晶体的电光效应及其应用

黄 康 靖

2012 级　学 号:masked student id*

(日期：March 27, 2015)

本实验首先通过对于磷酸二氘钾晶体的电光效应的研究, 探究了电光效应的基本原理, 测明了磷酸二氘钾晶体的半波电压与电光系数. 并随后使用测得的晶体参数和晶体本身, 利用相位补偿法, 测得了云母片晶体样本的折射率差, 从而探究了晶体电光效应的相关应用.

关键词： 双折射, 磷酸二氘钾, 电光效应, 光学调制器

* huangkangjing@gmail.com

I. 引言

当光介质 (比如晶体或者液体) 加上电场之后, 其折射率发生变化的现象成为电光效应. 电光效应是介质在外加电场下的极化现象中的非线性效应的体现. 电场与介质折射率之间的变化关系可以用下式表示:

$$n = n^0 + aE_0 + bE_0^2 + \dots \tag{1}$$

其中 a, b 为常数,n^0 为无电场作用时的折射率, 由一次项 aE_0 引起的折射率变化称为一次电光效应, 也称作线性电光效应或者泡克耳斯效应, 是 1893 年由泡克耳斯发现的, 它只存在于没有对称中心的晶体中, 总共只有 20 多种晶体类型. 而由二次项 bE_0^2 引起的折射率变化被称为二次电光效应, 也称为平方电光效应或者克尔效应, 它存在于所有的电介质中, 数值上远远小于一次电光效应, 因此通常不予考虑.

电光效应在科学研究与工程技术中有许多重要应用, 如可以制成光相位调制器, 光开关, 光滤波器, 光衰减器. 特别是在激光出现以后, 电光晶体被广泛应用在激光通讯, 激光测距, 激光显示, 光学数据处理等方面. 现在电光效应的测量已经成为研究电光晶体, 液晶, 功能有机分子与聚合物的一种重要手段.

本实验研究了 KD*P(KD_2PO_4, 磷酸二氘钾) 晶体的一次电光效应. 本实验分别采用了三种不同方法测量晶体的半波电压值, 从而得出电光系数. 最后用电光晶体作为相位补偿器, 测量出云母等双折射样品的微小相位差.[1]

II. 原理

A. 一次电光效应的一般描述

光在各向异性晶体中传播时, 因光的传播方向或者电矢量的振动方向不同, 光的折射率也不同, 这一区别通常采用折射率椭球来描述. 在主轴坐标系中, 折射率椭球方程为:

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1 \tag{2}$$

当晶体加上电场之后, 折射率椭球的形状, 大小, 方位都发生变化, 椭球方程变成

$$\frac{x^2}{n_{11}^2}+\frac{y^2}{n_{22}^2}+\frac{z^2}{n_{33}^2}+\frac{2}{n_{23}^2}yz+\frac{2}{n_{13}^2}xz+\frac{2}{n_{12}^2}xy=1 \tag{3}$$

只考虑一次电光效应的情况下, 电场对折射率椭球的影响可以用以下矩阵形式表示:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{n_{11}^2}-\frac{1}{n_1^2} \\ \frac{1}{n_{22}^2}-\frac{1}{n_2^2} \\ \frac{1}{n_{33}^2}-\frac{1}{n_3^2} \\ \frac{1}{n_{23}^2} \\ \frac{1}{n_{13}^2} \\ \frac{1}{n_{12}^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \tag{4}$$

[1]

B. 磷酸二氘钾类型晶体的纵向电光效应

KD*P 晶体是一种人工生长的晶体, 与他同类型的还有 KDP(磷酸二氢钾) 和 ADP(磷酸二氢铵), 它们属于四方晶系.

KD*P 为负单轴晶体, 折射率椭球为旋转椭球, 表达式为:

$$\frac{x^2+y^2}{n_o^2}+\frac{z^2}{n_e^2}=1 \tag{5}$$

式中 n_o 与 n_e 分别为单轴晶体的寻常光折射率与非寻常光折射率.

由晶体的对称性与前述的电光效应的普遍表达形式, 我们可以得到加上电场之后, 折射率椭球方程应当成为

$$\frac{x^2+y^2}{n_o^2}+\frac{z^2}{n_e^2}+2r_{41}(E_xyz+E_yxz)+2r_{63}E_zxy=1 \tag{6}$$

即加上电场后, 折射率椭球由旋转椭球变为一般的椭球.

