

# HgCdTe 반도체 재료의 C-V 특성 계산

이상돈\*, 강형부\*, 김봉흡\*, 김동호\*\*, 김재목\*\*

\* 한양대학교 전기공학과 \*\* 국방과학연구소 기술연구본부

## A Calculation of C-V characteristics for HgCdTe Semiconductor material

S.D.LEE\*, H.B.KANG\*, B.H.KIM\*, D.H.KIM\*\*, J.M.KIM\*\*

\* Hanyang Univ., E.E.Dept., Seoul \*\* ADD, ATRC, Taejeon

### ABSTRACT

Accurate Capacitance-Voltage characteristics of Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) devices in narrow band-gap semiconductors are presented. The unique band structure of narrow band-gap semiconductors is taken into account such as non-parabolicity and degeneracy. Compensated and partially ionized impurities either in the bulk or the space charge region are also considered. HgCdTe is a defect semiconductor, so this approach is very important for characterization and analysis of MIS devices.

### I. 서론

II-VI 화합물 반도체중 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 반도체 재료는 조성 x를 변화시킴으로써 에너지 밴드갭을 0[eV]에서 1.6[eV]까지 변화시킬 수 있다. 또한 직접 천이 에너지 밴드 구조를 가지고 있어서 포톤 (photon) 탐지 소자로서의 적용이 가능하다. 따라서 이러한 특성을 이용하여 조성비 x를 0.2~0.3 으로 조절하여 적외선 영역을 탐지하는 광전압 소자 (photovoltaic device) 혹은 광전도 소자 (photo-conductive device)로 많이 이용되고 있다.

외국에서는 HgCdTe 재료에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 재료에 대한 파라미터 및 특성분석과 재료성장애 관한 연구 결과가 많이 발표되고 있다. 그러나 아직도 소자의 제작 및 소자구조와 특성분석을 위한 연구는 미비한 점이 많은 실정으로 계속적인 연구가 진행되고 있다. 특히 협대역 (narrow band gap) 반도체 재료가 갖는 non parabolicity 와 축퇴 (degeneracy) 및 HgCdTe 의 특성인 잔류 도너 운반자(residual donor impurity)들의 보상효과(compensation effect)를 고려한 소자의 해석적 이론이 필요하다. 본 연구에서는 이상에서 일정한 특성들을 고려한 MIS의 C-V 특성

이론을 유도하고, 일반적인 C-V 특성 이론의 결과와의 차이 점을 해석적으로 구하였다.

### II. 이론

#### 1. 에너지 밴드 구조와 포아손 방정식

II-VI 화합물 반도체인 HgCdTe는 Zinc-blend 구조를 가지고 있으며 전도대는 non-parabolic 구조로서 전도대 에너지와 wave vector와의 관계는 식(1)과 같이 주어지고 가전자대는 parabolic 구조로 가정하였다. 또한 수식의 복잡함을 피하기 위하여 포인 전위  $\phi$  및 밴드 밴딩 (band bending)  $\phi$ 는 각각  $U=g\phi/kT$  와  $V=g\phi/kT$  로 단일화 시켰으며 에너지 차  $W_{AB} = E_A - E_B/kT$  로 하였다.

$$E(K) - E_c = \frac{-E_g + [E_g^2 + (8K^2 p^2/3)]^{1/2}}{2} \quad (1)$$

단, P : momentum matrix element  
K : wave vector  
Eg : energy band gap

식 (1)을 이용하여 non-parabolic 밴드에서의 전자의 농도는

$$n = \frac{3}{4\pi^2} \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{kT}{gP} \right)^3 \right] \cdot G(U - W_{c1}, W_{cv}) \quad (2)$$

이 되고 정공의 농도는

$$P = \frac{4\pi}{h^3} (2m^*_p kT)^{3/2} F_{1/2}(W_{v1} - U) \quad (3)$$

단, k : Boltzman constance  
T : absolute temperature  
h : Plank constance  
 $m^*_p$  : effective hole mass

로 된다. 여기서  $F_{1/2}(W_{v1} - U)$  은 페르미 적분 함수이고  $G(U - W_{c1}, W_{cv})$ 는 변형된 적분 함수로서 포인 수식은 Appendix A에 표현되어 있다. 또한 축퇴 현상을 고려한 이

은화 되는 불순물 농도  $N_A^-$ ,  $N_D^+$  는

$$N_A^- = \frac{N_A}{1 + 2\exp(W_{A1}-U)} \quad (4)$$

$$N_D^+ = \frac{N_D}{1 + 2\exp(U-W_{D1})} \quad (5)$$

따라서, 총전하량  $\rho(x)$ 는 식(2), (3), (4) 및 (5)를 이용하여

$$\rho(x) = q(p - n + N_D^+ - N_A^-)$$

가 되며 포아손 방정식은

$$\frac{d^2U}{dx^2} = -\frac{q\rho(x)}{\epsilon_0\epsilon_s kT} = \frac{-1}{L_D^2} \cdot \frac{\rho(x)}{2qn_i} \quad (6)$$

