# 공동공진형(空胴共振型) 마이크로波 光 변조기의 설계

논 문
19~6~2

# Design of a Cavity Type M/W Light Modulator by the Pockel's Effect.

강 형 목* 김 정 기**
(Hyung Mok Kang, Jung Ki Kim)

**〔ABSTRACT〕**

A Device is described which intensity modulates a light beam at modulating frequency in the M/W region.

A Method of designing a practical crystalline microwave-Freg. light modulator has been described. In addition, Electrooptic properties and operation as light modulator of $NH_4H_2po_4$ is described. A light path is poovided through the crystal into a suitably oriented analyzer. The intensity of the light beam emerging from the latter varies at the same rate as the cavity frequency.

## 1. 서 론

Laser의 개발과 응용에 관한 연구가 발달함에 따라 光波帶의 電磁波와 光波와의 기술 및 장치가 연구되고 光周波數帶의 통신에 대한 응용이 중요한 관심사가 되어왔다.

즉 GC帶域의 주파수에서 光通信 계통을 현재의 M/W 전송統에 대응시키려는 시도가 일어나고 있다.

이러한 시도의 중점은 넓은 帶域인 光波의 變調및 檢波가 M/W의 변조로도 가능한 것인가 하는 것이다.

제어계통에서도 변조된 光速을 사용하는 것은 재래식 M/W波의 레이다 계통에서 보다 많은 이점을 갖는다.

변조방식으로 저주파에서는 많은 변조방식이 있으나 M/W波 영역에서의 변조는 간단하지가 않다.

현재 光의 檢波도 M/W帶域에서 PIN photodiode나 進行波型 광전관을 이용하여 檢波되고 있다.

변조에 대한 이론은 1920년대에 Kerr Cell을 사용하여 $10^6$c/see의 周波數帶에서 녹색광을 변조한 Rupp에 의하여 개발되고 M/W波 대역에서는 D.T Holshouser등이 Xerr effect를 이용하였다.

그러나 현재 Kaminow에 의하면 KDP를 이용하여 X-Band에서 puised MoD이 pockel effect를 원리로하여 개발중이다.

즉 Kerr effect보다는 pockel effect가 광범위하게 사용되는데 이것은 Kerr liquid인 $CS_2$가 독성성이고 휘발성이며 liquid를 혼합하기 위하여 계속적인 물리적 동작을 필요로하고 pockel effect는 물리적으로 다양성이 있어서 여러방면에 응용이 가능하며 무절손실, 부피등이 없는 이점이 있기 때문이다.

그러므로 이 논문에서는 M/W帶域에 pockel effect를 사용한 변조기의 손실, 변조을 설계및 변조에 필요한 power량을 고찰하고 새로운 변조기를 M/W의 9GC帶域에 대응하도록 설계 해석한다.

## 2. 變 調

### 1) 변조과정

Pockel's effect는 voltage나 응력에 의해 유도되는 複屈折性 물질인 Uniaxial crystal에서 일어난다. 이러한 기본적인 crystal로서 KDP와 ADP가 있다.

Pockel's effect에 대한 기본적인 설명은 그림 1과 같다.

즉 광원으로부터 非變調光이 偏光器에 수직으로 入射되면 이 光은 두개의 상호수직인 光으로 분할되고 두개의 성분으로 분할된 光은 crystal로 入射하여 공급된 field의 영향으로 位波의 位相差가 생긴다. 해광기에서 광원쪽을 보면 偏光器에 있는 unicrystal의 특성으로 원형 환상 pattern을 볼 수 있다.

