

화합물 반도체 자기 센서

기술해설

Semiconductor Magnetic Field Sensors

차 준 호, 김 남 영

(Jun-Ho Cha and Nam-Young Kim)

Key Words (중요용어) : Semiconductor (반도체), Magnetic Field Sensors (자기센서), Hall Device (홀 소자), Hall IC (홀 IC), FET-Hall Sensor (FET 홀 센서), Magnetic Resistor Device (자기저항센서)

1. 서 론

반도체 산업의 발전은 반도체를 이용한 센서의 발전을 가져다 주었으며, 현재까지는 주로 실리콘을 이용한 반도체 센서가 주종을 이루어 왔다. 특히 단결정 실리콘 (single-crystalline silicon)이 보편적으로 반도체 센서의 재료로 사용되는데, 가격이 싸고 제조가 용이하며 센서의 재료로서 단 결정 실리콘을 대체할 수 있는 다결정 실리콘 (polycrystalline silicon) 및 비결정 실리콘 (amorphous silicon)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

* 또한 화합물 반도체 제조 기술의 발달 및 극소

공정 기술의 향상은 화합물 반도체 재료를 이용한 반도체 센서에 대한 연구 및 개발을 가능하게 하였다. 이러한 화합물 반도체 센서의 개발은 전반적인 센서시장에 매년 10~20%의 성장을 가져다주었다. 일반적으로 화합물 반도체 센서들은 다음과 같은 특성을 보여준다. 1) 광범위한 에너지 대역에 의한 적절한 감도 2) 센서로서의 정확도와 재생산 능력 3) 향상된 선형성 4) 광범위한 활동 영역 5) 간섭과 환경적 영향에 대하여 영향을 적게 받음 6) 안정도와 신뢰성 등을 나타낸다. 미세가공 기술 및 LSI 기술은 센서 크기의 최소화 및 대량화를 가능케 하였으며, 최소의 전력을 이용한 반도체 센서를 개발 할 수 있

표 1. 반도체 재료의 물리적 특성 및 센서에서의 적용

Table 1. Physical characteristics of semiconductor materials and applications to sensors.

물리적 측정	효과	적용
Radiation (방사,복사)	Photoresistive Effect (감광제 효과) Photointerface Effect (광계면 효과) Ionization Effect (이온화 영향) 광 캐퍼시터 영향	Photoresistor(광 레지스터) Photodiode(광전 다이오드) Phototransistor(광 트랜지스터) CCD Array and Matrix MIS and Schottky Diode Nuclear Radiation Sensor (핵복사 센서) Photocapitance(광콘덴서)
Mechanical Quantity (기계적 분량)	Piezoresistive (압전저항효과) Piezjunction (압전 결합) Piezotunnel effect (압전터널효과)	압전저항 파워 압력 센서 압전기 다이오드와 트랜지스터
Thermal Quantity (열적 분량)	Thermal Resistance(열적 저항) Thermojunction(열전접점) 효과 Thermoelectric(열전) 효과 Pyroelectric (초전기적) 효과	저항 온도 센서 온도 센서(다이오드,트랜지스터) Thermopile(열전쌍열,열전퇴) Pyroelectric(초 전기적) 센서
Magnetic Signals (자성적 신호들)	자기 저항 효과 Hall Effect(홀 영향) 자성적 접촉면 효과	자기 저항 센서 Hall Generator(홀 발전기) 자성다이오드 와 트랜지스터
Chemical Signals (화학적 신호들)	Charge-sensitive Field Effect	ISFET(ion-selective field-effect transistor)

도록 하였다. 본 논문에서는 반도체 재료의 물리적인 특성 및 적용에 대하여 일반적으로 서술하고, 반도체의 자성적인 효과를 이용한 센서와 화합물 반도체 재료를 이용한 자기센서(Magnetic Field Sensors : MFSs)에 대하여 논하고자 한다.

