

HgCdTe 광 다이오드의 터널링 전류 계산

(Tunneling Current Calculation in HgCdTe Photodiode)

朴 長 雨*, 郭 桂 達*

(Jang Woo Park and Kae Dal Kwack)

要 約

HgCdTe 광 다이오드는 작은 밴드갭 에너지, 높은 도핑 농도 그리고 낮은 동작 온도등으로 인하여, 터널링 전류가 암 전류의 주된 성분을 구성한다. 터널링 전류는 상대적으로 높은 온도 그리고 작은 역방향 바이어스 그리고 순 방향 바이어스에서 주된 성분인 트랩을 통한 간접 터널링과 낮은 온도, 큰 역방향 바이어스에서 주된 암 전류 성분인 밴드간 직접 터널링 전류로 나누어 생각할 수 있다. 본 논문에서는, 이들 터널링 전류를 계산하기 위하여 트랩을 통한 새로운 터널링-재결합 식과 공핍층 내에서 발생하는 트랩을 경유하는 터널링 전류를 계산하였다. 트랩을 경유하는 터널링-재결합식은 SRH(Shockley-Read-Hall) 생성-재결합 식과 같은 형태를 취하고 있으며, 터널링 효과는 재결합 시간으로 포함시켰다. 또한 직접 터널링 전류 계산을 위하여 Chakraborty와 Biswas의 식을 이용하였다. 그리고 본 논문에서 계산된 식을 조성비 0.29와 0.222인 HgCdTe 광 다이오드에 적용하여 터널링 현상을 설명하였다. 이때, 트랩을 경유하는 터널링 재결합 전류의 온도 의존성과 밴드간 직접 터널링의 온도 의존성을 보였으며, 특정 온도에서 전류를 성분별로 나타냄으로써 바이어스에 따른 주된 온도 성분을 알 수 있었다.

Abstract

Because of a small bandgap energy, a high doping density, and a low operating temperature, the dark current in HgCdTe photodiode is almost composed of a tunneling current. The tunneling current is divided into an indirect tunneling current via traps and a band-to-band direct tunneling current. The indirect tunneling current dominates the dark current for a relatively high temperature and a low reverse bias and forward bias. For a low temperature and a high reverse bias the direct tunneling current dominates. In this paper, to verify the tunneling currents in HgCdTe photodiode, the new tunneling-recombination equation via trap is introduced and tunneling-recombination current is calculated. The new tunneling-recombination equation via trap have the same form as SRH (Shockley-Read-Hall) generation-recombination equation and the tunneling effect is included in recombination times in this equation. Chakraborty and Biswas's equation being introduced, band to band direct tunneling current are calculated. By using these equations, HgCdTe (mole fraction, 0.29 and 0.222) photodiodes are analyzed. Then the temperature dependence of the tunneling-recombination current via trap and the band to band direct tunneling current are shown and it can be known what is dominant current according to the applied bias at the special temperature.

*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 6月 9日

광 특성과 여러가지 우수한 성능으로 인해 광 검출 소자의 재료로써 많이 사용되고 있다. 그런데 적외선 감지 용으로 사용되는 MCT는 조성비가 대체로 0.2에서 0.3 사이의 재료로써 매우 작은 밴드갭 에너지(0.08~0.23eV)를 갖게 된다. 또한 재료 성장 과정의 불안정으로 인하여 매우 많은 트랩 밀도를 갖고 있다. 그리고 MCT로 제작된 광 전압형(photovoltaic type) 적외선 감지 소자는 n⁺-p 접합의 형태로 제작되며 저온(~77K)에서 동작하게 된다. 이들 MCT의 물질 특성과 소자적인 특성으로 인하여, 광 전압형 적외선 감지 소자의 암전류는 주로 터널링 전류로 구성되게 된다. 터널링 전류는 두가지 기구로 설명되는데 그 하나는 트랩을 통한 간접 터널링 전류^{1, 2, 13}이고, 다른 하나는 밴드간 직접 터널링 전류^{13, 15}이다. 그중에서 직접 터널링 전류는 온도가 매우 낮거나, 밴드갭이 매우 작은 경우 혹은 큰 역방향 바이어스가 인가된 상태에서 주된 전류이다. 즉, 공핍층 내에서 전도대와 가전자대가 서로 중첩되고 전도대와 가전자대 사이의 간격이 터널링이 발생할 수 있을 정도로 작아지는 경우에 발생하게 된다. 그리고, MCT는 많은 트랩 밀도를 갖고 있기 때문에 MCT로 제작된 n⁺-p 접합의 공핍층에서는 일반적으로 SRH 생성-재결합 전류 성분이 주된 전류 성분으로 알려져 있지만, p, n 양편의 농도가 매우 높아지고 온도가 낮아지게 되면, 밴드갭 에너지가 작아지고 공핍층의 폭이 매우 좁아지게 되므로 트랩을 통한 SRH 생성-재결합 뿐만 아니라, 트랩을 통한 터널링 확률이 매우 증가하게 된다. 즉, 트랩을 통하여 일어나는 터널링인 간접 터널링은 트랩을 경유하기 때문에 전도대와 가전자대가 서로 중첩되지 않은 경우에도 발생할 수 있으며, 직접 터널링보다 높은 온도에서도 발생할 수 있고, 또한 순방향 바이어스 상태에서도 발생할 수 있다.^{1, 7, 8, 9, 13} 따라서, 온도가 증가할수록 그리고 밴드갭이 커짐에 따라서 트랩을 경유하는 터널링 전류가 중요하게 되며, 직접 터널링 전류는 밴드갭이 줄어들수록 그리고 매우 낮은 온도에서 주된 전류가 된다.

