

초청논문

고출력 전자파 발진기(High Power Transmitters)

박 건 식

서울대학교 물리교육과

I. 요약

CW나 pulse의 형태로 RF를 발진하는 고출력 전자파 발진기는 레이더 체계의 기본요소이다. 레이더 체계의 성공적인 운영을 위한 요건 중에 적합한 전자파 발진기의 선택과 개발을 무시할 수 없다. 이 차세대대전을 전후로 활발히 개발되었던 전자파 발진기들 중에는 널리 알려진 magnetron과 klystron이 있고 TWT(traveling wave tube)도 그 후 널리 사용되는 발진기이다. 지난 반세기를 지나오며 성능 및 신뢰도 등에서 괄목할만한 발전을 이루었으며 밀리미터파대역의 고출력 발진을 위해 gyrotron 등이 지난 30년간 개발되었다. 현재는 성능, 크기(무게) 및 가격의 문제뿐 아니라 고정밀 영상을 위한 고주파 발진기의 개발이 추진되고 있다. 여기서는 현재 레이더에 쓰이고 있는 magnetron, klystron, TWT 및 gyrotron에 대한 간략한 배경, 원리 및 특성 등을 비교 설명하였다.

II. 서론

1893년 Edison이 진공관에서 전류가 필라멘트와 양전극사이에서 흐르는 것을 관측한 이래로 100년이 지난 현재 진공관을 이용한 다양한 형태의 고출력 전자파 발진기들이 개발되어 각종 현장에서 사용되고 있다. Edison이 관찰한 전하매개체는 1897년 Thomson에 의해 음전하를 가진 전자라는 것이

알려지게 되었다. 이후 1904년 Fleming에 의해 Edison의 diode는 rectifier나 라디오파 측정기로 쓰일 수 있음을 알게되었다. 그러나 장거리의 무선 통신을 가능케한 결정적인 발견은 1906년 Deforest가 필라멘트(음극)에서 양극으로 흐르는 전자를 그 사이에 grid를 넣어서 조절할 수 있다는 것이었다. 이 진공 triode에서 음극과 grid사이에서 주어진 시간에 따라 변하는 라디오파는 증폭되었다. 이후로 효율적인 장거리통신을 위해 좀 더 넓은 주파수 범위와 고주파를 위해 gridded amplifier의 운행 주파수를 높이기 위한 연구가 진행되었다. 그러나 고주파(\sim GHz) 영역에서 gridded amplifier의 성능은 전자의 transit time효과 때문에 급격히 떨어지게 되었다. 이미 알고 있었던 전자속도의 modulation 개념은 1935년 Heil에 의해 spatial bunching의 개념으로 발전되게 되었으며 1937년 Varian 형제는 공진관을 이용해 전자파를 발진시키는 klystron을 발명하였다.

Klystron 외에 이 시기에 발명된 고출력 전자파 발진기들 중에는 잘 알려진 magnetron과 TWT가 있다. 이 두 발진기들은 각각 전시와 전쟁이 끝나갈 무렵 영국에서 발명되었다. 이 대표적인 전자파 발진기들은 전후에도 계속 연구되어 무기체계뿐 아니라 산업용 및 가전용에 이르기까지 매우 광범위하게 사용되고 있다. 전자파를 이용한 가열, 건조용으로는 CW형태의 고출력 전자파 발진기들이 사용되고 있으며 전자레인지 마그네트론의 주파수인 2.45

GHz에서 운행되고 있다. 무선으로 가열하는 획기적인 열전달방식뿐 아니라 무선으로 정보를 전달하기 위한 응용으로 다양한 고출력 전자파 발진기들이 쓰이고 있다. 전자전 및 중·장거리통신 등에서는 각종 다른 주파수, 대역범위 및 출력을 필요로 하고 있다.

