

## 펄스형 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 기중 침 대 침 전극간의 유도방전 특성

정 옹호\*, 최 진영, 이 유수, 정 현주, 송 건주, 김 희제  
부산대학교 전기공학과

### The induced discharge characteristics in atmosphere adopting a pulsed CO<sub>2</sub> laser

Yong-Ho Jung, Jin-Young Choi, Yu-Soo Lee, Hyun-Ju Chung, Gun-Ju Song Hee-Je Kim  
Dept. of Electrical Engineering PNU.

Abstract - The technique of induced discharge by a pulsed CO<sub>2</sub> laser is being applied to control electrical discharge path, material processing, triggered lightning for protecting the power equipments. In this paper, we have investigated about the characteristics of the induced discharge at atmospheric conditions by using a plasma channel, which is produced when a pulsed CO<sub>2</sub> laser radiation is focused by a focusing mirror as a trigger source. A plasma channel produced by laser radiation has an effect on decreasing the threshold voltage and inducing the discharge in both needle electrodes. We have confirmed a delay time between a produced plasma channel and an electrical discharge after laser radiation. We provided the decreased voltage lower than the natural discharge voltage between electrode type of needles and was induced the discharge by forming a plasma channel between them. In this research we could understand the time delay of induced discharge by laser radiation, and the characteristics of the discharge cause by the decrease in the threshold voltage, and the polarity effect by changes of plasma channel positions between two electrodes.

### 1. 서 론

정보화 사회로 진입함에 따라 낙뢰가 우리생활에 미치는 영향에 대한 관심이 증대되고 있다. 기존의 낙뢰대책인 피뢰침이나 가공지선 만으로는 낙뢰사고를 완벽하게 방어하기는 어렵다. 따라서, 새로운 대책으로서 레이저 유뢰가 주목을 받고 있다<sup>[1-3]</sup>. 레이저 유뢰란 대출력 레이저빔으로 공기를 플라즈마화시켜 이 플라즈마를 통하여 낙뢰를 유도하는 능동적인 대책이다. 방사되는 레이저빔을 집광 렌즈를 사용하여 기중에 조사하면 순간적인 플라즈마 채널을 생성할 수 있다<sup>[4]</sup>. 이 플라즈마 채널은 전극간의 절연파괴 문턱전압값을 낮추는 효과와 방전을 유도하는 효과를 동시에 얻을 수 있다<sup>[5]</sup>.

레이저에 의한 방전유도는 시간응답이 우수하고, 반복실행이 가능하며, 방전유도의 확률도 높고, 위치와 방향도 용이하게 변화시킬 수 있어서 기존의 트리거 방식에 비교해서 높은 효과를 기대할 수 있다<sup>[6-7]</sup>. 특히, 유도방전을 이용한 재료가공<sup>[8]</sup>, 방전 유도를 이용한 기중 방전 경로의 위치와 방향 제어<sup>[9]</sup>, 대전류 제어를 위한 정밀한 스위칭이 요구되는 분야<sup>[10-11]</sup>, 낙뢰를 유도하여 전력설비 및 통신설비를 보호하기 위한 연구<sup>[12-15]</sup> 등에 기초 데이터로 활용되고 있다. 또한, 레이저 유뢰를 실행하기 위한 전 단계로서 실제 낙뢰와 유사한 고전압전원과 기중 방전경로를 만들어 낙뢰유도를 실행하기 위한 다양한 조건의 기초데이터를 확보하기 위해 일반적으로 모의 방전유도 실험이 많이 수행되고 있다<sup>[16-17]</sup>.

