

나노선 기반 초고효율 열전소자 기술 개발 현황

노 종 욱 · 이 우 영

연세대학교 신소재공학과

Development of High-efficiency Thermoelectric Devices Using Nanowires

Jong Wook Roh and Woo Young Lee

Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University

1. 서론

21세기들어 에너지 수요의 급증과 더불어 야기된 글로벌 에너지 위기 및 지구 온난화의 가속화가 사회적 이슈로 대두되고 있다. 저탄소 녹색성장의 기조 아래 환경 친화적 신재생 에너지원의 개발에 관한 연구뿐만 아니라 에너지 효율을 높일 수 있는 연구가 국가주도 사업으로 활발히 연구되고 있다. 최근 우주·국방·수송 등의 국가전략 산업이나 기반 산업적 수요가 급증하고 있는 상황에서 극한 환경(저온, 고온, 방사선, 고압, 진공 등)에서 안정적인 에너지를 공급할 수 있는 적절한 에너지 변환 소재의 개발은 국가 전체의 안전이나 효율성 제고에 반드시 필요한 산업이므로 꾸준한 원천기술 개발 및 실용화 기술이 요구된다.

열전현상(thermoelectric effect)은 온도구배가 전위차를 형성하는 Seebeck 현상(1821년)과 전위차가 온도구배를 형성하는 Peltier 현상(1843년)으로 구분된다.(그림1 참조) 열전현상은 에너지 소비(energy consumption) 및 에너지 생산(energy generation)에 있

어서 변환 효율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 그 원리상 태양열, 지열, 해수열, 산업 폐열 등 지구상의 거의 모든 열을 이용할 수 있다는 장점을 가지고 있어 친환경 에너지 응용이 확대될 것으로 기대되고 있다. 또한 열전현상은 무공해, 저비용, 고신뢰성, 친환경성 등의 장점을 가지고 있어 IT, BT 분야의 기존 제품 기술과의 융합이 가능하며 민간분야뿐만 아니라 군수분야까지 그 활용도가 넓다.(그림 2) 이러한 뛰어난 적용성에

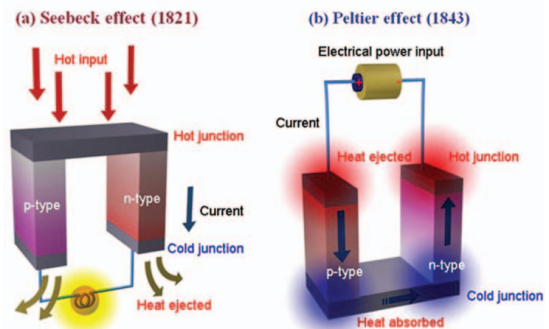


그림 1. 열전현상의 원리 (a) Seebeck 효과 (b) Peltier 효과

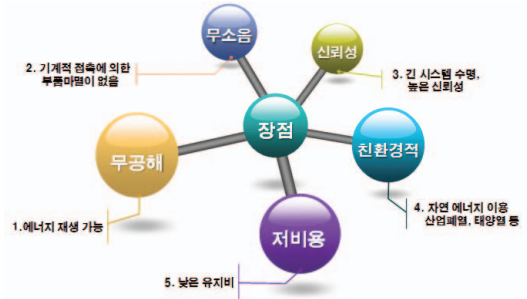


그림 2. 열전현상의 장점

도 불구하고 현재까지 열전 에너지 변환은 열전재료의 한계로 인하여 그 변환 효율이 카르노 기관의 약 10%에 머물고 있어 우주 및 군사, 극지 환경 발전, 의료기기 등과 같이 효율이 중요하지 않은 특수목적 분야에 제한되고 있다. 이러한 열전재료의 한계를 극복하기 위하여 최근 들어 나노 기술을 이용한 열전재료 개발이 선진국을 중심으로 연구되고 있다. 본 고에서는 벌크 열전재료의 한계를 극복하기 위한 나노 기술 기반의 열전소자에 관한 연구동향을 살펴보고 차세대 초고효율 에너지 변환용 열전소자의 개발 가능성에 관하여 살펴보고자 한다.

2. 벌크 기반의 열전재료의 한계

열전현상은 1821년 T. J. Seebeck에 의해서 처음 발견된 이후, Abram Ioffe에 의해 반도체의 Seebeck 계수가 금속에 비하여 약 100배 가량 크며 그 열전 변환 효율이 약 4%에 이른다는 연구 결과가 발표되면서 본격적인 연구가 시작되었다. 열전재료의 성능은 열전성능지수(thermoelectric figure of merit, ZT_m)로 결정된다.

$$ZT_m = \frac{S^2 \sigma T_m}{k} \quad (1)$$

여기에서 S 는 Seebeck 계수, σ 는 전기전도도(electrical conductivity), 그리고 k 는 열전도도(thermal

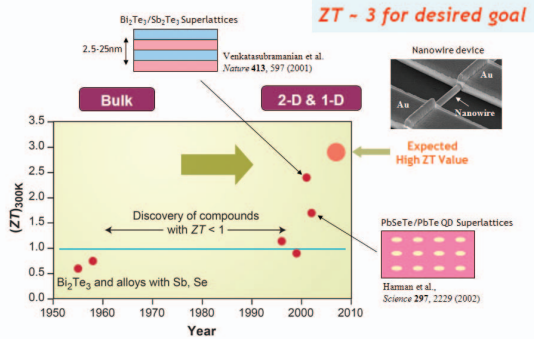


그림 3. 연도별 열전성능지수 발전 현황 (Ref.[5])

