

방전·고전압 분야에서의 레이저 응용

장용부*, 최영욱**, 김현부***

(*울산대학교 전기공학부, **한국전기연구소 선임연구원, ***한양대 공대 전기공학과 교수)

***한양대 공대 전기공학과 교수)

1. 序 論

레이저(LASER)는 電氣에서 光으로의 에너지 변환에 의한 것으로 1960년 최초로 ruby 레이저의 발진이 성공된 이후 눈부신 발전을 거듭 함에 따라 기초과학, 공학, 의학 등의 분야뿐만 아니라 현재, 산업계에서도 다양하게 널리 이용되고 있다.

이는 레이저광이 단색성, 可干涉性, 高指向性, 집광성(에너지집중) 등에서 매우 우수한 특성을 가지고 있으며, 발진 파장도 가시광선은 물론 마이크로파 및 적외선 영역에서부터 자외선, X-선에 이르기까지 넓은 범위의 파장을 선택적으로 얻을 수 있다. 또, $10^{-12} \sim 10^{-15}$ sec의 레이저 펄스폭을 얻을 수 있는 시간적인 제어가 가능하고, kJ, TW급의 대출력을 갖는 완성도가 높은 레이저들이 다양하게 개발, 실용화 되어 있다.

현재 전기공학 분야에 관련되어 활발히 연구되고 있거나 실용화 되고 있는 레이저 응용기술들은 다음에 열거된 바와 같다. 본 논문에서는 특히, 방전·고전압공학 분야에서의 레이저 응용에 관하여 선진 각국에서 활발하게 연구투자가 되고 있는 분야와 필자들의 연구분야 범위에서 소개하고자 한다.

- 전력 분야 : 레이저 誘雷
레이저 送電
- 원자력발전 : 레이저 同位体分離
(우라늄농축)
증기발생기수리보수
- 진단·계측 : 진류·전압계측
방전 플라즈마 진단
절연에자 염분감시
- 환경 분야 : 발전소 주변의 환경감시
- 신에너지원 : 레이저핵융합발전
- 기 타 : LTSG 스위치
절연재료의 공간전하측정

2. 레이저 誘雷

최근 전력계통 및 설비들이 초고압, 대용량화되고, 또 기술혁신으로 인하여 외적영향에 의한 설비사고회수는 감소되었지만 自然현상인 落雷에 의한 停電사고 비율은 상대적으로 더 높아지게 되었다. 일본의 경우는 송전선사고의 2/3가 낙뢰에 의한 것이며[1], 95년도에 우리나라 낙뢰사고는 송전설비 고장발생의 1/4, 자연환경여건에 의한 사고의 90%를 차지하고 있다[2]. 세계 각국의 통계에서도 낙뢰사고가 전체 사고의 절반이상의 차지하는 것으로 보고되고 있어 雷害에 대한 방지책이 더욱 철저히 요구되고 있다.

레이저에 의한 기체절연과피로 플라즈마를 발생시킨 것이 1963년에 처음 보고 되어[3], 광절연과피(optical breakdown) 현상에 관한 연구에 많은 흥미를 갖게 되었다[4].

1965년 laser triggered spark gap(LTSG)에 관한 최초 결과[5]가 발표된 후에 많은 연구가 되어 1970년대에는 레이저를 이용하여 발생시킨 플라즈마 채널로 放電을 誘導한 연구결과들이 발표되었다. 그러나, 레이저로 雷를 안전한

