

마이크로 발전기의 열전박막 설계

김현세[†] · 이양래* · 이공훈*

Design of Thermoelectric Films for Micro Generators

Hyunse Kim*, Yanglae Lee and Kong Hoon Lee

Key Words : Micro thermoelectric generator (마이크로 열전발전기); Poly-Si film (다결정실리콘 박막); Rapid Thermal Process (급속 열처리 공정)

Abstract

In this research, a polycrystalline silicon (poly-Si) film layer for micro thermoelectric generator (TEG) was fabricated. The fabrication process of the thermoelectric poly-Si film layer is explained. The P-type and N-type poly-Si films were fabricated on a tetra ethoxy silane (TEOS) layer with a supporting Si wafer. Seebeck coefficient and electrical conductivity were measured, including the transport properties such as the hall coefficient, hall mobility and carrier concentration. The design parameters for a rapid thermal process (RTP) were decided based on the experimental results. The measured power factors of the P-type and N-type were $21.2 \mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$ and $26.7 \mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$, respectively.

기호설명

R_H : Hall 계수 (cm^3C^{-1})
 μ : Hall Mobility ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{sec}^{-1}$)
 p : Carrier Concentration (cm^{-3})
 α : Seebeck Coefficient (mVK^{-1})
 σ : 전기전도도 ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$)
TPF: 열전 Power Factor ($\mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$)

1. 서 론

최근 마이크로 열전발전기가 휴대용 기기의 주요한 에너지원으로 주목을 받고 있다. 즉 기존에는 주로 배터리 등을 사용하였지만 사용 시간이 짧다는 단점을 지니고 있다. 또한 연료전지 등도 대안으로 떠오르고 있지만 이 역시 화학적인 반응에 의해 전기에너지를 생성하므로 장치의 구조가 복잡하고 화학반응 후 수증기 등의 부산물이 발생

할 수 있다. 반면 마이크로 열전발전기는 반영구적이며, 체열 등의 버려지는 열을 사용할 수 있으므로 차세대 휴대용 전원으로 널리 사용될 전망이다.

일본의 Seiko 에서는 최근 마이크로 열전발전기를 사용한 손목시계를 출시했다. 본 제품은 체열을 사용하여 작동하게 되며 소비전력은 $1\mu\text{W}$ 정도이다. 열전발전을 하는 열전층은 Bismuth Telluride (BiTe)를 사용하고 있으며 상온에서 작동하고 수도 정도의 온도 차를 이용하고 있다.

Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) 공정에 적합한 열전층의 재료로는 Poly-Si 이 있다. 현재 개발 중인 Poly-Si 마이크로 열전발전기는 고온에서도 작동하며, 최대 200 도 정도의 온도 차를 이용하여 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 정도의 전원을 공급할 수 있다. 그리고 이러한 열전 발전기의 성능을 나타내는 지표로 열전 Power Factor (TPF)가 있으며 이는 다음과 같이 구해 질 수 있다.

$$\text{TPF} = \alpha^2 \times \sigma \quad (1)$$

[†] 정회원, 한국기계연구원, 에너지기계연구센터
E-mail : hkim@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7967 FAX : (042)868-7355

* 한국기계연구원, 에너지기계연구센터

여기서 α 는 Seebeck Coefficient 이며, σ 는 전기 전도도 이다.

본 연구에서는 마이크로 열전발전기의 주요한 부분인 Poly-Si 의 박막을 설계하고 이를 제작하였으며, 열전 Power Factor 를 최대화 할 수 있는 급속열처리 공정 (RTP)의 변수를 구하는 실험을 수행하였다.

2. 열전박막 제작

2.1 제조 공정

P-type Poly-Si 박막 제조공정은 그림 1 과 같다. 우선 4 인치 P-type (1 0 0) 실리콘 웨이퍼를 Ammonium Peroxide Mixture (APM) 용액으로 Cleaning 한다. 그리고 Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD) 공정으로 Tetra Ethoxy Silane (TEOS) 층을 $0.3 \mu\text{m}$ 증착하였다. 역시 LPCVD 공정으로 Poly-Si 박막을 $1 \mu\text{m}$ 성장시켰다. 이 때 챔버의 온도는 $620 \text{ }^\circ\text{C}$ 이고 압력은 $200 \mu\text{bar}$ 였으며, SiH_4 가스의 유량은 60 sccm 였다. 증착속도는 8.5 nm/min 이었다.

