

특집

파워 디바이스의 기술동향

원 충 연

(성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부)

1.서론

반도체소자는 정보나 신호의 처리뿐만 아니라 전기회로나 전자회로 등의 전류나 전력의 제어에도 이용된다. 그 이용목적면에서 보면 소자는 정보처리와 비교해서 보다 큰 전류나 전압이 취급되므로 파워 트랜지스터처럼 다른 소자와 구별하여 일반적으로 Power Device (파워디바이스) 라고 한다. 즉 전력전자의 발전은 파워디바이스 혹은 전력용반도체소자의 발전 그 자체라고 할 수 있다.

1948년에 바이폴라 트랜지스터가 발명되고, 1958년 다이리스터의 발표이후 GTO, 전력용 트랜지스터, 전력용MOSFET, IGBT 등 여러종류의 전력용반도체소자가 발표되었으며 최근에는 SIT (Static Induction Trasistor), MCT (Mos-Controlled Thyristor)등이 개발중이거나 제품응용단계에 와있다. [1]

그림1은 파워디바이스의 주요응용분야를 보여준다.

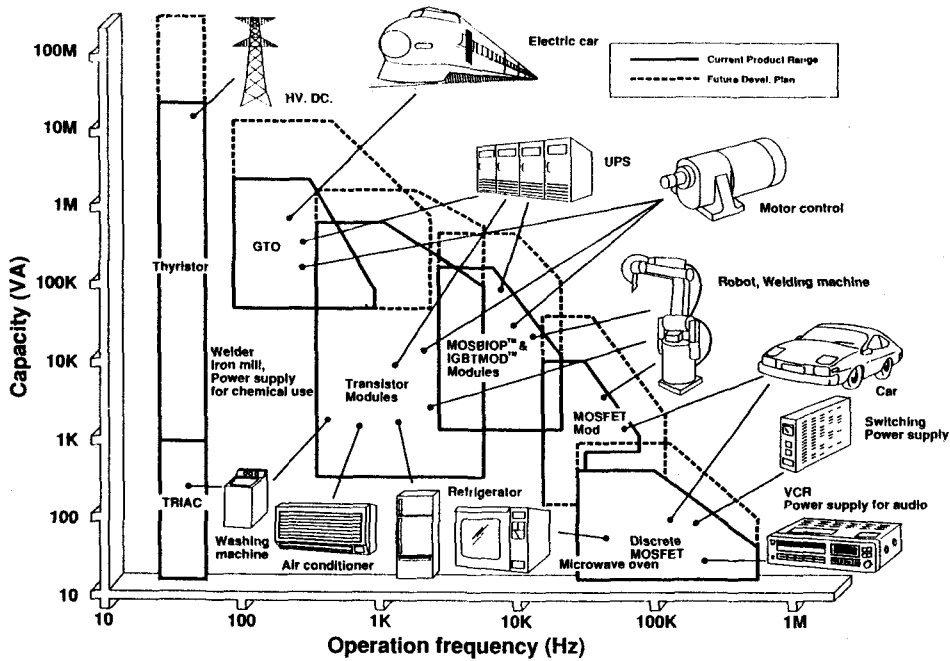


그림 1. 파워디바이스의 응용

이들 전력용반도체소자의 개발동향은 고속스위칭, 고내압화, 저손실 및 쉬운 구동회로 등을 따른다. 전력용반도체소자는 가전기기, 로봇, 용접기, 전동기 제어, UPS, SMPS, 지하철, 고속전철 등에 그 수요가 점점 늘어나고 있다.

2. 전력용반도체소자의 종류 및 특징

다이리스터나 다이오드는 스위칭 모드에서 만 적용되는 대표적인 스위칭 디바이스지만, 스위칭으로서 충분한 제어성을 갖지 못한다. 다시 말해서 양자 다같이 전류를 흘리는 on상태로 이행하려면 외부 회로의 협조를 빌려서 그 단자전압을 부로 해서 전류를 다른 디바이스로 옮기든가, 또는 소멸시켜야 한다.

