

磁光克尔效应

黄康靖

2012 级 masked student id^{*}

(日期: April 27, 2015)

1877 年, 克尔发现平面偏振光从光洁磁极表面反射时, 偏振面会发生微小的偏转, 后人称为克尔效应. 克尔效应是磁光效应的一种, 自发现以来, 在物理学的各个分支学科与技术中, 都有着广泛的应用. 磁光克尔效应背后的机理值得研究. 本实验通过光弹调制器调制从磁光克尔样品上, 经极克尔效应反射回来的光线, 并通过微机控制的锁相放大器测量微小信号, 测定了样品的克尔磁滞回线, 并且计算得出了样品的饱和克尔转角与矫顽力.

关键词: 磁光效应, 克尔效应, 磁滞回线, 锁相放大器, 微机控制, 自动测量, 微弱信号测量

^{*} huangkangjing@gmail.com

I. 引言

1845 年, 法拉第观察到平面偏振光在穿过在光的传播方向加有磁场的玻璃时, 偏振面的角度会发生旋转, 是为法拉第效应. 1877 年, 克尔发现平面偏振光从光洁磁极表面反射时, 偏振面会发生微小偏转, 是为克尔效应. 1896 年, 塞曼发现, 当光源置于磁场中时, 原来的一条谱线会分裂成几条偏振化的谱线, 是为塞曼效应. 这些效应反映了物质磁化状态对其光学性质的影响, 被统称为磁光效应.

借助磁光效应可以用光学方法探测物质的磁化状态, 亦可通过施加不同的外磁场来改变物质对光场的响应行为来实现一些应用目的. 因此, 磁光效应在物理学的诸多分支和应用中都有着重要的应用.

另一方面, 由于磁光克尔效应观察的是样品表面的反射光, 不要求样品透明, 所以其适用范围相对更宽. 自上世纪 50 年代以来, 磁光克尔效应及其相关技术在各个分支的物理学中, 都得到了充分的发展和应用.

本实验通过测量一个磁性薄膜的磁光克尔磁滞回线, 研究了克尔效应的基本原理, 探究了相关的测量技术, 并且测得了样品的饱和克尔转角值和矫顽力.

II. 原理

A. 磁光效应的唯象理论

光在介质分界面的反射与折射现象可以用菲涅尔公式准确地描述. 而在光频段, 相对磁导率可以看作 1, 折射率由介电常数决定, 因此, 相关的推导可以从介电常数入手.

最一般的情况下, 介电常数是一个复张量, 可以记作

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

假设在磁光介质中, 只有磁化沿着 z 方向所引起的各向异性, 那么由空间对称性分

析和时间反演不变性可以得到

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon & \delta & 0 \\ -\delta & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{pmatrix} = \epsilon_0 n^2 \begin{pmatrix} 1 & -iQ & 0 \\ iQ & 1 & 0 \\ 0 & 0 & n_z^2/n^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中 ϵ_0 为真空介电常数, n 为平均复折射率, 是 \mathbf{M} 的偶函数, $Q = \frac{-i\delta}{\epsilon_0 n^2}$ 是 \mathbf{M} 的奇函数, 称为复磁光系数.

采用新的坐标系, 可以将介电常数张量对角化为:

$$\epsilon = \epsilon_0 n^2 \begin{pmatrix} 1+Q & 0 & 0 \\ 0 & 1-Q & 0 \\ 0 & 0 & n_z^2/n^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_+^2 & 0 & 0 \\ 0 & n_-^2 & 0 \\ 0 & 0 & n_z^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中 $n_{\pm}^2 = n^2(1 \pm Q)$

由于 $Q \ll 1$, 有

$$n_{\pm} = n\sqrt{1 \pm Q} \approx n(1 \pm \frac{Q}{2}) \quad (4)$$

$$n = \frac{n_+ + n_-}{2} \quad (5)$$

沿磁化强度方向传播的光的本征态为左旋或者右旋偏振光, 对应的折射率之差为 nQ .

