한국전기전자재료학회
'00 영호남 학술대회논문집

고온용 실리콘 홀 센서의 제작

Fabrication of a Silicon Hall Sensor for High-temperature Applications

정 귀 상*, 류 지 구**
(Gwiy-Sang Chung*, Ji-Goo Ryu**)

ABSTRACT

This paper describes on the temperature characteristics of a SDB(silicon-wafer direct bonding) SOI(silicon-on-insulator) Hall sensor. Using the buried oxide SiO_2 as a dielectrical isolation layer, a SDB SOI Hall sensor without pn junction isolation has been fabricated on the $Si/SiO_2/Si$ structure. The Hall voltage and the sensitivity of the implemented SOI Hall sensor show good linearity with respect to the applied magnetic flux density and supplied current. In the temperature range of 25 to 300℃, the shifts of TCO(temperature coefficient of the offset voltage) and TCS(temperature coefficient of the product sensitivity) are less than $\pm 6.7\times10^{-3}$/℃ and $\pm 8.2\times10^{-4}$/℃, respectively. These results indicate that the SDB SOI structure has potential for the development of a silicon Hall sensor with a high-sensitivity and high-temperature operation.

Key words(중요용어) : Hall sensor(홀 센서), SOI(에스오아이), SDB(실리콘기판 직접접합), TCO(옵셋 전압의 온도계수), TCS(적감도의 온도계수)

1. 서 론

자연계의 수 많은 물리량 중에서 자장의 양을 전기적 신호로 변화시켜 자장의 양을 감지하는 자기센서는 자기데이프의 판독, 지자기의 측정, 패턴 인식, 비접촉 스위치, 브려시레스 모터, 변위 및 각도 측정, 전류량 측정, 적산 전력계 등의 FA, OA, HA, 의료, 자동차, 항공기 및 가전 제품 등의 자동화, 고기능화 그리고 고성능화시키는데 절대적으로 필요한 전자변환 소자이다. 이러한 자기량의 변환소자로는 홀 센서, 자기저항 소자, 자기트랜지스터, 홀 IC, 초전도 양자간섭 소자(SQUID) 등이 있다. 이중에서도 홀 효과 및 자기저항 효과를 이용한 자기센서가 활발히 연구개발되고 있다. 특히, 홀 이동도가 큰 GaAs, InSb와 같은 화합물 반도체를 이용한 홀 센서는 현재 상용화되고 있다.[1] 그러나, Si 홀 센서는 자기감도는 낮지만, 반도체 제조공정기술의 발달로 대량생산에 의한 저가격화와 동일 기판위에 감지부와 신호처리회로의 집적화[2]가 가능하며 더구나, 마이크로머시닝기술에 의한 3차원 자기센서[3]도 제작할 수 있기 때문에 활발히 연구개발되고 있다.

최근에 고온 혹은 극저온, 부식성 기체 및 액체, 방사선 분위기 등의 극한 환경속에서 사용가능한 소형, 경량, 다기능, 고감도, 저가격 그리고 신호처리 회로까지도 집적화할 수 있는 Si 홀 센서가 절실히 요구되고 있다. 현 반도체 제조공정기술로 제작된 Si 홀 센서는 일반적으로 pn접합에 의한 접합분리(junction isolation)를 이용하므로 pn접합의 누설전류 및 soft error 때문에 120℃ 이상의 고온 그리고 방사선 분위기에서는 특성이 급격히 악화된다. 소수캐리어 배제효과(minority carrier exclusion effect)를 이용한 300℃ 이상의 고온에서도 사용가능한 Si 홀 센서[4]에 관한 연구가 진행되고 있지만, 적감도가 10V/AT 정도로 대단히 낮아 실용화에 많은 문제점이 남아 있다. 최근, SOI(silicon-on-insulator)구조를

*동서대학교 정보통신공학부
(부산시 사상구 주례동 산69-1, FAX: 051-320-2122, E-mail:gschung@dongseo.ac.kr)
**부경대학교 전자공학과

