

논문 99-8-4-2

TMAH에 의한 이방성 식각을 이용한 3차원 자기센서의 제작

정 우 철*, 남 태 철**

Fabrication of 3-dimensional magnetic sensor

by anisotropic etching in TMAH

Woo-Chul Jung*, Tae-Chul Nam**

요 약

본 논문에서는 TMAH를 이용한 비등방성 에칭기술을 이용하여 3차원의 자장의 값을 측정하기 위한 경사각 구조의 3차원 자기센서를 제작하였다. 제작된 3차원 자기센서는 비등방성 식각에 의하여 [100] 결정방향의 Si 표면에 [111] 결정방향의 경사면을 구성하여 이 경사면에 경사각 Hall 소자를 제작하였으며, 기존의 3차원 자기센서에 비하여 개선된 감도 특성을 나타내었다. 제작된 소자의 적감도는 547V/AT 이었으며 자기센서 출력의 PSD 성분의 측정에 의해 계산 되어진 최소측정 자장은 0.07G 이었다.

Abstract

This paper will present an anisotropic etching in TMAH technique used in the fabrication of three-dimensional magnetic field vector sensor based on angled Hall plate structure. This sensor design relies on simultaneously detecting all magnetic field vector components using Hall plates that are imbedded into the silicon [111] sloped-surface of bulk micromachined cavity by the anisotropic etching of [100] silicon. The fabricated Hall elements has relatively improved sensitivity compare to convensional Hall elements for three-dimensional magnetic field sensing. The product sensitivity of 547V/AT at the supply current of 1.0mA was achived. The corresponding limit in the detection of magnrtic field is 0.07G that calculated by measured power spectral density(PSD) in magnetic sensor output..

1.서론

최근의 자기센서의 응용분야가 확대되면서 단순한 자장의 값을 검출하는 기존의 센서의 적용분야 이외에도 공간내에서 3차원의 벡터량을 지니는 자장의 값을 검출하기 위한 3차원 자기센서의 필요성이 증가되고 있다. 이러한 3차원 자기센서는 2차원 또는 3차원의 자

장의 값을 동일 센서로 검출하여 출력할 수 있으므로 공간자계의 측정이 필요한분야의 응용성이 확대될 수 있어, 자기컴퍼스, 비접촉식 각도센서, 위치측정 시스템 등에 적용될 수 있다^{1,2)}. 3차원의 자장의 값을 측정하기 위한 기존의 센서는 주로 동일칩 상에 수직 및 수평 Hall 소자를 배치하여 수직소자로 z 방향을 측정하게 하고 2개의 수평 Hall 소자로 x, y 값을 검출하는 방식을 취하는 구조의 센서들이 제시되고 있으며 이러한 센서들로는 3차원 자기트랜지스터와 같이 활성영역내부에서 자장에 의해 변화하는 캐리어의 흐름을 표면 및 벌크 내로 구분하여 각각의 캐리어의 편향을 이

* 포항산업과학연구원 센서/계측팀 (Sensor & Instrumentation Reasearch Team, Research Institute of Industrial Science & Technology)

**영남대학교 전기전자공학부 (School of Electrical & Electronic Eng., Yeungnam Univ.)

<접수일자 : 1999년 4월 7일>

용하여 3차원의 값을 검출하고 있다^[3,4]. 이러한 기존의 3차원 자기센서들은 두 가지의 다른 동작원리 및 구조를 지니는 센서를 하나의 소자로 구성하게 되므로 이때 발생하는 소자간의 감도의 차이가 심하게 나타나며 출력특성의 차이로 인해 측정하는 자장의 범위가 제한되어 사용상의 어려움이 있다. 이를 개선하기 위하여 반도체 표면을 경사를 지니도록 가공하여 이 경사면에 자기센서를 구성하여 3차원의 자기센서를 구현하는 방식이 제안되었는데 이러한 경사면을 이용하는 구조에서는 사진식각 공정시에 감광재(Photo resistor)의 균일한 도포의 문제가 있어 E-beam을 이용하는 감광재 및 식각공정을 이용하여 MOS 형 자기센서를 제작한 경우^[5]와, TEOS 와 Si_3N_4 층을 이용하여 이온주입 공정의 마스크로 사용하는 shadow-mask 방식의 Hall 소자^[6] 등이 제안되고 있다. 이러한 방식들은 사진식각 공정상의 문제점은 해결할 수 있지만 특별한 공정 및 장비를 요구하게 되어 기존의 표준공정을 도입하기에는 다소간 문제가 있다. 이러한 점을 고려하여 본 논문에서는 TMAH(Tetra Methyl Ammonium Hydroxide, $(\text{CH}_3)_4\text{NH}_4\text{OH}$)의 25% 용액을 이용하여 [100] 결정 방향을 가지는 Si wafer 상에 이방성 식각으로 [111] 경사면을 얻어^[7-11] 이 경사면에 기존의 Hall 소자를 구성하기 위한 활성영역을 이온주입하고 경사면의 금속공정의 어려움을 고려하여 n^+ 이온주입으로 전극부를 형성하여 경사면 바깥에서 Al 과 음성접촉면을 구성하여 경사면 상에서의 금속공정의 문제점이 해결된 기존의 Hall 소자 제작공정을 사용할 수 있는 3차원 자기센서를 제작 하였다.

