

GaAs/AlGaAs 이종접합된 양자홀 소자의 전기적 특성

The Electrical Characterization of the Quantized Hall Device with GaAs/AlGaAs heterojunction structure

유광민*, 류제천, 한권수, 서경철**, 임국형

(Yu kwang min*, Ryu je cheon, Han kwon soo, Seo kyung chul**, G. lhm)

Abstract

The Quantum Hall Resistance(QHR) device which consists of GaAs/AlGaAs heterojunction structure is used for the realization of QHR Standard based on QHE. In order to characterize electrical contact resistances and dissipations of the device, it is slowly cooled down for eliminating thermal shock and unwanted noise. Then, the two properties are measured under 1.5 K and 5.15 T. Contact resistances are all within 1.2 Ω and longitudinal resistivities are all within 1 m Ω up to DC 90 μ A. The results mean the device is operated well to realize the QHR Standard. To confirm it, the QHR Standard having the device is compared using a direct current comparator bridge with a 1 Ω resistance standard which the calibrated value is known from QHR standards maintained by other countries. The difference between them is agreed well within measurement uncertainty. It is thus considered that the properties of the device is estimated well and has good performance.

Key Words: Quantum Hall device, Contact resistance, Dissipation, Longitudinal resistivity

1. 서 론¹⁾

양자홀 소자는 양자홀 효과(QHE, Quantum Hall Effect)¹⁾에 기초한 양자홀 저항값을 내기 위하여 만들어진 반도체 소자로서, Si-MOSFET와 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 이종접합 구조가 대표적으로 사용되고 있다. QHE는 반도체 소자의 반전층에 생기는 2차원 전자가스(2DEG)에 의하여 일어난다. 2DEG는 트랜지스터의 제작기술의 발달로 인하여

1960년 중반에 이미 실현되었고,^{2),3)} 그 후, Si-MOSFET에서 2DEG를 형성하는 기술들이 꾸준히 연구되었으며, 그러한 기술을 바탕으로 1980년 2월 5일 저녁에 Klaus von Klitzing이 4 K 이하의 극저온과 10 T 이상의 고자장하에서 Si-MOSFET 소자의 전기수송 성질을 연구하던 중 QHE를 발견하게 되었다.⁴⁾ QHE에 기초한 전기저항표준은 시간에 따라 그 저항값이 변하지 않기 때문에 측정 전문가(metrologist)들은 그 효과를 전기저항 표준에 활용하기 위하여 매우 정열적인 활동을 하였다. 그런 활동의 결과로 양자홀 저항의 측정불확도는 1980년에 10⁻⁶ 정도였던 반면, 1990년 이후 von Klitzing 상수 R_{K-90} 을 저항단위의

* 한국표준과학연구원 전기.자기그룹
(대전시 유성구 도룡동 1번지)
Fax: 042-868-5018
E-mail: kmyu@kriss.re.kr
** 충남대학교 물리학과

표준값으로 사용하면서부터, 양자홀 저항표준은 최고 1×10^{-8} 이하의 측정불확도를 가지는 국가 저항표준으로 자리잡았다.^[5]

QHE의 발견은 Si-MOSFET 소자를 사용하여 얻어졌으나 최근에는 홀저항 안정성이 더 좋고 상대적인 홀 이동도가 더 큰 GaAs/Al_xGa_{1-x}As가 양자홀 저항표준에 널리 사용되고 있다. 그림 1과 같은 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 이종접합 구조를 가지는 양자홀 저항 소자에서 Hall 저항 R은 전류 I(x 방향)와 자기장 B(z 방향)에 수직인, y 방향의 2DEG 소자 양단에서 측정된 Hall 전압 U_H의 비이다. 전하밀도 n_s를 가지는 2DEG에 대하여 고전적 홀 전압 $U_H = (B/n_s e)I$ 이다. 만일 완전히 찬 에너지 준위의 수가 i이면, $n_s = iN = iBe/h$ 이고