본 논문에서는 단일 트랩을 통한 간접 터널링 특성을 용이하게 해석할 수 있는 SRH(Shockley-Read-Hall) 생성-재결합률과 같은 형태를 가지는 터널링-재결합 식과 이들 성분이 포함된 전류식¹²을 사용하였는데, 여기서 사용된 트랩을 통한 터널링-재결합식은 기존의 SRH 재결합식과 그 형태가 같기 때문에 해석적으로 적용하기가 용이하다. 또한 직접 터널링물로는 Kane에 의하여 유도된 식에 비해서 일반적으로 적용할 수 있는 Chakraborty와 Biswas의 직접 터널링 식^{16, 13}을 사용하였다.

기호 설명

- $E_{c,v}$: 전도대(가전자대) 하단의 에너지
- $E_{f,tp}$: 전자(정공)의 의사 Fermi 준위
- E_g : 밴드갭 에너지
- E_i : 진성 Fermi 준위
- E_T : 트랩 에너지
- F : 전계
- h : Frank 상수
- \hbar : $=h/2\pi$
- m_b : reduced effective mass
- n : 전자농도
- n_i : 진성 운반자 농도
- $N_{D,P}$: Acceptor(donor) 농도
- $N_{c,v}$: 전도대(가전자대) 상태 밀도
- N_{th} : 가벼운 정공 가전자대 상태 밀도
- p : 정공 농도
- p_{th} : 가벼운 정공(light hole) 농도
- P : 밴드간 행렬 요소(interband matrix element)
- q : 전하량
- T : 온도
- $U_{c,v}$: 트랩-전도대(가전자대)간의 천이 확률
- $U_{c,t}$: 전도대-트랩-가전자대 간의 천이 확률
- U_{th} : 열적 재결합 확률
- U_{dir} : 직접 터널링 확률
- V : 인가 바이어스
- V_o : 내부 전위
- W : 공핍층의 폭
- C_{np} : 전도대(가전자대)로부터의 열적 포획 상수
- $\tau_{np,pt}$: 전자(정공)의 열적 재결합 시간
- $\omega_{c,v}$: 트랩-전도대(가전자대)간의 터널링 륜
- τ_{np} : 전자(정공)의 터널링-재결합 시간

그리고 본 논문에서는 조성비가 0.29와 0.222인 HgCdTe 반도체 재료로 제작된 광 다이오드의 암전류의 주된 성분인 트랩을 통한 터널링 전류와 직접 터널링 전류를 계산하였다. 이 결과로부터 소자에서 발생할 수 있는 터널링 전류의 메카니즘을 밝혔다. 즉 역방향 바이어스가 인가된 경우에 트랩을 경유하는 터널링 전류의 온도 특성과 밴드간 직접 터널링 전류의 온도 특성을 보였다. 그리고, 특정 온도에서 바이어스에 따른 전류 성분의 변화 모습을 보임으로써 바이어스에 따른 주된 전류 성분을 알 수 있었다. 또한, 실험 결과와 간접적으로 비교함으로써 본 논문에서 사용된 수식이 소자의 터널링 특성을 잘 표현하고 있음을 알았다.

2. 터널링 전류 계산

트랩을 경유하는 터널링 천이는 트랩을 거쳐서 터널

링하기 때문에 열적 천이와 같은 메카니즘으로 생각할 수 있다. 그러나 터널링 천이와 열적 천이의 차이가 있다면, 터널링 천이의 경우 전도대에서 트랩으로 혹은 트랩에서 가전자대로의 천이가 에너지가 보존되는 터널링에 의한 것이고 열적 천이의 경우는 에너지의 변화가 있는 열적 방출이나 포획에 의한 것이라는 점이다. 이와 같은 기본적인 생각에서 트랩을 통한 천이 확률을 계산하면^[12]

$$U_{ct} = \frac{n(x)p(x) - n_i p_i}{\tau_p'(n(x) + n_i) + \tau_n'(p(x) + p_i)} \quad (1)$$

이 된다. 이식에서, τ_n' , τ_p' 는 터널링 성분과 열적 재결합 성분을 포함하는 터널링-재결합 시간으로 아래식과 같이 표시된다.

$$\tau_p' = \frac{1}{N_T(c_p + \omega_c')} \quad \tau_n' = \frac{1}{N_T(c_n + \omega_v')} \quad (2)$$

로 표시된다. 이때 터널링 계수 ω_c' , ω_v' 는 다음과 같이 표시된다.

$$\omega_c' = \omega_c \exp((E_c - E_T)/kT) = \omega_c N_c / n_i \quad (3)$$

$$\omega_v' = \frac{N_{vh}}{N_v} \omega_v \exp((E_T - E_v)/kT) = \omega_v N_{vh} / p_i \quad (4)$$

