

발열 전극에 따른 상변화 메모리 소자의 전자장 및 열 해석

장낙원† · 마석범* · 김홍승**

(원고접수일 : 2007년 3월 27일, 심사완료일 : 2007년 4월 16일)

Electromagnetic and Thermal Analysis of Phase Change Memory Device with Heater Electrode

Nakwon Jang† · Suk-Bum Mah* · Hong-Seung Kim**

Abstract : PRAM (Phase change random access memory) is one of the most promising candidates for next generation non-volatile memories. However, the high reset current is one major obstacle to develop a high density PRAM. One way of the reset current reduction is to change the heater electrode material. In this paper, to reduce the reset current for phase transition, we have investigated the effect of heater electrode material parameters using finite element analysis. From the simulation, the reset current of PRAM cell is reduced from 2.0 mA to 0.72 mA as the electrical conductivity of heater is decreased from 1.0×10^6 ($1/\Omega \cdot m$) to 1.0×10^4 ($1/\Omega \cdot m$). As the thermal conductivity of heater is decreased, the reset current is slightly reduced. But the reset current of PRAM cell is not changed as the specific heat of heater is changed.

Key words : Phase change random access memory (상변화 메모리), Non-volatile memory (비휘발성 메모리), Heater electrode (발열전극), Electrical conductivity (전기전도도), Thermal conductivity (열전도도)

1. 서 론

최근 PDA, 휴대전화, MP3, 디지털 카메라 등 휴대형 저장매체 시장의 급속한 발전으로 배터리 없이도 데이터를 저장할 수 있는 초고속, 대용량, 저전력 비휘발성 메모리에 대한 요구가 강해짐에 따라 새로운 메모리소자에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다.

상변화 메모리 PRAM(Phase change random access memory)은 기존의 전하 축적 개념의 메모리가 아닌 기록과 재생에 필요한 저항의 차이에 의해 동작하는 메모리 소자이다. 일정한 전기저항을 갖는 칼코게나이드 상변화 재료가 인가되는 전류에 따라 결정립 혹은 비정질로 변화되어 고속의 메모리 동작 특성과 나노 스케일에 의한 고집적화를 실현할 수 있는 안정된 메모리로 주목받고 있다^{[1],[2]}

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

* 용인송담대학 조명민테리어과

** 한국해양대학교 나노데이터 시스템학부

그러나 상변화 메모리의 지우기 동작전류(Reset current)는 약 ~2 [mA] 정도로 타 메모리 소자에 비해 큰 값을 나타내는 단점이 있어 상변화 메모리가 기존의 메모리 소자를 대체하기 위한 경쟁력을 갖추기 위해서는 지우기 동작 전류를 낮추어야 한다. 최근 상변화 소자의 동작 전류를 낮추고 신뢰성을 확보하기 위해 상변화 메모리의 구조 변화, 저항이 큰 상변화 재료의 개발 및 발열전극 재료의 개발의 연구가 진행 중에 있다^[3]. 그 중에서도 상변화 메모리는 전류의 주울 열에 의해 상전이가 이루어지기 때문에 열 공급원인 발열 전극을 변화시켜 Reset 전류를 낮추고자하는 연구가 많이 이루어지고 있다. 상변화 메모리의 발열전극으로 TiN 이 주로 이용되고 있으나 지우기 동작 전류를 줄이기 위해 다른 발열 전극 물질을 찾고자하는 노력이 이루어지고 있다^[4].

따라서 본 연구에서는 3차원 유한 요소 해석 도구를 이용하여 발열 전극의 전기전도도, 열전도도 및 비열 등의 물질상수를 변화시켜가며 물질상수가 상변화 메모리의 지우기 전류에 미치는 영향을 조사하여 지우기 전류를 낮추고 신뢰성을 갖기 위해 필요한 발열전극의 조건을 알아보았다.

