

자발 성장법으로 성장된 단결정 Bi 단일 나노선의 정상 자기 저항 특성

심우영 · 김도현 · 이경일 · 전계진 · 이우영*

연세대학교 신소재공학과, 서울 서대문구 신촌동 134, 120-749

장준연 · 한석희 · 정원용

한국과학기술연구원, 서울 성북구 하월곡동 39-1, 136-791

Mark Johnson

Naval Research Laboratory, Washington DC 20375, U.S.A.

(2007년 8월 6일 받음, 2007년 8월 23일 최종수정본 받음)

단결정 Bi 단일 나노선의 정상 자기 저항(ordinary magnetoresistance) 특성을 2~300 K에서 4 단자법으로 측정하였다. $I-V$ 측정을 통해 전기적 오믹 형성을 확인하였고, 2 K과 300 K에서 비저항이 각각 1.0×10^{-4} 와 $8.2 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 로 측정되었다. 수직(transverse) 및 수평(longitudinal) 자기저항비(MR ratio)가 110 K와 2 K에서 각각 현재까지 보고된 MR 중 가장 큰 2496%와 -38%로 관찰되었으며, 이 결과는 자발 성장법으로 성장된 Bi 나노선의 결정성이 매우 우수한 단결정임을 증명한다. simple two band(STB) 모델을 통해 Bi 나노선의 수직 및 수평 정상 자기 저항(OMR) 거동이 온도에 따른 페르미 준위(Fermi level)와 밴드 겹침(band overlap)등의 전자 구조 변화 및 운반자 농도 변화로 잘 설명된다.

주제어 : 단결정 Bi 나노선, 정상 자기 저항(OMR), simple two band 모델

I. 서 론

반금속(semimetallic) 비스무스(Bi)는 흥미로운 운반자 수송 특성과 더불어 고효율 열전 재료로서 과거 수 십년 동안 많은 연구가 진행되어 왔다[1-10, 13-15]. 특히 Bi는 알려진 물질 중 가장 작은 전자 유효질량($\sim 0.001m_0$)을 가지고 있어 Bi 나노선에서 양자구속효과(quantum confinement effect)를 쉽게 관찰할 수 있다[1-3]. 뿐만 아니라 본 연구팀은 Bi(BiPb) 박막에서 스핀 확산 거리(spin diffusion length)가 235 μm 을 확인[4]하였으며 이에 대한 후속 연구로서 Bi 나노선을 통하여 일차원(quasi one-dimensional) 구조에서 새로운 스핀 주입 현상을 확인할 수 있을 것으로 예상된다. 한편 양자구속 효과를 통해 Bi 나노선의 열전 특성을 크게 향상시킬 수 있는 이론적 결과가 보고됨에 따라 Bi 나노선은 열전(thermoelectric) 소자 응용 측면에서도 많은 관심을 불러일으키고 있다[5].

그러나 현재까지 Bi 단일 나노선의 열전 특성을 이해하기 위한 기초적인 전기 및 자기적 수송특성에 대한 연구가 전무한 실정이다. 왜냐하면 Bi 나노선 표면에 형성되는 자연 산화층(Bi_2O_3)으로 인해 전기적 오믹 형성이 어렵고, 또한 Bi가 낮은 녹는점(271.3 °C)을 가지므로 외부 전극과의 오믹 형성을

을 위해 열처리를 할 수 없어서 Bi 단일 나노선의 소자화가 어렵기 때문이다. 최근 Cronin *et al.*[6]과 Choi *et al.*[7]은 focused ion beam(FIB)을 이용하여 Bi 나노선의 자연 산화층을 제거하고 단일 나노선 소자를 만들어서 비저항 측정을 하였으나, 물질 연구에 기초가 되는 정상 자기 저항(ordinary magnetoresistance), Shubnikov-de Haas(SdH) 진동[8] 및 게이트 효과(gate effect)[8] 등의 결과는 보여주지 못하였다. 초 고효율 열전 재료로 응용을 위해 단결정 Bi 단일 나노선의 수송 특성 및 전자 구조 분석이 필수적으로 이루어져야 한다.

