

전원용 반도체 스위칭 소자의 개발동향

催鎮好, 高允一, 金良模
忠南大學校 電氣工學科

I. 머릿말

전원장치에 있어서 반도체 소자는 그 장치의 성능과 효과를 판가름하는 중요한 요소로서 최근 눈부신 진보와 발전을 거듭하여 왔다. 트랜지스터 발명이후 무접점 스위치로서 용량중대에 따라 그 특성을 발전시켜 왔으며, 스위칭 손실의 최소화 및 가격 경쟁은 반도체 소자의 발전을 가속시키게 되었다.

전력용 스위칭 소자의 진보과정을 살펴보면, 바이폴라 계열의 소자는 1970년대에 중심적인 소자로서 사용되었으나, 고순도 실리콘 웨이퍼 개발, 실리콘 웨이퍼의 직경확대 및 스위치 오프에서 발생하는 소수 캐리어 잔류시간으로 인한 스위칭속도 제한과 같은 문제점들은 이 소자의 지속적인 발전을 어렵게 하였으며, 1980년대에는 대용량, 자기소호능력을 겸비한 GTO가 개발되어 우수한 전력변환 소자로서 사용되어지고 있으며, 이러한 바이폴라 계열의 소자들은 전류제어에 의한 출력특성을 지니고 있기 때문에 대용량 시스템 사용에는 여전히 어려움을 지니고 있다. 1970년대에 개발된 MOS계열의 전력변환용 스위칭 소자는 전압제어 출력특성을 지니고 있기 때문에 현격히 낮은 입력전원으로도 대용량을 구동시킬 수 있다는 점에서 두각을 보여 현재까지 지속적인 발전을 거듭하여 왔으며, MOSFET의 온-저항을 줄이기 위한 노력은 현격한 진보를 보이고 있다.

한편 종전의 개별소자 범위를 넘어서 각 소자의 장점만을 살려 수지케이스에 복합화한 파워 모듈이나 파워 디바이스를 출력단으로 하여 그 구동회로내지는 인터페이스회로를 chip내에 집적화한 파워 IC가 있고 고밀도 실장기술에 의해 CPU메모리, 게이트어레

이등 VLSI의 chip에서 출력단의 전력 소자까지를 패키지내에 집적화한 파워집적회로 디바이스 등이 있다. 이와 같은 소자는 최근 전력전자 분야에서 각광을 받고 있는 스마트 드라이브(Smart Drive)회로의 전력변환 소자로서도 큰 몫을 차지하고 있다.

본 해설에서는 전력전자 분야에서 사용되고 있는 각종 스위칭소자의 특성과 고도의 산업사회에서 역할이 강화되고 있는 전력 반도체 스위칭 소자의 개발동향에 대하여 언급하고자 한다.

II. 스위칭소자의 발전 동향

1. 분류 및 발전추이

초창기에 반도체 산업을 지배하던 개별 전력소자(discrete device)는 가능 동작온도의 범위가 제한되었기 때문에 보다 폭넓은 온도범위에서 동작할 수 있는 소자가 필요하게 되었다. 이에 대해 집적회로가 등장함으로써 반도체 산업을 이끌어 가면서 공정기술과 소자개발을 주도하여 왔다. 그림 1은 집적회로 기술과 관련하여 전력소자 기술의 개발동향을 개략적으로 나타내고 있는데 점선으로 표시된 화살표는 웨이퍼 공정기술의 전반적인 시대 흐름을 나타내고 있다. 과거에는 집적회로 분야에 집중적인 기술개발이 있어 왔으나 점차 스마트 전력기술을 사용한 소자와 전력소자 분야로 그 추세가 변하고 있음을 알 수 있다.

