

금을 도우핑한 이중 주입 자기 센서

민 남 기* 이 성 제** H.T.Henderson***
 *고려대학교 **대림전문대학 ***University of Cincinnati

Gold-Doped Double Injection Magnetic Sensor

Nam Ki Min* Seong Jae Lee** H.T.Henderson***
 *Korea University **Dae Lim College ***University of Cincinnati

Abstract - This paper reports some results of an experimental investigation of planar double injection magnetic sensors. The threshold voltage proved to be very sensitive to an applied magnetic field. The magnitude and direction of the threshold voltage variation depends on the field strength and its orientation with respect to the conduction channel. The positively-directed field pushes the carriers into the bulk causing an increase in the threshold voltage. These results seem to agree with a path modulation due to Lorentz force. The application of a negative field causes a negative variation, which is dependent on the surface recombination velocity of the silicon-SiO₂ interface.

본 논문에서는 실리콘에 깊은 불순물인 금을 도우핑하여 고저항 영역을 형성한 p-i-n 다이오드를 제작하였고, 그 스위칭 전압이 인가 자계에 따라 변하는 것을 이용하여 자계의 세기를 검출하는 실리콘 마이크로 자기 센서를 개발하였다. 본 센서는 종래의 p-i-n magnetodiode와 구조는 동일하나 센싱 방식에 있어서 는 전혀 다른 자기 센서이다.

2. (DI) 자기센서의 원리

그림 1은 금을 도우핑한 이중 주입 자기센서의 기본 구조를 나타낸 것이다. 실리콘에서 금은 에너지 갭의 중간 부근에(E_{Au}=0.54eV) 역셉터 준위를 형성하며, 이것의 일부는 shallow donor가 제공하는 전자에 의해 보상되어 금을 도우핑한 영역은 고저항(i-영역)으로 된다. 부로 대전된 금 역셉터는 정공에 대해 매우 큰 포획 단면적을 가지는 반면, 중성 상태의 역셉터에 의한 전자의 포획 단면적은 매우 작으므로, 열평형 상태에서 전자의 수명은 정공의 수명보다 훨씬 크다.

1. 서론

최근 고도로 발전된 집적회로 기술을 이용하여 여러 종류의 마이크로 자기센서가 제안되고 있다. 실리콘 마이크로 자기센서는 권선을 이용한 종래의 자기센서에 비해 공간 분해능이 높으며, batch process를 적용할 수 있기 때문에 저가격화가 가능하고 안정된 특성을 가지며, 또한 센싱 소자와 주변회로란 하나의 칩에 집적하여 스마트화할 수 있는 등 본질적으로 우수한 특성을 갖는다. 이에 따라 magnetodiode, MOS Hall device, magnetotransistor등과 같은 상당히 많은 집적화 자기 센서의 개발이 진행되고 있다.[1-3]

이중 magnetodiode는 구조가 매우 간단하여 자계에 민감한 센서를 쉽게 실현할 수 있다. magnetodiode 효과는 p-i-n 구조에서 캐리어의 이중주입효과[4-5]와 인가자계의 상호작용에 의해서 발생한다. 그러나 종래의 p-i-n 다이오드 자기센서에서는 이중주입시 발생하는 공간전하전류의 표면 재결합속도 의존성을 이용하기 때문에 다이오드의 양면에서 표면 재결합 속도가 극단적으로 서로 다른 p-i-n 구조를 제작하는 것이 매우 어렵다.

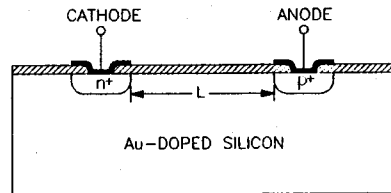


그림 1 이중 주입 자기 센서의 구조
 Fig. 1 Cross section of double injection magnetic sensor

지금 그림 1의 소자에 순방향 바이어스를 인가하면, 음극과 양극으로부터 각각 전자와 정공이 i-영역에 주입되어 소자에는 전류가 흐르기 시작하고, 인가전압이 증가함에 따라 이론적으로는 그림 2와 같은 전류(I)-전압(V)특성이 얻어진다.

