

광 주파수 빔 발생기의 기술 동향

Technological Trend of Optical Frequency Comb Generator

박재규 (Jaegy Park, findsome@etri.re.kr) 광융합부품연구실 선임연구원
 송민제 (Minje Song, smj60156@etri.re.kr) 광융합부품연구실 연구원
 한상필 (Sang-Pil Han, sphan@etri.re.kr) 광융합부품연구실 책임연구원
 김성일 (Sungil Kim, silkim@etri.re.kr) 광융합부품연구실 책임연구원
 송민협 (Minhyup Song, sminhyup@etri.re.kr) 광융합부품연구실 선임연구원

ABSTRACT

Optical frequency comb generators have been investigated as a signal source capable of generating highly stabilized ultrafast pulse lasers. The precise control of the optical frequency comb spacing by RF clock signals has led to a revolutionary paradigm shift in the precise measurement of time and frequency. Optical frequency combs also have advantages such as stable frequency spacing, stable number of lines, and robustness. Owing to these characteristics, optical frequency combs have been applied to the fields of high precision optical clock, communication, spectroscopy, waveform generation, and astronomy. In this article, we introduce the properties (i.e., generation methods, advantages, and so on) of various optical frequency combs, and discuss the expected future technological trends and applications.

KEYWORDS 광 주파수 빔(Optical frequency comb), 극초단파 레이저, 광전효과(Electro-optic effect), FWM(Four-wave mixing), Pockels effect, Kerr effect, 링 공진기(Ring resonator)

1. 서론

약 60년 전 최초의 레이저를 개발한 이후, 현재까지 많은 연구자들이 다양한 목적에 따라 고성능 레이저의 개발을 위해 지속적으로 연구해 오고 있다. 레이저는 잘 정의된 주파수, 간섭성 광원(Coherent light)의 성질, 극초단파, 고출력 및 방향

성을 갖기 때문에 다양한 분야에 응용되고 있다. 이러한 레이저의 역사에서 특히 주목할 만한 발전은 광 주파수 빔 발생기의 개발이다. 2005년에는 Hänsch와 Hall이 광 주파수 빔을 이용한 정확한 광 주파수 측정 및 이 연구에서 파생된 여러 가지 업적을 인정받아 노벨물리학상을 수상하였다. 그림 1에서와 같이 광 주파수 빔은 일정한 시간간격

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2019.J.340509>

* 이 논문은 과학기술정보통신부(MSIP)/정보통신기획지원(IITP)의 지원(2019-0-00008, 19HB2700) 및 국방부/민군협력진흥원의 지원(#19DB1200)을 받아 수행된 연구임.



(Δt)으로 극초단파를 생성한다. 이를 푸리에 변환하면 중심 주파수 f_0 를 기준으로 일정한 주파수 간격 ($\Delta f = 1/\Delta t$)을 갖는 서로 다른 주파수의 신호들이 나타난다. 이때, $f_0 = f_{\text{offset}} + N \times \Delta f$ 의 관계로 서로 연결되며, f_{offset} 는 캐리어 엔벨로프 오프셋 주파수(Carrier envelop offset frequency), N 은 정수이다. 많은 연구자에 의해 시험 제작된 극초단파 레이저 중에서 f_{offset} , Δf , f_0 를 정확히 조절 가능한 것만이 광 주파수 빔으로 분류된다. 이러한 관계에 의해 광 주파수 빔은 광 주파수와 RF를 직접 연결하는 기어박스가 된다. 더 이상 힘들게 광 주파수를 직접 측정할 필요가 없게 되었고, RF를 측정하여 정확한 광 주파수를 도출하는 것이 가능하게 되었다 [1-4].

