

점근해법에 의한 열자격 전류식의 분석

오용철*, 홍진웅*, 김기준**

The Analysis of TSC Equation by Asymptotic Estimation

Yong-Cheul Oh, Jin-Woong Hong, Ki-Joon Kim

Abstract

In this paper, it presents a method to calculate the escape frequency factor(ν) and its verification from TSC(Thermally Stimulated Current) equation and their simulation curves. To apply calculation method of ν using asymptotic estimation, it utilized TSC data with 1K interval. This method enables one to get the exact value of ν and activation energy at the same time by using computer programming. So, it regards their calculation method as a useful process to obtain the value of physical behavior.

1. 서론

열자격 전류는 반도체 또는 유전체 내에 있는 하전 입자가 온도의 상승과 더불어 열평형 또는 준열평형 상태로 이행되는 과정에서 방출되는 에너지의 변화량을 외부 회로를 통해 전류의 형태로써 측정하는 것이다. 그러나 열자격 전류의 식은 특성 자체가 워낙 비선형적이기 때문에 이러한 제정수를 명확히 구한다는 것은 매우 어렵다^[2]. 특히, 입자에 관련된 활성화 에너지 및 이탈 주파수 인자, 그리고 완화 시간 등의 기본적 물리량을 구하기 위한 방법으로 여러 가지 해석법이 제안되어 사용되고 있다^[3]. 이러한 각 방법은 실시 조건에 따라서 간편하고 정확하게 활성화 에너지를 구할 수 있으나, 만약 해당 조건에 만족하지 않는 경우에는 많은 오차를 함유하는 것으로 보고되고 있다.

따라서 본 연구에서는 열자격 전류식에 포함된 주요한 물성량을 분석하기 위하여 열자격 전류식을 시뮬레이션에 의하여 구현한 후 주요 물성량 중 하나인 캐리어 트랩의 이탈 주파수 인자와 활성화 에너지를 직접 계산하고자 하였으며 이를 실험 결과와 비교하여 그 정확도를 비교하고자 하였다.

2. 열자격 전류식의 계산

단일 캐리어 트랩을 근거로 한 1차의 열자격 전류 이론에서 그 기본 방정식은

$$I(T) = I_0 \exp\left\{-\frac{E_t}{kT} - \frac{\nu}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(\frac{E_t}{hT}\right) dT\right\} \quad (1)$$

로 표시된다^[2,4,5].

여기서 $I_0 = n_0 e \mu \nu \tau A E$ [A], n_0 는 캐리어 밀도, e 는 전자의 전하량, μ 는 캐리어 이동도, τ 는 완화 시간, A 는 전극 면적, E 는 형성 전계, k 는 볼츠만 상수(8.617×10^{-5} eV/K), T 는 절대 온도, T_0 는 승온 개시 온도[K], ν 는 이탈 주파수 인자, E_t 는 활성화 에너지, 그리고 β 는 승온 속도이다^[4,5]. 상승 곡선상의 두 좌표점을 임의로 선정하여 각 전류값의 비를 구하면

$$\frac{I_a}{I_b} = \exp\left[-\frac{E_t}{k} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_b}\right) + \exp\left(-\frac{\nu}{\beta} \int_{T_a}^{T_b} \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right) dT\right)\right] \quad (2)$$

로 되며, 점근 해법의 적용을 위해서 $x_a = \frac{E_t}{kT_a}$,

$x_b = \frac{E_t}{kT_b}$ 라 놓으면 (2)식에서의 적분항은

$$\frac{E_t}{k} \left(\frac{e^{-x_a}}{x_a} - \frac{e^{-x_b}}{x_b} \right) + \int_{x_a}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx - \int_{x_b}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (3)$$

으로 된다.

(3)식을 점근 급수로 전개하면

$$\begin{aligned} & \frac{E_t}{k} \left[\frac{e^{-x_b}}{x_b} \left\{ 1 - \left(\frac{x_b}{x_a} \right)^2 e^{-(x_a-x_b)} \right. \right. \\ & - \frac{2e^{-x_b}}{x_b^2} \left\{ 1 - \left(\frac{x_b}{x_a} \right)^3 e^{-(x_a-x_b)} \right. \\ & \left. \left. + \frac{6e^{-x_b}}{x_b^3} \left\{ 1 - \left(\frac{x_b}{x_a} \right)^4 e^{-(x_a-x_b)} \right\} \right. \right. \end{aligned} \quad (4)$$

이며, (2)식의 양변에 ln를 취한 후 (4)식을 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \ln \frac{I_a}{I_b} + \frac{E_t}{k} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_b} \right) &= \frac{\nu E_t}{\beta k} \left[\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \right. \\ & \left. \frac{(n+1)!}{x_b^{n+2}} e^{-x_b} \left\{ 1 - \left(\frac{x_b}{x_a} \right)^{n+2} e^{-(x_a-x_b)} \right\} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

