

홀효과에 관한 새 이론

강 대 현

전북 진안군 진안읍

samplemoon@korea.kr

초 록

홀효과에 관한 새 이론

1897년 에드윈 홀이 처음 발견한 홀효과는 전자운동만으로 설명이 되지않는 플러스 홀효과가 측정 되는데, 이를 설명하는 방법으로 양공(positive hole)개념이 도입되었으나, 이 개념은 물리학적으로 분명한 오류가 있다. 이에 핵물리학에서 사용되는 동위원소 원심분리 방정식과 고체 안의 원자 단위의 부피에서 전류전자의 분포가 로렌츠 힘에 의해 변화하고 준위차이를 유발하여 홀전압이 발생한다는 관점에서 새 이론을 제안한다.

분류 : 고체물리(홀효과)

1. 서 론

현재의 홀효과(Hall effect)이론은 시료 양단의 홀전압 발생을 전하량의 누적의 차이로 설명한다.

전류,자기장이 주어졌을 때 시료양단 간의 홀전압은 $U_H = E \cdot a$ 이며 $eE = F = e(v \times B)$ 로 한다.
(E 홀전기장, e 전하량, F 힘, v 전자의 유동속도, B 인가된 자기장, a 시료양단 거리)

로렌츠 힘 F에 의해 힘의 방향 시료한쪽에 전자가 누적되면서 힘의 평형을 이뤄 이것이 홀전기장 또는 홀전압으로 나타난다는 논리이다.

한편 고체에서 전류는 보통 전자로 이루어져 있어서 당연히 마이너스 홀전압이 나타나리라 예측이 되지만, 물질에 따라 양의 홀전압이 나타나는 경우 전자에 대응하여 “양공”이라는 개념을 쓰고 있다[1].

양공은 플러스 전하를 갖고 전자와는 반대방향으로 운동하는 것으로 간주하여 전하운반자로 “전자”와 “양공”이 사용되고 있다. “양공”은 주로 반도체의 가전자대의 전자가 빠져나간 상태로 설명하고 있다.

가전자대(valenc band)가 전자로 채워져 있을 때 가전자대 전체 전자의 알짜속도는 0이라고 하며

$$0 = v_1 + v_2 + \dots + v_n \tag{1}$$

위와 같이 표시한다. 가전자대에서 1개의 전자 v_2 가 빠져나가면 가전자대의 나머지 전자들의 속도 총합은 $-v_2$ 가 되고 이것을 “양공”속도라고 하며 전하 운반자(charge carrier)로 사용되고 있다.

금속과 같은 고체에 전자 캐리어가 사용될때 $eE = F = e(v \times B)$ 로부터 아래식을 유도한다.

$$\text{홀전압 } E = - \frac{1}{nec} (j B) \tag{2}$$

여기서 n 자유전자밀도, j 전류, B 자기장이다.

반도체와 같은 전자와 양공이 혼재되어 있다고 보는 고체인 경우에는

$$\text{홀전압 } E = \frac{1}{e} \frac{(pv_p^2 - nv_n^2)}{(pv_p + nv_n)^2} (j B) \tag{3}$$

을 사용한다. (여기서 p 양공밀도, n자유전자밀도, v_p 양공유동속도, v_n 전자유동속도)

2. 현재 이론의 문제점

가전자대의 전자가 빠져나간 상태가 앞에서 서술한 것처럼 $-v_2$ 라 하고 이것이 “양공”이라고 하고 있으나 실제 고체에는 전자만 있는게 아니고 포논 등이 포함되는 열역학적 열린계다.

전자와 포논(phonon)등이 혼합되어 있어 가전자대에 전자1개가 빠져나가도 여전히 알짜속도 합은 제로가 되는 것이 정상적인 물리상태이다

$$0=v_1+.....+v_n +...+(포논 운동량) + \tag{4}$$

이유는 간단하다.

전자,포논 등이 충돌과정을 거쳐 속도(운동량)합은 0이 되는 것이 엔트로피 증가법칙에 걸맞다.

전자들이 포논들과 충돌을 거쳐 마구잡이도가 증가하는 쪽으로 변화하는 것이 자연이치이다.

요약하면 가전자대에서 전자가 빠져나와도 남아있는 전자들은 포논과의 충돌을 거쳐 속도합은 보통 제로가 되는 게 자연스런 현상이다. 회로에 전류가 흐르다 전압을 끊으면 전류가 바로 제로가 되는 것과 같은 이치이다. 양공개념은 열역학 제2법칙에 맞지않다고 보는 것이다.

