

3 injection diode 의 스위칭기구의 고찰
Analysis on switching mechanism of double injection diode

심영권	고려대학교 교수
김상진*	" 대학원
함은석	" 대학원
이헌용	명지대학교 조교수

1. 서론

4족 반도체인 Si, Ge 에 Au 원자를 첨가하면 2 또는 3개의 acceptor-level 을 만들어 부정하성이 나타나는 현상은 이미 널리 알려진 것이나 그 생성기구는 이론적으로 충분히 해명되어 있지 않다. 단지 Au가 Si 내에서 깊은 억셉터 준위를 형성할 때 Au 원자가 Si의 격자점에 들어가 sp³ 혼성궤도를 만들기 때문에 캐리어를 트랩 또는 재결합중심의 역할로서 부정하성을 정상적으로 설명하고 있으며, 이 설명은 (그림-1)에 나타난 바와 같이 실험사실과 잘 부합되므로 타당하다고 본다.

그러나 부정하성에 의한 스위칭 기구는 물리적으로 의미있는 주요한 수치표현으로는 해석되어 있지 않다.

따라서 본고는 double-injection diode 에서 나타나는 부정하성에 의한 스위칭 기구를 종래의 정성적인 고찰을 토대로 물리적으로 의미있는 수치해석에 의한 적용을 보고하는 것이다.

2. 설정모델의 정성적 고찰

우리가 설정한 모델은 증가의 전성영역에 깊은 도너(정공을 트랩)와 억셉터(전자를 트랩) 준위를 포함한 p⁺-i-n⁺ 구조이다.

(그림-2)는 이 모델의 하나로써 Si 에 Au 를 첨가시킨 경우의 에너지밴드 다이어그램으로서 Au 는 깊은 준위 ($|E_c - E_a| = 0.54 \text{ eV}$, $|E_v - E_d| = 0.35 \text{ eV}$) 에 위치하여 재결합센터를 형성한다. 그리고 이론의 단순화를 위해 전하중성조건을 만족하고 있는 상태를 나타낸 그림이다.

이 모델에 있어서 억셉터형 재결합중심(deep acceptor-like trap)은 재결합준위로서 작용한다. 그리고 shallow donor 는 이러한 deep acceptor 를 보상하는 전자를 공급하며 재결합센터는 그것이 보상전자에 의하여 점유되었을 때 (-)로 하전된다.

그러나 (-)전하는 (+)로 이온화된 shallow donor 에 의해 평형을 이루고 있고, 따라서 열적 평형상태에 있어서 국부적인 중성이 유지된다.

shallow donor 는 보상전자를 공급할 뿐이며 재결합과 전기전도기구는 아무런 역할도 하지 않는다. 재결합센터는 부분적으로 전자에 의해 점유되었고 재결합준위는 열적으로 여기된 캐리어가 재결합센터의 밑도에 비해 무시될 정도로 충분히 깊은 에너지밴드 내에 위치하고 있기 때문에 시료 자체는 높은 저항율을 갖는다.

(-)로 이온화된 재결합센터는 정공에 대해 매우 큰 트랩단면적 σ_p 을 갖는 반면에 중성재결합센터는 전자에 대해 매우 작은 트랩단면적 σ_n 을 갖는다. 이것은 곧 전자의 life time 이 정공의 life time 보다 훨씬 크다는 것을 의미하는 것이다.

3. Double injection diode 의 스위칭 기구에 관한 수치적 해석

(그림-1)은 열평형상태에서 페르미준위 밑에 구제하고 있는 재결합센터들은 전자들로 가득 채워져 있고 반대로 페르미준위 위에 구제하고 있는 재결합센터들은 모두 비어 있는 상태를 나타낸 것이다.

(그림-2)는 OFF 상태 또는 저전계상태에서 외부가전압에 의한 자유 캐리어의 injection

level 이 재결합세터밀도보다 매우 작은 상태이기 때문에 전류는 재결합세터밀도에 의해 제어되므로 전류의 흐름은 매우 작다. OFF 상태에서 흐르는 전류는 주로 열평형상태의 전자밀도와 전공밀도를 각각 n_0, p_0 라고 하고, $n_0 = p_0$ 라고 가정할 경우 이동하지 못하는 공간전하에 의해 제한받게 된다.

$$i = q\mu(p + p_0)E = q\mu(n + n_0)E \quad (1)$$

$$dE/dx = -qN_A/\epsilon \quad (2)$$

(그림3-3)은 ON 상태에서 injection level 이 재결합으로 인한 캐리어의 상실보다 매우 큰 상태이기 때문에 고저항 반도체내에서 자유 캐리어에 의한 전류가 급증하는 기구를 나타내고 있다. ON 상태에서의 전류는 열평형상태에 있는 고밀도의 전자와 정공에 의해 흐르며 전계도 균일하므로

$i = q\mu(n_0 + p_0)E = 2q\mu n_0 E \quad (3)$ 로 된다. OFF-ON 상태의 두 영역사이에서의 경계조건은 $n(x_1) = n_0$ 로서 주어지므로 접촉부 (ohmic contact) 에서 $E(0) = 0$, 공간전하영역 거리를 d 라고 하고, 그리고 경계에서의 전계의 연속성을 고려하면 전압은

$$V = \frac{d}{q\mu n_0} i - \frac{\epsilon}{4q\mu^2 N_A n_0} i^2 \quad (4)$$

로 된다.