2. 전자장 및 열 해석

2.1 상변화 메모리 소자 해석 모델

상변화 소자는 일정한 크기의 전류가 상부전극을 통해 상변화 물질에 전달되어 상변화 물질을 결정립 혹은 비정질로 변화시키고, 이에 따른 전기저항을 측정하여 데이터의 '0'과 '1'을 구분하여 저장한다. Fig. 1은 일반적으로 제작되는 상변화 메모리 소자의 셀 구조를 나타내었다^[5]. 그림에서 보듯이 셀 구조는 DRAM 과 유사하며, 데이터를 저장하는 DRAM 의 캐페시터가 상변화 재료를 이용한 저항으로 대체되어 발열전극과 상부전극(Top electrode) 사이에 연결되어 있는 구조를 갖는다.

Fig. 1의 상변화 메모리 셀 구조를 바탕으로 발열 전극의 물질상수에 따른 상변화 메모리의 지우기 전류의 변화량을 유한요소 해석법을 이용하여 시뮬레이션하였다. 인가 전류에 따른 주울열 발생

및 열전달의 해석은 상용 전자장해석도구인 MagNet, ThermNet 을 이용하여 수치적으로 계산하여 수행하였다.

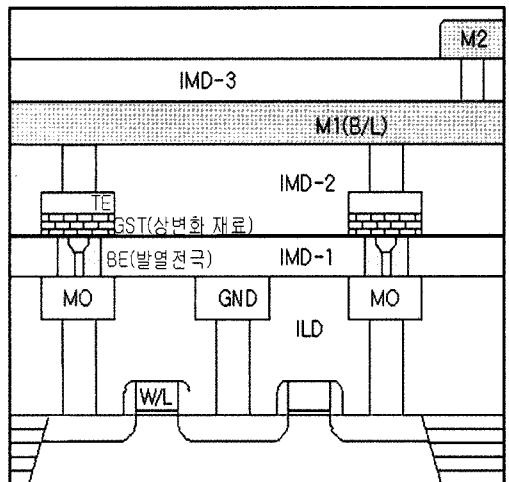


Fig. 1 Cell array of PRAM device

상변화 메모리의 해석 모델을 구축하기 위해 Fig. 2 와 같은 2차원 단위 셀 도면을 작성한 후, 이 도면을 바탕으로 상용 전자장 해석 도구를 이용하여 3차원 유한요소 모델을 구축하였다. 구축된 상변화 메모리 모델의 발열전극과 상변화 물질은 현재 많이 연구되고 있는 재료들을 사용하였으며^{[2],[4]}, 시뮬레이션에 있어서 중요한 변수인 각 층의 크기 및 두께는 Table 1에 나타내었다.

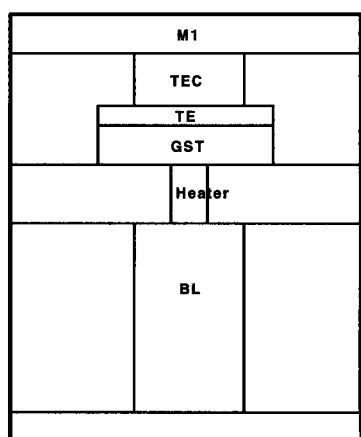


Fig. 2 2-D drawing of PRAM unit cell

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

Layer	재료	크기(μm)	두께(Å)
M1	W	1.5 X 1.5	1500
TEC	W	[지름] 0.30	2000
TE	TiN	0.5 X 0.5	500
GST	Ge ₂ Sb ₂ Te ₅	0.5 X 0.5	1000
Heater	TiN	[지름] 0.10	2500
BL	W	[지름] 0.30	3000

Fig. 3 은 정밀 전자장 및 열전달 해석을 수행하기 위한 상변화 메모리의 3차원 유한요소 해석모델이며, 모델의 전자장 및 발열 해석을 위한 발열전극 물질 및 각 층의 재료들의 전기전도도, 열전도도, 비열 등과 같은 물질상수는 Table 2 에 나타내었다.

