

논문 22-10-17

## 전자빔 다이오드 구조개선에 의한 대전력 후진파발전기의 구현

### Implementation of a High Power Backward Wave Oscillator on Electron Beam Diode Structure Improvement

김원섭<sup>1,a</sup>  
(Won-Sop KIM<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

We have designed the backward wave oscillator. A power-pulsed generator oscillated at 24 GHz has higher frequency than current one. It is very important to prevent microwave from going into the beam diode, since intense microwave will harmfully affect beam generation. Due to the axial mode operation, there exist a critical value of beam energy for the oscillation. By changing the condition at the SWS end, an enhanced performance of the K-band oversized BWO is observed in a low magnetic field region about 0.8T.

**Key Words** : Electron beam, Diode, Backward wave oscillator, Microwave,  $\pi$ -mode

#### 1. 서론

대전력 마이크로파 발생장치는 전자사이크로트론, 자이로트론, 크라이스트론, 마그네트론, 후진파발전기, 진행파관 등이 있다. 그중에서도 후진파발전기(Backward Wave Oscillator:BWO)는 전자빔을 축 방향과 평행으로 전파시켜 마이크로파를 발생시키는 원리에 의하여 간단하면서도 콤팩트한 장치의 하나로서 연구 개발 되고 있다[1]. 일반적으로 평면 도파관에서는 전자파의 전파속도인 위상속도가 광 속도보다 빠르거나 거의 같지만 전자빔의 속도는 광속도 보다 늦으므로 전자파와 전자빔의 결합이 약하여 에너지의 변화가 일어나기 어렵다. 따라서 여러 가지 형태의 주기구조를 갖는 도파관을 이용하여 전자파의 위상 속도를 광속도보다 느리게 함으로서 전자빔과 상호작용이 가능하게 되는데 이원리가 바로 후진파 발전기의 원리다. 후진파 발전기는 전자빔이 지파도파관(Slow

wave Structure : SWS) 에 축 방향으로 전파하여 수직으로 된 전자계 성분과 상호작용에 의하여 입자의 가,감속의 변화가 일어난다[2,3]. 여기서 전자빔과 SWS의 대칭축 방향으로 전개성분 전파에 필요한 모-드는 전자파  $TM_{01}$  모드이다[4,5]. 이와 같은 원리에 따라 후진파 발전기는 전자빔 발생장치와 전력 전송기기 및 에너지 변환기기 등으로 구성되며 양질의 전자빔의 발생기술에 따라 성능에 큰 영향을 받는다. 종래의 후진파발전기의 실험결과를 보면 8GHz 대의 낮은 주파수 범위에서 이루어졌는데 아직 발전의 안정성과 긴 펄스화의 발생이 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 지금까지의 연구결과보다 높은 주파수 대인 24 GHz 이상에서 발전하도록 전자빔의 질을 향상시키기 위하여 다이오드 제작에 주력하였다[6]. 다이오드는 원형으로 컵 모양을 하고 있으며 전자빔이 균일한 모양으로 발생하도록 유전체 조직인 벨벳을 부착하여 실험하였으며, 이를 이용하여 실험한 결과 비교적 양질의 전자빔이 발생되어 전파함으로서 충돌 전리 단면적의 증가와 밀도 증가가 이루어졌다. 이에 따라 발전의 안정화, 롱 펄스의 발생, 발전효율 증대, 출력증대 등을 통한 24 GHz대에서 발전하는 후진파발전기에서 대전력 마이크로파 출력을 발생시킬 수 있어 본 연구의 목표를 달성 할 수 있었다.

1. 전남도립대학 컴퓨터응용전기과  
(전남 담양군 담양읍 향교리 262)  
a. Corresponding Author : wskim@dorip.ac.kr  
접수일자 : 2009. 7. 17  
1차 심사 : 2009. 8. 20  
심사완료 : 2009. 9. 4