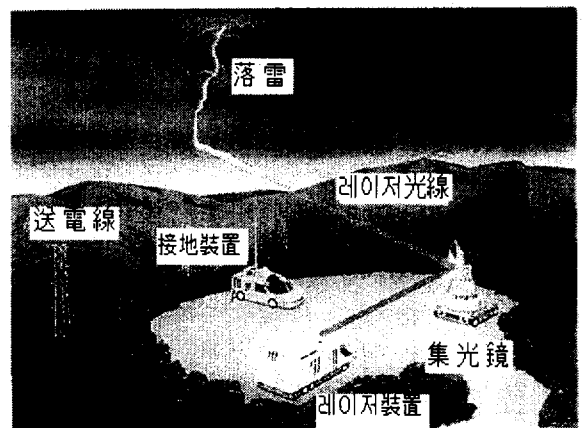


그림 1. 레이저 誘雷의 개념도



그림 2. 대출력 CO₂ 레이저에 의해 생성된 플라즈마 채널

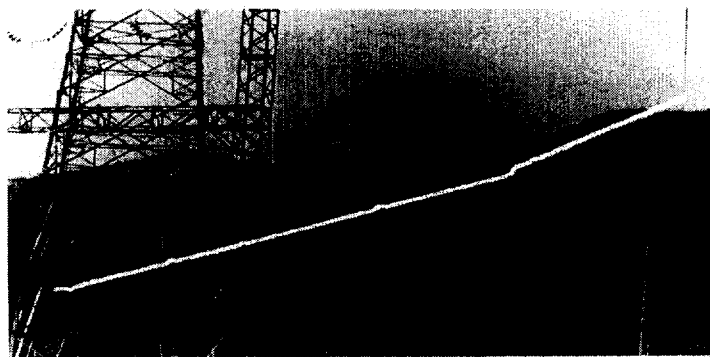


그림 3. 12MV 충격전압발생기(日, CRIEPI)에 의한 16m 레이저 放電誘導 (에너지 490J, 인가전압 3MV)

장소로 誘導하는 능동적인 避雷방법인 레이저誘雷가 1974년 미국의 L. M. Ball에 의해 최초로 제안된 후[6], AFFD Lab.에서 실험적으로 그 실현 가능성을 입증하였다.

레이저 誘雷는 그림 1에서 보는 바와 같이 대출력 펄스 레이저를 雷雲을 향하여 대기 중으로 집광시키면, 대기 중의 공기가 광절연과괴되어 장거리의 플라즈마채널이 생성되고, 생성된 플라즈마채널을 통하여 뇌운으로부터 雷放電을 인공적으로 안전한 접지 장소로 유도하는 방법이다.

레이저 誘雷를 실현하기 위해 해결되어야 할 기본적인 과제는 (1)방전유도에 유효한 장거리 플라즈마채널의 발생 기술, (2)레이저 플라즈마채널로의 방전유도과정, (3)대기 중에서 대출력 레이저 광의 전파특성해명 및 (4)뇌발생 감지기술등 이다[1, 7, 8].

선진각국에서 레이저 誘雷에 관한 연구되고 있는 연구방법들은 다음과 같다.

- 1) 강전리 플라즈마 채널법 : 대출력CO₂ 레이저를 이용하여 대기중에 발광 플라즈마 球(beads)을 동반하는 장거리의 강전리 플라즈마 채널을 만드는 방법(그림 2 참조)[8].
- 2) 약전리 플라즈마 채널법 : excimer 레이저를 이용하여 발광을 수반하지 않는 약전리 플라즈마 채널을 만드는 방법[9].

- 3) 강·약전리 플라즈마 복합법 : 1), 2)방법을 중첩함[10].
- 4) 회박화 채널법 : 방전이 일어나기 쉽게 기체 밀도가 낮은 채널을 만드는 방법[11].
- 5) cross-beam 법 : 뇌운에 복수개의 레이저 광을 교차시켜 절연과괴을 국부적으로 일으킨 후, 이로부터 霩間放電을 유도하여 消雷하는 방법[10].

