

ZnO 바리스터의 유전특성(2)

강대하* 노일수* 박상호** 허진석* 최필수***
 * 부경대학교 ** 한국폴리텍VII 울산대학 *** 부일인스텍

Dielectric properties of ZnO-based varistor(2)

Daeha Kang* Ilsoo Rho* Sangho Park** Jinseuk Hur* Pilsoo Choi***
 * Pukyong National University **Korea Politech.VII Ulsan College *** Buil Instech.

Abstract - In this study a low-signal equivalent circuit based on DSB model is proposed for ZnO-based varistor. As a equivalent circuit simulation result dielectric loss factor $\tan\delta$ shows 2 peaks in low frequency and high frequency regions. The low-frequency peak means the relaxation by deep defects and the high-frequency peak means the relaxation by shallow defects.

1. 서 론

산화아연(ZnO)은 흥미로운 응용분야가 많으므로 과거 십 수 년에 걸쳐 많은 관심을 끌여왔다. 다결정 ZnO는 세라믹 바리스터, 투명도체, 가스센서 또는 인광체로서 널리 사용된다. 기본적인 관점에서 이와 같은 모든 응용은 본질적 점결함의 농도 및 전자 구조에 크게 의존한다. 과거 ZnO내의 본질적 점결함의 형성 에너지와 전자구조가 많은 관심을 끌여왔다. ZnO는 Zn원자 간의 간극사이트에 의한 비화학적 양론에 대하여는 잘 알려져 있으며 소위 본질적 결함이라고 하는 간극을 포함하고 있는 것으로 인식되고 있다. 이러한 본질적 결함의 측면에서 ZnO는 n-형 반도체이다. 이러한 결함은 전도대보다 약간 낮은 금지대 내에 도너 사이트 층을 형성하여 그 에너지 갭(gap)을 감소시킴으로써 ZnO의 도전성을 초래한다. 간극내의 주성분인 Zn원자는 2가지로 이온화 되어 약간의 자유전자를 공급하는 것으로 가정된다. 이러한 자유전자는 전도대로 이동하여 ZnO의 도전율을 높이며 이도전율은 다른 외적 결함에 의해서도 증가할 수 있다. 이와 같은 ZnO를 포함한 반도체의, 입계를 통한 전하수송에 관한 일반적인 분석의 기본 틀은 Pike[1], Blatter[1] 등에 의한 문헌에 전개되어 있다. 이 문헌들에 의하면 이중쇼트키장벽 모델에 의해 poly-Ge, poly-Si, GaAs, BaTiO₃ 또는 ZnO와 같은 주요물질의 정상상태 및 비정상상태의 전하수송 특성에 대한 유용하고 일반적인 설명을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 이중쇼트키장벽 모델을 기초로 하여 ZnO와 같은 입계형 바리스터의 거시적 등가회로를 제안하고 그 특성을 분석하고자 한다.

2. 이중쇼트키장벽 모델

그림 1은 이중쇼트키장벽 모델을 나타낸다. $E_c(x) = -e\phi(x)$ 는 전도대(CB)의 평형상태 구조이며 $\phi(x)$ 는 정전포텐셜 $\phi_B = -\phi(x)_{x=0}$ 은 장벽높이이다. CB의 캐리어 농도는 N_0 으로서 에너지 $E_0(x)$ 를 갖는 임의의 이온화된 shallow donor에 대응하며 벌크 내 페르미준위 위치를 $E_F(-\infty)$ 로 정의하고 전도대와 페르미준위의 에너지차를 $\xi = E_c(-\infty) - E_F(-\infty)$ 로 나타낸다. 깊은곳에 위치해있는 결함은 밀도 N_α , 포획단면 σ_α 및 에너지 $E_\alpha(x)$ 를 갖는다. 여기서 $\alpha = 0, 1, \dots, d$ 는 낮은 위치로부터 깊은 위치까지의 결함위치를 나타낸다. 전도대와 결함에너지는 병렬로 구분되어 있으며 [2] $\xi_\alpha = E_c(x) - E_\alpha(x)$ 로서 어디에서든지 일정하다. 상태의 계면밀도 $N_s(E)$ 는 경계에 의존한다. 밴드구조를 결정하는 방정식과 $2d + 3$ 개의 미지량 $x_{L\alpha}, x_{R\alpha}$ 및 ϕ_B 가 주어짐으로써 Blatter와 Greuter[2]에 의해 그 해가 구해져 있다. 시의존 소신호 $V(t) = V_0 e^{j\omega t}$ ($eV_0 \ll k_B T$)를 인가할 때 반도체의 캐패시턴스 $C(\omega)$ 는 식 (2.1)로 주어진다.

