

12kV급 다이오드의 패키징 구조에 따른 방열 특성 연구

Heat Dissipation Analysis of 12kV Diode by the Packaging Structure

김남균*, 김상철*, 방 옥*, 송근호**, 김은동*

(Nam-Kyun Kim*, Sang-Cheol Kim*, Wook Bahng*, Geun Ho Song** and Eun-Dong Kim*)

Abstract

Steady state thermal analysis has been done by a finite element method in a diode of 12kV blocking voltage. The diode was fabricated by soldering ten pieces of 1200V diodes in series, capping a dummy wafer at the far end of diode series, and finally wire bonded for building anode and cathode terminal. In order to achieve high voltage and reliability, the edge of each diode was beveled and passivated by resin with a thickness of 25 μ m. It was assumed that the generated heat which is mainly by the on-state voltage drop, 9V for 12kV diode, is dissipated by way of the conduction through diodes layers to bonding wire and of the convection at the surface of passivating resin. It was predicted by the thermal analysis that the temperature rise of a pn junction of the 12kV diode can reach at the range of 16~34 $^{\circ}$ C under the given boundary conditions. The thickness and thermal conductivity(0.3~3W/m-K) of the passivating resin did little effect to lower thermal resistance of the diode. As the length of the bonding wire increased, which means the distance of heat conduction path became longer, the thermal resistance increased considerably. The thermal analysis results imply that the generated heat of the diode is dissipated mainly by the conduction through the route of diode-dummy wafer-bonding wire, which suggests to minimize the length of the wire for the lowest thermal resistance.

Key Words : high voltage, diode, thermal analysis, temperature rise, finite element method

1. 서 론

고전압 다이오드는 마이크로웨이브 오븐과 같은 가전제품, 산업용 인버터 회로나 전력변환장치에 사용되는 전력반도체(power semiconductor)의 하나이다. 전압저지능력이 수천 V 이상인 다이오드는 단일 칩을 사용하기보다는 내전압이 작은 여러 개의 소자를 직렬로 적층하는 경우가 대부분이다. 따라서 이러한 고전압 소자는 전류가 흐르는 방향으로 두꺼운 구조를 가지게 되어 소자에서 발생한 손실열을 방출하는데 불리한 구조를 갖게 된다.

전력소자의 전류밀도는 반도체 웨이퍼를 기준으로 100A/cm²에 이르며 이때 소자의 손실(power loss)에 의한 발열밀도는 100~250W/cm²에 이른다. 따라서 전력소자에서 발생하는 손실열을 방출하여 소자의 junction 온도를 적정하게 유지하는 것은 패키지 디자인에 있어서 가장 우선적인 고려사항이 되어왔다. 특히 적층형 고전압 다이오드는 웨이퍼 면에 수직 방향으로 5~15개의 실리콘 웨이퍼가 적층되어 있을 뿐만 아니라 각 층마다 솔더가 삽입되어 있고 바깥쪽은 전자회로와 연결을 위한 와이어가 접합되어 있는 일반적 구조를 가지고 있다. 또한 고전압 다이오드의 절연을 위하여 다이오드 소자의 측면벽(side wall)에는 passivation 막이 있으며 열방출에 관한 이 막의 역할도 잘 드러나 있지 않다.

본 연구에서는 1200V급 다이오드 10개를 적층하

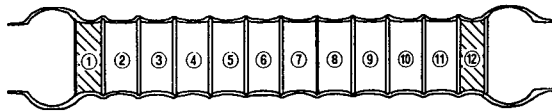
* : 한국전기연구원 전력반도체그룹
(경남 창원시 성주동 28-1
Fax: 055-280-1590
E-mail : nkkim@keri.re.kr)

** : 경상대학교 전자통신공학부

여 제작한 12kV급 다이오드의 정상상태에서의 열적 특성을 유한요소법으로 해석하였다. 다이오드 패키지에서 결선용 와이어의 길이와 다이오드 소자 측면의 passivation 막의 특성과 그 표면에서의 열전달계수를 변수로 하여 junction 부의 온도상승과 소자의 온도분포 변화를 조사하였다.

2. 열해석 대상 분석

열해석 대상인 12kV급 다이오드의 단면구조와 구성재료를 그림 1에 나타내었다. 가운데를 중심으로 하여 1200V급 다이오드 10개를 적층하고 가장자리에 더미 웨이퍼를 각각 한 장 붙인 후 알루미늄 lead wire를 연결하였다. 이 lead wire는 다이오드의 양극과 음극에 접합되어 전자회로와 연결되며 회로 구성에 따라 길이가 정해진다.



