

光的反射與偏極之探討

高中組物理科第三名

台北市立內湖高級中學

作者：蘇原保、羅志偉

謝志昌、范育誠

指導教師：陳聲台

一、研究動機

一般汽車玻璃上貼的隔熱紙，對光線的反射現象很特別，從某一角度觀察可看清楚車內景物，換一角度卻感覺強烈反光無法直視，這種現象引起我濃厚的研究興趣。

二、研究目的

- (一)研究反射光的成份與光的偏極之關係。
- (二)研究如何有效測出反射光中各偏極成份之量值及性質。

三、研究設備器材

- 1. 五重旋轉實驗暗箱 (自製)
- 2. 特殊規格照度計 (自製)
- 3. 限光器 (自製)
- 4. 光源電壓穩定器 (自製)
- 5. 各種反射玻璃、塑膠、金屬、隔熱紙數十片。

四、研究過程或方法

(一)光波的能量

- 1. 對一束向正 x 軸方向進行的光波我們可以寫出

$$\text{電場波爲 } E = E_0 \sin(kx - \omega t)$$

$$\text{磁場波爲 } H = H_0 \sin(kx - \omega t)$$

- 2. 互相垂直的電場與磁場同時作用的區域，其能量密度為

$$u = (0.5 \epsilon_0 E^2) + (0.5 \mu_0 H^2) = \epsilon_0 E^2 \quad \text{其中 } E \text{ 爲弦式電場瞬時值，而能量密度的平均值應表示成 } u = 0.5 \epsilon_0 (E_0)^2$$

- 3. 由上式知電磁波能量可以只用電場能量來計量。

- 4. 光波強度可表示為 $I = 0.5 \epsilon_0 (E_0)^2 \cdot C \quad I \propto (E_0)^2$ 這次我們採用的 A/O 型光電池，其光電流之輸出完全正比於入射光的強度 I ，亦即光電流正比

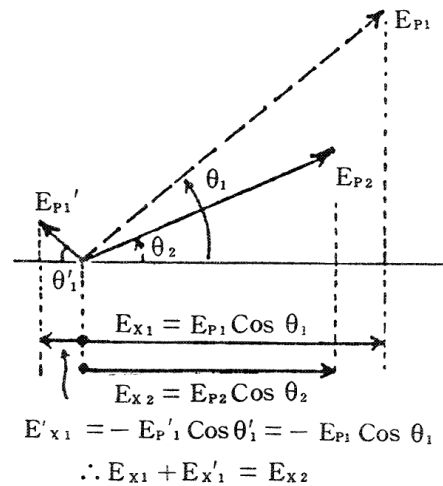
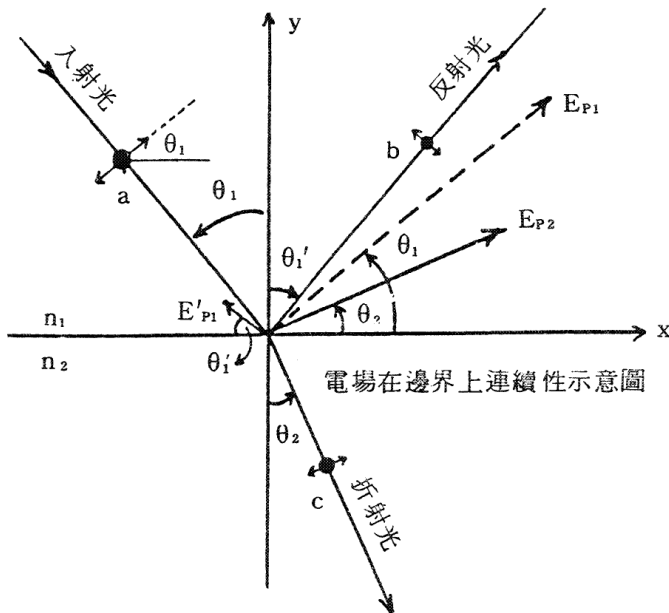
於電場振幅之平方。

(二)光的偏極

1. 物質分子因熱運動而加速，其中電子在加速時輻射出光波，但熱運動是無規的，故光波中電場偏極方向是機會均等的，可視為無偏極光，亦可視為 50% 為水平偏極，50% 為垂直偏極。
2. 無偏極之自然光通過一片人造偏極片時，一般書上皆認為光波中與偏極片同向的 50% 光線能量可以通過，故強度減半，即 $I=0.5I_0$ ，但我們觀察偏極片是有厚度的，應考慮吸收因素。
3. 上述透射光若再通過第二片偏極片，依 Malus 定理，透射強度變成 $I_2 = I_1 \cos^2 \theta = 0.5I_0 \cos^2 \theta$ ， θ 為兩偏極片的相對偏振夾角，若考慮上述吸收因素，Malus 定律還正確嗎？要用實驗證明。

