

光在介质中的折射

张 涛*

(北京师范大学射线束技术与材料改性教育部重点实验室, 北京市辐射中心,
低能核物理研究所, 北京 100875)

摘要 研究了光磁场的电磁感应对介质的作用, 建立了电子云导体模型: 介质中一个电子的电子云可以看作一个微小导体, 光变化磁场的电磁感应导致光与电子云导体之间能量交换. 光在介质中速度减慢起因于这种能量交换. 应用电子云导体模型和能量守恒原理, 导出介质折射率表达式, 并用表达式计算了几种介质的折射率, 计算结果与实测值符合很好. 用此观点解释了折射率的各向异性, 以及静电场或静磁场对介质折射率的影响.

关键词 折射率 光波 透明介质

光与物质相互作用是一个重要的科学技术研究领域 [1,2]. 光从真空进入一绝缘透明均匀介质时(简称“介质”), 光的方向和速度一般有所改变, 这称之为光的折射. 一般用光之电场与介质中电子作用的振子模型来解释折射, 但这种解释给不出折射率较准确的计算方法, 且其折射率实部表示的色散关系有时给出折射率小于 1 的结果, 与实验结果不符. 光的折射现象有许多重要的应用, 如光谱分析技术、光学成像技术、光纤通讯技术、化学结构分析和液体性质测试等, 正确认识折射机理对于进一步完善和发展光学技术有重要意义.

传统观点认为光与介质相互时光的电场起主导作用, 光的磁场作用可以忽略. 与传统上忽略光的磁场的分析方法相反, 本文分析光变化磁场的电磁感应对介质的作用, 进一步认识折射现象.

1 理论

光从真空射到介质上时, 一部分被反射, 另一部分透射进入介质. 透射进入介质的光中, 一部分光被介质吸收, 另一部分光被散射, 余下来的部分按折射方向继续前进 [3]. 在测量介质折射率时, 反射、吸收和散射部分的光被损失掉而不再作为原来入射光的折射光, 第四部分最终作为折射光被接收到. 所有这些部分的光都与介质相互作用, 在光的强度不高的情况下, 这些作用不使介质分子中的电子明显偏离基态. 在这种情况下, 从能量方面考虑, 假想把入射光

分为几个部分: 反射光部分、散射光部分、吸收光部分和折射光部分, 并且在光遇到介质前后, 光的这几部分能量均彼此独立. 这样就可以仅仅考虑折射光部分, 即穿过介质的光. 为简单起见, 在下文中, “光波”除了是指波长在千埃量级的电磁波外, 还特指 100%穿过介质的折射光部分.

1.1 储藏于介质中的折射能

设光波为余弦形式的单色平面电磁波, 光波在介质中某一点的电场和磁场为

$$\begin{aligned} H_M &= H_{M0} \cos \omega t, \\ E_M &= E_{M0} \cos \omega t, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 H_{M0} 和 E_{M0} 分别是介质中光波磁场强度幅值(单位: A/m)和电场强度幅值(单位: V/m), ω 是角速度(单位: rad/s), t 是时间(单位: s). ω 也是光波的磁场和电场在真空中的角速度, 因为光波由真空进入介质时不改变频率^[4]. 为清晰起见, 真空中光波的磁场强度和磁感应强度分别用 H 和 B 表示, $B = \mu_0 H$, μ_0 是真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, H_0 和 B_0 分别代表 H 和 B 的幅值; 介质中光波的磁场强度和磁感应强度分别用 H_M 和 B_M 表示, H_{M0} 和 B_{M0} 分别代表 H_M 和 B_M 的幅值. 对于绝大多数透明介质, 其磁化率 χ 的绝对值远远小于 1, 因此介质中分子感受的光波磁场近似等于真空中光波的磁场, 即 $H_M \approx H$, $B_M \approx B$, $H_{M0} \approx H_0$ 和 $B_{M0} \approx B_0$.