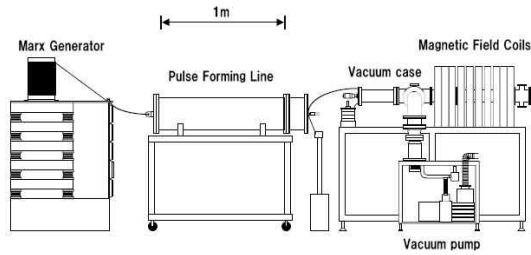


그림 1. 실험장치의 전체 모형도.  
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

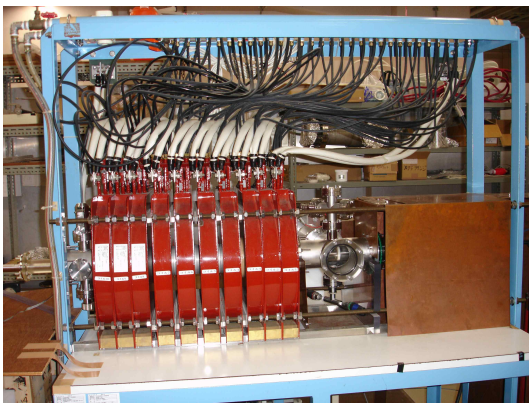


그림 2. 실험장치 사진.  
Fig. 2. Photo of experimental set up.

## 2. 실험장치의 제작과 특성

후진파발전기는 진공으로 구성된 도파관 내에서 전자 빔을 이용하여 전자파 모드와의 상호 작용에 의하여 마이크로파 출력을 발생시키는 장치이다. 그림 1에 설계한 실험 장치 모형도를 나타냈으며 그림 2에는 설계제작한 실험장치 사진을 나타냈다. 그림 1에서 보면 마르크스 제너레이터에서 고 전압을 발생시킨 후 전자 빔을 발생시키기 위하여 되도록 음극 전류로서 짧은 펄스 발생 장치가 필요하므로 펄스 형성 선로(Pulse Forming Line: PFL)를 제작하여 펄스를 발생시키고 전자총을 이용하여 전자 빔을 발생시킨다. 진공 용기안에 있는 파형모양의 지파 도파관(SWS)에 방사된 전자 빔은 축 방향으로 직선형으로 나열된 자계 코일에 의해 만들어진 전자파 모드와 상호작용에 의하여 마이크로파를 발생시킨다. 표 1에 지파도파관의

표 1. 설계 제작한 도파관 파라미터.

Table 1. Designed large diameter backward wave oscillator.

	$R_0$ [mm]	$h$ [mm]	$z_0$ [mm]	$D/\lambda$
도파관	15.7	1.7	3.4	2.3

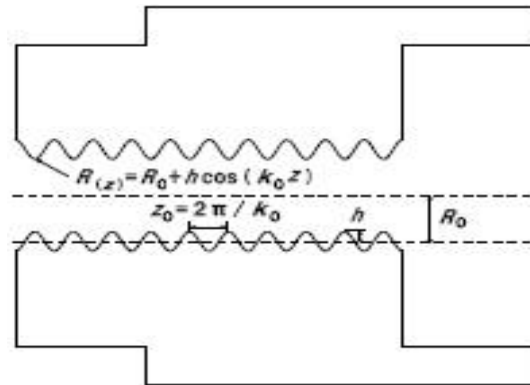


그림 3. 실험에 이용한 지파 도파관의 단면 형상.  
Fig. 3. Cross sectional view of the slow wave structure.

파라미터를 표현하였으며, 설계한 도파관의 모델을 그림 3에 나타냈다. 도파관의 끝에는 전자 빔을 회수하기 위한 역 테이퍼 모양의 금속 혼이 부착되어 있고 도파관이 들어있는 진공 파이프 끝에는 유리창 모양의 플랜지를 부착하여 마이크로파를 출력 시킨다. 출력부 전체는 전파 흡수체에 의하여 감싸이고 마이크로파 수신용 안테나와 동축 도파관 변환기가 놓여 있으며 마이크로파 출력 파형은 오실로스코프를 이용하여 관찰한다. 후진파발전기에서는 전자 빔과 전자계와의 상호작용에 의하여 마이크로파 출력이 얻어지는데 전자빔 발생이 중요하다[7]. 따라서 다음은 전자 빔의 발생 장치로서 설계 제작한 다이오드를 그림 4에 나타냈다. 그림 4(a)에는 설계 제작한 다이오드 모형이고 그림 4(b)는 음극의 표면에 부착된 벨벳에 대하여 나타냈다. 지금까지 원통형, 원뿔형, 테이퍼형 등 여러 가지 형태의 다이오드를 이용하여 전자 빔을 발생시켜 실험하였으나[8], 균일한 전자 빔의 밀도와 질적인 면에서 만족한 효과를 얻지 못했으므로, 본 연구에서는 양질의 전자 빔을 발생시킬 수 있는 컵 모양의 다이오드를 제작하였다. 그림 4(a)에서

