

박막 내 열전달 계측

이 글에서는 박막의 열전달 특성을 계측하기 위한 표준 측정기법과 장치를 간략히 설명하고 집적소자 및 MEMS(초소형기전시스템)에 흔히 사용되는 대표적인 박막에 대한 열물성 측정 사례를 소개하고자 한다.

열 수송자의 평균자유경로(mean free path)보다 특성길이가 작은 시스템 내부에서 발생하는 에너지 전달현상은 전통적인 열전달 이론으로 예측할 수 없으며, 근래 그에 대한 이론 및 실험적 연구가 활발히 수행되고 있다. 박막과 같은 미세구조 재료의 열전도율, 열확산도, 접촉열저항 등 열전달 특성은 열전달을 수반하는 시스템의 설계와 신뢰성 분석에 있어서 중요한 인자이다. 특히, 최근 집적소자, MEMS 등과 같은 고밀도 미세구조 내에서 발생하는 열 에너지의 소산이나 제어가 핵심적인 과제로 대두되면서 박막 구조 내에

서의 열전달 특성에 관한 관심이 크게 증가되고 있다.

전기전도와 마찬가지로 일반적으로 박막 내에서의 열전도율은 벌크(bulk) 상태에서의 값에 비해 작게 나타난다. 고체 내부에서 열에너지는 포논(pho-non), 전자와 같은 열수송자에 의해 전달되는데, 박막의 경우 벌크 상태와 달리 미세구조와 불순물의 함량이 제조 공정에 의존하므로 열수송자의 산란이 공정에 따라 다르게 나타난다. 일반적으로 산란 정도는 박막의 크기가 줄어들수록 증가한다. 또한, 공정에 따른 박막의 구조적인 차이뿐만 아니라 크기 효과(size effect)가 나타난

다. 박막의 경계는 열 수송자의 산란을 증가시키는 역할을 하며 이에 따라 박막은 열전도가 박막의 두께에 비례하는 열전달 특성을 지닌다. 예를 들어, 그림 1을 보면 벌크 GaAs 내 포논의 평균 자유이동거리는 상온에서 μm 수준이다. 따라서 벌크 상태와 똑같은 구조를 가진 GaAs 박막을 만든다고 하더라도 박막 크기에 의한 산란의 증가 때문에 박막에서의 열전도는 벌크 상태에 비해 감소하게 된다. 지금까지 박막 내 열전도를 예측하기 위한 많은 이론들이 제안되었으나 정량적인 수준에서 현상을 예측하기에는 한계가 있다. 이는 박막의 열전도

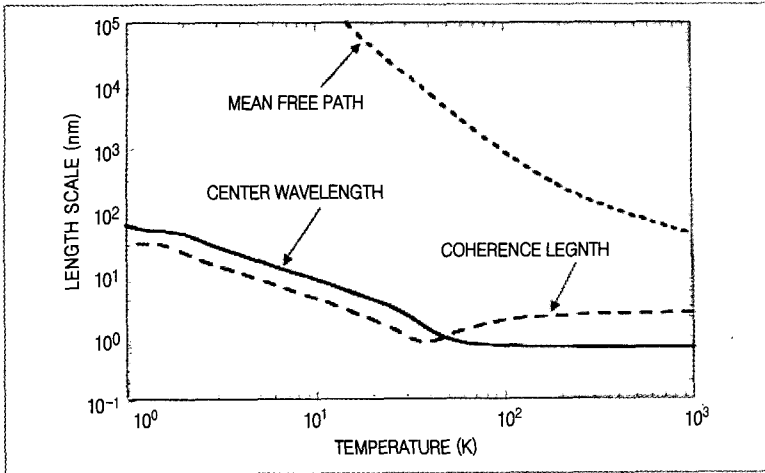


그림 1 벌크 GaAs 내 포논의 특성 길이들

율이 박막의 종류뿐 아니라 불순물 수준, 계면 구조 등 제조 공정에 따라 변화하는 인자에 크게 의존하기 때문이다. 따라서 박막의 열전달 특성을 나타내는 물성값들(열전도율, 열확산도 등)을 정확히 계측할 수 있는 기술은 미세열전달 이론의 개발과 마이크로/나노스케일 열시스템의 설계에 있어서 핵심적인 요소이다.

