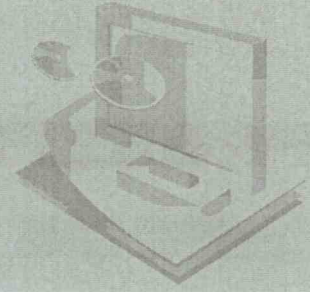




Special Thema

# 차세대 초고효율 에너지 변환용 나노선 열전 소자



전계진 박사 (연세대 신소재공학과) | 이우영 교수 (연세대 신소재공학과)

## 1. 서론

Seebeck 효과 (1821년)와 Peltier 효과 (1834년) 등의 열전 효과 (Thermoelectric Effects)는 거의 200년의 오랜 역사를 가지고 있으며 지난 1950년대까지 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 열전 성능 지수 (Figure of Merit,  $ZT$ ) 향상의 한계에 부딪혀 그 뛰어난 응용성에도 불구하고 산업적으로 제한된 분야에만 사용되고 있으며, 연구성과 측면에서도 1990년대 말까지 큰 진척을 가져오지 못하였다 (그림 1). 열전 재료의 효율성은 단위가 없는 열전 성능 지수 (Figure of Merit)  $ZT = S^2\sigma T/\kappa$ 로 표현되며, 물질 고유의 특성에 의해 결정된다. 여기서  $S$ 는 Seebeck 상수,  $\sigma$ 는 전기전도도 (Electrical Conductivity),  $\kappa$ 는 열전도도 (Thermal Conductivity)이고  $T$ 는 온도를 나타낸다.

1950년대에 열전 반도체가 열펌프로써 효과적인

역할을 한다는 것을 발견한 이후 열전 발전, 열전 냉장고 등 새로운 응용분야에 대해 큰 기대를 모았으나 1960년대부터 1990년에 이르기까지 가장 우수한 열전 반도체로 알려진  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  ( $ZT = 1$ )를 능가하는 물질이 발견되지 않았고,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 가 현재 상용화된 열전 반도체 소자의 대부분을 차지한다 [1]. 열전소자가 다른 기준소자의 에너지 변환효율 (카르노 효율 = 0.3)과 비교해서 경쟁력을 가지려면  $ZT$ 값이 3 이상 되어야 한다 (그림 2).

$ZT$ 는  $S$ ,  $\sigma$ ,  $\kappa$ 값에 의해 결정되는데, 이 세 인자 (Parameter)는 각각 서로 연관되어 있다. 전자의 수가 증가할수록 전기전도도는 증가하지만 동시에 Seebeck 상수의 감소를 가져오고, 열전도도의 경우 물질의 격자 진동 (Lattice Vibration)에 의해 기인될 뿐만 아니라 자유 전자 (Free Electron)의 영향을 동시에 받기 때문에 전자 수의 증가는 열전도도를 증가시키는 주요한 원인이 된다. 뿐만 아니라 물질의 열전도도를 감소시키는 것은 산란 메커니즘

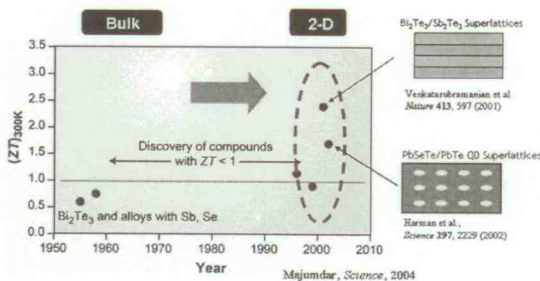


그림 1. 연도별 상온 열전 성능 지수( $ZT$ )의 발전 동향.

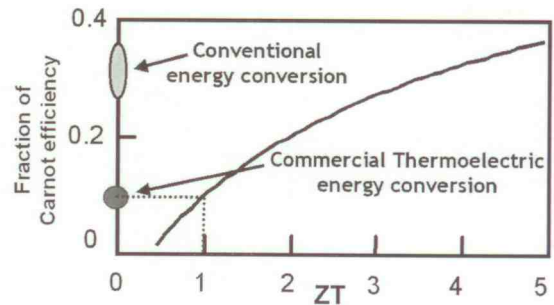


그림 2. 카르노 효율과  $ZT$ 값과의 비교.

## Special Thema

(Scattering Mechanism)에 의해 이를 수 있으나 전기 전도도를 동시에 감소시킨다. 이러한 세인자의 상쇄적 작용으로 인하여 즉, 하나의 인자를 증가시키게 되면 다른 인자들이 감소하는 경향으로 인하여 좀처럼 더 좋은 열전 물질이 발견되지 않고 있다.

그 동안 열전은 학계에서 큰 주목을 끌지 못하였지만 그럼에도 불구하고 열전 현상을 응용한 산업은 우주항공, 특수 군사 분야, 의료기기 등 비용이나 효율은 중요하지 않지만 에너지 이용성, 신뢰성, 예측성 등이 매우 중요한 틈새 응용분야를 찾아서 천천히 지속적으로 성장해 왔다. 1990년대에 들어 환경 및 에너지 문제가 대두되면서 열전의 잠재적 가능성이 다시 주목 받기 시작하였는데, 1993년 미국 MIT의 Dresselhaus 교수팀이 나노재료를 사용하면 열전 성능지수를 높일 수 있다는 이론 논문을 발표하면서 열전에 대한 연구는 재조명되기 시작하였다 [2, 3].

Dresselhaus 교수팀은 저차원 나노 구조물에서 열전 성능지수를 이루는 각각의 인자 ( $S, \sigma, \kappa$ )가 서로 간의 상쇄가 없이 열전 성능지수를 높일 수 있다는 이론적 근거를 발표하였다. 이 연구는 양자 구속 효과 (Quantum Confinement Effects)로 인하여 상태 밀도 함수가 불연속적으로 변하여 물질이 불연속적인 에너지 준위를 가지게 되어  $S^2\sigma$  (Power Factor)를 적절하게 조절할 수 있다는 것이 핵심이다.

지난 15년간 양자 구속 효과는 많은 주목을 받아왔고 이에 따른  $ZT$ 를 증가시키는 결실로 이어졌다 (그림 1). 지난 8년간 연구 보고를 살펴보면 2001년 Venkatasubramanian 그룹에서  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 와  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ 의 나노구조를 갖는 초격자 박막의 경우 실온에서  $ZT$ 가 약 2.4를 가지며 [4], 2002년 MIT 대학의 Harman 교수팀에서 개발한  $\text{PbSeTe}/\text{PbTe}$  양자점 초격자 박막의 경우  $ZT$ 가 약 1.3 ~ 1.6의 값을 가진다고 보고되었다 [5]. 열전 재료에 대한 지난 200년간의 역사적인 관점에서 보면 상기한 두 2차원 나노구조 재료는 단기간에 엄청난  $ZT$ 값의 도약을 가져왔다. 또한 2004년 Michigan State 대학의 Kanatzidis 교수팀은  $\text{AgPb}_x\text{SbTe}_{2+x}$  나노복합재료를 사용하여 800 K에서  $ZT = 2$ 를 기록하였다 [6]. 최근에는 UC Berkeley 대학의 Majumdar 교수팀이 열전 성능 지수  $ZT = 0.6$  인 Si 나노선을 제조하였다 [7]. 그리고 Caltech의

Heath 교수팀은 도핑정도가 다른 Si 나노선을 연구하여 열전성능지수  $ZT = 1$ 을 보고하였다 [8]. 특히, Si 나노선의 연구는 Si 나노선이 벌크 Si에 비해 열전 성능이 100배 이상 향상되었고 무기 재료 중 매우 값싼 Si으로 좋은 열전특성을 구현하였다는 점에서 매우 중요한 의미를 갖는다.

현재까지 저차원 시스템의  $ZT$  향상은 포논이 전자보다 나노 구조물의 경계면에서 더 잘 산란하는 효과에 의해 열전도도를 감소시키는데 기초한 것이었다. 그러나  $ZT$ 값을 충분히 증가시키기 위해서는 열전도도의 감소만으로 충분하지가 않고 전력인자 (Power Factor)인  $S^2\sigma$ 도 증가시키는 것이 매우 필요하다. 그림 3에서 보는 바와 같이 이론에 의하면 주어진 열전 물질에 대해 이차원 구조 (2D)보다 일차원 구조 (1D)에서  $ZT$ 가 훨씬 더 큰 값을 갖는다고 예측된다. 반금속 Bi는 매우 큰 이방성의 3차원 페르미면 (Fermi Surface)을 가지고 있으며, 높은 이동도 (Mobility)와 매우 작은 전자 유효질량  $m^*$  ( $\sim 0.001 m_e$ ) 등의 특징으로 인해 초고효율 열전 재료에 관한 연구에서 매우 주목 받는 물질이다. 또한 Bi는 반금속이어서 전자와 홀의 밀도가 같은 관계로  $S$ 가 상쇄되어 매우 작은 값을 갖지만 양자 구속 효과가 일어나면 반금속-반도체 전이 (Semimetal to Semiconductor Transition)가 일어나서 상쇄현상이 없어지므로 매우 큰  $ZT$ 를 기대할 수 있다. 특히 전자유효질량이 매우 작으므로 양자 구속효과를 물질 중 가장

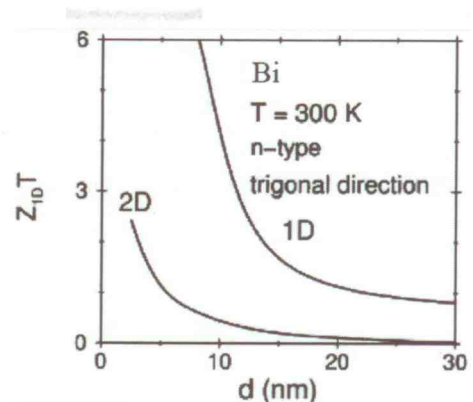
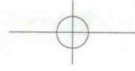


그림 3. Bi의 이차원 구조 (2D)와 일차원 구조 (1D)의  $ZT$ 값 비교.



