

정류소자

서강덕

(한국과학기술원 박사과정)

1. 서론

정류소자(rectifier)는 전원시스템 및 전력기기등에 사용되는 중요한 전력소자의 하나로서 이용되어 왔다. 정류소자의 기본요건으로서는 ON 상태에서의 낮은 순방향전압, 높은 전류구동 능력과 OFF 상태에서의 높은 역전압 차단능력, 낮은 누설전류이며 부가되는 조건으로서는 우수한 스위칭 특성 및 동작온도 범위이다. 전력정류소자로서 지금까지 광범위하게 사용된 소자는 P-i-N 다이오드이다. 그러나 최근에 VLSI 기술 및 시스템기술의 발달로 인하여 스위칭 전력전원 및 모터구동 등 여러분야에서 기존 P-i-N 정류소자의 특성이상의 고주파정류소자가 필요하게 되었다. 고주파정류소자는 그 시스템자체의 주파수특성을 개선시킬 뿐만 아니라 주변회로로 사용되는 수동소자 즉 capacitor 및 inductor 등의 크기를 작게 함으로써 시스템의 크기를 축소시키고 효율을 증대시켜 경제성을 향상시키는 장점이 있다.

그러나 기존의 P-i-N 정류소자는 스위칭 특성의 문제점 때문에 고주파용 정류소자로서는 적합치 못하다. 이에따라 최근에 새로운 구조를 갖는 정류소자가 개발되었다. 따라서 이 보고서에서는 P-i-N 다이오드의 스위칭특성을 검토하고 이의 문제점들을 개선한 새로운 정류소자들을 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1. P-i-N 정류소자

P-i-N 정류소자는 전력회로에 사용된 많은 소자들 중

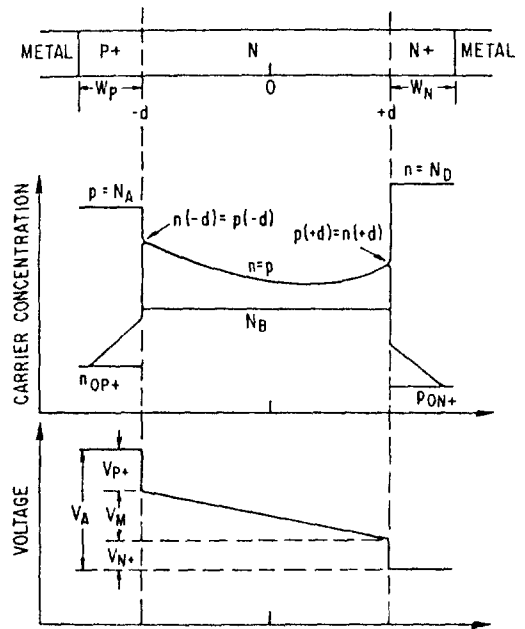


그림 1. P-i-N 정류소자에서 ON 상태의 운반자 농도 및 전압분포

에서도 초기의 반도체소자이다. 그림 1은 P-i-N 다이오드의 간단한 구조와 ON 상태의 반송자 농도분포 및 전압분포를 나타낸 것이다. 여기서 i 영역은 낮은 불순물농도의 N형이 사용된다. 이 i 영역의 두께는 OFF 상태시 인가되는 최대 역전압에 의하여 결정된다. 그림 1에서 보는 바와 같이 ON 상태에서 i 영역의 불순물농도는 P' 영역에서 주입된 정공 즉 소수반송자와 전하중성화를시키는 다수반송자 즉 전자가 같은 양으로 크게 증가하여 i 영역의 ON 저항이 감소하게 된다. 이때의 전

류전압 관계식은 다음과 같이 주어진다.¹⁾

$$J_F = \frac{2qDa_nk}{d} F(d/L_a) e^{qV_a/kT}$$

여기서

$$F(d/L_a) = \frac{(d/L_a) \tanh(d/L_a)}{\sqrt{1 - \frac{1}{4} \tanh^4(d/L_a)}} e^{-qV_m/kT}$$