介质分子中每一个电子在一定的空间范围内出现, 形成电子云, 可以把每个电子的电子云空间看作是一个导体, 基态下, 由于每一电子被限定在它自己的电子云空间上运动, 因而这些电子云导体是彼此独立的. 当电子云导体中有光波变化的磁场 B_M 穿过时, 光波的 dB_M/dt 会在电子云导体内产生感生电动势, 导致电子云导体表面上有感生电流流动. 这种感生电流实际上是电子叠加在原来轨道运动上的周向运动, 这是对电子运动统计平均的结果. 这样, 电子云如同一个电感线圈, 光波与这个线圈作用, 导致它们之间交换能量, 如图 1. 在光波磁场从幅值向 0 点变化时, 光波 dB_M/dt 绝对值增大, 由此导致电子云导体感生电流增大, 电子云导体电感从光波获得能量; 在光波磁场从 0 点向幅值变化时情况相反, 电子云导体电感向光波

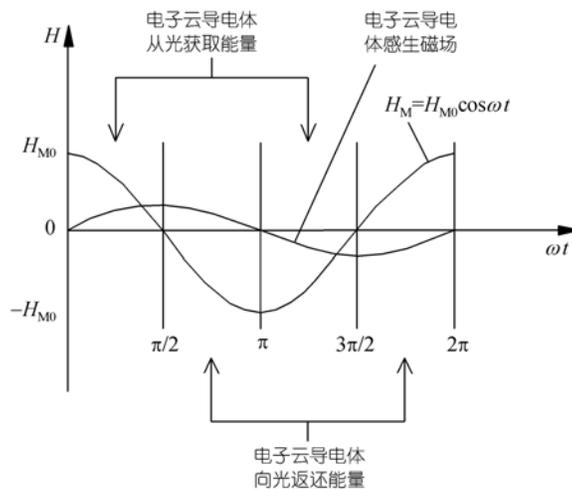


图 1 介质中一点处光波磁场强度波形 $H_M = H_{M0} \cos \omega t$ 及折射时光波与介质中一个电子的电子云电感交换能量过程

H_{M0} 是光波磁场强度幅值, ω 是光波角频率

退还所获得的能量.

光波的 dE/dt 穿过电子云导体时会在导体内引发涡旋磁场, 但涡旋磁场对感生电动势没有贡献.

对于一个如图 2 所示的线圈, 它的电感^[5]:

$$L_C = \mu n_C^2 V_C \left[\sqrt{1 + \left(\frac{R_C}{l}\right)^2} - \left(\frac{R_C}{l}\right) \right], \quad (2)$$

式中 μ 是磁导率, n_C 是线圈单位长度上匝数, V_C 是线圈的体积, R_C 线圈的半径, l 是线圈的长度. 线圈的电感与其形状有关. 同样, 当前文所说的电子云导体在光波 dB_M/dt 引起的感生电动势驱动下产生感生电流时, 电子云导体相当于一个线圈(图 3), 它的等效电感(单位: H)为

$$L = \mu_0 n_E^2 V g, \quad (3)$$

式中 n_E 是电子云导体线圈的单位长度上的等效匝数, V 为电子云导体的等效体积(单位: m^3), 即一个电子云被视为线圈时的体积. g 是与(2)式的中括号项相当的一个因子, g 不但与电子云导体的形状有关, 而且与光波和电子云导体之间的方位有关, 如图 4. 称 g 为电子云导体的形状方位因子(或者说是电子云的形状方向因子), $0 < g \leq 1$.

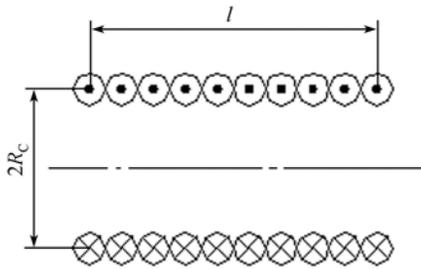


图 2 线圈示意图
 l 是线圈长度, R_C 是线圈半径

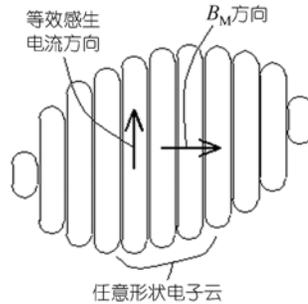


图 3 在光波 dB_M/dt 作用下, 一个电子的电子云导体相当于一个电感线圈, 产生等效感生电流

光波的波长远远大于一个原子的线度, 因此可以认为在某一时刻一个原子中光波 dB_M/dt 是处处一致的. 根据法拉第定律, dB_M/dt 在电子云导体中产生的感生电动势(单位: V), 如图 5.