유도방전에 일반적으로 사용되는 CO<sub>2</sub> 레이저는 다른 레이저 광에 비해 대기중에서 광의 흡수 및 산란이 적고, 대출력용으로 제작이 가능하다는 장점이 있다. 한편 CO<sub>2</sub> 레이저 생성 플라

즈마에 의한 방전유도특성에는 극성효과가 있는 것으로 보고되고 있으며, 특히 부극성 방전의 유도효과는 양호한 데 비하여 정극성 방전은 유도하기 어렵다고 보고되고 있다<sup>[18]</sup>. 그러나 앞서 언급된 실험에서는 전극간 조사 레이저빔의 에너지 세기와 공급 플라즈마에 의한 방전지연시간 측정<sup>[3, 9, 15]</sup>이 대부분이었고 동일 전극간격에서의 인가전압감소에 따른 레이저빔과 유도방전 사이의 명확한 지연특성 파형의 규명과 집광위치에 따른 극성효과에 관한 연구는 수행되지 않았다.

본 연구에서는 기중의 침 대 침 전극에 펄스형 CO<sub>2</sub> 레이저빔을 조사하여 전극간격에 따른 유도방전시 레이저빔과 방전전압간의 시간지연특성을 조사하기 위하여 오실로스코프로 파형을 분석하였고, 생성 플라즈마의 집광위치에 따른 극성효과를 연구하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 실험장치

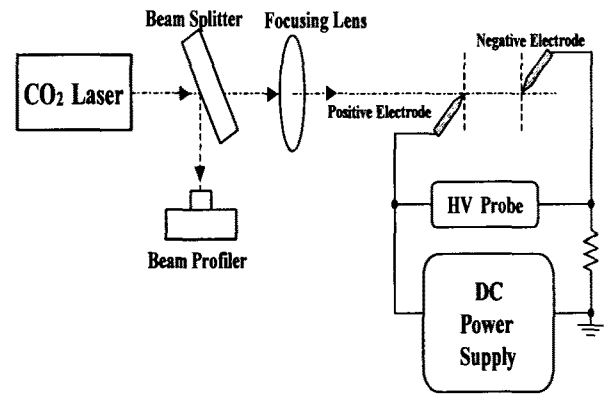


그림 1. 유도방전 실험 개략도

Fig. 1 Schematic diagram of the induced discharge

그림 1은 레이저빔을 조사하여 기중에서의 유도방전 특성을 연구한 실험장치의 전체 구성도를 나타낸 것이다. 방전 전원부의 입력전압은 AC 220 V까지 가변 가능한 슬라이더를 사용하였고, 출력측에는 고압 누설변압기(220V/18kV)와 배전압회로로 구성하였으며, 출력전압은 부하단에 공급가능한 최대 약 35 kV로서, 전극간격 2~10 mm까지 방전 가능한 전압을 인가할 수 있도록 설계된 DC 고전압 발생장치이다. 방전중의 과도전류에 의한 전원회로의 보호와 위험방지를 위해 20 Ω(50W)의 보호저항을 접지 전극측에 설치하였다. 그리고, 유도방전시 방전개시 전압을 측정하기 위해 Iwatsu(HV-P 30)사의 고압 프로브(1000:1)를 방전 전원부에 병렬로 구성하였다. 전극부는 침 대 침 방식의 방전전극이 사용되었으며, 직경 5 mm, 길이 6 cm의 스테인레스 전극을 사용하였다.

본 실험에 사용된 레이저는 펄스형 CO<sub>2</sub> 레이저로서 펄스 레이저에 의한 유도방전현상을 연구하기 위해 반치폭(FWHM : Full width at half maximum)은 약 2.5 msec로 조정하였고, 펄스 당 에너지가 약 200 mJ/pulse인 펄스형 CO<sub>2</sub> 레이

