

CO₂ 레이저와 응용 (CO₂ lasers and applications)

이 인 원
한국표준연구소 광학연구소

I. CO₂ 레이저의 원리 및 특성

이산화탄소 레이저는 진동에너지를 가지고 있던 분자가 이완되면서 방출하는 광에너지를 출력으로 하는 적외선 레이저이다. N개의 원자로 이루어진 분자는 3N개의 자유도를 가지며 그중에서 분자전체의 병진자유도(translational degree of freedom)은 3가지가 있고 회전자유도(rotational degree of freedom)는 비선형 분자의 경우에는 3가지, 선형분자의 경우에는 두가지가 있게 된다. 따라서 선형분자인 CO₂ 분자에 있어서는 9개의 자유도 중에서 병진자유도 3개와 회전자유도 2개를 제외하고 남은 4개가 진동자유도이다. 그림 1에 CO₂ 분자의 진동모드가 기술되어 있다. 진동수가 ν_1 인 symmetric stretching mode에서는 탄소원자는 정지해 있고 두개의 산소원자들이 서로 반대 방향으로 움직인다. 보다 높은 진동수를 가지는 asymmetric stretching mode에서는 두개의 산소원자는 같은 방향으로 운동하고 그 반대방향으로 탄소원자가 운동한다. 진동수 ν_2 인 bending mode에는 면에 평행으로 운동하는 것과 면에 수직으로 운동하는 두가지의 진동이 축퇴되어 있다. CO₂ 분자에 있어서의 진동상태를 나타내기 위해서 (n_1, n_2, n_3)와 같은 기호를 사용한다. n_1, n_2, n_3 는 각각 symmetric stretching, bending, asymmetric stretching mode의 양자수이다. 첨자 ν 는 degenerate vibration의 양자수이며 $\ell = n_2, n_2 - 2, \dots, 1, 0$ 의 값을 가진다. n 가 0이면 ℓ 은 0, n 가 1이면 ℓ 은 1만이 가능하고 $n_2 = 2$ 이면 $\ell = 2, 0$ 의 두 값을 가질 수 있게 되며 ℓ 값이 큰 쪽이 높은 에너지 준위가 된다.

CO₂ 분자의 경우 $\nu_1 = 2\nu_2$ 가 되어서 (10°0) 준위와 (02°0) 준위의 에너지가 거의 같으며 두 준위가 perturbation을 일으켜 서로 구별할 수 없게 된다는 사실이 Fermi에 의해서 1931년에 발견되었다. [1] 이러한 현상은 (10°0)와 (02°0) 사이에만 국한되지 않고 다른 많은 진동준위 사이에도 존재하며 이 Fermi resonance가 존재하는 준위를 표시하기 위해 (10°0, 02°0)_I, (10°0, 02°0)_{II}와 같은 기호를 사용한다. 이 기호에서 첨자가 큰 (10°0, 02°0)_{II} 쪽이 (10°0, 02°0)_I 보다 에너지가 낮은 쪽이다.

CO₂ 레이저에서 레이저 발진과 직접 관계되는 에너지 준위가 그림 2에 기술되어 있다. Upper laser level인 (00°1) 준위로 여기된 CO₂ 분자가 lower laser level인 (10°0, 02°0)_I 또는 (10°0, 02°0)_{II}로 천이하면서 각각 10.4 μm 파장대와 9.4 μm 파장대의 적외선 레이저광을 방출하게 된다. 상준위의 이완시간이 하준위의 이완시간에 비해 훨씬 길기 때문에 상준위에 여기된 분자수가 하준위에 여기된 분자수보다 많아지는 밀도반전이 가능해지며 따라서 광의 증폭이 가능해진다. 일반적으로 CO₂ 레이저에서는 O₂와 He 기체를 혼합하여 사용하는데 그림 2에서 보는 것 처럼

N₂의 $\nu = 1$ 의 진동에너지 준위가 CO₂의 상준위와 거의 일치하기 때문에 N₂와 CO₂의 충돌을 통하여 $\nu = 1$ 으로 여기된 질소분자의 에너지가 CO₂의 00°1 준위로 공명 에너지 전달이 용이하기 때문에 질소혼합을 통하여 레이저 효율을 크게 향상시킬 수 있다. He 기체는 CO₂와의 충돌을 통하여 하준위의 CO₂ 분자 에너지를 흡수함으로써 밀도반전이 큰 값을 가지도록 촉진해준다.

