

## 마이크로파 자유전자 레이저의 제작 및 동작특성 연구

이관철 · 정기형

서울대학교 원자핵공학과

(1992년 2월 13일 받음)

Marx generator와 진공 다이오드, Bifilar helical wiggler, 인도자장 솔레노이드 등을 이용하여 마이크로파 영역의 자유전자 레이저를 설계 제작하였다. Bifilar helical wiggler의 자장분포를 분석하였고 공간전하의 수직성분 효과를 고려하여 계산한 전자궤적 모의실험을 통하여 Wiggler 자장이 전자빔 입사에 적합함을 확인하였다. Wiggler 자장 300 G, 인도자장 4.4 kG, 전자빔 에너지 170 keV일때 분산방정식에 의하여 계산된 출력 주파수는 약 11 GHz였고 실험 결과 나타난 출력 주파수의 범위는 9.78 GHz~11.7 GHz로 추정되었다. 전자 속도의 축방향 퍼짐을 고려하여 이론적으로 이득을 계산하였다.

### I. 서 론

상대론적인 전자빔을 전장 또는 자장에 의하여 주기적인 운동을 하게 함으로써 발생하는 전자기파를 증폭하여 가간섭성 광파를 생성하는 자유전자 레이저는 최근 20여년 사이에 이론과 실험적 연구에 있어 급속한 성장을 거듭해 오고 있다. 자유전자 레이저는 전자빔의 에너지와 펌프장의 주기 및 세기등을 변수로하여 마이크로파에서 자외선까지 연속적인 파장에서 증폭이 가능하고 출력과 효율이 기존의 레이저에 비해 월등하다는 장점을 갖고 있기 때문에 물리학, 화학, 생물학연구 및 의술용의 새로운 광원으로 사용되어질 수 있으며 핵융합 장치의 부가열인 electron cyclotron resonance와 같이 mm파장 영역에서 10 MW 이상의 출력을 필요로하는 장치에도 사용할 수 있는 등<sup>[1]</sup> 응용 범위가 넓다는 가능성을 지니고 있다.

자유전자 레이저는 전자빔의 성질과 펌프장의 성질에 따라 전자빔의 밀도가 낮은 콤프턴 영역, 전자빔의 밀도와 이득이 높은 라만 영역, 고이득 콤프턴 영역의 세 가지 종류로 나누어 진다.

자유전자 레이저를 구성하는 주요 장치들로는 첫째로, 전자빔의 에너지, 전류, 펄스폭, 퍼짐성 등을 조절하는 전자 가속기가 있고 둘째로, 전자빔을 펌프장으로 유도하는 자장이나 빔광학 장치들이 있고 셋째로, 전자빔에 펌프장을 제공하는 wiggler가 있고 넷째로, 발생된 빛을 이끌어 내는 광학 장치들이 있다.

본 연구에서는 전자 가속기로서 고전압 펄스 발생 장치인 Marx generator, 질이 높은 전자빔을 발생 하도록 설계된 전계 방출용 진공 다이오드, 원형 편광된 펌프장을 제공하는 bifilar helical wiggler, 축방향 인도자장을 발생하는 솔레노이드 등을 이용하여 마이크로파 영역의 진동수에서 발진하도록 실험 장치를 제작하여 그 동작 특성을 연구하였다.

### II. 이 론

#### 1. Bifilar helical wiggler의 자장 분포

본 연구에서 제작한 bifilar helical wiggler는 자유전자 레이저 초기 개발 실험에서<sup>[2]</sup> 주로 이용되었던 wiggler로서 그림 1과 같이 두개의 나선형으로 감긴 도선에 반파장 간격으로 서로 반대방향으로 전류를 공급하여 중심축에서 z방향 자장은 서로 상쇄되어 없어지고 그림 2와 같이 원형 편광된 수직성분의 자장이 분포하도록 되어 있다. 이와같은 bifilar helical wiggler의 자장 분포는 해석적으로 구할 수 있다. 그림 1과 같은 전류 분포는 원통좌표계로 다음과 같이 표현된다.

$$J(r) = \frac{I}{k_w a} (\hat{e}_z + k_w a \hat{e}_\phi) \delta(r-a) \left[ \delta\left(z - \frac{\Phi}{k_w}\right) - \delta\left(z - \frac{\Phi + \pi}{k_w}\right) \right] \quad (1)$$