큰 직경(약 50 nm)의 나노선에서 관찰할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 나노선의 열전특성 측정 기술의 난이도, 나노선 자체의 단결정성, Bi 나노선 표면에 형성되는 산화층으로 인한 오믹 접촉형성의 어려움 등으로 인해 아직 단일 Bi 나노선의 ZT값에 대하여 보고된 바가 없다.

학문적인 측면에서 보면 열전 물성의 한계를 극복하고 경제·사회적 측면에서 21세기 에너지 변환시스템의 새로운 패러다임을 제시할 수 있는 초고효율 에너지 변환소자용 열전소자의 실용화를 위해서는 요구되고 있는 임계 변환 효율(Figure of Merit,  $ZT > 3$ )의 실현이 필요하다. 이와 같은 연구의 중요성이 1차원 나노선 기술을 이용한 연구가 2000년대 초반에 들어와 선진국을 중심으로 새롭게 연구의 박차를 가하고 있다. 따라서 본고에서는 나노선을 이용한 열전 현상에 관한 이론적 배경과 최근 연구동향에 관하여 살펴봄으로써 차세대 초고효율 에너지 변환용 나노선 열전소자의 개발 배경의 이해를 돕고자 한다.

## 2. 나노선 열전의 이론적 배경

어떻게 저차원 나노 구조가 ZT값을 증가시킬 수 있을까? 벌크 상에는 앞에서 언급한 바와 같이  $S, \sigma, \kappa$  값이 서로 연관되어 있는 관계로 한가지 특성을 변화시키면 그로 인해 다른 특성의 변화가 유도되어서 좀처럼 ZT값을 증가시키는 것이 쉽지 않다. 예를들면 전력 인자( $S^2\sigma$ )는 작은 밴드 갭을 갖고 축퇴 도핑된 반도체의 경우  $n \approx 10^{19}/\text{cm}^3$  정도가 최적화된 전하 운반자 농도를 가질 때 얻어지는  $S = 170 \mu\text{V}/\text{K}$  이다 [9]. 반도체에서 열전도도  $\kappa$ 는 격자진동에 의한 포논( $\kappa_L$ )에 의한 열전도가 지배적이다.  $\kappa_L$ 을 감소시키기 위한 노력으로 전하 운반자의 이동도를 감소시키면 이로 인해 전기전도도가 낮아진다. 새로운 구조인자를 도입함으로써 상호 연관된 고리를 끊어 낼 수 있다는 것이 저차원 열전의 핵심이다. 이 구조인자는 2차원에서 양자우물의 두께가 될 수 있고 1차원에서는 나노선의 두께가 되고, 0차원에서는 양자점의 직경이 될 수 있다. 결론적으로 저차원 나노 구조를 사용하게 되면 다음 세가지 이점을 이끌어 낼 수 있다.

첫째, 저차원 시스템은 전하이동도의 큰 손실 없이 포논에 의한 열전도도  $\kappa_L$ 을 줄일 수 있다. 이는 포논의 진동모드가 저차원 시스템에 의해 영향을 받거나 포논의 평균자유행정거리가 저차원 구조인자에 의해 제한되기 때문으로 해석된다. 구조인자가 전자의 평균 자유 행정거리보다 크고 포논의 평균 자유 행정거리와 비슷한 구조에서 일어나는 일이다.

둘째,  $S$ 가 주어진 전하 운반자 농도에서 3D보다 저차원 구조에서 더 증대되는데 이는 양자 구속 효과와 전자 에너지 필터링 효과에 기인한다. 이를 설명하기 위해  $S$ 에 대한 Mott 관계식을 보면 다음과 같다 [10]. 에너지  $E$ 를 갖는 전자의 전도도  $\sigma(E)$ 는  $E \sim E+dE$ 의 영역을 채우고 있는 전자에 의해 결정되는데 이는 파울리의 배타원리에 의해 그 수가 제한되어  $\sigma(E)$ 이 결정된다. 총 전기전도도는 페르미 분포함수  $f_0(E)$ 에 의해 모듈레이션 되어 그 값을 총 에너지 영역에서 적분한 값이다. 따라서 전기전도도는 다음과 같이 표현된다 [11].

$$\sigma = \int \sigma(E) \left( -\frac{\partial f_0(E)}{\partial E} \right) dE \quad (1)$$

Cutler와 Mott는 이 식으로부터  $S$ 를 다음과 같이 유도하였다.

$$S = \frac{k_B}{q} \frac{1}{\sigma} \int \sigma(E) \left( \frac{E - E_F}{k_B T} \right) \left( \frac{\partial f_0(E)}{\partial E} \right) dE \quad (2)$$

여기서,  $k_B$ 는 Boltzman 상수이고,  $q$ 는 전하운반자의 전하량이고  $E_F$ 는 Fermi Energy이다. 특히 축퇴 도핑된 반도체의 경우 페르미 통계분포는 축퇴되고 식 (2)는 일반적으로 알려진 Mott 방정식으로 표현된다.

$$S = \frac{\pi^2 k_B}{3q} \frac{1}{\sigma} \left\{ \frac{d[\ln(\sigma(E))]}{dE} \right\}_{E=E_F} \quad (3)$$

이식은 전기전도가 밴드 전반에 걸쳐 이루어지든지 혹은 특정 상태에 한정되어 있든지, 일반적으로 잘 성립한다. 전도도의 미분은 전하운반자 밀도의 미분으로 표현되고 이는 상태밀도함수  $g(E)$ 로 다음

# Special Thema

과 같이 표현된다.

$$\sigma(E) = n(E)e\mu(E) = n(E)e^2 \frac{\tau(E)}{m^*} \quad (4)$$

여기서,  $e$ 는 전자 전하량이고,  $m^*$ 는 전자의 유효 질량이고,  $\mu(E)$ 는 전하의 이동도이고,  $\tau(E)$ 는 전하의 완화시간 (Relaxation Time) 이다. 식 (3)에서 보듯,  $S$ 를 향상시키기 위해서는  $d(\sigma(E))/dE$ 를 증가시키면 된다는 것이 명확하다. 이를 위해 두가지 접근이 있는데 하나는  $d(n(E))/dE$  향상이고, 다른 하나는  $d(\mu(E))/dE$ 의 향상이다.

먼저  $d(n(E))/dE$ 를 살펴보면, 이는 상태밀도함수의 변화로 증대될 수 있는데 즉,  $d(g(E))/dE$ 에 비례한다. 양자구속효과는 이러한 저차원 구조로부터 유도된 상태밀도함수의 변화에 의존한다. 실제로 그림 4에서 보듯이 상태밀도함수의 에너지 의존성은 저차원 구조로 감에 따라 그 변화가 크게 달라진다 [11].

나노선에서 존재하는 극대화된 상태밀도함수는  $S$ 값을 크게 증가시킬 수 있다. 저차원에서 열전수송에 대한 개념은 꽤 오래된 것이지만 [12], 열전 성능 지수가 향상될 것이라는 예측은 Dresselhaus 교수팀에 의한 것이다 [1,3].

전하 이동도의 에너지 상관성에 의한 항인  $d(\mu(E))/dE$ 은 식 (4)에서 보듯이 완화시간  $\tau(E)$ 의 에너지 상관성에 기인한다. 이것은 전자 에너지 필터링

의 의미를 갖는다. 완화시간은 산란확률의 역수로 주어지는데, 이는 일반적인 반도체 이론 의해 간단히 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = \tau_0 E^{\lambda-1/2} \quad (5)$$

여기서  $\lambda$ 는 산란 지수로서 전자와 음향 포논간의 산란인 경우에 1이고, 전자와 중성 불순물 원자간의 산란인 경우는 1/2이고, 이온화된 결합원자와의 산란인 경우는 2이다. 반도체 열전 기술개발의 초창기에는  $\lambda$ 의 증가가 열전성능지수 향상에 도움이 된다고 생각하여 이온화된 결합원자에 대한 효과를 얻으려고 노력하였다. 그러나 이러한 이온화된 결합원자를 첨가할 경우 PbTe의 경우 이동도의 감소를 가져와서 오히려 역효과를 유발했고 [13], Bi의 경우는 열전 성능 향상을 가져왔다 [14].