저를 직접 설계, 제작하여 사용하였다[19]. 레이저의 구성은 제어부와 전원부, 레이저 공진기로 나누어지며, 제어부는 원칩 마이크로프로세서인 PIC16C55를 사용하여 One-pulse씩 발생되어 SCR에 인가되도록 프로그램 되었으며, 레이저 전원부의 SCR을 턴-온 하기위하여 설계되었다. 또한, 레이저 전원부는 풀 브리지 회로와 레이저빔의 펄스제어가 가능한 PFN(Pulse forming network)회로를 사용하여 후단의 SCR을 통해 커패시터에 저장된 에너지를 제어부의 신호에 의해 최종단인 고압 누설변압기(220V/18kV) 1차측에 인가되도록 구성하였다. 고압 누설변압기 2차측을 통해 레이저 공진기로 고압 펄스전압이 인가된다. 레이저 공진기의 전반사경은 99.5 %의 반사율을 가진 Mo(Molybdenum) 렌즈가 사용되었고, 출력경은 반사율 90 %인 ZnSe(Zinc-selenide) 부분 반사경으로 구성된 레이저 공진기를 사용하였다. 대기중에 조사된 CO<sub>2</sub> 레이저빔을 집광거리 10 cm의 볼록렌즈로 집광하였으며, 레이저빔의 조사시간과 유도방전시간을 비교하기 위해 집광렌즈 전단에 투과율 90 %, 반사율 10 %의 Beam splitter를 사용하였다. 기중에 조사된 레이저빔을 시간적으로 분석가능한 Moletron사의 Temporal beam profiler(Pyroelectric detector P5-01)를 사용하였고, 조사된 레이저광의 2차원적인 시간적 추이와 유도방전의 지연특성을 비교하기 위해, Temporal beam profiler의 신호와 고전압 프로브의 신호를 동시에 검출하여 오실로스코프(Lecroy사 제품:모델명 9310AM)로 계측하였다.

### 3. 실험 방법 및 결과

#### 3.1 전극간격에 따른 유도방전 전압

대기중에 두 전극을 놓고 전극간 거리를 2~10 mm까지 변화시켜, 침 대 침 전극 방식에서 각각의 자연방전전압  $V_N$ 을 측정하고, CO<sub>2</sub> 레이저의 펄스당 에너지가 200 mJ/pulse, 반치폭은 약 2.5 msec로 고정된 레이저빔 조사에 의해 유도되는 최소 유도방전전압을 각각 측정하였다. 자연방전전압  $V_N$ 은 기중에서 아크방전이 개시될 때의 전극간 전압이고, 유도방전전압  $V_I$ 는 공급 플라즈마 채널에 의해 두 전극 사이에서 방전 유도가 가능한 외부 인가전압을 나타낸다.

그림 2는 전극간격 변화에 따른 자연방전전압과 유도방전전압을 나타낸 것이다. 두 전극 사이의 자연방전전압  $V_N$ 은 전극간 거리를 2 mm씩 증가시킬 때 자연방전이 가능한 전압으로서, 2 mm의 전극간격에서의 자연방전전압  $V_{N2}=10$  kV,  $V_{N4}=11.3$  kV,  $V_{N6}=12.8$  kV,  $V_{N8}=13.5$  kV,  $V_{N10}=14$  kV로 각각 증가되었다. 그리고, 방전 유도가 가능한 인가전압의 감소폭은 전극간격 2 mm일 때의 인가전압  $V_{I2}=7.5$  kV에서 최소이며, 이 값은  $V_{N2}$ 의 약 25 % 감소된 전압이다. 또한, 전극간격을 2 mm씩 증가시켜 공급된 전압의 감소폭은 각각의  $V_N$ 을 기준으로  $V_{I4}=9$  kV,  $V_{I6}=11.5$  kV,  $V_{I8}=12.3$  kV,  $V_{I10}=13.6$  kV로 나타났으며, 전극간격 변화에 따른 두 전극 사이의 자연방전전압  $V_N$ 은 전극간격이 증가함에 따라 대기중의 절연파괴전압은 상승했고, 방전이 유도되는 인가전압의 변화폭은 전극간격이 증가함에 따라 감소됨을 확인하였다. 즉, 플라즈마 채널중에서 중성입자가 회박한 부분이 발생하는 것 과 하전입자가 양 전극간을 전전함에 따라 절연내력이 감소하므로 전극간격이 증가할수록 인가 전압의 변화폭은 감소되는 것으로 판단된다.