그림 2에서는 상, 하 에너지준위를 단순하게 하나의 진동 에너지 준위로 표시하였으나 실제로는 같은 에너지 준위안에 여러개의 상준위의 특정 회전 에너지준위에서 하준위의 특정 회전 에너지준위로 천이하며 일어나게 된다. 하준위의 회전 에너지 양자수가 상준위의 회전 에너지 양자수에 비해 1이 클 경우에는 P-branch 천이라 하며 같을 때에는 Q-branch 천이, 1이 적을 때에는 R-branch 천이라 하며 하준위의 회전 양자수를 괄호속에 넣어 P(20), R(22) 등과 같이 표시한다. 적외선 파장 10 μm 는 1000 cm^{-1} 에 해당되며 인접한 천이선 사이의 파장간격은 10 ~ 30 nm ($1 \sim 3 \text{ cm}^{-1}$)이고 CO₂ 레이저에서 얻을 수 있는 파장은 9.1 ~ 12.5 μm 영역이다.

CO₂ 레이저는 양자효율(상준위 에너지에 대한 레이저 광자 에너지의 비)이 40% 정도로 대단히 높으며 실제 장치에 있어서도 10% 정도의 plug in efficiency를 얻을 수 있는 고효율 레이저이며 쉽게 고출력을 얻을 수 있고 연속작동과 펄스작동이 모두 가능하기 때문에 재료가공 등의 산업적 응용과 연구, 의료, 군사적 응용에 걸쳐 광범위하게 사용되는 레이저이다.

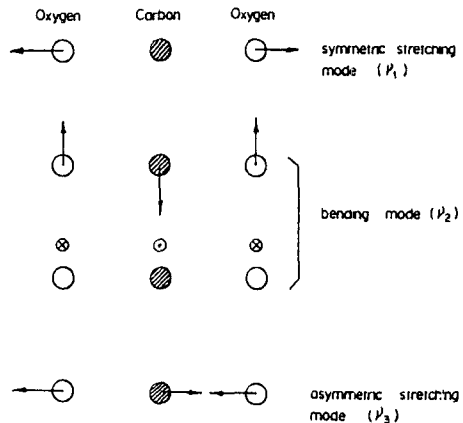


Fig. 1. Vibrational modes of CO₂.

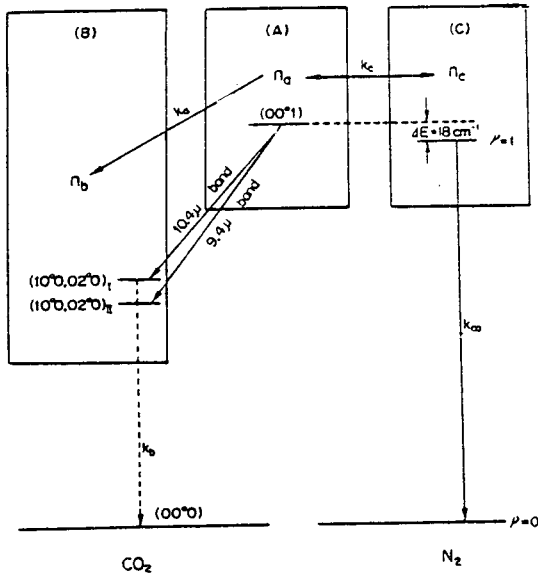


Fig. 2. Vibrational energy level diagram of the CO₂-N₂ system.