다음 결정체 양단에 변조전압을 가하면 타원형으로

*정회원 : 경희대학교 전자공학과
** 〃 : 광운전자공과대학 전자공학과

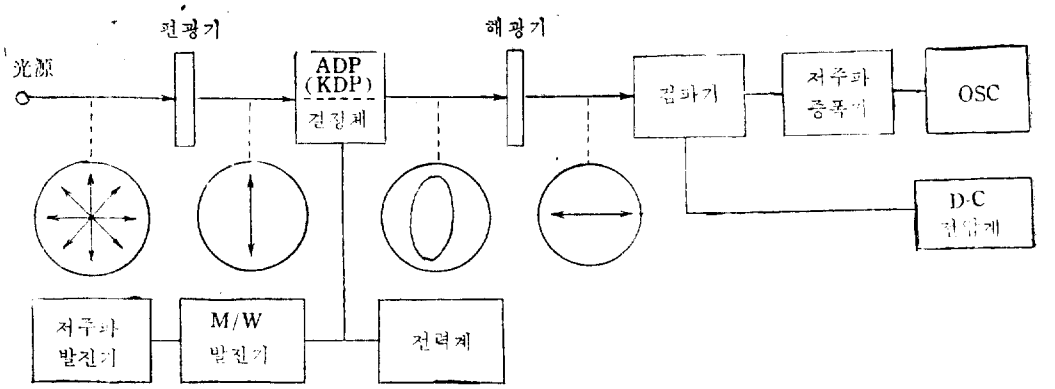


그림 1. 변조 및 검파

偏光된 光이 crystal로 부터 나오는데 이것은 입력평판 偏光器에서 偏光된 光束이 결정체내에서 서로 다른 속도로 진행하는 두개의 상호수직인 성분으로 분할되기 때문이다.

변조전압이 교번되면 나타나는 타원의 心差率도 변화한다.

결과적으로 해광기는 주파수가 변화함에 따라 光量이 주기적으로 변화하여 檢波器에 이르게 한다.

그림 2에는 偏光器와 해광기의 偏光面과 crystal의 電氣光 軸에서 유도된 성분이 표시되어 있다.

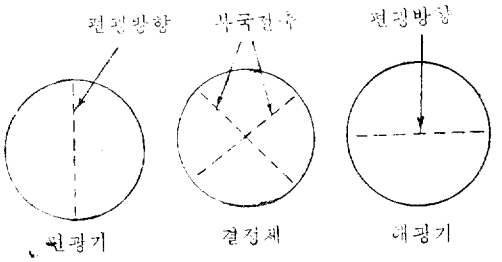


그림 2. 偏光平面

**2) 변조이론**

이러한 pockel's effect를 간단히 해석하면 다음과 같다. 電氣光 결정체인 ADP나 KDP결정체는 전계를 공급하지 않을 때 uniaxial로서 $z$軸과 光軸은 평행을 이루나 전계가 공급되면 biaxial로서 결정체 $x.y.z$와 타원형의 結晶屈折 軸 $x',y',z'$와는 일치하지 않는다.

이러한 전계에 의한 결과를 이용하여 光變調器에 이용한다.

이때 $z$와 $z'$를 평행으로 하면 $x',y'$는 $x',y$에서 $-45°$회전 한다.

Crystal의 屈折率은 Fresnel elépsoid항으로 다음과 같이 표시한다.

$$\frac{x^2+y^2}{n_o^2}+\frac{z^2}{n_e^2}=2\Gamma_{41}(ExYz+Eyzx)+2\Gamma_{63}$$

$$E_z\times Y=1$$

여기서

$n_o$=Ordinary refraction index(KDP=1.5)

$n_e$=Extraodinary refraction index(KDP=1.5)

$\Gamma_{ij}$=전기광 계수

$\Gamma_{41}=2.58\times10^{-7}$(stat volts/cm)$^{-1}$ in KDP

$\Gamma_{63}'=3.15\times10^{-7}$(stat volts/cm)$^{-1}$ in KDP

$\Gamma_{63}'=\Gamma_{63}-\Gamma_{66}\,d_{36}$ ($\Gamma_{63}$의 高周波値)

$=\Gamma_{63}$의 57%. in KDP

$x.y.z.$=결정의 方位軸

$z$方向에 對한 field는 Fresnel Ellipsoid에서

$$\frac{x^2+y^3}{n_{o2}}+\frac{z^2}{n_e^2}+2\Gamma_{63}E_2\times y=1$$

이 된다.

