

I. 서론

밀리미터파는 30~300 GHz 주파수 대역을 말한다. 밀리미터파는 마이크로파에 비해서 파장이 짧아 시스템을 소형, 경량화 할 수 있고 빔폭을 매우 좁게 만들 수 있어서 높은 해상도와 정밀도를 요구하는 레이더에도 쓰인다. 최근에 이런 밀리미터파 대역에 쓰이는 반도체 소자에 대한 수요의 증가로 연구소 및 산업체에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 초기에 밀리미터파 소자들은 군사용으로 주로 쓰였으나 이제 상업용으로 그 영역을 넓혀가고 있다. 과거에는 소자기술의 부족으로 인하여 이 분야에 대한 연구가 제한되었지만 현재는 MBE나 MOCVD 같은 반도체 장비 및 반도체 공정기술의 발전으로 인하여 밀리미터파 대역의 반도체 소자에 대한 연구가 가능해졌다. 마이크로웨이브 주파수 영역에서는 FET나 BJT와 같은 3 단자 소자가 주로 쓰이고 있으나 아직도 밀리미터파 영역에서는 IMPATT이나 Gunn 다이오드와 같은 2단자 소자가 많이 쓰이고 있다. IMPATT은 제어가 힘들며 잡음이 많아서 점점 3 단자 소자에 그 자리를 내어 주고 있지만 30~200 GHz 밀리미터파 대역에서 반도체소자로써 고출력을 얻을 수 있는 유일한 소자이다. Gunn 다이오드는 매우 낮은 효율(~2%) 때문에 응용에 많은 제약을 받는다. 하지만 그 사용의 간단함 때문에 효율이 문제가 되지 않은 밀리미터파 시스템에서 계속 많은 사용이 예상된다. 여기서는 밀리미터파 대역에서 쓰이는 2 단자 소자에 대해서 살펴보고 하겠다.

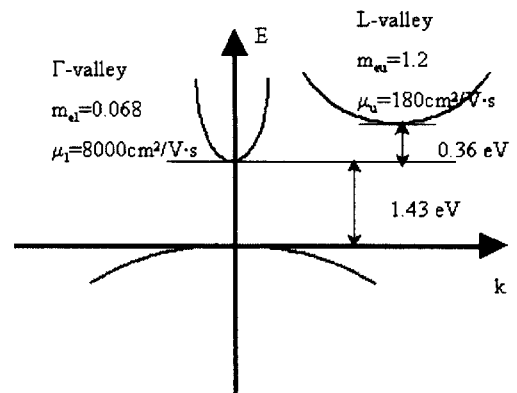
II. Gunn 다이오드

Gunn 다이오드는 1963년에 처음으로 이를 발견한 J.B. Gunn의 이름을 따서 만들어지게 되었다. Gunn 다이오드는 GaAs의 E-k 다이어그램을 통해서 이해할 수 있다.

GaAs의 E-k 다이어그램은 [그림 1]과 같다. 낮은 에너지상태인  $\Gamma$ 계곡에서의 전자는 높은 이동도와 낮은 유효질량을 가지는 반면에 L 계곡에서의 전자는  $\Gamma$ 계곡에 비해서 상대적으로 낮은 이동도와 높은 유효질량을 가진다. 상온에서 모든 전자는  $\Gamma$ 계곡에 있지만 전계가 가해짐에 따라 전자는  $\Gamma$ 계곡에서 L 계곡으로 전이되기 시작하면서 부정저항 특성을 보이게 된다.

먼저 부정저항을 나타내기 위해서는 다음의 세가지 조건을 만족해야 된다.