II. CO₂ 레이저 발생장치

1. 여기방법

가. 전기방전

CO₂ 레이저에서 여기 방법으로 가장 널리 사용되는 방식이 바로 전기방전 여기이다. 기체 방전에서 전자는 전기장에 의해 가속되어 운동에너지를 가지게 되며 가속된 전자가 기체분자와 충돌하면서 전자의 운동에너지 일부를 기체의 진동에너지로 전달하여 기체를 여기시킨다. 플라즈마에 의해 흡수된 전기에너지 중에서 레이저 발진에 필요한 진동에너지로 전환되는 에너지의 비율은 전자의 평균에너지에 따라 달라지며 $E/N = (1.5 - 2) \times 10^{-16} \text{ V} \cdot \text{cm}^3$ (E 는 전기장의 세기, N 은 기체 밀도)에서 최고치 0.9가 얻어졌다[2].

(1) Self-sustained DC discharge

음전극과 양전극 간에 직류전압을 걸어주어 방전을 지속시키는 방식으로 걸어진 전기장은 전자를 충분히 가속시켜서 진동에너지 여기뿐만 아니라 이온화 작용도 적절히 할 수 있게 해야 하므로 진동에너지 여기에 최적인 전장세기보다 2배 정도로 강해야 한다. 이 방전의 특징은 단순하다는 점이며 기체가 흐르는 방향과 전류방향이 같을 때에는 증여기 방식이라 부르고 두 방향이 서로 수직일 경우 종여기라 부른다. 이 자속 방전 방식에서는 방전의 시작을 용이하게 하고 방전을 안정화 시키기 위해서 ballast 저항을 사용하게 되며 이 저항에 의한 전력손실은 증여기의 경우 10% 정도, 횡여기의 경우 20 ~ 50% 정도가 된다[3].

(2) E-beam sustained DC discharge

보통조건에서는 glow discharge가 일어나지 않을 정도의 낮은 전압을 주전극에 걸어주고 전극사이의 기체 매질에 100 ~ 250 keV로 가속된 전자빔을 $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이상의 세기로 조사해주면 주입된 전자에 의해 플라즈마가 생성되어 방전이 일어나게 된다[4]. 이러한 비자속(nonself-sustained) 방전에서는 낮은 E/N 값에서 방전시키므로 방전이 안정되고 매질의 광학적 균일성을 얻을

수 있으며 여기효율이 높아지는 장점이 있다. 전자빔 지속방전의 단점은 가속된 고에너지 전자빔이 필요하므로 장치의 제작과 작동이 복잡하며 작동하는 사람을 전자빔으로부터 보호하기 위한 보안조치가 필요하다는 점이다.

(3) 펄스이온화 비자속 방전

짧고 강한 펄스방전 ($E/N = 1 \times 10^{-15} \text{ V} \cdot \text{cm}^3$, $\tau_p \leq 0.1 \mu\text{s}$)을 선행시켜 플라즈마를 생성시킨 다음에 낮은 E/N 값으로 비자속 방전을 뒤따르게 함으로써 전자빔 이온화 방식에 비해 상당히 단순한 방법이다. 펄스 반복률은 플라즈마가 남아 있는 상태에서 계속될 수 있도록 1 ~ 100 kHz를 사용한다[4]. 펄스방전과 DC 방전이 동일전극을 사용하는 방식과 두개 방전이 별도의 전극을 사용하는 방식이 있으며 펄스이온화 비자속 방전으로 많은 부피의 기체를 여기시킬 수 있다. 기술적인 복잡성은 0.1 μs 이하의 짧은 펄스방전을 위해 pulse generator를 만들어야 한다는 점이다.

(4) 고주파 교류방전

펄스이온화 방식과 작동원리가 유사하나 고주파 교류 방전에서는 별도의 펄스방전이 필요없이 고주파 교류 전기장에서 전기장이 최대가 되는 시간에는 이온화 작용을 하고 그 이외의 시간에는 비자속 방전을 하는 방식이다. 이온화 작용을 하는 시간이 전체의 10% 정도이므로 방전이 자속방전에 비해 안정되기 쉬우므로 더 많은 에너지를 기체에 넣어 줄 수 있다. 플라즈마가 소멸되기 전에 다시 이온화 작용이 일어나야 하므로 고주파가 필요하며 대개 10 ~ 100 kHz를 사용한다. 기체매질에 노출되어 있는 핀 전극에 고주파를 인가시키는 방법과 기체매질을 절연체로 싸고 그 외부에서 고주파를 인가하는 방식이 사용되고 있다. 레이저 출력은 고주파 전원 주파수의 두배로 변조되며 변조정도는 10 kHz의 경우 5% 정도이고 [5] 주파수가 높아지면 변조정도는 더 낮아진다.