위의 식에서 D_a 는 ambipolar 확산계수이며 L_a 는 ambipolar 확산길이이다. ON 상태에서 중요한 것은 양극 단과 음극단의 순방향 전압 V_F 이다. 이는 P-i 접합에서의 built-in 전압과 i 영역에서의 전압차의 합이며 V_F 가 클수록 전력소비량이 증가하며 이는 소자의 효율이 감소되고 많은 열이 발생하는 문제가 생긴다. 따라서 가능한한 V_F 를 감소시켜야 하며 이는 곧 i 영역의 두께를 작게한다는 것을 뜻한다.

그러나 이는 OFF 상태에서 차단할 수 있는 역전압의 크기를 감소시키므로 이의 최적화가 요구된다. P-i-N 다이오드의 중요한 문제점은 스위칭과정에서 발생한다. 먼저 OFF 상태에서 ON 상태로 스위칭될 때의 문제점을 본다. ON 스위칭 속도가 빠를 때 즉 인가되는 전류의 변화속도 $\frac{di}{dt}$ 가 P' 영역에서 i 영역으로 주입된

소수반송자의 확산계수보다 빠를 때 i 영역에서의 반송자 농도는 불순물농도와 같으므로 i 영역의 저항은 매우 큰 상태이다. 그리고 시간이 지남에 따라 i 영역의 반송자 농도가 증가하게 되고 저항이 감소한다. 따라서 ON 스위칭시 P-i-N 다이오드의 양극간에 나타나는 전압은 그림 2와 같이 순간적으로 매우 크게 된다. 이러한 현상을 순방향 전압 overshoot라고 하며 이 때 유도되는 최대전압 V_{peak} 는 평형상태의 ON 전압 V_F 보다 상당히 큰 값을 갖게 된다. 실제 제작된 소자에서 매우 빠른 스위칭속도 $\frac{di}{dt}$ 에 대하여 V_{peak} 가 30V 까지 관찰된 예가 있다. V_{peak} 값이 크면 이를 사용한 시스템에서 심각한 문제가 야기될 수 있다. 예를 들면 주변회로에 트랜지스터가 사용될 경우에 베이스와 에미터사이에 V_{peak} 가 직접 인가되어 트랜지스터가 파괴될 수 있다. 따라서 P-i-N 다이오드에서는 최대 ON 스위칭속도와 overshoot 전압을 최적화하여야 하며 이에따라 ON 스위칭속도가 제한받게 된다.