첫째, 하위계곡과 상위계곡의 에너지 차이가 상온



[그림 1] GaAs E-k 다이어그램

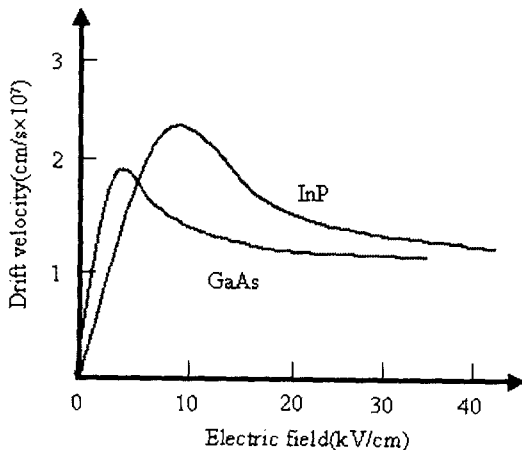
에서의 열에너지 즉 26 meV보다 수배 이상 커야 한다.

둘째, 두 계곡 사이의 에너지 차는 에너지 밴드갭보다 작아야 한다.

셋째, 하위계곡의  $dE/dk$ 가 상위계곡보다 커야 한다.

위의 조건을 만족하는 대표적인 반도체 물질들은 GaAs와 InP가 있다. Gunn 다이오드는 물질의 벌크 특성을 이용한 것으로  $n+nn$ 의 도핑구조를 갖는다. 이런 구조를 갖는 물질은 특정 문턱전계 이상의 전계를 가하게 되면 하위계곡에서 상위계곡으로 전자 전이가 일어나게 되어 도메인이라고 하는 고전계 영역이 물질 내에 생기게 된다. 안정한 도메인이 형성될 때까지 전자는 축적되고 안정한 도메인이 생성되면 이 도메인은 활성영역을 이동하게 된다. 이 도메인이 양극에 도착했을 때는 전류펄스가 발생하게 되고 동시에 다시 문턱전계 이상의 전계가 소자에 걸리게 되어 음극에서 도메인이 재생성되는 과정을 반복하게 된다.

그래서 GaAs나 InP같은 물질의 경우 전계와 드리프트 속도와의 관계는 [그림 2]와 같이 부정저항 특성을 보인다.



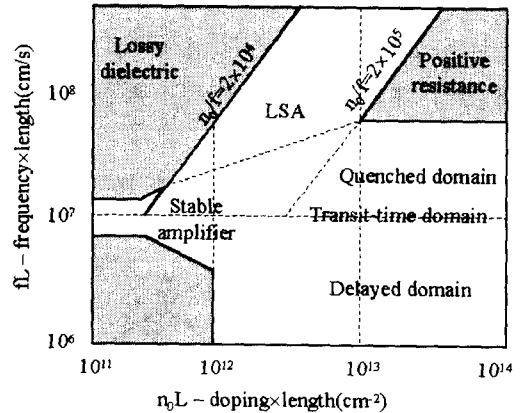
[그림 2] GaAs와 InP의 전계와 이동속도 관계 그래프

## 2-1 Gunn 다이오드의 동작모드

Gunn 다이오드는 활성영역의 도핑농도와 두께의 곱을 바꾸거나 외부 회로를 조절함으로써 해서 다음과 같은 여러 가지 동작모드를 가진다.

- ① Gunn 발진모드
- ② 안정한 증폭모드
- ③ LSA(Limited Space charge Accumulation) 모드

Gunn 발진모드는 다시 천이시간영역모드, 지연 영역모드, 소멸영역모드로 다시 나뉘게 된다. [그림 3]은 Gunn 다이오드의 여러가지 모드에 대해서 나타내고 있다.



[그림 3] Gunn 다이오드의 동작모드

## 2-2 InP Gunn 다이오드

InP의 경우는 GaAs에 비해서 높은 주파수의 밀리미터파 오실레이터에서 더 좋은 성능을 보인다. 그 이유는 첫째 GaAs에 비해서 높은 침투치 대 계곡 전류비를 가지고 있고, 둘째 scattering 시간이 작아서 하위계곡에서 상위계곡으로 전자가 전이하는데 걸리는 시간이 GaAs에 비해 더 작다. 그리고 높

은 첨두치 속도를 가지므로 같은 주파수에서 동작하는 GaAs Gunn 다이오드보다 활성영역의 두께를 키울 수 있다.