이때, $\omega_c N_c$ 와 $\omega_v N_{vh}$ 은 터널링율로서 Hoffman과 Anderson에 의하여 계산된 결과를 사용하였다.^[1] 즉, 전도대-트랩간의 터널링 률 $\omega_c N_c$ 를 표시해 보면,

$$\omega_c N_c = \frac{n^2 q (v_o - V) m^* |W_c|^2}{h^3 (E_C - E_T) W} \exp(-2\theta_c) \sec^{-1} \quad (5)$$

로 나타낼 수 있으며, 이때 θ_c 는 아래식과 같다.

$$\theta_c = \frac{\sqrt{3} W E_C}{8 \sqrt{2} P (V_o - V)} \left[\frac{\pi}{2} + \sin^{-1}(1 - 2\alpha) + 2(1 - 2\alpha) \sqrt{\alpha(1 - \alpha)} \right] \quad (6)$$

여기에서, $\alpha = E_T / E_C$ 이다. 가전자대-트랩간의 터널링은 세개의 가전자대 중에서 가벼운 정공(light hole) 가전자대만이 터널링에 관여한다고 가정하였기 때문에^[1,2] 식 (4)에서 가전자대의 상태 밀도를 가벼운 정공 가전자대의 상태밀도로써 표시하였다.

이 관계식은, 터널링 성분이 없으면, ω_c' , ω_v' 은 영이 되고, 따라서 $\tau_n' = \tau_{no}$, $\tau_p' = \tau_{po}$ 로 되기 때문에 U_{ct} 식은 일반적인 SRH 재결합식과 같게 된다. 즉,

$$U_{th} = \frac{n(x)p(x) - n_i p_i}{\tau_{no}(n(x) + n_i) + \tau_{po}(p(x) + p_i)} \quad (7)$$

$$\tau_{po} = \frac{1}{N_T c_p} \quad \tau_{no} = \frac{1}{N_T c_n}$$

그리고, 전도대-트랩간의 터널링과 열적 재결합 성분만 존재하는 경우에는,

$$U_{ct} = \frac{n(x)p(x) - n_i p_i}{\tau_{po}(n(x) + n_i) + \tau_n'(p(x) + p_i)} \quad (8)$$

이며, 트랩-가전자대간의 터널링과 열적 재결합 성분만 존재하는 경우에는,

$$U_{ct} = \frac{n(x)p(x) - n_i p_i}{\tau_p'(n(x) + n_i) + \tau_{no}(p(x) + p_i)} \quad (9)$$

로 된다. 이상의 식들에서 보듯이 트랩을 경유하는 터널링 효과는 SRH 생성-재결합 식의 재결합 시간의 항으로 포함시켰다. 따라서 이들식은 공핍층 내에서 발생하는 트랩을 통한 천이 성분, 즉 터널링 천이와 열적 천이를 모두 포함하는 일반적인 식이 되었다. 또한 이 식은 터널링 천이가 없는 경우에도 적용할 수 있는 식이다.

이들 식을 이용하여 공핍층 내에서 발생하는 트랩을 경유하는 터널링-재결합 전류를 계산하기 위해서는 공핍층 내에서 위의 식들을 거리에 따라서 적분해야 한다. 그러나 위의 식들은 바로 적분하기가 힘들기 때문에 Sah, Noyce, Shockley에 의한 것과 같은 방법^[10]으로 선형적인 밴드 구조를 가정하여, U_{ct} 를 바꿔쓰면,

$$U_{ct} = \frac{ni}{\sqrt{\tau_p' \tau_n'}} \frac{\sinh(\frac{q}{2kT} V)}{A+B} \quad (10)$$

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

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

으로 표현된다. 이때 역방향 바이어스가 매우 커지면, 식 (10)에서 A항은 B항에 비해 작게됨으로 식 (10)은

$$U_{ct} \approx -n_i \left[\sqrt{\tau_p' \tau_n'} \cosh\left(\frac{E_T - E_i}{kT} + \frac{1}{2} \ln \frac{\tau_p'}{\tau_n'}\right) \right]^{-1} \quad (11)$$

으로 된다. 식 (10)과 식 (11)은 U_{ct} 에 대해서만 대표적으로 나타내었지만, 기타 다른 항도 같은 형태로 정리

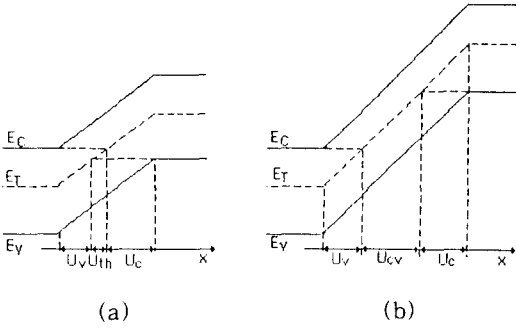


그림 1. n⁺-p 접합의 에너지 밴드와 각종 전이가 발생할 수 있는 구간
(a) 순바이어스 상태
(b) 역바이어스 상태

Fig. 1. Energy band of n⁺-p junction and the region of transitions.
(a) forward bias,
(b) reverse bias

될 수 있다. 따라서, 위에서 정리한 식을 거리에 따라 적분하게 되면, 터널링-재결합 전류식을 얻을 수 있다.

