

Thermal pulse를 이용한 반도체 소자의 thermal impedance 측정법

서 길수, 김 기현, 방 옥, 김 상철, 김 남균, 김 은동

Thermal Impedance measurement of Semiconductor Device with Thermal Pulse

Kil-Soo Seo, Kihyun Kim, Wook Bahng, Sang-Cheul Kim, Nam-Kyun Kim, Eun-dong Kim
Korea Electrotechnology Research Institute, Power Semiconductor Research Group

Abstract - 열저항 측정법에는 정상상태보다는 과도응답 특성을 이용하는 것이 우수한 것으로 20년부터 알려져 왔다. 온도를 시간의 함수로 나타내는 열적 계단응답함수를 이용하면 칩에서 주위 분위기, 냉각장치 또는 마운트를 포함한 열 임피던스를 측정할 수 있다. 소자 접합부의 열적 동특성을 측정함으로써 칩 주변의 기하학적 물질에 대한 특성을 파악할 수 있으며 나아가 측정으로부터 소자의 열적 구조를 유추할 수 있다. 본 논문에서는 열적 계단응답 특성을 이용한 열 임피던스 측정 이론 및 원리에 대해서 개관하였다.

(3) 구조함수(structure function)로 고려해 볼 수 있다. 단 RC network는 선형이며 수동 소자(passive)로, 열전도는 주로 한방향으로 흐른다고 가정한다. 그리고 열 저항 및 용량은 온도 변수와는 독립 변수로 가정한다. 대용량 소자의 패키지를 선형 열적 시스템으로 가정하면 디랙-델타(Dirac-delta) 및 단위 계단함수(unit-step function)에 관련된 응답특성을 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

1. 서 론

사이리스터와 같은 전력반도체에서 일어나는 가장 결정적인 파괴원인은 열의 발생에서 비롯된다. 과열에 기인한 파괴는 접합온도(T_j ; junction temperature)의 상승에 의한 파괴와 열피로 파괴 등으로 나눌 수 있다.

먼저 접합온도의 상승(일반적으로 150℃ 이상)에 의한 소자 파괴는 소자의 동작에 의하여 발생한 열이 미처 외부로 방출되지 못하여 발생하게 된다. 소자의 접합온도가 순간적으로 특정온도 이상이 되면 실리콘 전력소자의 비저항이 온도상승에 따라 작아지게 되어 결과적으로 열폭주(thermal runaway)가 일어나 소자의 온도가 급격히 상승하게 되며 종래에는 짧은 순간 안에 소자가 파괴되게 된다.

열피로에 의한 파괴는 장기간에 걸쳐서 진행되는 것으로 주로 패키지의 열화에 기인한다. 사이리스터와 같은 전력반도체 패키지는 여러 재료의 적층구조로 이루어져 있는데 재료간의 열팽창계수차에 의하여 응력이 발생하게 된다. 전력소자가 장기간에 걸쳐 동작-비동작이 반복되면 각 재료간에는 열피로가 발생하게 되며 패키지 내부로부터의 열방출이 어려워지게 된다. 결국 전력반도체를 장시간 사용할 경우 초기보다는 열방출이 어려워지는 현상이 발생하게 되고 궁극적으로 접합온도의 상승에 의한 열폭주로 소자가 파괴될 수 있다.





결국 열에 의한 전력반도체의 파괴 또는 신뢰성 저하는 열의 방출 구조 즉 패키지 문제에 귀결된다고 할 수 있다. 따라서 전력소자에서 발생한 열이 얼마나 원활히 외부로 방출될 수 있는지의 정도를 측정하는 것이 소자의 신뢰성 특성을 평가하는데 중요한 요소가 된다.

반도체 소자 패키지의 열방출 능력(동적 열 특성)을 여러 가지 함수들로 기술하여 왔는데 그 중 하나가 구조함수(structure function)이다[1-4]. 구조함수는 RC network 이론과 밀접하게 관련되어 있기 때문에 시상수(time constant) 개념, RC 1-port로 canonic 형식 및 시상수 스펙트럼으로 해석할 수 있다.[5,6,7]

본 고에서는 열 임피던스 측정에 필요한 기본 이론에 대해서 정리요약 기술하였다.