### 2-3 Gunn 다이오드의 제한요소

음극에서 이동한 전자가 하위계곡에서 상위계곡으로 전이하기 위한 충분한 에너지를 얻을 때까지는 약간의 거리 이동이 필요하며 이것을 dead zone이라고 한다. 이러한 dead zone은 저항성분으로 작용해서 DC-to-RF 변환 효율을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 오실레이션을 방해하는 요소로 작용한다. 그러므로 이러한 dead zone을 줄여야 한다. dead zone을 줄이기 위해서 음극 영역에 낮은 장벽높이를 갖는 Schottky contact을 이용하는 방법과 음극 영역 앞에 도핑이 낮게 된 notch를 두어 높은 전계가 이 notch 영역에 걸리게 해서 전자가 하위계곡에서 상위계곡으로 더 빨리 전이되게 하는 방법이 있다. 최근에는 AlGa-

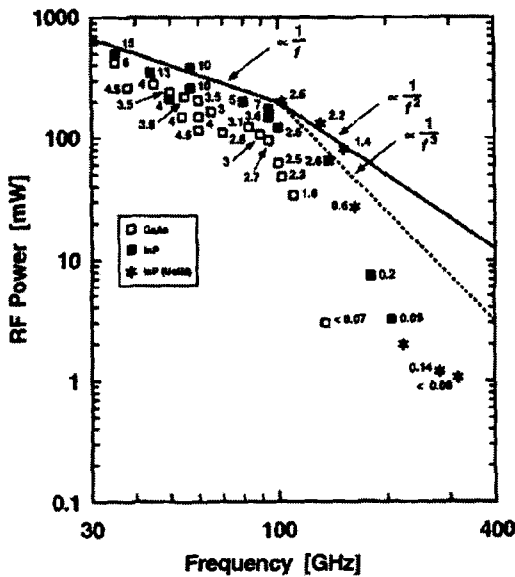
As/GaAs의 이종접합을 이용해서 hot carrier를 주입시키는 방법이 제안되었다.

또한 대부분의 전력소자에서와 마찬가지로 Gunn 다이오드에서도 열효과가 소자특성에 미치는 영향이 크므로 다이아몬드나 구리로 만든 heat sink 위에 Gunn 다이오드를 마운트해서 사용한다.

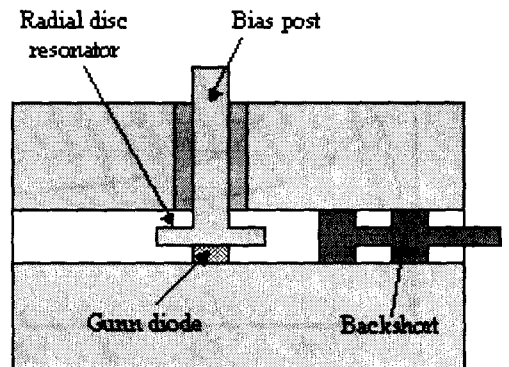
[그림 4]는 GaAs와 InP로 만들어진 Gunn 다이오드의 주파수와 RF 출력 전력과의 관계를 보여주는 그래프이다. 그림에서처럼 100 GHz 이상의 고주파에서는 InP Gunn 다이오드가 쓰인다.

### 2-4 응용분야

Gunn 다이오드는 전력소스로 널리 쓰이고 있고 통신장비의 로컬 오실레이터나 증폭기에 주로 쓰이고 있다. Gunn 다이오드는 적당한 출력전력을 가질 뿐만 아니라 잡음 특성이 우수하기 때문에 밀리미터 파 대역의 로컬 오실레이터로 주로 이용되고 있다. 최근에는 77 GHz 대역의 자동차 충돌 방지 시스템에 이용되는 FMCW 레이더의 로컬 오실레이터로 이용되고 있다. [그림 5]는 radial disc 공진기를 이용한 웨이브가이드 형태의 Gunn 오실레이터를 보여주고 있다.



