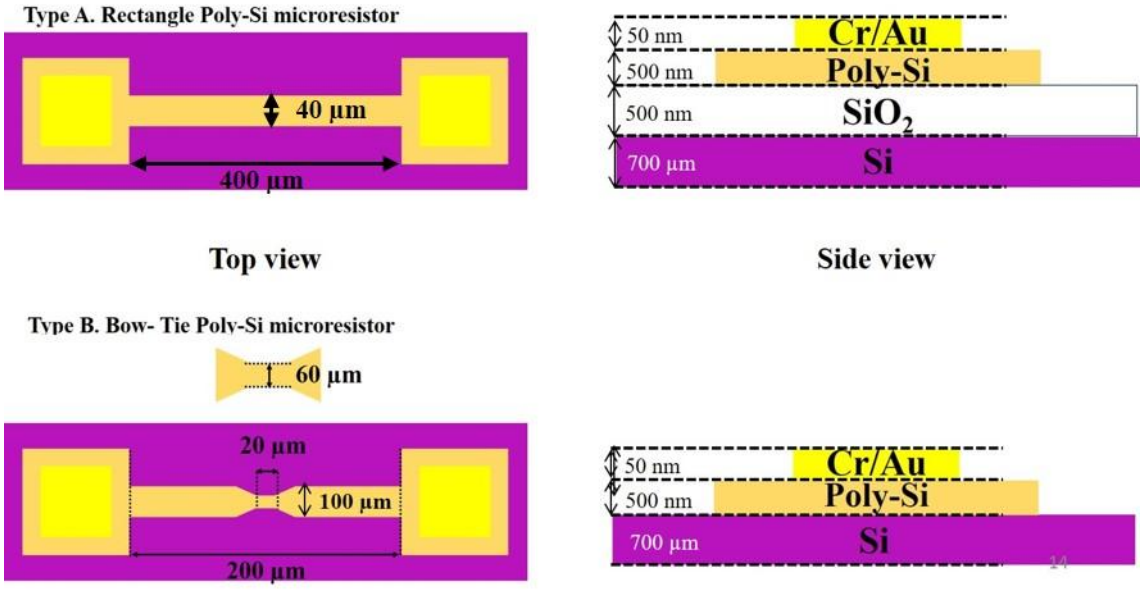
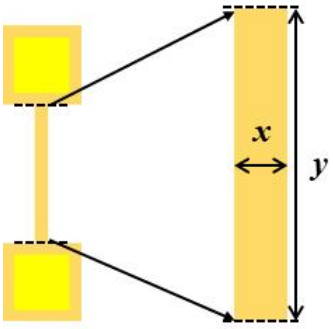
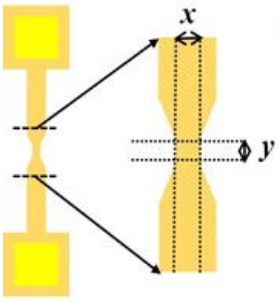


그림 10. Poly-Si 마이크로저항소자의 평면도와 측면도



x \ y	200 [Ω]	300 [Ω]	400 [Ω]	500 [Ω]
10	1630	2330	3110	3720
20	980	1300	1540	1880
30	720	1000	1130	1390
40	650	790	970	110
50	600	666	840	950

표 1. 사각형 Poly-Si 마이크로저항소자의 저항



y(μm) / x(μm)	5 [Ω]	10 [Ω]	15 [Ω]	20 [Ω]
30	702	650	634	632
40	733	660	623	640
50	774	630	585	508
60	797	664	600	507

표 2. 나비넥타이 Poly-Si 마이크로저항소자의 저항

3.4 Poly-Si의 열반사 계수 측정

열반사를 이용한 온도 분포 측정은 아무런 정보가 없는 시료의 온도 분포를 측정할 경우 온도 측정 전에 열반사계수(κ) 측정이 선행되어야 한다. 열반사계수는 시료의 온도가 1 ℃ 오를 때 달라지는 반사율 변화를 나타내며 시료의 물질, 프로브 광원의 입사각, 프로브 광원의 파장 등에 영향을 받는다.

본 연구에서는 LED(중심파장: 632 nm) 펄스광과 20×의 대물렌즈를 이용한 열반사 현미경 시스템에서 Poly-Si 마이크로저항소자의 열반사계수를 측정하였다. 그림 11은 열반사계수 측정개념도이다. 열반사계수를 측정하고자 하는 시료의 온도를 올려주기 위해 열전소자를 사용하였다. 열전소자와 측정 소자 간 의 열저항을 최소화하기 위해 구리판을 붙이고 그 밑에 열전소자를 붙인다. 마지막으로 시료의 온도 측정을 위해 시료에 열전쌍을 붙인다. 이후 프로브 광을 대물렌즈를 통해 입사시키고 이에 반사되는 광을 CCD 카메라로 측정한다. 이 상황에서 열전소자를 이용하여 소자의 온도를 상승시키며 달라지는 반사광을 측정한다. 열전쌍에서 측정되는 온도와 CCD 카메라에서 측정되는 반사광 세기를 이용하면 시료의 열반사계수 계산할 수 있다. 그림 12는 소자의 온도 변화에 따른 반사율 변화 그래프이며, 그래프의 기울기가 열반사계수가 된다. 온도가 상승될 때 시료의 반사율이 감소하는 것을 알 수 있는데 632 nm 광원을 이용하였을 때 Poly-Si의 열반사계수는 음수임을 알 수 있으며 계산 된 Poly-Si의 열반사계수는 -0.03281 $℃^{-1}$이다. 이를 이용하면 소자의 반사율 변화를 온도 변화로 변환할 수 있다.