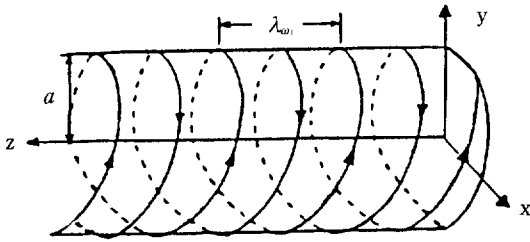


Fig. 1. Bifilar helix.  
( $a = 16 \text{ mm}$ ,  $\lambda_w = 36 \text{ mm}$ ,  $N = 25$ ,  $I = 3600 \text{ A}$ ,  $B = 300 \text{ G}$ ).

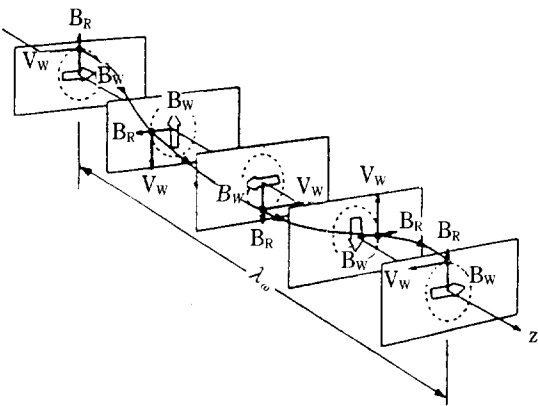


Fig. 2. Circularly polarized magnetic field.

where,  $k_w = \frac{2\pi}{\lambda_w}$ .

이때 Maxwell 방정식에 의하여 자장을 구하면 Bessel 함수를 포함하는 series로 r에 관한 4차항까지만 고려한 [3] 결과식을 계산한 값과 측정된 값을 그림 3에 나타내었다. 코일 반경이 일정한 영역에서는 측정치와 계산치가 비교적 잘 일치하는데 반경이 변하는 앞쪽에서는 측정치가 계산치보다 적은 것을 알수 있다. 이는 식(1)이 그림 1처럼 일정한 반경으로 무한히 긴 경우라 가정하고 유도하였기 때문에 실제값과 차이를 이루는 것으로 해석된다. 그러나 wiggler 자장이 서서히 증가하므로 (adiabatic region) 전자빔이 입사되는데 적합한 자장형태를 나타내고 있다.

**2. 분산 방정식과 출력주파수**

이상적으로 축방향 속도 퍼짐이 적은 전자빔으로 가정한 모델<sup>[4]</sup>을 택하여 선형섭동이론(linear perturbation theory)과 Poisson 방정식을 이용하여 분산 방정식을 구하면 다음과 같다.

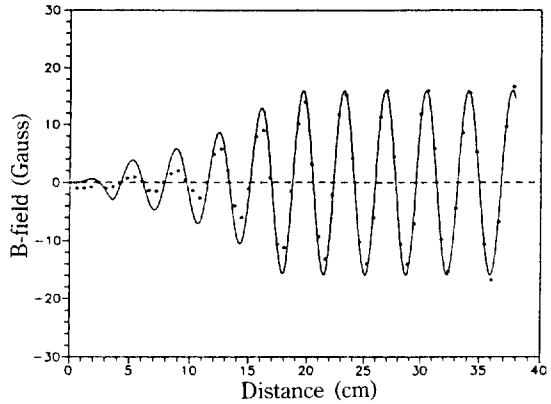


Fig. 3. Wiggler magnetic field(\*-measured, line-calculated).

Table 1. Parameters of the dispersion relation.

