

論文 92-29A-8-10

트랩을 통한 열적 천이와 터널링 천이를 동시에 고려할 수 있는 새로운 터널링 모델에 관한 연구

(New Tunneling Model Including both the Thermal and the Tunneling Transition through Trap)

朴 長 雨*, 郭 桂 達*

(Jang Woo Park and Kae Dal Kwack)

要 約

p-n 접합에서 양쪽의 도핑 농도가 증가하게 되면, 공핍층 내에서는 트랩을 경유하는 SRH(Shockley-Read-Hall) 생성-재결합 전류 뿐만 아니라 트랩을 경유하는 터널링 전류가 발생한다. 이 터널링 전류는 특히 순방향 바이어스가 인가된 경우에 주된 전류이다. 본 논문에서는 트랩을 경유하는 열적 생성-재결합 전류와 터널링 전류를 동시에 계산할 수 있는 새로운 터널링-재결합 식을 유도한다. 특히 본 논문에서 유도된 식은 SRH 생성-재결합 식과 같은 형태를 취하고 있기 때문에, 일반적인 SRH 생성-재결합 전류를 계산하는 방법에 의하여 트랩을 경유하는 터널링-재결합 전류를 쉽게 계산할 수 있다. 본 모델을 두가지 샘플에 적용하였는데 그 하나는 Si n⁺-p⁺ 접합이고 또다른 하나는 MCT(Mercury Cadmium Telluride, 조성비 0.29)로 제작된 n⁺-p 접합 소자이다. 특히 Si n⁺-p⁺ 접합의 경우 이론치와 실험치를 비교하였고, MCT n⁺-p 접합 소자의 경우에는 다른 연구 결과와 비교함으로써 본모델의 타당성을 입증하였다.

Abstract

According to increasing the doping concentration in p-n junction, a tunneling current through trap as well as SRH(Shockley-Read-Hall) generation-recombination current in depletion region occurs. It is the tunneling current that is a dominant current at the forward bias. In this paper, the new tunneling-recombination equation is derived. The thermal generation-recombination current and tunneling current through trap can be easily calculated at the same time because this equation has the same form as the SRH generation-recombination equation. For the validity of this equation, 2 kind of samples are simulated. The one is n⁺-p junction device fabricated with MCT(Mercury Cadmium Telluride, mole fraction=0.29), the other Si n⁺-p⁺ junction. From the results for MCT n⁺-p junction device and comparing the simulated and experimental I-V characteristics for Si n⁺-p⁺ junction, it is shown that this equation is a good description for tunneling through trap and thermal generation-recombination current calculation.

*正會員, 漢陽大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Hanyang Univ.)
接受日字: 1992年 4月 3日

I. 서 론

반도체 p-n 접합에서 p-, n-양쪽이 매우 높게 도

핑되어서 매우 얇은 공핍층이 형성되거나, 밴드갭 에너지가 매우 작은 경우에 공핍층 내에서는 SRH(Shockley-Read-Hall) 생성-재결합 전류 뿐만 아니라 트랩을 경유하는 터널링 전류가 발생하게 된다. 이들 공핍층에서 발생하는 두종류의 전류 성분은 작은 순방향 바이어스나 역방향 바이어스 상태에서 소자의 전류전압 특성을 이상적인 형태로부터 벗어나게 하는 성분으로 작용한다.

Si 쌍극성 소자의 경우에는 IC 집적회로 기술의 발달에 따라서 집적도가 증가하고 소자의 크기는 매우 작아지게 되었다. 이와 같이 크기가 줄어든 쌍극성 소자가 우수한 전기적 특성을 나타내기 위해서는 필수적으로 높은 도핑 농도가 필요하며, 이와 같이 높게 도핑된 $n^+ - p^+$ 접합은 비이상적인 전류-전압 특성을 나타내게 되며 이는 단순히 공핍층 내에서 일어나는 SRH 생성-재결합 전류만으로는 설명할 수 없게 된다.^{1,5)} 즉 매우 높은 도핑 농도로 인하여 공핍층이 매우 얇게 되고 따라서 터널링 장벽이 매우 낮아짐으로써 트랩을 경유하는 터널링 전류는 작은 순방향 바이어스가 인가된 경우에 매우 중요한 전류 성분으로 설명되고 있다.²⁻⁴⁾