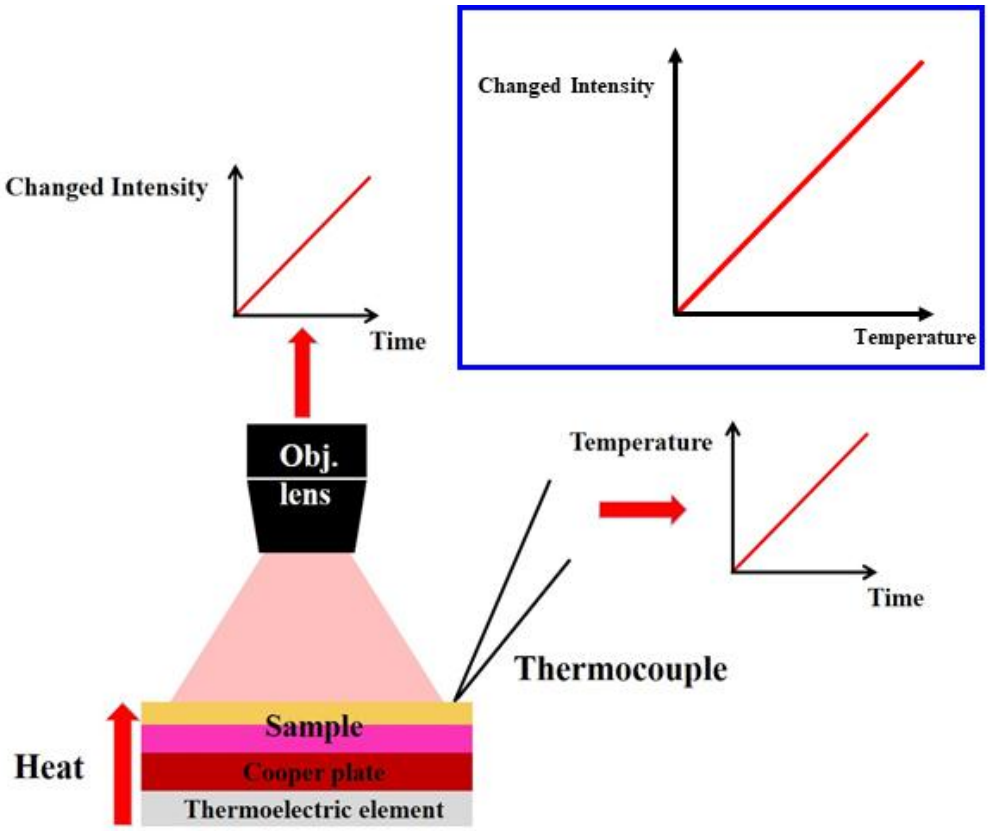


그림 11. 열반사계수 측정 개념도

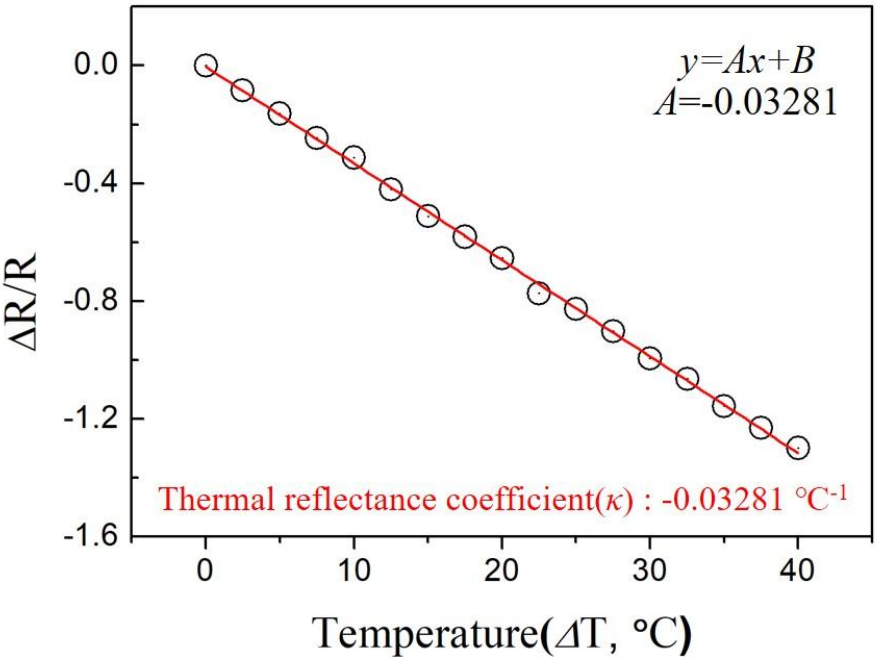


그림 12. 측정된 Poly-Si의 열반사계수

Ⅳ. 결과

4.1 Poly-Si 직사각형 마이크로저항소자

Poly-Si 직사각형 마이크로저항소자의 온도 분포 측정에 앞서 바이어스와 펄스광의 조건을 조절해가며 저항소자의 발열 측정에 최적조건을 확인하였다. 대물렌즈 배율 20×(NA : 0.14), 카메라 렌즈 1×, 바이어스는 20 V, 바이어스 전압과 펄스광의 주파수는 1 kHz로 조절하였다. 바어어스 및 펄스광의 펄스폭는 각각 240 μs, 10 μs로 조절하여 시간에 따라 달라지는 소자의 온도 분포 이미지를 얻었다. 얻은 이미지들은 각 200장씩 얻어 평균하였다. 그림 13은 지연시간을 0-300 μs까지 조정하면서 얻은 광학이미지와 열반사 이미지다. 광학 이미지에서는 온도에 의한 이미지 차이를 발견할 수 없었지만 열반사 이미지에서는 명확한 열화상 이미지를 얻을 수 있었다. 그림 14는 소자 중앙에서의 50×50 pixel들의 평균 반사율 변화 및 온도 그래프이며 앞에서 측정된 앞에서 측정한 열반사계수 값을 이용하여 반사율 그래프를 온도 그래프로 변환하였다. 