### 3. 나노선 열전 재료

일반적인 이론적인 근거에 의하면 증가된 양자 구속 효과에 의해 1차원 나노선이 2차원 양자 우물 구조인 초격자 박막보다  $ZT$ 가 훨씬 더 증가할 것으로 예측되고 있다. 현재 나노선 기반의 열전 소자연구는 CNT (Carbon Nanotubes), Si, Bi,  $Bi_2Te_3$  등에 대하여 대표적으로 MIT의 Dresselhaus 교수팀, UC Berkeley대학의 Majumdar 교수팀, Columbia대학의 Philip Kim 교수팀 등에서 주로 이루어져 왔다. 특히, 2008년 1월 Nature지에 Si 나노선을 이용한  $ZT$  값을 측정하는 논문이 Majumdar 교수팀 [7]과 Caltech의 Heath 교수팀 [8]에서 각각 한편씩 발표되었는데 나노선에서  $ZT$  값 향상을 위해 Seebeck 상수 ( $S$ , Thermoelectric Power)를 높이거나 열전도도를 낮추려는 것이 최근 이슈가 되고 있다. Philip Kim 교수팀은 SWNT (Single wall Nanotubes)와 MWNT (Multi wall Nanotubes)의 게이트 전압에 따른 Seebeck 상수 최적화에 관한 연구 [15, 16], Majumdar 교수팀은 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 구조를 이용한 나노선의 열전도도 ( $\kappa$ ) 측정에 대한 연구가 상당히 진행되어 왔으

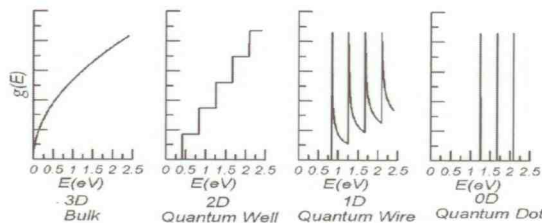


그림 4. 각 차원에 대한 다른 전자의 상태밀도함수의 에너지 상관성.



며 [17], Dresselhaus 교수팀은 Bi 나노선의 열전 특성을 측정하기 위하여 1960년부터 꾸준히 관련 연구를 진행해 오고 있다.

나노선 어레이를 만들기 위해 산화알루미늄( $Al_2O_3$ ) 템플릿을 이용하는데 이는 직경 7~100 nm 이고 길이 50  $\mu m$ 의 나노 크기의 일정한 벌집형태의 다공성 채널이고  $10^{10}/cm^2$ 의 밀도를 갖고 있다 [18, 19]. 채널의 구멍은 Bi 나  $Bi_{1-x}Sb_x$  같은 열전물질로 채워진다. Bi는 낮은 유효질량과 페르미 에너지면의 큰 이방성 때문에 양자 구속효과는 77 K에서 50 nm의 나노선 직경에서 일어날 것으로 예상되었으며 [20] 이러한 효과는 실험적으로 검증되기도 하였다 [19, 21].

AAO (Anodized Aluminum Oxide) 는 알루미늄 표면을 전기 연마 (Electro-polishing)와 양극 산화 (Anodization)를 통해 표면에 생성된 알루미늄 산화물을 식각함으로써 형성할 수 있고, 공정 변수 및 공정 횟수를 조절함으로써 다양한 pore 크기와 깊이를 가지는 템플릿의 제작이 가능하다. 형성된 AAO 템플릿은 그 자체로 수십 ~ 100 nm 단위의 규칙적인 구조를 가지는 나노 구조체이며, 금속 표면에 형성된 AAO 템플릿은 기관의 금속을 도전층 (Seed Layer)으로 사용하여 원하는 금속 및 반도체 물질을 전착법 (Electrodeposition)을 통해 나노 구조 내에 채워 넣어 어레이 (Array) 형태의 나노선을 형성할 수 있다 (그림 5). 그러나 이 방법으로 성장시킨 나노선은 다결정 특성을 지녀 단결정 Bi 나노선에서 볼 수 있는 양자구속효과를 관찰할 수 없다는 큰 결함이 있다. 압력 주입법 (Pressure Injection Method) [22] 역시 산화알루미늄 템플릿의 나노채널 내부에 성장시키고자 하는 물질을 액체 상태로 녹인 후 고압력을 가하여 채워 넣어 굳히는 방법으로 전기화학적 도금법과 달리 단결정 나노선을 성장시킬 수 있지만 여전히 어레이 형태의 나노선상에서 2단자법으로 상대적인 전기적 특성의 측정만 가능하였고 단일 나노선으로 소자화하지 못하여 열전 특성 평가를 하지 못하였다 (그림 6).

Bi는 매우 작은 유효질량과 함께 높은 이방성 밴드구조와 열전재료에 유용한 높은 전하이동도를 가지고 있다. Bi는 전자와 홀의 양이 같아 Seebeck 상수

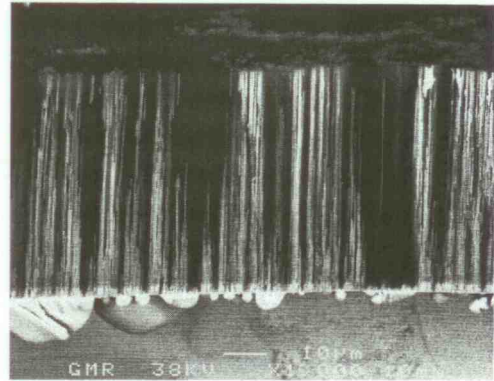
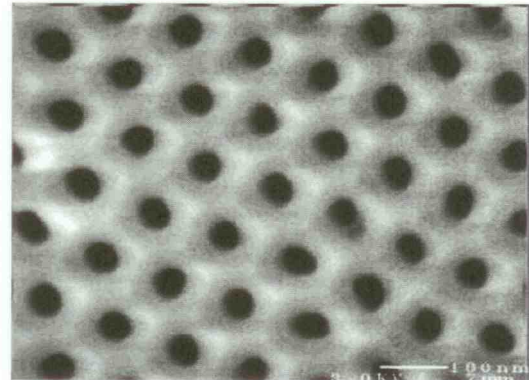
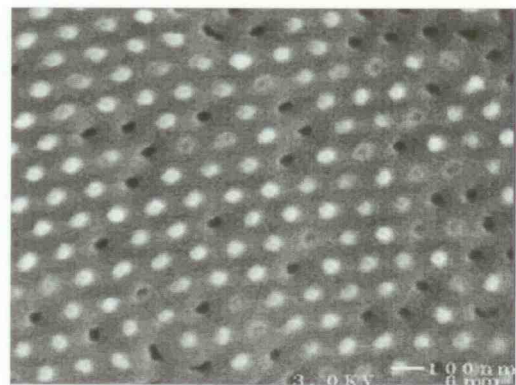


그림 5. AAO (Anodized Aluminum Oxide) 템플릿에 전기도금법으로 제작된 Bi 나노선.



(a)



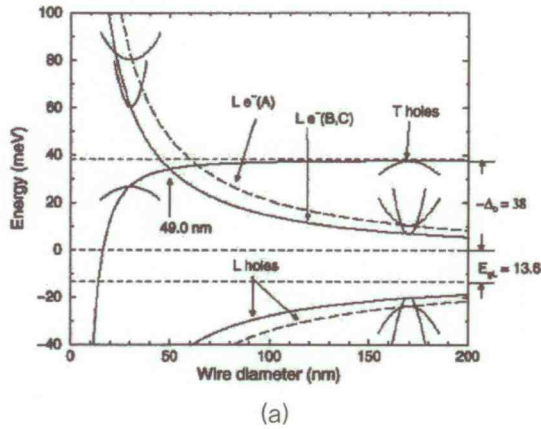
(b)

그림 6. (a) AAO (Anodized Aluminum Oxide) 템플릿, (b) AAO 템플릿에 압력주입법으로 제조된 Bi 나노선.

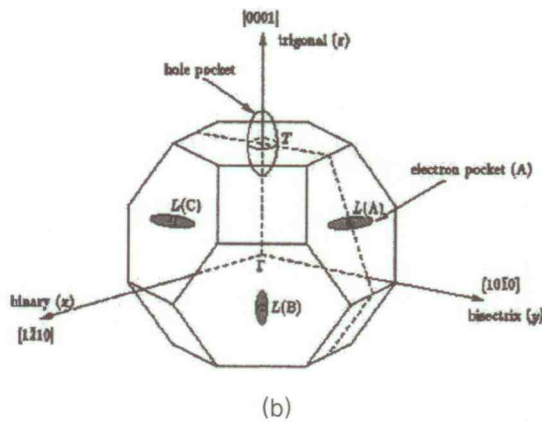
# Special Thema

에 대해 Positive, Negative 기여도가 서로 상쇄되는 반금속이다. 그러나 양자우물이나 양자 나노선으로서 Bi는 가장 낮은 전도대는 올라가고 가장 높은 가전자대는 내려가면서 반금속-반도체 전이 현상이 발생한다(그림 7). 이는  $[01\bar{1}2]$  성장 방향으로 Bi 나노선의 경우 직경 49 nm에서 반금속에서 반도체 전이가 발생할 것으로 예상된다 [23]. Bi 나노선은 높은 도핑 농도에서 반도체 영역에 있을 때 열전 응용으로 흥미로울 것으로 보인다.

