

홀효과란?

홀효과의 중요성은 반도체의 캐리어의 이동도, 전기적인 저항률 그리고 캐리어의 정확한 농도를 결정할 필요에 의해 강조되어 왔다. 홀효과는 이러한 것을 간단한 방법으로 제공하는데 이는 연구실이나 반도체공장에서 필수적으로 파악해야 할 특성이며 최근 반도체관련 산업현장조사에서 가장 일반적으로 적용되는 확인방법이다. 또한 홀효과를 기초로 한 연구가 1985년과 1998년에 노벨상을 수상했을 정도로 중요하다.

홀효과는 1879년 Edwin H. Hall에 의해 발견되었으며, 오늘날 산업에 적용되는 반도체물질의 거의 모든 특성의 전기적인 성질을 테스트하는데 일반적으로 적용되고 있다.

저항개념의 발전

물질의 전기적인 특성은 세 단계에 의해 발전되어 왔다. 첫째, 1800년 초 두 단자간 전압-전류 측정에 의해 나타난 물리적인 양을 측정함에 의해 저항(Resistance)과 컨덕턴스(Conductance)로 특성을 파악했으나 샘플의 형상이 다르면 저항이 다르게 나타나기 때문에 충분한 이해를 제공하지 못했다. 이를 보완하기 위하여 두번째로, 샘플의 형태상 불균일에 의해 영향 받지 않는 저항률(Resistivity)과 도전율(Conductivity)과 같은 물질 그 자체의 특성의 이해가 필요하게 되었고, 이는 물질의 전류 수송 능력을 결정하는 중요한 요소로서, 다른 샘플과의 의미있는 비교가 수행되었다.

그러나 1900년 초에 저항율과 도전율만이 기본적인 물질의 파라미터가 아니라는 것을 인식 한 후 최종적으로 캐리어 농도와 이동도를 정의함에 의해 오늘날 복잡한 전기적인 측정을 가장 일반적으로 다루게 되었다.

Hall Effect and Lorentz Force

홀효과의 가장 기본적인 물리적인 원칙은 Lorentz법칙이다. 그림1에서처럼 x축에 정전류를 인가한후 z방향에 자속농도를 인가하면 전자는 -y축방향으로 이동하여 샘플의 양쪽면을 통해 홀전압을 발생시킨다 이러한 힘을 로렌츠력이라 한다. 이러한 홀전압은

$V_H = I \cdot B / qnd$ 와 같이 나타나며

(I 는 전류, B 는 자속밀도, d 는 샘플의 두께, q (1.602×10^{-19} C) 는 전하량 그리고 n은 전하의 갯수이다.)