[그림 4] GaAs, InP Gunn 다이오드의 주파수와 RF 출력 전력과의 관계 그래프



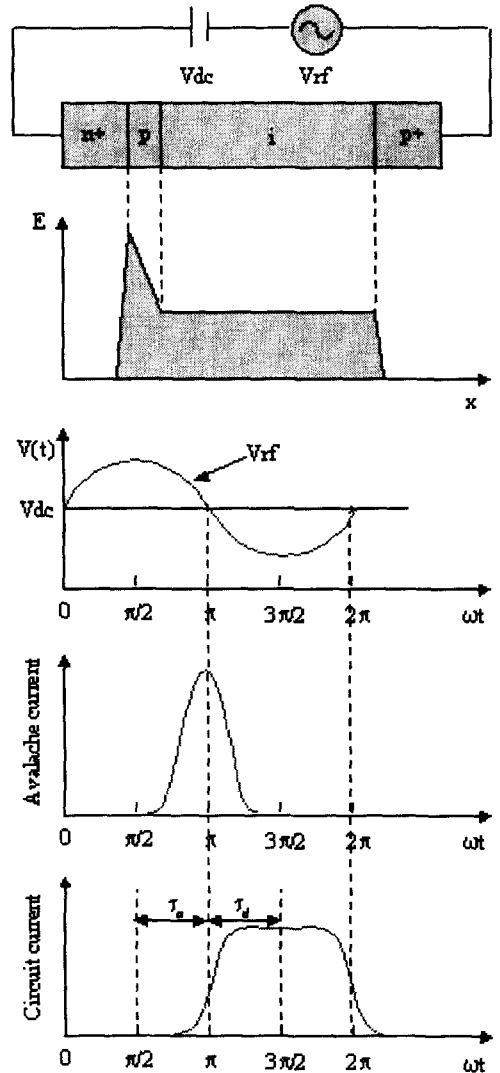
[그림 5] Waveguide type Gunn oscillator

### III. IMPATT

IMPATT(IMPact ionization Avalanche Transit Time)은 Gunn 다이오드와 함께 밀리미터파 대역의 전력소스로 많이 쓰이고 있다. IMPATT은 Si, GaAs, InP로 만들어지고 있으며 Si의 경우 동작주파수는 거의 400 GHz에 이르고 있다. 또한 IMPATT은 현재까지 만들어진 반도체소자 중에서 가장 높은 출력전력을 보여주고 있다. 그렇지만 애벌런치 항복에 의한 전자나 정공의 충돌로 인해서 잡음특성이 좋지 못하다. 일반적으로 IMPATT은 Gunn 다이오드에 비해서 10 dB 정도 AM 잡음이 큰 것으로 알려져 있다. 이러한 이유때문에 IMPATT은 수신단의 로컬 오실레이터로는 적합하지 못하다. 이런 IMPATT의 잡음 특성을 향상시키기 위해서 MIT-ATT이나 TUNNETT과 같은 소자가 제안되었다. 그러면 먼저 IMPATT의 동작원리에 대해서 살펴 보도록 하겠다.

#### 3-1 동작원리

IMPATT의 동작원리는 n+p-i-p+의 구조를 갖는 Read 다이오드를 통해서 쉽게 이해할 수 있다. Read 다이오드는 애벌런치 영역과 드리프트 영역으로 나뉠 수 있다. 애벌런치 영역은 p+n접합으로 이루어지는 얇은 고전계 영역으로 충격이온화가 일어나 전자와 정공을 발생시킨다. 드리프트 영역은 애벌런치 영역에서 발생된 캐리어들이 포화속도로 이동하는 낮은 전계 영역이다. 애벌런치 항복 전압에 가까운  $V_{dc}$ 와 거기에 추가적으로  $V_{rf}$ 가 더져서 소자에 인가되면  $V_{rf}$ 가 양인 동안은 애벌런치 증배에 의해서 캐리어가 지수적으로 증가하게 되고 음인 동안 지수적으로 감소하게 된다. 이런 애벌런치 현상에 의해서 발생된 전류는  $V_{rf}$ 값이 0을 지날 때 최