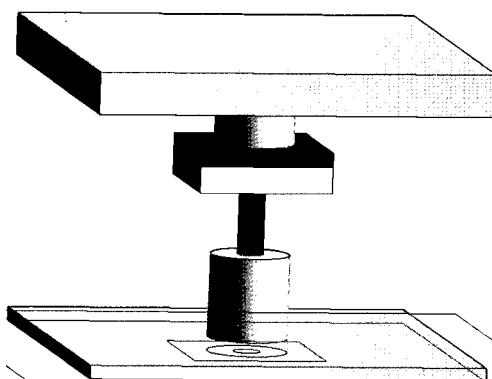


Fig. 3 Finite element analysis model

Table 2 Material parameters

물질	전기전도도 (1/Ω·m)	열전도도 (J/cm·K·s)	비열 (J/cm ³ ·K)	밀도 (g/cm ³)
W	1.75x 10 ⁷	1.78	2.58	19.3
GST	2.4x 10 ⁵	0.018	1.2	2.698
TiN	1.0x 10 ⁶	0.13	3.235	5.4
SiO ₂	1.0x 10 ⁻¹⁴	0.014	3.1	2.33

2.2 상변화 소자의 전자장 및 발열 특성

먼저 시뮬레이션에 사용한 상용 전자장 해석도구의 신뢰성을 검증하기 위해 지우기 전류 인가에 따

른 상변화 메모리 셀의 발열 온도 해석을 수행하였다. 상변화 메모리는 Fig. 4 와 같이 지우기 동작 시에는 강한 전류 펄스가 인가되어 상변화 재료의 국부적인 부분을 순간적으로 용융온도 이상으로 용융/급냉 시킴으로써 비정질상이 되며, 쓰기 동작 시에는 낮고 긴 전류 펄스를 인가하여 결정화 온도 이상으로 일정시간 유지하여 상변화 재료를 결정화한다. 본 연구에서 구축한 크기의 상변화 메모리 셀의 지우기 전류 펄스의 값은 일반적으로 2 [mA], 50 [ns] 이다^[5]. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3의 상변화 메모리 모델에 2 [mA], 50 [ns] 의 전류를 인가하여 상변화 재료의 발열온도를 구하여 실제 제작된 상변화 메모리의 발열온도와 비교하였다.

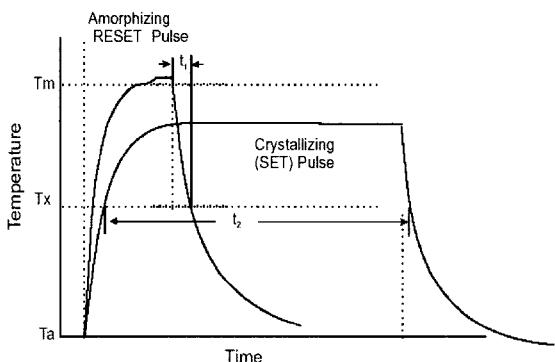


Fig. 4 Reset pulse and set pulse of PRAM

Fig. 5는 상변화 메모리 셀에 2[mA], 50[ns]의 지우기 전류를 인가했을 때의 발생하는 전력손(Ohmic loss)을 나타낸 것이다. 상부전극을 통해 인가된 전류는 상변화 재료를 통해 발열전극 외곽으로 전류가 집중적으로 흐르며 상변화 재료와 발열전극의 접촉면에서 발열의 원천인 전력량이 크게 발생되는 것을 알 수 있다. 상변화 메모리 셀의 지우기 전류에 따른 발열온도의 분포를 Fig. 6 에 나타내었다. 본 연구에 이용한 상변화 재료 Ge₂Sb₂Te₅의 용융온도는 632[°C]로 제작된 상변화 메모리가 지우기 동작 시에 이 용융온도까지 올라가 비정질화 된다^[6]. 구축된 상변화 메모리 셀 모델에 지우기 전류 2 [mA], 50 [ns]를 인가했을 경우, 상변화 재료와 발열전극 접촉면에서 발생한 열은 상변화 재료로 전달되어 발열전극위의 영역에

