

히트싱크에 의한 MOSFET의 열전달 특성변화 분석

김기현, 서길수, 김형우, 김상철, 김남균, 김은동
한국전기연구원

Analyzing the Characteristics of Thermal transient on MOSFET depending on a Heat sink

Ki-Hyun Kim, Kil-Soo Seo, Hyoung-Woo Kim, Sang-Choel Kim, Nam-Kyun Kim, Eun-Dong Kim
KERI

Abstract - Power MOSFET의 구동시에는 많은 열이 발생하게 된다. 이때 발생하는 열은 소자의 특성이나 수명에 영향을 주어 오동작을 하게되는 원인이 되기도 한다. 일반적으로 열이 많이 발생하는 chip이나 개별소자의 경우 히트싱크를 부착하여 사용하게 된다. 본 논문에서는 열을 방출시키기 위해 사용되는 히트싱크에 의한 열 전달(Thermal Transient) 특성의 변화 및 히트싱크의 부착에 이용되는 히트싱크 컴파운드(heat sink compound)에 의한 열 전달 특성에 미치는 영향 등을 실험을 통하여 분석하였고, 이를 기술하였다.

1. 서 론

일반적으로 반도체 소자는 특성이 열화하지 않고 반영구적으로 사용할 수 있는 것으로 생각하여 대용량 사이리스터를 장기적으로 사용함으로써 발생하는 열화에 대해 검토된 예나 데이터는 국내 외적으로 거의 없는 실정이다. 그러나 실제로 지하철이나 철도, 발전소와 같은 곳에서 전력반도체 소자들의 경우 장시간 높은 전압과 전류에 노출됨으로써 소자의 특성이 열화 되는 현상을 보이고 있으며 이러한 열화 현상에 의해 소자가 파괴되는 경우도 있음이 보고되고 있다.

Chip이나 개별소자 등의 전기적인 패키지에서 발생하는 전자적인 오류의 주요 원인은 온도, 습도, 먼지, 진동 등을 들 수 있고, 이 중 열에 의한 문제 발생률은 약 70%에 이른다. 열과 관련된 문제는 다음과 같은 문제들 야기 시키게 되는데 그 종류로 Creep, Corrosion, Fatigue, Electro migration 등을 들 수 있다. 이와 같이 전력의 밀집도가 증가하고, 비용 절감의 요구가 커지는 현대의 전력 반도체를 만드는 것에선 전기적인 최적화에 관련된 열적 시스템의 최적화가 더욱더 중요시 되고 있다.

본 논문에서는 열전달 물질인 히트싱크 컴파운드나 히트싱크가 MOSFET의 열 응답(thermal response) 특성에 주는 변화를 측정하여 재해석 해봄으로써 이들 열전달 물질이 MOSFET의 열전달 특성변화에 주는 영향을 비교 분석해 보았다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

열전달 특성변화를 측정하기 위해서는 먼저 logarithm time scale의 단위 응답(step response) 함수를 측정하여야 한다. 이를 위해서 드레인 전류인 I_D (drain current)값을 일정하게 개별소자(discrete device)에 인가시키고, 개별소자의 Drain과 Gate 사이에 일정 전압의 U_{DG} Pulse를 인가하여 개별소자를 가열시킨다. 개별소자의 가열에 따른 단위응답(step response) 함수는 인가되어지는 U_{DG} 펄스 사이에 센서를 이용하여 U_{GS} 값을 측정하여 을 얻

는다. 이 단위응답 함수를 분석을 위해 log. time scale로 변환한 함수가 $a(z)$ 가 된다. 이를 가열곡선(heating curve) 또는 열 임피던스 곡선(thermal impedance curve)이라 부른다.

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

열 임피던스 곡선을 식 (1)과 같이 미분하여 디컨볼루션(deconvolution)하면 시상수 스펙트럼(time constant spectrum) $R(z)$ 을 구할 수 있다. $R(z)$ 의 이산화(discretization)는 Foster canonic form의 RC 네트워크 모델로 나타내어진다.

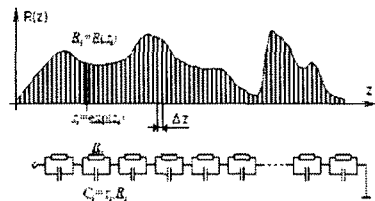


그림 1. RC network model of Foster canonic form

그러나 Foster 모델은 이론적인 이어서, 열 용량(thermal capacitance)이 시스템 주위(ambient)에도 존재하는 열 시스템의 물리적인 구조에는 적합하지 않다. 그러므로 열 시스템에 적용하기 위하여 열 시스템의 RC 네트워크 모델은 Cauer canonic form을 이용하여 표현되어진다.