- (1) 시상수, 극점(poles), FOSTER 및 CAUER 망
- (2) 시상수 스펙트럼(time constant spectrum)

표 1. 선형시스템의 디랙-델타 및 단위계단 응답특성
Table 1. Dirac-Delta and Unit step response Characteristic of Linear System

인가함수	응답함수
	
$\delta(t)$ Dirac-delta function	$W(t)$ Weight function
	
$h(t)$ Unit-step function	$a(t) = W(t) \otimes h(t)$ Unit-step response function

IC 칩, 개별소자 또는 패키지의 열 특성은 일반적으로 시간 영역에서 측정된다. 임의의 시간 $t=0$ 에서 순시전력 P_0 을 패키지 된 소자에 인가한 후 온도 상승을 $\Delta T(t)$ 라 하고, 이것을 P_0 로 나눈 함수 $a(t)$ 를 가열곡선(heating curve)이며, 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.[8]

$$a(t) = \frac{\Delta T(t)}{P_0} \tag{1}$$

단위 계단 응답은 패키지의 선형 열 시스템을 특성화에 필요한 정보를 갖고 있다. 패키지 시스템에 단위 열 계단 함수를 인가하면 열 응답함수 $a(t)$ 는 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$a(t) = W(t) \otimes h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W(y) \cdot h(t-y) dy \tag{2}$$

$$a(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W(y) \cdot h(t-y) dy = \int_0^{\infty} W(y) \cdot 1 dy \tag{3}$$

$$\frac{d}{dt} a(t) = W(t) \tag{4}$$

패키지의 과도 열 응답특성은 통상적으로 그림 2과 같은 $R_{th}C_{th}$ 병렬 연결된 n 개의 $R_{th}C_{th}$ 단(stage)으로 구성된 Foster 모델 또는 Cauer ladder 망으로 기술할 수 있다. 식 (2)의 과도 열 응답함수 $a(t)$ 는 $R_{th}C_{th}$ 단으로 구성하면 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$a(t) = \sum_i^n R_i \cdot [1 - \exp(-t/\tau_i)] \quad (5)$$

여기서 특성값은 R_{th} 의 크기와 시상수(time-constant) $\tau_i = R_{th}C_{th}$ 로 구성되며, R_{th} 와 τ_i 를 알면 열 시스템(thermal system)을 알 수 있다.

$$a(t) = \int_0^\infty R(\tau)[1 - \exp(-t/\tau)]d\tau \quad (6)$$

여기서 $R(\tau)$ 는 시상수 스펙트럼(spectrum)이다. 열 임피던스의 시간축을 $z = \ln(t)$, $\zeta = \ln(\tau)$ 로 두고, $a(t) \rightarrow a(z)$ 변환하면 $R(\tau)$ 는 $R(\zeta)$ 로 된다.

$$\frac{d}{dz}a(z) = \int_0^\infty R(\zeta)[\exp(z-\zeta) - \exp(z-\zeta)]d\zeta \quad (7)$$

여기서 $w_i(z) = \exp(z - \exp(z))$ 를 대입하면

$$\frac{d}{dz}a(z) = \int_0^\infty R(\zeta) \cdot w_i(z - \zeta) d\zeta = R(z) \otimes w_i(z) \quad (8)$$

로 된다. 시상수 스펙트럼 $R(z)$ 는 식 (8)으로부터

$$R(z) = \left[\frac{d}{dz}a(z) \right] \otimes^{-1} w_i(z) \quad (9)$$

로 된다.[8,9]

2. 본 론

2.1 시상수, 극점, FOSTER & CAUEL 망

패키지의 열방출 모델은 열 저항과 열용량으로 나눌 수 있으며, 두가지 성분을 그림 1에서 나타낸 것처럼 병렬로 연결된 모델로 나타낼 수 있다.

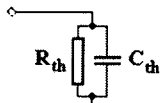


그림 1 RC 망 모델
Figure 1. RC network Model

$$T(t) = PR_{th}(1 - \exp(-t/\tau)) \quad (11)$$

$$\tau = R_{th}C_{th}$$

그림 1의 모델의 임피던스는 식 (12)와 같이 쓸 수 있다.

$$Z(s) = \frac{R_{th} \cdot 1/sC_{th}}{R_{th} + 1/sC_{th}} = \frac{R_{th}}{1 + sR_{th}C_{th}} = \frac{R_{th}}{1 + s\tau} \quad (12)$$

여기서 s 는 복소수이며, $s = j\omega$ 로 대치하면 주파수영역의 함수를 얻을 수 있다. 그림 2는 RC 포트인 FOSTER와 CAUEL 망으로 나타낸 것이며 여기서 R 은 열저항, C 는 열용량이다. 열 시스템에서 FOSTER 모델의 열 저항과 열용량은 구조의 물리적인 영역과 일치하지 않기 때문에 해석에 적합하지 않지만 CAUEL 모델은 물리적인 의미를 반영하며 열 흐름 경로를 파악 할 수 있다.