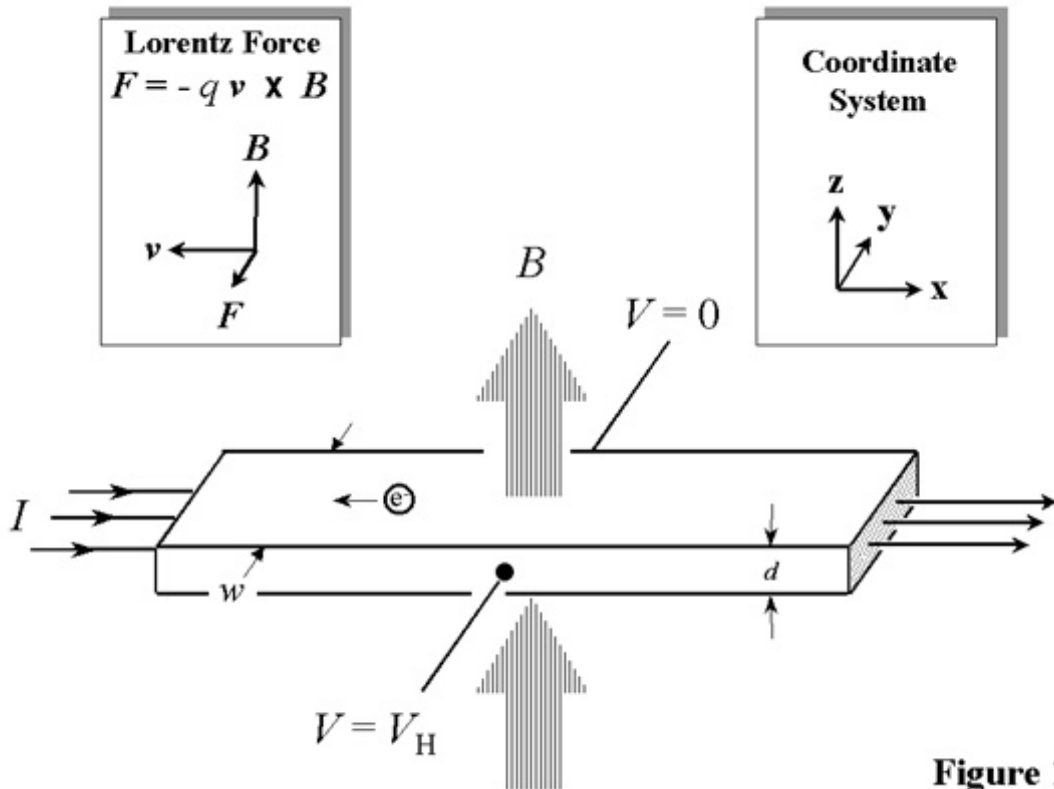


Figure 1

샘플의 표면에 나타나는 전자의 개수를 나타내는 n_s (sheet density) = $I B / q |V_H|$ 로 표현되며, 반도체의 전하캐리어의 n_s (sheet carrier concentration)는 정해진 전류, 자속밀도 그리고 전하량(1.602×10^{-19} C)과 홀전압을 측정함에 의해 결정된다.

반도체 샘플의 표면저항 (R_s)은 van der Pauw 법칙의 저항을 측정방법에 의해 결정되며 홀의 이동도는 다음 수식에 의해 결정될 수 있다.

$$\text{이동도}(\mu) = |V_H| / R_s I B$$

샘플의 두께를 알고 있다면 Bulk Resistivity($\rho = R_s d$)s 와 Bulk Density($n_b = n_s / d$)를 파악할 수 있다.

van der Pauw Technique

이동도와 표면의 캐리어의 농도를 결정하기 위해서는 저항율 (Resistivity)과 홀전압의 측정이 필요하다. van der Pauw법칙은 균일한 샘

플의 저항율을 측정하기 위하여 반도체 산업현장에서 가장 폭넓게 사용되고 있다. van der Pauw에서 제안된 가장 기본적인 방법은 그림 2에서 보여주는 것처럼 불균일한 얇은 판형의 샘플을 판의 네 모퉁이에 매우 작게 Ohmic Contacts를 해서 사용하는 것이다.

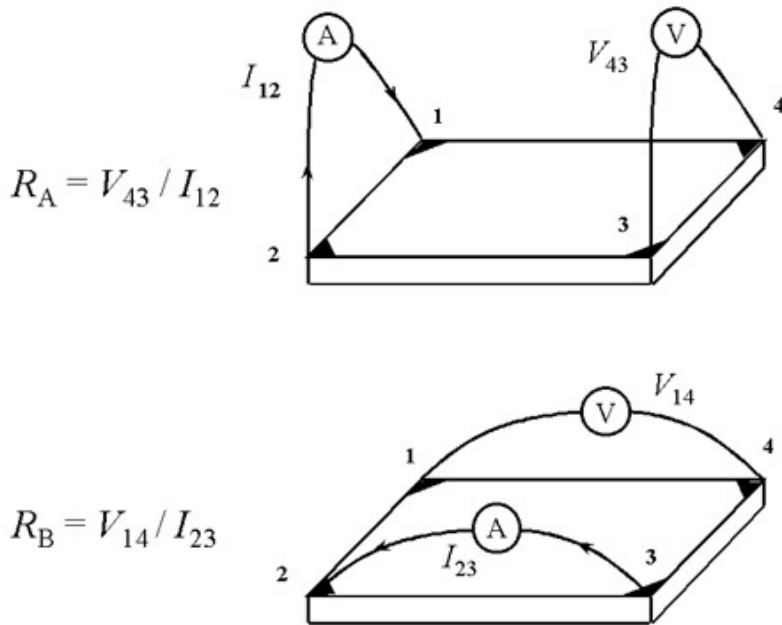


Figure 2

Resistivity를 확인하기 위해서는 표면저항 R_s 를 알아야 한다. van der Pauw법칙에서는 두개의 특성저항 수직축의 R_A , 수평축의 R_B 를 파악해야 한다.