2. 소자의 설계 및 제작

본 연구에서 제작한 3차원 자기센서의 구조를 그림 1에 나타내었다. 그림 1에 나타낸 것과 같이 제작된 3차원 자기센서는 [100] 결정방향의 Si wafer를 TMAH 용액을 이용하여 (111) 경사면이 나오도록 이방성 에칭을 하여주고 이 경사면에 소자를 제작하는 방식을 취하고 있다. TMAH 용액은 SiO_2 를 Etch stop으로 사용하여 약 $0.8\mu\text{m}/\text{min}$ 의 에칭율로 이방성 식각을 진행할 수 있으며 이는 KOH에 비해 반응이 완만하므로 비교적 고른 식각표면을 얻을 수 있어 자기센서의 활성영역으로 사용이 가능한 경사면의 구성이 가능하고 식각표면에 Hall 소자를 형성하기가 용이하다.

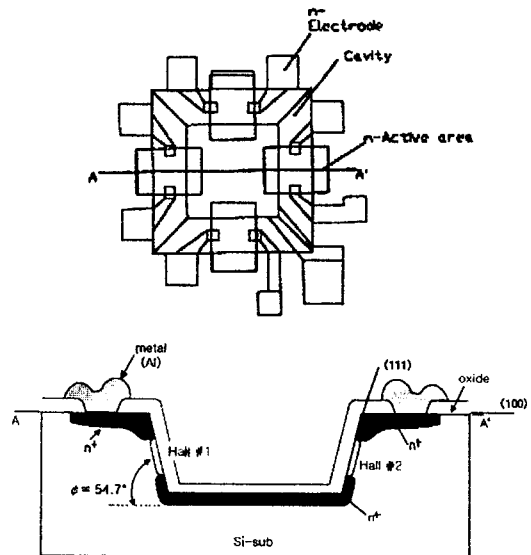


Fig. 1. Schematic of 3-dimensional Hall magnetic sensor using bulk micromachining.

그림 2에 TMAH 용액으로 $50\mu\text{m}$ 깊이의 에칭을 실시한 경우의 표면 상태에 대한 SEM 사진을 보였다. 이렇게 (100) 결정면에 대해 (111) 결정면을 이방성 식각으로 얻는 경우에 두 결정면 사이의 각도는 54.7° 를 이루는데 이때 식각으로 얻어진 (111) 경사면에 이온주입을 통한 활성층을 가지는 Hall 소자를 구성하여 자장을 측정하도록 한다. 본 연구에서는 $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ 의 면적을 지니고 깊이가 $50 \mu\text{m}$ 를 지니는 경사면을 구성하여 각각의 경사면에 Hall 소자를 구성하였다. 이때 경사면에 이온주입으로 구성되는 Hall 소자 영역의 정 및 각 소자간의 절연을 위하여 $500\Omega\text{cm}$ 의 저항율을 지니는 Si wafer를 사용하였으며 이온주입 공정에 의하여 형성된 n-type 영역을 자기센서의 활성영역으로 사용하였다. 또한 그림 1에 보인 것과 같이 각각의 소자의 상하면에는 구동전류를 공급하여 주는 전극을 형성하고 소자의 측면의 가운데 부분에 Hall 전압을 측정하기 위한 Hall 전극을 형성하여 자장에 따른 Hall 전압의 변화를 읽을 수 있도록 하였다. 이러한 공정에서는 $50\mu\text{m}$ 의 깊이를 가지는 경사면에 소자를 형성하여야 하는데 일반적인 감광재를 사용하는 사진식각 공정에서는 균등한 감광재의 두께를 얻기 어려우며 이로

