

## CO<sub>2</sub> 레이저 주파수 측정용 점접촉 MIM 다이오드

Point-Contact MIM Diode at CO<sub>2</sub> Laser Frequencies

조재홍, 윤태현, 박정환\*, 원종욱\*

한국표준연구소 레이저실

### 초 목

점접촉 MIM (Metal-Insulator-Metal) 다이오드는 레이저 광속의 검출기, 고조파 발생기 및 믹서로 사용되며, 그 검출범위가 수십 THz의 주파수 영역까지 가능하다. 이러한 MIM 다이오드의 여러가지 변수들에 대한 감응도를 측정하였으며, 이들의 특성을 조사하기 위한 광원으로는 10P(36) line의 CO<sub>2</sub> 레이저 광속을 이용했다. 또한 제작된 점접촉 MIM 다이오드를 이용하여 두 CO<sub>2</sub> 레이저 사이의 주파수 차이에 의한 맥놀이 주파수를 측정하였다. 그리고 MIM 다이오드에서 발견된 초퍼의 초핑 주파수에 의한 비선형 현상을 논하였다.

### I. 서 론

레이저 광속의 검출기, harmonic generator 및 믹서로 사용되는 것에는 주로 MIM 다이오드,<sup>(1,2)</sup> Schottky 다이오드 및 SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) 다이오드가 있다.<sup>(3-5)</sup> 이 중에서 SIS 다이오드는 접합을 만든 후에 극저온과 상온사이를

왕복하게 되면 접합이 파괴되는 수가 많기 때문에 잘 사용되지 않으며, Schottky 다이오드의 검출범위는 수 THz 정도로 검출범위가 넓지 못하다. 그러나 MIM 다이오드는 substrate 표면에 생긴 산화막에 날카로운 팁을 접촉시켜야 하기 때문에 접촉압력에 따라 검출한 신호의 크기가 달라지는 단점이 있지만 수십 THz 영역의 주파수를 검출할 수 있으며, 응답시간이 매우 짧은 장점을 갖기도 한다.<sup>(6)</sup> 이 점접촉 MIM 다이오드는 날카로운 whisker가 레이저 광속을 수신하는 안테나의 기능을 가지며, 더불어 비선형 DC 전류-전압 특성을 나타내기 때문에 적외선 영역에서부터 가시영역까지의 검출기, harmonic generator 및 믹서로 사용된다.

### II. MIM 다이오드 제작 및 실험 방법

지름이 25  $\mu\text{m}$ 인 텅스텐 선을 골게 퍼서 30 wt%의 KOH 수용액에 전기화학 에칭법으로 한쪽 끝을 날카롭게 에칭한다.<sup>(7)</sup> 에칭된 부분의 길이는 약 65  $\mu\text{m}$ 로서 그림 1은 에칭한 텅스텐 whisker를 보여준다. 또한 MIM 다이오드의 substrate로는 Ni, Co, Cu 및 Au를 사용하였으며, 지름 2 mm, 길이 1 cm인 봉으로 다이오드 마운트에 맞게 제작하였다.

그림 2는 10P(36) line에서 발진하는 CO<sub>2</sub>

\* Permanent address : 17-44, Domadong, Seoku, Taejon 302-160, Korea

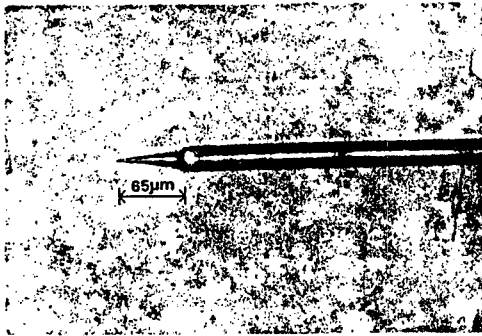


Fig. 1. The magnified photograph of tungsten whisker (etching length: 65  $\mu\text{m}$ , diameter: 25  $\mu\text{m}$ ).

