

임팩트 다이오드의 動作 및 特性

李 文 基*

I. 머릿말

고체전자 공학 분야에서 상당히 커다란 변혁이 이루어졌지만 마이크로파 전력발생은 어려운 문제로 남아 있었다. 고체상태의 회로는 크기가 작고 수명이 길며 전력소모가 적다는 점에서 경이적인 발전을 하였지만 진공관 설계자가 격자제어 진공관에서 주파수의 한계점에 도달하였던 것처럼 고체상태 회로 설계자 또한 트랜지스터의 능력 한계에 직면하고 있다.

그러나 진공관 설계자가 전자빔 제어방식이라는 새로운 개념에 의해 마이크로파 전력을 발생시키는데 성공한것과 마찬가지로 고체상태 회로 설계자는 반도체내에서 전하 캐리어의 이동방식에 힘입어 현재 마이크로파 전력을 발생시키고 있다. 13년전 B. T. L에 있는 W. T. Read가 고체상태회로로 마이크로파 전력발생 기술을 한가지 제시하였다. 즉 특별히 설계된 PN 접합장치에서 avalanche breakdown에 의해 생긴 전류와 인가전압사이의 일정시간 지연에 전하캐리어가 다이오드를 진행할 때 발생된 주행지연을 합하면 마이크로파 주파수에서 총지연이 180°에 해당할 수 있다는 것을 발표했다. 따라서 이런 역학구조에 의하면 외부회로에 전력을 전달할 수 있다. 그러나 "Read 다이오드"는 그가 비록 완전하고 기본적인 해석을 하였지만 7년후에야 겨우 실제로 실현되었다. 그 이유는 어떻게 이장치에서 발생된 열을 제거시키느냐 하는 열처리 문제가 해결되지 못했기 때문이다.

마이크로파의 응용은 실용적 임피던스 범위내에서 아주 작은 기구가 요구되며 avalanche breakdown에 필요한 전류밀도로 avalanche

breakdown으로 동작하면 극히 큰 전력밀도(즉 10^8 watt/cm²)를 의미하므로 온도 상승에 따른 사용장치의 파괴를 예방하기 위해서는 효과적으로 이 큰량의 열을 제거시키는 방법이 발견되지 않으면 안되었다.

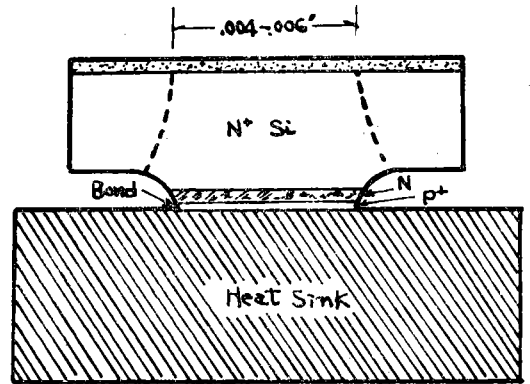


그림 1. 열압축법으로 금속방열판에 정착된 IMPATT 다이오드.

Mesa 형 PN 접합 다이오드를 변환시켜 그림 1과 같이 Mesa의 꼭대기를 열과압력으로 금이도 금된구리 방열판에 직접 정착시킴으로써 열처리가 성공적으로 성취되었다. 이 열압축 정착과정에서 모든 것이 최적상태이어야만 연속적 마이크로파 발전을 가능케 할만큼 충분히 낮은 열저항이 얻어질 수 있다.

열압축 정착은 재래식기술(즉 soldering)보다 시간이 많이 필요하고 극도로 주의하지 않으면 견고하며 완전히 정착시키기 힘들다. 그러나 현재는 비용이 적게 들고 적합한 열순환로를 만들기 위한 더욱 철저한 방법에 대한 연구가 이루어져서 웨이퍼의 접합측면에 방열판을 전기도금시킨 다음 그림 2와 같이 방열판상에 직접 Mesa 다이

* 경희대학교 전자공학과

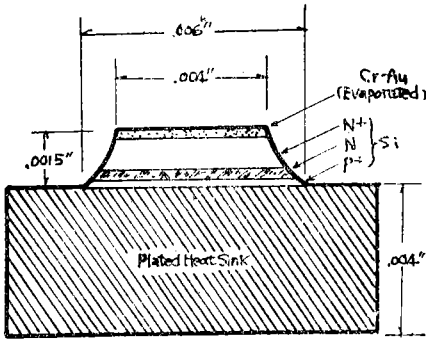


그림 2. 웨이퍼 기판역할을 하는 방열판이 내장된 IMPATT 다이오드.