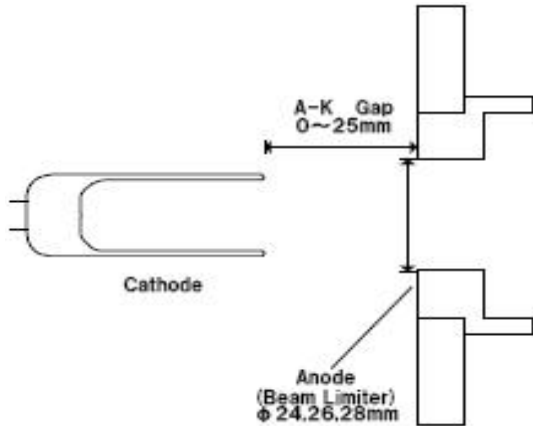


그림 4(a). 전자빔 발생장치의 다이오드의 모형.  
Fig. 4(a). Cross sectional view of the beam diode.

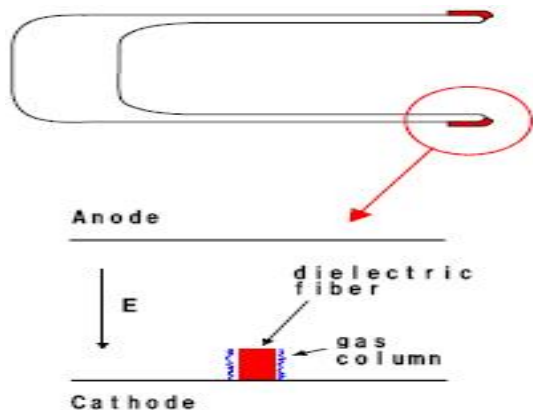


그림 4(b). 음극에 부착된 벨벳 유전체.  
Fig. 4(b). The dielectric velvet which attaches in the cathode.

보편 음극과 양극은 약 25 mm이고 전자빔의 반경은 24 mm에서 최대 28 mm까지 범위를 정하였다. 이것은 냉 음극으로서 전자 빔의 발생 형태 및 균일한 모양등은 실험을 통하여 그 결과를 얻었다. 실험에서 균일하고 일정한 크기의 전자 빔을 발생시키기 위하여 여러 가지 구상을 하였는데 그림 4(b)에서와 같이 음극 표면에 벨벳이라고 하는 유전체 물질을 부착시켜 음극 표면에서 양질의 전자 빔이 발생되도록 하였으며 이것은 미세한 가스 기둥이 형성됨으로서 균일한 전자 방출이 용이하게 된 형상을 이용한 것이다.

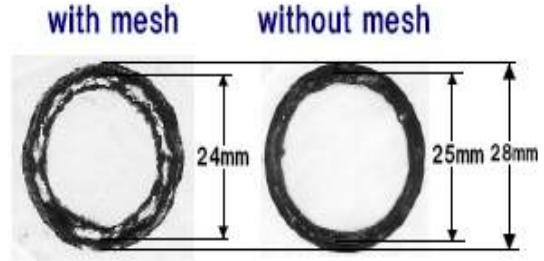


그림 5. 다이오드에서 발생된 전자빔의 모형.  
Fig. 5. Cross sectional view of the sharp edge velvet diode.

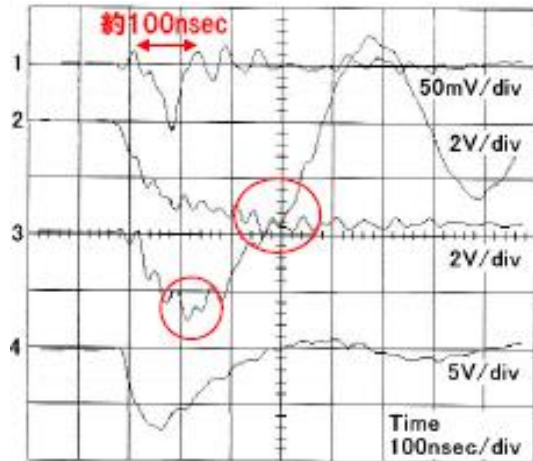


그림 6. 음극에서의 방전된 파형.  
Fig. 6. The wave shape which discharge from the cathode.