conductivity)를 나타낸다. 그러나 벌크 열전재료에서 상기 세 인자(parameter)는 각각 전하농도(carrier concentration)와 서로 연관되어 있어 상보적 관계에 있다. 예를 들어 전하의 수가 증가하게 되면 전기전도도의 향상을 가져올 수 있으나 동시에 전하의 이동으로 인한 열전도도의 증가가 동시에 발생하게 된다. 이러한 상보적 관계는 열전성능지수가 뛰어난 열전재료의 개발에 걸림돌이 되어 왔으며, 1950년대 발견된 Bi_2Te_3 ($ZT_m \approx 1$) 이후 2000년대까지 벌크 열전재료에서의 열전성능지수의 향상이 거의 이루어지지 않았다.(그림 3) 1993년 미국 MIT 물리학과와 Dresselhaus 교수가 나노 재료에서는 열전도도의 증가 없이 power factor($S^2\sigma$)의 향상이 가능하여 저차원의 열전재료에서는 그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 물질의 크기가 줄어들수록 열전성능지수가 비약적으로 증가할 것이라는 이론 논문을 발표하였다.²⁾ Dresselhaus 교수팀의 이론 논문은 나노 구조에서는 양자 구속 효과(quantum confinement effect)로 인하여 불연속적인 에너지 준위를 가지게 되고, 그로 인하여 power factor가 증가하는 동시에 나노 구조에 의해 포논(phonon)의 산란 요소(scattering source)가 증가하게 됨으로써 Seebeck 계수, 전기전도도 및 열전도도를 각각 독립적으로 조절할 수 있다는 데 그 연구의 핵심이 있다.(그림 5) 이러한 이론적 예측은 2001년 RTI(Research

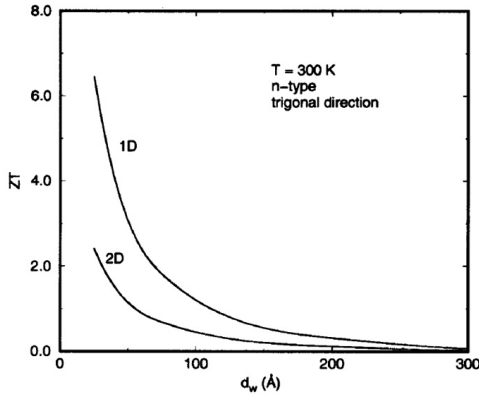


그림 4. 계산된 n-type Bi 나노선에서 직경별 열전성능지수 향상 (Ref.[6, 7])

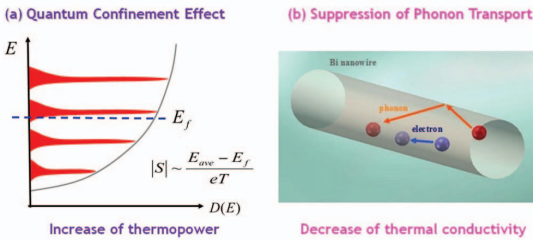


그림 5. 나노 열전재료에서 (a) 양자 구속 효과로 인한 파워 팩터의 향상 및 (b) 크기 효과로 인한 열전도도의 감소 원리

Triangle Institute, 미국)의 Venkatasubramanian 박사 연구팀에서 Bi₂Te₃/Sb₂Te₃ 초격자 박막구조에서 $ZT_m=2.4$ ($T_m=300K$)까지 향상시킨 결과가 발표되면서 나노 기술 기반을 이용한 열전재료에 관한 본격적인 실험적 연구가 시작되었으며³⁾, MIT의 Harman 그룹은 PbSeTe 기반의 양자점 초격자 구조를 이용하여 열전성능지수를 약 1.6까지 향상시키는 결과를 발표하여 나노 구조를 이용한 고효율 열전재료의 가능성을 보여주었다.⁴⁾ 그러나 이러한 연구들은 대부분 Dresselhaus 교수의 예측과는 달리 양자 구속 효과를 이용한 power factor의 증가가 아닌 나노 재료의 크기 효과로 인한 열 전달자(heat carrier)의 산란을 통한 열전도도의 감소로 인한 결과이며, 현재까지 양자 구속 효과를 통한 열전성능지수의 향상은 실험적으로 보고되지는 않고

있다. 그러나 이와 관련된 많은 연구가 진행되고 있어 조만간 가시적인 결과가 도출될 것으로 예측되고 있다. 본 고에서는 나노선 열전재료 개발을 위한 국내외 연구동향을 살펴보고 차세대 열전재료로 기대되고 있는 Bi 기반의 1차원 나노선 열전재료에 관하여 소개하고자 한다.

3. 나노선 기반의 열전재료 연구동향

(1) 국외 연구동향

국외의 경우 MIT의 Dresselhaus 교수의 이론적 예측 이후, 나노 박막 구조(2차원)와 나노선(1차원)의 열전 특성 분석을 중심으로 이뤄지고 있다. 특히 미국의 경우, 2000년대 초반부터 NASA, 미 해군 연구소, 미 공군을 중심으로 국방기술 응용을 위하여 연구되고 있으며, 미국 에너지청(DOE: Department of Energy)은 연간 3,000만 달러 규모의 정부주도형 연구를 2009년부터 진행 중에 있다. 이러한 정부 주도형 연구와 더불어 MIT, Caltech, U.C. Berkeley와 같은 대학을 중심으로 나노선 열전재료에 관한 연구 또한 활발히 이루어지고 있다.

