한국통신학회 1988년도 추계학술발표회 논문집(1988. 11. 5)

광굴절 매질을 이용한 링 발진기에 관한 연구

김 희 덕*, 김 은 수, 양 인 응
광운대학교 전자공학과

A Study on Ring Oscillator Using Photorefractive Medium

Hee-Deog Kim,* Eun-Soo Kim, In-Eung Young
Department of Electronics, Kwang-Woon University

Abstract

This paper described a theory of ring oscillation under the unidirectional oscillation condition using contradirectional two-wave mixing in photorefractive crystals, investigated and compared with ring oscillator using transmissive TWM. Despite the gain bandwidth of photorefractive TWM, ring oscillator can oscillate over a most range of cavity detuning unlike for conventional ring laser.

I. 서 론

비선형 광학의 한 분야로서 최근에, 2광파 혼합으로 나타나는 비가역 에너지전달을 이용한 발진에 대한 연구가 활발히 전개되고있다. 그예로 1982년 White 및 Cronin-Golomb 등은 단방향 발진기(Unidirectional Oscillator)를 실험적으로 구성 하였고, 1983년 Laeri 등은 2광파 혼합에 의한 링 발진 기를 이용하여 빔 증폭 실험을 하었다[1]. 최근에, Pochi.Yeh, Amnon Yariv 및 Sze Keung Kwong 등이 미소 한 주파수 차이가 있는 전송형 2광파 혼합을 이용하여 발진에 대한 이론을 서로 다른 접근법으로 제시하였고 실험적으로 입증하였다[2,3,4]. 반사형 2광파 혼합에 대해서도 발진에 응용하는 연구가 시작 되었으나, 아직 발진 이론은 보도되지 않았다. 1983년 Pochi.Yeh가 반사형 2광파 혼합을 분석 하면서 링 발진기에서의 단 방향 발진을 예언하였다[5].

따라서, 본 논문에서는 반사형 홀로그래픽 2광파 혼합을 이용하여, 광의 진행 방향이 단방향이 될 조건하에서 링 발진 이론을 기술하고, 전송형 2광파 혼합을 이용한 링 발진 이론과 비교 및 검토해본다.

II. 이 론

II-1. 2 광파 혼합

먼저 광굴절 결정체내에 두 가간섭 빔(Coherent Beam) 사이에 상호작용을 검토하여 본다. 두 빔을 상호작용시키는 방법에는 전송형(그림 1,a) 및 반사형(그림 1,b)이 있으며, 이들은 근본적인 차이가 있다[5].

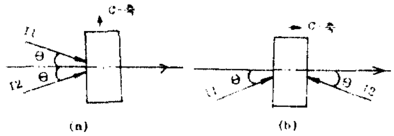


그림 1. 2광파 혼합 구성도
(a) 전송형 2광파 혼합
(b) 반사형 2광파 혼합

2광파 혼합으로 나타나는 비가역 에너지 전달을 링 발진기에 응용하기 시작하였으며, 전송형 2광파 혼합을 이용하여 단일빔으로 단방향 링 발진기 (그림 2,a)를 White 등이 처음으로 실험으로 구성하였고, 그후 단방향 링 발진기에 대한 일반적인 이론이 보도되었다. 따라서, 여기서는 반사형 2광파 혼합을 사용한 링 발진기(그림2,b)에 관하여 단방향 발진 이론을 전개한다.

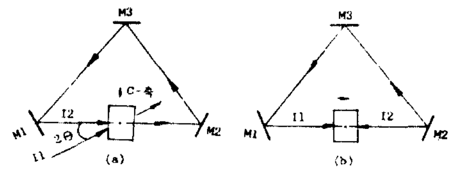


그림 2. 단방향 링 발진기
(a) 전송형 2광파 혼합 링발진기
(b) 반사형 2광파 혼합 링발진기

그림 2,b 의 링 공진기내에 광굴절 결정체에서의 서로 반대 방향으로 전파하는 거의 축퇴된 2광파 혼합을 분석해본다. 공진기 내에서의 두파의 전계를 다음으로 놓는다.