이용한 유전체분리(dielecric isolation)기술은 현 Si 소자의 고집적화, 고속화, 고내압화 및 내방사선화를 위한 가장 유력한 기술로 활발히 연구개발되고 있다.[5]

SOI구조의 형성기술 중에서, SiO_2가 형성된 두장의 Si기판을 직접접합하여 한면의 Si기판을 기계적 연마로 박막화하는 방법인 직접접합(SDB : silicon-wafer direct bonding)기술은 벌크 Si과 거의 동등한 결정질을 갖는 대면적의 SOI기판을 간단히 제조할 수 있을 뿐만 아니라 마이크로머시닝기술을 이용하여 미세구조물 제작이 용이하기 때문에 SOI소자, 3차원 IC 그리고 마이크로센서, 마이크로액츄에이터, 마이크로시스템 등의 개발에 가장 적당한 SOI구조 형성기술로 최근에 크게 주목받고 있다.[6-8] 특히, 저자는 결정성과 절연 특성이 우수한 SDB SOI 구조를 이용하여 250℃ 이상의 고온에서도 사용가능한 압저항형 반도체 압력센서[9]와 pn접합분리보다도 적감도가 3배이상 큰 홀 센서[10]에 관하여 보고하였다.

본 논문에서는 SOI구조와 유전체 분리기술을 이용하여 제작된[10] SDB SOI 홀 센서의 온도에 대한 오프셋 전압, 홀 전압 및 적감도 등의 특성을 분석·평가하여 고온에서의 사용가능성을 살펴보았다.

2. 제조 공정

그림 1은 SDB SOI 홀 센서의 제작공정 순서도를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 p형, 2~4 Ω·㎝, (100) 그리고 두께가 3,000~4,000Å인 SDB SOI기판을 사용하였다. 먼저, SOI구조 형성시 연마, 식각, 폴리싱시 분말 혹은 왁스 등에 의해서 생길 수 있는 유기물, 산화물, 금속 및 이온 불순물 등을 제거하기 위해 초기 세척했다.

그 다음, n 및 n^+ 영역을 형성하기 위해 인을 이온주입하였다. n영역에 대해선 인가 에너지가 180 *KeV*이고 유입된 불순물 양은 5×10^{12}/㎠이다. 마스크 #1을 사용하여 n^+ 전극 패턴을 형성한 후, 30 *KeV* 인가 에너지로 불순물 양이 3×10^{15}/㎠인 n^+ 영역을 형성하였다. 다음에 900℃에서 30분간 열처리하였다. 마스크 #2를 사용하여 전극접촉창을 연후, 증착기를 사용하여 알루미늄을 증착시켰다.

그 다음, 마스크 #3을 사용하여 전극 패턴을 형성, 마지막으로 옴익접촉을 위해서 450℃에서 30분간 열처리했다. 그림 2는 이와 같은 공정으로 제작한 SDB SOI 홀 센서의 단면도를 도식적으로 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

이상과 같은 공정으로 제작된 SOI 홀 센서의 특성을 평가하기 위해 알루미나 팻키지에 고정시키고 소자와 알루미나 팻키지사이를 은 도선으로 초음파 본딩하였다. 구동전류는 정전류 공급장치로 공급하고 자계는 가우스 메터로 측정하였다.

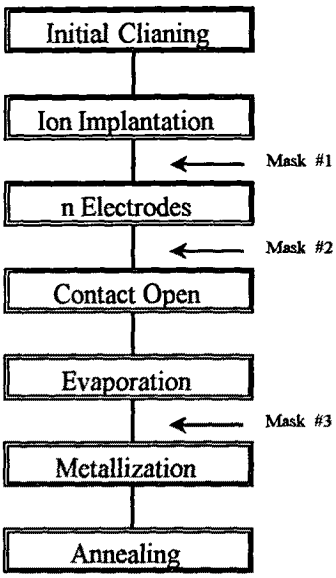

Fig. 1. Fabrication process flow chart of the SDB SOI Hall sensor.