특히 Bi 나노선의 경우 비교적 큰 직경의 나노선에서 양자 구속 효과가 구현될 뿐만 아니라 그 원자량이 다른 열전재료에 비하여 크기 때문에 낮은 열전도도를 가질 것으로 예측되고 있다.⁸⁾ MIT 대학의 Dresselhaus 교수 연구팀은 1993년부터 Bi 나노선에 관한 열전 특성 연구를 지속해오고 있다. Dresselhaus 교수 연구팀은 semiclassical transport model과 band structure model을 통하여 약 10nm 이하의 단결정 Bi 나노선에서 그 열전성능지수가 비약적으로 증가함을 이론적으로 증명하였다.⁶⁾ 이를 실험적으로 증명하기 위하여 전기 화학적 도금법이나 압력주입법(pressure injection method)을 이용하여 Bi 나노선을 제조하여 그 특성을 분석하였으며, 약 65nm 직경의 Bi 나노선에서 반금속-반도체 전이 현상(semimetal to semiconductor

transition)이 일어남을 확인하였다.^{9,10} 그러나 전기화학적 도금법으로 제조된 Bi 나노선의 경우 단결정 나노선을 성장시키기 어려워 그 열전 특성의 향상을 기대하기 어려우며, 압력주입법을 통해 성장된 단결정 Bi 나노선의 경우 Bi 나노선 array를 2단계법으로 측정하여 단일 Bi 나노선의 열전 특성을 분석하기 어렵다는 한계를 가지고 있었다.(그림 6) 2006년 Caltech의 Heath 교수 연구팀은 다결정 Bi 나노선의 Seebeck 계수를 suspended device를 이용하여 측정하는 데 성공하였으며 약 72nm의 직경을 가진 Bi 나노선의 경우 그 Seebeck 계수가 약 $25\mu\text{V}/\text{K}$ 로 측정되었다. 그러나 이 연구는 다결정 Bi 나노선의 한계로 인하여 Seebeck 계수가 벌크 Bi(Seebeck 계수: 약 $50\sim 100\mu\text{V}/\text{K}$)에 비하여 낮은 값을 가지는 한계를 가지고 있었으며, 명확한 반금속-반도체 전이 현상(semimetal-to-

semiconductor transition)이 나타나지 않는 한계를 가지고 있었다.¹¹⁾

Si의 경우, 나노 재료가 도입되기 시작한 최근까지는 낮은 열전성능지수($ZT_m = 0.01$)로 인하여 열전재료로서 주목받지 못하였다. 그러나 2008년 미국 Berkeley 대학의 Yang 교수 그룹과 Caltech의 Heath 교수 그룹이 Nature지에 나란히 Si 나노선의 열전 특성을 보고하면서 많은 관심을 받고 있다. 또한 Si 나노선의 경우, 현재 반도체 공정을 그대로 적용할 수 있어 산업화하기 쉽다는 장점을 가지고 있으며 대부분 열전재료가 고가임을 고려할 때 비교적 저가로 제조가 가능하다는 장점을 가지고 있어 그 의미가 크다고 할 수 있다. Caltech의 Heath 교수 그룹이 발표한 Si 나노선의 경우 나노선의 직경과 도핑레벨을 조절함으로써 200K에서 그 열전성능지수를 약 1까지 향상시키는 연구결과를 발표하였다.¹²⁾ 또한 Berkeley 대학의

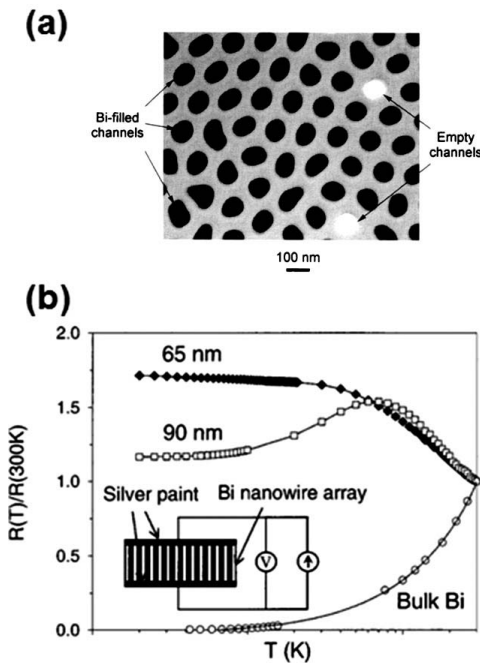


그림 6. Dresselhaus 그룹(MIT)의 (a) Bi 나노선 array의 주사 전자현미경 이미지 및 (b) Bi 나노선 array의 온도에 따른 전기저항 변화 (Ref. [9])

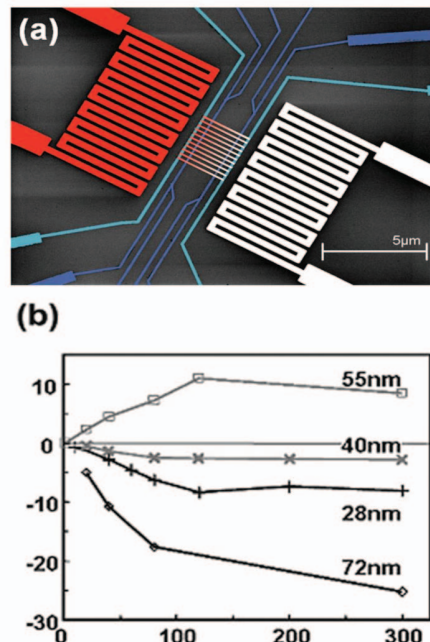


그림 7. (a) Heath 그룹의 polycrystalline Bi 나노선 소자 (b) 직경별 Seebeck 계수 (Ref.[11])