극초단파 펄스 레이저를 기반으로 한 매우 안정화된 광 주파수 빔은 고출력 특성 때문에 장거리 측정 및 분광, 형상 측정 시 대기 혹은 측정 시편에서 손실되는 광량을 보상하기 위해 필요하며, 또한 극초단파이기 때문에 고 분해능의 정밀 측정 및 가공을 가능케 한다. 광 주파수 빔은 수 펨토초에서 피코초 이하의 매우 짧은 펄스를 생성하는 레이저로서 (1) 광 주파수 및 거리 측정, 광학 시계, 시간/주파수 변환, 기초 물리 시험, (2) 저잡음 주파수 합성, 저잡음 마이크로파 발생기, 임의 파형 발생, 다 채널 광통신, 고차 조화파 생성, (3) 천문 분광기, 외계 행성 탐색, (4) 반송파 위상 제어, 아토초 과학, (5) 주파수 빔 분광학, 추적 가스 감지, 가간섭성 제어 등의 광범위한 분야에 응용되고 있다. 특히 장기간 주파수 안정화가 가능한 고출력 광섬유 극초단 레이저는 정밀가공산업, 고차 조화파 생성 현상을 이용한 극 자외선 대역에서의 주파수 안정화된 광 주파수 빔 형성과 이를 통한 분광 및 측정, 레이저 광원을 사물에 쏘아서 돌아오는 광원을 측정하므로 사물까지의 거리를 알게 되는 레이저

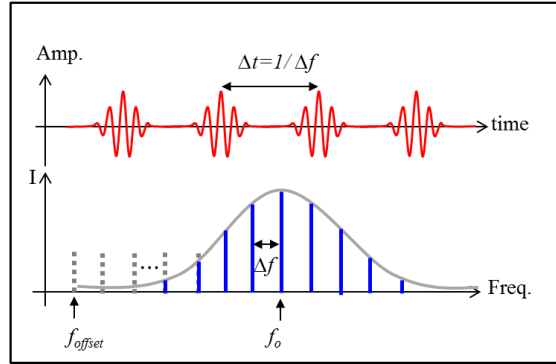
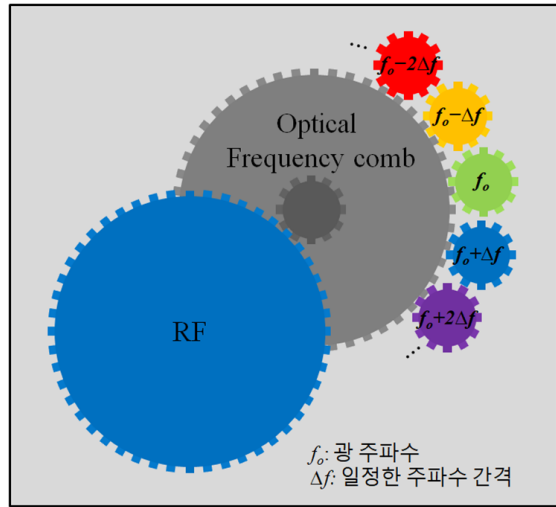


그림 1 광 주파수와 마이크로 파를 직접 연결하는 광 주파수 빔의 특성을 나타내는 개도도 및 광 주파수 빔 발생기에서 광펄스와 스펙트럼의 푸리에 변환 관계. f_{offset} : 캐리어 엔벨로프 오프셋 주파수(Carrier envelop offset frequency), Δf : 일정한 주파수 간격으로 RF대역임, f_0 : 광 주파수.

레이더 시스템 같은 응용분야에 매우 적합하다[1]. 본 고에서는 다양한 광 주파수 빔의 생성 방법과 장단점에 대하여 살펴보고, 기술 동향을 소개하고자 한다.

II. 다양한 광 주파수 빔 발생기

광 주파수 빔 발생기는 어븀(Erbium)이 도핑된 광섬유나 Ti:sapphire 결정 등을 이득물질로 사용하는 방법, Si_3N_4 나 AlN 같은 광도파로를 기반으로 하는 링 공진기에서 비선형 현상을 이용하는 방법,

그리고 광전 변환 변조기를 기반으로 비선형 현상을 이용하는 방법 등 세 종류로 나눌 수 있다. 이러한 방법들의 동작원리 및 광 주파수 빔의 생성 방식에 따른 장단점을 살펴보고자 한다.