현재 사용되고 있는 전력소자들을 크게 그림2와 같이 세가지로 분류할 수 있는데 그 하나는 단일 캐리어(uni-polar)에 의해 도전되는 MOS계열의 소자와 다른 하나는 두종류의 캐리어에 의해 도전되는 바이폴라 계열의 소자로, 이 두가지는 전통적으로 널리

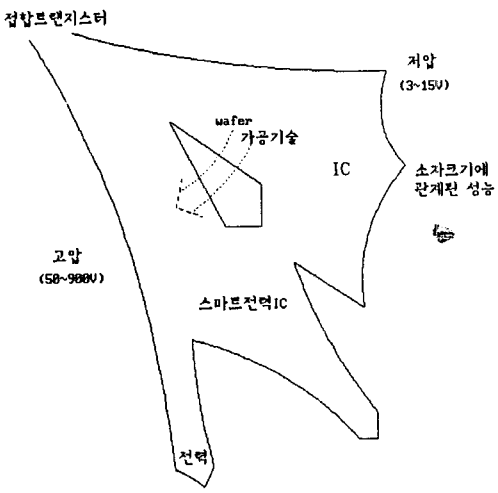


그림 1. IC기술과 연관된 전력 소자의 개발동향

알려져 있다. 최근 개발되고 있는 또 다른 한 부류의 전력소자로서 복합형태의 캐리어에 의해 도전되는 복합형 소자로서 이것을 그림2의 가운데에 나타내었다.

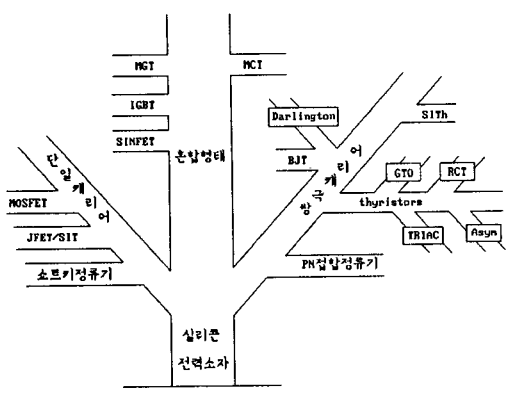


그림 2. 전력소자의 분류

2. 성능향상을 위한 기술

스위칭 소자를 판별하는 성능으로는 내압, 전류용량, 스위칭속도, 기능의 정도등을 들 수 있는데 본 절에서는 이러한 성능의 향상을 위한 설계 및 제조기술의 발달을 논하고자 한다.

1) 고압화 및 ASO의 확장

그림3은 planar 전력 트랜지스터의 구조를 나타낸 것으로 전력 트랜지스터에는 pnp형과 npn형이 있지

만 중용량 이상의 전력용으로는 특수한 경우를 제외하고는 npn형이 주로 사용되고 있다. 전력 트랜지스터에서는 낮은 온-전압으로 저손실, 고내압, 고히와 넓은 ASO(Area of Safety Operation), 고속 스위칭등의 성능이 요구 되는데 이러한 성능은 구조, 재료, 제법등에 의존되고 있다.

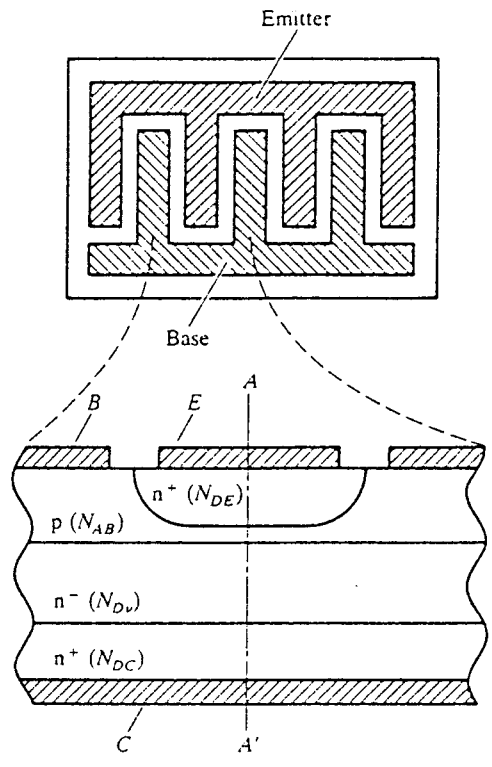


그림 3. 전력트랜지스터의 구조

고압화와 ASO범위의 확장을 위하여는 콜렉터 n-층 및 베이스 p층을 두껍게 하고 比抵抗을 높게 하는 것이 유력한 방법이나 특성향상을 얻을 수 있는 반면 hfe의 저하와 스위칭시간이 길어지고 콜렉터-에미터 간의 온-전압이 높게 되는등의 특성저하가 발생하므로 n-층과 p층의 두께를 결정하기에는 최적화가 필요하다.