2. 반도체 센서의 물리적 특성 및 적용

일반적으로 반도체를 이용한 센서의 물리적인 특성 및 효과를 고려하여 센서에 사용되는 일반적인 범위를 표 1에 나타내었다.

3. 자기 센서

(Magnetic Field Sensors : MFSs)

자기 센서(Magnetic field sensors)는 자력을 전기적 신호로 변환하는 소자이다. 이러한 자기 센서에는 주로 두 가지의 응용되는 분야로 구분되어 있는데, 1) 자력계 성분으로서의 자기 센서에 직접적으로 사용된다. 예를 들어 지구 중력장의 측정과 자성 부호 인식 및 자성 도구의 감시 등에 이용되고, 2) 비자성 신호를 위한 정보 수송으로써의 기능을 간단하게 하는 자장에 간접적으로 사용된다. 예를 들어 거리와 각의 변화를 감지한다. 이러한 넓은 분야의 응용은 마이크로테슬라와 밀리테슬라 범위 이하로도 자장을 감지할 수 있게 해준다. 자기 센서는 비 접촉 감지가 가능하며, 긴 수명과 높은 신뢰성을 나타내며, 에너지 보존이 가능하고, 먼지 및 습도 등의 외부의 영향을 적게 받으며, 비교적 저렴한 가격을 갖추어야 한다. 자기 센서의 종류는 사용되는 물리 현상 또는 효과에 따라서 표 2와 같이 구분하여 나타낼 수 있다.

자기 센서의 특성 중에서 최근의 자동제어 및 LSI의 응용분야에서 가장 실용성이 높은 전류 자기 효과를 이용한 홀 소자, FET-홀 소자 및 자기저항 소자의 기본 특성과 이러한 소자에 사용되는 단일 반도체 및 화합물 반도체 재료에 대하여 논술하고자 한다.

3-1. 반도체 홀 소자 (Hall Device)

그림1은 반도체 홀 소자의 기본적인 구조를 보여주는데, 소자 자체는 일반적으로 4개의 리드로 고정되어 있다. 그림2는 반도체 홀 소자의 동작원리를 보여주고 있다. 반도체 기판에 전류 I 를 흐르게 하고 전류와 수직인 방향에서 자계 B 를 가한다. 전류 I 와 자계 B 방향 양쪽의 수직방향으로 전위차 V_H 가 생긴다. 이 전위차 V_H 를 홀 전압이라고 한다. 홀 전압은 전류와 자계의 곱에 비례하고, 소자의 두께 d 가 적을수록 크게되며, 반도체 재료의 전하이동도에도 비례한다. 따라서, 실제의 홀 소자는 단일 반도체보다는 전하이동도가 높은 화합물 반도체가 주로 홀 소자의 재료로 사용되어진다.

홀 소자의 감도를 나타내는 적감도(k_H)의 단위는 자속 밀도 1kG내 소자 전류 1mA당의 홀 전압을 mV로 나타낸 단위(mV/KG·mA)가 사용된다. 일반적으로 홀 전압과 적감도 k_H 상의 관계는 아래 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_H = k_H I B \tag{1}$$

형상 및 전압에 의해 영향받는 형상 효과 계수 f_H 를 홀 계수 k_H 로 나타내면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$k_H = f_H \cdot \frac{R_H}{d} \tag{2}$$

표 2. 자기 센서의 분류

Table 2. Classification of magnetic sensors.

현 상	종 류
자기 작용	리드릴레이
전자유도 작용	코일(서치코일), 자기헤드(코일형), 다동변압기, 자성박막형(아스테로이드 곡선형), 배주과 자기 변조기 (플럭스케이프형)
전류자기 효과	홀 소자(홀 IC)
자기이방성 (급속)	자기저항소자 (반도체, 강자성 금속박막) 위건트와이어
초전도 효과	SQUID(조셉슨 효과)
핵자기 공명	광 펄핑형, 플로트형
자기·빛	자이레이터(자기 버블드 메인)
자기·열	서모스터 온더 릴레이 (감은 페라이트)