최근까지의 연구동향을 보면 미국, 소련 등에서는 80년대 중반이후는 가시화된 長距離放電誘導(induced long-gap discharge)의 결과는 보고되지 않고, 雷害에 대한 현실적인 대책이 절실한 일본에서 적극적인 실현연구가 진행되고 있다. 그리고 국내에서는 한양대 전기과에서 유일하게 레이저 誘雷연구가 진행되고 있으며[12][13], 1995년도에는 일본 九州 대학과 九州電力과의 공동연구에 참여하여 세계 최장거리인 16m 레이저 誘導放電(그림 3 참고)을 성공하기도 했다[13]. 여기서는 지금까지 가장 좋은 결과를 얻고 있는 강전리 플라즈마 채널법을 서술하고자 한다.

CO₂ 레이저에 의한 전리 플라즈마 채널은 그림 2에서 보는 바와 같이 연속적인 플라즈마가 아니라 대기 중의 미립자(aerosol)의 영향으로 불연속적인 플라즈마 球들로 형성되어 있다. 일본 九州大의 연구결과[7][8]에서 보면, 대기중의 미립자가 레이저 에너지를 흡수하여 爆發蒸發하면서 초기

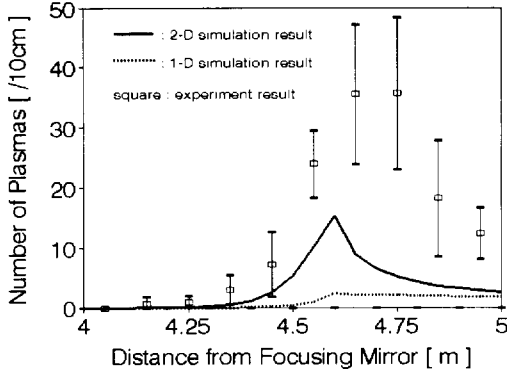


그림 4 레이저 플라즈마 beads밀도의 거리의존성(초점거리5m)

전자를 공급하는 것으로 해석되어 일반적인 광전리 메커니즘에서 얻어진 광전리 에너지의 임계치보다 낮아지게 되는 결과를 얻었다.

그리고 放電誘導가 가능한 길이는 레이저 플라즈마채널 길이의 절반정도이고, 유효한 플라즈마는 집광경 초점거리의 20%전에서부터 형성되며 초점이후에는 플라즈마가 거의 발생되지 않는다

[8]. 이는 그림 4에서 보는 바와 같이 필자의 연구결과와도 잘 일치됨을 알 수 있었다[14].

따라서 그림 5에서 보는 바와 같이, 장거리 채널을 얻기 위해서 단일 집광경보다 2개의 집광경으로 레이저 광을 분할하여 cascade type을 적용할 때가 월등히 좋은 결과를 얻었다. 그러나, 誘雷가 실현가능한 것으로 되어 있는 100m 이상급의 유효한 플라즈마 채널을 만들려면 앞으로 혁신적인 아이디어가 제시되어야 한다. 이를 위해 九州大에서는 강전리와 약전리 플라즈마법을 복합시킨 연구와 뇌운의 미니시뮬레이터를 제안하여 연구가 진행 중이다[8].

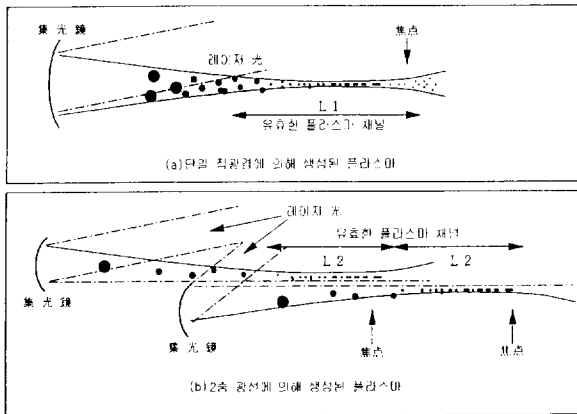


그림 5 레이저광 분할에 의한 플라즈마 채널의 장거리화

일본 大阪大와 CRIEPI에서도 강전리 플라즈마 채널법을 채택하고 있다. 특히 大阪大는 실질적인 레이저 誘雷 연구를 목적으로 1993년도부터는 야외현장에 50m의 철탑을 설치하여, 전계강도가 지상보다 수십배 높은 철탑꼭대기로부터 플라즈마 채널을 형성시켜 誘導방전을 유리하게 하는 현장실험을 개시하여 중요한 데이터를 얻고 있다[1][7].