$\omega_p$	$11.6 \times 10^9$	rad/sec
$k_w$	1.745	$\text{cm}^{-1}$
$\Omega_p$	$3.88 \times 10^9$	rad/sec
$\Omega_o$	$56 \times 10^9$	rad/sec
$v_o$	$1.978 \times 10^{10}$	cm/sec
$v_{11}$	$1.962 \times 10^{10}$	cm/sec
$\beta_w$	0.0837	
$\omega_c$	$39.8 \times 10^9$	rad/sec

$$\Omega_w^2 \left[ \frac{\Omega_o - k_w v_{11}}{\gamma^2 \Omega_w} \beta_w v_{11}^2 \omega_p^2 + (\omega - k v_{11})^2 \right] = [(\Omega_o - k_w v_{11})^2 - (\omega - k v_{11})^2] \times \left[ (\omega - k v_{11})^2 + \frac{\omega_p^2}{\gamma v_{11}^2} \right] \quad (2)$$

where,  $\Omega_{a,w} = \left| \frac{eB_{a,w}}{\gamma mc} \right|$ ,  $\omega_p = \left( \frac{4\pi e^2 n_o}{m} \right)^{1/2}$ ,  $\beta_w = \frac{v_w}{c}$

여기서 wave number matching조건<sup>[5]</sup>  $k_{cs} = k_{cm} + k_w$ 을 적용하고 TE<sub>11</sub>의 wave guide mode  $\omega^2 = c^2 k^2 + \omega_c^2$ 와 함께 table 1과 같은 실험 변수를 대입하여 나타낸 것이 그림 4이다. 그림에서 위의 두직선은 weak coupling을 일으키는 positive energy beam mode들이고<sup>[6]</sup> strong coupling을 일으키는 아래쪽 negative beam mode 중 instability region은 wave의 군속도(group velocity)가 전자빔의 속도보다 빠른  $6\omega_p$  부근에 있음을 알 수 있다. 이것은 약 11 GHz에 해당한다.

**3. 전자속도의 퍼짐에 의한 영향**

이상에서는 전자빔 속도의 축방향 성분 퍼짐은 고려하지 않았으나 진공다이오드의 구조에 의해 생겨나는

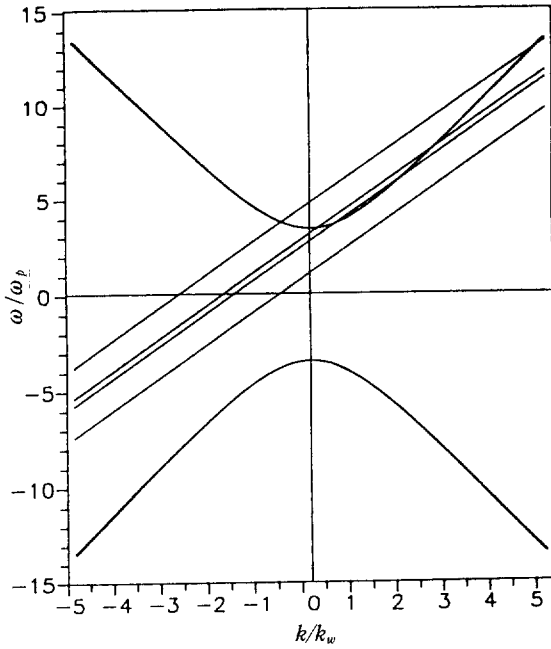


Fig. 4. Dispersion relation of the FEL.

$\delta\epsilon_z$ 는 normalized emittance,  $\epsilon_N$ 으로 부터 다음과 같은 관계식을 통해 구할 수 있다.<sup>[7]</sup>

$$2\left(\frac{\delta\gamma}{\gamma}\right)_{11} = \frac{(\epsilon_N/r_b)^2}{1+a_w^2} \quad (3)$$

where,  $a_w = \gamma \frac{v_w}{v_{11}}$ ,  $r_b$ : beam radius.

이때 전자의 속도 분포를 Gaussian으로 가정하고 실험 변수를 대입하여 지수적 이득을 구하면<sup>[8],9]</sup>  $8 \times 10^7$  ( $\text{sec}^{-1}$ ) 이나 공진기가 없는 경우 wave가 wiggler를 지나가는 시간  $T=4 \times 10^{-9}$  sec이기 때문에 지수적인 증폭이 약 1.3배 정도로 미약하다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 전자궤적 모의 실험

전자빔이 wiggler와 guide solenoid에 의한 자장속을 통과할때, 공간전하에 의한 수직성분의 전장을 고려하여 그 궤적을 시뮬레이션 프로그램을 통하여 계산하였다. 계산 결과는 그림 5, 6, 7에 나타나 있다. 중앙의 전자는 축방향으로 진행함에 따라 반경이 서서히 증가하다가 일정해진 나선 모양의 궤적을 그리지만 (그림 5), 외곽에 있는 전자는 중앙의 전자빔에 의해 발생한  $E_z$ 과  $B_z$ 에 의해  $E_z \times B_z$ 의 azimuthal drift와 wiggler field에 의한 나선모양의 궤적을 동시에 보여주고 있다(그림 6). 이는 Columbia대학의 모의 실험 결과와 유사한 것이다.<sup>[10],11]</sup>