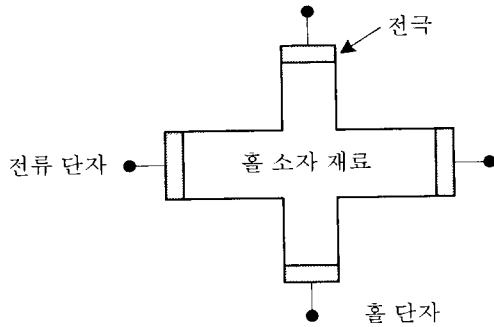


그림 1. 홀 소자의 기본 구조
Fig. 1. Basic structure of Hall device.

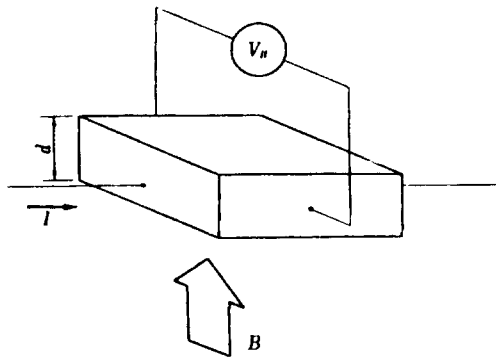


그림 2. 홀 소자의 기본 원리
Fig. 2. Basic principle of Hall device.

표 3은 홀 소자에 사용되어지는 단일반도체 및 화합물 반도체 재료의 특성을 보여준다. 홀 소자는 전자 이동도가 큰 GaAs, InAs, InSb 등의 III-V족 화합물 반도체가 주로 이용된다.

표 4에는 화합물 반도체를 이용한 홀 소자의 의존성, 강도, 홀전압의 온도 특성 등 홀 소자들의 특성 및 성능이 나와있다. 홀 소자의 성능은, 반도체 재료에 따라서 다르지만, 구동 방식에 따라서도 다르다. 예를 들면, 홀 소자의 홀전압이 정전류구동인 경우에는 반도체 기판의 전자밀도

에 주로 의존하며, 정전압구동인 경우에는 전자 이동도에 주로 의존한다. InSb는 다른 반도체와 비교해서 가장 좋은 전자 이동도를 가지고 있지만, 온도 의존성이 크고 저항률이 작다는 단점이 있다. 따라서 InSb 홀 소자는 저차계에서는 비교적 큰 홀 전압을 나타내지만, 고차계에서는 직선성이 나빠진다. 온도계수에 따라서 정전류 구동시에는 $-2.0 \%/^{\circ}\text{C}$, 정전압 구동시에는 $-0.2 \%/^{\circ}\text{C}$ 정도이다. InSb 홀 소자는 페라이트 소자를 끼고 실효적으로 감도를 높여서 사용하게 된다. InAs는 InSb보다 한 단계 낮은 전자 이동도를 갖고 있으며 홀 계수의 온도 의존성도 매우 낮다. GaAs는 에피택셜 성장 혹은 이온 주입법으로 두께를 수 $\Omega/\mu\text{m}$ 이하로 조정할 수 있으며 홀 계수의 온도 의존성이 매우 작아 고온에서의 사용이 용이하다. 따라서 GaAs 홀 소자는 홀 전압의 온도특성이나 직선성이 매우 높고, 정전류구동으로 사용한다. GaAs 홀 소자의 온도계수는 정전류구동시에는 $-0.06 \%/^{\circ}\text{C}$, 정전압 구동시에는 $-0.3 \%/^{\circ}\text{C}$ 이다.

자장 비례성은 기판 등에 의한 형상 효과 계수와 자기 포화의 자장 의존성이 크고, 홀 전압의 선형성을 나타낸다. 페라이트 기판을 이용한 InSb소자는 적감도는 커서 유리하지만, 자기 포화 때문에 1~1.5KG 이상에서 선형성을 상실한다. GaAs 와 InAs 소자는 10KG 이상의 강자계 내에서도 선형성이 유지된다. 이러한 홀 소자를 이용하여 근접 스위치, 회전계, 전류계, 위치 검출계 및 모터 제어계 등과 같은 계측용으로 널리 사용되고 있다.

