

磁光材料 Verdet 常数贡献性的讨论

蔡伟 邢俊晖 杨志勇

Contributions to Verdet constant of magneto-optical materials

Cai Wei Xing Jun-Hui Yang Zhi-Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 187801 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.187801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.187801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

半导体三量子点电磁感应透明介质中的非线性法拉第偏转

Nonlinear Faraday rotation in electromagnetically induced transparency medium of semiconductor three quantum dots

物理学报.2016, 65(24): 247801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.247801>

利用磁致发光曲线研究 Rubrene 器件中激子分裂和湮没过程

Investigation of excitons fission and annihilation processes in Rubrene based devices by utilizing magneto-electroluminescence curves

物理学报.2015, 64(17): 177801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.177801>

飞秒光诱导铽镓石榴石晶体中的磁化响应研究

Femtosecond photoinduced magnetization of terbium gallium garnet crystal

物理学报.2011, 60(8): 087803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.087803>

磁性纳米结构中由激光引起的超快自旋动力学研究

Laser-induced ultrafast spin dynamics research on magnetic nanostructures

物理学报.2011, 60(1): 017802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.017802>

磁光材料 Verdet 常数贡献性的讨论*

蔡伟¹⁾²⁾ 邢俊晖^{1)†} 杨志勇¹⁾

1) (火箭军工程大学, 兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 西安 710025)

2) (光电控制技术重点实验室, 洛阳 471000)

(2017 年 4 月 23 日收到; 2017 年 6 月 16 日收到修改稿)

Verdet 常数是表征材料磁光性能的重要参数, 具有波长和温度依赖性. 为了更好地分析入射光波长、温度等对 Verdet 常数的影响机理, 从基础理论切入, 分析了现有理论的优缺点. 结合光的波粒二象性特性, 提出了波动跃迁性贡献理论, 即法拉第效应是光的波动性作用以及电偶极跃迁作用带来的贡献之和, 波动性对偏转角的贡献为正, 跃迁性贡献为负. 在抗磁性材料中, 波动性贡献大于跃迁性贡献, Verdet 常数为正; 顺磁性材料中, 跃迁性贡献远大于波动性贡献, Verdet 常数为负. 进而分别以典型抗磁性材料重火石玻璃 ZF1 和顺磁性材料铽镓石榴石为例, 并结合相关数据、参数、模型, 对理论进行了验证. 试验结果表明, 在精确描述材料 Verdet 常数方面, 波动跃迁性贡献理论具有一定的优越性.

关键词: Verdet 常数, 法拉第效应, 波粒二象性, 量子理论

PACS: 78.20.Ls, 75.20.-g

DOI: 10.7498/aps.66.187801

1 引言

自法拉第磁光效应发现以来, 各种磁光材料相继问世并广泛应用于磁光开关、磁光调制器、相干俘获磁强计以及通信和控制等领域^[1-4]. 法拉第磁光效应描述了一束偏振光通过外加磁场的磁光材料(通常为晶体或玻璃)后偏振面发生偏转的现象, 偏转角度正比于磁场大小和光线有效传播距离, 该比例系数称为 Verdet 常数, 它是表征材料磁光性能的主要参数, 最初是实验现象以及实测数据的产物. 法拉第磁光效应的内在机理和 Verdet 常数的本质吸引着一批学者和研究人员从不同角度进行探究和发掘.

宏观理论最早被应用于 Verdet 常数的研究, 它能直观反映法拉第效应的物理实现过程, 但难以进一步解释 Verdet 常数的本质以及波长、温度等物理量对 Verdet 常数的作用机理^[5,6]. 探索 Verdet 常数本质的主流理论包括经典电子动力学理论(简称经

典理论)和量子理论. 经典理论以电子振子模型为基础^[7,8], 较好地阐明了 Verdet 常数与入射光波长和介质色散的关系, 对应的 Verdet 常数计算公式物理意义明晰, 但存在计算结果与实验值偏差较大的问题. 量子理论从能级分裂和电子跃迁出发, 从本质上揭示了法拉第磁光效应的作用机制^[9,10], 但在定量描述 Verdet 常数时还需要回归到宏观的统计学规律, 跃迁波长和相关参数需要通过对实验值的拟合来得到, 因此其计算模型的准确性难以通过原实验值验证.

