

XH₂PO₄ 形結晶のカー効果による 瞬間シャッター

古 屋 直 臣
中 村 軍 栄

High Speed Shutter By Kerr-effect of XH₂PO₄ Type Crystal

Naoomi FURUYA and Gunei NAKAMURA

Synopsis

A XH₂PO₄ type crystal such as Ammonium Dihydrogen Phosphate or Kalium Dihydrogen Phosphate belongs to the tetragonal system monaxial scalenohedral class, when electric field is applied to the direction of Z axis of it, these crystals change to the biaxial ones by a Kerr-effect. We study for the high speed shutter of ADP or KDP z-cut crystals by the Kerr-effect, in which consists of the crystal plate between the NESA glass electrodes, two polarisers and mounting to the camera body.

In case of the operation of this shutter, very sharp wave form of peak voltage 5 kV and pulse width 10⁻⁶ sec. from the pulse generator output is put across the electrodes of its crystal. A light pass through the crystal for the instant that the voltage is applied, so that the shutter speed is 10⁻⁶ sec. We used this shutter to take a photograph for the several points after the lighting of the luminosity of photographic flash lamp, and found that the luminosity curve of the flash lamp coincides with the standard curve of that lamp, and then the former exceeded to the latter for the electro-optical shutter effect in comparison with the KDP and ADP crystal shutter.

1 緒 言

第一燐酸アンモン (Ammonium Dihydrogen Phosphate, ADP; NH₄H₂PO₄), 第一燐酸カリ (Kalium Dihydrogen Phosphate, KDP; KH₂PO₄) などの XH₂PO₄ 形正方晶系単軸結晶 (V_d) に z 軸方向の電界をかけると, Kerr 効果によって双軸結晶となる。

これらの結晶のパルス電圧による効果は 10⁻¹⁰ sec. くらいまで応答することが確かめられている。

本研究においては, ADP および KDP 結晶⁽¹⁾の z-cut 板を用い, NESA ガラス面上に銀をもって格子状にコーティングしたものを電極として結晶片に接合し, これらをカメラ装置の所定の位置に設定し⁽²⁾, さきに試作開発したパルスジェネレータ^{(3)~(5)}と組合わせて, 1 × 10⁻⁶ sec. の高速度写真装置を構成させ,

これら一連の装置に対する使用限界の一つの目安を与えるために, 撮影対象として, 写真用閃光電球の発光現象を選び撮影を行ない, 一応成功したのでここに発表する次第である。

2 結晶の電気光学効果

結晶の光学的性質は, Fresnel の屈折率楕円体で説明できる⁽⁶⁾。一般に, この楕円体は座標軸 x, y, z をそれぞれ, 結晶軸と一致してとれば, 次の式で示される。

$$a^2x^2 + b^2y^2 + c^2z^2 = 1 \quad (1)$$

ここで, $a=1/n_x$, $b=1/n_y$, $c=1/n_z$, n_x, n_y, n_z :

三軸方向の屈折率

そこで, 結晶に電界を加えると屈折率楕円体が回転し

て、軸方向とその長さが変わる。このとき楕円体の主軸は結晶の三軸の方向と一致しなくなるので、結晶の三軸について楕円体の方程式は次のごとくなる。

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{23}yz + 2a_{31}zx + 2a_{12}xy = 1 \quad (2)$$

ここに、 a_{11} , a_{22} , a_{33} ……分極定数

この現象は Pockels によって始めて、しらべられ、結晶内の電気光学効果といわれるものである。

電界を加える前の座標軸 x , y , z と、電界を加えたために、楕円体が回転したのちの楕円体主軸の方向に対する新座標軸 x' , y' , z' との間には、方向余弦として次の関係が成りたつ。

$$\begin{array}{c|ccc} & x' & y' & z' \\ \hline x & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ y & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ z & \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \end{array} \quad (3)$$

また、この場合、分極定数は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} a_{11} - a_0^2 &= r_{11}E_x + r_{12}E_y + r_{13}E_z \\ a_{22} - b_0^2 &= r_{21}E_x + r_{22}E_y + r_{23}E_z \\ a_{33} - c_0^2 &= r_{31}E_x + r_{32}E_y + r_{33}E_z \\ a_{23} &= r_{41}E_x + r_{42}E_y + r_{43}E_z \\ a_{31} &= r_{51}E_x + r_{52}E_y + r_{53}E_z \\ a_{12} &= r_{61}E_x + r_{62}E_y + r_{63}E_z \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 r_{ij} : 電気光学定数

E_x , E_y , E_z : x , y , z 軸方向の電界

(4)式をマトリックスで表わすと、次のように簡単になる。

$$\begin{pmatrix} a_{11}(x^2) \\ a_{22}(y^2) \\ a_{33}(z^2) \\ a_{23}(yz) \\ a_{31}(zx) \\ a_{12}(xy) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x(x) \\ E_y(y) \\ E_z(z) \end{pmatrix} \quad (5)$$

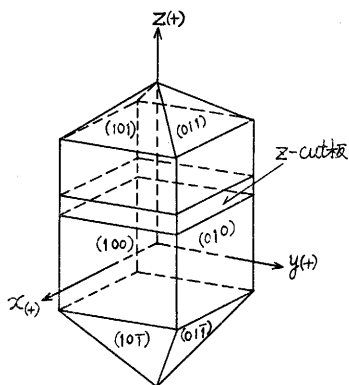


Fig. 1 XH_2PO_4 type crystal form.

ADP や KDP のとき正方晶系偏三角面体属 S_6 , A_2 (tetragonal scalenohedral class, V_d) の結晶は図 1 に示す結晶形態をもち、 x , y 軸方向の屈折率は等しく、 z 軸方向のそれは異なる。そして、これらの結晶は電界を加えないときは単軸結晶であるから、屈折率楕円体は次のようになる。

$$o^2(x^2 + y^2) + e^2z^2 = 1 \quad (6)$$

ここで、 o : 常光線に対する屈折率 n_o の逆数

e : 異常光線 n_e の逆数

次に、 XH_2PO_4 形結晶に電界を加えると、屈折率楕円体は回転し、軸の方向とその長さが変わるので双軸結晶となる。この場合、結晶内の屈折率楕円体の式は(7)式となる。

$$o^2(x^2 + y^2) + e^2z^2 + 2r_{41}(E_x \cdot yz + E_y \cdot zx) + 2r_{63} \cdot E_z \cdot xy = 1 \quad (7)$$

正方晶系に属するこれらの結晶の対称性から、(5)式は次のように簡単になる。

$$\begin{pmatrix} a_{11}(x^2) \\ a_{22}(y^2) \\ a_{33}(z^2) \\ a_{23}(yz) \\ a_{31}(zx) \\ a_{12}(xy) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x(x) \\ E_y(y) \\ E_z(z) \end{pmatrix} \quad (8)$$

それゆえ、 a_{ij} は (7), (8) 両式から次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= a_{22} = o^2 \\ a_{33} &= e^2 \\ a_{23} &= r_{41} \cdot E_x \\ a_{31} &= r_{41} \cdot E_y \\ a_{12} &= r_{63} \cdot E_z \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

表(1)に ADP および KDP 結晶の電気光学定数と屈折率の値を示す。

表 1 電気光学定数, 屈折率

結 晶	結晶系	$r_{ij}(10^{-10}\text{cm/V})$	屈 折 率		
			n_x	n_y	n_z
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (ADP)	V_d	$r_{41}=21,$ $r_{63}=-8.3$	1.5246		1.4792
KH_2PO_4 (KDP)	V_d	$r_{41}=8.7,$ $r_{63}=-10.7$	1.5095		1.4684
KD_2PO_4 (KDdP)	V_d	$r_{63}=-23$			

3 Z-cut 板の電気光学効果

XH_2PO_4 形結晶の z -cut 板について、 z 軸方向に電界 E_z を加え、これと同じ方向から光を当ててやる場合を考えてみると、 $E_x=E_y=0$ であるから、(7)式は

$$o^2(x^2+y^2)+e^2z^2+2r_{63} \cdot E_z \cdot xy=1 \quad (10)$$

となる。そして、この場合の屈折率楕円体の主軸の回転角 ϕ は、 xy 面内において $\pm 45^\circ$ で、電界の強さには無関係であるが、楕円の長軸の長さは印加電圧によって変わる。

