

# 실리콘-게르마늄 합금의 전자 소자 응용

이승윤\*

한밭대학교 신소재공학부, 대전 305-719

(2010년 11월 4일 받음, 2010년 12월 1일 수정, 2011년 1월 19일 확정)

실리콘(Si)에 비해 상대적으로 밴드 갭이 작고, 열전도도가 낮으며, 기존의 Si 반도체 공정 기술과 호환이 가능한 실리콘-게르마늄(SiGe) 합금은 트랜지스터, 광수신 소자, 태양전지, 열전 소자 등 다양한 전자 소자에서 사용되고 있다. 본 논문에서는 SiGe 합금이 전자소자에 응용되는 원리 및 응용과 관련된 기술적인 문제들을 고찰한다. Si에 비해 밴드 갭이 작은 게르마늄(Ge)이 그 구성 원소인 SiGe 합금의 밴드 갭은 Si과 Ge의 분률과 상관없이 항상 Si의 밴드 갭 보다 작다. 이러한 SiGe의 작은 밴드 갭은 전류 이득의 손실 없이 베이스 두께를 감소시키는 것을 가능하게 하여 바이폴라 트랜지스터의 동작속도를 향상시킨다. 또한, Si이 흡수하지 못하는 장파장 대의 빛을 SiGe이 흡수하여 광전류를 생성하게 함으로써 태양전지의 변환효율을 증가시킨다. 질량이 서로 다른 Si 및 Ge 원소의 불규칙적인 분포에 의해 발생하는 포논 산란 효과 때문에 SiGe 합금은 순수한 Si 및 Ge과 비교할 때 낮은 열전도도를 갖는다. 낮은 열전도도 특성의 SiGe 합금은 전자 소자 구조 내에서의 열 손실을 억제하는데 효과가 있으므로 Si 반도체 공정 기반의 열전 소자의 구성 물질로서 활용이 기대된다.

**주제어** : 실리콘-게르마늄, 소자, 밴드 갭, 열전도도

## I. 서 론

1950년대에 실리콘(Si)을 이용한 최초의 트랜지스터가 생산된 이래로 Si은 반도체 산업에 있어서 핵심 소재로 자리 잡고 있다. GaAs 및 InP로 대표되는 III-V 족 화합물 반도체 시장이 지속적으로 성장하고 있지만, 아직까지 Si이 전체 반도체 시장에서 차지하는 비중은 90%를 훨씬 상회하고 있다 [1]. 이러한 Si과 게르마늄(Ge)을 혼합하여 얻어지는 실리콘-게르마늄(SiGe) 합금은 Si에 비해 상대적으로 작은 에너지 밴드 갭(energy band gap)에서 기인하는 독특한 특성과 기존의 Si 반도체 공정과 호환이 가능한 그 제조 공정상의 장점에 의하여 Table 1과 같이 반도체뿐만 아니라 태양광 발전 [2] 및 열전 소자(thermoelectric device) [3] 등의 다양한 분야로 그 이용 범위가 확대되고 있다.

SiGe 합금의 가장 대표적인 응용 분야는 RF IC 내에서 사용되는 능동 소자의 하나인 이종접합 바이폴라 트랜지스터(hetero-junction bipolar transistor, HBT)이다 [4]. 밴드 갭이 상대적으로 작은 SiGe으로 HBT의 베이스(base) 층을 구성함으로써 전류 이득의 손실 없이 베이스 두께를 감소시킬 수 있으며, 이에 따라 바이폴라 트랜지스터의 동작속도가 향상된다. 현재 높은 동작 주파수 및 넓은 주파수

대역폭 특성이 요구되는 무선 통신 시스템 분야에서 SiGe은 시장 점유율을 높이기 위하여 III-V족 화합물 반도체와 치열한 경쟁을 벌이고 있다. 실제로 SiGe HBT와 Si CMOS 트랜지스터가 결합된 SiGe BiCMOS 기술은 GaAs, CMOS, LDMOS (laterally diffused metal oxide semiconductor) 등과 함께 휴대전화 및 무선랜용 파워 앰프의 주요 제조공정 기술로 이용되고 있다 [5]. 이와 같은 바이폴라 트랜지스터의 응용 이외에도 SiGe을 전계효과 트랜지스터(field effect transistor, FET)의 게이트, 소오스-드레인, 채널 또는 버퍼(buffer)층으로 사용하고자 하는 연구개발도 활발히 진행되고 있다 [6].

한편, SiGe은 Si 기반 포토닉스(photronics) 분야에서 흡수층 재료로서 널리 사용되고 있다 [7]. 이제까지 광소자에는 직접 재결합 및 높은 전광계수(electro-optic coefficient) 특성을 갖는 III-V족 화합물 반도체 물질들이 주로 사용되어 왔으나, 지속적인 연구개발에 의하여 Si 기반의 광소자가 실용화되어 가고 있다. SiGe은 Si 반도체 공정과 호환이 가능하면서도 Si에 비해 밴드 갭이 작기 때문에 Si으로 그 특성을 얻을 수 없는 1.3~1.6  $\mu\text{m}$  파장대의 빛을 받아들이는 Si 기반의 광수신 소자에 사용이 가능하다. 또한, 태양전지에 적용되는 경우에는 광전류를 생성시키는 적외선 영역

\* [전자우편] sy\_lee@hanbat.ac.kr

Table 1. Applications of SiGe alloys.

