

# 광학 포커스

## —레이저 (3)—

※이 글은 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업의 연구보고서로서 한국표준연구소에서 연구한 '레이저 응용기술개발을 위한 사전조사 연구'에서 발췌한 것임을 밝힌다※.

### ④ 주파수 가변(tunable) 레이저

보통의 레이저는 단일 주파수 발진을 하며 주파수 가변성이 없다. 그러나, 초정밀 레이저 분광학, 레이저 원격 탐사 등의 레이저 계측 분야와 의학용 레이저로서 레이저의 주파수를 가변할 수 있는 레이저의 필요성이 강력히 대두되었다. 현재 개발된 주파수 가변 레이저로는 가시 영역과 근적외선 영역의 색소 레이저, 적외선 영역의 color center 레이저, 자유전자 레이저, 반도체 레이저 등이다. 그러나 색소 레이저의 경우 파장 가변 영역은 각 색소별로 국한되어 있으며 주파수 안정도가 떨어진다. 또한 color center 레이저와 반도체 레이저의 파장 가변 영역은 극히 제한되어 있다.

70년대말 전자의 vibronic transition을 이용하는 주파수 가변 고체 레이저의 발견 이래 100nm 이상 심지어는 1000nm 이상을 연속적으로 주파수 가변할 수 있는 고체 레이저의 개발이 이루어져 왔다. 현재까지 개발된 주요 가변 고체 레이저와 이들의 파장 가변영역을 cw와 pulse 를 구별하여 그림 2-6에 나타내었다.

이들 주파수 가변 고체 레이저의 개발은 대부분의 선진국에 의해서 주도되고 있으며 특히 미국의 NASA의 경우 주파수 가변 고체 레이

저를 이용하여 인공 위성에 기지를 둔 공해 감시 및 원격 탐사 시스템을 개발 중에 있다. 또한 중공, 일본 등에서도 정책적으로 주파수 가변 고체 레이저의 개발에 박차를 가하고 있으며 국내에서도 많은 연구 기관과 학교에서 관심을 가지고 있는 레이저 개발 분야이다.

주파수 가변 고체 레이저의 장점은 기타 다른 레이저들보다 열적으로 안정하여 장시간 사용이 가능하며 근적외선 영역의 모든 파장을 가변할 수 있는 점이다. 이들을 이용한 응용 분야를 보면 크게 세 분야로 나눌 수 있는데 첫째 과학적 연구용으로 사용하는 것이다. 즉 초정밀 레이저 분광학, 광화학, 그리고 비선형 광학 연구에서 주파수를 가변하면서 새로운 원자적, 분자적 천이과정을 연구하는데 사용할 수 있다. 또한 1500nm 영역의 soliton 연구 등에도 앞으로 주파수 가변 고체 레이저의 사용이 기대된다. 둘째로 원격 탐사에 이용된다. 지금까지는 CO<sub>2</sub> 레이저나 반도체를 이용한 원격 탐사만 가능하였다. 그러나 이들 레이저의 파장 가변 능력은 극히 제한되어 몇몇 분자와 원자만을 대상으로 원격탐사가 가능하였으나 주파수 가변 레이저를 사용하면 환경 공해의 원인이 되는 거의 모든 분자나 원자들의 존재를 알 수 있어서 완벽한 원격 공해감시 및 환경 계측

시스템을 구성할 수 있다. 이들을 이용한 LI-DAR 특히 DIAL 시스템 개발을 국내에서도 시급히 개발할 필요성이 있다. 세번째로 응용 가능한 분야는 의학 분야이다. 이미 많은 레이저가 의학용 레이저로 개발되어 사용되고 있으나 파장 가변성이 없기 때문에 극히 제한된 분야에만 사용되고 있다. 그러나, 주파수 가변 레이저를 사용하면 표피를 자를 두께나 침투 두께 및 응고 크기의 파장을 가변함으로써 쉽게 조절할 수 있다. 특히 헤마토포피린(HpD) 광선 요법 개발 등에는 주파수 가변 고체 레이저가 필수적이 될 것이다.

이렇듯 많은 분야에 응용이 예상되는 주파수 가변 레이저를 개발하기 위해서는 우선 레이저 매질을 성장시킬 수 있는 결정 성장 분야와 레이저 개발 분야가 동시에 발전되어야 한다. 따라서 정부에서 정책적으로 지원하지 않고서는 선진국 수준의 기술 개발을 이룩할 수 없다.

