

전력용 반도체 소자

韓 民 九
(서울大 工大 教授)

■ 차 례 ■

- 1. 서 론
- 2. 다이리스터

- 3. 맺는 말
참고문헌

① 서 론

전력용 반도체소자 (Power Semiconductor Devices) 는 전기 에너지의 효과적인 변환과 제어에 있어서 핵심적인 역할을 하고 있다. 1952년에 Germanium을 이용한 rectifier 의 전류용량이 35 Amp, 전압용량이 200 V에 불과했으나, 오늘날에는 5000Amp 및 10,000 V에 달하는 Thyristor 가 개발되고 있다.

반도체 분야에서는 " Small is Beautiful " 이라는 말이 있듯이, 모든 소자들의 크기가 작아지고, switching Power, 전류 및 전압의 감소가 직접회로소자의 발달과 직결되고 있으나, 전력용 반도체 소자의 설계에 있어서는, power, 전류 및 전압의 증가가 그 목적으로 되어있어서 소자들의 크기가 증가되고있다. 따라서 일반적인 집적회로 (IC) 소자와 전력용 반도체소자의 발달이 상관관계가 희박하다고 여겨질 수가 있으나 사실은 아주 밀접하다. 즉 소자의 제조방법, 동작원리들은 전력용 반도체 소자와 일반적인 집적회로소자와 큰 차이가 없으며 오히려 전력용 반도체 소자는 높은 전압과 전류가 걸리므로, 재료의 uniformity, 온도상승에 따르는 여러문제등이 있어서 반도체공학도들에게 많은 도전을 요구하고 있다.

오늘날 사용되고 있는 전력용 반도체소자는 거의 전부가 실리콘으로 제조가 되고 있는데, 다이리스터 (Thyristor), P-I-N 다이오드 (Diode), 트

랜지스터 (Bipolar Transistor) 등의 단일소자 (Discrete Device) 가 거의 대부분을 차지하고 있으나, 최근에는 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) 및 MOS-FET을 이용한 HVIC (High Voltage Integrated Circuit) 들이 많은 관심을 끌고있다.

본 원고에서는 현재 널리 쓰이는 다이리스터에 관하여 고찰하고자 한다.

② 다이리스터

다이리스터는 그림 1 에서와 같이 4 개의 P-N-P-N 층으로 구성되어 있으며 3개의 단자를 갖고있다. Cathode (캐소드) 가 N 층에, Anode (애노드) 가 P 층에 부착되고 Gate (게이트) 가 중간에 있는 P 층에 부착되어있다. 역방향 (reverse bias) 의 전압을 다이리스터에 가하면, 즉 Cathode (K) 에 프레스전압, 애노드에 마이너스전압이 걸리면 $P_1 N_1 (J_1)$ 및 $P_2 N_2 (J_2)$ 는 다이오드의 측면에서 역방향바이어스고 또 $N_1 P_2 (J_2)$ 는 순방향바이어스기 때문에 역전류 (reverse current) 를 충분히 blocking 할 수 있다. 또한 다이리스터에 순방향 (forward) 전압을 걸어주면 $N_1 P_2$ 가 역방향이되고 $P_1 N_1$ 및 $P_2 N_2$ 가 순방향이 되어서 전류의 흐름이 줄어들면서 약간의 leakage current 가 흐르는데 이러한때를 forward blocking 또는 off-state 라고 한다.