3. 소자 제작 및 특성 측정

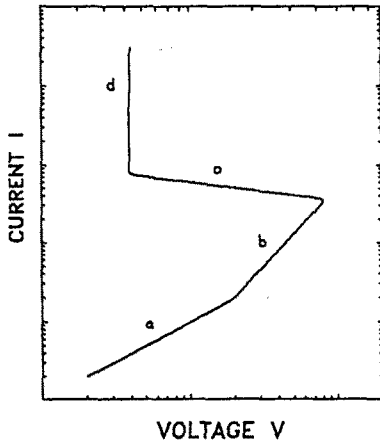


그림 2 이중 주입 자기 센서의 전류-전압 특성
Fig. 2 I-V characteristic of double magnetic sensor

저전압에서는 i-영역에 주입된 정공의 대부분이 금 영역센터에 의해 포획되어 채널내부로 진행하지 못하기 때문에 소자에는 주입전자가 지배하는 공간전하제한전류(b 영역)가 흐르게 된다. 인가 전압이 증가하면 주입 정공의 농도와 그 수명도 증가하기 시작하고, 주입정공이 채널을 통과하여 음극에 도달하는 시점에서 소자는 Off 상태(a,b 영역)에서 On 상태(d 영역)로 스위칭한다. 이때, 스위칭 전압은 다음식으로 된다.[4-5]

$$V_{Th} = kL^2 \quad (1)$$

여기서, k는 비례계수, L은 채널길이이다. 스위칭 전압은 채널길이의 자승에 비례한다.

지금 Off 상태(b 영역)로 바이어스되어 있는 p-i-n 소자에 채널방향과 수직으로 자계를 인가하면 채널영역에 주입된 carrier는 다음과 같은 Lorentz 힘을 받는다.

$$F = eE + e [v \times B] \quad (2)$$

여기서, $e = -1.602 \times 10^{-19}$ [C] (전자에 대해)
 $= 1.602 \times 10^{-19}$ [C] (정공에 대해)
 E = 전기장의 세기 v = 캐리어 속도
 B = 자속밀도

이 힘에 의해서, 채널내를 이동하는 소자는 자계의 방향에 따라 소자 표면으로 밀려든다 또는 반대로 소자 내부로 밀려지든가 하여, 캐리어 이동경로가 감소하거나 증가한다. 그러므로 자계의 인가는 등가적으로 채널 길이 L의 변화와 같다고 볼 수 있으며, 이중 주입 자기 센서의 전류(I)-전압(V) 특성, 특히 식 (1)에 따라 스위칭 전압이 크게 변화할 것이 예상된다. 이와 같이 본문에서 제시하는 자기 센서에서는 스위칭 전압의 자계 의존성을 이용하여 자계의 세기를 검출한다.

소자는 비저항이 10-15 $\Omega \cdot \text{cm}$ 인 n형 (100) Si 웨이퍼에 제작하였다. 양극은 BN 웨이퍼를 사용해 보론(B)를 975 $^{\circ}\text{C}$ 에서, 음극은 POCl_3 소오스를 사용해 인(P)를 1100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 열화산에 의해 형성하였다. 금을 확산하기 위해서, 소자 웨이퍼와 동일한 비저항과 크기를 갖는 웨이퍼위에 금 실리카 필름을 코우팅하여 소오스 웨이퍼를 만든 후, 이 소오스 웨이퍼와 소자 웨이퍼를 1 mm 간격으로 보오트에 로딩하여 1000 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1 시간 동안 금을 확산하였다. 금 확산후 측정된 웨이퍼의 비저항은 5~6 kohm-cm 로 증가하였다. 완성된 각 칩은 flat-pack에 부착한 후, gold-wire bonder로 본딩하였다. 제작된 소자의 채널 길이 L은 75 μm , 채널 폭은 100 μm 이다.

제작된 센서를 Bruker B-E 15B8 자석에 그림 3과 같이 설치하였다. 자계의 값은 FW Beel 610 Gauss-meter를 사용해 측정하였다.

자계의 방향이 소자의 면에 수평이 됨과 동시에 채널에 흐르는 전류밀도와 수직인 방향으로 인가한 후, curve tracer를 사용하여 자계의 세기에 따른 소자의 스위칭 전압 변화를 측정하였다.