다음은 그림 5에 발생된 전자 빔의 단면도에 대하여 나타냈다. 급속으로 제작된 음극에서 발생되는 전자 빔의 형태는 음극의 형상에 따라 여러 형태로 발생되며 유전체의 벨벳이 없는 것은 균열된 모양으로 발생되지만 벨벳을 부착하여 전자 빔을 발생시켰을 때 균질한 형태를 얻을 수 있었다. 전자 빔의 크기는 설계대로 24~28 mm였으며 전자 빔의 두께가 크면 전자파와의 작용할 수 있는 폭이 넓어져 에너지의 교환이 쉽게 이루어질 수 있다 [9,10]. 그림 6은 컵 모양의 음극에서 발생된 파형을 오실스코프를 통하여 나타냈다. 1번이 마이크로 파형이고 2번은 음극전압, 3번은 전자빔의 전압이며 4번은 PFL전압을 나타냈다. 이 그림에서 음극

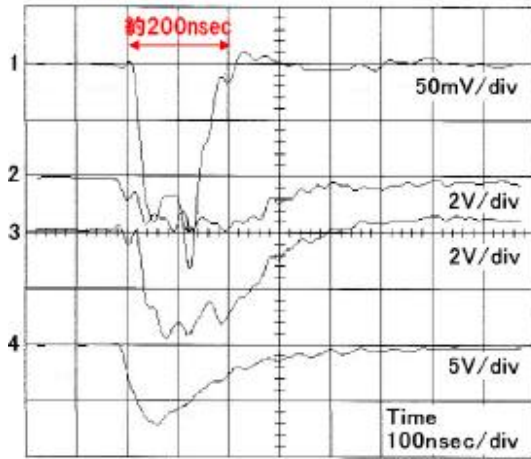


그림 7. 가스를 이용한 마이크로파 출력파형.  
 Fig. 7. A typical microwave output signals which uses the gas.

전압은 상대론적인 전자 빔을 이용하여 전자파와의 에너지의 교환에 의한 발진이 일어나기 때문에 발진 주파수가 긴 펄스를 만드는 것이 중요하다. 위의 실험결과 그림 6에서 보면 펄스 폭이 약 100 ns 정도의 결과가 얻어졌으며 이는 다이오드의 형태에 의한 동작이 개선된 것으로 판단 할 수 있고, 또한 전자 빔의 전류의 시간 간격의 차이는 200 ns 정도로 미세함을 알 수 있어 음극에서 발생된 전자 빔이 양호한 것을 알 수 있다. 그림 7은 가스를 이용하여 플라즈마의 생성 효과에 의한 마이크로파 출력을 나타냈다. 그림 6과 비교할 때 플라즈마의 효과에 의하여 마이크로파 출력이 매우 증대된 것을 알았다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 전자 빔의 발생과 플라즈마

후진파발진기는 전자 빔을 이용하여 마이크로파를 발생시키기 때문에 양질의 전자 빔이 중요하다. 다이오드는 양극과 음극으로 구성되며 고 전압을 인가하여 미세한 돌기로부터 전자가 방출된다. 따라서 본 실험은 그림 4(a)와 같은 다이오드를 제작하였고 또한 그림 4(b)와 같은 벨벳을 부착하여 음극 표면의 미세돌기로부터 표면 경계에서 전자 빔의 발생이 용이하다. 따라서 그림 5와 같은 전자 빔이 발생되는 형태를 얻었으며 측정에는 전자 빔이 발생 순간 진공관 내에 감열지를 이용하여 중