Application	Merit Parameter	Institution	Ref.
SiGe(C) HBT	$f_T = 300\text{GHz}$	IHP	23
SiGe(C) HBT	$f_T = 210\text{GHz}$ $f_{\text{MAX}} = 400\text{GHz}$	IMEC	24
SiGe HBT BiCMOS	$f_T = 200\text{GHz}$	IBM	25
a-Si/a-SiGe tandem solar cell	Efficiency = 10.4%	United Solar	26
a-Si/a-SiGe tandem solar cell	Efficiency = 13.0%*	University of Toledo	27
a-Si/a-SiGe/nc-Si triple-junction solar cell	Efficiency = 11%	University of Toledo	15
a-Si:H/a-SiGe:H/a-SiGe:H triple-junction solar cell	Efficiency = 10.1%	United Solar	28
Thermoelectric p-type SiGe alloy	$ZT = 0.95$	Boston College	29
Thermoelectric n-type SiGe alloy	$ZT = 1.3$	Boston College	30

\*Simulated data

의 빛을 추가적으로 흡수함으로써 변환효율을 향상시키는 효과가 발생하기 때문에 박막형 Si 태양전지의 구성물질의 하나로 각광받고 있다. 이외에도 SiGe은 반도체로서의 전도성 및 Si에 비해 상대적으로 작은 열전도도 특성에 의하여 열전 소자, 상변화 메모리(phase-change memory) [8] 등에서도 그 구성 물질로서 유용하게 이용될 수 있다.

본 논문에서는 Si과 차별되는 고유한 특성을 갖는 SiGe 합금이 다양한 전자 소자에 응용되어 성능 개선에 기여하는 원리를 알기 쉽게 해설하고, 각각의 전자 소자에 SiGe 합금을 적용하는데 있어서 고려하여야 할 기술적인 이슈들을 본 연구자가 다년간에 걸쳐 확보한 데이터를 바탕으로 하여 고찰하고자 한다.

## II. SiGe 합금의 특성

SiGe 합금을 구성하는 Ge은 Si과 동일한 다이아몬드 구조이며(Fig. 1) Si과 혼합되어 모든 조성 영역에서 고용체를 형성한다. Ge의 격자 상수는 Si에 비해 약 4% 정도 크며, SiGe 합금의 격자 상수는 Si과 Ge의 조성비에 의해 결정된다. Fig. 1에 표시된 바와 같이 SiGe 합금의 격자 상수는 Si 보다 크기 때문에 Si 격자와 정합을 이루면 내부에 압축 응력이 형성된다. 한편, Si 위에 위치한 SiGe 합금의 두께가 어느 값 이상으로 증가하면 전위 등의 결함이 생성되고 Si 격자와의 정합성(coherency)이 소멸되면서 응력변형(strain)이 완화된다. 이러한 두께를 임계두께(critical thickness)라고 하는데 임계두께는 Ge의 조성에 반비례한

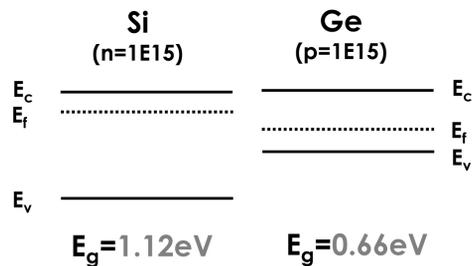
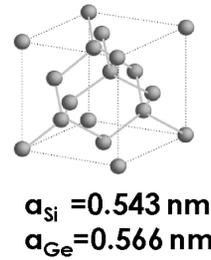


Figure 1. Comparison of lattice constants and energy band gaps of Si and Ge.

다. Fig. 1에서와 같이 Ge의 밴드 갭은 Si에 비해 작기 때문에 Ge을 포함하고 있는 SiGe 합금은 Si에 비해 작은 밴드 갭을 갖는다.

한편, SiGe 합금의 열전도도는 합금 원소의 분율이 증가함에 따라 감소하여 최소값에 도달한 후 다시 증가하는 양상을 보인다. SiGe 합금이 순수한 Si이나 Ge에 비해 낮은 열전도도를 나타내는 이유는 질량이 서로 다른 Si 및 Ge 원소가 불규칙하게 분포되어 있기 때문이다. SiGe 합금의 불규칙한 격자 내에서의 질량 변동(fluctuation)은 포논 산란 효과를 유발하기 때문에 열전도도가 작아진다 [9]. 이러한 SiGe 합금의 상대적으로 낮은 열전도도는 전자 소자 구조 내에서의 열손실을 억제하는 데에 유용하게 사용될 수 있다.

### III. SiGe HBT, BiCMOS 및 strained FET

1980년대 중반부터 연구가 시작된 SiGe HBT는 Si 반도체 공정을 기반으로 하고 있으면서 Si 바이폴라 접합 트랜지스터(bipolar junction transistor, BJT)에 비해서 고주파 특성이 우수하므로, 세계 각국의 반도체 제조업체들이 앞다투어 SiGe 소재 특성 및 HBT 소자에 관한 연구 개발에 힘을 기울여 왔다. 1987년에 최초로 동작하는 소자가 등장한 이래로 지난 20여년 동안 RF 동작속도를 나타내는 척도인  $f_T$  (cutoff frequency)가 이미 500 GHz 대에 도달할 정도로 SiGe HBT의 성능은 눈부시게 발전해 왔다 [10]. SiGe HBT의 우수한 고주파 특성은 SiGe의 고유한 물성에서 비롯된다. 즉, 앞에서 언급한 바와 같이 Si에 비해 밴드갭이 작은 Ge 원소를 더 포함하고 있는 SiGe 합금의 밴드갭이 순수한 Si에 비해서 상대적으로 작기 때문이다. SiGe의 밴드갭은 Ge 분률에 반비례하여 감소하며, 특히 SiGe이 Si 기판과 정합을 이루어 SiGe 내에 압축응력이 잔류하게 되면 밴드갭은 더욱 감소한다 [11].