3. 전압 · 전류 계측[7][15]

일반적으로 비선형 광학결정에 電界나 磁界를 인가하면 결정의 광학적 성질이 변하는 Pockels 효과나 Faraday 효과를 각각 얻을 수 있다. 레이저응용 전압, 전류계측에서는 이러한 비선형 광학효과들을 이용하여 측정 대상의 전압, 전류에 대응된 변조 레이저 광을 측정한다. 레이저 광은 전기적으로 절연되어 있고, 전자기적 잡음의 영향을 받지않을 뿐 아니라 비접촉적이고 측정의 신뢰도가 매우 높으며 소형경량화시킬 수 있는 등의 여러가지 장점들을 가지고 있다. 최근에는 전력회사들을 중심으로 전력설비진단의 방법으로 적극적인 연구가 이루어지고 있다.

Pockels 소자에 의한 전압측정은 다음과 같다. 측정소자의 입사 광과 투과한 변조광을 각각 I_i , I_o 라 하고 인가전계를 E 라고 할 때 식 (1)로 주어지는 관계를 얻을 수 있다. I_i , I_o 를 측정하여 식 (1)을 이용하면 전압을 구할 수 있다.

$$\frac{I_o}{I_i} = \sin(aE) + 1 \tag{1}$$

단, a 는 결정의 감도계수

다음으로, Faraday 소자가 Verdet 상수 V 를 갖고, 측정하고자 하는 전류에 의한 자계 B 에 비례하는 식 (2)로 회전각 θ 를 구하고, 주회적분의 법칙을 이용하면 식 (3)으로 표현되는 전류와 회전각의 관계를 얻을 수 있다. 그러므로 회전각을 측정함으로써 전류를 구할 수 있다.

$$\theta = V \int B \cdot dh \tag{2}$$

$$\theta = \mu VNI \tag{3}$$

단, μ 는 투자율

4. 플라즈마 계측[16]

4.1. 원리와 분류

일반적으로 레이저 응용계측은 피계측 대상에 레이저 광을 조사하여 그 응답을 보는 “능동적 계측법”이다. 피계측 대상이 플라즈마인 경우에는 그림 6에 나타낸 바와 같이