回転後の新しい屈折率の逆数 a, b, c を求めるために、(2)と(3)の両式から分極定数に関係づけて表わすと(11)式ようになる。

$$\left. \begin{aligned} a^2 &= a_{11}\alpha_1^2 + a_{22}\alpha_2^2 + a_{33}\alpha_3^2 + 2a_{23}\alpha_2\alpha_3 \\ &\quad + 2a_{31}\alpha_3\alpha_1 + 2a_{12}\alpha_1\alpha_2 \\ b^2 &= a_{11}\beta_1^2 + a_{22}\beta_2^2 + a_{33}\beta_3^2 + 2a_{23}\beta_2\beta_3 \\ &\quad + 2a_{31}\beta_3\beta_1 + 2a_{12}\beta_1\beta_2 \\ c^2 &= a_{11}\gamma_1^2 + a_{22}\gamma_2^2 + a_{33}\gamma_3^2 + 2a_{23}\gamma_2\gamma_3 \\ &\quad + 2a_{31}\gamma_3\gamma_1 + 2a_{12}\gamma_1\gamma_2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

楕円体の回転は xy 面内で生じ、その角度を ϕ とすれば、新旧座標軸間には(12)式の関係があるので、

$$\begin{array}{c|ccc} & x' & y' & z' \\ \hline x & \alpha_1 = \cos\phi & \alpha_2 = \sin\phi & 0 \\ y & \beta_1 = -\sin\phi & \beta_2 = \cos\phi & 0 \\ z & 0 & 0 & 1 \end{array} \quad (12)$$

この関係を用いて

$$\left. \begin{aligned} a^2 &= a_{11}\cos^2\phi + a_{22}\sin^2\phi + 2a_{12}\sin\phi \cdot \cos\phi \\ &= o^2\cos^2\phi + o^2\sin^2\phi + 2r_{63}E_z\sin\phi \cdot \cos\phi \\ b^2 &= a_{11}\sin^2\phi + a_{22}\cos^2\phi - 2a_{12}\sin\phi \cdot \cos\phi \\ &= o^2\sin^2\phi + o^2\cos^2\phi - 2r_{63}E_z\sin\phi \cdot \cos\phi \\ c^2 &= a_{33} = e^2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$\phi = -45^\circ$ であるから

$$\left. \begin{aligned} a^2 &= o^2 - r_{63} \cdot E_z \\ b^2 &= o^2 + r_{63} \cdot E_z \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

また、これを書き直せば

$$a^2 = \frac{1}{n_1^2}, \quad b^2 = \frac{1}{n_2^2} \quad (15)$$

で与えられ、これらの屈折率 n_1, n_2 は

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= n_0 + \frac{1}{2}r_{63} \cdot n_0^3 \cdot E_z \\ n_2 &= n_0 - \frac{1}{2}r_{63} \cdot n_0^3 \cdot E_z \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

電界は z 軸方向のみであるから、結晶片の厚みを d 、印加電圧を V とすれば、 $E_z = V/d$ となり、結晶板に垂直な方向に進む z 平面偏光の間の位相差 δ は

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right) d = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 - n_2) d \quad (17)$$

(17)式に(16)式を代入して

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} r_{63} \cdot E_z \cdot d \cdot n_0^3 = \frac{2\pi}{\lambda} r_{63} \cdot V \cdot n_0^3 \quad (18)$$

(18)式からわかるように、ある厚みをもった z -cut 板においては、これに垂直方向の偏光の位相差は印加電圧に比例する。

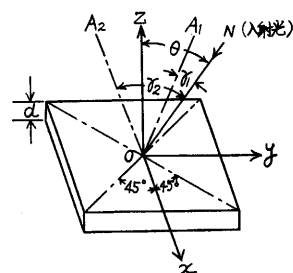


Fig. 2 Sketch showing that the angles between an oblique ray and optic axis when the electric field E_z is applied.

次に、図2のように、 z 板にその垂直方向から θ の角度をもって光が入射する場合を考えると、電圧が加わっていないときは、結晶は単軸(z)であるから、その位相差は

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \frac{n_0^2 - n_e^2}{2n_0 n_e^2} \sin^2\theta \quad (19)$$

で与えられる。

電圧が加えられると双軸(A_1, A_2)となり、入射光と光軸の間の角を γ_1, γ_2 とすれば次式のようになる。

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \frac{n_0 - n_e}{\cos\theta} \sin\gamma_1 \cdot \sin\gamma_2 \quad (20)$$

また、電圧が加えられた場合でも、偏光の入射面と xz 面との角 ϕ が 45° か 135° の場合には、比較的簡単な形で表わせる。これらの各場合について、表2にその計算式を示す。

表2 z -cut 板に対する位相差 (δ)

電界	光の入射角	計 算 式
$E_z = 0$	$\theta = 0$	$\delta = 0$
	$\theta \neq 0$	$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \frac{n_0^2 - n_e^2}{2n_0 n_e^2} \sin^2\theta$
$E_z \neq 0$	$\theta = 0$	$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \cdot r_{63} \cdot E_z \cdot d$ $= \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \cdot r_{63} \cdot V$
	$\phi = 45^\circ$	$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left(n_0^3 \cdot r_{63} \cdot V \right.$ $\left. + \frac{n_0^2 - n_e^2}{2n_0 \cdot n_e^2} \cdot d \cdot \sin^2\theta \right)$
	$\phi = 135^\circ$	$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left(n_0^3 \cdot r_{63} \cdot V \right.$ $\left. - \frac{n_0^2 - n_e^2}{2n_0 \cdot n_e^2} \cdot d \cdot \sin^2\theta \right)$

結晶に電界を加えない場合、 $\theta \neq 0$ のときは表2から明らかなように、漏れの明るさ δ は結晶の厚み d に比例して増加するとともに、波長 λ に反比例する。

