

GaAs/AlGaAs에서의 Intersubband 산란이 2DEG 특성에 미치는 영향

이 주 인, 황 종 승, 임 국 형, 노 삼 규
한국표준과학연구원 진공연구실

GaAs/AlGaAs 이종접합구조의 계면에는 두 물질의 전자친화력(electron affinity)에서 기인한 포텐셜 우물내에 전자들이 갇히게 되어 2차원 전자기체(2-dimensional electron gas, 2DEG)가 형성된다. 2DEG는 AlGaAs 공간층(spacer layer)을 사이에 두고 AlGaAs doped 층의 이온화된 donor 와 분리되기 때문에, 극저온($\leq 4.2\text{K}$)에서 높은 전하이동도(electron mobility)를 갖는 특성을 보여주게 된다. 이때, 이온화불순물(ionized impurity) 산란, acoustic phonon 산란 및 intersubband 산란등은 극저온에서 2DEG의 전하이동도에 지대한 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 이온화불순물 산란은 극저온에서 2DEG의 전하이동도가 $\leq 10^5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 에서 가장 많은 영향을 미치고 있는데, 2DEG의 전하이동도를 결정함에 있어서 원격 이온화불순물(remote ionized impurity)이 가장 지배적인 변수가 된다. 원격 이온화불순물 산란은 공간층 두께 d_0 에 따라 변화하는데, d_0 가 증가함에 따라 이온화불순물 포텐셜에 대한 영향이 줄어들게 되어 원격 이온화불순물에 의한 전하이동도는 증가하는 경향을 보이게 된다. 또한 GaAs/AlGaAs 이종접합의 전자농도가 $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 정도를 넘게 되면 둘 이상의 subband에 전자가 채워지게 되고 이때, intersubband 산란이 영향을 미치게 되어 전하이동도가 30~50 % 정도 감소하게 된다.

본 실험에서는 intersubband 산란이 2DEG 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여, AlGaAs 공간층을 0~100 Å으로 변화시키면서 MBE로 성장한 GaAs/AlGaAs 이종접합구조를 이용하여 van der Pauw 형태의 Hall 소자를 제작하였다. Ohmic contact을 위하여 Au-Ge (12 %)을 800 Å 정도로 진공증착하고, 적외선 RTA (rapid thermal annealing) 장치에 고순도 수소 (6 N)을 흘려주며 400 °C에서 3분간 annealing 하였다. 300 K, 77 K, 4.2 K 및 1.5 K에서 각각 Hall 효과를 측정하였으며, 4.2 K, 1.5 K에서 초전도 자석(superconducting magnet, 14 T max.)이 내장된 액체 헬륨 저온장치($^4\text{He} / ^3\text{He}$ cryostat, 1.5 K / 0.5 K min.) (Oxford)를 이용하여 SdH (Shubnikov-de Hass) 진동을 측정하였다.

Table 1은 공간층의 두께가 커짐에 따라 SdH 진동(1.5 K)으로부터 얻은 첫번째 subband와 두번째 subband에 대한 2DEG 전자농도 및 Hall 효과로부터 구한 Hall 이동도의 변화를 보여주고 있다. 공간층이 증가할수록 두 subband에 대한 총 2DEG의 전자농도는 감소하는 경향을 보여주고 있고, 두번째 subband를 점유한 전자농도는 0 Å일 때를 제외하고는 공간층 두께가 20 Å, 40 Å, 60 Å일 때 첫번째 subband 보다 5~10 % 정도로 작은 값을 가지고 있음을 알 수 있다. Fig.1에서는 1.5 K에서 공간층의 변화에 따르는 Hall 이동도에 대한 실험값과 이온화불순물 산란으로부터 구한 이론값(실선)을 비교하였다. 공간층이 80 Å과 100 Å일 때 Hall 이동도의 실험값은 이론값과 잘 일치하고 있는 반면, 0~60 Å에서는 50 % 이상 낮은 값을 보여주고 있다. Englert 등은

Table 1. The 2-dimensional electron concentrations of first subband and second subband and Hall mobilities at 1.5 K

| SPACER LAYER THICKNESS (Å) | HALL MOBILITY ($\times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) | 2DEG CONCENTRATION ($\times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) | | |
|----------------------------|--|---|----------------|-------|
| | | FIRST SUBBAND | SECOND SUBBAND | TOTAL |
| 0 | 0.30 | 20.1 | 4.2 | 24.3 |
| 20 | 1.29 | 12.2 | 0.89 | 13.1 |
| 40 | 2.65 | 10.7 | 0.71 | 11.4 |
| 60 | 2.94 | 10.2 | 0.64 | 10.8 |
| 80 | 7.97 | 7.84 | — | 7.84 |
| 100 | 11.8 | 6.86 | — | 6.86 |