考虑入射光垂直入射到介质表面时, 产生的极克尔效应, 按以上的推导以及菲涅尔公式, 可以得到, 入射的线偏振光在经过克尔介质反射之后, 将会成为长轴方向与原线偏振光有一定夹角的椭圆偏振光, 这一行为可以用复克尔转角表述:

$$\widetilde{\theta_K} = \theta_k + i\epsilon_k \approx -i \frac{nQ}{1 - n^2} \quad (6)$$

其中, θ_k 为克尔转角, 即为椭圆偏振光相对长轴转过的角度, 而 ϵ_k 则为克尔椭圆偏率, 为出射椭圆偏振光的椭圆偏率.

B. 磁光常数的动力学解释

磁光常数的动力学解释可以由经典电动力学中的介质极化和色散的振子模型得到[1][2], 其表达式应为:

$$Q = -\frac{2Ne^2\omega_0\omega_L/m\epsilon_0}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega) \left[(\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega) + \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \right]} \quad (7)$$

式中 $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ 为振子的固有频率, ω 为光场的振荡频率, 而 $\omega_L = \frac{e}{2m}B$ 为电子轨道在外磁矩中的经典拉莫尔进动角频率.

III. 实验

A. 实验装置

实验装置的方框图如图 1 所示

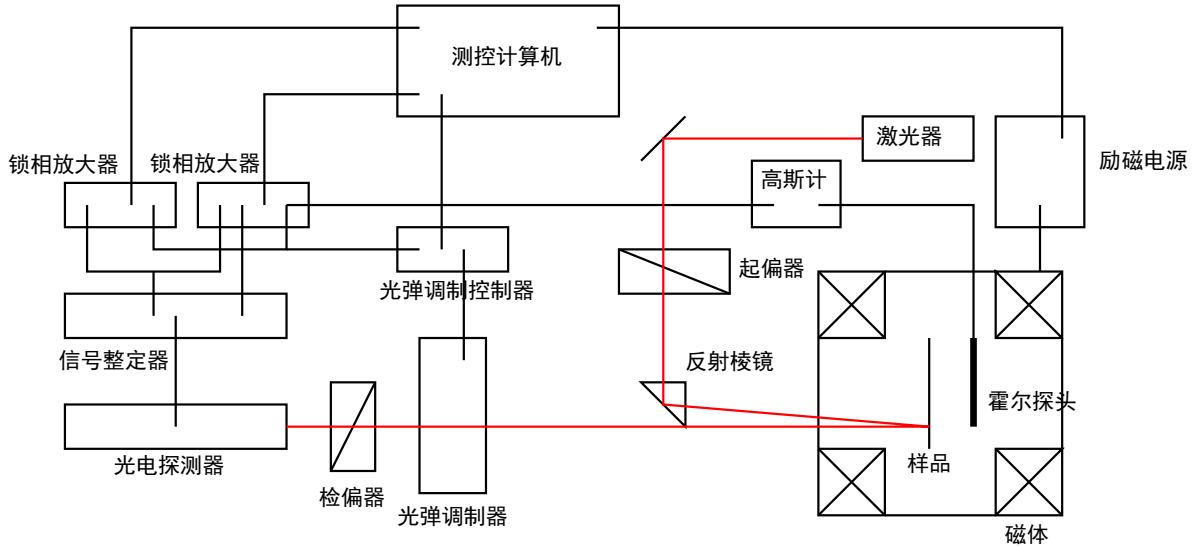


图 1: 此为实验装置的示意图, 通过一台测控计算机, 经 COM 口连接各测量设备, 并利用锁相放大器的 A/D 转换功能, 收集各模拟信号输出的探测器数据, 再在计算机上通过程序控制, 实现克尔磁滞回线的扫描测量. 具体的测量原理参见 III B

B. 实验具体原理与测量公式

下面来简述一下上述实验装置的具体原理与测量公式.

在本实验的实验装置中, 采用了锁相放大器作为光电探测器的放大设备, 以及作为高斯计模拟信号输出转换成计算机可以直接理解的数字信号输入这一转换桥梁的 A/D 转换器. 为了能够实现锁相放大器放大微小信号的功能, 实验中测得的光强变化频率和锁定放大器的参考信号频率之间必须具备确定的频率关系. 实验通过光弹调制器的调制保证了这一点.