따라서 OFF 상태에서 ON 상태로 또는 역으로 ON 상태에서 OFF상태로 이행해 나가는 과정은 캐소우드와 애노우드에서 서로 반대부호인 공간전하영역이 인가전압의 증가에 따라 다이오드의 중앙으로 확장해 나가 마주치게 되므로 이때에 OFF 상태에서 ON 상태로의 전이가 일어나며 그 역과정도 성립한다. 이 때의 임계전압 V_{th} 와 임계전류 i_{th} 는 각각 다음과 같이 표시된다.

$$V_{th} = qN_A d^2 / \epsilon \quad (5)$$

$$i_{th} = 2q\mu N_A n_0 d / \epsilon \quad (6)$$

식(5)의 임계전압은 Wright⁽¹⁾ 등에 의해 보고된 Au 를 doping 시킨 Si 에서 얻은 결과와 같다.

만약 인가된 전압이 더욱 증가하면 두 공간전하영역이 서로 침투되어 두 공간전하의 중첩에 의해 공간전하의 중성화가 이루어지며 아울러 중성재결합세터로 인한 긴 캐리어 수명에 의해 전도도는 높게 되고 ON 상태로 된다.

ON 상태에서의 I-V 특성은 영역적 근사법으로 서 얻어진다.

(그림-4)의 (I) 영역에서의 전류주입은 주입된

자유 캐리어에 의해 생긴 공간전하(고정공간전하보다 많다)에 의해 제한을 받는다.

$$J = q\mu n E, \quad dE/dx = -qN/\epsilon \quad (6)$$

(II)영역에서 전류는 정공보다 훨씬 많은 자유 전자에 의해 이루어지나 전계본포는 자유전자보다는 오히려 고정공간전하에 의해 결정된다.

식(2)는 이 영역에서 적용되며 (I)과 (II) 영역간의 경계는 $n(x_1') = N_A$ 에 의해 정해진다.

상술한 공간전하의 중성조건은 (III)영역에 적용되며, 즉 일반적인 donor injection 문제처럼 공간전하의 중첩영역이다.

이 영역에서 전자의 수명은

$$1/\tau_n = C_g P_d + C_s P_a = C_s N_A \left(\frac{1}{u+a} + \frac{1}{1+ua} \right) \quad (7)$$

단 $u = n(x)/p(x)$, $a = C_g/C_s$, P_d, P_a 는 이온화된 donor 와 중성 여섯터밀도이며, C_g, C_s 는 각각 그들이 전자를 트랩하는 트랩단면적을 나타낸다. a 는 보통 $10^{-2} - 10^{-3}$, u 는 다이오드 중심에서 $u=1$ 로 부터 캐소우드로 향해 단조로 이 증가하는 것이다.

만일 $u(x_2')/a=1$ 에 의해 (I'), (II)영역간의 경계를 택한다면 (III)영역에서는 $ua > 1$, $ua < 1$ 로 가정할 수 있으므로 연속식은

$$\mu E \frac{dn}{dx} = \frac{n}{\tau_n} = C_s N_A \quad (8)$$

로 되어 식(6) - (8)로 부터 직접 I-V 특성식이 유도된다.

$$V = 2 \left[E_1 x_2' + \frac{1}{2} \frac{qN_A}{\epsilon} \left\{ (d - x_2')^2 - (d - x_1')^2 \right\} + \frac{i}{2q\mu N_A} (x_1' - x_2') + 2/3 \sqrt{\frac{2i}{\epsilon\mu}} (d - x_1')^{3/2} \right] \quad (9)$$

$$x_1' = d - \frac{\epsilon i}{2q\mu N_A^2}, \quad x_2' = \frac{\mu E_1 \ln(1/a)}{2 C_s N_A} \quad (10)$$

$$E_1 = \frac{2 q\mu N_A d + \epsilon \mu}{2\epsilon q\mu N_A + q^2 \mu^2 N_A C_s \ln(1/a)} \quad (11)$$

식(11)로 부터 중첩영역에서의 유지전압은

$$E_{III}(i \rightarrow 0) = \frac{qN_A d / \epsilon}{1 + R}, \quad R = \frac{q\mu \ln(1/a)}{2\epsilon C_s} \quad (12)$$

윗식으로 부터 부성저항이 일어나는 경계조건을 유도해 보기로 한다.