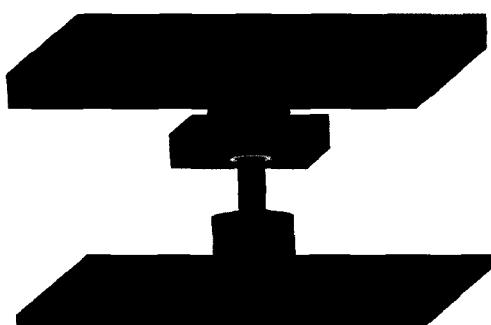


Fig. 5 Ohmic loss of PRAM cell

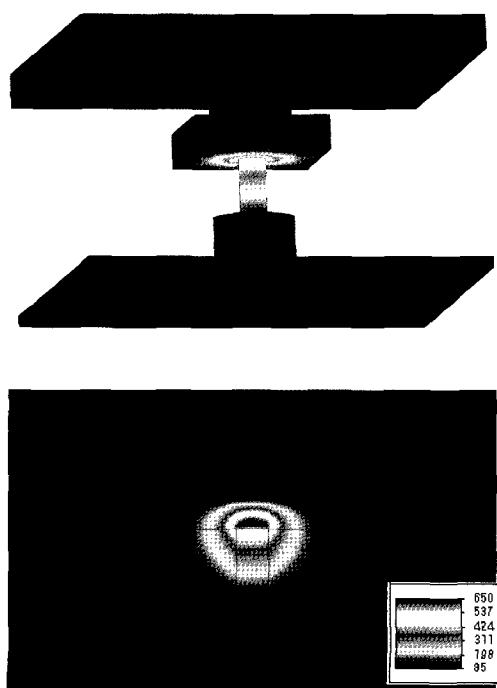


Fig. 6 Temperature distribution of PRAM cell

서 용융온도보다 조금 높은 650 [°C] 까지 올라가 완전히 용융되어 비정질화가 일어나는 것을 볼 수 있다. 그럼에서 보는 것과 같이 상변화 메모리에 2 [mA], 50 [ns]의 지우기 전류를 인가했을 때의 구축된 유한요소 해석 모델의 발열온도와 실제 제작된 소자의 발열온도는 서로 같음을 알 수 있다.

3. 발열전극에 따른 특성

상변화 메모리 셀의 발열 온도의 비교검증을 통해 구축된 상변화 메모리 해석 모델의 신뢰성을 바탕으로 발열 전극의 물질상수에 따른 상변화 메모리의 지우기 전류의 변화를 유한요소 해석법을 이용하여 알아보았다. 상변화 메모리의 동작 전류를 낮추기 위해 현재 발열전극으로 많이 사용하고 있는 TiN 대신 Table 3에 표시한 전극 재료들을 발열전극으로 이용하려는 연구가 진행되고 있다^[4]. 표에서 보듯이 발열전극으로 이용하려는 재료들의 전기전도도, 열전도도, 비열 등의 물질 상수들이 다르기 때문에 새로운 발열 전극 물질을 선정하기 위해서는 어떤 물질 상수가 지우기 전류를 줄이는 데 크게 기여하는지를 알아보는 것이 필요하다고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 발열전극으로 많이 사용되고 있는 TiN의 물질 상수를 바꾸어 가며 상변화 재료 Ge₂Sb₂Te₅가 완전히 용융되어 비정질화가 되는 온도인 650 [°C] 까지 올라가는 데 필요한 지우기 전류 값이 얼마인지 알아보았다.