가 된다. 이 식은 피크 온도가 주어지지 않는 식이기 때문에 피크 온도값에 대한 정보가 주어지지 않는 경우인 단순한 상승 부분에서 이동에 따른 이탈 주파수값을 함유하고 있다. 따라서 (5)식으로부터 이탈 주파수를 구하기 위한 식이 (6)식과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{\beta k}{\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(n+1)!}{\left(\frac{E_t}{kT_b} \right)^{n+2}} \exp\left(\frac{-E_t}{kT_b} \right)} \times \\ & \frac{\ln \frac{I_a}{I_b} + \frac{E_t}{k} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_b} \right)}{\left[1 - \left(\frac{T_a}{T_b} \right)^{n+2} \exp \left(- \frac{E_t}{k} \left(\frac{T_b - T_a}{T_a T_b} \right) \right) \right]} \end{aligned} \quad (6)$$

이탈 주파수 인자를 직접 계산하기 위한 식 (6)은 활성화 에너지의 값을 가지고 있으나 열자

격 전류의 실험값으로부터 직접 평가할 수는 없다. 따라서, 열자격 전류 곡선상의 임의의 2점을 가정하고 그 두 점의 정보(온도 및 전류)를 대입하므로써 이탈 주파수 인자와 활성화 에너지의 값이 일치하게 된다는 원리를 이용하게 된다.

3. 열자격 전류 곡선에서의 계산에 따른 결과 및 검토

사용 시료는 2축 연신된 PVF₂ 필름으로서 측정 방법은 형성 전계 1[MV/m]~10[MV/m]로 변화시켜 인가하면서 -100[°C]까지 급냉한 일렉트렛트로부터 5[°C/min]로 승온시키면서 열자격 전류를 측정하였다. 측정 결과 중 75[°C] 사이에 나타난 피크를 중심으로 본 연구를 적용하였으며, 보다 정확한 결과를 유도하기 위하여 실험 결과값을 근거로 하여 그림 1과 같이 다시 이론적으로 열자격 전류 곡선을 재구성하였다. 따라서, 재구성된 곡선의 이탈 주파수와 활성화 에너지는 표 1과 같으며, 본 연구에서 제안한 ν의 계산값은 위의 과정에 따라 컴퓨터에 의하여 정확히 계산되어져 그림 2에 도시하였다. 이 그림은 온도 영역을 바탕으로 하였으며 1K 간격으로 임의의 2개의 자료를 1조로 하여 고온으로 이동하면서 계산한 결과로서 형성 전계는 1[MV/m]에서부터 10[MV/m]까지이다. 재구성된 열자격 전류 곡선의 이탈 주파수와 활성화 에너지의 값은 (6)식에 의하여 계산된 결과와 비교적 잘 일치하고 있다.

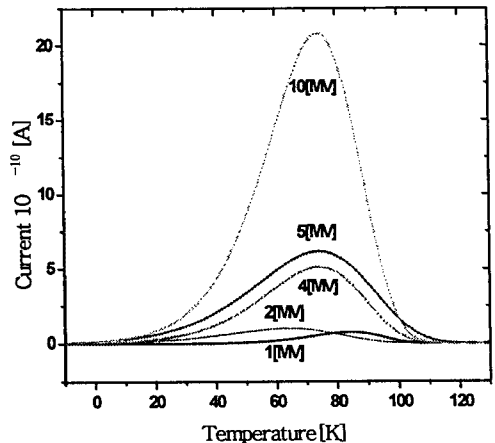
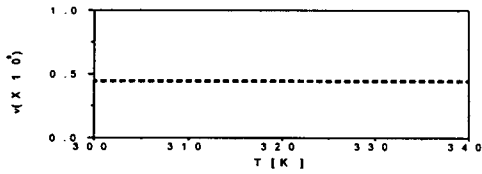
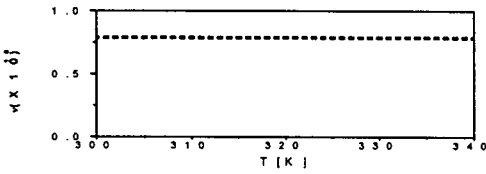


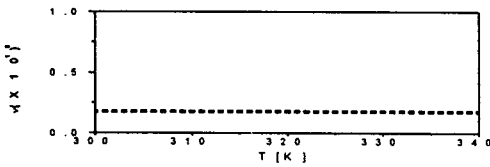
그림 1. 열자격 전류 실험 결과



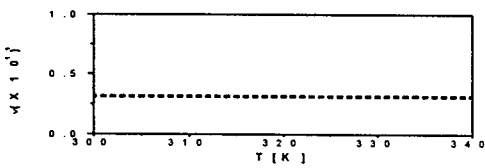
(a) 형성 전계가 1[MV/m]일 때



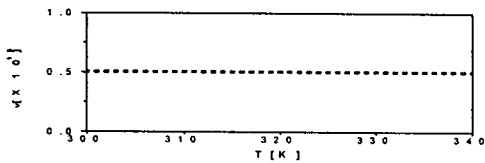
(b) 형성 전계가 2[MV/m]일 때



(c) 형성 전계가 4[MV/m]일 때



(d) 형성 전계가 5[MV/m]일 때



(e) 형성 전계가 10[MV/m]일 때

그림 2. 계산된 이탈 주파수 인자.

