

# 可见光在酞菁钴薄膜介质中 吸收和色散的研究

卞大坤 陈亚孚

(长春光学精密机械学院光学物理系, 长春 130022)

**摘 要** 对可见光在酞菁钴(CoPc)薄膜中的折射率、吸收率和吸收系数作了理论计算。理论结果和文献[1]的实验测量值符合得很好。并对光在介质中吸收、色散随频率变化的理论公式作了深入的分析。

**关键词** 酞菁钴薄膜, 吸收, 色散。

## 1 引 言

近年来由于光子技术和光电子技术的迅速发展,对于光在介质中吸收和色散现象的研究提出了深入的要求。酞菁钴薄膜是一种新型有机光电器件和非线性光学材料,可在光存储、光传感、光信息处理等方面有很好的应用前景,已引起了广泛注意。中国科学院上海光学精密机械研究所陈启婴等人<sup>[1]</sup>报道了在单晶硅片上制备了酞菁钴薄膜,用椭圆偏振光谱仪研究了该薄膜的光学性质,发现在可见光范围薄膜具有较大的吸收,并且吸收带较宽。他们用波长为 632.8 nm 的入射光,以不同的入射角  $\theta$  照射薄膜,测量得到薄膜复介电常数的实部  $\epsilon_1$ 、虚部  $\epsilon_2$ 、复折射率的实部  $n$ 、虚部  $\eta$  等一系列数据。结果很好,为介质光学性质研究提供了很好的实验方法。从文献[2]~[4]所给的公式不易跟酞菁钴薄膜实验结果符合。本文给出几个较适用的精确公式,并作了实际计算,与实验符合得很好。

## 2 吸收和色散公式的分析

根据电介质极化理论<sup>[2~4]</sup>,推导出复相对介电常数:

$$\epsilon_r = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (1)$$

其中, 
$$\epsilon_1 = 1 + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m} \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma^2}, \quad \epsilon_2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m} \frac{\omega \gamma}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma^2} \quad (2)$$

$\sqrt{\epsilon_r}$  也为复数,形式上引入复折射率  $n + i\eta$ , 即

$$\sqrt{\epsilon_r} = n + i\eta \quad (3)$$

且 
$$n^2 - \eta^2 = \epsilon_1, \quad 2n\eta = \epsilon_2 \quad (4)$$

推导出

$$n^2 = \frac{\epsilon_1 + \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}}{2}, \quad \eta^2 = \frac{-\epsilon_1 + \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}}{2} \quad (5)$$

这是一组很适用的精确公式。

由上述公式, 还可以进一步导出适用于具体物理模型的较为精确的适用公式。

## 2.1 介质的吸收

电磁波的衰减由  $\alpha$  或  $\eta$  决定,  $\alpha$  为吸收系数,

$$\alpha = (\omega/c)\eta \quad (6)$$

设  $\delta$  为透入深度

$$\delta = 1/\alpha = \lambda/2\pi\eta \quad (7)$$

深入分析可知, 若介质吸收较强,  $\eta$  接近 1, 则透入深度  $\delta$  与波长  $\lambda$  数量级相同。因此, 对于吸收较强的薄膜, 厚度的数量级与可见光波长相仿。

在  $\omega = \omega_0$  附近处,  $\epsilon_2$  有极大值, 并且  $\epsilon_1 \approx 1$ 。

$$\omega_0^2 - \omega^2 = (\omega_0 + \omega)(\omega_0 - \omega) \approx -2\omega_0\Delta\omega$$

那么(2)式为:

$$\epsilon_2 \approx \frac{Ne^2\gamma_0}{4\epsilon_0 m \omega_0 (\Delta\omega^2 + \gamma_0^2/4)} \quad (8)$$

式中  $\gamma = e^2\omega^2/6\pi\epsilon_0 mc^3$ , 在极大值处有:

$$\eta^2 \approx (-1 + \sqrt{1 + \epsilon_2^2})/2 \quad (9)$$

显然此处  $\eta$  最大,  $\alpha$  亦最大, 电磁波衰减得最多。即虚部  $\epsilon_2$  在介质的吸收中起主要作用。而吸收区间为  $(\omega_0 - \gamma_0/2, \omega_0 + \gamma_0/2)$ 。

