第 36 届全国中学生物理竞赛决赛

实验题Ⅰ　松耦合变压器的研究答题纸

竞赛时间：2019 年 10 月 27 日　　所需时间：90 分钟

成绩评定表

题序	1	2	3	总分
得分				
评卷人				
审核人				

提示卡使用情况（请监考老师在相应位置上签名）

提示卡	使用提示卡 1	使用提示卡 2
监考人员签名		

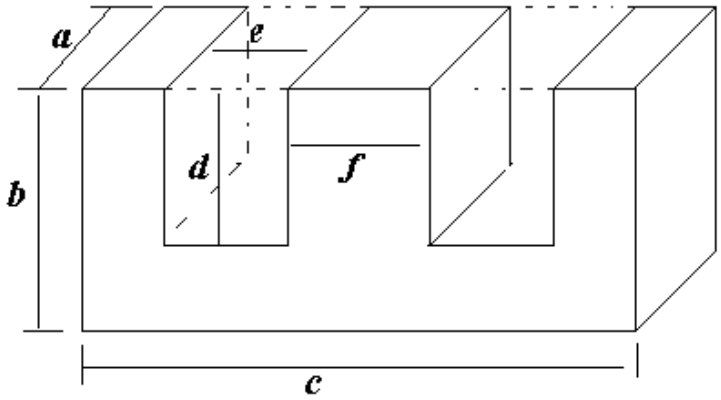
提示卡	使用提示卡 3	使用提示卡 4
监考人员签名		

得分	

1、基本参数测量（不要求重复测量）。（本部分 22 分）

（1）变压器功率与磁芯的体积密切相关，测量一个 E 型磁芯的体积V_e （5 分）

测量示意图和公式



如图所示，用游标卡尺测量 a, b, c, d, e, f 的大小。

$V_e = a*b*c-2a*d*e$

数据记录和数据处理

数据记录如下表：

单位：mm

a	b	c	d	e	f
36.28	57.00	110.00	38.70	19.42	36.68

$V_e = a*b*c-2a*d*e = 172942.8(mm)^3 \approx 0.1729\times10^{-3}m^3$

评分：

1、测量示意图和公式 2 分

2、数据列表记录，数据有效位数正确 1 分

3、结果有效位数 1 分

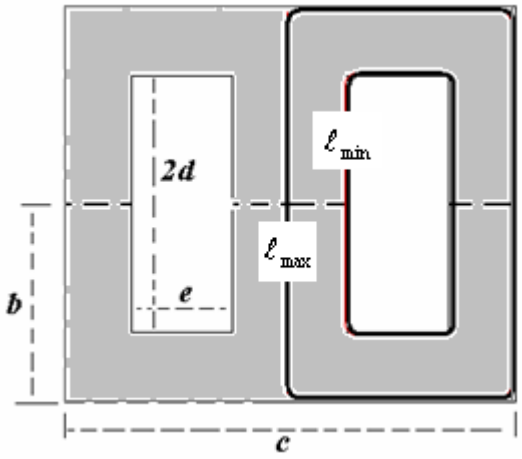
4、结果值合理 1 分（合理范围$(0.165--0.178)\times10^{-3}m^3$）

（2）用一对 E 型磁芯和一对初次级线圈可组合成一个 EE 型松耦合变压器，在什么状态下松耦合变压器漏磁最小？若此状态下变压器漏磁可忽略，测量该变压器磁路长度（磁力线长度）的最大值 $\ell_{e\max}$ 和最小值 $\ell_{e\min}$（5 分）

变压器漏磁最小的状态描述：

在 EE 型磁芯正对紧耦合，间隙为零时变压器漏磁最小。

最长磁路和最短磁路的示意图



数据记录和处理

如上图所示

最长磁路长度为：$\ell_{\max} = 4b + c = 338.00mm$

最短磁路长度为：$\ell_{\min} = 4d + 2e = 193.64mm$

评分：

5、正对，间隙为零，1 分

6、示意图 1 分

7、最长磁路 1 分（$\pm 4mm$以内）

8、最短磁路 1 分（$\pm 4mm$以内）

9、五位有效数字 1 分

（3）已知初级线圈 A 的匝数 N_A 为 198.0 匝，测量次级线圈的匝数 N_B。（5 分）

线圈编号：_____

在漏磁最小的情况下，用数字电桥测量初级线圈 A 的电感 L_A 和次级线圈 B 的电感 L_B。
数据如下：

L_A (mH)	L_B (mH)
413.2	142.38

因为在不漏磁情况下，自感系数与线圈的匝数平方成正比。

$$N_B = \sqrt{\frac{L_B}{L_A}} N_A = \sqrt{\frac{142.38}{413.2}} \times 198.0 = 116.2\text{匝}$$

评分：

10、 自感系数测量数据正确 2 分（样器测量值±15mH）

11、 公式 2 分

12、 结果值 1 分（116 匝 1 分, 115 匝, 117 匝得 0.5 分，其他不得分）

（4）估算该 E 型铁氧体磁芯的相对磁导率 μ_r。（5 分）

$$L \approx \frac{\mu_0 \mu_r N^2 S_e}{\ell_e}$$

$$\mu_r \approx \frac{L \cdot \ell_e}{\mu_0 N^2 S_e}$$

$$\ell_e \approx \frac{\ell_{e\max} + \ell_{e\min}}{2} = \frac{338.00 + 193.64}{2} = 265.82mm$$