1. Ti:sapphire 펄스 레이저를 기반으로 하는 광 주파수 빔

현재까지 가장 많은 연구가 이루어진 일반적인 광 주파수 빔 발생기는 그림 2(a) 및 (b)와 같은 Ti:sapphire 펄스 레이저이다. 공진기 외부에서 이득물질인 Ti:sapphire 결정에 다이오드 레이저를 이용하여 광펌핑을 하고, 포화 흡수체(Saturable absorber) 및 프리즘을 이용한 분산보정을 통해 모드 잠금을 하여 주기적인 극초단파를 생성시키는 방식이다. 그림 2(c)에서와 같이 주파수 빔의 간격은 극초단파의 주기(Δt)에 의해 결정된다. 여기서 극초단파의 주기는 공진기의 1회 왕복시간에 해당한다.

일반적인 극초단파 레이저의 경우 벌크 광학 시스템을 사용하기 때문에 공진기의 크기를 줄이는데 한계가 있고, 따라서 주파수 빔의 간격에 제한이 있다. 보고된 바에 따르면, 극초단파의 반복률은 수백 MHz~수 GHz로 제한되고, 생성된 광 주파수 빔의 스펙트럼 대역폭은 400~2,000nm로 넓으며, 사이즈는 10~15리터로 크다[1]. 극초단파 레이저를 이용한 광 주파수 빔은 매우 안정화되어 있으나 그 구조상 소형화하는 데 한계가 있다.

2. 광도파로를 이용한 링 공진기를 기반으로 하는 광 주파수 빔

도파로 구조의 링 공진기를 이용하는 마이크로 빔(Micro comb)에 대한 연구가 최근에 활발히 진행

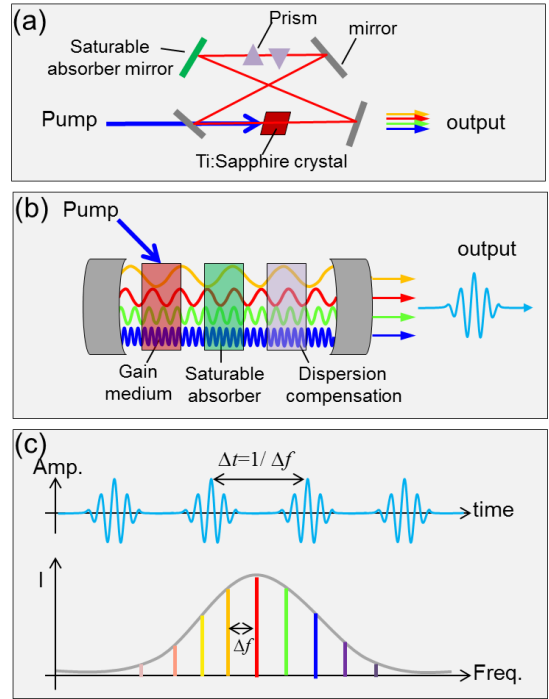


그림 2 극초단파 레이저의 (a) 공진기 내부의 광경로에 대한 개요도, (b) 구성요소에 따른 개요도, (c) 시간 및 주파수에 따른 출력 스펙트럼

되고 있다. 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 직선 도파로를 따라 링 공진기에 강한 펄스 광을 입력하면 Kerr 효과에 의한 FWM(Four-wave mixing)으로 광 주파수 빔이 발생하기 때문에 Kerr 주파수 빔이라고도 한다. 광 주파수 변환을 일으키는 FWM은 광의 세기(I)에 따른 굴절률의 변화, $n=n_0+I \times n_2$ 에 의해 발생한다. n_0 는 선형 굴절률이고, n_2 는 Kerr 상수이다. 그림 3(c)는 FWM에 의한 주파수 빔의 발생과정을 보여주고 있다. Si_3N_4 와 같은 3차 비선형 물질(3차 비선형광학계수에 의해 비선형현상이 발생하는 물질)에 주파수가 ω_p 인 광신호가 입력되면, 주파수가 ω_p 인 2개의 광자가 합쳐져서 주파수가 $2\omega_p$ 광자를 생성했다가 사라지면서 서로 다른 주파수 (ω_s, ω_i)를 갖는 2개의 광자를 생성하게 된다. 이때, $\omega_s=\omega_p+\Omega, \omega_i=\omega_p-\Omega$ 가 되며, 총 에너지와 총 운동량의 변화는 없다. 이와 같이 축퇴된(Degenerate)