레이저 광속에 대한 각 substrate 별로 감응도를 조사하기 위한 실험장치이다. 먼저 오실로스코프 상에 나타난 점접촉 MIM 다이오드의 전류-전압 곡선의 기울기 역수가 접촉저항을 나타내기 때문에 기울기를 변화시켜 원하는 접촉저항을 이루도록 미세조정나사를 움직여 조절

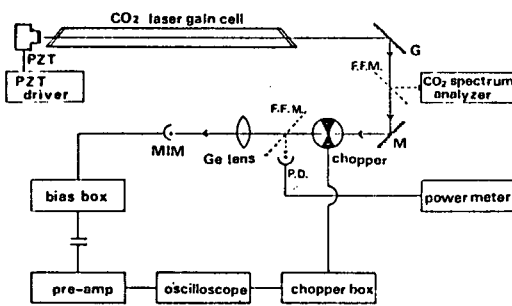


Fig. 2. The experimental set-up for the measurement of the responsibility of MIM point-contact diodes (PZT:piezoelectric transducer, C:capacitor, F.F.M.:flip-flop mirror, P.D.:power-detector, G:grating, M:mirror).

광속을 초점거리 10 cm의 Ge 렌즈로 MIM 다이오드에 입사시킨다. MIM 다이오드가 검출한 신호는 low nose preamplifier (EG&G BROOKDEAL 5004)에 의해 1000배 증폭되어 오실로스코프로 관찰된다.

### III. MIM 다이오드의 특성

그림 3은 Ni을 MIM 다이오드의 substrate로 사용하였을 경우의 전류-전압 특성곡선이며, 이러한 형태는 substrate가 Co, Cu 및 Au인 경우에도 동일한 모양을 갖는다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 다른 반도체 다이오드의 전형적인 전류-전압 특성곡선과는 달리 원점을 중심으로 비선형인 기함수의 형태를 나타내기 때문에 이러한 비선형 전류-전압 특성을 이용하는 레이저의 검출기, harmonic generator 및 믹서로 사용할 수 있음을 보여준다.

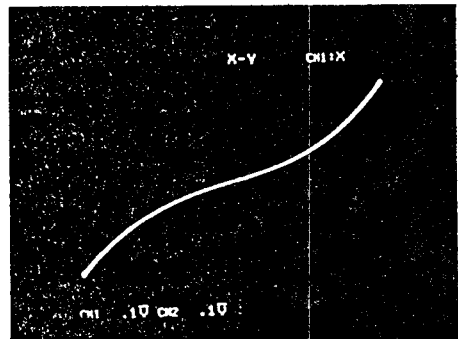


Fig. 3. The I-V characteristic curve of MIM point-contact diode (substrate: Ni, whisker: 25  $\mu\text{m}$ -diameter tungsten wire).

그림 4는 MIM 다이오드의 whisker에 입사하는 CO<sub>2</sub> 레이저 광속의 입사각도 ( $\theta$ )에 따라

검출된 신호의 변화를 나타낸 것이다. 안테나 이론에 의하면 안테나의 유효길이  $L$ 은 입사하는 전자기파의 파장의 정수배가 되어야만 한다. (8) 즉

$$L = n\lambda, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

이다. 이때 안테나의 유효길이  $L$ 을 에칭된 부분의 길이라고 가정하고 실험에 사용한 텅스텐 whisker의 에칭된 부분의 길이를 측정한 결과  $65 \mu\text{m}$ 였다. 이  $L = 65 \mu\text{m}$ 와  $\text{CO}_2$  레이저의 파장  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 를 식 (1)에 대입하여 풀면  $n = 6.2$ 가 된다. 따라서 안테나 패턴에는 약 6개의 로브가 생기게 되는데 실험을 통해서 얻은 결과도 6개의 로브가 생기므로 안테나의 유효길이는 에칭된 부분의 길이가 된다. 그림 4에서 삼각형으로 나타낸 곡선은 실험치들이며, 일점 쇄선으로 나타낸 곡선은 long-wire 안테나 이론(9)으로부터 계산한 이론치이다. 참고문헌 (9)에서 얻은 식으로부터 맨 처음 최대출력을 얻을 수 있는 각  $\theta$ 는

$$\theta = \cos^{-1}(1 - 0.371\lambda / L) \quad (2)$$

이다. 식 (2)에 안테나의 유효길이  $L = 65 \mu\text{m}$ 와  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 를 대입하였을 경우에  $\theta$ 는  $20^\circ$ 이지만, 측정결과  $22.5^\circ$ 에서 최대출력을 얻었다. 이 경우에 whisker의 에칭되지 않은 부분의 영향과 substrate 표면에서의 whisker의 영향을 고려하지 않았기 때문에 약간의 차이가 있다고 생각된다.