磁芯中间的截面大小长为 36.28mm，宽为 36.68mm

磁芯中间的截面积:

$$S_e = a * f = 36.28 \times 36.68 = 1330.75(mm)^2 = 1.331 \times 10^{-3} m^2$$

$$\mu_r \approx \frac{L_A \cdot \ell_e}{\mu_0 N_A^2 S_e} = 1675$$

或

$$\mu_r \approx \frac{L_B \cdot \ell_e}{\mu_0 N_B^2 S_e} = 1682$$

评分：

13、 测量公式 $\mu_r \approx \frac{L \cdot \ell_e}{\mu_0 N^2 S_e}$ 2 分

14、 有效截面积 S_e 1 分

15、 有效磁路长度 ℓ_e 1 分

16、 结果值合理 1 分（样器测量值±200）

（5）在室温环境中，判断该 E 型铁氧体磁导率与温度是正相关还是负相关？说明判断依据。（2 分）

正相关关系

用人体手温给磁芯加热时，L 值增大。

评分：

17、 正相关 1 分，依据 1 分。

得分	

2、最大耦合系数测量(本部分 14 分)

测量原理：

初、次级线圈间漏磁最小时，互感系数最大，耦合系数最大。即松耦合变压器的间隙为零时耦合系数最大。

在 EE 型松耦合变压器中，设两个线圈的自感系数分别为 L_A 和 L_B，互感系数为 M；将两个线圈串联起来，测量其总的自感系数为 L；串联方式有两种：首尾相接为顺串，尾尾相接为逆串，其相互关系式如下：

顺串：$L_{顺} = L_A + L_B + 2M$ (1)

逆串：$L_{逆} = L_A + L_B - 2M$ (2)

由（1）或（2）式可得互感系数 M。

$$M_1 = \frac{L_{顺} - L_A - L_B}{2}$$

或：$M_2 = \frac{L_A + L_B - L_{逆}}{2}$

耦合系数为：

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_A \cdot L_B}} \qquad (3)$$

方法 1，顺串时：$k_1 = \frac{L_{顺} - L_A - L_B}{2\sqrt{L_A \cdot L_B}}$ （4）

方法 2，逆串时：$k_2 = \frac{L_A + L_B - L_{逆}}{2\sqrt{L_A \cdot L_B}}$ （5）

数据记录和处理

单位：mH

L_A	L_B	$L_{顺}$	$L_{逆}$
413.2	142.38	1060.4	85.63

$M_1 = 252.41mH$

$M_2 = 234.98mH$

$k_1 = 1.041$

$k_2 = 0.9687$

不一致的主要原因。

产生系统误差的主要原因：由于初次级线圈磁场的相互作用引起顺串（或逆串）时漏磁情况发生变化。

评分：

18、 测量方法 3 分 （间隙为零 1 分，顺串逆串 2 分）

19、 公式 5 分[（1），（2），（3），（4）和(5)式各 1 分，]