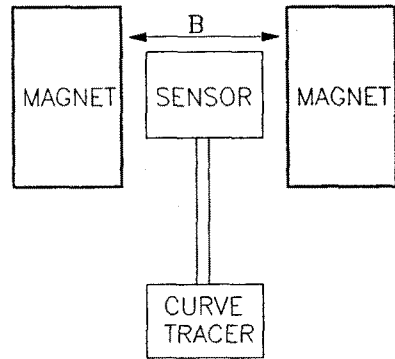


그림 3 센서 특성 측정장치의 구성
Fig. 3 Experimental set-up for measuring the magnetic sensor characteristics

4. 실험 결과 및 고찰

그림 4는 자계를 소자 표면에서 수평으로 가한 경우 채널내에서 캐리어의 이동 경로를 나타낸 것이다. 자계를 가하지 않은 상태에서 캐리어 이동 경로는 그림(a)와 같이 직선으로 된다. 자계를 그림(b)와 같이 지면으로 나오는 방향으로 인가하면 Lorentz 힘에 의해 캐리어는 그림과 같이 벌크속으로 밀리는 힘을 받게 된다. 그러므로, 캐리어의 이동 경로는 길어지므로 채널 길이가 증가한 것과 등가로 되어 스위칭 전압은 증가한다.

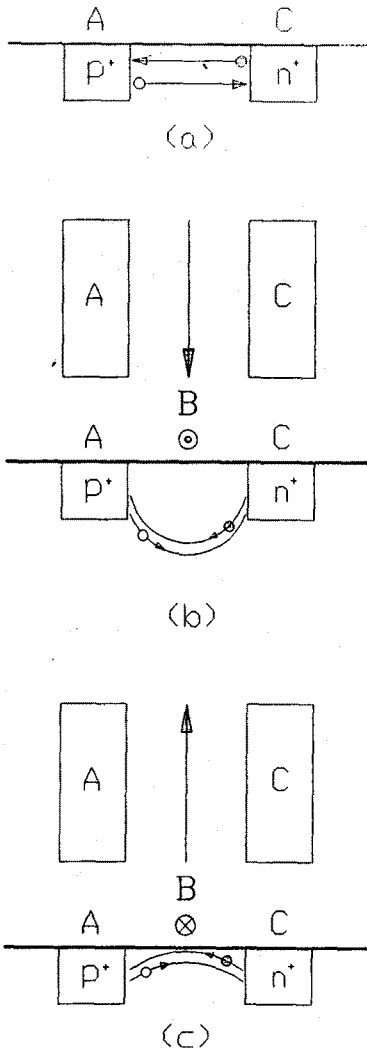


그림 4 자계를 인가하지 않은 경우(a)와 소자 표면에 수평으로 가한 경우(b),(c)의 캐리어 이동경로.

Fig. 4 Carrier trajectories in the presence of a magnetic field. (a) No magnetic field; (b) and (c) a magnetic field is perpendicular to the channel

그림 5는 자계의 세기(B)와 스위칭 전압(V_m)의 관계를 나타낸 것이다. 스위칭 전압은 자계에 비례해서 직선적으로 증가함을 볼 수 있으며, 양 방향의 자계에 대해 약 30 V의 변화가 관측되었다.

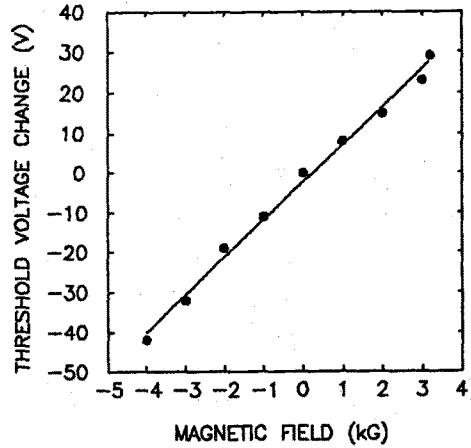


그림 5 스위칭 전압의 자계 의존성
Fig.5 Dependence of the threshold voltage on the magnetic field