상태의 상호작용에 의한 FWM뿐만 아니라, 서로 다른 주파수 $\omega_p + \Omega$ 과 $\omega_p + 2\Omega$ 를 갖는 축퇴되지 않은 광자 사이에서도 FWM이 발생하게 된다[5].

마이크로 빛은 도파로 구조의 반경이 수십~수백 마이크로미터인 링 공진기를 이용하기 때문에 제작이 간단하고, 소자의 크기가 작아 집적화에 매우 큰 장점이 있다. 하지만, 작은 광도파로 구조로 인해 온도 변화에 따른 굴절률 및 탄성계수의 변화로 인한 잡음이 강하게 발생하기 때문에 f_{offset} , Δf 를 안정화시키기 위한 연구가 필요하다. 마이크로 빛의 반복률은 수십 GHz~수 THz로 확장 가능하며, 생성된 광 주파수 빛의 스펙트럼 대역폭은 $\sim 1,000\text{nm}$ 이다. 사이즈는 수십 밀리미터로 작다[5,6]. 마이크로 빛은 소형화하기에 매우 유리한 구조이나 특성의 안정화를 위한 연구가 필요하다.

3. 광의 강도 및 위상 변조를 기반으로 하는 광 주파수 빔

광전 주파수 빔(Electro-optic frequency comb)은 연속적인 광신호를 광전 변조하여 주파수 빔을 생성하는 방식이다. 비선형 광학의 원리를 기반으로, 단일 파장인 연속파 레이저의 조화파(Harmonics)를 생성하여 일정한 간격을 갖는 다수의 빛을 만드는 원리이다. 광전변조기를 이용하여 연속적인 광원의 위상을 변조시키면 주파수 변조를 할 수 있다. 이때, 변조된 주파수들 사이에서 에너지와 운동량보존을 만족하면 FWM이 발생하여 주파수 빔이 형성된다. FWM이 발생하는 과정은 그림 3(c)에서 설명한 내용과 동일하다. 이때 주파수 빔의 전체적인 모양이나 각각의 빛 주파수 세기의 평탄화 정도를 조절하기 위하여 광신호의 강도 변조를 하거나 추가로 위상 변조를 조절하기도 한다.

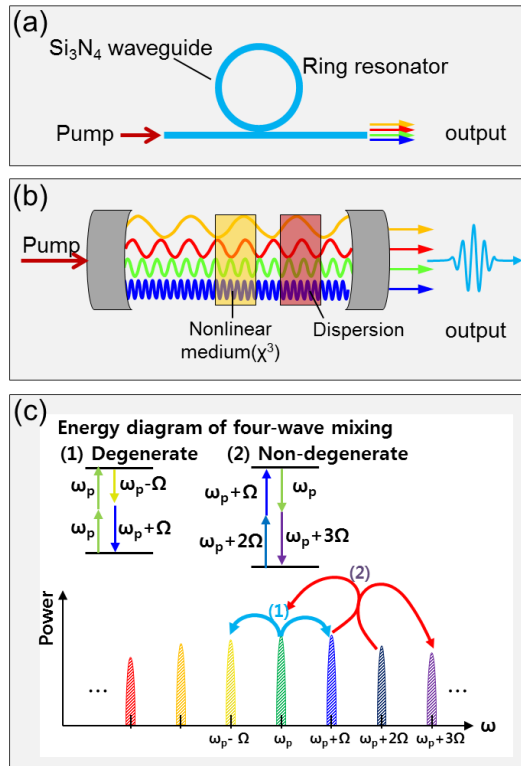


그림 3 마이크로 빛의 (a) 공진기 개요도, (b) 공진기를 구성 요소에 따른 개요도, (c) 주파수에 따른 출력 스펙트럼의 생성을 나타내는 개요도

그림 4는 일반적으로 사용되는 광전 주파수 빔의 구성도이며, 단일 파장의 연속파 광원을 강도 변조한 후에 추가로 위상 변조를 하여 주파수 빔을 생성하는 방법을 나타내고 있다.