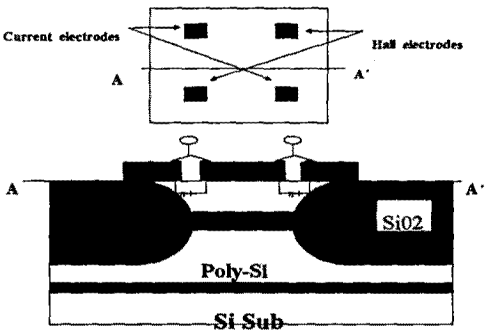

Fig. 2. A cross-sectional view of the fabricated SDB SOI Hall sensor.

그림 3는 무자계시 공급전류를 0에서 0.3 ㎃까지 변화시키면서 측정한 SDB SOI 홀 센서의 옵셋트 전압의 변화를 나타낸 것이다. 옵셋트 전압 V_o는 공급전류 $I_{sup.}$에 비례하면서 증가하는데 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o = R_E I_{sup.}$$

여기서, R_E는 소자 제조시 마스크의 비정합에 의한 기하학적 오차와 팻키징 등에 의한 압저항 효과에 의해서 발생되는 등가 저항이다.[11] 홀 센서는 자기감도가 높고 옵셋트 전압이 작은 것이 바람직하다. 그러나, 제조공정, 온도 및 aging 등에 따라 R_E가 변화함으로 옵셋트 전압의 정확한 예측은 어렵다.

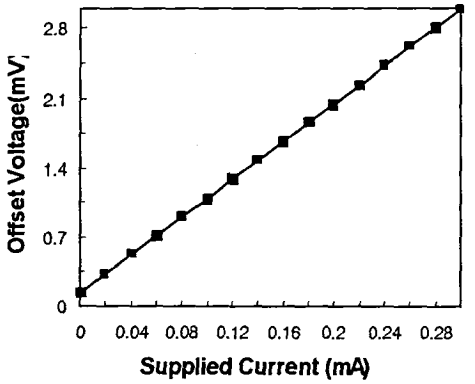

Fig. 3. Variation of offset voltage with supplied current under no magnetic flux density for the fabricated SDB SOI Hall sensor.[10]

그림 4는 제작된 SDB SOI 홀 센서의 자계에 따른 홀 전압 V_H의 변화를 나타낸 것이다. 일정한 전류하에서 인가 자속밀도 B를 0에서 1 KG까지 변화시키면서 측정한 결과 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 한편, 공급전류를 0에서 0.08 ㎃까지 변화시킨 경우에도 각각의 홀 전압은 선형적으로 증가했다. 따라서, 제작한 SDB SOI 홀 센서의 홀 전압은 자계 및 공급전류의 변화에 대해 우수한 선형 응답특성을 나타냈다. 홀 센서의 홀 전압은 다음과 같이 주어진다.[12]

$$V_H = G(\mu_n IB)/\sigma_n t$$

여기서, G는 공급전극과 홀 전극의 단락회로 효과를 나타내는 기하학적 수정계수이며, μ_n는 전자의 홀 이동도, σ_n은 전자의 도전율 그리고 t는 전류경로의 두께이다. 따라서, 홀 전압은 이동도에 비례하고 전류경로의 두께에 반비례한다. 그러므로 가능한 이동도가 크고 전류경로의 두께가 얇게 하는 것이 바람직하다. 일반적으로 pn접합분리를 이용하는 경우, 전류경로의 두께는 10 μm 이상인데 비해, 본 연구에서 제작된 SDB SOI 홀 센서는 3,000Å으로 약 1/33배 정도 얇다. 한편, 3,000Å 두께의 SDB SOI기판상에 제작된 MOSFET의 전자 이동도는 857 $cm^2/V \cdot s$으로 벌크 Si에 비해 30% 이상 증가한다.[9] 이것은 박막 SOI 소자는 완전 공핍화로 인해 소자의 이동도가 증가하는 SOI구조의 큰 장점이라 할 수 있다. 따라서, 제작된 SDB SOI 홀 센서의 적감도는 평균 $600V/A \cdot T$으로 pn접합형보다도 3배 이상 증가했으며 pn접합분리보다도 큰 출력을 얻을 수 있음을 알 수 있다.[10]

