

논문 95-4-1-02

강자성체 박막(Co-Ni)의 자기-저항 효과에 관한 연구(III)

張忠根* · 尹晚榮* · 金英日** · 孫大洛***

Magnetoresistive Effect in Ferromagnetic Thin Film(III)

C. G. Chang*, M. Y. Yoon*, Y. I. Kim**, D. R. Son***

요 약

자기저항 효과를 이용한 저자장 자기센서를 제작하기 위하여 슬라이드 유리 기판위에 Ni-Co(0.7Ni-0.3Co) 합금을 600 Å 두께로 진공증착 하였다. 증착된 박막을 bridge 구조의 격자무늬로 식각하는 과정에서 4개의 bridge arm을 주축과 45°로 배열하고 그 면적율을 67%로 증대시켰다. 제작된 센서는 자장범위 ±0.5mT에서 직선성이 양호하였으며 백색잡음은 0.2nV 이었고 전압감도는 7.6 nV/μT 이었다.

Abstract

To fabricate low field magnetic sensors using magnetoresistance(MR) effects, we deposited thin layers of 600Å in thickness of Ni-Co(0.7Ni-0.3Co) alloy on slide glasses. In the layers we ordered 4 arms of the fullbridge sensors in the shape of grid structure to be inclined at an angle of 45° to main axis and made the areal rate increase to 67%.

While the response characteristics of the fabricated sensors had good linearity in the magnetic field of ±0.5 mT ranges, the white noise was 0.2 nV and the voltage sensitivity was 7.6 nV/μT.

1. 서 론

자장을 변화시키면 전기저항이 변화하는 재료의 자-전(磁-電)현상에 관한 연구는 1966년에 Hebbert R.S.와 Schwee L.J.⁽¹⁾에 의해서 처음으로 시도되었으며 그 후 여러 연구자들⁽²⁻¹¹⁾에 의하여 현재도 진행되고 있다.

본인등도 이 연구에 관심이 있어서 1991년에는 자기저항 센서의 소재를 선정하기 위하여 Fe-Ni과

Co-Ni합금의 자기저항 효과를 조사⁽¹²⁾한 바 있고 1992년에는 Co-Ni합금 박막으로 자기저항 센서를 제작하여 그 자기저항 효과를 연구한 바 있다⁽¹³⁾. 이어서 1993년에는 600Å 두께로 진공 증착된 Co-Ni박막을 bridge 구조의 격자무늬로 사진 식각하는 과정에서 센서를 선형화시키기 위하여 4개의 bridge arm을 주축과 45°로 배열하고 격자무늬의 면적율을 67%로 증대시켜 자기저항 센서를 제작한 후 그 특성을 조사하였다. 제작된 센서는 인가 자장 범위 ±0.5 mT에서 직선성이 양호하였으며 백색잡음은 0.2nV이었고 분해능은 7.6nV/μT 이었다.

II. 실험방법

1. 박막시료의 제작

Ni-Co(0.7Ni-0.3Co,4N)합금을 10⁻⁶torr의 진공에서 진공 증착하여 박막을 제작하였다. 박막의 형상은 스

* 正會員 : 忠南大學校 物理學科
(Dept. of Physics, Chungnam Nat'l Univ.)

** 正會員 : 慶北大學校 센서技術研究所
(Sensor Technology Research Center/Kyungpook Nat'l Univ.)

*** 正會員 : 韓南大學校 物理學科
(Dept. of Physics, Hannam Univ.)

<접수일자 : 1995년 1월 16일>

*본 연구는 1993년도 한국과학재단-경북대학교
센서기술연구소의 연구비 지원으로 수행되었음.

태인레스 마스크를 사용하여 13×13mm의 방형(方形)으로 제작하였다. 기판은 크기가 15×15mm이고 두께가 0.3mm인 현미경용 슬라이드 그라스(Corning 0221, Germany)를 사용하였으며 여타의 증착조건은 전보⁽¹³⁾와 같다.

2. 선형성 격자무늬의 설계

처음에 시도한 센서 무늬는 그림1의 (a)와 같은 무늬의 것으로 이와같은 모양으로 식각된 센서 격자에 자속이 수직으로 입사할 때의 자기저항 변화는 그림 1의 (b)와 같이 비선형 특성을 가지고 있음을 전보(前報)⁽¹²⁾에서 밝힌 바 있다.