Table 3 Material parameters of heater

물질	전기전도도 (1/Ω·m)	열전도도 (J/cm·K·s)	비열 (J/cm ³ ·K)	밀도 (g/cm ³)
W	1.75×10^7	1.78	2.58	19.3
TiN	1.0×10^6	0.13	3.23	5.4
TiW	1.43×10^6	0.6	2.04	14.3
TiAlN	5.0×10^4	0.3	0.7	4.5
SiGe	5.0×10^4	0.085	1.84	3.08
p-Si	1.0×10^5	1.3	1.61	2.33

3.1 전기전도도에 따른 특성

발열전극의 전기 전도도에 따른 지우기 전류 값

의 변화를 알아보기 위해 TiN의 전기전도도 값인 1.0×10^6 ($1/\Omega \cdot m$)의 값을 기준으로 전기전도도 값을 변화시키며 상변화 재료의 온도를 650 [°C] 까지 올리는데 필요한 지우기 전류의 값을 조사하였다. 시뮬레이션을 통해 구해진 지우기 전류 값을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이 전기전도도가 줄어들수록 지우기 전류의 값은 크게 줄어들어 전기전도도가 1.0×10^4 ($1/\Omega \cdot m$)인 경우, 지우기 전류는 0.72 [mA]로 전기전도도가 1.0×10^6 ($1/\Omega \cdot m$)와 비교할 때 63% 나 줄어드는 것을 알 수 있다. 특히 발열전극의 전기전도도가 상변화 재료 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 의 전기전도도보다 작아지면 지우기 전류 값이 급격히 줄어드는 것을 볼 수 있다. 지우기 전류를 줄이기 위해서는 낮은 전기전도도의 발열전극으로 이용하는 것이 좋을 것으로 판단되나, 발열전극의 전기전도도가 지나치게 작게 되면 소자에 필요한 전류가 너무 작아지게 되므로 $1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^6$ ($1/\Omega \cdot m$) 정도의 전기전도도를 갖는 물질이 발열전극으로 좋을 것으로 사료된다.

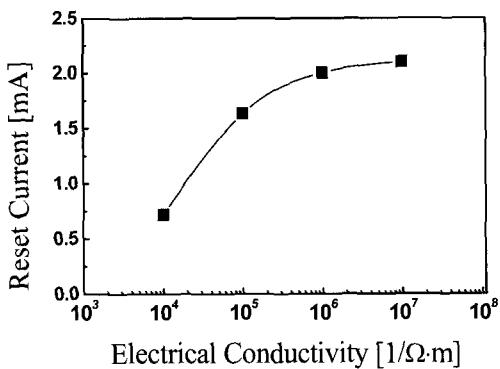


Fig. 7 Reset current of PRAM unit cell as a function of electrical conductivity

3.2 열전도도에 따른 특성

발열전극과 상변화재료의 접촉면에서 발생된 열은 상변화 재료와 발열전극의 양방향으로 전도되는 과정을 거쳐 상변화 메모리가 동작하기 때문에 발열전극물질의 열전도도에 대한 특성을 알아보는 것 또한 중요하다고 할 수 있다. 따라서 발열전극의 열전도도에 따른 지우기 전류 값을 알아보기 위해

TiN의 열전도도 값인 0.13 [$J/cm \cdot K \cdot s$]의 값을 기준으로 열전도도를 변화시키며 상변화 재료의 용융온도인 650 [°C] 까지 올리는데 필요한 지우기 전류의 값을 시뮬레이션을 통해 알아보았다. Fig. 8은 발열전극의 열전도도에 따른 지우기 전류의 변화량을 나타내었다. 그림에서 보듯이 열전도도가 줄어들수록 지우기 전류 값이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 상변화 재료와 발열 전극 사이에서 발생한 열이 발열전극을 통해 적게 빠져나가게 됨에 따라 상변화 재료의 온도를 좀 더 높이는 것으로 생각된다. 그러나 열전도도에 따른 지우기 전류의 변화량은 전기전도도가 지우기 전류에 미치는 영향을 매우 작은 것을 알 수 있다. 이는 발열전극을 통해 빠져나가는 열을 줄이는 것보다 발생되는 열량을 크게 하는 것이 더 효과적임을 의미한다.