오드를 부식시키는 수단이 개발되었다. 이와 같이 내장된 방열판은 비교적 넓은 영역으로 다이오드의 열을 확산시키므로 개개의 다이오드는 package 혹은 회로에 재래식기술로도 용접될수있다. 열저항 $14^{\circ}\sim 17^{\circ}\text{C/W}$ 인 X대역 다이오드는 이런 방식으로 얻어진다.

X대역 IMPATT 다이오드의 대표적인 동작특성은 그림 3과 같다. 10GHz에서 6.5%효율로 700mw의 전력을 발생하는 전형적 다이오드의 접합점 온도는 대략 200°C 정도이다. 출력전력이 1 watt 이면 접합점 온도가 $250^{\circ}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 정도가 된다. 이것은 350°C 이전에서는 열과파 현상이 발생되지 않으므로 아직도 충분히 안전여유가 있다. 마이크로파 발전용 avalanche 다이오드는 Read가 제안한 특수 4층 N^+PIP^+ 구조형식과 3층 P^+NN^+ 구조의 단순한 PN 접합형식으로 대별될수 있다. 3층구조의 다이오드는 4층구조형식 보다 제조공정이 훨씬 간단하다. 이 두형식 모두 IMPATT 다이오드라 불리우고 있는데 이것은 IMPact ionization and Avalanche Transit Time의 약자이다. 내장 방열판 제조기술에 의한 중요 잇점은 제조비용이 감소되고 개개 다이오드의 균일성을 대단히 향상시킨다는 점이다. 또한 PN 접합이 Mesa의 좁은 꼭대기 쪽이아닌 넓은 밑부분에 있으므로 Mesa 측면의 경사가 접합주위의 전계를 감소시키므로 모서리에서 breakdown이 일어날 기회