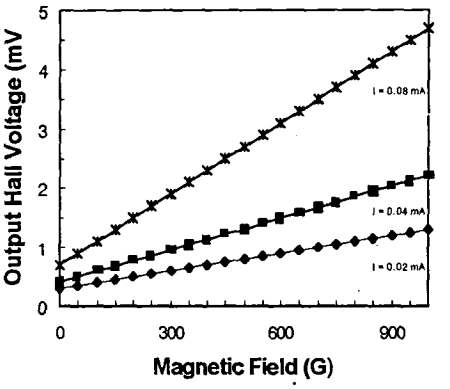

Fig. 4. Variations of Hall voltage with magnetic flux density under constant supplied current for the fabricated SDB SOI Hall sensor.

Si에 있어서 온도에 따른 금지대 폭의 변화를 무시할 경우, 일반적으로 누설전류[14]는 다음과 같이 주어진다.

$$I_j = AJ_{so}(T/300)^a \exp[Eg/nk\,(1/300 - 1/T)]$$

여기서 J_{so}는 실온에서의 단위 면적당 접합 누설전류의 크기, A는 확산층의 면적, k는 볼쯔만 상수, a과 n는 각각 1.5~3 그리고 1~2인 상수이다. 따라서, 누설전류는 온도에 따라 지수 함수적으로 증가함을 알 수 있다. pn접합분리기술에 의해 제작된 경우, 120℃ 전후에서 누설전류가 급격하게 증가하며 이결과는 이론적인 예상치와 잘 일치한다. 결과적으로 pn접합분리에 의해 제작된 소자는 누설전류의 영향

때문에 온도 특성이 크게 악화됨을 알 수 있다. 한편 유전체분리에 의해 제작된 경우, 200℃ 이상에서 누설전류가 약간씩 증가하지만 300℃까지는 무난하므로 유전체분리에 의한 분리기술은 고온용 소자 개발에 대단히 유용함을 알 수 있다.

그림 5는 공급전류가 0.06 ㎃, 25~300℃의 온도 범위에서 온도 변화에 따른 제작된 SDB SOI 홀 센서의 옵셋트 전압 변화를 나타낸 것이다. 홀 옵셋트 전압은 100℃까지는 증가하다가 그 이상의 온도에서는 감소하는 경향을 보였다. 옵셋트 전압이 증가하는 현상은 홀 센서의 비대칭성 저항 R_E의 온도효과에 의한 결과이며, R_E는 다음과 같이 주어진다.

$$R_E = \overline{\overline{G}}_E R_O$$

여기서 G_E는 소자의 기하학적 형상의 비대칭 정도를 나타내는 계수, R_O은 소자의 내부 저항이다.

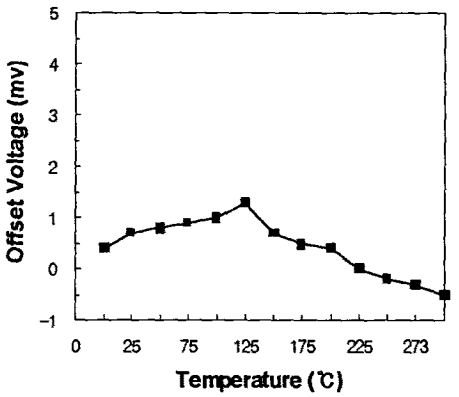

Fig. 5. Variation of offset voltage with temperature for the fabricated SDB SOI Hall sensor.

