

1. 서론

현대 측정 과학의 많은 분야에서 널리 사용되고 있는 광주파수 측정기술 (Optical Frequency Metrology)은 높은 측정 정밀도와 분해능을 얻기 위해 가간접적인 광, 즉 주파수 안정화된 광원의 개발, 광주파수의 절대측정 및 광주파수의 응용을 포함하고 있다. 이러한 광주파수의 응용 기술은 레이저가 개발된 1960년 이래로 많은 과학 기술적 발전을 거듭하고 있다. 최근에는 5×10^{14} Hz 정도의 주파수를 가지는 붉은색 가시광선 레이저의 주파수를 수 mHz 이하로 안정화시킬 수 있는 기술이 개발되어, 대략 10^{17} 의 분해능 동력학 영역을 가지고 있다. 이러한 고 분해능 특성 때문에 광주파수 측정학은 유효숫자를 한자리 더 정확하게 알아내는 기초 물리학 분야에서 최고 정밀한 측정학

- 1 Hz 또는 그 이하의 선폭을 갖는 레이저 주파수 안정화
- 수 Hz 선폭을 가지는 고분해 레이저 분광학을 이용한 광주파수 천이선의 관측 ($Q \sim 1.5 \times 10^{16}$)
- 초정밀 광주파수 표준기의 실현 (레이저 냉각된 원자나 이온을 이용할 경우 10^{18} 정확도 가능성)
- 마이크로파 세슘 주파수 표준기와 광주파수 표준기간의 위상 가간접적인 주파수 링크의 실현

이러한 연구결과를 볼 때, 광주파수 측정학자들의 오랜 꿈인 실용적인 광시계 (Optical Clock)와 광주파수 합성기의 개발이 멀지 않은 장래에 이루어질 것으로 기대되고 있으며, 이미 세계 각국의 표준기관에서는 이에 대한 연구를 시작하고 있다. 지금까지 마이크로 주파수를 기반으로 하는 주파수 측정기술이 현대 측정학의 핵심 기술임을 감안

특집 ─ 펨토 과학 ─

펨토초 모드록 레이저 metrology - 펄스 위상 및 콦주파수 안정화 -

윤태현*

의 핵심기술이 되고 있다. 이러한 광주파수 측정학은 이제 새로운 전기를 맞고 있다. 그것은 대략 40여 년간 광을 이용한 과학기술의 발달에 기반을 둔 광주파수 측정학에서 그 동안 불가능하게 여겨졌던 실 시간적으로 광주파수를 절대측정 할 수 있는 기술이 가능해 졌기 때문이다. 이는, 극히 최근인 2000년도에 실험적으로 구현된 펨토초 모드록 레이저를 이용한 새로운 광주파수의 절대측정이 가능해 졌기 때문인데, 본 특집호에서는 필자가 이 의미 있는 연구에 직접 참여하면서 얻은 연구 결과를 포함하여 펨토초 모드록 레이저 metrology 분야의 세계적인 연구 경향을 소개하고자 한다. 구체적인 연구 결과를 소개하기에 앞서 최근에 이룩된 의미 있는 연구 결과를 간단히 정리함으로써, 세계 최고 수준의 연구를 먼저 이해할 수 있을 것이다.

한다면, 앞으로 광주파수를 기반으로 하는 새로운 측정학의 발달이 예견되고 있는 것이다.

2. 광주파수 표준기에서의 핵심 쟁점들

레이저가 발명되고 몇 년이 지나지 않아서 국제 주파수 (시간) 표준이 세슘 133 원자의 바닥상태에서 $F = 4, m_F = 0 \leftrightarrow F = 3, m_F = 0$ 천이선을 기초로 하여 확립되었다. 이 천이선의 주파수는 9, 192, 631, 770 Hz로 정의되었다. 또한 이 천이 공명선의 Q 인자는 대략 전자기장파 원자와의 상호작용에서 가간접 상호작용 시간의 제약 때문에 대략 $Q \sim 10^8$ 정도 된다. 이때부터 전자기파와 원자

* 한국표준과학연구원 광주파수제어연구단

펄스 모드 레이저 metrology

와의 기간섭 상호작용 시간을 제 1차 및 제 2차 도플러 효과를 제거해서 연장하려는 수많은 노력이 있어왔고 지금도 진행 중에 있다. 특히, 최근에 발전한 레이저 냉각 및 포획 기술은 원자 분수 방식을 이용함으로써 수백 배의 분해능 향상을 가져올 수 있었다. 이렇게 줄어든 원자 속도로 인해서 열 원자 빔에서보다 제 1차 및 2차 도플러 효과를 크게 줄일 수 있게 되었다. 이제 원자 분수 방식의 세슘 (Cs) 시계가 세계 유수의 연구 기관에서 연구되어져서 3×10^{-16} 의 정확도가 보고되고 있고, 실험에 사용되는 크리스탈 오실레이터의 주파수 (위상) 노이즈에 의해 제한되는 1×10^{-13} ($\tau = 1s$) 수준의 short term 안정도를 가지고 있다.