$$R_H(i) = (h/ie^2) = R_K/i, \quad i=1,2,3,\dots \quad (1)$$

여기서, R_K는 von Klitzing 상수로서 약 25812.807 Ω이고, R_H(i)는 양자홀 저항을 나타낸다. 이 결과에서 보면, 양자홀 저항은 소자 구조와 물질에 무관하고, 단순히 두 개의 물리 기본 상수의 비에 비례한다. 그림 1은 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 이종접합 형태(위 그림)에 대하여 BIPM(국제도량형국)에서 행해진 i=2와 i=4 plateaus에서의 양자홀 저항 측정결과를 나타낸다. 그림 1의 위쪽 곡선은 자기장의 함수로 나타낸 transverse Hall 저항 R_H(R_{xy})로서 양자홀 저항 plateaus가 분명히 나타나 있다. 그림 1의 아래 쪽 곡선은 longitudinal 저항 R_{xx}을 나타내고 $\rho_{xx} = R_{xx}(W/L)$ 표현에 의해서 longitudinal 비저항과 관계 지워진다. 여기서 W와 L은 각각 유효 샘플 넓이와 R_{xx}의 4단자 측정에서 사용된 전압 전극들 사이의 샘플의 길이에 따른 거리이다. 이 같은 구조의 소자에 대하여 최적의 양자홀 저항값은 자기장이 가해졌을 때, 2DEG에 대한 전기적 접촉저항이 100 mΩ 이하이고, R_{xx}가 0.1 mΩ 이하로서 dissipation이 없는 경우이다.^[5]

2. 소자의 특성 측정 장치 및 방법

본 실험에 사용된 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 소자는 joint BIPM/EUROMET/BNM project에 의하여 만들어진 폭 0.4 mm, 길이 2.4 mm의 표준형 LEP type이었다. 이 샘플들은 5.15 T와 1.5 K에서 양자

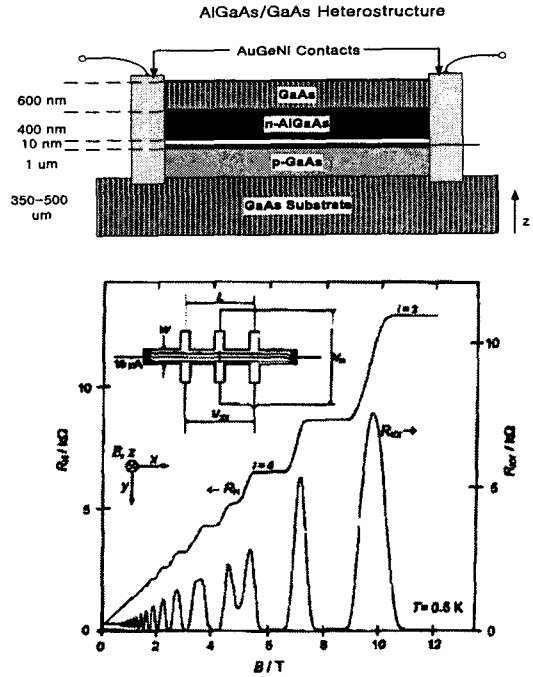


그림 1 LEP 형 양자홀 저항 소자의 R_H와 R_{xx}
Fig. 1. R_H and R_{xx} of LEP type QHR device

저항값이 i=4에서 R_H(4), 즉 6 453.20 175 kΩ을 가진다. 또한, 1.5 K까지의 냉각을 위한 저온장치는 Oxford 사의 cryo - magnetic system (S12/14L-40-13)을 사용하였다. 소자의 전류와 전압단자들의 접촉패턴과 접촉저항 측정 및 dissipation 측정장치는 다음 그림 2에 나타내었다.

냉각절차와 접촉저항과 dissipation의 측정절차는 CCEM Guideline을 따랐다.^[6] 접촉저항의 경우, 측정대상의 접촉단자(j)와 두 전류단자 중 하나 사이에 0.5 μA의 전류를 흘리고, j와 같은 홀전압을 가지는 이웃한 접촉단자사이의 전압을 측정한다.^[7] 이때, 소자가 dissipation이 없는 상태라면 두 전류단자 사이의 전압은 수십 nV 이하로서 거의 무시되므로 순수하게 측정단자의 접촉저항만 측정된다. 또한, dissipation 측정은 두 전류단자 사이에 양자홀 저항 측정시에 흘려주는 전류와 같은 전류를 흘려주고, 그림 2의 2번과 4번 전압단자 사이 혹은 6번과 8번 전압단자 사이의 longitudinal 전압을 측정하면 된다.