또한 이러한 트랩을 경유하는 터널링 전류는 MCT (Mercury Cadmium Telluride)로 제작된 광전압형 (photovoltaic type) 적외선 감지 소자에서 더욱 중요하게 작용하게 된다. 즉, 광전압형 적외선 감지소자는 $n^+ - p$ 접합 형태로 제작되며, 이때 적외선 감지용으로 사용되는 조성비 0.2에서 0.3 사이의 MCT는 매우 작은 밴드갭 에너지 (77K에서, 0.08eV-0.25eV 정도)를 갖고 있다. 그리고 재료의 성장상의 불안정으로 인하여 많은 트랩 밀도가 존재하게 된다. 또한, 이 적외선 감지소자는 역 포화 전류를 작게하기 위하여 높은 도핑 농도를 갖고 있으며, 저온에서 동작하기 때문에 트랩을 통한 터널링 전류 성분은 작은 순방향 바이어스와 역방향 바이어스가 인가된 경우에 매우 중요하게 된다.^{6,7)}

본 논문에서는 공핍층 내에서 트랩을 통한 터널링 전류와 열적 생성-재결합 전류를 동시에 계산할 수 있는 SRH 생성-재결합 식과 형태가 같은 새로운 터널링-재결합 식을 유도하였다. 그리고 본 논문에서 제시된 모델의 타당성을 입증하기 위해서 Si $n^+ - p^+$ 접합과 조성비 0.29인 MCT $n^+ - p$ 접합에 적용하여 그결과를 제시하였다.

II. 트랩을 경유하는 터널링-재결합식의 유도

기호설명

E_{civ}	: 전도대 (가전자대) 하단의 에너지
$E_{f,sp}$: 전자 (정공)의 의사 Fermi 준위
E_i	: 진성 Fermi 준위
E_{ib}	: p형 bulk의 진성 Fermi 준위
E_T	: 트랩 에너지
k	: Boltzmann 상수
n	: 전자농도
n_i	: 진성 운반자 농도
N_{civ}	: 전도대 (가전자대) 상태 밀도
n_T	: 채워진 트랩 밀도
N_T	: 트랩밀도
p	: 정공농도
q	: 전하량
r_a	: 전자 포획 확률
r_b	: 전자 방출 확률
r_c	: 정공 포획 확률
r_d	: 정공 방출 확률
T	: 온도
U_{cv}	: 전도대, 트랩, 가전자대 간의 천이 확률
U_{th}	: 열적 생성-재결합 확률
V	: 인가 바이어스
V_o	: 내부 전위
W	: 공핍층의 폭
x_{civ}	: 트랩-전도대 (가전자대) 간의 터널 거리
c_{np}	: 전도대 (가전자대)로 부터의 열적 포획 상수
$\tau_{no,po}$: 전자 (정공)의 열적 재결합 시간
ω_{civ}	: 트랩-전도대 (가전자대) 간의 터널링률
τ_{np}	: 전자 (정공)의 터널링-재결합 시간

1. 트랩을 경유하는 터널링-재결합식의 유도
 $n^+ - p$ 접합의 공핍층에서는 일반적으로 SRH 재결합 전류 성분이 주된 전류 성분으로 알려져 있다. 그러나 p, n 양편의 농도가 매우 높아지면 공핍층의 폭이 매우 좁아지게 되고 터널링을 일으킬 수 있는 전계가 매우 커지게 됨으로 공핍층 내에서는 트랩을 통한 SRH 재결합 뿐만 아니라, 트랩을 통한 터널링 확률이 매우 증가하게 된다. 이 트랩을 경유하는 터널링 전류는 밴드간 직접 터널링과 달리 순방향 바이어스가 인가된 경우에 중요한 전류 메카니즘이다.^{3,4,7)} 공핍층 내에서 발생하는 천이과정을 살펴보기 위하여 공핍층 내에서 발생하는 터널링 천이와 열적 천이를 그림 1에서 나타내었다. 이때, 공핍층 내에서 트랩을 통하여 일어날 수 있는 천이 과정을 수식으로 정리하면, 아래식과 같다.⁷⁾