한편, 레이저가 발명된 이래로 많은 연구자들이 광주파수 영역에서 주파수 표준을 만들기 위해 노력해 왔다. 이러한 노력들은 원자나 분자 또는 이온들이 가지고 있는 좁은 광시계 천이선을 이용할 경우 보다 높은 정확도와 재현성 그리고 안정도를 (이들은 주파수 표준기의 필수 3요소임) 가지는 새로운 주파수 표준기의 개발 가능성에 모아지고 있다. 주파수 안정화된 레이저의 주파수 안정도 평가의 척도는 FFS (fractional frequency stability)로 주어지며,

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \frac{1}{Q \cdot S/N \cdot \sqrt{\tau}}$$

으로 표현된다. 여기서 ν 는 주파수 표준기의 주파수이

고, S/N은 실험적인 신호대 잡음 비이며, τ 는 적분 평균시간이다. 위 식에서 분명히 알 수 있는 것은 실험에서 검출된 공명신호의 분해능 (Q)과 신호의 민감도 (S/N) 한계가 주파수 표준기의 안정도를 향상시키는 제일 중요한 파라미터라는 점이다. 그리고 여기서 중요한 점은 Q와 S/N을 10배 향상시키는 효과는 주파수 표준기에서 적분 평균시간 τ 를 100배 향상시키는 것과 같다는 점이다.

광주파수를 사용할 경우 마이크로파를 사용하는 세슘원자 시계보다 매우 높은 Q값을 얻을 수 있다. 이러한 노력은 1970년대와 1980년대의 비선형 분광학의 발전을 가져왔다. 원자계에서 양자 흡수 현상이 비선형 성을 가지고 있기 때문에 비선형 분광학을 이용할 경우 비록 S/N에서 한계는 있지만 Sub-Doppler 분해능의 광 천이선이 관측될 수 있다. 이러한 비선형 분광학들은 포획흡수 분광학, 이광자 분광학, 광 Ramsey 분광학, 광 이중 분광학, 양자 beat 분광학 등이 있다. 앞에서 언급했지만 레이저 냉각된 원자를 이용하면 원자나 이온이 가지고 있는 자연 천이선을 분광하는데 매우 유리하다. 한편 S/N 비율을 높이기 위한 많은 분광학적 기술이 같은 시기에 발달하였는데, 이는 편광 분광학, electron-shelving, quantum-jump, 주파수 (위상) 변조 분광학으로 대표되는 optical heterodyne 분광학 등을 포함하며 현재 1×10^{-8} 의 흡수 민감도와 1 MHz 선폭을 1 s 의 평균시간에서 $10^4 - 10^5$ 이상 분해할

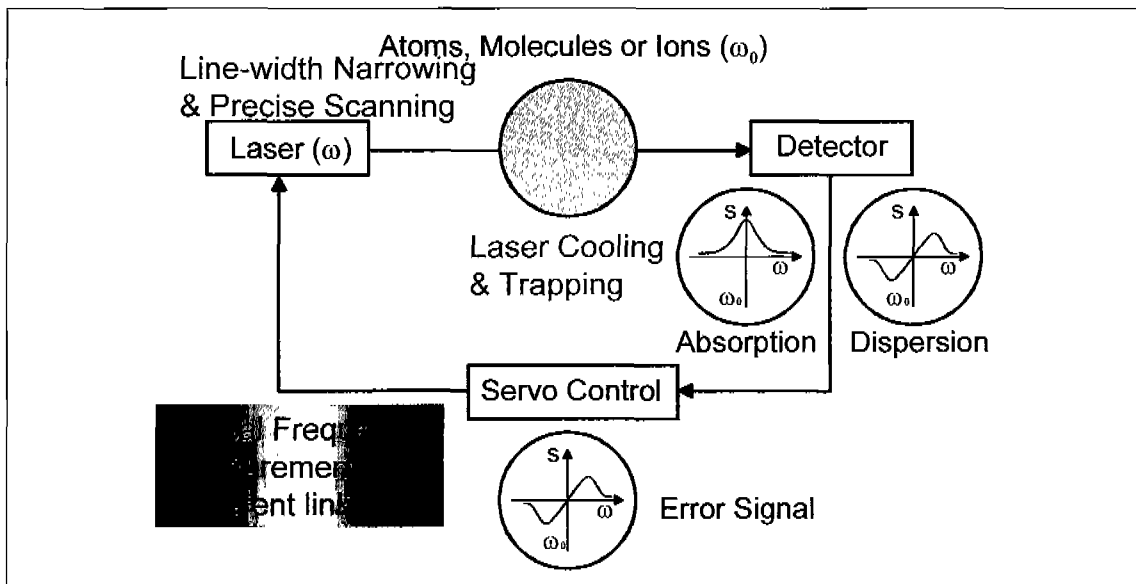


그림 1. 광주파수 표준기의 원리

수 있는 기술이 개발되어 있다. 위에서 언급한 이러한 기술 덕분에 광영역에서 ($\nu \sim 500$ THz at $\lambda = 600$ nm) 1 Hz 미만의 주파수 안정도를 갖는 ($\delta\nu/\nu=10^{-15}$) 새로운 광주파수 표준기의 탄생을 가능하게 하고 있다. 그림 1에는 광주파수 표준기의 원리를 개략적으로 보여 준다.