현재에는 1 GHz에서 100 GHz이상까지 CW로 1 MW까지 전자파를 발진할 수 있는 발진기가 개발되었다. Solid state 전자파 발진기들도 많이 개발되어 X-band이상에서 10 W이상 정도의 출력대에서는 진공관식 고출력 전자파 발진기들과 경합을 벌이고 있다. 점점 복잡해져가는 시스템과 성공적인 통합을 이루고 경제성에도 적합한 전자파 발진기를 연구 개발하는 것은 최근의 문제만은 아니다. 성능, 크기(무게) 및 가격 등을 개선하기 위한 노력이 특히 X(Ku)-band대역에서 10 watt 출력의 발진기들 가운데 이루어지고 있다. 저출력과 10 Hz 주변의 주파수대역에서는 SSPA(solid state power amplifier)와 비교되고 있다. 또한 hybrid 모듈형태로 최근 많이되고 있는 소형의 MPM(microwave power module)은 매우 관심을 끌고 있다. 저소음의 SSPA를 입력부분으로 사용하고 있으며 입력된 RF는 진공관 고출력 발진기를 통과하며 효율적으로 증폭되어 각종 현장에서 쓰일 전망이다. 현재에는 미국과 일본에서 시험단계중에 있다. C-, X-, Ku-, Ka- 및 W-band에까지 개발되고 있다.

크기와는 상관없이 매우 높은 출력을 요하는 지상배치용 전자파 발진기들도 꾸준히 개발되고 있다. Klystron은 50 mW이상을 pulse형태로 S-band대에서 출력할 수 있으며 magnetron 역시 MW 이상의 출력을 방출할 수 있는 고출력용 발진기를 개발하고 있다. 그러나 klystron과 magnetron은 발진회로의 크기와 주파수가 직접적인 상관관계에 있으므로 주파수가 10 GHz이상으로 올라가면 고출력의 한계에 이른다. 발진회로의 열처리와 전기적 breakdown 등이 문제된다. 주파수가 작을수록 고

출력의 전자파를 방출할 수 있고 밀리미터파대역을 넘는 주파수에 이르면 레이저가 존재한다. 그러나 1960년대 까지만해도 밀리미터파대역에서 고출력을 방출할 수 있는 전자파 발진기가 부재하였다. 그러나 고주파에 대한 수요가 증가하면서 밀리미터파의 고출력 발진기가 필요하게 되었다. 1960년 말에 발진기회로의 크기에 무관한 회전하는 전자빔을 이용하는 gyrotron이 개발되게 되었다. 최근에는 고정밀 레이더에 응용될 목적으로 고출력 밀리미터파를 방출할 수 있는 peniotron과 gyroklystron이라는 진공관 고출력 발진기가 개발되고 있다. Ka-와 W-band에서 수백 kw의 출력(>10 % duty cycle)을 요하고 있다.

진공관을 이용하는 고출력 전자파 발진기들은 크게 두가지로 분류된다. 먼저 선형의 전자빔을 이용하는 klystron과 TWT 등의 linear beam device가 있고 전자장과 자기장이 교차하는 상황에서 전자빔을 방출하는 magnetron과 crossed-field amplifier(CFA) 같은 cross-field device가 있다. gyrotron은 cross-field device에 속한다. linear beam device는 고출력 전자파 발진기들 중에서 일반적으로 매우 높은 CW 및 pulse 형태의 출력을 내는 발진기이다. 대부분 레이더의 마지막 출력 발진기로 쓰이고 CW illuminators나 ECM(electronic countermeasure)의 고출력 발진기로 쓰인다. 많은 경우 지상에 배치되는 시스템에 많이 쓰이고 선박용으로도 쓰인다. 마그네트론이나 crossedfield amplifier는 무기체계뿐 아니라 전자레인지 등으로 산업용과 가전용으로도 널리 쓰인다. 또한 태양에너지를 우주에서 지구로 전송하는 시스템에 사용될 수 있는지도 고려되고 있다. 레이더나 ECM에서 매우 높은 출력, 높은 이득 및 출력의 선형정도를 중요시할 때는 주로 linear beam device를 선택하게 된다. 반면에 고출력과 저전압, 저전압과 작은크기, 또는 고출력, 저전압, 고효율, 작은 크기와 무게, 낮은 가격 등이 고려될 경우는 일단 crossfield device쪽을 고려하게 된다. 이외에도 주파수의 안정

성, AM 및 PM modulation의 정도, phase linearity 등의 특성들이 고려된다. 위의 전자파 발진기들 중에 linear beam device들의 특성을 비교하면 아래와 같다.

종 류	Bandwidth(%)	효율 (%)	이득 (dB)
gridded tube	1~10	20~50	6~15
klystron	1~5	30~70	40~60
Helix TWT	30~120	20~40	30~50
Coupled Cavity TWT	5~40	20~40	30~50

Magnetron oscillator는 klystron의 특성과는 이득이 없는 것 외에는 비슷하다. Gyrotron은 발진기 형태에 따라 gyroklystron, gyro-TWT, gyromonotron 등으로 구분되며 특성도 이에 따라 매우 다르다.