저항의 온도 의존성은 이론 모델 계산 결과와 함께 실험 결과로부터 Bi 나노선이 양자 구속효과 때문에 반금속에서 반도체로 바뀐 것이 확인되었다



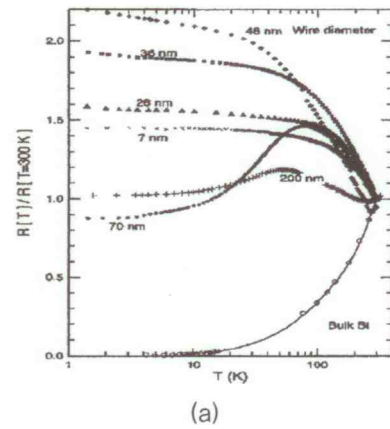
(a)



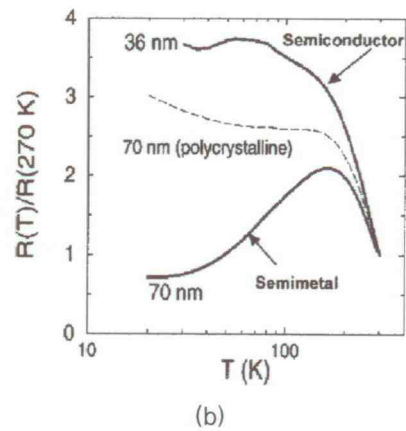
(b)

그림 7. (a) Bi 나노선의 두께에 따른 에너지 밴드 끝의 변화와 (b) Brillouin 존에 분포하는 전자와 홀의 포켓.

[24, 25]. 48 nm 이하의 나노선에서는 저항의 온도의존이 반도체 성향을 보이고, 70 nm보다 큰 나노선에서 저항의 온도의존성이 반금속 성향을 보여 이론적 예측과 거의 일치함을 알 수 있다(그림 8). 지금까지 Bi 나노선 어레이의 경우 Power Factor 증가를 보여주는 결정적인 실험적 결과가 없다. 이것은 나노선 어레이와 단일 나노선의 절대 저항값을 측정하기가 어렵기 때문이다. 이는 나노선 어레이의 경우 오믹 접촉이 이루어진 나노선의 개수를 알 수 없기 때문이고, 단일 나노선으로 소자를 만들고자 할 경우 템플릿에서 제거된 단일 나노선의 표면에 산화층이 형성되기 때문이다.



(a)



(b)

그림 8. Bi 나노선의 온도의존성 (a) 여러 가지 두께에서 측정된 온도에 대한 저항변화, (b) 이론적 계산 결과.



본 연구팀은 대표적인 열전재료인 Bi 및  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  나노선 연구에 집중해 왔으며, 기존에 선진국에서 수행된 연구와 달리 템플릿 제조나 촉매 제조를 거치는 일반적인 나노선 합성과정이 없고 이종물질의 개입이나 액상 혹은 기상으로의 상태변화 없이 Bi,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  박막을 스퍼터링으로 증착 후 진공 열처리하여 초고품위의 단결정 Bi,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  나노선을 성장시키는 방법을 개발하였다 [26].

단결정 Bi 나노선은 Bi 박막에서 열처리 시 박막에 유도된 압축응력에 의해 성장되는 것을 확인하였다 (그림 9). 열처리 시, 높은 열팽창 계수 ( $13.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )로 인해 부피 팽창이 큰 Bi 박막을 상대적으로 부피 팽창이 작은 Si 기판 ( $3.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )에 의해 압축응력 (Compressive Stress)이 발생된다. 이러한 압축응력은 나노선 성장에 있어 열역학적 구동력 (Thermodynamic Driving Force)을 제공하고 Bi 박막에 형성된 압축 응력을 이용하여 최고 품위의 단결정 Bi 나노선을 성장시킬 수 있었다. Bi와 Te를 동시에 스퍼터링으로 증착하여 열처리하여도 열전재료로서 가장 우수한 특성으로 알려진 고품위의 단결정  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  나노선이 성장되는 것이 최근 확인되었다 [26]. 성장된 나노선은 직경이 균일하고, 나노선 표면 위에 산화층을 형성하고 있다. 전자 회절패턴은 나노선의 축방향에 수직으로 빔을 조사하여 Bi 육방격자의 [110]축을 바탕으로 표시되었고 나노선이 단결정이고 성장 방향이 <001>임을 나타낸다. 또한 격자분석사진은 Bi 나노선에 결함이 없고, 단결정임을 보여준다(그림 9).

이와 같은 압축응력 유도법 (Stress-induced Method)은 소자 패키징 공정에서 신뢰성 문제로 대두되었던 Whisker 생성 메커니즘을 이용하여 부정적 요소를 긍정적인 방향으로 발전시킨 결과로 Bi 박막과 기판간의 열팽창계수 차이에 의한 응력발생으로 응력을 해소하기 위하여 나노선이 성장되는 메커니즘을 바탕으로 한다. 이 방법은 쉽게 단결정 Bi 나노선의 성장이 가능하며 Bi 박막의 두께 조절에 따른 Bi 나노선의 직경조절이 가능하다는 장점을 지니고 있다 [26, 27].

현재까지 Bi 단일 나노선의 열전 특성을 이해하기 위한 기초적인 전기 및 자기적 수송특성에 대한 연

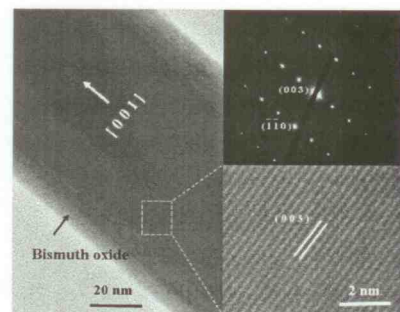
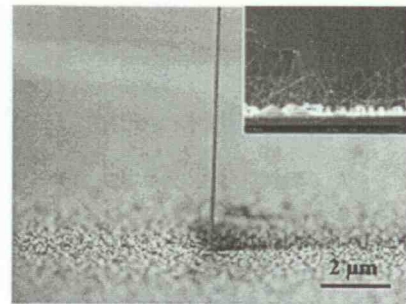
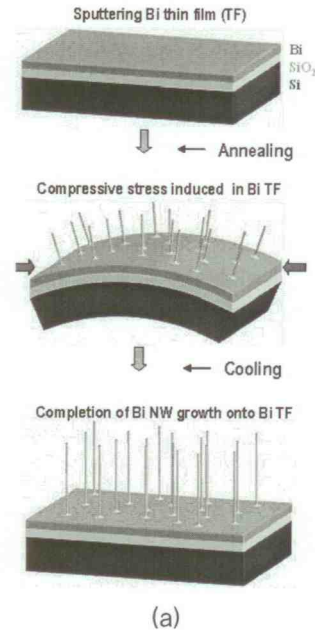
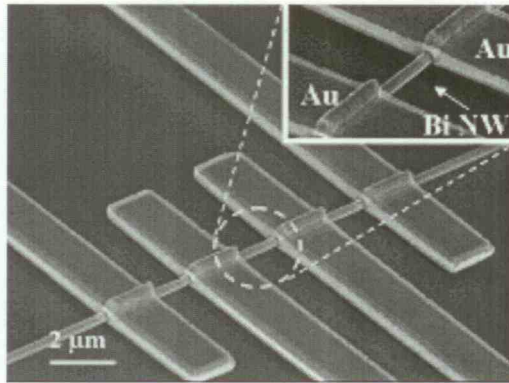


그림 9. (a) 열처리를 통한 단결정 Bi 나노선 성장 (b) 성장된 단결정 Bi 나노선의 전자주사현미경 이미지 (c) 단결정 Bi 나노선의 투과 전자현미경 이미지와 전자회절 패턴.

