

초고주파, 고출력 전자파 발진기를 위한 세라믹 진공창의 연구 동향

Research Trends of Ceramic Window for High Power, High Frequency Vacuum Power Tube

기술해설

최진주, 김남영, 김종현, 박건식
(Jin-Joo Choi, Nam-Young Kim, Jong-Heon Kim and Gun-Sik Park)

Key Word(중요용어) : Electron Beam(전자빔), Gyrotron(자이로트론), Vacuum Window(진공창), Ceramic(세라믹), vacuum power tube(진공 전력 발진기), sapphire(사파이어), CVD diamond (CVD 다이아몬드)

1. 서론

마이크로파 그리고 밀리미터파 파장에서 전자파를 발생시키는 장치 중 크게 두가지로 분류할 수 있다. 즉 MMIC, IMPATT, GUNN oscillator를 포함하는 solid state device¹, 그리고 진공에서 자유 전자를 이용해서 전자파를 발생시키는 vacuum power tube²(magnetron, klystron, gyro-klystron, gyrotron, Helix-TWT, millitrons 등등)으로 분류할 수 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 solid state device는 출력이 작아도 가능한 응용에서는 부피가 작고 가벼운 solid state 전자파 발진기로 많이 사용되고 있으나, 고출력을 필요하는 응용에서는, 즉 long range radar, 혹은 communication, ceramic material sintering, toxic chemical을 분해하는 플라즈마 장치, 그리고 미래의 에너지원이라 불리는 핵융합 장치에서의 current drive, initial plasma discharge, 그리고 ECR(Electron cyclotron Resonance)³ 가열할 때 요구되는 전자파 출력이 작게는 kW에서 MW 혹은 GW 범위이기 때문에 고출력 처리 능력을 지니고 있는 vacuum power tube가 널리 쓰인다. 특히, ITER (international Thermonuclear Experimental Reactor)와 같은 핵융합 플라즈마 가열용으로 개발되고 있는 110GHz or 170GHz의 주파수 범위를 포함하는 gyrotron은 발진기 출력이 1MW의 연속파를 가지는 발진기가 약 50개를(total RF power=50MW CW) 필요로 한다. 이러한 초고주파, 고출력 전자파를 발진시킬 수 있는 vacuum power tube는 gyrotron oscillator가 유일한 전자파 발진기로 알려져 있다.⁴

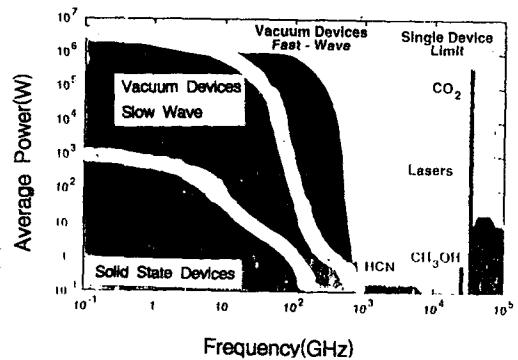


그림 1. 마이크로파 그리고 밀리미터파의 전력한계

Fig. 1. Power limit on microwave and millimeter wave coherent radiation

그림 2에서 보여주듯이 gyrotron oscillator를 구성하는 요소 중 크게 4가지로 구분할 수 있다. 첫째 전자빔을 발생시키는 전자총(Magnetron-Injection-Gun), 전자빔의 에너지가 전자파의 에너지로 변환되는 interaction circuit, 전자빔의 에너지를 다시 회수하는 beam collector, 그리고 진공에서 발진된 전자파를 외부로 전송시키면서 gyrotron 전자파 발진기의 진공을 유지시켜주는 세라믹 진공창(ceramic vacuum window)이다. 미국 및 구 소련을 비롯해서, 유럽, 그리고 일본에서는 이러한 gyrotron oscillator 개발에 거의 30년을 넘게 오늘날까지 지속적인 연구활동을 해왔다. 그러나 가장 최근의 연구 결과를 종합해 보면, 핵융합 플라즈마 가열용으로 쓰일려면 1MW 연속파가 10초 이상

지속되어야 하는데, 아직까지 어느 실험실에서도 완전히 연속파를 지닌 전자파를 출력시키지 못했다. 그 이유는 다름아닌 세라믹과 vacuum window의 1MW 연속파가 전송될 때 발생하는 온도 상승 때문이다.