단,  $L_D$  : intrinsic debye length

## 2. Low frequency Capacitance-Voltage 특성식 유도

저주파 C-V 특성의 식을 유도하기 위해서는 식 (6)을 이용하여 전계 E를 구하면

$$E = \pm \frac{kT}{qL_D} \left\{ \frac{N_D}{n_i} \ln \left[ \frac{1 + 1/2\exp(W_{D1} - U)}{1 + 1/2\exp(W_{D1} - U_B)} \right] + \frac{N_A}{n_i} \ln \left[ \frac{1 + 1/2\exp(W_{D1} - U)}{1 + 1/2\exp(W_{D1} - U_B)} \right] - \frac{2/3F_{3/2}(W_{V1}-U_B) - 2/3F_{3/2}(W_{V1}-U)}{F_{1/2}(W_{V1})} - \frac{H(U_S, U_B, W_{C1}, W_{CV})}{G(W_{C1}, W_{CV})} \right\}^{1/2}$$

$$= \pm \frac{kT}{qL_D} F(U, U_B) \quad (7)$$

가 되고 표면 전하량  $Q_s$  는

$$Q_s|_{U=U_S} = -\epsilon_0\epsilon_s E_s = \pm \frac{kT}{q} \frac{\epsilon_0\epsilon_s}{L_D} \cdot F(U_S, U_B) \quad (8)$$

이 된다. 따라서 저주파 C-V 특성 관계식은 식(8)을 표면 전위의 변화량에 대한 표면전하량의 변화이므로 반도체 내부에서의 정전 용량  $C_s$ 는

$$C_s = -\frac{q}{kT} \frac{dQ_s}{dU_S} = \pm \frac{\epsilon_0\epsilon_s}{L_D} \left[ \frac{N_A}{n_i} \frac{1}{1 + 2\exp(W_{A1}-U_S)} + \frac{N_D}{n_i} \frac{1}{1 + 2\exp(W_{A1}-U_S)} - \frac{F_{1/2}(W_{V1}-U_S)}{F_{1/2}(W_{V1})} + \frac{G(U_S-W_{C1}, W_{CV})}{G(W_{C1}, W_{CV})} \right] / F(U_S, U_B) \quad (9)$$

총 정전용량  $C_{total}$  은 다음과 같이 된다.

$$C_{total} = \frac{C_{ox}C_s}{C_{ox} + C_s} \quad (10)$$

## II. 계산 결과 및 고찰

HgCdTe 의 조성은  $x=0.3$ 으로 하였고 계산되는 운반자 농도는  $1 \times 10^{15} \sim 5 \times 10^{17} [cm^{-3}]$ 의 범위로 각각  $N_A$ ,  $N_D$ 로 적용하였다.

그림 1은  $N_A = 1 \times 10^{16}$  일때의 표면 전위와 게이트 전압 (gate voltage)와의 관계를 나타낸 것으로 실선은 본 이론에 의한 계산 결과이고 점선은 일반적인 이론에 의한 것으로 반전영역 (inversion region)에서는 축퇴효과에 의하여 표면전위가 상당히 차이가 생기는 것을 보여주고 있다. 즉, 그림 2에서 도시하는 바와 같이 반전영역에서의 표면 전하는  $\exp(U_S)$ 에 비례하지 않고 증가하는 양이 상당히 작음을 알 수 있다. 즉 전도대에서의 전자의 축퇴현상에 의거 전하량의 변화가 속박되는 것을 보여준다. 그림 3은 n-형 HgCdTe 반도체에서의 저주파 C-V 특성곡선의 계산결과로서 농도  $N_D$ 가 증가함에 따라 최저값이 음의 전압 방향으로 이동하는 현상을 보여준다. 또한 도-너 농도가  $5 \times 10^{16}$  이상에서는 0[volt] 부근에서 또하나의 변곡점이 나타나는 것을 보여주고 있으며 accumulation region에서의 정전용량이  $C_{ox}$  보다 작은 축퇴현상도 계산결과로 보여준다.

이상에서 고찰한 바와 같이 non-parabolicity와 degeneracy effect를 고려한 C-V 특성 계산 결과는 기존의 일반적인 이론의 결과와는 커다란 차이를 보이고 있음을 알 수 있었으며 HgCdTe MIS 소자를 제작후 특성 측정 분석에 정확성을 부여할 수 있는 이론적 모델을 제시하였다.