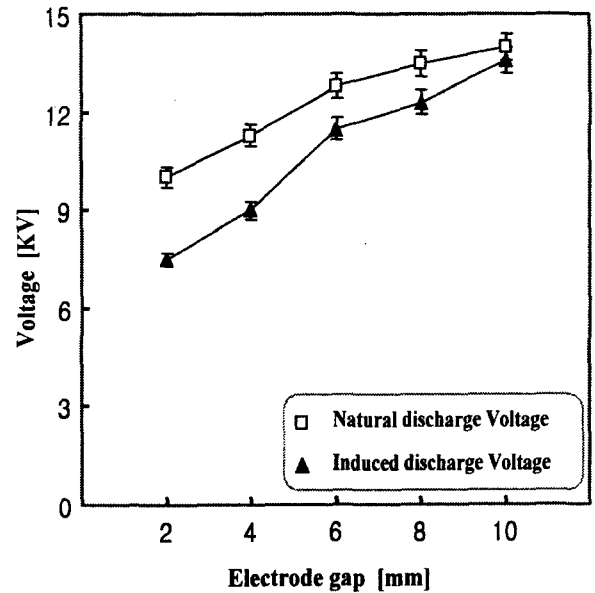


그림 2. 전극간격 변화에 따른 유도방전 전압

Fig. 2 The induced discharge voltages vs. electrode gap

#### 3.2 전극간격 및 인가전압에 따른 시간지연

기중에 놓여진 침 대 침의 두 전극에 자연방전 전압보다 각각 5, 7.5, 10 % 감소된 전압을 외부에서 인가하고, 전극간 거리를 2~10 mm의 범위로 변화시켰을 때의 유도방전에 대한 시간지연 특성을 측정하였다.

그림 3에 나타낸 AVD(Applied voltage decrease: %)는 방전유도가 가능한 인가전압의 감소율을 나타낸다. 그림 3은 전극간격과 인가전압을 변화시킴으로서 각 간격에서의 유도방전전압과 방전 개시시간의 시간지연을 나타낸 것이다. 각 전극간의  $V_N$ 은 전극간 거리가 증가됨에 따라 상승했으며, 각 전극에 동일한 감소율로 전압을 인가하고, 그에 따른 유도방전 시의 레이저빔과 유도방전 개시시간의 시간지연은  $V_{N2}$ 의 5 % 감소된 전압 9.5 kV에서 약 200  $\mu$ sec 지연되었고,  $V_{N4}$ 의 5 % 감소된 전압 10.7 kV에서 약 400  $\mu$ sec,  $V_{N6}$ 의 5 % 감소된 전압 12.2 kV에서 약 700  $\mu$ sec 로 각각 지연되었다. 결국, 전극간 거리가 증가되면 레이저빔의 조사에 의한 유도방전의 시간응답도 지연됨을 확인하였고, 또한, 전극간격을 동일하게 고정시키고, 조사 레이저빔에 의해 방전유도가 가능한 전압을 5, 7.5, 10 %로 각각 감소시켜 인가하고 유도방전의 시간지연을 측정하였다. 전극간격은 4 mm이고,  $V_{N4}$ 의 5 % 감소된 전압 10.7 kV에서 약 400  $\mu$ sec, 7.5 % 감소된 전압 10.4 kV에서 약 600  $\mu$ sec, 10 % 감소된 전압 10.2 kV에서 약 900  $\mu$ sec로 각각 나타났으며, 결과적으로 두 전극간의 자연방전전압  $V_N$ 보다 감소된 전압을 각각 인가하여 방전시킴으로서, 동일 전극간격의 자연방전전압에 비교해서 인가전압이 점차 감소되면 유도방전의 시간지연은 더욱 증가됨을 확인하였다.

그림 4는 전극간 거리가 각각 2, 4, 6 mm에서 자연방전전압  $V_N$ 보다 5 % 감소된 전압이 각각 인가되었을 때의 레이저 조사빔과 유도방전 전압파형을 나타낸 것이다. 결과적으로, 전극간격이 증가됨에 따른 방전유도의 시간지연은 레이저빔의 에너지 세기 증가에 비례함을 확인하였다.