3-2. 홀 IC

홀 IC는 실리콘 홀 소자와 신호 처리 회로를 모놀리식화 하는 방법으로 하나의 칩 위에 집적한 자기 센서(Magnetic field sensors)이다. 아래 그림 3은 선형 타입과 스위치 타입의 두 가지 타입으로 분류한 홀 IC의 특성을 보여 준다.

표 3. 홀 소자 재료의 특성
Table 3. Characteristics of Hall device materials

	금지대 폭 (eV)	전자이동도 ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$)	홀 계수 (cm^3/C)	저항률 ($\Omega \cdot \text{cm}$)
GaAs	1.40	8,500	6,250	0.78
InAs	0.36	33,000	115	0.005
InSb	0.17	78,000	380	0.005
Ge	0.66	3,900	4,250	1.2
Si	1.12	1,900	2,100	1.3

표 4. 화합물 반도체를 이용한 각종 홀 소자의 성능

Table 4. Hall devices by compound semiconductors.

항목 종류	입력 전류 I (mA)	무부하 홀전압 V_H (mV) $B=1\text{KG}$	입력 저항 $\gamma_1(\Omega)$	출력 저항 $\gamma_2(\Omega)$	적감도 k_H (mV / mA · KG)	불평형 전압 V_m (mV)	V_H 의 온도계수 β (%/°C)	γ_1 과 γ_2 의 온도계수 α (%/°C)
InAs	100	8.5	약 3	약 1.5	0.085	<0.5	약 -0.1	약 0.2
	400	30	약 1.4	약 1.1	0.075	<1	약 -0.07	약 0.2
InSb	5	250-550	240-550	240-550	50-110	10	-1.0 -1.3	-1.0 -1.3
	10	80-300	10-30	10-30	8-30	10	-2.0 (최대)	-2.0 (최대)
GaAs	5	15-110	200-850	200-850	3-22	V_H 의 20% 이내	-0.05	0.5
	5	14-100	150-600	150-600	2.8-20	V_H 의 20%	-0.06	-
GaAs*	1	10-30	450-900	450-900	10-30	V_H 의 20%	-0.06	-
	3-8	75-150	500-1000	5000	20	-	-0.06이하	-

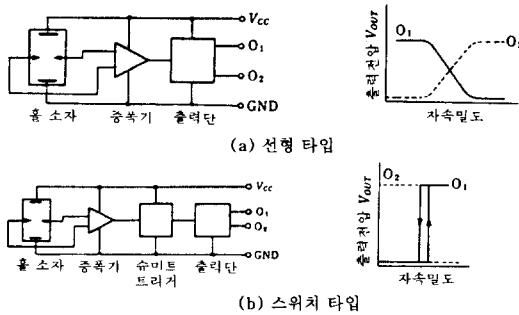


그림 3. 선형 타입과 스위치 타입

Fig. 3. Linear type and switch type.

선형 타입은 홀 소자와 같이 홀 전압을 증폭해서 100 G 정도의 자장에서 수 V의 전압이 생기고, 홀 소자와 비교해 볼 때 비평형 전압이 높고, 자계 측정 범위가 수 kG까지로 좁혀지고 자계 비례성이 좋지 않은 등의 단점에도 불구하고 출력 전압이 높고 회로가 간단하기 때문에 많이 상용화되고 있다. 스위치 타입은 회로 내에 슈미트 트리거 회로를 포함하고 있어서 자장의 크기를 감지한 후 ON-OFF로 동작하는 것이다. 홀 IC는 선형 타입이 홀 모터와 전류계 등에 사용되고, 스위치 타입은 무접점 스위치 등에 이용된다. 요즘에는 전력을 감소시키기 위해 소비 전력이 적은 MOS 홀 IC의 연구와 개발에도 노력하고 있다.