任何一个纯偏振态都可以表示为两个独立偏振模的叠加, 如果以对应的独立偏振模为基, 任何纯偏振态都可以用一个二维矢量表示, 而一个改变偏振态的线性光学器件的效应则可以用一个二维矩阵表示, 是为琼斯矩阵.

取光沿着 $-z$ 方向传播, 并且光弹调制器的振动轴沿着 x 方向, 容易得出, 光弹调制器与角度为 45° 的检偏器的琼斯矩阵分别为.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中 δ 为经过光弹调制器后, 光的 y 方向电场分量相对于 x 方向电场分量的相位延迟量.

当测量的是极克尔效应时, 琼斯矩阵应该为

$$\begin{pmatrix} r_F & -k \\ k & r_F \end{pmatrix} \quad (9)$$

将入射光的矢量乘上依次以上各个琼斯矩阵, 并且

$$\delta = \delta_0 \sin \omega t \quad (10)$$

并对光强变化函数的结果作贝塞尔展开,可以得到:

$$\begin{aligned} I(t) &\approx \frac{r_F^2 + k^2}{2} (1 + 2\theta_k \cos \delta - 2\epsilon_k \sin \delta) \\ &= \frac{r_F^2 + k^2}{2} (1 + 2\theta_k J_0(\delta_0) - 4\epsilon_k J_1(\delta_0) \sin \omega t + 4\theta_k J_2(\delta_0) \cos 2\omega t + \dots) \end{aligned} \quad (11)$$

如果取 $\delta_0 = 2.405$ 为零阶贝塞尔函数的零点, 并测出光强信号的直流分量 V_0 , 一次谐波分量 V_ω , 二次谐波分量 $V_{2\omega}$, 即有

$$\theta_k = \frac{\sqrt{2}V_{2\omega}}{4V_0 J_2(\delta_0)} \quad (12)$$

$$\epsilon_k = \frac{\sqrt{2}V_\omega}{4V_0 J_1(\delta_0)} \quad (13)$$

C. 实验测量

在具体实验中, 将会通过线性定标的方法, 来标定克尔转角的测量, 从而可以直接乘以系数得到克尔转角的数值.

实验采用了 632.8 nm 的激光作为光源, 测量了给定样品的克尔磁滞回线.

测量从 -1000 mT 开始, 扫描到正向 1000 mT 后又回到 -1000 mT, 每隔 50 mT 测量一个点.

IV. 实验结果及分析讨论

实验通过程序自动测量得到的磁滞回线数据, 绘制了线性插值的磁滞回线图线 (图 2) 和样条插值的磁滞回线图线 (图 3)

可以注意到, 磁滞回线虽然在 B 轴方向上基本是以 $B = 0$ 作为对称点的, 但是在 θ 轴方向上并不是以零点为对称点, 这是因为测量中存在转角的系统误差而导致的. 这一系统误差的主要来源应该是起偏器与检偏器的角度调节误差而引入的.