Cauer 모델의 그래프적인 표현을 누적 구조함수(Cumulative structure function)라 한다. 그림 2는 누적 구조함수와 Cauer RC 네트워크 모델을 표현하였다. 누적 구조함수를 이용하여 열전도 경로를 알 수 있다.

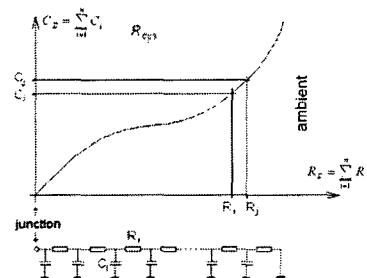


그림 2. cumulative structure function

누적 구조함수의 수평 그래프 부분은 일정량의 물질이

존재한다는 것을 뜻하게 된다.

누적 구조함수를 미분한 형태인 차분 구조함수(differential structure function)는 누적 열 용량을 열 저항으로 미분한 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 이식에서의 K는 열 흐름 경로의 수직 단면인 사각면적 A의 비례수이다.

$$K(R_{\Sigma}) = \frac{dC_{\Sigma}}{dR_{\Sigma}} = \frac{cA dx}{dx/\lambda A} = c\lambda A^2 \quad (2)$$

이 그래프의 피크(peak)값을 이용하여 시스템 내부의 물질이 바뀌는 것을 알 수 있으며, 물질 별 누적 열 저항값을 분석 할 수 있게 된다.

2.2 실험장치

열전달 특성을 측정하기 위해 사용된 소자는 n-type MOSFET인 IRF540을 이용하였으며, 비교 측정에 사용된 히트싱크(heat sink)는 그림 3과 같은 구조로 이루어져 있고, 히트싱크 컴파운드는 CASMOLY HC300를 이용하였다.

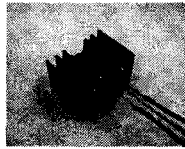


그림 3. 측정에 사용된 heat sink

히트싱크의 크기에 따른 열전달 특성의 변화를 측정하기 위해서는 그림 4와 같은 5 종류의 히트싱크를 이용하였고, 각각의 히트싱크의 표면적과 부피는 표 1에 나타나 있다. 히트싱크의 크기에 따른 열전달 특성변화의 측정에는 열 전도성과 확산특성을 높이기 위하여 MOSFET와 히트싱크 사이에 히트싱크 컴파운드를 충분히 발라 주었다.

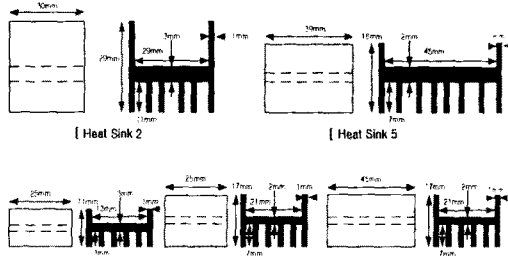


그림 4. 측정에 사용된 히트싱크 종류별 수치

표 1. 히트싱크 종류별 표면적과 부피

종류 분류	Heat Sink 1	Heat Sink 2	Heat Sink 3	Heat Sink 4	Heat Sink 5
표면적	3666mm ²	8178mm ²	2446mm ²	6426mm ²	9610mm ²
부피	2700mm ³	5670mm ³	1825mm ³	4860mm ³	6396mm ³

2.3 실험

히트싱크에 의한 MOSFET의 열전달 특성변화를 측정하기 위해 앞서 온도(T)의 변화량에 따른 V_{TM}(forward voltage drop)의 변화량을 나타내는 K-Factor를 다음과 같은 조건으로 측정 하였다. 측정 온도 범위는 25~40°C

에서 5°C간격으로 측정하여 K-Factor값을 얻을 수 있었다. 측정된 K-Factor는 $\frac{dV}{dT} = 4.076 [mV/°C]$ 이다. K-Factor는 열전달 특성 측정 시에 입력 값으로 입력되어진다.

히트싱크가 없는 MOSFET의 열 임피던스 곡선은 가열 모드(heating up mode)에서 측정 하였으며, I_D=30mA, U_{DG}=10V, Power step=320mW, T_{max}=500초 이내, Sample/OCT=400개를 조건으로 측정하였다.

