

共振型 結晶體變調器에 의한 레이저光變調 (Laser Light Modulation with Resonated Crystal Modulator)

楊 仁 應* 金 映 權**

(Young, In Eung) (Kim, Yung Kwon)

요 약

본 논문에서는 선형전기광효과(Pockel 효과)를 이용하여 X대역 마이크로파(9375 MHz)를 광변조하는 데 관하여 이론적인 해석과 실험적인 연구를 했다. 전기광 결정체 KDP를 공진형 변조기로 설계하여 z축으로 광선과 평행하게 마이크로파 전계를 인가하여 변조했다.

변조파 출력을 가변단락판의 위치변화에 따라 관찰했으며 $\lambda_g/2$ 에서 변조가 잘 개폐되는 것을 알았다. 또한 출력변조의 세기를 인가 전계의 세기를 변화시켜 측정하여 이론곡선과 비교해서 약 5%의 오차를 얻었다.

결과적으로 아직 해결되어야 할 문제는 많이 있지만 비교적 만족스러운 광변조기를 얻었다.

ABSTRACT

In this paper, theoretical and experimental study about the light modulation at X-band(9375 MHz) micro wave, using the linear electro-optic effect, has been described. The electro-optic crystal, KDP (potassium dihydrogen phosphate) is used for modulator crystals which is composed resonated modulator.

Output performances of modulated wave through movable short positions are presented. It was critically respond from $\lambda_g/2$. And the output modulated intensity was compared with theoretical curve.

Consequently, in spite of many problems remain yet, most promising and more successful modulator configurations are completely given.

I. 서 언

Pockel은 광결정체의 광축(光軸)과 평행하게 전계를 인가하여 결정체의 굴절율(屈折率)의 변화로부터 선형전기광효과(pockel 효과)를 설명했다.⁽¹⁾

광변조에 pockel 효과를 이용하면 Kerr 효과를 이용할 경우와 같이 고속광혼합과 위상지연에 의한 진폭변조를 얻을 수 있다.⁽²⁾⁽³⁾

전기광 결정체는 인가전계가 없을 때는 단축(單軸)이지만 z축(광축)과 평행으로 전계를 인가하면 결정체는 양축(兩軸)으로 변하여 xyz축 성분은 $x'y'z'$ 인 지수 타원체(index ellipsoid)로 바뀌는 이중굴절(二重屈折)을 이룬다. 결정체에 전계를 가하면 굴절율 n 은 다음과 같이 변하는 것으로 생각할 수 있다.

* 연세대학교 전자공학과
Dept. of Electronic Eng. Yonsei Univ.

** 경희대학교 전자공학과
Dept. of Electronics, Kyung Hee Univ

接受日字: 1970年 7月 10日

$$\frac{1}{n^2} = \frac{1}{n_0^2} + rE + RE^2 + \dots \quad (1)$$

여기서 n_0 는 인가전계가 없을 때의 굴절율이고 r 는 선형전기광계수, R 는 이차전기광계수이다. 이식의 계수들은 결정체의 응력과 상관없는 직접효과에 의한 것이다. 만일 결정체를 전계의 영향하에서 거시적 응력으로 취급한다면 굴절율은 전기광효과에 따라 변할 것이다.

본논문에서는 정방계사축결정체 (tetragonal scalenohedral crystal)인 KH_2PO_4 (KDP)와 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ADP)를 이용하여 공진형변조기를 설계 제작하고 9375 MHz의 마이크로파를 6328Å의 He-Ne 레이저광에 변조시켰다. 검파방식으로는 광증배관에 의한 광자방출형 직접검파방식을 응용하여 변조파형의 모양을 오시로스코프로 봤고 이론곡선과 비교하여 약 5%의 오차를 얻었다. 또한 광증배관 출력전압을 측정하여 변조도를 구했다.

II. 전기광 결정체

KH_2PO_4 와 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 는 가장 널리 알려진 전기광 결정체이다. 이들은 수용액으로부터 실온에서 성장되며 고온에서 성장된 결정체는 보통 응력이 없게된다. 이 결정체는 물에 쉽게 용해되고 깨어지기 쉬우며 따라서 절단, 연마가 쉽지만 흡습성이기 때문에 취급이 곤란하다. 이

결정체의 고유저항은 $10^{10}\Omega\text{-cm}$ 이다.

KDP와 ADP 결정체는 둘다 일반적으로 실온에서 사용되는 압전점군(piezo electric point group) 42m에 속한다.⁽⁴⁾

Curie 온도 T_c 이하에서는 KDP형 결정체는 강유전성이고 전이온도 T_i 이하에서는 ADP형 결정체는 반강유전성이다. Cure 온도 이하에서는 실험적으로 복잡하여 측정하기 곤란하다.

KH_2PO_4 내의, K, H, P, 원자는 결정구조를 변화시키지 않으면서 주기율표상의 대응되는 결핍의 원자로 대체할수있다. H를 중수로 D로 대체하면 유전성은 아주다른 성질로 변화를 이끈다.

부분적으로 중수소화된 KDP, $\text{KD}_{2x}\text{H}_{2(1-x)}\text{PO}_4$ 에서 Curie 온도는 근사적으로

$$T_c \approx (123 + 106x)^\circ\text{K} \quad (2)$$

으로 된다.

KDP-ADP 이종동형체의 전기광계수를 전기 및 광학적 성질에 따라 표로 만들면 표 1과 같다. 여기서 (T)로 표시한것은 일정왜력으로 측정된 값이고 (S)로 표시 한것은 고주파에서 일정응력으로 측정된 값이다. 소멸되지않는 γ_{mi} 계수는 단지 $\gamma_{41} = \gamma_{52}$ 와 γ_{63} 뿐이다. 0.633μ 에서 KDP 결정체의 광손실은 1/2 dB/m 이고 이것은 가장좋은 수정의 경우와 거의 같다.