박막 열전달 계측의 어려움

박막의 열물성 측정은 여타 물성들에 비해서 매우 어렵다. 열물성은 기본적으로 열원을 이용해서 시편을 가열하고 그 온도 응답을 측정하여 구할 수 있다. 하지만 박막의 경우 대부분의 인가된 열에너지가 박막이 아닌 기판(substrate)을 통해서 전달되므로 신호가 박막의 특성에 극히

둔감하게 반응하기 때문이다. 박막의 전기전도도 측정 시, 막의 증착에 사용되는 기층이 절연 물질일 경우 측정되는 전기적인 신호는 전적으로 박막의 전기적 특징이다. 그러나 열물성에 있어서 상대적으로 열을 완벽히 차단하는 재료가 없으므로 박막의 열전달 특성을 측정하기가 어려운 것이다. 기판의 열전도율이 작은 경우에도 시편에 가해진 열의 대부분은 박막에 비해 상대적으로 두께가 두꺼운 기판을 통해 전달된다.

최근까지 박막의 열전도율을 측정하기 위한 많은 측정 기법들이 개발되어왔다. 그러나 대부분의 방법들에 특별한 경우에만 효과적인 방법이며 모든 종류의 박막에 광범위하게 적용 가능한 방법은 아직 개발되지 않았다. 벌크 재료의 열물성을 측정하는 장치가 이미 상용화 된 반면, 박막의

물성은 실험실 수준에서 측정되고 있으며 이에 대한 전문적인 서비스 기관도 거의 없는 실정이다.

박막 열물성의 대표적인 측정법들

3 ω 법(3-omega 법)

박막의 열전도율을 측정하는 방법들 중 가장 잘 알려진 방법이 3 ω 방법이다. 3 ω 법은 주기적인 전기 가열에 의해서 나타나는 표면의 온도를 주파수에 따라 측정함으로써 시편의 열전도율을 측정하는 방법이다. 측정하고자 하는 시편 표면에 금속선을 증착하고 전류를 공급하면, 시편 표면의 온도는 변화하고, 이 온도의 변화는 시편의 두께와 열전도율 등 재료의 물성의 함수이다. 따라서 금속의 온도-저항 계수를 안다면 금속선 양단의 전압을 측정하여 시편의 열전도율을 측정할 수 있다. 특성온도의 변화는 일반적으로 아주 작고 노이즈에 민감하기 때문에 3 ω 법에서는 교류를 이용하여 특정 주파수에서 신호를 측정한다.

3 ω 법의 개략도와 시편 구성 사례를 그림 2에 나타내었다. 기본적으로 교류전류를 단일 금속선에 흐르게 하고 응답을 측정하기 위한 회로로 구성되어 있음을 알 수 있다. 측정하고자 하는 시편 표면에 증착된 열선에 ω 주파수