无论是宏观理论、经典理论还是量子理论, 三者皆有其独到的一面, 但都难以对 Verdet 常数进行全面、系统的描述, 甚至有的方法在特定情况下得到的结果偏差较大. 此外, 现有理论的推导过程并未对 Verdet 常数的正负进行严格的定义, 有的虽然提到了抗磁性的 Verdet 常数为正, 顺磁性的为负, 但也是基于实验现象的简单概括. 为了深入揭示磁光材料 Verdet 常数的本质, 在大量对比论证的基

* 光电控制技术重点实验室和航空科学基金联合资助项目(批准号: 201551U8008)和国家自然科学基金(批准号: 61505254)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 582072026@qq.com

础上, 我们认为虽然经典理论和量子理论都能解释法拉第效应, 但反映的是促成法拉第效应的两个不同方面, 并以此提出初步假设: 磁光效应引起的法拉第转角是光的波动性和电子层跃迁共同作用的结果, 两种作用对物质的 Verdet 常数都有一定的贡献, 贡献的大小与材料本身、入射光波长和温度有关. 基于此假设, 提出了波动跃迁性贡献理论, 得到了相应模型, 进而验证了模型的正确性和假设的合理性.

2 理论与模型

2.1 经典理论

法拉第效应的经典理论基于 Lorentz 色散理论, 将光与物质相互作用近似为阻尼振子在入射光下的受迫振动, 体现了光的波动性. 利用经典电子动力学理论, 求得抗磁性 (diamagnetic) 材料 Verdet 常数 V_{dia} 表达式为

$$V_{\text{dia}} = \frac{e\lambda}{2mc} \frac{dn}{d\lambda}, \quad (1)$$

式中, e 为电子电荷量, m 为电子质量, c 为光速, λ 为入射光波长, $dn/d\lambda$ 为介质的色散. (1) 式表明抗磁性 Verdet 常数主要与入射波长和介质色散有关.

而顺磁性 (paramagnetic) 介质中, 邻近电子自旋之间往往存在较为微弱的交换作用, 这种交换作用可等效为外斯分子场, 因此, 顺磁性 Verdet 常数 V_{par} 表达式为

$$V_{\text{par}} = \frac{e\lambda}{2mc} \frac{dn}{d\lambda} (1 + v\chi), \quad (2)$$

式中, v 为与分子场常数有关的系数, 磁化率 $\chi = T_C/(T - T_p)$ 服从居里-外斯定律, T_C , T_p 分别为居里常数和居里温度. 可见, 顺磁性材料的 Verdet 常数还受温度 T 的影响.

2.2 量子理论

经典的量子理论认为外加磁场或磁化引起的基态或激发态能级分裂产生的不均匀性是法拉第旋转的微观起源, 从而导致物质离子 (或原子) 的电偶极和磁偶极跃迁的不均匀性, 在可见光范围内, 一般只考虑电偶极跃迁^[11].

基于量子理论, van Vleck-Hebb^[12] 求得了顺磁性 Verdet 常数表达式:

$$V_{\text{par}} = \frac{4\pi^2 v^2 \chi}{g\mu_B c h} \cdot \sum_{ij} [C_{ij}/(v^2 - v_{ij}^2)], \quad (3)$$

式中, g 为 Lande 分裂系数, μ_B 为玻尔磁子, h 为普朗克常量, v 为入射光的频率, C_{ij} 代表发生 v_{ij} 频率跃迁的概率. 由于磁化率是温度的函数, 所以顺磁性 Verdet 常数同时与入射光波长和温度有关.