$$Ej = Aj(z)\exp[i(kjz - wjt)] + C.C. \quad j = 1,2, \qquad (1)$$

광굴절 매질에서($z = 0 \sim L$), $w1 \neq w2$인 두 파는 다음과 같은 세기 유도 격자를 발생시킨다.

$$n = no + n1\exp(i\phi)A1A2^{*}\exp[iKz-\Omega t)]/2I_o + C.C \qquad (2)$$

$$L_o = I1 + I2 = |A1|^2 + |A2|^2 \qquad (3)$$

n1은 실수이고 양수이며, ϕ는 실수이다. K=2k, Ω=w1-w2이다. 여기서, ϕ 및 n1은 각각 다음으로 쓸 수 있다.

$$\phi = \phi_o + \tan^{-1}(\Omega\tau) \qquad (4)$$

$$n1 = 2\delta n_s / [(1+(\Omega\tau)^2]^{1/2} \qquad (5)$$

여기서, τ는 홀로그래픽 격자를 형성시키는 데 걸리는 시상수, δn_s 및 광 유도 지수 변화의 포화값이고 ϕ_o는 빔 조사시의 결정체의 Nonlocal Response에 관련된 상수 위상 변이이다.

이제, n에 대한 식(2)와 스칼라 파동 방정식 및 Standard Slowly Varying Field Approximation을 적용하여, 다음 결합파 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}(d/dz)I1 &= \gamma(I1I2)/(I1+I2),\\ (d/dz)I2 &= \gamma(I1I2)/(I1+I2)\end{aligned} \qquad (6)$$

$$(d/dz)\phi_1 = -\gamma' I2/(I1+I2), \quad (d/dz)\phi_2 = \gamma' I1/(I1+I2) \qquad (7)$$

$$\gamma = (2\pi n1/\lambda)\sin\phi, \quad \gamma' = (\pi n1/\lambda)\cos\phi \qquad (8)$$

식(6)의 해를 구하고 흡수계수 α가 있다고 가정할 때, 두파에 대한 전송도는 다음과 같다.

$$T1 = I1(L)/I1(0) = (1+m)\exp(-\alpha L)/(1+m\exp(-\gamma L)) \qquad (9.a)$$

$$T2 = I2(0)/I2(L) = (1+m)\exp(-\alpha L)/(m+\exp(\gamma L)) \qquad (9.b)$$

양의 γ에 대해 T1>1이고, T2<1임을 알 수 있다. 그림 2,b로 부터 빔 I1이 흡수 손실을 극복할 정도로 증폭되고, 빔 I2는 소멸되는 특성을 이용하여, 단방향 발진조건을 찾을 수 있다.

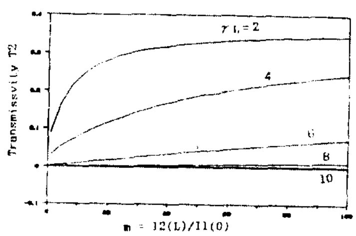


그림 3. 결합 강세 γL에대한 m함수로의 전송도 T2

그림 3으로 부터 T2가 0으로 접근 되는 γL > 6인 영역에서 확실하게 단방향이 일어날 수 있도록 링 발진기를 구성할 수 있다.

위상 ϕ_1과 ϕ_2는 식(7)로부터 직접적으로 적분될 수 있다. 식(7)에 식(9),(10)을 대입하고 적분하면 다음과 같다.

$$\Delta\phi_1 = \phi_1(L) - \phi_1(0)$$

$$= -\frac{\gamma'}{\gamma}\,\mathrm{Log}\left[\frac{1+m}{m+\exp(\gamma L)}\right] - \gamma' L \qquad (10)$$

여기서 발진이 되는 빔 I1에 대하여 광굴절 매질을 통과하는 위상변이는 다음과 같다.

$$2\pi n_o L/\lambda + \phi_1(L) - \phi_1(0) \qquad (11)$$

$\Delta\phi_1$는 부가적인 광굴절 위상 변이 이다.

II-2 발진 주파수와 세기

기존 이득매실과 같지않게 광굴절 2광파 혼합의 대역폭은 매우좁다. 단지 확산으로만 동작되는 광굴절 결정체(예,$BaTiO_3$)를 사용할 때 결합상수는 식(4), (5) 및 (8)에 따라 다음과 같이된다.

$$\gamma = \gamma_o / [1+(\Omega\tau)^2] \qquad (12)$$

여기서 $\gamma_o = 4\pi\delta n_s/\lambda$ 인 축퇴 2광파 혼합인 경우에 결합상수이다.