60년~70년대에 다이리스터는 많이 사용되었으나 스위칭속도가 느리고 자기소호기능이 없어서 점차 다른 소자로 그 자리를 넘겨주고 수 [MVA]이상의 대용량 시스템에서만 선택적으로 쓰이고 있다. [1],[2],[3]

80년대 이후에는 대용량 인버터에는 자기소호가 가능한 GTO가 소용량에는 파워트랜지스터가 사용되고 있다. 반면에 트랜지스터는 대조적으로 베이스의 신호에 의해서 on, off를 자유롭게 스위칭하므로 다이리스터에 비해서 이상적인 스위치라고 할 수 있다.

이와같은 파워디바이스는 외부 회로에만 의존하지 않고 제어신호를 받아서 그 자신의 제어능력으로 전류를 영과 같은 off상태로 이행하며, 이러한 소자를 자기소호소자라 부른다.

표 1. 자기소호소자의 종류

	바이폴라형	유니폴라형
다이리스터계	· 게이트 턴-오프 다이리스터(GTO) · 정전유도 다이리스터(SITh)	
트랜지스터계	· 바이폴라 트랜지스터	· MOSFET · 정전유도 트랜지스터(SIT)

표 2. 전력용반도체소자의 정격

Type		Voltage/current rating	Upper frequency (Hz)	Switching time (μs)	On-state resistance (Ω)
Diodes	General purpose	5000 V/5000 A	1k	100	0.16m
	High speed	3000 V/1000 A	10k	2~5	1m
	Schottky	40 V/60 A	20k	0.23	10m
Forced-turned-off thyristors	Reverse blocking	5000 V/5000 A	1k	200	0.25m
	High speed	1200 V/1500 A	10k	20	0.47m
	Reverse blocking	2500 V/400 A	5k	40	2.16m
	Reverse conducting	2500 V/1000 A	5k	40	2.1m
	GATT	1200 V/400 A	20k	8	2.24m
TRIACs	Light triggered	6000 V/1500 A	400	200~400	0.53m
		1200 V/300 A	400	200~400	3.57m
Self-turned-off thyristors	GTO	4500 V/3000 A	10k	15	2.5m
	SITH	4000 V/2200 A	20k	6.5	5.75m
Power transistors	Single	400 V/250 A	20k	9	4m
		400 V/40 A	20k	6	31m
		630 V/50 A	25k	1.7	15m
	Darlington	1200 V/400 A	10k	30	10m
	SITs		1200 V/300 A	100k	0.55
Power MOSFETS	Single	500 V/8.6 A	100k	0.7	0.6
		1000 V/4.7 A	100k	0.9	2
		500 V/50 A	100k	0.6	0.4m
IGBTs	Single	1200 V/400 A	20k	2.3	60m
MCTs	Single	600 V/60 A	20k	2.2	18m

자기소호소자는 크게 나누어서 다이리스터계와 트랜지스터계로 분류된다. 표1에 나타낸 바와 같이 트랜지스터계는 다시, 바이폴라형과 유니폴라형으로 구분된다. 유니폴라형은 1종류의 캐리어 뿐이며 전류를 흘리는데 일반적으로 바이폴라형보다 고속의 동작이 가능하다. 반면에 on저항이 크기 때문에 효율이 떨어진다.

