

상변화 박막의 두께에 따른 상변화 메모리의 전류 및 열 특성

최홍규* · 장낙원† · 김홍승** · 이성환***

(원고접수일 : 2007년 11월 1일, 심사완료일 : 2007년 12월 31일)

Electrical and thermal characteristics of PRAM with thickness of phase change thin film

Hong-Kyw Choi* · Nak-Won Jang† · Hong-Seung Kim** · Seong Hwan Lee***

Abstract : In this paper, we analyzed the heat transfer phenomenon and the reset current variation of PRAM device with thickness of phase change material using the 3-D finite element analysis tool. From the simulation, Joule's heat was generated at the contact surface of phase change material and bottom electrode of PRAM. As the thickness of phase change material was decreased, the reset current was highly increased. In case thickness of phase change material thin film was 200 Å, heat increased through top electrode and reset current caused by phase transition highly increased. And as thermal conductivity of top electrode decreased, temperature of unit memory cell was increased.

Key words : Phase change random access memory (상변화 메모리), Finite element analysis(유한요소법), Top electrode(상부전극), Reset current(지우기 전류), Thermal conductivity(열전도도)

1. 서 론

최근 정보기술의 발달과 함께 휴대용 저장매체에 이용되는 배터리 없이도 데이터를 저장할 수 있는 초고속, 대용량, 저전력, 비휘발성의 특성을 갖는 FRAM(Ferroelectric RAM), MRAM (Magnetic RAM), PRAM (Phase Change RAM) 등의 새로운 메모리소자에 대한 연구가 활발히 진행 중에

있다^{[1],[2]}. 그 중에서 상변화 메모리 PRAM은 기존의 전하 축적 개념의 메모리가 아닌 저항체 상변화 재료를 결정립 혹은 비정질로 변화시키고, 이에 따른 전기저항을 측정하여 데이터의 '0'과 '1'을 구분하여 기록과 재생에 필요한 저항의 차이에 의해 동작하는 메모리 소자로 제조공정이 단순하여 저가격화 달성이 용이하고, 나노 스케일에 의한 고집적화를 실현할 수 있는 안정된 메모리로 최근 연구가

† 교신저자(한국해양대학교 전기전자공학부), E-mail:nwjang@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4413

* 한국해양대학교 전기전자공학부

** 한국해양대학교 나노데이터 시스템학부

*** 위덕대학교 에너지전기공학부

활발히 이루어지고 있다^{[3],[4]}. 현재 상변화 메모리에 이용되고 있는 상변화 재료 $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST)는 이미 광 디스크 분야에 응용되면서 구조 및 결정 특성에 대한 연구는 꾸준히 이어지고 있으나^[5], 반도체 메모리 소자로의 응용에 대한 연구는 그 기간이 얼마 되지 않아 소자의 구조 변화에 따른 전기적 성질 변화, 집적공정 진행에 따른 열화의 원인 등에 대한 연구는 아주 미미한 실정이다. 특히, 상변화 메모리가 고집적화 될수록 상변화 재료 $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST) 크기와 두께가 작아지게 되는데, 이에 따른 상변화 재료의 발열 특성과 주변 물질로의 열전달 특성이 상변화 소자의 동작에 미치는 영향에 대한 연구가 절대적으로 필요하다.

따라서 본 연구에서는 상변화 재료의 구조에 따른 상변화 메모리의 동작 특성 변화를 알아보기 위해 3차원 유한 요소 해석 도구를 이용하여 상변화 재료 GST의 두께에 따른 상변화 메모리소자의 발열 온도 및 지우기 전류를 조사하였으며, 고집적 상변화 메모리 소자에 적절한 상변화 재료 및 상부 전극의 조건을 제시하였다.

2. 전기장 및 열 해석

본 연구에서는 Maxwell 방정식으로부터 유도되는 Laplace 방정식과 경계 조건을 수치해석적인 방법을 이용하여 3D 구조로 모델을 구성하여 상변화 메모리 소자의 시뮬레이션 수행하였다. 상변화 메모리의 해석 모델을 구성하기 위해 상용 전자장 및 열 해석 도구인 MagNet, ThermNet를 이용하여 3차원 유한요소 모델을 구축하였다. Fig. 1은 상변화 메모리 소자의 전자장 및 열전달 해석을 위해 구성된 해석모델이다. 그림에서 보듯이 셀 구조는 발열전극(Heater)과 상부전극(Top electrode) 사이에 상변화 재료 GST 박막이 연결되어 있는 구조를 갖는다.