在  $\omega$  远离  $\omega_0$  处,  $\epsilon_2$  有极小值。如  $\omega$  满足  $|\omega_0^2 - \omega^2| \gg \omega\gamma$ ,

$$\epsilon_2 \approx (Ne^2/\epsilon_0 m) \omega\gamma / (\omega_0^2 - \omega^2)^2 \rightarrow 0 \quad (10)$$

$$\eta^2 \approx (-\epsilon_1 + \sqrt{\epsilon_1^2})/2 = 0 \quad (11)$$

即此处  $\alpha \approx 0$ , 电磁波几乎不衰减, 介质没有吸收。

## 2.2 介质的色散

由实部  $n$  决定实际测定的折射率, 频率不同的电磁波相速度不同, 折射角不同, 从而产生两种色散现象。考察  $n$  随频率变化的情况。

1) 当  $\omega$  远离  $\omega_0$  时, 即  $\epsilon_2 \rightarrow 0$ , 则

$$n^2 \approx (\epsilon_1 + \sqrt{\epsilon_1^2})/2 = \epsilon_1 \quad (12)$$

可见, 实部  $\epsilon_1$  在介质的色散中起主要作用。由(2)式可知

$$n^2 \approx 1 + (Ne^2/\epsilon_0 m) [1/(\omega_0^2 - \omega^2)] \quad (13)$$

折射率随频率增大而增大, 属正常色散。

2) 在  $\omega = \omega_0$  附近处, 可有,

$$\epsilon_1 \approx 1 + \frac{Ne^2(\omega_0 - \omega)}{2\epsilon_0 m \omega_0 (\Delta\omega^2 + \gamma_0^2/4)} \quad (14)$$

如果介质吸收不强烈,  $\epsilon_2$  比  $\epsilon_1$  小很多, 按(5)式, 仍有

$$n^2 \approx \epsilon_1 \quad (15)$$

在  $\omega = \omega_0 - \gamma_0/2$  时,  $\epsilon_1$  最大; 在  $\omega = \omega_0 + \gamma_0/2$  时,  $\epsilon_1$  最小。在这两个频率之间, 折射率随频

率增大而减小,属反常色散,它发生在介质对电磁波的吸收区。

最后需要指出的是,当介质吸收较强, $\epsilon_2$ 较大,实部 $\epsilon_1$ 和虚部 $\epsilon_2$ 在色散中都起作用,折射率随频率变化的情况将复杂化。

### 3 酞菁钴薄膜吸收和色散的计算

应用本文推得的公式,根据文献[1]实验中 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 的测量数据,计算 $n$ 、 $\eta$ 和吸收系数 $\alpha$ 。

当 $\theta = 65^\circ$ 时,实验测得( $n_m$ 、 $\eta_m$ 表示折射率和吸收率的测量值):

$$\epsilon_1 = 1.928, \quad \epsilon_2 = 2.567, \quad n_m = 1.603, \quad \eta_m = 0.800, \quad \alpha' = 1.5900 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$$

由数据看到,与实部 $\epsilon_1$ 相比,虚部 $\epsilon_2$ 较大; $\epsilon_1$ 超过1很多。这样, $\epsilon_1$ 和 $\epsilon_2$ 对 $n$ 、 $\eta$ 都起作用,由(5)式计算折射率为( $n_t$ 、 $\eta_t$ 表示折射率和吸收率的理论值)

$$n^2 = 2.5692, \quad n_t = 1.603$$

可见理论值与测量值完全符合。吸收率为

$$\eta^2 = 0.6412, \quad \eta_t = 0.8007$$

理论值与测量值符合得很好。按(7)式计算吸收系数为( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )

$$\alpha = 2\pi\eta/\lambda = 0.7950 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$$

如按下面公式计算吸收系数为

$$\alpha' = 4\pi\eta/\lambda = 1.5901 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$$

$\alpha'$ 就是实验计算值,可见 $2\alpha = \alpha'$ 。由于采用不同的单位制,公式体系不同,推得的吸收系数表达式不同。 $\alpha$ 、 $\alpha'$ 随波长(频率)变化的曲线位置不同,但形状相同,描述介质的吸收特性完全一样。

再对 $\theta = 70^\circ$ 、 $75^\circ$ 情形,把各个物理量测量值与理论值列出、比较,如表1、表2所示。

Table 1. Some physical data of a CoPc film with the different angles of incidence

$\theta$	$\epsilon$		$n$		$\eta$	
	meas.	meas.	theore.	meas.	theore.	meas.
	data	data	data	data	data	data
$65^\circ$	1.928	2.567	1.603	1.603	0.8007	0.8000
$70^\circ$	1.935	2.577	1.606	1.606	0.8024	0.8024
$75^\circ$	1.940	2.567	1.606	1.606	0.7973	0.7992

Table 2. The data of absorption spectra of a CoPc film

$\theta$	$\alpha/(10^5 \text{ cm}^{-1})$	
	theore.	exper.
	data $2\alpha$	data $\alpha'$
$65^\circ$	1.5901	1.5900
$70^\circ$	1.5934	1.5934
$75^\circ$	1.5873	1.5871