Borrelli^[13] 基于量子理论得到了抗磁性 Verdet 常数, 即

$$V_{\text{dia}} = 4\pi N v^2 \cdot \sum_{ij} [A_{ij}/(v^2 - v_{ij}^2)^2], \quad (4)$$

式中, N 表示单位体积内载流子数, v_{ij} 为电子的迁移频率, A_{ij} 表示与迁移强度有关的参量. (4) 式表明, 抗磁性 Verdet 常数与波长有关, 而与温度无关.

2.3 现有理论的局限

由 (1) 和 (2) 式可见, 经典理论的 Verdet 常数模型具有表达清晰、便于定量分析和解算等优点, 只要知道某材料的介质色散、居里常数、居里温度以及根据磁学理论 $vT_C = T_p$ 的结论, 即可求解具体材料的 Verdet 常数. 但通过实验论证分析, 该模型存在较大误差. 以抗磁性材料重火石玻璃 ZF1 为例 (表 1, 图 1), 从介质色散出发计算其 Verdet 常数, 结果与实验值偏差较大. 为了符合实验值, 文献 [14] 引入了一个随磁光材料结合键性质改变的量——磁光系数 γ 用来修正, γ 是一种类似效率因素小于 1 的乘性因子, 需要通过实验值拟合计算获得, 并以 ZF7 为例拟合得到 $\gamma = 0.875$. 然而, 采用该方法计算顺磁性材料铽石榴石 (TGG) 的 Verdet 常数时, 会出现很大的偏差 (表 2, 图 2), 计算值与实验值符号相反, 且实验值的绝对值远大于计算值的绝对值, 因此采用磁光系数的方法具有一定的局限性.

对顺磁性 Verdet 常数研究通常采用量子理论, 一般通过对实验数据的拟合得到 Verdet 常数表达式和相关参数. 该方法的缺点是将法拉第效应仅仅归因于基于实验数据拟合得到的量子跃迁模型, 而忽略其他因素的影响, 这种拟合方法可能实际掩盖了除电偶极跃迁外的其他因素与 Verdet 常数的关系.

2.4 波动跃迁性贡献理论

为了探索和解释经典理论中计算结果的偏差问题, 从而更好地诠释 Verdet 常数的本质, 本文引入了光的波粒二象性理论: 光既具有波动特性, 又具有粒子特性, 两种特性的显著性相当, 且在传播

过程中同时存在^[15]. 基于这一思想, 考虑到经典理论体现了光的波动性, 而量子理论所解释的电偶极跃迁是光的粒子性的体现, 因此提出猜想性假设: 经典理论和量子理论所解释的两部分效应同时存在, 共同作用于法拉第旋转. 法拉第效应可分为两部分解释: 一部分是光的波动性带来的, 使法拉第转角偏正, 对应 Verdet 常数分量为正; 另一部分是光的粒子性作用带来的, 使转角偏负, 对应 Verdet 常数分量为负. 因此, 经典理论中计算结果的偏差并非受到效率等乘性因子的影响, 而是源自于量子效应产生的加性分量.

针对现有理论存在的不足, 在上述猜想的基础上, 提出了波动跃迁性贡献理论, 即法拉第磁光效应是光波与物质作用(波动性)和电偶极受激跃迁(跃迁性)共同带来的结果, 波动性和跃迁性同时对法拉第转角产生贡献, 贡献的大小与材料的磁性、材料的结构属性、主贡献离子、入射光波长和材料温度等因素有关.

法拉第磁光效应的波动性贡献是指线偏振光分解成的“左旋”和“右旋”两种波动光进入介质后与电磁性振子相互作用耦合成“左旋”和“右旋”电磁耦合场振荡, 当受到有效场造成的拉莫进动作用后, 耦合场振荡便以不同的波矢在介质中传播, 表现为宏观上的左右折射率差异, 从而导致了偏振光的旋转. 该部分贡献实际上就是经典理论所解释的法拉第效应. 为了明确 Verdet 常数的正负值, 现约定法拉第旋转角的正负关系: 迎着磁场正方向看, 偏振面的逆时针偏转角为正, 对应正的 Verdet 常数, 反之为负. 考虑正负问题后, 表达式将有别于经典理论的结果.