1) 순방향 바이어스에서의 트랩을 통한 터널링-재결합 전류

여기서 고려할 것은 전도대와 가전자대가 서로 중첩되지 않은 상황, 즉, n⁺측의 전도대 에너지가 p측의 가전자대 에너지보다 큰 경우이다. 이와 같은 경우는 순방향 바이어스가 인가된 상황으로 생각할 수 있는데 이때의 n-p 접합의 선형적인 밴드 구조, 그리고 공핍층 내에서 발생할 수 있는 전이과정과 구간을 그림 1.a 에 나타내었다. 이것을 표시해보면 다음과 같다.

$$\textcircled{1} 0 < x \leq \left(1 - \frac{E_T}{V_0 - V}\right) W :$$

가전자대-트랩 터널링과 열적 재결합

$$\textcircled{2} \left(1 - \frac{E_T}{V_0 - V}\right) W < x \leq \frac{E_C - E_T}{V_0 - V} W : \text{열적 재결합}$$

$$\textcircled{3} \frac{E_C - E_T}{V_0 - V} W < x \leq W$$

전도대-트랩 터널링과 열적 재결합

이상과 같은 구간에서 앞서 구한 터널링-재결합 식 (10)을 적분하면,

$$J_T = \int_0^{\left(1 - \frac{E_T}{V_0 - V}\right) W} U_i dx + \int_{\left(1 - \frac{E_T}{V_0 - V}\right) W}^{\frac{E_C - E_T}{V_0 - V} W} U_i dx + \int_{\frac{E_C - E_T}{V_0 - V} W}^W U_i dx$$

$$= \frac{qni}{\sqrt{\tau_n' \tau_p'}} \frac{W}{q(V_0 - V)/2kT} \sinh\left(\frac{qV}{2kT}\right) \times \left[f(b_1) \begin{vmatrix} z_2 \\ z_1 \end{vmatrix} + f(b_2) \begin{vmatrix} z_4 \\ z_3 \end{vmatrix} + f(b_3) \begin{vmatrix} z_6 \\ z_5 \end{vmatrix} \right] \quad (12)$$

과 같은 전류식을 얻을 수 있다. 이때,

$$f(b_k) = \int_{z_1}^{\tilde{z}_1 + t} \frac{1}{z^2 + 2b_k z + 1} dz \quad (13)$$

$$i=1, 2, 3, 4, 5 \quad k=1, 2, 3$$

여기서,

$$b_k = \exp(-qV/2kT) \cosh \left[\frac{E_T - E_i}{kT} + \frac{1}{2} \ln \frac{\tau_p}{\tau_n} \right] \quad (14)$$

$$z_i = \sqrt{\frac{\tau_p}{\tau_n}} \exp \left[\frac{q}{kT} \left(\frac{x_i}{W} - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (15)$$

이며, 식 (13), (14)에서 사용된 구간 z와 b에서 사용될 인수의 값은 표 1에 정리하였다.

2) 역방향 바이어스에서의 터널링 전류

이 경우는 전도대와 가전자대의 중첩이 발생한 상황, 즉 n⁺측의 전도대 에너지가 p측의 가전자대 에너지보다 작은 경우이다. 이때에는 아래와 같은 구간에서 트랩을 통한 간접 터널링이 발생할 수 있으며, 또한 밴드간 직접 터널링이 발생할 수 있다. 이 경우의 밴드 구조와 공핍층 내에서 발생할 수 있는 트랩을 경유하는 전이과정을 그림 1.b에 나타내었다.

$$\textcircled{1} 0 < x \leq \left(1 - \frac{E_C - E_T}{V_0 - V}\right) W :$$

가전자대-트랩 터널링과 열적 재결합

$$\textcircled{2} \left(1 - \frac{E_C - E_T}{V_0 - V}\right) W < x \leq \left(1 - \frac{E_T}{V_0 - V}\right) W :$$

전도대-트랩-가전자대 터널링과 열적재결합

$$\textcircled{3} \left(1 - \frac{E_T}{V_0 - V}\right) W \quad (x \leq W)$$

전도대-트랩 터널링과 열적 재결합

이때, 트랩을 통한 터널링-재결합 전류는 식 (11) 과 같이 아래처럼 계산된다.

$$J_T = \int_0^{(E_C - E_T)W/(V_0 - V)} U_c dx + \int_{(E_C - E_T)W/(V_0 - V)}^{(1 - E_T/V_0 - V)/W} U_c dx + \int_{(1 - E_T/V_0 - V)/W}^W U_{cv} dx + \int_{(1 - E_T/V_0 - V)/W}^W U_c dx$$

$$= \frac{qni}{\sqrt{\tau_n \tau_p}} \frac{W}{q(V_0 - V)/2kT} \sinh\left(\frac{qV}{2kT}\right) \times \left[f(b_1) \begin{vmatrix} z_2 \\ +f(b_2) \\ z_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} z_4 \\ +f(b_3) \\ z_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} z_6 \\ z_5 \end{vmatrix} \right] \quad (16)$$

이때, 사용된 $f(b_k)$, b_k , z_i 는 식 (12), (13), (14)와 같이 표현되며, 사용된 b_k 와 구간 z_i 에 관련된 인수는 표 1에 나타내었다.