그림 5는 substrate 재질에 따른 접촉저항과 MIM 다이오드가 검출하는 신호와의 관계를 보여준다. 여기에서 각각의 다이오드들의 바이어스 전압은 최대신호가 나오는 바이어스 전압을 선택하였으며, 그 값은 표 1에 나와 있다. 이 때 입사시킨 레이저 출력은  $200 \text{ mW}$ 였으며, 입사각도는  $22.5^\circ$ 였다. 그림 5에서 W-Ni 다이오드는 접촉저항이  $400 \Omega$ 에서, W-Co 다이오드는  $500 \Omega$ 에서 최대출력신호를 보였으며,

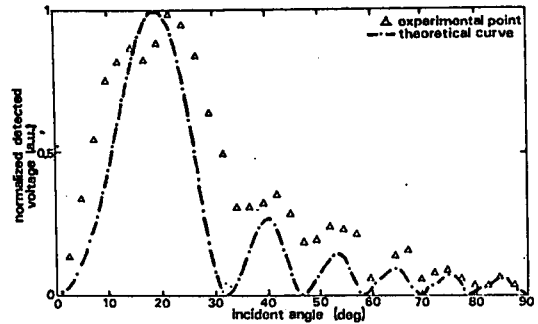


Fig. 4. The normalized detected voltage as a function of the incident angle (W-Ni MIM point-contact diode).

W-Cu와 W-Au 다이오드들은 접촉저항이 증가함에 따라 점차적으로 신호가 증가하는 추세를 나타낸다. 그러나 그림 5에서 보는 바와 같이 접촉저항이 커질수록 다이오드들의 점접촉 부분의 불안정으로 인하여 신호의 변동이 커지고 있다. 따라서 검출신호도 크고, 시간에따른 신호의 변동이 작은 최적의 조건이 되도록 접촉저항을 조절하여야 한다. 이들 각 다이오드들의 최적 접촉저항은 표 1에 나와있다.

이상의 결과를 종합하여 최적의 실험조건 하에서 각 다이오드에 최적 접촉저항과 바이어스 전압을 인가하였을 때의 감응도와 신호대 잡음비 (SNR)를 표 1에 정리하였다. 표 1에서 보듯이 W-Ni 다이오드와 W-Co 다이오드는 감응도와 SNR이 거의 같다. 이들 두 다이오드는 감응도면에서 W-Cu 다이오드보다 작지만 SNR은 2배 이상 크며, W-Au 다이오드에 비해서는 감응도와 SNR이 각각 훨씬 좋다. 그러므로 감응도와 SNR이 모두 양호한 다이오드는 W-Ni 다이오드와 W-Co 다이오드이기 때문에 레이저 주파수를 측정하는 실험에 이들을 사용하는 것이 적당하다고 판단된다.

Table 1. The responsibility and the SNR of various MIM point-contact diodes.

MIM 다이오드	접촉저항 ( $\Omega$ )	바이어스전압 (mV)	감응도 (mV/W)	신호대 잡음비 (dB)
W-Ni	400	-132	17	32
W-Co	500	174	15	26
W-Cu	600	150	30	15
W-Au	1000	100	7	13

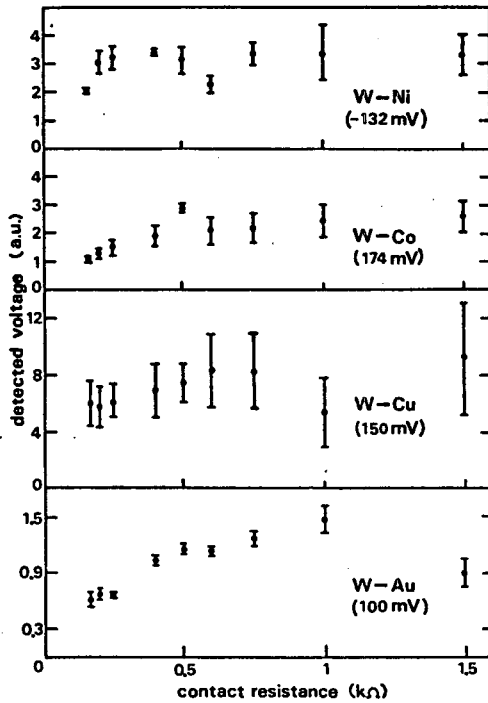


Fig. 5. The contact resistance vs detected signal in various MIM point-contact diodes (incident power: 200 mW).