如果只在 KD*P 晶体的光轴 z 方向上加电场, 则折射率椭球式成为

$$\frac{x^2+y^2}{n_o^2}+\frac{z^2}{n_e^2}+2r_{63}E_zxy=1 \tag{7}$$

为了求出加电场后朱折射率的变化, 作如下坐标变换

$$\begin{cases} x=x'\cos\frac{\pi}{4}-y'\sin\frac{\pi}{4} \\ y=x'\sin\frac{\pi}{4}+y'\cos\frac{\pi}{4} \\ z=z' \end{cases} \tag{8}$$

可得折射率椭球方程为

$$\frac{x'^2}{n_{x'}^2}+\frac{y'^2}{n_{y'}^2}+\frac{z'^2}{n_{z'}^2}=1 \tag{9}$$

并且

$$\begin{cases} n_{x'}=n_o(1+n_o^2r_{63}E_z)^{-1/2} \\ n_{y'}=n_o(1-n_o^2r_{63}E_z)^{-1/2} \\ n_{z'}=n_z \end{cases} \tag{10}$$

当折射率的变化很小时, 有

$$\begin{cases} n_{x'}\approx n_o-\frac{n_o^3}{2}r_{63}E_z \\ n_{y'}\approx n_o+\frac{n_o^3}{2}r_{63}E_z \\ n_{z'}=n_z \end{cases} \tag{11}$$

当光束沿着晶体光轴 z 方向传播时, 沿着 x' 轴振动的光波和沿着 y' 轴振动的光波, 由于它们的折射率不同, 经过长度为 l 的晶体后, 产生的相位差为

$$\Phi=\frac{2\pi}{\lambda}(n_{y'}-n_{x'})l=\frac{2\pi}{\lambda}n_o^3r_{63}E_zl=\frac{2\pi}{\lambda}n_o^3r_{63}V_D \tag{12}$$

这里 V_D 是加在晶体 z 方向的直流电压, 称为半波电压, 其表达式为

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2n_o^3 r_{63}} \tag{13}$$

由此可得电光效应的电光系数的测量原理式

$$r_{63} = \frac{\lambda}{2n_o^3 V_\pi} \tag{14}$$

[1]

III. 实验

实验的装置示意图如图 1所示

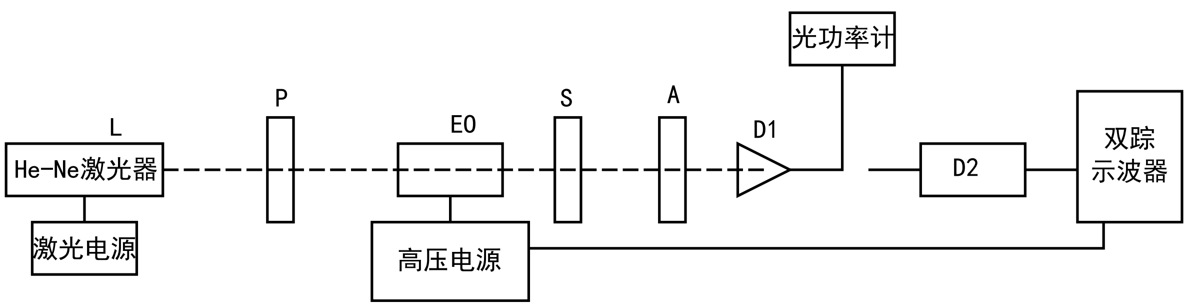

图 1: 此图为实验装置的示意图. 实验装置基本上由氦氖激光器, 起偏器, 电光晶体, 测量样品, 检偏器和探测器这几部分组成. 其中探测器部分在实验的不同阶段分别使用了光功率计与光电集成接受装置.

实验使用的激光器是内腔型氦氖气体激光器, 使用 JDW-3 型激光电源供电.

如前文所述, 实验中使用的电光晶体是 KD*P(磷酸二氘钾) 晶体.[1]

实验分为三部分进行:

a. 在这一部分中, 首先 A 与 P 的偏振状态被调节成相互垂直着, 并且分别与电光晶体的 x 主轴和 y 主轴相互平行的状态, 测量了电光晶体上加上的电压与输出的光强之间的关系. 随后,P 被调节为与 A 的偏振状态平行的状态, 测量了电光晶体上加上的电压与输出的光强之间的关系.

b. 在这一部分中, 如同在上一个部分中一样,A 与 P 的偏振状态先后被调节成分别与电光晶体的两个主轴平行与一同和晶体的一个主轴平行的状态. 实验在这一部分中采用光电探测器进行测量, 并且使用交流信号源, 在高压直流电压的基础上, 在电光晶体上加上了一个交变电压.