3-3. FET-Hall Sensors

MOSFET 구조는 Hall 센서로써 사용될 수 있

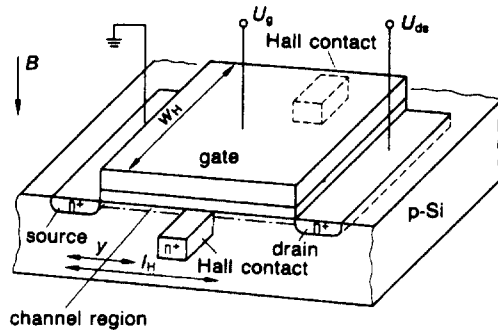


그림 4. n-MOSFET 홀 소자의 기본 구조

Fig. 4. Basic structure of n-MOSFET Hall device.

다. 그림 4는 그러한 센서의 구조를 보여준다. 소스와 드레인 사이의 채널 면적은 Hall 요소로써 작용한다. 이 채널의 깊이는 게이트 전압이나

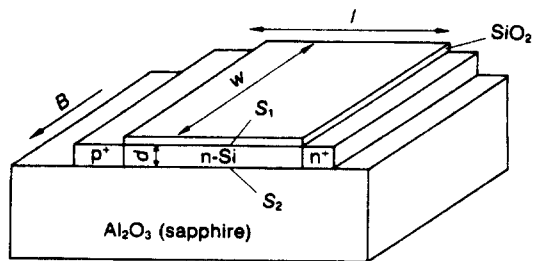


그림 5. Silicon-on-sapphire(SOS) 자기 소자의 기본 구조

Fig. 5. Basic structure of SOS magnetic device.

드레인-소스 전압의 사용에 따라 다양할 수 있다.

Magnetoconcentration effect는 특별한 구조에서 사용될 수 있다.(그림 5) 정공과 전자들은 p+와 n+지역으로부터 low doped n지역으로 주입된다. Si-SiO₂ 접합 면에서 재결합 속도는 베이스보다 낮다.

4. 자기 저항 소자

4-1. 반도체 자기 저항 소자

반도체의 자기 저항 효과는 반도체에 자계를 인가한 후 홀 효과에 의해 전계의 생성과 함께 로렌츠 힘에 의해 전자의 경로가 길어져 소자의 저항 변화가 생기는 효과이다. 자기저항소자의 일반적인 동작원리를 그림 6에서 보여주고 있다. 강자성 금속에서는 전류와 가해진 자계의 방향이 평행일 때 최대가 되고, 직교했을 때는 최소가 된다. 따라서 자기저항효과를 가진 강자성 금속 2개를 직각으로 배치하여 자계 B의 회전각 θ 에 대하여 차동적으로 출력 V_s 를 나타내게 한다.

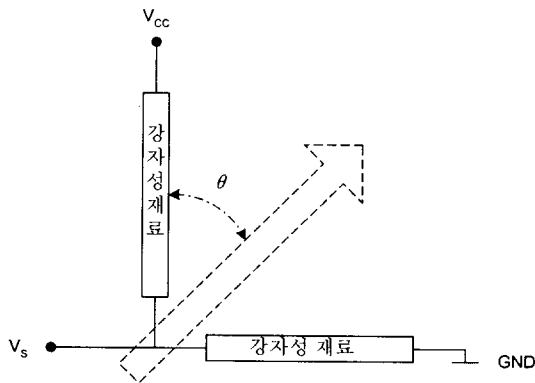


그림 6. 자기 저항 소자의 특성

Fig. 6. Operational principle of magnetic register device.

현재 InSb와 InSb-NiSb의 두 가지 형태의 반도체가 반도체 자기 저항 소자로써 상용화되고 있다. InSb는 5~10 μm 의 벌크 단결정으로 경계 전극을 형성할 수 있고 InSb-NiSb는 InSb의 안에 금속 칩을 석출하여 경계 전극을 대치한 효과를 얻는 구조이다. 아래 그림 7에서 저자계의 범위에서 $R=R_0(1+kB^2)$ 으로 표현되고 고자계의 범위에서 즉 1.5kG 이상인 소자의 저항 $R=R'(1+kB)$ 단, R' : $B=1.5\text{kG}$ 의 저항값, k 는 계

수로 표현되는 자기 저항 특성을 보여준다.