그림4는 표면이 절연막 SiO2로 보호된 chip 끝부분의 단면을 보인 것으로 가드링으로 표면전위를 분할하여 전계강도를 완화시키고 필드 플레이트로 실리콘 표면 공핍층의 확장을 제어하게 된다. 이러한 구조와 기술로 1200 1600V의 트랜지스터가 생산되고 있고

실용상 2000V정도가 한계라고 알려져 있다.

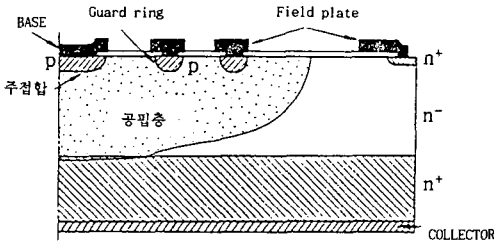


그림 4. 칩 끝부분의 단면구조 예
그림 4. chip 끝부분의 단면구조 예

고압화의 발전을 거듭한 대표적인 전력소자로는 다이리스터를 들 수 있는데 다이리스터의 구조는 그림5와 같고 양극과 음극 사이에 4층 구조로 된 반도체 접합으로 설계기술 및 제조공정기술의 진보와 더불어 고압화 대전류화로 발전을 거듭하여 왔다.

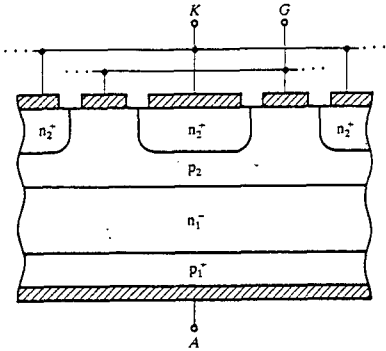


그림 5. 다이리스터의 구조

다이리스터의 고압화에 따라 turn-off시 큰 스위칭 전력에 견딜수 있는 내력이 필요한데 이 내력을 높이기 위하여 그림 6과 같이 저항영역을 내장시켜 급격한 전류의 증가를 억제함과 동시에 turn-off시 발생전력을 저항영역에서 분산소비시켜 순시전력밀도를 낮추는 방법이 있다.

2)대전류화

스위칭 소자의 대전류화를 위하여는 chip에서 전류가 흐르는 면적을 넓게 할 필요가 있기 때문에 미세화하여 가용면적을 넓게 취하면 된다. planar 트랜지스터의 경우 몇개의 chip을 병렬접속하여 하나의 패키지로 조립하여 전류용량을 증대시킨다. 대전류화는 hfe의 향상, 포화전압의 저감도 함께 꾀할 필요가 있어 패턴을 미세화하여 에미터 유효면적을 증대시키거나 에미터 부분을 균일하게 동작시켜 전류분포를 균일하게 함으로써 전류용량을 증대시킬 수 있다.

GTO 다이리스터의 제어전류의 향상에 있어서는 대 면적화와 함께 정상전류분포와 turn-off시 전류집중과의 정량적인 관계를 파악하여 GTO를 구성하고 있는 단위 GTO의 ASO를 확대하는 것에 주목하여 대전류화하여 왔다. 불균일한 정상전류분포에 의한 turn-off시 전류집중을 완화시키기 위해 효과적인 게이트 전극의 접촉위치를 구하는 것이 제어전류증대로 연결되게 된다.

3)고속 스위칭

스위칭소자의 내압을 높이기 위하여 트랜지스터에서와 같이 콜렉터나 베이스층을 두껍게 하는 것은 스위칭시간, 특히 turn-off시간이 길어지게 되는데 이것을 단축시키기 위하여는 금, 백금을 함께 도핑함으로써 소수 캐리어의 수명을 단축시키고 또한 에미터 패턴을 미세화하는 등의 방법을 취하는데 미세화한 에미터를 베이스영역으로 둘러싼 메시구조와 링에미터 구조가 있다.

turn-off시간을 단축하기 위하여 회로에서 취하는 방법으로는 turn-off시 베이스 역바이어스 전류를 증가시키거나 콜렉터 포화다이오드를 콜렉터와 베이스 사이에 접속하여 트랜지스터가 포화되는 것을 막도록 한다.