$R \gg 1$ 인 경우 전계는 식(10)으로 $2 C_s N_A d / \mu \ln(1/a)$ 로 감소하고 $x_2' \approx d$ 로 된다.

이 의미는 다이오드가 공간전하 중성영역에 의해 지배됨을 의미한다. 임계전계와 유지전계의 비는 $V_{th}/V_H \approx (R/2) \gg 1$ 로 되어 부성저항의 존

저를 가리키고 있다.

만일 $R \ll 1$ 인 경우 $E_{III}(i_{\rightarrow 0})$ 는 $qN_R d / \epsilon$ 로 감소되어 가므로 $x_2 = R d \ll d$, $x_1 \approx d$ 로 된다.

이러한 경우는 다이오드가 (II) 영역에 의해 지배되며

$$V_h = qN_R d^2 / \epsilon, \quad V_{th} / V_h \approx 1$$

로 된다. 따라서 위의 식의 파라미터 R 은 ON상태에서의 life time과 relaxation time 의 비로 근가되며 자유 캐리어가 N_R 과 근사함을 나타낸다.

즉 부성저항의 모델은 relaxation time case 에서 life time case 에의 전이에 포함되며 이것은 마치 공간전하의 중성상태에 의해 지배되는 것보다 고정공간전하에 의해 제한되는 OFF 상태의 전류와 같이 볼 수 있다.

후자의 경우 캐리어 life time보다 relaxation time 이 짧음을 가리킨다. 임계전계는 확산항을 무시한 이 해석에서는 d 에 비례한다. 이상 상세한 수치계산과 확산효과 등은 앞으로 종합적으로 검토하여 보고할 예정이다.

Reference

- (1) Wright, Electronics Letters, 8, 578 (1968)
- (2) M.A.Lampert, Phys.Rev., 125, 126 (1962)
- (3) K.L.Ashley & A.G.Milnes, J.Appl.Phys., 35, 369(1964)
- (4) I.Dudeck & R.Kassing, J.Appl.Phys., 48, 4786(1977)

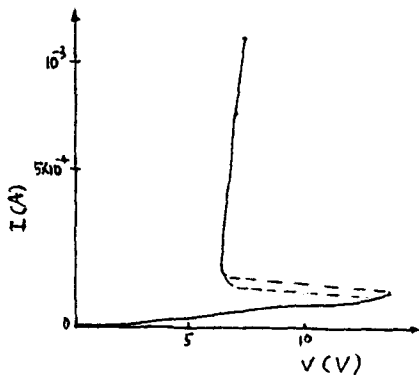


그림 1. 증착산 double injection diode 의 I-V 특성

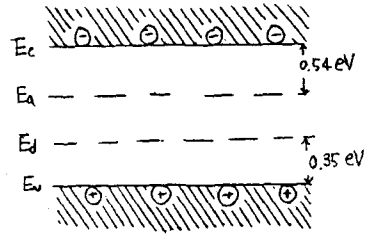


그림 2. 증착산 Si3 의 에너지 띠

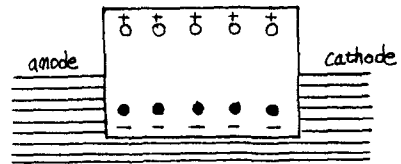


그림 3-1 열평형상태에서의 에너지 띠

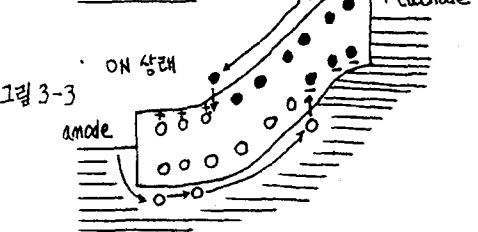
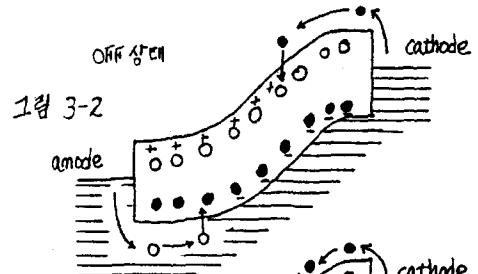


그림 3-2 OFF 상태

그림 3-3 ON 상태

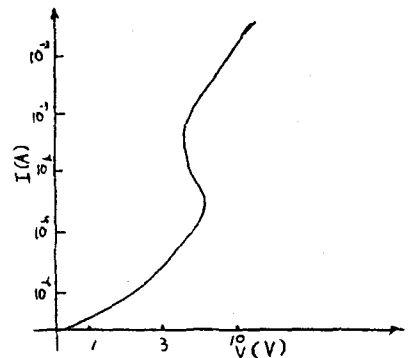


그림 4. Double injection diode 의 I-V 특성