아래의 글에서는 klystron, TWT, magnetron/CFA, gyrotron의 간략한 배경, 원리 및 특성을 설명하였다.

III. Klystron

3-1 배 경

Klystron은 1937년 여름에 발명되었고, 1939년 2월 미국의 "The Journal of Applied Physics(응용 물리학회지)"라는 정기학술지에 발표되었다. 그러나 이러한 연구 결과가 당시 타의 추종을 불허할만큼 강력한 군사력을 보유하고 있었던 독일에서는 간과되었던 것이 확실하다. 그러나 당시 레이더 개발 등으로 열을 올리고 있던 영국에서는 이를 이용해 가벼운 항공레이더에 쓸 수 있음을 알고 1940년 klystron을 야간용 전투기의 레이더 수신기로 사용함으로써 영국전투(Battle of Britain)에서 승리할 수 있었다.

이차대전 중에 개발된 klystron은 실로 엄청난

전쟁무기 개발의 성과라 할 수 있다. 그러나 전후에도 소위 "마이크로웨이브"라고 불리면서 산업에 다양하게 쓰이기 시작하였다. 항공 운항에 필수적이 되었고 인공위성을 통해 세계적인 통신의 시대를 여는 견인차의 역할을 하게 되었다.

Klystron은 Varian이란 형제와 스탠포드대학의 한센교수에 의해 개발되었다. 형은 물리학 전공을 하고 취직해 있었고 고졸 출신의 동생은 비행기 조종사였다. 기상 상태에 큰 영향을 받는 당시 비행기 운항에 항상 불편을 느끼고 있었던 동생과 고주파 전자파 발진기가 그러한 문제를 해결할 수 있으리라 확신했던 형은 스탠포드대학으로 돌아와 한센교수의 자문으로 결국 klystron을 발명하게 되었다.

3-2 원 리

Klystron은 다른 고출력 전자파 발진기들과 마찬가지로 크게 네가지 요소로 이루어져 있다. 먼저 전자빔을 발생하는 전자총이 있으며 RF발진회로, beam collector 및 focusing magnet로 구성되어 있다. Amplifier의 경우는 발진회로의 첫 공진관으로 입력된 RF가 RF 공진회로를 지나면서 전자빔의 운동에너지로부터 에너지를 받아 마지막 공진관에서 증폭되어 나오게 된다. 전자빔은 전원공급장치의 전압에 의해 일정한 운동에너지를 가지고 여러개의 공진관으로 구성된 RF 발진회로로 진입하게 되는데 이때 공진관에 입력된 전자파의 전기장과 반응을 하게되어 입력된 RF의 주파수대로 전자빔은 modulate되게 되며 전자빔은 경험된 전기장의 방향에 따라 가속 또는 감속되어 결국 어느정도 진행하다가 응집(bunching)을 하게 된다. DC의 형태로 진행하던 전자빔은 상호작용한 RF에 의해 AC성분을 가지게되며 마지막 공진관에 이룰때 가장 잘 응집된 상태가 된다. RF의 주파수에 해당하는 AC성분의 전자빔은 이미 입력 RF주파수로 설계된 마지막 공진관을 excite하며 RF를 발진하게 하며 자신의 에너지를 잃게 된다. 전자총은 Pierce 형태의 것으로

로 이미 매우 잘 개발이 되어있어 균일한 초기 속도와 에너지를 갖는 전자빔을 발생시킨다. 이후 전자빔은 솔레노이드나 PPM(periodic permanent magnet)에 의해 focus되어 발진회로로 진입하게 된다. 쓰고 남은 전자빔의 에너지를 회복할 수 있는 depressed collector가 발진기의 전체 효율을 높이기 위해 연구되고 있다.

Klystron은 공진관 형태의 발진회로이므로 매우 좁은 주파수대역에서 운행될 수 있다. 그러나 주파수대역을 5% 정도까지 올리기 위해 공진관을 바로 연결해 놓은 형태를 취하는 EIK(extended interaction klystron)나 공진관회로와 TWT와 같이 도파관을 섞어 발진회로를 구성한 twystron이 있다. 이외에도 4개 이상의 공진관을 stagger tune해서 주파수대역을 넓히고 있다. 현재에는 전압을 낮추기 위한 방법으로 multi-beam klystron 등이 연구개발되고 있다.