이러한 SiGe을 바이폴라 트랜지스터의 베이스 층으로 사용함으로써 Si으로 구성된 에미터(emitter)와 SiGe으로 구성된 베이스의 밴드갭 차이에 따른 전류이득 증가 효과를 얻을 수 있다. SiGe HBT의 콜렉터 전류 및 전류이득(즉, 콜렉터 전류/베이스 전류)은 밴드갭 차이에서 비롯되는 소수 캐리어 농도의 증가 때문에 Si BJT의 경우와 비교하면 더 커지게 된다(Fig. 2, 식 1).

$$\frac{I_C(\text{SiGe HBT})}{I_C(\text{Si BJT})} = A \exp\left(\frac{\Delta E_G}{kT}\right) \quad (\text{식 1})$$

( $I_C$ 는 콜렉터전류,  $\Delta E_G$ 는 Si와 SiGe의 에너지 밴드갭 차이, A는 비례상수)

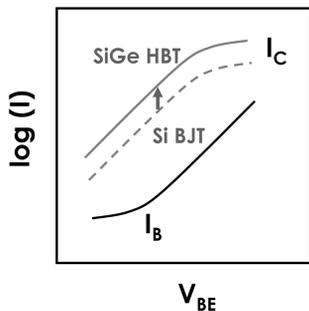


Figure 2. Comparison of Gummel plots of a SiGe HBT and a Si BJT.

이와 같은 전류이득 측면에서의 장점은 SiGe HBT에서 베이스 불순물 농도를 상대적으로 높이면서도 Si BJT와 동일한 수준의 전류이득이 유지되도록 하는 것을 가능하게 한다. 베이스 불순물 농도가 증가하면 전류이득은 감소하는 반면에, 베이스 내의 punchthrough 현상 [12]을 방지하는데 유리해지므로 SiGe HBT의 경우에는 전류이득의 손실 없이 베이스 두께를 얇게 할 수 있다. Fig. 3과 같이 베이스의 두께가 얇아지면 베이스를 통과하는 소수 캐리어의 통과시간이 감소하게 되므로 결국 트랜지스터의 동작속도가 커지게 된다.

SiGe을 트랜지스터의 구성 요소로 사용하고자 하는 시도는 SiGe HBT에만 한정되지 않고 SiGe HBT 기술과 기존의 Si CMOS 기술을 집적하는 SiGe BiCMOS 기술로 발전되었으며, SiGe 다결정 또는 에피택셜 층을 MOS 트랜지스터에 도입하여 그 성능을 향상시키고자 하는 연구도 다양하게 진행되고 있다. 회로 설계에 있어서 전력소모가 작은 Si CMOS 트랜지스터와 동작속도가 빠른 SiGe HBT를 동시에 사용하게 되면 두 종류 트랜지스터의 장점을 적절히 조합함으로써 우수한 성능의 RF IC를 용이하게 구현할 수 있으므로 SiGe BiCMOS 기술에 대한 수요는 계속해서 증가할 것으로 전망된다. 이에 더하여 SiGe은 strained-Si/SiGe 전계효과 트랜지스터(field-effect transistor, FET)의 구성 요소로서 널리 활용되고 있다. Strained-Si/SiGe FET에 있어서 SiGe은 HBT에서와는 다르게 작용한다. Si과 SiGe의 격자상수 차이 때문에 FET의 채널 영역에 응력변형이 발생하게 되는데, 이것에 의하여 캐리어의 이동도가 증가하고 결국 구동 전류(drive current)가 증가한다 [6]. 구동 전류의 증가는 게이트 산화막 스케일링의 필요성을 완화시키므로 관련 기술을 적용하는 산업체의 수가 급격히

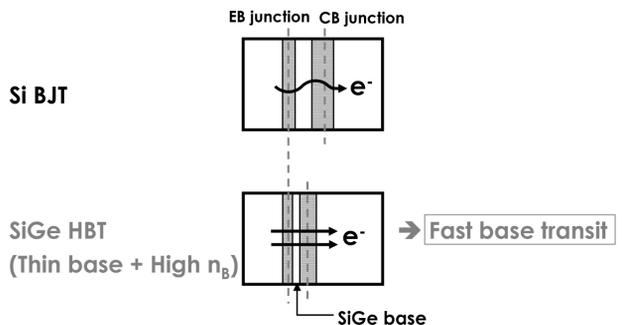


Figure 3. Schematic cross-sections of prototype transistors including Si and SiGe base layers.

증가하고 있다.

