

소개 Introduction

전력전자의 핵심적인 기술은 전력변환장치를 사용하여 전기에너지의 형태를 가공하는 것이다. 예를 들어 DC/DC 또는 DC/AC, AC/DC, AC/AC 전력 변환 기술은 전력변환 컨버터를 활용한다. 이러한 전력변환장치는 스위치 소자와 수동 소자의 조합으로 구성한다. 전력변환장치의 스위치 소자는 일반 반도체 소자보다 높은 전압, 높은 전류를 견딜 수 있어야 하므로 전력용 반도체를 이용하게 된다. 본 문서에서는 실리콘 전력용 반도체에 대해 소개한다.

전력용 반도체 Power semiconductors

전력용 반도체는 전력전자에서 스위치 혹은 정류기로 사용되는 장치를 통칭한다. 신호 수준의 반도체와 달리 도통 운전(commutation mode)이 주로 사용된다. 즉, ON/OFF 상태가 중요하며 선형 구간(linear operation)은 고려되지 않는다.

전력 회로 상의 스위치는 ON/OFF 상태에 대한 제어가 항상 가능하지는 않다. 예를 들어 다이오드는 양단에 걸리는 전압과 전류 방향에 따라 켜지며, 꺼질 때도 전압, 전류에 영향을 받는다. 사이리스터의 경우 켜지는 순간을 제어할 수 있지만, 꺼지는 동작은 다이오드와 같이 제어할 수 없다. 반면, BJT, MOSFET, IGBT 등의 소자는 제어 신호를 인가하여 도통 여부를 결정할 수 있다.

전력변환장치(이하 컨버터) 설계에서는 기본적으로 이상적인 특성을 가정하게 된다.

- (1) 임의의 큰 Breakdown 전압을 견딘다.
- (2) 켜져 있을 때 소자 양단 전압 혹은 저항이 매우 작다.
- (3) Turn ON/OFF 속도가 매우 빠르다.
- (4) 전력 소모를 견디는 능력이 뛰어나다.

1. 임의의 큰 Breakdown 전압을 견딘다는 것은 꺼졌을 때 역전압을 견딜 수 있다는 것이다. 실제로는 소자가 견딜 수 있는 전압이 제한되어 있기 때문에 이를 고려하여 소자를 선정해야 한다.

2. 켜져 있을 때 소자 양단 전압이나 저항이 매우 작다는 것은 회로 동작이 전원(Source)과 부하(Load) 사이 에너지 변환 시 회로 동작 상 영향이 거의 없다는 것이다. 실제로는 Forward-biased 전압이 발생하거나 On-resistance가 존재하기 때문에 부하 전류의 왜곡 등이 발생할 수 있다.
3. Turn ON/OFF 속도가 매우 빠르다는 것은 스위치가 즉각적으로 반응하여 스위칭 동작 시 회로가 즉각적으로 변화한다는 것이다. 실제로는 시지연이 발생하기 때문에 Dead-time 등을 고려해야 한다.
4. 전력 소모를 견디는 능력이 뛰어나다는 것은 회로 동작으로 인해 소자에서 발생하는 열을 무한정 견딘다는 것이다. 실제로는 방열 특성, Junction 온도 제한 등으로 소자 설계에 있어 열적인 요소를 반드시 고려해야 한다.

즉, 컨버터 구조 및 동작 설계를 위해 시뮬레이션을 할 때에는 이상적인 특성을 기반으로 진행하지만, 실제 제작 시에는 시뮬레이션에서는 발생하지 않는 문제들을 고려하여야 한다는 것이다.

실리콘 전력용 반도체 Si power semiconductors

Si 전력용 반도체의 경우 일반적으로 설계 Trade-off가 발생한다. Si 전력용 반도체는 높은 Breakdown 전압을 얻기 위해서 도핑 농도가 낮은 층을 삽입하게 된다. 그러나 이러한 도핑 농도가 낮은 층은 전류 도통 능력을 떨어뜨리기 때문에 낮은 Forward 전압 강하 혹은 낮은 저항을 얻지 못한다. (도통 손실이 늘어난다.) 따라서 Breakdown 전압과 도통 손실은 Si 전력용 반도체 설계의 Trade-off가 된다. 일반적으로 전력용 반도체는 일반 반도체 스위치보다 도통 손실이 크게 발생한다는 의미로도 볼 수 있다.

Si 전력용 반도체는 Majority carrier device와 Minority carrier device로 나뉜다.

- a. Majority carrier device는 MOSFET, Schottky diode를 예로 들 수 있으며, 전압에 따라 비례하는 저항 성분으로 볼 수 있다.
- b. Minority carrier device는 BJT, IGBT, thyristor

family를 예로 들 수 있으며, conductivity modulation으로 도통 특성을 정의할 수 있다. Minority carrier를 높은 저항의 Drift region(통상 N-drift region)에 주입하여 저항을 줄이게 된다. 즉, 도통 되는 구간에서 도통 능력이 향상되며, 이를 conductivity modulation이라고 한다.