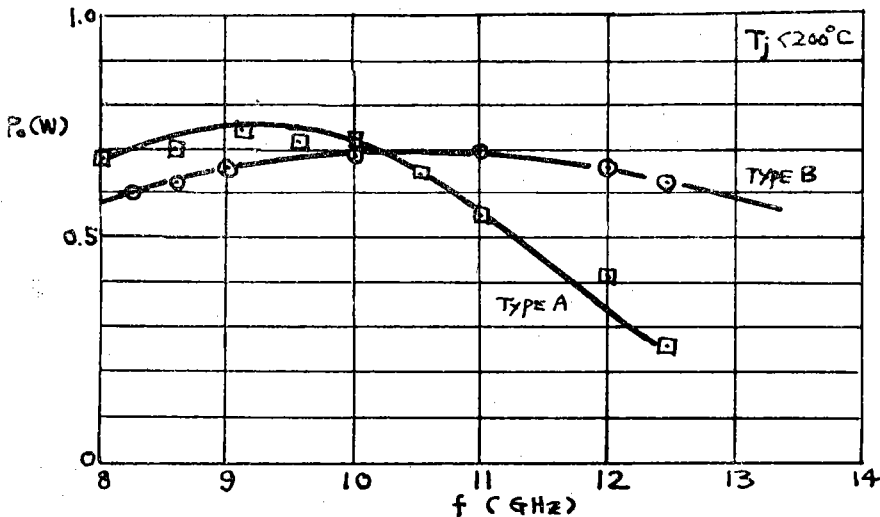


그림 3. X대역 IMPATT 다이오드의 대표적 동작특성

가 적어진다. 더욱 다이오드는 재래식의 유전체 침전기술(Deposition)에 의해 웨이퍼 모양인체

passivate시킬수 있다. 아직까지 IMPATT 다이오드의 가격은 비교적 비싸지만 수요와 공급율이

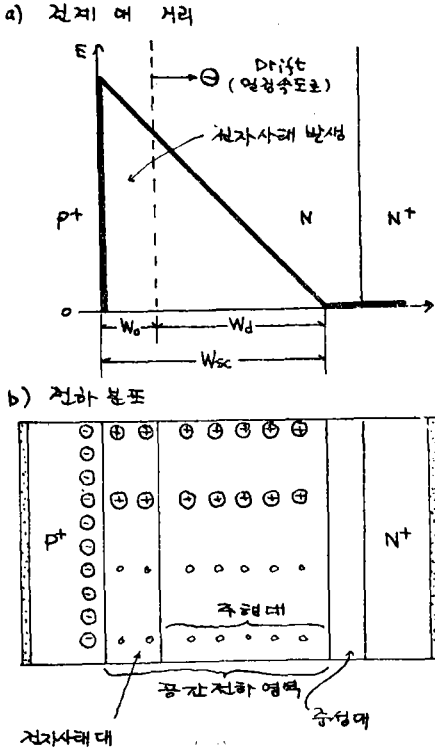


그림 4. avalanche breakdown으로 역바이어스된 P+NN+ 접합 다이오드의 전계와 전하분포.

증가함에 따라 가격이 점차 저렴해질 전망이 보인다.

IMPATT 다이오드는 현재 X 대역 CW 마이크로파의 고체상태 전력원으로 가장 큰 것이고 항공도플러 항해레이더, 마이크로파 통신회선, 항공위상 배열레이더 등에서 벌써 널리 사용되고 있다.

II. 동작이론

정확한 수식적 이론을 재쳐놓고 IMPATT 다이오드 특성을 알기 위하여 여기서 몇가지 가정을 하여 간단히 동작이론을 설명하고자 한다.

기본이론은 Read의 논문에서 잘 설명되어 있고 더욱 최근에 Sze와 deLoach가 실험 결과를 뒷받침으로 이론을 재차 전개했다.

3층 P+NN+다이오드의 구조는 그림 4와 같다. 다이오드는 역 breakdown 전압으로 바이어스되어 있어 전계분포는 삼각형모양을 하고있고 양으

로 대전된 공핍층을 증가시키는 방향이며 PN 접합에서 전계는 최대이다.

따라서 breakdown은 전계가 매우 커서 공핍층으로 들어가는 전자 혹은 홀이 홀전자쌍을 이온화시킬수 있을만큼 충분한 확율을 가질때 발생한다. 만약 평균적으로 공핍 영역의 각각의 캐리어가 폭한개의 새로운 홀전자 쌍을 생성하면 지속적인 avalanche가 존재하고 이것은 마치 기체내에서 전기방전이 일어나는 것과 같은 것이다. 그러므로 다이오드는 어떤 적류전류에 대해서도 본질적으로 일정전압 V_{bd} , 즉 breakdown 전압,로 유지될 수 있다. 이온화의 확율은 전계에 대한 증가함수이다. 이런이유로 breakdown쪽으로 바이어스된 다이오드에서 발생한 전하는 P+N 접합(즉 전계가 최고인 영역내에서) 근처에 국부화할려는 경향이 있다.

실리콘 P+N 계단 접합에서 이영역은 avalanche대(그림에서 W_a)로 알려져 있고 총 공핍층폭의 약 25%에 해당한다. 나머지 공핍층은 주행대라고 불리우고 그림에서 W_d 로 표시되어 있다.

다이오드가 동작할 때는 전하가 avalanche 대전역에 걸쳐 발생한다. 고전계의 영향으로 전하는 일정속도로 공핍 영역의 N+쪽 끝으로 주행한다.

이와 같은 동작역학의 특징은 전하속도가 $2 \times 10^4 \text{v/m}$ 이상의 전계에서는 전계에 무관하다는 것이다. 전형적인 IMPATT 동작상태에서는 전계의 세기는 공핍 영역의 대부분에서 이보다 훨씬 크다. 이런 결과로 인한 전하속도를 포화속도 V_{sat} 라하고 실리콘내 전자에서는 10^7cm/s 정도이다. 다이오드의 동작은 avalanche 과정에서 시간지연(time delay)이 포함되어 있으므로 인가전압에 따라서 전하가 어떤방법으로 증가되는가 고찰해 볼 필요가 있다.

breakdown 전압 V_{bd} 와 동일한 적류전압으로 바이어스돼 있고 정현파의 마이크로파 전압이 중첩되어 있는 다이오드의 얇은 공핍 영역에서 전하 증가에 대한 해석으로 부터 Read는 그림 5에서와 같이 다이오드 총전압이 breakdown보다 강하될 때 첨예한 펄스가 발생함을 근사적이론으로 규명했다. 즉 전하펄스가 avalanche 영역에서 발