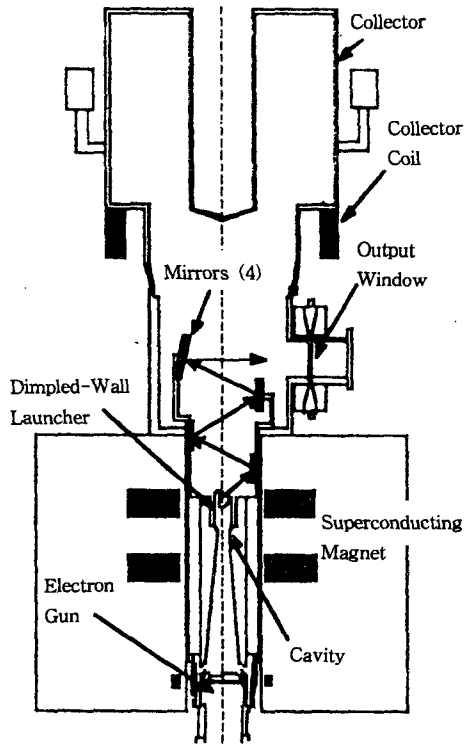


그림 2. 고출력, 고주파 전자파 발진기 Gyrotron Oscillator의 Configuration
Fig. 2. Configuration of High power and high frequency Gyrotron oscillator

gyrotron에서 진공창의 역할은 첫째 고출력 전자파를 진공에서 외부로 전송하는 것과, 둘째 핵융합 플라즈마 장치와 gyrotron의 진공상태를 분리시켜 주는 것이다.

gyrotron에서 방출되는 전자파는 quasi-optical mode converter를 지나면서 HE₁₁ gaussian beam의 형태로 변환 시켜서 전송한다. 보통 beam의 크기는 직경이 약 7cm 내지 10cm정도이다. 이러한 gaussian beam을 진공창을 통과 시켜야 하는데, 안정성을 충분히 고려해서, 원형으로 만들어진 진공창의 직경을 보통 10.16cm로 정하고 두께는 impedance matching을 고려한 식, 즉 $N \lambda g / (2\sqrt{\epsilon})$

[여기서 N은 정수 (1, 2, 3...), 그리고 λg 는 guided wavelength]에서 주파수의 함수로 정해진다. 특히 두께를 결정할 때, mechanical stress를 고려하면 두꺼울수록 좋으나, dielectric loss가 커지기 때문에 고출력 연속파 전자파 발진기에는 두꺼운 세라믹은 바람직하지 않다.

gyrotron window에 쓰일 ceramic은 고출력의 연속파 전자파를 전송해야 하기 때문에 loss tangent가 작아야 하고, 가능한 적은 dielectric constant, high thermal conductivity, mechanical stress에 잘 견딜 수 있어야 한다. gyrotron window에 대한 이러한 조건들을 충족시켜 주는 세라믹은 sapphire, silicon, 그리고 CVD diamond 등이다.

2. 고출력 세라믹 진공창

서론에서 기술한 바와 같이, gyrotron의 진공창에 쓰이는 세라믹을 고려할 때, 우선 전자파의 impedance를 matching 시켜야 하는 문제, 그리고 진공창 안에서의 thermal shock이나 thermal runaway 현상을 없애기 위해서 세라믹의 thermal 및 mechanical properties, dielectric loss 그리고 세라믹내에서 발생된 열을 냉각시키는 방법등을 연구해야 한다. ITER의 fusion plasma heating용으로 개발된 핵융합인 1MW 연속파 gyrotron oscillator 인 경우, 전자파 발진 장치에서는 충분한 전자파, 즉 1MW 이상의 출력을 발진시킬 수 있지만, 발진된 전자파의 출력을 진공에서 플라즈마가 있는 tours까지 전송 시킬 때 세라믹 진공창을 거쳐야 하는데, 이 세라믹 진공창이 가지는 finite loss tangent로 인한 내부의 급격한 온도 상승 때문에 1MW 연속파를 발진시킬 수 없었다.

예를 들면, 일본의 JAERI(Japan Atomic Energy Research Institute)에서 single sapphire disk (직경 120mm, 두께 3.57mm)를 110 GHz gyrotron에 장착해서 실험을 했다⁵. 진공창의 온도 변화는 thermocouple과 IR(Infrared) Camera를 설치하여 측정하였다. 그림3에서 보는 바와 같이 상온에서 gyrotron이 동작할 때, sapphire의 중앙 부분의 온도가 불과 0.5초 사이에 300°K에서 600°K 까지 급격하게 올라가는 것을 볼 수 있고, 또 계속해서 2.3초까지 전자파를 연속으로 전송 시킬 때 무려 1200°K까지 올라가는 thermal runaway 현상이 측정되었다. 그리고, 실험에서 관측된 또다른 현상은, 그림4에서 보는 바와 같이 sapphire의 permittivity

