

# Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 광다이오드에서 터널링 전류가 RoA에 미치는 영향

(Tunneling Current Contribution to RoA of Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te Photodiodes)

朴 長 雨\*, 郭 桂 達\*

(Jang Woo Park and Kae Dal Kwack)

## 要 約

RoA는 p-n 접합 적외선 감지소자의 성능을 평가하는 중요한 성능 지수이다. 본 논문에서는 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te n<sup>+</sup>-p 접합 광다이오드에서 터널링 전류가 RoA에 미치는 영향을 조사하였다. 이때 RoA를 계산하기 위하여 고려한 것은 확산모델, 열적 생성-재결합 모델, 트랩을 경유하는 간접 터널링 모델, 그리고 밴드간 직접 터널링 모델 등이다. 이상의 모델들을 사용하여 온도에 따른, 농도에 따른, 그리고 조성비에 따른 RoA의 변화를 계산하였다. 또한, 이상의 결과로부터 여러가지 조건하에서 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 광다이오드의 주된 암전류 성분을 파악할 수 있었다.

## Abstract

RoA is an important figure of merits for estimating the performance of p-n junction infrared detectors. This paper presents the tunneling current contribution to RoA of Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te n<sup>+</sup>-p junction photodiodes. Then, a diffusion model, a thermal generation-recombination model, an indirect tunneling model via trap, and a band-to-band direct tunneling model are considered to calculate RoA. Using these models, RoA depending on temperature, doping concentration, and mole fraction is calculated. Also from these results, under various operating conditions the dominant dark current mechanisms can be understood.

## I. 서 론

MCT(Mercury-Cadmium-Telluride, Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te)로 제작된 n<sup>+</sup>-p 접합 광 다이오드의 성능을 평가하는 중요한 지표는 RoA 곱, 즉, zero 바이어스 저항과 단면적의 곱으로 다음식과 같이 계산된다.<sup>[1, 2, 3]</sup>

$$RoA = \left[ \frac{dV}{dJ} \right]_{V=0} \quad (1)$$

소자가 효율적이고 낮은 잡음 상태에서 동작하기 위해서는 RoA값이 높아야만 한다. 또한, RoA 곱은 빛이 없는 상태에서 소자내에서 주된 전류 성분을 명확히 구분할 수 있게 해주는 성능 지수이다.

그림 1에는 Hg<sub>0.71</sub>Cd<sub>0.29</sub>Te로 제작된 n<sup>+</sup>-p 접합 광다이오드의 온도에 따른 RoA 값을 나타 내었다.<sup>[4]</sup> 이그림으로부터 온도별 주된 전류 메카니즘을 구분할 수 있다. 즉, 높은 온도에서는 n<sub>1</sub><sup>-2</sup>에 비례하는 확산 전류에 의한 RoA가 주도적으로 나타나며, 온도가 낮아 짐에 따라

\*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

서 공핍층 내에서 발생하는 SRH(Shockley-Read-Hall) 생성 재결합 전류에 의한 RoA 값이 주도하게 되어서 n<sub>i</sub><sup>-1</sup>에 비례하는 온도 특성을 나타내게 된다. 그러나, 그 이하의 온도로 내려가게 되면 이들 두 모델에 의해서는 설명할 수 없는 특성을 보이게 되는데, 이와 같은 현상은 다른 논문들에서도 보이고 있다.<sup>[2, 5]</sup> 따라서, 본 논문에서는 이 특성을 설명할 수 있는 터널링 모델을 제시하고자한다. 그리고 본 논문에서 유도된 식들을 이용하여 여러 조건에서 RoA 값을 계산함으로써 MCT로 제작된 광 다이오드의 특성을 파악하고자 한다.

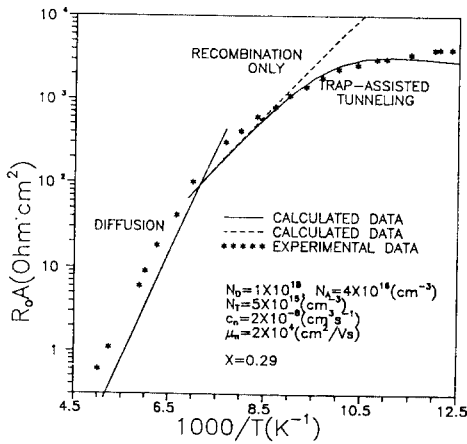


그림 1. RoA의 온도에 따른 변화  
Fig. 1. Temperature dependence of RoA.