다음에는 P-i-N 다이오드가 ON 상태에서 OFF 상태로 스위칭되는 현상을 검토한다. OFF 스위칭시 빠른

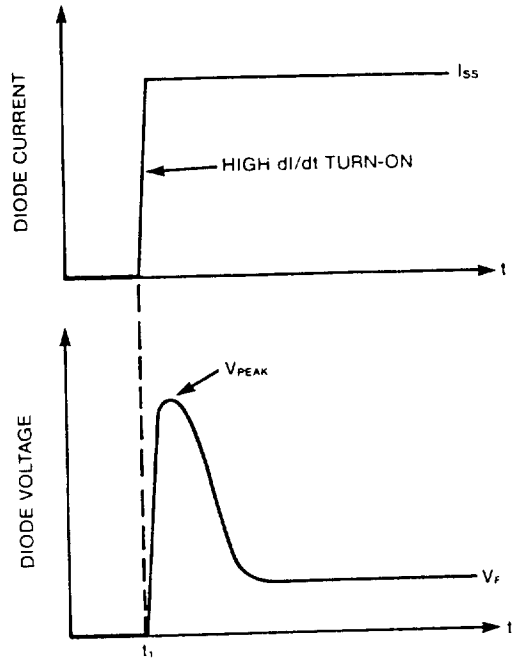


그림 2. P-i-N 정류소자의 ON 스위칭 특성

속도의 $\frac{di}{dt}$ 로 OFF 될 때 ON 상태시 i 영역에 존재하는 소수반송자와 다수반송자가 OFF 상태의 평형상태로 환원되는 과정에서 전류가 ON 상태와 반대방향으로 흐르게 된다. 이 역 전류의 발생원인은 두 가지 현상으로 설명된다. 첫째로 i 영역에 있는 소수반송자 정공은 P' 영역으로, 다수반송자 전자는 n' 영역으로 역주입됨으로써 생기는 전류이고, 둘째는 i 영역에서 소수반송자와 다수반송자가 재결합하는 과정에서 생기는 전류이다. 그림 3은 OFF 스위칭될 때의 전류파형과 전압파형을 나타낸다. 여기서 최대역전류 I_{RP} 는 빠른 속도로 스위칭될 때 ON 상태의 순방향전류 I_F 와 비슷한 수준까지 된다. 역전류가 감소되는 회복시간은 그림 3에서 $t_A^+ t_B$ 이며 t_A 는 주로 역주입전류에 의해 결정되고 t_B 는 주로 재결합전류에 의해 결정된다. 또한 OFF 스위칭 과정에서 P-i-N 다이오드의 양 단자에 연결된 회로선의 inductance 성분에 의하여 역전압의 overshoot 현상이 발생하며 이는 스위칭속도가 빠를수록 커지게 된다. 즉 그림 3에서 V_{RP} 가 커지면 P-i 접합의 파괴를 초래할 수 있으므로 i 영역의 두께를 늘려야 하는 문제점이 생기며 이 경우 i 영역의 ON 저항이 증가하게 된다. 역전류현상과 역전압의 overshoot 현상은 주변의 타 소

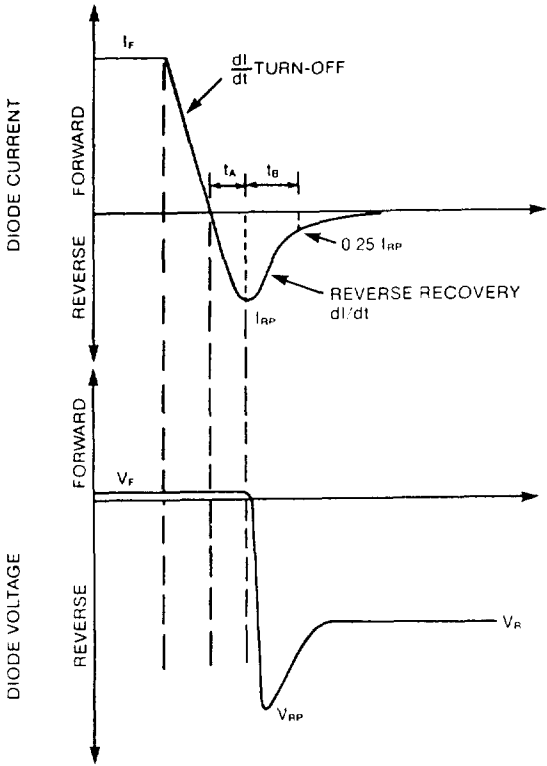


그림 3. P-i-N 정류소자의 OFF 스위칭특성

자들에게도 stress를 주게 되어 시스템전체의 신뢰도에 크게 영향을 준다. 따라서 P-i-N 다이오드의 OFF 스위칭 속도는 역전압 overshoot 현상과의 최적화가 필요하며 이것이 OFF스위칭속도를 제한한다. 또한 소자의 OFF 시간은 역전류의 회복시간에 의하여 결정된다. 따라서 P-i-N 다이오드의 최대동작 주파수는 ON, OFF 시의 최대 스위칭 속도와 OFF 시의 역전류 회복시간의 합에 의하여 결정되며 특히 역전류회복시간이 큰 제약요소가 된다.