명 칭	위 치	재 료
Lead wire	⑬의 왼쪽	Aluminum
Dummy wafer	①	Silicon
Diode	②~⑪	Silicon
Dummy wafer	⑫	Silicon
Lead wire	⑭의 오른쪽	Aluminum

그림 1. 12kV급 다이오드 단면구조와 그 구성재료.

다이오드와 다이오드간은 물론이고 다이오드와 더미 웨이퍼 및 lead wire간은 Pb-10Sn 솔더로 접합하였다. 다이오드 및 더미 웨이퍼의 두께는 300 μ m로 동일하였고 솔더층의 두께는 20 μ m였다. 다이오드의 양극 및 음극은 솔더링 특성을 향상시키기 위하여 5 μ m 두께의 은 도금층이 있다. 또한 다이오드 소자들은 측면이 에칭되어 베벨링된 구조를 가졌다. 한편 다이오드를 포함하여 lead wire의 표면은 passivation 수지가 25 μ m의 두께로 코팅되어 있었다.

3. 열해석 모델링과 경계조건

기본적으로 다이오드 소자는 원통형 구조를 가지며 여러 가지 대칭구조가 있어 간편한 3차원 모델링이 가능하다. 우선 디스크형 소자는 원의 중심으로부터 동심원상으로 일정한 특성을 보일 것이므로

원의 360°를 모델링하는 대신 원통(cylinder)의 축에서 보아 30° 회전한 조각으로 모델링하였다.

또한 다이오드 소자 6번과 7번 사이의 솔더층을 중심으로 양쪽은 기하학적으로 대칭이므로 다른 한쪽은 열해석 모델에서 제외하였다. 결국 열해석용 3차원 모델은 알루미늄 와이어로부터 6번 다이오드까지로 구성된 원기둥의 12등분 조각이라고 할 수 있다. 각각의 다이오드 소자들은 측면이 에칭되어 beveled 구조를 가지도록 모델링하였다.

그림 2는 3차원 열해석 모델의 단면을 보여주고 있다. 이렇게 하여 그림 3과 같은 3차원 모델을 만들었다. 사용된 모델은 절점(node)이 2430개, 유한요소(finite element)의 수가 2332개였다.

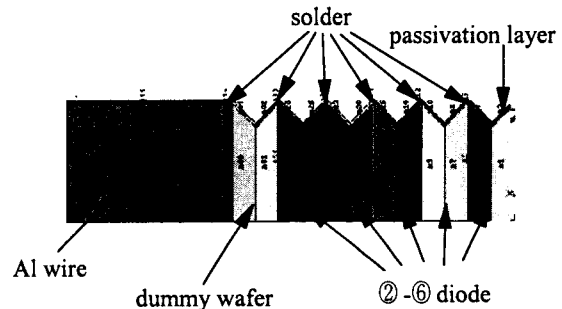


그림 2. 3차원 열해석 모델의 단면.



그림 3. 열해석에 사용된 3차원 모델.

표 1. 열해석 모델링에 사용된 재료와 열전도도

재료 번호	재료명	열전도도 (W/m-K)	적용범위
1	실리콘	135	diode dummy wafer
2	Pb-Sn 솔더	43	solder layer
3	절연수지	0.3-3.0	passivation layer
4	알루미늄	222	lead wire

열해석에 사용된 재료는 표 1에 나타난 바와 같이 4가지의 재료들로 구성되었으며 각 재료의 열전도도는 온도변화에 따른 변동을 고려하지 않았다.

12kV급 다이오드에서 주요 발열원은 10개의 1200V급 다이오드임을 알 수 있었다. 즉 각각의 다이오드의 통전중의 파워손실을 결정하는 온전압 강하, $V_F=0.9V$ 인데 비하여 솔더층이나 dummy wafer 전체의 저항 발열분은 다이오드 소자 발열분의 1% 미만이므로 고려하지 않았다. 한편 다이오드 소자에서의 주된 발열부위는 p-n junction 영역이므로 실제 p-n junction 영역인 표면으로부터 $40\mu m$ 깊이 에 분포하는 유한요소들이 개별소자의 발열총량(0.315 watt)을 낸다고 가정하고 발열총량을 유한요소들의 체적으로 나누어 $49 \text{ watt}/\text{mm}^3$ 의 발열밀도를 입력하였다.

열해석의 변수로서 제조공정에서 쉽게 바꿀 수 없는 소자의 크기와 모양, passivation 수지의 두께 등은 고려하지 않았으나 수지의 열전도도와 알루미늄 와이어의 길이를 주요 변수로 삼아 열해석을 행하였다. Passivation 수지의 열전도도는 0.3, 1.0, $3.0W/m-K$ 로 변화시켰으며, 양쪽의 알루미늄 와이어의 길이는 최대 5mm까지 변화시켰다.