$$r_a = n(x - x_c) [N_T - n_T(x)] \omega_c + n(x) [N_T - n_T(x)] c_n \tag{1}$$

$$r_b = n_T(x) N_c \omega_c + n_T(x) n_1 c_n \quad (2)$$

$$r_c = p(x+x_v) n_T(x) \omega_v + p(x) n_T(x) c_p \quad (3)$$

$$r_d = [N_T - n_T(x)] N_v \omega_v + [N_T - n_T(x)] p_1 c_p \quad (4)$$

윗식에서 우변의 첫째항은 터널링 전이를 나타내고, 있으며, 둘째 항은 열적전이에 의한 성분을 나타내고 있다.

축퇴되지 않은 반도체에서, 정상상태의 경우 전자와 정공의 농도 그리고 식 (1)~(4)에서 사용된 n_1 과 p_1 은 아래식에 의해서 계산된다.

$$\begin{aligned} n(x) &= n_i \exp[(E_{fn} - E_i)/kT] \\ p(x) &= n_i \exp[(E_i - E_{fp})/kT] \\ n_1 &= N_c \exp[-(E_c - E_T)/kT] \\ p_1 &= N_v \exp[-(E_T - E_v)/kT] \end{aligned} \quad (5)$$

이때 진성 Fermi 준위는 그림1에서와 같이 정의하면, 아래와 같이 주어진다.

$$E_i(x) = E_{ib} - q\phi(x)$$

또한 그림 1에서 보듯이, 터널링 거리는 반도체 전위 ϕ 의 변화에 해당하므로^[8] $n(x-x_c)$ 는 $n(x)$ 의 항으로 표시할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} n(x-x_c) &= n_i \exp[(E_{fn} - E_{ib} + q\phi(x-x_c))/kT] \\ &= n_i \exp[|(E_{fn} - E_{ib} + q\phi(x))/kT| \\ &\quad \cdot \exp[q\phi(x-x_c) - \phi(x)]/kT] \end{aligned}$$

이때,

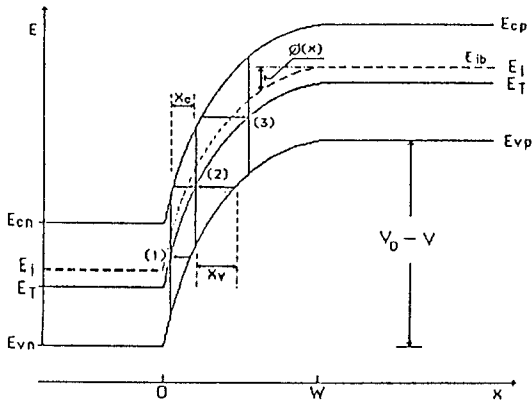


그림 1. $n^+ - p$ 접합의 에너지 밴드와 공핍층 내에서의 각종 전이 과정

Fig. 1. Energy band for $n^+ - p$ junction and the various transition processes in depletion region.

$$q[\phi(x-x_c) - \phi(x)] = E_c - E_T$$

이므로,

$$n(x-x_c) = n(x) \exp[(E_c - E_T)/kT] \quad (6)$$

가 된다. 같은 방법으로 $p(x+x_v)$ 를 계산하면,

$$p(x+x_v) = p(x) \exp[(E_T - E_v)/kT] \quad (7)$$

로 표시할 수 있다.

한편, 정상상태에서 위의 식(1)에서 (4)는 아래와 같은 관계를 만족하게 된다.

$$r_a - r_b - r_c + r_d = 0$$

따라서, 이식으로 부터 n_T 를 계산하면,

$$n_T(x) = \frac{N_T [n(x)c_n + p_1 c_p + n(x-x_c)\omega_c + N_v \omega_v]}{[n(x) + n_1]c_n + [p(x) + p_1]c_p + [n(x-x_c) + N_c]\omega_c + [p(x+x_v) + N_v]\omega_v} \quad (8)$$