从表1和表2可看出, $n$ 、 $\eta$ 、 $\alpha$ 的理论值和实验值符合得很好。通过计算和实验对比,不难得出两点结论:1) 陈启婴等人的实验测量值是准确的;2) 本文的公式在研究介质对光的吸收和色散现象时具有实用价值。

实验和理论结果如图1、图2所示(参考文献[1],横坐标改为 $\omega$ )。两图中曲线都是在入射角为 $70^\circ$ 情况下测量得到的。从两图可见,实部 $\epsilon_1$ 和折射率 $n$ 随频率的增大而减小,这是反常色散;虚部 $\epsilon_2$ 和吸收率 $\eta$ 都较大,表示吸收较强。显然,反常色散发生在薄膜对可见光的吸收区。在图2中,标明了波长为 $632.8 \text{ nm}$ (角频率 $29.8 \times 10^{14} \text{ rad/s}$ )的入射光在 $\theta = 70^\circ$ 时 $n$ 、 $\eta$ 的理论值。

观察两图中 $\epsilon_2$ 曲线和 $\eta$ 曲线,可见吸收峰出现在频率 $30.6 \times 10^{14} \text{ rad/s}$ 、 $24.8 \times 10^{14} \text{ rad/s}$ ,吸收峰都不尖锐,吸收带较宽。这显示出实际的介质酞菁钴薄膜的复介电常数、复折射率

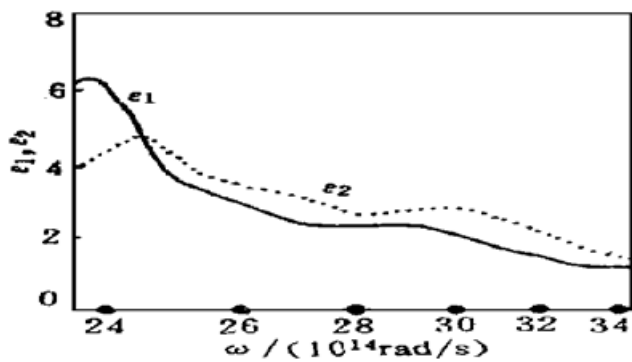


Fig. 1 Real part  $\epsilon_1$  and imaginary part  $\epsilon_2$  of complex dielectric constant of a CoPc film in visible range

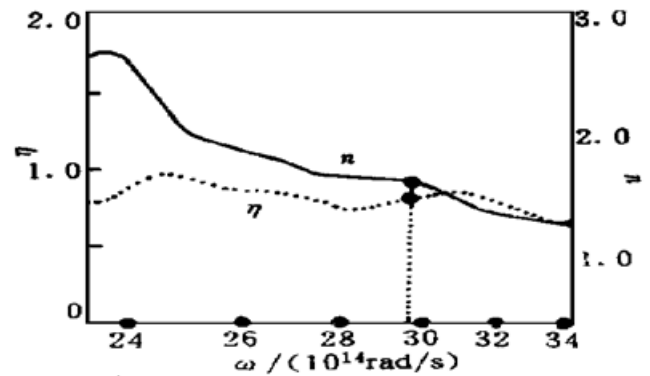


Fig. 2 Real part  $n$  and imaginary part  $\eta$  of complex refractive index of a CoPc film in visible range

和吸收光谱的复杂特性。这是由于酞菁化合物复杂分子结构和电子跃迁情况所决定的。

### 参 考 文 献

- [1] 陈启婴, 顾冬红, 干福熹. 酞菁钴薄膜的折射率及吸收特性. 光学学报, 1996, **16**(2): 207~ 210
- [2] 方俊鑫, 殷之文. 电介质物理学. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [3] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学. 北京: 科学出版社, 1974.
- [4] 陈亚孚. 介质传输光学. 北京: 兵器工业出版社, 1995.
- [5] [美] 杰克逊 J.D. 经典电动力学. 上册, 北京: 人民教育出版社, 1982. 313~ 315
- [6] 蔡圣善, 朱 耘. 经典电动力学. 上海: 复旦大学出版社, 1985. 298~ 310
- [7] 卞大坤. 浅谈介质的色散和吸收. 全国第四届电动力学研讨会论文选集, 北京: 高等教育出版社, 1993. 184~ 186

## Absorption and Dispersion of Visible Light in CoPc Thin Film

Bian Dakun      Chen Yafu

(Department of Optics and Physics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022)

(Received 30 April 1998; revised 6 July 1998)

**Abstract** The refractive index, absorption index and absorption spectra on a cobalt phthalocyanine (CoPc) thin film are theoretically calculated. The theoretical result is in a good accordance with the measured data. The theoretical formulas about optical absorption and dispersion changing with frequency in dielectric are analyzed.

**Key words** cobalt phthalocyanine thin film, absorption, dispersion.