시뮬레이션에 있어서 중요한 변수인 각 층의 크기 및 두께는 Table 1에 나타내었다. 상변화 재료 GST 박막의 두께는 3000 Å, 상부전극 TiN의 두께는 500 Å으로 하였다. 또한, 시뮬레이션에 이용한 각 물질의 물질상수를 Table 2에 나타내었다.

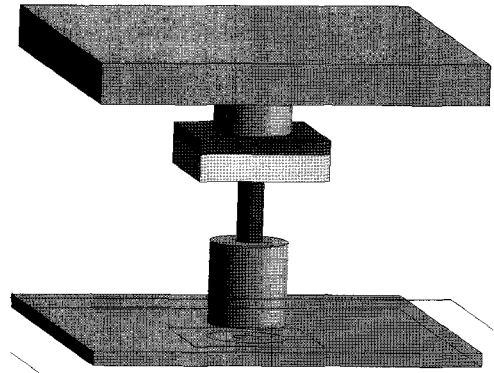


Fig. 1 Finite element analysis model of PRAM

상변화 메모리는 상부전극을 통해 상변화 재료에 인가되는 전류의 크기에 따라 쓰기(Set)과 지우기(Reset) 상태로 동작이 이루어진다. 지우기 동작 시에는 강한 짧은 전류 펄스가 인가되어 상변화 재료의 국부적인 부분을 순간적으로 용융온도 이상으로 용융/급냉 시킴으로써 고저항의 비정질상으로 상전이를 이루게 된다. 본 연구에 이용한 상변화 재료 $Ge_2Sb_2Te_5$ 의 경우 일반적으로 알려진 용융온도는 632°C이고^[6], 상변화 메모리의 지우기 동작에서는 일반적으로 730°C까지 온도가 올라가 비정질화 된다. 본 연구에서 구축한 크기의 상변화 메모리 셀의 지우기 전류 펄스의 값은 일반적으로 2 mA, 50ns 이다^[7]. 시뮬레이션에 사용한 Fig. 1과 같이 구축된 메모리 셀 모델과 해석도구의 신뢰성을 검증하기 위해 2mA, 50ns의 지우기 전류 인가에 따른 상변화 메모리 셀의 발열 온도 알아보았다.

Table 1 Specification of PRAM unit cell considered for finite element analysis

Layer	재료	크기[μ m]	두께[Å]
MI	W	1.5 X 1.5	1500
TEC	W	[지름] 0.30	2000
TE	TiN	0.5 X 0.5	500
GST	$Ge_2Sb_2Te_5$	0.5 X 0.5	1000
Heater	TiN	[지름] 0.10	2500
BL	W	[지름] 0.30	3000

Table 2 Material parameters

물 질	전기전도도 (1/Ω·m)	열전도도 (J/cm·K·s)	비 열 (J/cm ³ ·K)	밀 도 (g/cm ³)
W	1.75x 10 ⁷	1.780	2.58	19.30
GST	1.5x 10 ⁵	0.018	1.20	2.70
TiN	1.0x 10 ⁶	0.130	3.24	5.40
SiO ₂	1.0x 10 ⁻¹⁴	0.014	3.10	2.33

Fig. 2는 구축된 상변화 메모리 셀 모델에 지우기 전류 2mA, 50ns를 인가했을 때의 상변화 메모리 셀의 발열온도 분포도이다. 그림에서 인가전류에 의해 상변화 재료와 발열전극 접촉면에서 발생한 열은 상변화 재료로 전달되어 730℃ 까지 올라간 것을 볼 수 있다. 이는 상변화 재료 GST의 용융온도보다 높은 값으로 상변화 재료가 완전히 용융되어 비정질화가 되는 지우기 동작이 정상적으로 이루어짐을 말하는 것으로, 구축된 유한요소 해석 모델과 해석도구는 적절한 것으로 판단된다.