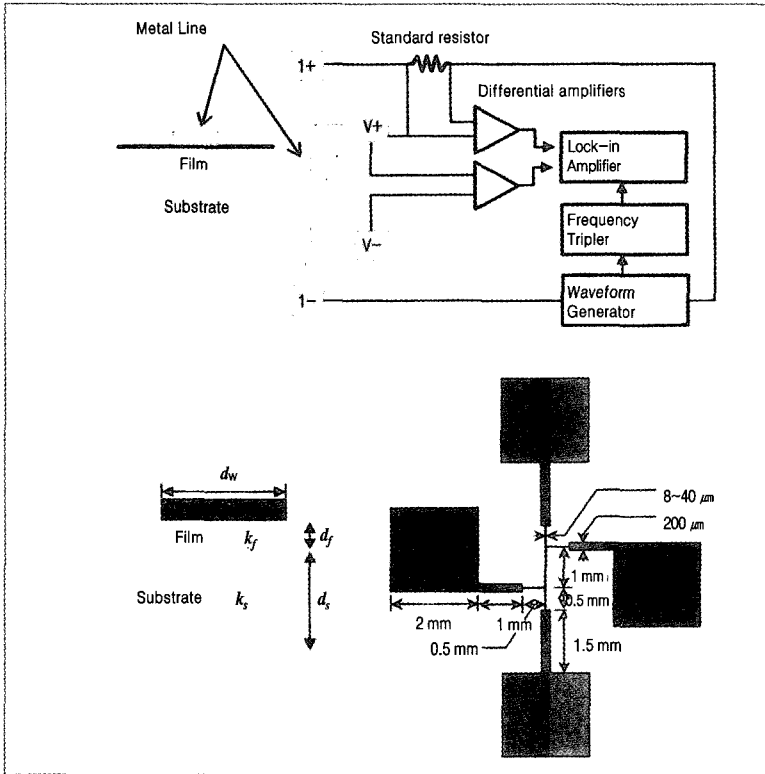


그림 2 3ω법 개념도와 시편의 구성 예

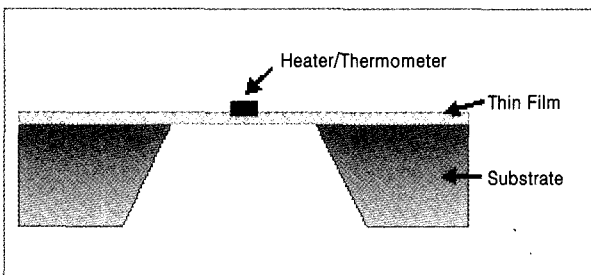


그림 3 자유지지(free standing) 막 구조를 이용한 박막의 열물성 측정

를 가지는 전류를 공급할 경우 2ω 주파수의 joule 열이 공급되고, 시편 표면의 온도는 2ω 주파수를 가지고 변화된다. 금속선의 저항은 온도의 함수이므로 역시 2ω 의 주파수로 변화되고 시편의 온도 반응은 3ω 주파수의 전압변화로

검출된다. 이 3ω 주파수의 전압은 기준 주파수를 세 배로 동기화 하여 락인앰프(lock-in amplifier)로 측정한다.

3ω 법은 그 측정 방식으로 인해 절연 박막과 열전도율이 낮은 재료에 민감도가 좋은 방법이다. 절

연박막이 아니어도 원칙적으로 측정이 가능하나 전기적 절연층을 시편과 금속선 사이에 증착하여 주어야 하므로 측정의 민감도가 떨어지게 된다. 또한 측정하고자 하는 박막이 금속선과 기층 사이의 열적이 저항으로 작용하는 원리를 이용하는 것이므로 열전도율이 큰 박막에는 적용이 어렵다는 단점을 가지고 있다.

열전도율이 큰 박막의 경우, 기층을 제거하면 박막의 영향만을 측정할 수 있다(그림 3). 많은 박막이 실리콘 기층 위에 많이 증착되는데 이 경우 실리콘 기층을 선택적으로 식각하여 측정 시 박막의 영향만이 나타나도록 한다. 열물성 측정 시 필요한 가열을 위한 가열선과 온도 측정을 위한 센서 부분은 일반적인 3ω 법의 경우와 같이 보통 금속선을 이용하여 제작한다. 박막의 두께가 스스로 지지할 수 없을 정도로 너무 얇을 경우에는 SiN_x 나 폴리이미드 등과 같이 열전도율이 작고 두께가 작은 형태로 가공이 가능한 기판을 사용하여 박막을 지지하는 방식으로 시편을 준비한다.