표 1. 플라즈마중의 레이저 傳播현상과 그 원인 및 그것을 이용하여 측정할 수 있는 플라즈마의 제량

현 상		원 인		플라즈마 제량의 이용
반 사	입사광이 플라즈마에 의해 반사됨	그 주파수의 전자파가 플라즈마 중 전반의 cut off 조건이 됨		① 플라즈마 밀도의 간이 추정법 ② 「전상(傳相)변화」와 함께 핵융합장치에서의 플라즈마 밀도 측정
강도 변화	투과광 강도가 플라즈마에 의해 감소함	그 주파수의 전자파가 플라즈마 중 전반의 공명조건이 됨		레이저 광을 플라즈마에 흡수시켜 여기된 플라즈마 파동을 측정하고 그의 파동의 자계와 이온온도 의존성을 이용하여 자계와 이온온도를 구함
		플라즈마를 구성하는 입자에 의한 흡수		흡수에 관여하는 입자 밀도의 선별측정
투과 위상 변화	투과광의 위상이 플라즈마와 진공에 대해서 다르게 변화함	플라즈마의 굴절율이 진공중의 값(=1)에서 변화함		① 완전전리 플라즈마에 있어서는 전자 밀도의 측정 ② 중성기체도 굴절율에 기여할 때는 다른 파장의 레이저 광을 이용하여 전자밀도, 중성기체 밀도를 분리하여 계측함
		직선편광의 레이저를 플라즈마중에 투과시킨 후 편광면을 회전함		회전각이 자계와 전자밀도의 곱과 레이저 운반통로에 걸치는 적분치에 비례하므로 다른 방법으로 전자밀도를 알면 자계강도가 구하여진다. 그 공간분포로부터 플라즈마 중의 전류밀도가 구하여진다
굴 절	입사 레이저 광의 통로가 플라즈마를 통과 후 입사광의 진행방향에서 휜	플라즈마의 굴절율의 정도에 의한 휜		① 충격파 등이 밀도변화의 현저한 장소의 가시화 측정 ② 투과,산란등의 측정을 하기위해 레이저 광의 휜을 어느 정도 이하로 억제 하기 위한 레이저주파수하한의 검토
산 란	레이저 광의 일부가 플라즈마 입자에 의해 레이저 광의 전반방향과의 다른 방향으로 산란됨	Mie 산란	레이저 파장보다 훨씬 큰 입자에 의한 산란	플라즈마 등의 입자의 덩어리의 공간 분포, 밀도, 속도의 측정
		Rayleigh 산란	원자, 분자, 이온 등에 의한 산란	① 플라즈마 등의 원자, 분자, 이온의 밀도 측정 ② 레이저형광, Thomson 산란을 하기 위해 광학계 교정
		Raman 산란	입사 레이저 광의 에너지가 분자에 흡수되거나 분자에너지가 레이저 광의 에너지에 더해져서 입사 레이저광과 다른 파장의 산란광이 나타남	① 분자의 밀도, 속도등의 측정 ② 레이저 형광, Thomson 산란을 하기 위한 광학계의 교정
		레이저 형광 (LIF)	원자, 분자, 이온의 에너지 준위차에 일치하는 레이저 광이 입자에 흡수되면서 동시에 입자를 여기시켜 그것이 하준위로 천이할 때 발생하는 방출스펙트럼	형광발생에 관여하는 원자, 이온, 분자의 밀도 에너지 분포함수의 선별 측정
		Thomson 산란	플라즈마중의 자유전자에 의한 산란	① 하전입자(전자,이온) 밀도, 온도의 측정 ② 플라즈마의 요동에 의한 전자밀도 요동의 파수, 주파수, 스펙트럼의 측정

플라즈마중에 레이저 광을 입사하면 레이저 광은

- 1) 플라즈마에 의해 반사되기도 하고
- 2) 투과광의 강도와 위상, 편광도가 변화 하기도 하고
- 3) 경우에 따라서는 레이저의 진행경로가 휘기도 하고
- 4) 산란광이 관측되기도 한다.

그 크기의 정도가 플라즈마에 따라서 다른 점을 이용하여 레이저 응용 플라즈마 계측에서는 문제로 하고 있는 플라즈마에 대해서 상기한 4가지의 경우가 관측이 가능하도록 레이저의 파장, 스펙트럼 폭, 강도, 편광도 등을 구하여 플라즈마의 파라미터를 계측하는 방법을 개발한다. 이 방법에 의하면 측정량의 시간적·공간적·스펙트럼적 분해능은 레이저측의 특성에 따라 정해지므로 레이저 광의 우수한 가간섭성(coherence)을 사용하면 플라즈마의 제 파라미터를 원격에서 높은 감도와 분해능을 가지고 파악할 수가 있다.

표 1에서는 상기한 4가지에 영향을 미치는 인자와 그것을 이용하여 측정할 수 있는 플라즈마의 파라미터를 나타내었다. 플라즈마 응용은 상당히 영역이 넓어지고 있는 동시에 레이저 및 계측기도 급속히 발전하고 있으므로 레이저 응용 플라즈마 계측은 금후에도 점점 그 측정대상을 넓혀나가면서 중요한 역할을 완수하는 것이 기대되고 있다.