GTO의 경우, 소자의 전력손실과 보호회로인 스너버회로의 손실을 고려한다면 동작주파수는 기껏해야 수 100Hz 정도이지만 turn-off손실과 스너버 캐패시터 용량의 저감을 통해 1~1.5kHz까지 높일 수 있다.

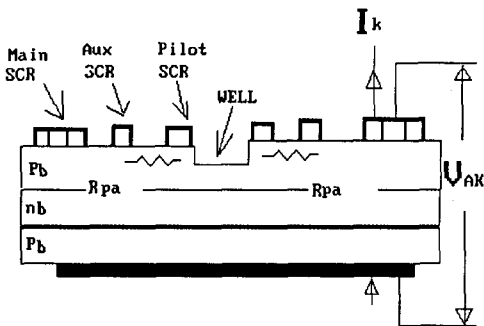


그림 6. 다이리스터의 고압화

4) MOSFET의 온-저항 저감

전력용 MOSFET의 온-저항은 그림7에 보인 바와 같이 여러 종류의 저항성분의 합으로 나타내어진다. 실제의 chip에서는 그림7과 같은 단위 cell이 여럿 병렬접속되어 있어서 소스 윈도우 크기 S를 미세화 하면 할수록 cell의 병렬수가 증가하기 때문에 모든 저항성분을 감소시키는 효과가 있다. 그러나 게이트 폭 Lg의 미세화는 높은 내압의 소자에 있어서 Rj의 증가를 일으키기 때문에 한계가 있다.

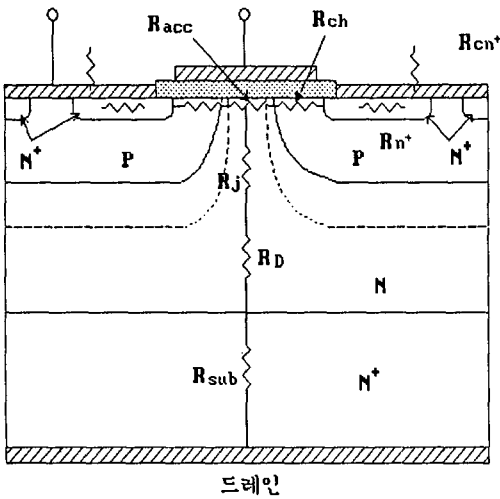


그림 7. 중형 MOSFET구조와 온-저항성분

III. 복합소자

1. IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)

그림 8은 IGBT의 기본구조와 등가회로를 나타내고 있다. 게이트에 양의 전압이 가해지면 MOS가 온-상태로 되어 n베이스에 전자가 주입되고 p형 콜렉터 영역으로부터 정공이 주입되기 때문에 n형 베이스에 도전도가 변하여 온-저항이 급격히 저하한다. 따라서 IGBT는 MOSFET에 비하여 고압에 적합한 소자다. 그러나 n형 베이스에 축적된 소수 캐리어가 소멸되기까지 turn-off가 끝나지 않기 때문에 일반적으로 스위칭시간이 길은 반면, BJT보다는 훨씬 고속 스위칭이 가능하기 때문에 저소음 인버터나 전자렌지 등에 폭넓게 사용되고 있다.