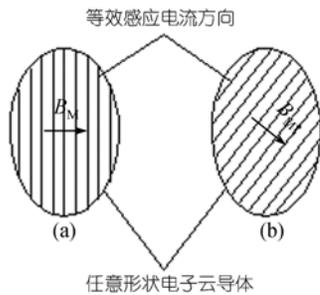


图 4 同一个电子的电子云与光波磁场处于不同方位时, 其形状方位因子 $g_a \neq g_b$
 g_a 和 g_b 分别是(a)和(b)状态下的电子云形状方位因子

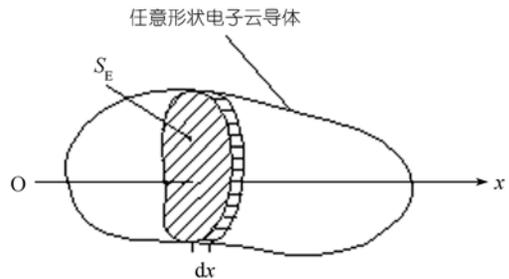


图 5 一个电子的电子云导体中的感生电动势计算示意图
光波磁场强度方向与 x 轴向相同

$$U = -\frac{d\Phi}{dt} = -\int S_E \frac{dB_M}{dt} n_E dx = -V n_E \frac{dB_M}{dt}, \quad (4)$$

式中 Φ 是磁链数(单位: Wb), S_E 是 x 处导体截面积(单位: m^2), B_M 单位为特斯拉(T). 电子云导体线圈中的感生电流(单位: A)为

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (2\pi f L)^2}} = \frac{U}{2\pi f L} = -\frac{1}{2\pi f \mu_0 n_E g} \frac{dB_M}{dt}, \quad (5)$$

式中 R 是电子云导体线圈的电阻, f 是光波频率. (5)式认为电子云导体线圈的电阻 $R=0$, 这是合理的, 因为电子在原子内运动时并不发生散射过程而损耗能量. 电子云导体等效于一个纯电感. 作为一个电感, 感生电流导致的电子云导体中储存的能量为

$$W_E = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{V}{2\omega^2 \mu_0 g} \left(\frac{dB_M}{dt} \right)^2 = \frac{V}{2\mu_0 g} B_{M0}^2 \sin^2 \omega t, \quad (6)$$

式中 $B_M = B_{M0} \cos \omega t$, $\omega = 2\pi f$. 为方便起见, 把由光波 dB_M/dt 引起的、并在介质与光波之间来回交换的介质中感生电流能量称为“折射能”. W_E 即为电子云导体中储存的折射能. 电子云导体的平均折射能(平均储存能量)是 W_E 在光波磁场变化一个周期内的平均值, 即

$$\langle W_E \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} W_E d\theta = \frac{V B_{M0}^2}{4\mu_0 g}, \quad (7)$$

式中 $\theta = \omega t$. (7)式说明光波与位于其中的分子中某个电子之间的平均折射能, 与这个电子云导体的等效体积成正比. 对原子核也可得出类似的结果, 由于原子核体积远远小于电子云的体积, 原子核的折射能可忽略不计. 这样, 一个分子与光波作用时的平均折射能 W_A 近似是分子中所有 z 个电子的 $\langle W_E \rangle$ 之和:

$$W_A = \sum_{i=1}^z \langle W_E \rangle_i = \frac{B_{M0}^2}{4\mu_0} \sum_{i=1}^z \left(\frac{V}{g} \right)_i, \quad (8)$$

式中 i 表示分子中第 i 个电子. 因此, 光波在介质中传播时, 储藏于单位体积介质中的折射能(或者说平均折射能密度)为

$$W_{re} = \rho W_A = \frac{\rho B_{M0}^2}{4\mu_0} \sum_{i=1}^z \left(\frac{V}{g} \right)_i = \frac{\rho(1+\chi)^2 B_0^2}{4\mu_0} \sum_{i=1}^z \left(\frac{V}{g} \right)_i, \quad (9)$$

式中 ρ 是介质中分子密度(单位: m^{-3}). 当介质中有多种分子时, 有

$$W_{re} = \Sigma(\rho W_A)_j, \quad (10)$$

式中 j 表示第 j 种分子.

