

## GaAs/AlGaAs 양자세선의 전자기적 특성

이주인\* · 서정철 · 이창명 · 임재영\*

한국표준과학연구원, 대전 305-600, \*인제대학교 광공학과, 김해 621-749  
(논문접수일 : 2000년 8월 25일)

### Electro-magnetic properties of GaAs/AlGaAs quantum wires

Joo In Lee,\* J.-C. Seo, Chang Myung Lee, and Jae-Young Leem\*

Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon 305-600

\*Inje University, Kimhae 621-749

(Received August 25, 2000)

#### 요 약

GaAs/AlGaAs 이중접합구조 위에 split gate로 양자세선을 제작하여 Shubnikov de Haas 진동 및 양자 Hall 효과 측정으로 1DEG의 전기적 특성을 관측하였다. Gate 전압이 증가할수록 채널폭이 좁아짐에 따라 1D 특성이 나타났다. Edge state 수송 이론인 Landauer-Büttiker formula로부터 QHE plateau와 SdH 진동의 최소값이 나타나는 자기장 영역이 일치하지 않고 있는 현상을 명확히 규명하였다.

#### Abstract

We have presented the electrical properties of the quantum wire fabricated by split gate on GaAs/AlGaAs heterostructures by using the Shubnikov de Haas oscillation and quantum Hall effect measurements. We observed the 1D properties of the sample as increasing gate voltage. The misfit between quantum Hall plateau and minima in Shubnikov de Haas oscillations are interpreted as Landauer-Büttiker formula based on the edge state transport.

#### 1. 서 론

양자 Hall 효과(quantum Hall effect, QHE) [1]가 발견된 이후 이 현상을 이해하기 위한 많은 연구가 이루어졌다. Laughlin [2]은 원통형의 도체에 축 방향으로 자기장을 인가하였을 때 형성된 Aharonov-Bohm flux에 대응하여 흐르는 전류를 논의하면서, QHE가 파동함수의 long-range phase 불변성에 의한 초전류(supercurrent) 때문으로 설명하였다. 그러나 이러한 해석이 모순된 것은 아니지만 실제로 파동함수가 고정된 long-range phase를 유지하기 위하여 시료의 크기가 비탄성산란거리(inelastic scattering length)보다 작아야 하는 문제점을 안고 있다. 이같은 문제를

해결하기 위하여 제안된 이론이 시료의 경계에 형성된 edge state에 의한 수송(transport) 현상이다. [3]

Edge state 이론은 Landauer [4]가 이상적인 도체에서의 수송현상을 설명한 이론을 근간으로 하고 있다. 높은 자기장 영역에서 Fermi 에너지가 불순물에 의해 넓혀진(broadening) Landau 준위와 일치하였을 경우 도체 내부의 Landau 준위(bulk Landau level)가 전자가 반대편 edge state로 이동할 확률을 제공하게 되어 낮은 자기장 영역에서와 같은 결과를 주게 된다. 그러나 Fermi 에너지가 Landau 준위 사이에 존재하게 되면 edge state에서 skipping 운동을 하는 전자가 탄성산란을 일으키더라도 불순물 분포의 평균 거리가 높은 자기장에서의 cyclotron 반경보다 크다

고 한다면 edge에서 멀어지지 못하고 다시 edge state로 돌아와 같은 방향으로 이동하게 된다. 결국 자기장이 증가함에 따라 cyclotron 반경이 줄어들게 되고 전자가 불순물 산란에 의하여 거꾸로 이동할 확률을 줄이게 된다. 따라서 전자가 하나의 edge state에서 투과할 확률이 1이 되어 저항 값이  $R=(1/N)(h/e^2)$ 로 표시된다. 이 결과는 실제 2차원전자기체(two-dimensional electron gas, 2DEG)를 갖는 반도체 시료에서 관측된 QHE를 잘 설명해 주고 있고, 최근에는 1차원 및 0차원에서 나타나는 ballistic 수송, 변형된(anomalous) QHE, 단전자투과현상 및 AB 진동과 같은 새로운 양자현상을 설명하기 위한 이론으로 받아들여지고 있다.