3-3 특 성

고출력 klystron은 높은 이득, 높은 출력과 좋은 효율로 특징지어진다. 그러나 상대적으로 좁은 주파수대역과 높은 전압에서 운행된다. 고출력의 klystron 중에 몇가지를 아래와 같이 소개한다.

주파수	출력	주파수대역
2.856 GHz	30 MW	2.856 GHz
2.015 GHz	1.3 MW	8.8~9.2 GHz

전자빔에너지	이득	효율
pulse 290 kV, 295 A	50 dB	35 %
pulse 85 kV, 50 A	50 dB	30 %

이외의 주요한 특성으로는 소음에 대한 민감성을 말할 수 있다. 주로 음극에서 발생할 때 전자빔은 소음을 갖게되고 소음은 발진기의 이득에 따라 증폭되게된다. 이외에도 전원공급장치의 전압

ripple에 의해 AM 및 PM modulation이 생긴다. Klystron의 경우 출력의 전자빔 전압에 대한 민감도는 $5 P / 2 V_0$ 로 AM modulation의 정도를 보여 주며 위상의 전압에 대한 민감도는 $\theta_0 / 2 V_0$ 로 PM modulation의 정도를 보여준다. 전자빔의 전압이 높을수록 민감도가 낮아짐을 볼 수 있다.

IV. Traveling Wave Tube(TWT)

4-1 배 경

1941년 영국의 Kompfner는 버밍햄대학의 Oliphant교수 밑에서 전자파 발진기에 대한 연구원의 일을 시작하였다. 전직 건축설계사에서 새로운 일을 맡게 된 그는 magnetron을 발명한 Randall 등과 같은 곳에서 일하게 되었다. 당시는 전시였고 정부로부터 많은 과학자들은 무기개발의 협조 부탁을 받고 있었다. Kompfner역시 이러한 상황에서 레이더 등에 사용될 전자파 발진기를 연구하게 되었다. 그는 특별히 klystron 발진기가 갖는 약점인 gap에서의 전자와 전자파와의 상호작용이 약하고 강하게 하기 위하여 gap을 좁게 만드는 것은 실지 제작에 문제가 있으므로 이를 해결해 보고자 연구하였다. 그는 현재에도 널리 쓰이고 있는 Helix형태의 회로를 만들어 전자파 진행에 대해 연구하였고 곧 이러한 Helix형태의 회로는 전자파의 속도를 줄이는 효과를 만들고 이때 전자빔의 속도와 비슷해질 때 효과적으로 전자빔으로부터 에너지를 전자파로 전환할 수 있게 된다는 것을 알게 되었다.

3년후 그는 1,700 volt에서 밀리 암페어 되는 전류의 상황에서 이득이 10 dB 되는 출력을 성공적으로 얻게 되었다. 이후의 의문은 과연 얼마나 넓은 주파수대를 갖느냐였다. 처음 실험에서 얻은 주파수대역(bandwidth)은 60 MHz를 넘었다. 그 당시 레이더 수신기에 쓰이는 전자파 발진기의 주파수대역은 수 MHz정도였으므로 레이더 수신기로서의 주파수대역으로는 충분한 이상이었다. 그러나 그때

까지만도 이러한 광대역 전자파 발진기가 각종 통신 등에 얼마나 중요한 역할을 할지는 상상하지 못했다. 이렇게 하여 영국에서 magnetron에 이어 TWT도 처음으로 발명이 되었는데 실지로 TWT의 작동원리 등 이론적이며 자세한 연구는 미국의 당시 벨연구소의 Pierce에 의해 정립되었다.