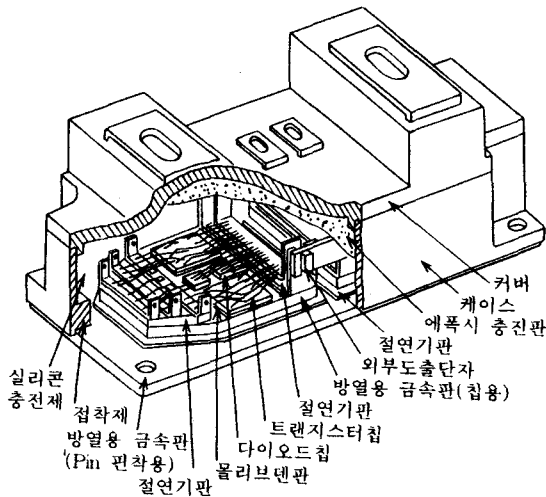
전력용 반도체소자의 특징은 기본적으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 무제어성 턴-온, 턴-오프
(예를 들면, 다이오드)
2. 제어성 턴-온과 무제어성 턴-오프
(예를 들면, SCR)
3. 제어성 턴-온 및 턴-오프특성
(BJT, MOSFET, GTO)
4. 지속적인 게이트신호가 필요
(BJT, MOSFET)
5. 게이트펄스가 필요 (SCR, GTO)
6. 양극성 내전압특성 (SCR)
7. 단극성 내전압특성 (BJT, MOSFET, GTO)
8. 양방향성 전류 (TRIAC, RCT)
9. 단방향성 전류
(SCR, GTO, BJT, MOSFET, diode)

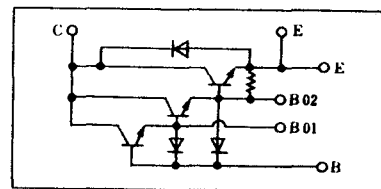
전력용반도체소자의 정격은 표2에 정리되어있다. 또한 표3은 많이 사용되고있는 파워소자의 특성과 기호를 표시하였다.

표 3. 전력용반도체소자의 특성과 기호

Devices	Symbols	Characteristics
Diode		
Thyristor		
SITH		
GTO		
MCT		
TRIAC		
LASCR		
NPN BJT		
IGBT		
N-Channel MOSFET		
SIT		



(a) 파워 트랜지스터 모듈의 구조



(b) 내부 등가 회로

그림 2. 파워트랜지스터모듈의 구조와 등가회로

2.1 전력용 트랜지스터

파워 트랜지스터 모듈에 대표되는 고내압화와 대용량화는 1970년대 후반에 본격화 되었으나 당시는 소자정격이 450[V] 50[A] 미만이었고 장치 용량에서도 수 [KVA] 미만의 영역을 커버하는데 불과했던 것이 현재에는 1200[V] 400[A]가 되는 초 대용량 소자가 제품화되었고 장치 용량에서는 수 백 [KVA]영역까지를 커버하는데 이르렀다. 바이폴라 트랜지스터의 특징은 대전력을 비교적 고주파로 스위칭하는 것이며, 스위칭 전원 등의 소용량 장치에서는 수십[KHz], VVVF 인버터 등의 장치에서는 수 [KHz]의 스위칭주파수가 적용되고 있다. 그림2는 파워 트랜지스터 모듈 구조와 등가회로를 보여 준다.

2.2 전력용 MOSFET

종래 전력 변환이나 전력 제어 장치에는 주로 바이폴라 트랜지스터나 다이리스터가 사용되어 왔다. 이 바이폴라형의 파워디바이스는 고내압화, 대전류화의 점에서는 커다란 진보를 했지만 고속화와 저구동 전력화의 점에서는 아직 충분하지 않다. MOSFET의 명칭은 Metal Oxide Semiconductor-Field Effect Trasistor(금속 산화물 전계 효과 트랜지스터)에서 유래됐으며, 소스와 드레인의 양 전극 사이에 산화막을 씌워서 게이트 전극(금속)을 설치한 구조로 되었다.

한편 파워 MOSFET는 유니폴라형 디바이스이므로 본질적으로 고주파 동작이 가능한 동시에 전압구동(저전력 구동)이라는 특징을 가지고 있다. 이 때문에 고내압, 대전류화의 연구, 개발이 진척되고 있으며, 특히 최근에는 초 LSI의 설계, 제조기술을 응용해서 더욱 새로운 칩구조의 개발, 각종 특성의 트레이드 오프형의 연구와 최적화 등이 피해지고 있으며, 매우 우수한 파워 MOSFET가 개발, 실용화 되는데 이르렀다. 패키지 기술의 개발, 개량으로 대용량의 파워MOSFET 모듈도 실용화되어 종류도 다양하다.