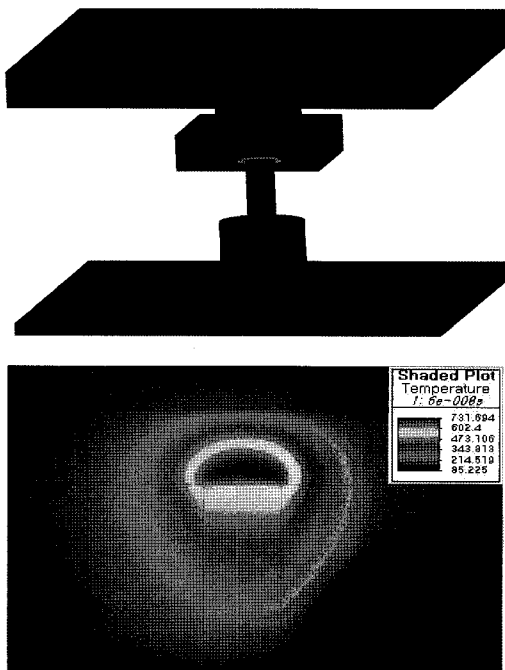


Fig. 2 Temperature distribution of PRAM cell

3. 상변화 재료 두께에 따른 특성

상변화 메모리가 고집적화 되어 상변화 재료의 크기는 작아지고 두께는 얇아지게 되면 열전달에 의해 동작 특성이 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 상변화 재료의 두께 변화에 따른 발열 특성과 주변 물질로의 열전달이 메모리 소자의 동작에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

구축된 상변화 메모리 셀의 상변화 재료 GST 박막의 두께를 3000Å ~ 200Å으로 변화시키며 2mA, 50ns의 지우기 전류를 인가할 때 발생하는 발열 온도를 알아보았다. Fig. 3은 시뮬레이션을 통해 구해진 상변화 재료 두께에 따른 상변화 메모리 셀의 발열온도이다. 그림에서 보듯이 GST 박막의 두께가 3000Å에서 1000Å으로 얇아질 때까지는 발열온도가 조금 감소하나 메모리 셀의 지우기 동작에는 크게 영향을 줄 정도는 아니다. 그러나 GST 박막의 두께가 500Å, 200Å으로 줄어들면 발열온도는 급격히 줄어들어 정상적인 메모리 셀은 정상적인 지우기 동작을 하지 못하게 된다.

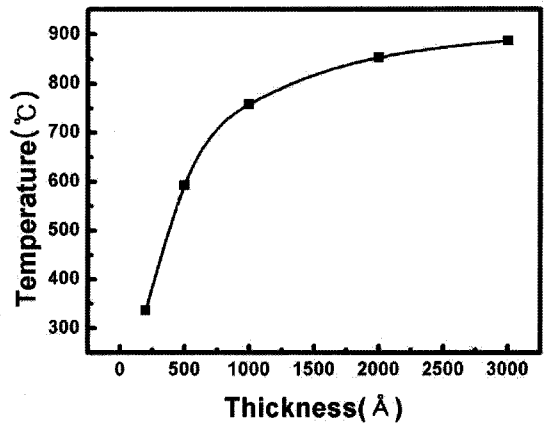


Fig. 3 Temperature distribution of PRAM cell with GST thickness

상변화 재료 두께에 따른 상변화 메모리 셀이 정상적인 지우기 동작을 하기위해 필요한 지우기 전류 값을 알아보았다. Fig. 4는 상변화 재료 GST의 두께를 변화시킬 때 상변화 메모리 셀의 온도를

730°C의 상전이 온도까지 올리는데 필요한 지우기 전류의 값을 나타낸 것이다.