원자나 분자, 이온으로 대표되는 양자 흡수체와 광학 공진기를 같이 사용하면 레이저의 발진 선평을 능동적으로 제어할 수 있는 훌륭한 시스템이 된다. 즉, 수동 광학 공진기는 광주파수에 대해 선형적인 반응을 하며 높은 S/N 비율을 얻을 수 있다. 따라서 광학 공진기를 이용한 레이저 주파수 안정화는 여러 가지 면에서 광 주파수 표준 연구에 해결책을 제공한다.

첫째, 레이저는 양자 흡수체 (즉 원자나 분자)를 이용할 때 보다 긴 위상 가산점 시간을 얻을 수 있어 높은 S/N 비율 얻고 interrogation을 자주하지 않아도 된다. 다시 말하면, 짧은 시간영역에서 레이저의 선평은 연구대상인 원자의 천이선의 선평보다 좁게되어 원자 자체가 가지고 있는 자연 천이선 정보를 얻을 수 있고 장시간 interrogation을 통해서 매우 미세하게 자연천이선의 실제 중심 주파수를 찾아낼 수 있다.

둘째로, 기본적으로 양자 흡수체의 공명 중심 주파수를 이용하면 광 공진기와 같은 인위적이 수동적 표준기의 장시간에 걸친 주파수 흐름 (drift)을 제거할 수 있다. 예를 들면, 광 공진기에 주파수 안정화된 레이저 시스템을 주파수 안정도가 10^{-16} 인 실험 결과가 보고 되고 있다. 이러한 실험에는 레이저 주파수를 광 공진기에 안정화시키기 위해서 이른바 주파수 변조 법 또는 Pound-Drever-Hall

(PDH) 법을 이용하는데 이러한 방법은 미국의 JILA에서 개발되어 현재 보편적인 실험 방법으로 사용되고 있다. 또한 주파수 편이 광위상 동기 (frequency-offset optical phase locked-loop)을 이용하면 공진기/레이저 시스템을 주파수를 정밀하게 튜닝할 수 있어 1 Hz 수준의 레이저 스펙트로미터를 만들 수 있다.

레이저 냉각된 원자를 이용할 경우 지금까지 개발된 어떤 주파수 표준기 보다도 성능이 뛰어난 광주파수 표준기의 개발이 가능한데 이는 위에서 언급한대로 양자 흡수체가 가진 광 천이선의 자연 선평의 검출과정에서 줄어든 원자 속도 때문에 양자 흡수체 집단의 자연천이선의 선평과 systematic error의 획기적인 감소 때문이다. 예를들면, 미국 표준기관인 NIST 연구원들은 최근 Hg^+ 이온의 광천이선을 수 Hz 선평으로 검출하는데 성공하여 $Q > 1 \times 10^{14}$ 인 실험 결과를 보고하였다.

이밖에도 레이저 냉각 및 포획 기술을 이용하여 연구되고 있는 많은 광주파수 표준기 들을 살펴보면 양자 흡수체로서 중성 원자를 이용하는 Mg, Ca, Sr, 그리고 Yb 시스템 등이 있으며, 이온인 경우 Sr^+ , Yb^+ , 그리고 In^+ 시스템 등이 있다. 이러한 시스템들은 기존의 주파수 표준기들이 가지고 있던 최대 문제점들인 주파수 편이와 확대가 없이 $10^{16} \sim 10^{18}$ 의 주파수 정확도를 갖는 광주파수 표준기를 제공할 것으로 기대되고 있다. 한편, 실용적인 광주파수 표준기 입장에서 생각해 보면 항상 개발 비용과, 크기, 그리고 시스템의 복잡성 등을 생각해야만 된다. 이러한 간단한(?) 시스템들은 위에서 언급한 레이저 냉각된 원자를 이용하는 시스템보다 10배 정도 성능은 떨어지나 시스템의

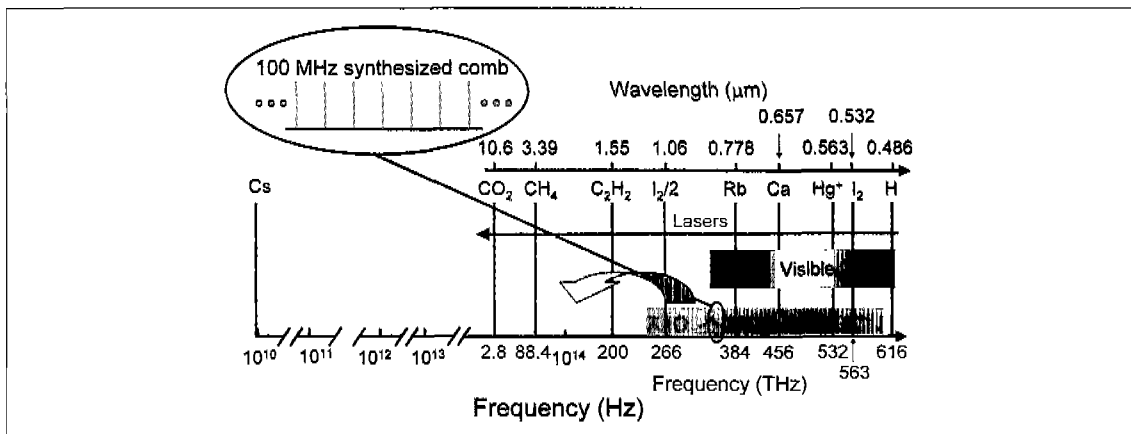


그림 2. 광주파수 표준기의 주파수 맵

펄트초 모드록 레이저 metrology

구현 가능성과 이동성 그리고 개발비용 측면에서 경쟁성을 가지고 있다. 이러한 소형 시스템들 중에는 1064 nm에서 HCCD 분자나 532 nm에서 I₂ 분자에 안정화된 다이오드 펌핑 Nd:YAG 레이저 시스템이 있으며, 현재 300 s에서 4×10^{-15} 의 주파수 안정도가 보고 되고 있다. 그림 2에는 현재 연구중인 광주파수 표준기들의 주파수 맵을 보여주고 있다.