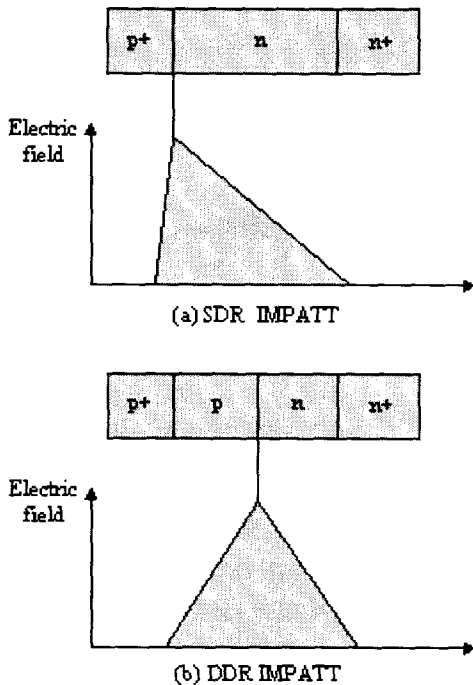
[그림 6] IMPATT의 동작원리

대가 된다. 애벌런치 항복이 일어나는데 걸리는 시간지연( $\tau_a$ )과 캐리어가 드리프트 영역을 이동하면서 발생하는 시간지연( $\tau_d$ )으로 인하여 인가한 전압과 전류 사이에 위상차가 발생하게 되고 전류의 위상지연이  $90^\circ$ 보다 클 경우에 부성저항 특성을 보이게 된다.

### 3-2 IMPATT의 종류

IMPATT은 전자나 정공 중에서 하나만 이동하는 SDR(Single DRift)구조와 전자와 정공 둘 다 이동하는 DDR(Double DRift) 구조가 있다. SDR IMPATT의 경우는  $n+pp+$  또는  $p+nn+$ 의 구조를 가진다.  $n+pp+$ 구조가  $p+nn+$ 구조에 비해서 더 높은 효율을 가지나  $n+$ 기판이 일반적이므로  $p+nn+$ 구조가 많이 쓰인다.

DDR IMPATT은 p형의 SDR IMPATT과 n형 SDR IMPATT을 서로 연결해서 구성된 것으로 이 경우는 전자와 정공의 드리프트 영역이 공통의 애벌런치 영역을 공유하게 되어서 결과적으로 효율을 더 높일 수 있게 된다. 그리고 같은 임피던스를 가지는 DDR구조와 SDR구조를 비교했을 때 DDR 구조는



[그림 7] IMPATT의 여러 가지 구조

SDR구조에 비해서 두 배의 접합면적을 가지게 되므로 SDR구조와 비교해서 4배의 출력전력을 가지게 된다. [그림 7]은 SDR과 DDR의 구조와 소자에 나타나는 전계를 보여주고 있다.

IMPATT의 최적 드리프트 길이는 포화 드리프트 속도와 주파수에 의해서 결정되고, 출력전력과 효율은 그 반도체 물질의 전기적, 열적 특성에 의해 결정된다.

### 3-3 IMPATT의 제한 요소

IMPATT의 주파수를 높이는데 제한을 주는 요소는 다음과 같다.

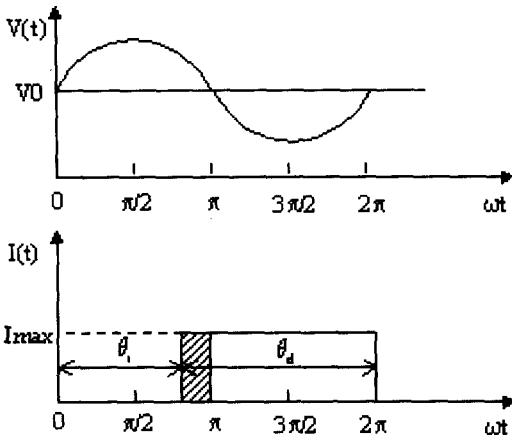
- 애벌런치 영역의 dead zone으로 인해 실제로 애벌런치 항복이 일어나는 영역이 줄어들게 된다.
- 고주파에서는 충격이온화에 의해서 발생된 캐리어가 애벌런치 응답시간으로 인해 감소하게 된다.
- Tunnel 효과에 의해서 발생하는 캐리어가 전계가 증가함에 따라 애벌런치 증배의 증가와 비교할 만 하다.
- 포화 드리프트 속도는 전계가 증가하고 온도가 올라감에 따라 감소한다.
- 이온화속도는 전계가 증가함에 따라 포화되어 애벌런치 항복이 일어나는 것을 감소시킨다..