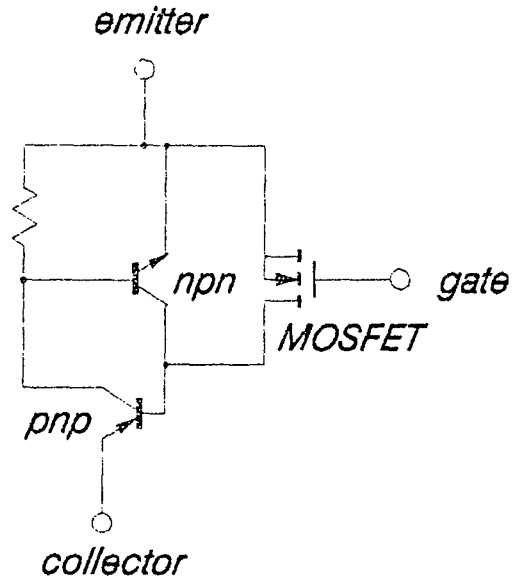
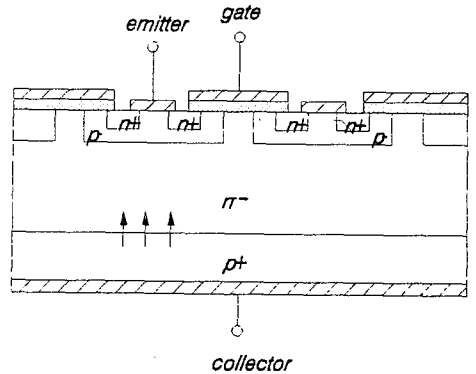


그림 8. IGBT의 기본구조와 등가회로

2. MCT(MOS-Controlled Thyristor)

MCT는 다이리스터의 turn-on과 turn-off의 제어를 MOSFET을 이용하여 실현하는 소자로서 MOSFET의 간편한 제어와 다이리스터의 고밀도 전류를 복합한 형태로 MOS turn-off 다이리스터의 구조와 등가회로를 그림9에 나타내었다.

이 MCT는 GTO에 비하여 높은 입력 임피던스의 MOS 게이트를 사용하며 IGBT보다 높은 순방향 전도도를 나타내고 있으나 MOSFET내의 cell증가와 함께 turn-off전류 밀도가 현격한 감소를 보이므로 전력용 트랜지스터나 MOSFET을 대체할 만한 역할을 해 내지 못하나 GTO를 사용하는 회로의 대체회로로 적당한 소자이다.

그 응용분야와 정격을 나타내면 그림10 과 같다. 민수용 오디오 앰프로서 20W이상의 출력을 갖는 IC가 제품화된 것은 오래되었고 200V이상의 고내압 IC도 실용화되고 있으며 특히 자동차용 기계식 릴레이를 전력용 IC로 치환하고자 개발된 IC도 있다. 이외에도 정전압원, 스위칭전원장치등에 이용되며 고내압, 대전류IC로는 형광등 안정기용, AC모터 제어용, 평판 디스플레이 구동용, 전자교환기 가입자회로용 등에 널리 응용되고 있다.