생하고 이 전하가 주행대를 이동하면 외부회로에 구형파전류를 발생한다. 외부전류 파형의 시간폭은 전하가 주행대를 통과하는데 요하는 시간 τ 에 의해 결정되고 이것은 Wd/V_{sat} 와 같다. 만약 τ

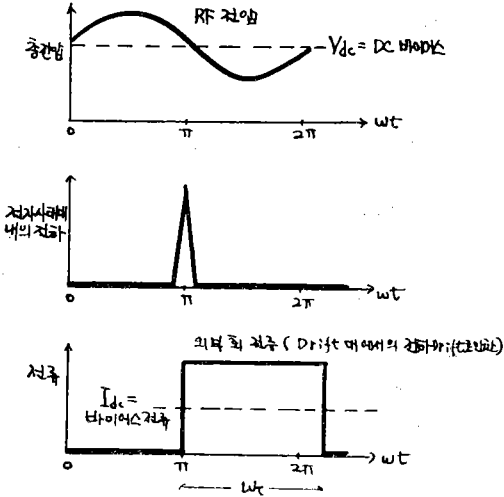


그림 5. 구형파 전류 발생 과정

가 교류주기의 $\frac{1}{2}$ 과 같으면 전류 파형의 푸리에 성분의 기본치는 다이오드 전압과 180° 위상차를 가질 것이다. 이 다이오드는 따라서 외부회로에 교류전력을 전달하고 다른 관점에서 보면 이 다이오드는 이 주파수에서 부저항을 가지고 있다고 볼 수 있다.

III. 제조 과정

IMPATT 다이오드의 대표적인 제조과정은 다음과 같으며 이것을 단계적으로 나타내면 그림 6과 같다.

저저항(대략 $0.01\Omega\text{cm}$)의 고도로 불순물이 첨가된 실리콘 웨이퍼를 만들고 이위에 우선 N층($\rho=0.5\sim 1.0\Omega\text{cm}$)를 형성한후 p^+ 층($\rho=0.003\Omega\text{cm}$)를 Epitaxial로 형성시킨다. 이중 Epitaxial은 계단 접합을 만들고 층의폭을 극히 정확히 조절할 수 있다.

이와 같이 제조된 웨이퍼를 피막기술에 의해 접합면(PN^+)에서 금속화 시킨후 구리 혹은 금을 금속피막에 $0.003''$ 내지 $0.004''$ 두께로 전기도금시킨다. 다른쪽 면(N^+)을 기계적 방법으로

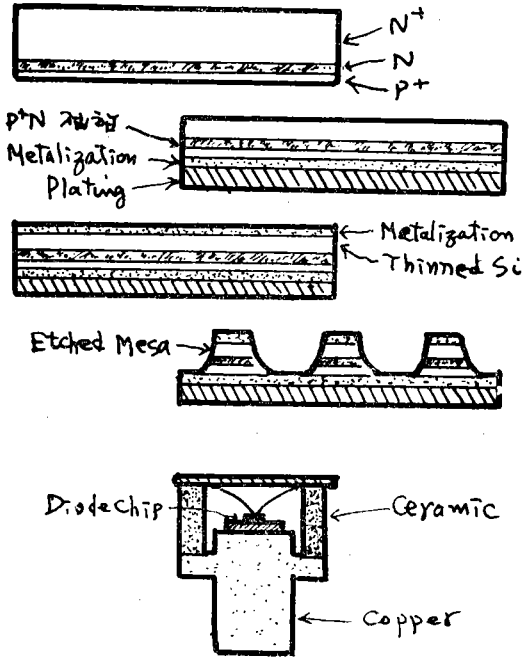


그림 6. IMPATT 다이오드 제조 과정

얇게 연마하고 웨이퍼를 화학적 방법으로 $0.001''$ 내지 $0.002''$ 두께로 감소시킨후 금속화 한다. 그런다음 사진부식법을 이용하여 금속을 원형 pad로 부식시키고 실리콘 mesa를 또한 부식시킨다. 웨이퍼를 절단하면 비교적 넓은 금속기판위에 각각의 mesa가 남아 있으므로 이것을 package의 구리 stud에 solder시킨다. 그후 금핀 혹은 도선을 열압축법으로 mesa 위에 접착시키고 package 위쪽 모서리에 다른쪽핀을 접착시킨다. 마지막으로 package의 내부를 불활성기체로 채우고 kovar 혹은 금속 cap을 윗쪽에 용접시켜 밀봉한다.