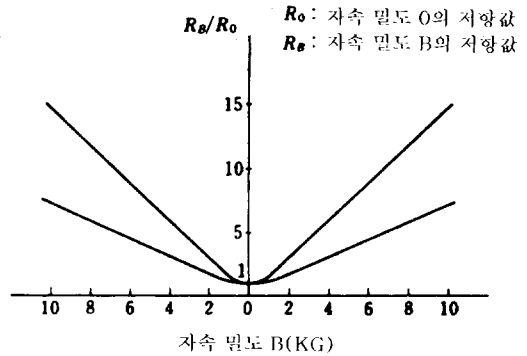


그림 7. 자기 저항 소자의 특성

Fig. 7. Characteristics of magnetic register device.

자기저항소자는 자계의 회전을 검출할 수 있기 때문에 주로 회전계, 위치 검출, 테이프 엔드 검출 등에 이용되며, 다극 마그넷을 이용하여 디지털 스케일, 회전 위치제어 등에도 이용되어 진다.

5. 결 론

지금까지 반도체 재료가 갖는 자기효과를 이용하여 자기 센서의 종류 및 특성 등에 대하여 서술하였다. 반도체 LSI의 응용분야가 확대됨에 따라서 반도체 센서를 이용한 극소형화, 고성능화, 저가격화, 다기능화 등이 가능하게 되었다. 이러한 상황에서 반도체를 이용한 홀 소자나 자기저항 소자와 같은 자기센서 등을 주변회로와 일체화시킨 초소형 시스템에 대한 연구가 활발하다. 특히 화합물 반도체는 자기 센서에 적합한 물리적인 특성을 갖고 있기 때문에, 자기 센서로 효율을 나타내고 있다. 반도체의 미세가공기술의 발전과 LSI 제조 기술의 발전을 이용하여 센서의 집적화, 저가격화를 가능하게 하였으며, 다른 종류의 반도체 센서들을 자기 센서와 함께 하나의 칩위에 장착할 수 있는 응용집적센서(Application-specific Integrated Sensors)가 더욱 중요한 역할을 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Peper Hauptmann, "Sensors (Principles & Application)", Prentice Hall, Pub., 1993.
2. Ian R. Sinclair, "Sensors and Transducers"

- Newnes Pub., 1991.
3. James C. S., "Silicon Temperature Measurement by Infrared Absorption : Fundamental Processes and Doping Effects", IEEE Transaction on Electron Devices, Vol.39, No.1, 1992.
 4. Sheng-Beng Hwang, Y. K. Fang, Kuin-Hui Chen, Ching-Ru Liu, Jun-Dar Hwang, and Min-Hong Chou, "An a-Si:H/a-Si, Ge:H Bulk Barrier Phototransistor with a-SiC:H Barrier Enhancement Layer for High-Gain IR Optical Detector", IEEE Transaction on Electron Devices, Vol. 40, No.4, 1993.
 5. Durgamadhab Misra and Bingda Wang, "Elimination of Cross Sensitivity in a Three-Dimensional Magnetic Sensors", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.41, No.4, 1994.

저자소개



차준호

1969년 7월 18일생. 1990년 2월 광운대학교 전자공학과 입학. 1996년 2월 동대학 졸업. 현재 반도체 소자 및 VLSI 설계 연구소의 연구원.



김남영

1960년 11월 14일생. 1987년 2월 광운대 전자공학과 졸업. 1991년 2월 뉴욕 주립대학(SUNY at Buffalo) 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1994년 2월 동 대학원 전자공학과 졸업(공박사). 1994년 8월까지 뉴욕 주립대학교내 CEEM 연구소 연구원. 현재 광운대학교 전자공학과 조교수.