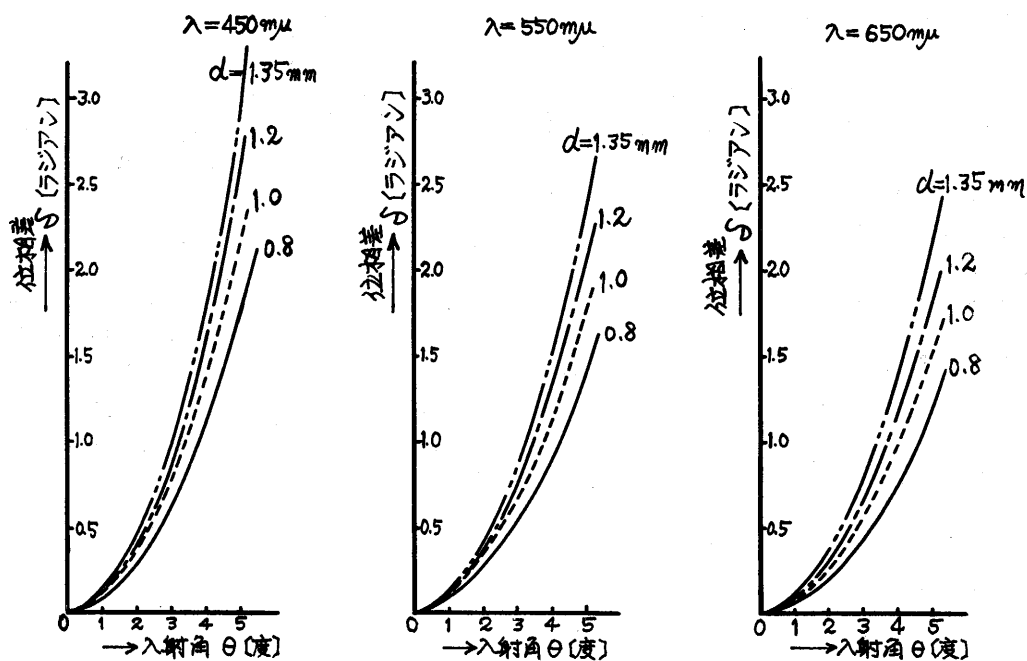
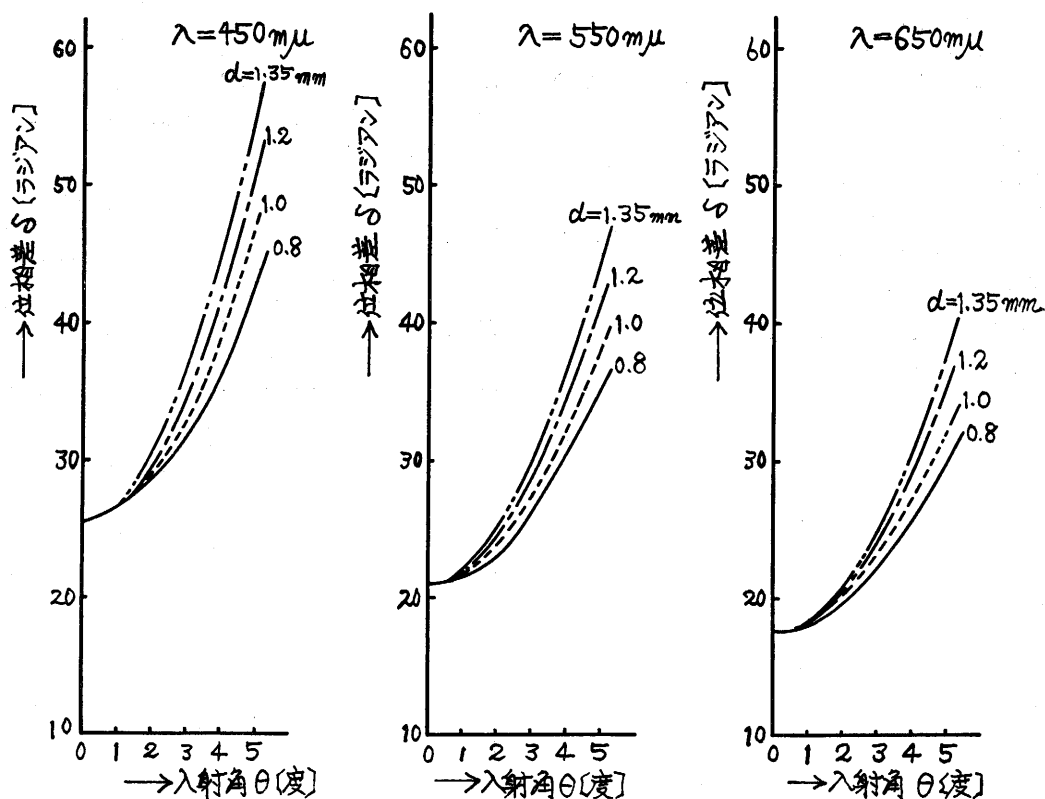


Fig. 3 Relation between the angle of incidence and the phase difference.

Fig. 4 Relation between the angle of incidence and the phase difference when the 10 kV high frequency voltage E_z is applied.

ADP 結晶について、結晶の厚みをパラメータとし、各波長について、 δ と θ との関係を示したものの 1 例が図 3 である。

また、1 例として、10 kV の高周波電圧を加えたとき、 $\phi=45^\circ$ の場合、 δ と θ との関係を図 4 に示す。

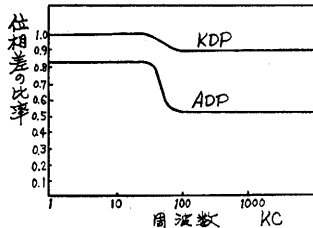


Fig. 5 Characteristics of the phase difference of a z-cut plate for the frequency of applied voltage.

図 5 は ADP および KDP 結晶に交番電圧を加えた場合に生ずる位相差 δ を印加電圧の周波数に対して示したものである。印加電圧の周波数が結晶板の共振周波数より低い場合には、結晶は自由な状態にあるものと考えられ、また、共振周波数より高い周波数においては、結晶はクランプ状態にあるものとみなされる。

そこで、結晶の電気光学効果は、電界による直接効果と、その電界によって結晶内に生ずる変形に基づく効果との和と考えられ、いま、自由状態にある結晶の電気光学定数を r_{63} 、クランプ状態にある結晶のそれを r'_{63} とすれば、次の関係がある。

$$r_{63} = r'_{63} + p_{66} \cdot d_{36} \quad (21)$$

ここで、 p_{66} : 光弾性定数

d_{36} : 圧電定数

それゆえ、共振周波数より高い周波数の電界では、結晶がクランプ状態となるために、(21)式の右边第 2 項が 0 となるためと考えられる。 r_{63} と r'_{63} の関係を求めると、ADP では $r'_{63} = 0.62 r_{63}$ 、KDP では $r'_{63} = 0.89 r_{63}$ となり、かつまた、KDP の r_{63} は ADP のそれよりも大きいので、KDP の r'_{63} は ADP のそれのほぼ 2 倍弱大きい。

したがって、 10^{-6} sec. 程度の瞬間シャッター素子としては、KDP の方が ADP より有利である。このことは本実験結果からも確かめられている。表 2 から、波長 $\lambda = 550 m\mu$ の光が z-cut 板を通過する際に $1/2$ 波長の位相差を生ぜしめるに必要な印加電圧の値を計算し、これらが表 3 に示してある。

一方、入射光が z 軸に平行な場合は、シャッターを開いたときの通過光の明るさは、 $\theta = 0$ における位相差によって大凡の値が与えられる。このときは δ は印

表 3 ADP, KDP の高周波電気光学定数と $1/2$ 波長の位相差に要する印加電圧

結晶	r_{63} (10^{-10} cm/V)	r'_{63} (10^{-10} cm/V)	$\lambda = 550 m\mu$ の光に $1/2$ 波長の位相差を得る電圧 (kV)	
ADP	-8.3	-5.2	9.1	14.9
KDP	-10.7	-9.5	7.5	8.4

加電圧に比例するので、ある程度の明るさを得るにはそれに対応するだけの電圧を加えてやる必要がある。それがためには結晶の耐圧上、結晶の厚みを大きくしなければならない。また、カメラのある開きに対して、漏れを少なくするためには、結晶の厚みを薄くする必要がある。これら相反する条件を満足するためには、耐圧上許し得る範囲で結晶を薄くすればよい。

偏光の入射面が 45° または 135° の方向にあり、電界を加えたときの位相差は、表 2 のように、電界を加えた場合、垂直入射光による位相差と、電界のない場合の斜入光によって生ずる位相差との和または差の形で与えられる。 $E_z = 0$ において、斜入光の位相差は入射角 θ が増すとともに増大するので、 $E_z \neq 0$, $\theta \neq 0$, $\phi = 45^\circ$ の場合、 δ を表わす式の右边において、第 1 項と第 2 項の絶対値が等しく、符号が反対になる個所があり、それが光学軸に対応する入射光の方向である。すなわち、この方向から入射した光は結晶内において、光学軸の方向に進む。このような入射角を θ_0 とすると、その値は、ADP および KDP では $E_z = 10^5$ V/cm のときに、 $5.4^\circ \sim 7.5^\circ$ で、この値より大きい θ をもつ光の位相差については、漏れの明るさを与える $E_z = 0$ の場合の位相差の値が大ききいてくるので、電界を加えること、つまり、シャッターを開く効果が大きく現われてこない。したがって、 θ_0 より大きい入射角の光はいるような状態で、ADP や KDP をシャッターとして用いることは良策ではない。

4 XH₂PO₄ 形結晶シャッターの明るさ

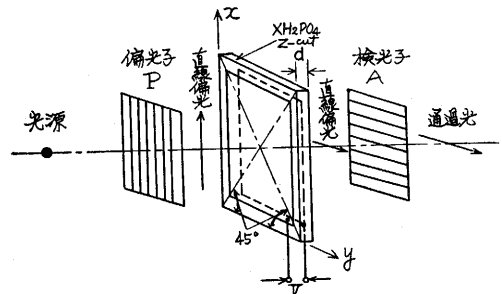


Fig. 6 Kerr-cell shutter by XH₂PO₄ type crystal.