GaAs/AlGaAs 이중접합구조를 갖는 시료에 대하여 이중접합 계면에 평행한 높은 자기장을 인가한 후 Hall 이동도를 측정하였을 때, 자기장을 인가하지 않은 경우보다 Hall 이동도가 2배 증가함을 관측하였다. 그들은 이 현상을 계면에 평행하게 인가된 자기장이 subband들의 에너지 간격을 증가시키어 intersubband 산란이 현저히 감소하였기 때문으로 해석하였다. 즉, intersubband 산란이 개입되면 Hall 이동도는 50 % 정도 감소한다는 결론을 얻을 수 있다. 또한 Mori와 Ando는 GaAs/AlGaAs 이중접합구조에서 2DEG의 전자농도에 따라 전하이동도의 변화를 이론적으로 계산하였는데, intersubband 산란이 개입하기 시작하는 $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 정도의 전자농도를 가지는 시료에서는 전자들이 두번째 subband를 점유하면 전하이동도가 60 % 정도로 감소함을 보여주었다. 본 실험에서 사용한 GaAs/AlGaAs 이중접합구조의 공간층 두께가 60 Å보다 작으면 전자들이 두번째 subband를 점유하고 있음이 SdH 진동으로부터 확인되었다. (Table 1) 따라서, 60 Å이하에서 Hall 이동도가 intersubband 산란을 고려하지 않은 계산값보다 50 % 이상 감소하는 결과를 얻게 된 것은 intersubband 산란이 개입하게 되었기 때문이다. 전자농도가 $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 이상에서는 intersubband 산란이 개입하고 있음을 분명히 알 수 있으며, intersubband 산란이 개입되었을 때 ($d_0 \leq 60 \text{ Å}$)의 Hall 이동도 μ 는 공간층 두께 d_0 에 대하여 $\mu \sim d_0^{0.60}$ 인 관계식을 만족하고 있음을 알았다. Fig. 2는 여러가지 공간층에 대하여 얻은 총 전자농도와 Hall 이동도의 결과를 나타낸 그림으로 전자농도에 대한 Hall 이동도는 지수적으로 감소하고 있음을 볼 수 있다. Lee 등은 단지 원격 이온화불순물 산란만을 고려할 때 공간층의 변화에 대한 Hall 이동도 μ 는 전자농도 n_s 에 대하여 $\mu \sim n_s^{-2.5}$ 와 같은 관계가 있음을 이론적으로 계산하였다. Fig. 2의 실험값을 최소자승법으로 구한 Hall 이동도 μ 는 대략 $\mu \sim n_s^{-3.0}$ 와 같은 관계식을 얻을 수 있는데, Lee 등이 얻은 식보다 Hall 이동도가 급격히 감소하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 차이는 원격 이온화불순물 뿐만아니라 intersubband 산란이 Hall 이동도에 개입하기 때문에 나타난 결과이다. 특히 본 실험에 사용한 GaAs/AlGaAs 이중접합구조의 전자농도가 intersubband 산란이 개입되는 $\geq 8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 정도임을 보면, Hall 이동도가 Lee 등의 식보다 더 빨리 감소하는 원인으로 intersubband 산란에 의한 영향에 의한 것으로 생각할 수가 있다.

결론적으로, GaAs/AlGaAs 이중접합구조에서의 공간층 두께가 0 Å에서 100 Å으로 커짐에 따라 전자밀도는 감소 ($20 \sim 7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 1.5 K)하는 반면 Hall 이동도는 증가 ($0.2 \sim 12 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$, 1.5 K)하였다. 이온화불순물 산란만을 고려한 이론값과 비교한 결과, 공간층이 비교적 두꺼운 구조에서는 잘 일치하였으나 얇은 (60 Å 이하) 시료에서의 Hall 이동도는 이론값보다 약 50 % 정도 작음이 밝혀졌다. 이러한 차이는 시료의 2DEG 밀도가 $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 정도를 넘어서게 되면서 약 5~10 %의 전자가 두번째 subband를 점유하게 되고, intersubband 산란이 Hall 이동도에 영향을 미친 결과이다. 공간층 두께가 60 Å 이하인 시료에서는 intersubband 산란에 의한 Hall 이동도의 급격한 감소가 관측되었는데, 이때 공간층 두께 d_0 에 대한 Hall 이동도 μ 는 $\mu \sim d_0^{0.6}$ 인 관계를 가지고 있었다. 두 subband에 대한 총 2DEG 밀도 n_s 에 대한 Hall 이동도의 변화는 대략 $\mu \sim n_s^{-3.0}$ 의 함수관계로써 나타낼 수가 있었는데, 첫번째 subband만을 고려한 Hall 이동도의 이론식보다 급격한 변화율을 보여 주었다.

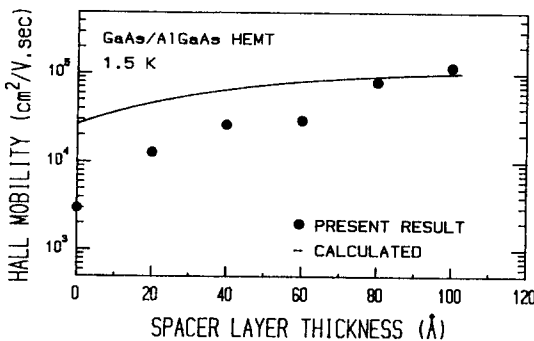


Fig.1 2DEG mobility as a function of spacer layer thickness at 1.5 K

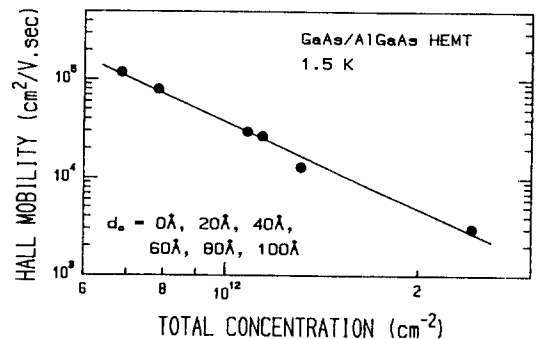


Fig.2 Dependence of Hall mobility on total 2DEG concentration at 1.5 K