가 된다. 따라서, 전도대와 가전자대 그리고 트랩을 통한 전이 확률은,

$$\begin{aligned} U_{cv} &= r_a - r_b \\ &= N_T [n(x)c_n + n(x-x_c)\omega_c \\ &\quad - n_T(x) [(n(x) + n_1)c_n + (n(x-x_c) + N_c)\omega_c] \\ &= \text{분자} / \text{분모} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{분자} &= N_T [n(x)p(x) - n_1 p_1 c_n c_p \\ &\quad + \{n(x)p(x+x_v) - n_1 N_v\} c_n \omega_v + \\ &\quad + \{n(x-x_c)p(x) - N_c p_1\} \omega_c c_p \\ &\quad + \{n(x-x_c)p(x+x_v) - N_c N_v\} \omega_c \omega_v] \end{aligned} \quad (10)$$

분모 = 식(8)의 분모
식(10)과 식(11)에 식(5), (6), (7)을 대입하면, (10)식은

$$\text{분자} = N_T [n(x)p(x) - n_1 p_1] (c_n + \omega_c') (c_p + \omega_v') \quad (12)$$

그리고 (11)식은,

$$\text{분모} = (n(x) + n_1) (c_n + \omega_c') + (p(x) + p_1) (c_p + \omega_v') \quad (13)$$

으로 쓸 수 있다. 여기서,

$$\omega_c' = \omega_c \exp((E_c - E_T)/kT) = \omega_c N_c / n_1 \quad (14)$$

$$\omega_v' = \omega_v \exp((E_T - E_v)/kT) = \omega_v N_v / p_1 \quad (15)$$

이다. 이때, $\omega_c N_c$ 와 $\omega_v N_v$ 은 터널링율로서 Hoffman과 Anderson에 의하여 계산된 결과를 사용하였다.^[7] 이상의 결과를 다시 정리하면, 전도대, 가전자대, 트랩간의 전이하는 확률 U_{cv} 는

$$U_{cv} = \frac{n(x)p(x) - n_1p_1}{\tau_p'(n(x) + n_1) + \tau_n'(p(x) + p_1)}$$

로 된다. 이때, τ_n' , τ_p' 는 터널링 성분과 열적 생성-재결합 성분을 포함하는 터널링-재결합 시간으로 아래식과 같이 표시된다.

$$\tau_p' = \frac{1}{N_T(c_p + \omega_v')}, \quad \tau_n' = \frac{1}{N_T(c_n + \omega_c')} \quad (17)$$

이 관계식은, 터널링 성분이 없으면, ω_c' , ω_v' 은 영이 되고, 따라서 $\tau_p' = \tau_{p0}$, $\tau_n' = \tau_{n0}$ 로 되기 때문에 U_{cv} 식은 일반적인 SRH 재결합식과 같게 된다. 즉,

$$U_{th} = \frac{n(x)p(x) - n_1p_1}{\tau_{p0}(n(x) + n_1) + \tau_{n0}(p(x) + p_1)} \quad (18)$$

$$\tau_{p0} = \frac{1}{N_T c_p}, \quad \tau_{n0} = \frac{1}{N_T c_n} \quad (19)$$

로 된다. 본 연구에서는, 식(16)에서 보듯이, 단일 트랩을 통한 터널링 성분을 SRH 생성-재결합 식에 도입하였다. 이상의 유도과정에서 알 수 있듯이 트랩을 통한 터널링은 트랩을 통하여 천이한다는 면에서 일반적인 SRH 생성-재결합 과정과 같다. 그러나 이천이가 단지 열적인 포획이나 방출 과정만이 포함된 것이 아니라 트랩을 경유하는 터널링 천이도 포함되어 있다는 면에서 차이가 있다. 따라서 본 모델에서 터널링 성분을 재결합 시간에 포함시킴으로써 SRH 재결합 모델의 식과 같은 형태의 터널링-재결합 모델을 유도할 수 있었다.