ADPあるいはKDPを用いたシャッターでは、図6のように、結晶の x 、 y 軸方向がそれぞれ、偏光子 P および検光子 A の方向におかれ、電圧が印加されないときは、 z 軸方向に光学軸をもつ単軸結晶であるので、結晶に垂直に入射する光に対しては、検光子からの通過光は0である。次に、結晶に電圧を加えると、図2のように、 z 軸に関して対称な、 A_1 、 A_2 の二つの光学軸をもつ双軸結晶となり、 A_1 、 A_2 の xy 面への投影は x 、 y 軸と 45° の方向となる。したがって、図のように P 、 A を配置しておけば、電圧印加時の通過光量は最大になる。この場合においても、偏光子 P に入射する光のうち垂直方向の成分のみが、これを通過するので、偏光子の偏光率を100%としても、 P を通過した直線偏光の明るさは入射光の $1/2$ となる。これが完全に検光子 A を通過するとしても、結晶内において光量の $1/2$ が損失になる。実際には、偏光子、結晶内部、電極、検光子中において、いくつかの光の損失があるので、 $\delta=\pi$ 、 $\phi=\pi/4$ としても、シャッターを通る光の明るさは、これに入射する光の $1/2$ 以下になる。

さらに、 XH_2PO_4 結晶においては、漏れを少なくするために、 $\delta=\pi$ を与える値より印加電圧は低くして使用するので、通過光量は前述の値より一層低下するものである。なお、偏光板にダイクロームを用いたので、これが偏光子並びに検光子として直交していても、多少の光がこれらを通過する。

5 実験結果

5-1 シャッター素子として z -cut板結晶の加工

ADPやKDP結晶は、水溶性の結晶で硬度が余り高くないので、加工には注意を要する。数度以上の温度差を急に与えると、結晶に亀裂が入るので、結晶の切断、研磨に当って留意しなければならない。

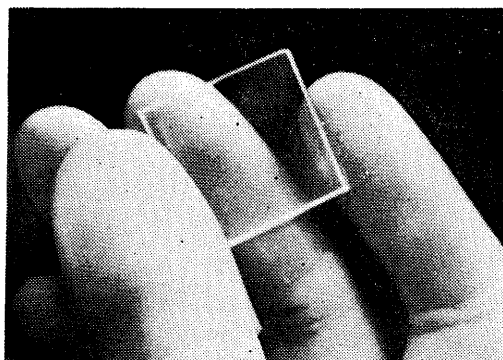
大きな単結晶から z -cut板を切断する方法としては、高速度で回転する円形銅板の表面を僅かに水でぬらしたものを、予め結晶表面に切断位置を針の先でだけきしておいた線に添って進めてやれば、2~3分にして所定の粗面板が得られる。

これを希望の寸法をもつ、透明な結晶片に仕上げるには高度の熟練を要する。まず、初めは紙やすりを用いて所定の寸法よりやや大きい程度に研磨する。すなわち、最初は150番程度の荒いもので減らし、所定値まで、あと0.5mm位になったら240番程度のものに移り、さらに、400番程度ですり、あと0.05mmのところまで止める。この操作の途中で、板上、中央部

と四隅の5点における厚みをマイクロメータで測り、 $1/100$ 以内に収めるよう均一にすって行かなければならない。

紙やすりだけでは十分な平面にならないので、平らなスリガラスの上にカーボランダム粉末をごく薄く敷いて、結晶を当て、力が一様に加わるように注意して廻しながら研磨する。この場合、カーボランダムに異物が混入しないように、また力が入りすぎないようにする。面全体が白くなれば、ほとんどは平面になったとみてよいから仕上に移る。

仕上は、まず、フランネルかシリコン布にカーボランダム粉を厚目に敷いて、結晶をこするようにして研磨すると、10~15分で半透明になるから、次いで、これらの布に酸化クロムを厚目に敷いて研磨すると、10~15分で写真1のように透明になる。



Phot. 1 Polished crystal.

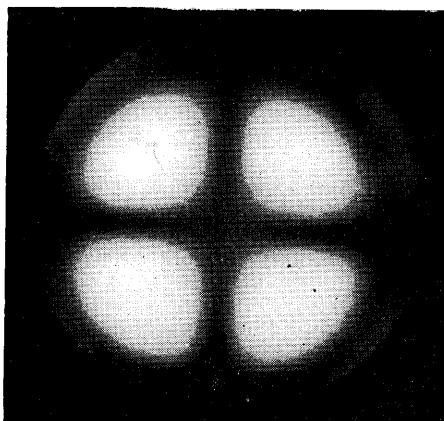
なお、結晶は湿気弱いから、指には必ずゴムサックをはめて作業しなければならない。

5-2 シャッター閉時における光の漏れの結晶厚みによる変化

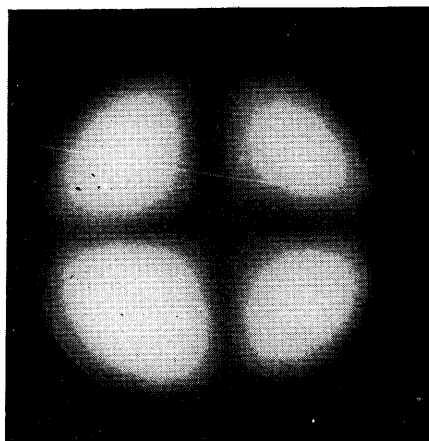
前述のごとく、結晶のカー効果による瞬間シャッターは、閉じている状態でも光の漏れがあり、その漏れ量は理論で述べたように、結晶の厚みが薄くなるほど少なくなる。そこで、これらの関係をADP結晶について実際に観察してみた。

写真2は、シャッターを閉じた状態、すなわち、偏光子と検光子を互いに直角におき、鏡筒直前に60W電球を置き、カメラを外して、代わりにスリガラスをあて、結晶の厚みをかえて光の漏れを写したものである。結晶の厚みが薄くなるにつれて、直交する暗部の幅が広くなり、光の漏れ量が減少することがわかる。

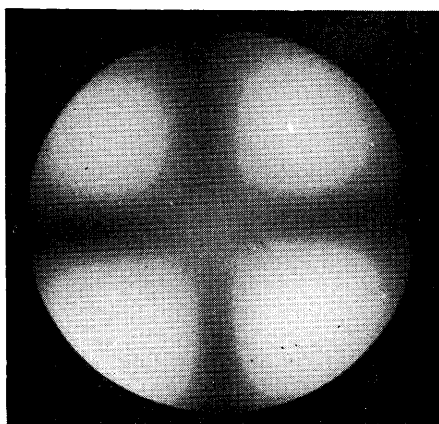
次に、写真3は、シャッターは閉じた状態でカメラを取付け、閃光電球を発光させ光の漏れる状態を種々の結晶厚みについて撮影したものである。