SiGe을 Si 반도체 공정에 적용하는데 있어서 가장 중요하게 고려하여야 할 사항은 사용자가 요구하는 반도체 소자 특성을 얻을 수 있도록 Si과 Ge의 비율을 정밀하게 조절하는 것이다. SiGe 트랜지스터 개발 초창기에는 SiGe 층 내에 잔류하는 압축응력에 의한 소자 신뢰성 저하에 대한 의문이 제기되었으나, 연구가 진행됨에 따라 잔류응력이 직접적인 원인이 되는 신뢰성 문제는 없다는 것이 확인되었다 [13]. 따라서, SiGe 형성 시 Si 및 Ge을 공급하는 원료 기체의 비율을 조절함으로써 SiGe 층의 잔류응력 및 밴드 갭을 일정범위 내에서 변화시켜 다양한 성능을 갖는 반도체 소자를 제조할 수 있게 되었다. SiGe HBT의 경우 전류이득을 고려하면 Ge의 분율이 커질수록 밴드 갭 차이가 증가하게 되어 유리하지만, Si 기판과의 정합이 깨지면서 오히려 결정결함이 발생하고 압축응력이 완화되는 역효과가 발생하므로 Ge의 양을 임계 값 이하로 하거나 Ge의 분율을 베이스 깊이에 따라 점진적으로 변화시키는 등 Ge 분율 이외에도 여러 요인들을 동시에 고려함으로써 제조 공정을 최적화 하도록 해야 한다. 또한 Fig. 4와 같이 Si과 SiGe의 계면으로부터 결정결함이 발생하는 경우에는 이것이 누설 경로(path)로 작용하여 정상적인 접합 특성이 얻어지지 않으므로 SiGe 박막을 증착하기 전에 적절한 전처리를 통해 기판 표면을 깨끗한 상태로 유지하는 것도 매우 중요하다.

#### IV. SiGe 광수신 소자 및 태양전지

포토닉스는 광자(photon)에 의해 신호가 전달되도록 하는 기술로 광자 신호의 생성, 감지, 전달, 및 처리와 관련된 기술이다. 대표적인 광소자로는 레이저, 변조기, 검출기, 광섬유, 도파관(waveguide)이 있으며 이제까지 광소자 제조에는 III-V족 화합물 반도체 물질, 특히 GaAs 및 InP가 널리 이용되어 왔다. Si은 마이크로일렉트로닉스(micro-electronics) 분야에서 매우 광범위하게 사용되어 왔으나 포토닉스 분야에서는 간접 밴드 갭 및 낮은 전광계수 특성에 의하여 그 사용이 제한되어 왔다. 그러나 Si 반도체 공정을 이용하여 광소자를 구현하게 되면 전자 산업에 있어서 광소자의 활용성이 크게 확장될 수 있으므로 세계 유수의 반도체 제조업체에서는 앞다투어 Si을 기반으로 하는

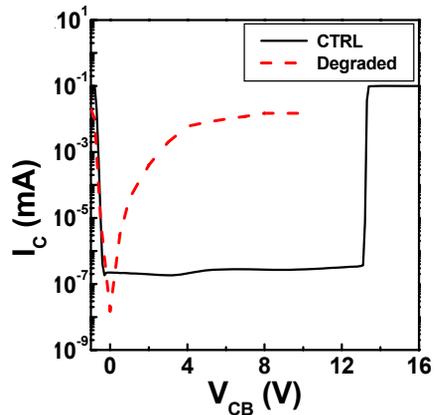
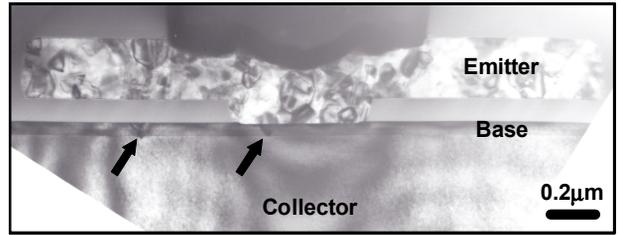


Figure 4. Cross-sectional TEM image of a SiGe HBT including volume defects initiated at the collector-base interface and measured collector current vs collector-base voltage for a control device and the SiGe HBT.

광소자의 개발에 열을 올리고 있다.

화합물 반도체를 대신하여 Si으로 구현하기에 가장 용이한 광소자로는 광수신(photodetector) 소자를 꼽을 수 있다 [7]. 광수신 소자는 광 신호를 전기 신호로 바꾸는 역할을 수행하는 소자로, Si을 흡수층 재료로 사용하면 1.1 μm 이하의 파장을 검출하는 광수신 소자를 제조할 수 있다. 그러나 1.3~1.6 μm 파장대의 빛을 흡수하기에는 Si의 밴드 갭이 상대적으로 크기 때문에 이러한 경우에는 이종접합구조(heterostructure)를 도입하여 광소자를 제조하게 된다. 이때 사용되는 물질이 바로 Si에 비해 밴드 갭이 작은 SiGe 합금이다. 밴드 갭이 작을수록 검출이 가능한 파장의 길이가 길어지므로 근적외선 영역의 광수신 소자에는 Si 격자와 정합을 이루는 strained SiGe 합금이 유용하게 쓰인다. 앞에서 언급하였듯이 SiGe 합금에는 임계두께가 존재하므로 광수신 소자에서 SiGe 합금이 사용되는 경우에는 임계 두께 이하의 Si 층과 SiGe 층이 번갈아 적층된 Si/SiGe 초격자(superlattice) 구조가 사용된다. Fig. 5는 초격자 구조가 적용된 광수신 소자의 단면도이다. 이러한 광수신 소자를 광섬유와 집적함으로써 일반 금속 배선에 비해 작은

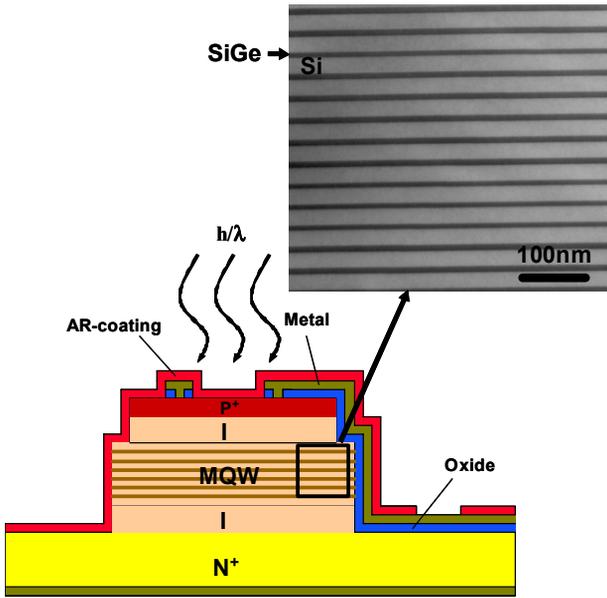


Figure 5. Schematic cross-section of a Si/SiGe photo-detector employing a Si/SiGe superlattice structure.