이 결과 파워 MOSFET는 가전제품에서 OA기기, 전장품 일반 산업기기 등 폭넓은 분야에 급속하게 채용되기 시작했다. 이러한 MOSFET에는 공핍형 MOSFET와 증가형 MOSFET의 두가지 형태가 있다. 그림3은 증가형 MOSFET이다.

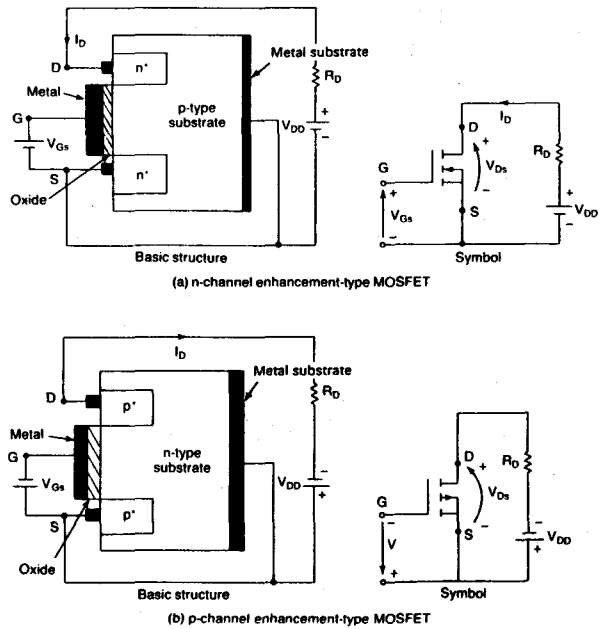


그림 3. 증가형 MOSFET

2.3 전력용 정전유도형 트랜지스터

정전 유도형 트랜지스터(Static Induction Trasistor : SIT)는 우수한 대출력성, 고속성, 저잡음성, 부온도 특성 등으로 음향용, 공업용으로 실용화되고있으며, 마이크로파용, 집적 회로 또는 다이리스터로의 응용 발전이 진척되어 가고 있다.

SIT는 그 동작원리와 기본구조에서 영 게이트 바이어스일 때 드레인 전류가 흐르며, normally -on형과 반대인 경우에는 드레인 전류가 흐르지 않는다.

구조가 종형이므로 고내압화도 용이하고, 동작이 다수 캐리어에 의존하고 있기 때문에 온도특성이 부(-)이다. 그 때문에 수천개 이상의 채널을 균형있게 병렬 구동할 수 있으므로 멀티 채널화하여 대전류화가 용이하며 내부저항도 적다.

이 SIT는 대전력 고주파용으로서 효율, 취급하는 전력, 사용하기 쉬운 점 등으로 대단히 우수한 디바이스라는 것이 많은 실용예에서 실증되었다.

SIT는 드레인-소스 사이에 흐르는 전류를 게이트와 게이트 사이의 채널 내부 전위장벽 높이를 게이트 바이어스 전압으로 제어해서 드레인 전류를 제어하는 소자이다. 구조적으로는 종형, 횡형, 그리고 게이트 매입형, 표면 배전형에서도 원하는 소자 특성을 얻을 수 있기 때문에 어떤 것이든 설계할 수 있다. 중요한 것은 종래의 FET와 같은 드레인 전류

의 포화에 기여하는 직렬저항(대부분은 채널저항)을 매우 작은 값으로 해서 멀티 채널화 하는데 따라 저손실 대전류화가 가능하게 된 것이다.

그 기본 동작은 소스에서 주입된 다수 캐리어가 고전계 중을 드리프트하는 것이기 때문에 고주파용 디바이스로서 이상적이다. 또한 전류 온도 계수가 부이며 열폭주를 일으키지 않기 때문에 대전력화에 최적의 소자이다.