한편 그림 4(c)와 같이 자계의 방향을 역으로 하면 캐리어는 표면으로 끌려오는 힘을 받게 되지만, Si-SiO₂ 계면에 의해 저지되므로 carrier path의 변화가 매우 작아 V_m 의 변화도 크지 않을 것으로 예측된다. 그러나 그림 5에서 볼 수 있듯이 실측된 스위칭 전압은 상당히 감소하여 스위칭 전압(V_m)-자계(B) 관계는 양방향의 자계에 대해서 직선적으로 되었다. 이와 같은 V_m 의 감소는 표면에서 캐리어의 축적에 기인한다고 생각된다. 표면에서 전자와 정공 농도가 증가하면 소자는 더 낮은 전압에서 스위칭할 것이다. 그러나, 몇몇 소자에서는 그림 6과 같이 반대방향의 자계에 대해서도 스위칭 전압이 증가하였다. 이것은 Si-SiO₂ 계면에서 표면 재결합속도(S)의 크기에 따라 스위칭 전압이 달라지는 것으로 생각된다. S=0 이면, 전술한 바와 같이, 표면을 향하여 편향된 캐리어는 재결합에 의해서 소실되지 않고 축적되므로 그림 5와 같이 스위칭 전압은 감소할 것이다. 그러나, S가 매우 크면, 표면으로 편향된 캐리어는 그곳에서 재결합하므로 전자정공의 밀도는 감소할 것이므로 자계의 세기에 따라 스위칭 전압은 증가한다.

4. 결론

본 문에서는 플레나 이중 주입 자기 센서를 제작하고 센서의 특성을 실험적으로 간단히 고찰하였다. 센서의 스위칭 전압은 자계에 매우 민감하였다. 스위칭 전압의 변화 크기와 방향은 자계의 세기와 인가 방향에 의존하였으며, 대부분의 경우 V_m -B 특성은 직선으로 되었다. (+)자계에서 스위칭 전압의 증가는 로렌츠 힘에 의해 캐리어의 이동 경로가 변화하여 유효채널길이

참고문헌

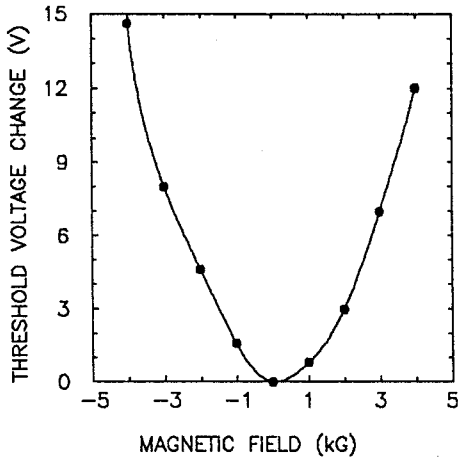


그림 6 스위칭 전압의 자계 의존성
Fig. 5 Dependence of the threshold voltage on the magnetic field

가 증가하는 것에 기인한다고 생각된다. 한편 반대방향으로 자계를 가하면, 실리콘-산화막 계면에서의 표면 재결합 속도의 크기에 따라 스위칭 전압이 증가하거나 감소하는 것이 확인되었다. 일반적으로 실리콘-산화막 경계면에서 재결합 속도는 매우 작으므로, (-)자계방향에서 센서 소자의 스위칭 전압은 대부분 감소하였다. 그러나, 몇몇 소자에서는 자계의 방향에 관계없이 스위칭 전압이 증가하였다.

실리콘 이중 주입 자기 센서는 소자는 양방향의 자계에 대해 우수한 선형성을 나타내기 때문에 자기센서로서의 가능성을 갖고 있다. 그러나, 동작 전압이 낮고 안정된 스위칭 특성을 갖는 소자의 제작이 앞으로 해결해야 할 과제이다.

- [1] R.S. Popovic, *Hall Effect Devices*, Adam Jilger, 1991, pp. 251-297.
- [2] H.P. Baltes and R.S. Popovic, "Integrated Semiconductor Magnetic Field Sensors," *Proc. IEEE*, vol. 74, pp. 1107-1132, 1986
- [3] W. Gopel, J. Hesse, and J. N. Zemel, *Sensors*, Vol. 5 Magnetic Sensors, 1989.
- [4] M.A. Lampert and P. Mark, *Current Injection in Solids*, Academic Press, New York, 1970.
- [5] K.C. Kao and W. Hwang, *Electrical Transport in Solids*, Pergamon Press, Oxford, 1981.
- [6] L.S. Gasanov and I.N. Gorbaty, "Double-Injection P-I-N Structures in a Magnetic Field," *Sov. Phys. Semiconductor*, Vol. 14, No. 3, p. 279, 1980.
- [7] N. Nedev and N. Smirnov, "Two-dimensional Modelling of Lateral Magnetotransistor," *Sensors and Actuators A*, Vol. 45, p. 195, 1994.
- [8] H. Trujillo, A. Nagy, and J.C. Cruz, "Influence of Topology on the Response of Lateral Magnetotransistor," *Sensors and Actuators A*, Vol. 45, p. 174, 1994.