인해 경사면상에서 식각공정에 나쁜 영향을 미친다. 이러한 문제는 Al 증착후 일정한 선폴을 얻어야 하는 금속공정에서 예측한 결과를 얻기 어렵게 하는데 본 연구에서는 이러한 문제점을 고려하여 에칭된 경사면의 바닥과 경사면에 구성되는 전극의 인출을 위해 이온주입에 의하여 n+ 영역을 경사면 바깥부분으로 연장하고 접촉구멍(contact hole)을 열어서 증착된 Al과 오믹접촉(ohmic contact)을 가지도록 하였다. 이외의 활성층 및 n+ 전극을 위한 이온주입공정의 마스크로는 감광제를 사용하였으며 50µm의 경사면의 경우에 다소간 두께의 불균일성이 발생하지만 마스크로 사용할 수 있는 정확한 형상을 얻을 수 있었다.

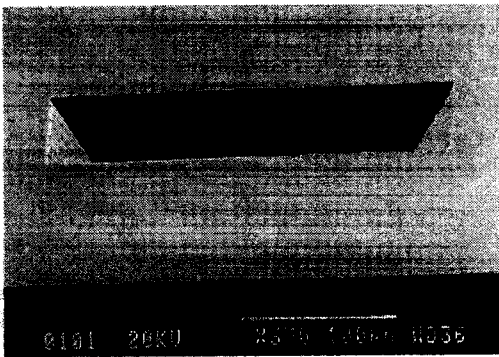


Fig. 2. SEM micrograph of sloped-surface

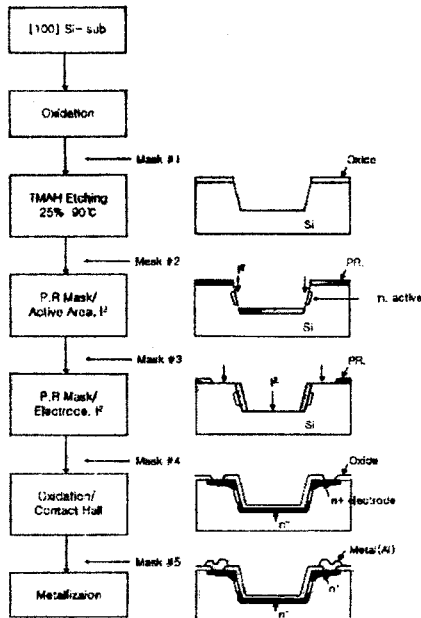


Fig. 3. Fabrication process of 3-D magnetic sensor.

그림 3에 3차원 자기센서의 제작공정을 나타내었다. 이상의 공정은 기존의 사진식각 공정을 최대한 이용하여 제작한 경우로서 E-beam 용 감광제 및 식각공정을 이용하는 경우 및 TEOS 및 Si₃N₄ 층을 이용하는 shadow mask를 사용하는 방식에 비하여 단순화된 공정으로 제작할 수 있는 장점을 지닌다. 이상의 공정으로 제작된 3차원 자기센서의 사진을 그림 4에 나타내었다.

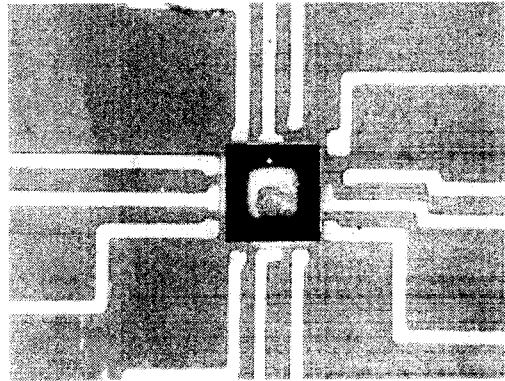


Fig. 4. Micrograph of 3-D magnetic sensor.