数学分析可以得出, 当直流电压在 V-I 曲线最高和最低值的中部时, 输出的光强在这一条件下将以交变电源的频率交变变化; 而当直流电压在 V-I 曲线的最高值和最低值点时, 输出的光强的交变频率将会出现二倍频现象. 这是测量 V-I 曲线最值点的精确度较高的有效方法.

在这一部分中, 实验使用了上述的方法, 在上述的两种条件中分别测量了 V-I 曲线的最高点位置.

c. 在这一部分中, 样品片 S 被插入到了光路中, 并且其光轴被调节为与电光晶体的光轴相互平行. 随后, 使用了与第二部分中相同的方法与条件, 分别测量了两种条件下 V-I 曲线最高值点的位置. 这样, 若样品的相位差记为 Φ_S, 两种情况下电光晶体的加的电压分别为 V_D 和 V_D', 那么我们分别可以有

$$\Phi_S = -\frac{\pi V_D}{V_\pi} \tag{15}$$

和

$$\Phi_S = \pi - \frac{\pi V_D'}{V_\pi} \tag{16}$$

从而可以测得样品的 Φ_S, 结合样品的厚度就可以算出样品的 Δn. 并且可以测得电光晶体的半波电压:

$$V_D' - V_D = V_\pi \tag{17}$$

IV. 实验结果及分析讨论

a. 对于第一部分的实验, 测得的 V-I 特性曲线如图 2和图 3所示

根据曲线, 我们可以得到粗测的电光晶体半波长度为

$$V_\pi = 1341\,\mathrm{V} \tag{18}$$