수지표면에서의 열전달계수는 자연냉각이 이루어진다고 가정하고 $5W/m^2-K$ 로 고정하였다. 일반적으로 패키지의 끝은 전자회로의 히트싱크(heat sink)에 접합되므로 본 소자의 알루미늄 와이어 끝의 노드의 온도는 $25^\circ C$ 로 고정하였다. 이렇게 열해석된 p-n junction 온도와 히트싱크 온도간의 차이로부터 열저항을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 알루미늄 와이어 길이가 3mm, 수지의 열전도도가 $1.0W/m-K$, 열전달계수= $5W/m^2-K$ 이고 정상상태의 발열조건에서의 온도분포를 나타내고 있다. 전체적으로 최고온도는 $50.4^\circ C$ 로써 히트싱크의 온도($25^\circ C$)에 비하여 $25.4^\circ C$ 의 온도상승(temperature rise, ∇T)이 예측되었다.

그림 5는 그림 4의 조건과 동일할 때 ⑥번 다이오드 소자의 표면에서의 온도분포를 보여주고 있다. 그림 5의 부채꼴 모양은 디스크형 다이오드 소자의 12분의 1조각을 모델링한 것으로 부채꼴의 중심이 디스크형 소자의 중심과 같다. 그림 5를 보면 소자 표면에서의 각 지점별 온도차는 최고 $0.13^\circ C$ 에 지나지 않음을 알 수 있다. 그림 4에서 이미 본 바와 같이 ⑥번 다이오드와 알루미늄 와이어의 끝 부분의 온도차가 $25.4^\circ C$ 에 이르렀음을 고려하면 소자표면

에서의 온도차는 사실상 없다고 할 수 있다.

다이오드에서의 열 방출경로는 두 가지가 있다. 한 가지는 디스크형 다이오드 소자의 원심 방향으로 다이오드에서 방출된 열이 passivation용 수지를 통과하여 이 수지표면에서 대기와 자연냉각 혹은 강제 냉각되는 경우를 생각할 수 있다. 다른 하나의 열방출 경로는 원기둥 모양의 종축을 따라 다이오드 → dummy wafer → 알루미늄 와이어의 순으로 전달되는 것이다. 이 경우

알루미늄 와이어의 끝은 대개 열용량이 큰 전자회로 본체와 접촉하고 있으므로 일종의 히트 싱크와 결합되어 있다고

가정할 수 있다. 그림 5. ⑥번 다이오드 소자 따라서 알루미늄 와이어의 끝이 일

종의 기준 케이스온도(case temperature, T_c)라고 할 수 있다. 기준온도는 임의로 설정할 수 있으나 본 해석에서는 $25^\circ C$ 로 입력한 바 있다.

그림 4와 5의 결과를 종합하면 10개의 다이오드 소자를 적층한 고전압 다이오드 소자에서의 주요 열방출 경로는 개개의 소자에서 알루미늄 와이어까지임을 짐작할 수 있다. 이는 일반적으로 고분자 수지재료의 열전도도가 금속 재료의 수백분의 1 정도임을 감안할 때 passivation 수지를 통한 열전달이 용이하지 않음이 예측된다.

한편 그림 5에서 소자의 중심부보다는 절연수지에 근접한 부분이 다소 온도가 높음을 알 수 있다. 이는 표면으로부터 $40\mu m$ 깊이에 존재하는 p-n 접합

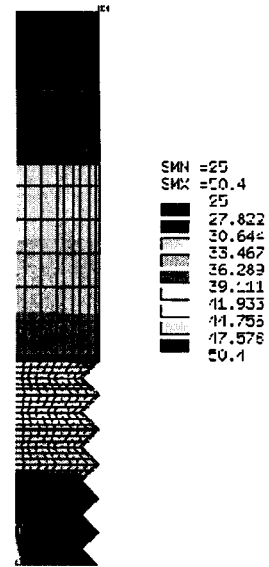


그림 4. 열해석한 12kV급 다이오드의 온도분포

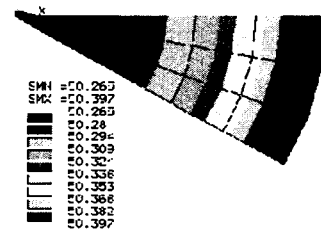


그림 5. ⑥번 다이오드 소자 표면에서의 온도분포

부에서 발생한 열이 종축방향을 따라 알루미늄 와이어 방향으로 열전도 과정으로 확산되다가, beveling 되어 잘록한 부분에서 열전달 면적이 좁아져 열플럭스가 집중되는 현상 때문으로 이해된다.