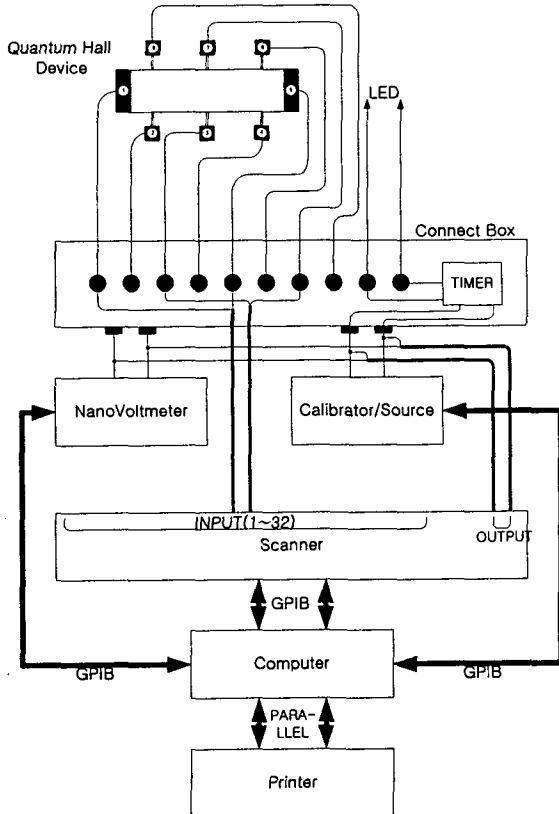


그림 2. 양자홀 소자의 접촉저항 및 dissipation 측정장치
 Fig. 2. Experimental apparatus for contact resistances and dissipations of the QHR device

3. 측정결과 및 논의

100 μA 까지의 전류를 소자에 흘려 측정한 각 단자들의 dissipation(longitudinal resistivity) 측정결과는 표 1에 나타내었고, 양자홀 저항 측정에 사용된 전류(1번과 5번) 및 전압단자(3번과 7번)들의 접촉저항은 모두 1.2 Ω 으로 나타났다.

앞서 이야기 된 바와 같이 접촉저항이 0.1 Ω 이하가 되어야 이상적인 소자가 되지만, 1.2 Ω 을 가지더라도 잡음이 약간 더 커지고, 1×10^{-7} 수준의 측정정확도에는 영향을 미치지 않는다. 또한, 일반적으로, longitudinal resistivity가 0.1 m Ω 이하인 경우 dissipation에 의한 양자화(Quantization) 정확도는 1×10^{-8} 혹은 그 이하이며, 1 m Ω 이하이면

표 1. 양자홀 소자의 longitudinal resistivity(ρ_{xx})
 Table 1. longitudinal resistivity(ρ_{xx}) of the QHR device

current (μA)	longitudinal resistivity(ρ_{2-4}) (m Ω)				
	9/6 (+B)		9/7 (+B)		9/7 (-B)
	before	after	before	after	after
30	0.33	0.27	0.20	<0.4	<0.08
50	0.60	0.32	0.32	0.40	0.08
70	0.71	0.34	0.48	0.46	0.23
90	0.89	0.48	0.62	0.52	0.51
100	1.30	0.60	0.84	0.60	0.82

1×10^{-7} 이하가 된다.^[5] 이러한 두 특성을 측정한 결과가 양자홀 저항 측정정확도에 사실상 영향을 주지 않음을 확인하기 위하여 양자홀 저항 측정정확도가 이미 1×10^{-8} 수준인 외국으로부터 교정을 받은 1 Ω 저항표준기와 이 실험에 사용된 양자홀 소자로부터 나오는 양자홀 저항값과 비교를 하였다. 이때 비교측정에 사용된 장비는 Guideline사의 automatic DCC(Direct Current Comparator) bridge로서 비교정확도는 6×10^{-8} 이하이다. 비교측정은 양자홀 저항과 1 k Ω 표준저항을 비교하고 다시 10 : 1의 비율로 내려서 1 k Ω 과 1 Ω 을 비교하였다. 다음 그림 3은 양자홀 저항과 1 k Ω 의 비교측정 결과를 전류에 따라 나타낸 것으로서, 전류에 따른 양자홀 저항 소자의 안정성이 측정정확도 1×10^{-7} 수준에서 유지되고 있음을 알 수 있다.