因此, 数据处理中, 首先取了所有数据点中最大和最小的 5 个点的角度值取平均,

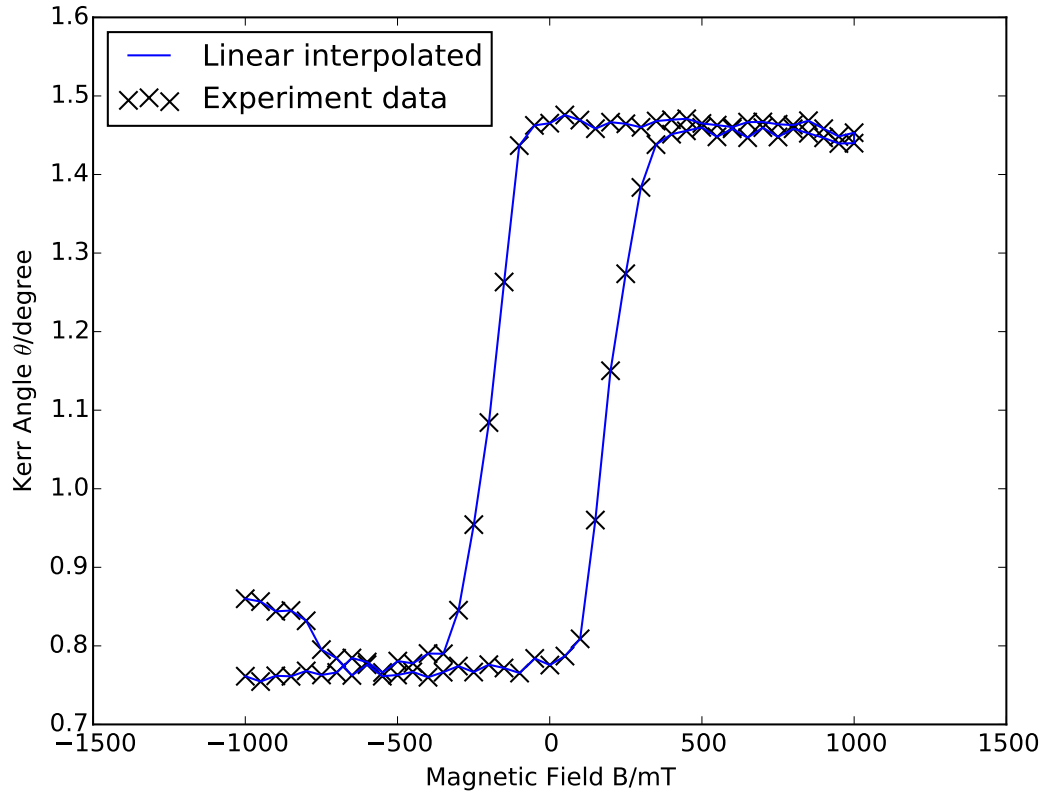


图 2: 磁滞回线的线性插值图线, 如图例所示, 图中蓝线是为线性插值的磁滞回线图, 十字状标定点是为实验测量数据.

分别取为克尔转角的最大值和最小值, 然后二者取差除以二, 从而消除这一系统偏差, 将结果作为饱和克尔转角的测量值.

测量得到饱和克尔转角为:

$$\theta = 0.3555^{\circ} \quad (14)$$

另外, 在数据处理中, 分别对正向的样条差值曲线与负向的样条差值曲线求零点, 得到了正向和负向的矫顽力数值, 正向矫顽力为

$$H_{+} = 1.507 \times 10^5 Am \quad (15)$$

负向矫顽力为

$$H_{-} = -1.511 \times 10^5 Am \quad (16)$$

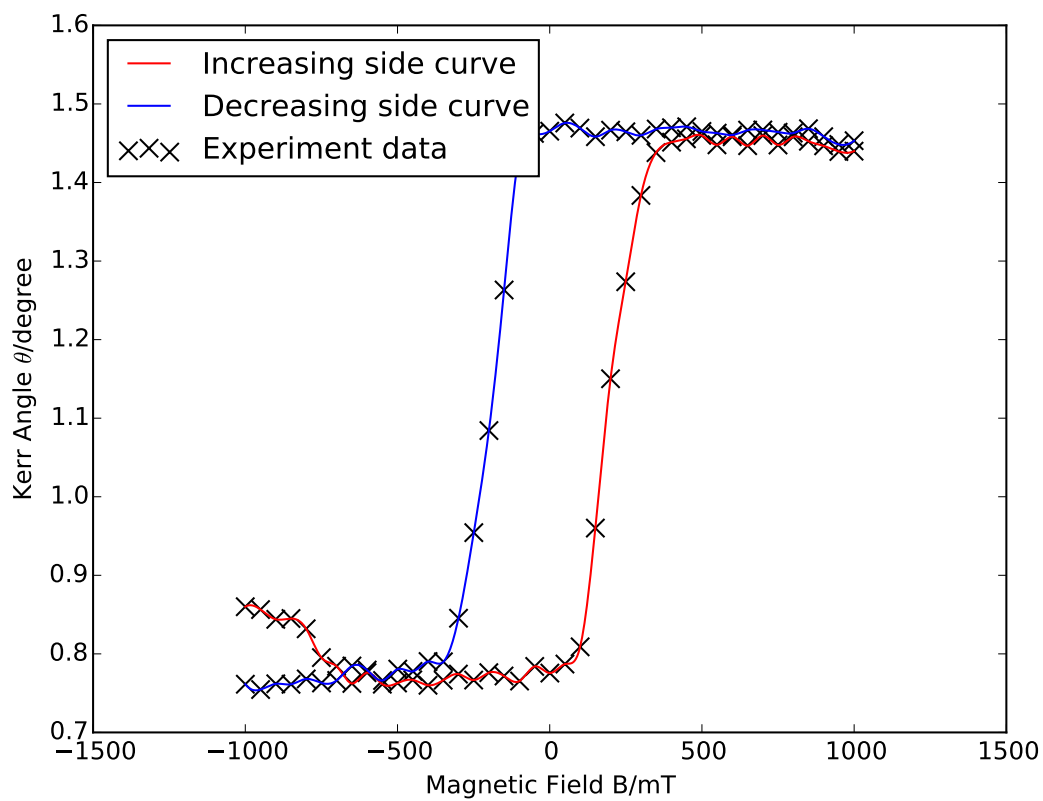


图 3: 磁滞回线的样条插值图线, 如图例所示, 图中红线是为正向增大时的样条插值的磁滞回线图, 蓝线是为负向减小时的样条插值的磁滞回线图, 十字状标定点是为实验测量数据.

二者绝对值的不同, 应当是磁场测量由于霍尔探头的可能漂移和地磁场等因素而引入的误差所导致的.

V. 结论

本实验成功地测量了给定样品的克尔磁滞回线, 并利用磁滞回线的测量数据计算了样品的饱和克尔转角与矫顽力.

VI. 致谢

感谢周路群老师在实验中严谨而细致的指导.

感谢同组的刘照南同学认真而仔细的协助.

- [1] L. D. Landau and E. M. Lifshitz and L. P. Pitaevskii, Electrodynamics of Continuous Media, 2nd Edition, 世界图书出版公司 (2007)
- [2] R. Atkinson and P. H. Lissberger, Sign conventions in magneto-optical calculations and measurements, Applied Optics, Vol.31 (1992) 6076.

A. 思考题

- a. 应该不一样高, 因为锁相放大器对一次谐波分量和二次谐波分量的测量精度应该是不同的
- b. 输出的光强应当也具备周期性变化的特性, 通过半波片的琼斯矩阵应当可以推算出来相关关系, 理论上来说应该可以使用锁相放大器这一套系统进行复克尔转角的测量.

B. 数据处理代码

本实验的所有数据处理和绘图使用 python 语言完成. 具体的处理使用了 python 的 numpy, scipy 和 matplotlib 这数个开放源代码库套件.

相关的处理代码附在文后

data.py

```
1  #!/usr/bin/env python2
2  from matplotlib import pyplot as plt
3  import numpy as np
4  from scipy.interpolate import InterpolatedUnivariateSpline as ius
5  from scipy.optimize import bisect as bs
6  from copy import copy
7  data = '''
8  -1000.1000000000-5.30647541404105E-020.860013439593021
9  -949.9750000000-5.28408094143352E-020.856383997088847
10 -899.8500000000-5.20729892914885E-020.843940038089416
11 -849.9250000000-5.21387717337086E-020.8450061654147
12 -799.9750000000-5.13320485674585E-020.831931709945249
13 -749.9750000000-4.90683050673635E-020.795243518971602
14 -700.2000000000-4.83901370846416E-020.784252540328806
```