(三)反射光的成份

1. 光線射向光滑介質（如玻璃）上，入射光之電場可分解為 S 波（與入射面垂直）及 P 波（與入射面平行），各佔 50% 能量。
2. 與電場伴隨的磁場亦有 S 波與 P 波之分。
3. 光線由介質常數 ϵ_1 處射向介質常數 ϵ_2 之表面時，電場及磁場的變化是連續的，E 及 H 於邊界上的水平分量不會中斷，圖(-)顯示 P 波和 S 波在平行於邊界上皆有分量，我們可列出下式：



$$E_{x1} = E_{P1} \sin(k_1 a - \omega t) \cos \theta_1$$

$$E_{z1} = E_{S1} \sin(k_1 a - \omega t)$$

$$H_{x1} = -\sqrt{\epsilon_1 / \mu_1} E_{S1} \sin(k_1 a - \omega t) \quad \dots\dots(1)$$

$$H_{z1} = \sqrt{\epsilon_1 / \mu_1} E_{P1} \sin(k_1 a - \omega t) \quad \text{其中 } a = x \sin \theta_1 - y \cos \theta_1$$

反射光柱平行於邊界之各分量可表示為：

$$E_{x_1'} = -E_{p_1} \sin(k_1 b - \omega t) \cos \theta_1'$$

$$E_{z_1'} = E_{s_1} \sin(k_1 b - \omega t)$$

$$H_{x_1'} = \sqrt{\epsilon_1 / \mu_1} E_{s_1}' \sin(k_1 b - \omega t) \cos \theta_1' \quad \dots\dots(2)$$

$$H_{z_1'} = \sqrt{\epsilon_1 / \mu_1} E_{p_1}' \sin(k_1 b - \omega t) \quad \text{其中 } b = x \sin \theta_1' + y \cos \theta_1'$$

透射光柱平行於邊界之各分量可表示為：

$$E_{x_2} = E_{p_2} \sin(k_2 c - \omega t) \cos \theta_2$$

$$E_{z_2} = E_{s_2} \sin(k_2 c - \omega t)$$

$$H_{x_2} = -\sqrt{\epsilon_2 / \mu_2} E_{s_2} \sin(k_2 c - \omega t) \cos \theta_2 \quad \dots\dots(3)$$

$$H_{z_2} = \sqrt{\epsilon_2 / \mu_2} E_{p_2} \sin(k_2 c - \omega t) \quad \text{其中 } c = x \sin \theta_2 - y \cos \theta_2$$

邊界上下之電場切線成分應相等，磁場亦然，即

$$\left. \begin{aligned} E_{x_1} + E_{x_1'} &= E_{x_2} & (E_{p_1} - E_{p_1}') \cos \theta_1 &= E_{p_2} \cos \theta_2 \\ E_{z_1} + E_{z_1'} &= E_{z_2} & (E_{s_1} + E_{s_1}') &= E_{s_2} \\ H_{x_1} + H_{x_1'} &= H_{x_2} & \sqrt{\epsilon_1 / \mu_1} (E_{s_1} - E_{s_1}') \cos \theta_1 &= \sqrt{\epsilon_2 / \mu_2} E_{s_2} \cos \theta_2 \\ H_{z_1} + H_{z_1'} &= H_{z_2} & \sqrt{\epsilon_1 / \mu_1} (E_{p_1} + E_{p_1}') &= \sqrt{\epsilon_2 / \mu_2} E_{p_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots(4)$$

因多數物質之 $\mu \doteq \mu_0$ 而 $\sqrt{\epsilon_1} = n_1 \sqrt{\epsilon_0}$ ， $\sqrt{\epsilon_2} = n_2 \sqrt{\epsilon_0}$ 利用和差化積處

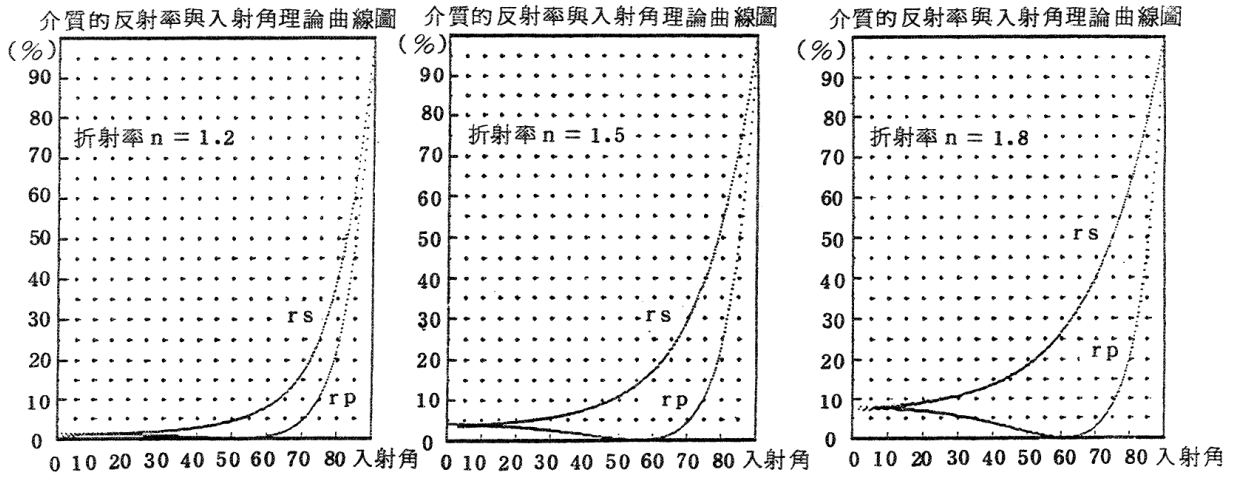
理(4)式，結果如下：

$$\frac{E_{p_1'}}{E_{p_1}} = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad \gamma_p = \left(\frac{E_{p_1'}}{E_{p_1}} \right)^2 = \left[\frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \right]^2$$