이 특성을 선형화 시키기 위한 조건은 (1)⁽¹⁴⁾식에서 $\theta=45^\circ$ 이므로 이 조건에 맞도록 설계한 무늬는 그림1의 (c)와 같다.

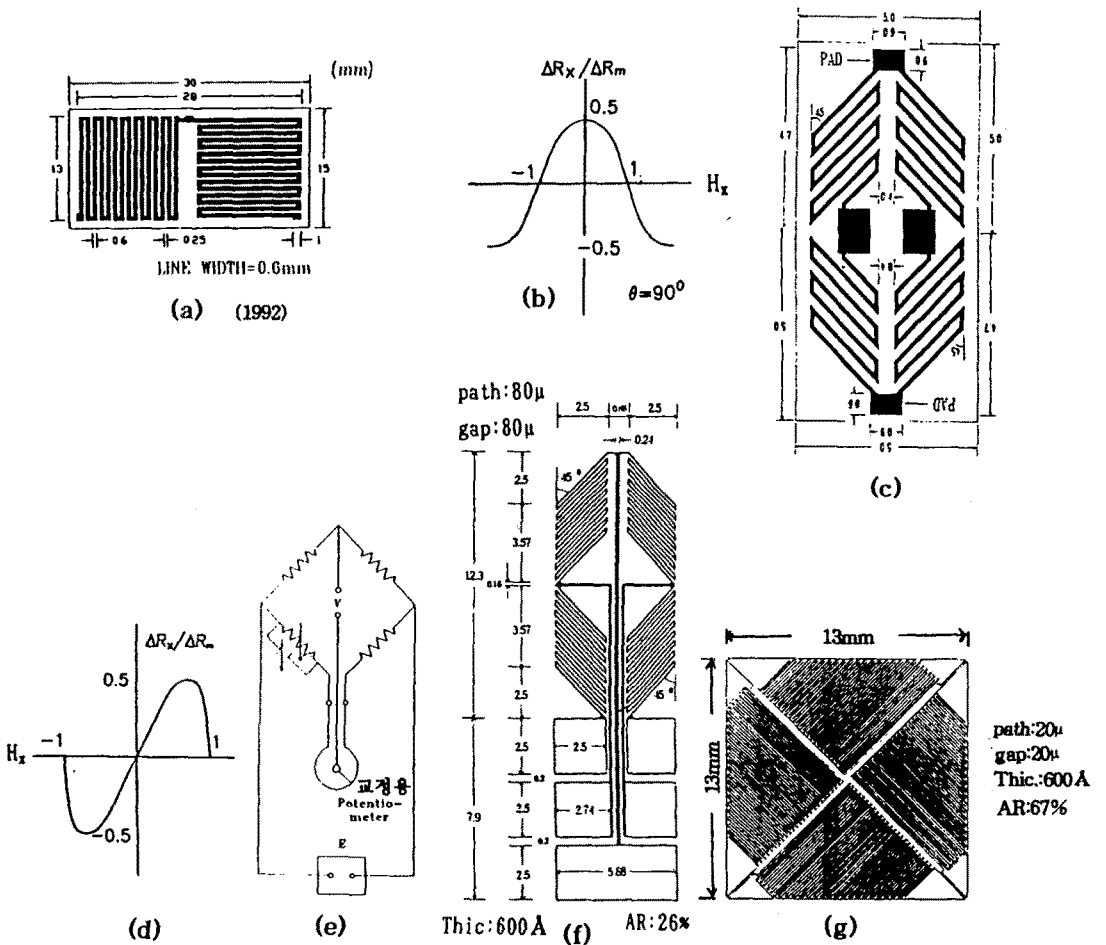


그림 1. 자기 저항센서 무늬의 설계

(a) : 90° 차동무늬, (b) : 90° 차동무늬의 자기저항변화, (c) : 45° bridge무늬, (d) : 45° bridge무늬의 자기저항변화, (e) : potentiometer가 삽입된 bridge회로, (f) : 5단자 45° bridge, (g) : 8단자 bridge 무늬.

Fig. 1. Design of magnetoresistance sensor pattern.