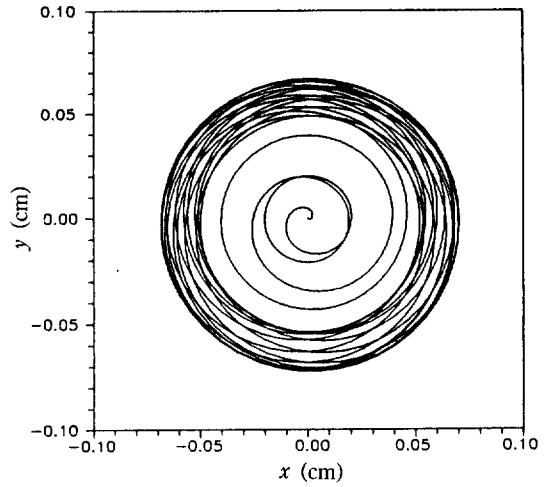


Fig. 5. Trajectory of a center electron.

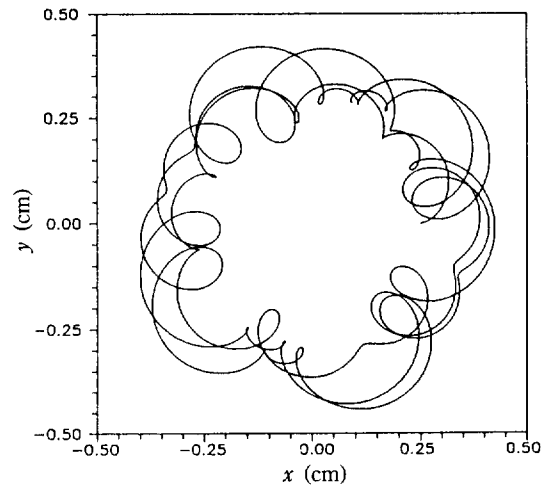


Fig. 6. Trajectory of an outer electron.

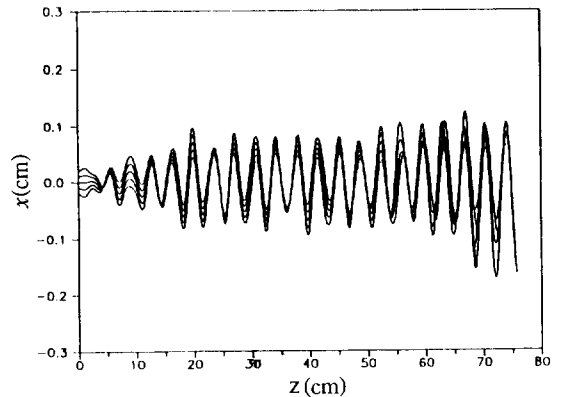


Fig. 7. Electron beam trajectory.

그림 7은 중앙에 분포한 전자빔이 축방향으로 진행함에 따라 나선 모양의 궤적을 그리는 것을 나타내고 있다.

### III. 실험장치

그림 8은 장치의 전체적인 구성도를 나타내고 있다. drift tube를 통과한 전자빔은 bending magnets에 의해 접지로 보내진다. 실험에 사용한 Marx generator는 SNUT-79 tokamak의 중성빔 입사장치 용으로 사용되던 것으로서<sup>[12]</sup> 충전용 인덕터를 저항으로 교체하여 최고 전압 200 kV까지 작동하도록 하였다.