광전 변조 방식을 이용하는 광전 주파수 빔은 광변조기의 변조 속도를 조절하여 반복률을 자유롭게 변화시키는 것이 가능하다. 따라서 ITU-T의 파장분할다중화(WDM) 통신용 채널 기준에 적합한 파장간격과 동일한 반복률을 갖는 광 주파수 빔을 생성할 수 있다. 최대 반복률은 광변조기와 RF 발진기의 성능에 의해 제한된다. 또한 광전 주파수 빔은 광의 세기 및 위상 변조기의 적절한 조합으로 빛 주파수 세기의 평탄도를 1dB 이하로 만드는 것이 가능하다. 광전 주파수 빔

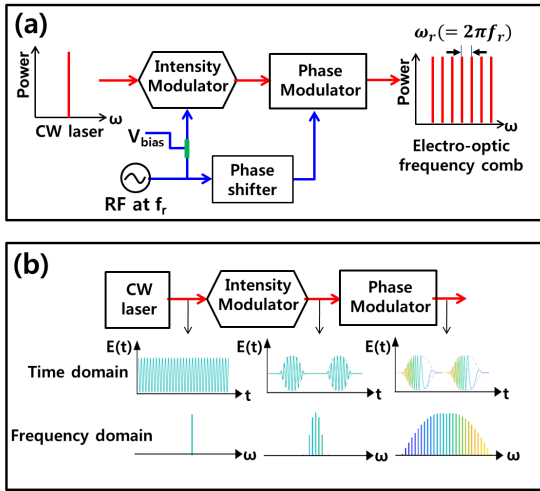


그림 4 광전 주파수 빛(electro-optic frequency comb)
(a) 구조도, (b) 주파수 및 시간 영역에서 펄스의 특성을 나타내는 개요도

의 반복률은 수백 MHz~수십 GHz로 확장 가능하며, 생성된 광 주파수 빛의 스펙트럼 대역폭은 ~2,000nm이다. 사이즈는 약 10리터이다[7-10]. 광전 주파수 빛은 광변조기를 집적화함으로써 소형화하려는 연구가 진행되고 있다.

ETRI에서는 광전 변조 방식을 이용하여 광전 주파수 빛 기술 연구를 수행하였다. 그림 5(a)의 시스템 구조로 1.5dB 이내에 50개의 주파수 채널을

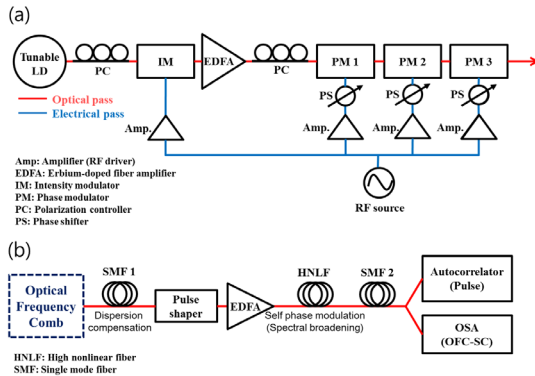


그림 5 ETRI에서 연구 개발 중인 광전 변조 방식을 이용한
(a) 광전 주파수 빛, (b) 초연속체 생성을 위한 시스템 구성도

갖는 광전 주파수 빛을 생성하였으며, 40dB 이상의 SMSR(Side-mode suppression ratio)을 확보하였다. 이때, 일반적인 강도 변조기를 DD-MZM이나 DP-MZM으로 대체할 경우 출력 스펙트럼의 평탄도를 향상시킬 수 있다. 이러한 광전 주파수 빛은 마이크로파 포토닉 필터 및 DWDM 등의 다양한 분야에 응용 가능하다[10].