(a) : 90° differential pattern, (b) Magnetoresistance change of 90° differential pattern, (c) : 45° full bridge pattern, (d) : Magnetoresistance change of 45° full bridge pattern, (e) : Bridge circuit inserted potentiometer, (f) : 5 terminal 45° bridge pattern, (g) : 8 terminals 45° bridge pattern.

$$\Delta R_x = \Delta R_m (h_x^2 \cos 2\theta + h_x \sqrt{1 - h_x^2} \sin 2\theta - \frac{1}{2} \cos 2\theta) \quad (1)$$

여기서 $h_x = H_x/H_k$

H_k : anisotropy field

H_x : applied field

ΔR_m : $R_{x0} \Delta \rho / \rho$

즉 센서의 무늬를 그림1의 (c)와 같이 식각하면 그림1의 (d)와 같이 선형화된 신호를 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 인출선의 처리가 어렵고 bridge arm의 저항차로 인하여 야기되는 offset을 교정하기 어렵다는 단점이 내포되어 있음이 확인되었다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 그림1의 (e)와 같이 교정용 potentiometer를 삽입할 수 있도록 하기 위하여 그림1의 (f)와 같이 5단자 45° bridge를 설계하였다. 또한 위상평형용 trimmer를 부가할 수도 있도록 하였다.

그러나 그림1의 (f)와 같이 설계 제작된 센서의 전압감도는 연구자의 기대에 미치지 못하여 다시 보완하였다. 즉 자기저항 센서의 전압감도¹⁴⁾ Su는

$$Su = J \Delta \rho l \frac{1}{H_{KO} + H_{BO} + tM/w} \quad (2)$$

여기서 Su : 전압감도, J : 전류밀도
 $\Delta \rho$: 저항변화, M : 분자량
 H_{KO} : 이방성자장, H_{BO} : 부가된 bias field
 t : 박막의 두께, w : path의 폭
 l : 센서 path의 길이

로 표현되므로 (2)식에서 전압감도 Su를 향상시키기 위하여는 전류통로(current path)의 길이(l)를 최대한 길게 하고 폭(w)를 넓게 즉 path와 path사이의 틈새(gap)을 좁게 설계하여야 할 것이다. 즉 무늬의 면밀도가 높아지도록 설계하여야 할 것이다. 이에 근거하여 그림1의 (f)와 같이 설계된 무늬의 면밀도를 대폭 증가시켜서 그림1의 (g)와 같이 설계 변경한 결과 이 무늬의 면밀도는 67%에 도달하였으며 전압감도 역시 매우 향상되었다.

3. 센서 무늬의 식각 방법

무늬의 사진 식각 공정은 Photo-resist가 습기에

민감하므로 Co-Ni박막을 80℃에서 10분간 건조시킨 다음에 Photo-resist Spinner (Headway rearch #1-EC 1 D-R485)를 사용하여 photo-resist 1518J를 2000rpm(5초) → 3000rpm(20초) → 2000rpm(5초)의 단계로 도포하였다. photo-resist가 도포된 박막을 80℃에서 30분동안 soft baking한 후 Mask Aligner(Karls Suss #1009,S/N 1485)에 장착하고 film 원판을 집착한 후 45초 동안 자외선을 조사시켰다. 현상처리는 Hoechst AZ351 현상액 10ml를 deionized water 50ml로 희석시켜서 현상 처리한 다음 135℃에서 30분 동안 hard baking 시켜서 microetching solution(M14)으로 부식처리 하였다.

4. 센서의 특성 측정 방법

센서의 출력전압에 미치는 인가 자장의 영향은 센서에 1mA의 bias 전류가 인가될 때 외부자장을 ± 2.5mT의 범위 내에서 변화시키면서 센서의 출력 전압을 측정하여 구하였다. 또한 센서 무늬의 두께(600Å, 800Å, 1000Å)에 의한 영향도 함께 구하였다.

한편 -30℃에서 +90℃까지의 온도 구간에서 센서의 온도 특성을 조사하였고 dual channel signal analyzer(FFT, B&K #2034)로 센서의 백색잡음과 분해능을 관측하였다.

III. 실험 결과 및 검토

1. 센서의 출력 전압에 미치는 bias 전류의 영향

그림1의 (g)와 같은 무늬로 제작된 자기저항 센서의 출력전압에 미치는 bias 전류의 영향을 조사한 결과는 그림 2와 같다. Bias 전류가 0.4mA에서부터 1.5mA 까지 직선적으로 증가함에 따라 출력전압도 직선적으로 증가되었다. 따라서 이들은 1차 함수 관계에 있음을 확인할 수 있었다.