이에 나타난 현상을 측정하였다. 그림 5의 결과에서 벨벳 유전체를 부착했을 때 전자 빔의 폭이 더 크게 생성된 것은 벨벳이 표면의 미세한 구조 사이에 전자를 모아서 전자 빔을 방출하는 역할을 하며 3중점 효과에 의하여 전자 빔의 발생이 용이해지기 때문이다. 또 본 장치의 실험결과에서 보듯이 비교적 약한 전계에서도 마이크로파 발진 출력을 측정하였을 경우 가스를 이용하여 플라즈마를 발생하였을 때는 플라즈마 효과에 의하여 비교적 균일하고 용이하게 전자방출이 된 것을 알 수 있었다. 벨벳은 미세한 털이 있는 용 모양의 형질과 같은 재질로서 가열에 약하고 소모품이므로 보다 더 긴 펄스를 생성하기 위해서는 재질에 대하여 앞으로 개선해야 할 과제다.

플라즈마를 이용하여 대전력 마이크로파 출력에 있어 PFL에 의한 펄스를 발생시켜 동작시키는데 있어 도중에 순간적으로 발진이 정지하는 현상이 발생하였다. 이것은 상대론적 전자 빔을 이용한 경우 전극간에 플라즈마가 순간적으로 생성될 때 발생하는 현상으로 생각할 수 있는데 이것을 없애기 위하여 전자 빔과 벨벳에 의한 양극의 플라즈마 충돌과 음극에 쌓은 플라즈마를 생각할 수 있어 다음 실험에서 보다 더 좋은 결과를 낼 수 있어야 할 것이다.

#### 3.2 마이크로파 발진 출력의 분석

본 연구에서 지금까지의 마이크로파 발진 실험에서 K-band 후진파발진기는 약 24 GHz의 범위 내에서 실험을 하여 출력은 약 130 kW가 얻어졌고 또 40 GHz대의 범위에서 발진하는 Q-band 후진파발진기는 마이크로파 출력이 약 200 kW의 발진출력을 관측하였다. 이것을 그림 8의 그림으로 표시하였다. 여기서 보면 주파수가 높은 Q-band의 경우가 높은 출력이 얻어진 것을 알 수 있는데 마이크로파의 운동 속도로 보아 이결과는  $\pi$  모드 근처에서 동작점의 군 속도가 보다 작아지기 때문이 아닌가 생각된다. 위와 같은 것을 개선하고 보다 높은 출력의 K-band 후진파발진기의 대전력의 발생을 위하여 80 keV의 전자 빔에 에너지와  $\pi$  모드에서 발진이 일어나는 점을 분산관계식  $R_{(z)}=R_0+h\cos(K_0z)$ 을 이용하여 파수와 주파수와의 관계로 나타내 분석한 결과가 그림 9에 나타났다.

그림에서 보면  $\pi$  모드에 근접할 수록 빔 에너지가 점점 변화하여 여기된 군속도의 전자파 모드가 최고점인 24 GHz 부근에서 후진파발진기의 효과적인 발진이 이루어져 마이크로파 출력 값이 얻어진 것으로 분석된다

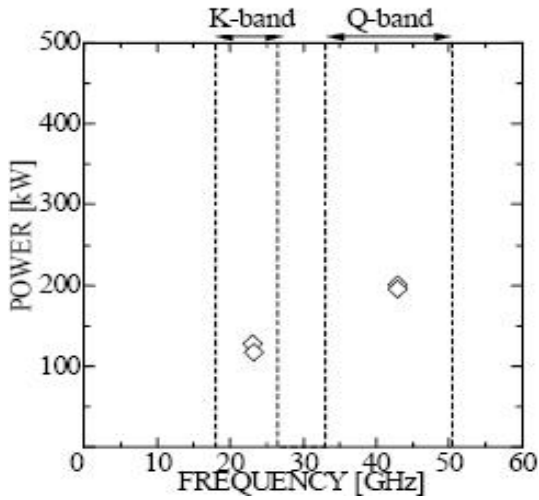


그림 8. K-band와 Q-band를 통한 마이크로파 발진 출력.

Fig. 8. The microwave oscillation output which leads K-band and Q-band.