### \* REFERENCE \*

1. E.H.Nicollian and J.R.Brews, MOS physics and Technology, Wiley, 1982, pp26~175
2. I.Bloom and Y.Nemirovsky, "Bulk levels and interface calculation for narrow band-gap semiconductors.", solid-state electronics, Vol.31, No.1, pp17~25, 1988
3. D.Long and J.L.Schmit, Semiconductors and Semimetals, edited by R.K.Willardson and A.C.Beer, Vol.5, Academic Press, 1970, pp175~255

### APPENDIX A

#### A1. 표면전위

$$U(x) = \frac{E_F - E_1(x)}{kT} = \frac{q\phi(x)}{kT}, \quad x \rightarrow 0 \quad U(0) = U_S$$

$$, \quad x \rightarrow \infty \quad U(\infty) = U_B$$

$$V(x) = \frac{q(\phi(x) - \phi_B)}{kT} = U - U_B$$

A2. 적분함수

$$F_j(\eta) = \int_0^{\infty} \frac{y^j}{1 + \exp(y - \eta)} dy$$

$$G(\eta, W_{cv}) = \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{y+W_{cv}} (2y+W_{cv})}{1 + \exp(y - \eta)} dy$$

$$H(U_s, U_b, W_{ci}, W_{cv}) = \frac{a}{aU_s} G(U_s - W_{ci}, W_{cv})$$

$$= \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{y+W_{cv}} (2y+W_{cv}) \ln\left[\frac{\exp(U_b - W_{ci}) + \exp(y)}{\exp(U_s - W_{ci}) + \exp(y)}\right] dy}{1 + \exp(y - \eta)}$$

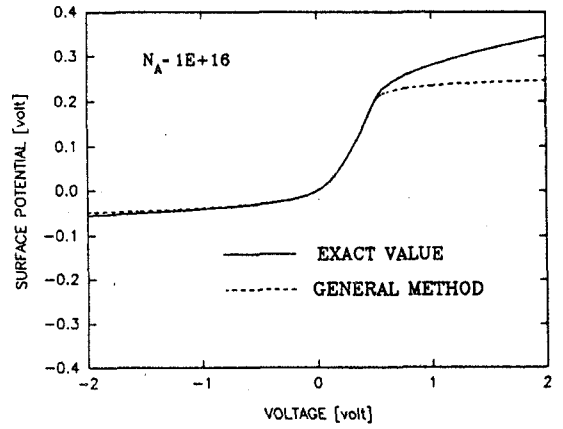


그림 1. Non-parabolicity와 축퇴를 고려한  
인가전압과 표면전위와의 관계.

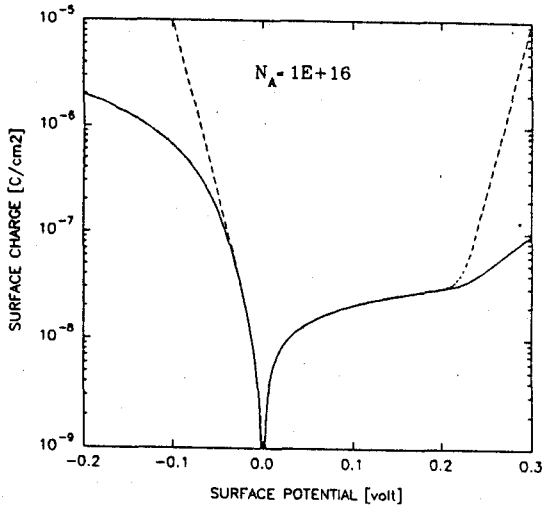


그림 2. 그림 1에서의 표면전위에 의한  
표면 전하량의 변화

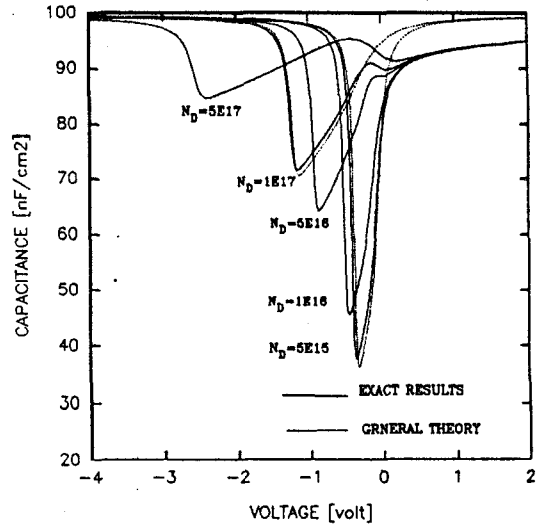


그림 3. 일반적인 MIS이론과 narrow band-gap  
특성을 고려한 C-V 특성 곡선.