$$C(\omega) = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\sum_{\alpha=0}^d r_\alpha(\omega)}{\sum_{\alpha=0}^d x_\alpha r_\alpha(\omega)} \quad (2.1)$$

순환적 정의로서 $r_0(\omega) = 1$ 이며, $r_\alpha(\omega)$ 는 식 (2.2)로 주어진다.

$$r_\alpha(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau_\alpha} \frac{\sum_{\mu=0}^{\alpha-1} (x_{L\mu} - x_{L\alpha}) r_\mu(\omega)}{\sum_{\mu=0}^{\alpha-1} (x_{L\mu} - x_{L\alpha}) (N_\mu / N_\alpha)} \quad (2.2)$$

완화시간 τ_α 는 식 (2.3)으로 주어진다.

$$\tau_\alpha = \frac{e}{AT^2\sigma_\alpha(1 + g_\alpha)} e^{\xi_\alpha/k_B T} \quad (2.3)$$

단 A: Richardson 상수, g_α : 퇴화인수

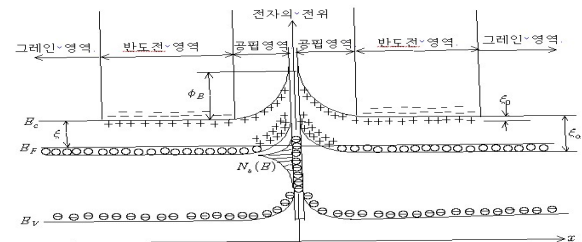


그림3.1 이중쇼트키장벽 모델
 Fig.3.1 Double Schottky Barrier model

r_α 는 복소함수로서 간략화할 수 없는 형식으로 실수부와 허수부가 혼합되어 있다. 딥준위(deep level)들이 서로 결합되어 있으며 합리적, 정량적 정보를 얻기 위해서는 전반적인 피팅(fitting)을 행해야 한다. 따라서 실험 데이터를 통하여 각 딥준위에 대한 개별적 정보는 얻을 수 없으며 거시적 관점에서 취급해야 한다. 이상의 이중쇼트키장벽 모델 및 식 (2.1)~(2.3)으로부터 거시적 관점에서 ZnO바리스터 구조를 공핍영역, 반도체전역 및 그레이인의 도전영역으로 구분할 수 있다. 공핍영역에는 shallow donor와 deep donor가 함께 존재하며 deep donor가 지배적이다. 반도체전역에는 shallow donor만 존재하며 산화물 반도체에서의 일반적 유전특성을 나타내는 유전영역을 포함한다. 또한, 그레이인은 도전율이 높다.

3. 등가회로 및 시뮬레이션

3.1 등가회로

제2장에서 설명한 바와 같이 바리스터의 미세구조는 결정립과 이것을 둘러싸고 있는 입계의 매트릭스로 되어있다. 바리스터의 주 구성요소인 결정립은 도전율이 높으므로 소신호응답의 경우에는 인가전압의 대부분이 입계에 걸리게 된다. 바리스터 재료는 세라믹스로서 그 유전율은 매우 크다. 또한, 전질의 2중쇼트키장벽 모델에서 설명한 바와 같이 반도체성 결정립과 입계로 구성되어 있는 것으로 간주할 수 있다. 따라서, 바리스터를 하나의 등가회로로 취급할 경우는 저저항의 결정립, 입계의 반도체성, 유전성 및 고저항의 공핍영역을 고려대상으로 해야한다. 그러므로 본 연구에서는 이들 고려사항을 다음과 같이 소자화 하였다.