이 경우 結晶軸으로부터 $x'$와 $y'$축은 $45°$회전하고 長軸에대한 길이는 field의 변화에따라 변하는 타원형의 patern이 된다.

이 두축을 따른 屈折率은 각각

$$n_x'=n_o+\frac{1}{2}n_o^3\Gamma_{63}E_z$$

$$n_y'=n_o-\frac{1}{2}n_o^3\Gamma_{63}E_z$$

$$n_z'=n_e$$

이 되고 $z$軸을 따라 전파되는 光平面과의 後屈折은 각각

$$B_x' = n_y' - n_x' = n_o - n_e - \frac{1}{2}n_o^3\Gamma_{63}E_z$$

$$By' = n_x' - n_z' = n_o - n_e + \frac{1}{2}n_o^3\Gamma_{63}E_z$$

$$Bz' = n_z' - n_y' = n_o^3\Gamma_{63}E_y$$

가 된다.

여기서 $\Gamma^9{}_3$의 値는 결정체의 탄성율로서 이론이나 실측으로 구할 수 있다.

비교적 높은 주파수에서 $\Gamma_{63}$는 상수치의 약$\frac{6}{10}$이 되어 $0.847\times10^{-11}$(m/v)의 空電値 (static value)가 된다.

z軸 방향으로 光이 진행될때 復屈折의 값이 가장 크다. 그리고 자연적인 복굴절은 factor가 아니므로 光의 변조에 이 crystal을 사용하여 z방향으로 진행시키므로서 이용된다.

결정체에 인가되는 法線方向의 遲延(retardation)은

$$\Gamma = \frac{B_x' t}{\lambda} = \frac{n_o^3\Gamma_{63}V}{\lambda}$$

이고 여기서

$t$=결정체의 두께

$V$=전위차

$\lambda$=光束의 波長 이다.

그러므로 주어진 $\Gamma$에 대하여 필요한 $V$는 $\lambda$에 비례한다

位相差 $\phi$의 項을 radian으로 표시하면 위식은

$$\phi = 2\pi\frac{n_o^3\Gamma_{63}V}{\lambda}$$

가 된다.

**3) Pockel's Effect의 해석**

그림 1에서 偏光器를 통과한 후 타원의 $x'$軸에 대하여 $\theta_o$의 각으로 향한 光의 Vector $A_o$를 생각하자.

이 光束 $I$의 세기는 field vector의 自乘의 시간평균치로 정의된다.

즉 $I=(\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}|A_o|^2\cos^2 wtd(wt)$

$$A_o\sqrt{2I}\cos wt$$

그리고 $A_{ox}=A_o$ cso $\theta_o$, $A_{oy}=A\sin\theta_o$로 주어지는 $X^1$과 $Y'$방향의 成分을 생각하면 field가 z방향으로 주어질때 타원축을 따르는 이성분에서 $\theta_o$는 45°가된다.

그러면 變調光에 대한것과 타원축을 따른 光의 Amplitude는 이 位相遲延(phase retardation)의 항으로 쓸 수 있다.

$$A_{ox}=\sqrt{I_o}\cos(wt+\rho_x')$$

$$A_{oy}=\sqrt{I_o}\cos(\omega t+\varphi y^{2'})$$

여기서

$$\varphi=2\pi nd/\lambda$$

그러므로

$$\varphi_x' = \frac{2\pi d}{\lambda}[n_o + \frac{1}{2}n_o^3\Gamma_{63}E_x] = \frac{2\pi n_o d}{\lambda} + \frac{\pi n_o\Gamma_{63}V}{\lambda}$$

$$\varphi_y' = \frac{2\pi d}{\lambda}[n_o + \frac{1}{2}n_o^3\Gamma_{63}Ez] = \frac{2\pi n_o d}{\lambda} - \frac{\pi n_o^3\Gamma_{63}V}{\lambda}$$