## II. 실험

분자선증착장비(molecular beam epitaxy)로 성장한 GaAs/AlGaAs 이종접합시료를 사용하여 양자세선(quantum wire)에서의 자기수송(magnetotransport)을 관측하였다. Lithography 공정을 이용하여 양자세선을 제작하는 방법으로는 시료를 식각하는 방법, split gate를 이용하는 방법 등이 있는데, 본 실험에서는 양자세선을 split gate를 이용하여 제작하였다. 이때 제작공정은 photolithography 기술을 사용하였는데, 그 방법은 다음과 같다. bridge pattern을 형성한 뒤 다시 photolithography 공정을 반복한다. 이때 현상액(developer)에서 현상한 후, 진공증착기를 이

용하여 Ni과 Au 순으로 각각 50 Å과 300 Å 두께로 증착하고, 아세톤에 넣어 photoresistor 위에 올라간 Ni/Au를 제거하여 split gate를 형성하였다. 이때 split gate 사이의 간격을 1 μm, 너비를 20 μm로 하였다. 따라서 split gate에 전압을 인가하면 양자세선의 선포는 1 μm 이하가 되고 길이는 20 μm가 된다. Fig. 1은 bridge pattern에 split gate를 형성한 시료를 광학 현미경(1000 배)으로 관측한 사진을 보여주고 있다. 양자세선이 형성된 시료는 초전도 자석이 포함된 희석냉동기(dilution refrigerator)에 넣고 20 mK에서 전기적 특성을 측정하였다. 이때 측정을 위하여 lock-in amplifier 방법을 사용하였고 흘려준 전류는  $10^{-8}$  A로 하였다.

자기저항(magnetoresistance) 측정은 자기장을 일정한 방향으로 증가하면서 전류방향 및 수직 방향의 전압을 측정하는 방법이다. 극저온에서 저차원계(low-dimensional system)가 형성된 시료의 양자현상을 연구하는데 많이 이용되고 있는데, 그 대표적인 양자현상으로 양자 Hall 효과(quantum Hall effect, QHE)와 Shubnikov de Haas(SdH) 진동을 들 수 있다. [1]

자기저항 측정방법으로는 Hall 효과 측정장비를 이용한 직류전류방법과 lock-in amplifier를 이용한 교류전류방법으로 분류될 수 있다. 직류전류방법은 비교적 시료의 채널 폭이 큰 2차원 전자계에 이용되어 왔으나, 채널 폭이 작은 1차원 또는 0차원 전자계에서는 전류에 의한 열적 효과(heating effect)를 방지하기 위하여 1~10 nA 정도로 전류를 흘려주

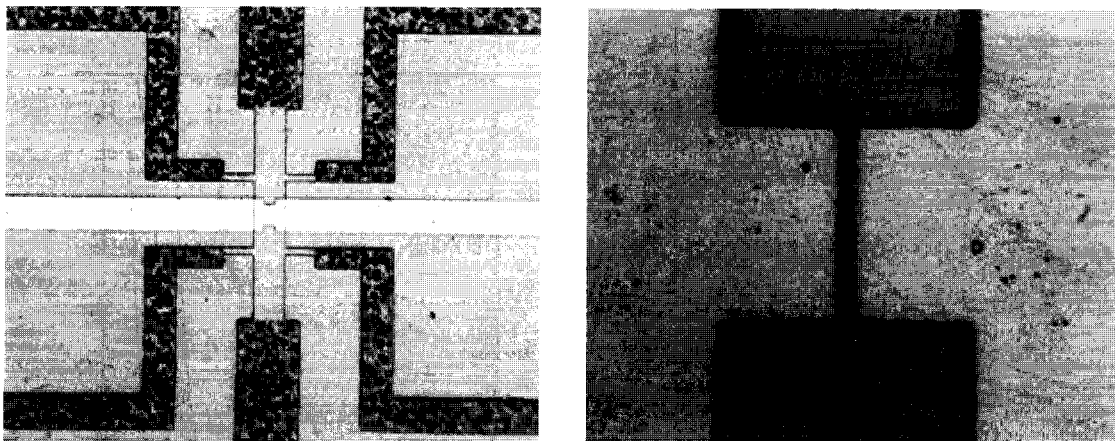


Fig. 1 Photographs for quantum wire formed by split gate on GaAs/AlGaAs HEMT structure.

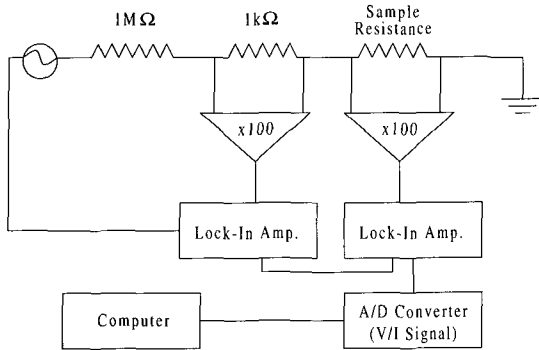


Fig. 2 Schematic diagram of magneto-resistance measurements by using the lock-in amplifier method.