$$\frac{E_{s_1}'}{E_{s_1}} = \frac{-\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad \gamma_s = \left(\frac{E_{s_1}'}{E_{s_1}} \right)^2 = \left[\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right]^2$$

r_s 與 r_p 分別代表 s 波及 p 波的能量反射率，如何測量此二反射率，這是本次實驗的重心。

4. 在某一入射角 γ_p 值會降到零，此時 $\theta_1 + \theta_2 = 90^\circ$ ， θ_1 被稱為 Brewster 角，是否所有物質在 Brewster 角下 r_p 值都會降到零呢？我們收集許多光滑反射體，以實驗來求證。



(四)儀器研製

1. 五重旋轉實驗暗箱製作

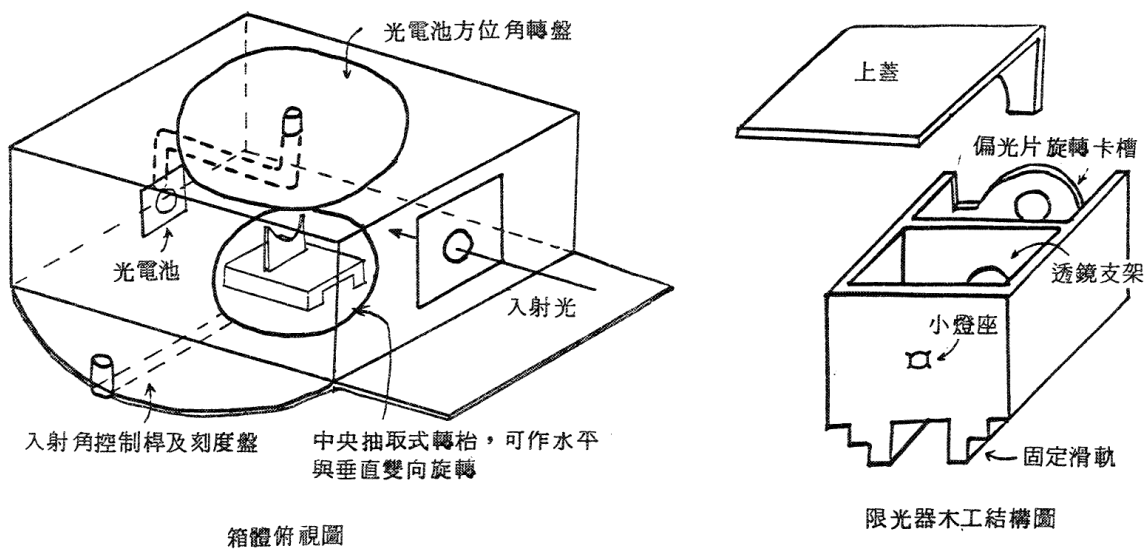
(1) θ_1 為起偏鏡角度調整， θ_2 為檢偏鏡角度調整，上下兩個大型圓盤同軸旋轉，負責方位變換， θ_3 及 θ_4 分別調整被照體及光電池的方位角度， θ_5 負責在垂直於入射面方向旋反射體。