4-2 원 리

TWT의 작동원리는 klystron과 흡사하다. 기본 구조도 전자총, RF 발진회로, beam collector 및 magnet 시스템으로 구성되어 있다. 전자빔은 klystron과 같이 선형 전자빔을 사용하고 있으나 RF 발진회로는 klystron의 공진관과 전혀 다른 나선형구조나 공진관이 서로 구멍으로 바로 붙어 연결된 형태를 취하는 소위 “slow wave 구조”의 형태를 취한다. TWT에서도 전자총에서 발생된 전자빔은 RF 발진회로로 진입하게되며 여기서 전자빔은 RF와의 상호작용에 의하여 가지고 있던 운동에너지를 발진회로에서 RF를 excite하는데 다 소모하며 에너지를 RF에너지로 전환한다. 이때 RF발진회로를 excite하기 위해서는 전자빔은 klystron과 같이 velocity modulation의 과정을 거쳐 beam bunching의 density modulation을 이루게되며 입력된 RF의 주파수대로 AC 성분을 가지게 되어 RF 발진회로의 해당 주파수의 전기장을 excite하며 전자파를 발진하게된다. 그러나 TWT에서는 나선형과 같은 형태의 발진회로를 통해 RF의 위상속도를 전자빔의 속도와 같게 맞춰 줌으로 전자빔이 진행하며 연속적으로 같은 RF와 상호작용을 할 수 있게한다. 초기에 양의 위상을 만난 전자빔은 계속적으로 양의 위상을 음의 위상을 만난 전자빔은 계속 음의 위상을 경험함으로 속도의 변조로 말미암아 bunching을 이루며 density modulation이 일어나게 된다.

Klystron은 공진관을 이용함으로 공진관내의 전기장이 진행파를 이용하는 TWT의 전기장보다 높

아서 짧은 거리에서도 높은 이득을 얻을 수 있었다. TWT는 상호작용 해야하는 거리가 klystron보다 길고 계속적인 상호작용이므로 전자빔의 질이 klystron의 경우보다 많이 나빠져서 효율이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 그러나 TWT는 무엇보다도 어떤 발진기에서도 얻을 수 없는 넓은 주파수 대역에서 운행할 수 있으므로 이러한 단점이 있음에도 널리 쓰이고 있다.

4-3 특 성

위에서 언급한 바와 같이 TWT의 강점은 넓은 주파수대역(bandwidth)이다. 100 %이상의 주파수대역(intantaneous bandwidth)을 제공할 수 있는 발진기는 TWT 외에는 없다. 특성을 설명하기 위해 아래와 같은 한 예를 들어보았다.

	Klystron	TWT
출력	10 kW	10 kW
이득	53 dB	53 dB
주파수(주파수대역)	X-band(0.6 %)	X-band(5 %)
전자빔전압, 전류	15 kV, 2 A	20 kV, 2.9 A
효율	35 %	30 %
무게(길이)	38.5 kg(39.6 cm)	38.5 kg(6.1 cm)

이 두 비슷한 규격의 발진기들은 출력이나 이득 면에서 매우 비슷하나 주파수대역에서는 큰차이를 보이고 있다. 이 경우 TWT는 더 넓은 주파수대역을 얻을 수 있으나 주문대로 제작한 것이다. 효율은 약간 낮으며 약한 field 때문에 발진기의 길이가 매우길다. 가격은 TWT가 약 40 %정도 비싸다.

TWT는 길이가 약간 길어서 전원공급장치의 전압에 대한 위상변화가 klystron의 것보다 더 민감하다. 아래는 위의 예시된 TWT의 경우에 대한 AM과 PM modulation을 보여준다.

전 압	AM	PM
cathode to body	0.5dB / 1 %	30 degrees / 1 %
cathode to anode	0.1 dB / 1 %	5 degrees / 1 %
drive power		2.2 degrees / 1 dB

V. Magnetron

5-1 배 경

Magnetron의 발명은 역사상 매우 중요한 사건이다. 1940년 영국에서 개발되어 히틀러가 영국을 그들의 전투폭격기로 위협하는 이차세계대전시에 영국은 그동안 극비로 개발되어 온 magnetron을 이용한 레이더를 통해 전쟁을 승리로 이끄는 데 대단히 중요한 역할을 하였다. 전자파 발진기가 개발되기 전인 그 당시만 해도 비행기는 야간이나 기류가 좋지 않을 때는 출격할 수가 없었다. 이들은 또한 폭격기가 오는 것을 미리 알게됨으로 효과적으로 적군의 공격을 대처하고 공격을 할 수 있었다. 거의 때를 같이 하여 미국에서는 일년 먼저 klystron이라는 전자파 발진기가 개발되어 역시 전쟁을 성공적으로 치루는 건인차적 역할을 하였다. 미국의 경우는 우수한 과학자들을 보스턴지역의 Radiation Laboratory에 유치해 전시 중과 전시 후 상당한 기간까지 본격적으로 전자파 발진기를 개발하게 하였다. 영국에서는 Randal, Boot과 Ludi라는 과학자들이 1939년에 magnetron을 버밍햄대학에서 개발하였고 미국에서는 Varian형제들이 1938년에 klystron을 스탠포드대학에서 개발하게 된 것이다.