패러매트릭 2광파 혼합 이득을 다음과 같이 정의한다.

$$G1 = T1 = I1(L)/I1(0) = (1+m)\exp(-\alpha L)/\{1+m\exp(-\gamma L)\} \qquad (13)$$

따라서, G1>1인 증폭이 될 조건은 $\gamma > \alpha$이고 $m > \{1-\exp(-\alpha L)\}/\{\exp(-\alpha L)-\exp(\gamma L)\}$일 때이다.

반사형 2광파 혼합을 이용하여 단방향 발진을 확실히 일으킬 수 있고, 발진 빔의 주파수가 Detuning됨을 예상할 수 있다. 이러한 현상들은 광굴절 결합으로 나타난 부가적인 위상변이 식(10)로서 설명될 수 있다. 이 위상 변이를 발진 주파수 Detuning의 함수로서 몇가지 m값에 대하여 그림4에 주어졌다.

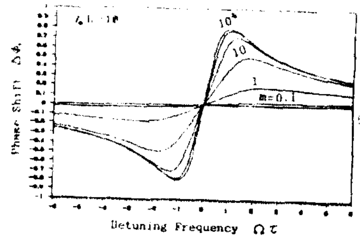


그림4. m값에 대한 주파수 Detuning 함수로서 위상변이

이 위상 변이는 주파수 Detuning가 $\Omega\tau = \pm 1$에 대하여 $+\pi$에서 $-\pi$까지 변화됨을 볼 수 있다. 이러한 위상변이가 링 발진기에서 2π 정수배의 왕복 위상변이를 필요하는 발진에 대한 원인이 된다.

II-3. 발진 조건

그림2,b와 같은 반사형 단방향 발진기내에 발진 빔의 세기가 형성되면 발진세기의 이득이 포화가 되어 결국 정상상태가 된다.

정상상태시 발진조건으로 왕복 빔 크기 및 왕복위상도 최초의 상태가 되어야 된다. 링 발진기에서 적절한 경계조건을 적용하면 빔 세기에 관한 발진조건은 다음과 같다.

$$I1(0) = R\ I1(L) \qquad (14)$$

여기서 L은 상호작용 길이이고 R은 미러 각각에 대한 반사율 곱이다. 발진 빔에 대한 위상에 관한 발진 조건은 다음과 같다.

$$\Delta\phi_t + \int k\, ds = 2N\pi\ , \qquad N=\text{정수} \qquad (15)$$

여기서, 적분은 왕복 빔 경로 구간이다.

식(14)은 다음과 같이 Gl에 대한 정의로 쓸 수 있다.

$$Gl \cdot R = 1 \qquad (16)$$

Cavity-detuning Parameter $\Delta\gamma$ 를 다음으로 정의한다.

$$\Delta\gamma = 2N'\pi - \int k ds \qquad (17)$$

N' 는 $\Delta\gamma$ 가 $-\pi$ 에서 $+\pi$ 사이 놓이도록 한 정수이다.

이때, 위상에 대한 발진 조건식은 다음으로 쓸 수 있다.

$$\Delta\phi_t = \Delta\gamma + 2M\pi\ , \qquad M = \text{정수} \qquad (18)$$

다시 말해서, 발진은 캐비티 Detuning이 광굴절 위상 변이로서 보상될 수 있을 때 단지 일어날 수 있다.

식(16)의 Gl에 대해 식(13)을 대입하고, 식(8)를 사용하므로 다음을 얻는다.

$$\Delta\phi_t = \frac{\gamma'}{\gamma} \mathrm{Log}(R\exp(-\alpha L)) \qquad (19)$$

순수 확산인 경우 $\phi_0=\pi/2$인 경우 ϕ에 대한 식(4) 및 (8)을 이용하여 식(19)로 부터 다음을 얻을 수 있다.

$$\Omega\tau = \frac{2\,\Delta\phi_t}{\alpha L - \mathrm{Log}\ R} = \frac{2(\Delta\gamma + 2M\pi)}{\alpha L - \mathrm{Log}\ R} \qquad (20)$$