표 1. KDP-ADP 형 결정체상수 (T_c 이상)

	T_c	γ_{63}	γ_{41}	n_3	n_1	ϵ_3	ϵ_1	$\tan\delta_3$	$\tan\delta_1$
KH_2PO_4	123	(T) -10.5	+8.6	1.47	1.51	(T) 21	42	(S)	4.5×10^{-3}
		(S) 9.7				(S) 21		7.5×10^{-1}	
KD_2PO_4	222	(T) 26.4	8.8	1.47	1.51	(T) 50	58	(S)	2.5×10^{-2}
		(S) 48				(S) 48		1.0×10^{-1}	
NH_3PO_4	148	(T) -8.5	24.5	1.48	1.53	(T) 15	58	(S)	7.0×10^{-3}
		(S) 5.5				(S) 14		6.1×10^{-3}	

※ 單位. $T_c: ^\circ\text{K}$, $\gamma_{mi}: 10^{-12}\text{m/volt}$, $\tan\delta$ (at 10^{10}Hz), n (at 0.546μ)

굴절율과 자의선흡수는 (이것은 산소이온에서 전자계수를 낸다). 모든 이종동형체에서 거의 같다. 이 결정체들은 0.2μ 과 같은 짧은 파장에 대하여도 투명하다. 적외선 흡수는 수소진동의 결정이고 이 주파수는 양자질량의 제곱근에 근사적으로 역비례한다. 저주파에서 중수소화염이 비

중수소화염의 경우보다 $\sqrt{2}$ 배 정도 크다.

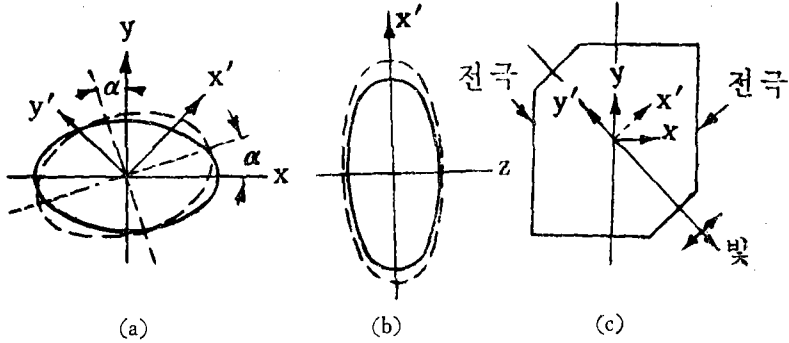
$$\left. \begin{aligned} \text{KDP} &= 1.55\mu \\ \text{ADP} &= 1.4\mu \\ \text{KD*P} &= 2.15\mu \end{aligned} \right\} \dots \quad (3)$$

$\gamma_{63}/(\epsilon_3 - 1)$ 의 크기는 모든 이종동형체에서 거의 같고 T_c 근처에서 ϵ_3 가 급격히 증가함에도 불

구하고 온도에는 상관없다. Curie 온도 근처에서 동작시키거나 ϵ_3 를 증가 하도록 실온에 가까운 T_c 를 갖는 이종동형체를 선택하므로 큰 γ_{63} 값과 낮은 변조전압을 얻을수 있을 것이다. 그러나 손실정점(loss tangent)도 역시 증가하므로 이런 방법은 응용에 그리 적당하지 못하다. 전기광결정체수 γ_{63} 는 KDP 및 ADP에 대한 투명영역내에

서 실제로 파장에 상관없다. KDP 결정체는 인가 전계가 없으면 단일축성이다. 즉 광선은 z 축에 평행 또는 수직으로 편광하고 굴절율 n_3 또는 n_1 을 갖이고 주파(主波)로서 진행한다.

그림 1에서 보는 바와 같이 전계 E_3 가 z 축으로 인가되면 주축은 z 축이되고 x' 과 y' 축은 x 와 y 축에



(a) x 방향으로 인가된 전계와 $z=0$ 단면
 (b) x 방향으로 인가된 전계와 $y'=0$ 단면
 (c) 결정체단면

그림 1. 電氣結晶體의 二重屈折

Fig. 1. Electro-optic crystal

45° 로 된다. z 축 편광에 대한 굴절율은 n_3 로 그대로 있지만 한편

$$n_{x'} \approx n_1 - \frac{1}{2} n_1^3 \gamma_{63} E_3 \dots\dots\dots (4)$$

$$n_{y'} \approx n_1 + \frac{1}{2} n_1^3 \gamma_{63} E_3 \dots\dots\dots (5)$$

이다. x' 또는 y' 을 따라 편광된 광선은 결정체 길이 L 를 통하여 진행되어 변조율이

$$\eta = \pi n_1^3 \gamma_{63} E_3 L / \lambda \dots\dots\dots (6)$$

인 위상변조를 낸다.

z 축으로 진행하고 x , 또는 y 축으로 초기적으로 편광된 광선은 위상지연 (phase retardation)을 낸다.

$$\delta = 2\eta \dots\dots\dots (7)$$

전압 $E_3 L$ 은 소위 반파전압이라고 불리우는 π (rad)의 지연을 요구한다.

$$V_{1/2} = \frac{\lambda}{2n_1^3 \gamma_{63}} \dots\dots\dots (8)$$

광역광개폐기 또는 진폭변조기에 대하여는 두 경우 모두 인가전계와 광통로가 z 축을 따른다.

자연적인 이중굴절 때문에 z 축 방향은 개방되고 각개구(角開口)는 두꺼운 샘플에 대하여 엄격히 제한된다. 개구를 증가시키는 방법은 B.H.Billings¹⁵에 의하여 설명됐다. 자연적 이중굴절은 잘 조준된 레이저 빔으로는 그리 문제되지 않는다. 광통로와 수직인 전계의 위상 또는 진폭변조는 (Kerr 효과) z 축으로 전계를 x' 축으로 편광을 y' 축을 광통로로 할수있다. 결정체의 응력이 적으면 진폭변조를 내는데 필요한 상대위상관계를 부분적으로 망친다. 정상적으로는 KDP형 결정체는 무응력이다. 그러나 비교적 적은 손실정점에도 불구하고 결정체는 변조전계에 의하여 그의 전체적이 가열되지만 단지 그 표면만이 냉각된다. 전열구배는 응력을 낸다.

이것은 결정체 내의 전력손실이 1(watt) 이상 될때 충분히 크고 결정체의 크기에 상관없으며 진폭변조를 무력하게 만든다. x 축으로 인가한 전계는 x 축으로 약간 indicatrix로 회전한다.

x 축을 따라 반축은 불변인채로 남고 다른 축

들은 $\gamma_{41}E_1$ 의 이차만큼 변한다.