이를 통해 소자에 바이어스 전압을 인가하면 온도가 계속 상승하다가 바이어스 전압 off 직전에 9.36 ℃로 가장 높게 측정되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 온도 상승과 하강은 소자에 인가되는 전압에 의해 전류가 생성되면서 소자의 온도를 높이게 되는데 bias off 직전까지 계속 소자의 온도가 상승하다가 더 이상 전압이 가해지지 않으면 더 이상 전류가 흐르지 않아 온도가 감소하게 된다. 그림 15는 마이크로 저항에서의 바이어스 전압 off 후 반사율 변화를 이용한 소자의 열적 완화시간 측정하였다. 20 V가 인가된 Poly-Si 마이크로저항소자의 완화시간은 35 μs임을 확인할 수 있다. 완화시간 측정은 소자의 시분해 온도 분포 측정에 선행되어야 할 사항이다. 만약 소자의 완화시간 보다 짧은 시간에 다시 바이어스 전압이 가해지게 되면 시료는 충분히 열적 평형상태에 도달 못하였기에 시료의 온도는 주변온도 보다 높아진다. 이렇게 되면 잔열에 의한 시료의 열반사 신호는 계속 증가하게 되며 결과적으로 시료 온도 분포 측정에 오류가 된다. 본 연구에서는 완화시간 보다 충분히 긴 시간(1 ms) 뒤에 다시 바이어스 전압을 가했기에 정확한 소자의 온도 분포 측정이 가능했다. 이를 응용하면 전압이 인가되는 다양한 소자의 시분해 온도 분포 및 열적 완화시간 측정이 가능할 것으로 예상된다.