교류열량법(AC calorimetry)

마이크로 가공 기술을 이용하여 금속선을 제작하는 기술은 측정 정밀도면에서는 우수하지만, 측정 시편을 제작하기 위한 복잡한 공정이 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 교류열량법은 그림 4와 같이 두께가 매우 얇은(보통

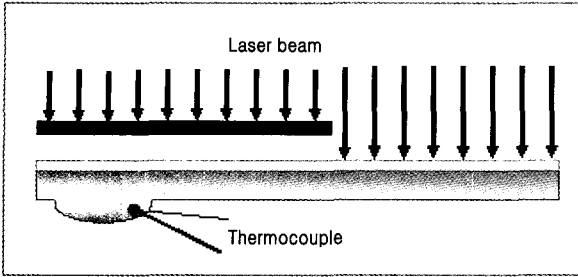


그림 4 교류열량법을 이용한 박막의 열확산도 측정

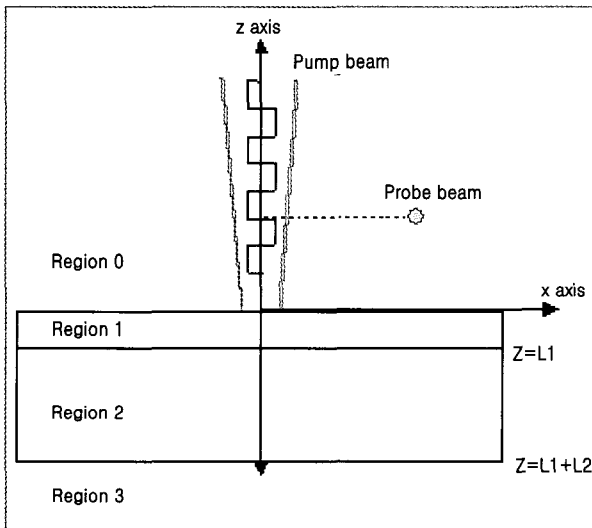


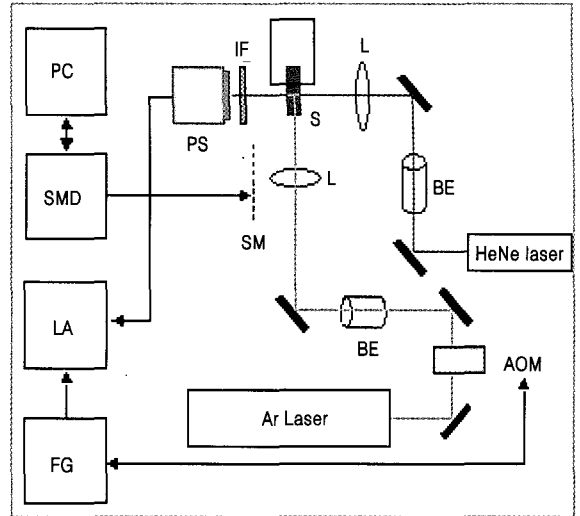
그림 5 광열편위법 개념도

수 μm 정도) 폴리이미드 등 저열전도성 기판 위에 측정하고 하는 시편을 증착한 뒤 주기적으로 시편을 가열하면서 열전대로 온도를 계속하는 방법이다. 통상적으로 레이저가 가열원으로 이용되고 온도센서로는 상용 마이크로 열전대가 사용된다. 교류열량법에서는 열전대 온도의 크기와 위상을 통해서 박막의 열확산도를 구할 수 있으며 금속과 같이 열의 확산이 빠른 박막에 효과적이다. 이 방법은 복잡한 공정없이 비교

적 우수한 정밀도로 고열전도 박막의 열물성을 측정할 수 있다는 장점을 지닌다. 반면 박막의 두께가 얇은 경우 측정 민감도가 떨어지고 열전대와 기판의 접촉저항에 의한 오차의 영향을 받는다는 단점을 지닌다.