본 연구에서는 자발 나노선 성장법(spontaneous nanowires growth method)으로 성장된 단결정 Bi 단일 나노선의 자기수송특성을 2~300 K에서 4 단자 측정을 통해 조사하였다. 단결정 Bi 단일 나노선에서 수직(transverse) MR과 수평(longitudinal) MR이 각각 2496% (110 K)과 -38% (2 K)로 관찰되었고, 이는 운반자(carrier)의 자유행정거리(mean free path)가 매우 길고 Bi 나노선의 결정성이 매우 뛰어난 단결정임을 반영한다. 또한 simple two band(STB) 모델을 바탕으로 Bi 나노선의 MR 거동을 해석하기 위하여 온도에 따른 전자 구조와 전자 및 홀의 농도를 조사하였다.

II. 실험 방법

단결정 Bi 나노선 성장을 위해 열산화된 실리콘(Si) 기판

*Tel: (02) 2123-2834, E-mail: wooyoung@yonsei.ac.kr

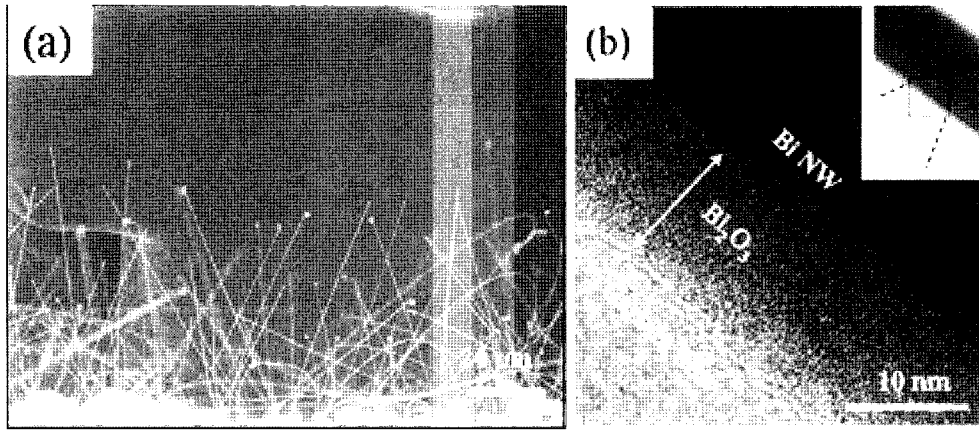


Fig. 1. (a) A SEM image showing Bi nanowires grown by spontaneous growth method onto Bi thin film after annealing at 270 °C for 10 hours. (b) A HRTEM image of a Bi nanowire consisting of a single-crystalline Bi core and a 10-nm-thick amorphous Bi₂O₃.

위에 Bi 박막을 스퍼터법(dc/rf magnetron sputtering system)으로 4×10^{-8} Torr 진공도에서 증착하였다. 270 °C, 10시간 열처리 후 두께가 균일하고 높은 장평비(high aspect ratio)를 가진 Bi 나노선이 Bi 박막에서 성장되었음을 관찰하였다[Fig. 1(a)]. 본 성장법으로 성장된 Bi 나노선은 길이가 수백 μm 이며 직경은 수십 nm로 스퍼터 증착 조건 및 열처리 조건에 따라 제어가 가능하다[8]. 열처리 후 TEM 분석을 통해 Bi 나노선이 c-축 방향(trigonal direction)으로 우선 성장된 단결정으로 이루어져 있음을 확인하였다[Fig. 1(b)]. 또한 나노선 표면에 10 nm 두께의 자연 산화층(Bi₂O₃)이 형성됨을 알 수 있다. 소자 제작을 위해 성장된 Bi 나노선을 기판 위에 분산한 후 전자 빔 리소그래피(electron-beam lithography)와 lift-off 공정을 이용하여 Au 전극(5000 Å)을 형성하였고 Bi 나노선의 자연 산화층 제거를 위하여 RF 파워를 이용하여 플라즈마 에칭법을 사용하였다. 제작된 Bi 나노선 소자 구조는 주사전자현미경(SEM, scanning electron microscopy)으로 관찰하였다. 전기적 특성은 QUANTUM

DESIGN사의 physical property measurement system(PPMS)을 이용하여 직류 4단자법으로 측정하였다. 저항의 온도 의존성과 자기 저항 측정 시스템은 Labview 프로그램과 general purpose interface bus(GPIB) 인터페이스를 이용하여 제어하였다.