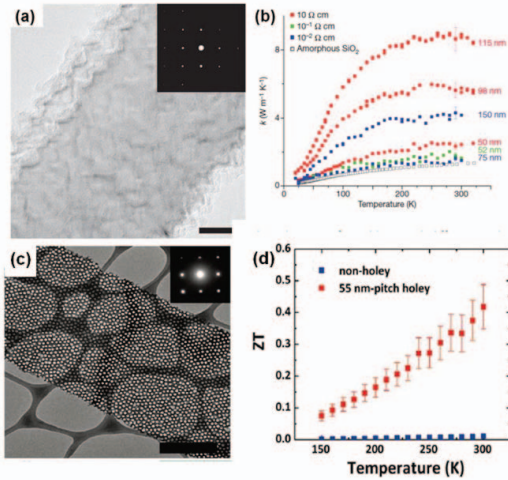


그림 8. Yang 그룹(U. C. Berkeley)의 rough surface Si 나노선의 (a) TEM 이미지 (b) 열전도도 및 다공성 Si 나노리본의 (c) TEM 이미지와 (d) 열전성능지수

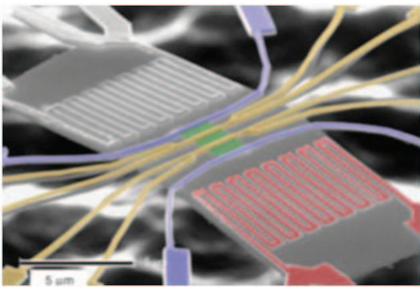


그림 9. Si 나노선의 열전성능지수 측정을 위한 소자의 주사 전자현미경 사진 (Ref.[12])

Yang 교수 그룹이 보고한 rough surface Si 나노선의 경우, 그 열전도도가 0.8W/m-K로서 벌크 Si에 비하여 약 100 이상 감소하여, 비정질 수준의 열전도도를 가짐을 확인하였다.¹³⁾ 이와 관련된 후속연구로서 Yang 교수 그룹은 다공성 Si 나노리본(nano-ribbon)을 제조하였으며, 다공성 구조의 계면증가를 통한 phonon의 입계 산란을 유도하여 열전도도를 300K에서 전기전도도의 큰 감소 없이 약 1.14까지 떨어트리는 데 성공하였다. Yang 교수 그룹의 rough Si 나노선과 다공성 구조의 Si 나노리본 연구의 공통점은 전기전도도의 큰

감소 없이 나노선의 미세구조를 제어함으로써 포논 산란을 극대화시키고 이를 통해 열전도도를 감소시켰다는 것이다.

위와 같이 단일 물질의 구조 변화를 통한 열전성능 지수의 향상뿐만 아니라 포논 산란의 증가를 위한 core/shell 구조의 나노선 및 초격자 구조의 나노선에 관한 연구 또한 활발히 진행되고 있다. Li 교수 연구팀은 그림 10의 (a)에 나타난 것과 같이 Te/Bi₂Te₃ core/shell 구조의 나노선을 two-step solution phase 법을 이용하여 제조하였으며, 그 열전 특성을 Te/Bi₂Te₃ core/shell 나노선을 bulk composite를 제작하여 측정하였다. 측정 결과, 그 열전도도가 상온에서 약 0.55W/m-K로서 매우 낮은 값을 가졌음을 확인하였다.¹⁴⁾ 또한 2003년 Berkeley 대학의 Majumdar 교수 그룹에서는 Si/SiGe 초격자 나노선의 열전도도를 micro-suspended device를 이용하여 측정하였으며, phonon의 alloy scattering과 더불어 증가된 계면 산란으로 인하여 열전도도가 감소함을 확인하였다.¹⁵⁾

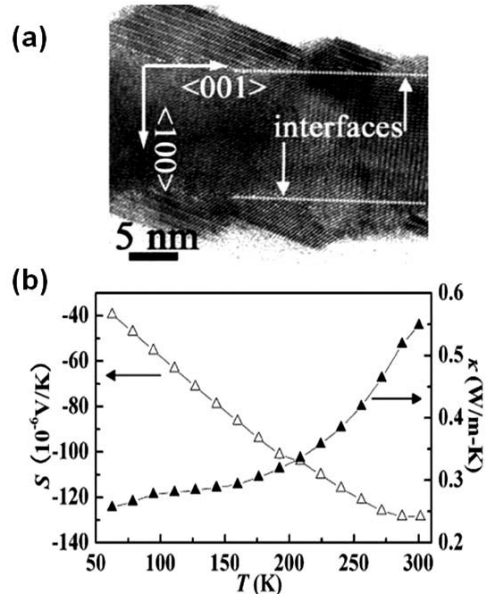


그림 10. (a) Te/Bi₂Te₃ core/shell 나노선의 TEM 이미지 (b) Te/Bi₂Te₃ core/shell 나노선의 Seebeck 계수와 열전도도

(2) 국내 연구동향

국내 열전소재 및 소자 연구는 선진국에 비하여 낮은 수준(ZT~0.8)이었으나 최근 들어 대학과 연구소를 중심으로 나노 구조 열전재료에 관한 연구가 시작단계에 있으며, 삼성종합기술원, LG 화학, 삼성전기 등 산업체에서는 나노 구조 벌크 물질을 이용한 열전의 산업적 응용에 관한 연구가 진행되고 있다. 최근 삼성종합기술원 연구팀은 나노 구조 벌크 In_4Se_3 에서 전기 및 열전달 이방성을 이용하여 705K에서 1.48의 열전 성능지수 향상을 이루었으며 KIST, 전기연구원, 한국기계연구원 등의 연구소는 Bi_2Te_3 기반의 2차원 박막 열전반도체 개발 및 모듈화에 관한 연구를 수행 중에 있다.¹⁶⁾ 최근 ETRI 연구팀에서는 top-down 방식을 이용하여 제조된 50nm 직경의 n-type Si 나노선이 약 -118 $\mu\text{V}/\text{K}$ 의 Seebeck 계수를 가짐을 확인하였다. 그러나 국내에서는 1차원 나노 열전재료의 중요성에도 불구하고 단결정 나노선 성장 및 소자화의 어려움으로 인하여 대부분의 연구가 벌크 및 박막을 중심으로 연구되고 있으며, 나노선 열전재료의 개발에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

