

테라헤르츠 엘립소메트리를 이용한 도핑된 실리콘의 전기적 광학적 물성 분석

Analysis of Electrical and Optical Characteristics of Doped Silicon using THz Ellipsometry

한연호, 임미현, 김정희, 정은아, 문기원, 한해욱

포항공과대학교 전자컴퓨터공학부

bladeho@postech.ac.kr

테라헤르츠(terahertz; THz) 기술을 이용해서 반도체 시료의 특성을 측정하는 방법으로는 대표적으로 투과형과 반사형 시영역 분광법(time-domain spectroscopy; TDS)이 있다⁽¹⁻²⁾. THz파를 이용한 물성 측정을 위해서 처음에는 주로 투과형 THz-TDS가 사용되었는데 고체, 액체, 기체 상태의 다양한 물질의 특성을 분석하는데 효과적임이 입증되었다. 그러나 금속이나 도핑 농도가 아주 높은 반도체의 경우 THz파의 투과율이 매우 낮기 때문에 투과 방식으로 물질의 특성을 측정하는 것이 거의 불가능할 뿐 아니라 시료의 두께를 정확히 알아야 한다는 단점이 있다. 이러한 문제 때문에 반사형 THz-TDS 시스템이 고안되었다. 반사형 THz-TDS 시스템은 시료의 흡수율이나 두께에 관계없이 물질의 특성을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 하지만 반사형 THz-TDS에서는 기준 신호를 측정하기 위한 기준 거울과 시료의 위치를 수 마이크로미터 이내로 정확히 일치시켜야 하며 그 차이만큼의 위상을 보정해줘야 정확한 시료의 특성을 얻을 수 있다는 문제점이 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 타원편광분석(ellipsometry)을 THz-TDS에 적용하여 p-type 실리콘의 물성을 측정하였으며 투과형 THz-TDS를 이용해 측정한 결과와 비교 분석하였다.

Ellipsometry는 시료에서의 TE, TM 편광에 대한 반사율의 비를 이용해서 시료의 광학적 특성을 분석하는 방법이기 때문에 기준 신호를 측정할 필요가 없고 시료의 두께나 도핑 농도에 구애받지 않는 장점이 있다. 이미 가시광선이나 근적외선 영역에서는 ellipsometry 시스템이 시료의 물성 측정, 박막 두께 측정, in-situ growth 모니터링 등 많은 분야에 응용되고 있다. 하지만 가시광이나 근적외선 영역에서는 전자기파의 위상을 직접 측정할 수 없기 때문에 위상을 측정하기 위해서 analyzer의 각도를 변화시키며 빛의 세기를 측정해야 하는 단점이 있다. 이와 달리 THz-TDS를 이용한 ellipsometry는 빛의 세기와 위상을 동시에 측정할 수 있기 때문에 polarizer를 이용해서 TE와 TM에 편광에 대한 시료에서의 반사 신호 2개만 측정하면 시료의 물성을 추출해낼 수 있다.

THz ellipsometry를 위한 기본적인 실험 장치는 일반적인 THz-TDS 시스템과 동일하며, wire-grid로 만들어진 THz 편광기를 이용해서 THz파의 편광을 바꿔주게 된다. THz 광원으로 사용되는 InAs에서 방출되는 THz파는 지면에 평행한 방향으로 편광되어 있으며, THz 검출기로 사용되는 광전도 쌍극자 안테나의 쌍극자 방향 역시 지면에 평행한 상태로 놓이게 된다. 따라서 시료에서 반사되는 THz파의 TE, TM 편광의 정확한 반사율 비를 구하기 위해서는 시료에 입사하는 TE, TM 편광의 크기가 같아야 한다. 그림 1-b)와 같이 THz 편광기를 배치하게 되면 두 번째 편광기의 각도만 90° 돌리줌으로써 TE,

TM 편광의 크기를 똑같이 만들어 줄 수 있다. 이러한 방법으로 실험 장치를 구성한 후 p-type 실리콘에 대한 TE, TM 편광에서의 반사 신호를 측정하였다.