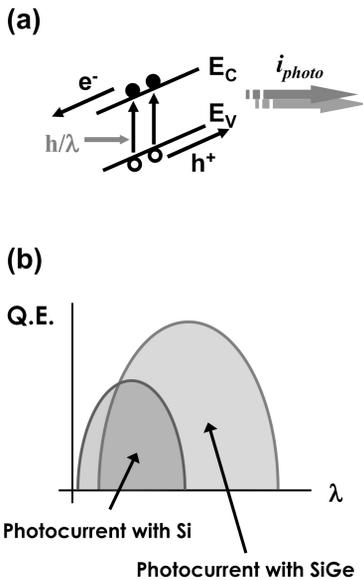


Figure 6. (a) Simplified energy band diagram of a solar cell and (b) quantum efficiency (QE) spectra of solar cells employing Si and SiGe absorption layers.

신호 지연 특성을 갖는 광 배선에 적용할 수 있다. 즉, 광섬유의 코어로부터 Si/SiGe 초격자로 빛(신호)이 입사되면 광전류가 발생하여 빛을 감지하게 되고 이것을 광통신에 이용하는 것이다.

태양전지는 광수신 소자와 마찬가지로 입사되는 빛에 의

하여 반도체 가전자대(valence band)의 전자가 전도대(conduction band)로 여기됨에 따라 광전류가 생성되는 원리를 이용한다(Fig. 6(a)). 높은 광전류를 얻기 위하여 광수신 소자의 하나인 포토다이오드를 어레이 형태로 배열하여 태양전지를 구성한다. 태양전지의 흡수층으로는 여러 가지 물질이 사용되는데, 유리, 금속, 플라스틱과 같은 저가의 기판 위에 Si 계 박막을 흡수층으로 구성한 형태의 비정질 Si 계 박막 태양전지 기술이 기존의 벌크형 결정질 Si 태양전지 기술의 대안으로 활발히 연구되고 있다. Si 박막 태양전지는 단일 접합(single junction), 이중 접합(tandem cell or double junction cell) [14], 및 삼중 접합(triple junction cell) [15]의 세 가지 구조로 분류할 수 있다. 단일 접합 구조는 한 종류의 Si계 박막으로 흡수층을 구성하는 것으로 제조 공정이 단순하지만 변환효율이 낮은 단점이 있다. 변환효율이란 입사한 빛에 대해서 어느 정도의 비로 광전류로 변환되는가를 나타내는 것이다. 변환효율을 높이기 위해서 흡수층을 2개 이상의 다른 물질로 구성하는 이중 접합 구조 및 삼중 접합 구조가 고안되었다. 흡수층을 밴드 갭이 다른 물질로 구성하게 되면 여러 파장의 빛을 유효하게 전기 에너지로 변환할 수 있으므로 변환효율이 높아진다. 이러한 다중 접합의 적층형 구조는 제조 공정이 복잡하지만 12% 이상의 변환효율을 얻을 수 있어서 대면적화를 통한 상용화가 추진되고 있다. SiGe 합금은 Si에 비해서 밴드 갭이 작기 때문에 광수신 소자의 경우와 마찬가지로 상대적으로 긴 파장의 빛을 흡수할 수 있다. 따라서 Si이 흡수하지 못하는 파장대의 빛을 흡수하여 광전류를 생성하므로 변환효율을 증가시킨다. Fig. 6(b)는 Si 및 SiGe 박막으로 흡수층을 구성한 경우의 양자효율(quantum efficiency, QE) 곡선을 개략적으로 나타낸 것이다. Si이 흡수하지 못한 긴 파장의 빛을 SiGe이 흡수하여 광전류로 변환함으로써 전체 광전류가 증가되고 결국 양자효율 또한 증가하게 된다. 참고문헌 [15]는 비정질 Si 박막, 비정질 SiGe 박막 및 나노결정 Si 박막으로 각각 흡수층의 상부 셀(cell), 중간 셀, 하부 셀을 구성한 경우의 QE 곡선들을 제시하고 있는데, 그 그래프부터 밴드 갭이 서로 다른 흡수층 구성 물질에 따라 QE 곡선이 뚜렷하게 달라지는 것을 확인할 수 있다. SiGe에서 Ge의 분율이 클수록 밴드 갭이 감소하므로 흡수할 수 있는 빛의 파장이 길어진다. 따라서 Ge의 함량을 높이면 변환효율이 향상될 것으로 기대되며, 어느 정도의 적은 비용으로 소자를 제작할 수 있는냐에 따라

그 효율성이 결정될 것으로 예상된다. 한편, 다결정 Si계 박막을 태양전지의 흡수층으로 사용하고자 하는 연구도 활발히 진행되고 있는데 비정질 Si계 박막에서는 캐리어의 확산 거리가 단결정이나 다결정 Si계 박막에 비해 매우 작아 전자-정공 쌍의 수집 효율이 낮기 때문에 비정질 구조가 아닌 결정 구조를 저온에서 얻을 수 있는 증착 기술의 개발이 필요하다고 판단된다. 특히, Si 박막 태양전지의 생산성을 크게 좌우하는 요인의 하나가 Si 박막 형성을 위한 plasma enhanced chemical vapor deposition(PECVD)의 증착 속도이므로 SiGe 박막 증착 시의 증착 속도 또한 반드시 고려되어야 한다.