ϵ_r 값이 온도에 비례해서 변하고, 그 결과 진공창의 전송주파수 범위가 달라진다. 즉, 진공창의 두께 ($t = \frac{N}{2} \frac{\lambda_g}{\sqrt{\epsilon}}, \lambda_g = \frac{c}{f}$)는 고정된 값이므로 ϵ 값이 변함에 따라 transmission frequency가 달라진다. 따라서 gyrotron에 발진된 전자파는 window mismatching이 나타나며, 이것 때문에 투과되지 못하고 반사되는 Gaussian beam은 gyrotron의 cavity Q를 높임으로써 전자빔과 전자파의 에너지 변환 효율을 떨어 뜨릴 뿐만 아니라 internal quasi-optical mode converter에 더 많은 thermal loading이 가해짐으로 좋지 않은 영향을 미친다. 그래서 steady state를 유지하면서 연속동작을 하기 위해선 세라믹 진공창의 냉각이 반드시 필요한데, 그 방법에는 edge-cooling, face-cooling, cryo-

cooling등이 있으며 아직까지 완전한 해결책을 찾기 위해서 여러 세계 각국 연구소에서 활발한 연구가 진행되고 있다.

(2.1) face cooled window

Double disk sapphire window는 2개의 sapphire disk를 붙여서 그사이로 fluoinert coolant 즉 FC-75 coolant를 흐르게 해서 세라믹의 전체 표면을 냉각한다.

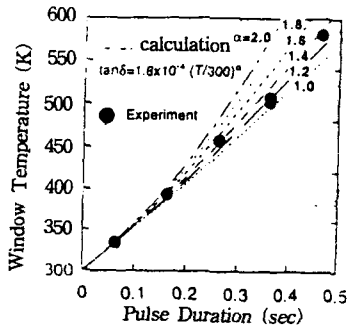


그림 3. 전자파의 pulse duration에 따른 진공창 온도 상승
Fig. 3. Temperature rise of ceramic window as a function of pulse duration.

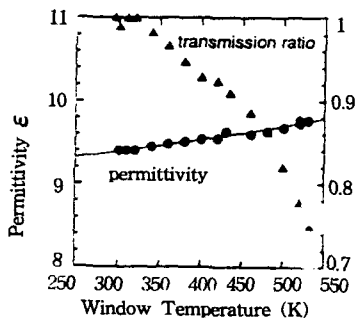


그림 4. 진공창 온도 상승에 따른 permittivity 변화 및 Transmission 계수
Fig. 4. Permittivity and transmission coefficient as a function of temperature rise

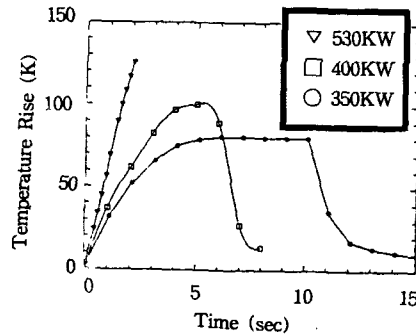


그림 5a. FC-75 cooled double disk sapphire window의 시간에 따른 온도 상승
Fig. 5a. Temperature rise as a function of time for FC-75 cooled double disk sapphire window.

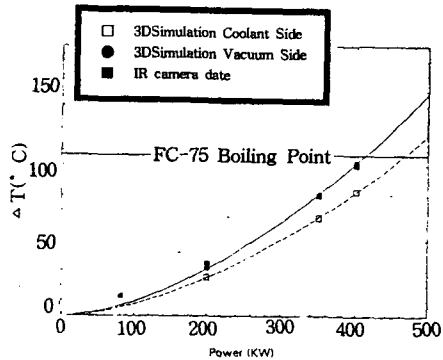


그림 5b. FC-75 cooled double disk sapphire window의 전자파 출력에 따른 온도 상승
Fig. 5b. Temperature rise as a function of radiation power for the FC-75 cooled double disk sapphire window.