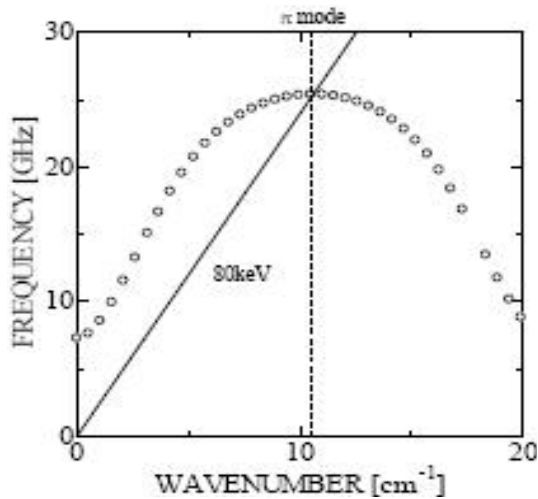


그림 9. 빔에너지 80 kV의 지파도파관 분산관계.  
Fig. 9. Dispersion relation of slow wave structure beam energy for 80 kV.

실험결과를 이용하여 설계 제작한 도파관의 발진 출력의 개선과 발진 특성의 비교 분석을 하여 그림 10에 나타냈다. 도파관의 크기는 20주기를 이용하였으며 자계 B=0.8T이고 음극은 컵 모양의 형상을 이용하였으며 음극과 양극간 거리는 9 mm에

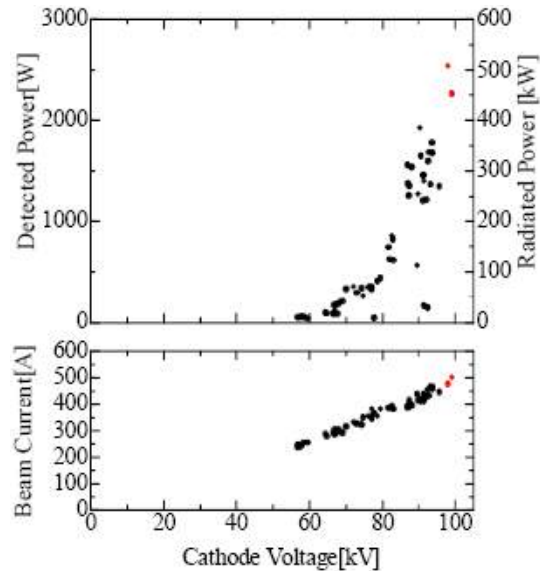


그림 10. 지파도파관의 발진 출력 특성 분석.

Fig. 10. Analysis oscillation output of slow wave structure.

벨벳을 부착하였다. 빔 전류는 음극 인가 전압 80 kV에서 약 400A정도가 얻어졌으며 방사출력은 최대 500 kW가 얻어졌다. 여기서 볼 때 축 방향의 모드 변화에 따른 출력 변화는 크게 나타나지 않았으며 이것은  $\pi$  모드에 가까울수록 군 속도의 절대치가 작아져 축방향 모드의 분포가 높은 밀도를 갖게 되는 부분에서 발진이 일어나는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 대 전력 펄스 파워 발생기의 개발을 위하여 후진파발진기를 설계·제작하였다. 연구 결과를 종합하면 균일하고 보다 좋은 양질의 전자 빔을 발생시켜 마이크로파 출력을 얻기 위하여 다이오드를 컵 모양으로 개선하였으며 그 결과 양질의 전자빔을 얻어 마이크로파 출력을 증대시켰다. 이것은 컵모양의 다이오드에 벨벳을 부착시켜 전자 빔을 발생케하여 전자파와의 상호작용의 효과를 가져와 빔 에너지 80 kV에서 주파수 24 GHz부근에서 최대출력 500 kW를 얻었다. 또한 생성된 플라즈마에 의하여 마이크로파 출력이 증대되는것을 확인하였으며 이는 발진시간이 증대되는

**표 2.** 실험 결과와 X-band 후진파발전기의 비교.  
**Table 2.** Experimented large diameter backward wave oscillator compared with that in the X-band backward wave oscillator.

	X-band BWO	Large diameter BWO
radius	0.8 cm	2.8 cm
energy	45 kV	80 kV
frequency	8.49 GHz	24 GHz
spatial growth rate	8.8	0.9
temporal growth rate	0.18	0.02

경향을 알았다. 이것은 발전영역이  $\pi$  모드 부근에서 군 속도를 작게하여 동작하도록 함으로서 발생된 전자 빔과 전자파와의 상호작용에 의한 대전력 마이크로파 출력이 발생하였으며 비교적 낮은 자장과 콤팩트한 후진파발전기의 개발에 대하여 설명할 수 있었다. 지금까지의 선행된 후진파발전기의 연구 결과는 낮은 주파수인 8 GHz 대역에서 발전하는 X-band BWO에서 이루어졌는데[11], 본 연구결과와 비교하여 표 2에 표시하였다.