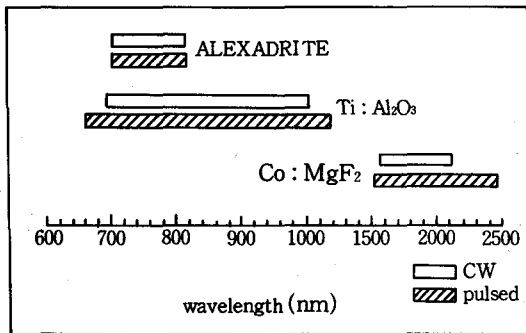


그림2-6 주요 주파수 가변 고체 레이저와 이들의 파장 가변 영역

### 5] 극초단 펄스 레이저

순간적으로 일어나는 초고속 현상의 관찰은 폭이 매우 짧은 극초단 펄스레이저를 사용해야 가능하다. 이 레이저를 이용한 연구 분야는 선진국에서도 1980년대에 들어 활성화된 분야로 제2세대 컴퓨터 및 통신 장비 개발과 같은 부

가가치가 매우 큰 산업적 응용 분야에서부터 반도체와 금속 등 여러가지 소재의 여기 상태나 전도자의 수명 측정, 광화학 반응과 분자의 운동이나 여기상태의 이완 현상 연구등의 기초 과학 분야에도 널리 활용되는 첨단연구 분야이다. 즉, 극초단 펄스 레이저를 이용하여 과거에는 불가능했던 초고속 현상의 연구가 가능해짐에 따라 여러가지 과학 및 기술의 발전이 현재에도 급속히 이들 분야에서 이루어지고 있다.

### 가. 극초단 펄스 레이저의 개발 현황

펄스폭이  $10^{-12}$ - $10^{-15}$ 초인 레이저를 극초단 펄스 레이저라고 분류할 수 있는데 펄스폭의 크기 및 발진 파장에 따라 여러 종류의 펄스 레이저가 개발되어 있다. 현재 가능한 펄스폭은 20fs ( $2 \times 10^{-14}$ S)가 최고의 수준이며 세계적으로도 몇몇 실험실에서만 발진에 성공하고 있다. 상품화된 레이저로 가능한 펄스폭은 1ps ( $10^{-12}$ s)가 한계이며 이것보다 짧은 펄스 레이저는 실험실에서 자체 제작한 것만 가능한 상태이다. (국내에서 개발된 가장 짧은 펄스폭의 레이저는 표준연구소에서 구성한 mode-locked 색소 레이저로 펄스폭이 현재 300fs ( $3 \times 10^{-13}$ s)에 이르고 있다.)

**펄스폭이  $10^{-12}$ - $10^{-15}$ 초인 레이저를 극초단 펄스 레이저라고 분류할 수 있는데 펄스폭의 크기 및 발진파장에 따라 여러 종류의 펄스 레이저가 개발되어 있다. 극초단 펄스 레이저를 이용한 초고속 현상 연구 및 응용분야는 크게 기초 과학분야와 전자공학 및 산업에의 활용분야로 구분할 수 있다.**

### 나. 초고속 현상 연구 및 응용 분야

극초단 펄스 레이저를 이용한 초고속 현상 연구 및 응용 분야는 크게 기초과학 분야와 전자 공학 및 산업에의 활용 분야로 구분할 수

있다.

1). 기초 과학에의 응용

비정질 반도체의 광전도자 특성과 반도체 및 금속에서의 phonon 연구분야 등이 최근에 활발해지고 있으며 광화학 반응 및 분자의 운동 및 여기상태의 이완 현상 연구도 계속 진행되고 있다.

2). 전자 공학 및 산업에의 응용분야

제2세대 컴퓨터 개발 및 초고속 통신 장비 개발 등 전자 산업에서도 부가가치가 매우 큰 이 분야의 연구 방향은 보다 빠른 초고속 반도체 소자 및 전자 소자와 광소자 개발에 있다. (GaAs 반도체 소자가 크게 각광을 받는 것도 작동 속도가 실리콘에 비해 매우 빠르다는 장점에 있다고 하겠다.) 이러한 초고속 소자의 개발을 위해 새로운 초고속 전자 천이 현상 (electricaltransient) 측정 방법인 electro-optic sampling 기법이 최근 개발되어 시간 분해능이 그림2-14에서 처럼 200fs ( $2 \times 10^{-13}$ s)에 이르고 있다. 현재 도달한 최고의 시간 분해능은 앞에서 언급한 mode-locked 색소 레이저를 이용한 것으로 초고속 GaAs 반도체 소자의 개발이 이를 통해 이루어지고 있으며 더 많은 발전이 이루어지리라 예상된다.