III. 결과 및 고찰

Bi 나노선에 전기적 오믹 형성을 위해 Fig. 2(a)에 보여진 바와 같이 Ar 이온으로 Bi₂O₃을 제거하는 플라즈마 에칭법을 사용하고 Bi₂O₃ 형성을 막기 위해 in-situ 법으로 Au 전극을 형성하였다[8]. Fig. 2(b)는 전자 빔 리소그래피와 lift-off 공정을 이용하여 단결정 Bi 단일 나노선으로 제조된 소자의 모양을 보여준다. 측정된 직경 400 nm 나노선의 비저항은 2 K와 상온에서 각각 1.0×10^{-4} 과 $8.2 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 으로 측정되었다[Fig. 2(c)].

Fig. 3(a)는 자기장을 가하지 않았을 때($H=0$) 400 nm 나

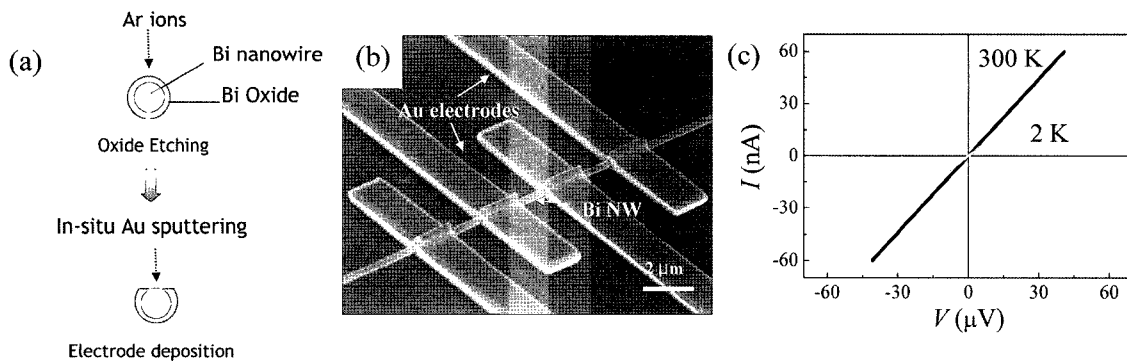


Fig. 2. (a) Schematic diagram of plasma etching technique used to make ohmic contacts to the Bi nanowire, by first sputtering with Ar ions and then depositing Au electrodes. (b) A SEM image showing an individual 400-nm-diameter Bi nanowire with four Au electrodes, deposited by sputtering after plasma etching to remove the oxide layer. (c) Four-point I - V curves taken at 2 K and room-temperature for the Bi nanowire device.

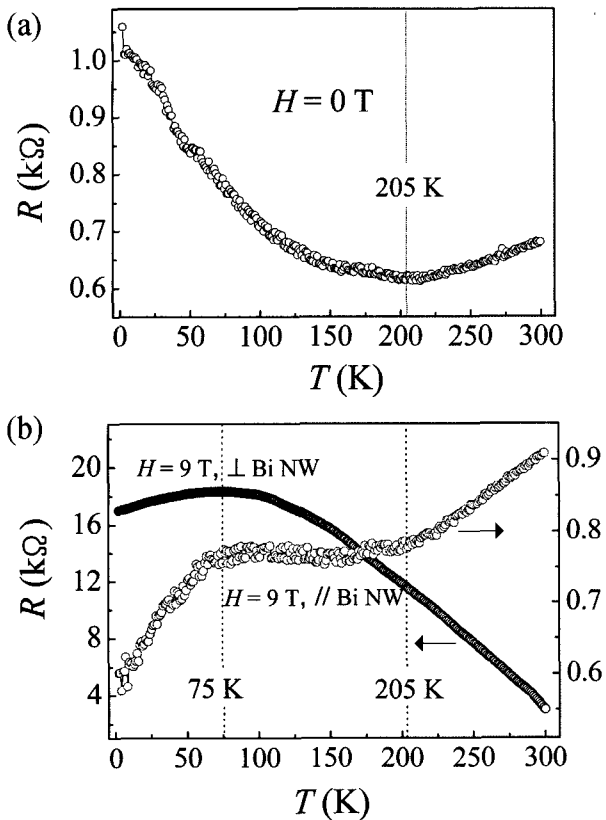


Fig. 3. Temperature dependent resistance for the 400-nm-diameter Bi nanowire, measured (a) with and (b) without a magnetic field of 9 T applied perpendicular and parallel to the nanowire.