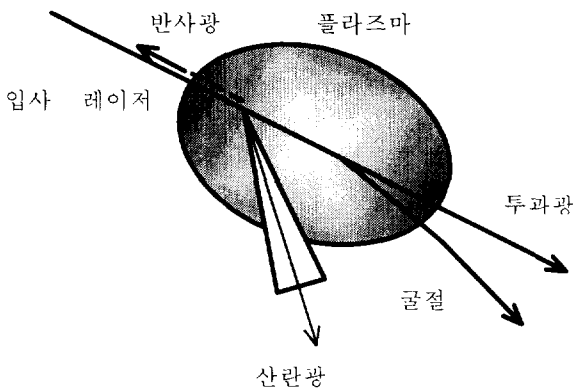


그림 6 레이저 응용 플라즈마 계측의 원리

(플라즈마에 외부에서 레이저광을 입사 하여 플라즈마에 의한 반사광, 투과광, 굴절광, 산란광에의 영향을 정량적으로 조사하여 그것으로부터 플라즈마의 상황을 파악하는 방법)

4.2. 연구내용

레이저 응용 플라즈마 계측 연구로서 현재 세계적 연구 동향과 그 내용을 간략히 소개하면 다음과 같다.

1) Thomson 산란법에 의한 플라즈마 진단

레이저 Thomson 산란법은 이미 확립된 기술이나 신세대의 요구에 부응하여 그 기능과 응용범위를 확대하기 위하여 다음과 같은 연구과제가 진행되고 있다.

- a. LIDAR Thomson 산란법에 의한 전자 온도·밀도의 계측.
- b. 적외·원적외 레이저에 의한 이온온도의 계측.
- c. Thomson 산란법의 방전 플라즈마에서의 응용.

d. Fraunhofer 회절법에 의한 플라즈마 요동의 검출과 와해의 사전검출

2) 고온 플라즈마중의 입자계측

고온 플라즈마중에서 레이저 형광법의 측정대상으로 되는 입자는 수소원자와 불순물 원자임. 불순물은 플라즈마·벽면의 상호작용의 관점에서 중요하다.

- a. 대형 플라즈마 장치중에서의 수소원자 밀도의 측정.
- b. 이온빔을 조사할 때 스퍼터된 원자의 속도 분포 관측의 측정

3) 레이저 분광법에 의한 프로세스 플라즈마의 진단

프로세스 플라즈마중의 각종 라디칼의 측정에는 레이저 분광법의 좋은 측정대상이 된다. 더욱이 스펙트럼 프로파일의 계측으로 새로운 정보를 얻을 수 있다.

- a. Stark 효과에 의해 국부전계의 계측
- b. 스펙트럼 프로파일의 관측에 의한 입자의 속도와 온도의 계측

4) 플라즈마 계측용 신형 레이저의 개발

- a. 고속 주파수스캔(RAFS) 레이저의 개발과 그 응용
- b. ps(10^{-12} s)고출력 색소 레이저와 광대역 가변파장 coherent 광원의 개발
- c. 새로운 가변파장 고체 레이저의 개발

5. 기 타

레이저광속도 [7]

1972년에 처음으로 제안된 과제로서 현재 기초적인 연구가 진행 중이다. 레이저 광이 대기 중으로 전파되는 특성이 우수하므로, 먼저 전기에너지를 레이저 에너지로 변환시킨 후, 원하는 곳으로 레이저 광을 전송하여 이로부터 레이저 플라즈마를 발생시켜 다시 전기를 얻는 방법이다.

전기애자의 염도측정

송전선 애자의 오손염분은 절연불량의 주요인이 된다. 그러므로 펄스 YAG 레이저를 이용하여 비접촉이고 원격측정으로 오손염분량을 직접 측정하는 방법이다. 측정원리는 애자에 YAG 레이저를 照射하여 부착된 염분 중의 NaCl을 열적으로 勵起시켜 Na의 발광정도로 염분량을 추정하는 방법이다.