또한, ETRI에서는 자체 개발한 광전 주파수 빛 기술 기반으로 그림 5(b)와 같은 초연속체(Super-continuum) 형성 기술 연구를 수행하였다. 초연속체는 넓은 대역폭과 매우 짧은 펄스를 갖는 다중 파장 광원으로, 광전 주파수 빛 구조 내에서 SMF 길이 조절에 의한 분산 보상과 HNLF에 의한 자기 위상변조(Self-phase modulation)를 통하여 출력 스펙트럼의 대역폭을 확장시켰다. 그 결과, 10dB 이내 43.5nm의 파장 범위를 갖는 초연속체를 생성하였으며, 이때 펄스폭은 103fs로 우수하였다[8].

III. 광 주파수 빛 발생기의 기술 동향 및 전망

광 주파수 빛은 초기에는 극초단파 레이저를 생성하는 기술로서 각광을 받았다. 스펙트럼 영역에서 광 주파수 빛의 대역폭이 커질수록 펄스폭이 줄어드는 원리를 이용해서 펨토초 이하의 레이저를 생성할 수 있고, 이를 통해 고정밀 가공 등과 같은 분야에 적용되어 왔다. 그 이후에 광 주파수 빛의 특성(안정도, 대역폭, 편평도 등)이 향상되면서 시간 측이 아닌 주파수 자(Frequency ruler)로서의 스펙트럼 측에서의 응용 분야로 확대되고 있는 상황이다. 그림 6에서 보이는 바와 같이 광 주파수 빛의 대역폭, 라인 수, 안정도 편평도 등의 정돈 수준에 따라 유무선통신, 이미징, 분광 등의 분야에서 획기적인 역할을 할 수 있는 신호원으로서 각

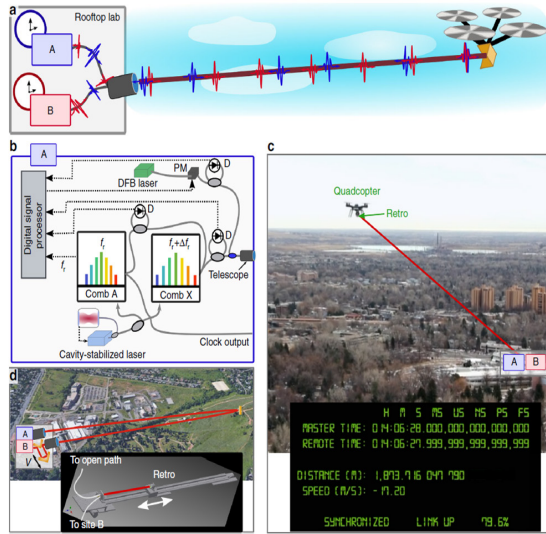


그림 6 광 주파수 빛의 특성(정확성, 견고성, 단순성, 스펙트럼 대역폭, 주파수 빛의 개수)에 따른 응용 분야 예시[11]

광을 받고 있다.

광 주파수 빛은 탐지 및 센싱용 신호원으로 사용되고 있다. 다양한 분자들은 고유의 흡수 스펙트럼을 가지고 있기 때문에 넓은 파장대에서 촘촘한 빛살들을 가지고 있는 광원을 만들 수 있다면, 흡수 스펙트럼의 특성 파악을 통해 물질의 유무를 파악할 수 있다. 현재 광 주파수 빛은 고차조화파 생성 방식을 통한 XUV부터 Mid-IR까지, 그리고 광 주파수 빛의 생성 방식에 따라 10 μ m 이상의 파장대를 커버할 수 있는 주파수 자를 생성할 수 있다. 이를 통해 분자 탐지뿐만 아니라, 파장대에 따라 독성 가스 및 폭발물까지 탐지할 수 있는 기술의 확보가 가능하다.