1차의 열자격 전류 곡선에서 활성화 에너지의

값을 계산하는 방법에 대해서는 여러 연구자에 의하여 시도된 바 있다.

그러나 대부분의 제안된 방법은 피크 온도를 근거로 하고 있다. 그 중 Bucci 방법은 피크 온도를 직접적으로는 사용하고 있지 않으나 열자격 전류 곡선의 전온도 영역을 필요로 하고 있으며, 이 니셜라이즈 기법의 경우에는 초기의 상승 부분 자료만을 이용하여 아레니우스 플롯의 경사에서 활성화 에너지의 값을 계산하지만 그 원리상 곡선의 상승 부분에만 적용해야 하는 제한이 있고 신호가 큰 영역에 대해서는 부정확해지는 경우가 있기 때문에 피크 전류값의 약 20%에만 사용되어지는 실정이다.

표 1. 재구성된 열자격 전류 곡선의 v값과 E_t값

종류 형성전계	v[1/sec]	E _t [eV]
1[MV/m]	0.443X10 ⁹	0.665
2[MV/m]	0.787X10 ¹⁰	0.734
4[MV/m]	0.179X10 ¹⁰	0.73
5[MV/m]	0.314X10 ¹¹	0.787
10[MV/m]	0.506X10 ¹⁶	1.14

따라서, 본 연구에서 수행한 방법은 열자격 전류 곡선에서 피크 전류값이 명시되지 않는 경우에서나 또는 부분 곡선이라 할지라도 1[K] 간격으로 1조의 데이터를 설정하여 2조 이상의 결과 값만 유도되면 v값과 E_t값을 정확히 계산할 수 있었다. 특히 본 연구 방법에 의한 계산 결과는 초기 상승 법과 비교할 때 약 15%의 오차가 발생하였으며, 피크 전류를 중심으로 한 접근 해법 적용 결과와는 약 2% 미만의 오차가 발생하였다. 이와 같은 오차의 발생은 열자격 전류식을 접근 해법으로 계산하므로써 발생 오차를 최대한으로 줄일 수 있었던 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 이탈 주파수 인자를 계산하기 위한 방법과 이의 검증에 관하여 살펴보았다. 계산 방법은 기존의 피크 전류값에 의존한 방법과는 달

리 열자극 전류값이 임의의 1[K] 간격으로 1조의 값이 2개 이상일 경우에는 적용이 가능하였으며, 이탈 주파수 인자는 활성화 에너지를 파라미터로 하여 동시에 두 개의 값을 컴퓨터 프로그래밍에 의하여 손쉽게 계산할 수 있었다. 이를 검증하기 위하여 PVF₂ 필름의 실험 결과에 적용한 결과 매우 정확한 결과를 유도하였으며, 이와 같은 결과에 따라 이 기법은 다른 실험에서도 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

Reference

- [1] R. A. Creswell and M. M. Perlman, "Thermal Currents from Corona Charged Mylar", J. Appl. Phys., V. 41, No. 6, pp.2365~2375(1970)
- [2] 電氣學會, "電氣絶緣材料 熱刺激電流", 電氣學會技術報告, No. 194, 1985
- [3] R. A. Creswell and M. M. Perman, "Thermal Currents Study of the Effect of Humidity on Charge Storage in Mylar", J. Appl. Phys., Vol. 42, No. 2, pp.531~533(1971)
- [4] S. Maeta and F. Yoshida, "On the Determination of the Trap Depths from Thermally Stimulated Current II," Jap. Journal of Appl. Phys., Vol. 28, No. 9, pp.1717~1727(1989)
- [5] K.J. Kim, S.H. Park, C.H. Kim, and J.U. Lee, "Error Correction of the Activation Energy of TSC by using a Asymptotic Estimation Method," KIEEME 추계 학술대회 논문집, pp.118~122(1992)
- [6] 吉田福藏, 前田成歇, "熱刺激電流の 部分曲線から離脱周波數因子を 直接評價できろ 漸近解法v法の 提案", T. IEE Japan, Vol. 111-A, No. 4, pp.323~331(1991)