레이저 동위체 분리(우라늄농축)

천연적으로는 0.7% 밖에 존재하지 않는 ^{235}U 를 3%까지 농축시킬 필요가 있다. 이를 위해 레이저로 우라늄을 농축시키는 연구가 되고 있다. 원리는 먼저 우라늄을 가열시켜 우라늄증기를 발생시킨 후 ^{235}U 만이 共鳴하는 파장의 색소 레이저를 照射하여 ^{235}U 를 光電離시킨 후, 전기적으로 진리 이온을 회수하는 방법이다.

6. 결 론

이상과 같이 방전·고전압공학 분야에서의 레이저 응용에 관하여 개략적으로 소개하였다. 기술된 분야들 중의 일부는 실용화 단계이거나 근접되었으나, 아직은 대부분이 연구 중에 있는 미래형 첨단 연구과제이다. 국내 전기공학분야에서의 투자는 미비하지만 국내에서도 충분한 결과를 얻을 수 있는 분야로 사료되며, 이를 계기로 새로운 관심의 대상이 되기를 기대하면서 끝맺고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] 山中龍彦, レーザ-研究, 24(5), p.533, 1996
- [2] "'95 송전설비 고장분석 및 대책", 한국전력공사, 1996
- [3] Maker et al., Quantum Electronics, Columbia Univ. Press, 2, p.1559, 1964
- [4] Y. P. Raizer, Laser-Induced Discharge Phenomena, Consultants Bureau, 1977
- [5] W. K. Pendleton, A. H. Guenther, Rev Sci. Instrum., 36, p.1546, 1965
- [6] L. M. Ball, Appl. Opt., 13, p.2292, 1974
- [7] 日本電學技術報告 553号, 1995
- [8] 田中 他, 放電·高電壓合同研究會資料 ED-96-77, 1996
- [9] 中村 他, 日本電學誌, B-113, p.1265, 1993
- [10] 神野 他, 日本電學誌, A-115, p.595, 1995
- [11] 新藤, 鈴木, 日本電中研調査報告 T182010, 1982
- [12] 張龍茂, 姜衡富, 電氣學會論文誌, 45, p.289, 1996
- [13] Y. M. Chang et al., XII Int. Conf. Gas Discharges and Their Applications, 1997
- [14] Y. M. Chang et al., proc. Korea-Japan Elect. Disch. H.V. Eng., paper3-31, 1996

[15] 日本電學技術報告 221号, 1986

日本電學技術報告 219号, 1986

[16] 村岡克紀, 前田三男, "レーザー-應用計測", 産業圖書, 1995

저 자 소 개



장용무(張龍茂)

1958년 9월 7일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과졸업, 1985년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(공학). 1995년-1996년 일본 큐우슈우대학 대학원(Post-Doc). 1988-현재 한양대 공대 강사. 1993-현재 한양대 산업과학연구소 선임연구원. 관심분야 : 레이저 誘雷, 레이저 응용 진단계측, 펄스 파워용 스위칭, 대출력 레이저 및 응용



최영욱(崔永旭)

1960년 6월 26일생. 1984년 2월 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 3월 九州大學 大学院 総合理工學研究科 에너지변환공학과 졸업(석사). 1997년 3월 동대학원 졸업(공학). 1984년 3월-1991년 10월 한국전기연구소 연구원. 1997년 4월-현재 한국전기연구소 선임연구원. 관심분야 : 방전현상의 레이저 응용 계측, 플라즈마응용, 고전압 펄스 전원 설계.



강형부(姜衡富)

1937년 8월 29일생. 1962년 일본 국립대관대학 공학부 전기공학과 졸업, 1969년 동대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한양대 공대 전기공학과 교수. 당학회 평의원