IV. 다이오드 설계

웨이퍼는 앞서 설명한바와 같이 주행대를 통과하는 주행시간을 대략 원하는 발진주파수 주기의 $\frac{1}{2}$ 정도로 되도록 설계해야 한다. 설계도는 고유저항을 주의해서 조절함으로써 N형층에서의 breakdown 전압을 조절하여 행할 수 있다. 그러나 N형영역은 breakdown시 공핍층을 유지하는데 필요한 두께이상으로 두껍게 해서 안된다.

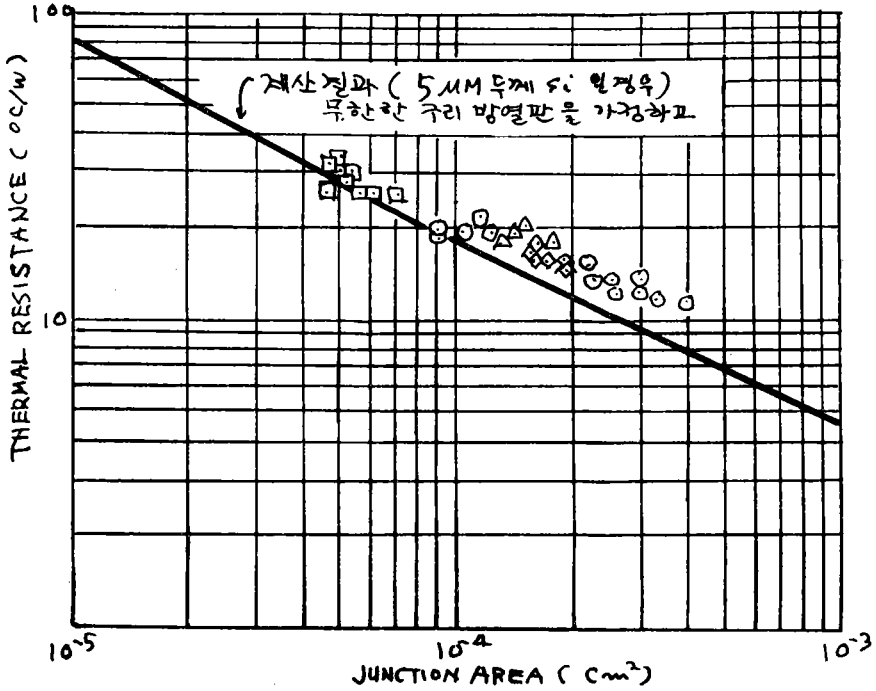


그림 7. 접합면에 대한 열저항

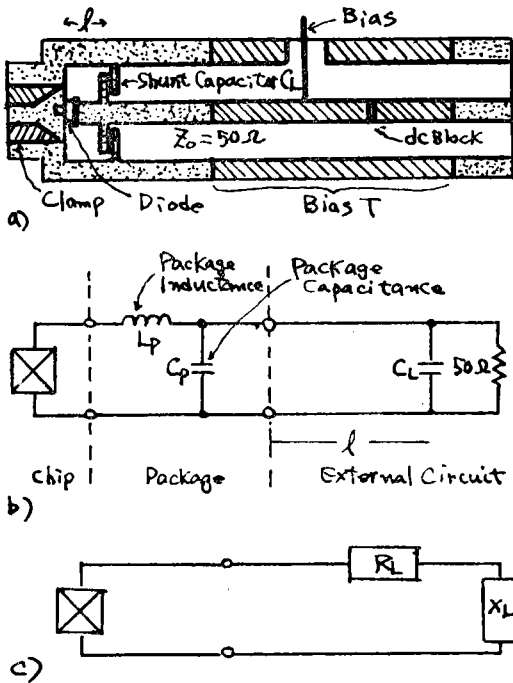


그림 8. X대역 동축 발진회로

왜냐하면 공핍안된 물질이 직열저항에 관계되기

때문이다. Epitaxial 웨이퍼의 요구조건을 다충족 시킨후 조절해야할 나머지 파라미터는 접합면적 인데 이접합면이 다이오드 동작 혹은 공핍용량 Cd를 결정하기 때문이다. 공핍용량은 접합면적 A와 공핍층 두께 Wsc 사이에 아래와 같은 관계가 있다.

$$C_d = \frac{A}{W_{sc}} \quad \text{pF}$$

여기서 A의 단위는 cm²이고 Wsc는 cm이다. 만약 Wsc가 $4 \times 10^{-4} \text{cm}$ ($4.0 \mu\text{m}$)이고 A가 $2 \times 10^{-4} \text{cm}^2$ 이면 Cd는 0.5pF 정도이다. 원리상으로는 최대 출력이 접합면 A를 크게하면 증가하지만 다이오드의 리액탄스가 감소된다.