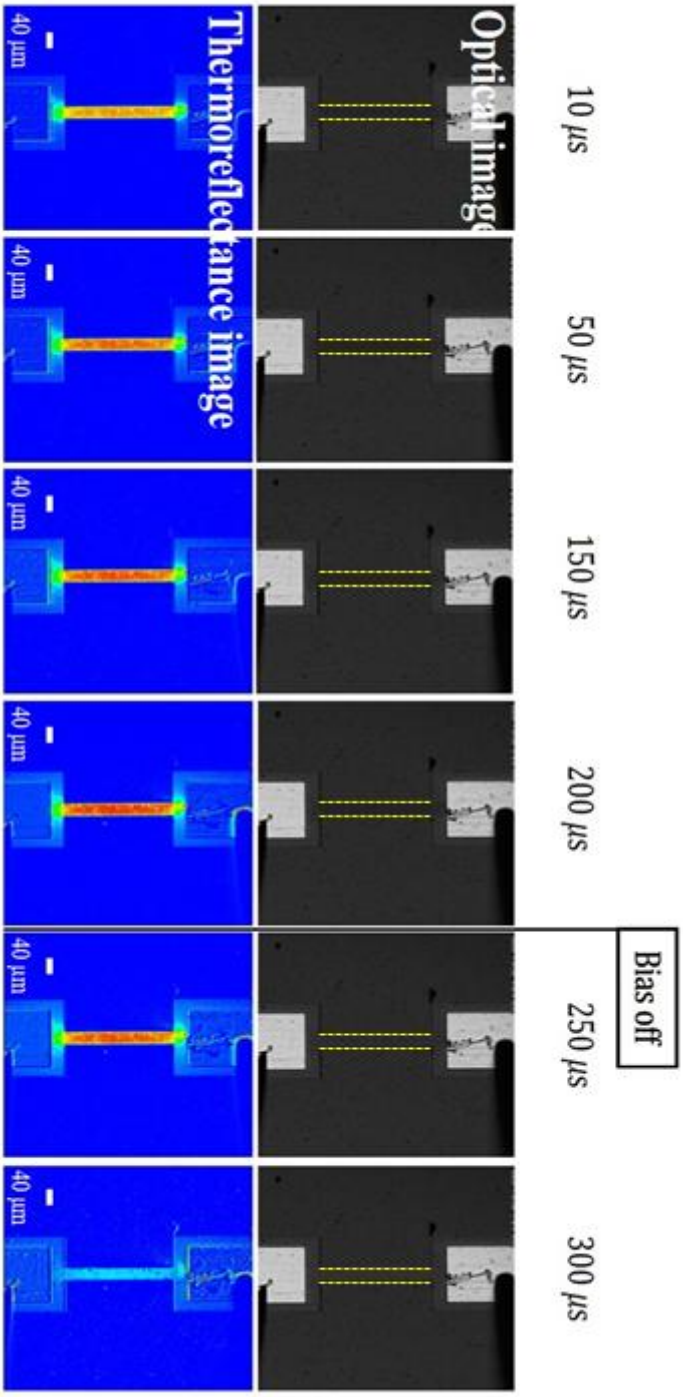


그림 13. Poly-Si Microresistor의 광학 및 열반사 이미지

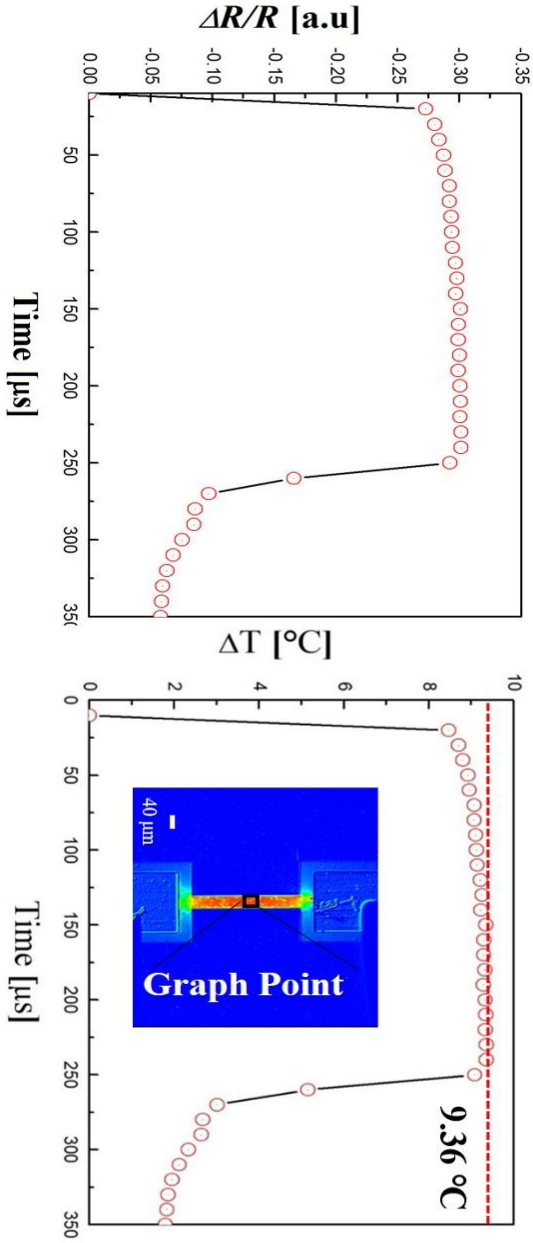


그림 14. 펄스 바이어스 신호가 인가된 이후의 사각형 Poly-Si 마이크로저항 중심에서의 시간에 따른 반사율 변화 및 온도 변화그래프

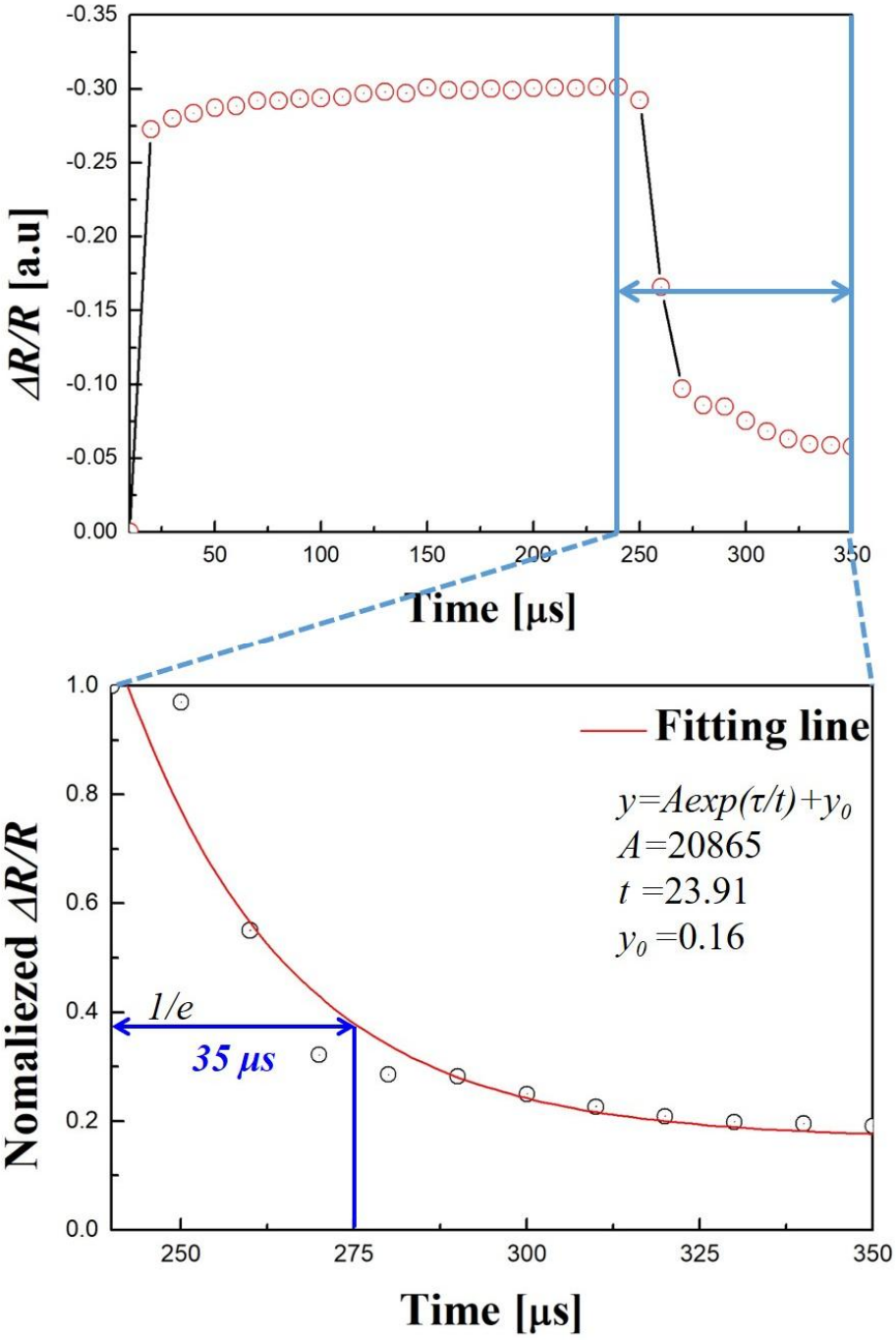


그림 15. 사각형 Poly-Si 마이크로저항에서의 바이어스 off 후 반사율 변화를 이용한 소자의 열적 완화시간 그래프

4.2 Poly-Si 나비넥타이 마이크로저항소자

Poly-Si 나비넥타이 마이크로저항소자의 온도 분포 측정에 앞서 바이어스와 펄스광의 조건을 조절하면서 온도 분포 측정의 최적조건을 확인하였다. 대물렌즈 배율 20×(NA = 0.42), 카메라 렌즈 2×, 바이어스는 25 V, 바이어스와 펄스광의 주파수는 1 kHz, 펄스폭은 각각 50 μs, 10 μs로 조절하여 시간에 따라 달라지는 반사율 변화 이미지를 얻어 분석하였다. 각 이미지를 200장씩 얻어 평균하였다. 그림 16은 지연시간을 50 μs까지 조정하면서 얻은 저항의 측면 끝부터 90 um까지의 열확산에 의한 반사율 변화 이미지이다. 시간이 지나면서 소자 중앙에서의 반사율 변화가 커지면서 소자 주변의 반사율 변화도 관측된다. 그림 17에서는 소자에서 발생된 열이 시간이 지남에 따라 얼마만큼 퍼져나갔는지를 비교하였다. 시간이 지나면서 그래프가 오른쪽으로 이동되는 것을 확인할 수 있는데 이는 열확산에 의한 시료의 반사율 변화에 의한 것이며 10, 30, 50 μs 동안 열이 6, 21, 32 μm 퍼져나가는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 분석을 이용하여 소자에서 발생된 열의 확산 및 소자 내에서 존재하는 국소 발열점이 주변에 어떠한 영향을 끼치는지에 대한 분석 가능성을 확인하였다.