1.2 光波在真空中和在介质中的平均能量密度

前文说明, 光波在介质中被折射时, 光波的部分能量转化为贮存于介质中的折射能. 由(6)式知, 电子云导体电感中贮存的折射能瞬时值正比于 $\sin^2 \omega t$. 由(1)式, 介质中光波的能量瞬时值正比于 $H_M^2 \propto \cos^2 \omega t$. 折射能最大时光波磁场能量最小, 折射能最小时光波磁场能量最大, 光波在介质中一个电子云空间上的能量与贮存于这个电子云中的折射能的相位关系是反相的. 这说明折射能虽然来自光波, 但它不属于光波本身. 这就要求光波本身在介质中时的能量应低于其在真空中时的能量, 以维持光波-介质体系的能量守恒. 这样, 在真空中的光波通量中取一单位立方体(图 6), 当这个光波体从真空进入介质被折射时, 它或者降低其本身能量密度, 或者减少其体积, 以降低光波体本身的能量.

真空中光波的平均能量密度为 [6]

$$W_v = \frac{1}{2\mu_0} B_0^2. \quad (11)$$

在介质 $\mu \approx \mu_0$ 条件下, 介质中光波的平均能量密度为

$$W_m = \frac{1}{2\mu} B_{M0}^2 \approx \frac{1}{2\mu_0} B_0^2 = W_v, \quad (12)$$

表明光波在真空中与在介质中的平均能量密度是近似相等的. 这样就要求图 6 中的光波体由真空进入介质时应减少体积, 或者说光波体的尺寸要收缩. 假定收缩发生在光波的传播方向上, 由此可以推断光波在介质中的速度要比其在真空中的速度低. 设光波在介质中的速度为 v , 则图 6 所示的光波体由真空进入介质受到折射时, 光波体在传播方向的尺寸由 1 变为 $v/c = 1/n$ (尺寸收缩), 从而光波体的体积由 1 变为 $1/n$; 这里 $n=c/v$, n 为介质折射率, c 为真空光速, $c>v$.

1.3 能量守恒

如前文所述, “光波”仅指入射光的折射部分, 不含入射光的反射、吸收、散射部分. 光波在折射过程中应遵守能量守恒原理. 图 6 为真空中单位立方体的光波的能量, 应等于在介质内 $1/n$ 体积的光波体中包含的光波本身的能量与介质含有的折射能之和, 即

$$W_v = (W_{re} + W_m)/n, \quad (13)$$

式中 W_{re} 为光波受到折射时储藏于介质中的平均折射能密度, W_v 为光波在真空中的平均能量密度, W_m 为光波处在介质中的平均能量密度, 单位为 J/m^3 . 将(9), (11), (12)式代入(13)式, 先假设介质中只有一种分子, 则

$$\frac{B_0^2}{2\mu_0} = \frac{1}{n} \frac{\rho(1+\chi)^2 B_0^2}{4\mu_0} \sum_{i=1}^z \left(\frac{V}{g} \right)_i + \frac{1}{n} \frac{B_0^2}{2\mu_0}, \quad (14)$$

简化后得

$$n = 1 + \frac{1}{2} (1+\chi)^2 \rho \sum_{i=1}^z \left(\frac{V}{g} \right)_i \approx 1 + \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^z \left(\frac{V}{g} \right)_i. \quad (15)$$

这是在认为所有分子的空间取向一致条件下的结果. 当介质中分子的空间取向不一致时, (15)式应改为

$$n = 1 + \frac{1}{2} (1+\chi)^2 \rho \sum_{i=1}^z \left(\frac{V}{\langle g \rangle} \right)_i \approx 1 + \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^z \left(\frac{V}{\langle g \rangle} \right)_i, \quad (16)$$