식(13)의 Gl에 대하여 식(16)를 대입하면 정상상태시 m값을 구할 수 있다.

$$m = \frac{I2(L)}{I1(0)} = \frac{1 - R\exp(-\alpha L)}{R\exp(-\alpha L) - \exp(-\gamma L)} \qquad (21)$$

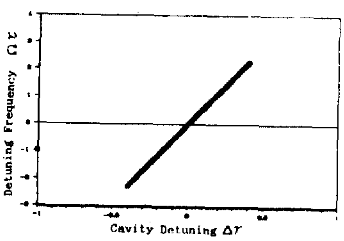
m은 정상상태시의 두 입사 세기이다. 식(21)로부터 임계 발진 조건과 I2빔의 전송도 T2가 거의 0으로 접근되는 단방향 발진 조건은 다음이다.

$$\gamma L > \alpha L - \mathrm{Log}\ R \qquad \text{그리고} \qquad \gamma L > 6 \qquad (22)$$

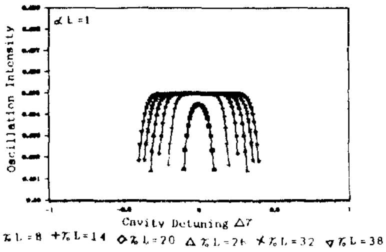
식(22)로 부터 단일 방향으로 발진시킬 임계조건은 $\gamma L>6$임을 알 수 있고, 식(22)에 식(13)를 대입하면 유한 스펙트럼 영역을 얻는다.

$$|\,\Omega\tau\,| < \left(\frac{\gamma_0 L - 6}{6}\right)^{1/2} \qquad (23)$$

여기서 γ_0는 $\Omega=w1-w2=0$일때 이득이다. 이 식은 정상상태시 스펙트럼 영역을 정의 해준다.



(a)



(b)

그림 5. 캐비티 Detuning함수로의 Detuning주파수와 세기
(a) Detuning 주파수
(b) 발진 세기

그림 5,a와 b는 캐비티 Detuning 함수로서 각각 주파수 Detuning과 발진세기를 보였다. $\gamma_0 L$값이 매우 큰 값에 대하여 대부분의 캐비티 Detuning $\Delta\gamma$ 에서도 단방향 발진이 일어날 수 있는 반면에 $\gamma_0 L$값이 적은 영역 에서는 캐비티 Detuning $\Delta\gamma=0$ 부근에서 단지 단방향 발진이 일어남을 알 수 있다. 전송형 단방향 발진기와 비교할 때 반사형 단방향 발진기는 동일한 $\gamma_0 L$에 대하여 캐비티 Detuning 폭이 전송형보다 좁은 영역에서 단방향 발진이 일어남을 알 수 있다.

III. 결 론

서로 반대 방향으로 전파하는 반사형 홀로그래픽 2광파 혼합을 이용한 단방향 링 발진 조건을 제시하여 발진 이론을 유도했다.

전송형 단방향 링 발진 이론과 비교를 하면, 두 형사이 2광파 결합방정식이 다르므로서 광굴절 위상변이가 반대로 나타났고, 캐비티 Detuning 길이가 증가함에 따라 전송형은 Detuning 주파수가 감소하지만 반사형은 증가하였으며, 링 발진기내에 형성되는 빔 세기는 서로 비슷하지만 전송형은 캐비티 Detuning$\Delta\gamma$ 값이 큰 범위에서도 발진이 되는 반면, 반사형은 보다 적은영역에서 단지 단방향 발진이 일어났다.

기존 레이저 매질을 이용한 링 발진기가 정확한 캐비티 길이를 요구한다면 광굴절 매질을 사용한 발진기는 임의 캐비티 길이에서도 발진됨을 알수있다.

참 고 문 헌

1. F.Laeri, Opt.Commun., 47,387(1983).
2. P.Yeh, J.Opt.Soc.Am., B2,1924(1985).
3. Amnon.Yariv Opt.Lett.,10,454(1985).
4. Sze-Keung Kwong Appl.Phys.Lett., 47,460(1985).
5. P.Yeh, Opt.Commun.,45,32(1983).