

Super Junction MOSFET의 트렌치 식각 각도에 따른 열 특성 분석에 관한 연구

Thermal Characteristics according to Trench Etch angle of Super Junction MOSFET

강 이 구**

Ey Goo Kang**

Abstract

This paper analyzed thermal characteristics of super junction MOSFET using process and design parameters. Trench process is very important to super junction MOSFET process. We analyzed the difference of temperature, thermal resistance, total power consumption according to trench etch angle. As a result we obtained minimum value of temperature difference and thermal resistance at 89.3° of trench etch angle. The electrical characteristics distribution of super junction MOSFET is not showed tendency according to trench etch angle. We need iterative experiments and simulation for optimal value of electrical characteristics. The super junction power MOSFET that has superior thermal characteristics will use automobile and industry.

요 약

본 논문에서는 Super Junction MOSFET의 우수한 열 특성을 검증하기 위해 도출된 공정 및 설계파라미터를 이용하여 열특성을 분석하였다. 열 특성 중 핵심공정인 Trench 식각 각도에 따른 온도차이, 열 저항, 그 때 흐르는 드레인 전류를 측정하여 전체 소비전력을 분석하였다. 분석한 결과 Trench 식각 각도가 89.3° 일 때 온도차와 열 저항 값이 가장 작게 나왔으며, 식각 각도에 따라서 분포는 경향성을 보이지 않았다. 따라서 반복 시뮬레이션과 실험을 통해 최적의 값을 도출해야 되며, 본 측정 결과 최적의 식각 각도는 89.3°와 89.6°의 결과를 보였다. 다른 전기적인 특성을 고려하여 최종 식각 각도를 보여야 하며, 열 특성의 우수한 SJ MOSFET이 산업에의 이용을 위해 본 논문의 자료가 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Key words : Super Junction, Power MOSFET, Thermal Resistance, Trench Etch, P-pillar, P-base concentration

1. 서론

전력 MOSFET 소자는 전압 구동 방식으로 동작하는 소자이며, 큰 전력을 처리하기 위해 설계된 스위

칭 디바이스로서 전원 공급 장치, 변환기, 모터 제어기 등에 널리 사용된다. 산업용 모터 구동에 사용되는 전력 MOSFET은 동작 상태에서 낮은 온 저항은 전력 공급의 손실은 줄여줌으로 효율을 높이고 결과적으로 저전력 구현을 가능하게 한다. 또한 스위칭 특성이 우수하며 입력 임피던스가 크기 때문에 구동 회로를 단순화 할 수 있는 장점이 있다. 하지만 고전압 전력 MOSFET의 경우 고전압 특성 향상을 위해 항복 전압을 증가시키려면 드리프트 영역의 비저항과 두께를 증가시켜야 하며 따라서 온-저항 특성이 항복 전압의 증가에 따라 급격히 증가하는 문제가 있다.

* Dept. of Photovoltaic Engineering, Far East University

★ Corresponding author: keg@kdu.ac.kr,

Tel:+82-43-879-3726

Manuscript received July. 24, 2014; revised Sep. 15, 2014, revised Nov. 27, 2014, accepted Dec. 3, 2014

이에 600V급 기준으로 고전압 특성을 가지면서도 기존 플래너 전력 MOSFET 대비 낮은 온-저항 특성을 가지는 유니파이드 전력 트랜치 MOSFET 기술로의 전환이 이루어지고 있다.

이러한 전력반도체는 스위칭 소자로서 동작 시에 스위치를 통해 흐르는 전류로 인해 필연적으로 줄열 (Joule's Heat)이 발생하게 된다. 일반적인 MOSFET 스위치 소자의 경우 전류량이 미비하여 발생하는 줄열의 양이 크지 않지만 전력반도체의 경우 수 [A] 단위의 전류가 흐르게 되어 발생하는 줄열의 양이 상당하다. 이렇게 발생하는 줄열은 열 자체로서 금속접합부의 크랙이나, 번트(burnt) 현상 등을 유발하여 전력반도체 소자에 치명적인 손상을 가하게 된다. 따라서 소자의 신뢰성을 이야기할 때 열 방출의 정도는 결코 빠질 수 없다.

본 논문에서는 SJ MOSFET의 우수한 열 특성을 검증하기 위해, 공정 및 소자 시뮬레이션으로 도출한 설계 및 공정 파라미터를 이용하여 열 특성 시뮬레이션을 수행하여, 그에 대한 특성 분석을 서술하였다.