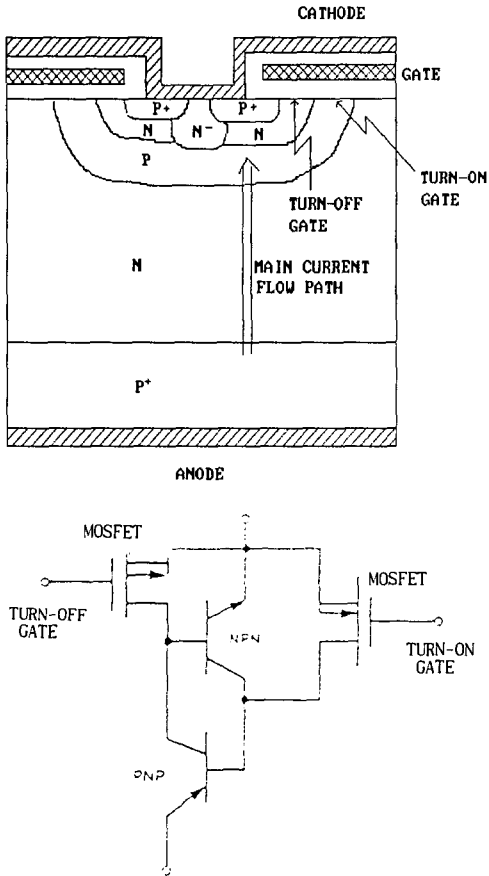


그림 9. MOS turn-off다이리스터의 구조와 등가회로

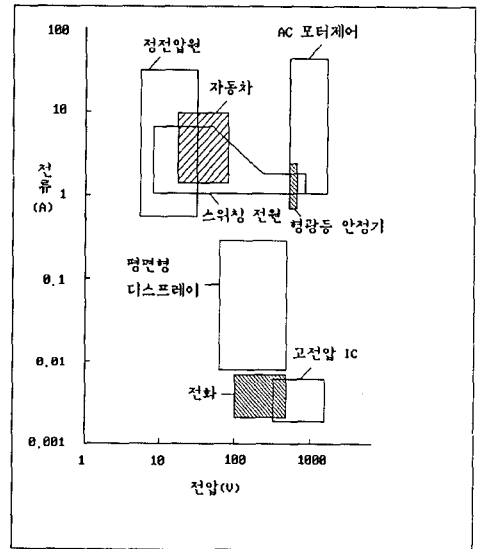


그림 10. 전력용 IC의 응용분야와 정격

IV. 맺는말

3. 스마트 전력용 IC

Intellegent IC라고도 불리는 이 IC는 제2의 전자공학 혁명이라고도 불려질 정도로 최근 전력소자 분야에서 발전을 거듭하여 왔다. 이 발전은 GTO, MOSFET를 비롯한 전력소자의 발달과 드라이브회로 및 보호회로의 기술개발에 힘입어 이룩된 업적으로 전력소자와 이들 주변회로를 함께 조립하여 하나의 기능으로 한 IC로 할 수 있기 때문에 소형으로 사용하기 간편한 소자로 응용될 수 있을 것이다.

이러한 IC는 산업용 뿐 아니라 민수용 기기에도 파급되어 널리 사용되기에 이르렀다.

이미 제품화되어 사용되기 시작한 IC가 많아졌고

전력용 소자의 발전을 이끄는 요소기술로는 소자의 기능설계 기술, 소자의 모델링 및 시뮬레이션 기술, 결정재료기술, 제조 및 조립기술, 실장기술등을 들 수 있다. 신소자기술이 탄생되고 육성되어 성장하기 위하여는 이 요소기술들이 유기적으로 기능하여 적절한 신기술을 배태하는 것이 중요하다. 이와 같은 스위칭소자의 기술진보는 곧바로 전력전자 응용기기의 발전을 도모하게 된다.

본 해설에서는 전력용 반도체 스위칭 소자들의 특성과 개발동향에 대하여 살펴보았고 특히 소자의 고내압화, 대전류화, 고속화로의 발전을 위한 기술에 대하여 간략하게 살펴 보았다.

參考文獻

[1] P.L.Hower, "Power Semiconductor Device:An Overview", IEEE Proceedings, vol.76, pp.335-342, 1988

[2] B.J.Baliga, "Evolution of MOS-Bipolar Power Semiconductor Technology", IEEE Proceedings, vol.76, pp.409-418, 1988

[3] Makoto Azuma, "GTO Thyristors" IEEE Proceedings, vol.76, pp.419-427, 1988

[4] N.Mohan, T.M.Undeland, and W.P. Robbins, Power Electronics, pp.7-24, John Wiley & Sons, 1989

[5] 大見.竹内, "電力用半導體 動向", 電氣學會誌, 110卷 2號, pp.81-82, 1990「6」 황성규, "스마트 파워 IC기술", 전기학회지, vol.42, nO.7, pp30-44, 1993.7

筆者紹介



催 鎮 好
 1965年 10月 21日生
 1988年 2月 충남대학교 전기공학교육과 졸업(학사)
 1993年 ~ 현재 충남대학교 전기공학과 대학원 재학

주관심 분야 : 전력전자



高 兌 一
 1966年 10月 28日生
 1993年 2月 충남대학교 전기공학과 졸업(학사)
 1993年 ~ 현재 충남대학교 전기공학과 대학원 재학

주관심 분야 : 전력전자



金 良 模
 1950年 3月 29日生
 1969年 3月 ~ 1973年 2月 서울대 공대 공업교육(전자)학과 (학사)
 1973年 3月 ~ 1975年 2月 서울대 교육대학원 공업교육(전자)전공 (석사)
 1984年 4月 ~ 1986年 3月 일본 동경대 전자공학과 (공학박사)

1979年 11月 ~ 현재 충남대학교 전기공학과 교수
 1990年 1月 ~ 1991年 1月 미국 버지니아 테크 방문교수

주관심 분야 : 철도시스템 및 DC/DC 컨버터