Bi 나노선의 경우 앞에서 언급되었다시피 그 열전 재료로서의 중요성에도 불구하고 Bi의 낮은 녹는점과 화학적 불안정성으로 인한 단결정 Bi 나노선의 제조 및 소자화의 어려움으로 인하여 많은 연구가 진행되지 않았다.¹⁰⁾ 이러한 한계를 극복하기 위하여 본 연구팀은 Si/SiO₂ 기판 Bi 박막의 열처리를 통하여 인가된 기판과 Bi 박막 사이의 압축응력을 나노선 성장을 위한 열역학적 구동력(thermodynamic driving force)으로 이용하여 자발성장법을 통한 단결정 Bi 나노선을 성장시켰다. 압축응력을 이용한 자발성장법으로 성장된 Bi 나노선은 직경이 균일하고 매우 큰 aspect ratio를 가져 소자화하기 쉬운 구조를 가지고 있으며 투과전자현미경과 격자분석 조사 결과 결함이 없는 단결정성을 가짐을 알 수 있었다.(그림11) 자발성장법으로 성장된 직경 120nm의 단결정 Bi 나노선의 경우 그 전기적 특

성 측정 결과 그 이동도가 약 76900cm²/Vs였으며, 자유행정거리가 1.35 μm 로 측정되어 매우 뛰어난 고품질의 단결정성을 가졌다는 것을 반증하고 있다.^{17,18)} 이와 같은 압축응력 유도법(stress-induced method)을 이용한 나노선 성장법은 과거 소자 패키징 공정의 난제로 인식되었던 whisker 생성 메커니즘을 이용하여 부정적 요소를 긍정적인 방향으로 발전시킨 결과로서, 촉매나 템플레이트에 사용하는 일반적인 나노선 성장법과는 달리 이종 물질의 개입이나 액상 혹은 기상 상태 변화 없이 단결정 나노선을 성장시킬 수 있다는 점에서 단결정 나노선 성장에 있어 응용성이 매우 크다고 할 수 있다.^{19,20)} 실제로 본 연구팀은 상기에 언급된 압축응력 유도법을 기반으로 단결정 Bi_2Te_3 나노선을 제조하였으며 간단한 제조방법을 통하여 열전재료 응용을 위한 고품위 단결정을 가진 compound semiconductor 나노선의 제조가 가능함을 보였다.²¹⁾ 또한 본 연구팀은 최근 압축응력 유도법을 이용하여 Bi 내에 나노 입자(nano particles)가 삽입된 나노선을 성장시켜, 장과장을 가진 포논의 전달을 선택적으로 억

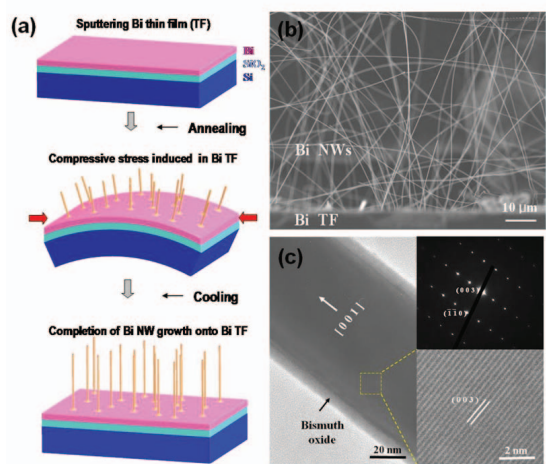


그림 11. (a) 열처리를 통해 자발성장된 단결정 Bi 나노선의 성장 (b) 성장된 단결정 Bi 나노선의 주사전자현미경 이미지 (c) 단결정 Bi 나노선의 투과전자현미경 이미지와 전자회절 패턴

제시케 열전도도를 벌크 Bi에 비해 약 50배 이상 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 이는 압축응력 유도법의 이용을 통해 나노선의 성장단계에서부터 단결정을 유지한 채로 나노선의 미세구조를 조절 및 변화시켜