II. 본론

1. SJ MOSFET의 열 저항과 전체전력, 온도 방출 설계

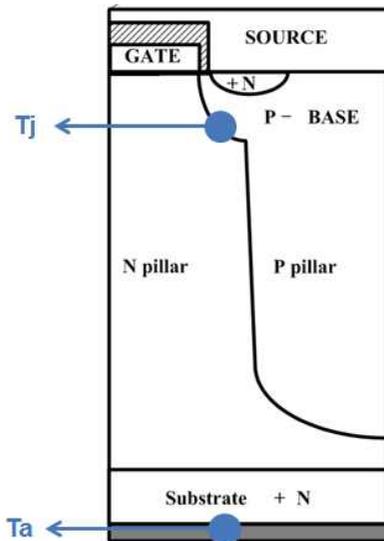


Fig. 1. The structure of SJ MOSFET for thermal characteristics

그림 1. 열특성 분석을 위한 SJ MOSFET의 구조

열 특성을 비교하기 위해서는 단순한 온도차이보다 구체적인 기준을 설정하여 비교할 수 있으며, 그 기준이 되는 것은 열 저항이다. 열 저항은 소자의 온도 특성의 하나로, 온도 상승률이라고도 한다. 그림 1에서 나타낸 바와 같이 일반적으로 소자의 온도 상승은 온도 상승 한 곳의 접합부의 온도를 $T_j[^\circ\text{C}]$, 소자의 바닥 전극에서의 온도를 $T_a[^\circ\text{C}]$ 이라 하면, 소자의 줄열에 의한 온도 상승분은 다음 식3 과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_j - T_a = R_{th} \cdot P_t \tag{1}$$

식1에서 R_{th} 는 열 저항으로 단위는 $[^\circ\text{C}/\text{W}]$ 로 나타내고, P_t 는 소자의 동작전류와 동작전압에 의해 소모되는 전체 전력[W]을 나타낸다. 식1을 풀이하면 전체 전력 소모분에 의해 R_{th} 만큼 비례하여 접합에서 발생한 온도가 밖으로 방출된다고 할 수 있다.

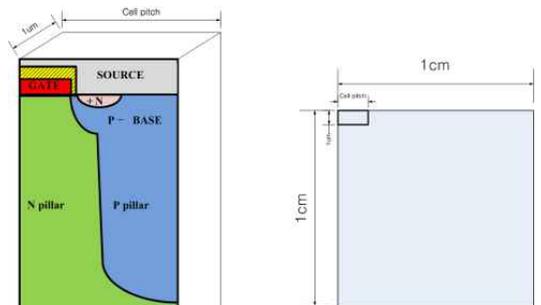


Fig. 2. The method obtaining current of SJ MOSFET
그림 2. 칩 전체에서 소자하나에 흐르는 전체 전류를 구하는 방법

그림 2는 칩 전체에서 소자 하나에 흐르는 전류를 구하는 방법을 보여주고 있다. 전체전력을 구해주기 위해서는 전체 칩 면적당의 기준을 생각해주어야 한다. 그림 2에서 보는 바와 같이 칩 면적 일반적으로 전체 칩 면적이 1cm^2 에 100A가 흐를 때 $R_{ds(on)}$ 을 기준으로 하여 칩의 성능을 표현한다. 따라서 열 저항에서도 이때의 기준을 사용하여 $100\text{A}/\text{cm}^2$ 에 대한 비례식을 이용하여 소자 하나(Cell Pitch x 1um)에서 흐르는 전류를 계산하여 그 때의 전류 값에 따른 셀 피치 소모 전력을 계산해야 한다.

2. SJ MOSFET의 열 저항 실험 결과 및 분석

열 특성을 분석하기 위하여 본 논문에서 사용한 SJ MOSFET 제작을 위한 공정 방법은 트랜치 필링 공정을 사용하였다. 초접합 공정 설계를 위한 트랜치

필라의 트랜치 각도에 따른 BV 특성과 Rds(on) 특성 평가 진행 및 셀피치 선정 및 레이아웃 까지 설계 진행 후 제작을 진행하였다. 시제품 제작 시 트랜치 각도에 따른 설계 결과 평가 후 소자의 신뢰성 측면의 특성 평가 및 개선을 위하여 신뢰성 설계를 위한 열 특성 평가진행하기 위하여 그림 3과 같이 SJ MOSFET 소자의 중요 변수인 트랜치 각도를 실험 변수로 설정하여 트랜치 각도의 변화에 따른 열 특성을 분석하였다.