현재 Si으로 만들어진 IMPATT이 가장 우수한 특성을 보이고 있다. GaAs의 경우는 저주파에서는 Si에 비해서 높은 효율을 보이나 높은 온도에서 전자의 드리프트 속도가 감소하게 되어 그 성능이 제한을 받는다.

### 3-4 다른 전송시간 소자들

#### 3-4-1 MITATT

IMPATT이 아주 고주파 영역에서 쓰이기 위해



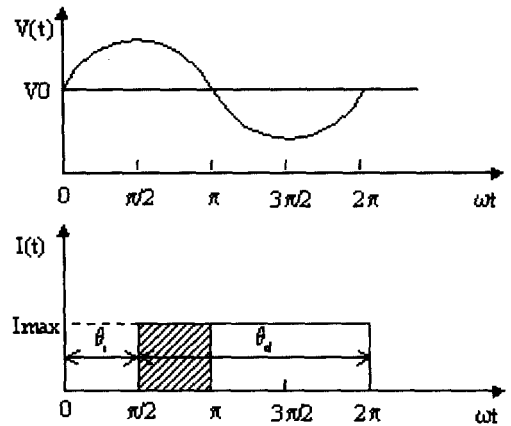
[그림 8] MITATT의 RF전압과 유기된 전류

서는 공간전하영역을 줄여야 하고 결과적으로 액티브영역의 도핑농도를 키워야 한다. 그러나 도핑농도가 증가함에 따라 소자에 걸리는 최대 전계가 증가하게 되어서 tunnel 효과가 보이기 시작한다. Tunnel 효과에 의해서 발생된 캐리어는  $V_{rf}$ 와 동위상 상태가 되어서 전류의 위상지연이  $180^\circ$ 보다 줄어들게 되어 결과적으로 출력전력과 효율을 떨어뜨리게 된다. 이런 IMPATT을 MITATT(Mixed Tunnel and Avalanche Transit Time)이라고 부른다. MITATT은 [그림 8]에서처럼  $\theta_i$ 가  $90^\circ \sim 180^\circ$  사이에 있게 되고 빗금 친 영역의 전류 성분은  $V_{rf}$ 와 동위상 상태가 되어 전력소모를 야기하므로 IMPATT에 비해서 출력전력과 효율, 부성저항 특성이 나빠지게 된다. 그러나 애벌런치 증배가 IMPATT에 비해 작아서 잡음 특성이 더 우수하다. MITATT은 GaAs의 경우 150 GHz, Si/SiGe의 경우는 103 GHz까지 만들어지고 있다.

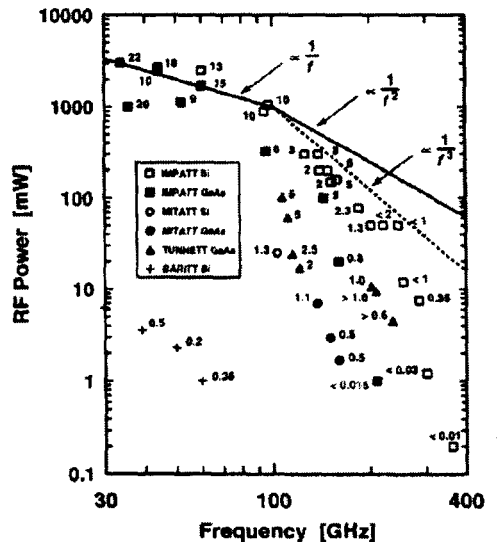
### 3-4-2 TUNNETT

TUNNETT(TUNNEL injection Transit Time)은 MITATT과 비슷하지만 애벌런치 항복보다 tunnel

효과가 소자에 미치는 영향이 훨씬 크다. TUNNETT은 [그림 9]에서 보여지는 것처럼 IMPATT이나 MITATT에 비해 출력전력과 효율이 떨어진다. 그러나 애벌런치 증배가 현격하게 줄어들어서 잡음특성이 더 뛰어나고 tunnel 효과의 응답시간이 아주



[그림 9] TUNNETT의 RF전압과 유기된 전류



[그림 10] IMPATT, MITATT, TUNNETT의 주파수와 RF출력전력과의 관계 그래프

작기 때문에 소자가 아주 고주파영역까지 동작하는 것이 가능하다.