20、 数据顺串和逆串自感系数 L 测量 2 分。

21、 耦合系数计算 2 分

22、 误差原因 2 分(漏磁情况发生变化 2 分，漏磁 1 分)。

得分	

3、测量耦合系数与间隙的关系（本部分 24 分）

（1）测量 EE 型松耦合变压器的耦合系数与气隙间距的关系。（20 分）

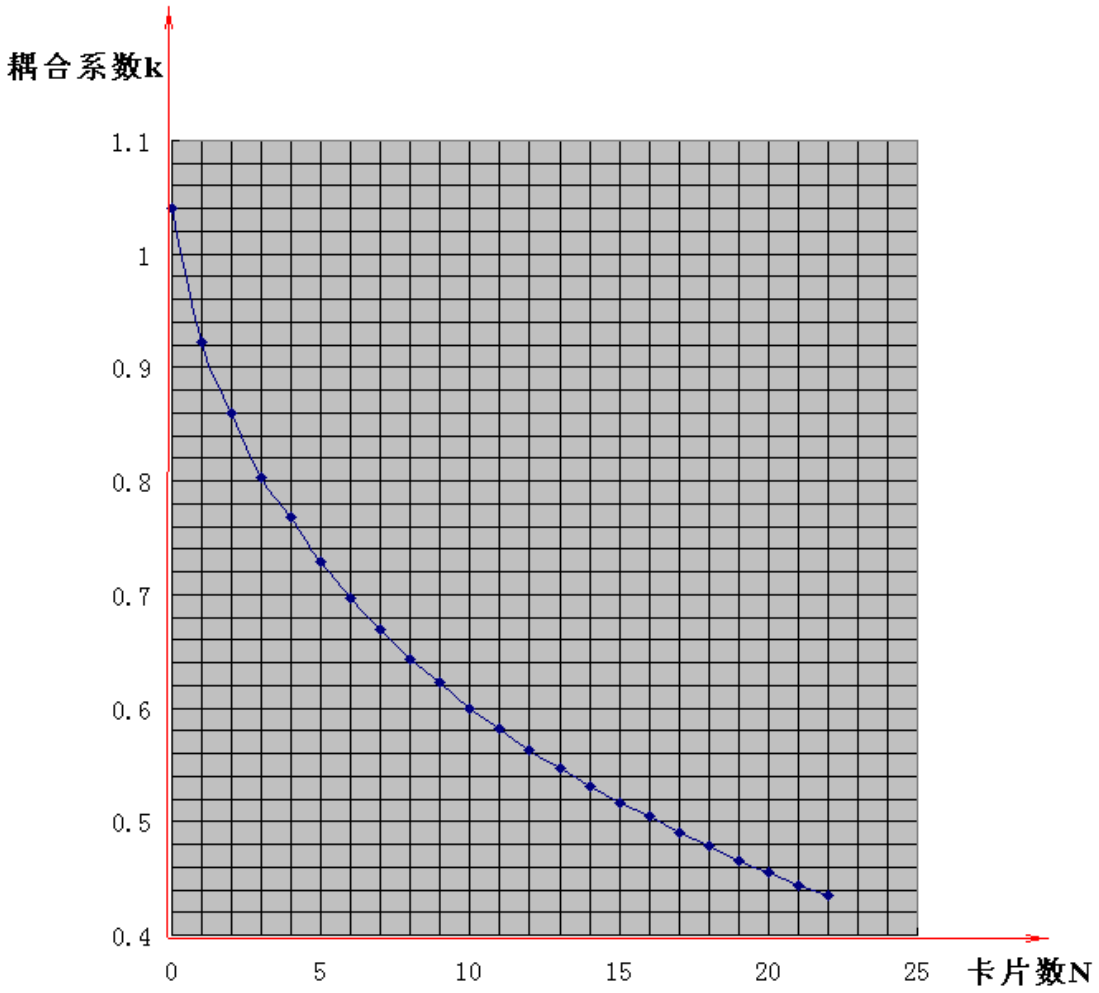
简述实验方案

将纸卡片垫入 EE 型松耦合变压器磁芯中心柱之间，以纸片的张数为单位，垫入纸片的张数代表松耦合变压器的间隙间距 h；在松耦合变压器的不同间隙间距时，测量相应的自感系数、互感系数和耦合系数。实验方法与实验 2 相同。

列表记录数据、处理数据

卡片张数N	L_A（mH）	L_B(mH)	L_+(mH)	M(mH)	k
0	413.2	142.38	1060.4	252.41	1.041
1	109.71	37.945	266.71	59.5275	0.9226
2	69.36	23.741	162.91	34.9045	0.8601
3	53.29	18.213	121.57	25.0335	0.8035
4	44.42	15.28	99.69	19.995	0.7675
5	38.871	13.424	85.6	16.6525	0.729
6	35.089	12.152	76.04	14.3995	0.6973
7	32.288	11.193	68.95	12.7345	0.6699
8	30.138	10.47	63.47	11.431	0.6435
9	28.442	9.893	59.22	10.4425	0.6225
10	27.074	9.429	55.67	9.5835	0.5998
11	25.924	9.04	52.79	8.913	0.5822
12	24.945	8.707	50.27	8.309	0.5637
13	24.131	8.427	48.14	7.791	0.5463
14	23.405	8.181	46.3	7.357	0.5317
15	22.785	7.97	44.66	6.9525	0.5159
16	22.221	7.78	43.26	6.6295	0.5042
17	21.73	7.613	41.95	6.3035	0.4901
18	21.291	7.46	40.83	6.0395	0.4792
19	20.892	7.325	39.748	5.7655	0.4661
20	20.534	7.202	38.809	5.5365	0.4553
21	20.212	7.092	37.93	5.313	0.4438
22	19.911	6.991	37.154	5.126	0.4345

实验数据处理作图如下：



耦合系数 k 与气隙间距 h（以纸片的张数为单位）的关系曲线。

23、 实验方案 4 分
24、 实验数据列表 1 分
25、 20 组以上实验数据 5 分（20 组以上 5 分，15-19 组 4 分，10-14 组 3 分，5-9 组 2 分，1-4 组 1 分）
26、 数据计算 5 分
27、 实验曲线 5 分（纵坐标平移合理 1 分，坐标标度 1 分，图名 1 分，实验点 1 分，曲线光滑 1 分）
28、 用逆串的方法做测量，评分标准参见顺串情况。

（2）当耦合系数为 0.55 时， 该 EE 型松耦合变压器的气隙间距为多少毫米？（4 分）

从图中可以看出，耦合系数为 0.55 时，卡片的张数位于 12 张和 13 张之间。用游标卡尺可以测出 12 张和 13 张卡片的厚度分别为：3.26mm 和 3.50mm。

间隙卡片数（张）	12	13
间隙间距 h(mm)	3.26	3.50
耦合系数 k	0.5637	0.5463

从图中可以看出，在 12 张和 13 张卡片之间，耦合系数与间隙间距可以近似为线性关系，所以有耦合系数为 0.55 时的间隙有

$$h_{0.55} = 3.26 + \frac{3.50 - 3.26}{0.5637 - 0.5463} \times (0.5637 - 0.5500) \approx 3.45mm$$

评分：

29、 纸张数判断正确 1 分（在 12 张和 14 张纸之间）

30、 线性近似计算公式 1 分

31、 计算结果 2 分(在 3.00mm---4.00mm 范围内 1 分，3 位有效数字 1 分)