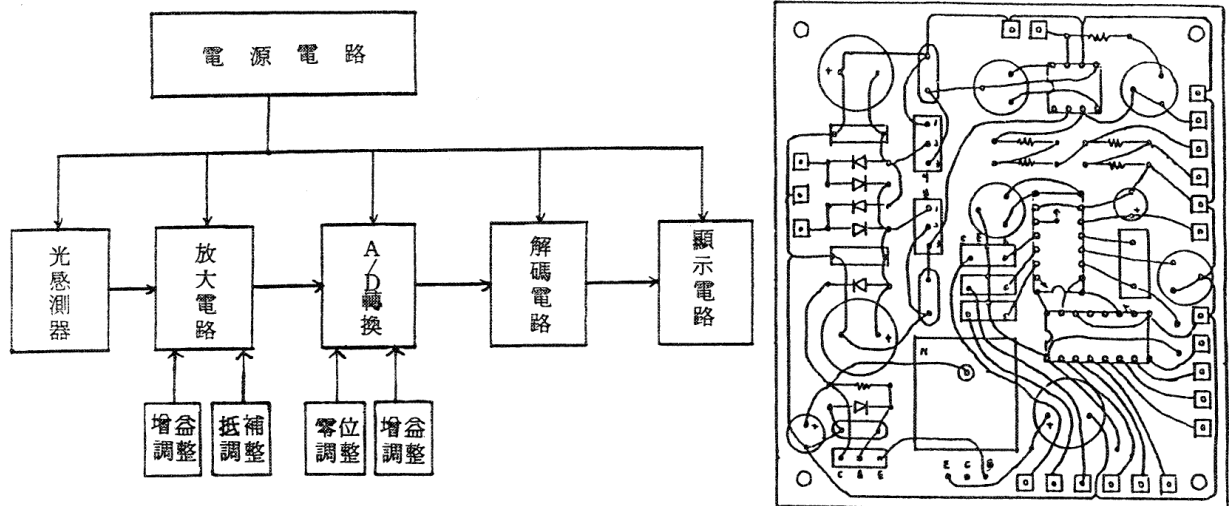
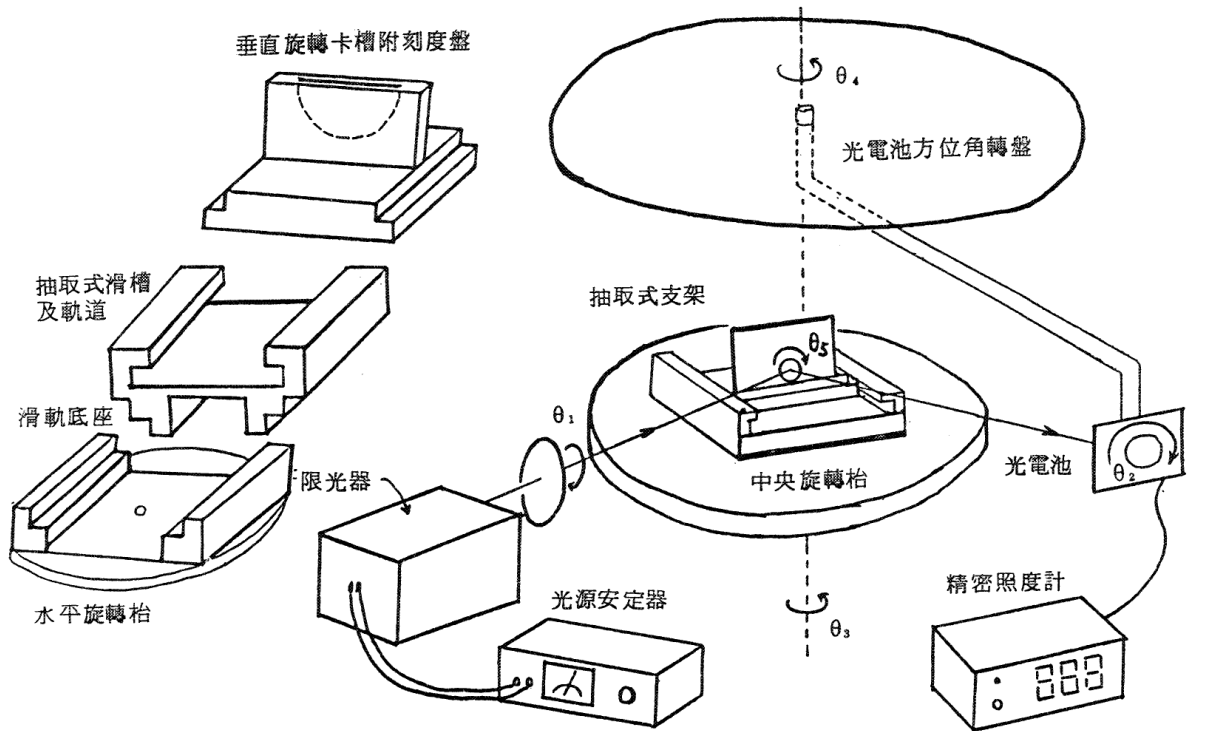
(2) 整個暗箱及轉體皆以木工製作，內外噴塗黑漆隔絕光線。

2. 限光器製作

(1) 雷射光的局部强光將使光電池產生過激，破壞其線性能力。

(2) 以鎢絲燈泡來產生無偏極的自然光，將其置於透鏡焦點上，產生的平行光束再經過小孔射出即能得到理想之入射光線。





3. 精密照度計製作 (詳細製作過程從略)

- (1) 市售照度計皆非實驗專用的，其靈敏度只能測至 1Lux，這無法滿足 Brewster 角入射時 γ_p 值趨近於 0 之微弱讀數，故必須自己動手研製，將測量範圍擴展十倍，能測至 0.1Lux。
- (2) 感測部份採用 A-10 型光電池，這種型號線性轉換能力甚佳，大量被使用於影印機內。

五、實驗結果

(受限於篇幅，僅列出部分結果)