다음으로 이온 주입 공정을 수행하였는데 여기서 P-type 과 N-type 이 결정된다. P-type 의 경우는 Boron 을 이온주입하게 되며, 에너지가 40 keV 이며 주입량은 10^{16} cm^{-2} 이었다. 반면 N-type 의 경우 Phosphorous 이온을 주입하며, 이때 에너지는 130 keV , 이온 주입량은 10^{16} cm^{-2} 이었다.

이후에 Sputtering 공정으로 $0.02 \mu\text{m}$ 의 Titanium (Ti) 층과 $0.15 \mu\text{m}$ 의 알루미늄 층을 올렸다. 그리고 이를 전극으로 사용하기 위해 Photolithography 공정을 진행한 뒤 Dry Etch 를 수행하였다. 마지막으로 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 크기로 Dicing 하여 시편 제작을 완료하였다.

그리고 완성된 시편 중에 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 30 sec 와 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 30 sec 인 두 가지 경우의 조건에 대해 급속 열처리 공정을 수행하였다. 표 1 에 주요 공정변수의 값들이 정리되어 있다. 시편의 번호 중에 P1, P2 는 P-type 을, 그리고 N1, N2 는 N-type 을 의미한다. 또한 P1, N1 은 RTP 의 온도가 600°C 이며 P2, N2 는 800°C 이다.

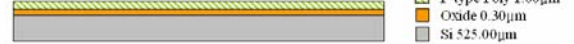
1. TEOS Deposition



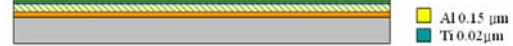
2. Poly-Si Deposition



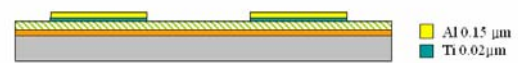
3. Ion-implantation



4. Al/Ti Sputtering



5. Al/Ti Etching



6. Dicing



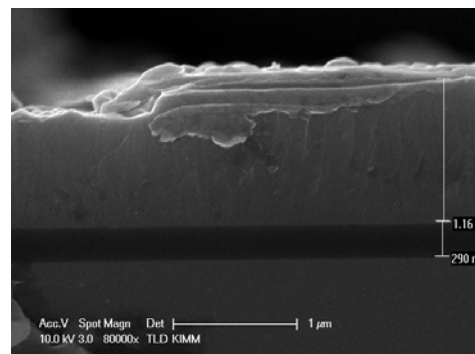
Fig. 1 Fabrication Process.

Table 1 Design parameters and values.

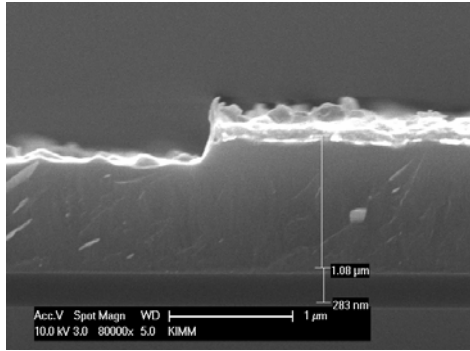
No	Ion Implantation Energy (keV)	Ion Implantation Dopant Dose (cm^{-2})	RTP
P-type P1	40	Boron 10^{16}	$600 \text{ }^\circ\text{C}$, 30 sec
P-type P2	40	Boron 10^{16}	$800 \text{ }^\circ\text{C}$, 30 sec
N-type N1	130	Phosphorous 10^{16}	$600 \text{ }^\circ\text{C}$, 30 sec
N-type N2	130	Phosphorous 10^{16}	$800 \text{ }^\circ\text{C}$, 30 sec

2.2 제작 결과

그림 2 에 제작한 Poly-Si 박막의 SEM 사진이 나와 있으며, 이를 분석한 결과 열전 발전 Poly-Si 박막의 증착이 잘 이루어졌음을 알 수 있었다.