### V. 발열전극 및 열전 재료로서의 SiGe 합금

상변화 메모리는 입력된 전기 펄스에 의하여 발생하는 줄 열을 이용하여 상변화 물질의 상을 가역적으로 변화시켜 이에 대응하여 나타나는 전기저항의 차이를 메모리로서 응용하는 비휘발성 메모리이다. Fig. 7(a)에서 관찰할 수 있듯이 상변화 메모리는 일반적으로 상부전극, 하부전극, 발열전극, 상변화 물질로 구성되는데, SiGe 합금은 상변화 물질과 접촉하는 발열전극의 구성 물질로 활용이 가능하다. 전기 펄스 입력 시 상변화 물질 자체에서 발생하는 줄 열에 의하여 상변화가 이루어지며, 줄 열이 상대적으로 용이하게 발생하는 물질을 발열전극 물질로 하여 상변화 물질과 접촉시키게 되면 상변화가 촉진되어 결과적으로 상변화에 필요한 전기 에너지를 줄일 수 있게 된다. SiGe은 기존의 발열전극 물질로 사용되는 내화(refractory) 금속에 비해 전기비저항이 높고 열전도도가 낮은 특성이 있어서 Fig. 7(b)와 같이 상변화에 필요한 전류를 크게 줄이는 효과를 나타낸다 [8]. SiGe은 질량이 서로 다른 Si 및 Ge 원소의 불규칙한 분포에서 기인하는 낮은 열전도도 특성을 갖기 때문에 발열전극을 통한 열 손실을 억제함으로써 Si에 비해서 상변화 전류를 감소시킨다. 순수한 SiGe에 안티몬(Sb)을 첨가함으로써 저온에서 발열전극을 형성하는 방법이 이미 보고 되었으며 [16], 앞으로 칼코겐화물 기반의 상변화 물질과의 열적 안정성이 확보된다면 SiGe은 상변화 메모리의 발열전극으로서 널리 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

발열전극의 경우와 유사하게 SiGe 합금의 높은 전기비

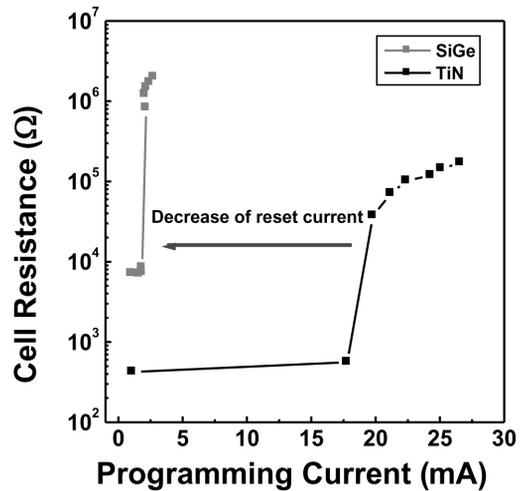
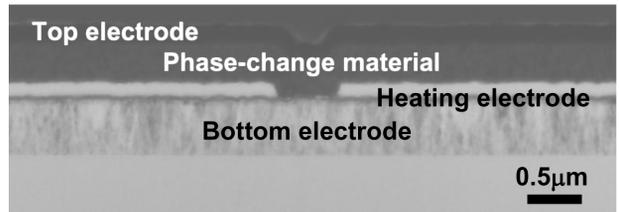


Figure 7. Cross-sectional TEM image of a phase-change memory (PCM) device and measured cell resistance vs programming current for PCM devices employing SiGe and TiN heating electrodes.

저항 및 낮은 열전도도 특성을 이용하여 우수한 효율의 열전 소자를 제조할 수 있다. 열전 효과(thermoelectric effect)를 나타내는 물질을 이용하여 전기에너지를 열에너지로 변환시키거나, 반대로 열에너지를 전기에너지로 변환시켜 주는 장치를 열전 소자라 한다. 열전 소자는 열전 효과의 하나인 펠티어 효과(Peltier effect)를 이용한 국부 냉각 등에 매우 널리 사용되고 있으며 그 이외에 동력발전기, 센서 등의 용도로도 이용되고 있다. 이제까지 가장 널리 알려진 열전 재료는 비스무스-텔루라이드(bismuth telluride)인데 최근에 Si 반도체 공정과 호환이 가능한 SiGe 합금이 새로운 열전 소재로 주목받고 있다.