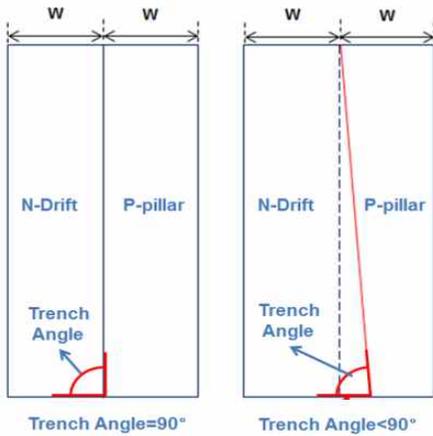


Fig. 3. Trench angle of SJ MOSFET according to P-pillar etch angle

그림 3. P-pillar 식각 각도에 따른 Trench 각도의 변화

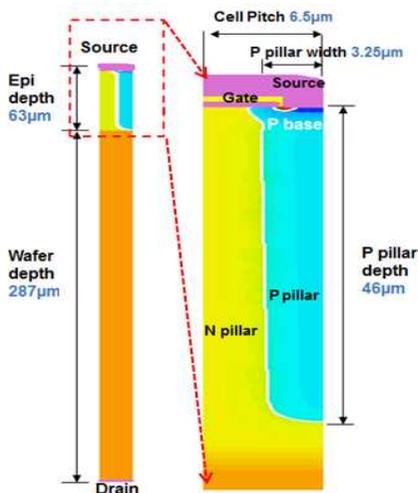


Fig. 4. The design parameter of SJ MOSFET for thermal characteristics

그림 4. 열 특성 분석을 위한 SJ MOSFET의 설계변수

그림 4에서 제시한 설계변수를 가지는 SJ MOSFET 구조에서 트랜치 각도를 90°에서 89.3°까지 감소시키면서 시물레이션 실험을 진행하였다.

1 Cell의 동작 전류인 6.5[μ A]에서의 열 특성을 분석하기 위한 사전 실험으로 외부 온도인 히트싱크(Heat Sink)의 온도를 300K(27 $^{\circ}$ C, 상온) ~ 375K (100 $^{\circ}$ C, 가혹조건)로 변경하면서 특성을 평가하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 히트싱크 300K 일 경우에는 바닥 쪽의 온도가 303K이고 접합에서의 온도가 315K 정도로 약 12도의 열이 방출됨을 확인할 수 있었고, 히트싱크 375K 일 경우는 바닥 쪽의 온도가 381K이고 접합 쪽의 온도가 406K로 접합부의 온도가 140 $^{\circ}$ C에 도달하여 상용화된 동작 온도 범위를 넘어가는 것을 확인하였다. 동작 온도에 따른 열저항 값은 상온을 기준으로 평가하므로 이후의 열 특성 평가 시는 히트싱크 온도를 300K로 설정한 후 열특성 분석을 진행하였다.

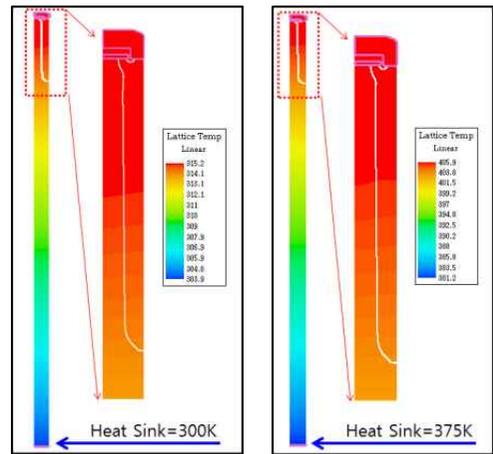


Fig. 5. The thermal characteristics of SJ MOSFET at 300 and 400K of heat sink

그림 5. 히트 싱크 300과 400K에서 SJ MOSFET의 열 특성 시물레이션

앞서의 특성 분석을 위한 SJ MOSFET의 사양에서 셀 피치 6.5 μ m를 사용하여 1개의 셀 피치에 흐르는 전류 6.5[μ A]와 6.5[μ A]에서의 소모 전압들을 사용하여 각각의 트랜치 각도 조건에서의 소모된 전체 전력을 구하였으며, 구체적으로 보면, 각 Trench 각도에 따라 히트 싱크 온도를 300K로 설정한 후 동작 전류 시물레이션에서의 Tj 와 Ta를 구하여 ΔT 를 구하였으며, 앞서 분석에서 구한 Pt와 ΔT 를 사용하여 이론