외국에서 받은 1 Ω 저항값은 1.000 011 35 Ω 이고,^[8] 위의 절차로 측정한 결과를 정리하면 그 평균값이 1.000 011 43 Ω 으로 얻어졌으므로^[9] 두 결과의 차이는 0.08×10^{-8} 로 나타났다. 따라서, 이 실험에 사용된 소자의 접촉저항과 dissipation 특성은 측정정확도 1×10^{-7} 수준에서 양자홀 저항값에 아무런 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 이들 특성 이외에도 소자를 1.5 K로 내리는데 필요한 냉각속도는^[6] 소자의 접촉특성과 dissipation 특성에 직접적으로 영향을 미치는 중요한 인자로서 보통 수 K/분 정도로 생각하고 다시 온도를 상온으

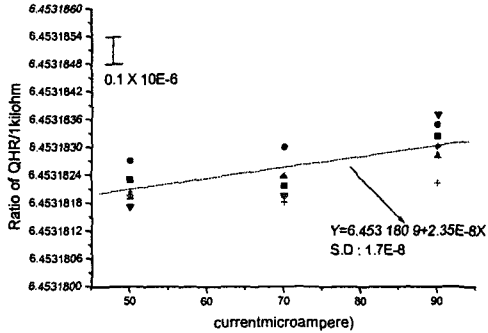


그림 3. 전류에 따른 QHR/1 kΩ 비율의 변화
 Fig. 3 Ratio variation of QHR/1 kΩ with currents

로 올릴 때는 자연냉각을 하면 소자의 상태는 잘 보존되었다. 본 실험에서 빨리 냉각했을 경우와 빨리 상온으로 올렸을 경우에는 접촉저항과 longitudinal resistivity가 훨씬 커서 잡음에 의한 측정편차가 10^{-6} 이상으로 컸었다. 이 상태에서 회복하기 위하여 자연적으로 상온으로 올려서 수일을 두었더니 다시 원래의 소자상태를 유지하였다.

5. 결론

양자홀 저항표준에 사용되는 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 이중접합된 상용 양자홀 소자의 중요한 두 특성인 접촉저항과 dissipation 특성을 1.5 K의 극저온과 약 5 T의 고자장에서 살펴보았다. 상온에서 1.5 K 까지 서서히 냉각하여 열 충격을 피하였고, 측정 시스템 전체에 대하여 전기적 차폐를 하여 원치 않는 전기적 잡음을 피하므로써, 접촉저항과 dissipation이 최소로 유지된 상태에서 접촉저항은 1.2 Ω으로 측정되었고, 소자의 양자화에 결정적인 dissipation이 순 방향과 역 방향의 자기장에 대하여 1 mΩ 이하로 나타났다. 이러한 소자의 성능을 확인하기 위하여 양자홀 저항과 1 Ω 표준저항을 비교하였고, 전체 측정정확도 이내에서 그 차이값이 일치하였으므로 잘 양자화되어 있음을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Landwehr G, "The discovery of the quantum Hall effect," Metrologia, Vol. 22, 118-127, 1986.
- [2] A B Fowler, F F Fang, W E Howard and P J Stiles, "Magneto-oscillatory conductance in silicon surfaces," Phys. Rev. Lett., Vol. 16, 901-903, 1966.
- [3] S Kawaji, T Igarashi and J Wakabayashi, "Quantum galvanometric effect in n-channel silicon inversion layers under strong magnetic fields," Prog. Theor. Phys. Suppl., vol. 57, 176-186, 1975.
- [4] Klaus von Klitzing, "The quantum Hall effect," Rev. Mod. Phys., vol. 58, 519-531, 1986.
- [5] B Jeckelmann and B Jeanneret, "The quantum Hall effect as an electrical resistance standard," Rep. Prog. Phys. vol. 64, 1603-1655, 2001.
- [6] F. Delahaye, "Technical Guidelines for Reliable measurements of the Quantized Hall Resistance", Metrology 26, 63-68, 1989.
- [7] B Jeckelmann and B Jeanneret, "Influence of the Voltage Contacts on the Four-Terminal Quantized Hall Resistance in the Nonlinear Regime," IEEE IM., vol. 46, No. 2, 276-280, 1997.
- [8] Kwang Min Yu, Young Tae Park, Kwon Soo Han, Kyung-Hwa Yoo, "Effect of Temporary Temperature Change on Drift Rate of KRIS Legal Ohm," CPEM 98 Digest, THPA3-4, 524-525, 1998.
- [9] Kwang Min Yu, et al, "Calibration Procedure of 1 Ω based on a QHR standard using a DCC bridge," KRIS Calibration Procedure Document (Draft) C-13-4-0010-2001, pp. 1-19, 2001.