결과를 보면 전자 빔의 반경과 발전 주파수, 그리고 빔 에너지가 본 연구결과가 더 크며 정해진 길이에서 발전조건을 결정하는 시간적 성장률은 작지만 공간적 성장률에 대한 결과는 차이가 나지 않았다. 따라서 본 연구결과를 활용하면 작고 간단하며 효율 좋은 대전력 마이크로파 출력장치를 만들 수 있을 것으로 생각되며 이를 이용하면 차세대 에너지개발 및 재료가공과 핵융합 가열장치등 많은 응용분야에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 논문은 일본 Niigata of Univ.의 핵융합과학 연구센터의 Ogura Kazuo 교수와 연구진의 도움으로 진행된 연구 결과입니다.

### 참고 문헌

[1] M. R. Amin, K. Minami, K. Ogura, X. Z. Zheng, and T. Watanabe, "Resonance enhancement of radiation from a backward

wave oscillator utilizing large diameter corrugated metal structure", J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 64, p. 4473, 1995.

[2] W. S. Kim, K. Mianmi, K. Ogura, H. Inada, and T. Watanabe, "Design study of a large diameter backward wave oscillator operating at 24 GHz", J. of Plasma Fusion Research Jpn., Vol. 72, p. 338, 1996.

[3] N. Vlasov, A. G. Shkvarunets, J. C. Rodgers, Y. Carmel, T. M. Antonsen, T. M. Abuefadl, D. Lingze, V. A. Cherepenin, G. S. Nusinovich, M. Botton, and V. L. Granatstein, "Overmoded GW-class surface-wave microwave oscillator", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 28, p. 703, 2000.

[4] K. Ogura, R. Yoshida, Y. Yamashita, H. Yamazaki, K. Komiyama, and M. Sakai, "Study on oscillation starting condition of K-band oversized backward wave oscillator driven by a weakly relativistic electron beam", J. Plasma Fusion Res., Vol. 6, p. 703, 2004.

[5] K. Ogura, R. Yoshida, K. Komiyama, M. Sakai, and H. Yamazaki, "Experimental demonstration of mode change in a oversized backward wave oscillator due to corrugation number", IEEE Trans. FM, Vol. 124, p. 456, 2004.

[6] H. Oe, K. Ogura, K. Bansho, H. Iizukaname, A. Sugarawa, and W. S. Kim, "Experimental Study on Disk Type Cold Cathode in Weakly Relativistic Energy Region", International Congress on Plasma Physics, p. 233, 2008.

[7] O. Watanabe, K. Ogura, T. Cho, and M. R. Amin, "Self-consistent linear analysis of slow cyclotron and cherenkov instabilities", Phys. Rev. E, Vol. 63, p. 6503, 2001.

[8] K. Hahn, M. Hail, I. Fuks, and E. Schamiloglu, "Initial studies of a long pulse relativistic backward wave oscillator utilizing a disk cathode", IEEE Trans. on Plasma Sci., Vol. 30, p. 303, 2002.

[9] K. Ogura, K. Komiyama, M. Sakai, D. Yamada, H. Saito, and H. Yamazaki, "Performance of weakly relativistic oversized backward wave oscillators", J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 72, p. 2437, 2003.

- [10] K. Ogura, Y. Miyazawa, H. Tanaka, Y. Kiuchi, S. Aoyama, and A. Sugawara, "Weakly relativistic K-band oversized backward wave oscillator with bragg reflector at beam entrance of slow wave structure", Plasma Fusion Res., Vol. 2, No. S1041, 2007.
- [11] S. Kobayashi, M. Botton, Y. Carmel, T. M. Antonsen, J. Rodgers, A. G. Shkvarunets, and V. L. granatstein, "Electromagnetic properties of periodic cavities coupled as a radiating antenna", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 26, p. 947, 1998.