굴절율의 일차적인 변화를 얻기 위해서는 광은 y 또는 z 축과 45° 인 y'' 또는 z'' 을 따라 yz -평면에 편광하여야 하고 각각 z'' 또는 y'' 방향으로 전파되어야 한다. indicatrix 의 $y''=0$ 부분은

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_3^2} \right) + \gamma_{41}E_1 \right] z''^2 = 1 \dots (9)$$

이고

z 편광의 변조도 (modulation index)는

$$\eta = 2\pi \sqrt{2} \left(\frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_3^2} \right)^{-\frac{3}{2}} \gamma_{41}E_1L/\lambda$$

$$\approx \pi n_1^3 \gamma_{41}E_1L/\lambda \dots \dots \dots (10)$$

이다.

ADP 결정체에서는 일정왜력에서 γ_{61} 이 크므로 x 축에 전계 E 가 인가되는 변조기가 가장 좋다. 그러나 일정응력인 때의 γ_{41} 은 아직 불확실하고 고주파에서 사용 가능여부도 불확실하다. Ley, J.M.⁽⁶⁾은 이 KDP와 ADP 결정체를 이용한 변조기의 여러가지 문제점들을 들어 설명하고 있다.

본 논문에 사용한 KDP 및 ADP 결정체의 광특성은 그림 2에 보인다. 여기서 보면 6328 Å의 광으로 변조 할때 KDP인 경우 광전파율은 약 90%, ADP인 경우 약 80% 정도이다.

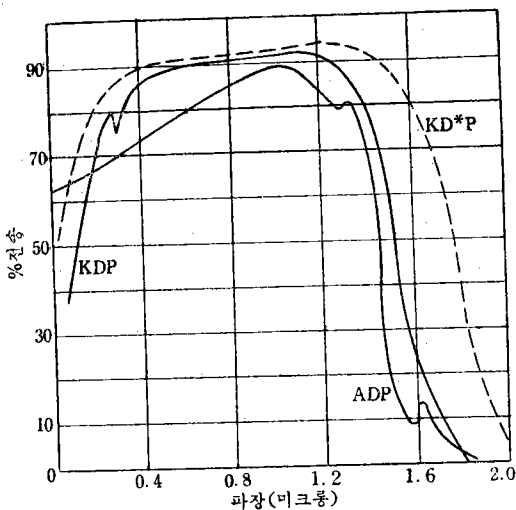


그림 2. 전기광결정체의 전파특성
Fig. 2. Transmitting Characteristics of Electro-optic Crystals

Ⅲ. 변조이론

전기광 결정체 변조기의 광축 (x -축)으로 광을 입사시키고 광과 평행하게 마이크로파 전계를 공급하면 z 축에서 이중굴절(Pockel효과)에 따라 위상지연이 일어난다. 이중굴절은 전술한 바와같이 결정체의 굴절율의 차와 같다.

$$n_1 = n_0 + \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{rp} E_z$$

$$n_2 = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{rp} E_z$$

$$n_3 = n_e$$

$$B_x = n_2 - n_3 = n_0 - n_e - \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{rp} E_z$$

$$B_y = n_1 - n_3 = n_0 - n_e + \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{rp} E_z$$

$$B_z = n_1 - n_2 = n_0^3 \gamma_{rp} E_z \dots \dots \dots (11)$$

여기서 n_1 은 x' 축(x 축으로부터 -45° 변위)의 굴절율, n_2 는 y' 축(y 축으로부터 -45° 변위), n_3 는 z' 축(z 축으로부터 -45° 변위)의 굴절율, n_0 는 전계 $E_z=0$ 인 때의 본래광선의 굴절율이고 n_e 는 특수굴절율이다. 또 γ_{rp} 는 전기광계수로 Pockel 상수 e_{ij} 와는 다음의 관계가 있다.

$$\gamma_{rp} = \frac{E_z - 1}{4\pi} e_{ij} \dots \dots \dots (12)$$

여기서 E_z 는 전계방향으로의 유전상수이다.

결정체의 길이가 L cm인 경우 결정체를 통한 지연은 다음과 같다.

$$\Gamma = \frac{B_z L}{\lambda} = \frac{n_0^3 \gamma_{rp} E L}{\lambda} \dots \dots \dots (13)$$

여기서 KDP 결정체를 쓰면 $\gamma_{rp} = \gamma_{63} = 10^{-9}$ (cm/volt) $n_0 = 1.51$. $V = EL$ 이다. 표(2)는 변조기로 사용한 결정체의 9.2GHz 마이크로파 전계내에서의 성질을 보인다.

표 2. 전기광 결정체의 중요한 성질

	KDP	ADP
전기광계수	10^{-9} cm/volt	0.4×10^{-9} cm/volt
굴절율($E_z=0$)	$n_0=1.51$	$n_0=1.53$
비유전상수(실온)	$\epsilon_r=22$	$\epsilon_r=14$
유전 Q	125	165
지연전압	7.5~11kv	9.6~14.5kv

결정체를 통한 위상지연 δ 는

$$\delta = 2\pi\Gamma = \frac{2\pi n_0^3 \gamma_{rp} V}{\lambda} \dots\dots\dots(14)$$

이다. 따라서 위상변조지수 η 는 다음과 같다.

$$\eta = \frac{\delta}{2} = \pi\Gamma = \frac{\pi n_0^3 \gamma_{rp} V}{\lambda} \dots\dots\dots(15)$$

여기서 반파지연전압 즉 π rad의 지연을 내는 전압은

$$V_0 = \frac{\lambda}{2n_0^3 \gamma_{rp}} \dots\dots\dots(16)$$

로 주어진다. (15)식에서 위상변이는 $\pi n_0^3 E L \gamma_{rp} / \lambda$ 이고 인가전계를 시간의 함수 $E = E_0 \sin(\omega_m t + \phi)$ 라고 가정한다. 결정체내에서의 광속도는 c/n 이므로 $z=0$ 에서 $t=t_0$ 시간에 광이 결정체의 z 축으로 입사한다고 하면

$$z = c/n(t - t_0) \dots\dots\dots(17)$$

로 된다. 만일 $\omega_m t_0$ 가 위상요소 ϕ 를 포함한다고 하면 결정체의 작은 조각 dz 에서의 미소위상변이 $d\eta$ 는

$$d\eta = (\pi n_0^3 E \gamma_{rp} / \lambda) \sin(\omega_m n_0 z / c + \phi) dz \dots\dots(18)$$

이다. 그러므로 균일한 결정체에 대한 고주파위상변이는 다음과 같이 주어진다.

$$\eta(z) = \int_0^z d\eta[\eta_m(z)/z] \int_0^z \sin(\omega_m n_0 z' / c + \phi) dz' \dots\dots(19)$$

이 위상변이는 크기가

$$|\eta(z)| = (2\pi n_0^3 \gamma_{rp} E_0 / \lambda k) \sin(kz/2) = |\eta_m(z)| \sin(kz/2) / (kz/2) \dots\dots\dots(20)$$

인 변주주파수로 발진한다. 여기서 $k = \omega_m n_0 / c$ 이다 결정체의 길이가 L 이고 변주주파수가 ω_m 인 경우 광의 결정체를 통하여 지나가는데 요하는 시간안에 변조계의 위상변화가 일어나는 전이각은 kL 로 정의한다.