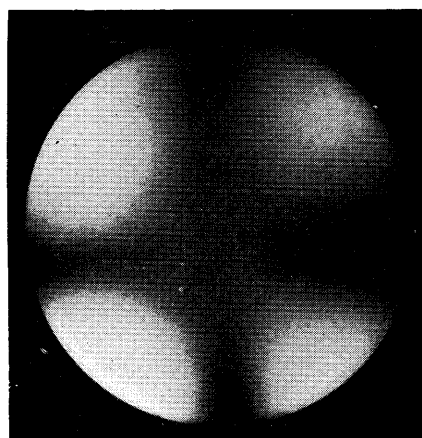
厚み 5.0 mm



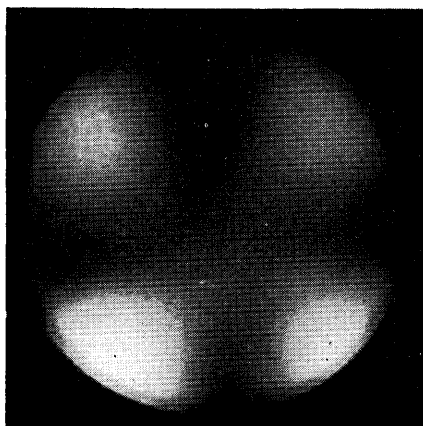
3.9 mm



2.0 mm



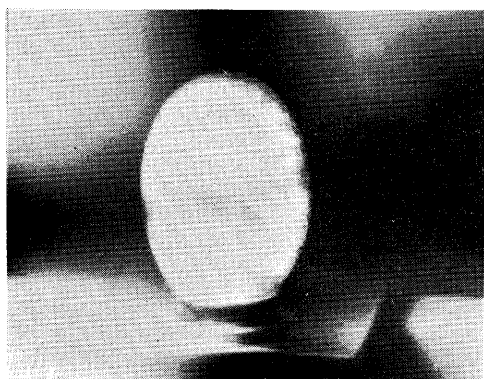
1.0 mm



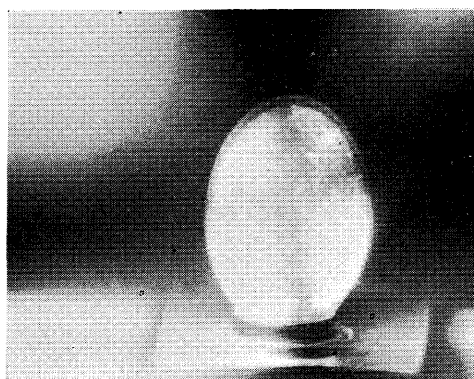
0.5 mm

Phot. 2

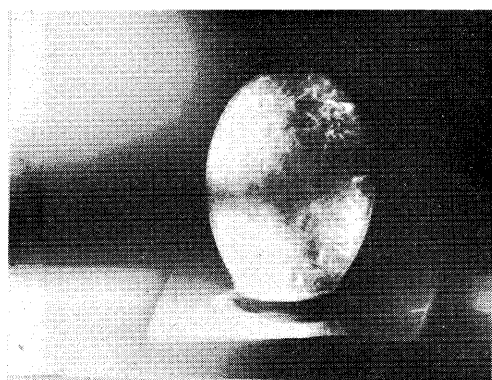
Leakage of light when shutter is closed
for variation of crystal thickness.



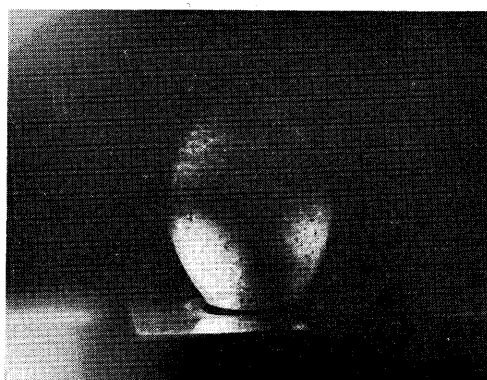
厚み 1.89 mm



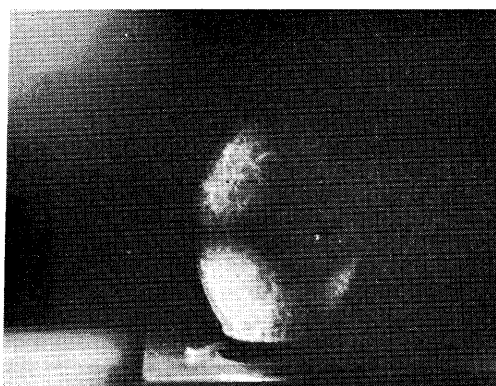
1.70 mm



1.35 mm



1.2 mm



1.0 mm

Phot. 3

Light leakage of flash lamp when shutter is closed for variation of crystal thickness.

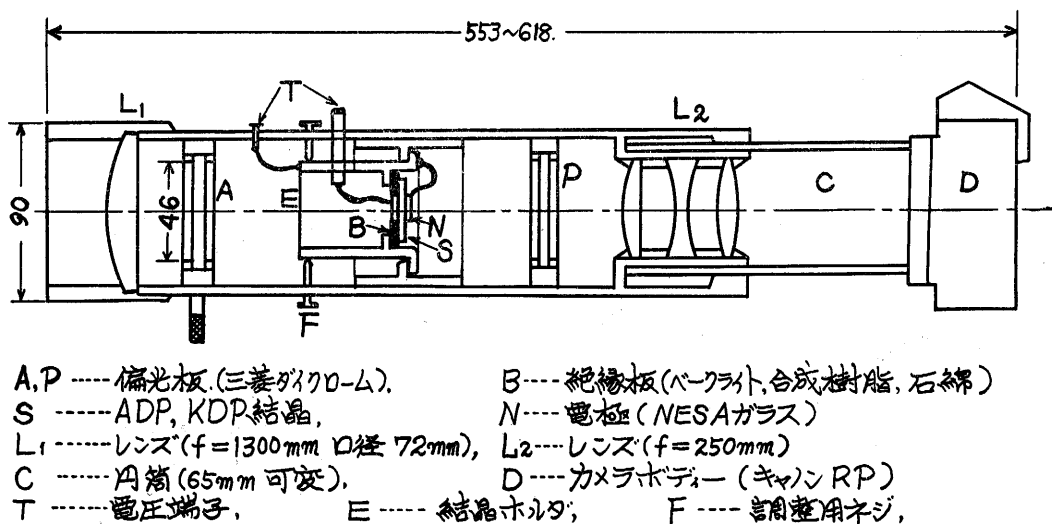
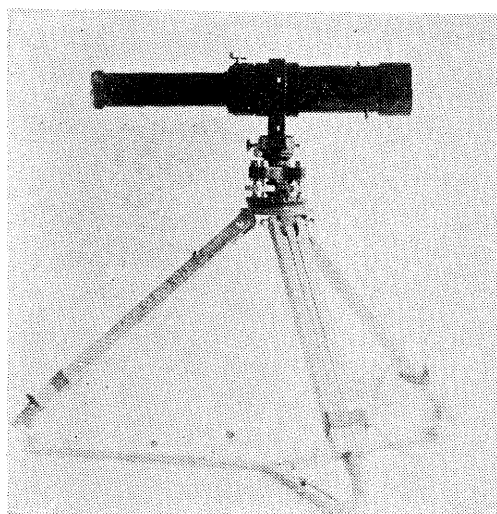


Fig. 7 Sketch showing that construction of camera elements.



Phot. 4 Camera set.

5-3 瞬間シャッターを装置したカメラの構造

カメラの構造は、図7のごとく、その外観は、写真4に示すように三脚上に取り付けてある。

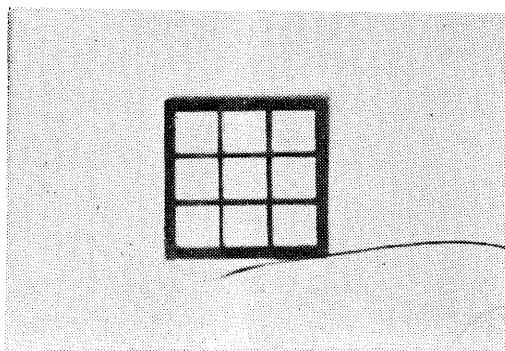
結晶ホルダーは容易に取出すことができ、電圧印加のためのリード線を端子に取付ける際には、ホルダーを筒内に収めてから、対物レンズと偏光子を外して、前方より手を入れて工作できる。高圧側リード線は前面側の電極から直接バークライト製チューブを経由し外部へ通ずる。接地側は後面側電極よりホルダーにつなぎ、ホルダーの前方より出して接地端子につないである。