그림 2 는 다이리스터의 전류-전압특성을 표시한

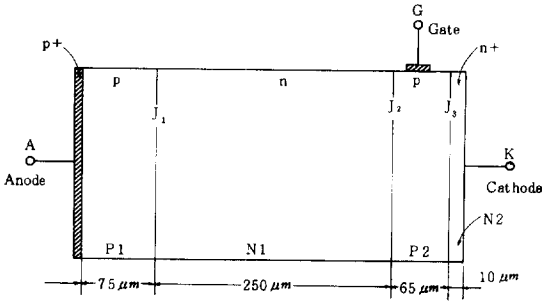


그림 1. 다이리스터의 개관도

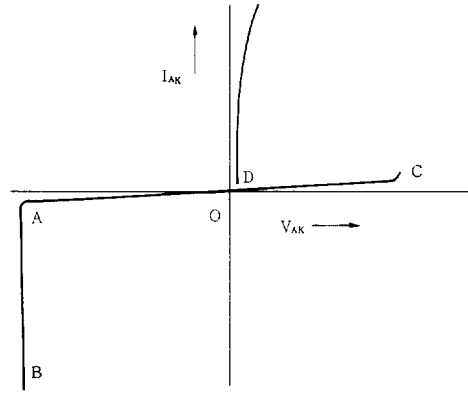


그림 2. 다이리스터의 전류-전압특성

것인데 D - C 영역이 forward blocking 에 해당한다. Reverse blocking 은 O - A 영역이라고 하겠다. Forward 상태일때 P₂ 영역 (그림 1) 에 전류를 gate 로 통해서 주입하면 P₂ 영역에서는 Hole이 N2 영역에서는 전자가 J₃ junction 을 통하여 주입이 되는데 P₂ 영역에 들어간 전자들은 J₂ junction 부근의 강력한 electric field 에 흡수되어서 J₂ 의 전류가 증가하면서 J₂ 가 block 라는 절연성이 없어지면서 Avalanche 현상이 나타난다. 따라서 애노드에서 캐소드로 많은 전류가 흐르게 된다. 이러한때를 On - state 라고 하여 대전류 - 저저항의 상태가 된다. (그림 1의 D-E 영역) 이러한때는 J₂ 의 절연성이 한번 없어지며는 gate 의 전압을 제거하여도 On - state 또는 forward conduction mode 는 계속 진행이 된다.

다이리스터의 제조방법은 N type 의 실리콘 wafer 에 diffusion 을 이용하여서 junction 을 만드는데 junction depth 는 일반적으로 25 μm 을 초과하기때문에 diffusion 의 온도가 매우 높고, 시간이 또한 장시간을 요한다. 일반적인 doping profile 이 그림 3 에 소개되었다. N type wafer 는 보통 직접 회로에 쓰이는 silicon wafer 보다 doping den-

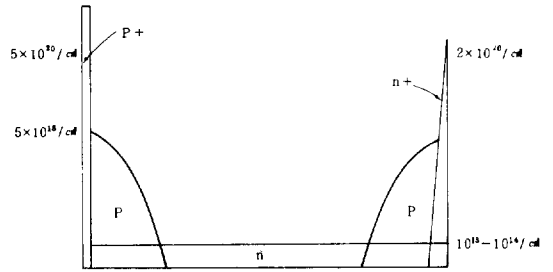


그림 3. 다이리스터의 도우핑 개관도

sity 가 매우 낮아서 10¹³-10¹⁴ cm⁻³ 정도인데 reverse breakdown voltage 가 N type 의 doping density 에 반비례하기 때문에 doping density 를 줄여야 하기 때문이다. 일반적으로 turn-on time 이나 turn-off time 은 carrier life time 에 반비례하는데 doping density 가 감소하면 carrier life time 이 증가하기 때문에, carrier life time 을 감소하기 위하여 금이나 백금을 이용하여 도우핑하여서 carrier life time 을 감소하기도 한다. 또한 electron radiation (1 - 2 MeV) 을 이용하여서 life time 을 감소시키기도 한다.

다이리스터의 전류용량의 증가는 사용되는 silicon wafer 크기와 직결되는데 요사이는 4 inch (100 mm) 직경의 wafer 를 이용하여 대용량의 전류를 발생시키는데, 높은 전류때문에 wafer 의 uniformity 가 직접회로의 그것보다 절실히 요구되고 있다.

일반적으로 다이리스터의 성능을 평가하는 조건은 다음의 7 가치가 되겠는데

- 1) Blocking 전압의 증가
- 2) 전류의 증가
- 3) Turn-off 시간의 감소
- 4) Gate 전류의 감소
- 5) Anode Voltage 의 신속한 증가 (dv/dt)
- 6) 전류의 빠른 변화 (di/dt)
- 7) 주파수의 증가

열거한 7 가지의 조건을 동시에 만족하기에는 오늘의 반도체기술이 아직까지는 미흡하다고 볼 수 있겠다. 예를들면 reverse blocking voltage 를 결정하는 요소로써 Avalanche breakdown 이라는 현상이 있는데, N₁ 층의 doping (도우핑) 을 감소

시키면 증가되어서 reverse blocking voltage의 증가에 도움이되나, N_1 층의 doping의 감소는 Forward current의 감소를 초래하기 때문에 N_1 층의 도우핑의 최적값이 결정되어야하고 current와 voltage에서의 trade-off가 생기게된다.