(5) 펄스방전

펄스방전은 주로 높은 기체 압력에서 횡여기 방식으로 사용되고 있으며 하나의 방전과 다음 방전 사이의 시간이 많이 떨어져 있기 때문에 하나의 방전에서 생성되었던 플라즈마가 소멸된 다음에 새로운 절연기체에 대해 다음 방전이 일어나게 된다. 따라서 방전의 시작을 쉽게 하고 균일 방전을 가능하게 하려면 방전 펄스 직전에 기체 매질의 선전리(preionization)가 이루어지는 것이 중요하며 선전리 방식으로는 주로 전자 빔과 자외선이 사용되고 있다.

나. Gas dynamic pumping

고온, 고압으로 밀폐되었던 기체를 노즐을 통해 순간적으로 단열팽창시키면 이완시간이 긴 상준위에 여기되었던 분자는 그대로 있고 이완시간이 빠른 하준위에 여기되었던 분자는 바닥 상태로 떨어지게 되어 밀도 반전이 형성된다. 온도는 1000 ~ 2000 °K 정도로 가열하고 기체 압력은 수십기압으로 유지하는 것이 보통이며 기체 가열방법으로는 아크방전 방식과 연소방식이 주로 사용되고 있다. 아크방전 방식에서는 7.5% CO₂, 91.3% N₂, 1.2% H₂O를 사용하는 경우와 N₂만을 아크로 가열한 다음 팽창시키는 과정에서 차가운 CO₂, He 혼합기체와 만나 에너지 전달을 하게 하는 방식도 사용되었다 [1]. 연소방식에서는 CO, O₂, H₂, N₂의 혼합기체를 사용하는 방식과 acetylene, propane 또는 천연가스를 산소와 혼합하여 사용하는 방식이 있으며 gas dynamic laser에서 H₂O는 하준위를 빨리 이완시키는 quencher로서의 역할을 하고 있다. 연속 출력으로는 수십 kW가 쉽게 얻어지며 펄스동작으로는 수 kJ 에너지가 얻어지고 있다.

다. Optical pumping과 chemical transfer pumping

HBr 레이저의 4.23 μm 출력을 직접 CO_2 분자에 조임으로써 상준위($00^0 1$)로 여기시킬 수 있다. 수기압 ~ 수십기압의 기체 압력이 사용되고 있으며 0.4 μs HBr 레이저 펄스로 펌핑하여 20기압의 CO_2 압력에서 2 ns의 CO_2 레이저가 얻어졌다.

화학반응을 통하여 생성되는 HV, HBr, DF, HF의 여기된 분자와 CO_2 를 충돌시킴으로써 펄스와 연속동작의 CO_2 레이저가 얻어지고 있다. DF, HF와 CO_2 사이에는 attractive potential이 작용하므로 에너지 전달이 효과적으로 일어난다.

2. 기체 냉각 및 refresh 방법

가. 열확산 냉각(diffusion cooling)

방전관 내부에 혼합기체를 넣어 방전시키면서 방전관 외벽을 냉각수로 식혀주는 방식으로서 방전으로 더워진 기체는 차가운 관벽에 충돌하여 냉가된다. 방전관의 직경이 작으면 효과적으로 열확산 냉각이 가능하므로 방전관 단면적당의 전기 입력에너지 밀도는 관직경의 제곱에 반비례하여 증가하게 되며 따라서 방전관에 넣어줄 수 있는 총에너지는 직경에 무관하다. 레이저 출력도 방전관 직경에 관계없이 최적조건에서 100 W/m 정도가 얻어지고 있다. 방전에 의해 CO_2 가 해리되어 생성되는 O_2 와 기타 분순물의 영향을 최소화하기 위해 보통 느린 속도로 기체를 흘러주게 되며 기체가 흐르는 방향이 방전방향과 나란하기 때문에 이러한 종류의 레이저를 저속축류형(slow axial flow: SAF) 레이저라 칭한다.