편의상 회로설계시 동작 주파수에서 리액탄스가 20~30ohm 되게 하는 용량이 요구되고 있다. 접합면적에 대한 다이오드의 열저항을 측정된 결과가 그림 7과 같다. 이상적인 경우는 직선이며 이것은 열저항이 반무한 구리방열판으로 나타나는 완전한 열분산 저항과 실리콘 자체의 열저항에 의한 것의 합으로 구성돼 있다고 가정하여 계산한 결과이다. 접합면적이 적은 다이오드일수록 이상적인 경우에 접근하고 있음을 알수 있다. GaAs

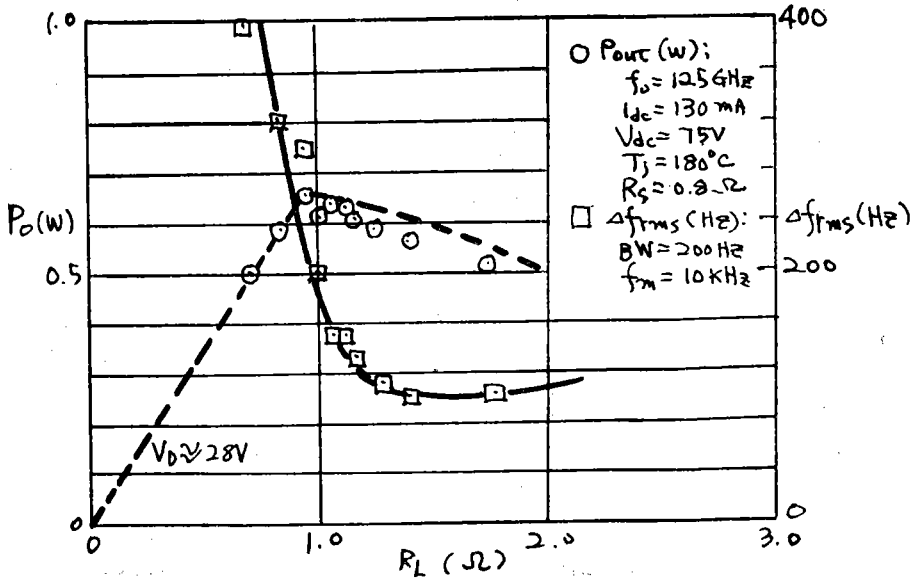


그림 9. 부하저항대 출력과 잡음

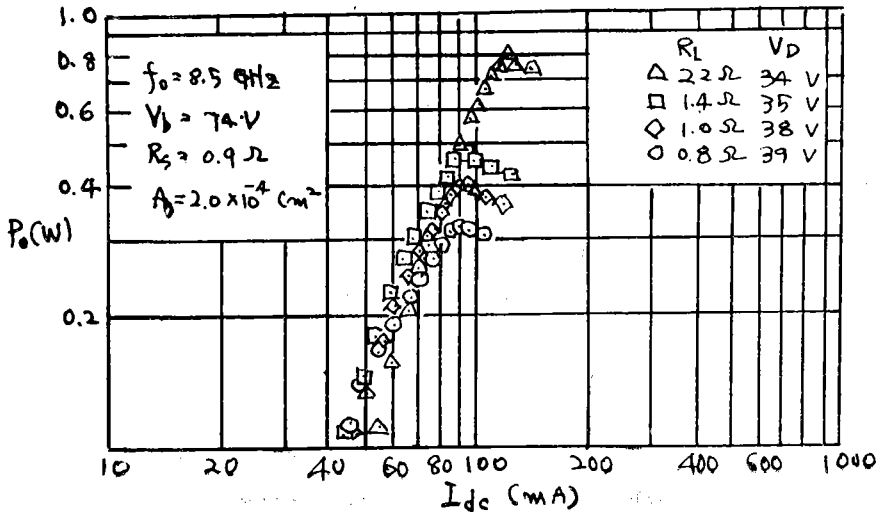


그림 10. 바이어스 전류에 대한 출력

를 IMPATT 다이오드에 사용하면 효율(Si에 있어서 이론적 최대효율 23%)을 증가시키고 잡음이 감소되는 등 잠재적 우월성을 가지고 있다.