式中 $\langle g \rangle$ 是分子中第 i 个电子 g 值的空间取向平均值. 当介质中有多种分子时,

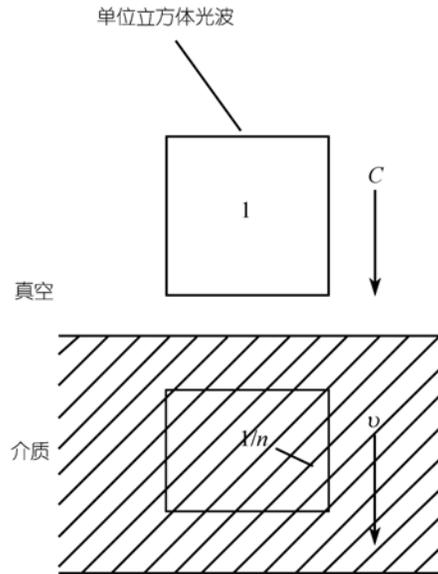


图 6 从真空中连续的光波中取出一个单位立方体, 由于介质中光速为 $v=c/n$, 立方体由真空垂直入射进各向同性介质后, 其传播方向上的尺寸由 1 缩减为 $1/n$, 因而上述光波体的体积由 1 变为 $1/n$

$$n = 1 + \frac{1}{2}(1 + \chi)^2 \sum \left[\rho \sum_{i=1}^z \left(\frac{V}{\langle g \rangle} \right)_i \right]_j \approx 1 + \frac{1}{2} \sum \left[\rho \sum_{i=1}^z \left(\frac{V}{\langle g \rangle} \right)_i \right]_j, \quad (17)$$

其中 ρ 单位为 m^{-3} , V 单位为 m^3 , (15)~(17)式右侧是无量纲数, 这与左侧折射率无量纲数是一致的.

上面分析了光波的 dB/dt 和 dE/dt 对介质分子与光波之间能量传递的作用. 现在考虑光波的磁场 B 和电场 E 对介质分子与光波之间能量传递的作用. 介质分子中的电子云受到光波磁场 B 和电场 E 的作用, 分别引起电子云的磁极化和电极化, 导致电子云储存了磁极化能和电极化能(与电子相比, 在光波磁场 B 和电场 E 作用下, 原子核磁极化和电极化非常微弱, 可以忽略). 电子云的磁极化能和电极化能与光波的磁场能和电场能相位相同, 它们分别是光波磁场能和电场能本身的一部分, 因而它们不会造成图 6 中光波体积的改变, 即它们不会造成光速的变化. 总之, 光波在介质中速度的变化主要起因于光波的 dB_M/dt 与电子云的作用(忽略 dB_M/dt 与原子核的作用), 光波的 B_M , E_M 和 f (光波频率)与光波速度的变化没有直接关系. (15)~(17)式不显含 B_M , E_M 和 f 正说明了这一点. 应注意地是, (15)~(17)式是在介质分子中的电子未明显偏离基态、且介质的磁化率绝对值 $\ll 1$ 的条件下导出的. 光波的 B_M , E_M 和 f 会间接影响光波速度. 对此解释是: 光波 dB_M/dt 在电子云上产生的涡旋电场绝对值 $|E_s| \propto |\text{dB}_M/\text{dt}| = B_{M0}\omega|\sin\omega t|$, 如果光波的电场、磁场和频率较高, 或者光波频率处于介质的共振区, 介质的电子将受到较强的扰动而明显偏离基态, 电子云的方位、形状或等效体积明显改变, 从而影响介质的折射率. 因此, 超过一定限度时, 光波的电场、磁场和频率都会间接影响介质的折射率, 导致介质光学的色散和非线性行为. 这时, 每个电子云的形状方位因子 g 和等效体积 V 不能视为常数, 可表示为 $g = g(H_0, E_0, f)$ 和 $V = V(H_0, E_0, f)$.

非球形电子云的 g 值是各向异性的, 这是导致介质的折射率各向异性的主要原因. 如果所有这些非球形电子云是完全随机取向的, 则介质的折射率表现为宏观各向同性; 如果这些非球形电子云是规则或部分规则取向的, 则介质的折射率有可能在宏观上表现出各向异性. 外加静电场或静磁场可以改变介质中电子云的 V 或 g 值, 从而影响介质的折射率.