미국의 CPI(예전의 Varian)에서 제작한 110 GHz gyrotron의 경우 이러한 FC-75로 냉각 시킨

double disk sapphire window를 사용했는데, 출력이 1MW power인 경우 2msec, 500kw인 경우 2sec, 350kw인 경우 10sec까지의 고출력 전자파를 전송시킬 수 있었다.⁶ 그림 5a와 5b에서 보여주는 바와 같이 530kw 전자파가 세라믹 진공창을 지날 때 2초내에 온도 상승차이가 130°C 올라가는 thermal run-away 현상이 보였고, 그 이상의 온도에서는 FC-75가 끓기 때문에 (FC-75 boiling temperature = 120°C) 2초 이상 gyrotron을 동작할 수 없다. 물론 coolant의 압력을 높여서 유체속도를 올리면 세라믹의 냉각 효율을 높일 수 있지만 세라믹의 안쪽 면에 가해지는 압력 때문에 세라믹이 깨질 수 있는 위험성이 있다. 위의 실험에서는 냉각수 압력이 25kpsi(1.72 x 10⁸Pa)를 넘지 않게 작동 되었다.

결론적으로 1MW CW를 operation을 하려면 새로운 세라믹 진공창 개발이 요구 되었고 다음 section에서 기술하듯이 distributed window가 개발되기에 이르렀다. 한편 CPI의 double disk sapphire window는 표면이 평평하기 때문에 coolant 압력을 얼마이상 올리지를 못했는데, 최근에 미국의 MIT 핵융합 센터에서 sapphire disk를 원형모양으로 만듦으로써, coolant 압력을 3배 이상 높여도 세라믹이 견딜 수 있고 냉각능력을 그만큼 높임으로써 gyrotron 전자파 출력을 3MW까지 전송시킬 수 있다는 연구결과가 발표되었다.⁷

(2.2) Cryo-cooled window

유럽-ITER 연구팀은 핵융합 플라즈마 가열을 위해서 140GHz를 가지는 고출력 전자파 발진기를 개발했는데, 여기에 부착된 세라믹 진공창의 냉각 방법으로 극저온 냉각 (cryo-cooling)방식을 썼다. 세라믹 진공창의 물질로써 유전손실(dielectric loss)와 열전도성(thermal conductivity)이 좋은 Ti-doped monocrystalline Al₂O₃(sapphire)이며 세라믹 진공창의 가장자리를 액화 질소(boiling temperature=77°K)를 가지고 냉각한다. 컴퓨터 코드로 계산한 바에 의하면, Gaussian beam인 경우 500kW, Gaussian beam을 공간 상에 퍼지게 만드는 경우 700kW, 그리고 beam을 원통형(annular distribution)으로 하면 1MW의 출력까지 전송할 수 있는 것으로 나타났다.⁸ 140GHz gyrotron의 실험결과, 액화 질소로 냉각된 세라믹 진공창은 500kW에서 500msec까지 (진공창 온도차이 = 3°K) 작동할 수 있었으나, 펄스 길이가 더 긴 경우 세라믹 진공창 표면에서 전기 방전(electric arcing)이

일어났다. 이는 진공창의 양면 중, 공기와 접촉하는 쪽에서 공기 중의 물분자가 얼어붙어 생긴 아이스 때문에 전기 방전이 일어난 것으로 추정된다. 그리고 실험에서 얻은 또다른 중요한 결과는 이러한 액화 질소로 냉각된 진공창에서는 세라믹 가장자리에서 열 제거가 중요한 것이 아니고, 세라믹 자체내에서 발생하는 열을 바깥 방향으로 방출시키는 열전도율(thermal conductivity)이 큰 문제점을 발견했다.

그러한 첫 번째 gyrotron 실험에서 얻은 연구 결과를 바탕으로, 세라믹의 온도에 대한 열특성을 조사해 보았다. 그림 6에서 보는 바와 같이, sapphire는 액화질소 온도인 77°K에서 보다 액화 네온(liquid Neon)온도인 30°K에서 제일 높은 열전도성을 가지고 있다. Ti-doped sapphire의 loss tangent는 온도에 따라서 $\tan \delta = 3.15 \times 10^{-12} \times T^{3.3}$ 로 표시하는데, 77°K에서보다 27°K에는 loss tangent 값이 현저히 낮음을 알 수 있고, 따라서 고출력 전자파 연속 전송이 가능할 것으로 기대된다. finite element code를 통한 시뮬레이션에 따르면(여기서 온도와 주파수에 관한 식으로 표시한 $\tan \delta = 1.48 \times 10^{-11} \times f(\text{GHz}) \times T^2(\text{K})$) 진공창 두께가 2mm일 때 2.8MW까지 연속파로 전송시킬 수 있음을 알 수 있다.⁹ 현재 gyrotron에 연결