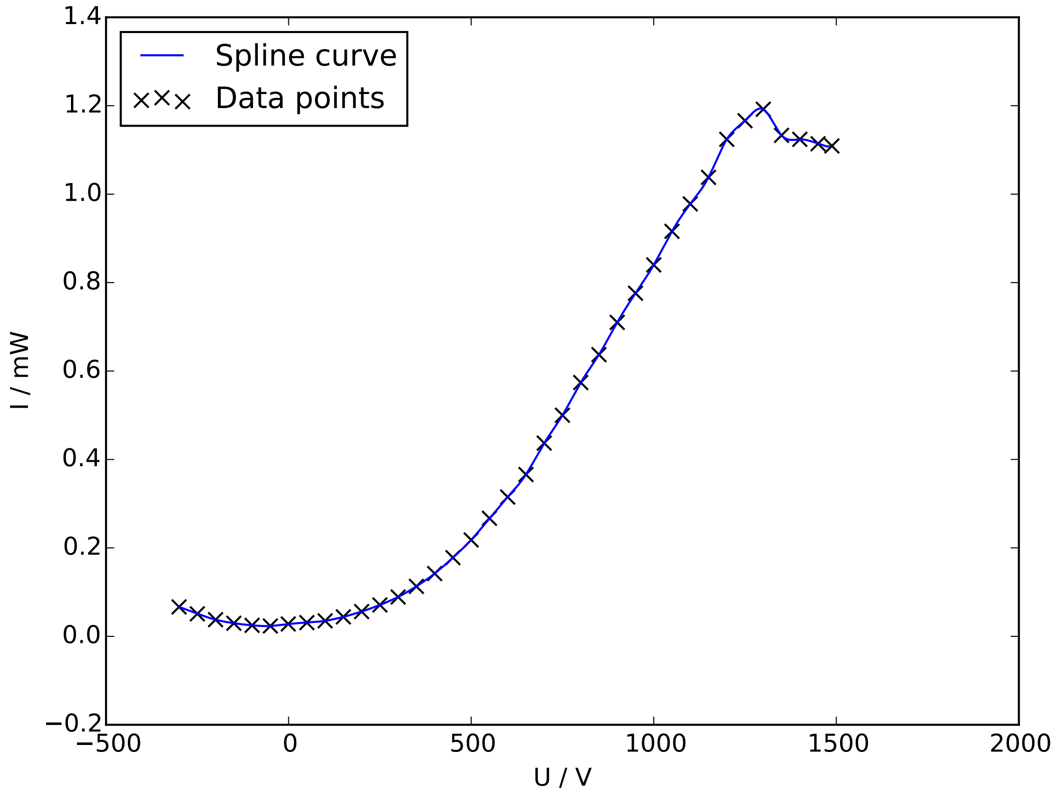

图 2: 当 A 与 P 的偏振方向分别与电光晶体的两个主轴分别平行时测得的电光晶体电压与输出光强之间的关系曲线; 拟合曲线为数据点按照三阶分段样条插值算法得到

b. 对于第二部分的实验, 根据在两种不同条件下的输出光强极值位置, 我们测得了晶体半波电压应为

$$V_\pi = 1424\,\mathrm{V} \tag{19}$$

并且, 由每块晶体长度为 $l = 1.5\,\mathrm{cm}$, 激光波长为 $\lambda = 632.8\,\mathrm{nm}$ 的实验室数据, 我们计算得出晶体的电光系数为

$$r_{63} = 1.62 \times 10^{-11}\,\mathrm{V}^{-1}\mathrm{m}^{-1} \tag{20}$$

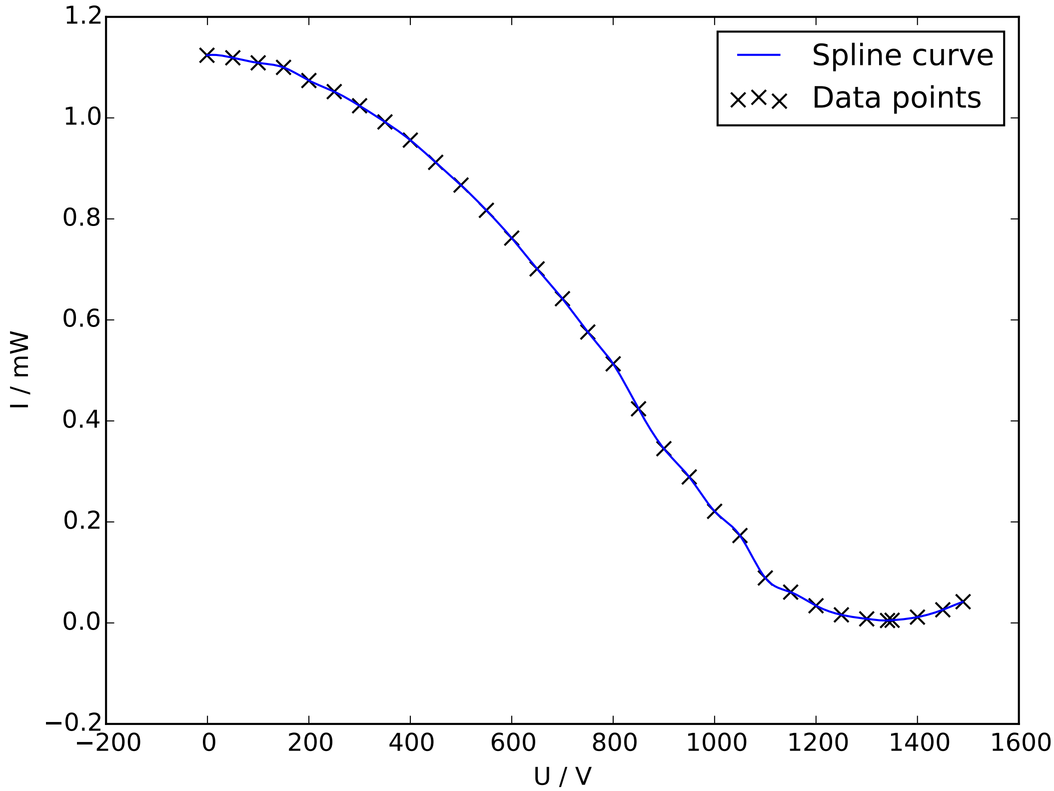

图 3: 当 A 与 P 的偏振方向一同与电光晶体的某个主轴一致平行时测得的电光晶体电压与输出光强之间的关曲线; 拟合曲线为数据点按照三阶分段样条插值算法得到

c. 对于第三部分的实验, 我们通过补偿法, 测得了云母样品的折射率差应当为

$$\Delta n = 2.64 \times 10^{-6} \tag{21}$$

V. 结论

本次实验研究并考察了 KD*P 晶体的电光效应, 先测量了搭建的光学系统的 V-I 响应曲线, 测得了该晶体的半波电压, 并且在此基础上测得了晶体的电光系数.