第 36 届全国中学生物理竞赛决赛

实验题 II 光偏及应用研究答题纸

竞赛时间：2019 年 10 月 27 日　　所需时间：90 分钟

成绩评定表

题序	1	2	3	总分
得分				
评卷人				
审核人				

提示卡使用情况（请监考老师在相应位置上签名）

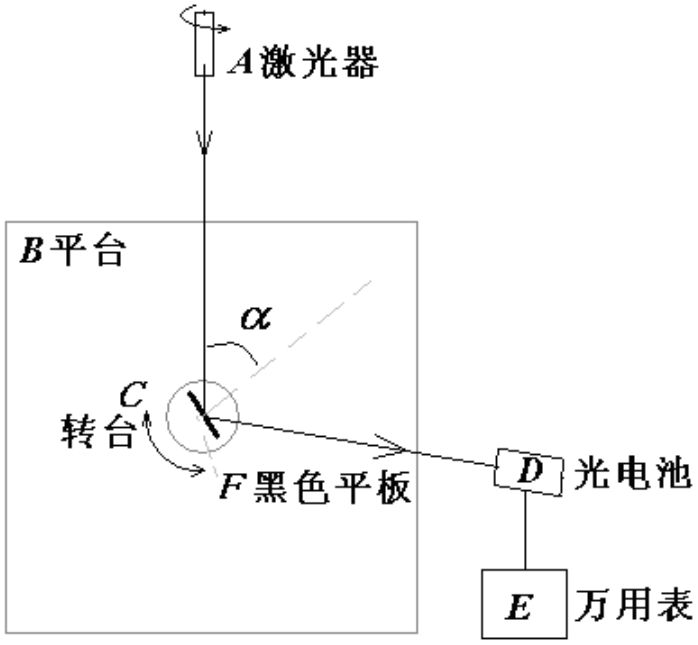
提示卡	使用提示卡 1	使用提示卡 2
监考人员签名		

得分	

1、测量黑色平板的折射率（本部分 22 分）

（1）请设计出测量黑色平板折射率的实验方案。（14 分）

画出测量原理图。



评分：

1、正确画出测量原理图 4 分（原理图 2 分，其中标注激光源、黑色平板，光电池，万用表各 0.5 分）

写出测量的关键步骤和测量公式。

(a)将待测黑色平板固定于转动平台，转动平台中心轴处在待测平面上。

(b)调整激光源使激光光线通过转动平台中心轴，并垂直于与黑色平板表面。

(c)在激光光线方向不变时，以激光光线为轴转动激光源(或者激光源处加偏振片，转动偏振片)至某一角度，然后转动转台，肉眼观察反射光强 I 随入射角 α 的变化；多次转动激光源（或偏振片），当反射光强随入射角变化最明显时在三维调节架上固定激光器（或停止转动偏振片）。

(d)用万用表的微安挡，测量反射光的光电流，转动转台 C，观测光电流变化，用逐渐逼近法确定，当光电流为最小时，记录转动臂的角坐标 θ_1，此位置对应的入射角为布儒斯特角 α_0。

(e)转动转台 C，使反射光在另一侧时，同理测量当布儒斯特角 α_0 入射时，反射光的光电流最小，转动臂对应的角坐标为 θ_2。

(f)测量公式：

$$\alpha_0 = \frac{|\theta_2 - \theta_1|}{4} \text{或者} \alpha_0 = \frac{360^0 - |\theta_2 - \theta_1|}{4} \text{或者} \alpha_0 = \frac{180^0 - |\theta_2 - \theta_1|}{2}$$

$$n = \tan\alpha_0$$

评分：

2、测量步骤 5 分（其中(a)0.5 分、(b)0.5 分、(c)2 分、(d)1 分、(e)1 分）

3、测量公式 2 分（α_0, n 公式各1分 ）

说明减少系统误差方法。

(a)双侧测量布儒斯特角（相当于分光计左右读数窗）。

(b)调整激光光路通过转台 C 的中心轴，并与中心轴垂直。

(c)转动激光源至最佳角度（反射光光强随入射角变化最明显）。

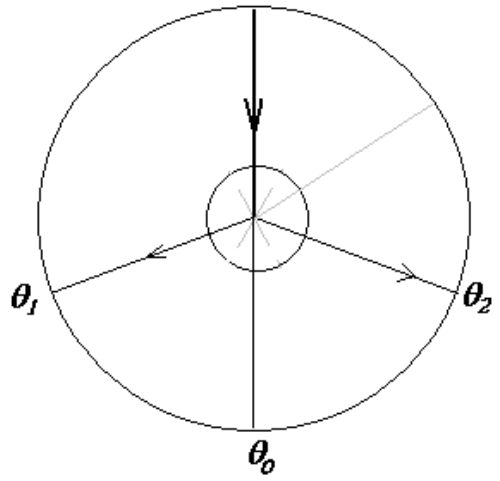
评分：

4、3 个方法 3 分（每个方法得 1 分）

（2）（单次测量）测出黑色平板的布儒斯特角和折射率。（8 分）

光路示意图。

转动平台，用逐渐逼近法确定反射光的光电流为极小时，测出相对应的角位置坐标θ_1和θ_2，光路示意图为：



数据记录

方法 1（双侧测量）：

左侧角坐标θ_1（度）	右侧角坐标θ_2（度）
73.2	293.0

数据处理

布儒斯特角为α_0，则有：

$$\alpha_0 = \frac{293.0 - 73.2}{4} = 54.95^0 \approx 55.0^0$$

方法 2（单侧测量）：

左侧测量

左侧角坐标θ_1（度）	中间角坐标θ_0（度）
73. 2	3. 5

数据处理

布儒斯特角为α_0，则有：

$$\alpha_{01} = \frac{180.0 - (73.2 - 3.5)}{2} = 55.15^0$$

或者右侧测量，同理有：$\alpha_{02} = \frac{293.0 - 180.0 - 3.5}{2} = 54.75^0$

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_{01} + \alpha_{02}}{2} = 55.0^0$$