II. RoA 계산식의 유도

1. 확산 모델

이상적인 다이오드에 순방향 바이어스가 인가된 경우, 확산 전류는 아래식과 같이 구할 수 있다.

$$J_{diff} = J_0 \exp(qV/kT) \tag{2}$$

따라서 RoA는

$$(Ro \cdot A)_{diff} = \left. \frac{dV}{dJ_{diff}} \right|_{V=0} = \frac{kT}{qJ_0} \tag{3}$$

J<sub>0</sub>는 역포화 전류로써 p-n접합 양측의 소수 운반자에 의한 전류의 합으로 주어진다. 이때 역포화 전류는 p 영역에서의 소수 캐리어인 전자 전류에 의하여 주로 구성된다고 가정하면, 확산 전류에 의한 (RoA)<sub>diff</sub>는

$$\begin{aligned} (Ro \cdot A)_{diff} &= \frac{kT}{q^2} \frac{N_A}{n_i^2} \left[ \frac{\tau_n}{D_n} \right]^{1/2} \\ &= \frac{1}{q} \frac{N_A}{n_i^2} \left[ \frac{kT}{q} \frac{\tau_n}{\mu_n} \right] \end{aligned} \tag{4}$$

이 된다.<sup>[4, 5]</sup> 여기에서 k는 Boltzmann 상수, T는 소자의 동작 온도, q는 전하량, N<sub>A</sub>는 p 영역의 도핑 농도, n<sub>i</sub>는 진성 캐리어 농도이며, τ<sub>n</sub>는 전자의 평균 재결합 시간, 그리고 D<sub>n</sub>과 μ<sub>n</sub>은 각각 전자의 확산 계수와 이동도이다. 식 (4)에서 보듯이 확산 전류에 의한 (RoA)는 n<sub>i</sub><sup>2</sup>에 비례하는 온도 특성을 갖는 것을 알 수 있다.

2. 공핍층내에서 트랩을 통한 간접 터널링 모델

만약 공핍층내에서 SRH 트랩 중심을 경유하는 재결합이 발생할 때, SRH 트랩 에너지가 진성 Fermi 준위와 같다고 가정하면, 공핍층 내에서의 SRH 생성-재결합 전류는

$$J_{t-r} = \frac{-q n_i}{\tau_{no} + \tau_{po}} W \tag{5}$$

로 표시되며, 따라서 SRH 생성-재결합 모델에 의한 RoA는 아래식과 같이 간단히 표시할 수 있다.<sup>[4]</sup>

$$(Ro \cdot A)_{t-r} = \frac{V_0 \tau_0}{q n_i W} \tag{6}$$

여기서 τ<sub>0</sub>는 평균 운반자 수명이다. 그리고 V<sub>0</sub>는 내부 전위, W는 공핍층의 폭이다. 이 생성-재결합에 의한 RoA는 n<sub>i</sub><sup>-1</sup>에 의존하는 특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

그림 1에서 볼 수 있듯이, 위에서 설명한 확산 모델에 의한 RoA는 높은 온도에서의 RoA를 효과적으로 설명할 수 있으며, 생성-재결합 모델에 의한 RoA는 어느 정도 낮은 온도 범위까지의 RoA를 설명할 수 있지만, 매우 낮은 온도 경우의 특성을 설명할 수 없다. 즉, 매우 낮은 온도 범위에서는 확산 모델이나 열적 생성-재결합 모델과는 다른 모델이 포함되어야 함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 터널링 모델을 포함시켜서 이현상을 설명하고자한다.

우선 트랩을 경유하는 간접 터널링 모델에 관하여 설명하도록 한다. 계산의 편의를 위해서 트랩의 에너지와 진성 Fermi 에너지는 에너지갭 중앙에 있다고 가정하고, 전자의 터널링-재결합 시간과 정공의 터널링-재결합 시간은 같으며 공핍층 내에서 캐리어 농도를 무시하면, 참고 문헌 [6]의 결과로부터,

$$J_{TAT} = q \frac{n_i}{2\tau_n'} W \tag{7}$$

와 같은 트랩을 통한 터널링-재결합 전류를 얻을 수 있다. 이때, 전자의 터널링-재결합 시간,  $\tau_n'$ 은

$$\tau_n' = \frac{1}{N_T(c_n + \omega_c')} \tag{8}$$

이다. 식(8)에서  $N_T$ 는 트랩의 밀도이고  $c_n$ 은 열적 포획 계수, 그리고  $\omega_c'$ 은 터널링 효과를 고려하는 항이다. 여기서  $\omega_c'$ 은 다시 간략히 표시하면, 참고 문헌[6]과 [7]으로부터