현재의 홀효과 이론이 소홀히 한 부분은 다이오드에서 알 수 있는데 P형 반도체와 N형 반도체에서 전자의 행동이 다르다는 점이다. 분명히 n형 반도체에서 전류전자는 주위의 원자에 고정된 전자들보다 에너지 준위가 높다. 반면 p형 반도체에서 전류전자의 에너지 준위는 주위의 고정된 전자들보다 에너지 준위가 낮다고 보는 것이 옳다고 여겨진다.

다이오드에서 전류전자가 n형 반도체 쪽에서 p형 반도체로 흐를때 빛을 방출한다는 사실이 이를 뒷받침해준다. 그러므로 홀효과 현상을 설명하려는 이론은 p형,n형 반도체에서 전류전자의 에너지 준위가 다르다는 점에 착안해서 논리 전개를 했어야 했다.

로렌츠 힘이 전류전자에 작용하여 한쪽으로 쏠리게 만드는데 에너지 준위가 낮은 전류전자는 힘이 쏠리는 방향으로 낮은 에너지 준위를 형성하고 에너지 준위가 높은 전류전자는 힘이 작용하는 방향으로 높은 에너지 준위를 형성하게 된다는 것이다. 이 점을 놓친 것이 아닌가 생각된다.

3. 새 이론

현재의 홀효과(Hall effect)이론이 전적으로 로렌츠 힘에 의한 전하 축적에 의해 홀전압이 결정되는 것이라 봤다면, 새 이론은 로렌츠 힘에 의해 물체 내의 원자 또는 분자단위 부피에서 등준위선을 따라 전자의 위치가 변하고 이로인하여 원자단위의 양단의 에너지 준위 차가 발생하며 이 차이가 시료 양단 사이의 모든원자에 걸쳐 합해져 홀전압을 결정하는 것으로 본다.

고체 내에서 원자에 고정된 전자의 최상위 준위에 비해 전류를 이루는 전자의 에너지 준위가 상대적으로 낮으면 플러스 홀효과가 나타난다고 보는 이유는 로렌츠 힘에 의해 그 힘의 방향으로 원자 또는 분자단위의 부피에서 전류전자의 분포확율이 높아지므로서 시료 양단 간에 홀전압 차가 발생한다고 보기 때문이다. 반대인 경우 마이너스 홀효과가 나타난다고 보는 것이다.

자기장(B)이 가해진 시료에서 전류를 이루는 전자는 로렌츠 힘($F=e(v \times B)$)이 작용하는데, 원자 단위의 부피에서 이 힘의 방향에 격자이온과 전자가 평행으로 위치할 때 이 전자와 격자이온사이의 준위차는 전자가 등준위선을 따라 움직여 위치한다면 원칙적으로 슈뢰딩어방정식에 의해 구할 수 있다.

$$\text{슈뢰딩거방정식 } H = \text{운동에너지}(\frac{p^2}{2m}) + \text{포텐셜에너지}(V(y)) \tag{5}$$

그러나 다수의 전자가 관련되는 현상을 슈뢰딩거방정식으로 나타내기는 아주 어렵다.

정성적으로 위 식과 같이 이론상 전자가 등준위선을 따라 단위 부피내의 어느 곳에 있던 격자이온과

전류(전도대) 전자가 이루는 준위는 같다고 볼 수는 있다.

전류를 이루는 전자의 로렌츠 힘 방향으로 분포경향에 대한 계산은 원자핵 동위원소 원심분리에 사용하는 방정식을 참고하여 아래와 같이 사용한다[2]

$$\text{분포확률} = (\exp(\frac{e(v \times B) \cdot a}{NkT}) - 1) \quad (6)$$

(여기서, e 전하량, v 유동속도, B 자기장, k 볼츠만상수, T 전자기체온도, a 시료양단거리, N 시료양단 사이 원자 한줄의 전도대전자수)

측정되는 홀전압은 (5),(6)식에서 얻을 수 있는데. 시료양단 사이에 있는 각 원자단위의 양단 준위값을 모두 더하여 홀전압을 나타낸다.

$$eV_h = - \sum_1^N (H_b - H_a) (\exp(\frac{e(v \times B) \cdot a}{NkT}) - 1) \quad (7)$$

(여기서, H_b 전도대의 전자준위, H_a 가전자대 전자 준위, V_h 홀전압)

(7)식은 보통 금속에서 전자기체의 온도는 전자볼트 수준으로 지수항은 $\frac{e(v \times B) \cdot a}{NkT} \approx 0$ 이다. 그러므로 아래와 같이 근사식으로 표시할 수 있다.

$$eV_h = - \sum_1^N (H_b - H_a) (\frac{e(v \times B) \cdot a}{NkT}) \quad (8)$$

1) 홀계수(Hall coefficient)