[그림 10]은 지금까지 설명한 IMPATT과 MITATT과 TUNNETT의 주파수에 따른 RF 출력전력의 관계를 보여주고 있다.

### 3-5 응용분야

IMPATT은 Gunn 다이오드에 비해 잡음특성이 좋지 못하지만 DC-to-RF 변환 효율이 좋기 때문에 높은 출력전력을 요구하는 증폭기나 오실레이터에 쓰인다.

## IV. Schottky 다이오드

### 4-1 동작원리

반도체와 금속을 접합시킬 경우 pn 접합과 비슷한 특성을 지니게 되는데 이를 이용한 다이오드를 Schottky 다이오드라고 한다. Schottky 다이오드는 pn접합과는 달리 다수 캐리어에 의해서 동작 특성이 결정되므로 pn 접합에 비해서 순방향 I-V 기울

기가 훨씬 더 급하고, turn-on 전압도 낮고, 더 작은 직렬저항성분을 갖게 된다. 이 때문에 순방향에서 역방향으로 바이어스가 바뀔 때 소수 캐리어의 충전 효과가 적어 고속 동작이 가능해진다.

### 4-2 응용분야

Schottky 다이오드는 수신단에 들어오는 RF 신호를 검출하는 디텍터로 사용되고 RF 신호와 로컬 오실레이터의 신호를 낮은 주파수 대역의 IF 신호로 바꿔주는 믹서에 주로 사용된다.

## V. pin 다이오드

### 5-1 동작원리

pin 다이오드는 pn 다이오드에서 i 영역이 추가된 구조이다. pin 다이오드의 경우 i 영역이 있어서 pn 다이오드 보다 공핍 영역이 더 넓어 커패시턴스가 더 작아지게 되므로 고속 스위칭이 가능하게 된다. 즉 순방향 바이어스가 걸렸을 때는 스위치가 on 상태가 되고 역방향 바이어스가 걸렸을 때는 높은 임

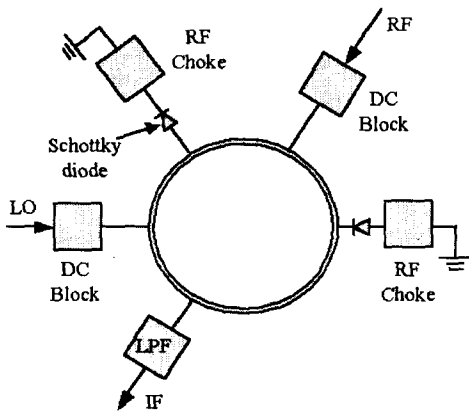
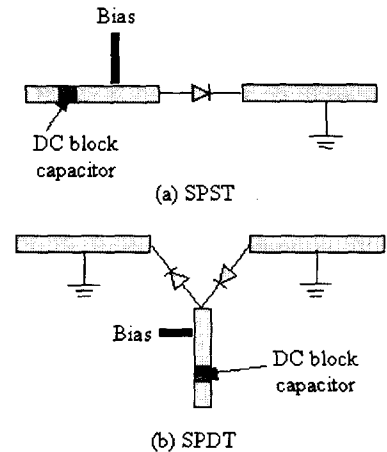
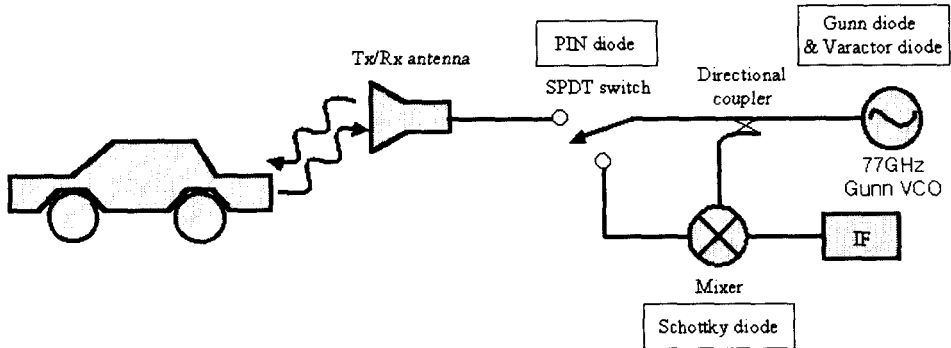