表一、自然光百分偏振實驗記錄

鎢 絲 燈 泡	檢 偏 鏡 角 度										百 分 偏 振 (%)
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	170	
	透 射 光 强 度 (lux)										
燈泡 1	6.9	6.9	6.8	6.8	6.9	6.9	6.7	6.8	6.8	6.7	1.47
燈泡 2	5.4	5.1	5.3	5.3	5.4	5.3	5.2	5.1	5.4	5.3	2.85
燈泡 3	6.0	6.0	6.1	6.1	6.3	6.2	6.2	6.1	6.1	6.1	1.61
燈泡 4	5.1	4.9	4.9	4.9	5.0	4.8	4.9	5.0	5.1	5.1	3.03
燈泡 5	4.4	4.4	4.5	4.4	4.4	4.5	4.4	4.4	4.5	4.4	1.12
燈泡 6	5.6	5.5	5.4	5.4	5.5	5.5	5.4	5.3	5.4	5.5	2.97

表二、加透鏡百分偏振實驗記錄

鎢 絲 燈 泡	檢 偏 鏡 角 度										百 分 偏 振 (%)
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	170	
	(加 透 鏡) 透 射 光 强 度 (lux)										
燈泡 1	39.2	39.4	39.4	39.6	39.0	39.1	38.8	38.7	38.5	39.0	1.41
燈泡 2	38.2	38.1	38.3	38.4	38.6	38.2	38.1	37.9	37.8	38.0	1.04
燈泡 3	39.1	39.3	39.5	39.5	39.6	39.9	39.2	38.6	38.3	39.0	2.05
燈泡 4	41.4	41.6	41.7	41.9	42.2	42.3	42.1	42.0	41.8	41.5	1.08
燈泡 5	44.4	44.9	44.9	45.4	45.7	46.2	45.8	45.2	44.8	44.1	2.33
燈泡 6	35.1	35.3	35.6	35.9	36.2	36.5	36.9	36.4	35.8	35.4	2.50

表三、偏極片透光率的實驗記錄

偏極片規格		原 入 射 光 的 强 度 (lux)	偏 極 片 層 數								同 向 透 射 率 的 平 均 值 (%)
品 牌	厚 度 (mm)		1		2		3		4		
			透 射 量 lux	透 射 率 (%)	透 射 量 lux	透 射 率 (%)	透 射 量 lux	透 射 率 (%)	透 射 量 lux	透 射 率 (%)	
Cokin	0.33	136	38.1	28.2	21.9	57.5	12.7	57.8	7.4	58.2	57.5
Kenko	0.25		43.7	32.1	28.1	64.4	18.3	65.1	11.9	64.8	64.6
star	0.40		38.7	28.4	22.2	57.6	12.8	57.6	7.4	57.8	57.5
不知名	0.27		42.3	31.1	26.5	62.6	16.5	62.1	10.3	62.4	62.3

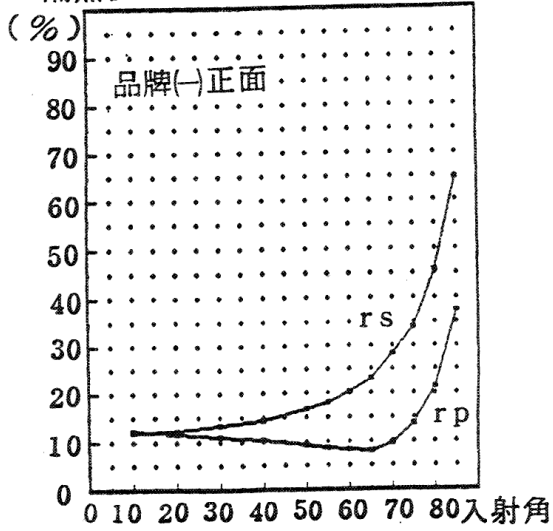
表四、驗證 Mlaus 定率的實驗記錄

偏極片規格		原入射光的強度 (lux)	兩 偏 極 片 相 對 角 度									
品牌	厚度 (mm)		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
			透 射 光 強 度 測 量 值 (lux)									
Cokin	0.33	136	21.9	21.3	19.1	16.3	12.7	9.1	5.6	2.7	0.7	0.1
Kenko	0.25		28.1	27.5	24.9	21.0	16.3	11.6	7.2	3.1	0.9	0.1
star	0.40		22.2	21.4	19.8	16.7	13.0	9.0	5.3	2.7	0.7	0.1
不知名	0.27		26.5	25.5	22.5	19.6	15.6	11.0	6.3	3.2	0.8	0.2