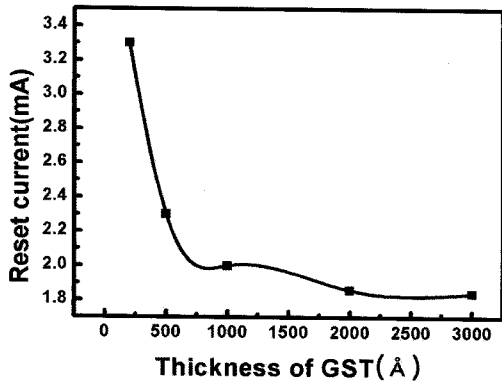


Fig. 4 Reset current of PRAM cell with GST thickness

그림에서 보듯이 상변화 재료의 두께가 3000 Å에서 1000Å까지는 지우기 전류가 큰 변화 없으나, 500Å일 때는 지우기 전류가 증가하여 200Å일 때는 지우기 전류가 3.3mA로 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 지우기 전류 3.3mA은 타 메모리 소자에 비해 매우 큰 값으로 고집적 상변화 메모리가 기존의 메모리 소자를 대체하기 위한 경쟁력을 갖추기 위해서는 지우기 동작 전류를 크게 낮추어야 한다.

상변화 재료의 두께가 얇아짐에 따라 메모리 셀의 발열 온도가 낮아져 지우기 동작 전류가 증가하는 원인을 알아보기 위해 상변화 재료 GST 박막 두께가 200Å일 때의 메모리 셀의 발열 온도 분포를 알아보았다. Fig. 5는 지우기 전류의 인가 시간에 따른 메모리 셀에서의 발열 온도 증가를 보여주는 곡선이다. 그림에서 보듯이 상변화 재료 GST 박막 두께와 상관없이 상부전극을 통해 지우기 전류가 인가됨에 따라 30ns까지 온도는 급격히 상승을 하다가 40ns까지 조금 내려간 후 50ns이상에서는 발열온도가 비교적 안정적으로 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 상변화 재료의 두께가 200 Å일 때는 인가하는 지우기 전류를 더 오랜 시간 유지하여도 온도가 더 이상 올라가지 않는 것을 볼 수 있다.

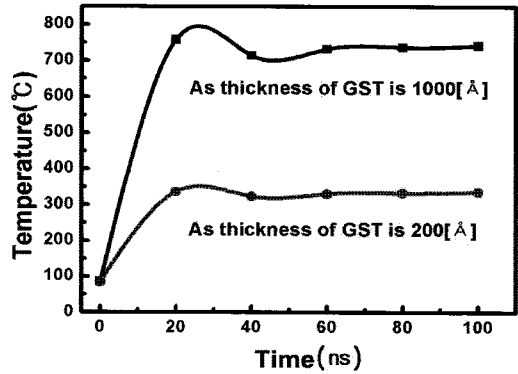


Fig. 5 Temperature distribution of PRAM cell with current applied time

Fig. 6은 GST 박막 두께가 200Å일 때의 메모리 셀의 발열 온도 분포도이다. 앞에 제시한 Fig. 2의 GST 박막 두께가 1000Å의 경우는 인가된 지우기 전류에 의해 상변화 재료와 발열전극의 접촉면에서 발생한 열이 GST 박막 쪽으로 전달되어 대부분 상변화 재료를 비정질화 시키는데 사용되었고 상부전극까지는 열이 크게 전달되지 못한 것을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 6의 GST 박막 두께가 200Å의 경우는 발생한 열이 상변화 재료의 온도를 높이는 과정에서 상변화 재료가 용융 온도까지 올라가기 전에 상부전극과 접촉하면서 상부전극으로 열이 전달되어 상부전극으로 열이 급속히 전달되는 것을 볼 수 있다.

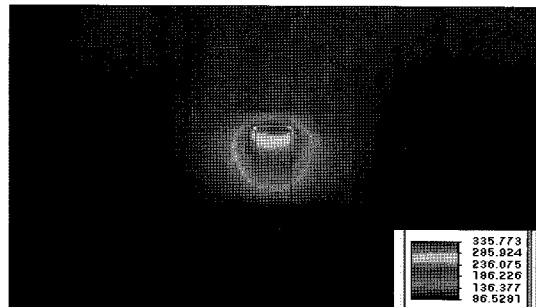


Fig. 6 Temperature distribution of PRAM cell at 200 Å GST thin film thickness

이는 상변화 재료의 두께가 200Å일 때의 전류 인가 초기에 상변화재료의 접촉면에서 발생된 열이 상변화 재료와 상부 전극으로 전달되는 과정에서

상변화재료 GST막의 두께가 얇아 전달된 열이 상부전극과 접촉하면서 외부로 쉽게 전달되면서 빠져나가 발열온도가 올라가지 않는 것으로 사료된다.

