

액체 레이저 발진기와 웨이브가이드

Liquid Laser Cavities and Waveguides

조성주
 (주)라이다텍 환경연구소
 sjcho@lidartech.com

액체 레이저 발진기와 웨이브가이드(liquid laser cavities and waveguides)는 서로 섞이지 않는 액체들의 표면장력에 의해 자연적으로 형성되는 액체표면에서의 전반사를 이용하여 레이저를 발진시키는 새로운 형태의 색소 레이저이다. 본 연구에서는 지금까지 연구되어온 마이크론 크기의 구형 액체 발진기⁽¹⁾의 형태가 아닌, 밀리미터 크기의 다양한 형태의 액체 레이저 발진기 제작과 발진 특성, 이의 적용 가능성을 살펴 보았다.

서로 섞이지 않고 레이저의 발진을 방해하지 않는 액체들인 C₈F₁₈, H₂O, Dibutylphthalate(DBP; C₁₆H₂₂O₄)를 사용하여 크기(0.1 - 1.5 cm)를 연속적으로 조절할 수 있는 액체 방울 모양과 환형 고리 모양의 액체 발진기를 구성하였다. 가로, 세로 각각 20 mm인 직육면체 용기에 물을 넣은 후에 물 속에 피펫을 사용하여 레이저 색소(Laser dye; 9-Dibutylaminobenzophenoxazinon-5)가 용해되어진 DBP(Density:1.047g/cm³)를 넣으면 물보다 무겁기 때문에 용기 바닥에 방울 모양의 액체 발진기가 표면장력에 의해 자연적으로 형성된다.(그림 1) 이 발진기는 매우 안정하여 20일 이상 그 특성이 변화되지 아니한다. Nd:YAG 레이저의 2차 조화파를 사용하여 적도 부근을 펌핑(pumping)하면 적도 부근에서 360도 전방향으로, 레이저 빛(λ =630-640 nm)이 방출되며 이때 발진 문턱 에너지(threshold energy)는 10 μ J이다.

대기중에서 DBP 용액은 폴리에틸렌 모세관 끝에 지름이 약 2 mm인 물방울 모양의 발진기를 형성한다. 이 발진기는 물속에 있는 것에 비하여 공기와 DBP의 굴절률($n_{H_2O}=1.33$, $n_{DBP}=1.49$) 차이가 크기 때문에 전반사가 액체 발진기 내부에서 일어나는 각도 범위가 크므로 레이저 발진을 위한 문턱 에너지가 0.2 μ J로 물속에 있는 발진기보다 적다.

용기 속에 C₈F₁₈(굴절률(n_D)=1.28; 밀도(D)=1.793g/cm³)를 넣고 그위에 물을 넣으면 물은 가볍고, C₈F₁₈과 섞이지 않아 용기의 벽면에 물이 가서 불기 때문에 중심부분은 물이 없는 고리 모양의 형태를 띄게 된다. 이때 레이저 용액인 DBP를 조금 넣으면 레이저 용액은 물 표면에 부착이 되어 고리 모양의 레이저 발진기가 완성된다. DBP의 전반사 입사각도는 물과 공기, 그리고 C₈F₁₈ 각각에 대해서 62°, 43°, 59°이다. 이때 적도 부근을 펌핑했을 때 발진 문턱 에너지는 85 μ J이고 발진된 레이저 빛은 측면에서 보았을 때 네곳의 모서리인 얇은 DBP 박막(thin film)으로부터 나온다. 용기의 뚜껑이 닫혀있을 경우는 용기 안

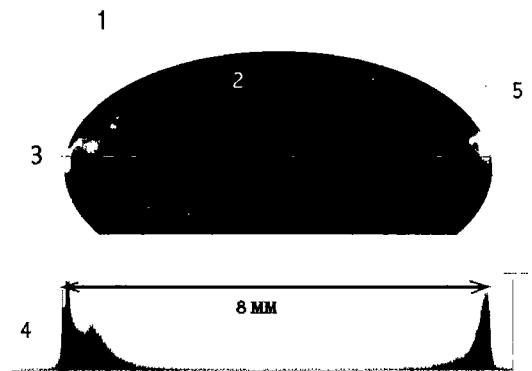


그림 2. 물속의 DBP 액체 발진기.
 1-물, 2-DBP용액, 3-펌핑되는 적도면, 4, 5-레이저의 가로, 세로축 강도분포

의 증기압이 일정하여, 형성된 고리모양의 액체발진기가 안정된 형태로 유지되지만 용기의 뚜껑이 열려 있을 때에는 용기 내부의 C₈F₁₈의 증기압이 변화되고 이 변화가 DBP용액의 표면장력을 변화시켜, 공기와 접하고 있는 DBP표면의 진동⁽²⁾이 관측된다. 이 경우도 발진특성은 용기의 뚜껑이 닫혀있을 때와 같다.