그러나 이런 잇점은 비용이 많이 들고 Si에 비해 제조기술이 아직도 초보적이라는 점에서 감쇄된다. GaAs IMPATT 다이오드는 많은 비용을 감당할 수 있는 고급성능이 필요한 곳에 사용할 만하지만 Si IMPATT는 저렴한 가격으로 대단

위 생산에 적합하다.

V. 발진 회로

발진회로의 대표적인 예는 그림 8과 같다. 그림을 보면 발진회로는 단순히 7mm 동축선에 다이오드가 훌륭한 방열판 역할을 할수있는 Clamp의 끝쪽에 설치돼있다. 다이오드 package의 인덕탄스와 단락판과 반지름방향 용량 C_L 사이의 선로

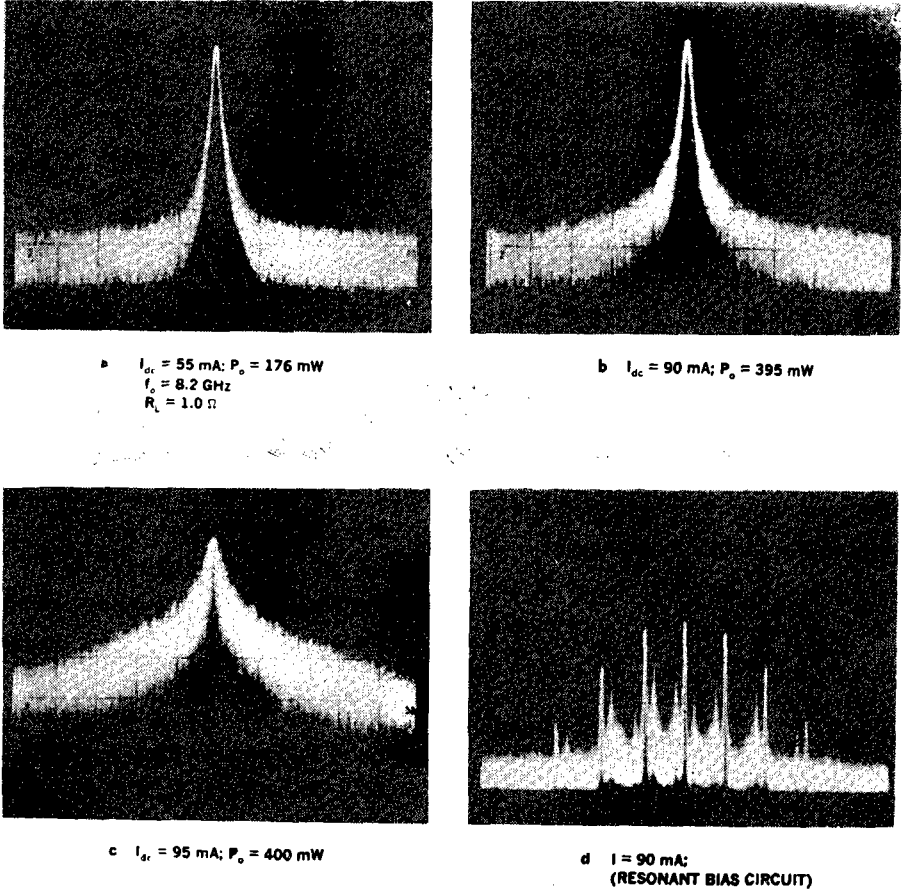


그림 11. 1Ω 부하에서 8.2GHz로 동작한 IMPATT 다이오드의 스펙트라. (수직눈금은 10dB/cm 이고 수평눈금은 a. b. c에서는 1MHz/cm 이며 d는 30MHz/cm 이다)