그리고

$\pi n_o^3\Gamma_{63}V_o/\lambda=\Gamma_o$

$V=V_o\cos\omega mt$

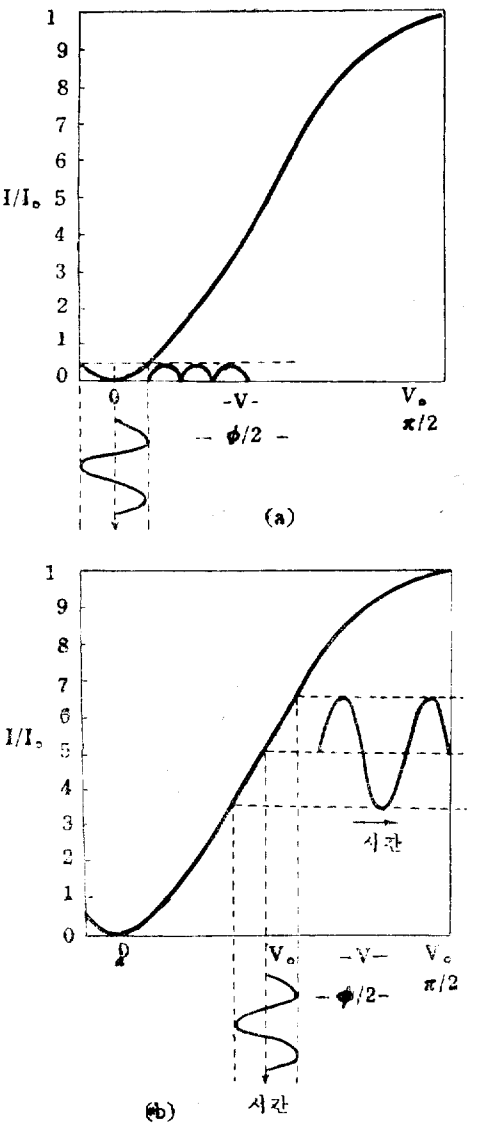


그림 3. 결정체 전압대 상대광도
(a) bias=0
(b) bias=quarter wave bias

라 하면

$2\pi n_o d/\lambda$는 位相으로 구 할 수 있다.

다음 해광기를 통과한 光에 대하여 $x$를 $X'$축과 光의 進行軸과의 각이라 하자. 그러면 光의 세기는

$$I=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi}|A\cos x+Ay\sin x|^2 d(\omega t)$$

이 되고 $X'$축과 45°로 偏光되면 위의 식은

$$\frac{I}{I_o}=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\cos(\Gamma_o+\Gamma\cos\omega_m t)$$

가 되여

Bessel 함수로 전개하면 기본항이 $\Gamma_o=\frac{\pi}{4}$ 때 인 어난다.

즉 $\frac{I}{I_o}=\frac{1}{2}[1-2J_1(2\Gamma_o)\cos\omega_m t]$ 가 된다.

해광기를 통과하는 상대 光度와 결정체에 공급되는 전압에 대한 비례는 그림 3의 (a) (b)와 같다.

만일 $\phi$가 결정체의 遲延과 같을때 해광기를 통과하는 最大 光度를 $I_o$, 100%변조에서 필요한 전압을 $V_o$, 그리고 $I$와 $V$가 순시강도 및 전압이면 상대 투고는

$$I/I_o=\sin^2(\phi/2)$$
$$=\sin^2\left(\frac{\pi}{2}\cdot\frac{V}{V_o}\right)$$

가 된다.

일반적으로 선형 동작조건은 결정체면 양단에 $\frac{V_o}{2}$의 dc bias를 걸어줄때 얻을수 있다. dc bias는 $M/W$장치에서는 실제적이 못되므로 결정체와 偏光器 사이에 quarter wave plate를 장치하므로 光學的으로 실제적인 효과를 얻는다.

半波遲延에 필요한 전압 $V_o$는 대략 자외선 에서는 15(KV)가 된다.