2.4 전력용 IGBT

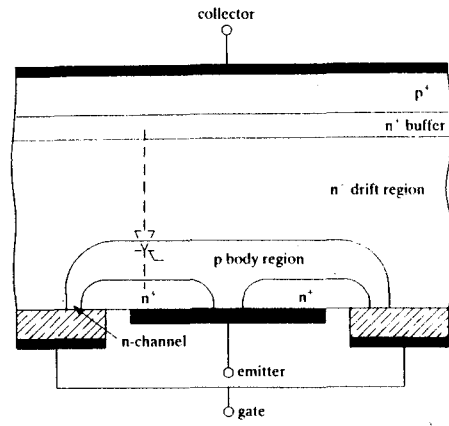
IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)는 MOS 구조를 한 바이폴라 소자이다. MOS의 특징을 가진 전압구동에 의한 제어의 용이함과 바이폴라 특징인 저 on 전압을 겸비하고 있다. 그리고 종래의 바이폴라 소자에 비해서 스위칭 속도는 매우 빠르다. 현재 발전단계에 있으며 앞으로 유망한 스위칭 소자라고 말할 수 있다. 이 소자는 전류가 크게되면 게이트 신호로 전류를 차단할 수 없게 된다. 즉, 래치-업 현상이 있다. 앞으로의 과제는 고속성을 손실없이 래치-업 내량의 향상과 대용량화 하는 것이다.

로봇, 공조기, 공장기계 등에 사용되는 인버터나 OA 기기용의 무정전 전원 장치로 대표되는 산업용 일렉트로닉스, 민생용의 소형 전력변환 장치는 앞으로의 수요가 급속하게 신장되어 가고 있다. 이 전력변환 장치는 응용 범위의 확대에 따라서 장치의 소형 경량화, 고효율화, 저소음화가 점점 중요하게 되어가고 있다. 그러나 바이폴라 트랜지스터나 파워 MOSFET 등 종래의 전력용 반도체 소자에 의해서는 이 요구를 동시에 만족시키는 것은 곤란하다.

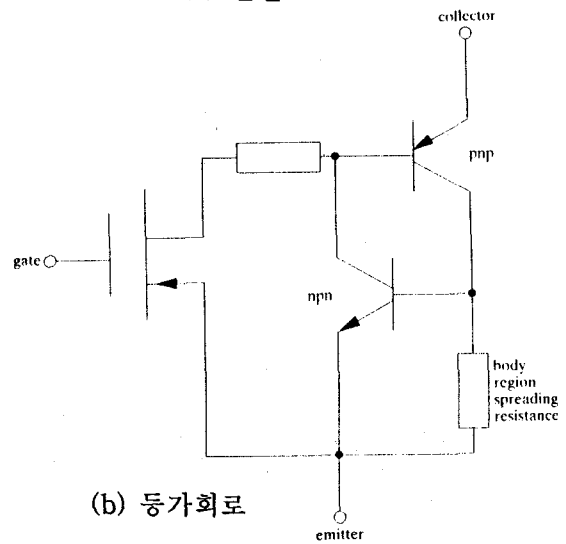
따라서 파워 MOSFET의 고속 스위칭 특성과 바이폴라 트랜지스터의 대전력 특성을 겸비한 새로운 반도체 소자로서 IGBT가 최근 주목받고 있다. 그림 4는 IGBT 단면도와 등가회로를 보여준다.

2.5 파워 IC

파워 IC란 파워 스위칭 소자와 그 구동 회로나 보호회로 등을 하나의 실리콘 칩상에 집적해서 사용하기 쉬운 신뢰성의 향상을 꾀한 것이다. 즉, 인텔리전트(고기능) 파워 소자이다. 파워 소자에서는 바이폴라 트랜지스터, GTO, MOSFET, IGBT 등의 자기보호소자 혹은 다이리스터 등이 쓰인다. 용도는 소형 전동기, 솔레노이드, 램프의 구동 또는 스위칭 전원 등이 있다. 앞으로 보호나 동작 모니터 기능



(a) 단면도



(b) 등가회로

그림 4. IGBT의 단면도와 등가회로

(a) 단면도 (b) 등가회로

등의 강화와 고내압, 대전류화가 전철될 것으로 생각된다.