한편, 옵셋트 전압의 온도 계수 TCO(temperature coefficient of the offset Voltage)는 다음과 같이 주어진다.

$$TCO = [1/O_T(T=25℃)]\{[O_T(T_2-T_1)]/(T_2-T_1)\}$$
$$= G_E I_{sup}(\partial R_O/\partial T)$$

25~300℃의 온도 범위에서 제작된 SDB SOI 홀 센서의 TCO는 $\pm 6.7\times10^{-3}$/℃로서 비교적 작다. 따라서, 옵셋트 전압은 내부 저항의 온도에 의존함을 알 수 있으며 저온에서는 소자의 R_E의 온도 의존성 효과가 지배적이지만 온도가 상승함에 따라 이동도의 산란으로 상대적으로 감소함을 알 수 있다.[14]

그림 6은 제작된 SDB SOI 홀 센서의 각 온도에서자장에 대한 출력 홀 전압의 변화를 나타낸 것이다. 일정한 온도하에서 자속밀도의 변화에 따른 홀 전압은 고온에서도 선형성이 유지됨을 알 수 있다.

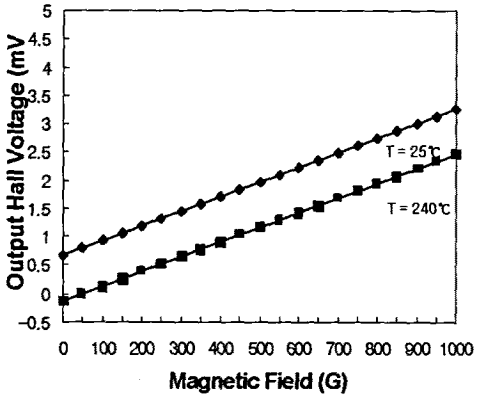

Fig. 6. Variations of Hall voltage with magnetic field under constant temperature for the fabricated SDB SOI Hall sensor.

그림 7은 제작된 SDB SOI 홀 센서의 온도에 따른 적감도의 변화를 나타낸 것이다. 일반적으로 적감도의 온도 계수 TCS(temperature coefficient of the product sensitivity)은 다음과 같이 주어진다.

$$TCS = [1/S_H(T=25℃)]\{[S_H(T_2-T_1)]/(T_2-T_1)\}$$

여기서 T는 측정온도이다. 25~300℃의 온도 범위에서 제조된 홀 센서의 TCS는 $\pm 8.2\times10^{-4}$/℃로서 일

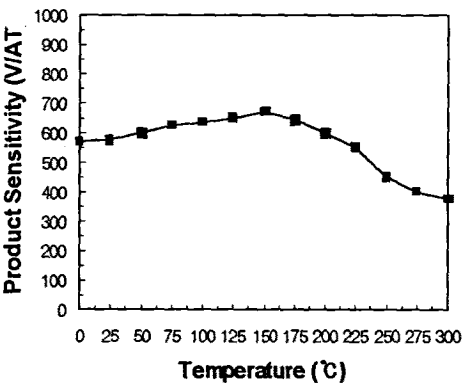

Fig. 7. Variation of product sensitivity with temperature of the fabricated SDB SOI Hall sensor.

반적인 pn접합분리기술로 제작된 경우의 10^{-3}/℃에 비해 상대적으로 작다. 25~150℃의 온도 범위에서 온도에 따른 이동도의 증가 때문에 TCS는 온도에 따라 거의 선형적으로 증가한다. 그러나 그 이상의 온도에서는 누설 전류, 즉 산란 현상에 의해서 TCS는 감소한다.[14] 일반적으로 pn접합분리기술을 이용한 경우는 사용가능 온도가 120℃이지만, 본 유전체 분리기술을 이용한 SDB SOI 홀 센서는 300℃의 고온에서도 사용할 수 있다. 따라서, 제작된 SDB SOI 홀 센서는 소자의 활성 두께가 얇으며 완벽한 분리가 가능하기 때문에 고온용 고감도 홀 센서로서 적당하다.