**4) 變調度**

出力光의 %변조는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\%\ 변조}{100}=M$$
$$=2J_1(2\Gamma_o)$$
$$=2J_1(V/V_o)$$

여기서 $\lambda=0.63\ \mu$, $\Gamma_{63}=6\times10^{-12}(m/v)$, $2\Gamma_o<0.5$ 인 경우 $M=V/V$ 로서 $V=4.9$ KV가 된다. %변조는 공급전압이나 전력의 自乘根에 비례한다. %변조가 100M이 되도록 공급전력을 계산하자.

$RC$를 Cavity wall과 결정체 손실을 포함하는 空胴 전체의 손실저항이라하고, $R_o$를 空胴을 향한 effective coupling과 發振器의 저항이라 하고, $C_o$를 결정체의 용량이라 하면, 최대전력이 전달되는 조건은 $R_o=Rc$일 때이므로

$$\Gamma(=\frac{V^2\omega^2C_o^2RC}{2}=\frac{M^2\lambda^2\omega^2C_o^2R_o}{8\pi n_o^6\Gamma_{63}^2}$$

가 되어 入力이 %변조의 自乘에 비례하고 %변조가 아주 적을때 入力도 적어지는 결과가 된다.

**5) 결정체 손실**

Crystal loss는 두가지 경우를 생각할 수 있다. 용량성의 얇은 결정체를 쓰는 경우와 進行波間의 긴 결정체를 사용하는 경우이다. M/W 波周波數에서 이러한 결정체의 등가회로는 간단히 $R$과 $C$의 직열회로로 생각할 수 있다.

$R$은 損失正接과 관계가 있고, $RC=\tan\delta/(\omega co)$와 같이 capacitance로 생각할 수 있다.

그러므로 결정에서 복사하는 power는 간단한 회로로서

$$PC=\frac{V^2\omega C o\tan\delta}{2}$$

가 된다.

이 식에서 전력은 주파수의 自乘에 비례하므로 동작은 저주파일수록 용이하게 된다. 같은 원리로 進行波型의 경우 $\delta$는 주파수에 비례하고 손실은 주파수 自乘에 비례하게 된다.

## 3. 변조기의 설계

$M/W$주파수대역에서 결정체에 수천볼트 단위의 전압을 공급하기 위하여 저주파에서 사용하는 과정을 $M/W$ 帶域에 이용하는 것이 필요하다.

일반형 공동내 유전물질인 電氣光 결정체를 장치하여 높은 $Q$의 값을 갖게하는 共振器는 결정체를 설치한 부분에 극히 높은 전계를 집속 시킬 수 있으므로 이용에 가능하다.

동시에 전계와 결정체를 통과하는 光의 진로는 光軸과 crystal의 $z$軸과 평행하여야 한다, 실험적 共振器의 설계도는 그림4와 같다.

이 共振器의 共振周波數는 결정체로 주어지는 capacitance의 susceptance와 중심도체 및 외부도체로 주어지는 전송선로의 susceptance를 같도로 하므로 근사

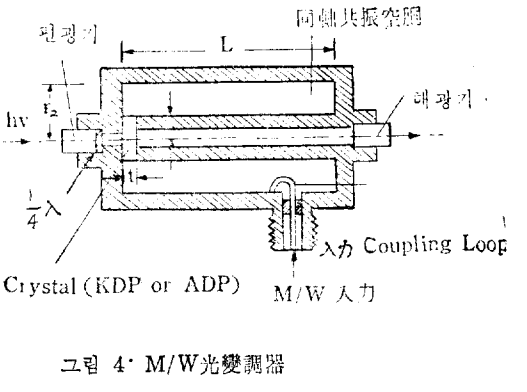


그림 4· M/W光變調器

치로서 구 할 수 있다. 물론 ADP나 KDP의 損失正接은 1GC의 주파수에서도 낮은값을 갖는다. 그러나 유전손실이 크므로 적은 결정체 용량을 필요로한다.

空胴共振器내 光路를 中心軸上에 설치하므로 기하학적인 항으로 근사치를 구하는 식이 유도된다.