광열편위법

광열편위법(photothermal mirage technique)은 광열신기루법이라고도 불리며 그림 5와 같이 레이저를 이용하여 광학적



(AOM : acousto-optic modulator, BE : beam expander, FG : function generator, IF : interferential filter, L : lens, LA : lock-in amplifier, PC : personal computer, PS : position sensor, S : sample, SM : stepping motor, SMD : stepping-motor driver)

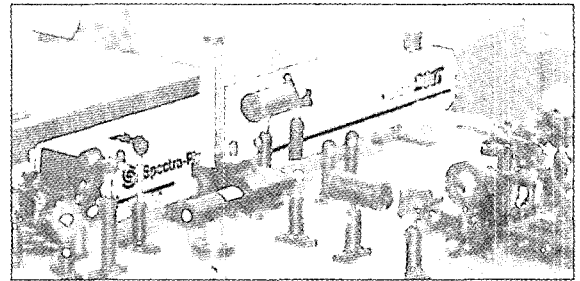


그림 6 광열편위법 실험장치 구성 사례

으로 시편을 가열하고 빛이 온도 구배에 따라 굴절한다는 신기루 원리를 이용하여 광학적으로 온도를 측정하는 방법이다. ω 주파수로 시편을 가열할 경우 같은 주파수의 온도 변화가 시편과 주위 분위기에 발생된다. 이 때 공기의 굴절률은 온도의 함수이므로 굴절률도 온도에 따라 변화게 된다. 따라서 시편 위를 평행하게 지나가는 탐사광의 경로가 굴절을 변화에 따라 휘게 되고 휘의 정도와 위상은 시편의 열물성의

함수로 주어진다. 그림 6에는 실험장치의 구성 예를 나타내었다. 3 ω 법, 교류열량법 등 접촉식 측정법의 경우 시편을 준비하는 공정에서 원래 시편의 물성이 변화될 가능성이 있다. 반면 광열편위법과 같은 비접촉, 비파괴 측정법은 시편 손상을 주지 않으면서 물성을 파악할 수 있는 효과적인 방법으로서 절연물질, 전도성 물질 등 종류에 관계없이 모든 물질에 적용 가능하다. 뿐만 아니라, 광열편위법은 특별한 시편준비 과정을 필요로 하지 않으므로 표준화된 장치로 구현하기에 적합하다고 하겠다. 하지만 광학계의 구성 시 정렬(alignment) 오차로 인해 측정 정밀도가 상대적으로 떨어지고 신호를 얻기 위해 온도를 많이 올려야 한다는 단점을 지닌다.

측정 사례

박막에서의 열전달 특성은 벌크 상태에 비해 다르게 나타날 수 있다. 그 예로 필자의 연구실에서 수행한 측정 결과들을 소개하고자 한다. 열산화된 SiO₂ 박막의 열전도율은 상대적으로 잘 알려져 있을 뿐 아니라 공정에 대한 의존성이 적어 박막 측정에 표준 물질로 사용될 수 있다. 두께 500nm SiO₂ 박막에 대한 전형적인 3 ω 법 측정신호가 그림 7에 나타나 있다. 측정된 SiO₂ 박막의 열전도율은 1.35W/m·K로