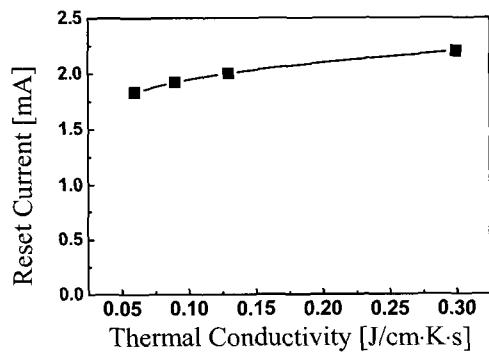


Fig. 8 Reset current of PRAM unit cell as a function of thermal conductivity

3.3 비열에 따른 특성

발열전극의 물질 상수 중에서 비열이 상변화 메모리의 지우기 전류에 미치는 영향을 알아보기 위해 TiN의 비열 값인 3.23 [$J/cm^3 \cdot K$]의 값을 기준으로 비열을 변화시키며 상변화 재료의 온도를 650 [°C] 까지 올리는데 필요한 지우기 전류의 값을 시뮬레이션을 통해 알아보았다. Fig. 9은 발열전극의 비열에 따른 지우기 전류의 변화량을 나타내었다. 그림에서 발열전극의 비열이 변화해도 지우기 전류는 거의 변화 없이 일정한 것을 알 수 있다. 이는 상변화 메모리는 상변화 재료의 온도를 올려 비정질화 및 결정화시키는 것으로 온도가 올

라가는 상변화 재료의 비열이 동작에 있어 중요한 요소이지 발열전극의 비열은 소자 동작과는 크게 관계가 없는 것으로 사료된다.

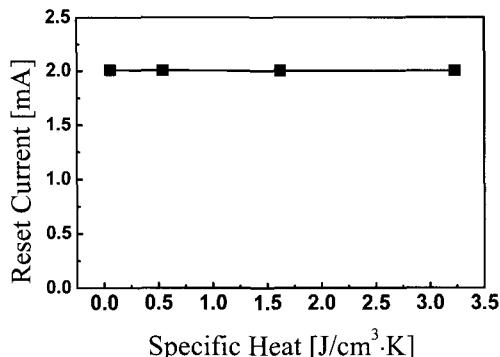


Fig. 9 Reset current of PRAM unit cell as a function of specific heat

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 유한 요소 해석 도구를 이용하여 발열 전극의 전기전도도, 열전도도 및 비열 등의 물질상수를 변화시켜가며 물질상수가 상변화 메모리의 지우기 전류에 미치는 영향을 조사하여 지우기 전류를 낮추기 위해 필요한 발열전극의 조건을 알아본 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 발열전극의 전기전도도가 줄어들수록 지우기 전류의 값은 크게 줄어든다.
2. 발열전극의 열전도도가 줄어들수록 발열전극을 통해 빠져나가는 양이 줄어들어 지우기 전류 값이 줄어드는 것을 볼 수 있다.
3. 발열전극의 비열이 변화해도 지우기 전류는 거의 변화 없이 일정한 값을 나타내었다.
4. 상변화 메모리의 지우기 전류를 낮추기 위해서는 발열전극의 열전도도나 비열보다는 전기전도도가 낮은 재료를 선택하는 것이 효과적이다.

감사의 글

“본 연구는 2004년 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.”(KRF-2004-002-D00246)

참고문헌

- [1] S. Ovshinsky, "Reversible Electrical Switching Phenomena in Disordered Structures", Phys. Rev. Lett., Vol.21 (20), p.1450, 1968.
- [2] 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.
- [3] Y.H. Ha, J.H. Yi, H. Horii, J.H. Park, S.H. Joo, S.O. Park, U.I. Chung, J.T. Moon, "An Edge Contact Type Cell for Phase Change RAM Featuring Very Low Power Consumption" IEEE Symposium on VLSI Tech. Dig., pp.175~176, 2003.
- [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] 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.
- [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.

저 자 소 개

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

마석범(馬碩範)



1962년 1월 20일생. 1984년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1986년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2000년 연세대학교 대학원 전기·컴퓨터 공학과 졸업(박사). 1986~1996년 삼성전자 반도체부문 특수사업부, 1999년 3월~현재 용인송담대학 조명인테리어과 부교수

김홍승(金泓承)



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