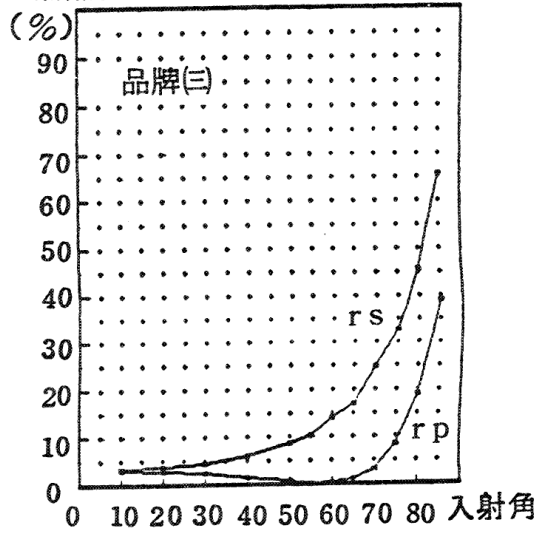
表五、測玻璃反射率的實驗記錄

玻璃厚度 (mm)	入射偏極光強度 (lux)	Is	Ip	玻 璃 的 入 射 角									
				10	20	30	40	50	60	70	75	80	85
				S 振動反射光強度： I'_s (lux)。 P 振動反射光強度： I'_p (lux)。									
				S 振動反射率： r_s (%)。 P 振動反射率： r_p (%)。									
1.32	40.4	36.3	I'_s	3.2	3.6	4.7	6.1	8.4	12.4	18.0	21.5	26.2	32.2
			r_s	7.9	8.9	11.6	15.1	20.8	30.7	44.5	53.2	64.8	79.2
			I'_p	2.6	2.5	2.1	1.4	0.6	0.1	2.5	5.6	11.7	21.3
			r_p	7.2	6.9	5.8	3.9	1.7	0.3	6.9	15.5	32.2	58.7
2.64	40.4	36.3	I'_s	3.3	3.6	4.8	6.2	8.6	12.6	18.2	21.6	26.2	32.2
			r_s	8.1	8.9	11.9	15.3	21.2	31.2	45.0	53.5	64.8	79.2
			I'_p	2.6	2.6	2.1	1.3	0.6	0.1	2.6	5.6	11.9	21.4
			r_p	7.2	7.1	5.8	3.6	1.7	0.3	7.1	15.5	32.8	58.9
5.04	40.3	37.2	I'_s	2.3	2.6	3.3	4.3	6.1	9.2	14.3	17.5	22.4	27.8
			r_s	5.7	6.5	8.2	10.7	15.2	22.9	35.6	43.4	55.7	69.2
			I'_p	2.0	1.8	1.5	1.0	0.4	0.1	1.8	4.1	9.3	15.1
			r_p	5.4	4.9	4.0	2.7	1.1	0.2	4.8	11.1	25.0	40.6