즉 共振波長 $Q$와 共振器의 병열 임피던스는 각각

$$\lambda_0 = 2\pi\left(\frac{Lr^1}{2t^1}\,1n\,\frac{r^2}{r^2}\right)^{1/2}$$

$$Q = \frac{2L}{\delta}\,\frac{1nr^2/r_1}{21nr^2/r^1 + L(^1/r_1 + ^1/r_2}$$

$$R = \frac{60\pi}{\delta}\,\frac{(2L)^2(I_0 r^2/r_1)^2}{\lambda_0\{21n\ r^2/r_1 + L(^1/r^1 + ^1/r_2)\}}$$

가 된다.

여기서 $t'$=등가 공기용량의 두께

$=t/$유전상수($t$=실제두께)

$=t/14(\because K=14)$

$r_1$=내부도체 반경=결정체 반경

$r^2$=외부도체 반경

$L$=외부도체 길이

Cavity는 전송선과 결합되기 때문에 $\lambda_0$와 $Q$는 변화될 수 있다.

이 부분의 M/W 주파수 손실을 감소시키기 위하여 그 크기는 共振器의 共振周波數 이하에서 차단되도록 설계하여야 한다. 그리고 偏光器와 결정사이에 quarter wave plate를 사용할때 變調比는 약0.24 정도가된다.

## 4. 결　　과

M/W 周波數帶域인 9.37GC에서 결정체를 이용하여 光을 변조시키는 변조기의 설계치는 표 1과 같고 시작품의 모양은 그림 5와 같다.

| $f_0$GC) | L(cm) | $r_1$(cm) | $r_2$(cm) | t(cm) |
|---|---|---|---|---|
| 9.375 | 4.60 | 0.535 | 2,417 | 0.505 |

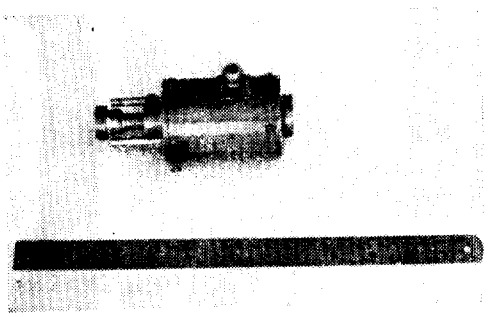

그림 5. 共振空胴型 마이크로波 光變調器

## 5. 결　　론

KDP및 ADP를 이용한 X—帶域 空胴型 변조기가 설계 제작되었고 出力光의 100%가 변조될 수 있다는 것이 해석으로 증명되었다.

偏光器에서 주되는 손실은 약 3db정도로 비교적 적은 M/W전력으로 변조시킬 수 있다. 아직도 온도변화에 따른 변조방식과, 다른 종류의 電氣光 결정체를 이용한 변조 및 강한 光度의 단광색을 이용하는 변조방법이 더 개발될 수 있다고 보겠다.

## 참 고 문 헌


1. Lucovsky, G., M.E. Lasser and R.B. Emmons, "Coherent Light Detection in Solid State Photodiodes," Proc. IEEE, Vol. 51, pp.166—172, January 1963.
2. Kaminow, I.P., "Electrooptic Light Modulators" Proc. IEEE, Vol. 54, No. 10 Oct. 1966.
3. Blumenthal, R.H., "Design of a Microwave-Frequency Light Modulator" Proc. IRE, Vol 50, pp. 452—456, April. 1962
4. Peters, C.J., "Gigacycle Bandwidth Coherent Light Traveling-wave Phase Modulators," Proc. IEEE, Vol, pp. 147—153. Januar 1963.
5. Rigrod, W.W. and I.P. Kaminow, "Wideband Microwave Light Modulation," Proc. IEEE, Vol. 51, pp. 137—140. January 1963.
6. Buhrer, C.F., L.R. Bloom and D.W. Baird, "Electro-optic Light Modulation with Cubic Crystals," Applied Optics, Vol. 2, pp. 839—846, August 1963.
7. Johnson, K.M., "Solid State Modulation and Direct Demodulation of Gas Laser Light at a M/W Frequency," Proc. IEEE, Vol. 51, pp. 1368—1369. October 1963.