지금까지 열거한 P-i-N 다이오드의 문제점들을 종합하면 다음과 같다. 즉 순방향 전압의 크기, ON스위칭 시의 순방향전압 overshoot, OFF 스위칭시의 역전압 overshoot 및 역전류와 이의 회복시간이다. 이러한 문제점들의 원인은 P-i-N 다이오드의 동작원리가 소수반송자와 다수반송자가 함께 전류에 기여하는 양극성소자이기 때문이다. 따라서 P-i-N 소자의 단점들을 개선하기 위하여는 정류소자를 다수반송자에만 의하여 동작되는 단극성소자로 구성하는 방법과 P-i-N 다이오드와 같

이 양극성소자라 하여도 스위칭시 소수반송자를 적절하게 제어하는 방법이 있다. 특히 P-i-N 다이오드의 주파수특성을 개선하기 위하여 i 영역에 금 또는 백금등의 불순물을 도핑함으로써 재결합준위를 형성하여 반송자의 수명을 감소시키는 방법²⁾이 있다. 이렇게 반송자의 수명을 감소시킴으로써 OFF스위칭시 역전류 회복시간을 단축시킬 수 있다. 실제 소자를 제작하여 측정된보고에 의하면 주파수특성을 두 배로 증가시킬 수 있다. 그러나 재결합준위를 형성시키는 것은 두 가지 문제점을 동반하므로 이의 최적화가 필요하다. 하나의 문제점은 역전압상태에서의 재결합준위에 의한 누설전류가 증가하며 다른 문제점은 반송자의 수명감소에 의한 i 영역의 ON 저항 증가이다. 이러한 단점들은 모두 소자의 전력소모를 증가시키므로 소자의 최대동작온도를 크게 감소시킨다.

2.2. IOC 정류소자

P-i-N 정류소자의 구조에서 음극단의 N⁺ 영역은 소자의 기계적인 지지기반이 되며 외부단자와의 접촉저항을 작게 하고 i 영역에 다수반송자를 주입시키는 역할을 하게 된다. 그러나 i-N 접합층의 불순물농도 차이에 의한 built-in 전위가 형성됨으로써 그림 4에서 보는 바와 같이 소수반송자에 대하여 전위장벽 역할을 하게 된다. 이 전위장벽은 P-i-N 다이오드가 OFF 스위칭시 소수반송자가 N⁺ 영역으로 확산되는 것을 방해함으로써 역전류 회복시간을 크게하는 요인이 된다. 이러한 단점을 개선하기 위해 고안된 것이 그림 5의 IOC (Ideal Ohmic Contact) 정류소자³⁾이다. 즉 음극단의 N⁺ 영역을 N⁺와 P⁺로 모자이크형태로 변형시켜 그림 5(b)와 같이 소수반송자에 대한 전위장벽을 제거한 구조이다. 이와 같은 구조로서 그림 6과 같이 P⁺ 대신 쇼트키 접합을 이용한 IOC 정류소자도 있다.³⁾ IOC 정류소자의 장점은 OFF스위칭시 소수반송자가 양극단의 P⁺ 영역과 음극단의 P⁺영역으로 동시에 빠져나옴으로써 역전류회복시간이 크게 감소된다. 실제 소자를 제작 검토한 예를 보면 P-i-N 정류소자의 역전류회복시간이 500nsec 일 때 IOC 정류소자는 60nsec로 측정되었다. 또한 OFF 스위칭시 소수반송자가 양극단과 음극단으로 분리되어 이동함으로써 역전류가 크게 감소되는 장점이 있다.