結晶を取付ける絶縁板は、バークライト板、合成樹

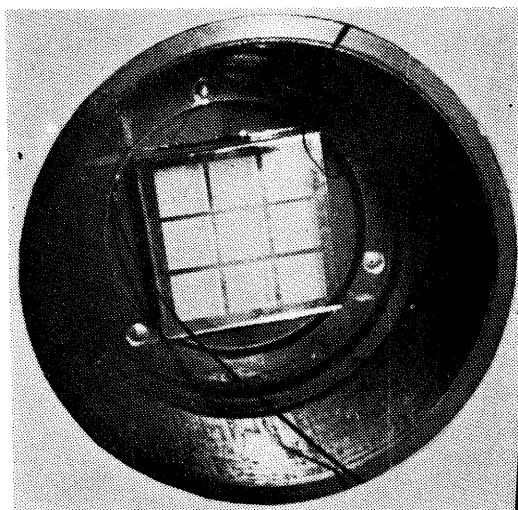
脂、石綿などを用い、光の通過する窓の大きさは、結晶および電極の大きさが変わるとに、それに合わせてきめている。本実験で用いた結晶、電極絶縁板の種類、窓の大きさを示したものが表4で、結晶に接着した電極、およびそれを鏡筒内に取付けた状態が写真5である。

表4 結晶および電極の大きさ、種類等

結晶の大きさ	電極の大きさ	絶縁板、窓の大きさ
ADP 25 × 25 mm		窓の大きさ 20.5 × 20.5 mm 厚さ 3 mm バークライト
ADP 25 × 17 mm		窓の大きさ 20.5 × 15 mm 厚さ 2 mm 合成樹脂
ADP 21 × 17 mm		窓の大きさ 18 × 10 mm 厚さ 2 mm 合成樹脂
KDP 27 × 16 mm		窓の大きさ 18 × 10 mm 厚さ 1.5 mm 石綿



Phot. 5(A) NESA electrode of crystal.



Phot. 5(B) Electrode mounting in cylinder.

カメラボディに機械的シャッターを併用すれば、光の漏れる時間を短くできるのであるが、本装置に取付けられたキャノン RP はフォーカルプレーンシャッターであるから、高速度になるとシャッターが全開状態になることはなく、幕がスリット状に移動するので、被写体に対するスリットの位置と、結晶に加えられるパルス電圧とを同期させることが困難である。また、できたとしても、スリット状の狭い画面しか露光しないので不適当である。その点、レンズシャッター式一眼レフカメラなら、これを解決することができよう。

本実験では、 $1/11$ 秒の低速シャッターを併用したが、フラッシュ電球の閃光時間である 40ms. をカバーしているので、バルブを使用するのと同じである。

5-4 電極の接着とシャッター効果

XH_2PO_4 形結晶は、光の透過方向と電界の方向とが一致しているので、NESA ガラスと称する酸化錫の層をつけた透明電極に銀を格子状にハンダコーティングしたものにリード線を溶着し、さきに試作したパルスジェネレータ^{(4),(5)}からパルス電圧を加えて、シャッターを駆動させた。

この電極を結晶に接着させる作業が予想外にむずかしく、普通、二つの異なる物質を接着させるときに用いる方法として採られているように、電極板と結晶の間に接着剤の薄層を作らせると、図8のように平行板電極間に誘電率の異なる二層の物質がある場合に相当し、接着剤にかなり高い電圧がかかるために、肝心な結晶に対する印加電圧が低下してしまうこととなり、ひいては、シャッター効果が減少してしまう。

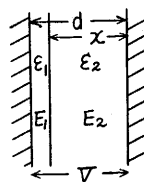


Fig. 8 Parallel plate condenser with two different dielectrics.

この場合、接着剤に加わる電圧 E_1 は次式で示される。

$$E_1 = \frac{V}{d - x(1 - \epsilon_1/\epsilon_2)} \quad (22)$$

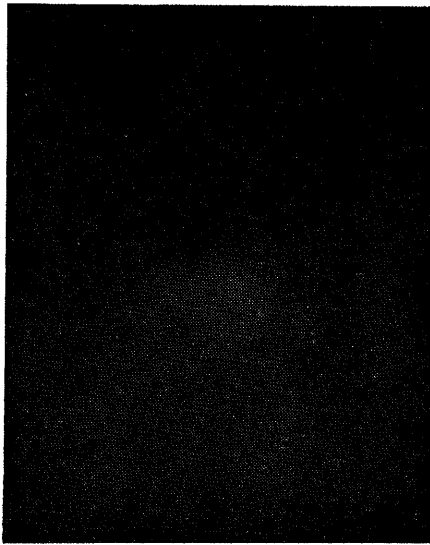
いま、結晶の厚み $x=0.8\text{mm}$ 、印加電圧 $V=5 \times 10^3\text{V}$ 、 $\epsilon_1=1 \sim 6$ (空気1, カナダバルサム, セメダイン3000などの誘電率を3~6とする)、 ϵ_2 としてADP 14.0, KDP 21.3にとり、接着剤の種々の厚みについて、これに加わる電圧の値を求めたものが表5である。

表5 各種接着剤による電圧降下

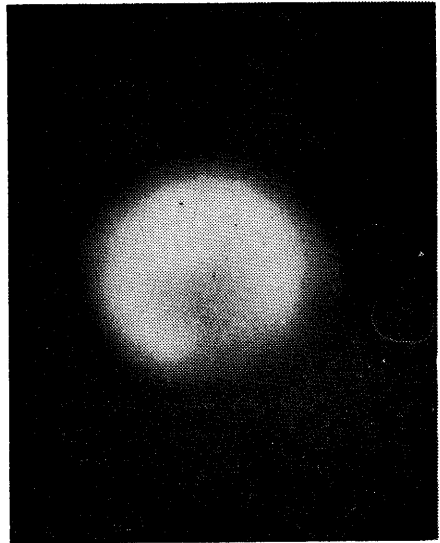
ADP			
誘電率 ϵ_1	1	3	6
厚み (mm)			
0.001	86.2 V	29.1 V	14.5 V
0.01	746	276	142
0.02	1300	524	276
0.05	2330	1130	635

KDP			
誘電率 ϵ_1	1	3	6
厚み (mm)			
0.001	128 V	43.5 V	22.1 V
0.01	1040	403	213
0.02	1724	746	408

普通程度の加圧力で、セメダイン3000を接着剤としてはさみ、その厚みを測ったところ 0.03mm であった。したがって、この場合は、パルスジェネレータの出力電圧の波高値が 5 kV であっても、結晶自身の印加電圧は 4 kV 程度に低下してしまう。次に、結晶と電極とは密着させて、電極板の周りのみにセメダイン3000をつけて、KDP 結晶のシャッター効果を撮影したものが写真6である。写真の左側はシャッター閉時(無電圧)、右側はシャッター開放時(電圧印加)で、かなり良好な結果が得られた。同様な方法で、ADP 結晶について撮影したものが写真7である。写真6と同様に、左側はシャッターが閉じた場合、右側はシャ



closed

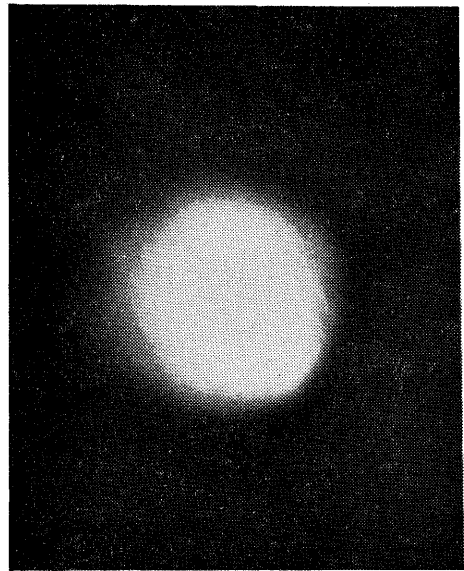


open

Phot. 6 KDP crystal shutter.



closed



open

Phot. 7 ADP crystal shutter.