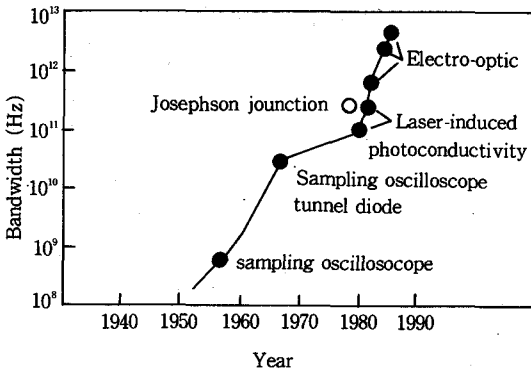


그림2-7 초고속 전자천이 현상의 측정을 위한 Sampling 방법에 따른 시간분해능

레이저 주파수 안정화는 광파장을 기준으로 하여 사용하는 모든 광계측 및 응용에는 필수적인 기술이다. 예를 들면 광속 간섭 현상을 이용한 광계측, 홀로그래피 응용 계측, 스펙클 간섭 계측, 도플러 간섭 계측, 광섬유 간섭 계측 등 거의 모든 계측 분야에 사용되는 광원 레이저는 주파수 안정화가 되어야만 가간섭 길이가 길어져서 측정 영역이 확장되고 또 측정의 정밀정확도는 바로 레이저 광원의 안정화 정도에 따라 직접 제한을 받는다.

6] 안정화 레이저

레이저를 안정화시킨다는 말에는 두 가지의 뜻을 포함하고 있다. 첫째, 레이저의 주파수를 안정화시키는 것이고, 둘째는 레이저광의 출력 안정화를 의미한다. 레이저의 안정화 중에서 주파수가 안정화되면 출력도 안정화 되는 수가 있으나 출력이 안정화되면 주파수가 안정화되는 경우는 극히 드물다. 그러므로 출력의 안정화 기술보다 주파수의 안정화 기술이 훨씬 고급 기술에 속한다. 주파수 안정화 기술은 초정밀 계측 분야나 기초 과학을 위해 급격한 연구 성과로 최근 위상 변조 분광학을 이용해서 레이저의 주파수를  $10^{-16}$ 까지 안정화함으로써 현재 시간 표준으로 사용하고 있는 세슘 원자시계의 안정도  $10^{-13}$ 을 훨씬 능가하고 있다. 그러므로 장치의 시간 표준도 레이저 주파수에 기준을 둘 가능성도 배제할 수가 없는 조짐이 나타나고 있다.

레이저 주파수 안정화는 광파장을 기준으로 하여 사용하는 모든 광계측 및 응용에는 필수적인 기술이다. 예를 들면 광속 간섭 현상을 이용한 광계측, 홀로그래피 응용 계측, 스펙클 간섭 계측, 도플러 간섭 계측, 광섬유 간섭 계측 등 거의 모든 계측 분야에 사용되는 광원 레이

표 2-5. 레이저 주파수 안정화 방법

안정화방식 또는 주파수 분별 방법	사용되는 레이저	안정도	사용처	실용레이저
출력곡선의 중심	가스레이저	$10^{-7}-10^{-8}$	정밀계측	CO <sub>2</sub> 레이저
Lamb dip의 중심	가스레이저	$10^{-8}-10^{-9}$	정밀계측	Perkin Elmer5800 Spec.Phy.SP 119 NEC GLG 101
보조 에탈론 사용 방식	고출력가스 레이저 색소레이저 고체레이저 반도체레이저	$10^{-7}-10^{-9}$	정밀계측	대부분의 Ar <sup>+</sup> 레이저 색소 레이저 기타
방전전류 및 온도 조절 방식	반도체레이저	$10^{-6}-10^{-7}$	정밀계측	단일모드 반도체레이저
자장 또는 전장 인가 방식	가스레이저	$10^{-8}-10^{-9}$	정밀계측, 중력 가속도 측정	HP 5517A(Hewlett packard) ZL150(spindler) ZL150(spinoler Hoyer) MOC-QD-H
2개 종모드 발진 방식	가스레이저	$10^{-7}-10^{-8}$	정밀계측	Tropol 200 SP117(Spe.Phy.)
편광 분광학	색소 레이저 반도체레이저	$10^{-8}-10^{-10}$	고분해분광학	상용 레이저 없음
분자 및 원자의 흡수선	가스, dye, 반도체레이저	$10^{-10}-10^{-13}$	고분해분광학, 광주파수표준 초정밀계측, 중력가속도	상용레이저없음
위상변조 분광학	dye 레이저 반도체레이저 가스 이온레이저	$10^{-11}-10^{-16}$	고분해 분광학, 초정밀 gyro, 초정밀계측, 중력과 측정	상용레이저없음