(1) 결정립 : 저저항 R_g 로서 입계와 직렬로 연결됨

(2) 반도체 영역 : 저저항 R_S 및 정전용량 C_S 의 병렬로 간 주함
(3) 유전영역 : 콘덕턴스 G_D 및 정전용량 C_D 의 병렬로 간 주함
(4) 공핍영역 : 고저항 R_B 및 정전용량 C_B 의 병렬로 간 주함
여기서, R_g, R_S, C_S, R_B, C_B 는 주파수 의존성이 없으나 G_D 와 C_D 는 유전완화현상에 의하여 다음과 같은 주파수 의존성을 갖는다. 유전영역의 정전용량 C_D^* 는 유전율 ϵ^* 에 대하여 식(4-1)과 같은 관계식을 갖는다.

$$C_D^* = \frac{S}{t} \cdot \epsilon^* \quad (3.1)$$

단, S : 전극면적 t : 유전체의 두께
따라서, C_D^* 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_D^* = \frac{S}{t} \cdot \frac{\Delta\epsilon}{1+(j\omega\tau)^\beta} = \frac{\Delta C}{1+(j\omega\tau)^\beta} = C' - jC'' \quad (3.2)$$

단, $\Delta C = \frac{S}{t} \cdot \Delta\epsilon, C' : C_D^*$ 의 실수부

$C'' : C_D^*$ 의 허수부

등가회로를 위하여 C_D^* 를 어드미턴스 Y_D 로 변환하면,

$$Y_D = j\omega C_D^* = \omega C' + j\omega C'' = G_D + j\omega C_D \quad (3.3)$$

단, $\omega = 2\pi f, f : \text{주파수}$

$$G_D = \omega C', C_D = C''$$

로 주어진다. 이 식은 콘덕턴스 G_D 와 정전용량 C_D 가 병렬로 연결됨을 의미하며, 주파수 의존성이다. 또한 유전체의 유전손실은 식(3.4)로 표현된다.

$$\tan\delta_D = \frac{G_D}{\omega C_D} \quad (3.4)$$

이상과 같이 소자화된 요소들을 조합하여 등가회로를 구성하였다. 이 때, 정전용량 및 유전손실은 서로 종속적인 관계이므로 동일주파수에 대하여 동시조사가 필요하다.

바리스터를 반도체영역, 유전영역, 공핍영역 및 결정립의 직렬조합으로 가정하면 합성 어드미턴스 및 유전손실은 식(3.5) 및 식(3.6)이 된다.

$$Y_{DSB} = \frac{1}{\frac{2}{\frac{1}{R_S} + j\omega C_S} + \frac{2}{G_D + j\omega C_D} + \frac{2}{\frac{1}{R_B} + j\omega C_B} + R_g} \quad (3.5)$$

$$= G_{DSB} + j\omega C_{DSB}$$

$$\tan\delta_{DSB} = \frac{G_{DSB}}{\omega C_{DSB}} \quad (3.6)$$

식(3.5)의 정전용량 C_{DSB} 및 식(3.6)의 $\tan\delta_{DSB}$ 는 순수한 바리스터 물질의 유전특성을 나타낸다.

실제로는 편형 리드부의 인덕턴스 L_0 및 두전극 사이의 표유정전용량(stray capacitance) C_0 을 고려해야 하며, 이 L_0 및 C_0 는 주파수에 의존하지 않는다. 따라서 이러한 L_0 및 C_0 을 고려하면 식(3.5) 및 식(3.6)은 식(3.7) 및 식(3.8)로 된다.

$$Y_m = \frac{1}{\frac{1}{Y_{DSB} + j\omega C_0} + j\omega L_0} = G_m + j\omega C_m \quad (3.7)$$

$$\tan\delta_m = \frac{G_m}{\omega C_m} \quad (3.8)$$

여기서 G_m 및 C_m 은 식(3.9) 및 식(3.10)으로 주어진다.

$$G_m = \frac{G_{DSB}}{1 - \omega^2 L_0 \{ \omega^2 L_0 (C_{DSB} + C_0)^2 + 2(C_{DSB} + C_0) + L_0 G_{DSB}^2 \}} \quad (3.9)$$

$$C_m = \frac{(C_{DSB} + C_0) \{ 1 - \omega^2 L_0 (C_{DSB} + C_0) \} - L_0 G_{DSB}^2}{1 - \omega^2 L_0 \{ \omega^2 L_0 (C_{DSB} + C_0)^2 + 2(C_{DSB} + C_0) + L_0 G_{DSB}^2 \}} \quad (3.10)$$

따라서, 측정장치에 의해 측정되는 바리스터의 정전용량 및 유전손실은 C_m 및 $\tan\delta_m$ 이다. 그림3.1은 이상의 모든 사항을 고려하여 나타낸 편형 리드부 바리스터의 등가회로이다.