그림 3은 전기 전기광 결정체 변조기에서 위상지연에 의한 진폭변조이다. 비변조광을 레이저로부터 변광기에 수직으로 입사시킨다. 여기에서 사용한 직교편광기와 해광기는 위상변조광을 진폭변조광으로 변환시키는데 필요하다. 변조전압을 결정체면에 공급하면 타원편광된 광이 결정체에서부터 나오므로 입사평면편광 광선은 결정체 내부로 각 다른 속도로 진행되는 두개의 상호직교인 성분으로 갈린다. 변조전압이 바뀔 때 따라 합성투원의 편심(偏心)이 변한다. 그러므로

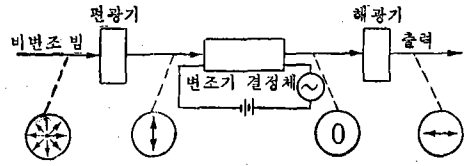
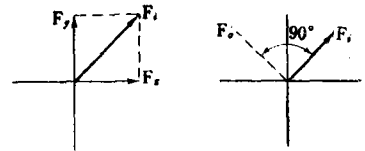


그림 3. 위상지연에 의한 변조도
Fig. 3. Diagram of phase retarded modulation



(a) 결정체내의 입력계 (b) 직교편광기를 사용하여 출력을 반파지연시킨것

그림 4. 입력계와 출력계
Fig. 4. input and output

해광기는 변조파형에 따라서 광의 변화를 통과시킨다.

입력파를 각각 그림 4에서 보이는 바와 같이 F_{xi}, F_{yi} 의 두 성분으로 생각할 수 있다.

$$F_{xi} = \frac{F_i}{\sqrt{2}} \sin(\omega t - \beta_x z) \dots\dots\dots(21)$$

$$F_{yi} = \frac{F_i}{\sqrt{2}} \sin(\omega t - \beta_y z) \dots\dots\dots(22)$$

로 표시 할수있다. 따라서 출력단에서의 출력계는 다음과 같다.

$$F_o = \frac{F_{x0} + F_{y0}}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots(23)$$

$z=z_0$ 인 경우의 x 와 y 축 성분을 F_{x0}, F_{y0} 라하고

$$F_{x0} = \frac{F_i}{\sqrt{2}} \sin(\omega t - \beta_x z_0) \dots\dots\dots(24)$$

$$F_{y0} = \frac{F_i}{\sqrt{2}} \sin(\omega t - \beta_y z_0) \dots\dots\dots(25)$$

이므로 결정체내에서의 전파손실이 없다고 가정하면 출력은 다음과 같다.

$$F_o = \frac{F_i}{2} [\sin(\omega t - \beta_x z_0) + \sin(\omega t - \beta_y z_0)] \dots\dots(26)$$

여기서 β_x, β_y 는 굴절율의 차이에 따라 생기는

위상지연이다. (26)식은 입력편광기와 같은 각도의 해광기를 사용한 경우이다. 그러나 만일 해광기를 90°회전하면 직교편광기의 경우가 되고 최대출력은 한 성분의 지연이 일어날 때 즉 F_x 가 입력으로부터 출력까지의 반파와 같으면 얻어진다. 그림(4-b)는 이것을 설명한 것이다. 그러면

$$F_0 = \frac{F_i}{2} [-\sin(\omega t - \beta_x z_0) + \sin(\omega t - \beta_y z_0)] \quad (27)$$

으로 된다. 만일 $\beta_x z_0 = \theta + \frac{\delta}{2}$, $\beta_y z_0 = \theta - \frac{\delta}{2}$ 이고 $t' = t - \frac{\theta}{\omega}$ 라고 하면

$$F_0 = \frac{F_i}{2} [-\sin(\omega t' - \frac{\delta}{2}) + \sin(\omega t' + \frac{\delta}{2})] \quad (28)$$

로되고 삼각함수를 정리하여 다음식을 얻는다.

$$F_0 = F_i \sin(\delta/2) \cos \omega t' \quad \dots\dots\dots (29)$$

세기는 계의 자승에 비례하므로 출력세기 I_0 는 (29)식에 의하여 다음과 같다.

$$I_0 = k F_0^2 = k F_i^2 \sin^2(\delta/2) \cos^2 \omega t' \quad \dots\dots (30)$$

또는

$$I_0 = I_i \sin^2(\delta/2) \cos^2 \omega t' \quad \dots\dots\dots (31)$$

$\cos^2 \omega t'$ 항이 나타난것은 대부분의 평균반전력에서 직교편광기의 밖에서 경합되는 때문이다. 그러므로 최대출력은 $I_i/2$ 로 주어진다.

일반적으로 전송손실을 고려하여 I 를 최대출력이라고 생각하면 출력세기 I_0 는

$$I_0 = I \sin^2(\delta/2) \quad \dots\dots\dots (32)$$

로 된다. 또 상대전파강도를 보면 (32)식으로부터

$$I_0/I = \sin^2(\delta/2) \quad \dots\dots\dots (33)$$

이다. 또 (15)식에 의하여

$$I_0/I = \sin^2 \eta = \sin^2 \left(\frac{\pi n_0^3 \gamma_{rp} V}{\lambda} \right) \quad \dots\dots (34)$$

또는

$$I_0/I = \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{V}{V_0} \right) \quad \dots\dots\dots (35)$$

로 된다. 여기서 V_0 는 100% 변조를 요하는 전압이고 V 는 순시전압이다.