어야 하기 때문에 직류전류방법은 측정 한계에 도달하게 된다. 따라서, 1차원 또는 0차원전자계가 형성된 시료의 경우 자기저항을 측정하기 위하여 교류전류방법이 반드시 요구된다.

Fig. 2는 lock-in amplifier(EG & G 5210)를 이용하여 자기저항을 측정하는 교류전류방법을 나타내는 개략도이다. 우선 1 MΩ 저항을 교류전원 전단에 연결하여 시료에 공급되는 전류가 일정하게 흐르도록 하였다. 하지만 자기장 변화에 따라 시료의 저항이 급격하게 변화하기 때문에 시료저항이 1 MΩ에 비하여 무시할 정도로 작지않게 변한다면 시료에 흐르는 전류값이 변할 수 있다. 따라서 시료에 흐르는 전류를 정확하게 측정하기 위하여 1 kΩ 저항을 시료와 직렬로 연결하고 이저항에 인가된 전압을 다른 lock-in amplifier를 사용하여 측정하였다. 1 kΩ과 시료에서 측정된 전압을 비교하여 직접  $R=V/I$  신호를 얻어 컴퓨터에 입력하였다. 이때 진동수가 20 Hz인 10 V 교류전원을 사용하여 시료에 흐르는 전류가 10 nA를 넘지 않도록 하였다.

### III. 결과 및 논의

Fig. 3은 0 - 7.6 T로 자기장을 다르게 인가한 뒤 gate 전압에 대한 시료의 저항을 측정한 결과를 보여준다. 자기장을 인가하지 않았을 때 gate 전압이 증가함에 따라 양자세션의 저항이 증가하고 있음을 볼 수 있는데, 이것은 split gate에 의하여 gate 아래에 형성된 2DEG가 depletion되고 채널 폭이 줄어들어 나타나는 현상으로 split gate가 올바르게 작동되고

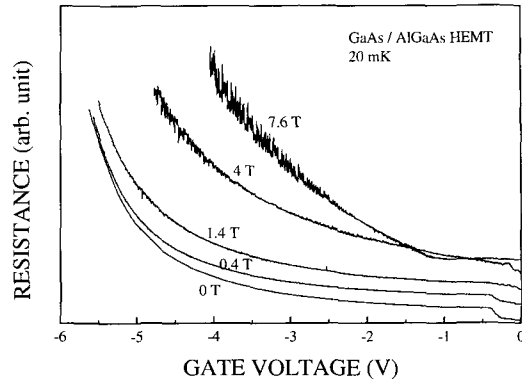


Fig. 3 Magnetic field dependence of the resistance as a function of gate voltage at 20 mK.

있음을 보여주고 있다. Split gate가 작동되는 전압은 그림에서 보듯이 -0.4 V이다. 자기장 인가되면 gate 전압에 대한 양자세션 저항이 더욱 급하게 상승하고 있음을 볼 수 있다. Split gate에 의한 포텐셜을

$$V(x) = \frac{1}{2} m^* \omega^2 x^2 \quad (1)$$

와 같이 조화진동(harmonic oscillator) 포텐셜로 가정하면 자기장이 인가되었을 때 양자세션의 전자에 대한 Hamiltonian은

$$H = \frac{p_x^2}{2m^*} + \frac{1}{2} m^* \omega^2 (x - X_0)^2 + \frac{p_y^2}{2m^*(B)} \quad (2)$$

이 된다. 여기서  $m^*$ 는 전자의 유효질량(effective mass),  $\omega = (\omega_0^2 + \omega_c^2)^{1/2}$ ,  $\omega_c = eB/m^*$ ,  $X_0 = (\hbar k/eB)(\omega_c^2/\omega^2)$ ,  $m^*(B) = m^* \omega^2/\omega_0^2$ 이다. 따라서 이 Hamiltonian의 고유에너지(eigenenergy)는

$$E_{n, k_y} = \hbar \omega (n + \frac{1}{2}) + \frac{\hbar^2 k_y^2}{2m^*(B)} \quad (3)$$

와 같이 표현된다. 이때  $m^*(B)$ 는 자기장이 증가할수록  $m^*(0)$ 보다 더 커지게 되므로 Fig. 3에서 보는 바와 같이 gate 전압에 대한 양자세션 저항의 상승효과가 더 커지게 된다. 자기장을 1.4 T와 4 T를 인가하였을 때 gate 전압이 작은 영역에서 작은 진동이 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 식 (3)로부터 이해될 수 있는데  $\omega_0$ 의 증가(gate 전압을 증가시키면  $\omega_0$ 가 커짐)는 마치  $\omega_c$ 를 증가시킨 결과와 같게 된