2. 트랩을 경유하는 터널링-재결합 전류의 계산
터널링-재결합 전류를 계산하기 위하여, Sah, Noyce, Shockley에 의한 것⁹⁾과 같은 방법으로 그림 2의 선형적인 밴드 구조를 가정하고 식(5)의 운반자 농도 식을 이용하여, U_{cv} 를 바꿔쓰면,

$$U_{cv} = \frac{n_i}{\sqrt{\tau_p' \tau_n'}} \frac{\sinh\left(\frac{q}{kT} V\right)}{A+B} \quad (20)$$

이때 A와 B는 아래와 같이 표시된다.

$$A = \cosh\left[\frac{q}{kT} (V_0 - V) \left(\frac{x}{W} - \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2} \left(\ln \frac{N_A}{N_D} - \ln \frac{\tau_p'}{\tau_n'}\right)\right]$$

$$B = \exp\left(-\frac{qV}{2kT}\right) \cosh\left(\frac{E_T - E_i}{kT} + \frac{1}{2} \ln \frac{\tau_p'}{\tau_n'}\right)$$

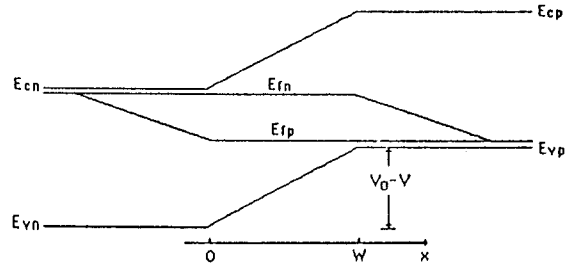


그림 2. n-p 접합의 에너지 밴드의 선형적인 근사
Fig. 2. The linear approximation of energy band for n-p junction.

으로 표현된다. 이때 역방향 바이어스가 매우 커지면 식(20)의 분모항의 첫항은 두번째항에 비해 작게됨으로 식(20)은

$$U_{cv} = -n_i \left[\sqrt{\tau_p' \tau_n'} \cosh\left(\frac{E_T - E_i}{kT} + \frac{1}{2} \ln \frac{\tau_p'}{\tau_n'}\right) \right]^{-1} \quad (21)$$

으로 된다. 따라서, 위에서 정리한 식(20)와 식(21)을 공핍층 내에서 거리에 따라서 적분하게 되면, 참고 문헌 [9]에서 얻어진 생성-재결합 전류와 같은 형태의 터널링-재결합 전류식을 얻을 수 있다.

III. 결과 검토 및 토의

본 논문에서 유도한 트랩을 경유하는 터널링-재결합 모델을 두가지 샘플에 적용하였다. 그 하나는 Si n⁺-p⁺ 접합이고 다른 하나는 적외선 감지소자인 조성비 0.29인 MCT (Mercury Cadmium Telluride) n⁺-p 접합 광다이오드이다.

1. Si n⁺-p⁺ 접합

Si 쌍극성 소자로 구성된 IC 기술의 발달에 따라 쌍극성 소자의 크기는 매우 줄어들게 되었다. 쌍극성 소자에서, 전기적인 우수한 특성을 유지하면서 크기를 줄이기 위해서는 p-, n-양쪽의 도핑 농도를 증가시킬 필요가 있다. 즉, BJT의 크기를 줄이기 위해서는 punchthrough를 방지할 수 있는 정도의 베이스도핑이 필요하고^{10,11)} 높은 베이스 도핑은 낮은 베이스 저항과 높은 Early 전압을 위하여 바람직한 것이다. 또한 높은 이미터 주입 효율과 낮은 직렬 저항을 얻기 위해서는 높은 이미터 도핑이 요구된다. 이와 같은 조건은 10¹⁸ (cm⁻³) 이상의 도핑이 요구되는

데¹⁾ 이렇게 높게 도핑이되면, 공핍층이 매우 좁아지고 따라서 접합 전계는 트랩을 통한 터널링이 발생할 수 있을 정도로 강하게 된다. 이때문에 트랩을 통한 터널링 전류는 매우 커져서 특히 순방향 바이어스가 인가된 경우에 주된 전류가 된다.