펠티어 효과는 열전대에 전류가 흐를 때 두 접합에서 가역적인 열의 방출이나 흡수가 일어나는 현상이다 [17]. 전자가 이동하는 매질이 변하게 되면 전자가 운반할 수 있는 열의 양이 변하게 되므로 펠티어 효과에 의하여 여분의 열 에너지(Q)를 방출하거나 흡수하게 된다(Fig. 8). 열전 효과의 정도를 양으로 표시한 것이 지백 계수(Seebeck coeffi-

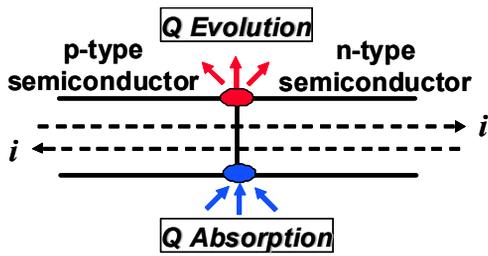


Figure 8. Schematic of the Peltier effect occurring at a p-n junction.

cient, S)이며 효율적인 열전 재료가 되기 위해서는 큰 S 값을 가져야 한다. 또한 비가역적인 열손실 및 전기적 손실이 작아야 하므로 열전도도  $\kappa$  및 전기비저항  $\rho$  값이 작아야 한다. 일반적으로 물질의 열전 효율은 식 2와 같은 열전성능 지수(thermoelectric figure of merit) Z로 표시된다 [18].

$$Z = \frac{S^2}{\kappa\rho} (K^{-1}) \quad (\text{식 2})$$

큰 S 값, 작은  $\kappa$  값, 작은  $\rho$  값을 갖는 효율적인 열전 재료는 큰 Z 값을 갖는다는 사실을 식 2로부터 알 수 있다.

열전 재료로 가장 대표적인 것은 금속이나 절연체가 아닌 반도체 재료이다. 반도체는 금속이나 절연체와 비교할 때 적절한 전하 캐리어 농도에서 높은 Z 값을 갖는 특성이 있기 때문이다 [19]. 가장 널리 사용되는 열전 재료는 칼코겐 원소를 포함한  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  등이 있으며 칼코겐화물 열전 재료 이외에 최근에는 SiGe 합금이 새로운 열전 소재로 주목받고 있다. SiGe 합금이 가지는 최대 장점으로서는 Si 반도체 공정과 호환이 가능하다는 점이다. SiGe 합금은 칼코겐화물 열전 재료에 비해 작은 Z 값을 갖지만 Si에 비해서는 큰 Z 값을 갖는데 그 이유는 순수한 Si 및 Ge에 비해 낮은 열전도도를 갖기 때문이다 [20].

열전 소자는 기본적으로 직렬로 연결된 여러 개의 열전 대로 구성되는데, p형 반도체와 n형 반도체를 교대로 위치 시킴으로써 각 접합에서 방출되거나 흡수되는 펠티어 열을 극대화 시킨다 [21]. 펠티어 열은 두 물질의 S 값 차이에 비례하며 전자가 다수 캐리어인 경우에는 S가 음의 값, 전공이 다수 캐리어인 경우에는 S가 양의 값이기 때문에 p형 반도체와 n형 반도체로 하나의 접합을 형성하면 효과적인 열전 소자가 된다. 최근에 CMOS 공정과 호환이 가능한 SiGe 합금의 장점을 살린 on-chip MEMS 기반 열전 소자가 제

작된 결과가 보고되었다 [18]. 열전 소재로서 칼코겐화물에 비해 Z 값이 작은 SiGe의 단점은 Si/SiGe multilayer quantum well(MQW) 구조를 도입하여 열전도도 및 전기비저항을 낮춤으로써 극복할 수 있을 것으로 예상된다 [22]. 결국 Si과 다른 SiGe의 독특한 특성을 충분히 활용한다면 Si 반도체 공정으로 고성능의 열전 소자를 제작할 수 있을 것으로 생각되며, 열전 소자의 친환경성을 고려할 때 관련 연구가 폭넓게 진행되어야 할 시점이라고 판단된다.

## VI. 결 론

다양한 전자 소자의 구성 물질의 하나로 SiGe 합금이 이용되는 원리를 알아보고 SiGe 합금을 적용하는데 있어서 고려하여야 할 기술적인 측면들을 고찰하였다. 밴드 갭이 작은 SiGe을 이용하여 전류 이득의 손실은 억제하면서 베이스 층의 두께를 감소시킴으로써 Si BJT에 비해 우수한 고주파 특성을 갖는 SiGe HBT를 제조할 수 있다. 또한, 밴드 갭이 작아서 Si에 비해 긴 파장의 빛을 흡수하는 특성을 갖는 SiGe으로 광 흡수층을 구성함으로써 태양전지의 변환 효율을 높이고 장파장의 빛을 효과적으로 검출하는 것이 가능하다. 낮은 열전도도를 갖는 SiGe을 열전 소자와 상변화 메모리의 구성 물질로 사용하면 소자 내에서의 열 손실이 감소하여 소자의 성능이 개선된다. SiGe 합금은 Si 반도체 공정과 호환이 가능하므로 Si이 이용되는 분야에서 특정한 기능을 얻고자 할 때 유용하게 이용될 수 있으며, 이러한 측면을 고려할 때 SiGe 합금이 도입되는 전자 소자 분야는 더욱 더 다양해질 것으로 전망된다.

## 감사의 글

이 논문은 2009년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

## 참고문헌

- [1] R. Quinsey, IEEE 2007 Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium 1 (2007).