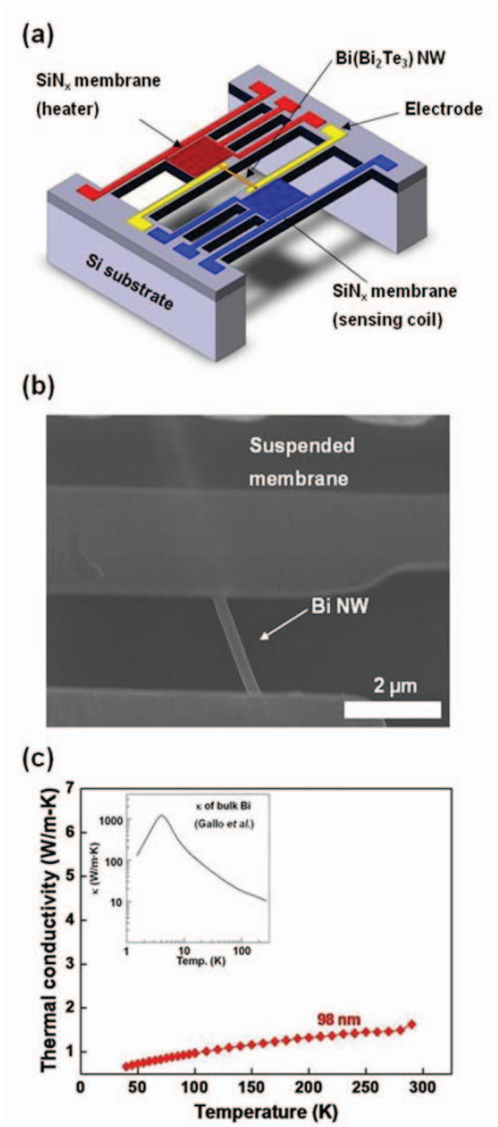


그림 12. 단결정 단일 Bi 나노선 열전도도 측정에 사용된 suspended micro-device의 (a) 개략도 (b) 주사전자현미경 이미지 (c) 단결정 Bi 나노선의 온도에 따른 열전도도 변화

열전도도를 조절할 수 있다는 점에서 그 의미가 크다고 할 수 있다.

대부분의 나노선 열전 특성 연구가 나노선 array의 열전 특성 측정에 기반을 두고 있다는 것을 고려할 때, 열전 나노선의 연구에 있어 가장 큰 난제는 단일 나노선의 열전 특성을 평가하는 방법이라고 해도 과언이 아니다. 본 연구팀은 단결정 Bi 나노선의 열전 특성을 이해하기 위하여 suspended micro-device와 전자빔 리소그래피 기반의 소자공정을 이용하여 단일 단결정 Bi 나노선의 열전도도와 Seebeck 계수 측정에 각각 성공하였다. 단일 나노선의 열전도도 측정을 위하여 그림 13의 (a)에 나타난 것과 같은 suspended micro-

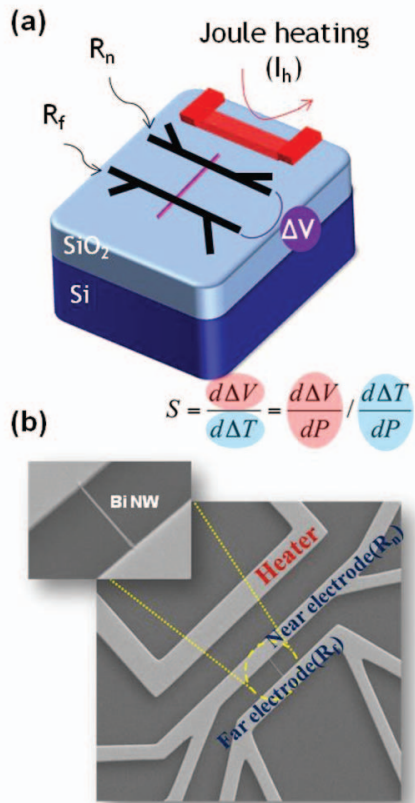


그림 13. Seebeck 계수 측정을 위한 단일 나노선 소자의 (a) 모식도 및 (b) 주사전자현미경 이미지

device를 이용하여 기판을 통한 열전달을 배제시켰다.^{22,23} suspended micro-device는 SiN_x 멤브레인 위에 형성된 heater에서 발생한 열이 Bi 나노선을 통해서만 흐를 수 있도록 설계하였으며, 반대편의 sensing coil을 통하여 나노선을 통한 열전달(thermal conductance)을 측정하여 그 양단간 온도차이를 측정하였다. 이때 나노선과 membrane 간 열저항(thermal resistance)을 최소화하기 위하여 dual-beam Focused ion beam을 이용하여 국부적인 thermal contact를 그림 13의 (b)와 같이 형성하였다. 열전도도 측정 결과 단결정 Bi 나노선의 경우 직경이 작아짐에 따라 나노선 표면에서의 포논 및 전자의 산란이 강화되어 열전도도가 감소하였으며^{23,24}, 약 98nm의 직경을 가진 단결정 Bi 나노선의 경우 그 열전도도가 0.8W/m-K로 측정되어 벌크 Bi(열전도도: 8W/m-K)에 비하여 약 10배가 낮은 값을 가짐을 확인하였다. 또한 본 연구팀은 나노선 양단의 온도 차이를 정확하게 측정하여야만 가능한 단일 나노선의 Seebeck 계수의 측정을 위하여 전자빔 리소그래피와 플라즈마 에칭 테크닉을 이용하여 Seebeck 계수 측정을 위한 소자를 제작하는 데 성공하였다.²⁵ 그림 14의 (a)에 단일 Bi 나노선의 Seebeck 계수 측정 원리가 나타나 있다. 우선 전자빔 리소그래피를 통하여 형성한 micro heater에 전류를 인가하여 Joule heat을 발생시켜 소자 내에 온도구배(thermal gradient)를 형성하고, 동시에 4단자법(4-point-electrode)을 이용하여 양단간 전압차를 측정하였다. 측정결과 약 120nm 직경의 Bi 나노선의 경우 그 Seebeck 계수가 70 μ V/K에 달함을 확인하였으며, 이와 같은 연구와 더불어 본 연구팀은 게이트 전압의 조절에 따라 Bi 나노선의 전하농도를 조절하여 Seebeck 계수를 최적화하는 연구를 진행하고 있다.