ッターが開いた場合のものである。この場合は、シャッターが閉じた状態でも漏れがかなりあることがわからう。

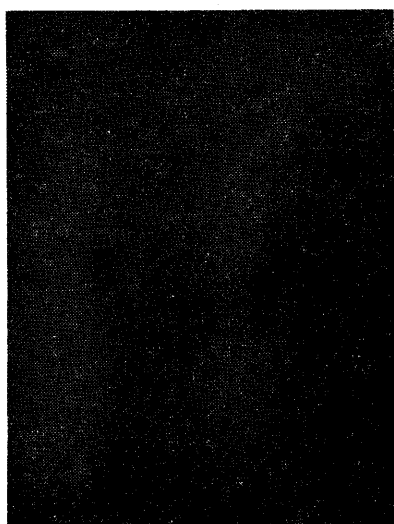
次に、ADP 結晶の厚みを 0.5mm として、シャッターが閉じたときの漏れ量の少ない状態において、印加電圧は、この厚みで破壊電圧の限界値に近い 5kV に保ち、撮影距離を変えて、この装置としては焦点の合う最長距離であるレンズ前 675mm の位置に被写体

(閃光電球) を置きその点灯時を撮影したものが写真 8 である。

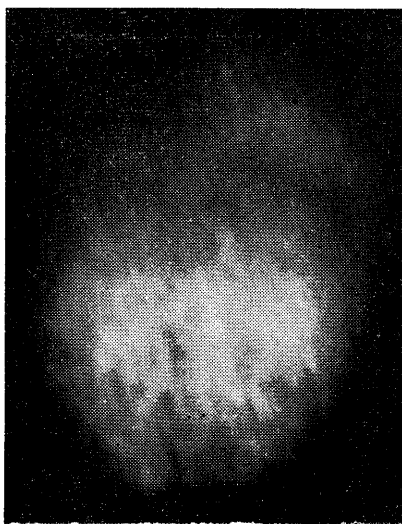
5-5 閃光電球の撮影

図 9 の回路を用いて、閃光電球が点灯経過中の各瞬間における閃光の状態を撮影した。

リレー 1 (WA-659) はパルス遅延用リレーの回路と閃光電球の回路の両者をほとんど同時に (0.6ms だけ閃光電球回路の方が早い) スイッチするためのもの



closed



open

Phot. 8 ADP 0.5 mm thickness shutter.

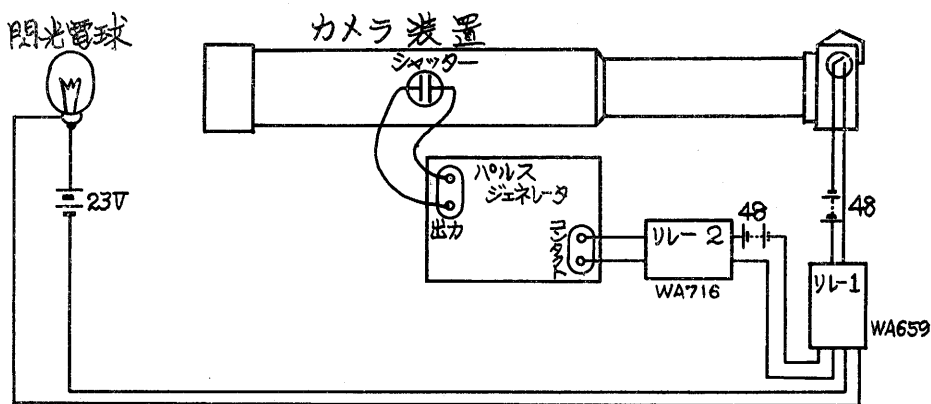


Fig. 9 photographing circuit of flash lamp.

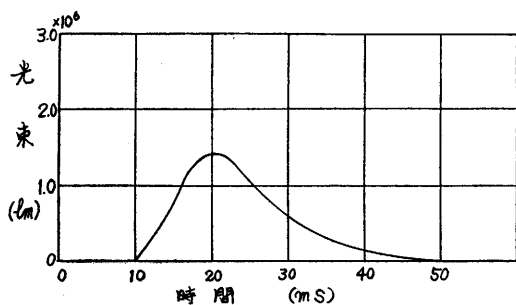


Fig. 10 Characteristic curve of flash lamp M class super 5.

である。パルスジェネレータはコンタクト端子を短絡することにより、波高値 5 kV、パルス幅 $1 \mu\text{s}$ のパルスを発生することができる。被写体の閃光電球は T 社製 M

級、SUPER 5 で、その特性は図10に示すようであるとされている。

この曲線上の数個所の点で、 $1 \mu\text{s}$ の時間中の光量が撮影できるように遅延用リレー 2 (WA 716) について、11~36ms の遅延時間が得られ、さらに、15ms から 0 ms 付近までの遅延時間は図11のようにして得られた。図11の回路で、リレー 2 は 15ms で一定、リレー 3 (W4-SW102) の励磁コイルの電圧を変化して、

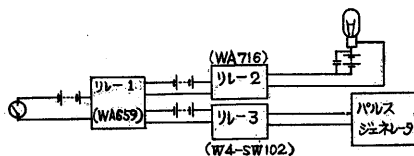
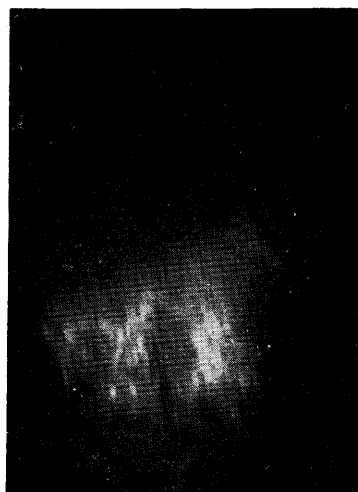


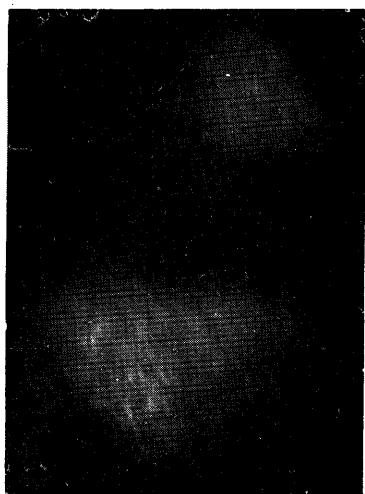
Fig. 11 Delay circuit of shutter.



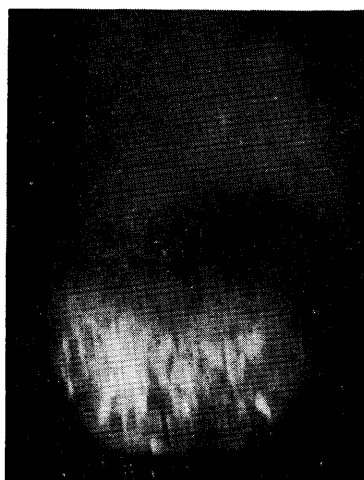
8 ms



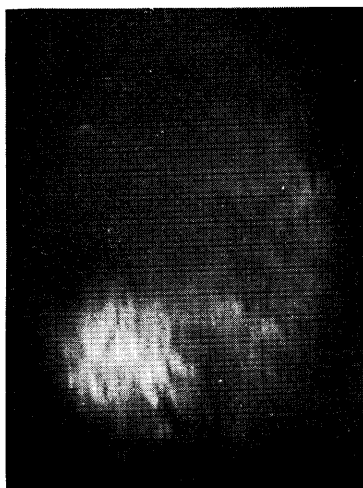
12 ms



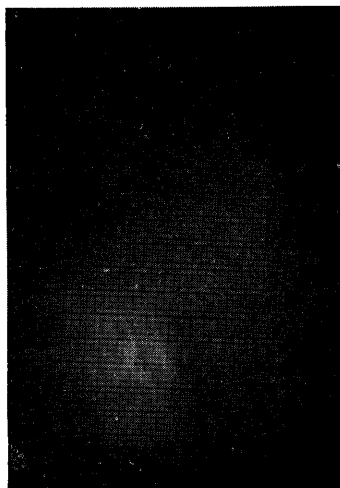
15 ms



21 ms



28 ms



36 ms

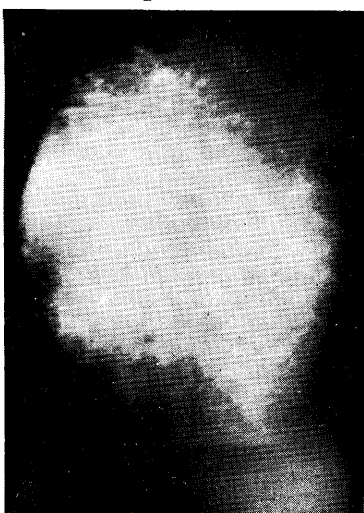
Phot. 9 Photograph of flash lamp after switching by ADP shutter.