노선의 온도에 따른 저항의 변화 $[R(T)]$ 를 보여준다. 400 nm Bi 나노선의 경우 205 K 이상의 온도영역에서 양의 저항온도 계수(temperature coefficient of resistance)를 가지는 금속형 저항특성을 보이는 반면 205 K 이하의 영역에서는 반도체형 저항특성을 나타내는 음의 저항온도계수를 보인다. 즉 전기저항이 205 K에서 최소점을 가진다. Bi의 전기저항 특성은 운반자(carrier)의 이동도(mobility)와 농도(concentration)의 상호 관계에 의해 결정된다. 다결정 나노선의 경우 결정 내 존재하는 결함, 특히 결정립계에 의해 전자산란이 일어나 전자 이동도의 기여도가 감소하여 전자농도의 기여도가 커져서 모든 온도영역에서 음의 저항 온도 계수를 보인다[9, 10]. 이와 달리 Fig. 3(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 단결정 나노선의 경우 결정립계에 의한 전자산란이 없어 높은 온도 영역에서는 (> 205 K) 포논(phonon) 산란에 의한 이동도가 감소하는 양의 저항온도계수가 보이고 낮은 온도영역에서는 (< 205 K) 전자 농도에 의존하는 음의 저항온도계수가 보인다. 따라서 Bi 나노선이 단결정임을 확인할 수 있다. 이와 같은 Bi 나노선의 결정성은 정상 자기 저항 특성을 통해 보다 확실하게 증명될 수 있다.

자기장(9 T)을 가할 경우, 나노선 성장 축에 수직한 자장 (R_T)과 수평한 자장(R_L)에 대해 저항의 온도 의존성을 Fig. 3(b)에 나타내었다. 정상 자기 저항은 외부자기장을 가할 경우 로렌츠(Lorentz) 힘에 의해 운반자의 행로(trajjectory)가 휘어지기 때문에 나타나는 현상이다. 정상 자기 저항의 크기는 $w_c \tau$ 로 정량화 되고 $w_c = eH/m^*$ 와 $\tau = l/v_F$ 는 각각 사이클로트론의 진동수와 자유행정 완화 시간을 나타낸다. 9 T의 자장이 인가된 경우, 온도가 300 K에서 75 K까지 감소함에 따라 운반자의 자유행정거리가 길어져 R_T 가 증가한다. 또한 75 K에서 2 K로 감소할수록 R_T 는 감소한다. 반면 R_L 은 Fig. 3(b)에서와 같이 세 구역으로 구분이 된다: (I) R_L 은 $205 < T < 300$ K에서 감소하고, (II) $75 < T < 205$ K에서 변화가 없으며 (III), $2 < T < 75$ K에서 급격히 감소한다. 각각의 정상 자기 저항 거동은 Bi 나노선의 온도에 따른 페르미 준위(Fermi level) 및 밴드 겹침(band overlap)과 같은 전자 구조의 변화와 운반자 농도의 변화로 설명될 수 있다.

Fig. 4는 자기장(9 T)을 가했을 경우 2~300 K에서 Bi 나노선의 (a) 수직 정상 자기 저항비(transverse OMR ratio)와 (b) 수평 자기 저항비(longitudinal OMR ratio)의 변화를 보여준다. 자기저항비는 $[R(H) - R(0)]/R(0) \times 100$ 으로 표현되고, $R(0)$ 와 $R(H)$ 는 각각 자기장을 가하지 않았을 경우와 자기장(9 T)을 가했을 경우의 저항이다. 본 연구에서 상온과 2 K에서 각각 286%와 1401%의 자기저항비를 보였고 110 K에서 최대 2496%가 관찰되었다[Fig. 4(a)]. 본 연구에서의 Bi 단결정 나노선은 다결정 400-nm Bi 나노선의 자기저항비[9, 11]를 비교할 때 2.5배 큰 자기저항비를 나타낸다. 대부분의