Magnetron의 역사를 언급하면서 일본의 연구 역사를 빼 수가 없다. 일본은 영국에 못지않게 일찍이 1926년경부터 magnetron을 개발해 오고 있었다. 그러나 그 당시 일본에서는 금속을 깎는 기술 등이 발전해 있지 못했음으로 실지 현장에서 쓸 수 있는 정도로 개발할 수 없었고 또한 이러한 전

자파 발진기의 레이더 응용 등의 중요성을 깨닫지 못하고 있었다. 그러나 그들은 그 당시 상당한 수준의 연구결과를 보유하고 있었다. 그 후 그들은 이 magnetron이 전자레인지에 사용되면서 아직도 세계 제일의 수출국으로 자리잡고 있다.

1940년 이전에는 고주파를 방출하는 발진기들의 주파수는 수 백 MHz 정도였다. 전쟁을 중심으로 전자파 발진기는 여러나라들의 관심을 끌었고 실제로 연구 개발을 시작한 나라는 프랑스, 미국, 러시아, 일본, 영국 이었다. 이차세계대전의 긴박상황은 여러나라의 과학자들을 자극하였고 불과 수 watt 정도의 출력을 내던 전자파 발진기들은 매우 짧은 개발 기간안에 kw의 고출력을 방출할 수 있는 전자파 발진기를 개발했던 것이다. 현재 magnetron은 1 GHz에서 100 GHz 까지 높게는 MW의 출력까지 낼 수 있게 되었다.

5-2 원 리

Magnetron과 CFA의 작동원리는 같으나 magnetron은 입력부분이 없는 oscillator이다. Magnetron과 CFA에서는 RF가 원통형인 anode를 따라 진행한다. 음극에서 방출된 전자빔은 anode로 가속되지 않고 전기장과 외부의 자기장에 의해 원통형의 음극 주위를 돌게된다. 전기장에 의한 힘과 외부 자기장에 의한 힘이 균형을 이루어 전자빔은 초기엔 원운동을 시작하게 된다. 그러나 anode의 RF에 의해 전자빔은 anode쪽으로 움직이며 전자빔이 가지는 potential 에너지를 RF에너지에 전달하게된다. 이 과정에서 전자빔은 radially 응집(bunching)을 하게 되며 결국은 anode에 부딪치게 된다. Magnetron에서의 전자 응집현상은 linear beam device에서의 axial 전자응집현상과 비교된다. Anode에 형성된 RF는 coupler를 통해 출력부분으로 연결되어 방출되게 된다.

5-3 특 성

Magnetron oscillator는 레이더에 처음으로 사용된 고출력 전자파 발진기이며 현재에도 레이더 시스템에 널리 사용되고 있다. 소형, 무게, 적절한 전압, 좋은 효율 및 구조적 강점 및 수명 등으로 특징지어진다. 위에서 설명된 바와 같이 전자빔이 potential 에너지를 거의 잃을때까지 전자빔은 음극과 anode사이를 회전함으로 효율은 원리적으로도 매우 높다. 많은 magnetron은 심지어 80%이상의 효율을 갖는다. 그러나 spectral purity가 레이더체계에서는 효율보다도 더 중요하다. 이미 전자레인지의 magnetron 소음에 관한 세가지 영역이 있음은 잘 알려져있다. 낮은 전류의 경우 소음정도가 높고 중간치의 전류경우에는 spurious sideband가 나타나며 높은 전류에서는 소음정도가 낮다. 이러한 소음문제는 레이더뿐 아니라 전자레인지의 전파방해 측면에서도 간과될 수 없는 문제이므로 연구가 진행중에 있다. 이에 따라 약한 주파수의 안정도를 위해 coaxial magnetron이 미국에서 개발되었다. Anode의 vane에 발생되는 RF는 vane의 slot을 통해 coaxial 구조에 TE₀₁과 같은 모드를 형성하여 출력하는 방식이다. 주파수의 안정성을 요하는 현장에 쓰이며 대부분의 magnetron 발진회로는 strapping의 방식을 통해 모드 purity를 유지하고 있다.

고출력 magnetron과 CFA의 몇가지 개발된 예를 아래의 표에 나타내었다.