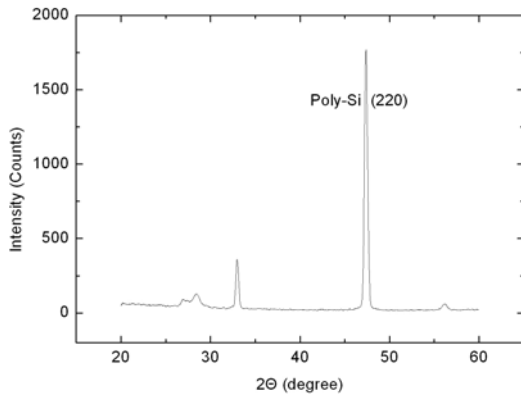
(a)



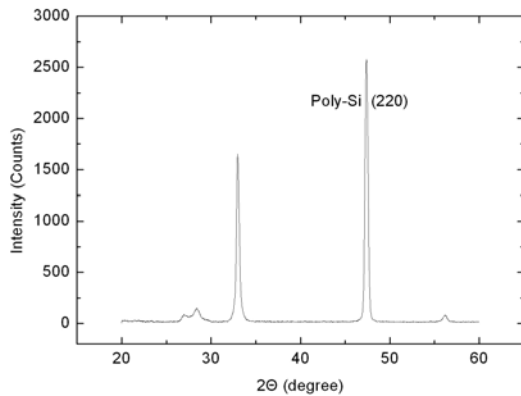
(b)

Fig. 2 SEM pictures of (a) the P-type and (b) the N-type Poly-Si films.

또한 그림 3 에는 X-ray diffractometer (XRD) 패턴이 나와 있다. 이를 통하여 Poly-Si 박막이 (2 2 0) 방향으로 결정화가 잘 되었음을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 3 XRD patterns of (a) the P-type and (b) the N-type Poly-Si films.

3. 실험

3.1 특성 측정

완료된 시편들의 특성을 Hall Effect Measurement System (Ecopia Inc.)과 Thermoelectric Measurement Setup (Fraunhofer IPM)을 이용하여 측정하였으며, 그 결과를 표 2 와 3 에 정리하였다. 표 2 에는 Hall Coefficient, Hall Mobility, Carrier Concentration 가 정리되어 있으며, 표 3 에는 Seebeck Coefficient 와 Electrical Conductivity 및 Power Factor 가 나와 있다.

우선 Transport Property 를 살펴보면 측정된 Hall Coefficient 와 Carrier Concentration 의 값이 양인 경우는 P-type 임을 의미하고 음인 경우는 N-type 임을 의미한다. 그리고 P1 의 경우가 $1.17 \text{ cm}^3\text{C}^{-1}$ 로 P2 에 비해 더 높았으며 역시 N1 의 경우 N2 에 비해 절대값이 더 큰 $-4.67 \text{ cm}^3\text{C}^{-1}$ 을 보여주었다. 마찬가지로 Hall Mobility 도 P1 과, N1 이 각각 $21.16 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{sec}^{-1}$ 과 $419.57 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{sec}^{-1}$ 로 값이 더 높았다. Carrier Concentration 은 P1 을 제외한 P-type, N-type 모두 절대값이 $1.00\text{E}+19$ 이상이였다.

Table 2 Transport Properties.

No	Hall Coefficient, R_H (cm^3C^{-1})	Hall Mobility, μ ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{sec}^{-1}$)	Carrier Concentration, p (cm^{-3})
P1	1.17	21.16	6.00E+18
P2	0.44	13.92	1.53E+19
N1	-4.67	419.57	-3.98E+19
N2	-0.58	46.50	-1.12E+19

Table 3 Power Factors.

No	Seebeck Coefficient, α (mVK^{-1})	Electrical Conductivity, σ ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$)	Power Factor, $\alpha^2\sigma$ ($\mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$)
P1	0.260	180.6	12.2
P2	0.259	305.0	21.2
N1	-0.146	864.1	18.5
N2	-0.181	811.5	26.7

열전 Power Factor 를 결정해 주는 Seebeck Coefficient 와 Electrical Conductivity 중에 우선 Seebeck Coefficient 를 살펴보면, P-type 의 경우는 두 가지 모두 비슷한 값을 보여주었다. 반면 N-type 의 경우는 N2 의 Seebeck Coefficient 가 -0.181 mVK^{-1} 로 더 우수하였다. Electrical Conductivity 의 경우 P-type 의 경우 P2 가 $305.0 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ 으로 더 높았으며 반면 N-type 은 N1 의 경우가 $864.1 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ 로 약간 더 높았다. Power Factor 는 P2, N2 가 각각 $21.2 \mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$, $26.7 \mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$ 로 더 우수하였다. 아래 그림 4 에 각각의 조건에 해당하는 Power Factor 의 비교 그래프가 나와 있다.