#### 1. 진공 다이오드

축방향 전자빔 퍼짐을 최소한으로 줄인, 낮은 emittance 전자빔을 발생시키기 위하여 그림 11과 같은 구조<sup>[13]</sup>의 진공다이오드를 제작하였고 진공용기의 압력은 내시 간 펌프 가동 후  $2 \times 10^{-5}$  Torr에 도달하였다. Cathode shank는 스텐레스강, anode는 graphite이고 전자빔 발생부분에는 graphite보다 균일한 전자빔을 발생시키는 것으로 알려진 Velvet을 사용하였다.<sup>[14][15]</sup> Velvet의 모양<sup>[16]</sup>은  $1 \text{ cm}^2$ 당  $12 \times 12$ 개의 다발에 길이 1 mm의 섬유가 40여개씩 심어져 있고 70% acetate, 30% nylon의 성분으로 구성되어 있다. 이러한 모양의 부도체가 전자의 전계방출에 있어 보다 나은 특성을 나타내는 것은 바늘 형태의 섬유의 끝 부분에서 형성된 강한 전장으로 인해 전자들이 고르게 방출되기 때문인 것으로 믿어진다. 그림 9에 스탠포드 대학에서 만들어진 e-gun code<sup>[17]</sup>를 사용하여 전자빔의 전류, perveance,  $\epsilon_N$ 과 빔케적을 계산하여 나타내었다. 전자빔의 퍼짐을 막기위한 인도자장의 세기가 5.5KG에서 인가전압이 170 kV일때  $\epsilon_N$ 이 최소가 되어  $47 \pi \cdot \text{cm mrad}$ 이 되었다(그림 9). 이때 cathode에서 발생한 전자빔의 전류는 213 A이고 perveance는 3.048 micro perveance이다. 이로부터 전자빔의 전류밀도를 계산하였고 인도자장을 Cathode 영역까지 인가하여

빔 광학적으로 안정한 confined flow<sup>[18]</sup>를 발생하도록 하였다.

#### 2. 인도자장 솔레노이드

인도자장 솔레노이드는 길이 1 m, 외경 120 mm의 PVC파이프에 3.2 mm의 에나멜 동선을 500회 감아 제작하였다. 그림 10은 직류 전류 1.8 A일때 중심축에서 축방향 자기장 크기를 측정치와 계산치를 비교하여 나타내고 있다. 솔레노이드 펄스전원회로의 전압-전류 관계와 그림 10의 전류-자장 관계에서  $B = 3.9 V_s [G]$ 이고  $V_s$ 가 1200 V일때 인도자장은 4.68 kG이다.

### IV. 결 과

그림 13은 충전전압  $\pm 19 \text{ kV}$ 에서 황산구리 저항을 load로 사용했을때 Marx generator의 전압파형이고 그림 14는 빔발생시의 Marx generator의 전압파형이다. 발전된 마이크로파를 측정하기 위하여 만든 cascade high-

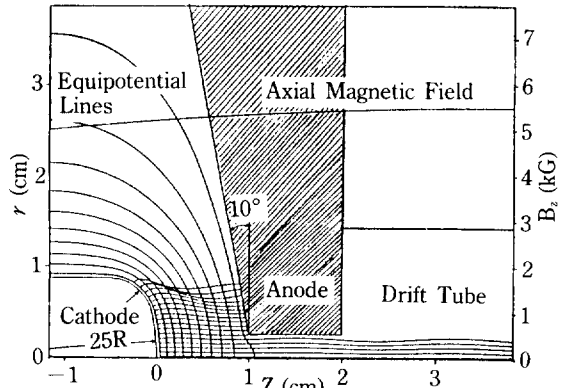


Fig. 9. Electron trajectory in vacuum diode. ( $V = 170 \text{ kV}$ ,  $B_z = 5.5 \text{ kG}$ ).

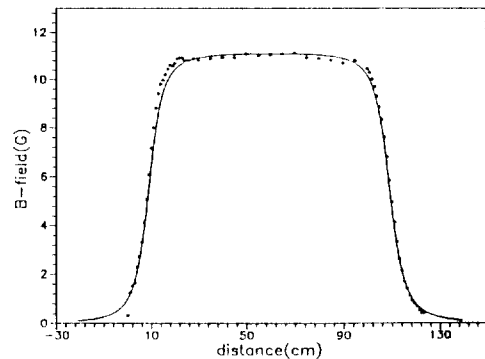


Fig. 10. Magnetic field of guide solenoid.