또한, 밴드간 직접 터널링 전류는 밴드갭이 작은 MCT로 제작된 광검출소자에서는 매우 중요한 암전류 성분으로서 Chakraborty와 Biswas에 의해 유도된 식^[6]을 사용하였다. 이 식은 Kane의 직접 터널링 식보다 일반적인 식이라고 할 수 있다.^[6, 13]

$$U_{dir} = \frac{qE^2 m_r}{2\pi h^2 E_C^{1/2}} \frac{\exp\left[-\frac{\pi}{2E} \frac{E_C^{1/2} m_r^{1/2}}{qh}\right]}{1 + \exp\left[-\frac{\pi}{2E} \frac{E_C^{3/2} m_r^{1/2}}{qh}\right]} \quad (17)$$

III. 결과 검토 및 고찰

본 논문에서 유도한 터널링-재결합식을 $Hg_{0.71}Cd_{0.29}Te$ 로 제작된 $n^+ - p$ 접합에 적용하여 계산한 전류-전압 결과를 그림 2에 나타내었다. 이때 사용한 상수의 값은 Anderson과 Hoffman^[1]의 값과 같다. 그림 2에서 보듯이 단일 트랩을 통한 터널링을 고려하였기 때문에 터널 다이오드에서 나타나는 부성 저항 특성이 나타나고 있는데 이것은 터널 다이오드에서 보이는 직접 터널링 전류에 의한 현상이 아니라 트랩을 경유하는 간접 터널링 전류에 의한것이다.^[1, 13] 이는 Anderson과 Hoffman에 의하여 계산된 것과 같은 결과

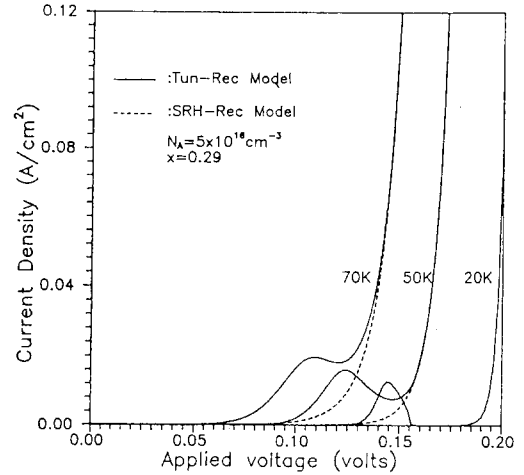


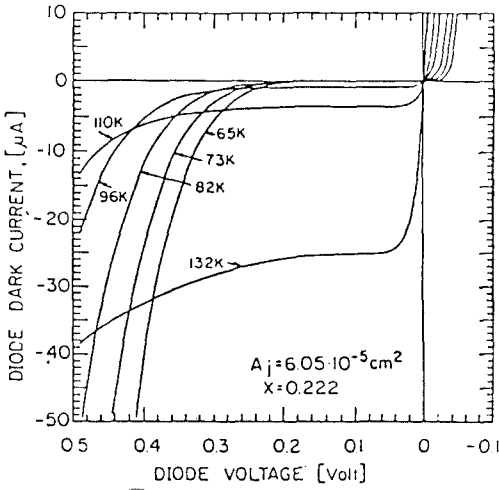
그림 2. $Hg_{0.71}Cd_{0.29}Te$ $n^+ - p$ 다이오드의 순방향 전류-전압 특성.
Fig. 2. The forward current-voltage characteristics for $Hg_{0.71}Cd_{0.29}Te$ $n^+ - p$ diode.

이다. 본 논문에서도 Anderson과 Hoffman의 연구와 같이 트랩이 $0.7E_C$ 의 위치에 있다고 가정하였기 때문에 이때 나타나는 터널링전류는 주로 전도대-트랩 터널링에 의한 것이다.

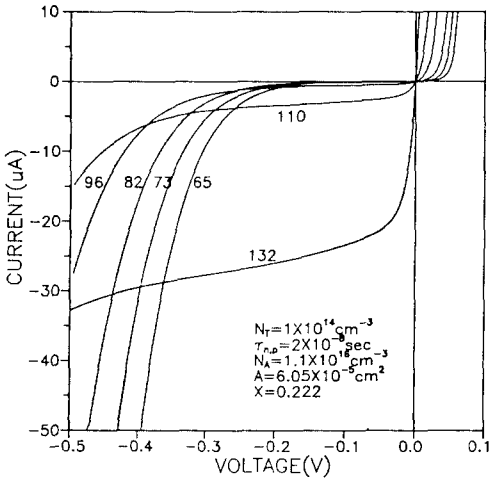
그림 3.a에는 조성비 $x=0.222$ 인 광검출소자의 전류-전압 측정치를 타내고 있다.^[3] 이 소자의 단면적은 $6.05 \times 10^{-5} cm^2$ 이고 $N_A = 1.1 \times 10^{16} cm^{-3}$ 이다. 이 소자에 대하여 앞절에서 유도한 전류식에 의하여 전류-전압 특성을 계산하여 그림 3.b에 나타내었다. 계산값과 실험 결과의 특성이 대체로 일치된 결과를 얻고 있음을 이들 그림으로부터 알 수 있다.