$$\omega_c' = \beta E \exp(-2\alpha/E)n_i \tag{9}$$

가 얻어진다. 이때

$$\beta = \frac{\pi^2 q m^* |W_c|^2}{h^3(E_C - E_T)} \tag{10}$$

$$\alpha = \pi \sqrt{3} E_C^2 / (18 \sqrt{2} P) \tag{11}$$

가 된다. 여기에서,  $q$ 는 전하량,  $m^*$ 는 전자의 유효질량,  $h$ 는 Frank 상수,  $E_C$ 는 밴드갭 에너지,  $E_T$ 는 트랩의 에너지이고,  $E$ 는 전계이다. 그리고  $W_c$ 는 트랩과 밴드간의 상호작용을 나타내는 터널링 천이 행렬 요소이고  $P$ 는 Kane의 행렬요소이다. 따라서 식(9)를 식(8)에 대입하면,

$$J_{TAT} = q n_i N_T (c_n + \omega_c')W \tag{12}$$

을 얻을 수 있다. 그리고,  $(RoA)_{TAT}$ 는

$$\begin{aligned} (Ro \cdot A)_{TAT} &= \left. \frac{dV}{dJ_{TAT}} \right|_{V=0} \\ &= \left[ \frac{\partial J_{TAT}}{\partial E} \frac{\partial E}{\partial(V_o - V)} \right]^{-1} \Bigg|_{V=0} \end{aligned} \tag{13}$$

로 표시할 수 있다. 이때,

$$\frac{\partial J_{TAT}}{\partial E} = q n_i N_T \frac{W^2}{V_o - V} [c_n + 2(1 + \alpha/E)\omega_c'] \tag{14}$$

이고,

$$\frac{\partial E}{\partial(V_o - V)} = \frac{1}{W} \tag{15}$$

이므로, 트랩을 경유하는 터널링 모델에 의한 RoA는 이 래식과 같이 주어진다.

$$(RoA)_{TAT} = \frac{V_o}{qn_i N_T W} \frac{1}{c_n + 2(1 + \alpha/E)\omega_c'} \tag{16}$$

이 식을 살펴보면 온도가 높은 경우나 혹은 밴드 갭이 매우 큰 경우에  $c_n \gg 2(1 + \alpha/E)\omega_c'$ 와 같은 조건이 만족하면,  $(RoA)_{TAT} = (RoA)_{g-r}$ 이 된다. 그러나 온도가 낮아지게 되거나 밴드 갭 에너지가 매우 작은 경우에는 쉽게 터널링이 발생할 수 있기 때문에  $2(1 + \alpha/E)\omega_c' \gg c_n$ 인 조건이 됨으로

$$(RoA)_{TAT} = \frac{V_o}{qn_i N_T W} \frac{1}{2(1 + \alpha/E)\omega_c'} \tag{17}$$

로 근사될 수 있다. 즉, 열적 천이보다 트랩을 경유하는 터널링 천이가 RoA에 보다 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

### 3. 직접 터널링 성분

MCT n<sup>+</sup>-p 접합 다이오드의 동작 온도가 극히 낮거나 양측의 도핑 농도가 매우 높아서 공핍층의 폭이 매우 작을 때, 그리고 조성비가 낮아서 에너지갭이 극히 작게 되는 경우에는 직접 터널링 전류에 의한 RoA가 주도하게 된다. 직접 터널링에 의한 RoA를 계산하기 위하여 Kane에 의하여 유도된 직접 터널링 식<sup>[8]</sup>을 쓰면,

$$U_{DIR} = \frac{q^2 m_r^{1/2} E^2}{18\pi\hbar^2 E_C^{1/2}} \exp \left[ - \frac{\pi m_r^{1/2} E_C^{3/2}}{2\hbar q E} \right] \tag{18}$$

이다. 여기에서  $m_r$ 은 reduced 유효질량이다. 이 직접 터널링 식에 의하여 공핍 층내에서 발생하는 터널링 전류를 계산하면,

$$\begin{aligned} J_{DIR} &= q U_{dir} W \\ &= a W E^2 \exp(-b/E) \end{aligned} \tag{19}$$

이 되며, 여기서

$$a = \frac{q^3 m_r^{1/2}}{18\pi\hbar^2 E_C^{1/2}} \tag{20}$$

$$a = \frac{\pi m_r^{1/2} E_C^{3/2}}{2\hbar q} \tag{21}$$

이다. 따라서 직접 터널링 모델에 의한  $(RoA)_{DIR}$ <sup>[11]</sup>은

$$(RoA)_{DIR} = \frac{dV}{dI_{DIR}} \Bigg|_{V=0} = \frac{2}{a(3E+b)} \exp(b/E) \quad (22)$$

을 얻을 수 있다.