随后, 本实验利用已测得的晶体的电光系数, 采用补偿法进行测量, 成功地完成了对云母晶体样本片的折射率插值测量.

本次测量中, 我们采用了调整起偏器 P 而不是检偏器 A 的做法. 理论上来说, 这一做法可能会给系统引入误差, 因为激光发射的入射光并不一定是无偏振光或者圆偏振

光, 从而调节起偏器可能改变入射到系统中的光强度. 然而, 从实验的结果来看, 结果并没有和标准值有太大偏离, 从而证明了这一引入的误差是微弱的.

VI. 致谢

感谢蒋莹莹老师在实验中认真而细致的指导.

感谢同组的冯一阳同学在实验中仔细而周到的协助.

---

[1] 吴思成，王祖铨 2010 近代物理实验（第三版）（北京：高等教育出版社）第 165 页.

A. 思考题

a. 本实验先后采用了直接测量极值, 使用倍频法测量极值, 和加入样品用补偿法测量半波电压的方法. 三个方法一个比一个精确, 但是操作一个比一个麻烦.

b. 主要由光电晶体和配套的电压源组成. 它的作用是可以可调整地控制通过它的光的偏振态

c. 这将导致在后面测量半波电压的步骤中难以调节到输出光强的最低点, 从而引入半波电压的测量误差.

d. 因为这一方法对于判断极值点的位置最为精确, 可以有效控制测量误差.

B. 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

plot1.py

```
# encoding=utf8
from matplotlib import pyplot as plt
from scipy.interpolate import spline
import numpy as np

U = [
        -300,
        -250,
        -200,
        -150,
        -100,
```

—50,
—1,
50,
100,
150,
200,
250,
300,
350,
400,
450,
500,
550,
600,
650,
700,
750,
800,
850,
900,
950,
1000,
1050,
1100,
1150,
1200,
1250,
1300,

```
        1350,
        1400,
        1450,
        1488
        ]

I = [
        0.0665,
        0.0509,
        0.0377,
        0.0296,
        0.0249,
        0.0234,
        0.028,
        0.031,
        0.035,
        0.044,
        0.056,
        0.071,
        0.089,
        0.113,
        0.142,
        0.178,
        0.218,
        0.267,
        0.315,
        0.366,
        0.437,
```

```
        0.500,
        0.574,
        0.637,
        0.710,
        0.776,
        0.840,
        0.916,
        0.978,
        1.038,
        1.124,
        1.166,
        1.192,
        1.133,
        1.124,
        1.114,
        1.109
       ]

xnew = np.linspace(-300, 1480, 500)
smooth = spline(U, I, xnew)
plt.plot(xnew, smooth, label="Spline curve")
plt.scatter(U, I, marker='x', color='black', s=50,label="Data points")
plt.xlabel("U / V")
plt.ylabel("I / mW")
plt.legend(loc="upper left")
plt.show()
```

plot2.py

```python
# encoding=utf8
from matplotlib import pyplot as plt
from scipy.interpolate import spline
import numpy as np

U = [
        -1,
        50,
        100,
        150,
        200,
        250,
        300,
        350,
        400,
        450,
        500,
        550,
        600,
        650,
        700,
        750,
        800,
        850,
        900,
        950,
        1000,
        1050,
```

```
        1100,
        1150,
        1200,
        1250,
        1300,
        1341,
        1350,
        1400,
        1450,
        1490
        ]

I = [
        1.124,
        1.119,
        1.109,
        1.100,
        1.074,
        1.052,
        1.024,
        0.992,
        0.956,
        0.912,
        0.867,
        0.817,
        0.762,
        0.701,
        0.642,
```

```
        0.576,
        0.513,
        0.424,
        0.345,
        0.289,
        0.221,
        0.173,
        0.089,
        0.061,
        0.034,
        0.016,
        0.008,
        0.0048,
        0.0053,
        0.0115,
        0.026,
        0.042
       ]

print len(U)
print len(I)
xnew = np.linspace(-1, 1489, 500)
smooth = spline(U, I, xnew)
plt.plot(xnew, smooth, label="Spline curve")
plt.scatter(U, I, marker='x', color='black', s=50,label="Data points")
plt.xlabel("U / V")
plt.ylabel("I / mW")
plt.legend()
```

```
plt.show()
```