2. 센서의 출력 전압에 미치는 인가 자장의 영향

그림3은 센서에 1mA의 bias 전류와 2.5mT의 bias 자장을 걸어주고 이 2.5mT의 bias 자장에 수직한 방향으로 0~2.5mT의 외부 자장을 인가시켰을 때의 출력 전압을 조사한 결과이다.

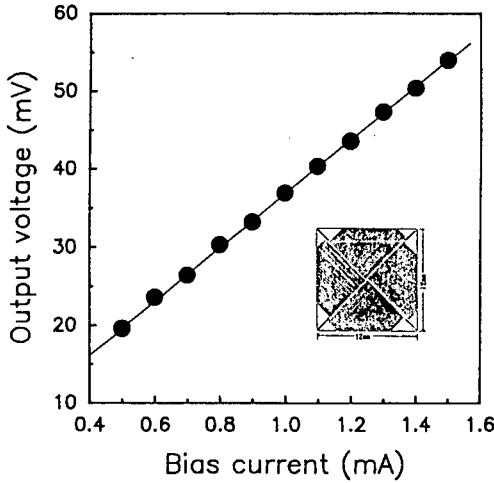


그림 2. 자기저항 센서의 출력전압에 미치는 bias 전류의 영향

Fig. 2. Effect of bias current on the output voltage in magnetoresistance sensor.

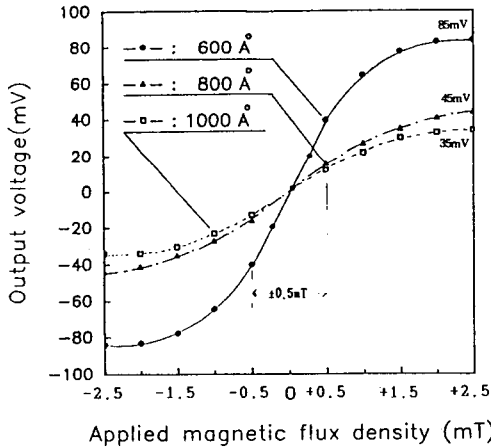


그림 3. 자기저항 센서의 출력전압에 미치는 인가자속의 영향

Fig. 3. Effect of the applied magnetic flux density on the output voltage in magnetoresistance sensor

그림에서 실선은 600 Å 두께의 박막으로 제작된 센서의 출력전압을 나타낸 것이고, 파실선(破實線)은 800 Å 두께의 박막으로 제작된 센서의 출력전압이며, 점선은 1000 Å 두께의 박막으로 제작된 센서의 출력전압을 나타낸 것이다.

이들 출력특성은 2.5 mT의 인가자장에서 포화되었으나 그 출력전압은 두께가 600 Å 인 경우에는 85mV이

었고, 두께가 800 Å 일때는 45mV이었으며, 두께가 1000 Å 일때는 35mV로 감소되었다. 이와같이 박막의 두께가 두꺼워 짐에 따라 출력전압이 감소되는 현상은 (2)식에서 전압감도 S_u 가 박막의 두께 t 에 반비례하는데 기인하는 것으로 사료된다.

전압감도를 더욱 높이기 위하여 박막의 두께를 더욱 얇게 하는 일련의 실험을 수행한 결과 600 Å 이하의 박막에서는 센서 무늬의 기계적 감도가 약화되면서 여러가지 결함이 속출되어 실용성이 희박한 것으로 확인되었다.

한편, 두께 600 Å 인 센서는 ± 0.5 mT의 자장구간에서 그 출력전압의 직선성이 지극히 양호함이 확인되었다. 따라서 이구간에서는 bias 자장을 걸어 주지않아도 자장 계측이 가능 할것으로 사료된다.

3. 센서의 출력전압에 미치는 온도의 영향

센서의 출력 전압에 미치는 온도의 영향을 -30°C 에서부터 $+90^\circ\text{C}$ 까지의 범위에서 조사한 결과는 그림4와 같다. 그림에서와 같이 -30°C 에서의 출력전압은 155.9 μV 이었고 그후 온도의 증가에 따라 약간의 진동을 보이면서 증가하다가 $+90^\circ\text{C}$ 에서 156.18 μV 를 나타내었다. 따라서 이 자기저항 센서의 온도 구배는 2.33 nV/ $^\circ\text{C}$ 임을 알수 있었다. 이 자기 저항센서가 이와같이 완만한 온도 구배를 가지는 이유는 이 조성의 합금 (0.7Ni-0.3Co)이 매우 작은 저항온도계수 ($1 \times 10^{-4}/\text{deg}$)를 나타내는데 기인하는 것으로 사료된다.