评分：

5、光路示意图 2 分（光路图 1 分，方向标注 0. 5 分，角度标注 0. 5 分）

6、数据记录 1 分（有效数字和单位正确 1 分）

7、布儒斯特角为α_0结果正确 3 分

结果在[54. 8, 55. 8]范围内 3 分；结果在[54. 3, 54. 8）或（55. 8, 56. 3]范围内 2 分；结果在(53. 8, 54. 3)，或（56. 3，56. 8）范围内 1 分，其他情况不得分。

8、 布儒斯特角为α_0只有单侧测量，光路示意图 1 分，数据记录 1 分，结果在[54. 3， 56. 3]范围内 1 分。

黑色平板的折射率。（2 分）

测量公式：$n = \tan\alpha_0$

$n = \tan 55.0 = 1.4281$

角坐标的最小刻度值为 1 度，设系统误差为 0. 5 度

$$\Delta n = \frac{\Delta\alpha_0}{\cos^2\alpha_0} = \frac{1}{\cos^2 55.0} \times \frac{0.5}{180} \times \pi = 0.027$$

所以折射率取三位或四位有效数字

$n = 1.43$或$n = 1.428$

评分：

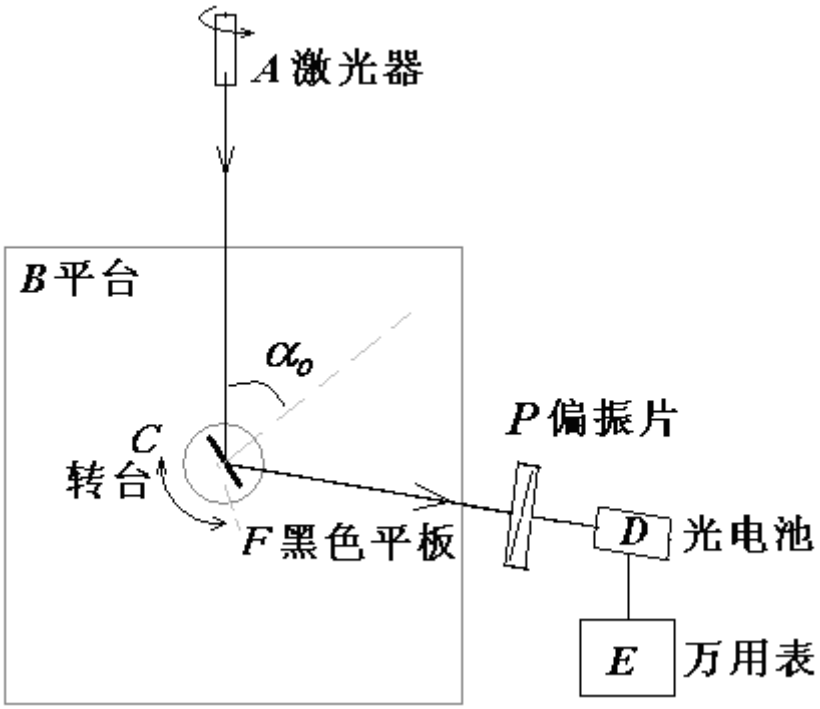
9、数值计算 2 分[折射率数据范围（1. 39, 1. 50）1 分，有效数字 3 位或 4 位 1 分]。

得分	

2、实验研究光电池的光电流与入射光强之间的关系。（本部分 22 分）

（1）测量偏振片的偏振化方向与偏振片指针的夹角，画出测量光路图并简述测量方法，列表记录多次测量的实验数据，并写出结果表达式。（10 分）

测量原理图



测量方法

在激光以布儒斯特角α_0入射黑色平板情况下，转动激光器 A，使反射光强较强时在三维调节架上固定激光器，以此保证黑色平板反射后产生有一定光强的线偏振光源，光矢量垂直于入射面。再在光路中放入偏振片 P，旋转偏振片观测透过光的光电流信号大小，记录光电流最大或最小时偏振片指针的角坐标β。光电流最大时，偏振片偏振化方向垂直于入射面，为竖直方向；光电流最小时，偏振片偏振化方向平行于入射面，为水平方向。

数据记录和处理

偏振片的编号：_____

光电流	极大	极小	极大	极小
光电流极值处角坐标 β（度）	69.8	158.0	249.0	337.5
偏振化方向与指针的等效夹角 $\Delta\beta$	69.8	68.0	69.0	67.5
光电流	极大	极小	极大	极小
光电流极值处角坐标 β（度）	68.5	160.0	250.0	339.8
偏振化方向与指针的等效夹角 $\Delta\beta$	68.5	70.0	70.0	69.8
$\Delta\beta$ 的平均值 $\overline{\Delta\beta}$（度）	69.075 取 69.1			