즉, IOC 정류소자는 P-i-N 정류소자의 OFF 스위칭

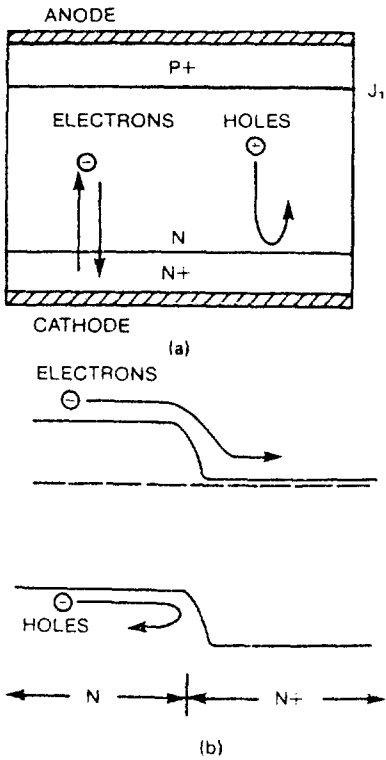


그림 4. P-i-N 정류소자에서의 i-N 접합층의 전위장벽

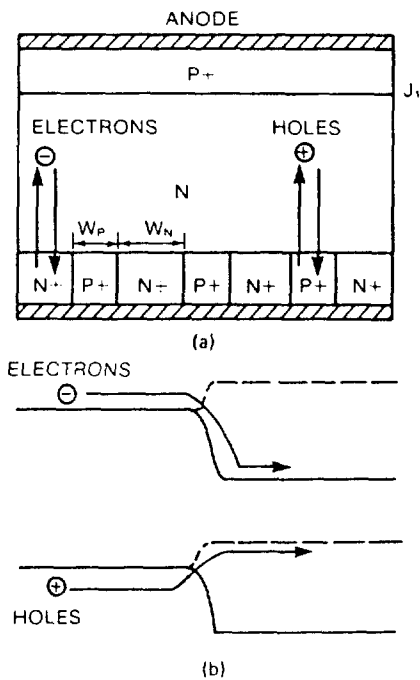


그림 5. 10C 정류소자의 구조

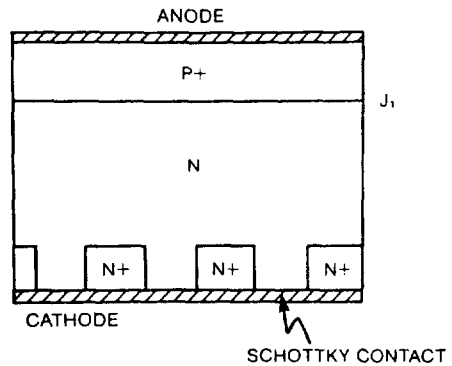


그림 6. Schottky 접합을 이용한 10C 정류소자

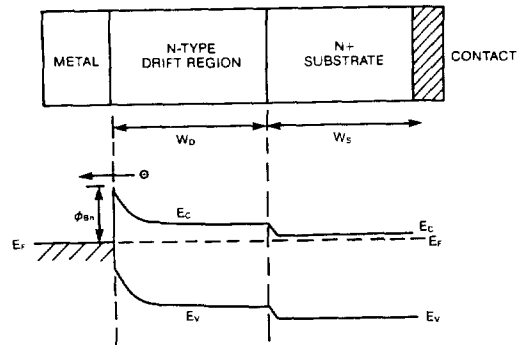


그림 7. Schottky 정류소자의 구조 및 에너지 준위

특성을 개선시킨 것이며 ON스윗칭 특성은 같게된다. 또한 OFF 상태에서 P-i-N 다이오드에 비하여 누설전류가 감소되며 이에 따라 최대 동작온도 범위가 커지는 장점을 수반한다.

2.3. 쇼트키 정류소자

P-i-N 정류소자에서 P-i 접합다이오드 대신 금속접합을 이용한 그림 7의 쇼트키 정류소자가 있다. 쇼트키 정류소자는 P-i-N 다이오드와 비슷한 구조로 되어 있으나 금속영역에서 i 영역으로 주입되는 소수 반송자의 양이 극히 작기 때문에 동작형태가 크게 달라진다. 즉 P-i-N 정류소자는 전류가 다수반송자와 소수반송자에 의하여 형성되나 쇼트키 정류소자는 다수반송자 즉 전자에만 의하여 전류가 흐른다. 쇼트키 정류소자의 전압 전류식은 다음과 같다.⁴⁾

$$J = AT^2 e^{-(q\phi_{Bn}/kT)} (e^{qVa/kT} - 1) \quad (1)$$

여기서 A는 Richardson 상수이고 T는 절대온도 ϕ_{bn} 은 쇼트키접합의 전위장벽이다.