IV. 변조기의 설계와 해석

캐비티내에 KDP 결정체를 넣어 공진하도록 하

기 위해서 우선 공진주파수를 마그네트론 2J42의 고정 발진주파수 9375 MHz로 결정하고 공진 모드를 TE₁₀₁ 모드로 선택한다. 그리고 마이크로파내에서의 KDP 결정체의 비유전율은 22로 하여 구하면 다음과 같다.

$$\omega_{mnp} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} \\ = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} \quad (36)$$

TE₁₀₁ 모드에서는 $m=p=1, n=0$ 이므로

$$\omega_{101} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{d}\right)^2} \\ = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{d}\right)^2} \quad \dots\dots\dots (37)$$

이다. (37)식을 파장의 식으로 표시하면

$$\lambda_0 = \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\frac{2}{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{d^2}}} \quad \dots\dots\dots (38)$$

이고 $a=d$ 로 취한다면

$$\lambda_0 = \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\frac{2}{\frac{2}{a^2}}} = \sqrt{2\epsilon_r} a \quad \dots\dots\dots (39)$$

이다. $\lambda_0 = 3.2\text{cm}$ 이므로 $a=d=0.490\text{cm}$ 로 되고 전이각을 $\frac{\pi}{2}$ 로하여 캐비티 길이 L 을 결정하면

$$L = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{c}{\omega_0 n_0} \quad \dots\dots\dots (40)$$

로된다. 따라서 $L=0.530\text{cm}$ 로 구해진다. 공진형 변조기의 설계도는 그림 5과 같다.

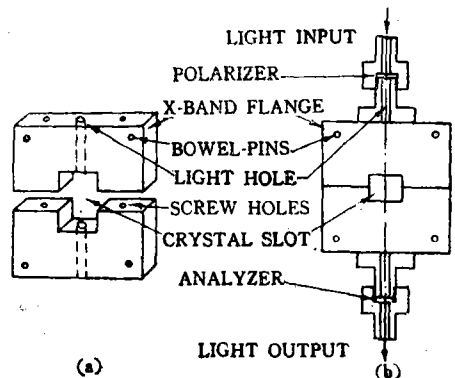


그림 5. 공진형 변조기
Fig. 5. resonated modulator.

그림 5의 변조기 캐비티내에 KDP 결정체를 가득 채워서 공진하게 하고 캐비티의 y축을 KDP 결정체의 광축에 일치하게 한다. 이 유전체로 채워진 캐비티 전자계의 일반식으로부터 y축방향의 전계는 다음과 같다.

$$E = \bar{y} E_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi z}{d} \sin \omega_m t \dots (41)$$

또 구형공진기 캐비티의 에너지 축적과 에너지 손실을 계산하면 다음과 같다. 이 전계에 축적되는 에너지 밀도는

$$W = \frac{1}{2} (\mu H^2 + \epsilon E^2) \dots (42)$$

이므로 전술한 바와 같이 전계내에 축적되는 에너지는

$$W = (U_E)_{\max} = \frac{\epsilon}{2} \int_0^d \int_0^a \int_0^a |E|^2 dx dy dz \dots (43)$$

로 된다. 고로

$$W = \frac{\epsilon a L d}{8} E_0^2 \dots (44)$$

다음에 캐비티 벽면에서의 전력손실을 근사적으로 구하면 이상도체내의 전류는 접선방향의 자계로부터 다음과 같이 구해진다. 각면의 전류는

$$\left. \begin{aligned} \text{윗면} : J_y = H_x |_{z=0} \\ \text{좌측} : J_y = -H_x |_{x=0} \\ \text{우측} : J_y = H_x |_{x=a} \\ \text{상면} : J_z = -H_x, J_z = H_x \\ \text{하면} : J_x = H_z, J_x = -H_x \end{aligned} \right\} \dots (45)$$

이고 도체벽의 표면고유저항을 R_s 라하면 위 전류들은 다음의 손실을 내게된다.

$$W_L = \frac{R_s}{2} \left\{ \int_0^L \int_0^a |H_x|^2_{z=0} dx dy + 2 \int_0^d \int_0^a \dots \right.$$

$$\left. |H_x|^2_{z=a} dy dz + \int_0^d \int_0^a [|H_x|^2 + |H_z|^2] dx dz \dots (46) \right.$$

자계의 x축성분과 z축성분을 대입하여 적분하면 다음을 얻을수 있다.

$$W_L = \frac{R_s \lambda_0^2}{8Z_0^2} E_0^2 \frac{L(a^3 + d^3) + ad(a^2 + d^2)}{2a^2 d^2} \dots (47)$$

$a=L=d$ 인 입방체라고 하면

$$W_L = \frac{5R_s \lambda_0^2}{16Z_0^2} E_0^2 \dots (48)$$

로된다.

캐비티 벽 이외의 손실 즉 결합개구의 저항손실, 공진기와 유전체 사이의 손실등은 실험적인 다른 불확정치와 비교하여 그리큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각할수 있다.

캐비티 Q는

$$Q = \frac{\omega_0 W}{P_{diss}} = Q_{die} \dots (49)$$

이다. 여기서 P_{diss} 는 전손실을 의미한다. 그러므로

$$Q = \frac{\omega_0 \frac{\epsilon a L d}{8} E_0^2}{P_{diss}} \dots (50)$$

이고 순시최대전계는

$$E_0 = (8Q_d P / \epsilon_r \epsilon_0 \omega_0 a L d)^{1/2} \dots (51)$$

이다. 그러면 결정체 중심을 지나는 순시최대전압은

$$V_0 = E_0 L = (8Q_d P L / \epsilon_r \epsilon_0 \omega_0 a d)^{1/2} \dots (52)$$

이다. 여기서 Q_d 는 유전체의 Q를 의미한다. $a=d$ 이므로

$$E_0 = (8Q_d P / \epsilon_r \epsilon_0 \omega_0 a^2 L)^{1/2} \dots (53)$$

$$V_0 = E_0 L = (8Q_d P L / \epsilon_r \epsilon_0 \omega_0 a^2)^{1/2} \dots (54)$$

로 된다.

V. 실험

(1) 실험장치의 구성

그림 6과 같이 실험장치를 구성했다. 광원으로 6328Å TEM₀₀ 단일 모드 CW He-Ne 레이저를 25Hz로 초핑하여 직교편광기의 수직편광기 앞에 놓고 변조기를 지나온 광신호는 해광기(수평편광기)로 결정체 이중굴절에 의한 변조파를 검출했다. 검파는 광증배관 1P28로 했으며 마이크로파로는 2J42 매그네트론 장치로부터 주파수 9375 MHz, 평균전력 3w~6w 최대전력 4kw~8kw 까지 변화하면서 측정했다.