그림 5는 전극간 거리를 4 mm로 고정시키고,  $V_{N4}=11.5$  kV의 5, 7.5, 10 %씩 감소시킨 전압을 각각 인가하여 유도

방전이 발생할 때의 시간지연을 나타낸 곡형이다. 즉, 동일간격 일지라도 인가전압 감소율이 증가함에 따라 방전유도의 시간지연은 레이저빔의 에너지 세기에 비례함을 확인하였다. 이러한 결과는 플라즈마 채널의 생성에 의하여 공기밀도의 교란이 발생하게 되고, 이러한 밀도 교란이 전극 부근까지 퍼지는 데에는 일정한 시간을 필요로 하게 되므로 시간지연이 발생되는 것으로 판단된다.

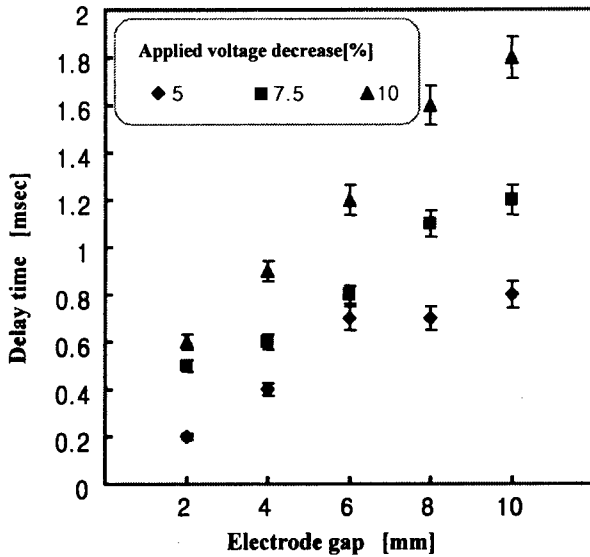
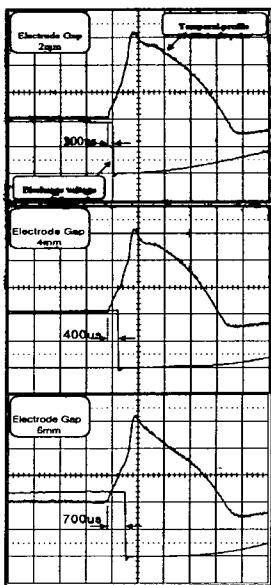


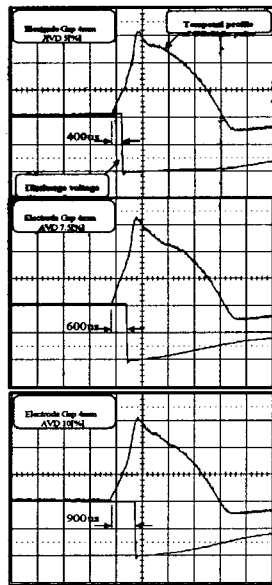
그림 3. 전극간격 및 인가전압에 따른 유도방전의 시간지연 특성

Fig. 3 The delay time characteristics of induced discharge vs. electrode gap & applied voltage



1000  $\mu$ sec/div

그림 4. 전극간격에 따른 유도방전 시간지연  
Fig. 4 The delay times of induced discharge vs. electrode gap



1000  $\mu$ sec/div

그림 5. 인가전압 감소에 따른 유도방전 시간지연  
Fig. 5 The delay times of induced discharge vs. applied voltage decreasing

### 3.3 집광 위치에 따른 유도방전의 극성효과

두 전극사이의 간격을 고정시키고 공급 플라즈마 채널의 생성 위치를 정 전극부분(Left), 중간부분(Middle), 부 전극부

분(Right)으로 변화함에 따른 기중 유도방전의 극성효과를 조사하였다.