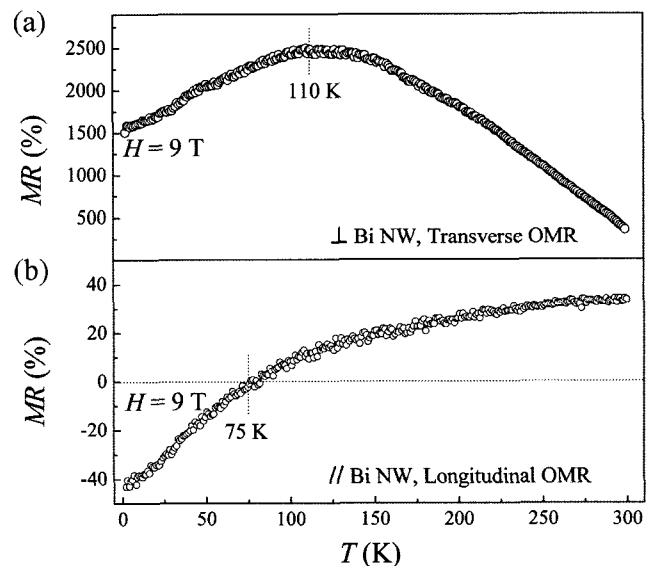


Fig. 4. The temperature dependence of (a) transverse and (b) longitudinal MR ratios of the Bi nanowire with a magnetic field of 9 T.

금속은 매우 작은 $w_c\tau$ 으로 인해 정상 자기 저항이 매우 작으나 반금속 Bi의 경우 작은 유효질량($\sim 0.001m_e$)과 긴 자유행정거리(λ)로 인하여 큰 양의 정상 자기 저항비(MR ratio)를 보인다. m^* 는 물질 고유값이고 결정성에 따라 자유행정거리가 달라지므로 정상 자기 저항비는 Bi의 결정성을 판단할 수 있는 기준이 되며 본 연구에서 자발 나노선 성장법으로 제조한 400 nm Bi 나노선에 대한 정상 자기 저항의 실험 결과로부터 Bi 나노선의 결정성이 매우 뛰어난 단결정임을 보여 준다.

반면, Fig. 4(b)는 나노선에 평행(longitudinal)한 자기장(9 T)을 가했을 경우 2~300 K에서 온도에 따른 정상 자기 저항의 변화를 보여준다. 외부자기장이 평행할 경우 사이클로트론의 회전반경이 특정 자기장 이상부터 나노선 직경보다 작아지게 되어 나노선 벽면과의 충돌에 의한 나노선 벽면 산란 효과(wire boundary scattering effect)가 증가됨에 따라 저항이 감소한다[1, 2]. 하지만 결정내의 결함 특히 결정립계가 존재할 경우 결정립계에 의한 전자산란으로 인해 나노선 벽면 산란 효과가 감소하여 저항이 줄어들지 않음으로 다결정 Bi 나노선에서는 저항이 증가하는 현상을 보인다[11]. 본 연구에서는 2 K에서 측정된 수평 자기 저항비가 -38 %로 현재까지 보고된 수평 정상 자기 저항비[1, 2] 중 가장 큰 값이다. 따라서 이와 같은 결과는 성장된 Bi 나노선의 결정성이 매우 우수하여 자유행정거리가 매우 크다는 것을 증명하는 또 다른 연구 결과이다. 실제 자발 나노선 성장법으로 성장된 120-

nm Bi 나노선의 자유행정거리가 게이트 효과를 통해 2.1 μm 임을 측정하였다[8].