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{8\times 7}[\sum_{k=1}^{8}(x_k - \bar{x})^2]} = 0.35^0$$

取 $\Delta_{仪} = 0.5^0$

$$u_B = \frac{\Delta_{仪}}{\sqrt{3}} = 0.29^0$$

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.5$$

$$\Delta\beta = \overline{\Delta\beta} \pm u = 69.1^\circ \pm 0.5^\circ$$

评分：

10、 原理图 2 分（图 1 分，布儒斯特角 α_0 标注 0.5 分，偏振片标注 0.5 分）。

11、 测量方法 2 分（较强线偏振光的产生 1 分，旋转偏振片测量 1 分）。

12、 数据记录 2 分（列表 1 分，6 次及以上多次测量 1 分）。

13、 数据处理 2 分（A 类不确定度 0.5 分，B 类不确定度 0.5 分，结果表达式 1 分）。

14、 结果正确 2 分（结果偏差 $\Delta \le 2^0$，表达式合理 2 分；结果偏差 $2^0 < \Delta \le 3^0$，且表达式合理 1 分；超出此范围 0 分）。

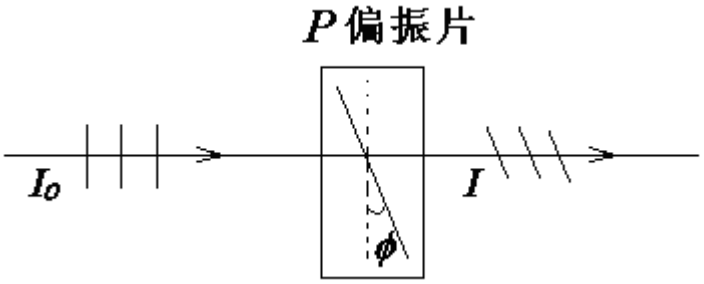
（2）用万用表测量光电池在不同光强照射时的短路电流（万用表电流档内阻可忽略不计），判定光电流与入射光强的关系。请设计实验方案，列表记录和处理实验数据，作图并判定其关系。（12 分）

实验方案

利用上题中光路图，经黑色平板布儒斯特角反射后产生较强的线偏振光入射到偏振片，设入射光强为I_0，出射光强为I，入射光光矢量与偏振片的偏振化方向的夹角为ϕ，由马吕斯定律$I = I_0 \cos^2\phi$可知，出射光强I与$\cos^2\phi$成线性关系。

因此偏振片出射光的光电流i与$\cos^2\phi$的关系即为光电流i与光强I的关系。

测量原理图如下，旋转偏振片改变ϕ，测量光电流$i(\phi)$，作图研究光电流i与$\cos^2\phi$的关系。



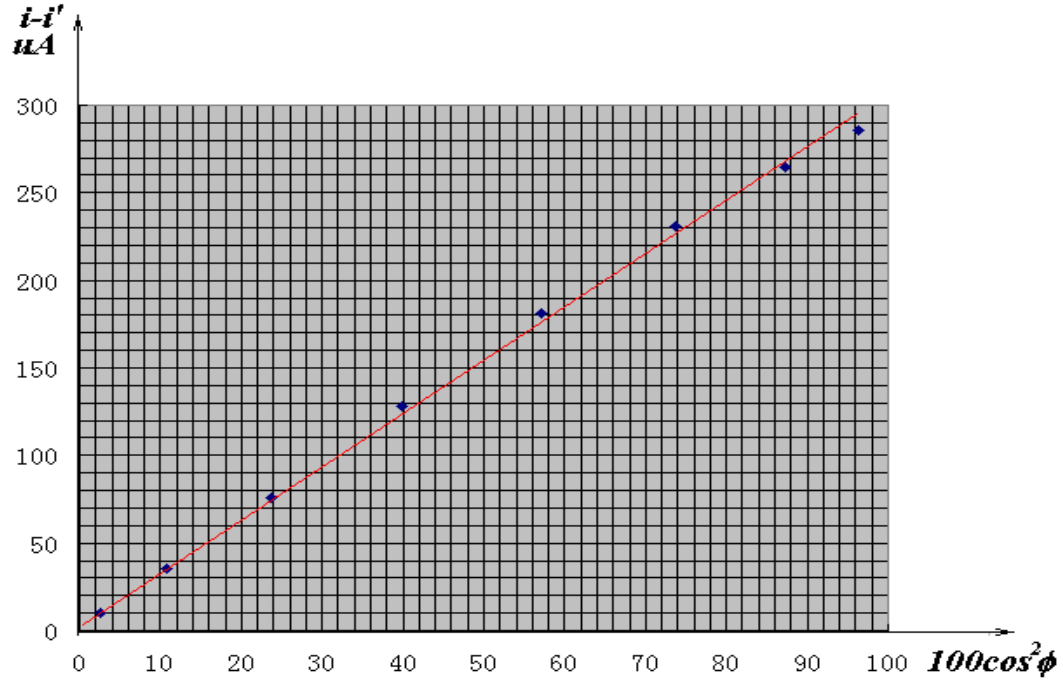
实验数据记录和处理

本底光电流$i' = 0.3\mu A$，　$\Delta\beta = 69.1^0$

测量光电流i与指针角坐标β关系如下：

β（度）	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
光电流 i（μA）	286	265	231	181.1	128.7	75.8	36.1	10.0
$\phi = \beta - \Delta\beta$（度）	10.9	20.9	30.9	40.9	50.9	60.9	70.9	80.9
$100 * \cos^2\phi$	96.4	87.3	73.6	57.1	39.8	23.7	10.7	2.5
去本底光电流 $i - i'$（μA）	285.7	264.7	230.7	180.8	128.4	75.5	35.8	9.7