그림 2에서와 같이, 두 전기적인 저항을 얻기 위해 먼저, 정전류 I_{12} 를 단자 1과 2양단간에 인가한 후 단자 3과 4사이에 나타나는 전압 V_{43} 을 구한다. 다음에, 단자 2와 3양단간에 전류 I_{23} 인가한 후 단자 1과 4사이에 나타나는 전압 V_{14} 을 구한다. 따라서 수직축의 R_A , 수평축의 R_B 는 다음의 식으로 나타낸다.

$$R_A = V_{43} / I_{12} , R_B = V_{14} / I_{23}.$$

이렇게 구해진 수직축의 R_A , 수평축의 R_B 를 van der Pauw법칙을 통해 유도된

다음 수식을 이용하여 R_s 값을 구하여야 한다.

$$\exp(-\pi R_A/R_S) + \exp(-\pi R_B/R_S) = 1$$

여기서 구한 R_s 값을 이용하여 Bulk Resistivity (ρ)를 계산할 수 있다.
즉 $\rho = R_s d$ 이다.

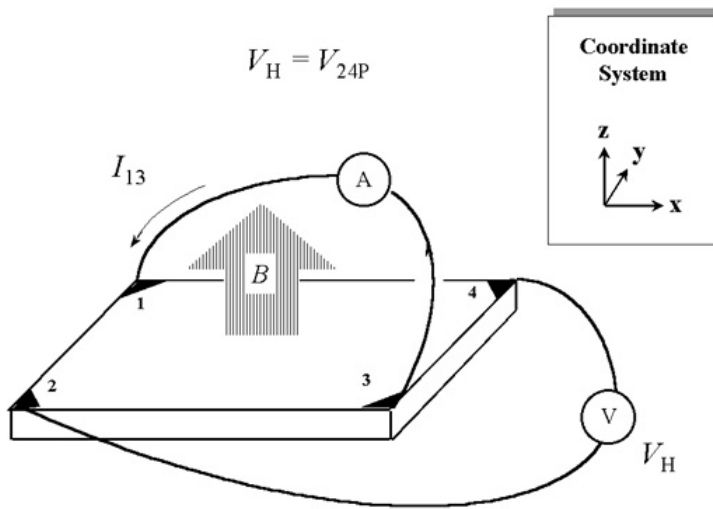


Figure 3

van der Pauw 법칙에서 홀효과의 목적은 홀전압 V_H 를 측정함에 의해 Sheet Carrier Concentration를 확인하고자 함이다. 그림 3에서와 같이 홀전압 측정은 일정한 전류와 일정한 자속밀도가 샘플에 수직으로 인가될 때 나타난다. 홀 전압을 측정하기 위해 전류(I_{13})는 1과3의 양단자에 인가되고 자속밀도가 전류와 수직으로 인가될 때 홀전압(V_{24})은 단자 2와 4 사이에 나타난다. 이 때 Sheet Carrier density(n_s)는 다음 수식에 의해 결정되어진다.

$$n_s = IB/qV_H$$

홀효과와 Resistivity를 측정할 때 고려되어야 하는 실질적인 면을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) Ohmic Contact 정도와 샘플의 크기
- 2) 샘플의 균일성과 정확한 두께의 결정
- 3) 정확한 온도의 측정
- 4) 접촉면의 전압-전류의 특성이 선형성
- 5) 명·암에 따른 광전도의 영향

주요평가 항목 및 평가방법
(HMS-3000에 적용된 수식을 기준으로 설명)