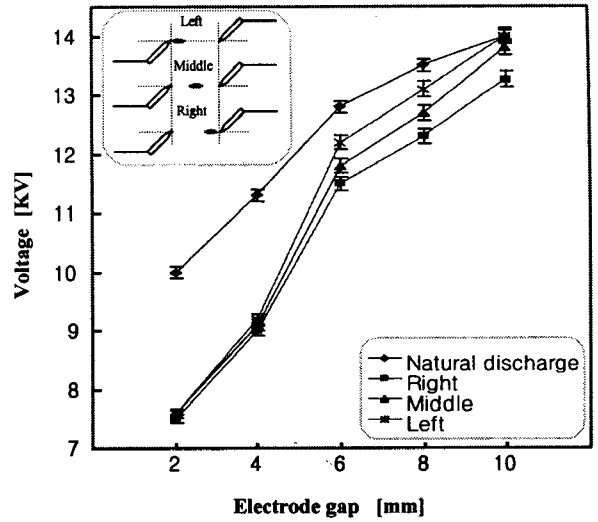


그림 6. 집광 위치에 따른 유도방전의 극성효과

Fig. 6 The polarity effect of induced discharge vs. focusing position

그림 6은 공급 플라즈마 채널의 생성 위치가 두 전극사이에서 변화될 때의 최소 유도방전 전압의 변화를 나타낸 것이다. 2, 4 mm에서는 거의 변화가 없었고, 6 mm 이상에서는 부 전극측(Right)에 가깝게 레이저빔을 조사함으로써 정 전극측(Left)에 비교해서, 6 mm일 때 약 0.7 kV, 8 mm에서 약 0.8 kV, 10mm에서 약 0.9 kV로 각각 나타났다. 결과적으로, 부 전극측에 가깝게 레이저빔을 조사함으로써 보다 감소된 인가전압에 의해 방전이 유도되었다. 즉, 플라즈마 채널은 정극성 및 부극성의 하전입자의 혼합체이므로 전계가 가해지면 각각의 입자는 전계에 의하여 드리프트된다. 이 드리프트 운동이 시작되면 공간전하의 왜곡을 초래하게 되며 그에 따라 드리프트 운동이 계속 진행되기 때문에 극성효과가 나타나는 것으로 판단된다.

## 4. 결론

기중의 침 대 침 전극에 자연방전전압 보다 감소된 전압을 인가하고, 200 mJ/pulse, 반치폭 2.5 msec인 펄스형 CO<sub>2</sub> 레이저빔을 조사함으로써, 2~10 mm의 전극간격에 따른 방전유도의 시간지연 특성과 플라즈마 채널의 생성위치 변화에 의한 극성효과를 조사연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전극간격을 2~10 mm까지 변화시켰을 때 자연방전전압  $V_N$ 은  $V_{N2}=10$  kV~ $V_{N10}=14$  kV로 전극간격 증가에 비례해서 증가했고, 유도방전전압  $V_1$ 는  $V_{12}=7.5$  kV( $V_{N2}$ 의 약 25% 감소된 전압)~ $V_{110}=13.6$  kV( $V_{N10}$ 의 약 3% 감소된 전압)로 인가전압의 변화폭은 감소되었다.

(2) 조사 레이저빔과 유도방전 개시간의 시간지연은 2~6 mm 일때 각  $V_N$ 의 5% 감소된 전압 9.5 kV, 10.7 kV, 12.2 kV에서 약 200  $\mu$ sec, 400  $\mu$ sec, 700  $\mu$ sec로 전극간격과  $V_1$ 의 상승에 비례해서 시간지연의 증가를 나타냈다.

(3) 전극간격 4 mm에서 자연방전전압  $V_{N4}=11.3$  kV보다 5% 감소된 전압 10.7 kV를 인가했을 때 약 400  $\mu$ sec, 7.5% 감소된 전압 10.4 kV에서 약 600  $\mu$ sec, 10% 감소된 전압 10.2 kV에서 약 900  $\mu$ sec로 인가전압이 감소할수록 지연시간은 증가하였다.

