

Semiconductor basic concepts, Doping

정주안

2025년 8월 13일

키워드: 반도체, 도핑, n타입/p타입 반도체

개념

1 반도체(Semiconductor)

반도체는 gap energy(최외각 전자를 탈출시키기 위한 최소 에너지)가 도체(conductor)와 절연체(dielectric)의 중간이므로, 열생성된 자유 전자(free electron)와 양공(hole) 쌍의 밀도가 도체와 절연체의 중간이다. 따라서 도체와 절연체 사이의 전도도도를 가진다. 자세한 설명은 전자기학을 참고하자.

순수 반도체 원소는 주기율표상 4족 원소에 해당한다.

반도체 소재로 사용되는 주요 원소				
<div> <div></div> 단체반도체원소 <div></div> 화합물반도체원소 </div>				
II	III	IV	V	VI
	5 B 붕소	6 C 탄소	7 N 질소	8 O 산소
	13 Al 알루미늄	14 Si 규소	15 P 인	16 S 유황
30 Zn 아연	31 Ga 갈륨	5 Ge 게르마늄	33 As 비소	34 Se 셀렌
48 Cd 카드뮴	49 In 인듐	50 Sn 주석	51 Sb 안티몬	52 Te 텔루르
80 Hg 수은	81 Tl 탈륨	82 Pb 납	83 Bi 비스무트	84 Po 폴로늄

자료: 화합물 반도체 산업동향 보고서, IBK투자증권

그림 1: 반도체 원소

Si 와 Ge 의 bandgap energy는 다음과 같다.

for Si , $E_g = 1.12eV$

for Ge , $E_g = 0.67 eV$

cf) for diamond, $E_q = 2.5\text{eV}$

순수한 반도체에서 자유전자 또는 양공의 밀도를 n_i 라고 하면, 온도에 따라 다음 공식을 따른다.

$$n_i = 5.2 \times 10^{15} T^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

($k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ (Boltzmann's constant))

ex) For Si, at $T = 300K$, $n_i \approx 10^{10} electrons/cm^3$

실제 Si원자의 밀도는 $5 \times 10^{22} atoms/cm^3$ 수준이고, 이에 비해 자유전자의 밀도는 매우 낮으므로 순수한 실리콘은 좋은 전도체가 아니다.

2 도핑(Doping)

반도체의 전하 캐리어 밀도를 조절하기 위해 3족 또는 5족 원소 불순물(impurity)를 첨가하는 것을 도핑이라 한다. 일반적으로 3족 원소는 B(Boron), 5족 원소는 P(Phosphorus)를 사용한다.

P를 도핑하면 주변 4개의 Si와 공유 결합해 옥텟을 이루고 전자 하나가 남아 빠져나오므로, 반도체 내 자유 전자 밀도가 증가한다. 이렇게 도핑된 반도체를 n-type 반도체라고 하며, 도핑된 P는 자유전자를 공여하므로 donor라고 한다.

반대로 B를 도핑하면 옥텟을 이루기에 전자 하나가 부족하므로, 그 자리에 양공이 생긴다. 이렇게 도핑되어 양공의 밀도가 증가한 반도체를 p-type 반도체라고 한다. B는 양공을 만들고 그 자리에 자유전자가 들어올 수 있으므로 acceptor라고 한다.

도핑에 상관없이 반도체 내에서 다음 등식이 성립한다.

$$np = n_i^2$$

따라서 n-type에서 $n \approx N_d, p \approx \frac{n_i^2}{N_d}$

p-type에서 $p \approx N_a, n \approx \frac{n_i^2}{N_a}$

도핑된 N_d (density of P doner), N_a (density of B acceptor)는 $10^{15} - 10^{17}$ 정도로 n_i 보다 매우 크므로 근사할 수 있는 것이다. 이 공식을 사용하여 도핑된 반도체의 자유전자, 양공의 농도를 계산할 수 있다.

참고 사항

- Q. What happens to n and p in n-type Si and T increases?
A. n은 거의 일정하고, p는 증가한다(비율상)

비고

노트. 반도체에 대한 기본 이해

참고 자료

[1] Lazavi microelectronics 1