3. 측정 및 결과

이상에서 언급한 구조를 지니는 자기센서는 서로 마주보는 경사면의 Hall 소자의 출력특성으로 다차원 자장을 검출할 수 있게 한다. 일반적으로 Hall 소자의 특징은

$$V_H \propto \frac{B \cdot I}{t} \quad (1)$$

으로 나타나는데 이때 그림과 같이 Hall 소자가 수평면에 대하여 일정한 각도 ϕ 의 경사를 이루고 있는 경우의 동작원리를 그림 5에 나타내었다.

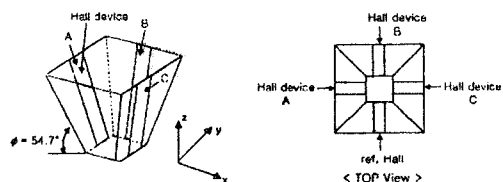


Fig. 5. Conceptual view of 3-D magnetic sensor.

이러한 구조의 자기센서는 외부에서 인가되는 3차원의 자장의 값에 대하여 각각 결과치를 나타내게 되는데 그림에 나타난 Hall 소자들 중에서 A 소자에 수직으로 자장이 입사하는 경우를 $B_{\perp A}$ 로 두고 A 소자를 사용하는 경우에 대해 나타내면($B_x=0$ 인 경우)

$$B_y = B_{\perp A} \sin \Phi \quad (2)$$

$$B_z = B_{\perp A} \cos \Phi \quad (3)$$

로 나타난다. 이 경우에 예칭으로 이루어진 경사면의 각도는 항상 일정하므로 경사면이 이루는 각도는 $\Phi=54.7^\circ$ 로서 이를 대입하면 각 방향의 자장의 크기를 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 자장을 측정하면 3차원의 x,y,z 성분을 계산해 낼 수 있다. 이상에서 제작한 3차원 자기센서의 각각의 특성을 측정하였다. 먼저 외부에서 인가되는 자장이 없는 경우에 공급해주는 정전류의 크기에 따른 오프셋 성분을 측정하였다. 이때 측정된 결과를 그림 6에 나타내었는데 그림에서 나타난 것과 같이 각각의 Hall 소자의 오프셋 특성은 거의 같게 나타났다. 다음으로는 공급하는 전류원을 고정시키고 외부에서 인가하는 자장을 변화시켜 이때 나타나는 Hall 전압을 측정하였는데 특성측정의 용이성을 위하여 각각의 소자에 동일한 방향 및 동일한 크기의 자장을 인가하여 소자간의 자장 검출특성을 비교하여 출력특성을 그림 7에 나타내었다. 이 경우에는 각각의 소자가 동일하게 경사각인 54.7° 를 유지하고 있는 경우의 출력특성으로서 그림과 같이 거의 같은 기울기를 나타내고 있으며 이는 3차원을 측정하는 경우에 수직 또는 수평성분의 검출을 위한 각각의 소자간에 자장 검출특성 차이가 없음을 나타내고 있다. 이상의 결과에서 각각의 Hall 소자의 적감도는 오프셋 및 자장검출 특성이 거의 동일하게 나타나므로 각각의 소자의 적감도 역시 거의 동일하게 나타나게 된다. 이것은 기존에 연구 및 제안된 3차원 자기센서에서 3차원 자장의 측정시에 오는 수직 검출소자의 감도와 수평검출소자의 감도의 현저한 차이에서 오는 보정 및 측정범위의 문제점을 보완할 수 있는 결과이다. 또한 제작된 3차원 자기센서의 각도에 따른 특성을 측정하기 위하여 일정한 자장을 인가하고 이를 회전시켜 이때 나타나는 Hall 전압을 측정하여 그림 8에 나타내었다. 이때 출력특성은 예칭면이 일정한 경사를 지니므로 약 55° 및 235°

에서 0V에 접근하였고 나머지 영역에서 양호한 검출 특성을 나타내었으며, 최종적으로 얻어진 적감도(product sensitivity)는 547V/AT로 나타났다.

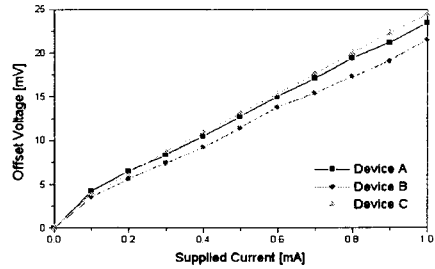


Fig. 6. Variations of offset voltages of 3-D magnetic sensor to supplied current.