作图，判定光电流与光强关系



去本底后的光电流 $i-i'$ 与 $100*\cos^2\phi$ 的关系图

从图中可以看出，光电流与 $\cos^2\phi$ 有较好的线性关系，所以光电流与光强也为线性关系。

评分：

15、 实验方案 3 分（线偏振光产生并入射偏振片 1 分，马吕斯定律公式 1 分，测量光电流 i 与 $\cos^2\alpha$ 的关系 1 分 。

16、 背景本底光电流测量 1 分

17、 实验数据 3 分（列表 1 分，6 组以上 1 分，列表计算 $\phi,(\cos\phi)^2$ 0.5 分，列表计算 $i-i'$ 0.5 分）

18、 作图 3 分（坐标轴物理量及单位，坐标轴标度，图名，6 个实验点以上各 0.5 分, 光滑直线 1 分）

19、 结论 2 分

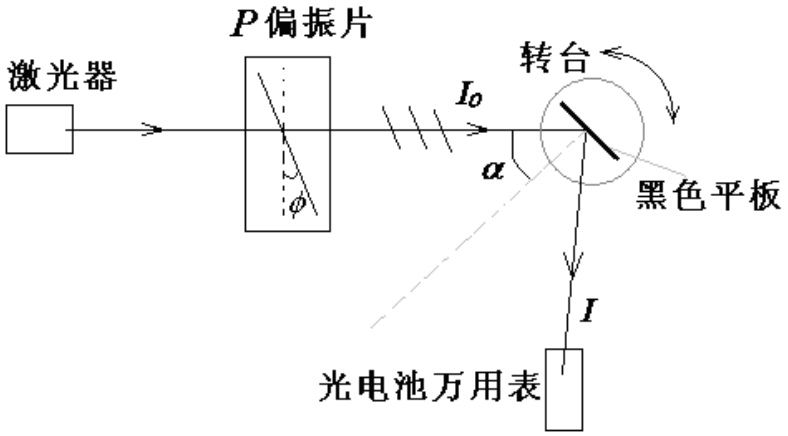
得分	

3、线偏振光入射黑色平板时，测量其光强反射率。（本部分 16 分）

（1）测量光矢量平行于入射面的线偏振光在黑色平板上的光强反射率与入射角的关系曲线，列表记录实验数据并作图（14 分）。

测量方案

原理图如下：



简要步骤：

(a)转动偏振片，使偏振片指针指向 90+69.1=159.1 度。

(b)在激光光路经过转台中心轴，并垂直于黑色平板表面情况下，转动激光器使激光通过偏振片的光强较强。

(c)在没有黑色平板情况下，测量背景本底光电流 i_0' 和激光源的出射光光电流 i_0，并测量此时激光光线在光学平台上的角坐标位置 θ_0。

(d)装上黑色平板，转动转台，测量不同的入射角 α 时反射光的光电流 i 和本底 i'，此时光电池所在转动动臂的角坐标为 θ。

测量公式：

$$\text{入射角}:\alpha=\frac{180-|\theta-\theta_0|}{2}$$

$$\text{反射率}:R=\frac{i-i'}{i_0-i_0'}$$

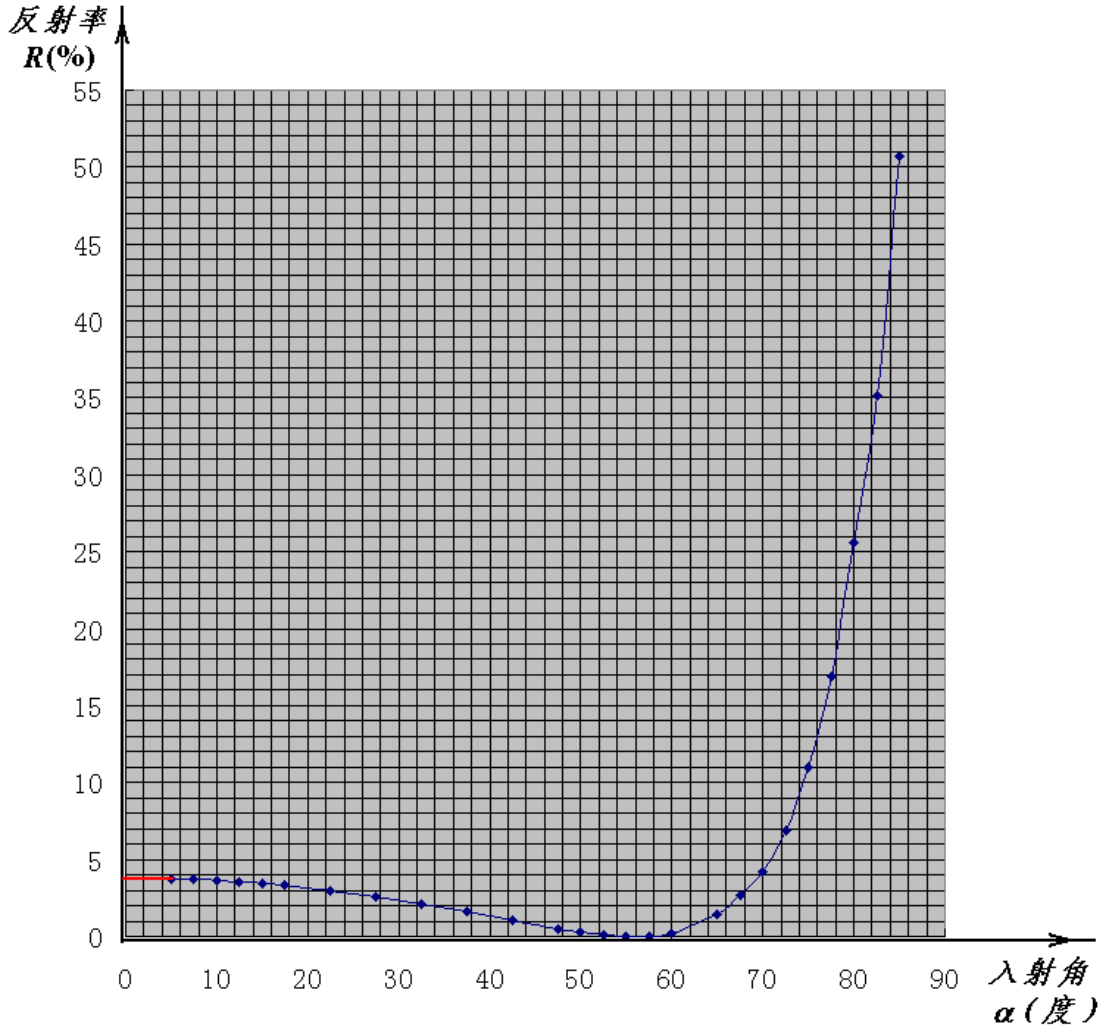
实验数据记录和处理。

没有黑色平板反射时：

$i_0 = 2.30\times10^3\,\mu A, \theta_0 = 5.0$度$= (365^0)$，本底光电流$i_0' = 0.6\mu A$.

有黑色平板反射时：

θ（度）	355.0	350.0	345.0	340.0	335.0	330.0	325.0
反射光$i(\mu A)$	1166	808	589	388	253	158.7	97.3
本底光电流$i'(\mu A)$	00.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
入射角α（度）	85.0	82.5	80.0	77.5	75.0	72.5	70.0
$i-i'(\mu A)$	1165.4	807.5	588.6	387.7	252.7	158.4	97.0