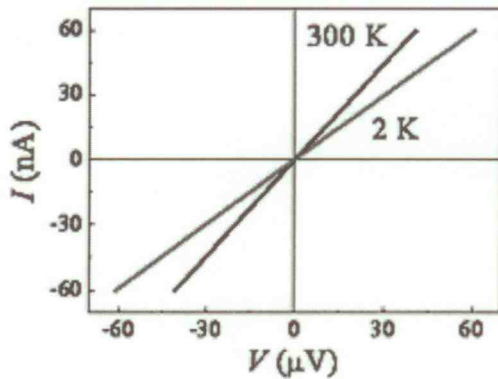
## Special Thema

구는 전무한 실정이다. 왜냐하면 Bi 나노선 표면에 형성되는 자연 산화층 ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ )으로 인해 전기적 오믹 형성이 어렵고, 또한 Bi가 낮은 녹는점 ( $271.3^\circ\text{C}$ )을 가지므로 외부 전극과의 오믹형성을 위해 열처리를 할 수 없어서 Bi 단일 나노선의 소자화가 어렵기 때문이다. 본 연구팀은 오믹접촉을 형성하기 위해 독자적인 기술인 기판 바이어스를 걸어 플라즈마 에칭 (Plasma Etching) 공정으로 자연 산화층을 제거하여 단일 Bi 나노선 소자를 제작하여 정상 자기 저항 (Ordinary Magnetoresistance), Shubnikov-de Haas 진동 등을 관찰하였다 [27].

그림 10(a)는 단결정 Bi 단일 나노선을 이용한 소



(a)



(b)

그림 10. (a) 단결정 Bi 단일 나노선, (b) 단결정 Bi 단일 나노선 소자의 I-V 곡선.

자와 그림 10(b)는 단결정 Bi 단일 나노선의 선형적 특성을 보이는 I-V 곡선을 보여준다. 또한 단일 Bi 나노선 소자에 백 게이트를 달아서 최초로 게이트 효과 (Gate Effect)를 관찰하였다 [27]. 특히, 페르미 준위를 조절하여 Bi 나노선에 게이트 효과로 전기적 도핑을 할 수 있고 이는 열전 효과를 극대화시킬 수 있다. 전자 이동도  $\mu_d = 76,900 \text{ cm}^2/\text{V}$ 와 자유행정거리  $l = 1.3 \mu\text{m}$ 를 확인하였으며, 이 결과는 아주 우수한 캐리어 이동도를 보이므로써 초고속 HEMT (High Electron Mobility Transistor)로의 응용이 기대된다 [26, 27]. 본 연구팀은 압축응력 유도법으로 성장된 단결정 Bi,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  단일 나노선 소자공정을 최적화시켜 단일 나노선 소자의 Seebeck 상수 (S), 전기전도도 ( $\sigma$ ), 열전도도 ( $\kappa$ )를 구하고 열전 성능 지수의 향상을 위한 연구를 진행 중이다.

### 4. Si 나노선의 열전특성

벌크상의 Si은 일반적 반도체 전자재료로써 매우 중요한 물질이지만 결코 열전재료로써는 좋은 재료가 아니라고 여겨졌다. 왜냐하면 전기전도도가 매우 커서 열전능이 매우 낮기 때문이다. 그러나 나노선으로 만들어 지면서 Si은 전혀 새로운 특성을 갖게 된다. UC Berkeley대학 Majumdar 교수팀 [7]과 Caltech의 Heath 교수팀 [8]은 각각 독립적으로 Si 나노선의 열전 성능이 나노선의 형태와 도핑을 제어하면 매우 크게 증가된다고 최근에 보고하였다.

두 그룹은 Si 나노선의 ZT값을 상온과 저온에서 거의 1에 가까운 값을 얻었다. 그들은 Si 나노선의 경우 아주 작은 열전도도 값을 갖는다는 것을 발견했다. 흥미롭게도, Caltech의 Heath 교수팀은 1-D 포논 끌개 효과로 인해 S가 매우 증가되는 것을 발견했다. UC Berkeley대학 Majumdar 교수팀은 Si 나노선 제작 시 그들의 고유한 방법인 "Electroless Etching" 방법을 사용했는데, Si 웨이퍼 표면에서 HF/ $\text{NO}_3$  수용액상에 침전한 은이온이 촉매 역할을 하는 환원반응을 통해 Si 웨이퍼를 수직으로 깎아 내어 Si 나노선 어레이를 제조해 내는 방법이다.

그림11과 같이 표면이 매끄러운 나노선을 만드는

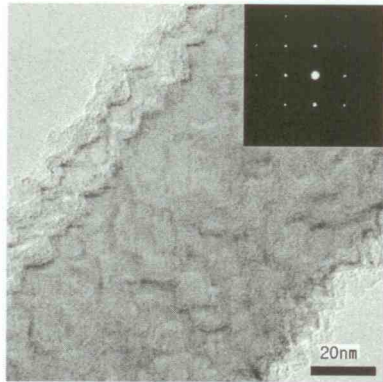


일반적인 다른 합성법과는 달리 이 기술은 웨이퍼 표면에서는 거친 표면의 특성을 보이는 수직으로 정렬된 Si 나노선 어레이를 만들어 낸다. 거친 나노선 표면은 Si 나노선의 열전도도를 100배 감소시키는데 절대적으로 중요한 역할을 하지만 이 현상을 물리적 배경은 완전히 설명되지 않고 있다. 앞으로 최적화된 도핑 정도와 거칠기의 조절을 통해 상온에서 1보다 더 큰 ZT값을 얻을 수 있을 것으로 기대하고 있다.

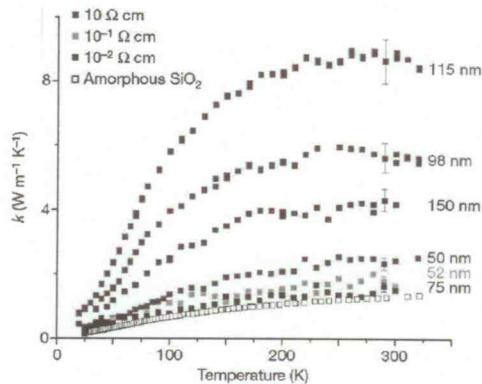
한편 Caltech의 Heath 교수팀은 단면적이  $10 \text{ nm} \times 20 \text{ nm}$ 와  $20 \text{ nm} \times 20 \text{ nm}$ 인 나노선을 'Superlattice Nanowire Pattern Transfer (SNAP)' 방

법[28]을 이용하여 불순물 농도가 조절된 단결정 Si 나노선을 만들었다. 나노선의 크기와 불순물 도핑 수준 (Impurity Doping Levels)을 변화시킴으로써, 넓은 온도 범위에서 벌크상태의 Si보다 약 100배나 증가된 ZT값을 얻었고, 200 K에서도  $ZT = 1$ 값을 얻었다(그림 12).

비록 Si 나노선은 효율이 좋은 다른 열전물질에 비해 낮은 열전성능을 갖지만 두 연구팀은 이 물질의 효율증가가 곧 이루어질 것이라고 낙관하고 있다. 여기서 우리가 주목할 점은 Si와 같은 저가의 열전재료를 새로이 얻어내었다는 점과 나노선 구조로 만들어진 열전재료는 열전도도 뿐 아니라 전력인자

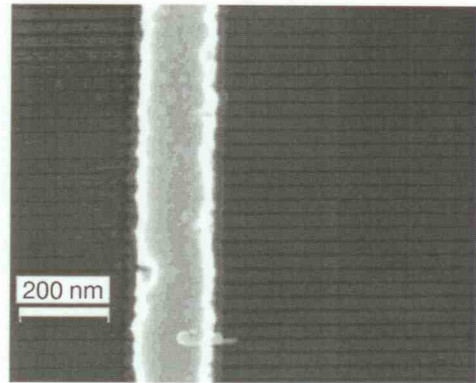


(a)

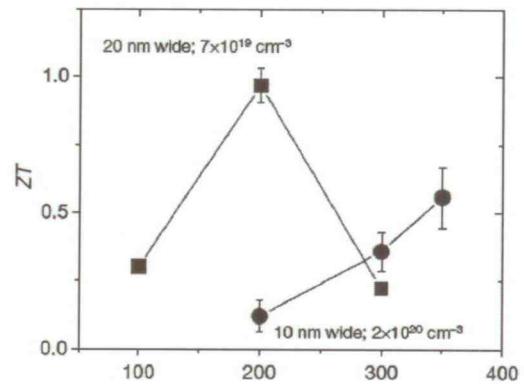


(b)

그림 11. UC Berkeley대학의 Majumdar 교수팀에서 제작한 Si 나노선 (a) 거친 표면을 가진 Si 나노선의 SEM 이미지, (b) 측정된 열전도도.



(a)



(b)

그림 12. (a) Caltech의 Heath 교수팀이 제작한 Si 나노선 어레이와 (b) 측정된 ZT값.

(Thermoelectric Power)까지 쉽게 증가시킬 가능성을 확인하였다는 점에 주목할 필요가 있다.