2 检验及讨论

在标准条件(273 K和标准气压)和钠光入射(真空中波长为 589.3 nm)条件下, 氦气折射率实测值 $n_{\text{He}} = 1.000035$ ^[7], 氦气的密度为 $2.686 \times 10^{25} \text{ atoms/m}^3$. 一般情况下, 钠光不会激发惰性元素原子明显偏离基态^[8]. 氦原子只有两个 1s 电子, 它们的电子云是球形的, 并且在空间上是重叠的. 可以认为基态时这两个 1s 电子的电子云体积相同. 当一个线圈呈球形时, (2)式的中括号项等于 $2/3$ ^[9], 因此球形电子云有 $\langle g \rangle = g = 2/3$. 将上面这些数据代入(15)式, 可以求出基态氦原子一个电子的电子云等效体积为 $0.8687 \times 10^{-30} \text{ m}^3$, 进而求出氦电子云的等效半径 $r_{\text{He}} = 0.592 \times 10^{-10} \text{ m}$. 为了验证氦电子云的等效半径, 我们考察氦的抗磁性. 氦原子无固有磁矩, 因而显现抗磁性. Langevin 抗磁性磁化率为^[10]

$$\chi = -\frac{N_A e^2}{6mc^2} \sum_{i=1}^z \langle R^2 \rangle_i, \quad (18)$$

式中所有量的单位均是厘米克秒制(cgs), 其中 χ 是抗磁性磁化率(单位: cm^3/mol), N_A 是 Avogadro 常数, e 是电子电量, m 是电子静止质量, c 是光速, $\langle R^2 \rangle_i$ 为原子中第 i 个电子与核距离平

方的平均值. 抗磁性磁化率与折射率皆主要起源于磁场与介质分子中电子之间的作用, 如果令He的 $R = r_{\text{He}} = 0.592 \times 10^{-8}$ cm, 代入(18)式, 则可得到He的抗磁性磁化率的计算值 $\chi_{\text{He}}' = -1.977 \times 10^{-6}$ cm³/mol, He的抗磁性磁化率的实测值 $\chi_{\text{He}} = -1.88 \times 10^{-6} \sim -2.02 \times 10^{-6}$ cm³/mol^[11,12]. χ_{He}' 处于实测 χ_{He} 的范围内, 说明He的电子云等效半径 $r_{\text{He}} = 0.592 \times 10^{-10}$ m与(15)式是合理的.

仅当一个电子的电子云呈球形时, 与电子云等效体积对应的等效半径 r 才有意义, 并且此电子的 r 和 R 都有半径的意义(如氦的1s电子云). 对于一个 p 或 d 电子, 其电子云不呈球形, 因而不存在与电子云等效体积对应的等效半径 r , 并且这个 p 或 d 电子的 R 值没有半径的意义(R 不是单一值, 如图7). 因此除氦之外, 其他惰性气体的折射率与抗磁性磁化率之间关系较复杂.

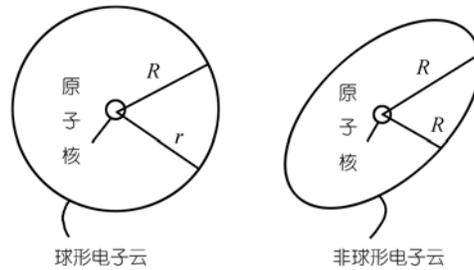


图7 一个球形电子云和一个非球形电子云中 R 和 r 关系示意图
球形电子云中 $R=r$, 非球形电子云不存在等效半径 r , 且 R 不是单一值

标准条件下 H_2 与He的单位体积中电子数几乎相同, 但它们的折射率实测值不同, $n_{\text{He}} = 1.000035$, $n_{\text{H}_2} = 1.000140$ ^[7]. H_2 中的每个电子在两个H原子中运动, H_2 中每个电子云体积要比He中每个电子云体积大, 这使得 $n_{\text{H}_2} > n_{\text{He}}$. 在标准条件下 O_2 和 N_2 的原子密度几乎相等, 氧原子比氮原子多一个电子, 似乎 O_2 的折射率应大于 N_2 的折射率. 但实际是 O_2 的折射率 $n_{\text{O}_2} = 1.000272$, N_2 的折射率 $n_{\text{N}_2} = 1.000297$ ^[7]. 按元素周期律原子半径变化规律, 氮原子半径大于氧原子半径, 或者说氮原子的电子云体积大于氧原子的电子云体积, 这使得 N_2 的折射率大于 O_2 的折射率.