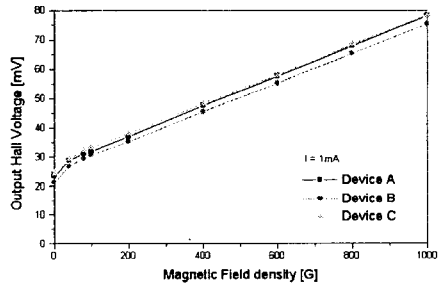


Fig.7. Variations of Hall voltage vs. supplied magnetic flux density.

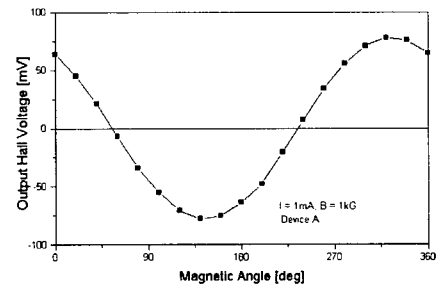


Fig. 8. Hall voltage vs. magnetic field direction angle.

이상에서 제작된 3차원 자기센서의 최소측정 자장 및 잡음특성측정을 위하여 10mm 두께의 Al 재질의 차폐 구조로 이루어진 차폐상자(shielding box) 내부에 제작된 3차원 자기센서 및 구동을 위한 정전류원 부를 제작하여 넣고 밀봉하여 외부의 잡음의 유입을 최소화한 후 자기센서 내부에서 발생하는 잡음의 영향을 관측하였다. 측정장비로는 HP35670A Dynamic signal analyzer 에 내장된 PSD(Power Spectral Density) 측정 Mode를 사용하여 자기센서의 출력전압의 PSD를 측정하였다. 이때 소자를 구동하기 위한 공급전류(I_H)는 1mA, 이었으며 무자계시 및 1kG 인가시의 특성을 측정하여 최소측정자장을 계산하였다. 센서의 잡음성분을 측정하기 위한 방법으로 PSD를 사용하는 경우에 측정되는 PSD성분은 $S(f)$ 의 형태로 표현된다.^[11,12] 이때 $S(f)$ 의 단위는 V^2/\sqrt{Hz} 로 나타나며(Hall Plate의 전압출력 방식인 경우), 이때 mean-square value 는 $V^2(t)$ 로 정의되어

$$V^2(t) = \int S_v(f) df \quad (4)$$

로 나타난다.

또한 감도를 s 로 두고 전압출력 방식인 경우를 고려하면

$$S_v = \Delta V / \Delta B \quad (V/T) \quad (5)$$

로 나타나게 된다. 이때 최소측정자장 B_{min} 은 주어지는 narrow frequency band, f 에서 동작되는 경우에 band 폭을 Δf 라고 두고 S/N 비를 1 로 가정하면

$$B_{min} = [S(f) \Delta f]^{1/2} / s \quad (6)$$

로 얻어진다. 결과적으로 특정주파수에서의 PSD 및 자기센서의 감도에서 검출가능한 최소 자장을 얻을 수 있다. 측정된 3차원 자기센서의 noise 특성은 그림 9. 에 나타내었으며 이것은 Hall 소자의 대략적인 사용범위인 0Hz - 25kHz 범위에서의 PSD 성분을 나타내고 있다. 그림 9.의 PSD 특성은 전형적인 Hall plate의 PSD 개형을 나타내고 있으며 noise 의 성분이 거의 1kHz - 2kHz 미만의 저주파 영역에 집중됨을 알 수 있다. 실제 측정에서는 구동전류 1mA, 측정주파수 1kHz, 밴드폭(Δf) 1Hz 로 하였는데 이 경우에는 PSD

는 $-43.6 \text{ dB}_v/\sqrt{Hz}$ 이었으며 제작된 자기센서의 적 감도가 547V/AT 임을 고려하면 최소측정자장은 $7\mu T$ 로 나타났다.

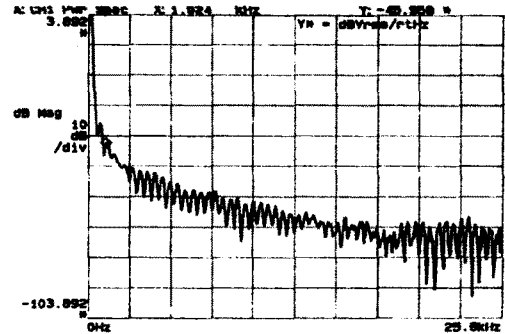


Fig. 9. Power spectral density $S_{VH}(f)$ of voltage fluctuations.