쇼트키정류소자의 최대장점은 i 영역의 소수 반송자가 ON 상태와 OFF 상태일 때 같은 양으로 존재하므로 OFF스윗칭시 역전류가 발생하지 않으며 이에 따라 소자의 동작속도가 매우 빨라진다는 점이다. 같은 이유로 ON 스윗칭 시에도 P-i-N 정류소자에서 발생하는 순방향 전압 overshoot 현상도 발생하지 않는다. 또 다른 장점은 쇼트키전위장벽이 낮을수록 ON 상태에서 쇼트키접합에서의 전위차가 낮아 P-i-N 정류소자보다 효율이 증가되는 것이다. 그러나 쇼트키정류소자는 역전압 상태에서 고유적으로 P-i-N 정류소자보다 누설전류가 많게되며, 식1에서 알 수 있듯이 온도가 증가함에 따라 누설전류가 크게 증가하게 된다. 또한 역전압이 증가할수록 쇼트키 장벽전위가 작아지는 현상때문에 누설전류는 더욱 증가하게 된다.⁵⁾ 누설전류의 증가는 쇼트키 정류소자의 최대 동작온도와 최대 동작전압을 크게 제한하는 요소가 된다. 쇼트키 다이오드를 형성하는데 사용되는 금속은 주로 백금과 몰리브덴이며 쇼트키 접합에서의 순방향전압차는 약 0.2V이다.

2.4. MOSFET정류소자

전력 MOSFET을 정류소자로 응용할 수 있다.⁶⁾ MOSFET 정류소자의 특징은 3 단자소자이며 게이트단으로 ON, OFF를 제어하며 양극단과 음극단의 전압을 고정시킨 상태에서 전류의 양을 제어할 수 있다는 것이다. 또 다른 특징은 ON, OFF시 양극단과 음극단의 전압의 방향이 일정한 것을 들 수 있다. 그림 8은

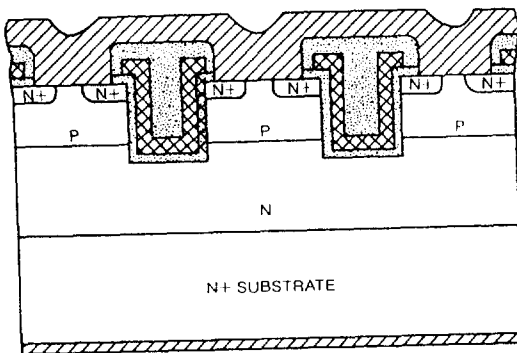


그림 8. 고집적 전력 MOSFET 구조

최근 개발된 고집적 전력 MOSFET 구조이다. 그림 8에서 P-i-N 다이오드의 i 영역에 대응되는 영역은 N에 피층이며 ON 상태에서는 게이트에 + 전압을 인가하여 NMOS를 통하여 N에피영역에 다수반송자를 공급하게 된다. OFF 상태는 게이트에 - 전압 혹은 0V를 인가함으로써 다수반송자의 공급을 중단시킴으로써 이루어진다. MOSFET 정류소자는 쇼트키 정류소자와 같이 다수반송자에 의하여 전류가 흐르는 단극성 소자이므로 쇼트키 정류소자와 대등한 스윗칭특성을 갖는다. MOSFET 정류소자는 우수한 스윗칭특성뿐만 아니라 P-i-N 다이오드에서의 P-i 접합층의 built-in 전위 또는 쇼트키정류소자에서의 전위장벽이 생기지 않으므로 순방향 전압이 크게 감소되고 전력효율이 크게 증가한다. 또한 누설전류가 작게되고 고전압 고전류용에 적합하게 사용될 수 있다. 다만 제작공정이 타 정류소자들에 비하여 복잡하기 때문에 제작단가가 높은 것이 단점이다.