15 -649.9UUUUUUUU-4.70388219214658E-02UUU0.762351954520342
16 -600.15UUUUUUUU-4.78853765042068E-02UUU0.776071952479438
17 -549.875UUUUUUUU-4.69794216899358E-02UUU0.761389262838109
18 -499.9UUUUUUUU-4.70737143237943E-02UUU0.762917451061848
19 -449.95UUUUUUUU-4.73181631033159E-02UUU0.766879200043561
20 -399.8UUUUUUUU-4.68963307884461E-02UUU0.76004261960671
21 -349.95UUUUUUUU-4.72937378512328E-02UUU0.76648334321925
22 -300.05UUUUUUUU-4.77740489945072E-02UUU0.774267682279962
23 -249.85UUUUUUUU-0.047303656670089UUUUUU0.766644096202267
24 -200.1UUUUUUUU-4.78849899698874E-02UUU0.776065687968936
25 -150.1UUUUUUUU-4.76237124880034E-02UUU0.771831198437736
26 -99.025UUUUUUUU-0.047226874734163UUUUUU0.765399701539859
27 -49.3UUUUUUUU-4.83753064776643E-02UUU0.784012182646491
28 0.45UUUUUUUUUU-4.78536444473938E-02UUU0.775557675238976
29 49.975UUUUUUUU-4.85616114636211E-02UUU0.787031602869602
30 99.9UUUUUUUUUU-4.99137347265351E-02UUU0.808945285443453
31 149.9UUUUUUUUUU-5.92413989431258E-02UUU0.960117503542358
32 199.75UUUUUUUU-7.09707301767545E-02UUU1.15021322077997
33 249.6UUUUUUUUUU-7.85876799322312E-02UUU1.27366011626697
34 299.6UUUUUUUUUU-8.53675079836319E-02UUU1.3835398912096
35 349.1UUUUUUUUUU-0.08872878389617UUUUUU1.43801564457528
36 400.2UUUUUUUUUU-0.089549536583423UUUUUU1.45131747463279
37 448.95UUUUUUUU-8.98141859486887E-02UUU1.45560661183121
38 499.275UUUUUUUU-9.00835800723359E-02UUU1.45997264670006
39 549.375UUUUUUUU-8.93425815278834E-02UUU1.44796338146796
40 599.375UUUUUUUU-8.99772875057709E-02UUU1.45824997715686
41 650.125UUUUUUUU-8.92753197398012E-02UUU1.4468732785803
42 700.05UUUUUUUU-0.090069159228884UUUUUU1.45973893000091