反射率 R（%）	50.7	35.1	25.6	16.9	11.0	6.89	4.22
θ（度）	320.0	315.0	305.0	300.0	295.0	290.0	285.0
反射光$i(\mu A)$	61.5	33.6	3.9	0.3	0.5	3.5	6.5
本底光电流$i'(\mu A)$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
入射角α（度）	67.5	65.0	60.0	57.5	55.0	52.5	50.0
$i-i'(\mu A)$	61.2	33.3	3.6	0.0	0.2	3.1	6.1
反射率 R（%）	2.66	1.45	0.16	0.00	0.00	0.13	0.26
θ（度）	280.0	270.0	260.0	250.0	240.0	230.0	220.0
反射光$i(\mu A)$	11.9	24.6	38.2	49.1	59.7	69.7	77.0
本底光电流$i'(\mu A)$	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	1.1
入射角α（度）	47.5	42.5	37.5	32.5	27.5	22.5	17.5
$i-i'(\mu A)$	11.4	24.0	37.6	48.4	58.9	68.9	75.9
反射率 R（%）	0.50	1.04	1.63	2.10	2.56	3.00	3.30
θ（度）	215.0	210.0	205.0	200.0	195.0		
反射光$i(\mu A)$	80.4	82.0	84.6	86.2	86.9		
本底光电流$i'(\mu A)$	1.2	1.3	1.4	1.4	2.0		
入射角α（度）	15.0	12.5	10.0	7.5	5.0		
$i-i'(\mu A)$	79.2	80.7	83.2	84.8	84.9		
反射率 R（%）	3.44	3.50	3.62	3.69	3.69		



反射反射率R（%）与入射角α（度）的关系图

（2）测出该线偏振光垂直入射黑色平板时的光强反射率（2 分）。
利用外推法，从上图的引长线可知，该线偏振光垂直入射黑色平板时的反射率为$R \approx 3.8\%$

评分：

20、 原理图 2 分（图 1 分，标注 1 分）

21、 测量方法 4 分（偏振片指针位置正确 1 分，较强光强 1 分，测量入射光电流i_9与本底光电流i'1 分，测量θ_0与θ 1 分）

22、 测量公式 2 分（入射角公式 1 分，反射率公式 1 分）

23、 实验数据 3 分（列表 1 分，计算 R 及有效数字 1 分，20 组及以上 1 分）

24、 作图 3 分（坐标轴物理量及单位、标度、图名、20 点以上各 0.5 分，光滑曲线 1 分）

25、 反射率结论 2 分（3-5%）