주파수 안정화 펄트초 모드록 레이저는 1.06 μ m에서 약 500 nm 까지 주파수 간격이 100 MHz로 일정한 광빗(optical comb)을 형성하여 기존의 광주파수 표준기들의 주파수 간격을 거의 연속적으로 연결하며, 모든 광주파수 표준기의 광주파수를 절대 측정할 수 있게 한다 (본문 참조). 그리고 차 주파수 발생 법을 이용하면 적외선 이하의 모든 주파수의 합성도 가능하다.

위에서 언급한 광주파수 표준기 연구에서 남은 한가지 질문은 과연 수백 THz의 높은 주파수를 가지는 광주파수, 즉 양자 흡수체의 중심 주파수 값, 측정의 정확도이다. 이러한 연구에서는 원자간의 충돌, 전자기파의 파면 왜곡, 잔여 도플러 효과, 조사파의 세기에 따른 자연 천이선의 확대와 편이가 필연적으로 따라오게 된다. 또한 위상 또는 주파수 변조 과정에서 왜곡과 비선형 물리적 상호작용 때문에 관측된 자연 천이선이 비대칭이 되기도 한다. 예를 들면, 주파수 변조 분광학에서 잔여 진폭 변조(residual amplitude modulation, RAM)는 원치 않는 주파수 편이와 주파수 안정도에 영향을 주어 부가적인 능동적인 제어를 통해서만 제거 시킬 수 있다. 이러한 문제들은 결국 광주파수 표준기의 정확도에 영향을 주는 주된 요인이 된다. 보다 심각한 문제는 광주파수 표준기에서 절대 기준역할을 하는 양자 흡수체의 2차 도플러 효과에 의한 시간 지연 문제는 양자 흡수체의 속도 성분을 정확히 제어할 수 있어야 하는데, 따라서 레이저 냉각 및 포획 기술을 이용한 원자속도의 감속 방법을 이용해야 한다. 이를위해 한국표준과학 연구원 광주파수 제어 연구단에서는 Yb 원자의 레이저 냉각 및 포획 연구가 진행 중에 있다.

3. 극초단 펄스 기술과 고정도 주파수 안정화 기술의 만남

위에서 언급한 광주파수 표준기 연구에서 남은 한가지

질문은 과연 수백 THz의 높은 주파수를 가지는 광주파수, 즉 양자 흡수체의 중심 주파수 값, 측정의 정확도이다. 그런데 광주파수 표준기 연구 분야에서 가장 획기적인 발전이 2000년도에 이 분야의 선도 연구 그룹인 독일의 Max-Planck for Quantum Optics (MPQ)와 미국의 JILA에서 동시에 이루어 졌다. 이것은 물리학에서 에너지-시간 불확정성 원리에 의해 완전히 다른 분야로 인식되던 두 첨단 분야가 하나로 수렴하면서 가능하게 되었다. 즉, 시간 공간과 주파수 공간에서의 불확도를 최소화하여 불확정성 원리가 허용하는 최소 불확정 상태를 시간 또는 주파수 공간에서 구현함으로써 지금까지 상상할 수 없었던 간단한 방법과 정확도로 광주파수를 측정할 수 있다. 그동안 주파수 공간에서의 주파수 정밀 측정은 연속파(continuous wave, CW) 레이저를 이용하여 측정하였으며, 광원의 주파수 특성을 주파수 공간에서의 delta function으로 설명할 수 있다. 반면, 시간공간에서는 펄트초 모드록 레이저를 이용하여 시간공간에서의 delta function을 갖는 광원으로 극초단 현상의 동력학을 연구하여 왔다. 이들 두 분야에서 가장 앞선 연구 결과를 살펴보면 주파수 안정화 광원의 주파수 폭과 펄트초 모드록 레이저의 시간 폭이 대략 10^{15} Hz에서 1 Hz, 그리고 10^{-15} s의 펄스폭을 가지고 있어 10^{15} 오더의 dynamic range를 가지고 있다. 그러면 새로운 펄트초 모드록 레이저를 이용한 광주파수를 절대 측정법에 대해서 간략히 설명한다.