다. 즉, 일반적으로 2DEG에서  $\omega_c$ 를 증가시켰을 때 SdH 진동이 나타나는 현상과 유사하게 된다. 하지만 7.6 T의 자기장을 인가한 경우는 진동현상이 없이 저항이 0인 영역이 약 -1 V까지 편평하게 계속되고 있음을 볼 수 있다. 이 시료의 자기저항 곡선으로부터 알게 되겠지만 7.6 T는 SdH 진동이 0이 되는 지점이다. SdH 진동은  $1/B$ 에 대하여 주기적인 함수관계가 있으므로 자기장이 클 때 SdH 진동이 0이 되는 영역은 매우 넓어진다. 따라서 7.6 T에서  $\omega_c$ 를 증가시켜도 SdH의 0인 영역을 넘지 못하여 편평한 영역이 계속되게 된다.

Fig. 4는 각 gate 전압에 대한 양자세선의 QHE(쇄선)와 SdH 진동(실선)을 보여준다. QHE는 gate 전압이 0 V일때의 곡선을 보여준다. Gate 전압이 0 V일때 2DEG에서 나타나는 전형적인 QHE와 SdH 진동이 관측되었다. Gate 전압이 증가할수록 SdH 진동의 자기저항이 증가하였음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 4의 결과와 일치하는 것으로 gate 전압에 의하여 채널 폭이 감소하였기 때문이다. 전체적으로 gate 전압에 대한 SdH 곡선이 낮은 자기장 영역(<2 T)에서는 큰 변화를 나타내고 있다. 우선 2DEG에서 filling factor  $\nu=2$  일때 SdH 진동이 최소가 되는 자기장 영역은 7.5~8 T인데 반해 gate 전압이 증가할수록 낮은 자기장 쪽으로 이동하여 gate 전압이 -3 V일때 6.5 T에서 SdH 진동이 최소가 됨을 알 수 있다. 또한 0 V일때 SdH 진동의 최소값이 0이지만 -2 V 이상에서는 유한한 저항 값을 갖게 되고 그 값이 증가하고 있음을 알 수 있다. 2DEG에 자기장이 인가되면 고유에너지는

$$E_n = \hbar \omega_c (n + \frac{1}{2}) \quad (4)$$

와 같이 불연속한 Landau 에너지로 분기되고, 상태 밀도는

$$D(E) = \frac{eB}{\pi} \hbar \sum_n \delta(E - E_n) \quad (5)$$

과 같이 에너지에 대하여  $\delta$  함수관계를 갖게 된다. 이때 시료 내의 불순물이나 결함에 의하여 Landau 준위의 중앙에는 extended state가, 가장자리에는 localized state가 존재하게 되어 EF가 localized state에 존재할 때 SdH 진동의 최소값이 0이 된다. 하지만 gate 전압에 의하여 시료가 양자세선 (1DEG)으로 변하게 되면 고유에너지는 식 (3)와 같이 바뀌게 된다. 따라서 SdH 진동의 최소값은  $\omega_c$ 의 영향만큼 낮은 자기장 영역으로 이동하게 되고, [5] extended state가 항상 존재하게 되어 SdH 진동의 최소값이 0이 되지 못한다. SdH 진동이 낮은 자기장 쪽으로 이동하는 또 한가지 이유는 채널폭이 좁아지면서 2DEG의 밀도가 줄어드는 현상 때문이다. [6,7]

이와 관련한 흥미있는 현상은 gate 전압에 의하여 채널 폭이 좁아지면서 SdH 진동이 최소가 되는 자기장 영역과 QHE의 plateau가 나타나는 자기장 영역이 다르게 나타난다는 사실이다. 기존의 QHE를 설명해 주는 Landau 준위의 extended state와 localized state 이론으로는 이와 같은 현상을 설명할 수 없다. Landauer-Bütikker formula에 의하면 probe i에 흐르는 전류는

$$I_i = \frac{e}{h} [(\nu_i - R_{i,i})\mu_i - \sum_{j \neq i} T_{i,j}\mu_j] \quad (6)$$