히트싱크가 있는 MOSFET의 열 임피던스 곡선은 같은 모드의 조건으로 I_D=180mA, U_{DG}=10V, Power step=180mW, T_{max}=2000초 이내의 조건으로 측정하였다. 드레인 전류는 히트싱크의 크기에 따라 조절하여 측정 하였다.

3. 결과 및 검토

그림 5의 왼쪽 그래프는 측정에 사용된 MOSFET의 K-Factor 곡선이며, 오른쪽 그래프는 히트싱크가 없는 MOSFET의 열 임피던스 곡선을 나타낸다.

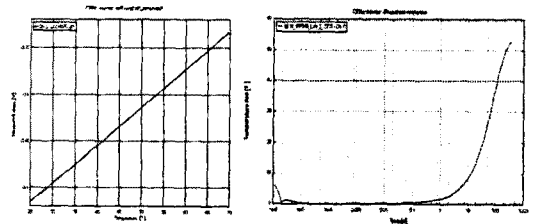


그림 5. K-Factor and Thermal Impedance curve

열 임피던스 곡선을 이용하여 Cauer 모델의 RC 네트워크 모델로 변환시켜 그래프적으로 표현하면 누적 구조함수가 나오게 되고, 다시 이를 열 저항으로 열 용량을 미분하면 차분 구조함수가 나타난다. 이를 그림 6에 표현하였다. chip에서의 열 저항값은 3[K/W]가 나오고, 패키지(Package)까지의 열 저항값은 34[K/W], 주위까지의 열 저항값은 168[K/W]가 측정 계산되어진다.

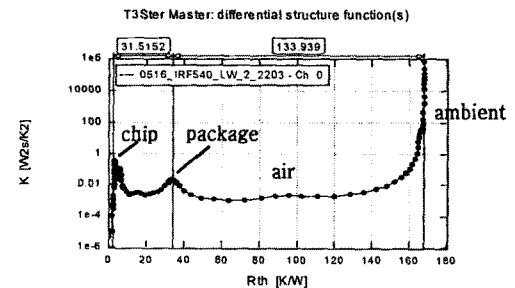


그림 6. Differential structure function of MOSFET

그림 7은 열전달 물질인 히트싱크 컴파운드와 히트싱크에 의한 열전달 특성변화를 측정하여 차분 누적함수를 비교한 그래프이다. 측정 결과 히트싱크에 의한 열 저항값의 차이는 130.5[K/W]로 나왔고, 히트싱크와 측정 소자 사이에 히트싱크 컴파운드를 바를 경우 이 컴파운드에 의해서 다시 8[K/W]의 열 저항값의 감소함을 확인할 수 있었다.

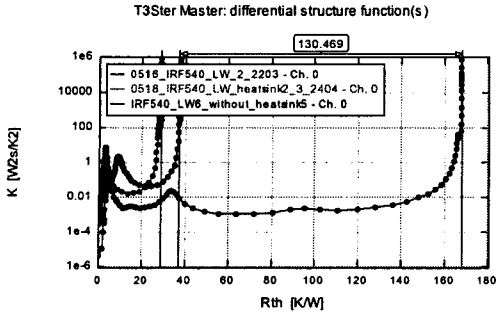


그림 7. 히트싱크에 의한 열전달 특성변화

그림 8은 크기가 다른 5개의 히트싱크에 의한 MOSFET의 열 임피던스 곡선을 측정하여, 이를 누적 구조함수 그래프로 표현하였다. 히트싱크의 표면적이 넓어짐에 따라 열용량의 크기가 다음과 같이 증가함을 알 수 있었다.

2.9 ▽ 4.2 ▽ 6.5 ▽ 6.5 ▽ 8.9 [단위 : Ws/K]

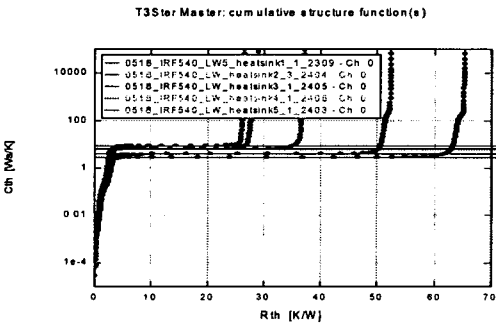


그림 8. 히트싱크 크기별 누적 구조함수

그림 9는 열용량을 열저항에 의해 미분한 차분 구조함수를 나타낸다. 히트싱크의 표면적에 의한 열저항값의 차이를 표 2에 나타내었다.