앞에서 설명한 극초단(시간) 기술과 고정도(주파수) 기술의 연결은 펄트초 모드록 레이저가 다중모드 레이저의 종모드가 모드록킹 과정을 거쳐 일정한 시간 간격을 가지는 연속적인 극초단 펄스를 발생시키는 원리에 기인한다. 만약, 펄트초 레이저가 레이저 공진기의 왕복시간 τ 보다 펄트초 폭을 갖는 펄스를 발생시킨다면, Fourier 변환에 의해 주파수 공간에서는 일정한 주파수 간격 $f_{rep} = 1/\tau$ 을 가지는 불연속 스펙트럼, 즉 광빗(optical comb) 스펙트럼을 갖게 됨을 쉽게 알 수 있다. 여기서 연속적으로 발생하는 주기적인 펄스 간격은 주파수 공간에서 주기적인 광빗의 주파수 분해능에 해당되고 펄스의 폭은 대략 발생한 광빗의 전체 스펙트럼 폭을 결정한다. 그러나, 펄스폭이 펄트초 가까이되면 각 펄스의 진폭안에 전자기파의 진동이 대략 5개 이하로 되기 때문에 진폭을 결정하는 펄스모양과 실제 전자기파의 진동위상이 각 펄스마다 다르게 되는데 이는 공진기 내에서 진행되는 광 펄스의 위상속도와

그룹속도가 다르기 때문이다. 이러한 영향은 그림 3에서와 같이 pulse-to-pulse phase slip (PS) $\Delta\phi$ 를 발생시키게 된다. 주파수 공간에서는, 이 PS가 모든 광빔 성분의 주파수 편이 δ 를 주게 되는데, 이때 $\delta = \Delta\phi f_{rep}/2\pi$ 의 관계가 성립한다. 이러한 간단한 이론적 고찰을 통해 우리는 어떻게 주파수 공간에서 f_{rep} 과 δ 를 제어함으로써 모든 광빔의 광주파수 성분을 제어할 수 있고, 반대로 시간 공간에서는 펄스 진폭에 대한 전자기파의 위상 편이 $\Delta\phi$ 를 제어할 수 있는지 알 수 있다. 이때 중요한 것은 주파수 공간에서 f_{rep} 과 δ 모두 현재 가장 발달한 전자기술로 제어가 가능한 마이크로파 영역에 (수백 MHz) 속하므로 f_{rep} 과 δ 를 세습 주파수 표준기를 이용하여 쉽게 안정화시킬 수 있다는 점이다. 이렇게 함으로써 펄스초 모드 레이저에서 발생한 모든 광빔 성분의 주파수를 간단히 안정화시킬 수 있으며, 각 성분의 주파수는 $f_n = n f_{rep} + \delta$ (n 은 정수 대략 10^6)의 간단한 식으로 표현됨을 알 수 있다. 다음에는 주파수 공간에서 f_{rep} 과 δ 를 안정화 시켜서 광주파수를 절대 측정할 수 있는 실험적 방법에 대해서 설명한다. 현재 이러한 광빔 스펙트럼은 대략 500 nm에서 시작하여 1100 nm 이상(즉 광주파수의 한 옥타브 (octave) 이상)에서 photonic air-gap fiber를 이용하여 발생시킬 수 있으며, 각각의 광빔 성분의 주파수 안정도는 1 Hz 이하로 안정화시킬 수 있다.

$f_{rep} = 1/\tau$ 는, τ 는 펄스간격, 주파수 공간에서 광빔의

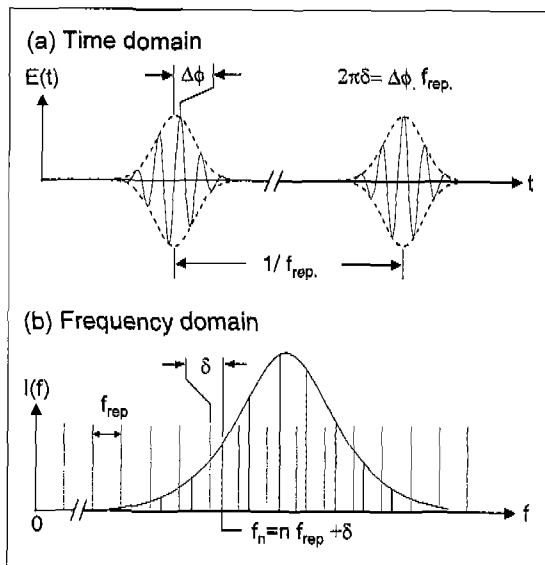


그림 3. 펄스초 모드 레이저 펄스의 시간공간(a) 및 주파수 공간(b)에서의 기술

간격이고, $\Delta\phi$ 는 pulse-to-pulse phase slip (PS)이며, $\delta = \Delta\phi f_{rep}/2\pi$ 는 PS에 기인한 광빔 성분의 주파수 편이이다. 이때 n 번째 광빔 성분의 주파수 $f_n = n f_{rep} + \delta$ 로 주어지며, f_{rep} 와 δ 모두 마이크로파 영역에 속해 세습 주파수 표준기로 안정화가 가능하다. 따라서 모든 광빔의 주파수 f_n 의 주파수를 세습 주파수 표준기에 위상 가간섭적인 방법으로 안정화시키고 절대 측정이 가능하다.