### III. 결과 검토 및 토의

본 논문에서 고려한 수치들의 타당성을 검토하기 위하여, 그림 5에서는 조성비가 0.29인 경우에 계산된 RoA의 결과를 실험 결과<sup>[1]</sup>와 비교하였다. 그림 1에서 보듯이 온도가 높은 경우에는 확산 모델에 의한 RoA에 의하여, 그리고 중간 정도의 온도에서는 생성-재결합 모델에 의한 RoA에 의하여 실험결과를 설명할 수 있다. 그러나, 온도가 더욱 낮아지면, 생성-재결합 모델에 의해서는 더이상 설명될 수 없다. 따라서 본 논문에서는 이 현상을 터널링 모델에 의하여 설명하였다. 즉, 본 논문에서 살펴본 바로는 그림에서와 같이 온도가 낮아짐에 따라서 발생하는 RoA의 감소는 간접 터널링 모델에 의해서 설명할 수 있는 것이다. 즉, 온도가 낮아짐에 따라서 간접 터널링률  $\omega'$ 이 전자의 포획 단면적의 크기에 육박할 정도로 커지게 되며, 따라서 RoA는 생성-재결합 모델에 의한 RoA보다 감소하게 되리라 생각된다. 이때 직접 터널링 효과는 밴드갭 에너지가 크기 때문에 보다 낮은 온도에서 발생하리라 예상된다.

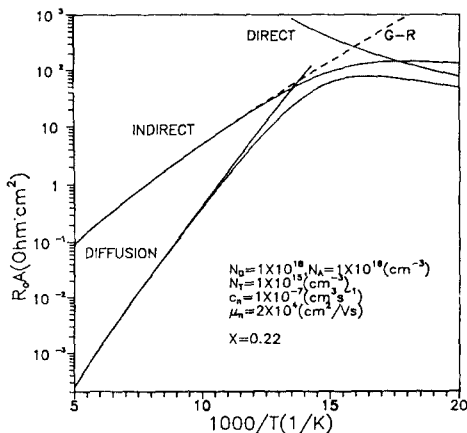


그림 2. 조성비가 0.22인 경우 RoA의 온도에 따른 변화  
Fig. 2. The dependence of RoA on temperature at x=0.22.

그림 2에서부터 7까지는 RoA의 온도에 따른 변화를 나타내었다. 그림 2는 조성비 0.22인 경우의 RoA 특성을 나타내었다. 이 그림을 살펴보면 온도가 높은 경우에는 전성 운반자 농도가 크기 때문에 주로 확산 모델에 의하여 주도되며, 온도가 감소함에 따라서 트랩을 통한 간접 터널링 모델에 의해서 전체적인 RoA가 주도되며, 그 이하로 온도가 내려가면 직접 터널링 모델에 의한 결과의 지배를 받게 된다. 그림 3은 조성비 0.24인 경우의 특성을 보이고 있는데, 그림 2에서와는 달리 조성비가 증가하여 에너지갭이 증가하였기 때문에 직접 터널링 모델에 의한 영향은 보이지 않는다. 이와 같이 조성비가 증가하는 경우에는 보다 낮은 온도에서 직접 터널링의 효과가 나타나게 되리라 예상할 수 있다.

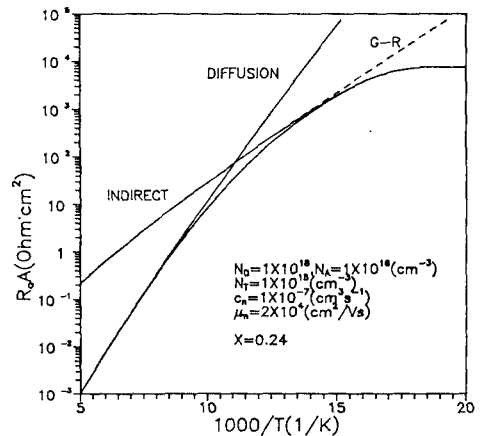


그림 3. 조성비가 0.24인 경우 RoA의 온도에 따른 변화  
Fig. 3. The dependence of RoA on temperature at x=0.24.