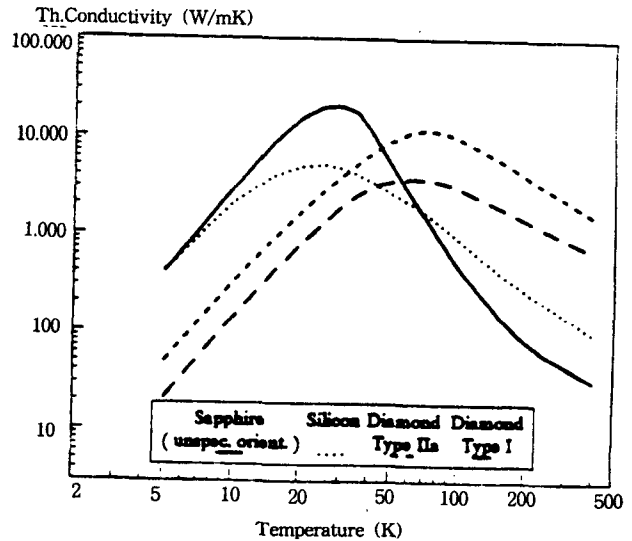


그림 6. sapphire, silicon, 그리고 diamond의 온도에 따른 열전도율

Fig. 6. Thermal conductivity of sapphire, silicon, and CVD diamond.

해서 실험 하고 있는 중인데, 조만간에 좋은 결과가 나올 것으로 기대된다.

일본의 JAERI에서는 110GHz gyrotron을 동작할 때 극저온 냉각식 샤프이어 진공창(cryo-cooled single disk sapphire window)를 사용했다.¹⁰ 독일의 KfK gyrotron 진공창과 다른 점은 진공창을 냉각 할 때 액체 질소나 액체 네온을 사용하지 않고 2차 냉각 단계(첫 냉각 단계에서 80°K 그리고 두 번째 냉각 단계에서 20°K까지 냉각 방식을 택한 극저온 냉각기 (cryo-refrigerator)를 13-50°K 범위로 조절할 수 있게 고안되어 있다는 점이다. 110GHz gyrotron이 HE₁₁ mode를 가지고 발전되는 370kW, 0.4 sec 전자파는 샤프이어 진공창을 지날 때 순간적으로 온도가 3°K까지 오름이 실험에서 측정되었으며 400kW 1sec 동작시 30°K까지 올라감이 측정되었다.

이러한 액화 질소나 액화 네온 혹은 극저온 냉각 시스템을 이용한 극저온 세라믹 진공창(cryo-cooled ceramic window)은 시스템 자체가 복잡하고 부피를 많이 차지하기 때문에 조작하기가 쉽지 않을 뿐아니라, 세라믹 표면에 생기는 아이스 문제 때문에 지금까지 1MW CW를 전송할 수 있는 시스템 응용은 실용단계가 아니다.

(2.3) 배분형 세라믹 진공관 (distributed ceramic window)

앞에서 기술 한 바와 같이 극저온 냉각 방식을 채택한 gyrotron은 냉각 시스템이 복잡하고 조작하기 어려운 단점이 있기 때문에, 세라믹 진공창의 열전도성을 높인 새로운 냉각 방식이 GA(General Atomic, 즉 미국의 ITER연구팀)에서 배분형 세라믹 진공창을 개발했다.¹¹ 그림7에서 보는 바와 같이, 냉각 채널을 세라믹 사이에 뚫으로써 세라믹에 생기는 열을 효율적으로 제거 할 수 있는 장점이 있다. HE₁₁ mode를 통과시키기 위해서 세라믹은 sapphire로 만들었으며, 냉각채널은 niobium으로 만들었는데, 이는 세라믹의 가장 근접한 열팽창률(thermal expansion rate)과 가장 근접한 금속중의 하나이기 때문에 brazing 할 때, 그리고 진공창에 걸리는 열부하(thermal loading)에 잘 견딜 수 있게 고안 되어 있다. 전자파의 mismatching을 줄이기 위해서 금속의 앞과 뒷부분을 그림7에서 보는 것처럼 경사를 지게 했으며 경사면의 길이가 1.5λ 이상 되면 반사되는 power는 -30dB 이하로 계산된다. 그리고 sapphire의 두께는 $N \lambda_d/2$ (N은 integer, λ_d는 세라믹 안에서의 파장)로 정함으

로써 HE₁₁ mode와 matching 되게 만들었다. 주파수가 110GHz에 맞게끔 고안된 이 배분형 진공창은 N을 6으로 그리고 sapphire 두께가 2.7mm로 되어있으며, 이러한 두께는 sapphire에 걸리는 최저 stress(minimum stress) 즉 83MPa를 견딜 수 있게 충분히 두껍게 고안되어 있다.