(4) 동일간격의 두 전극사이에서 플라즈마의 생성위치 변화에 따른 극성효과를 조사한 결과 인가전압은 전극간격 6 mm의 경우 0.7 kV, 8 mm에서 0.8 kV, 10mm에서 0.9 kV로 정극성 전극측 보다 부극성 전극측에 가깝게 집광함으로써 더욱 감소된 전압에 의해 방전이 유도되는 것을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] See for instance 23rd Int. Conf. "Lightning Protection", Conf. Proc., Firenze, Italy, Sept. 23-27, 1996; 10th Int. Symp. High Voltage Engineering, Conf. Proc., Montreal, Que., Canada, 1997
- [2] Uchida S et al 1999 "Laser-triggered lightning in field experiments J. Opt. Technol. 66 199-202
- [3] T. Shindo et al., "Model experiments of laser-triggered Lightning," IEEE PES Winter Meeting, No. 92 WM 258-4 PWRD, 1992.
- [4] D.W.Koopman, K.A.Saum, "Formation and guiding of high velocity electrical streamers by laser induced ionization," J. Apply. Phys., Vol. 44, pp. 5328-5336, 1973
- [5] K. Hidaka, D. Sakai, and T. Kouno, "Laser trigger effect on induced electrical discharge," T. IEE Japan, vol. 115-A, no. 7, pp.622-629, 1995
- [6] K.A.Saum, D.W.Koopman, Discharges Guided by Laser-induced Rare faction Channels, The Physics of Fluids, 15, 11, Nov.1972
- [7] Dong-Hoon Lee, Hee-Je Kim "Characteristics of Laser-Guided DC Discharge by Nd:YAG Laser at Low Pressure", Journal of electrical engineering & Information Science, Vol. 3. No. 3, June 1998
- [8] Donald C. O' shea et al., Introduction to Laser and Their Application, Addison-Wesley Publishing Company, 1977, pp. 256-261
- [9] J.R.Greig et al., "Electrical discharges guided by pulsed CO<sub>2</sub> laser radiation," Phys. Rev. Lett., Vol.41, pp. 174-177, 1978.
- [10] A.H. Guenther and J.R. Bettis, "The laser triggering of high-voltage switches," J. Physics D , vol 11, p.1577, 1978
- [11] W.K.Pendleton, A.H.Guenther, Investigation of a laser triggered spark gap, Rev.Sci.instrum.36,11,Nov.1965
- [12] L.M.Ball, The Laser Lightning Rod System: Thunderstorm Domestication, Appl.Optics, 13, 10, Oct. 1974
- [13] H. Okubo et al."Laser-induced discharge characteristics in low vacuum with residual helium gas and air," XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum-Berkeley. 1996
- [14] X. M. Zhao et al., "Ultrashort pulse propagation for triggering of lightning," in Proc. Int. Conf. Laser's 91, San Diego, CA, 1991.
- [15] Patrick Rambo et al., "High-voltage electrical discharges induced by an ultrashort-pulse UV laser system," J. Opt. A:Pure Appl. Opt. 3 (2001) 146-158
- [16] D. Wang et al."A possible way to trigger lightning using a laser," J. Atmos. Terr. Phys., vol.57, no.5, pp.459-466, 1995
- [17] K. Nakamura, T. Suzuki, C. Yamabe, and K. Horii, "Fundamental research on lightning triggering by means of UV lasers," Elec. Eng. Japan, vol. 114, no. 8, pp. 69-79, 1994
- [18] Megumu Miki et al."Positive discharge guided by CO<sub>2</sub> laser radiation in air," T. IEE Japan, Vol. 155-A, No.7, '95
- [19] Hyun-Ju Chung, Dong-Hoon Lee, Do-Wan Kim, Sung-Joon Park, Yu-Soo Lee, Jung-Hwan Hong, Joong-Mann Kim, Hee-Je Kim "Simplified power supply for long pulse CO<sub>2</sub> laser using zero cross switching technique", Optics & Laser Technology Vol. 33, pp. 161-165, 2001, Elsevier Science Ltd