### 5. 나노선의 열전특성 측정기술

열전 나노선의 연구에 있어서 가장 큰 장애물은 열전 특성 측정에 있다고 해도 과언이 아니다. 벌크 열전 특성과는 상이하게, 열전 나노선의 경우, 전기적 및 열적접촉을 만드는 것이 쉽지 않고, 나노 스케일에서 열의 흐름을 통제하고 특정 나노 스케일의 위치에서 온도변화를 측정하는 것이 매우 어렵기 때문이다. 특히 Bi 나노선은 공기 중에서 나노선의 표면에 10 nm 두께의 산화층(Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)을 지니고 있어 소자 제작 시 오믹접촉형성이 매우 어렵다. 2001년 MIT Dresselhaus 교수팀은 산화알루미늄 템플릿을 이용한 전기도금법으로 Bi 나노선 어레이를 성장시켰으며 이를 이용하여 2단자 소자제작을 하여 어레이 형태의 Bi 나노선의 특성을 관찰한 바 있다(그림 13)[18]. 그러나 이 경우 다결정 Bi 나노선을 어레이 형태로 하여 2단자로 측정할 결과이기에 단일 나노선의 열전 성능을 측정할 수 없다는 근본적인 문제가 있다. 또한 Caltech의 Heath 교수팀 [29]은 스퍼터링법을 이용한 Bi 나노선을 제작하여 나노선의 크기 효과에 따른 열전 특성을 측정하였으나 제작된 나노선이 다결정이어서 단결정에서 관찰될 수 있는 양자 구속효과를 관찰하지 못했음은 물론 열전효과 상승을 기대할 수 없었다(그림 14). 전술한 바와 같이 본 연구팀은 플라즈마 에칭법으로 나노선 표면의 산화막을 진공 중에서 제거한 후 진공을 깨지 않고 바로 전극을 증착시킴으로 오믹접촉을 만들 수 있어서 이러한 문제를 해결하였다 [26, 27]. 뿐만 아니라 수소 열처리법도 오믹접촉을 만드는데 아주 탁월한 효과가 있음을 확인하였다.

나노선의 열전도를 측정하기 위해서는 나노선이 기판으로부터 완전히 분리되어 공중에 떠 있는 구조에서 측정되어야 한다. 그렇지 않으면 열전도도가 낮은 나노선을 통해 열이 흐르지 않고 대부분의 열이 기판을 통해 전달되어 측정 자체가 불가능하다. 나노 스케일의 열전달은 외부 열이 완전히 차폐된

Cryostat에서 진행되며, 열전달의 정확한 측정을 위해서는 마이크론 사이즈의 Heating Membrane과 Sensing Membrane의 보정이 선행되어야 한다. Heating Membrane에 전류인가에 의해 발생된 Joule 열은 나노선을 통해서만 Sensing Membrane에 전달되게 된다. 이때 Heating Membrane과 Sensing Membrane의 저항변화를 보정값과 비교하여 나노선 양단간의 온도 차이를 계산할 수 있으며 이를 통하여 열전도도 측정이 가능하다(그림 15).

UC Berkeley대학 Majumdar 교수팀은 나노선의 전기전도도를 측정하기 위하여 그림 16(a)와 같이

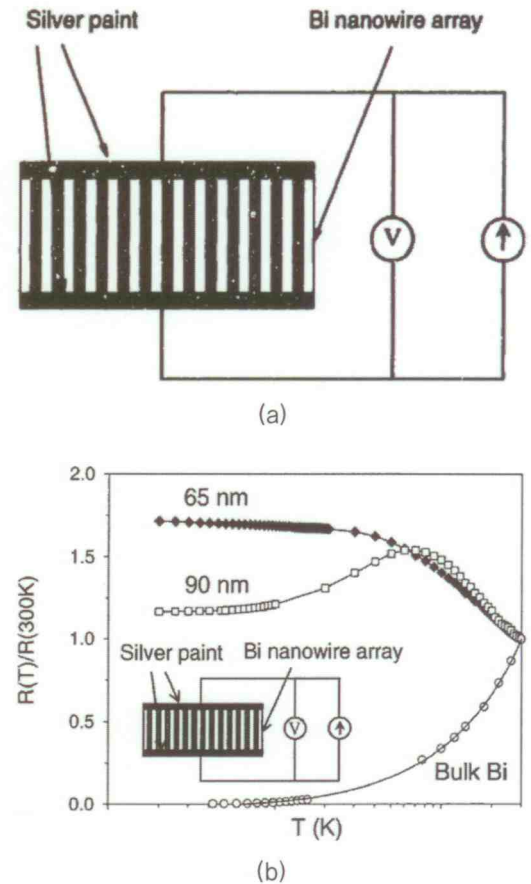
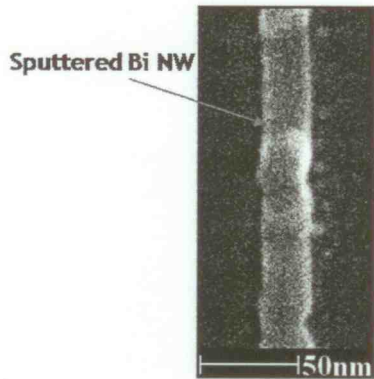
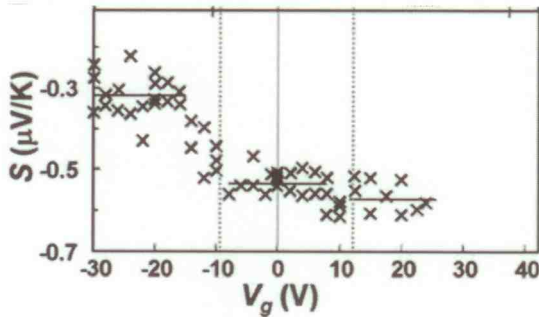


그림 13. MIT Dresselhaus 교수팀의 산화알루미늄 템플릿을 이용한 전기 도금법 Bi 나노선 어레이의 소자제작. (a) 2단자 측정 모식도, (b) 나노선 직경에 따른 상대적 저항값의 온도의존성



(a)



(b)

그림 14. Caltech의 Heath 교수팀의 스퍼터링법을 이용하여 제조한 Bi 나노선의 열전 특성 측정 (a) 스퍼터링 법으로 제작한 Bi 나노선의 SEM 이미지 (b) Gate-voltage에 따른 S값.

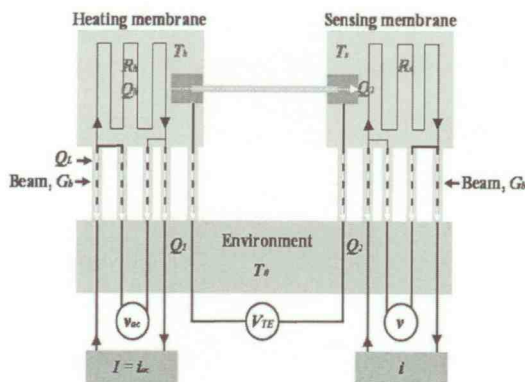
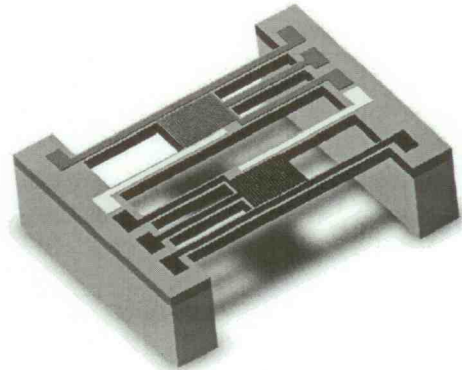


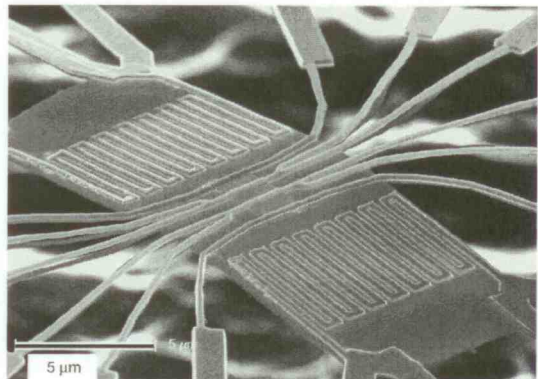
그림 15. MEMS 구조를 이용한  $\kappa$  측정 개략도.

MEMS 기술을 이용하여 띄워진 구조의 측정구조물을 개발하였다. Majumdar 교수팀은 이 구조물을 이용하여 탄소나노튜브 [15],  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ [30], Si [31] 나노선의 열전도도를 성공적으로 측정하였다. Caltech의 Heath 교수팀이 제작한 Si 나노선 어레이와 측정된 ZT값에서 만든 구조물(그림 16 (b))인데 나노선이 놓일 부분의 기판을 파내어 제거하고 최소한의 구조물만 띄워서 측정하는 방식인데, 이 구조물을 이용하여 Si 나노선의 열전도도를 측정하였다 [8].