광 주파수 빛은 유무선 통신 분야에서도 그 필요성이 지속적으로 대두되고 있다. 유선 통신에서는 다채널 파장 광원으로서, WDM 및 DWDM이 고려된 NG-PON2 이상의 차세대 통신망을 위한 신호원으로 각광을 받고 있다. 뿐만 아니라 최근에



출처 H. Bergeron et al., "Femtosecond time synchronization of optical clocks off of a flying quadcopter," Nature Commun., 10, 1189, 2019. CC BY 4.0.

그림 7 움직이는 비행체와의 시간-주파수 전송 실험

는 무선통신 분야에서도 그 필요성이 커지고 있다. 광 주파수 빛의 비팅(Beating)을 통해 THz 영역까지의 고안정한 고주파수 전기신호를 생성할 수 있고, 광 주파수 빛의 크기 및 위상 조형을 통해 초고주파/광대역 임의파형의 생성(Arbitrary waveform generation)이 가능하다. 따라서 신호 전송 시 생기는 신호 왜곡의 보상이나 보안 송수신 기술 구현을

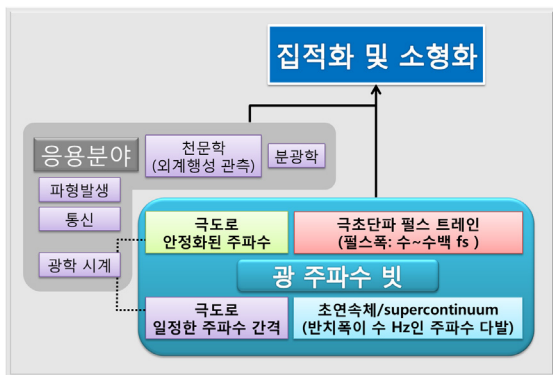


그림 8 광 주파수 빛 특성, 응용 및 연구방향에 대한 개요도

가능하게 할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

또한 광 주파수 빛은 고정밀 이미징 기술에도 그 활용도가 매우 높을 것으로 기대하고 있다. 단거리 고정밀 이미징에 있어서 OCT(Optical coherence tomography) 분야뿐만 아니라 THz 이미징을 위한 신호원으로서도 대두되고 있다. 그리고 장거리 고정밀 라이더(LIDAR: Light detection and ranging) 분야와 같이 고정밀 장거리 탐지 기술 분야에서도 그 활용도가 매우 높을 것으로 기대하고 있고, 여러 기관에서 경쟁적으로 활발한 연구가 진행 중에 있다. 그림 7은 이러한 연구 중 한 가지 예로, 움직이는 비행체인 드론이나 위성을 이용한 정밀 탐색이나 검출에 관한 연구를 보여준다. 여기서의 문제는 외부 환경에 의한 비행시간의 변화 및 도플러 효과에 의해 움직이는 비행체와의 링크를 지속적으로 유지하기 어렵다는 점이다. 이 문제는 광 주파수 빛을 이용한 정확한 시간-주파수 전송방법으로 해결될 수 있다.

최근에는 이처럼 다양한 분야에서 현재 기술로 불가능한 많은 기술을 가능하게 할 광 주파수 빛의 집적화 및 소형화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[12]. 반도체 칩 형태의 부품을 기반으로 광 주파수 빛을 작게 대량생산할 수 있게 되면, 매우 정밀하면서 다양한 응용이 가능한 다재다능한 광 원을 누구나 포터블한 형태의 제품으로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결론

광 주파수 빛을 생성하는 세 가지 방법과 장단점, 그리고 다양한 응용에 대하여 살펴보았다. 광 주파수 빛은 주파수 사이의 간격과 주파수가 극도로 안정되어 있다. 펄스폭은 수~수백 fs 수준이고, 스펙트럼 대역폭은 ~1,000nm로 넓으며, 이