(2) 변조파의 검파

사진1은 비변조파와 변조파를 보인다. 이때의 변조평균전력은 4W, 최대전력 5.4kW이고 매그네트론 동작전원인 사이라트론 평균전류는 40mA 이

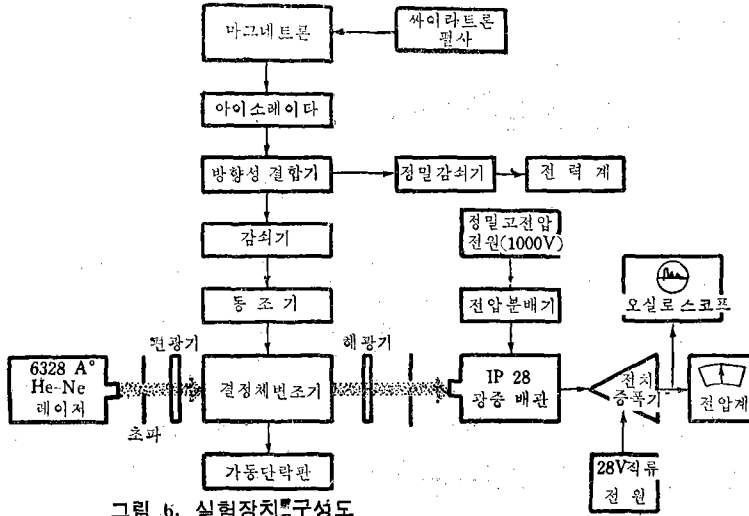


그림 6. 실험장치 구성도

Fig. 6. Block diagram of experimental apparatus.

다. 사진 1에서 변조파와 비변조파는 양쪽 모두 초파를 통하여 들어오는 레이저광이 순간적 (약 2.5msec) 들어 왔다가 살아지기 때문에 입력, 및 출력파도현상을 동반하고 있다.

변조파의 마이크로파 영향을 고찰하기 위하여 가동단락판(可動短絡板)을 최근점에서 최원점까지, 그리고 최원점에서 최근점까지 가변하면서 변조 개시, 폐종을 측정하면 표(3)과 같다.

마다 개시점과 폐종점이 분명히 나타나는 것을 알수 있다. 또한 폐종점에서 다음의 개시점까지의 거리는 1~2mm정도 간격을 갖는데 이것으로 마이크로파 정재파의 최소점이 결정체의 중심에서 1~2mm 정도만 변이되도 변조는 일어난다고 생각할수 있다.

(3) 전계변화의 영향

마이크로파 전계를 변화시키면서 변조파의 첨두전압을 측정하면 표(4)과 같다. 이때 마이크로파 평균전력을 0.5W 에서부터 4.5W 까지 변화시키고 싸이랏론 평균전류를 10mA에서 60 mA 까지 변화시킨다.

표(4)로부터 싸이랏론 평균전류대 변조첨두전압의 관계를 그리면 그림 7과 같다. 이 그림에서는 싸이랏론 평균전류가 변해도 전계의 평균전력이 일정하면 변조첨두전압을 얻을수 있음을 알수 있다.

표(4)로부터 매그네트론 정적동작인때 전계의 첨두전력을 구하고 또 이 첨두전력과 (52)식을 이용하여 결정체 중심전압을 구하면 표(5)를 얻는다.

표(5)로부터 결정체 중심전압대 측정평균전력의 관계를 그리면 그림 8과 같고 결정체 중심전압대 변조첨두전압의 관계곡선을 그리면 그림 9를 얻는다.

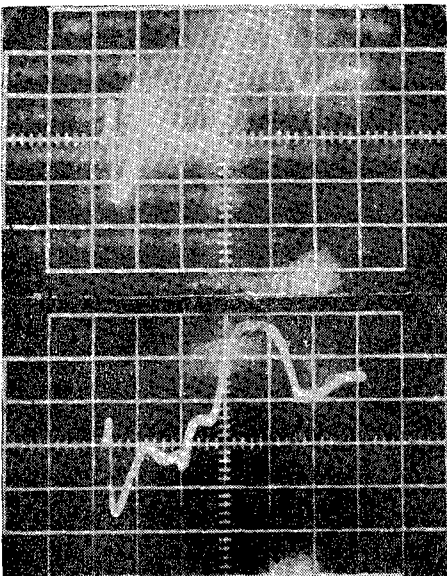


사진 1. 공진형변조기의 비변조파와 변조파
Photo 1. Unmodulated and modulated wave.

표(3)에서 보던 반파장 $\frac{\lambda g}{2} = \frac{4.47}{2} = 2.235$

표 3. 공진형 변조기의 단락효과

조건	개폐	첫번째폐중점	첫번째개시점	두번째폐중점	두번째개시점	폐중점간거리	개시점간거리
근점에서 원점으로		16.0	16.1	37.2	38.6	22.2	22.5
원점에서 근점으로		37.0	35.2	15.6	12.9	21.4	22.3

※ 단위 mm

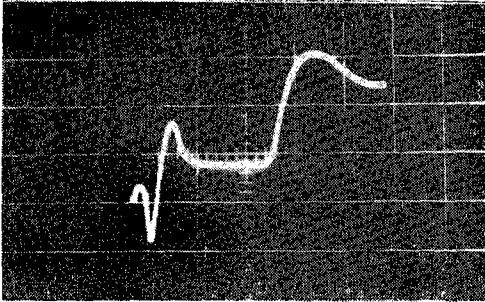


사진 2. 가동단락 15.0mm에서의 변조폐중
Photo 2. mod. finishing at movable short
15.0mm

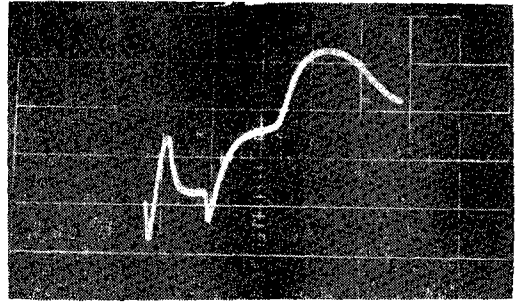


사진 3. 가동단락 16.1mm에서의 변조개시
Photo 3. mod. beginning at movable short
16.1 mm

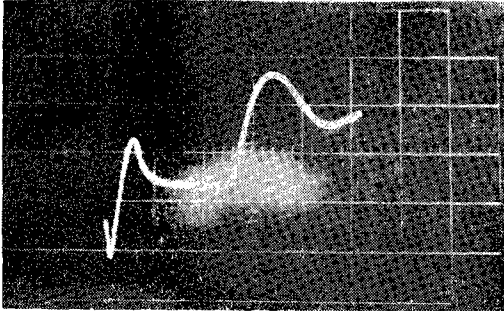


사진 4. 가동단락 37.2mm에서의 변조폐중
Photo 4. mod. finishing at movable short
37.2mm.