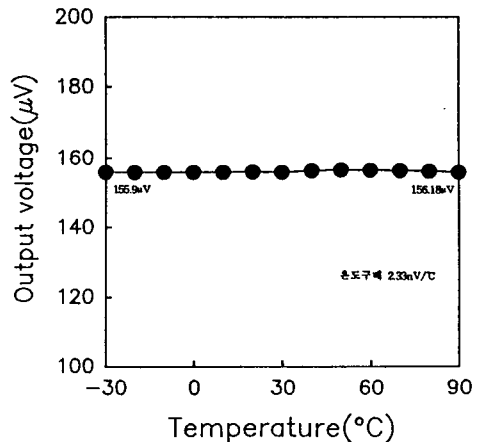


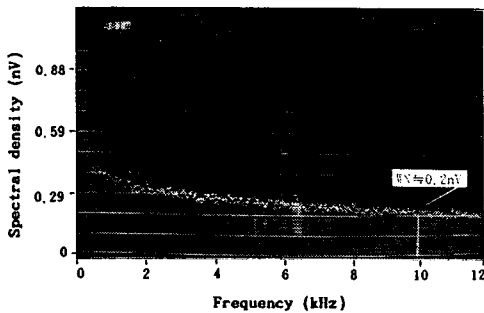
그림 4. 자기저항 센서의 출력전압에 미치는 온도의 영향
Fig. 4. Effect of temperature on the output voltage in magnetoresistance sensor.

4. 센서의 백색잡음

사진 1은 센서의 백색잡음 스펙트럼을 관측한 것으로 종축은 spectral density로 단위는 nV이다. 이 때의 눈금은 선형눈금으로 V_{rms} 를 나타내도록하였다. 횡축은 주파수로 단위는 kHz이고 frequency span은 12.8kHz로 설정하였고 ΔF 는 16Hz로 택하였다. 사진에서 2 kHz 미만은 1/f의 잡음특성을 나타내는 것으로 이 잡음은 센서 자체에서 발생된 잡음이 아니고 신호증폭회로에서 발생된 잡음으로 간주된다. 대역폭이 개방된 영역 즉 2 kHz 이상에서의 잡음은 센서 자체에서 발생된 잡음으로 10 kHz에서의 잡음은 사진에서와 같이 0.2 nV로써 이 값이 이 센서의 백색잡음으로 사료된다. 이와 같은 잡음의 근원은 결정립 경계면에서 야기되는 저항요동과 박막내의 국소적인 열적 비평형에 의한 저항요동 등에 의한것으로 사료된다. 또한 박막의 구조적 결함을 전자가 tunneling할 때에 잡음이 야기된 것으로 추측된다.

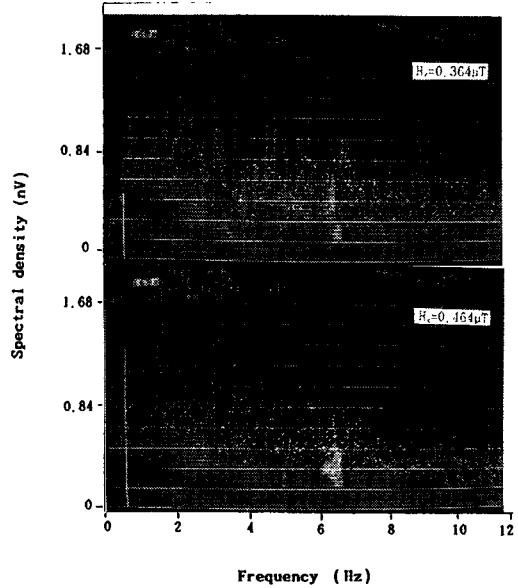
5. 센서의 전압감도

사진2는 센서에 평행한 방향으로 인가된 자장 즉 수평방향으로 인가된 자장이 0.364mT일 때와 0.464mT일 때의 spectral density를 0.5Hz에서 관측하여 비교한 것이다. 0.5Hz에서 관측한 이유는 스펙트럼의 면적분을 생략하기 위해서이다. 즉, 1Hz 대역폭 내의 스펙트럼의 면적분 값이 바로 센서의 분해능인데 대역폭이 1Hz이므로 적분할 필요없이 중간점에서의 높이 즉, 0.5Hz에서의 높이를 측정하면 그 값이 바로 분해능 값이 되기 때문이다.