저속축류형 CO_2 레이저에서는 기체소모가 그다지 많지 않으므로 방전에 사용된 기체를 외부로 배출해 버리는 개방형(open type)이 주로 사용된다. 레이저 장치를 단순하게 하고 기체소모를 없애며 휴대용으로 운반할 수 있는 장점을 가지도록 밀봉형(sealed off) CO_2 레이저도 개발되어 있다. 밀봉형에서는 CO_2 해리로 생성된 CO와 O_2 를 재결합시켜 다시 CO_2 로 만들어 주기 위해 Pt 촉매를 가열하여 사용하거나 또는 Pd를 작은 가루로 만들어 다공성 SnO 에 침투시켜 촉매로 사용한다 [6]. O_2 에 전자가 부착됨으로써 방전이 불균일한 아크로 천이 되는 것을 방지하기 위해 촉매를 사용하는 방법 이외에도 자외선 선전리 펄스레이저의 경우 자외선 펄스와 주방전 펄스를 시간적으로 가깝게 하고 펄스 길이를 짧게 함으로써 자외선에 의해 생성된 전자들이 산소에 부착되기 전에 균일한 주방전이 일어나도록 하기도 한다 [7]. 기체매질에 생성되는 H_2O 분순물을 제거해주는 molecular sieve (3 A)를 사용하여 장시간 동작이 가능하였다.

열확산 냉각 방식 레이저에서 고효율을 얻기 위해서는 방전관의 길이를 10 m 정도로 길게 하다가 직경 5 mm, 길이 1 m 정도의 가는 방전관 여러개를 병렬로 설치하는 multichannel 방식을 사용하게 된다. Multichannel 방식에서는 자속 직류방전과 고주파방전 여기 방법이 사용된다.

나. 대류냉각(convection cooling)

기체를 빠른 속도로 흘러줌으로써 방전영역에서 너무 뜨거워지기 전에 새로운 기체가 공급되도록 하는 방식을 대류냉각이라 한다. 방전방향과 기체가 흐르는 방향이 일치하는 형식을 고속축류형(fast axial flow: FAF) CO_2 레이저라 부르며 두개의 방향이 서로 수직인 형식을 고속횡류형(transverse flow)형 CO_2 레이저라 한다. 대류냉각 방식에서는 SAF CO_2 에 비해 단위길이당 훨씬 높은 출력을 얻을 수 있으나 기체를 고속으로 흘러 주기 위해 용량이 큰 펌프가 필요하다는 복잡성이 있다. 대류냉각방식에서는 기체 순환방식을 사용하고 0.1 ~ 1% 정도만의 새로운 기체를 교환해 줌으로써 기체 소모를 최소화 하고 있다.

다. 단일펄창 냉각

앞에서 설명된 gas dynamic laser(GDL)에서 사용되는 기체냉각 방식이며 고온, 고압의 기체를 노즐을 통하여 순간적으로 단일펄창시킴으로써 lower level에 여기된 CO_2 분자를 이완시키는 방법이다.

3. 고효율 CO_2 레이저

가. 고효율 CW CO_2 레이저

레이저 출력 100 W 정도를 내는 저속축류형(SAF) CO_2 레이저는 레이저빔의 공간적, 시간적 특성이 우수하기 때문에 비교적 낮은 출력이 필요한 응용분야에 쓰이고 있다. SAF CO_2 를 고효율으로 만들기 위해서는 방전관의 내경을 3 cm 정도로 비교적 크게 하고 길이를 10 m 정도로 하여 1 kW 출력을 얻는다. 내경 4 mm 정도의 방전관을 여러개 사용 하는 multichannel SAF CO_2 레이저로는 보통 1 ~ 4 kW의 출력을 얻는다. FAF CO_2 레이저의 경우에는 보통 수 kW의 출력을 얻고 있으며 transverse fast flow 방식을 사용하여 20 ~ 30 kW까지의 출력을 내는 상품이 개발 되었다.