그림 4에서는 트랩을 통한 간접 터널링 모델에 의한 RoA의 온도에 따른 변화를 나타내고 있다. 이 그림으로부터 명확히 알 수 있는 것은 조성비가 낮아서 에너지갭이 작은 경우에는 상대적으로 높은 온도에서도 트랩을 통한 간접터널링 효과가 나타나기 시작한다는 것이다. 그리고 조성비가 커지면 밴드갭이 증가하기 때문에 터널링 효과는 상당히 낮은 온도에서 영향을 주게 된다.

그림 5는 조성비가 0.29인 경우 p 영역의 농도에 따른 RoA의 변화를 나타내고 있다. N<sub>A</sub>가 높은 경우에는 같은 온도에서도 N<sub>A</sub>가 낮은 경우보다 높은 내부전계가 형성되기 때문에 N<sub>A</sub>가 높은 경우에서 터널링 효과가 더욱 커지게 된다. 따라서 N<sub>A</sub>의 농도가 높은 경우에는 상대적으로 높은 온도에서 쉽게 터널링 효과가 나타나며, 농도가 낮은 경우에는 낮은 온도에서 터널링효과가 나타나게 된다.

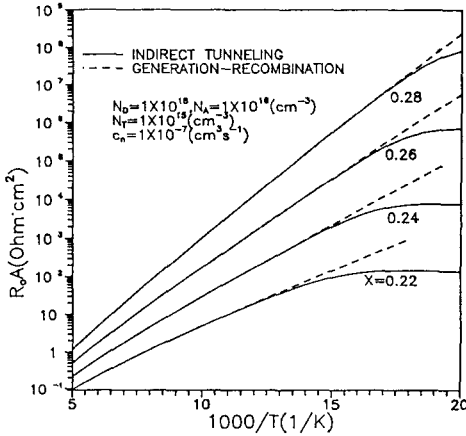


그림 4. 간접 터널링의 효과에 따른 RoA의 온도에 따른 변화  
 Fig. 4. The effect of indirect tunneling on RoA.

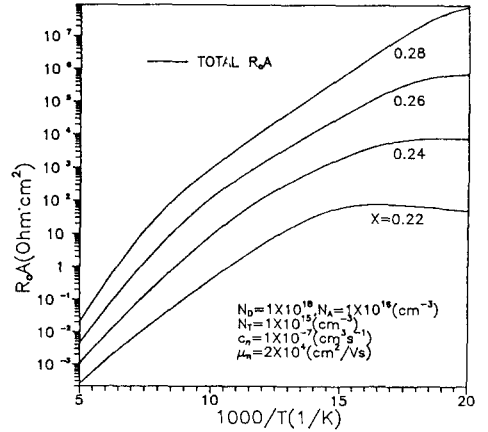


그림 6. RoA의 조성비에 대한 의존성  
 Fig. 6. RoA depending on mole fraction.

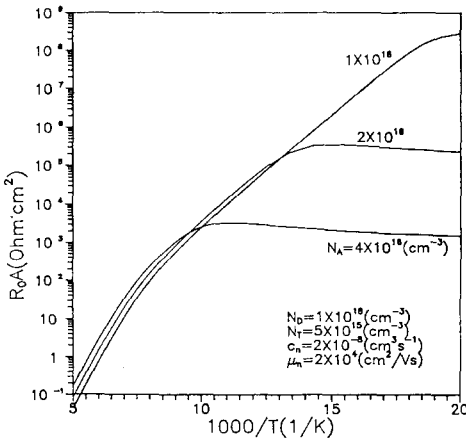


그림 5. 조성비가 0.29인 경우 RoA의 p 영역 농도에 대한 의존성  
 Fig. 5. The dependence of RoA on p-region doping concentration at x=0.29.