그림 3.b의 결과를 살펴보면 온도가 높을 때는 진성 운반자 농도가 대체로 높게 되고, 에너지 밴드의 휨 정도가 상대적으로 약하기 때문에(즉, 약한 전계 형성) 터널링에 의한 전류라기 보다는 재결합 전류가 주가되므로 바이어스에 따른 변화가 심하지 않게 나타난다. 그러나 온도가 낮아지면, 터널링 확률이 높아지게 됨으로 재결합 전류보다는 터널링 전류가 주된 전류가 된다. 특히 역방향 바이어스가 증가함에 따라 직접 터널링 전류 성분이 전체 전류를 주도하기 때문에 급격한 기울기를 갖는 터널링 전류를 얻을 수 있다.

그림 4에는 전도대-트랩-가전자대를 경우하는 간접 터널링-재결합 전류 성분을 온도에 따라서 나타내고 있다. 이 그림으로부터 온도가 높은 경우에는 터널링 전류 성분 보다는 대부분의 전류가 열적 재결합 전류라는 것을 알 수 있으며, 온도가 낮을수록 터널링 확률이 증가하기 때문에 역 방향 바이어스의 증가에 따라



(a)



(b)

그림 3. (a) 조성비 0.222인 MCT n⁺-p 다이오드의 전류-전압 특성^[3]

(b) 조성비 0.222인 MCT n⁺-p 다이오드의 전류-전압 특성의 계산치

Fig. 3. (a) Experimental Current-Voltage characteristics for MCT n⁺-p diode(x=0.222).

(b) The temperature dependence of conduction band-trap-valence band tunneling-recombination current.

서 간접 터널링 전류가 커지고 있음을 볼 수 있는데, 이는 트랩을 통한 터널링 성분이 온도가 낮을수록 전계에 민감한 함수로 된다는 것을 보여주는 것이다.

직접 터널링 전류의 온도 의존성은 그림 5에 나타내었다. 앞서 예상한 바와 같이 직접 터널링 전류는 온도

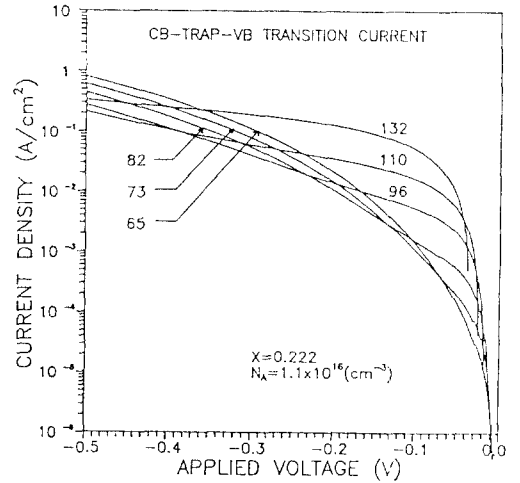


그림 4. 전도대-트랩-가전자대 터널링-재결합 전류의 온도 의존성

Fig. 4. The temperature dependence of conduction band-trap-valence band tunneling-recombination trap-valence.

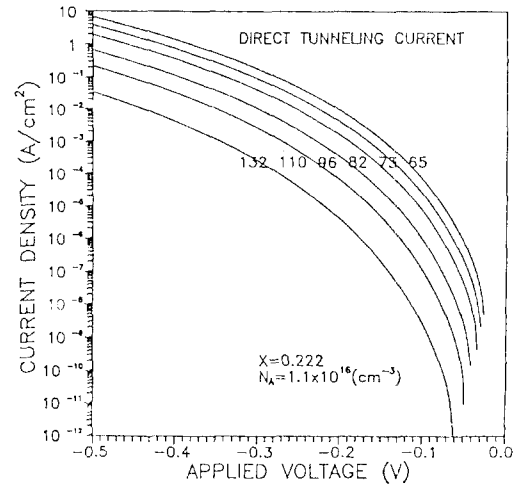


그림 5. 직접 터널링의 온도에 대한 의존성

Fig. 5. The temperature dependence of direct tunneling current.

가 감소할수록 큰 전류 성분을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 그리고 바이어스가 증가함에 따라서 매우 큰 전류를 나타내게 된다.

그림 6에서는 온도 T=65K에서 각종 전류 성분을 표시하였다. 이 그림에서 보면, 낮은 인가 전압에서는 전도대-트랩 간의 터널링-재결합 전류가 전체 전류를 주도하고 있다. 이것은 트랩의 위치를 0.7E_G로 가정하

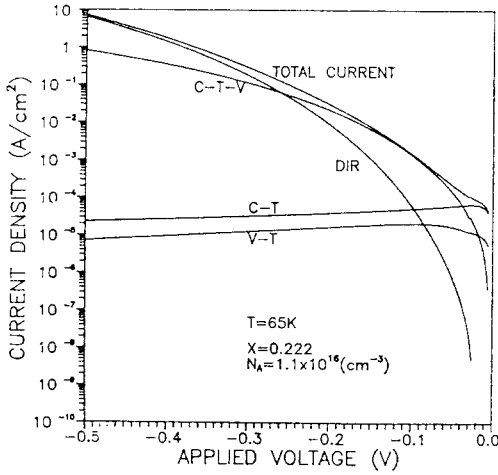


그림 6. T=65K일 때의 전류 성분
Fig. 6. The various current components at T=65K.