- [2] Q. H. Fan, C. Chen, X. Liao, X. Xiang, S. Zhang, W. Ingler, N. Adiga, Z. Hu, X. Cao, W. Du, and X. Deng, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **94**, 1300 (2010).
- [3] M. Strasser, R. Aigner, M. Franosch, and G. Wachutk, *Sensor. Actuat. A* **97-98**, 535 (2002).
- [4] D. L. Hame, J. H. Comfort, J. D. Cressler, E. F. Crabbe, J. Y. -C. Sun, B. S. Meyerson, and T. Tice, *IEEE Trans. Electron Devices* **42**, 455 (1995).
- [5] C. Lei, R. Ying, and L. Zong-sheng, *Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing*, 486 (2010).
- [6] D. L. Hame et al., *Appl. Surf. Sci.* **224**, 9 (2004).
- [7] L. Pavesi and D. Lockwood, *Silicon Photonics: Topics in Applied Physics Vol.94* (Springer-Verlag, Berlin, 2004) p.1.
- [8] S. -Y. Lee, K. -J. Choi, S. -O. Ryu, S. -M. Yoon, N. -Y. Lee, Y. -S. Park, S. -H. Kim, S. -H. Lee, and B. -G. Yu, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 053517 (2006).
- [9] B. Abeles, *Phys. Rev.* **131**, 1906 (1963).
- [10] J. D. Cressler, *IEEE 2008 Custom Intergrated Circuits Conference*, 75 (2008).
- [11] S. S. Iyer, G. L. Patton, J. M. C. Stork, B. S. Meyerson, and D. L. Hame, *IEEE Trans. Electron Devices* **36**, 2043 (1989).
- [12] S. Wolf, *Silicon Processing of the VLSI Era Vol.2* (Lattice Press, Sunset Beach, 1990) p.471.
- [13] U. König and H. Dämbkes, *Solid-State Electron.* **38**, 1595 (1995).
- [14] J. Cho, S. Kim, S. Hwangboe, J. Janng, H. Choi, and M. Jeon, *J. Korean Vacuum Soc.* **18**, 352 (2008).
- [15] X. Deng, X. Cao, Y. Ishikawa, W. Du, X. Yang, C. Das, and A. Vijn, *Conference Record of IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion Vol. 2*, 1461 (2006).
- [16] S. -Y. Lee, Y. S. Park, S. -M. Yoon, S. -W. Jung, J. Lee, and B. -G. Yu, *Microelectron. Eng.* **85**, 2342 (2008).
- [17] R. M. Rose, L. A. Shepard, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials Vol. IV*, p.167 (1966).
- [18] D. D. L. Wijngaards and R. F. Wolffenbuttel, *IEEE Trans. Electron Devices* **52**, 1014 (2005).
- [19] N. S. Hudak and G. G. Amatucci, *J. Appl. Phys.* **103**, 101301 (2008).
- [20] P. V. Gerwen, T. Slater, J.B. Chrvrier, K. Baert, and R. Mertens, *Sens. Actuators A* **53**, 325 (1996).
- [21] G. J. Snyder, J. R. Lim, C. -K. Huang, and J. -P. Fleurial, *Nat. Mater.* **2**, 528 (2003).
- [22] S. Ghamaty, N. Elsner, and J. Bass, *9th Diesel Engine Emissions Reduction Conference*, 104 (2003).
- [23] A. Fox et al., *IEEE International Electron Devices Meeting*, 1 (2008).
- [24] S. Van Huylenbroeck, A. Sibaja-Hernandez, R. Venegas, S. You, G. Winderickx, D. Radisic, W. Lee, P. Ong, T. Vandeweyer, N. D. Nguyen, K. De Meyer, and S. Decoutere, *IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*, 5 (2009).
- [25] D. C. Howard, L. Xiangtao, and J. D. Cressler, *IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting*, 55 (2009).
- [26] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, and W. Warta, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **17**, 320 (2009).
- [27] Q. H. Fan, X. Liao, X. Xiang, C. Chen, G. Hou, X. Cao, and X. Deng, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 145101 (2010).
- [28] X. Xu et al., *5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2783 (2010).
- [29] G. Joshi, H. Lee, Y. Lan, X. Wang, G. Zhu, D. Wang, R. Gould, D. Cuff, M. Tang, M. Dresselhaus, G. Chen, and Z. Ren, *Nano Lett.* **8**, 4670 (2008).
- [30] X. W. Wang, H. Lee, Y. Lan, G. Zhu, G. Joshi, D. Wang, J. Yang, A. Muto, M. Tang, J. Klatsky, S. Song, M. Dresselhaus, G. Chen, and Z. Ren, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 193121 (2008).

## SiGe Alloys for Electronic Device Applications

Seung-Yun Lee\*

*Division of Advanced Materials Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719*

(Received November 4, 2010, Revised December 1, 2010, Accepted January 19, 2011)

The silicon-germanium (SiGe) alloy, which is compatible with silicon semiconductor technology and has a smaller band gap and a lower thermal conductivity than silicon, has been used to fabricate electronic devices such as transistors, photodetectors, solar cells, and thermoelectric devices. This paper reviews the application of SiGe alloys to electronic devices and related technical issues. Since the SiGe alloy comprises germanium whose band gap is smaller than silicon, its band gap is also smaller than that of silicon irrespective of the ratio of silicon to germanium. This narrow band gap of SiGe enables the base thickness of bipolar transistors to decrease without a loss in current gain so that it is possible to improve the speed of bipolar transistors by adopting the SiGe-base. In addition, the conversion efficiency of solar cells is enhanced by the absorption of long-wavelength light in the SiGe absorption layer. Phonon scattering caused by the irregular distribution of alloying elements induces the lower thermal conductivity of SiGe than those of pure silicon and germanium. Because a thin film layer with a low thermal conductivity suppresses thermal conduction through a thermal sink, the SiGe alloy is considered to be a promising material for silicon-based thermoelectric systems.

Keywords : Silicon-germanium, Device, Band gap, Thermal conductivity

\* [E-mail] sy\_lee@hanbat.ac.kr