空气的主要成分是: N_2 78.1%, O_2 21%, Ar 0.9%(体积百分比)^[7], 标准条件下钠光在空气中的折射率 $n_{\text{air}} = 1.000292$ ^[13]. 作为验证, 用(17)式计算空气中的折射率. O_2 , N_2 , Ar的折射率实测值分别是 $n_{\text{O}_2} = 1.000272$, $n_{\text{N}_2} = 1.000297$, $n_{\text{Ar}} = 1.000283$. 令(16)和(17)式中 $0.5\Sigma(V/\langle g \rangle)_i = D$, 分别得到

$$n = 1 + \rho D, \quad (19)$$

$$n = 1 + \Sigma(\rho D)_j. \quad (20)$$

先考虑单一成分气体, 令标准条件下理想气体的分子的密度是 ρ_G , 根据(19)式, 在标准条件下 N_2 , O_2 和Ar的单一成分气体的 $\rho_G D$ 值分别是 $\rho_G D_{\text{O}_2} = 0.000272$, $\rho_G D_{\text{N}_2} = 0.000297$, $\rho_G D_{\text{Ar}} = 0.000283$. 当 N_2 , O_2 和Ar组成空气时, 由于气体分子之间作用微弱, 气体分子中的电子云不改变其形状和体积, 每种分子的 $D = 0.5\Sigma(V/\langle g \rangle)_i$ 保持不变, 变化的只是每种分子的密度, 所以空气折射率的((20)式)计算值为

$$n_{\text{air}}' = 1 + 0.21\rho_G D_{\text{O}_2} + 0.781\rho_G D_{\text{N}_2} + 0.009\rho_G D_{\text{Ar}} = 1.0002915. \quad (21)$$

空气折射率的计算值 n_{air}' 与实测值 n_{air} 符合很好. (20)式可以作为分析混合气体成分的辅助手段.

酒精水溶液在25℃时的含量、折射率和密度三种实测值成套数据列于表1. 我们用表1中数据来检验(20)式. 液体的密度单位一般采用g/cm³, 而不是气体采用的分子密度. 为了方便

计算, 可以令(20)式中的 $\rho D = \rho_M D_M$, 其中 ρ_M 是介质的质量密度(单位: g/cm^3); D_M 单位为 cm^3/g . 这样, (20)式变为

$$n = 1 + \sum(\rho_M D_M)_j. \quad (22)$$

同 D 一样, D_M 取决于介质分子的电子云参数. 与气体中的情况不同, 液体中分子间有较强的相互作用, 从而影响分子的电子云参数. 这样一来, 因为环境分子情况不同, 水分子在纯水中的 D_M 值与它在酒精水溶液中的 D_M 值可能不同. 对酒精分子也是如此. 因此, 计算酒精水溶液的折射率时就应当采用分子在酒精水溶液中的 D_M 值, 而不能采用纯液体中的 D_M 值. 假定在一定浓度范围内, 酒精水溶液中的水分子 D_M 值 D_{MW} 和酒精分子 D_M 值 D_{MA} 与酒精含量近似无关, 即 D_{MW} 和 D_{MA} 近似保持不变. 我们先用表 1 中两组数据求出 D_{MW} 和 D_{MA} , 然后再用 D_{MW} 和 D_{MA} 计算表 1 中其他浓度溶液的折射率. 取 4% 和 34%(质量分数)酒精水溶液的两组数据代入(22)式得

$$1.33497 = 1 + 0.98984(0.04D_{MA} + 0.96D_{MW}), \quad (23)$$

$$1.35402 = 1 + 0.94337(0.34D_{MA} + 0.66D_{MW}). \quad (24)$$

由(23)和(24)式解出 $D_{MA} = 0.4563768$, $D_{MW} = 0.3334968$. 由(22)式以及 D_{MA} , D_{MW} 和表 1 中的浓度、密度数据, 可以计算出每一浓度酒精水溶液的折射率, 见表 2. 计算得到的折射率与实测值符合得很好, 说明前文 D_{MW} 和 D_{MA} 近似保持不变的假定是正确的, 也表明(19), (20)和(22)是合理的.