적 배경 절에서 확인한 $T_j - T_a = R_{th} \cdot P_t$ 을 사용하여 열 저항을 구하여 표 1과 그림 6에 도시하였다. 결과를 보면 알겠지만 식각 각도가 89.3°에서 가장 작은 열저항 값을 보여주고 있지만, 식각 각도와 열저항 값의 분포를 보아 특별한 경향이 보이지 않아, 실험을 통한 분석을 통해 최적의 값을 도출하는 것이 타당하다고 판단된다.

Table 1. The result of thermal characteristics of SJ MOSFET according to trench etch angle.

표 1. 트렌치 각도에 따른 열 특성 결과

	89.3	89.5	89.6	89.9	90.0
ΔT	3.51	4.65	4.03	8.25	4.38
V(Drain)	2.03	1.94	2.23	2.50	2.45
Rth	1.73	2.40	1.81	3.30	1.79

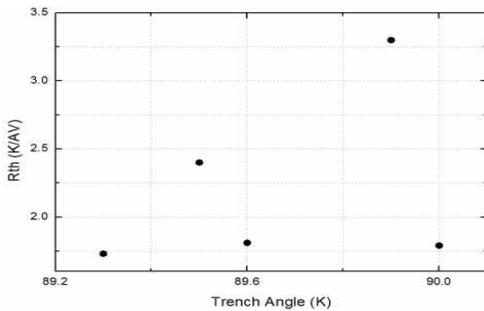


Fig. 6. The thermal resistance distribution of SJ MOSFET according to trench etch angle

그림 6. Trench 각도에 따른 열저항 분포

III 결론

본 논문에서는 SJ MOSFET의 우수한 열 특성을 검증하기 위해 도출된 공정 및 설계 파라미터를 이용하여 열특성을 분석하였다. 열 특성 중 핵심공정인 트렌치 식각 각도에 따른 온도차이, 열 저항, 그 때 흐르는 드레인 전류를 측정하여 전체 소비전력을 분석하였다. 분석한 결과 트렌치 식각 각도가 89.3° 일 때 온도차와 열 저항 값이 가장 작게 나왔으며, 식각 각도에 따라서 분포는 경향성을 보이지 않았다. 따라서 반복 시뮬레이션과 실험을 통해 최적의 값을 도출해야 되며, 본 측정 결과 최적의 식각 각도는 89.3°와 89.6°의 결과를 보였다. 다른 전기적인 특성을 고려하

여 최종 식각 각도를 보여야 하며, 열 특성의 우수한 SJ MOSFET의 활용을 위해 본 논문의 자료가 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Fujihira, T, Proc. of the ISPSD'98, Kyoto(1998), pp.423-426
- [2] H. Ninomiya, Y.Miura and K Kobayashi, Proc. ISPSD(2004), pp.177-180
- [3] Pravin N. Kondekar, TENCON Vol.4(2003), pp.1455-1458.
- [4] S. Iwamoto, K. Takahashi, H. Kuribayashi, S. Wakimoto, K. Mochizuki and H. Nakazawa, Power Semiconductor Devices and Ics, Proceedings. ISPSD'05. The 17thInternationalSymposiumon(2005), pp.31-34
- [5] Yoshiyuki Hattori, Kyoko Nakashima, Makoto Kuwahara, Tomoyuki Yoshida, Shoichi Yamauchi and Hitoshi Yamaguchi, Proceedings of International symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, Kitakyushu(2004), pp.189-192
- [6] E.G. Kang, S.H. Moon and M.Y. Sung, Microelectronics journal, Vol.32, Issue.8(2001), pp.641-647
- [7] E.G. Kang and M.Y. Sung, Solid-State Electronics, Vol.46, Issue.2(2002), pp.295-300

BIOGRAPHY

By Goo Kang (Life Member)



2000 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
 2005 : MS degree in Electrical Engineering, Korea University.
 2006 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.
 2003~present : professor in department of photo voltaic engineering, Far East University