사 진 1. 자기저항 센서(8단자)의 백색잡음 스펙트럼.
Photo. 1. Spectrum of white noise in magnetoresistance sensor(8 terminal).

이 실험에서 0.364mT의 자장이 인가될 때 관측된 분해능은 0.56nV 이었고 0.464mT의 자장이 인가될 때 관측된 분해능은 1.32nV 이었다. 따라서 전압감도는 $S_u = \Delta u / \Delta H_x$ 에 의해서 7.6nV/ μ T임을 알 수 있었다.



사 진 2. 자기저항 센서(8단자)의 전압감도.

Photo. 2. Voltage sensitivity of magnetoresistance sensor(8 terminal).

IV. 결 론

니켈,코발트(0.7Ni-0.3Co) 합금을 유리기판에 600Å 두께로 진공 증착한 후 박막을 bridge 구조의 격자 무늬로 사진식각하는 과정에서 4개의 bridge arm 주축과 45° 각도를 유지하도록 배열하고 격자 무늬의 면적율을 67%로 하여 자기저항 센서를 제작한 다음 그 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제작된 자기저항 센서(0.7Ni-0.3Co)는 2.5mT의 bias 자장에서 출력전압이 포화 된다.
2. 두께가 600Å인 이 자기저항 센서의 출력전압은 ± 0.5 mT의 인가 자장 구간에서 직선성이 지극히 양호하다.
3. 이 자기저항 센서의 온도 구배는 2.33nV/ $^{\circ}$ C 이다.
4. 이 자기저항 센서의 백색잡음은 0.2 nV 이다.
5. 이 연구에서 구현된 센서의 전압감도는 7.6 nV/ μ T 이다.

참 고 문 헌

- [1] Hebbert R.S. and Schwee L.J., Rev. Sci. Instrum, 37. 1321(1966)
- [2] Irons H.R. and Schwee L.J., IEEE Trans. Magn. MAG-8. 61.(1972)
- [3] Vincent J.L. Phys. D:Appl. Phys. 11. L29(1987)
- [4] Batles H.P. et al. Proc. Conf. 'Sensor 82' Essen 176 (1982)
- [5] Gebhardt O. and Richter W., Exp. Tech. Phys., 30, 963 (1982)
- [6] Hoffman G.R. and Birtwistle J.K., J.Appl. Phys., 53, 8266 (1982)
- [7] Hoffman G.R. and Birtwistle J.K., and Hill E. W., IEEE Trans. Magn., MAG-19, 2139 (1983). J. Appl. Phys. 53. 8266
- [8] Kwiatkowski W, Stabrowski M. and Tumanski S., IEEE Trans. Magn., MAG-19, 2502 (1983)
- [9] Tumanski S., IEEE Trans. Magn., MAG-20, 1720 (1984)
- [10] de Riidder R.M. and Fluitman J.H. IEEE Trans. Magn., MAG-20, 960 (1984)
- [11] Hoffman G.R., Hill E.W. and Birtwistle J.K., IEEE Trans. Magn., MAG-20. 957 (1984)
- [12] C.G.Chang, J.Y.Song, M.Y.Yun, J.H.Park and D.R.Son, J. The Korean sensors society, vol.1, No.1,23 (1992)
- [13] C.G.Chang, J.Y.Yoo, S.W.Nam and D.R.Son J. The Korean sensors society, vol.3, No.1,to be printed
- [14] W.Kwiatkowski and Tumanski, J.Phys. E:Sci. Instum. 19 (1986)

 著 者 紹 介

張 忠 根

『센서학회지 제1권 1호』 논문 92-03 참조
현재 충남대학교 물리학과 교수

尹 晚 榮

『센서학회지 제1권 1호』 논문 92-03 참조
현재 충남대학교 대학원 조교

孫 大 洛

『센서학회지 제1권 제1호』 논문 92-03 참조
현재 한남대학교 물리학과 교수



金 英 日

1966년 11월 22일생. 1989년 충남대학교 물리학과 학사. 1991년 충남대학교 물리학과 석사. 현재 경북대학교 센서기술연구소 주임연구원. 주관심분야 : 적외선센서, 초음파센서, 자기센서