43 749.875UUUUUUUU-8.93302478572607E-02UUUU1.44776349130232
 44 799.725UUUUUUUU-8.99741016201931E-02UUUU1.45819834393141
 45 849.7UUUUUUUUU-8.96219838426534E-02UUUU1.45249161776431
 46 899.8UUUUUUUUU-8.92663929451906E-02UUUU1.44672860320279
 47 949.8UUUUUUUUU-8.88177690063115E-02UUUU1.43945781446535
 48 999.675UUUUUUUU-8.88436472274759E-02UUUU1.43987721936705
 49 999.9UUUUUUUUU-8.96662125241229E-02UUUU1.45320842614486
 50 949.6UUUUUUUUU-8.93724175012527E-02UUUU1.44844692913527
 51 899.95UUUUUUUUU-8.99813531447674E-02UUUU1.45831586842941
 52 849.95UUUUUUUUU-9.06072161709186E-02UUUU1.46845914757115
 53 799.825UUUUUUUU-9.02651543161011E-02UUUU1.46291539641126
 54 750.15UUUUUUUUU-9.03285948800217E-02UUUU1.46394356922523
 55 699.975UUUUUUUU-9.05103177943285E-02UUUU1.46688872842021
 56 650.025UUUUUUUU-0.090495874330095UUUUUU1.46665464510905
 57 600.025UUUUUUUU-9.01107242652538E-02UUUU1.46041256903823
 58 550.1UUUUUUUUU-9.02595235967469E-02UUUU1.46282414008873
 59 499.975UUUUUUUU-9.03935060662126E-02UUUU1.46499557621949
 60 449.925UUUUUUUU-9.07604577149682E-02UUUU1.47094271297198
 61 399.975UUUUUUUU-0.090685022779988UUUUUU1.46972014897543
 62 349.9UUUUUUUUU-9.05810635150682E-02UUUU1.46803529494286
 63 299.925UUUUUUUU-9.00897818672599E-02UUUU1.46007315836869
 64 250.075UUUUUUUU-9.03666890496494E-02UUUU1.46456095638514
 65 199.9UUUUUUUUU-9.04908004948738E-02UUUU1.46657241413387
 66 150.2UUUUUUUUU-8.99821450516299E-02UUUU1.458328702759
 67 99.025UUUUUUUUU-9.06556952863642E-02UUUU1.46924484217199
 68 49.45UUUUUUUUUU-0.091057520320864UUUUUU1.47575716726673
 69 0UUUUUUUUUUUUUU-0.090412858940442UUUUUU1.46530922568798
 70 -50.2UUUUUUUUUU-9.02387676210874E-02UUUU1.46248775074126

```

71 -100.05uuuuuuuu-8.86535907071909E-02uuu1.43679699852414
72 -149.8uuuuuuuu-7.79402928992487E-02uuu1.26316800039831
73 -199.7uuuuuuuu-6.69010751913643E-02uuu1.08425686163655
74 -249.4uuuuuuuu-5.88837944740374E-02uuu0.954321855292282
75 -299.6uuuuuuuu-0.052160243879768uuuuuu0.845354161640955
76 -349.3uuuuuuuu-4.87414771995882E-02uuu0.789946663021293
77 -399.575uuuuuu-4.87597713611464E-02uuu0.790243154073801
78 -449.1uuuuuuuu-4.79863261997287E-02uuu0.777708030819534
79 -499.125uuuuuu-4.81653364357465E-02uuu0.780609225996895
80 -549.1uuuuuuuu-0.047269698908431uuuuuu0.766093747258277
81 -599.6uuuuuuuu-4.80904870604529E-02uuu0.779396152088604
82 -649.75uuuuuuuu-4.84079761523022E-02uuu0.784541655734812
83 -699.8uuuuuuuu-4.72742237354863E-02uuu0.766167080530848
84 -749.7uuuuuuuu-4.70759455450799E-02uuu0.7629536121696
85 -799.8uuuuuuuu-4.73933330689166E-02uuu0.768097469716484
86 -849.825uuuuuu-4.69718232312647E-02uuu0.761266115625176
87 -899.9uuuuuuuu-4.70108328063436E-02uuu0.761898338639946
88 -949.75uuuuuuuu-0.046559952167593uuuuuu0.754590975866687
89 -999.8uuuuuuuu-4.69771093055334E-02uuu0.761351786330476'''
90
91 data = [i for i in data.split("\n") if i]
92 data = [i.split() for i in data]
93 B = [float(i[0]) for i in data]
94 y = [float(i[2]) for i in data]
95 Bp = B[:41]
96 yp = y[:41]
97 Bn = list(reversed(B[41:]))
98 yn = list(reversed(y[41:]))

```

```

99 p = ius(Bp, yp)
100 n = ius(Bn, yn)
101 newx = np.linspace(-1000,1000,500)
102 plt.plot(B, y, label = 'Linear_interpolated')
103 plt.scatter(B, y, 80, marker = 'x', color='black', label='Experiment_data
    ')
104 plt.xlabel("Magnetic_Field_B/mT")
105 plt.ylabel("Kerr_Angle_\\theta$/degree")
106 plt.legend(loc = 'upper_left')
107 plt.show()
108 plt.plot(newx, p(newx), color = 'red', label = "Increasing_side_curve")
109 plt.plot(newx, n(newx), color = 'blue', label = "Decreasing_side_curve")
110 plt.xlabel("Magnetic_Field_B/mT")
111 plt.ylabel("Kerr_Angle_\\theta$/degree")
112 plt.scatter(B, y, 80, marker = 'x', color='black', label='Experiment_data
    ')
113 plt.legend(loc = 'upper_left')
114 plt.show()
115 ysorted = copy(y)
116 ysorted.sort()
117 ymin = sum(ysorted[:5]) / 5
118 ymax = sum(ysorted[-5:]) / 5
119 print "theta_=", (ymax - ymin) / 2
120 ymed = (ymin + ymax) / 2
121 u0 = 1.25663e-6
122 incB = bs(lambda x: p(x) - ymed, -1000, 1000)
123 decB = bs(lambda x: n(x) - ymed, -1000, 1000)
124 incH = incB * 1e-3 / u0

```

```
125 | decH = decB * 1e-3 / u0
126 | print incH, decH
```