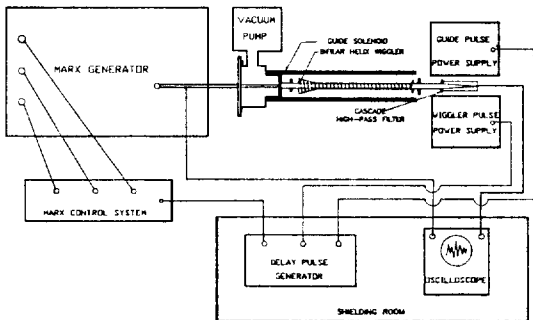


Fig. 8. The free electron laser system.

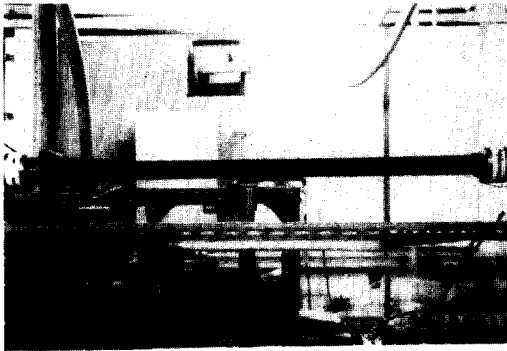


Fig. 11. Bifilar helical wiggler with vacuum diode.

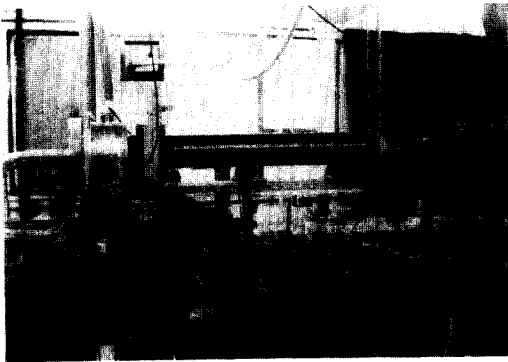


Fig. 12. 실험 장치 전체의 모습.

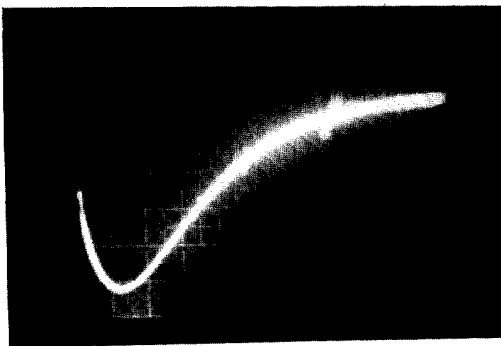


Fig. 13. 황산구리 load일때 Marx generator의 전압 파형. (36 kV/div, 100  $\mu$ sec/div).

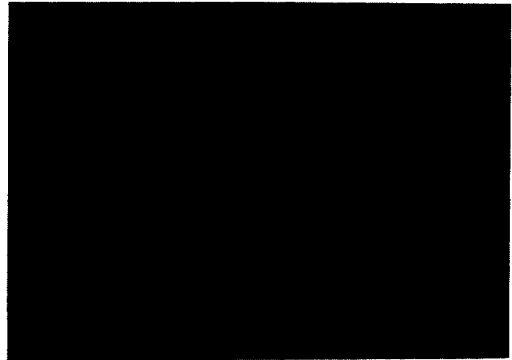


Fig. 14. 전자빔 발생시 Marx generator의 전압 파형. (36 kV/div, 10  $\mu$ sec/div).

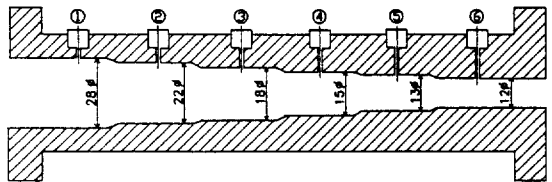


Fig. 15. Microwave detector.

Table 2. Cut-off frequency and frequency range of detector. ( $f_c = c/3.41r$ )

Channel	$r$ [cm]	$f_c$ of TE <sub>11</sub> [GHz]	frequency range [GHz]
(1)	1.4	6.28	6.28~ 8.00
(2)	1.1	8.00	8.00~ 9.78
(3)	0.9	9.78	9.78~11.7
(4)	0.75	11.7	11.7 ~13.5
(5)	0.65	13.5	13.5 ~14.7
(6)	0.6	14.7	