#### IV. 두 CO<sub>2</sub> 레이저 광속의 맥놀이 주파수 측정<sup>(10)</sup>

lock-in stablizer (Lansing 80-215)를 이용하여 레이저 출력이 최대가 되는 주파수에 CO<sub>2</sub> 레이저들을 주파수 안정도 10<sup>-8</sup>~10<sup>-9</sup>으로

안정화 시켰다.<sup>(10)</sup> 이 경우 주파수 안정용 검출기로는 상용의 HgCdTe 검출기 (Judson J15-D)를 사용하였으며 이에 사용된 CO<sub>2</sub> 레이저들의 제원은 이미 발표된 논문 (11)에 자세히 언급되어 있다.

이렇게 안정화된 두 CO<sub>2</sub> 레이저의 10P(36) line들 사이의 맥놀이 주파수를 측정하기 위하여 II, III장에서 제작한 W-Ni 점접촉 MIM 다이오드를 사용하였다. 그림 6은 관측된 두 CO<sub>2</sub> 레이저의 10P(36) line들 사이의 맥놀이 주파수로 두 line들 사이의 offset 주파수는 rf 스펙트럼 분석기 (HP 8566B)에 의하여 27 MHz로 측정되었다. 즉 본 연구에서 제작된 점접촉 MIM 다이오드는 그 응용이 가능함을 보였다.

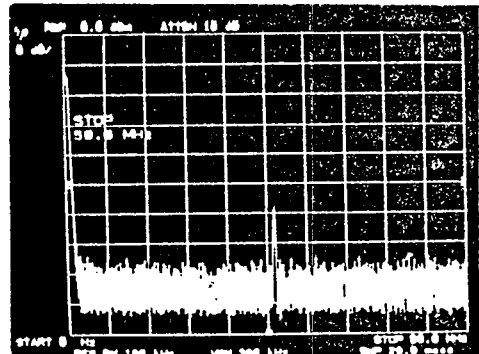


Fig. 6. Photograph from the rf spectrum analyzer of the beat frequency, generated by the frequency mixing of the two CO<sub>2</sub> laser beams on the MIM diode (frequency span: 50 MHz; center frequency: 25 MHz).

V. 점접촉 MIM 다이오드의 비선형 동력학

그림 2와 같은 MIM 다이오드의 출력특성 실험장치에서 초퍼의 주파수에 의한 정류화된 출력을 보면 그림 7과 같다. Ⅲ장에서 논의한 결과들은  $f_{r1}$ 과  $f_{r2}$ 가 아닌 다른 초핑 주파수에서의 결과들이며, 그림 7의  $f_{r1}$ 과  $f_{r2}$ 에서는 7배 강도가 큰 신호가 관찰됨을 알 수 있다. (12,13)

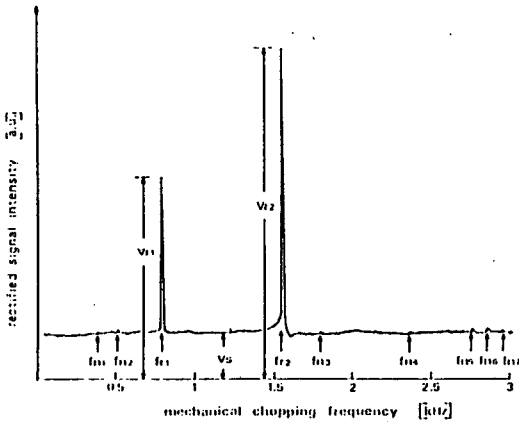


Fig. 7. Average rectified signal of the CO<sub>2</sub> laser beam with the Co substrate MIM diodes as a function of the chopping frequency (contact resistance; 130 Ω, applied bias voltage; 200 mV, laser incident angle; 20°, laser power; 1 W).