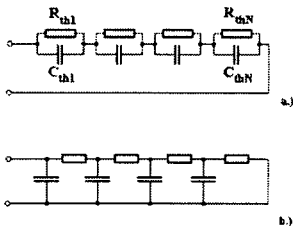


그림 2 FOSTER & CAUEL 망
Figure 2. FOSTER & CAUEL network

유한한 시상수 수를 갖는 시스템의 열 임피던스는 식 (12)의 함수로서 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$Z(s) = \sum_{i=1}^N \frac{R_{thi}}{1 + s\tau_i} \quad (13)$$

그림 3은 $R_{thi} - \tau_i$ 의 관계를 나타내는 것으로서 응답이나 상대 크기가 발생하는 시상수를 기술하는 이산 스펙트럼이다.

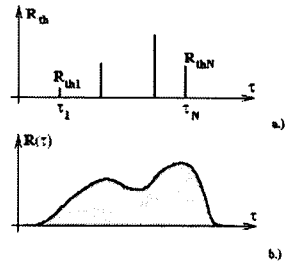


그림 3 이산 및 연속 시상수 스펙트럼
Figure 3. Discret and continuous time-constant spectra

실제 소자나 패키지를 물리적인 측면에서 열저항 및 열용량으로 나눌 수 없지만, 저항과 용량 특성을 갖는 유한한 크기의 요소로 분산 변수망을 그림 4과 같이 나타낼 수 있다.

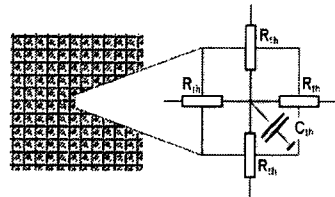


그림 4 RC 회로로 모의한 열전도도 모델
Figure 4. A dense lumped network models the distributed property of the matter

그림 4의 분산 변수망은 C_{th} 수 만큼 시상수를 가지며 유한한 요소를 무한히 작게 하면 연속적인 스펙으로 나타난다.

$$z = \ln(t), \zeta = \ln(\tau)$$

시상수 함수 $R(\zeta)$ 는

$$R(\zeta) = \mp \frac{1}{\pi} \text{Im}(Z(s = -\exp(-\zeta))) \quad (14)$$

2.2 구조함수

시상수 스펙트럼 $R(z)$ 을 얻으면 열전달 경로에 따라 열저항 및 열용량을 기술하는 함수이므로 heat-flow map은 간단히 그릴 수 있다. 시상수 스펙트럼은 FOSTER RC 모델의 확장으로 가정하면 그림 5에서 보는 바와 같이 된다.

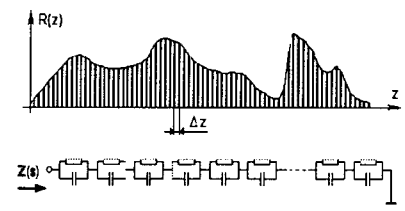


그림 5 이산화된 $R(z)$ 함수와 Foster 모델
Figure 5. Discretized $R(z)$ function and the corresponding FOSTER model

일단 $R(z)$ 가 결정되면 열의 이동경로(heat-flow map)를 그릴 수 있으며 식 (10), (11)과 같이 R_{th} , C_{th} 를 구할 수 있다.

$$R_{th} = R(z)\Delta z \quad (15)$$

$$C_{th} = \exp(z)/R_{th} \quad (16)$$

Δz 값을 줄이면 $R_{th}C_{th}$ 수는 증가하면서 모델은 더욱 정확하게 된다. 결국 $\Delta z \rightarrow 0$ 이면 무한한 $R_{th}C_{th}$ 의 직렬 단을 갖는 FOSTER 모델로 변환된다.

이 모델은 수학적으로 정확하지만 노드와 노드간에 캐패시터를 갖기 때문에 열시스템 구조를 특성화에 사용되지 않는다.

Protonotarios and Wing의 논문[1]에 의하면 누적 구조함수(cumulative structure function)는 1차원 분산 RC line의 구조를 기술할 수 있다.

$$C_Y = f(R_Y) \quad (17)$$

여기서

$$C_Y = \int_0^Y c(\xi)A(\xi)d\xi \quad (18)$$

$$R_Y = \int_0^Y \frac{1}{\lambda(\xi)} \frac{1}{A(\xi)} d\xi \quad (19)$$

c 는 체적 열용량(volumetric heat capacitance), λ 는 열전도율(thermal conductivity), $A(x)$ 는 선의 단면적이다.

누적 구조함수는 연속체를 CAUER망으로 기술한 것이며, 시상수 스펙트럼으로 이산화 된다.

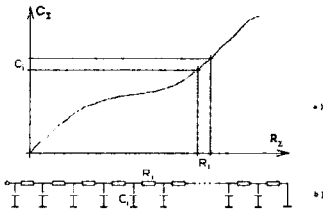


그림 6. 누적 구조함수와 Cauer ladder 모델
Figure 6. The cumulative structure function and the Cauer ladder model

그림 6에서 $R(z)$ 스펙트럼으로부터 집중 소자 Foster 모델을 유도할 수 있으며, Foster-Cauer변환을 하면 Cauer 모델로 바뀐다.