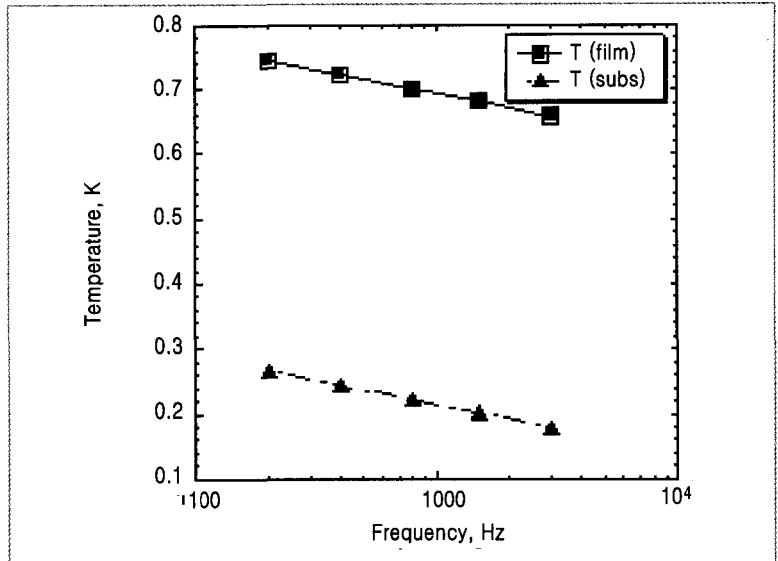


그림 7 3 ω 법을 이용하여 측정된 SiO₂ (500nm) 박막의 신호

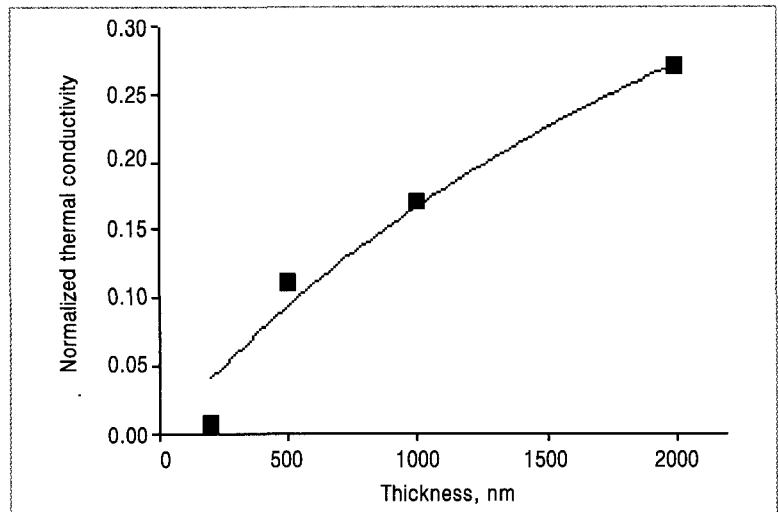


그림 8 AlN 박막의 두께에 따른 열전도율

비결정질 구조를 가지는 벌크 상태의 SiO₂ 열전도율과 유사하게 측정되었다. 이를 통해 실리콘 기층을 이용하여 열산화법으로 제작된 SiO₂ 박막은 비결정질 구조를 가지므로 포논의 평균이동거리가 박막의 두께 비해 매우 작

으므로 벌크 상태와 유사한 열전도율을 가짐을 알 수 있다.

그림 8은 RF reactive magnetron sputtering을 이용하여 Si(001) 기층 위에 상온에서 증착된 AlN 박막의 열전도율을 두께를 변화시키며 3 ω 법을 이용하

여 측정된 결과를 보여준다. 측정된 열전도율은 비교를 위해 벌크 상태의 열전도율 값으로 표준화하였다. 박막의 표준화된 열전도율은 200~2,000nm 범위에서 0.6~27%로 측정되었으며 박막의 열전도율이 벌크 상태에 비해 현저히 감소하였음을 알 수 있다. 이는 박막 제작 시, 불순물 및 박막-기층 격자 상수 불일치에 따라 마이크로 결정 상태가 벌크 상태와 매우 상이하기 때문이다. 또한 같이 공정 조건이라고 하더라도 두께가 감소할수록 박막의 열전도율이 감소함을 알 수 있다. 이러한 경향은 일반적으로 모든 박막에서 관측되는데, 이는 박막의 두께가 작아질수록 박막 내주에서의 grain의 크기가 감소하여 산란이 더 증가하기 때문이다.