그림 3과 그림 4는 Si n⁺-p⁺ 접합의 순방향 전류-전압 특성을 나타내었다. 그림 3은 바이어스가 인가되지 않은 경우의 공핍층이 폭이 185Å(이것은 p, n 양층의 농도가 4×10¹⁸cm⁻³ 정도이다)이고 전자와 정공의 수명시간이 τ_{no}=τ_{po}=0.01μs, 그리고 온도가 T=294K인 경우의 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하였다. 여기에서 트랩의 위치는 밴드갭 중앙에 있다고 가정하였다. 이때 실험 결과는 참고문헌 [12]에서 얻은 것이다. 그리고 이그림에서 SRH 모델을 고려한 경우와 Poole-Frenkel 효과^(13,14)가 고려된 경우를 동시에 비교하였다. 그림에서 보듯이 SRH 모델이나, Poole-Frenkel 효과는 실험 결과를 충분히 고려하지 못함을 볼 수 있다. 즉 열적 생성-재결합 모델만으로는 실험 결과를 표현할 수 없고 따라서 트랩을 경유하는 터널링 모델이 포함되어야만 함을 알 수 있다.

그림 4는 Si n⁺-p⁺ 접합의 다른예인데, p⁺ 영역의 농도는 5×10¹⁹cm⁻³이고 n⁺ 영역의 농도는 그림에 나타낸 바와 같다. 그리고, 온도는 T=300K이다. 여기에서 실선은 본 모델에 의하여 계산된 결과이고 실험

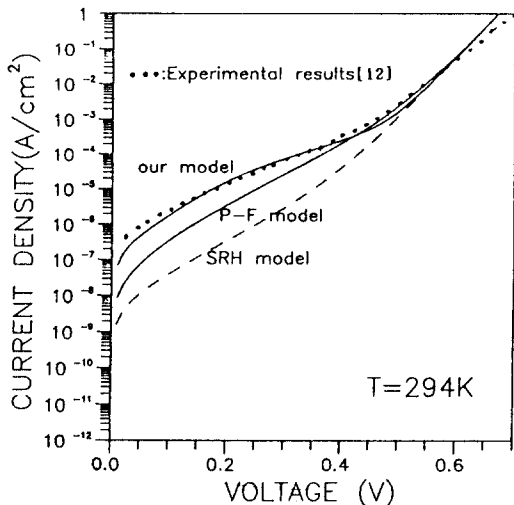


그림 3. Si 제로 바이어스 공핍층 폭이 185Å인 n⁺-p⁺ 접합의 순방향 전류-전압 특성

Fig. 3. The forward current-voltage characteristics for Si n⁺-p⁺ junction at zero bias depletion width of 185Å

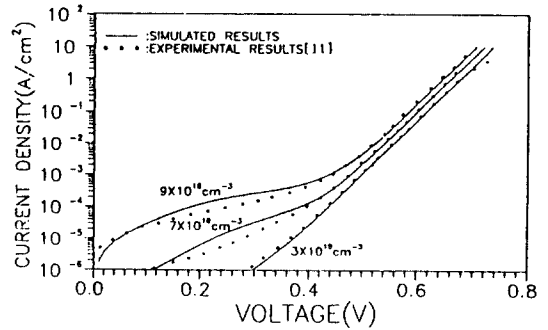


그림 4. 여러 도핑 농도에 따른 Si n⁺-p⁺ 접합의 순방향 전류-전압 특성

Fig. 4. The forward current voltage characteristics for Si n⁺-p⁺ junction with various doping concentrations.

결과는 참고문헌 [11]에서 얻은 것이다. 이때 전자와 정공의 수명시간은 τ_{no}=τ_{po}=0.1μs로 하였고 트랩의 위치는 밴드갭 중앙에 있다고 가정하였다. 이 그림으로 부터 본 논문에서 유도된 새로운 터널링-재결합 식은 트랩을 경유하는 터널링 현상을 잘 기술하고 있음을 알 수 있다.

2. MCT n⁺-p 접합 광 다이오드

적외선 감지용 광 다이오드 제작에 사용되는 MCT는 조성비가 0.2에서 0.3 정도의 물질로 매우 작은 밴드갭 에너지를 갖고 있으며, MCT 물질의 성장 상의 어려움으로 인하여 많은 트랩 밀도를 갖고 있다. 또한 광 다이오드는 역포화 전류를 줄이기 위하여 매우 높은 도핑을 하며, 또한 저온에서 동작하고 있다. 이와 같은 이유 때문에 MCT로 제작된 광 다이오드는 트랩을 통한 터널링이 매우 중요한 순방향 바이어스 특성을 나타내게 된다.