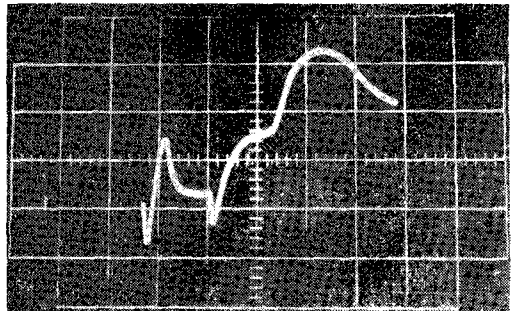


사진 5. 가동단락 38.6mm에서의 변조개시
Photo 5. mod. beginning at movable short
38.6mm.

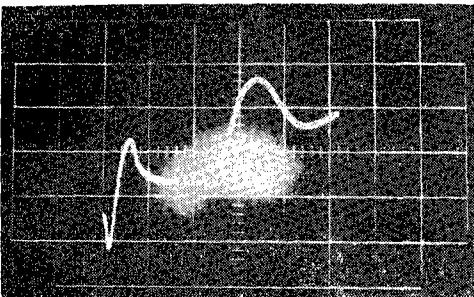


사진 6. 가동단락 37.0mm에서의 변조폐중
Photo 6. mod. finishing at movable short
37.0mm

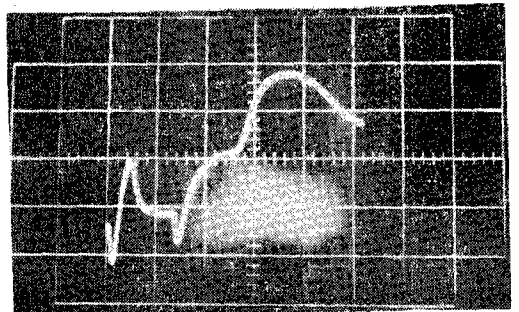


사진 7. 가동단락 35.2mm에서의 변조개시
Photo 7. mod. beginning at movable short
35.2mm.

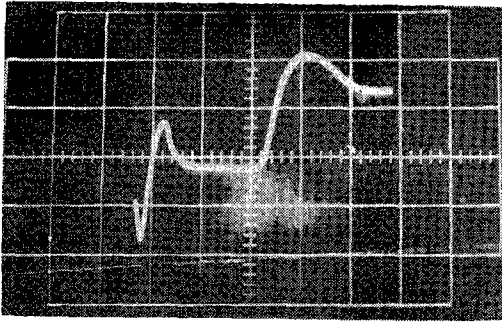


사진 8. 가동단락 15.6mm에서의 변조 패종
Photo 8. mod. finishing at movable short 15.6mm.

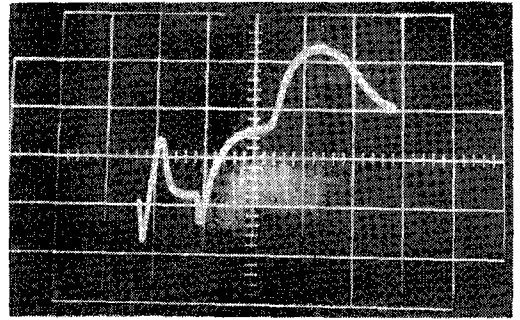


사진 9. 가동단락 12.9mm에서의 변조 개시
Photo 9. mod. beginning at movable short 12.9mm.

표 4 마이크로파 평균전력에 대한 변조 침두 전압

사이라트론전류	평균전력								
	0.5 (W)	1.0 (W)	1.5 (W)	2.0 (W)	2.5 (W)	3.0 (W)	3.5 (W)	4.0 (W)	4.5 (W)
10(mA)									3.8(V)
20(mA)							3.3(V)	3.6(V)	3.8(V)
30(mA)					2.3(V)	3.2(V)	3.3(V)	3.6(V)	3.8(V)
40(mA)			0.8(V)	1.5(V)	2.3(V)	3.2(V)	3.3(V)	3.6(V)	3.8(V)
50(mA)	0.16(V)	0.2(V)	0.8(V)	1.5(V)	2.3(V)	3.0(V)	3.3(V)	3.6(V)	3.8(V)
60(mA)	0.16(V)	0.2(V)	0.8(V)	1.5(V)	2.3(V)	3.0(V)	3.3(V)	3.6(V)	3.8(V)

표 5. 평균전력, 침두전력, 및 결정체 중심전압의 관계

평균 전력 (W)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
변조침두전압 (V)	0.16	0.2	0.8	1.5	2.3	3.2	3.3	3.6	3.8
침두 전력 (kW)	0.68	1.36	2.04	2.72	3.4	4.08	4.76	5.44	6.12
중심 전압 (kV)	3.7	5.2	6.4	7.4	8.2	9.0	9.8	10.4	11.0

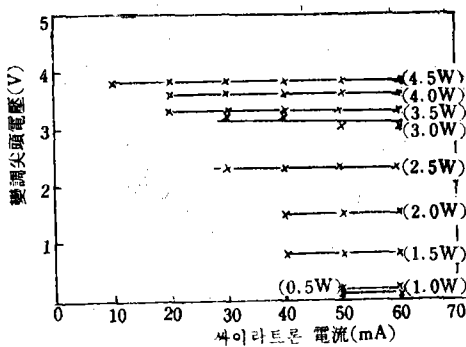


그림 7. 사이라트론 평균전류대 변조침두전압 곡선
Fig. 7. Thyratron average current v.s. mod. peak-to-peak voltage curve.