4. 결 론

고온 혹은 극저온, 부식성 기체 및 액체, 방사선 분위기 등의 환경속에서 사용가능한 고감도, 소형, 경량, 다기능, 저가격 그리고 신호처리 회로까지 집적화가 가능한 고성능 Si 홀 센서를 개발하기 위해 SDB기술에 의해 제조된 SOI기판 위에 홀 센서를 제작하여 특성을 분석·평가하였다. 제작된 SDB SOI 홀 센서의 적감도는 600 $V/A \cdot T$으로 벌크 Si보다 3배 이상 증가했으며 우수한 선형 응답특성을 나타냈다. 또한, 25~300℃의 온도 범위에서 제작된 SDB SOI 홀 센서의 출력 전압은 인가 전류 및 자속밀도에 따라 선형적으로 변화했다. 더구나, 옵셋트 전압 및 적감도의 온도에 따른 변화율이 일반적인 pn접합분리기술을 이용하는 경우 보다도 훨씬 작기 때문에 고온용 고감도 Si 홀 센서로서 대단히 유효하게 응용될 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] A. Nathan, H. P. Baltes, R. Castagnetti, Y. Suggiyama and D. R. Briglio, "Low-frequency noise in modulation-doped AlAs/GaAssuper-lattice dual-drain magnetic sensors", *Sensors & Actuators* A, vol. 21, pp. 776-779, 1990.

[2] T. Nakamura and K. Maenaka, "Integrated magnetic snesors", *Sensors & Actuators* A, vol. 21, pp. 762-769, 1990.

[3] S. Kawahito, S. O. Choi, M. Ishida and T. Nakamura, "MOS Hall elements with three-dimensional microstructure", *Dig. of the 7th Int. on Solid-State Sensors & Actuators*, pp. 892-895, 1993.

[4] S. R. Hout and S. Middelhoek, "High temperature silicon Hall sensor, *Sensors & Actuators* A, vol. 37, pp. 26-32, 1993.

[5] G. S. Chung, "Thin SOI structures for sensing and integrated circuit application", *Sensors & Actuators* A, vol. 39, pp. 241-251, 1993.

[6] M. Huff, M. Mettner, T. Lober and M. Schmidt, "A pressure-balanced electrostatically -actuated microvalve", *IEEE Solid-State Sensors & Actuators Workshop*, pp. 123-127, 1990.

[7] P. Barth, F. Pourahmadi, R. Mayer and J. Poydock, "A monolithic silicon accelerometer with integral air damping and overrange protection", *IEEE Solid-State Sensors & Actuators Workshop*, pp. 35-38, 1988.

[8] S. Bengtsson, "Semiconductor wafer bonding : a reviw of interfacial properties and application", *J. Electronic Materials*, vol. 21, pp. 241-251, 1992.

[9] G. S. Chung, S. Kawahito, M. Ishida, M. Kawashima and T. Nakamura, "Application of Si-wafer direct bonding to high-temperature integrated pressure sensors", *Sensors & Materials*, vol. 3, no. 2, pp. 61-74, 1991.

[10] G. S. Chung,, "Fabrication of a SOI Hall sensor using Si-wafer direct bonding technology and its characteristics, *J. KIEEME*, vol. 8. no. 2, pp. 165-170, 1995.

[11] J. M. V. D. Boom and S. Kordic, "Offset reduction in Hall plates : simulation and experiments", *Sensors & Actuators A*, vol. 18, pp. 179-193, 1989

[12] S. Middelhoke and S. A. Audet, "Silicon sensors", *Academic Press.*, 1989.

[13] B. Diem, R. Truch, S. V. Bosson and G. Delapierre, "SIMOX : a technology for high-temperature silicon sensors", *Sensors & Actuators* A, vol. 21, pp. 1003-1006, 1990.

[14] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor devices" *John Wiley & Sons, New York*, 1981.