VI. Gyrotron (Electron Cyclotron Resonance Maser)

고출력 magnetron의 예

주파수	출력	Duty cycle	Voltage	Current
1.29 GHz	25 MW	0.0025	52 kV	260 A
5.6 GHz	1 MW	0.001	37.5 kV	65 A
9.25 GHz	1 MW	0.0015	30 kV	70 A
16.5 GHz	100 KW	0.001	22 kV	20 A
24 GHz	120 KW	0.0005	14 kV	30 A

고출력 magnetron의 예

주파수	출력	Duty cycle	Voltage	Current	이득
1.288 GHz	1.8 MW	0.02	46	50	9.2 dB
2.998 GHz	3.0 MW	0.0015	47	100	
5.65 GHz	1.0 MW	0.001	35	60	18 dB
9.05 GHz	1.0 MW		40	45	7 dB
16.5 GHz	0.1 MW	0.01	14	23	17 dB

6-1 배경

위에 간략히 소개한 전자파 발진기들(klystron, magnetron 및 TWT)은 전자파 발진회로의 특성상 밀리미터의 파장을 내는 전자파 발진기로서는 한계가 있음은 오래전부터 알고 있는 사실이다. 이제까지는 밀리미터파에 대한 수요가 없었고 또한 이러한 주파수 대역(Ka-Band에서 W-Band)의 전자파를 방출할 수 있는 발진기도 부재한 상태였다. 그러나 점점 더 정밀하고 빠른 정보 및 통신 등의 필요에 의해 여러 선진 국가들은 고출력 밀리미터 파를 방출할 수 있는 전자파 발진기 개발을 지난 30년 가량 지속해 오고 있다.

1964년 미국과 러시아에서는 독자적으로 거의 동시에 gyrotron이라는 전자파 발진기를 발명하였다. 미국에서는 예일대학의 교수인 Hirshfield 교수가 첫 실험에 성공하였으며 러시아에서는 응용물리 연구소(Institute of Applied Physics)의 Gaponov가 첫 실험에 성공하게 되었다. 이후 gyrotron은 응용 분야에 따라 다양한 형태로 발전하게 되었다. 이차 대전 전후에 개발된 전자파 발진기가 방출할 수 없는 높은 출력을 고주파에서 얻을 수 있는 gyrotron은 35 GHz와 94 GHz에서 개발되고 있다.

형태로는 좁은 주파수대에서 운용되는 gyrotron oscillator 발진기(1 MW CW, >100 GHz)와 klystron구조와 같이 여러 공진관에서 전자빔과

상호작용하는 gyro-klystron이 있고 광대역의 바린 기로는 최근에 gyro-TWT가 연구 개발되었다. 35 GHz gyro-klystron은 러시아에서 대공 레이더용 전자파 발진기로 현장에서 쓰이고 있고 현재는 94 GHz 발진기를 개발하고 있다. 출력은 10 kW이상 수백 kW에 이르고 있다. 광대역용으로 개발되어 전자전, 통신 등에 쓰일 gyro-TWT는 이름대로 TWT와 같은 형태의 발진회로를 통해 넓은 주파수대에서(>20 % BW) 10~100 kW 이상의 출력을 방출할 수 있다. 지난 20년간 러시아는 gyro-klystron을 집중적으로 연구 개발하였으며 미국은 gyro-klystron과 gyro-TWT 모두를 연구하고 있다.

6-2 원 리

Gyrotron에서는 linear beam device와는 달리 회전하는 전자빔의 transverse 에너지와 transverse RF 전기장의 cyclotron 공명조건을 통해 전자파를 발진한다. Klystron, magnetron 및 TWT 등에서는 발진 주파수와 발진회로의 크기와 직접적인 관련이 있어 고주파에서 고출력을 발진하는데 한계가 있었다. 그러나 gyrotron에서는 전자빔의 cyclotron 주파수가 외부 자기장에 비례함으로 발진되는 주파수는 외부 자기장의 세기와 관련한다. 비교적 큰 발진회로를 이용함으로 출력의 한계가 대단히 높다. 200 GHz이상에서 1 MW CW가 실현되고 있다.