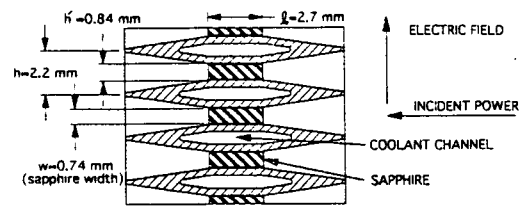


그림 7. 배분형 세라믹 진공창
Fig. 7. Distributed window.

배분형 진공창이 가지는 한가지 단점은 linearly polarized된 전자파만 투과 가능하다는 것이다. 이는 곧 금속으로 만들어진 cooling channel이 선형 배열 수직인(linear array)로 되어 있는데, 이 배열방향과 누적되는 E-field polarizatinn을 가지는 전자파만 투과되기 때문이다. 선형으로 정렬된 배열 방향과 같은 방향으로 polarized 된 전자파는

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \text{ 때문에 100\% 반사된다. 여기서 } \sigma$$

는 electrical conductivity, J는 electrical current density, 그리고 E는 electric field이다. 또 하나의 큰 단점은 세라믹과 niobium의 brazing의 기술적 어려움에 있다. 약 60개가 넘는 (직경 10.16cm 진공창을 가정) 금속과 샤프이어를 brazing할 때 두 개의 다른 물질이 만나는 접촉 부분면에서 기포(void) 없이 진공 상태를 유지하는 brazing 기술은 아직 많은 공학적 어려움이 있다. 실지로 GA에서 저출력을 가진 전자파를 사용해서 실험을 했는데 ohmic loss와 dielectric loss가 각각 4% , 2%가 측정됨으로 진공창의 전기적 측면에서는 만족한 결과가 나왔지만, 고효율 1MW gyrotron에 연결해서 사용할 진공창은 brazing 과정에서 진공 결함이 발견되어 쓸 수 없게 되었다. 이는 곧 앞에서 기술한 대로, 금속과 세라믹이 접촉한 부분에서의 brazing이 기술적인 어려움이 있음을 말해 주는 결과이다.

(2.4) CVD diamond window

일반적으로 solid crystalline 그리고 poly-crystalline material 즉 sapphire 그리고 silicon 같은 세라믹은 전자파의 흡수가 일어나는 주파수가 보통 submillimeter와 적외선(infrared) 범위에서 위치하는데, 이는 물질을 구성하는 격자의 진동(lattice vibration)과 phonon 흡수 혹은 다른 여러 가지 흡수가 있기 때문이다. 하지만 다이아몬드는 그러한 물질 격자진동 때문에 생기는 전자파의 흡수가 적외선 범위에서 일어나기 때문에, submillimeter파 범위 즉 110 GHz - 170GHz 에서 작동하는 ECR 가열용 gyrotron에서는 CVD diamond가 좋은 세라믹 진공창 물질로 여겨져 왔다. 그리고 다이아몬드가 가지고 있는 특성 중 높은 열 전도성, 낮은 유전손실, 견고성(maximum bending stress = 600-900 MPa)이 좋기 때문에 고출력 gyrotron에 더욱 관심있는 물질로 여겨져 있었다. 여태까지 CVD로 제작되는 다이아몬드는 크기에 한계가 있었으나, 최근에 CVD 기술발전으로 다이아몬드 크기를 직경 10.16cm까지 만들 수 있으므로, gyrotron의 기존의 진공창 세라믹의 대체용으로 많은 연구가 진행 되고 있다. 현재 알려진 바에 의하면, 미국의 Norton Diamond company, 그리고 영국의 DeBeers Company가 gyrotron 진공창용으로 직경 10.16cm까지 되는 CVD diamond를 만들었다. 한국에서도 KIST에서 10.16cm까지 제작하는데 성공했으나 아직까지 유전특성 즉 loss tangent, 열전도율을 submillimeter 파 범위에서 실험 data가 없다.¹² DeBeers에서 만든 CVD diamond는 직경이 100mm 그리고 두께가 2.5mm나 되고, 직경 160mm까지 제작 가능하다고 주장한다.¹³ DeBeers에서 제작된 diamond(두께 = 0.6mm)의 온도 변화에 따른 tan δ 값이 그림8에서 보는바와 같이 100°K-400°K 까지 거의 일정한 값(10⁻⁵)을 갖고 있고, dielectric permittivity도 온도 변화에 관계없이 거의 일정한 값을 갖고 있다. 두께 2.5mm가 되는 diamond는 loss tangent가 10⁻⁴ 정도 되는 것으로 추정된다. Sapphire나 Au-doped HR(High Resistivity) Silicon 경우는 온도가 올라가면 tan δ가 급격히 증가하는 것과는 대조적이다. diamond의 tan δ는 또한 전자파의 주파수에 대해 1/f로 비례하기 때문에 흡수된 power (즉, $P = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \omega \tan \delta \int |E|^2 \cdot du$)는 주파수에 관계없이 일정하다. 이것 또한 sapphire나 silicon에 비해서 좋은 특성을 갖고 있는데, 즉 sapphire 와 silicon의 loss tangent는 각각 f, 그리고 1/f^{1/2}로 비