Seebeck 상수 (S)값 측정에서는 열 흐름을 완벽하게 제어하지 않아도 측정이 가능하다. Columbia대



(a)



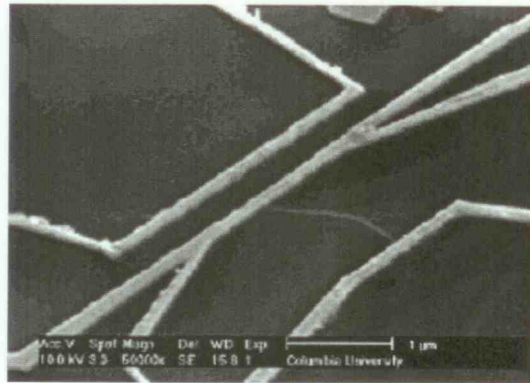
(b)

그림 16. (a) UC Berkeley대학의 Majumdar 교수팀에서 개발한 Suspended MEMS 구조, (b) Caltech의 Heath 교수팀이 제작한 Suspended MEMS 구조.

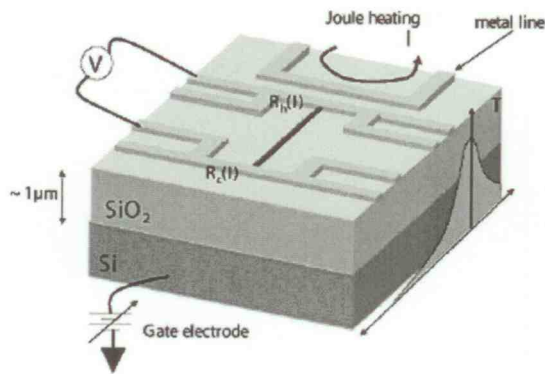
# Special Thema

학의 Philip Kim 교수팀은 [32, 33] 그림 17과 같이 마이크로 히터와 마이크로 온도센서를 나노선 양단에 위치시켜서 온도 차이에서 유발되는 전위차를 측정하였다. 이 마이크로 히터 선에 공급된 바이어스 전압은 줄 히팅 (Joule Heating)을 발생시키고, 접촉 영역 근처에 부분적으로 온도 구배를 발생시킨다. 이 열은 주로 SiO<sub>2</sub>층 (1 μm 두께)을 따라 전도되면서 나노선의 길이 방향을 따라 온도 분포가 생성된다.

본 연구팀은 단결정 Bi 및 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 나노선의 Seebeck 상수와 전기적 특성 측정을 위해 제조한 Au 전극을 이용하여 나노선 양단에 발생한 온도 변화를 측정하고 있다 (그림 18). 나노선 양단의 온도구배는



(a)



(b)

그림 17. Seebeck 상수 (S)를 측정하기 위한 탄소나노튜브 소자 (a) 소자의 SEM 이미지, (b) 온도와 전위차 측정을 위한 개략도.

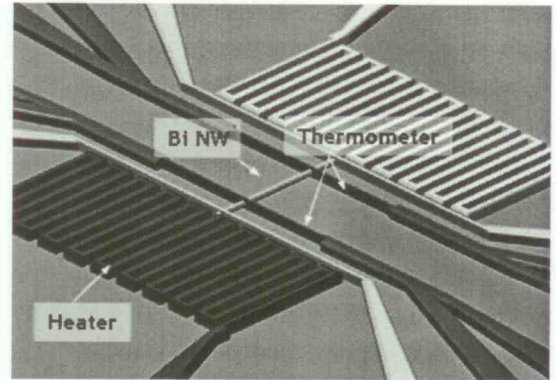
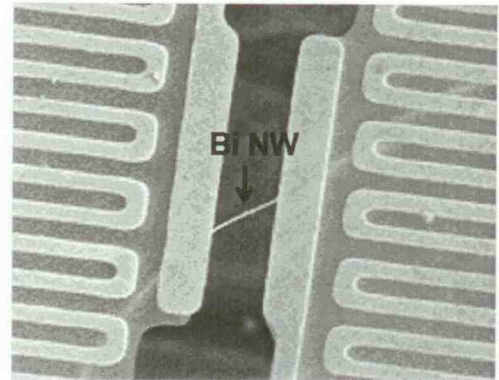
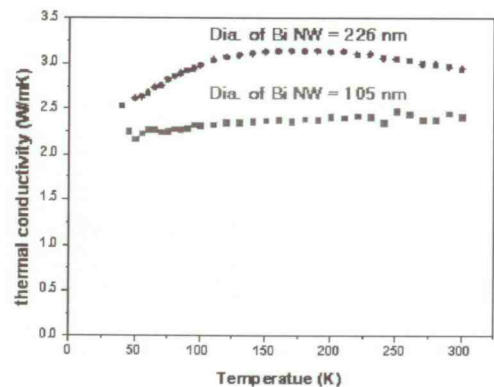


그림 18. Seebeck 상수 (S)를 측정하기 위한 Bi 나노선 열전 소자의 개략도.



(a)



(b)

그림 19. (a) MEMS Test Structure를 이용한 단일 단결정 Bi 나노선 소자와 (b) 나노선 직경에 따른 열전도도 측정결과.



나노선의 온도에 따른 저항 변화와 히터에 인가된 전류량 및 시스템의 온도 변화에 의해 결정된다. 따라서 히터에 의한 미세 온도 구배를 측정할 수 있는 Au 전극의 폭 및 안정적 공정기술의 확보가 필요하다. 이와 같은 나노선 열전소자로 부터 Bi 나노선의 양자 구속 효과 (Quantum Confinement Effects)를 확인하기 위하여 Fermi Level을 바꾸어 가면서 측정할 수 있는 게이트 구조를 이용하고 있다. 한편 Bi 및 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 나노선의 열전도도( $\kappa$ )는 UC Berkeley Majumdar 교수팀과 공동연구의 일환으로 MEMS Test Structure를 이용하여 측정중이다. 그림 19(a)는 MEMS Test Structure 위에 올라간 단일 Bi 나노선과 그림 19(b)는 Bi 나노선 직경에 따른 열전도도 측정 결과를 보여 준다. 측정된 단결정 Bi 나노선의 직경은 105 nm와 226 nm이었으며, 각각의 열전도도는 상온에서 2.4 W/mK와 3.0 W/mK로 측정되었다. 이 값은 벌크 Bi(상온 기준 열전도도  $\approx 8.0$  W/mK)에 비하여 매우 낮은 값이며, 이는 압축응력법으로 성장된 단결정 Bi 나노선이 매우 낮은 열전도도를 가짐을 증명하는 결과이다.

## 6. 결론

2000년대에 들어서 나노 기술 (Nanotechnology)의 응용으로 열전 물질의 성능지수가 현격히 향상되고 있다. 열전 현상을 이용한 에너지 변환기술은 군사용, 우주항공분야에서의 열전 발전, 특정 지점 냉각, 소형 열전냉각 제품과 같이 특수한 목적으로 사용되는 틈새시장 (Niche Market)에 적용되는 수준에 머물러 왔으나, 21세기에 들어 신재생 에너지 개발과 에너지 이용효율의 극대화 및 친환경적 에너지원의 개발 측면에서 열전에너지 변환기술에 대한 관심이 다시금 고조되고 있다. 초고효율의 나노 열전소자의 개발은 경제적인 측면에서 기존의 에너지 시스템을 대체할 수 있을 뿐만 아니라 폐열의 재활용, 청정에너지의 개발 등을 통하여 막대한 에너지 수입 비용 절감이 기대되며 또한 세계 최고 수준의 국내 소자 제작기술과 시너지효과를 통하여 기존의 전자, 철강, 자동차, 바이오 등 산업 전반에 일대 변혁을 기

대할 수 있다. 특히 최첨단 전자장비와 생명기술 연구 분야에서는 정확하고 세밀한 온도제어를 위하여 고성능의 열전냉각소자에 대한 개발요구가 절실하다. 이러한 요구에 부합하기 위해서는 뛰어난 열전 성능을 지닌 재료 개발이 반드시 선행되어야 한다.

혁신적인 에너지 변환시스템을 개발하기 위하여 임계 변환 효율  $ZT = 3$ 을 구현하는데 1차원 나노선 기술이 중요한 역할을 할 것으로 기대를 모으고 있다. 나노선을 이용한의 주요 연구 방향은 전통 열전 물질인 Bi 계열의 재료를 기반으로 한 양자 구속효과에 의한 전력 인자 ( $S^2\sigma$ ) 향상과 나노구조에 의한 열전도도 감소가 한가지 방향이고, 또 다른 중요한 방향은 Si과 같은 매우 저가의 재료를 이용하여 나노선에서 일어나는 열전도도의 감소와 에너지 밴드 엔지니어링에 의한 전력인자 향상을 꾀하는 것이다. 단순히 나노구조만 도입하더라도 열전도도를 1/3 배 정도는 감소시킬 수 있으므로 보통 열전물질에 기반을 둔 나노구조로  $ZT$ 값이 3 이상을 기대할 수 있다. 또한 벌크 상에서는 거의 열전효과를 갖지 못하는 Si을 표면이 거친 나노선으로 만들면 열전도도가 100배 가량 감소됨이 확인됨으로써 열전 나노선의 응용을 한층 가속화시키고 있다. 물론 벌크 열전 재료와 달리 열전 나노선의 경우 실용화는 아직 갈 길이 멀다. 그럼에도 불구하고 나노선 기반 열전소자가 21세기 에너지 변환시스템의 새로운 패러다임을 제시할 것으로 많은 사람들의 기대를 모으고 있다.