가 된다. 여기서  $\nu_i$ 는 probe i에서 edge stat의 채널 수이고  $\mu_i$ 는 probe i에서 화학 포텐셜(chemical potential)이다. 또한  $R_{i,i}$ 는 probe i에서 입사된 캐리어가 probe i로 반사 (reflection)될 확률을 나타낸다. 식 (6)을 적용하여 QHE와 SdH 진동을 나타내는 자기저항  $R_{xy}$ 와  $R_{xx}$ 는

$$R_{xy} = \frac{h}{e^2} \frac{1}{M + T^n} \quad (7)$$

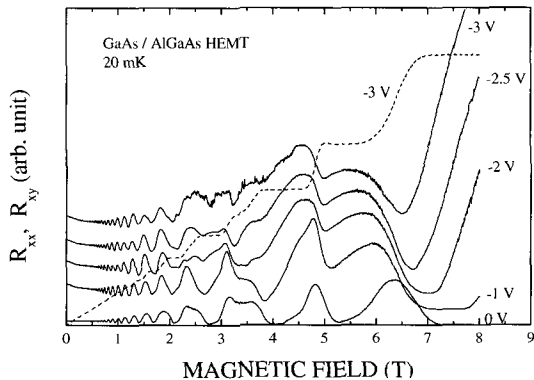


Fig. 4 QHE and SdH oscillation as a function of magnetic field with different gate voltage.

$$R_{xx} = \frac{h}{e^2} \frac{1}{T} - R_{xy} \quad (8)$$

으로 표현된다. 여기서  $T''=T'/(2-T')$ 이고,  $T$ 는 양자세선에서의 전체 투과확률이고,  $T'$ 은 probe에서의 전체 투과확률이며,  $M$ 은 양자세선에 형성된 edge state의 채널 수이다. 양자세선에서  $T$ 와 probe에서  $T'$ 이 다른 이유는 서로 채널폭이 다르기 (양자세선의 채널폭은  $1 \mu\text{m}$  보다 작고 probe 폭은  $20 \mu\text{m}$ 이다.) 때문이다. 이때  $R_{xy}$ 는  $T'$ 에만 의존하게 되고  $R_{xx}$ 는  $T$ 와  $T'$ 에 의하여 결정된다. 따라서  $R_{xy}$ 의 plateau 영역과  $R_{xx}$ 의 최소영역이 자기장이 다른 곳에서 나타나게 됨을 알 수 있고, 이것은 실험결과와 잘 일치하고 있다.

이 시료에서는 채널폭이 submicron 선폭보다 크기 때문에 IDEG에서 나타나는 universal conductance fluctuation(UCF)이나 Aharonov-Bohm 효과는 관측되지 않았지만, gate 전압에 의하여 채널폭이 좁아지고 있음을 확인하였고 이로부터 2DEG 특성과 구별되는 IDEG에서의 흥미로운 현상을 관측할 수 있다.

#### IV. 결 론

결론적으로, 본 연구에서는 GaAs/AlGaAs 이중접합구조 위에 split gate로 양자세선을 제작하여 자기저항 측정을 하였다. Gate 전압이 증가할수록 채널

폭이 좁아짐에 따라 1D 특성이 나타났다. 우선 SdH 진동이 변형되었고 최소값이 나타나는 위치가 낮은 자기장 쪽으로 이동하고 있었으며 그 최소값이 높은 자기장 영역에서 0이 되지 않고 유한한 값을 보여주었다. 이것은 gate에 의하여 주어진 구속 포텐셜 때문에 조화진동이  $\omega_c$ 에서  $(\omega_o^2 + \omega_c^2)^{1/2}$ 으로 달라져 나타난 이론적인 해석과 일치하였다. 또한 QHE plateau와 SdH 진동의 최소값이 나타나는 자기장 영역이 일치하지 않고 있는데 edge state 수송 이론인 Landauer-Büttiker formula로부터 명확히 규명하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] K. van Klitzing, G. Dorda, and M. Pepper, Phys. Rev. Lett. **45**, 494 (1980).
- [2] R. B. Laughlin, Phys. Rev. B **23**, 5632 (1981).
- [3] M. Büttiker, Phys. Rev. B **38**, 9375 (1988).
- [4] E. H. C. Parker, *The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy*: Plenum: New York, 1985.
- [5] K.-F. Berggren, G. Roos, and H. van Houten, Phys. Rev. B **37**, 10118 (1988).
- [6] S. Nakata, Y. Hirayama, S. Tarucha, and Y. Horikoshi, J. Appl. Phys. **69**, 3633 (1991).
- [7] S. K. Noh, J. I. Lee, G. Ihm, J. H. Oh, K. J. Chang, and S. J. Lee, Superlatt. Microstru. **16**, 187 (1994).