따라서 오늘날의 다이리스터는 전술한 7개의 조건을 동시에 만족하지 못하고, 그중 어느하나를 개선하려면 다른 조건의 희생이 따를 수도 있어서 각 작용도에 따라서 세분화가 되고있다.

대표적인 다이리스터의 몇개의 예를 들면 다음과 같다.

- a) Phase Control Thyristors
- b) Inverter Thyristors
- c) Asymmetrical Thyristors (ASCR)
- d) Reverse Conducting Thyristors (RCT)
- e) Gate-Assisted Turn-off Thyristor (GATT)
- f) Light-Triggered Thyristor

열거한 6가지의 Thyristor의 전류와 전압의 평균용량을 그림 3에 표시하였다. 6가지의 Thyristor에 관하여 설명을 하고자 한다.

a) Phase Control Thyristor

Converter라고도 불리우는데 일반적으로 50~60 Hz 정도의 주파수에서 많이 쓰이는데 그림 3에서와 같이 고전압-고전류용으로써 3000Amp까지의 전류와 50~4000V까지의 전압용으로써 널리쓰이고 있으나 switching속도가 느린면이 있다. 소자의 설계에 있어서는 punch-through와 current-gain 문제때문에 base와 junction의 두께를 조절하여야 한다. forward voltage drop은 carrier life time과 diffusion length에 반비례하기 때문에, voltage drop을 극소화하기 위하여는 turn

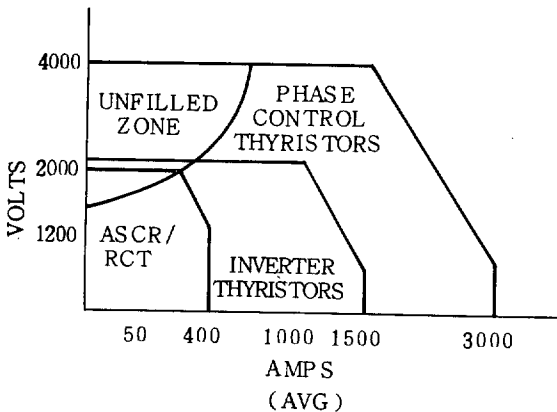


그림 4. 여러가지 다이리스터 용량

-off time의 증가가 불가피하여서 switching speed가 감소하게 된다. 또한 최근에는 shunting path를 이용하는 emitter shorting structure의 도입으로 dv/dt 가 100V/ μ S이상으로 향상되고 있다.

b) Inverter Thyristor

전술한 phase control thyristor가 대용량의 전류와 전압을 제어할 수 있으나 속도가 느리기 때문에, 속도의 증가를 위하여 carrier life time의 감소는 인위적으로 하여서 저장된 전과의 방출을 증가하므로써 turn-off time을 감소시킨다. carrier life time의 감소는 금이나 백금(Platinum)을 이용하여doping을 함으로써 성취할 수 있다. 그러나 carrier life time의 증가는 forward voltage drop 증가하므로 phase control thyristor에 비하여 전류 및 전압용량이 감소하게 된다. Turn-off time은 5-50 μ S 정도이고 전류-전압용량은 2000 Amp 및 2500 V 정도에 이른다.

c) Asymmetrical Thyristor(ASCR)

ASCR은 전압용량이 400V 정도으로써, N type base와 P type 에노드사이에 N layers를 또 하나 삽입하므로써 일반적인 다이리스터보다 N type의 base의 두께를 줄이므로써 forward voltage drop을 줄이는 이점이 있다. forward voltage drop은

$$V_{FD} \propto \frac{d^2}{\tau}$$

d : N base width

D : Diffusion constant

τ : Carrier life time

로 표시가 되는데 d가 1/2로 감소하면, 동일한 V_{FD} 를 얻기위해서는 τ 가 1/4로 감소하여도 된다. 이럴때의 turn-off time은 50%이상 증가된다. 또한 N base의 두께의 감소는 Spreading velocity가 N base 두께에 역비례하기 때문에 turn-on에 di/dt 가 증가하게 되어서 turn-on 시간 di/dt 및 turn-off에 문제가 없이 증가할 수 있다.