상변화 메모리가 고집적화 되어 상변화 재료의 두께가 200Å 이하에서 상변화 메모리가 저전력, 비휘발성 메모리로서 경쟁력을 갖추기 위해 지우기 전류의 크기를 낮추는 방법에 대해 알아보았다.

상변화 재료의 두께가 200Å일 때 상변화 메모리 셀에서 발생된 열이 상부전극을 통해 외부로 열이 빠져가기 때문에 빠져나가는 열을 차단하는 것이 상전이에 필요한 지우기 전류를 낮추기 위해서 필수적이다. 구축된 상변화 메모리 셀 모델의 경우, 상변화 재료 GST 박막위에 상부전극 TiN의 두께가 500Å으로 적층되어 있는 구조이다. 상부전극을 통해 외부로 나가는 열을 줄이기 위해 상부전극 TiN의 두께를 변화시키며 온도변화를 알아보았다. Fig. 7은 TiN의 두께에 따른 상변화 메모리 셀의 발열온도를 나타내었다. 그림에서 보듯이 상부전극의 두께를 매우 크게 변화시켜도 두께에 비해 온도의 변화의 차이가 매우 작음을 볼 수 있다. 상부전극의 두께는 빠져나가는 열을 차단하기 어려움을 알 수 있다.

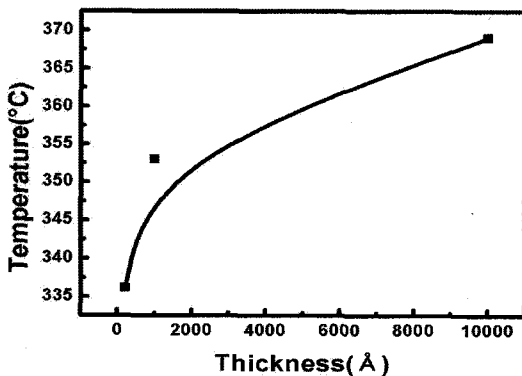


Fig. 7 Temperature distribution of PRAM cell with top electrode thickness

상부전극을 통해 빠져나가는 열을 차단하기 위해 상부전극의 열전도도를 변화시키며 발생하는 온도변화를 알아보았다. 상부전극 TiN의 열전도도 값인 0.13J/cm·K·s의 값을 기준으로 열전도

도를 변화시키며 2mA, 50ns의 지우기 전류를 인가할 때 발생하는 상변화 메모리 셀의 발열온도를 시뮬레이션을 통해 알아보았다. Fig. 8은 상부전극의 열전도도에 변화에 따른 발열온도의 변화를 나타내었다.

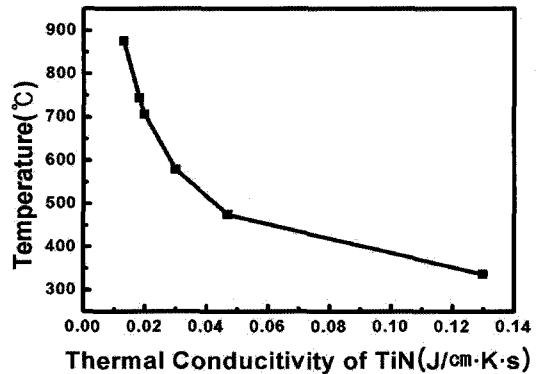


Fig. 8 Temperature distribution of PRAM cell with top electrode thermal conductivity

그림에서 보듯이 상부전극의 열전도도를 낮출수록 상변화 메모리 셀의 발열온도가 급격히 증가함을 볼 수 있다. 이는 상변화 재료와 발열전극 사이에서 발생한 열이 상부전극으로 도달하더라도 열전도도가 낮아 외부로 빠져나가지 못하고 상변화 재료의 온도를 올리는데 사용된 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 상변화 재료의 구조에 따른 상변화 메모리의 동작 특성 변화를 알아보기 위해 3차원 유한 요소 해석 도구를 이용하여 상변화재료 GST의 두께에 따른 상변화 메모리소자의 발열온도 및 지우기 전류를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 상변화 재료 GST의 두께가 3000Å에서 200Å으로 얇아질수록 상변화 메모리 셀의 발열온도는 감소하고 지우기 전류 값은 2mA에서 3.3mA로 크게 증가한다.