나. 고효율 펄스 CO_2 레이저

고출력 펄스 레이저는 다광자 해리, 초고온 플라즈마 생성, Lidar, 재료가공 등의 응용에서 연속 출력 레이저로는 불가능하거나 미흡한 성능에 그치는 분야에서 양호하게 활용될 수 있는 장점이 있다. 연속 출력 CO_2 레이저를 Q-스위칭시켜 펄스를 얻는 연구가 초창기에 시도되었으나 높은 기체 압력에서 횡방향 펄스 방전 방식으로 동작되는 TEA(transversely excited atmospheric pressure) CO_2 레이저의 출현으로 Q-스위칭 방식은 거의 쓰이지 않게 되었다. TEA CO_2 에서는 보통 방전펄스의 길이가 1 μs 이내이며 N_2 혼합비와 기체 압력 등에 따라 달라지기는 하지만 보통 수백 ns의 레이저 펄스가 얻어진다.

TEA CO_2 레이저에서 mode-locking을 통하여 1 ns 길이의 펄스열이 발생되며 이들 펄스열에서 단일 펄스를 선택한 다음 증폭시킴으로써 10 GW 이상의 고효율을 얻을 수 있다. 펄스레이저에서 평균출력을 높이기 위해서는 고에너지 펄스와 함께 고반복률이 요구된다. 고에너지, 고반복률 동작을 위해서는 하나의 방전에 쓰였던 기체가 빨리 지나감으로써 다음 방전에서는 새로운 기체가 전극사이에 채워지도록 고속으로 기체를 흘러주어야 한다. 또한 방전에서 생성되는 분순물을 제거해 주기 위해 Pt, Pd, gopcolite (MnO₂, CuO based mixture) 등을 사용한다 [7], [8]. 고에너지, 고반복률 CO_2 장치로는 펄스에너지 10 J, 반복률 1000 pps, 평균 출력 10 kW 정도의 시스템들이 개발되었다 [8].

4. 파장가변 CO_2 레이저

동위원소 분리나 적외선 분광학 등의 응용을 위해서는 파장을 가변시킬 수 있는 레이저가 필요하다. 파장은 프리즘, 광회절격자, F-P etalon을 사용하여 선택할 수 있으며 공진기내에 etalon을 설치하여 0.03 cm^{-1} 의 선폭이 얻어지고 있다. 기체의 압력을 높이면 파장 가변 범위를 넓힐 수 있다. CO_2 레이저의 경우 압력에 따른 선폭확장의 정도는 0.2 $\text{cm}^{-1}/\text{atm}$ 이고 서로 이웃한 천이선의 간격이 1 ~ 3 cm^{-1} 이므로 기체압력을 10기압 이상으로 하여 주면 연속적으로 중첩된 스펙트럼을 얻을 수 있게 된다. 기체의 압력을 높여주고 동시에 천이선에 약간의 차이가 있는 ^{12}C , ^{13}C 동위원소를 혼합하여 사용함으로써 9.1 ~ 12.5 μm 영역에서 연속적인 파장가변이 가능하다[9]. 수백 torr 정도의 중간 기압에서 작동하는 waveguide CO_2 레이저는 파장가변 영역은 0.2 cm^{-1} 정도로 좁으나 크기가 작고, 파장 안정성이 양호하기 때문에 고분해능 분광학에 많이 이용 되고 있다.

III. CO₂ 레이저의 응용

1. 산업분야에서의 응용

가. 레이저 처리의 유형

- 1) 열처리
국부가열을 통한 응력제거, 구조변화를 통한 재질경화, 레이저 가열에 의한 화학반응 촉진등
- 2) 용융처리
용접, 표면합금 형성, 표면의 용융경화, 불순물 제거 등
- 3) 증발처리 또는 용융제거 처리
절단, 천공, scribing, marking, reprographics, 저항 트립핑, 표피제거, 흠집제거, 박막증착 등