d) Gate Turn-off Thyristors

다이리스터가 동작을 시작하려는 게이트가 다이리스터를 제어할 수가 없다. 즉 on 상태에 돌입하려는 gate 전류가 필요없게 된다. 그러나 실제의 회로의 운영면에서는 gate를 조절하여서 turn-off하게 될때가 있는데, gate-turn-off Thyristor

(GTO)는 마이너스 펄스를 gate에 걸어주어서 동작을 중지시키는 소자이다. 특히 DC 회로에서 commutation에 필요한 회로가 없어 전력을 조정할 수 있도록 되어있다.

GTO소자의 가장 중요한 특성은 turn-off time의 감소 및 turn-off 전류의 증가가 되는데, 게이트에 역방향의 전압을 걸어주므로써 캐소드와 베이스사이의 excess hole을 제거하므로써 turn-off를 시키게 된다. 제어할 수 있는 전류는

$$I = \frac{4GV_{GK}}{R_B}$$
로 표시가 되는데, V_{GK} 는 캐소드 게이트의 breakdown 전압, R_B 는 P base의 저항, G는 turn-off gain이다.

따라서 제어전류를 증가시키기 위하여 R_B 를 감소하여야 한다. R_B 의 감소는 P형 base의 도우핑을 증가하여 이룩될 수 있다. 도우핑의 증가는 emitter의 breakdown이 감소하게 되어서 도우핑 일방적인 증가는 소자의 특성을 저하시키므로 최적의 도우핑을 하여야 하는데

$1.0 \pm 0.5 \cdot 10^{18} / cm^3$ 가 널리 쓰이고 있다.

Turn-off time이 2~15 μ S이 GTO가 개발되고 있으며 2500V 및 1000A의 turn-off용 GTO가 보고되고 있다.

e) Light Triggered Thyristors

다이리스터중에서 가장 최근에 개발된 소자로써 전기를 이용하지 않고 빛의 광전효과를 이용하여서 게이트 전류를 발생하여서 다이리스터를 동작시키는 장치이다. 전기적 절연이 필요로 하는 switching 문제, 예를 들면 고전압 회로등에서 많이 사용되고 있다.

Light Triggered Thyristors의 설계에서는 빛에 의하여 발생할 수 있는 gate 전류가 제한이 되므로 전기적으로 작동시키는 일반적인 다이리스터의 gate sensitivity의 100배정도의 sensitivity가 필요하게 된다.

gate sensitivity의 증가는 noise에 민감하게 되고 또한 dv/dt가 감소하게 되는 문제가 발생하는데 빛은 쏘여주는 gate 면적을 일반적인 다이리스터보다 1/10~1/100정도로 감소시키고 multi-amp-lifying gate를 이용하여 해결한다.

1 milliwatt 보다 작은 광원을 이용하여서 4kV 및 1500A의 용량을 갖은 장치가 개발되어 있다. dv/dt는 1500~2000V/ μ s정도이고 di/dt는 250A/ μ s까지 얻을 수 있게 되어있다. 광원으로는 Light Emitting Diode (LED)가 많이 사용되나 더 큰 power를 갖는 반도체 레이저의 발달이 되어가고 있으므로, 또한 반도체 레이저의 파장이 줄어가고 있어서, optical fiber의 loss가 감소되어서 gate 전류가 증가될 수 있다.

㉓ 맺는 말

다이리스터는 power semiconductor device중에서 가장 광범위 또한 대용량의 전류와 전압을 취급할 수 있는 소자로서 널리 이용되고 있다.

또한 silicon wafer의 크기가 증가하고 있기때문에 전류의 증가가 기대가 되고 있다. 그러나 MOSFET의 power device의 응용이 증가되고 있으나 대용량의 전류와 전압의 조절분야에서는 다이리스터의 역할이 두드러질 것이다.

참고문헌

- 1) S.M.Sze "Physics of Semiconductor Devices" 1983 John Wiley, New York
- 2) S.K.Ghandi : "Semiconductor Power Devices" 1977 John Wiley, New York
- 3) M.S. Adler et al : IEEE, Trans. on Electron Devices p.1570, 1984.