(8)식에서 유도하면 아래와 같다.

$$\text{홀계수 } R_h = - \frac{\Delta H}{kT} \cdot \frac{1}{nec} \quad (9)$$

(여기서 $\Delta H = \sum_1^N (H_b - H_a)/N$ 이고, $kT = \frac{2}{3} \langle \frac{p^2}{2m} \rangle$ 를 뜻하는데 $\langle \frac{p^2}{2m} \rangle$ 는 전도대 전자의 평균운동에너지, n 전도대의전자 밀도, e 전자전하량, c 광속)

2) 플러스 홀효과

새 이론은 플러스 홀효과가 $H_b < H_a$ 인 경우로 되어있다.

격자이온에 있는 가전자대의 전자의 준위가 전류(전도대) 전자보다 높아야 한다.

이는 밴드의 오버래핑(overlapping)으로 알려진 현상에서 가능하다. 어떤 이유에서 만들어지든 전도대가 밸런스밴드보다 준위상 낮은 경우에 플러스 홀효과가 나타난다.

3) 도체의 도전형(p형,n형) 특성원인 동질성확인

도체를 P형 또는 N형으로 분류에 있어서, 홀효과는 전하운반자의 부호가 P형과 N형을 결정하는 것으로 여기고 있고, 열기전력의 부호, 점접촉다이오드 정류특성으로 평가하여 얻는 것은 전자 준위 차이로 도전형을 구분하는 총 3가지 방법이 있다.

도체의 도전형을 평가할 때 서로 다르게 나오면, 열기전력으로 평가한 것을 믿는 경향이 있는 것으로 보인다.

새이론은 홀효과 부호가 시료양단에서 전자의 에너지 준위차이로 결정되므로 도체의 도전형을 확인하는 위의 3가지 방법이 동질성을 갖고 있어 각각 나름대로 정당하며, 측정대상 도체의 물리적 환경차이로 인해 발생하는 전자의 준위차이 때문에 다르게 나올수 있음을 명확하게 보여준다.

4. 결 론

홀효과에서 양공(positive hole)개념이 널리 사용되고 있으나 이 개념이 물리학적으로 무의미한 개념으로 판단되었다. 이런 이유로 플러스 홀효과를 설명할 다른 방안이 필요하였다.

로렌츠 힘이 고체내 전자에 직접적으로 일을 한다기 보다는 원자단위 부피에서 전도대의 전자는 원자를 중심으로 어느 방향에 있든 등준위선을 따라 움직인다고 보았고 로렌츠 힘은 단지 등준위선을 따라 움직이는 전자가 힘의 방향에 분포하는 경향을 높여주는 수단이며 이런 분포 경향이 원자양단의 준위 차이를 노출, 합산되어 시료양단에서 홀전압이 측정된다는 것이다.

로렌츠 힘에 의한 전도대 전자의 분포경향을 계산하는 방법은 핵물리의 동위원소 원심분리방정식을 사용하여 새로운 “홀효과이론”을 완성하게 되었다.

새이론은 홀전압은 원자 또는 분자단위부피에서 원자양단의 전자구름의 준위 차이로 발생하며 이 준위차이는 로렌츠 힘이 유발하는 것이고, 전하운반자 역할은 전도대의 전자만이 하는 것이며 가전자대의 어느 전자든 홀(hole)이 생기더라도 전하를 운반하지 않음을 보여준다.

가전자대는 전하를 운반되는 통로가 아님을 명확히 한 것이다.

새이론에 의해 ‘고체에서 전하운반자는 전자뿐이다’ 라고 말할 수 있게 되었다.

참고문헌

[1] Charles Kittel, *Introduction to Solid State Physics* 7th ed. (John Wiley & Sons Inc, New York, 1996), pp.206-207

[2] 박봉열외 3인 공역, *原子核物理學*. (集賢社, 1982), pp.531-533

Abstract

KANG, DaeHyeon

baeunmyeon office 567-883

samplemoon@korea.kr

New Theory on the Hall effect

In Hall Effect first found by Edwin Hall in 1897, Plus Hall Effect has been measured that is not explained with electron movement only. As a method to explain this effect, a concept of positive hall has been introduced but it has an obvious physical error. Thus, this researcher proposes a new theory from a viewpoint that distribution of conductive electrons is varied by Lorentz Force with isotope separation equation used in nuclear physics and in atom unit volume within solid and results in difference of level to generate Hall voltage.

Category: Solid Physics (Hall Effect)

PACS number : 72(Hall effect)

Keyword : Hall effect