이외에도 여러 메니스커스모양과 거품모양(bubble)의 액체발진기를 제작하여 레이저를 발진하였으며 발진특성이 연구되었다.

액체레이저 발진기와 웨이브가이드는 액체표면에서의 전반사로 인해 발진이 되기 때문에 발진 문턱 에너지가 매우 낮다. 그러나 대부분의 레이저 에너지가 전반사로 인해 외부로 나오지 못하고 발진기 내부에서 갇혀있게 되어 이 내부에 갇혀있는 레이저에너지를 밖으로 도출하기 위해서 액체발진기에 프리즘이나 광학윈도우(optical window)를 접촉시켜 접촉면으로부터 레이저빔이 밖으로 나오도록 했으며 이때 효율은 펌핑에너지의 0.2 - 0.5 %를 얻었다. 특히 시험관용기에 C₈F₁₈와 Rhodamin B가 용해된 에탄올 용액을 넣고 800 rpm으로 회전시키면 무거운 C₈F₁₈은 원심력에 의해 용기벽면으로 밀려나고, 회전축을 따라 에탄올용액이 탄환모양의 형태를 띤다. 이 발진기의 끝에서 급격히 각도의 변화가 생기기 때문에 부분적으로 전반사 조건이 파괴되어 발진된 레이저 빔이 외부로 나오게 되며 이때의 에너지효율은 5 %에 이른다.

액체레이저 발진기는 표면의 성격에 따라 그 특성이 민감하게 바뀌게 된다. 에탄올 용액이 담긴 시험관을 펌핑하면, 유리의 굴절률이 에탄올용액보다 크기 때문에 전반사조건을 만족시킬수가 없게 되어 레이저가 발진이 되는 것은 불가능하다. 그러나 실험결과 레이저가 발진이 되었을 뿐만아니라 발진된 레이저빔의 스펙트럼은 간섭계등과 같은 특별한 광학적 장치가 없이는 유기염료의 특성상 넓은 영역에서 연속스펙트럼을 갖는 것과는 달리 명확한 선형스펙트럼 구조를 갖고 있었다. 이는 유리 시험관과 공기에서 전반사가 일어나는 조건이 되고 전반사가 된 레이저빔은 다시 에탄올과 유리시험관 면에서 간섭현상을 일으켜 보강간섭을 일으키는 조건을 만족하는 파장만이 증폭(amplification)되어 선형 스펙트럼 구조를 갖게 되는 것을 밝혀내었다.

액체레이저 발진기는 표면장력에 의해 형성되는 액체표면이 레이저 거울(laser mirror)의 역할을 하기 때문에 펌핑에너지가 큰 실험을 할 경우에도 거울표면이 상하는 일이 없고 또한 발진 문턱에너지가 아주 낮기 때문에 새로운 유기염료의 발진특성을 연구할 경우에 고가의 광학구성품들을 사용하지 않아도 되어 비용과 실험의 영역을 확장시켜준다. 유기염료의 형광(fluorescence)이 펌핑에너지를 증가시킬때 형광이 계속 증가하는 현상을 설명하기 위해 펌핑강도(pumping intensity; I_0)에 따라 여기 상태(excited state)의 생명주기(life time; τ)가 변한다고 하는 가설⁽³⁾($\tau \propto I_0^{-0.5}$)을 검증하기위하여 액체레이저발진기를 사용하여 생명주기가 펌핑강도에 따라 변하지 않고 일정함을 증명하였다.

액체레이저 발진기와 웨이브가이드는 외부의 영향에 민감하게 반응하여 이런 영향을 측정하는 계측기 개발과 액체 표면현상의 연구, 그리고 발진특성 연구를 위한 자연적인 광학실험기기로서 그 응용범위를 확대할 수 있다.

참고문헌

1. Shi-Xiong Qian, J. B. Snow, Huey-Ming Tzeng, R. K. Chang, "Lasing Droplets: Highlighting the Liquid-Air Interface by Laser Emission", Science 231, 486 (1986).
2. Yu. Yu Stoilov., "Fluorocarbons as Volatile Surfactants", Langmuir 14, 5685-5690 (1998)
3. V. P. Klochkov ., E. B. Verkhovskii, "Influence of spontaneous emission on the threshold longitudinal pump power of dye lasers", Quantum Electronics 21, 1005-1007 (1994)