측정된 신호를 분석하기 위해서 존스 행렬을 도입하였다. 이상적인 편광기는 빛의 편광 방향과 편광기의 광축이 수직이 되었을 때는 편광기를 통과한 빛의 세기가 0이 되어야 하지만 실제 사용되는 편광기에서는 약간의 빛이 통과하게 된다. 그리고 주파수에 따라서 빛이 통과하는 정도가 다르기 때문에 주파수에 따른 편광기의 extinction ratio를 정확히 측정할 필요가 있다. 사용된 THz 편광기의 정확한 특성을 반영하기 위해서 THz-TDS 시스템을 이용하여 extinction ratio를 측정하였으며 이를 존스 행렬에 적용하였다. 이러한 존스 행렬로부터 p-type 실리콘의 유전율을 추출하였으며, Drude 모델을 사용하여 p-type 실리콘의 운반자 밀도, 이동도, 전도도와 같은 전기적 특성을 추출할 수 있었다.

THz ellipsometry를 이용해서 측정된 시료의 물성과 투과형 THz-TDS를 이용해서 측정된 결과를 비교 분석하였으며 두 실험에서의 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었고, four-point probe로 측정된 결과와도 잘 일치함을 확인하였다. 결론적으로 THz-TDS 시스템에 ellipsometry를 적용하여 도핑된 반도체의 물성을 측정할 수 있음을 보였다.

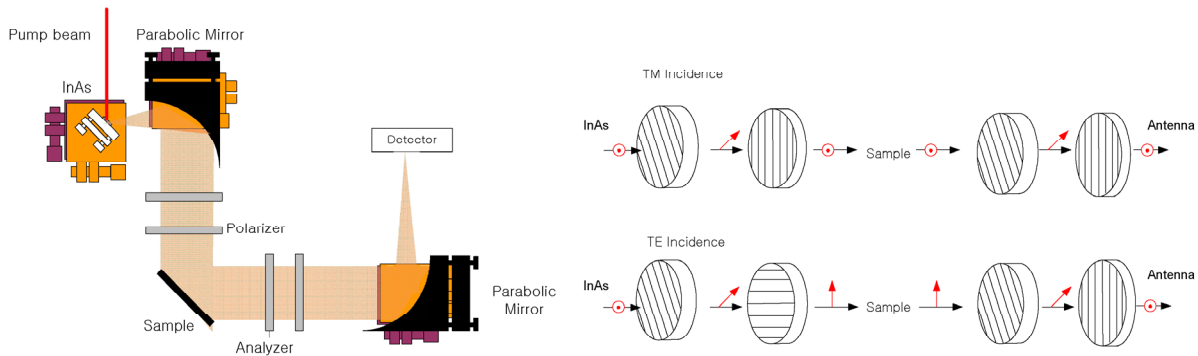


그림 1. THz ellipsometry 시스템의 개략도(a)와 THz파의 편광에 따른 편광기의 배치(b)

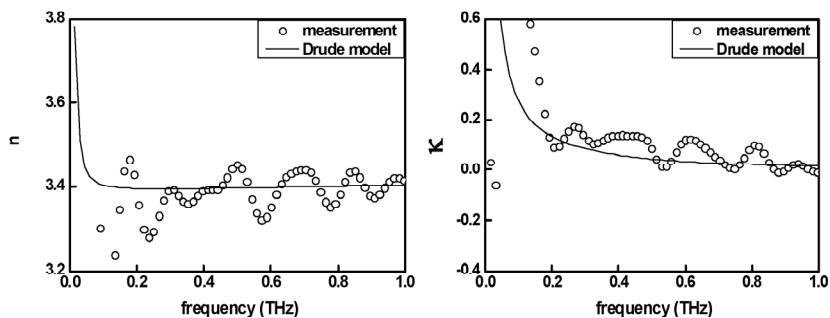


그림 2. THz ellipsometry로 측정된 시료의 굴절률과 extinction coefficient

1. D. Grischkowsky, Søren Keiding, Martin van Exter, and Ch. Fattinger, "Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors," J. Opt. Soc. Am. B, 7, 2006-2015 (1990).
2. Tae-in Jeon and D. Grischkowsky, "Characterization of optically dense, doped semiconductors by reflection THz time domain spectroscopy," Appl. Phys. Lett., 72, 3032-3034 (1998).