를 구성하는 각각의 빛 주파수의 선포는 수 Hz로 좁다. 이러한 특성을 기반으로, 광 주파수 빛은 매우 정밀한 광학 시계, 통신, 분광학, 파형발생 및 천문학 분야에서 응용되고 있다. 또한, 고정밀 이미징이나 라이더를 이용한 탐색 분야에서 응용하기 위한 연구가 진행 중이며, 최근에는 광 주파수 빛의 집적화 및 소형화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 앞에서 언급한 광 주파수 빛의 모든 장점 및 응용 기술을 융합한 포터블한 모듈을 만들 수 있다면, 이 장치는 절대적인 시간 기준을 제공하고, 동시에 분석과 탐색, 통신 등의 업무를 가능케 하는 획기적인 미래 유망기술이 될 것이다.

용어해설

광 주파수 빛(Optical frequency comb) 매우 안정화된 극초단파 레이저. 주파수가 머리빗 모양처럼 일정한 간격으로 배열되기 때문에 광 주파수 빛이라고 함. 광 주파수 빛은 일정한 시간 간격(Δt)으로 극초단파를 생성하며, 이를 푸리에 변환하면 일정한 주파수 간격 ($\Delta f=1/\Delta t$)의 광 주파수(f_0)들이 나타남. 이때, $f_0 = f_{offset} + N \times \Delta f$ 의 관계로 서로 연결되며, f_{offset} 는 캐리어 엔벨로프 오프셋 주파수(Carrier envelop offset frequency), N 은 정수임. 시험 제작된 극초단파 레이저 중에서 f_{offset} , Δf , f_0 를 정확히 조절 가능한 것만이 광 주파수 빛으로 분류

약어 정리

DD-MZM	Dual-drive MZM
DP-MZM	Dual-parallel MZM
DWDM	Dense WDM
EO	Electro-Optic
FWM	Four-Wave Mixing
HNLF	High NonLinear Fiber
Mid-IR	Mid-infrared
MZM	Mach-Zehnder Modulator
NG-PON	Next Generation-Passive Optical Network
OFC	Optical Frequency Comb

RF	Radio Frequency
SMF	Single-Mode Fiber
WDM	Wavelength Division Multiplexing
XUV	Extreme Ultraviolet

참고문헌

- [1] S. A. Diddams, "The evolving optical frequency comb [Invited]," *J. Opt. Soc. Am. B*, 27, 2010, pp. B51-B62.
- [2] J. L. Hall, "Nobel lecture: Defining and measuring optical frequencies," *Reviews of modern physics*, 78, 2006, pp. 1279-1295.
- [3] T. W. Hänsch, "Nobel lecture: Passion for precision," *Reviews of modern physics*, 78, 2006, pp. 1297-1309.
- [4] J. L. Hall, "Optical frequency measurement: 40 years of technology revolutions," *Journal of selected topic in quantum electronics*, 6, 2000, pp. 1136-1144.
- [5] T. J. Kippenberg, "Microresonator-based optical frequency combs," *Science*, 332, 2011, pp. 555-559.
- [6] P. Trocha, "Ultrafast optical ranging using microresonator soliton frequency combs," *Science*, 359, 2018, pp. 887-891.
- [7] V. Torres-Company et al., "Laser Frequency Combs For Coherent Optical Communication," *Opt. Lett.*, 38, 2013, pp. 2188-2190.
- [8] M. Song et al., "Flat-top Supercontinuum Generation Based on Electro-optic Optical Frequency Comb," *CLEO 2019*, paper JTU2A.11.
- [9] D. R. Carlson et al., "Ultrafast electro-optic light with subcycle control," *Science* 361, 2018, pp. 1358-1363.
- [10] T. T. Tran et al., "Highly flat optical frequency comb generation based on pulse carving and sinusoidal phase modulation," *Optical engineering* 58, 2019, 076103.
- [11] N. R. Newbury, "Searching for applications with a fine-tooth comb," *Nature Photonics*, 5, 2011, pp. 186-188.
- [12] B. Stern et al., "Battery-operated integrated frequency comb generator," *Nature*, 562, 2012, pp. 401-405.