4. 결론

본 논문에서는 TMAH 이방성 식각용액을 이용하여 $200 \times 200\mu m^2$ 의 면적 및 $50\mu m$ 의 깊이를 가지는 에칭면을 얻고 이 경사면에 Hall 소자를 제작하여 3차원 측정이 가능한 자기센서를 제작하였다. 이러한 방식으로 제작된 3차원 자기센서의 각각의 Hall 소자의 적 감도는 대략 547V/AT 이었고, 최소측정자장은 0.07G 로 나타났다. 또한 외부에서 인가되는 자장의 각도에 대한 출력 특성도 양호하게 나타났다. 이상에서 제작한 3차원 자기센서는 기존의 3차원 자기센서에서 문제가 되던 수평자장 측정소자 및 수직성분의 자장을 측정하기 위한 소자간에서 구조적인 문제로 인해 발생하던 감도의 불균일성이 해결되어 측정범위가 확대되고 출력값의 보정회로가 간단해져서 사용상의 편의점을 제공할 수 있다.

참고문헌

- [1] J. H. Huijsing, " Integrated Smart Sensor ", Sensors and Actuators, A.30, pp. 167~174, 1992.
- [2] H. P. Baltes and R. S. Popovic, " Integrated Semiconductor magnetic field sensor", Proc. IEEE., vol. 74, no. 8, pp. 1107 ~ 1132, 1986.

- [3] S. Kordic and J. A. Munter, "Three-dimensional Magnetic Field sensors", IEEE. transaction on ED., Vol.35, No.6, pp 771-779, 1988.
- [4] M. Paranjape, L. Ristic and I. Filaovsky, "A 3-D vertical hall magnetic field sensor in CMOS technology", IEEE. ED., pp. 1081-1084, 1991.
- [5] S. Kawahito, N. Fusitsuka, M. Ishida and T. Nakamura, "Buried-channel MOS Hall elements with three-dimensional micro structure", Technical digest of the 11th sensor symposium, pp. 71-74, 1992.
- [6] M. Paranjape, F. Giacomozzi, L. Landsberger and M. Kahrizi, "A micromachined angled Hall magnetic field sensor using novel In-cavity Patterning", IEEE. Trans. 97 Solid-state sensors and actuators, pp.397-400, 1997.
- [7] Ivan Stoev, "Anisotropic etching of Si(100) studied by scanning electron microscopy", Sensor & Actuators, A51, pp. 113-116, 1996.
- [8] M. Merlos, M. C. Acero, M. H. Bao, J. Bausells and J. Esteve, "A study of the undercutting characteristics in the TMAH-IPA system", J. Micromech. Microeng. 2, pp. 181-183, 1992.
- [9] 정우철, 남태철, "차동검출방식을 이용한 홀 센서의 제작 및 특성", 센서학회지, 제 7권 제 4호, pp.1 - 9, 1998.
- [10] M. Landsberg, S. Naseh, M. Kahrizi and M. Paranjape, "On hillocks during Anisotropic etching of Si in TMAH", IEEE. J. of Micro electromechanical systems, Vol. 5. No.2, pp. 106-116, 1996.
- [11] Osamu Tabata, "pH-controlled TMAH etchants for silicon micromachining", Sensors & Actuators., A53, pp. 335-339, 1996.
- [12] A. Chovet, Ch. S. Roumenin, G. Dimopolos and N. Mathieu, "Comparision of noise properties of different magnetic field semiconductor integrated sensor", Sensors and Actuators, A21-A23, pp. 790 - 794, 1990.
- [13] F. Bordini and A. D'Amico, "Noise in sensors", Sensors and Actuators, A21-A23, pp. 17-24, 1990.

 著 者 紹 介



정 우 철

1969년 2월 28일생.

1992년 영남대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1994년 영남대학교 대학원 졸업(공학석사)

1999년 영남대학교 대학원 졸업(공학박사)

1994년 - 현재 포항산업과학연구원 센서/계측팀 선임연구원

주관심분야 : 반도체 센서 및 시스템

남 태 철

『센서학회지 제1권 제1호』 논문 92-02, p.21 참조
현재 영남대학교 전기전자공학부 교수