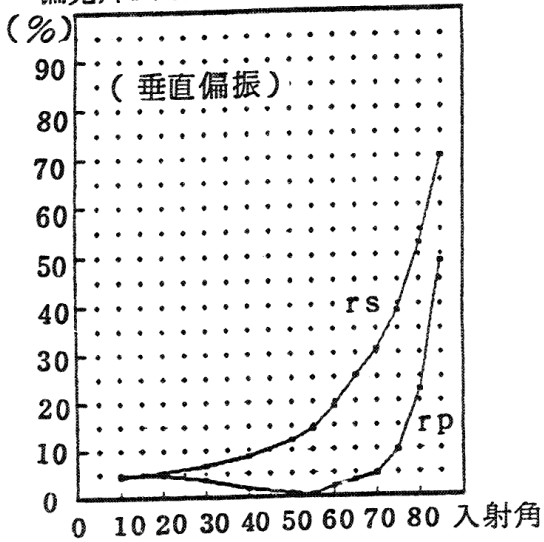
隔熱紙反射率與入射角實驗曲線圖



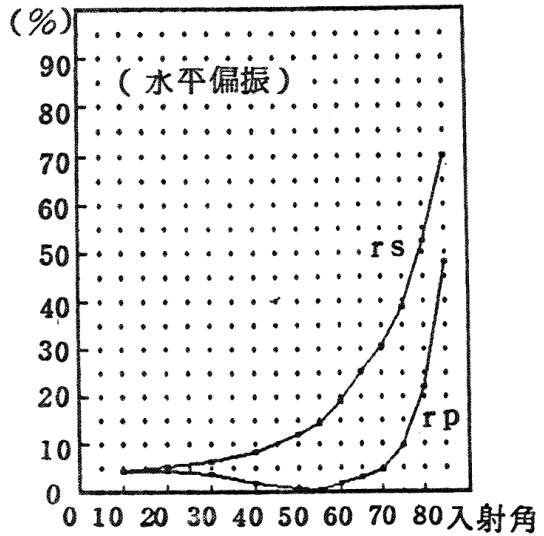
隔熱紙反射率與入射角實驗曲線圖



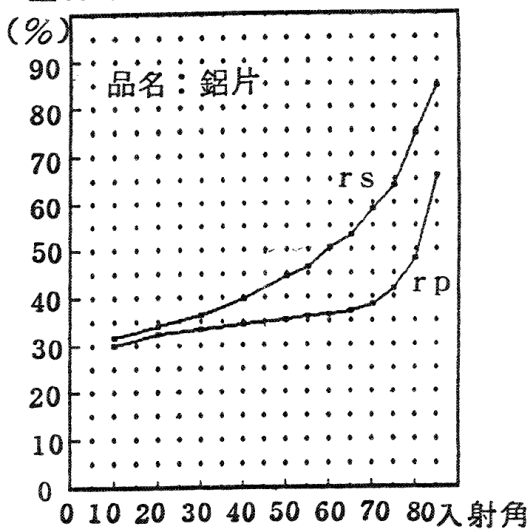
偏光片反射率與入射角實驗曲線圖



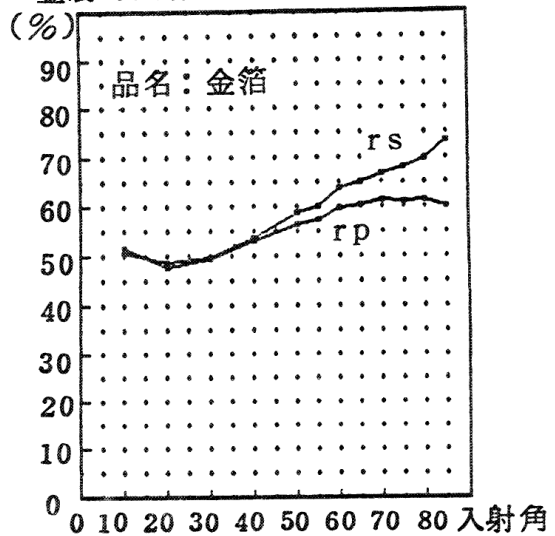
偏光片反射率與入射角實驗曲線圖



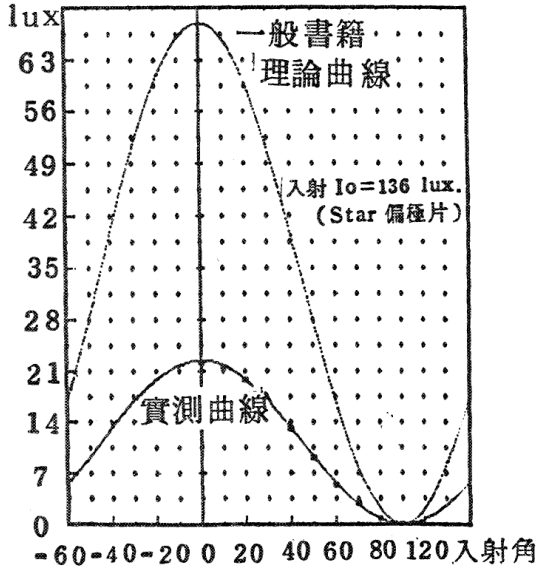
金屬的反射率與入射角實驗曲線圖



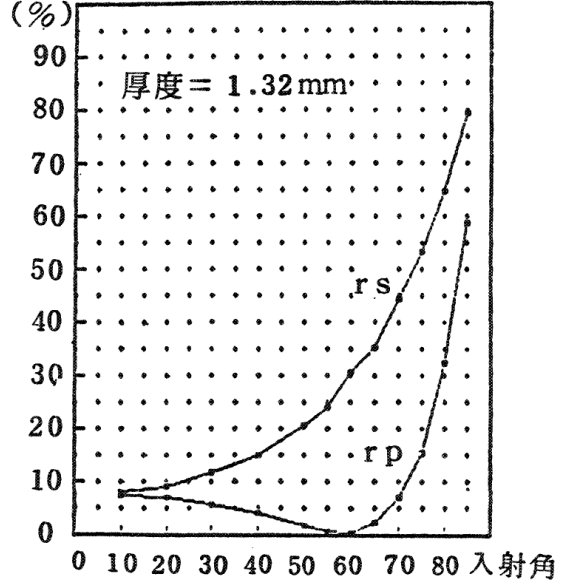
金屬的反射率與入射角實驗曲線圖



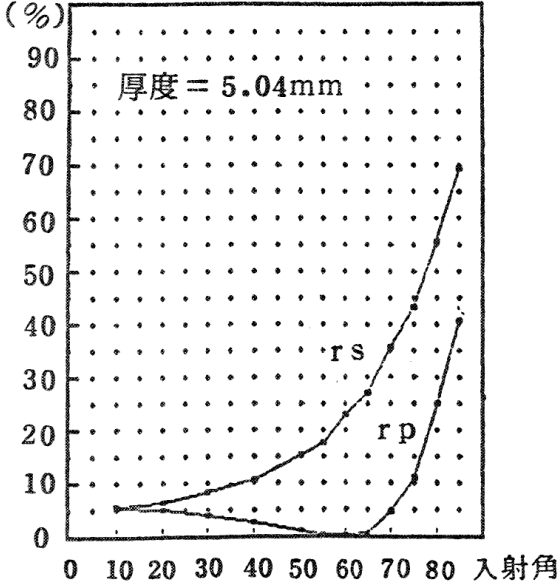
兩偏極片相對角度與透射量曲線圖



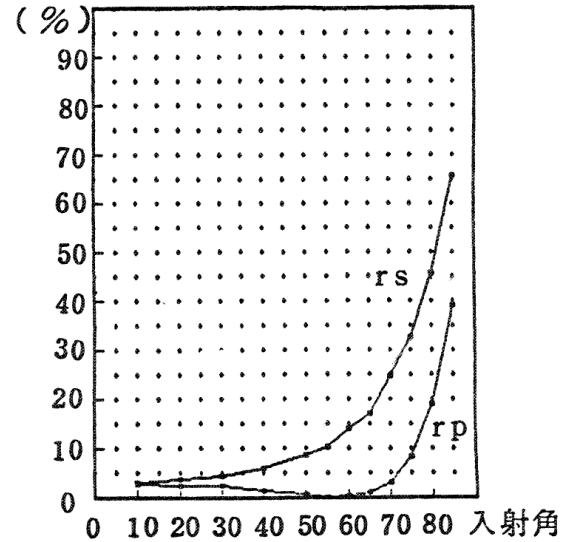
玻璃的反射率與入射角實驗曲線圖



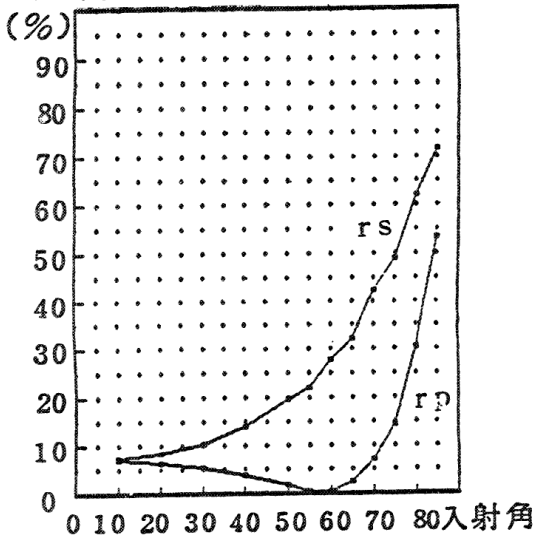
玻璃的反射率與入射角實驗曲線圖



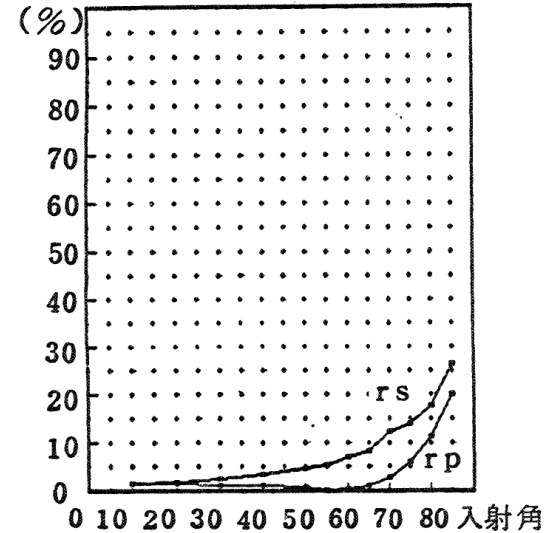
亞克利反射率與入射角實驗曲線圖



保鮮膜反射率與入射角實驗曲線圖



塑膠袋反射率與入射角實驗曲線圖



六、結論

- (一)鎢絲燈泡百分偏振很小，一般實用上可視其為無偏極光源。
- (二)燈泡外的玻璃及前方透鏡，對百分偏振有影響，但影響不大。
- (三)偏極片的透光率並非一般書上所說的 50%，乃小於此值甚多。

1. 光連續通過同向偏極片時，每經一片被吸收的比率是固定的。
2. 比較表三數據，我們推想透射光強度公式應表示為：