4. 펄스초 모드 레이저를 이용한 광주파수의 절대 측정

광주파수 표준기에서 주파수 측정시 절대 주파수 측정이라는 말을 사용하려면 앞에서 기술 한 바와 같이 현재 주파수 표준기인 세습 (Cs) 원자시계를 기반으로 하는 위상 가간섭적인 방법으로 광주파수가 측정되어야 한다. 그러나, 그림 2에서 볼 수 있는 것처럼 광주파수는 Cs 원자시계보다 대략 10^6 이상 높기 때문에 그 동안 위상 가간섭적인 측정이 어려웠다. 기존에 사용하던 레이저 주파수 체인에서는 9.2 GHz인 Cs 주파수를 하모닉 배가 방법을 이용한 주파수 합성 체인이 유일한 방법이었었는데, 이는 건설상의 어려움 (대략 광주파수 측정 시스템 개발에 10년 정도 필요)과 다른 광주파수 측정이 불가능하다는 점 때문에 세계적으로 그 동안 2-3개가 운영되고 있을 뿐이었다. 이에 대한 자세한 설명은 이 글에서는 생략하기로 하고, 펄스초 모드 레이저를 이용한 새로운 광주파수 절대 측정 방법에 대해 설명하겠다. 위에서 설명한 주파수 안정화된 펄스초 모드 레이저를 이용하면 전혀 새로운 방법으로 광주파수를 절대 측정할 수 있다. 즉, 측정할 광주파수 표준기의 주파수를 f 라 하면 기존의 레이저 주파수 체인에서는 $f \approx n \times f_{Cs}$, 여기서 f_{Cs} 은 Cs 원자시계의 주파수 그리고 n 은 정수, 라는 관계식을 이용한 것이다. 반면, 새로운 방법에서는 $f = 2f - f = n \times f_{rep}$ 라는 간단한 관계식을 이용한 것이다 (n 은 정수 대략 10^6). 여기서 f 와 $2f$ 는 모두 광주파수 영역에 속하고, $2f$ 는 비선형 결정을 이용하여 간단히 f 로부터 발생시킬 수 있다. 그리고 $2f - f$, 즉 f 와 $2f$ 사이의 주파수 간격은 위에서 설명한 주파수 안정화된 펄스초 모드 레이저를 이용하면 간단히 측정할 수 있다. 이러한 간단한 방법에서는 물론 펄스초 모드 레이저의 스펙트럼이 f 와 $2f$ 사이의 octave 주파수 차이보다 넓어야

펨토초 모드록 레이저 metrology

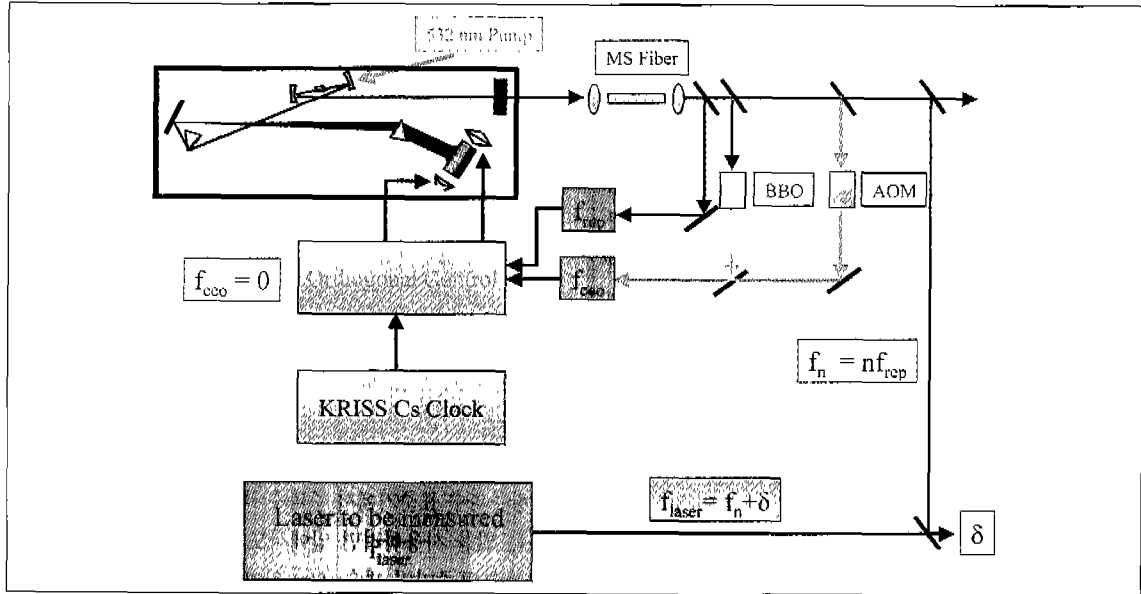


그림 4. 한국표준과학연구원에서 개발 중인 주파수 안정화 펨토초 모드록 레이저와 SOC를 이용한 광주파수 절대 측정 장치

한다. 이것은 최근에 개발된 새로운 microstructure 광섬유(photonic crystal or air-gap fiber, PCF)를 이용하면 실험적으로 쉽게 구현할 수 있다. 그림 4에는 한국표준연구원에서 개발 중인 광주파수 절대 측정 시스템의 개략도를 보여준다. 여기서 펨토초 모드록 레이저의 스펙트럼은 15 fs의 펄스폭인 경우 대략 50 nm이며, 10 cm의 PCF를 통과하면 500 nm - 1100 nm 이상의 광대역 스펙트럼을 갖게되어 새로운 방법으로 주파수 측정이 가능하게 된다. 이때 $f_{rep} = 100$ MHz 이었고 δ 는 self-refrence 방법으로 능동 제어한다. δ 를 능동제어 하려면 적외선 영역의 광빔 성분을 2차 조화파 발생시켜 녹색 영역의 광빔 성분과의 맥놀이 주파수를 측정하여 δ 를 측정한다. Cs 원자시계를 이용하여 f_{rep} 와 같이 안정화시키면 되는 데 이를 self-referenced optical comb (SOC) 발생기라 부른다.