表 1 酒精水溶液在 25°C 时的折射率及有关参数

酒精含量/(质量分数)	密度 $[\rho]/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	折射率实测值 n (波长 589.3 nm 钠光)
4.00	0.98984	1.33497
13.00	0.97611	1.34109
17.00	0.97062	1.34396
19.00	0.96782	1.34537
28.00	0.95410	1.35109 ^{a)}
34.00	0.94337	1.35402
35.00	0.94146	1.35447

a) 28.01%(质量分数)酒精水溶液在 25°C 时的折射率实测值

表 2 酒精水溶液折射率的计算值与实测值(25°C, 波长 589.3 nm 钠光)

酒精含量/(质量分数)	4.00	13.00	17.00	19.00	28.00	34.00	35.00
折射率计算值 n'	1.33497	1.34112	1.34397	1.34536	1.35102	1.35402	1.35446
折射率实测值 n ^[14]	1.33497	1.34109	1.34396	1.34537	1.35109 ^{a)}	1.35402	1.35447
$n - n'$	0	-0.00003	-0.00001	0.00001	0.00007	0	0.00001

a) 28.01%(质量分数)酒精水溶液在 25°C 时的折射率实测值

3 结论

对于电磁感应作用而言, 介质中的每一电子的电子云可以视为微小导体, 由于原子中每一个电子被限定在其本身的电子云空间上, 在基态下各电子不会因为彼此之间交换能量而改变状态, 因此这些微小导体应视为彼此互不导通、相互独立的导体, 尽管这些电子云在空间上可以相互重叠; 近似地, 它们将各自独立地接受感生电动势的作用; Faraday 电磁感应原理适用于此微小导体, 可见光磁场变化量 dB_M/dt 产生感生电动势, 在一定的感生电动势作用下电子云导体上生成感生电流, 从而有折射能在电子云与光波之间来回交换; 主要是这种作用导致光

在介质中传播速度变慢(还有原子核等与光波间的折射能交换). 光的磁场变化量 dB_M/dt 在光与介质相互作用过程中起重要作用. 本文揭示了光与电子相互作用的一种模式: 在光的磁场变化量 dB_M/dt 作用下, 光波与电子可以往返交换能量, 在这种交换能量过程中它们各自保持自身独立性, 过程结束后它们恢复各自的原始能量状态. 光在介质的折射率与介质的分子密度、介质分子的电子云有效体积和形状方位因子直接相关, 光的电场 E_M , 磁场 B_M 和频率 f 通过改变电子云的有效体积和形状方位因子来间接影响折射率. 当介质中的电子被较强地扰动时, 其电子云的有效体积和形状方位因子开始变化, 从而引起折射率变化, 这可以用来解释折射率的非线性. 根据本文折射率公式可合理解释折射率各向异性的起因、静电场或静磁场对介质折射率影响的起因.

参 考 文 献

- 1 黄建国, 韩建伟. 脉冲激光模拟单粒子效应的等效 LET 计算. 中国科学 G 辑: 物理学、力学、天文学, 2004, 34(6): 601—609
- 2 齐红基, 王建国, 邵建达, 等. 双折射薄膜界面电磁传播特性分析. 中国科学 G 辑: 物理学、力学、天文学, 2005, 35(5): 529—536
- 3 母国光. 光学. 北京: 人民教育出版社, 1978. 536—539
- 4 冯恩信. 电磁场与波. 西安: 西安交通大学出版社, 1999. 143—150
- 5 张之翔. 电磁学千题解. 北京: 科学出版社, 2002
- 6 程守洵. 普通物理学(第三册). 北京: 高等教育出版社, 1999. 104—110
- 7 张向宇. 实用化学手册. 北京: 国防工业出版社, 1986. 488-497
- 8 Ghatak A. Optics. New Delhi: Tata Mcgraw-Hill Publishing Co Ltd, 1977. Chapter 2
- 9 Haus H A, Melcher J R. Electromagnetic Fields and Energy. New York: Prentice Hall, 1989
- 10 陈秉乾, 舒幼生, 胡望雨. 电磁学专题研究. 北京: 高等教育出版社, 2001
- 11 姚允斌, 解涛, 高英敏. 物理化学手册. 上海: 上海科技出版社, 1985. 234—237
- 12 宛德福, 马兴隆. 磁性物理学. 北京: 电子工业出版社, 1999. 65—67
- 13 苏和, 王之亮. 基础物理手册. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1981. 544
- 14 姚允斌, 解涛, 高英敏. 物理化学手册. 上海: 上海科技出版社, 1985. 424—440