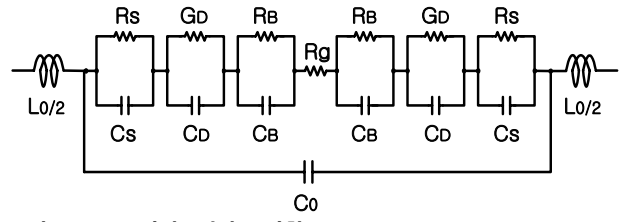


그림3.1 ZnO 바리스터의 등가회로
Fig. 3.1 Equivalent circuit of ZnO varistor

이상의 시뮬레이션에서는 전향복영역의 소신호응답시 바리스터의 미세구조를 결정립, 반도체 영역, 유전영역 및 공핍영역의 직렬조합으로 보고 있으며, 전극간의 병렬 표유정전용량 및 편형 리드부의 직렬 인덕턴스를 고려하고 있다. 본 연구에서는 이러한 시뮬레이션의 결과를 실제 데이터에 적용함으로써 등가회로상의 각종 파라미터를 결정하였다.

3.2 시뮬레이션 결과

그림3.2는 바리스터 전압 22 [V]의 시료에 대한 캐패시턴스와 $\tan\delta$ 의 측정결과 및 커브피팅 결과(실선)를 나타낸 것으로서 측정결과와 피팅결과가 잘 일치하고 있다. 그림3.3은 피팅결과 얻어진 파라미터를 기초로 하여 바리스터의 유전특성을 재현한 것으로서 저주파 영역 및 고주파 영역에 2개의 $\tan\delta$ 피크를 나타내고 있다. 저주파 피크는 deep defects에 의한 완화현상이며 고주파 피크는 shallow defects에 의한 완화 현상을 나타낸다. 특히 저주파의 피크는 문헌 [2]와 거의 일치한다.

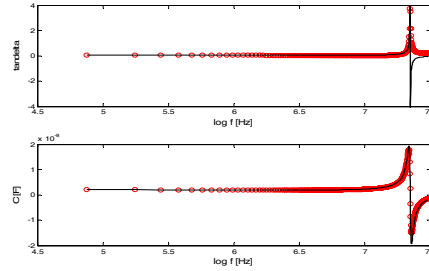


그림3.2 ZnO바리스터 유전특성의 실험결과
Fig.3.2 The experimental result of dielectric properties for ZnO-based varistor(22 [V]).

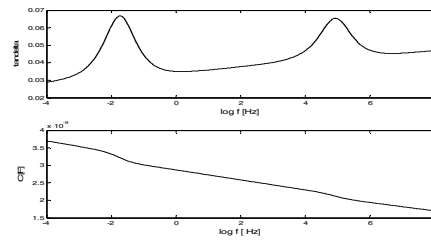


그림3.3 피팅 파라미터에 의해 재현된 ZnO바리스터의 유전특성
Fig.3.3 Dielectric properties of ZnO-based varistor reproduced with fitting paramers.

4. 결 론

본 연구에서는 이중쇼트키장벽 모델을 기초로 하여 ZnO바리스터의 소신호 등가회로를 제안하였다. 이 등가회로의 시뮬레이션 결과, $\tan\delta$ 에 있어서 저주파 및 고주파 영역의 2개의 peak가 나타났다. 저주파 피크는 deep defects에 의한 완화이며 고주파 피크는 shallow defects에 의한 완화를 의미한다.

[참 고 문 헌]

- [1] Pike G. E., "Diffusion-limited quasi Fermi level near a semiconductor grain boundary", Phys. Rev. B, Vol. 33, pp.3274-3276, 1984
- [2] Blatter G. and Greuter F., "Carrier transport through grain boundaries in semiconductors", Phys. Rev. B, Vol. 54, pp. 3952-3966, 1986