도통 상태에서 등가적으로 MOSFET은 저항, IGBT는 다이오드로 볼 수 있다. 고전압 Application에서 Si IGBT가 Si MOSFET보다 많이 사용되었던 것은 이러한 특성과도 연관이 있으며, 높은 전류 도통에도 소자 양단 전압이 제한되는 IGBT가 1차 저항 특성을 보이는 MOSFET보다 유리한 측면이 있다.

아래 그림은 도통 특성을 비교하는 것으로, BJT/IGBT는 도통 시 PN 다이오드 특성으로 단방향으로만 전류가 도통되며, MOSFET은 양방향 도통이 가능하다.

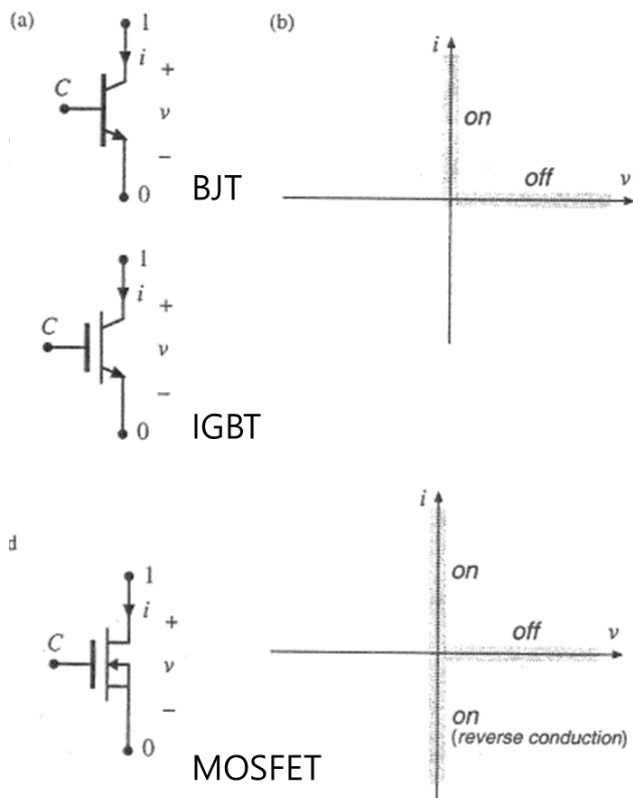


그림 1. 스위치 도통 특성

스위칭 속도에서는 Majority carrier device가 더 우수한 능력을 보여 준다. 스위칭 속도는 켜고 끄기 위해 주입하는 Charge의 양과 관련된다. Minority carrier device의 경우, 도통을 위해 carrier 주입이 필요하고 이에 시간이 많이 걸리므로 Majority carrier device보다 스위칭 속도가 느릴

수밖에 없다. 또한 BJT와 IGBT는 꺼질 때 Natural discharge하는 형태로 꺼지면서 Tailing effect를 보이는데, 즉각적으로 끌 수 있는 MOSFET과 다른 점이다.

통상 600 V 미만의 경우 Si MOSFET, 600 V 이상의 Application에서는 Si IGBT를 많이 사용하게 된다.

Power MOSFET

일반적인 MOSFET과 다르게 Power MOSFET의 경우, Vertical structure를 갖는다. Gate-Source 사이 전압을 인가하면 채널이 형성되며, 이 채널을 통해 도통하게 된다. 도통 경로를 보면 N, N(-), channel, N 층을 거치게 된다. P-N(-) junction은 Body-diode를 형성한다. 소자의 정격 전류를 흘릴 수 있어 별도의 역방향 다이오드를 달지 않아도 된다. 하지만 원하는 Reverse recovery 특성이 나오지 않기 때문에 Module을 구성할 때는 Fast recovery diode를 별도로 구성하여 넣을 수도 있다.