기존의 단일 나노선의 열전 특성은 Seebeck 계수와 열전도도를 각각 따로 측정하여 동일 나노선에서 열전 성능지수를 정확하게 측정하기 어렵다는 한계를 가지고 있었다. 이를 극복하기 위하여 본 연구팀에서는 All-

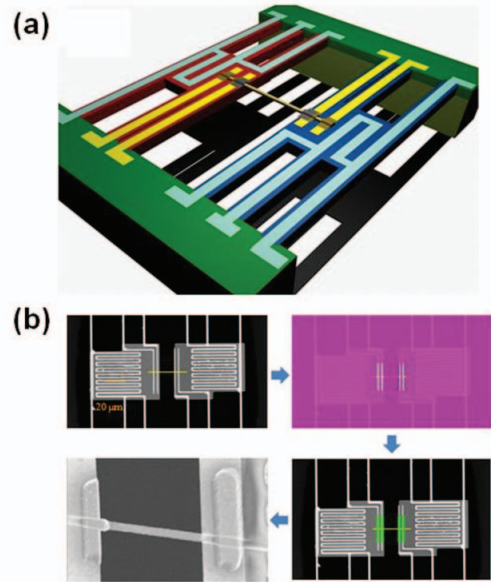


그림 14. (a) All-in-one MEMS의 모식도 및 (b) All-in-one MEMS를 이용한 단일 나노선 소자 제작 방법

in-one MEMS(micro-electromechanical systems)를 이용하여 동일 나노선의 전기전도도, Seebeck 계수 및 열전도도를 동시에 측정할 수 있는 시스템을 개발하고 있다. 그림 14에 나타난 것과 같이 All-in-one MEMS는 Seebeck 계수, 전기전도도 및 열전도도를 동시에 측정하기 위하여 기판간 열전달을 배제하기 위한 suspended structure를 가졌으며, 동시에 온도구배로 인한 나노선 양단간 전압차를 측정하기 위한 4단자 전극 구조를 가지고 있다. MEMS 위에 형성된 4단자 전극과 나노선 사이에 thermal contact 및 전기적 ohmic contact를 만들기 위하여 plasma etching 기법이 사용되었다. 우선 All-in-one MEMS의 membrane 사이에 나노선을 위치시키고 전극을 형성할 부분을 제외하고 금속마스크를 위치시킨 후, plasma etching 기법을 이용하여 Bi 나노선의 산화층을 제거한다. 산화층 제거 후 진공을 깨지 않고 바로 전극을 형성하여 thermal contact 및 전기적 ohmic contact을 동시에 형성함으

로써 동일 나노선의 전기전도도, Seebeck 계수 및 열전도도를 동시에 측정할 수 있다.

나노선 열전재료의 특성 분석에 있어 단일 나노선의 열전 특성 분석이 필수적이지만, 나노선 열전재료의 응용을 위해서는 array화가 필수적이다. 그러나 나노선의 경우 일반적으로 벌크 및 박막에 비하여 그 기계적 특성이 취약하여 실용화에 어려움이 있다. 또한 열전 모듈 구현을 위해서는 p-type과 n-type의 나노선 정렬이 필수적이다. 이러한 응용성의 문제를 해결하기 위하여 본 연구팀은 기상증착법을 이용하여 나노선 다발에 페를린(parylene)을 삽입함으로써, 빈틈없이 채워진 구조를 가지게 되어 나노선 다발의 물리적 안정성을 확보하는 연구를 수행 중에 있다. 페를린을 이용한

공정은 높은 진공도를 요구하지 않으며, 유리전이온도(glass transition temperature)가 90°C이고 녹는점이 290°C로서 비교적 고온에서도 안정적이라는 장점을 가지고 있어 소자 제작의 안정성을 확보할 수 있다. 또한 일반적으로 나노선의 지지대로 사용되는 다공성 산화 알루미늄에 비하여 낮은 열전도도를 가져 높은 열전성능지수를 기대할 수 있다.

4. 결론

본 고에서는 열전성능지수 향상을 위한 나노선 기반의 열전재료 개발 동향에 관하여 살펴보았다. 2000년대 들어 나노 기술의 이용을 통하여 열전 물질의 성능지수가 급격히 향상되고 있으며, 그 실험적 결과들이 계속 보고되고 있다. 최근 녹색성장 및 저탄소 산업의 확대를 통하여 신재생 에너지의 개발과 에너지 효율의 증가가 강조되고 있으며, 이러한 시점에서 열전소자는 친환경 에너지 변환 시스템 개발, 미활용 저급 에너지의 활용뿐만 아니라 자동차 폐열 발전, 전자 부품 냉각소자까지 그 응용범위가 넓어질 것으로 예측된다. 이를 위하여 양자구속효과와 크기 효과에 기반을 둔 파워팩터의 향상 및 열전도도 감소를 동시에 달성할 수 있는 나노선 기반의 열전재료가 차세대 열전재료로서 주목 받고 있으며, 또한 가시적인 성과가 이루어지고 있다. 이를 위하여 나노선의 미세구조 조절, 단일 나노선의 열전 특성 측정, 나노선 소자 및 모듈화 기술의 개발이 요구되고 있다. 나노선 기반의 초고효율 열전재료의 개발은 미래형 에너지 변환 시스템의 새로운 전환점을 제시할 것으로 예측된다.

후기

본 연구는 2009년도 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업(2009-0093823)의 지원으로 수행되었습니다.