Fig. 5는 온도에 따른 c-축으로 성장된 Bi 나노선의 (a) 밴드 구조 모식도와 (b) 계산된 총 운반자, 전자 및 홀의 농도의 변화를 보여준다. Bi 나노선의 정상 자기 저항 거동을 이해하기 위해 simple two band(STB) 모델[12]에 근거하여 밴드 구조와 전자 및 홀의 농도의 변화를 조사하였다. 정량적으로 정상 자기 저항의 크기는 다음과 같은 식으로 표현되며

$$OMR = 4(\omega_c\tau)^2 \left\{ \frac{n_e n_h / (n_e + n_h)}{1 + [\omega_c\tau(n_e - n_h) / (n_e + n_h)]^2} \right\}, \quad (1)$$

이 때 μ 는 운반자의 이동도, n_e 와 n_h 는 각각 전자 및 홀의 농도를 나타낸다. Eq. (1)에서와 같이 전자와 홀의 농도가 같을 경우($n_e = n_h$) 정상 자기 저항은 최대값을 보인다. 즉 Bi는 전자와 홀의 농도가 유사하므로[5] 운반자 농도가 정상 자기 저항에 미치는 영향을 반드시 고려되어야 한다.

자유 전자 모델(free electron model)[12]에 따라 페르미 준위(E_F)는 다음과 같은 온도 의존성을 보이며

$$E_F = E_{F0} \left[1 - \pi^2 / 12 \left(\frac{kT}{E_{F0}} \right)^2 \right], \quad (2)$$

이 때 각각 E_{F0} 와 k 는 0 K에서 페르미 준위와 볼츠만 상수(Boltzmann constant)를 나타낸다. E_{F0} 가 외부자기장에 비례함[13]을 가정할 때 Eq. (2)에 따라 0~300 K에서 페르미 준위의 변화($\Delta E_{F, 0-300}$)는 16.2 meV이다. 이 값은 밴드갭(band-gap)이 수 eV에 이르는 반도체의 경우 무시할 만 하지만, 38 meV의 아주 작은 밴드 겹침을 갖는 Bi에서는 16.2 meV의 페르미 준위의 변화를 고려해야 한다.

또한 온도에 따른 밴드 겹침은 다음과 같은 식으로 표현되고[5, 15]

$$\Delta_0(T) = - (E_F^e + E_F^h), \quad (3)$$

이 때 E_F^e 와 E_F^h 는 각각 전자와 홀의 페르미 에너지를 나타낸다. Eq. (3)에 따라 Δ_0 는 Fig. 5(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 75 K, 205 K와 300 K에서 각각 -38 meV, -51 meV와 -104 meV이다. 즉 E_F 과 Δ_0 는 0~300 K에서 온도 의존성을 보여주고 있으며, 이는 n_e 및 n_h 또한 온도 의존성을 가지고 있음을 의미한다. 이를 확인하기 위해 온도에 따른 총 운반자와 전자 및 홀 농도의 변화를 조사하였다.

Bi의 홀과 전자의 상태밀도(density of states)는 다음과 같다[16].

$$N(E) = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 \hbar^3} (m_x m_y m_z)^{1/2} E^{1/2} \quad \text{for holes} \quad (4)$$

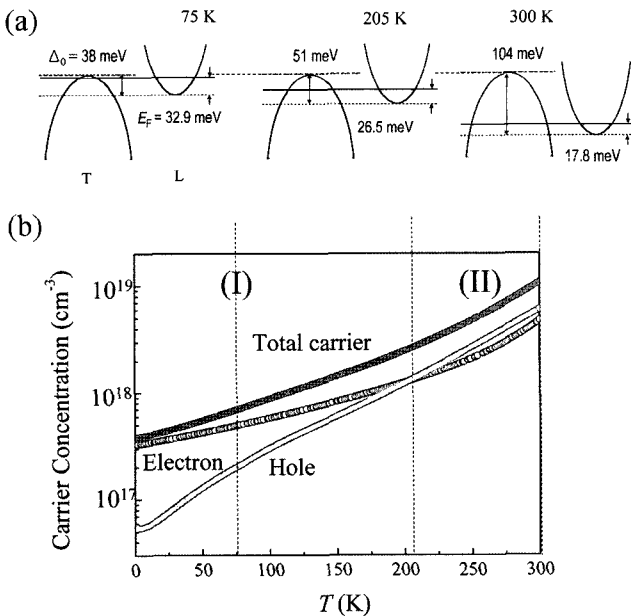


Fig. 5. (a) Schematics of energy-band diagrams at the L-point and T-point with Fermi energy level at temperatures of 75, 205, and 300 K at 9 T. (b) Calculated carrier concentrations of electrons and holes of the Bi nanowire grown along the trigonal axis as a function of temperature at 9 T.