차분 구조함수(differential structure function)는 아래의 식과 같이 기술할 수 있으며, IC 패키지의 열전달 경로를 타내는데 적합하다.

$$S(R_Y) = \frac{dC_Y}{dR_Y} = \frac{cA dx}{dx/\lambda A} = c\lambda A^2 \quad (20)$$

이 함수의 피크(peak)는 단면적 또는 국부적으로 캐패시턴스의 증가를 의미하며 이를 이용하면 패키지 몸체나 냉각부를 경계면을 확인할 수 있다.

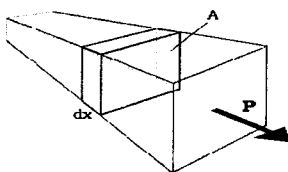


그림 7 구조함수의 이해
Figure 7. Interpretation of the structure function

구조함수 가장 중요한 주된 특징은 다음의 5가지로 요약할 수 있을 것이다.

① 기지의 구조함수를 갖는 면적으로 직렬로 연결하면

구조함수의 각각의 구조함수를 더한 것으로 된다.

② 열전도 부분의 열전달 방향이 역으로 되면 구조함수는 R_Y 축을 따라 역방향으로 된다.

③ R_1 과 R_2 사이에서 열용량의 합은 아래와 같이 계산된

$$C_{12} = \int_{R_1}^{R_2} S(R_Y) dR_Y \quad (21)$$

④ R_1 과 R_2 사이에서 정의되는 구조함수의 물리적인 거리는

$$x_{12} = \int_{R_1}^{R_2} \sqrt{\frac{\lambda}{c}} S(R_Y) dR_Y \quad (22)$$

⑤ 열전도 영역을 갖는 구조함수 $S(R_Y)$ 는

$$S(R_Y) = constants = \lambda c A^2 \quad (23)$$

두께가 w 인 원통형

$$S(R_Y) = \lambda c A_0^2 \exp(4\pi\lambda w R_Y) \quad (24)$$

여기서 A_0 는 $R_Y = 0$ 일 때의 단면적이다.

구조함수로부터 형상을 얻어낼 수 있는데, 이것은 선형구조에서 가능하며 $c = constant$, $\lambda = constant$ 일 때 정확하다.

$$L(r) = \sqrt{\frac{\lambda}{c}} \int_0^r (S(R_Y))^{1/2} dR_Y \quad (25)$$

$$A(r) = \frac{1}{\sqrt{c\lambda}} (S(r))^{1/2} \quad (26)$$

여기서 r 은 누적저항이다.

3. 결 론

본 논문에서는 다바이스나 IC 패키지류의 열 시스템 특성을 전기회로의 단위계단응답 특성을 이용해 열 임피던스를 구하는 이론에 대해서 간략하게 정리하였다.

전기회로의 unit step function의 응답특성을 열시스템에 적용하여 구조함수를 구함으로써 열임피던스 즉 열저항 및 열용량을 하는 유도하였다. 또한 Protonotarios and Wing의 이론에 근거하여 열 시스템의 구조함수의 특성, 누적구조함수 및 차분구조함수에 대해서 기술하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] E.N.Protonotarios, O.Wing: "Theory of nonuniform RC lines", IEEE Trans. on Circuit Theory, V.14, No.1, pp. 2-12 (1967)
- [2] V.Szkely, Tran Van Bien: "Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method", Solid-State El, V.31, No.9, pp.1363-1368 (1988)
- [2] V.Szkely: "On the representation of infinite-length distributed RC one-ports", IEEE Trans. on Circuits and Systems, V.38, pp. 711-719 (1991)
- [3] M.S.Ghausi and J.J.Kelly, Introduction to Distributed Parameter Networks, New York: Holt, Rinehart and Winston, 1968
- [4] E.N.Protonotarios, O.Wing: "Theory of nonuniform RC lines", IEEE Trans. on Circuit Theory, V.14, No.1, pp. 2-12 (1967)
- [5] V.Szkely: "Convolution calculus in the network theory and identification", ECCTD'97, 30th Aug - 3rd, Sept. 1997 Budapest, Proceedings Vol.1. pp.49-56
- [6] Report on the transient thermal measurements on Infineon's BUZ103/100/111 packages, Budapest, 22.01.2000.
- [7] PWB - measurement of the effective thermal conductivity, experiments and feasibility study, Report, TUB-MicReD, April 2000
- [8] V.Szkely, M. Rencz: Thermal dynamics and the time constant domain IEEE CPMT, to be published