2.5. JBS 정류소자

JBS (Junction Barrier controlled Schottky) 정류소자⁷⁾는 쇼트키 정류소자를 변형시킨 소자로서 쇼트키 정류소자의 단점인 누설전류를 크게 감소시킨 정류소자이다. 그림 9와 같이 쇼트키 접촉면에 P+ 영역을 삽입

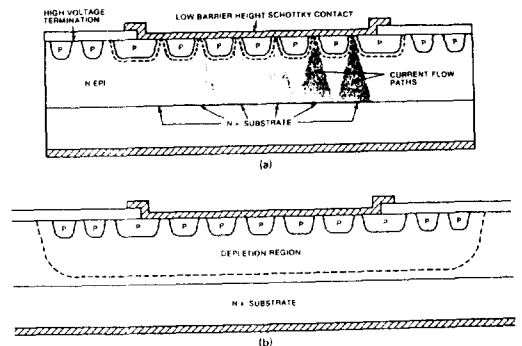


그림 9. JBS 정류소자의 구조

(a) ON상태 (b) OFF상태

하여 ON 상태에서는 쇼트키 정류소자와 같은 원리로 전류가 도통하고 역전압상태에서는 전압이 증가함에 따라

P^+ 영역사이의 $N(i)$ 영역이 공핍층에 의하여 Pinch-off가 되어 쇼트키 전위장벽이 낮아지는 것을 방지하고 쇼트키접촉면에서의 누설전류가 증가하는 것을 억제한다. 따라서 JBS 정류소자는 쇼트키 정류소자에 비하여 최대 동작온도와 최대 동작전압이 증가된다. 그러나 JBS 정류소자는 i 영역의 실제 동작 넓이가 감소되어 고전류 정류소자로는 적합하지 못한 단점이 있다.

3. 결 론

지금까지 전력소자로서의 P-i-N 정류소자의 단점 및 이를 개선한 여러가지 새로운 형태의 정류소자들을 소개하였다. 특성별로 분류하면 쇼트키 정류소자는 고주파 고전류 저전압 저온도용으로 적합하며, JBS 정류소자는 쇼트키정류소자의 저전압 저온도 특성을 보완한 용도이며 전류특성은 상대적으로 저하된다. IOC 정류소자는 고주파 고전압 고온도용으로 적합하며, 마지막으로 MOSFET 정류소자는 고주파 고전류 고전압 고온도 등 가장 우수한 특성을 갖게되고 고신뢰도를 요구하는 정류소자로 이용된다.

참 고 문 헌

- 1) S.K.Ghandhi, *Semiconductor Power Devices*, Wiley, New York, 1977.
- 2) B.J.Baliga and E. Sun, "Comparison of gold, platinum and electron irradiation for controlling life time in power rectifiers," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-24, pp. 685-688, 1977.
- 3) Y.Amemiya, et al., "Novel low-loss and high speed diode utilizing an ideal ohmic contact," *IEEE Trans, Electron Devices*, Vol. ED-29, pp. 236-243, 1982.
- 4) C.R.Crowell and S.M.Sze, "Current transport in metal- semiconductor barriers," *Solid State Electron.*, Vol. 9, pp. 1035-1048, 1966.
- 5) S.M.Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley, New York, 1981.
- 6) R.Severns, "The power MOSFET as a rectifier," *Power Conversion International*, pp. 49-50, 1980.
- 7) B.J.Baliga, "The pinch rectifier : A low forward drop, high speed power diode," *IEEE Electron Device Lett.* Vol. EDL-5, pp. 194-196, 1984.