그림 11. Rat-race mixer

[그림 11] Rat-race mixer



[그림 12] PIN 다이오드 스위치



[그림 13] 자동차 충돌방지 시스템에 쓰이는 2단자 소자들

피턴스를 가지게 되어 off 상태가 된다. 또한 pin 다이오드의 저항은 순방향 바이어스 전압에 대해 반비례하므로 바이어스 전압을 조절함으로써 저항값을 조절할 수 있어 가변감쇄기로도 쓰일 수 있다.

### 5-2 응용분야

p-i-n 다이오드는 주로 고속동작을 요구하는 스위치나 가변감쇄기에 쓰일 뿐만 아니라 phase array radar system에서 사용되는 phase shifter로도 이용이 가능하다. 그리고 높은 출력전력을 가지는 송신단으로부터 수신단을 보호하기 위한 리미터 회로도 사용된다.

## VI. 결 론

지금까지 밀리미터파에 쓰이는 2단자 소자에 대하여 살펴 보았다. 밀리미터파에 쓰이는 반도체 소자는 개별 소자로써 고부가 가치를 창출할 수 있고 앞으로 밀리미터파 소자에 대한 수요가 급증할 것으로 예측되므로 우리나라도 이에 대한 연구를 진행해야 하겠다. 또한 밀리미터파에서 쓰이는 2단자 소자의 경우는 다른 반도체 소자와 달리 패키지가 그 소자에 미치는 영향이 아주 크므로 패키지에 대한 연

구도 병행되어야 한다. 끝으로 [그림 13]은 밀리미터파 대역의 2 단자 소자가 실제 시스템에 어떻게 적용이 되는지를 보여주고 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. P. Nougier, *III-V Microelectronics*, North-Holland, 1991.
- [2] K. Chang, *Microwave solid-state circuits and application*, John Wiley & Sons, 1994.
- [3] Dalman, *Microwave devices, circuits & their interaction*, John Wiley & Sons, 1994.
- [4] S. Y. Liao, *Microwave devices and circuits 3rd Ed*, Prentice-Hall, 1990.
- [5] T. S. Laverghette, *Practical microwave*, Prentice-Hall, 1996.
- [6] H. Eisele & G. I. Haddad, "Potential and capabilities of two-terminal devices as millimeter-and submillimeter-wave fundamental sources," *IEEE MTT-S Digest*, 1999.
- [7] H. Eisele, "The potential of InP IMPA TT diodes as high power millimeter-wave sources : first experimental results," *IEEE MTT-S Digest*, 1996.



---

[8] P. A. Rolland, "Comparison between InP and other semiconductor materials for the realization of millimeter wave two terminal devices," *InP and related materials 2<sup>nd</sup>*

*International conference*, 1990.

[9] S. Kitazume, "Advances in millimete-wave subsystems in Japan," *IEEE MTT*, vol. 39, no. 5, May, 1991.

≡필자소개≡

김 정 근

1999년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학  
학과(공학사)

1999~현재: 한국과학기술원 전자전산학  
과 석사과정

[주 관심분야] 자동차 충돌방지 시스템,  
RF MEMS, 양자점 메모리 소자



홍 성 철

1982년: 서울대학교 전자공학과(공학사)

1984년: 서울대학교 전자공학과(공학석사)

1989년: 미시간대학교 전자공학과(공학박  
사)

1989년~현재: 한국과학기술원 전자전산  
학과 교수

[주 관심분야] III-V족 계열 반도체 소자, 광소자 및 양자  
기능소자