②, ③의 전압파형이다. 그림 18은 인도자장만 있는 상태에서 probe ③, ④의 전압파형이고 그림 19는 wiggler 자장을 인가했을 때의 probe ③, ④의 전압파형이다. 그림 14에서 전자빔이 발생된 시간폭은 약 5  $\mu$ sec로 관측되고 그림 16~19에서 전압파형이 초기 3  $\mu$ sec 동안에 두드러지게 나타났음을 알 수 있다. 전자빔의 전류를 측정하기 위해 로고프스키코일<sup>[19]</sup>과 패러데이컵을 제작하였으나 모두 noise 마이크로파와 coupling되어 측정을 하지 못하였다. 펄스 측정은 Tektronix 2430 digital storage oscilloscope를 사용하였으며 140 kHz 주파수를 갖는 감쇠진동은 빔발생시 전하가 접지로 흘러나갈 때

pass filter의 구조와 특성이 그림 15와 표 2에 표시되어 있다. 실험결과 측정된 probe의 전압파형이 그림 16~19에 나타나 있다. 그림 16은 인도자장만 있고 wiggler 자장이 없는 상태에서 probe ②, ③에 나타난 전압파형이고 그림 17은 wiggler 자장을 인가한 상태에서 probe

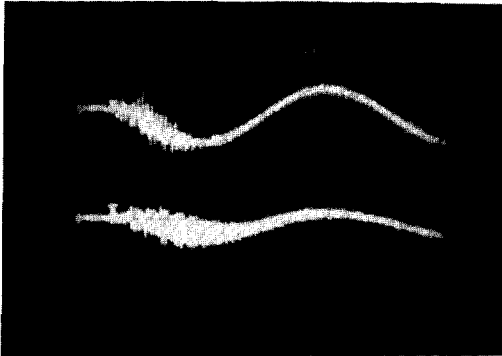


Fig. 16. Voltage pulses of channel ②, ③.

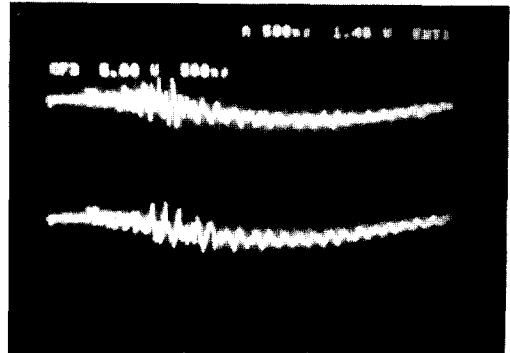


Fig. 18. Voltage pulses of channel ③, ④.

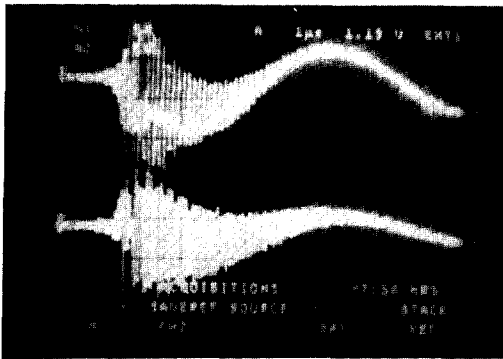


Fig. 17. Voltage pulses of channel ②, ③.

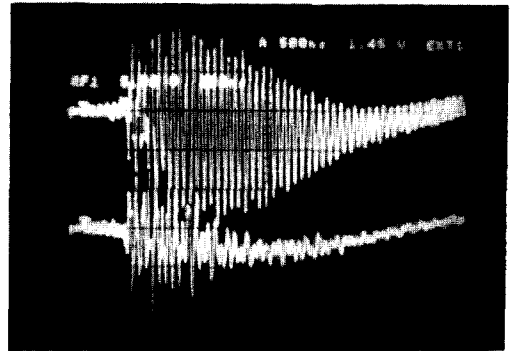


Fig. 19. Voltage pulses of channel ③, ④.

접지의 저항과 인덕턴스에 의한 영향이라고 생각된다. 그림 16~19를 통하여 wiggler 자장에 의하여 발생한 마이크로파가 probe ②에서 대부분 cut-off되어 줄어든 것을 알 수 있다.