**한편 레이저 출력을 이용하는 모든 계측 분야나 반도체 산업에 근간을 이루는 리소 그래픽용 레이저 광원, 레이저 가공 산업에서의 고출력 레이저광원, 공장 자동화를 위한 광센서 등에 사용하는 반도체 레이저는 출력의 안정화가 필수적으로 뒷받침되어야 하는 기술중의 한가지로 대두되고 있다.**

저는 주파수 안정화가 되어야만 가간섭 길이가 길어져서 측정 영역이 확장되고 또 측정의 정밀정확도는 바로 레이저 광원의 안정화 정도에 따라 직접 제한을 받는다. 보통의 He-Ne laser의 안정도는  $10^{-6}$ 을 넘지 못하므로 간섭 현상을 이용하여 측정할 수 있는 길이는 수십 cm밖에 되지 않으며 측정의 정밀도도  $10^{-6}$ 을 초과할 수가 없다. 그러므로 광원인 레이저의 주파수를 고정밀정확도로 안정화할수록 이것을 사용하는 시스템의 정밀정확도는 높아지게 된다. 레이저의 주파수를 안정화하는 방법에는 표 2-5에서 보는바와 같이 여러가지가 있는데 사용하는 레이저 종류와 필요한 정밀정확도에 따라 선택해서 사용해야 한다. 한 예로 옥소의 흡수선에 주파수를 안정화한 옥소 안정화 헬륨 네온 레이저는 현재 국가 길이의 원기로 사용하고 있다. 최근에 고정밀정확도가 요구되고 차세대의 광통신 방법인 코히런트 광통신 등의 분야에서는 주파수를 안정화한, 반도체 레이저에 관한 연구가 시급히 요구되므로 반도체 레이저의 단일 모드 주파수 안정화 연구가 필요하며 초정밀 계측용 레이저 주파수 안정화를 위한 위상 변조 분광학 등에 대한 연구를 특히 필요로 하고 있다.

한편 레이저 출력을 이용하는 모든 계측 분야나 반도체 산업에 근간을 이루는 리소 그래픽용 레이저 광원, 레이저 가공 산업에서의 고

출력 레이저광원, 공장 자동화를 위한 광센서 등에 사용하는 반도체 레이저는 출력의 안정화가 필수적으로 뒷받침되어야 하는 기술중의 한가지로 대두되고 있다. 이들 레이저의 출력 안정화 기술은 표 2-6과 같다. 보통의 He-Ne 레이저는 5%이하의 출력 요동이 있으나 레이저 튜브의 방전 전류를 제어 할 경우 0.1%이하의 출력 요동으로 줄일 수가 있다.

**표 2-6. 출력 안정화 방식**

안정화 방식	사용되는 레이저	안정도
방전전류 조절 방식	CO <sub>2</sub> , Nd:YAG, Nd:Glass, Ar <sup>+</sup> , He-Ne	0.1-1% 이하
방전전류 및 온도조절	반도체 레이저	1% 이하
외부편광소자 도입방식	편광된 모든 레이저	0.1% 이하
보조에탈론 도입방식	단일모드 레이저	0.1% 이하

대부분의 고출력 레이저에서는 레이저 출력 요동이 사용에 있어서 심각한 문제점으로 나타나고 있으므로 이에 대한 연구도 필요하다고 하겠으나 고전압, 고전류인 이들 레이저에서의 전원부의 제어는 쉽게 해결되고 있는 문제는 아닌 것 같다. 광계측 분야에서 최근 들어서 각광을 받고 있는 반도체 레이저는 단일 모드, 다중 모드와 같은 cw일 경우에는 더욱 출력 요동이 심한데 전류 및 온도를 정밀 제어할 필요가 있으며 단일 모드 발진 반도체 레이저에서는 주파수 안정화를 실현하면 더욱 더 높은 정밀도로 레이저 출력을 안정화시킬 수 있으므로 주파수 안정화에 대한 연구가 더욱 기대되고 있다.