있기 때문에 낮은 전압에서는 대체로 공핍층의 많은 부분에서 전도대-트랩간의 터널링이 발생하기 때문이다. 그러나 인가 전압이 증가할수록 전도대-트랩-가전자대로 이어지는 터널링-재결합 전류가 큰 기울기로 증가한다. 또한 전도대와 가전자대간의 직접 터널링 전류는 전체에 매우 민감한 함수 이므로 바이어스가 증가함에 따라서 주된 전류 성분으로 작용하게 됨을 볼 수 있다. 그림 6에서 보면, 전도대-트랩 혹은 가전자대-트랩의 전류는 바이어스에 따라서 조금씩 감소하는 현상이 나타나는데, 이는 다음과 같이 설명된다. 공핍층내의 운반자 농도를 무시한 경우, 전도대-트랩간의 터널링 전류는

$$J_2 = \frac{-qn_i^2}{\tau_p n_i + \tau_n' p_i} W_1 = \frac{-qN_T c_p p_i (c_n n_i + \omega_c N_c)}{c_n n_i + c_p p_i + \omega_c N_c} W_1 \quad (17)$$

로 근사적으로 표시할 수 있다. 그리고 역방향 바이어스가 강하게 인가된 경우 $c_n n_i + c_p p_i \ll \omega_c N_c$ 이므로, 식 (17)은

$$J_c = -qN_T N_c c_p p_i W_1 \quad (18)$$

가 된다. 식 (18)을 살펴보면, 전류 J_c 에 기여하는 모든 성분들은 공핍층의 폭만 제외하면, 전압의 변화에 무관한 값이다. 그런데 공핍층의 폭 W_1 는 역방향 바이어스가 증가될 수록 계속해서 줄어들게 되고 따라서

전류는 전체적으로 줄어드는 경향을 보인다. 식 (18)은 Nemirovsky 등^[11]에 의하여 유도된 thermal-trap-assisted 터널링 전류의 표현식과 같은 것이다. 가전자대-트랩 터널링도 마찬가지로 경향을 보인다.

그러나 전도대-트랩-가전자대를 경유하는 터널링 전류는 직접 터널링 보다는 적은 기울기를 갖지만 역방향 바이어스가 증가함에 따라 상당히 급격히 증가하게 된다. 이를 정량적으로 살펴보면, 다음과 같다. 전도대-트랩-가전자대를 경유하는 터널링 전류 J_{ct} 는

$$J_{ct} = \frac{-qn_i^2}{\tau_p' n_i + \tau_n' p_i} W_2 \quad (19)$$

이다. 이때 역방향 전압이 매우 크게 되면, 터널링 확률이 열적 포획 단면적에 비하여 커지게 되고 터널링-재결합 시간은 $\tau_n' = 1/N_T \omega_c$ 그리고 $\tau_p' = 1/N_T \omega_v$ 으로 근사된다. 따라서,

$$J_{ct} = \frac{-q(c_n n_i + \omega_c N_c)(c_p p_i + \omega_v N_{vth})}{(c_n n_i + \omega_c N_c)(c_p p_i + \omega_v N_{vth})} W_2 = \frac{-q\omega_v N_c \omega_v N_{vth}}{\omega_v N_c + \omega_v N_{vth}} W_2 \quad (20)$$

이때, $\omega_c N_c \gg \omega_v N_{vth}$ 라고 근사적으로 생각하면,

$$J_{ct} = -qN_T \omega_c N_{vth} W_2 \quad (21)$$

로 된다. 식 (21)에서 보면, $\omega_v N_{vth}$ 도 전체에 대해 지수함수적인 의존성을 가지므로, 전체적인 트랩을 통한 터널링 전류는 바이어스에 따라서 급격한 증가를 하게 된다. 그러나, 온도가 매우 낮으면, 밴드간 직접 터널링 전류가 트랩을 경유하는 전류보다 바이어스에 따라서 급격한 증가를 하게 된다. 따라서 전체적인 터널링 전류는 낮은 역 바이어스 상태에서는 트랩을 통한 간접 터널링 전류가 그리고 큰 역 바이어스가 인가되면, 밴드간 직접 터널링 전류가 주된 암전류를 구성하고 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는, 순방향 바이어스나 약한 역방향 바이어스 그리고 높은 온도에서 주된 암전류 성분으로 작용하는 단일 트랩을 통한 터널링 전류를 해석할 수 있는 SRH 재결합 식 형태의 터널링-재결합 식을 사용하여 트랩을 경유하는 터널링-재결합 전류를 계산하였다. 이때 트랩을 통한 터널링은 기본적으로 트랩을 경유한다는 면에서 SRH 재결합 과정과 같은 과정이기

표 1. b 값과 구간 z에 사용되는 파라미터
Table 1. The parameters used in calculation
of a and range z.