회전하는 전자빔을 발생하기 위해 magnetron injection gun이라는 전자총이 거의 모든 gyrotron에서 쓰이고 있다. 전자빔은 cross field상황에서 음극에서부터 회전하는 형태로 발생되며 외부에서 가해진 자기장에 의해 전자빔은 compress되며 발진회로도 진입한다. 이때 회전하는 전자빔은 transverse RF와 상호작용하여 새로운 형태의 응집현상을 나타낸다. 다른 device에서는 공간에서 전자빔의 응집현상을 보이나 이 경우는 전자 cyclotron orbit상에서 같은 위상을 갖도록 응집 정렬됨으로

위상 응집(bunching in the phase of electron cyclotron orbit)이라고 부른다.

6-3 특 성

발진회로는 응용도에 따라 각각 다른형태를 가진다. Gyromonotron은 공진관의 형태를 취하며 oscillator로 운행되며 효율과 높은 출력으로 핵융합 장치의 플라즈마 가열 등 kw-MW CW의 고출력을 요하는 곳에 쓰인다. 밀리미터대역에서 주목된다. 또한 gyroklystron은 작동원리는 gyrotron이며 구조는 여러 공진관을 사용하는 klystron의 형태를 가진다하여 명명되었다. 높은 효율, 높은 이득 등으로 차세대 선형가속기에 사용될 목적으로 개발되고 있으며 고정밀을 요하는 레이더용으로 개발되고 있다. 이미 35 GHz에서는 현장에 배치되었고 94 GHz로도 개발되고 있다. 이 외에도 주파수대역을 넓힐 목적으로 gyro-TWT가 개발되고 있다. 이 경우도 TWT에서와 같이 traveling wave를 사용하

Gyromonotron oscillator의 예

주파수	pulase시간	출력	효율
140 GHz	1초	1 MW	42 %
110 GHz	0.0001초	1.3 MW	45 %
110 GHz	0.0001초	1.0 MW	65 %

(에너지 회복회로)

Gyroklystron의 예

주파수	출력	효율	이득	주파수대역
4.5 GHz	70 kW	40 %	36 dB	0.4 %
16 GHz	160 kW	40 %	30 dB	
28 GHz	76 kW	9 %	30 dB	0.4 %
35 GHz	750 kW	24 %	20 dB	1.2 %
85 GHz	82 kW	30 %	18 dB	
94 GHz	65 kW	26 %	33 dB	0.6 %
91 GHz	2.5 kW CW	25 %	31 dB	0.7 %

Gyro-TWT의 예

주파수	출력	효율	이득	주파수대역
5 GHz	120 kW	26 %	20 dB	7 %
10 GHz	55 kW	11 %	20 dB	11 %
16 GHz	207 kW	13 %	16 dB	2 %
35 GHz	10 kw	17 %	25 dB	20 %
34 GHz	62 kw	21 %	33 dB	12 %

기 때문에 붙여진 이름이다. 도파관의 형태를 이용하는 gyro-TWT는 tapered 도파관형, folded 도파관형 및 dielectric형의 구조를 가진다. 주파수대역은 Ka-band에서 20 %를 남고 있다.

Ⅶ. 결 어

이차세계대전을 전후로 활발히 개발되었던 전자파 발진기들 중에 널리 알려진 magnetron, klystron 및 TWT들은 반세기를 지나오며 성능 및 신뢰도 등에서 괄목할만한 발전을 이루었으며 앞으로 레이더뿐 아니라 각종 현장에서 쓰일 전망이다. 현재는 점점 고성능 및 초소형화되어가며 MP-M 등과 같이 모듈의 형태로 개발되고 있다. 주파수대역으로는 고정밀 레이더 등을 위한 밀리미터 파이상의 고출력, 고주파 발진기의 개발이 추진되고 있다. 이미 전통적인 고출력 발진기들도 Ka-band대역 이상 고출력을 발진할 수 있도록 상당히 개발되었으며 새로운 원리를 이용한 gyrotron계열의 고출력 발진기들도 현장에 쓰일 정도로 개발 중에 있다.

참고문헌

1. Gaponov and Granatstein, "Application of High-Power Microwaves", Artech House (1994)
2. Eaves and Reedy, "Principles of Modern Radar", Van Nostrand Reinhold Co.(1987).
3. *Proceeding of 21st International Conference on Infrared and Millimeter Waves*, Berlin(1966)
4. Brookner, "Radar Technology", Artech House
5. *Proceeding of International Workshop on Crossed-Field Devices*, Ann Arbor(1995)250

저자소개

1995년~ 현재 서울대학교 물리교육과 조교수
 1987~1995년 미국해군연구소 연구원
 1989년 미국 메릴랜드 주립대학 박사