파워 소자의 전압, 전류를 얼마 이상 인가하는 가 는 정확하게 알 수 없다. 예를들어 1[A]급 이상을 말할 때도 있고 소자의 소비전력의 크기로 말할 경우도 있다. 또 전압이 100[V] 이상에서는 전류가 적을 때도 파워 IC로 취급하는 경우가 있다.

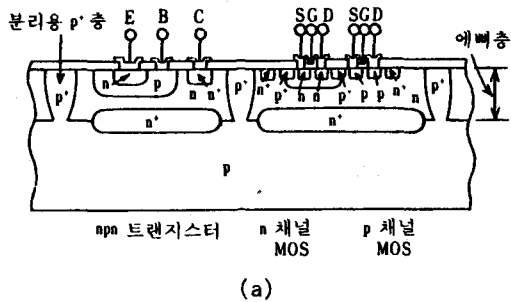
또한 파워부와 그 주변부를 동일 칩 상에 만든 것(모노리틱 IC)과 개별 칩으로 만들어진 것(하이브리드 IC)으로 구별할 수 있다. 파워 소자는 스위칭 동작을 하는 것이 일반적이지만 오디오용 앰프와 같은 아날로그 동작을 하는 것도 포함된다. 명칭도 파워 IC 외에 스마트 파워IC, 인텔리전트 파워 IC, 고압 IC 등이 있고 이것들도 명확하게 구별되어 상

용되고 있는 것은 아니다.

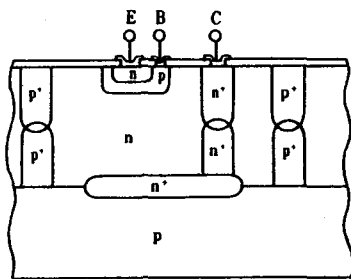
주된 응용분야는 전화 교환용 스위치, 자동차에 있어서의 모터, 솔레노이드, 램프 등의 절환 스위치나 발전기의 레귤레이터, 모터제어에 있어서는 직류 모터, 스테핑 모터 등의 각종 모터의 구동 회로, 전원에서는 스위칭 레귤레이터, OA 기기, 정보기기에서는 EL, 플라즈마 디스플레이 등의 표시 장치용 드라이브나 각종 프린터의 드라이브에 사용된다.

파워 IC칩의 이점은 사용하기 용이함에 있으므로 사용자는 전문적인 지식이 없어도 사용할 수 있다. 즉, 주 회로는 사용 목적에 맞게 구성하여 전원과 부하 사이를 파워 IC로 접속하여 사용한다. 그리고 TTL이나 마이크로 컴퓨터로 직접 제어되며, 또한 각종 보호 회로를 구비하여 파괴가 되지 않게 되어 있다. 이 때문에 회로를 간단하게 만들 수 있고 저가격화가 가능해지며, 또한 신뢰성의 향상에도 관계된다.

파워IC를 만드는 입장에서 보면 중요한 기술의 하나가 소자 사이의 분리 기술이다. 크게 나누어서 pn 접합을 이용하는 방법과 SiO_2 막 등의 절연막으로 분리하는 유전체 분리법 등이 있다. 그림 5는 pn접합분리 구조를 보여준다.



(a)



(b) 고내압 npn 트랜지스터

그림 5. pn 접합 분리 구조

전자는 공정이 간단하며 비교적 저압용에 쓰인다, 후자는 공정가격은 높게 되지만 고내압용 혹은 대전류용 등, 발생 노이즈가 큰 용도에 유리하며 래치-업 등의 오동작의 염려도 없다. 앞으로 각각의 특징을 살려서 사용하는데 구분되어 갈 것으로 생각된다.

기타 중요한 기술로서는 파워 소자의 저손실화이다. 소자의 소비전력, 즉 발열에 따라 IC화가 되는 소자의 크기가 결정된다고 할 수 있다. 소비전력이 저감되면 그에 따라서 출력전력을 올릴 수 있게 된다.