주요 평가 항목	평가 및 측정방법	비고
<p style="text-align: center;">홀계수(Rh) 시험</p>	<p>홀계수(Rh) $= D(V_{mbd2}-V_{mbd1} + V_{mbd1}-V_{mbd2})/B I$ (D = 샘플의 두께 V_{mbd2} = b와 d단자간의 홀전압 (자속밀도 인가시(N극=>S극) 역전류 상태) V_{mbd1} = b와 d단자간의 홀전압 (자속밀도 인가시(N극=>S극) 순전류 상태) V_{mbd1} = b와 d단자간의 홀전압(자속밀도 인가시(S극=>N극) 순전류 상태) V_{mbd2} = b와 d단자간의 홀전압(자속밀도 인가시(S극=>N극) 역전류 상태) B = 자속밀도 I = 인가 정전류)</p> <p>수식에서처럼 홀계수는 샘플에 인가되는 정전류의 수직방향으로 자속밀도를 인가한 후 발생하는 홀전압의 정확한 측정을 필요로 하며, 순방향과 역방향의 전류와 자속밀도의 극성변화에 따른 차를 기준으로 측정하여야 하며, 아울러 샘플의 정확한 두께 및 자속밀도 그리고 정전류의 정확한 인가 및 홀전압의 확인이 홀계수의 정밀도를 결정한다.</p>	<p>자속밀도 인가에 의해 샘플에 나타나는 홀전압의 정확한 인식이 중요함 (반도체의 경우 이동도가 큰 GaAs 뿐만 아니라 이동도가 작아 측정이 어려운 GaN의 측정이 가능하면 홀효과 측정장비의 정도가 뛰어나다고 판단됨)</p>
<p style="text-align: center;">캐리어 이동도(μ) 시험</p>	<p>$\mu = R_H / \rho$ (R_H = 홀계수, ρ = 저항율)</p> <p>반도체 샘플의 특성파악을 위해 일반적으로 적용되는 홀효과의 가장 중요한 측정요소 중 하나로서, 샘플 자체의 전기적인 특성을 나타내는 Resistivity와 자계 인가시 전자나 홀의 편향에서 나타나는 홀전압을 이용한 홀계수에 의해 결정되어진다. 반도체 샘플에서의 이동도는 제작된 샘플의 감도를 결정하는 가장 중요한 요소로서 반도체 웨이퍼의 도핑 후 특성을 확인하는 절차로서 반드시 검증하여야 한다.</p>	

주요 평가 항목	평가 및 측정방법	비고
비저항(ρ) 시험	$\rho = \frac{FD(V_{da2} - V_{da1} + V_{cd2} - V_{cd1})}{I}$ <p>(F = 샘플의 형태 보정계수 D = 샘플의 두께 V_{da2} = d 와 a단자간 전압 (자속밀도 비인가시 역전류 상태) V_{da1} = d 와 a단자간 전압 (자속밀도 비인가시 순전류 상태) V_{cd2} = c 와 d단자간 전압 (자속밀도 비인가시 역전류 상태) V_{cd1} = c 와 d단자간 전압 (자속밀도 비인가시 순전류 상태) I = 인가 정전류)</p> <p>수식에서처럼 비저항율은 자속밀도를 인가하지 않은 상태에서 샘플의 4단자 중 수평, 수직에 대한 단자간의 저항을 확인하여 측정하여야 하며 van der Pauw가 제안한 불균일한 샘플의 형태와 제작시의 도핑 정도에 따라 결정되는 샘플자체가 가지고 있는 특성을 파악하기 위한 방법 중 하나이며 샘플의 두께와 정확한 정전류의 인가 및 홀전압의 확인이 비저항의 정밀도를 결정한다.</p>	
농도(N) 시험	$N = \frac{1}{q R_H}$ <p>(q = 전하량 = 1.602×10^{-19} C R_H = 홀계수)</p> <p>반도체 샘플의 특성파악을 위해 일반적으로 적용되는 홀효과의 가장 중요한 측정요소 중 하나가 샘플내에 존재하는 전자나 홀의 개수로 표시되는 캐리어 농도이다. 이는 수식에서처럼 전자 1개가 가지고 있는 전하량과 로렌츠력에서 나타나는 홀계수에 의해 결정된다. 홀계수의 정확한 측정은 인가되는 정전류와 자속밀도에 의해 나타나는 홀전압의 정확한 측정에 의해 결정된다.</p>	정확한 자속밀도와 정전류에 의해 나타나는 홀전압만 확인하면 샘플의 형태에 의해 나타나는 저항률과 무관하게 자계를 인가했을 때 나타나는 홀전압을 이용하여 정확한 농도값을 확인