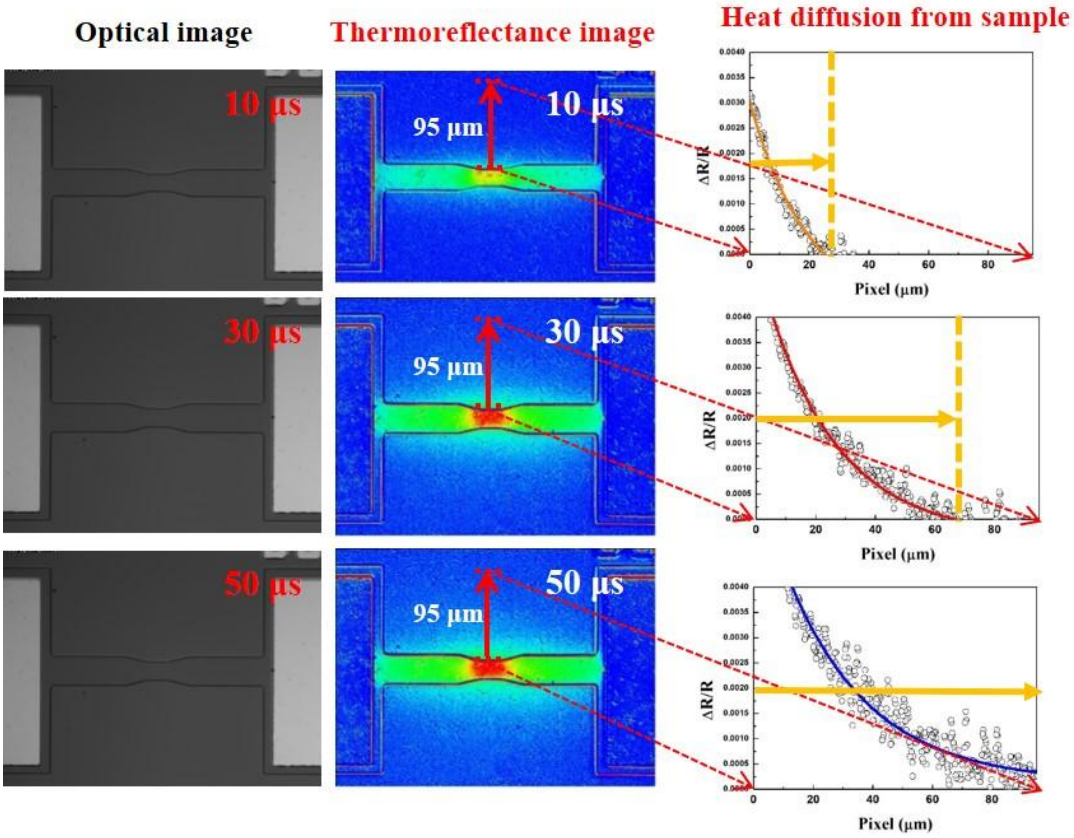


그림 16. 나비넥타이 Poly-Si 마이크로저항에서의 광학 및 열반사 이미지

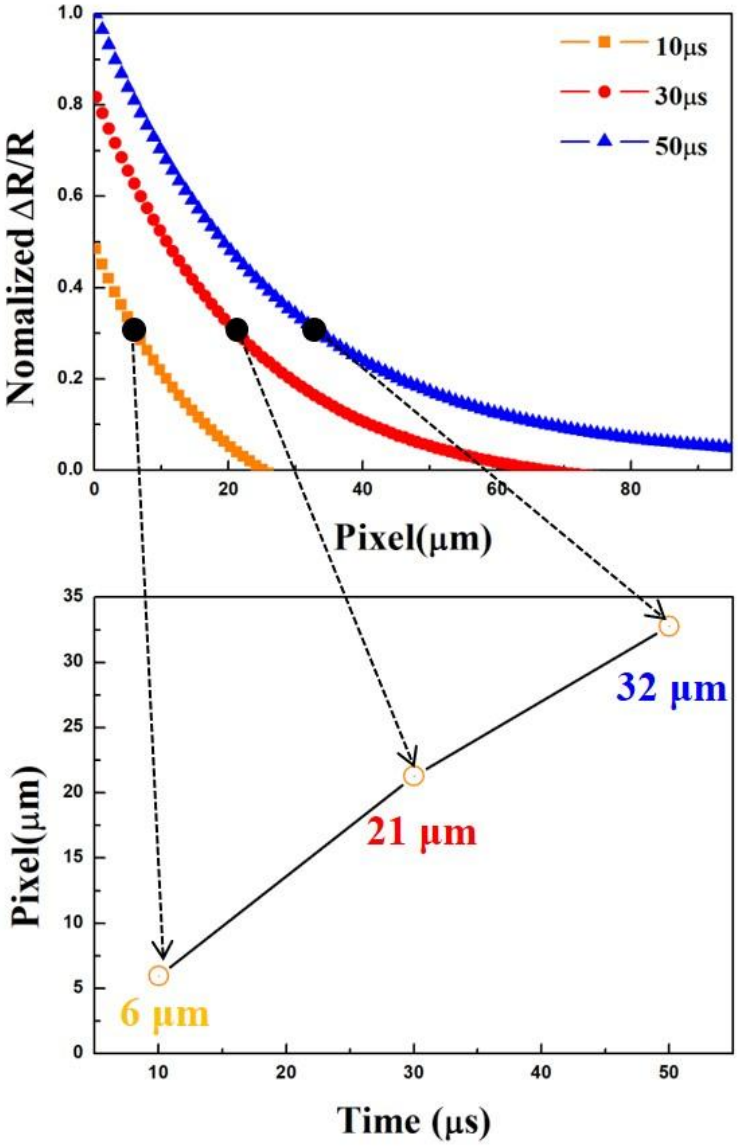


그림 17. 소자에서 발생된 열의 Si 기판 표면에서 확산 그래프

Ⅴ. 결론

본 연구에서는 CCD 카메를를 이용한 시분해 열반사 현미경 개발 및 응용연구를 진행하였다. 직사각형 Poly-Si 마이크로저항소자를 이용하여 특정 조건에서 시료 온도를 측정하였으며 바이어스 off되기 직전에 9.36 ℃로 가장 높게 측정되는 것을 확인할 수 있었다. bias off 이후의 반사율 변화를 측정하여 20 V 가 인가된 Poly-Si 마이크로저항의 완화시간은 35 μs임을 확인할 수 있었다. 나비넥타이 Poly-Si 마이크로저항소자에서는 소자에서 발생한 발열이 시간에 따라 공간적으로 어떻게 확산되어 가는지에 대한 이미지를 얻을 수 있었으며 소자에서 발생된 열이 10us, 30us 그리고 50 us동안 6, 21, 32 μm 퍼져나가는 것을 확인할 수 있었는데 이를 이용하여 소자 및 다양한 발열점의 열확산 분석에 이용할 수 있을 것이다.

Ⅵ. 참 고 문 헌

1. J. Kolzer, E Oesterschulze, and G. Deboy, “Thermal imaging and measurement techniques for electronics materials and devices”, Microelectron. Eng. **31**(1), 251-270 (1996).

2. W. Liu and B. Yang, “Thermography techniques for intergrated circuit and semiconductor devices”. Sens. Rev, **27**(4), 298-309 (2007).

3. L Shi, O. Kwon, A. C. Miner, and A. Majumdar, “Design and batch fabrication of probes for sub-100 nm scanning thermal microscopy,” J. Microelectromech, Syst. **10**(3), 370-378 (2001).

4. A. Csendes, V. Szekely, and M. Rencz. “Thermal mapping with liquid crystal method,” Microelectron. Eng. **31**(1), 281-290 (1996).

5. P. Kolodner and J. A. Tyson, “Microscopic fluorescent imaging of surface temperature profiles with 0.01 ℃ resolution”, Appl. Phys. Lett. **40**(9), 782-784 (1982).