례하고 따라서 흡수된 power는 f² 그리고 f^{1/2}로 비례하기 때문에 초고주파 즉 submillimeter range 에서는 diamond가 고출력 gyrotron 진공창용으로 큰 장점을 가지고 있다. 그리고, sapphire 나 silicon에 비해서 diamond가 thermal shock에 대한 내구성 그리고 높은 열전도성을 가지고 있기 때문에, 앞에서 설명한 극저온 냉각방식(cryo-cooling)을 쓰지 않고, 상온에서 간단한 냉각수로 1MW 연속파 출력을 전송 할 수 있는 큰 장점을 지니고 있다.

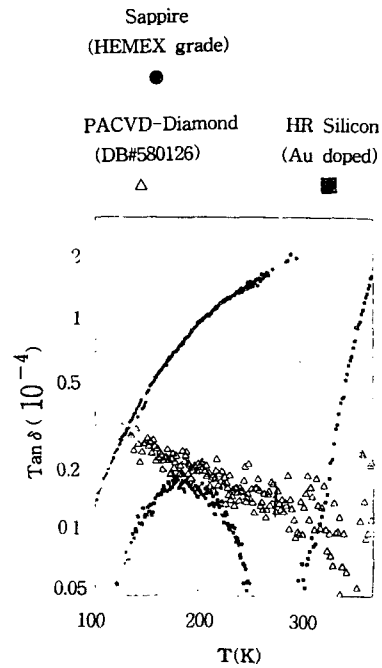


그림 8. 145GHz에서 온도에 따른 loss tangent 값
Fig. 8. Temperature dependence of loss tangent at 145GHz.

DeBeers에서 제작된 CVD-diamond(직경 96mm, 두께 2.2mm, tan δ = 1.3 x 10⁻⁴)가 처음으로 일본의 JAERI와 Toshiba의 합작으로 제작된 170GHz gyrotron (출력=165kW)의 세라믹 진공창으로 부착되어 실제로 test 되었다.¹⁴ CVD 다이아몬드의 loss tangent, $\tan \delta = \frac{C_0 \rho D^2 C_p}{4f(1 + \epsilon)} \cdot \frac{\Delta T}{P_{RF} \Delta t}$ 식에서 측정되었다. 여기서 C₀는 빛 속도, ρ는 질량밀도(mass density), D는 세라믹 진공창 직경, C_p는 비열(specific heat), f는 입사된 전자파의 주파수,

ϵ 는 유전율(dielectric constant), ΔT 는 세라믹의 온도증가, P_{RF} 는 입사된 전자파 출력, 그리고 Δt 는 펄스폭(pulse duration)이다. 그리고 CVD diamond의 열전도율(thermal conductivity)을 알기 위해서, 측정된 세라믹 진공창의 온도증가와 열전도율을 포함하는 열역학 방정식에 구한 값과 비교함으로써 열전도율을 구할 수 있었다. 이러한 방법으로 측정된 loss tangent는 1.3×10^{-4} 이며, 열전도율(thermal conductivity)는 1800 W/mK이다. 아직까지 1MW CW gyrotron으로 diamond로 만들어진 진공창을 실제로 test 하지 못했다. 앞으로 수년 이내에 이 CVD-diamond가 1MW 연속파 전송 실험이 될 계획인데, 그 실험 결과가 주목된다. diamond의 특성을 finite element numerical code로 시뮬레이션 해 보면, 상온에서 일반적 냉각수로 다이아몬드의 가장자리를 냉각하면 3-7MW 연속파를 전송 할 수 있는 것으로 예측되는데, 이러한 계산 결과가 앞으로 실험에서 확인된다면, gyrotron에 쓰이는 진공창으로 다이아몬드가 가장 적합한 세라믹으로 간주되며 지난 30년이 넘게 개발되어온 gyrotron의 과학적, 기술적 측면에서 획기적인 발전으로 남게 될 것이다.