$$N(E) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi^2 \hbar^3} (m_x m_y m_z)^{1/2} \left(\frac{E^2}{E_g} - E \right) \left(\frac{2E}{E_g} - 1 \right) \text{ for electrons} \quad (5)$$

이 때 m_x , m_y 및 m_z 는 x , y , z 방향에 따른 운반자의 유효질량이고 E_g 는 L -point에서의 밴드갭이다. Eq. (4)와 Eq. (5)에 따라 전자와 홀의 유효질량 및 밴드갭[9]을 이용하여 n_h , n_e 및 n_T 를 계산하였다[Fig. 5(b)]. 205 K에서 전자와 홀의 농도가 동일하고 이를 기준으로 온도에 대해 2개의 구역으로 나눌 수 있다: (I) $205 < T < 300$ K에서 $n_e < n_h$ 이고 (II) $0 \leq T < 205$ K에서 $n_e \gg n_h$ 가 된다. 이러한 결과는 Fig. 5(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 E_f 와 Δ_0 의 온도 의존성과 동일한 결과를 보여주고 있다.

R_T , R_L 과 n_e , n_h 의 상관 관계를 이해하기 위해 STB 모델 [12]을 사용하였다. 전술한 바와 같이 온도가 75 K까지 감소함에 따라 포논 산란(phonon scattering)이 감소하여 운반자의 자유행정거리가 길어짐에 따라 R_T 가 증가한다. 그러나 75 K에서 온도가 감소할수록 R_T 가 감소한다. 이와 같은 현상은 저온 영역에서 자유행정거리 증가보다 운반자 농도 변화가 R_T 를 결정하는데 중요한 역할을 하기 때문이다. 즉, Fig. 5(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 $T < 75$ K에서 n_e 과 n_h 의 차이가 매우 커지므로 Eq. (1)에 의해 R_T 가 감소하는 것으로 해석된다. 이러한 결과는 운반자 농도와 자유 행정 거리에 영향으로 정상 자기 저항이 특정 온도에서 최대값을 보인다는 견해 [10]를 증명한 결과이다.

반면, 205~300 K의 온도 영역에서 온도가 감소함에 따라 자유 행정 거리가 길어져 R_L 이 감소한다. $75 < T < 205$ K에서 R_L 의 변화가 거의 없으며 이와 같은 현상은 n_e 와 n_h 의 차이가 온도가 내려갈수록 커짐에 따라 자유 행정 거리가 길어짐에도 불구하고 Eq. (1)에 의해 정상 자기 저항이 증가하지 못하여 기인한 것으로 해석된다. 75 K 이하에서는 R_L 이 급격하게 감소함을 볼 수 있다. 이 현상은 75 K 이하에서 $n_e \gg n_h$ 됨에 따라 운반자 전체 유효질량이 감소($m_e^* \ll m_h^*$, [16])하고 $w_c = (eH/m^*)$ 가 증가하여 정상 자기 저항이 증가하는, 즉 R_L 이 감소하는 것으로 고려된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 자발 성장법으로 성장된 단결정 Bi 단일 나노선의 정상 자기 저항을 연구하였다. 플라즈마 에칭을 통해 나노선 표면의 자연 산화층을 제거하여 400 nm 단일 Bi 나노선 소자를 성공적으로 제작하였다. 4 단자 측정을 통해 110 K와 2 K에서 각각 현재까지 보고된 정상 자기 저항 중 가장 큰 2496%와 38%의 수직 및 수평 정상 자기 저항비를 관찰하였다. 이 결과는 자발 나노선 성장법으로 성장된 Bi 나노선이 결정성이 매우 우수한 단결정임을 보여준다. Bi 나