## 감사의 글

산업자원부 소재원천기술개발사업, 학술진흥재단 (KRF-2007-314-C00107) 및 한국과학재단 특정기초연구사업(R01-2005-000-10711-0)의 지원에 감사를 표함.

## 참고 문헌

- [1] A. Majumdar, "Thermoelectricity in Semiconduc-

## Special Thema

- tor Nanostructures", *Science*, vol. 303, pp. 777-778, 2004.
- [2] L. D. Hicks, M. S. Dresselhaus, "Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit", *Phys. Rev. B*, vol. 47, pp. 12727-12731, 1993.
- [3] L. D. Hicks and M. S. Dresselhaus, "Thermoelectric figure of merit of a one-dimensional conductor", *Physical Review B*, vol. 47, 16631-16634, 1993.
- [4] R. Venkatasubramanian, E. Siivola, T. Colpitts, B. O'Quinn, "Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit", *Nature*, vol. 413, pp. 597-602, 2001.
- [5] T. C. Harman, P. J. Taylor, M. P. Walsh, and B. E. LaForge, "Quantum Dot Superlattice Thermoelectric Materials and Devices", *Science*, vol. 297, pp. 2229-2232, 2002.
- [6] K. F. Hsu, S. Loo, F. Guo, W. Chen, J. S. Dyck, C. Uher, T. Hogan, E. K. Polychroniadis, M. G. Kanatzidis "Cubic  $\text{AgPb}_m\text{SbTe}_{2+m}$  : Bulk Thermoelectric Materials with High Figure of Merit", *Science*, vol. 303, pp 818-82, 2004.
- [7] A. I. Hochbaum, R. Chen, R. D. Delgado, W. Liang, E. C. Garnett, M. Najarian, A. Majumdar, P. Yang, "Enhanced thermoelectric performance of rough silicon nanowires." *Nature*, vol. 451, pp. 163-167, 2008.
- [8] A. I. Boukai, Y. Bunimovich, J. T. Kheli, J. K. Yu1, W. A. Goddard III, J. R. Heath, "Silicon nanowires as efficient thermoelectric materials". *Nature*, vol. 451, pp. 168-171, 2008.
- [9] H.J. Goldsmid, *Applications of Thermoelectricity*, Methuen, London, 1960.
- [10] M. Cutler, N.F. Mott, "Observation of Anderson Localization in an Electron Gas", *Phys. Rev.* vol. 181, pp. 1336-1340, 1969.
- [11] N.W. Ashcroft, N.D. Mermin, *Solid State Physics*, Holt Rinehart and Winston, Philadelphia, 1976.
- [12] A.Ya. Shik, *Fiz. Tekh. Poluprovodn.* vol. 7, pp. 261, 1973.
- [13] T.S. Stavitskaya, L.S. Stilbans, *Sov. Phys. Solid State* vol.2, pp1868, 1961.
- [14] J. P. Issi, J. P. Michenaud, J. Heremans, "Electron scattering in compensated bismuth", *Phys. Rev. B* vol.14, pp.5156-5160, 1976.
- [15] P. Kim, L. Shi, A. Majumdar, and P. L. McEuen, "Thermal Transport Measurements of Individual Multiwalled Nanotubes", *Phys. Rev. Lett.* vol. 87, 215502 -4, 2001.
- [16] J. P. Small, K. M. Perez, and P. Kim, "Modulation of Thermoelectric Power of Individual Carbon Nanotubes", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 91, pp. 256801-256804, 2003.
- [17] L. Shi, D. Li, W. Jang, D. Kim, Z. Yao, P. Kim, A. Majumdar, "Measuring Thermal and Thermoelectric Properties of One-Dimensional Nanostructures Using a Microfabricated Device", *Journal of Heat Transfer*, vol. 125. Pp. 881, 2003.
- [18] Z. Zhang, X. Sun, M.S. Dresselhaus, J.Y. Ying, J. Heremans, "Electronic transport properties of single-crystal bismuth nanowire arrays", *Phys. Rev. B* vol. 61, pp. 4850-4861, 2000.
- [19] Z. B. zhang: 'Fabrication, characterization and transport properties of bismuth nanowire systems', PhD thesis, MIT, February, 1999.
- [20] Y. M. Lin, X. Sun, M.S. Dresselhaus, "Theoretical investigation of thermoelectric transport properties of cylindrical Bi nanowires", *Phys. Rev. B* vol. 62, pp. 4610, 2000.
- [21] J. Heremans, C.M. Trush, Z. Zhang, X. Sun, M. S. Dresselhaus, J. Y. Ying, D. T. morelli, "Magnetoresistance of bismuth nanowire arrays : A possible transition from one-dimensional to three-dimensional localization" *Phys. Rev. B*, vol. 58, R10091-R10095, 1998.
- [22] S.B. Cronin, Y.M. Lin, O. Rabin, M.R. Black, G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus, P.L. Gai, "Bismuth nanowires for potential applications in nanoscale electronics technology", *Microsc. Microanal.* vol.8, 58-63, 2002.
- [23] J. Heremans, C. M. Trush, Y.M. Lin, S. Cronin, Z. Zhang, M. S. Dresselhaus, H. F. Mansfield, "Bismuth nanowire arrays : Synthesis and galvanomagnetic properties", *Phys. Rev. B*, vol. 61, pp. 2921-2930, 2000.
- [24] Y.M. Lin, 'Fabrication, characterization and theoretical mode-ling of Te-doped Bi nanowire systems for thermoelectric applications', MS thesis, MIT, January 2000.
- [25] B. Lenoir, M. Cassart, J. P. Michenaud, H. Sherrer, S. Sherrer, "Transport properties of Bi-RICH Bi-Sb alloys", *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 57, pp. 89-99, 1996.
- [26] W. Y. Lee, J. H. Ham, W. Y. Shim, J. W. Roh, S. H. Lee, K. J. Joen, " METHOD FOR MANUFAC-



TURING NANOWIRE BY USING STRESS-INDUCED GROWTH", 한국 (출원 06-137069), PCT (PCT/KR2007/006944), 미국(출원 12/064,861), 유럽(출원 7855359.1).

- [27] W. Shim, J. Ham, K. Lee, W. Y. Jeung, M. Johnson and W. Lee, "On-Film Formation of Bi Nanowires with Extraordinary Electron Mobility", To be published.
- [28] N.A. Melosh, A. Boukai, F. Diana, B. Gerardot, A. Badolato, P. M. Petroff, J. R. Heath, "Ultrahigh-Density Nanowire Lattices and Circuits", Science vol. 300, pp. 112-115, 2003.
- [29] A. Boukai, K. Xu, and J. R. Heath, "Size-Dependent Transport and Thermoelectric Properties of Individual Polycrystalline Bismuth Nanowires", Adv. Mater. vol. 18, pp. 864-869, 2006
- [30] L. Shi, C. Yu, and J. Zhou, "Thermal Characterization and Sensor Applications of One-Dimensional Nanostructures Employing Microelectromechanical Systems", Journal of Physical Chemistry B vol. 109, pp. 22102-22111, 2005.
- [31] Y. Zhang, J. Christofferson, A. Shakouri, D. Li, A. Majumdar, Y. Wu, R. Fan and P. Yang, "Characterization of heat transfer along a silicon nanowire using thermoreflectance technique", IEEE Transactions on Nanotechnology 5 (1), pp.67-74, 2006.
- [32] J. P. Smalla, L. Shi, P. Kim, "Mesoscopic thermal and thermoelectric measurements of individual carbon nanotubes", Solid State Communications vol. 127, pp.181-186, 2003.
- [33] J. H. Seol, A. L. Moore, S. K. Saha, F. Zhou, and L. Shi, Q. L. Ye and R. Scheffler, "Measurement and analysis of thermopower and electrical conductivity of an indium antimonide nanowire from a vapor-liquid-solid method", J. Appl. Phys. vol. 101, pp. 023706, 2007.

### 저|자|약|력



성 명 : 전계진

◆ 학 력

- 1988년  
경상대 물리교육과 이학사
- 1991년  
연세대 대학원 물리학과 이학석사
- 1997년  
연세대 대학원 물리학과 이학박사

◆ 경 력

- 1997년 - 1998년 삼성 생명과학 연구소 Post-Doc
- 1998년 - 2005년 삼성종합기술원 의료전자팀 U-Health팀 수석연구원
- 2007년 - 현재 연세대 신소재공학과 연구교수



성 명 : 이우영

◆ 학 력

- 1986년  
연세대 금속공학과 공학사
- 1988년  
연세대 대학원 금속공학과 공학석사
- 2000년  
Univ. of Cambridge 물리학과 이학박사

◆ 경 력

- 2000년 - 2003년 KIST 미래기술연구본부 선임연구원
- 2003년 - 현재 연세대 신소재공학과 교수
- 2008년 - 현재 대학산업기술지원단 단장