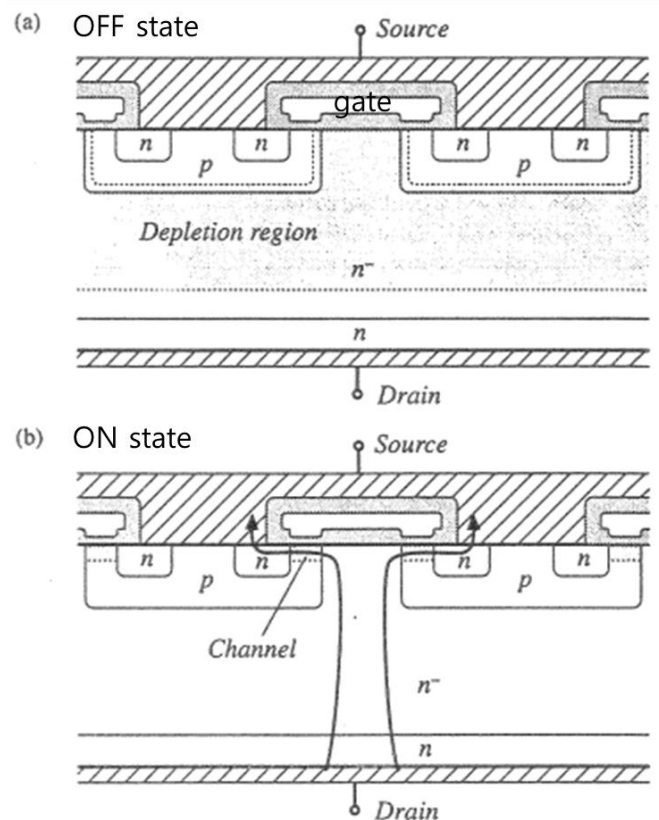


그림 2. MOSFET 구조

MOSFET을 켜고 끄기 위한 Gate-source 전압은 통상 ON에 12V 혹은 15V를 사용하고, OFF 시 -4V 혹은 -7V를 사용한다.

IGBT

IGBT의 구조는 그림 3에서 볼 수 있듯이, MOSFET의 Drain 측 N층이 P층으로 대체된 구조와 같다. Gate에 전압을 인가하였을 때 P층에서 Minority carrier인 Hole이 주입되어 전류가 흐르게 된다. (conductivity modulation) 도통 경로의 P-N(-) junction이 Forward-biased 전압을 형성하게 된다.

앞서 기술한 바와 같이 스위칭 시간은 상대적으로 느린데, 특히 OFF 시 Current tailing이 발생한다. 그림 4의 IGBT 내 등가 소자를 보면, MOSFET 부분과 BJT 부분으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 등가 MOSFET의 경우 OFF 신호를 인가하면, 즉 Gate charge를 제어하면 즉각적으로 OFF 된다. 하지만 PN(-)P Collector 전류는 Minority charge가 존재하는 동안 흐르게 된다. 즉, 능동적으로 제거할 수 없어 천천히 전류가 감소하게 된다. 따라서 더 긴 Turn-off 시간이 필요하며, IGBT는 이러한 특성 때문에 최대 30 kHz 정도의 스위칭 주파수로 스위칭하게 된다.

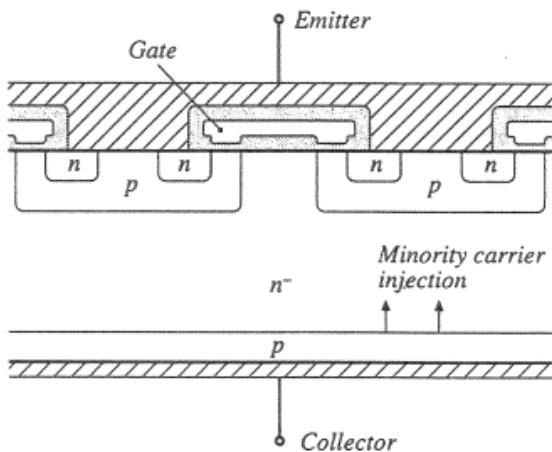


그림 3.IGBT 구조

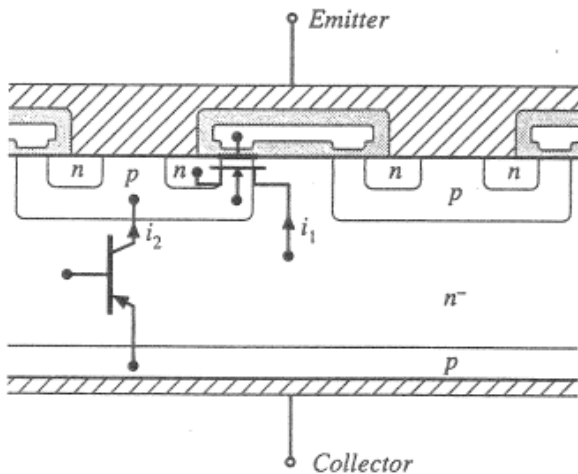


그림 4.IGBT 내부 등가 소자

본 자료는 대략적인 정보 전달을 위한 매거진으로, 기술상의 오류가 있을 수 있으며, 최신 동향이 누락될 수 있습니다. 상세한 지식과 정보를 얻기 위해서는 교재 및 논문 등을 참고하시기 바랍니다.

Reporting: benkim@plecko.biz