본 장치를 이용하면 광주파수가 가시광선 영역에서 어떤 광주파수 f_{laser} 도 맥놀이 주파수 δ 를 측정함으로써 간단히 절대 측정이 가능하다. (정수 n은 정밀 파장계로 결정한다.)

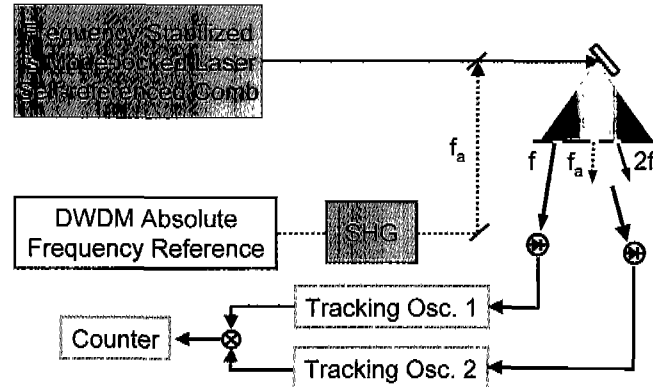
5. 정보통신 표준에의 응용

주파수 안정화 펨토초 모드록 레이저를 이용한 새로운 광주파수 절대측정 법은 광주파수를 이용하는 여러 분야

에서 획기적인 전환점을 제공하고 있다. 원자나 분자의 이광자 천이선을 이용할 경우 양자천이선과 관련하여 가간섭 양자제어 (coherent quantum control)가 가능하며, 고효율 주파수 안정화 광원을 임의의 파장에서 발생시키는 광주파수 합성기 (optical frequency synthesizer), 그리고 광주파수 표준기를 이용해 펨토초 모드록 레이저의 광빔을 절대안정화시켜 기존의 Cs 주파수 표준기보다 더 정확한 광시계 (optical clock)의 개발도 가능하게 되었다. 본 해설서에서는 이러한 주파수 안정화 펨토초 모드록 레이저의 한 응용예로써, 앞으로 다가올 광인터넷 시대의 필수 기술인 DWDM (dense wavelength division multiplexing) 통신을 위해 국제 전기통신 연합 (international telecommunication union, ITU)에서 규정한 절대 주파수 기준 (absolute frequency reference, AFR)의 주파수 절대 측정법에 대해 간단히 소개 한다.

ITU에서는 1.5 μ m 영역인 193.1 THz, 즉 파장 1552.52 nm를 DWDM 통신의 AFR로 규정하고 이를 기준으로 하여 100 GHz (0.8 nm), 50 GHz (0.4 nm), 또는 그 이하의 간격을 갖는 다중채널 광통신 표준의 규정하고 있다. 따라서 193.1 THz의 AFR 주파수의 절대 측정과 이의 상시 감시를 위하여는 광주파수의 절대 측정이 필요한데 이러한 연구에 주파수 안정화 펨토초 모드록 레이저를 이용하면 간단히 해결 할 수 있다. 1552.52 nm인 AFR 레이

Versatile Optical Frequency Calibration System for DWDM Absolute Frequency Reference



1552.25 nm, 193.1 THz (ITU-T G.692)

그림 5. Self-referenced 방법으로 주파수 안정화된 펄스초 모드락 레이저를 이용한 DWDM 주파수 기준의 절대측정

저 출력을 주파수 doubling 하면 776.26 nm가 되는데 이는 그림 4에서 보여준 광주파수 절대 측정시스템의 주파수 측정 범위 내에 들어오게 된다. 따라서 SOC 발생기를 이용하면 쉽게 DWDM용 AFR 주파수를 절대측정하고 감시할 수 있는데 그림 5에 측정 개념도를 보여준다. 이러한 시스템을 보다 유용하게 사용하기 위하여는 소형이며 간단한 시스템이 필요한데 1.5 μm 영역에서 모드락킹된 광섬유 레이저를 이용한 소형 시스템 개발에 많은 연구가 필요하다.

파장 1552.25 nm ($f_a = 193.1$ THz) 주파수 표준기를 주파수 배가하면 776.125 nm가 되며, 이 경우 그림 3의 주파수 측정 장치를 이용하여 쉽게 주파수를 절대 측정할 수 있다.