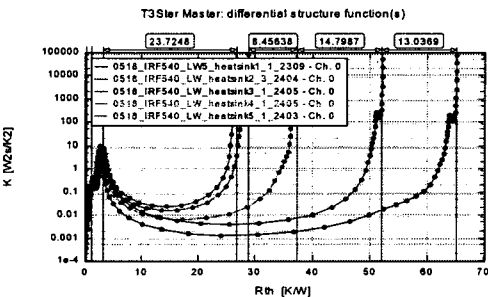


그림 9. 히트싱크 크기별 차분 구조함수

표 2. 히트싱크 크기별 열저항 비교

분류 \ 종류	Heat Sink 1	Heat Sink 2	Heat Sink 3	Heat Sink 4	Heat Sink 5
표면적비율	1.5	3.3	1	2.6	3.9
R_{thja} [K/W]	52.3	28.9	65.2	37.3	26.5
감소비율	80%	44%	100%	57%	41%

차분 구조함수 그래프를 이용하여 chip에서 히트싱크까지의 물질별 열저항값의 변화를 확인 할 수 있었다. 패키지 내의 chip접한 부분에서 약 0.3[K/W]의 열저항값이 계산되었고, 패키지가치는 1.3[K/W], 히트싱크까지는 3.1[K/W]로 각각 계산되었다. 히트싱크의 크기가 MOSFET의 열전달 특성변화에 주는 영향을 분석을 통하여 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 MOSFET에 일정 전압의 전압펄스를 인가하여 열 임피던스 곡선을 측정하였고, 측정된 값을 Cauer 모델을 이용하여 누적 구조함수와 차분 구조함수 그래프를 구하여, 열저항 및 열용량을 구하였다. MOSFET의 열저항 및 열용량을 여러 열전달 물질에 의한 열전달 특성변화와 비교해 봄으로써 열전달 물질이 chip이나 개별소자의 열전달 특성에 미치는 영향을 분석해 보았다.

히트싱크없이 개별소자만의 열 저항값을 측정된 결과 168[K/W]로 나왔고, 컴파운드를 바른 히트싱크에 의한 열저항값은 29[K/W]로 측정 계산되어졌다. 히트싱크에 의해 139[K/W]의 차이가 나고 5.8분의 1로 열저항값이 줄어드는것을 확인할 수 있었다.

히트싱크의 표면적의 차이에 의한 MOSFET에 발생하는 열저항값의 차이를 비교한 결과 히트싱크의 표면적이 약 3.9배 큰 히트싱크가 작은 히트싱크의 열저항값에 비해 약 59% 줄어듦을 확인 할 수 있었다. 그러나 히트싱크의 크기에 비례하여 열저항값이 줄어드는 폭이 일정한 것이 아니라, 표면적이 약 3배에 이르렀을때 약 55%로 감소하고, 이 이상의 크기에서는 열저항값의 감소폭이 둔화되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 방법을 이용하여 IC Chip이나 개별소자들의 적절한 히트싱크의 크기를 찾을 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 서길수, 김상철, 김형우, 김남균, 김은동, “전력계통용 대용량 사이리스터의 가속열화 시험법”, 대한전기학회 하계학술대회, C집, pp 1785-1787, 2003. 7.
- [2] 김형우, 서길수, 김상철, 김남균, 김은동, “전력용 반도체 소자의 열화에 의한 소자파괴 메커니즘 분석”, 대한전기학회, 2003.11.
- [3] 김상철, 서길수, 김은동 “HVDC용 사이리스터 소자의 전기적 특성 simulation 연구”, 대한전기학회 하계학술대회, C 집, pp 1559-1561, 2003. 7
- [4] 서길수, 이양재, 김형우, 김상철, 방욱, 김남균, 김은동, 신의철, “대용량 사이리스터의 전압/열에 의한 가속열화 시스템” 대한전기학회, 하계학술대회, C집, 2004. 7
- [5] 김형우, 서길수, 김상철, 방욱, 김기현, 김남균, 김은동, “대용량 전력반도체 소자의 열화진단”, 한국전기전자재료학회 추계학술대회, 2004. 11
- [6] MicRED Ltd, “Properties of the structure function and its use for structure identification and for compact model generation”, 2000.
- [7] AMD Ltd, “Thermal Interface Material Comparison: Thermal Pads Vs. Thermal Grease”, 2004. 4.
- [8] E.N.Protonotarios, O.Wing: “Theory of nonuniform RC lines”, IEEE Trans. on Circuit Theory, V.14, No.1, pp. 2-12 (1967)
- [9] John W. Sofia, Analysis Tech, Wakefield : “Analysis of Thermal Transient Data with Synthesized Dynamic Models for Semiconductor Devices”, IEEE, 1999