6. J. P. Rakotoniaina, O. Breitenstein, and M.Langenkamp, “Localization of weak heat soureces in electronic devices using highly sensitive lock-in thermography”, Mater. Sci. Eng. B Adv. Funct. Solid State Master. B **91-92**, 481-485 (2002).

7. K. S. Chang, S. C. Yang, J.-Y. Kim, M.H. Kook, S. Y. Ryu, H. Y. Choi, and G. H. Kim, “Precise temperature mapping of GaN-based LEDs by Quantitative infrared micro-thermography”, Sensors (base) **12**(4), 4648-4660 (2012).

8. M.Farzaneh, K. Maize, D. Luerben, J. A. Summers, P. M. Mayer, P. E. Raad, K. P. Pipe, A. Shakouri, R.J. Ram, and J. A. Hudgings.“CCD-Based thermorfelctance microscopy: Principles and Applicaton”, J. Phys. D Appl. Phys. **42**(14), 143001 (2009).

9. S. Grauby, B. C. Forget, S. Hole and D. Fourier, “High resolution photothermal imaging of high frequency phenomena using a visible charge coupled device camera associated with a multichannel lock-in scheme”,

Rev. Sci instrum. **70**, 3603-3608 (1999).

10. K. Maize , J. Christofferson and A. Shakouri, “Transient thermal imaging using thermoreflectance”, 24th IEEE Symp. (San Jose, CA) **55-8**, 2008.

11. H. Wellisch, "Conrad Gessner : a bio-bibliography.", J. Soc. Bibliogr. Nat. Hist. **7**. (2): 151-247 (1975).

12. S. Karel, N. Jiri, et al., "Altering the balance between bacterial production and protistan bacterivory triggers shifts in freshwater bacterial community composition.", Antonie Van Leeuwenhoek **81**(1-4): 453-463(2002).