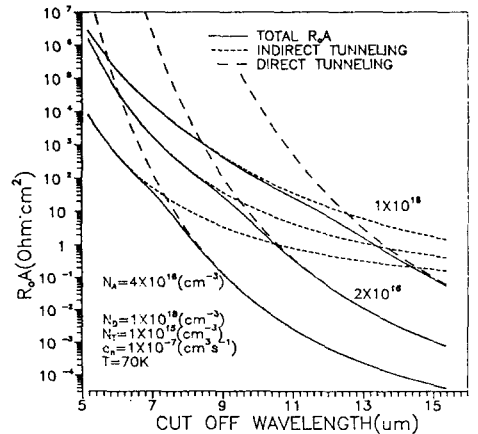


그림 7. 조성비가 0.22이고, 온도가 77K인 경우 차단주파수에 따른 RoA (Nₐ에 대한 의존성)  
 Fig. 7. RoA depending on cutoff frequency at x=0.22 and T=77K.

그림 6은 전체 RoA의 온도에 따른 변화를 조성비의 함수로 나타내었다. 조성비가 클수록 RoA는 커지며, 낮은 온도에서 터널링 효과가 나타난다. 이것은 조성비가 클수록 진성 운반자 농도는 작아지며, 밴드갭 에너지가 커지기 때문이다. 즉, 진성 운반자 농도가 작아지기 때문에 확산 모델( $n_i^{-2}$ 에 비례)과 생성-재결합 모델( $n_i^{-1}$ 에 비례)에 의한 RoA는 커지게 되며, 밴드갭이 커짐으로 인해 터널링은 보다 낮은 온도에서 나타나기 시작한다. 그리고, 조성비가 0.22인 경우에는 낮은 온도에서 직접 터널링 효과가 나타나서, 다른 조성비에서와는 다른 값의

저온 기울기를 보이고 있다. 전체적으로는 높은 온도에서는 확산 모델에 의한 성분이며, 그리고 온도가 감소함에 따라서 생성-재결합 모델에 의한 RoA가 주도하며, 그 이하로 온도가 내려가면, 트랩을 통한 간접 터널링 효과가 나타나기 시작한다. 그리고 그 온도 이하 보다 낮은 온도에서는 직접 터널링 효과가 주도적으로 나타나게 된다.

그림 7에서는 온도가 77K인 경우 차단 주파수에 따른 RoA의 값을  $N_A$ 를 함수로 하여 나타내었다. 이때 차단주파수와 밴드갭사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\lambda_c = \frac{1.24}{E_c} [\mu m] \quad (23)$$

즉, 조성비가 작을수록 E<sub>G</sub>는 작아지고, λ<sub>co</sub>는 길어지게 된다. 그림 7에서 보면 농도가 높은 경우에는 내부전계가 커지기 때문에 직접 터널링에 의한 효과가 상당히 넓은 차단주파수 영역에서 나타나고, 농도가 낮아질수록 간접 터널링에 의한 효과가 상당히 넓은 영역에서 영향을 미치는 주된 성분임을 알 수 있다. 즉, 직접 터널링의 경우 농도에 의존하는 경향이 간접 터널링에 비해 크다는 것을 알 수 있다.

그림 8에는 N<sub>A</sub>=1×10<sup>16</sup>cm<sup>-3</sup> 인 경우, 조성비에 따른 RoA를 온도를 함수로 하여 나타내었다. 즉, 온도가 낮은 경우에는 직접 터널링의 효과가 간접 터널링 효과에 의한 영향보다 주도적으로 나타나게 됨을 알 수 있다. 그러나 온도가 90K인 경우, 낮은 조성비에서는 확산모델에 의한 RoA가 주도하며, 온도가 높아지면서 열적 생성-재결합에 의한 효과가 주도적으로 나타나게 된다. 즉, 직접 터널링 효과는 밴드갭이 작고 온도가 낮은 경우에 주도적으로 나타나게 되며, 밴드갭이 커질수록 또한 온도가 높아질수록 간접 터널링의 효과와 생성-재결합 효과가 주도적으로 나타나게 된다.

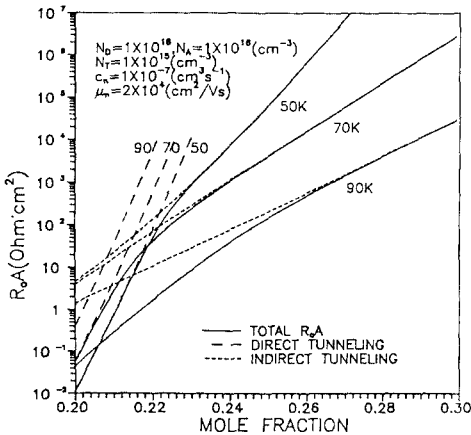


그림 8. N<sub>A</sub>=1×10<sup>16</sup>cm<sup>-3</sup>인 경우 조성비에 따른 RoA  
Fig. 8. RoA depending on mole fraction at N<sub>A</sub>=1×10<sup>16</sup>cm<sup>-3</sup>.