한편 passivation 수지의 두께를 25 μ m로 고정하고 그 열전도도의 변화가 소자의 열방출 특성에 미치는 영향을 표 2에 나타내었다. 수지의 열전도도가 0.3W/m-K인 경우와 1.0W/m-K인 경우의 차이는 열방출에 전혀 영향을 끼치지 못하는(0.04%) 것으로 드러났다. 드러나 JCR 열전도도가 3W/m-K로 높아질 경우 ∇T 는 0.09 $^{\circ}$ C가 낮아져 0.35%의 온도강하 효과가 있는 것으로 분석되었다.

고분자 수지에서 3W/m-K의 열전도도는, 열전도도가 우수한 세라믹 충진재를 다량으로 사용할 경우 예나 가능한 것으로 사실상 달성하기 어려운 열전도 특성이다. 결론적으로 12kV급 소자에서 JCR 열전도도를 높이는 노력은 열저항 감소에 거의 미치는 영향이 없다고 할 수 있다.

표 2. Passivation 수지의 열전도도가 p-n 다이오드 접합부 온도에 미치는 영향

열전도도	최고온도 $T_{MAX}(^{\circ}C)$	기준온도 $T_c(^{\circ}C)$	온도상승	
			$\nabla T(^{\circ}C)$	대비
1.0W/m-K	50.40	25.0	25.40	100.00%
0.3W/m-K	50.41	25.0	25.41	100.04%
3.0W/m-K	50.31	25.0	25.31	99.65%

표 3. 알루미늄 lead wire의 길이가 p-n 다이오드 접합부 온도에 미치는 영향

wire 길이	최고온도 $T_{MAX}(^{\circ}C)$	기준온도 $T_c(^{\circ}C)$	온도상승	
			$\nabla T(^{\circ}C)$	대비
3 mm	50.4	25.0	25.4	100.0%
1mm	41.8	25.0	16.8	66.1%
2mm	46.1	25.0	21.1	83.1%
5mm	59.0	25.0	34.0	133.9%

알루미늄 와이어 길이가 12kV급 다이오드의 p-n 접합부 온도 강하에 미치는 영향을 표 3에 요약하였다. 알루미늄 와이어가 3mm인 경우를 기준으로 할 경우 1mm인 경우는 8.6 $^{\circ}$ C(34%), 2mm인 경우는 4.3 $^{\circ}$ C(17%)의 p-n junction 온도강하 효과가 있는 것으로 분석되었다. 또한 알루미늄 와이어 길이가 5mm

로 증가할 경우 접합부는 8.6 $^{\circ}$ C(34%)의 온도 상승효과가 있는 것으로 분석되었다.

그림 1의 ②~⑥번 다이오드(실질적으로는 ②~⑪번 다이오드)에서 발생한 대부분의 열은 디스크형 다이오드의 종축 방향으로 전달되어 알루미늄 와이어의 끝에 접합된 히트싱크로 빠져나감을 의미한다. 따라서 고압 다이오드의 동작시에 온전압 강하에 의하여 발생하는 p-n 접합부 온도 상승을 낮추기 위한 최선책은 알루미늄 와이어 길이를 최소화하는 것임을 알 수 있다.

12kV급 고압 다이오드의 열저항은, 길이 3mm의 알루미늄 와이어 패키지인 경우의 온도상승(∇T) 25.4 $^{\circ}$ C를 기준으로 계산할 때 80.8 $^{\circ}$ C/W가 된다. 특히 정상상태에서의 온도상승 25.4 $^{\circ}$ C는 매우 우수한 것으로 평가된다. 즉 일반적으로 전자회로 등에서 설정되는 최고 케이스 온도($T_{C,max}$)는 110 $^{\circ}$ C인 경우가 많은데 이러한 경우라도 다이오드 접합부온도는 $T_c + \nabla T = 135.4^{\circ}$ C가 된다. 이 온도는 일반적으로 설정되는 max. junction 온도인 150 $^{\circ}$ C보다 안정적으로 낮은 수치로 평가된다.

4. 결 론

1200V급 다이오드 10개가 직렬로 적층된 12kV급 다이오드에서 열해석을 행하였다. 소자에서 발생된 손실열의 대부분은 적층된 소자의 종축방향을 따라 알루미늄 와이어 패키지를 통하여 방출되는 것으로 드러났다. 따라서 고전압 다이오드의 열저항을 낮추기 위해서는 다이오드 소자로부터 히트 싱크 즉 알루미늄 와이어 끝까지의 길이를 최소화하여야 함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 2000년도 중점국가연구개발사업 “전력용반도체 기술개발”의 지원대상과제의 일환으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] N.K. Kim et al., J. Microelectronics & Pack. Soc., 6[3] 23-33(1999).
- [2] C.A. Neugenbauer et al., The Packaging of Power Semiconductor Device, Gordon & Beach Science Publishers, 1986.
- [3] A. Lostetter et al., J. Adv. Microelectronics, Jan/Feb 25-27(1998).