1 ms



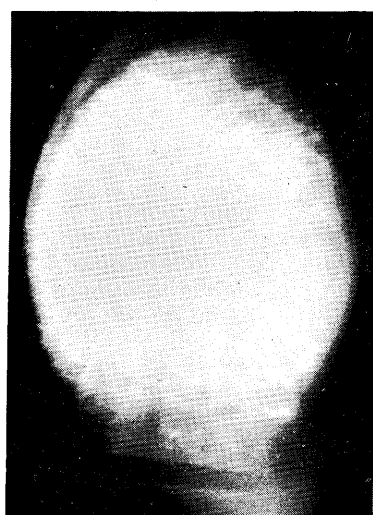
5 ms



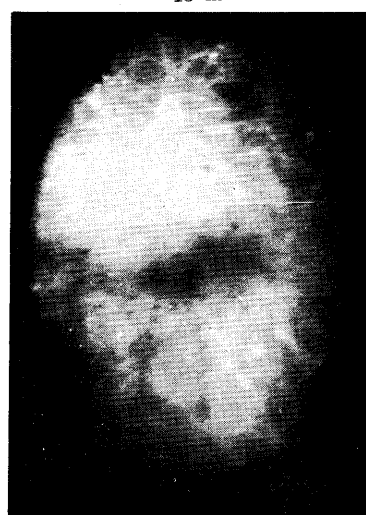
8 ms



15 ms



20 ms



36 ms

Phot. 10 Photograph of flash lamp after switching by KDP shutter.

前述の遅延時間が得られた。

このようにして、ADP および KDP を用いた瞬間シャッター装置で、閃光電球の発光状態の時間的变化を撮影したものが写真9 および写真10である。

6 考 察

6-1 結晶の厚みの決定

本研究に使用したパルスジェネレータの波高値は5 kV であったために、ADP 結晶は0.5mm 厚まで利用できることが知られている⁽²⁾。KDP 結晶について、これに関する文献は見当たらないが、前者と同程度の耐圧があるものとして取扱い、数十回、5 kV のパルス電圧を加えたが破壊することはなかった。また、結晶の厚みが薄くなるほど光の漏れが減少することが、撮影の結果定性的ではあるがわかった。

6-2 結晶の研磨

結晶研磨の方法については種々行なってみたが、次の方法が一番良好であった。すなわち、急速に厚みを減らすときは、紙やすりを用いるがよく、厚みを整えるには、ガラス板上にカーボランダム粉末を薄く散布して研磨する。最後の仕上げは酸化クロムで行なうと、ほとんど透明な面が得られる。

水溶性結晶であるから、研磨に際してはできるだけ水を使わない方がよい。切断の際は、水を使うと早くすむが水と結晶の温度差が5°C 以上あると、結晶が破壊したり、光学的特性が変化するおそれがある。

6-3 電極の接着

結晶に NESA ガラスを接着する場合、接着剤の屈折率は結晶のそれとほぼ等しいことが必要である。また、接着剤は接着膜が薄いほどよく、その誘電率は大きいほど良いと考えられる。

こうした接着剤が得られないときは、結晶と NESA ガラスの間には接着剤は挿入せず、両者を密着させて、周りだけに接着剤を用いる方法をとっても、シャッター効果は落ちない。結晶をベークライト製ホルダーに取付ける場合の接着剤は、ゴム系の接着剤を用い、固った後でもある程度の柔軟性を持つものでないと、パルス電圧を加えたとき結晶の圧電効果によって、結晶内に歪力が生じて結晶を破壊するおそれがある。

6-4 閃光電球の撮影

この種シャッターは、通過光量/漏光量が有限の値をもち、被写体としての閃光電球は条件が悪いものと考えられるので、瞬間シャッターの使用限界の一つの目安を与えるために、撮影をこころみただけである。

その結果、試作した瞬間シャッターは実用し得るものと断定できる。

閃光電球の時間特性を撮影した写真10の明るさから、推定して描いたところ図12のようになった。これ

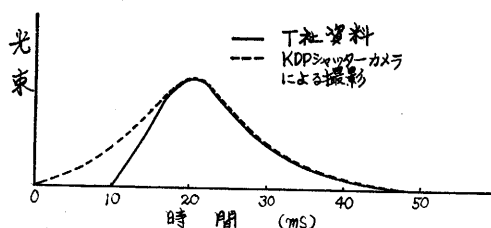


Fig. 12 Comparison of T company data and photographing result.

によるとT社の資料と点火直後の状態に違いがみられる。すなわち、T社の資料では、点火後10ms たないと閃光を始めないが、本実験では、点火直後から閃光を始めた。

これらの差異を生じた原因としては、電源の違いが1つの因子と考えられる。すなわち、前者(T社資料)は、電源として乾電池(22.5V)とコンデンサを用い、その電流—時間特性を電磁オシログラフで求めた結果、図13のようであった。図において、2 ms 以内が

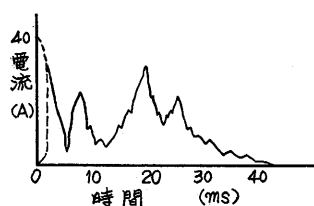


Fig. 13 Oscillogram of current wave of flash lamp M class super 5.

破線で表わしてあるのは、電磁オシロのバイブレーションコイルが、感光紙の幅以上に振れたためなのか、或は、電流値0 から急峻に立上ったために、感光するに至らなかったのか、はつきりしない。

若し、この曲線を上方に延長して、時間軸0のときの電流値を推定すれば40A にも達することとなる。

このような大電流が流れると、乾電池の内部抵抗による電圧降下のために、乾電池の端子電圧は極端に低下する。T社の資料からみれば、10ms までは光束が0であるから、この破線部はむしろ下降曲線のようにあったのではないかと考えられる。また、20ms 付近の電流が最大値を示しているが、これと光束最大値の時間がほぼ一致していることは、測定結果が正しいことを示すものと考えられよう。

さて、後者（本実験）においては、電源に直流発電機を使用したので、電機子抵抗は小さく、したがって、電圧降下が少ないために、閃光電球点火の瞬間における発光量は、前者よりも多いものと考えられる。

これらの解明については、今後さらに研究を続けて明確な結論を下したい。

また、ADP と KDP の両者のシャッターとしての効果を比較すると、前者よりも後者の方が同一の電圧のもとでは、はるかに優れていることがわかった。そして、このことは電気光学定数の値と一致している。

7 結 言

XH_2PO_4 形結晶（ADP, KDP）のカー効果による瞬間シャッターを試作し、先に試作開発したパルスジェネレータ、カメラ装置と組合わせて、閃光電球の瞬間撮影に一応成功した。

この種の瞬間シャッターの製作にあたって、最も問題となる点は、結晶の厚みの決定、結晶の研磨、電極の接着である。また、ADP よりも KDP 結晶による方が鮮明な写真がとれた。

本実験については、学生笹原利則、山田俊幸両君に

労苦を煩わした。結晶の育成や結晶の切断については、技官溝田孝夫君に負うところが多い。また、パルスジェネレータは日本通信機 K. K；カメラ装置は長島レンズ研究所に、それぞれ製作を依頼したものである。

ここに記し、感謝の意を表する次第である。なお、本研究は文部省試験研究費の補助を受けて行なったものである。

参 考 文 献

- 1) 古屋，溝田；山梨大学工学部研究報告第14号 昭38. 12
- 2) 伏見；電気試験所研究報告第602号 昭36. 5
- 3) 古屋，数野；山梨大学工学部研究報告第12号 昭36. 12
- 4) 古屋，数野；山梨大学工学部研究報告第13号 昭37. 12
- 5) 古屋；高速度写真研究会資料 No. 91 昭38. 7
- 6) B. H. Billings；J. Opt. Soc. Am. **39** P. 797 (1949)