13. H. G. Kapitza, "Microscopy from the very beginning." 2nd ed. GmbH, Carl Zeiss (1997).

14. C.-H. Park, J. Joo, et al., "History of Microscope from the Magnifying Glass to the Field Emission Electron Microscope", Korean J. Electron Microscopy **33**(2), 93-104 (2003).

15. This Month Physics History: December 1840: Joule’s abstract on converting mechanical power into heat“, APS Sites, December 2009 (Volume **18**, Number 11)

15. E. Matatagui, A. G. Thompson, and M. Cardona, “Thermoreflectance in Semiconductors”, Phy. Rev. **176(**3) 950-960 (1968)

16. R. K. Willardson and A. C. Beer, Semiconductors and Semimetals (Academic, 1972)

17. L. R. de Freitas, E. C. da Silva, A. M. Ansanares, G. Tessier, and D. Fournier, “Sensitivity enhancement in thermoreflectance microscopy of semiconductor devices using suitable probe wavelengths”, J. Appl. Phys. **98**(6), 063508 (2005).

A Study on the Micron and Submicron Time-resolved Thermoreflectance Microscopy System Using CCD Camera

University of Ulsan
Department of Physics
Hwangbo Hyeon

due to advance of production technology, line width of semiconductor device is reduced. It is problem which semiconductor self-heating problem. Self-heating in semiconductor devices affects device's performance and reliability. Today one of the most important factor in semiconductor device is thermal management.

Scanning thermal microscopy (SThM), liquid crystal thermography (LCT), flourescence micro-thermography (FMT), Infrared thermography (IRT) and thermoreflectance microscope (TRM) are typical temperature detection techniques. Among them, IRT is the most widely used method in industry. However, the spatial resolution of infrared camera is 3 μm, which limits the measurement of temperature distribution. TRM is a non-contact, non destructive technique with higher spatial resolution than IRT.

Recently many engineers and scientists is studying performance improvement of device through thermal management of device. This requires time-resolved measurement. However, in the case of general thermoreflectance microscope can't detected time-resolved information.

In this study, we developed time-resolved thermoreflectance microscope with hardwares and softwares than we measured Poly-Si microresitor's time-resolved temperature distribution. Two different shape samples were prepared. In the rectangular resistor, we measured how temperautre of the sample changes under specific conditions wit. In the bow-tie resistor we analzed how the generated heat from the device spreads through the substrate.

감사의글

김석원 교수님 감사합니다. 물리학과에서 방황하던 1, 2학년을 청산하고 3학년부터 실험방에서 본격적인 학과생활을 가르쳐 주시고 도움을 주신 점 제 인생의 가장 큰 복입니다. 교수님이 없었다면 현재의 저는 존재하지 않았을 것입니다. 그리고 논문 심사를 맡아 주신 윤병국 교수님, 임성현 교수님, 교수님들 덕에 좋은 수업을 받았으며 물리학에 대한 재미를 느끼게 된 계기가 되었습니다. 그리고 한국기초과학지원연구원에서 일할 기회를 주신 장기수 본부장님, 실험에 많은 도움을 주신 김동욱 박사님 마지막으로 생활적인 부분에서 큰 도움을 주신 정찬배 연구원과 연구장비개발부 박사님들께 갚지 못 할 은혜를 입었습니다. 그리고 학교를 재밌다고 느끼게 해준 사람들 중 먼저 떠난 사람들 강만일 박사님, 이재란 누나, 김태성 형, 강동욱 형, 천보관, 김인혁, 김성호 떠날 때 감사하다 못한 말을 이 글에 남기며 좋은 일이 가득하길 바랍니다. 현재 실험방 생활을 같이 하고 있는 김현기, 박현우, 홍문봉 그리고 울산대학교 물리학과 대학원 친구들 덕에 재밌었습니다. 그리고 이 글을 절대 보지 않을 나의 친구들에게도 고맙다는 이야기 남깁니다.

저는 이제 걸어오던 걸음과 다른 새로운 방향으로 걸어나고자 합니다. 예전에 저였다면 저는 새로운 걸음이 무서웠을 것입니다. 그러나 현재의 저는 그렇지 않습니다. 앞으로 있을 무언가와 다시 딛을 걸음이 기대됩니다. 그 앞에는 밝은 점도 어두운 점도 존재하겠지만 저는 밝은 점만 보고 갈려고 합니다. 그리고 저가 받았던 것을 누군가에게 다시 베푸는 수 있는 사람이 되겠습니다.

마지막으로 항상 응원해주시고 격해주시는 아버지, 어머니 그리고 동생 혁이, 옥순이 이모, 세희 이모 사랑합니다. 그리고 다들 각자가 원하는 행복한 길만을 걷기를 바랍니다.