$$I=0.5I_0(\alpha //)^n+0.5I_0(\alpha \perp)^n \quad \alpha \text{ 爲透射率, } n \text{ 爲偏鏡片數。}$$

3. Malus 定律在考慮實際偏極片厚度及透射率時，公式應表示為：

$$I=0.5I_0(\alpha //)^2\cos^2\theta+0.5I_0(\alpha \perp)^2\sin^2\theta$$

- (四)各類反射體之 γ_s, γ_p 反射曲線可分為兩大類：

1. 玻璃及塑膠類的反射曲線完全符合理論，在 Brewster 角入射的光，其 p 波反射率 γ_p 值趨近於零。
2. 金屬因有自由電子，故反射率較高，但其反射曲線極為特殊， γ_p 值沒有明顯的極小點，這方面理論值得我們繼續研究。
3. 汽車隔熱紙也分為兩類，一類有金屬光澤的反射率較高， γ_p 曲線與金屬相近，另一類無金屬光澤的，反射曲線一如塑膠。
4. 偏光片表面亦可反射光線，但其反射曲線與玻璃或塑膠近似，並無特別的方向性此點與其透射特性完全不同。
5. 自然光經任何光滑表面反射，反射光必變成偏極光，由 γ_s 及 γ_p 控制偏極的強弱，而 γ_s 與 γ_p 值則由反射體的材質決定。
6. 正向入射及掠入射時， γ_s 與 γ_p 的曲線重合，反射光無偏極性。

七、參考資料

- (一)Sear's 物理學下冊：第四十三章 徐氏基金會。
- (二)光學原理：第一、十、十一章 亞東書局。
- (三)電光源原理：第十章 凡異出版社。
- (四)無線電界各期雜誌。

評語

本作品探測反射光中各偏極成分之量值，自行設計一套實驗儀器（包括限光器及精密照度計）測出多種不同材質的薄片之表面反射之偏極性，實驗設計及製作可合實用方法與步驟周全，所以實驗結果與理論之討論尚屬完整。