6. 결론

본 해설서에서는 최근 새로이 등장한 주파수 안정화 펄스초 모드락 레이저를 이용한 광주파수의 절대 측정과 광통신에의 응용성을 살펴보았다. 이러한 기술의 핵심인 주파수 안정화 펄스초 모드락 레이저는 광대역에 걸쳐 주파수 안정화된 광원을 실시간으로 합성할 수 있는 광주파수 합성을 마이크로 주파수 나눔 (frequency division) 방법으

로 구현한 것이다. 이 기술은 가시광 영역에서 원하는 모든 파장내에서 100 MHz 간격으로 안정화 레이저를 실시간적으로 발생시키는 기술이다. 즉, 그동안 불확정성 원리에 의해 서로 상보적이던 기술로 여겨지던 주파수 공간에서의 초정밀 주파수 안정화 기술과 시간공간에서의 극초단 펄스 레이저 발생 기술이 주파수 안정화된 펄스초 모드락 레이저를 통하여 하나로 융합함으로써 전혀 예상할 수 없었던 과학 기술적인 돌파구가 마련되었다. 이 새로운 광주파수 측정기술은, 기초물리상수를 측정하는 기초과학 분야 뿐만 아니라, 안정화 레이저를 사용하는 초정밀 측정, 광통신 등의 정보산업에 큰 기여를 하게 된다. 또한 새로운 개념의 광시계의 개발이 가능해져서, 앞으로 다가올 새로운 광 인터넷에 기반을 둔 정보통신 시대에 필요한 광주파수의 절대기준을 수립하게 된다. 이러한 광시계의 개발은 레이저가 개발되어 과학기술연구에 사용 된지 근 40년만에 이루어낸 최고의 업적 중에 한 가지가 될 것이다.

참고문헌

- (1) S. T. Cundiff, J. Ye, and J. L. Hall, Optical Frequency synthesis based on modelocked lasers, Rev. of Sci. Inst. 72, 3749 (2001).
- (2) S. A. Diddams, D. J. Jones, J. Ye, S. T. Cundiff, J. L. Hall, J. K. Ranka, R. S. Windeler, R. Holzwarth, Th. Udem, and T. W. Hansch, Direct link between

펄스 모드 레이저 metrology

- microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb, Phys. Rev. Lett. 84, 5102 (2000).
- (3) S. A. Diddams, D. J. Jones, T. M. Fortier, R. S. Windeler, S. T. Cundiff, T. W. Hansch, and J. L. Hall, Towards the ultimate control of light: Optical frequency metrology and the precise control of femtosecond pulses, Optics & Photonics News, October (2000).
- (4) D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka, A. Stentz, R. S. Windeler, J. L. Hall, and S. T. Cundiff, Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked Lasers and direct optical frequency synthesis, Science 288, 635 (2000).
- (5) J. Hall and J. Ye, Merging the ultrasensitive, the ultrastable, and the ultrafast: a new era of frequency standards and optical frequency measurement, Optics & Photonics News, February (2001).
- (6) Th. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, and T. W. Hansch, Accurate measurement of large optical frequency differences with a mode-locked laser, Opt. Lett. 24, 881 (1999).
- (7) Th. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, and T. W. Hansch, Absolute optical frequency measurement of the Cesium D1 line with a mode-locked laser, Phys. Rev. Lett. 82, 3568 (1999).
- (8) T. H. Yoon and J. R. Park, Amplification of a probe field without population inversion in a two-level atom driven by a strong bichromatic pump field, Phys. Lett. A 264, 142 (1999).
- (9) J. Ye, T. H. Yoon, J. L. Hall, A. A. Madej, J. E. Bernard, K. J. Siemsen, L. Marmet, J.-M. Chartier, and A. Chartier, Accuracy comparison of absolute optical frequency measurement between harmonic-generation synthesis and a frequency-division femtosecond comb, Phys. Rev. Lett. 85, 3797 (2000).
- (10) T. H. Yoon, J. Ye, J. L. Hall, and J.-M. Chartier, Absolute frequency measurement of the iodine-stabilized He-Ne laser at 633 nm, Appl. Phys. B 72, 221 (2001).
- (11) T. H. Yoon, A. Marian, J. L. Hall, and J. Ye, Phase-coherent multilevel two-photon transitions in cold Rb atoms: Ultrahigh-resolution spectroscopy via frequency-stabilized femtosecond laser, Phys. Rev. A 63, 011402(R) (2001).
- (12) J. Ye, J. Hall, and S. Diddams, Precision phase control of an ultrawide-bandwidth femtosecond laser: a network of ultrastable frequency marks across the visible spectrum, Opt. Lett. 25, 1675 (2000).

약 력



윤태현

현재근무처 : 한국표준과학연구원 책임연구원
 창의적 연구사업 "광주파수저어 연구단" 단장
 최종학력 : 1999. 2. 한국과학기술원 물리학과 박사
 1987. 2. 고려대학교 물리학과 석사
 1985. 2. 고려대학교 물리학과 학사
 주요경력
 1987. 2 ~ 현재 : 한국표준과학연구원 책임연구원
 2002. 10 ~ 현재 : 과학기술홍보대사 (과학기술문화재단)
 2002. 1 ~ 현재 : 우대연구원(한국표준과학연구원)
 2000. 2 ~ 2001. 2 : 미국 JILA, Univ. of Colorado & NIST, Boulder, Research Associate
 1996. 11 ~ 1997. 2 : 일본 NRLM(현 NMIJ), Tsukuba, Visiting Scientist
 1991. 6 ~ 1992. 6 : 독일 PTB, Braunschweig, Visiting Scientist
 주관심분야 : 광주파수 표준 및 절대측정, 광시계, 펄스 모드 레이저 주파수안정화, 고분해 레이저 분광학, 레이저 냉각 및 포획
 E-mail: thyoon@kriss.re.kr