(1)에 의해 유도성부하 효과가 이루어져 있다. 이회로는 50Ω 선로임피던스를 다이오드쪽에서 바라본 1내지 3ohm 임피던스로 치환시킨다. 이회로를 동조시키려면 용량 C_L 의 두부분사이에 적당한 크기의 유전체 쇄기를 삽입하여 행한다. X대역다이오드를 Load 시키기 위해서는 C_L 값이 1내지 3pF 정도이면 된다. 그림 8b의 등가회로는 그림 8c와 같이 적열부하회로로 등가적으로 변환된다. 이발전기의 출력전력과 잡음을 R_L 의 함수로 나타내면 그림 9와 같다. R_L 이 비교적 높은 값인 예를들면 3ohm 정도에서 부터 감소되면 전력은 증가하여 포화현상 즉 “자기제한 효과”가 나타난다. 포화상태는 인가교류 파형인 $V_D \sin \omega t$ 의 첨두치가 다이오드 breakdown 전압 V_D 의 $\frac{1}{2}$ 정도에 달하면 발생한다. 그후 전력은 R_L 을 더

욱 감소시키면 R_L 에 직선함수로 감소한다. 이 직선종속관계는 다이오드양단의 인정교류전압에 일치하고 있다. 그림10은 RF 전력을 R_L 을 매개변수로 하여 바이어스 전류의 함수로 나타낸 것이다. 포화상태에서 출력레벨은 R_L 이 특정범위까지 증가함에 따라 더욱커진다. 포화시 다이오드 전압은 각경우에 대략 $\frac{1}{2}V_{br}$ 와 같음을 그림 10에서 알수있다. 이것은 열효과가 아니라고 강조할 수 있겠고 순전히 전기적 현상 때문이다.

VI. 잡음과 변조

전압포화가 발생하기 시작하든지 발생하면 RF 스펙트럼이 잡음화하고 바이어스 전류가 발전하는 상태가 된다.

이런 현상이 그림 11에 설명된 주파수 스펙트

라에 나타나 있다.

그림에서는 R_L 이 낮은 값으로 선택돼있으므로 비교적 저전력인 0.4watt에서 발생했다. 사진을 보면 포화레벨 이상으로 전류가 증가하면 스펙트럼이 급격히 떨어진다. 그림 11d는 공진 회로가 바이어스단자에서 접지되어 있는 경우이다. 발전기가 포화전력레벨 이상에서 동작하면 바이어스 전류가 발전하며 주파수 스펙트럼에서 측파대로 나타난바와 같은 RF에서 AM 또는 FM 변조가 나타난다. 이와 같은 전력포화에 수반되는 잡음화 경향이 IMPATT 다이오드 동작특징인것 처럼 보인다. 그러므로 정상적으로 IMPATT 다이오드를 동작시키기 위해서는 포화레벨 즉 최대전력을 얻는 R_L 값보다 훨씬 낮은 R_L 값에서 동작시켜야 한다. 다이오드 바이어스전류를 직접 변조시키면 진폭변조를 얻을 수 있고 동시에 약간의 주파수 변조도 아울러 발생한다. 주파수변조는 YIG 혹은 varactor 회로로써 얻을수도 있다.

VII. 결 론

IMPATT 다이오드가 X대역 CW 마이크로파 전력원으로 실용화될수 있음을 알았다. IMPATT 다이오드 회로설계의 기본은 또한 간단히 대신호 등가회로 방법으로 이해할 수 있다.

새로운 제조기술로 적당한 가격의 신뢰할수 있

는 다이오드가 생산되고 있으므로 마이크로파 장치에서 대량으로 앞으로 사용될 전망이 보인다.

금후의 개발방향은 C대역에서 부터 Ku대역에 이르는 전주파수 범위에서 동작할 수 있는 다이오드를 생산하는 것일 것이다.

참 고 문 헌

1. W. T. Read; "A proposed High Frequency Negative Resistance Diode" Bell System Technical Journal, Vol 37, No. 2, 1958.
2. R. L. Johnston, et. al; "A Silicon Diode M/W Oscillator." Bell System Technical Journal, Vol. 44, No 2, 1965.
3. R. A Zettler; "Batch Fabrication of Integral Heat Sink IMPATT Diode", Electronic Lett, Vol 5, No. 26, Dec. 27. 1969.
4. Hoefflinger; "Recent Developments on Avalanche Diode Oscillator," Microwave Journal, Vol. 12, No. 3, March. 1969.
5. S. M. Sze; "Physics of Semiconductor Devices", Wiley Interscience, New York 1969.
6. B. C. deLoach; in "M/W Semiconductor Devices and Their Circuit Application." H. A. Watson, Ed., McGraw Hill, New York, 1969.
7. R. H. Haitz, et. al.; "A Method for Heat Flow Resistance Measurement in Avalanche Diode." IEEE Trans. Vol. ED-16, No. 5, May, 1969.