나. 레이저 처리의 장단점

- 1) 장점
정밀가공, 좁고 깊은 용접, 열영향 받는 부분의 최소화, 높은 생산효율, 자동화 용이, 다양한 가공이 용이, 원격가공, 레이저광 분할로 다중 작업가능, 진공 장치 불필요, 비접촉 가공, 공구마모 없음, 전자빔에 비해 X-선 장애 없음, 잔류자장 영향 없음, filler 없는 용접 가능, 특성 다른 재료 사이의 용접도 가능, 빔의 형상, 강도, 위치를 쉽게 조정할 수 있다. 부과창 내부의 시료 가공도 가능, 표면만의 열처리 가능
- 2) 단점
시설투자와 운전경비가 일반적으로 비싸다. 새로운 기술이므로 훈련이 필요하다. 표면반사 때문에 손실이 많다.

2. 연구분야에서의 응용

CO₂ 레이저는 초고온 플라즈마의 생성 및 진단[10] 동위원소 분리[11-13], 원격외선 레이저 여기[14,15], 다광자분광학[16], 대기중의 공해물 분포 조사[17] 등에 이용되고 있으며 최근에는 고온초전도체 박막의 증착, 레이저에 의한 CVD 등에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

3. 의료분야에서의 응용

CO₂ 레이저 파장은 수분에 의해 강력히 흡수되며 인체의 90% 정도가 물로 이루어져 있기 때문에 CO₂ 레이저광은 아주 작은 부위에서 모두 흡수된다. 따라서 목적하는 부위 이외의 세포에 거의 영향을 주지 않고 처리가 가능하며 실제로 열에 의해 손상되는 부위는 50~200 μm 정도인 것으로 알려지고 있다. 또한 표피 조직만을 짙은 펄스광으로 제거하는 것이 가능하며 25~80 μm 깊이 까지만을 제거한 결과가 보고되고 있다[18].

CO₂ 레이저는 뇌종양이나 피부암 세포와 같은 악성 조직의 제거에 활용되며 피부의 흠집, 물집, 문신 등을 효과적으로 처리할 수 있으며 무혈절개 수술에도 활용되고 있다. 레이저의 장점은 비접촉이며 조작이 용이하고 정밀하며 시술후에 회복이 빠르다는 장점이 있다.

References

- [1] W. W. Duley, *CO₂ lasers : Effects and applications*, Academic Press, New York, P 58, 1976.
- [2] W. L. Nighan, *Phys. Rev. A2*, 1989 (1970).
- [3] A. C. Eckbreth and J. W. Davis, *Appl. Phys. Lett.* **19**, 101 (1971).
- [4] G. A. Abil'siitov et al., *Sov. J. Quantum Electron.* **11**, 1535 (1982).
- [5] V. V. Antyukhov et al., *Sov. J. Quantum Electron.* **10**, 240 (1980).
- [6] A. V. Artamonov et al., *Sov. J. Quantum Electron.* **11**, 679 (1981).
- [7] P. E. Dyer and P. Monk, *Appl. Phys.* **B26**, 169 (1981).
- [8] V. Yu. Baranov, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-19**, 1577 (1983).
- [9] F. O'Neill and W. T. Whitney, *Appl. Phys. Lett.* **31**, 270 (1977).
- [10] K. C. Jones and J. L. Munroe, *J. Opt. Soc. Amer.* **67**, 1405 (1977).
- [11] N. V. Karlov et al., *Appl. Opt.* **17**, 856 (1978).
- [12] J. L. Lyman et al., *Appl. Phys. Lett.* **27**, 87 (1975).
- [13] I. P. Herman and J. B. Marling, *J. Chem. Phys.* **72**, 516 (1980).
- [14] Z. Drozdowicz et al., *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-13**, 413 (1977).
- [15] E. J. Danielewicz and F. Keilmann, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-15**, 8 (1979).
- [16] J. L. Lyman et al., *Opt. Commun.* **25**, 391 (1978).
- [17] R. W. Week and W. W. Duley, *J. Appl. Phys.* **10**, 4661 (1974).
- [18] J. A. Dixon, *Proc. IEEE* **70**, 579 (1982).