노선의 정상 자기 저항 거동을 이해하기 위해 simple two band(STB) 모델에 근거하여 밴드 구조와 전자 및 홀의 농도의 변화를 조사하였다. 자유 전자 모델을 이용하여 계산한 결과 페르미 준위(E_f) 및 밴드 겹침(Δ_0)이 온도에 따라 변화하는 것을 확인하였고 상태밀도를 계산하여 온도에 따라 전자와 홀의 농도가 변화함을 확인하였다. 이 결과로부터 자유 행정 거리가 각각 $T > 75$ K 및 $T > 205$ K에서 R_T 와 R_L 변화를 결정하는 주요한 인자임에 반해, $T < 75$ K 및 $T < 205$ K에서는 전자와 홀의 농도 불균형이 각각 R_T 와 R_L 거동에 결정적인 역할을 하는 것으로 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 한국학술진흥재단(KRF-2004-041-C00126)의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] J. Heremans, C. M. Thrush, Y. Lin, S. Cronin, Z. Zhang, M. S. Dresselhaus, and J. F. Mansfield, *Phys. Rev. B*, **61**, 2921 (2000).
- [2] Z. Zhang, X. Sun, M. S. Dresselhaus, J. Y. Ying, and J. Heremans, *Phys. Rev. B*, **61**, 4850 (2000).
- [3] Y. Lin, S. B. Cronin, J. Y. Ying, M. S. Dresselhaus, and J. Heremans, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 3944 (2000).
- [4] W. Shim *et al.*, to be published.
- [5] Y. M. Lin, X. Sun, and M. S. Dresselhaus, *Phys. Rev. B*, **62**, 4610 (2000).
- [6] S. B. Cronin *et al.*, *Nanotech.*, **13**, 653 (2002).
- [7] D. Choi, A. Balandin, M. Leung, G. Stupian, N. Presser, S. Chung, J. Heath, A. Khitun, and K. Wang, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 141503 (2006).
- [8] W. Shim *et al.*, to be published.
- [9] K. Liu, C. L. Chien, P. C. Searson, and K. Y. Zhang, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 1436 (1998).
- [10] F. Y. Yang, K. Liu, K. Hong, D. H. Reich, P. C. Searson, and C. L. Chien, *Science*, **284**, 1335 (1999).
- [11] K. Liu, C. L. Chien, and P. C. Searson, *Phys. Rev. B*, **58**, R14681 (1998).
- [12] Y. Zhang, J. Small, M. Amori, and P. Kim, *Phys. Rev. Lett.*, **94**, 176803 (2005).
- [13] S. Kasap, *Principle of Electronic Materials and Devices* (New York: McGraw-Hill, 2002).
- [14] M. Cankurtaran, M. Onder, H. Celik, and T. Alper, *J. Phys. C: Solid State Phys.*, **20**, 3875 (1987).
- [15] C. Gallo, B. Chandrasekhar, and P. Sutter, *J. Appl. Phys.*, **34**, 144 (1963).
- [16] S. Cronin, Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA (1999).

Ordinary Magnetoresistance of an Individual Single-crystalline Bi Nanowire

Wooyoung Shim, Dohun Kim, Kyoung-il Lee, Kye Jin Jeon, and Wooyoung Lee*

Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

Joonyeon Chang, Suk-Hee Han, and Won Young Jeung

Korea Institute of Science and Technology (KIST), P. O. Box 131, Seoul 136-791, Korea

Mark Johnson

Naval Research Laboratory, Washington DC 20375, U.S.A.

(Received 6 August 2007, in final form 23 August 2007)

We report the magneto-transport properties of an individual single crystalline Bi nanowire grown by a spontaneous growth method. We have successfully fabricated a four-terminal device based on an individual 400-nm-diameter nanowire using plasma etching technique to remove an oxide layer forming on the outer surface of the nanowire. The transverse MR (2496 % at 110 K) and longitudinal MR ratios (38 % at 2 K) for the Bi nanowire were found to be the largest known values in Bi nanowires. This result demonstrates that the Bi nanowires grown by the spontaneous growth method are the highest-quality single crystalline in the literatures ever reported. We find that temperature dependence of Fermi energy (E_F) and band overlap (Δ_0) leads to the imbalance between electron concentration (n_e) and hole concentration (n_h) in the Bi nanowire, which is good agreement with the calculated n_e and n_h from the respective density of states, $N(E)$, for electrons and holes. We also find that the imbalance of n_e and n_h plays a crucial role in determining magnetoresistance (MR) at $T < 75$ K for R_T and at $T < 205$ K for R_L , while mean-free path is responsible for MR at $T > 75$ K for R_T and $T > 205$ K for R_L .

Keywords : single-crystalline Bi nanowire, magnetoresistance (MR), simple two band (STB) model