	순방향 바이어스 상태	역방향 바이어스 상태
b	$k=1 \tau_n = \tau_{n0}, \tau_p = \tau_{p0}$	$k=1 \tau_n = \tau_{n0}, \tau_p = \tau_{p0}$
	$k=2 \tau_n = \tau_{n0}, \tau_p = \tau_{p0}$	$k=2 \tau_n = \tau_n', \tau_p = \tau_p'$
	$k=3 \tau_n = \tau_n', \tau_p = \tau_{p0}$	$k=3 \tau_n = \tau_n', \tau_p = \tau_{p0}'$
z	$x_1=0$	$x_1=0$
	$x_2 = (1 - \frac{E_T - E_1}{V_0 - V})W$	$x_2 = \frac{E_G - E_1}{V_0 - V} W$
	$\tau_n = \tau_{n0}, \tau_p = \tau_{p0}$	$\tau_n = \tau_{n0}, \tau_p = \tau_{p0}'$
	$x_3 = x_2$	$x_3 = x_2$
	$x_4 = \frac{E_G - E_1}{V_0 - V} W$	$x_4 = (1 - \frac{E_T}{V_0 - V})W$
	$\tau_n = \tau_{n0}, \tau_p = \tau_{p0}$	$\tau_n = \tau_n', \tau_p = \tau_{p0}'$
	$x_5 = x_4$	$x_5 = x_4$
	$x_6 = W$	$x_6 = W$
	$\tau_n = \tau_n', \tau_p = \tau_{p0}'$	$\tau_n = \tau_n', \tau_p = \tau_{p0}'$

때문에 트랩을 통한 터널링 효과를 SRH 재결합 시간에 포함시키는 형태로 고려하였다. 본 연구에서 유도한 터널링 재결합 식은 SRH 재결합 식과 같은 형태를 취하고 있으므로 SRH 재결합 전류를 계산하는 방법을 변환시키지 않고서도 터널링 전류를 해석적으로 계산할 수 있었다. 또한 낮은 온도나 높은 역방향 바이어스 상태에서 주된 암전류 성분을 이루고 있는 직접 터널링 성분을 해석하기 위하여 Kane의 모델식보다 일반적이라고 할 수 있는 Chakraborty와 Biswas의 직접 터널링 모델을 도입하였다.

본 논문에서는 조성비 $x=0.29$ 인 MCT로 제작된 $n^+ - p$ 접합 소자에 적용하여 순바이어스 상태에서 트랩을 통한 터널링 재결합 전류를 계산하여 부성저항 특성을 확인하였는데 이는 Anderson과 Hoffman의 결과와 잘 일치하는 것이었다. 또한 조성비가 0.222인 $n^+ - p$ 접합 다이오드에 적용하여 터널링 전류를 계산하였다. 이때 공핍층에서 발생하는 트랩을 통한 터널링-재결합 전류의 온도에 대한 의존성을 보였으며, 또한 밴드간 직접 터널링 전류의 온도에 대한 의존성도 보였다. 그리고 특정 온도($T=65K$)에서 터널링 전류를 성분별로 분석함으로써 인가 바이어스에 따른 주된 전류 성분을 보였다. 그리고 본 논문의 결과를 실험 결과와 비교하였다.

參 考 文 獻

- [1] W. W. Anderson, H. J. Hoffman, "Field ionization of deep levels in semiconductors with applications to $Hg_{1-x}Cd_xTe$ p-n Junctions," J. of Appl. Phys. vol. 53, no. 12, pp. 9130-9145, 1982
- [2] J. P. Omaggio, "Analysis of dark current in IR detectors on thinned p-type HgCdTe," IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 37, no. 1, pp. 141-152, 1990
- [3] 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
- [4] W. A. Beck, N. E. Byer, "Calculation of tunneling currents in (Hg, Cd)Te photodiodes using a two-sided junction potential," IEEE Tras. on Electron Devices, vol. ED-31, no. 3, pp. 292-297, 1984
- [5] V. Gopal, V. Dhar, "Zener current contribution to the resistance area product of 8 to 14-um $Hg_{1-x}Cd_xTe$ photodiodes," IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-33, no. 6, pp. 1489-1493, 1986
- [6] P. K. Chakraborty and J. C. Biswas, "Theory of interband tunneling in semiconductor," Solid State Electronics, vol. 28, no. 5, pp. 493-497, 1985
- [7] 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
- [8] 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. 629-631, 1986
- [9] G. A. M. Hurkx, F. G. O'Hara, M. P. G. Knuyvers, "Modeling forward-biased tunneling," ESSDERC '89, pp. 794-796, 1989
- [10] 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
- [11] Y. Nemirovsky, R. Fastow, M. Meyassed, A.

Unikovsky, "Trapping effects in HgCdTe,"
J. Vac. Sci. Tech., vol. B9, no. 3, pp.
1829-1839, 1991

- [12] 박 장우, 곽 계달, "트랩을 통한 열적 천이와 터널링 천이를 동시에 고려할 수 있는 터널링 모델에 관한 연구", 전자공학회 논문지, 제 29권, A권 제8호, pp. 682-688, 1992
- [13] W. W. Anderson, "Field induced tunneling in

Hg_{1-x}Cd_xTe photodiodes," Appl. Phys. Lett.,
vol 41, no. 11, pp. 1080-1082, 1982

감사의 글

저자들은 본연구에 지대한 관심을 갖고 아낌없는 지원을하여주신 국방과학연구소 기술연구본부 3부 김재묵 부장님과 그 부원들께 감사드립니다.

著 者 紹 介

朴 長 雨 (正會員) 第29卷 第8號 參照
현재 한양대학교 대학원
전자공학과 박사과정 재학중

郭 桂 達 (正會員) 第27卷 第7號 參照
현재 한양대학교
전자공학과 교수