그러므로 우수한 성능을 기대할 수 있는 공정 조건은 P2, N2 의 경우라 할 수 있다. 즉 TEOS 의 두께는 $0.3 \mu\text{m}$, Poly-Si 의 두께는 $1.0 \mu\text{m}$ 이고, 에너지와 이온주입량이 P-type 의 경우 각각 40 keV , $1\text{E}16/\text{cm}^2$, N-type 의 경우는 각각 130 keV , $1\text{E}16/\text{cm}^2$ 이다. 그리고 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 30 sec 의 조건에 대해 급속 열처리 공정을 수행하면 된다. 이 경우 박막의 Power Factor 는 P-type, N-type 각각 $21.2 \mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$, $26.7 \mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$ 이 나왔다.

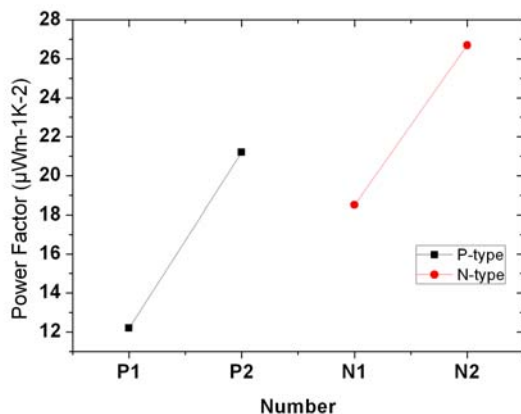


Fig. 4 Power Factor.

4. 결론

본 연구에서는 마이크로 열전발전기의 주요한 부분인 Poly-Si 의 박막을 설계하고 이를 제작하였으며, Power Factor 를 최대화 할 수 있는 급속열처리 공정의 변수를 구하였다. TEOS 와 Poly-Si 의 두께가 각각 $0.3 \mu\text{m}$, $1.0 \mu\text{m}$ 일 때, P-type 은 40 keV 의 에너지, $1\text{E}16/\text{cm}^2$ 의 이온주입량, N-type 은 130 keV 의 에너지와, $1\text{E}16/\text{cm}^2$ 의 이온주입량으로 열전 박막을 증착할 경우 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 30 sec 의 조건으로 급속 열처리 공정을 수행하면 더 우수한 성능이 기대된다. 이 경우 박막의 Power Factor 는 P-type, N-type 각각 $21.2 \mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$, $26.7 \mu\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$ 로

측정되었다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 에너지기계연구센터의 기본사업과제 ‘유비쿼터스 진단기기의 미세열유체 핵심부품 요소기술개발’의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) D. M. Rowe, D. V. Morgan and J. H. Kiely, Miniature low-power/high-voltage thermoelectric generator, *Electronics Letters* 25 (1989) 166-168.
- (2) J. J. Kiely, D. V. Morgan and D. M. Rowe, Low cost miniature thermoelectric generator, *Electronics Letters* 27 (1991) 2332-2334.
- (3) M. Strasser, R. Aigner, M. Franosch and G. Wachutka, Miniaturized thermoelectric generators based on poly-Si and poly-SiGe surface micromachining, *Sens. Actuators A* 97-98 (2002) 535-542.
- (4) M. Strasser, R. Aigner, C. Lauterbach, T. F. Sturm, M. Franosch and G. Wachutka, Micromachined CMOS thermoelectric generators as on-chip power supply, *Sens. Actuators A* 114 (2004) 362-370.
- (5) J. Posthill, A. Reddy, E. Siivola, G. Krueger, M. Mantini, P. Thomas, R. Venkatasubramanian, F. Ochoa and P. Ronney, Portable power sources using combustion of butane and thermoelectrics, in: *International Conference on Thermoelectrics*, Clemson, SC, USA, June 19-23, 2005, pp. 517-520.