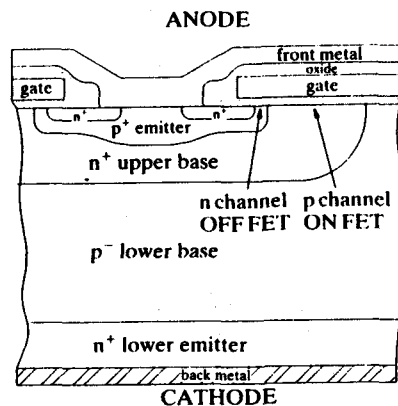
이 문제는 패키지의 방열 특성과도 관계하지만 경우에 따라서는 파워부와 기타의 주변부를 개별 칩으로 하는 것이 유리한 경우도 있다.

파워소자로서는 GTO 다이리스터, MOS FET, 바이폴라 트랜지스터, IGBT 등의 자기보호소자가 쓰여진다.

2.6 MCT

한편 대용량 인버터에 응용 가능한 MCT는 Thyristor와 같은 pnpn접합에 MOS gate에 의해서 Turn on/off 되는 소자로 ON시의 손실이 적고, 스위칭 속도가 4-9kHz 정도로 비교적 빠르나 현재까지는 양산성의 문제 등으로 600[V] 75[A]급 정도만 상용화되고 있다. 또 SIT는 MOSFET 보다 빠른 스위칭이 가능하지만 아직은 ON 손실이 너무 커서 실용화에 문제가 있다. 이들 소자는 2-3년 후에 본격적인 양산이 시작될 수 있을 것으로 보인다.

그림 6은 MCT의 단면도와 P-MCT의 등가회로이다.



(a)

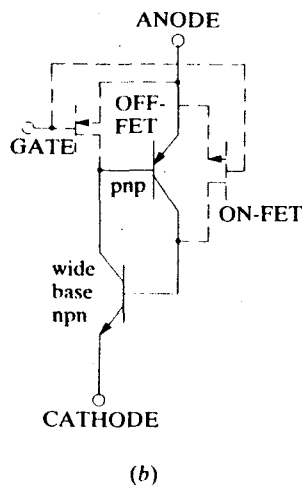


그림 6. MCT단면도와 등가회로

결론

전력전자는 이미 현대기술에 있어서 중요한 위치를 차지하고 있으며 그 기본은 전력용반도체소자의 스위칭에 기초한 것이다. 전력용 반도체 기술의 발달과 더불어 전력 취급용량과 전력용 반도체 소자의 스위칭 속도도 놀라운 향상을 가져왔다. 마이크로 프로세서/마이크로 컴퓨터 기술의 발달은 전력용 반도체 소자에 대한 제어와 제어방법의 합성에 많은 영향을 주었다. 이 특집에서는 각 반도체소자의 물리적 특성은 될 수 있는한 배제하고 내용 소개에 중점을 두었다.

최근에 대한 전기학회 창립 50주년 특집에도 아주 대학의 최연의 교수의 "전력반도체 소자의 어제와 내일"이 기고 되었으므로 참고하여 주시기 바라며 특히 국내외 동향은 중복되는 것 같아서 생략하였다.[3] 김복권, 권순걸, 원규식 교수가 번역한 "최신 전력전자"의 내용도 이 특집을 준비하는데 많은 도움이 되었기에 참고문헌에 첨부하였다. 지면관계상 많은 부분을 상세히 다루지 못했고 혹시 누락된 부분이 있으면 너그럽게 양해를 구합니다.

참 고 문 헌

- [1] 김복권, 권순걸, 원규식, 최신전력전자, 대영사, 1996.
- [2] 권봉현, 전기공업, pp.34-45, 1996.
- [3] 최연익, 전력전자기술, 대한전기학회 학회지, Vol.46, pp.13-22, 1997.

- [4] M.H Rashid, Power Electronics, Prentice Hal, 1996.



원 충 연 (元 忠 淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 전기공학과 졸업. 1987년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1991~1992년 미국 University of

Tennessee 전기공학과 부교수. 1996년 전력전자학회 평의원. 현재 성균관대 공대 전기전자 및 컴퓨터공학부 교수.