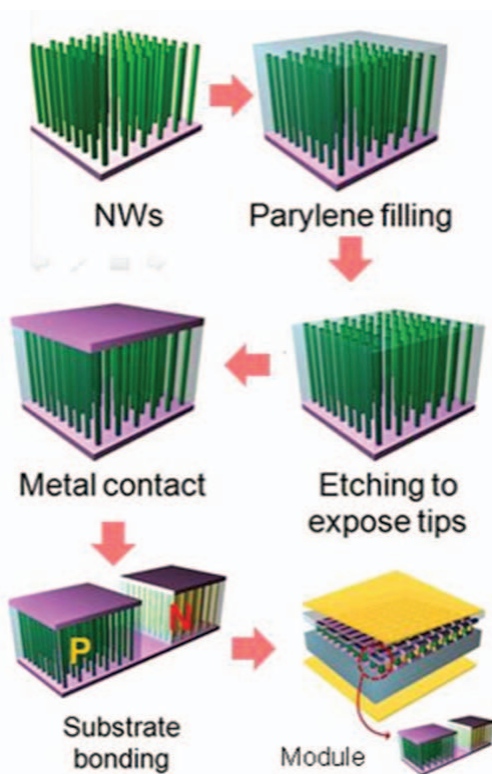


그림 15. 나노선 다발 기반의 열전소자화를 위한 구조설계 및 공정 모식도

참고문헌

1. Hicks, L.D. and M.S. Dresselhaus, *Thermoelectric figure of merit of a one-dimensional conductor*. Physical Review B, 1993. 47(24): p. 16631.
2. Hicks, L.D. and M.S. Dresselhaus, *Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit*. Physical Review B, 1993. 47(19): p. 12727.
3. Venkatasubramanian, R., et al., *MOCVD of Bi₂Te₃, Sb₂Te₃ and their superlattice structures for thin-film thermoelectric applications*. Journal of Crystal Growth, 1997. 170(1-4): p. 817-821.
4. Harman, T.C., et al., *Quantum dot superlattice thermoelectric materials and devices*. Science, 2002. 297(5590): p. 2229.
5. Majumdar, A., *Thermoelectricity in semiconductor nanostructures*. Science, 2004. 303(5659): p. 777-778.
6. Lin, Y.M., X.Z. Sun, and M.S. Dresselhaus, *Theoretical investigation of thermoelectric transport properties of cylindrical Bi nanowires*. Physical Review B, 2000. 62(7): p. 4610-4623.
7. Dresselhaus, M.S., et al., *The promise of low-dimensional thermoelectric materials*. Microscale Thermophysical Engineering, 1999. 3(2): p. 89-100.
8. Gallo, C.F., B.S. Chandrasekhar, and P.H. Sutter, *Transport Properties of Bismuth Single Crystals*. Journal of Applied Physics, 1963. 34(1): p. 144.
9. Lin, Y.M., et al., *Transport properties of Bi nanowire arrays*. Applied Physics Letters, 2000. 76(26): p. 3944-3946.
10. Zhang, Z.B., et al., *Electronic transport properties of single-crystal bismuth nanowire arrays*. Physical Review B, 2000. 61(7): p. 4850-4861.
11. Boukai, A., K. Xu, and J.R. Heath, *Size-Dependent Transport and Thermoelectric Properties of Individual Polycrystalline Bismuth Nanowires*. Advanced Materials, 2006. 18(7): p. 864.
12. Boukai, A.I., et al., *Silicon nanowires as efficient thermoelectric materials*. Nature, 2008. 451(7175): p. 168-171.
13. Hochbaum, A.I., et al., *Enhanced thermoelectric performance of rough silicon nanowires*. Nature, 2008. 451(7175): p. 163-165.
14. Zhang, G.Q., W. Wang, and X.G. Li, *Enhanced Thermoelectric Properties of Core/Shell Heterostructure Nanowire Composites*. Advanced Materials, 2008. 20(19): p. 3654-3658.
15. Li, D.Y., et al., *Thermal conductivity of Si/SiGe superlattice nanowires*. Applied Physics Letters, 2003. 83(15): p. 3186-3188.
16. Rhyee, J., et al., *Peierls distortion as a route to high thermoelectric performance in In₄Se_{3-δ}*. Crystal Growth & Design, 2009. 9(10): p. 3654-3658.
17. Shim, W., et al., *On-Film Formation of Bi Nanowires with Extraordinary Electron Mobility*. Nano Letters, 2008. 9(1): p. 18.
18. Shim, W., et al., *Shubnikov-de Haas oscillations in an individual single-crystalline bismuth nanowire grown by on-film formation of nanowires*. Applied Physics Letters, 2009. 95(23): p. 232107.
19. Ham, J., et al., *Self-assembled Bi interconnections produced by on-film formation of nanowires for in situ device fabrication*. Nanotechnology, 2010. 21(16): p. 165201.
20. Lee, S., et al., *Direct observation of the semimetal-to-semiconductor transition of individual single-crystal bismuth nanowires grown by on-film formation of nanowires*. Nanotechnology, 2010. 21(16): p. 165201.

- 21(40).
21. Ham, J., et al., *Direct Growth of Compound Semiconductor Nanowires by On-Film Formation of Nanowires: Bismuth Telluride*. Nano Letters, 2009. 9(8): p. 2867.
22. Roh, J.W., et al., *Size-dependent thermal conductivity of individual single-crystalline PbTe nanowires*. Applied Physics Letters, 2010. 96(10): p. 103101.
23. Li, D.Y., et al., *Thermal conductivity of individual silicon nanowires*. Applied Physics Letters, 2003. 83(14): p. 2934-2936.
24. Li, W.X., et al., *Phonon transport and thermal conductivity in dielectric quantum wire*. Journal of Physics D-Applied Physics, 2003. 36(23): p. 3027-3033.
25. Jang, S.Y., et al., *Transport properties of single-crystalline n-type semiconducting PbTe nanowires*. Nanotechnology, 2009. 20(41).