IV. 결 론

본 논문에서는 여러인자들이 RoA에 미치는 영향을 알아보기 위하여 RoA에 관한 수식을 유도하였다. 이때 유도한 식은 확산모델, SRH 생성-재결합 모델, 그리고 트랩을 통한 간접터널링 모델과 밴드갭 직접터널링 모델이다. 이들 모델을 통해서, RoA의 변화를 조사하여 본 결과는 다음과 같다.

1. 온도에 의한 영향

온도가 높은 경우에는 n<sub>i</sub><sup>-2</sup>에 비례하는 확산 성분이 주된 효과를 나타내며, 온도가 감소함에 따라 n<sub>i</sub><sup>-1</sup>에 비례하는 SRH 생성-재결합 효과가 주된 효과로 나타나게 된다. 그리고 그 이하로 온도가 내려가는 경우에는 터널링 효과가 나타나기 시작하는데, 우선 트랩을 통한 간접터널링 효과가 밴드갭 직접터널링 효과보다 먼저 나타나게 된다. 그리고 이 터널링 효과들은 RoA의 값을 낮추어 주는 역할을 하는데, 간접터널링에 의하여 RoA가 감소하는 것보다 직접터널링에 의하여 RoA가 감소하는 것이 더 심하게 된다.

2. 도핑 농도에 의한 영향

도핑농도가 커지게 되면, 내부전계가 강하게 형성되기 때문에 높은 온도에서도 터널링할수 있는 확률이 커지게 됨으로 높은 온도에서도 터널링에 의한 효과가 나타나게 된다.

3. 조성비에 의한 영향

조성비의 변화는 밴드갭 에너지에 심각한 영향을 주게 된다. 즉 조성비가 작은 경우에는 밴드갭이 작아지게 되고, 이에 따라서 높은 온도 그리고 낮은 도핑 농도에서도 터널링이 쉽게 발생하게 된다. 그 중에서도 조성비가 작은 경우에는 밴드갭 직접 터널링에 의한 효과가 주된 영향을 주게 되며, 조성비가 커서 밴드갭이 커지면, 직접 터널링 효과는 줄어들게 되며, 이 때에는 직접 터널링에 의한 영향보다 간접 터널링에 의한 영향이 주된 효과로 나타나게 된다.

參 考 文 獻

[1] V. Gopal, V. Dhar, "Zener current contribution to the resistance-area product of 8-to 14-μ m Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te Photodiodes," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-33, no. 10, pp. 1489-1493, 1986.  
[2] R. E. DeWames, G. M. Williams, J. G. Pasko, A. H. B. Vanderwyck, "Current generation mechanisms in small bandgap HgCdTe p-n junctions fabricated by ion implantation," *J. Crystal Growth*, vol. 86, pp. 849-858, 1988.  
[3] M. B. Reine, A. K. Sood, T. J. Tredwell, "Photovoltaic infrared detectors," *Semimetal and Semiconductor* edited by R. K. Willardson, A. C. Beer, vol. 18, Chap. 6, pp. 201-311, 1981.

- [4] A. Kolodny, I. Kidron, "Properties of ion-implanted junctions in Mercury-Cadmium-Tellurides," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-27, no. 1, pp. 37-43, 1980.
- [5] D. L. Polla, M. B. Reine, C. E. Jones, "Deep level studies of  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  II: correlation with photodiode performance," *J. Applied Physics*, vol. 52, no. 8, pp. 5132-5138, 1981.
- [6] 박장우, 광계달, "트랩을 통한 열적 천이와 터널링 천이를 동시에 고려할 수 있는 터널링 모델에 관한 연구," 전자공학회 논문지, 제29권, A편 제8호, pp. 682-688, 1992.
- [7] 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. Applied Physics*, vol. 53, no. 12, pp. 9130-9145, 1982.
- [8] E. O. Kane, "Theory of tunneling," *J. Applied Physics*, vol. 32, no. 1, pp. 83-91, 1961.

#### 감사의 글

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

---

#### 著 者 紹 介

朴 長 雨 (正會員) 第29卷 A編 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