### V. 결 론

Marx generator에 의하여 발생한 170 kV의 전자빔을 이용하여 마이크로파 영역의 자유전자 레이저를 설계 제작하였다. Bifilar helical wiggler의 자장을 이론적으로 구한 값과 측정값을 비교 분석하여 그 분포가 전자빔 입사에 적합함을 확인하였다. 수직방향 공간전하에 의한 효과를 고려한 전자궤적을 모의실험하여 전자가 인도자장과 wiggler 자장에 의하여 helical 모양의 궤적을 그리는 것을 알 수 있었다. 전자 속도 분포의 축방향 퍼짐을 고려하여 계산된 이득은 약  $3 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ 이고 분산방정식에 의하여 유도된 출력 주파수는 약 11 GHz이며 실험결과 발생한 마이크로파의 주파수 범위는 9.78 GHz~

11.7 GHz로 추정된다. 본 연구에서 제작한 자유전자 레이저의 출력 증강을 위한 개선책으로 전계방출 진공 다이오드를 열전자총 (Thermionic electron gun)으로 바꾸어 emittance를 줄여 라만 영역의 고이득 레이저로 개선하는 방법<sup>[20]</sup>과 전자빔의 에너지를 높이는 방법 혹은 공진기를 설치하는 방법 등이 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] Victor L. Granastein, Igor Alexeff, *High-Power Microwave Sources*, norwood (1987).
- [2] D. A. G. Deacon, L. R. Elias, J. M. J. Maday, *et al.*, Phys. Rev. Lett., **38**, 892 (1977).
- [3] S. Y. Park, J. Appl. Phys., **53**, 1320 (1982).
- [4] H. P. Freund, Phys. Rev. A, **28**, 1835 (1983).
- [5] T. Kwan et al., Phys. Fluids, **22**, 1089 (1979).
- [6] C. W. Roberson, P. Sprangle, Phys. Fluids B, Vol. 1, No. 1, January 3' (1989).
- [7] T. C. Marshall, *Free Electron Laser*. New York

- 103 (1985).
- [8] T. C. Marshall, *Free Electron Laser*, New York 81 (1985).
- [9] Akira Hasegawa and Kunioki Mima, *Appl. Phys. Lett.*, **29**, 542 (1976).
- [10] T. C. Marshall, *Free Electron Laser*, New York 91 (1985).
- [11] A. Grossman, "A New Millimeter FEL Using the Cyclotron-Undulator Interactions of Relativistic Spiralling Electrons", Thesis, Columbia Univ. Dept. of Physics (1982).
- [12] 황 순모, "중성빔 입사 장치의 음이온원 개발에 관한 실험적 연구", 박사학위논문, 서울대학교 (1987).
- [13] R. H. Jackson et al., *IEEE Vol. QE.*, **19**, 346 (1983).
- [14] G. Bekefi et al., *J. Appl. Phys.*, **62**, 1564 (1987).
- [15] D. A. Kirkpatrick et al., *J. Appl. Phys.*, **57**, 5011 (1985).
- [16] R. J. Adler et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **56** 766 (1985).
- [17] William B. Herrmansfeldt, *Electron Trajectory Program*, stanford (1979).
- [18] Samuel Y. Liao, *Microwave Electron Tube Devices*, California (1988).
- [19] Adolf J. Schwab, *High-Voltage Measurement Techniques*, M.I.T. Press, Mass. 180 (1972).
- [20] J. Fajans, G. Bekefi, Y. Z. Yin and B. Lax, *Phys. Fluids* **28**, 1995 (1985).

## Construction of a Microwave Free Electron Laser and Studies of Its Characteristics

Kwan-Chul Lee and Kie-Hyung Chung

*Department of Nuclear Engineering, Seoul National University*

(Received February, 13, 1992)

A microwave free electron laser which consists of Marx generator, vacuum diode, bifilar helical wiggler, and guide solenoid was designed and constructed. The analysis of the magnetic field distributions of the bifilar helical wiggler and computer simulation of electron trajectories with the perpendicular effect of space charges led to the conclusion that the magnetic field distributions are suitable for the electron beam injection. Output frequency in a single  $TE_{11}$  mode derived from the dispersion relation with parameters of 300 G wiggler field, 4.4 kG guide field, and 170 keV electron beam energy was about 11 GHz. And this agreed with the frequency range of 9.78 GHz~11.7 GHz deduced from the experimental result. The gain was calculated by considering the effect due to the axial spread of the electron velocity distribution.