3. 맺 음 말

고출력 전자파 발진기, 즉 gyrotron oscillator에서 1MW 연속파 출력을 발진하기 위해서 가장 중요한 요소인 세라믹 진공창의 특성을 연구 조사했다. 표 1에서는 세라믹의 특성 중 열전도율, 내구성 그리고 loss tangent 면에서, sapphire, silicon, 그리고 CVD diamond를 비교 분석 및 요약 했다. 표1에서 보는 바와 같이, CVD diamond가 1MW 연속 전자파 전송에서, 다른 세라믹에 비해서 열전도율이 높고, 온도에 따른 유전 특성 변화가 거의 없고, 또한 강한 내구성을 지니고 있기 때문에 가장 적합한 세라믹 진공창이다.

참 고 문 헌

1. Infrared and Millimeter Wave, Edited by Kenneth J. Button and James C. Wiltse Academic Press, 1981
2. A. S Gilmour, Jr., Microwave Tubes, Artech House Inc. 1986
3. Applications of High-Power Microwave, edited by A. V. Gaponov and V.L. Granatstein,

표 1. 세라믹 진공창의 비교조사

세라믹	냉각방식	예상 최대 전송 출력	비고
double disk sapphire	face cooled(FC-75)	0.5-1MW	Expensive coolant (CPI)
double disk sapphire	enhanced face cooled(FC-75)	2-5MW	Expensive coolant (MIT)
single disk sapphire	edge-cooled (LN ₂)	3-7MW	cryogenic cooling (KFK)
multi-layer sapphire and metal strip	distributed(water)	1-2MW	difficult fabrication (GA)
CVD diamond	edge cooled (water)	3-7MW	Room temperature(De Beers) (JAERI/TOSHIBA)

Artech House, 1994

4. Gyrotron Oscillators, Edited by C. J. Edgcombe, Taylor & Francis 1993
5. A. Kasugai, et. al., Conference Digest of Internation Conference on Infrared and Millimeter Waves, edited by R. J. Temkin, p. 18, 1995
6. K. Felch, et. al., IEEE Trans. on Plasma Science, 24(3), p. 558, 1996
7. G. S. Haldeman, Conference Digest of Internation Conference on Infrared and Millimeter Waves, edited by H. Freund, p. 152, 1997
8. H. E. Hafner, et. al., Conference Digest of Internation Conference on Infrared and Millimeter Waves, edited by K. Sakai and T. Yoneyama, p. 281, 1994
9. P. Norajitra, et. al., Conference Digest of Internation Conference on Infrared and Millimeter Waves, edited by R. J. Temkim. p. 475, 1995
10. A. Kasugai, et. al., Conference Digest of Internation Conference on Infrared and Millimeter Waves, edited by K. Sakai and T. Yoneyama, p. 295. 1994

11. C. P. Moeller, et. al., Conference Digest of Internation Conference on Infrared and Millimeter Waves, edited by K. Sakai and T. Yoneyama, p. 279, 1994
12. Wook-Seong Lee, private communication
13. M. Thumm, Conference Digest of Internation

- Conference on Infrared and Millimeter Waves, edited by H. Freund, 1997
- 14 O. Braz, et. al., Conference Digest of Internation Conference on Infrared and Millimeter Waves, edited by H. Freund, p. 144 , 1997



최진주

1960년 8월 31일생. 1983년 8월 서울대 물리교육과 졸업. 1985년 8월 조지아 주립대학 물리학과 졸업(석사). 1991년 5월 Univ. of Michigan 핵공학과 졸업(박사). 1991년 5월부터 1997년 8월 미해군연구소 고출력 전자파 발전기 연구

실 연구원. 현재 광운 대학교 전파공학과 조교수



김종현

1961년 12월 13일생. 1984년 2월 광운대학교 전자통신과 졸업. 1990년 6월 독일 Ruhr University Bochum, 전자공학 석사. 1994년 8월 독일 Dortmund University, 전자공학박사. 1995년 3월 현재 광운 대학교 전파공학과 조교수.본학회 편수위원



김남영

1960년 11월 14일생. 1987년 2월 광운대 전자공학과 졸업. 1991년 2월 뉴욕 주립대학(SUNY at Buffalo) 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1994년 2월 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1994년 8월까지 뉴욕 주립 대학교내 CEEM 연구소

연구원. 현재 광운 대학교 전자공학과 조교수

박건식

1955년 11월 18일생. 1978년 2월 서울대 물리교육학과 졸업. 1989년 8월 Univ. of Maryland 물리학과 졸업(석사.박사). 1987년 5월부터 1995년 8월 미해군연구소 고출력 전자파 발전기 연구실 연구원. 현 서울대학교 물리교육학과 조교수.