(2) 상부전극의 열전도도가 $0.13 \text{ J/cm}\cdot\text{K}\cdot\text{s}$ 에서 $0.01 \text{ J/cm}\cdot\text{K}\cdot\text{s}$ 로 줄어들수록 상변화 메모리 셀의 발열온도는 $335 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 $887 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 증가한다.

(3) 상변화 재료의 두께가 얇은 경우, 상부전극을 통해 외부로 열이 빠져나가 발열온도가 감소하나, 상부전극의 열전도도가 작은 재료를 사용하면 외부로 빠져나가는 열을 막아 지우기 전류를 낮출 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원(R-2005-7-068) 주관으로 수행된 과제임

참고문헌

- [1] N.W.JANG, Y.J.SONG, H.H.KIM, D.J.JUNG, S.Y.LEE, J.K.LEE, C.J.KIM and KINAM KIM, "Effects of UV Process on High Density 1T1C FRAM Device" Integrated Ferroelectrics, Vol. 39, pp.51~59, 2001.
- [2] S.Lai, T.Lowrey, "OUM - A 180nm nonvolatile memory cell element technology for stand alone and embedded applications", IEEE IEDM Tech. Dig., pp803, 2001.
- [3] S.H.Lee, Y.N.Hwang, S.Y.Lee, K.C. Ryoo, S.J.Ahn, H.C. Koo, W.C.Jeong, Y.T.Kim, G.H.Koh, G.T.Jeong, H.S. Jeong and Kinam Kim, "Full Integration and Cell Characteristics for 64Mb non-volatile PRAM", IEEE Symposium on VLSI Tech. Dig., pp.20~21, 2004.
- [4] S.Y. Lee, K.j. Choi, S.O. Ryu, S.M. Yoon, N.Y. Lee, Y.S. Park, S.H. Lee and B.G. Yu, "Polycrystalline silicon-germanium heating layer for phase-change memory application", Applied physic letter, Vol.89, pp.053517-1~3,

2006.

- [5] N.Yamada, E.Ohno, K.Nishiuchi, N. Akahira, M.Takao, "Rapid-Phase Transitions of $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$ Pseudobinary Amorphous Thin Films for an Optical Disk Memory", J. Appl. Phys., Vol.69(5), pp.2849, 1991.
- [6] I. Friedrich, V. Weidenhof, W. Njoroge, P. Franz, M.Wuttig, "Structural transformation of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films studied by electrical resistance measurements", J. Appl. Phys., Vol.87, No.9, p.4130, 2000.
- [7] Y.N.Hwang, S.H.Lee, S.J.Ahn, S.Y. Lee, K.C.Ryoo, H.S. Hong, H.C. Koo, F. Yeung, J.H. Oh, H.J. Kim, W.C. Jeong, J.H Park, H. Horii, Y.H. Ha, J.H. Yi, G.H. Koh, G.T.Jeong, H.S. Jeong and Kinam Kim, "Writing current reduction for high-density phase change RAM", IEDM 03, pp.893~896, 2003.

저 자 소 개



최홍규(崔洪奎)

1981년 10월 31일생. 2007년 8월 한국해양대학교 전기전자공학부 졸업, 2007년 9월~현재 한국해양대학교 대학원 전기전자공학 재학(석사)



장낙원(張樂元)

1967년 11월 7일생. 1990년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1992년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1999년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1992~1995년 삼성전자 AMLCD 사업부, 1999~2003년 삼성전자 반도체연구소, 2003년 9월~현재 한국해양대학교 전기전자공학부 조교수



김홍승(金泓承)

1968년 2월 7일생. 1990년 한국과학기술대학 전자재료과 졸업, 1993년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(석사), 1999년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(박사), 1999~2003년 한국전자통신연구원. 2001~2002년 미국 코넬대학교(박사후연수). 2003년 9월~현재 한국해양대학교 나노반도체전공 조교수



이성환(李聖煥)

1966년 8월 10일생. 1990년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1992년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1995~2001년 현대중공업 기전연구소. 2001년 3월~현재 위덕대학교 에너지전기공학부 조교수