금속 박막의 열확산도 측정 결과를 벌크 상태의 열확산도로 표준화하여 그림 9에 나타내었다. 그림에서 금속 박막의 열전도율이 벌크 상태에서의 값에 비해 0.513에서 0.986 정도의 비율로 감소함을 알 수 있다. Al/Ti 합금 (Al 97%, Ti 3%)은 벌크값이 알려져 있지 않으므로 순수한 Al 값을 벌크값으로 표준화하였다. 따라서 Al/Ti의 열확산도 감소율이 Ti에 의한 불순물 산란에 의해 다른 금속 박막에 비해 큼을 알 수 있다. 그림 9에는 4-probe법을 이용하여 측정된 전기전도도도 벌크 상태의 값으로

표준화하여 함께 나타내었다. 금속 박막의 전기전도도 또한 열전도율과 유사한 경향성을 보여주는데 이는 벌크 상태와 같이 박막에서도 대부분의 열이 전자에 의해서 전달됨을 나타낸다. 즉, 금속 박막에서도 벌크 상태에서의 금속에서도 같이 Wiedemann-Franz

법칙이 적용됨을 알 수 있다. 그러나 350nm 두께의 Mo의 경우 다른 금속 박막과 달리 열전도율이 전기전도도의 두 배 정도로 크게 나타났다. 이를 통해 Mo의 경우, 전자에 의한 열운송능력만 아니라 포논에 의한 열운송능력도 무시할 수 없음을 알 수 있다.

맺음말

이상에서 일반적인 박막의 열전달 계측 기법과 그 측정 사례들을 간략히 소개하였다. 박막의 열전달 계측 기술은 아직 완전히 개발되지 않았으며 이에 대해 추가적인 연구가 향후 활발히 진행되어야 할 것이다. 박막의 경우 그 열물성이 두께와 공정에 따라 다양하게 변화하므로 계측 수요

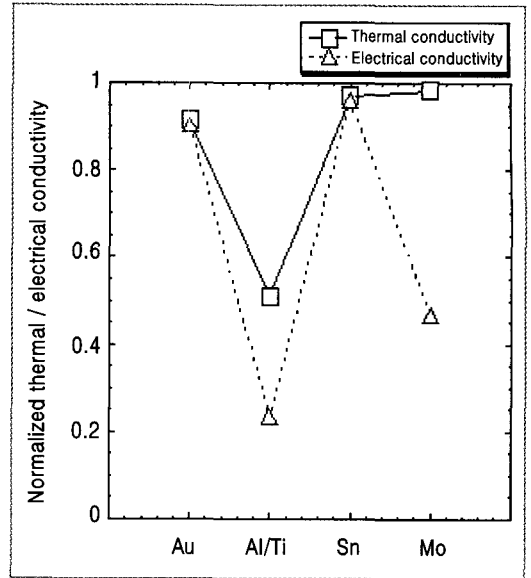


그림 9 금속 박막의 열전도율과 전기전도도

가 벌크 재료에 비할 수 없이 큼에도 불구하고 상용화된 계측 장비가 존재하지 않는다는 사실은 시사하는 바가 크다. 앞서 소개된 측정 방법들을 이용하여 실험실 수준의 측정을 하는 경우에도 시편의 특성에 따라 측정 변수들을 조절해야 하는 어려움이 있다. 반도체 소자의 지속적인 집적화와 나노기술의 상업화에 있어서 박막 및 미세구조 내 열소산 문제는 그 중요성이 향후 더욱 증대되리란 것은 자명하다. 따라서 미세열전달 이론의 확립과 더불어 박막 내 열전달 특성을 효과적으로 계측하기 위한 표준화된 측정 기법의 확립과 장치 개발에 관한 지속적인 연구가 필요하며 이는 미래지향적 기계산업의 핵심기반 기술로서 역할을 할 것이다.