본 논문에서 유도한 터널링-재결합식을 조성비 0.29인 MCT n⁺-p 접합에 적용하여 계산한 전류-전압 결과를 그림 5에 나타내었다. 이 MCT n⁺-p 접합의 경우 터널링 전류를 계산할 때, 가전자대와 트랩간의 터널링은 가전자대중에서 가벼운 정공 가전자대(light hole valance band)만이 터널링에 관여한다고 생각한다.^(17,18) 이때 사용한 상수의 값은 Anderson과 Hoffman⁽²¹⁾의 값과 같다. 즉, n⁺와 p⁺영역 도핑 농도는 각각 1×10¹⁷과 5×10¹⁶(cm⁻³)이고 전자와 정공의 lifetime은 각각 τ_{no}=1×10⁻⁹과 τ_{po}=1×10⁻¹⁰(sec)이다. 그리고 트랩 에너지의 위치는 0.7E_c이다. 그림 5에서 보듯이 Anderson과 Hoffman에 의한 결과⁽²¹⁾와 마찬가지로 부성저항 특성이 나타나고 있는데 이것은 트랩이 0.7E_c의 위치에 있다고 가정하였기 때문

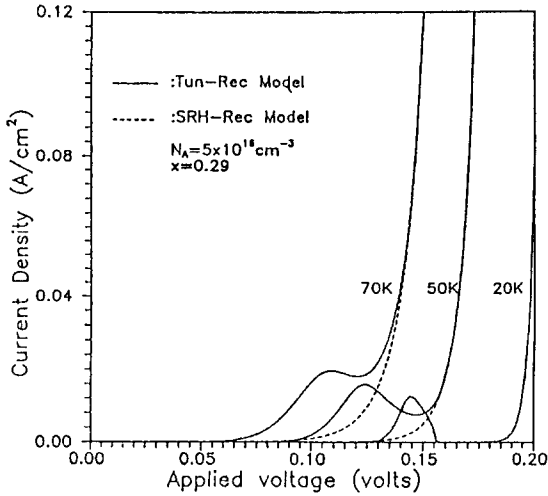


그림 5. $\text{Hg}_{0.71}\text{Cd}_{0.29}\text{Te}$ $n^+ - p$ 다이오드의 순방향 전류-전압 특성

Fig. 5. The forward current-voltage characteristics for $\text{Hg}_{0.71}\text{Cd}_{0.29}\text{Te}$ $n^+ - p$ diode.

에 주로 전도대-트랩 터널링에 의한 것이다. 이결과는 Anderson-Hoffman의 결과와 잘 일치하고 있다.

IV. 결 론

쌍극성 소자에서 p -, n -양쪽이 매우 높게 도핑되거나, 밴드갭 에너지가 매우 작은 경우에, 작은 순방향 혹은 역방향 바이어스 상태에서 전류는 SRH 생성-재결합 전류 뿐만 아니라, 트랩을 통한 터널링 전류로 구성되게 된다. 이 트랩을 경유하는 터널링 전류는 소자가 이상적으로 동작하지 못하게 하는 요인이다.

본 논문에서는, 공핍층 내에서 발생하는 트랩을 통한 열적 생성-재결합과 트랩을 통한 터널링 현상을 규명할 수 있는 새로운 터널링-재결합 식을 유도하였다. 본 모델은 SRH 생성-재결합이나 트랩을 통한 터널링이 트랩을 경유한다는 면에서 같은 메커니즘이므로 SRH 생성-재결합 식과 같은 형태의 식으로 유도하였다. 그리고 트랩을 경유하는 터널링 성분을 재결합 시간의 항으로 포함시켰다. 따라서 본 모델에서 유도된 식을 사용하면, 공핍층 내에서 일반적인 SRH 생성-재결합 전류를 계산하는 방법을 그대로 사용하여서 트랩을 통한 열적-재결합 전류와 터널링 전류를 동시에 계산할 수 있다. 또한 본 모델식은 SRH 생성-재결합 모델을 포함하고 있는 수치해석 프로그램에 많은 변형을 하지 않고 쉽게 적용할

수 있으리라 생각된다.