이들의 신호는 driven damped oscillator의 비선형 damping 계수  $a(q)$ 와 비선형 복원력  $f(q)$ 에 의하여 생기는 것으로 설명할 수 있다. 즉, 등가 RLC 회로를 고려할 경우, 유효 junction 전하  $q(V) = \int C(V) dV$  를 사용하면, (I, V, Q)의 3개의 결합된 제 1차 autonomous 미분 방정식들을 다음과 같이 표현

할 수 있다.

$$\ddot{q} + a(q)\dot{q} - f(q) = A_0 \sin(\omega t) \quad (3)$$

여기에서  $a(q)$ 와  $f(q)$ 는  $C(q)$ 와  $V(q)$ 에 의한 비선형 값을 갖는다. 위의 방정식 (3)은 jump 현상,  $\omega_{res}/n$  ( $n = 2, 3, 4, \dots$ 의 정수)에서 subharmonic response를 갖는 등의 비선형 동력학적 특성을 보여준다. (14)

그림 7은 W-Co MIM 다이오드에서의 결과로 접촉저항은 130 Ω, 인가된 바이어스 전압은 200 mV, 레이저 광속의 입사각은 20°이다. 그리고  $f_{r1}$ 은 775 Hz,  $f_{r2}$ 는 1537 Hz이며 각각의 FWHM은 3 Hz와 8 Hz이다. 이 경우  $f_{r1}$ 은  $f_{r2}$ 의 subharmonic response로 설명되며, 입사 레이저 power가 증가하면  $f_{r2}$ 의 중심 주파수가  $f_{r1}$ 쪽으로 가까워지기 때문에 정확히  $f_{r1}$ 이  $f_{r2}$ 의 반이 아니다.

V. 결 론

1. 금속 substrate의 종류에 무관하게 동일한 모양의 비선형 전류-전압 특성곡선을 나타내고 있기 때문에 레이저의 검출기, harmonic generator 및 믹서로서 사용할 수 있다.

2. 입사각도에 대한 whisker에 유도되는 출력을 안테나 이론으로 해석한 결과, 안테나의 유효길이는 텅스텐 whisker의 에칭된 길이에 해당된다. 또한 유효길이  $L = 65 \mu m$ 인 경우에 입사각도  $\theta = 22.5^\circ$ 에서 최대 출력을 얻을 수 있었다.

3. 30 THz의 CO<sub>2</sub> 레이저 광속검출에서 각 다이오드에 최적 접촉저항과 바이어스 전압을 인가하였을 경우에 감도도와 SNR을 조사한 결과 W-Ni 다이오드와 W-Co 다이오드가 W-Cu 다이오드와 W-Au 다이오드보다 양호하였다.

4. 제작된 점접촉 MIM 다이오드를 이용하여 두대의 안정화된 CO<sub>2</sub> 레이저의 10P(36) line 들 사이의 맥놀이 주파수를 측정하였다.

5. MIM 다이오드에서 특정한 초핑 주파수들에서 신호가 7 배정도 증가함을 관찰하였으며, 이를 다이오드의 비선형 동력학으로 설명하였다.

(proceeding), 436(1990)

[13] J.H. Jo, J.W. Won, J.H. Park, T.H. Yoon, and Y.P. Kim, IEEE Transactions on Instrum. and Measure., to be submitted

[14] Robert Van Buskirk, and Carson Jeffries, Phys. Rev. A, 31(5), 332(1985)

### 참 고 문 헌

- [1] H.H. Kingenberg and C.O. Weiss, Appl. Phys. Lett., 43, 361 (1983)
- [2] 박정환, 윤태현, 조재홍, 원종욱, 이수완, 새물리, 28(4), 427(1988)
- [3] N. Inoue and Y. Yasuoka, Infra. Phys., 25, 599(1985)
- [4] C.O. Weiss, Appl. Phys., B34, 63(1984)
- [5] J.W. Won, J.S. Kim, J.H. Jo, and C.O. Weiss, IEEE Transactions on Instrum. and Measure., 38(2), 541 (1989)
- [6] S.M. Faris, T.K. Gustafson, and J.C. Wiesner, IEEE J. Quantum Electron., QE-9, 737(1973)
- [7] 원종욱 외, 안정화 레이저 제작에 관한 연구, KSRI-88-1-IR (한국표준연구소, 1988)
- [8] T.A. Milligan, Modern Antenna Design, (McGraw-Hill, New York, 1985), pp. 327
- [9] J.D. Kraus, Antennas, (McGraw-Hill, New York, 1950), pp.407
- [10] T.H. Yoon, J.H. Park, J.H. Jo, and J.W. Won, J. Korean Phys. Soc., 22(1), 104(1989)
- [11] 윤태현, 원종욱, C.O. Weiss, 새물리, 28(6), 694(1988)
- [12] J.W. Won, J.H. Jo, J.H. Park, T.H. Yoon, and Y.P. Kim, '90 CPEM digest