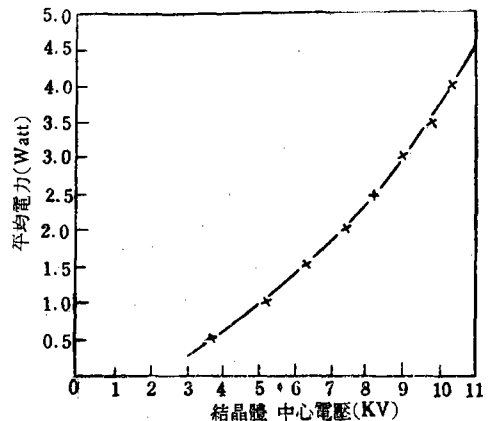


그림 8. 결정체 중심전압대 평균전력 곡선
Fig. 8. Crystal center voltage v.s. average power curve.

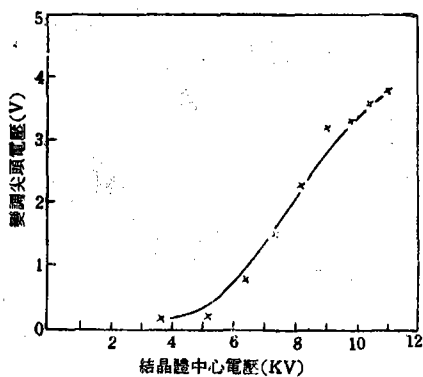


그림 9. 결정체 중심전압대 변조첨두전압 곡선
Fig. 9. Crystal center voltage vs. mod. peak-to-peak voltage curve.

VI. 결과고찰

변조전계의 세기와 출력과의 관계는 다음과 같이 정규화출력으로 보았다.

$$I_0/I = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{V}{V_0}\right) \dots\dots\dots(35)$$

여기서 V_0 는 100% 변조를 요하는 전압으로 전이각 $\frac{\pi}{2}$ -rad 일때 11kV이다. 순시전압을 1(kV)에서부터 11(kV)까지 변화하면서 이론출력을 구하고 결정체 중심전압대 정규화출력을 계산하면 표(6)과 같다. 이표를 이용하여 결정체 중심전압대 정규화출력을 그리면 그림 10과 같다.

표 6. 결정체 중심전압대 정규화이론출력

V(kV)	V/V ₀	$\theta^\circ \left(= \frac{\theta}{2} \cdot \frac{V}{V_0} \right)$	$\sin\theta \left(= \sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{V}{V_0} \right)$	$\sin^2\theta \left[= \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{V}{V_0} \right) \right]$
1	0.09	8.2°	0.142	0.020
2	0.18	16.3°	0.280	0.078
3	0.27	24.4°	0.412	0.170
4	0.36	32.5°	0.536	0.287
5	0.45	40.6°	0.652	0.425
6	0.54	48.7°	0.753	0.586
7	0.63	56.8°	0.834	0.694
8	0.72	64.9°	0.905	0.822
9	0.81	73.0°	0.956	0.920
10	0.90	81.2°	0.988	0.981
11	1.0	90.0°	1	1

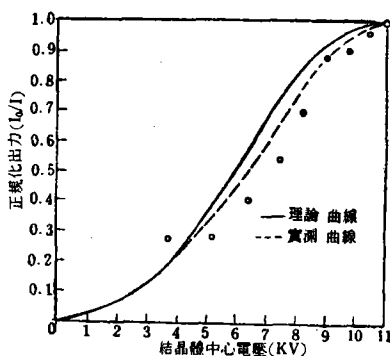


그림 10. 이론출력곡선과 실측곡선
Fig. 10. Theoretical and experimental plot.

그림 9에서 零점은 측정출력을 정규화하여 프롯트한 것이고 실선은 이론곡선, 점선은 실측곡선을 표시한다. 이론곡선과 실측곡선 사이에는 약 5% 정도의 오차가 있다. 오차의 원인으로서는 측정기기오차, 시차(視差), 측정방법의 가정 및 계산오차를 들수있다. 또 실측치를 정규화할때 11(kV)때의 변조첨두전압을 1.0으로 맞추었기 때문에 전체적인 변이가 있는 것으로 볼수있다.

광증배관이 검파하는 파에는 대기광 초과에 의한 반사광, 수직방향으로 부터의 이탈에 의한 반사, 측정오차, 그리고 광증배관내부의 산사잡음등의 영향을 고려해야 할것이다. 또한 그 이외의 모든 불확정분도 고려해야 한다.

VII. 결론(結論)

X대역(9375 MHz)의 마이크로파 전계로 변조 전압을 전기광결정체에 인가하면 타원편광된 광이 나와 입사평면편광 광선은 결정체내부로 각기 다른 속도를 가지고 진행해가는 두개의 상호 직교 성분으로 갈라진다. 직교편광기를 사용하여 검파하면 변조파형에 따라서 광의 변화를 통과시키게 된다. 즉 위상지연에 의한 위상변조를 진폭변조로 바꿔 검파가 가능하다.

변조기의 전계파로 부터 전계의 최대에너지를 구하고 개구도체벽에 의한 손실과 유전체 Q 를 계산하여 결정체중심에 걸리는 순시최대전계와 순시최대전압을 각각 구했다. 이 전압과 전계로부터 반파지연전압을 구해보면 실험결과와 잘 일치하는것을 알았다.

변조기에서 마이크로파 TE_{101} 모드가 공진하도록 설계되었으며 광파와 전계가 강하게 상호 작용하여 변조결합이 아주 좋았다.

광전검파는 자승검파로 취급하여 $e_0 = ae_i^2$ 인 이

상검파기로 했다. 따라서 출력신호와 출력잡음 전압은 입력신호와 입력신호잡음전압의 자승에 비례한다.

본 논문에서는 X대역 마이크로파의 광변조를 확인하고 근사적인 방법으로 결정체중심전압과 변조출력침투전압과의 관계 곡선을 이론치와 실측치로 비교했는데 실측치는 약 5% 정도의 오차를 냈고 비교적 만족스러운 결과를 얻었다.

<참고문헌>

1. Pockels, F.: Gött. Nach. (1895)
2. Holshouser, D.F., et al.: J. opt. soc. Am. 51. 12 (1951)
3. Froome, K.D. et al.: J. Sci. Instr. 38. 12 (1961)
4. Marson, W.P.: Phys Rev. 69. 3 (1946)
5. Billings, B.H.: J. opt. soc. Am. 39. 10 (1949)
6. Ley, J.M.: Electronics lett. Vol.2. Jan (1966)
7. Kaminow, I.P.: Phys. Rev. 129. 4 (1963)
8. Ross, M.: Laser Receivers John-Wiley. (1966)
9. O'B Carpenter., R.: J. opt. soc. Am. 40.4 (1950)