HMS-3000장비의 저가 및 소형화 사유

홀효과를 통한 샘플의 특성을 파악하기 위해서는 정밀한 정정류원의 공급, 정확한 홀전압의 측정 2000Gauss(최소치)이상의 자속밀도 및 온도의 변화가 필요하다. 특히 2000Gauss이상의 자속밀도를 샘플표면에 인가하기 위해서는 대형의 영구자석이나 전자석을 적용하여야 하므로 크기와 가격의 큰 부담을 가지고 있다.

또한 홀효과를 정확히 측정하기 위해서는 다음과 같은 인자도 같이 고려하여야 한다.

- 1) Ohmic Contact 정도와 샘플의 크기
- 2) 샘플의 균일성과 정확한 두께의 결정
- 3) 정확한 온도의 측정
- 4) 접촉면의 전압-전류의 특성의 선형성
- 5) 명·암에 따른 광전도의 영향

따라서, 홀효과를 통한 정확한 반도체 샘플의 전기적인 특성을 파악하는 것은 간단하 문제가 아니다.

최근, 전자석의 경우 코어의 재료 및 기술의 발달로 인해 크기가 많이 감소한 경향이 있으나 2000Gauss이상의 자속밀도를 인가하기 위해서는 여전히 큰 전류와 많은 Turn수 때문에 가격과 크기축소의 한계를 가지고 있다. 또한 영구자석의 경우, 크기의 축소와 사용의 편리성을 제공하나 자속밀도 변화의 한계성이 있으며 저온장치(액체질소 및 He 그리고 전자냉동 방식 등) 적용 시 온도유지를 위한 공간의 확보에 따른 자속밀도의 감소(거리의 제공에 반비례) 때문에 대형의 영구자석(고가)을 사용해야 하는 단점을 가지고 있다.

그리고 홀효과 측정 장치에서 샘플의 온도변화에 따른 특성파악의 필요성 때문에 고가의 온도조절장치(Cryostat)가 필요하나 실제 실험에서 가장 많이 적용되는 상온과 극저온의 의미부여가 되는 액체질소를 이용한 77 K의 온도를 제공함에 의해 기본적인 물성파악은 가능한 것으로 보여 지므로 간단하면서 소형의 액체질소를 담을 수 있는 용기의 제작이 자석의 크기와 가격을 결정할 수 있는 큰 요인이라 할 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 HMS-3000은 소형의 원통형 영구자석(직경 : 50mm, 두께 : 30mm)을 이용하여 이동이 간편하게끔 설계 제작하여 5100 Gauss의 자속밀도 인가장치를 제작하여 자속밀도 변화에 대한 샘플특성을 파악함과 동시에 N극=>S극, S극=>N극으로의 극성변화에 대한 홀전압을 파악하여 홀효과를 보다 더 정밀하게 확인할 수 있게 하였으며, 또한 특수 스템로폼을 이용한 액체질소용기(25×53×73 mm)는 초소형이면서도 액체질소가 유지시간이 15분이상 가능하게 제작되어 77 K상의 샘플에 대한 특성을 유효하게 확인할 수 있게 하였다.

그리고 홀효과를 위해 필수적인 정전류 인가장치와 홀전압의 표시장치를 자체기술로 설계 제작하여 비용의 절감을 가져왔다., 특히 NT 심사중 심사위원들의 조언을 제품에 반영하여 OP amp등에서 발생하는 잡음등을 제거함과 동시에 입력임피던스를 증가시켜 초기에 나타나는 오프셋 전압과 미세변동을 최소화시켜 홀전압의 보다 정밀한 표시가 가능하게 되어 측정결과(농도, 이동도, 홀계수, 저항율 등)의 정확성과 재현성이 개선되었다.