본 논문에서는 본 모델의 타당성을 입증하기 위하여 $\text{Si } n^+ - p^+$ 접합에 적용하여 계산된 결과를 실험값과 비교하였으며, MCT 광 다이오드의 순방향 전류 전압 특성을 계산하였다. 이들 계산결과로부터 본 모델은 식 트랩을 경유하는 터널링 현상을 효과적으로 밝힐 수 있음을 알았다.

參 考 文 獻

- [1] J.W.S. Woo, J.D. Plummer, Johannes, "Non-Ideal Current in bipolar transistors at low temperatures," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-34, no. 1, pp. 130-138, 1987.
- [2] J.A. Del Alamo, R.M. Swanson, "Forward-Bias Tunneling: A Limitation to bipolar Device Scaling," *IEEE Electron Device Letters*, vol. EDL-7, no. 11, pp. 629-632, 1986.
- [3] G.A.M. Hurk, F.G.O'Hara, M.P.G. Knuvers, "Modeling forward-biased tunneling," *ESSDERC'89*, pp. 794-796, 1989.
- [4] G.A.M Hurk, H.C. de Graaff, W.J. Kloosterman, M.P. Knuvers, "A novel compact model description of reverse-biased biode characteristics including tunneling," *ESSDERC'90*, pp. 49-52, 1990.
- [5] E. Hackbarth, D. Tang, "Inherent and stress-induced leakage in heavily doped Silicon junction," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-35, no. 12, pp. 2107-2118, 1988.
- [6] Y. Nemirovsky, D. Rosenfield, R. Adar, A. Kornfeld, "Tunneling and dark currents in HgCdTe photodiodes," *J. Vac. Sci. Technol.* A7(2), pp. 528-535, 1989.
- [7] W.W. Anderson, H.J. Hoffman, "Field ionization of deep levels in semiconductors with applications to $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ p-n junctions," *J. of Appl. Phys.* 53(12) pp. 9130-9145. 1982.
- [8] J.P. Omaggio, "Analysis of dark current in IR detectors on thinned p-type HgCdTe ," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-37, no. 1, pp. 141-152, 1990.
- [9] C.T. Sah, R.N. Noyce, W. Shockley, "Carrier generation and recombination P-N junctions and junction characteristics," *Proceeding of the IRE*, pp.1228-1235, 1958.
- [10] J.M.C. Stock, R.D. Isaac, "Tunneling in base-emitter junctions," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-30, no. 11, pp. 1527-1534, 1983.

- [11] Z. Matutinovic-Krstelj, E.J. Prinz, D.V. Schwartz, J.C. Sturm, "Reduction of p⁺-n⁺ junction tunneling current for base current improvement in Si/SiGe/Si heterojunction bipolar transistors," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 12, no. 14, pp. 163-165, 1991.
- [12] G.A.M. Hurkx, D.B.M. Klaassen, M.P.G. Knuvers, F.G. O'hara, "New recombination model describing heavy-doping Effects and low-temperature behavior," *IEDM 89*, pp. 307-310, 1989.
- [13] J.C.S. Woo, J.D. Plummer, J.M.C. Stork, "Non-ideal base current in bipolar transistors at low temperatures," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-34, no. 1, pp. 130-138, 1987.
- [14] G. Vincent, a. Chantre, D. Bois, "Electric field effect on the thermal emission of traps in semiconductor junctions," *J. Appl. Phys.* vol. 50, no. 8, pp. 5484-5487, 1979.

감사의 글

저자들은 본 연구에 지대한 관심을 갖고 아낌없는 지원을 하여주신 국방과학 연구소의 기술연구 본부 3부 김재묵 부장님과 그 실원들께 감사드립니다.

著 者 紹 介



朴 長 雨 (正會員)

1965年 1月 18日生. 1987年 2月 한양대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1989年 2月 한양대학교 대학원 전자 공학과 석사과정졸업(공학석사). 1991年~현재 한양대학교 대학원 전자공학과 박사과정

재학중. 주관심분야는 MCT(mercury-cadmium-telluride) 적외선 감지소자의 해석적 모델링 및 수치해석적 연구등임.

郭 桂 達 (正會員) 第27卷 第7號 參照

현재 한양대학교 전자공학과 교수