此时, 抗磁性 Verdet 常数的波动性贡献为

$$V_1^{\text{dia}} = \frac{q_e \lambda}{2mc} \frac{dn}{d\lambda}, \quad (5)$$

顺磁性 Verdet 常数的波动性贡献为

$$V_1^{\text{par}} = \frac{q_e \lambda}{2mc} \frac{dn}{d\lambda} \cdot \left(1 + v \frac{T_C}{T - T_p}\right), \quad (6)$$

正常色散区满足 $dn/d\lambda < 0$, 而 $q_e = -e < 0$, 所以 $V_1 > 0$.

法拉第磁光效应的跃迁性贡献是指物质中原子或磁性离子的电子层结构在外磁场的作用下产生能级分裂, 在光粒子激发下发生电子跃迁, 进而导致法拉第效应. 如顺磁性材料中通常含稀土离子(Pr^{3+} , Ce^{3+} , Nd^{3+} , Tb^{3+} , Dy^{3+} 等), 这些离子

具有不成对的 4f 电子, 且被外层的 5s 和 5p 电子所屏蔽, 配位场对内层 4f 电子的影响很小, 在磁场的作用下, 使电子极易发生 $4f^n \rightarrow 4f^{n-1}5d$ 的迁移, 表现出明显的顺磁性特征, 它对 Verdet 常数的贡献较大^[16].

跃迁性贡献可用量子理论描述. (3) 式表明顺磁性材料的 Verdet 常数是一系列跃迁作用的总和, 式中 v_{ij} , C_{ij} 等参数需要通过实验拟合方法来获得. 但由于各跃迁概率互不相同且具有微观不确定性, 导致难以直接进行拟合得到. 为此引入主导波长跃迁模型思想^[17,18], 即只考虑对 Verdet 常数起主导作用的跃迁 (v_t , C_t), (3) 式可简化为更加实用的表达式, 得到顺磁性 Verdet 常数的跃迁性贡献部分:

$$\begin{aligned} V_h^{\text{par}} &= \frac{4\pi^2 v^2 \chi}{g\mu_B ch} \cdot \sum_{ij} [C_{ij}/(v^2 - v_{ij}^2)] \\ &\xrightarrow{\text{主导跃迁}} \frac{4\pi^2 v^2}{g\mu_B ch} \cdot \frac{C_t}{v^2 - v_t^2} \cdot \chi \\ &= \frac{4\pi^2 C_t}{g\mu_B ch} \cdot \frac{\lambda_t^2}{\lambda_t^2 - \lambda^2} \cdot \frac{T_C}{T - T_p} \\ &= -\frac{\lambda_t^2}{\lambda^2 - \lambda_t^2} \frac{E}{T - T_p}. \end{aligned} \quad (7)$$

抗磁性材料中的 Pb^{2+} , Sb^{3+} , Te^{4+} , Bi^{3+} , Tl^{+} 等具有易极化的外层电子结构和较大的离子半径, 同时具有 $s^2 \rightarrow 4sp$ (包括 $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$, 3P) 的电子跃迁模式, 但这种贡献较小^[19].

同样采用主导波长跃迁模型思想, 得到抗磁性 Verdet 常数的跃迁性贡献为

$$\begin{aligned} V_h^{\text{dia}} &= 4\pi N v^2 \cdot \sum_{ij} [A_{ij}/(v^2 - v_{ij}^2)^2] \\ &\xrightarrow{\text{主导跃迁}} 4\pi N v^2 \cdot \frac{A_t}{(v^2 - v_t^2)^2} \\ &= \frac{4\pi N}{c^2} \cdot \frac{A_t \lambda_t^2 \lambda^4}{(\lambda^2 - \lambda_t^2)^2} \\ &= -\frac{A \lambda_t^4 \lambda^2}{(\lambda^2 - \lambda_t^2)^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

(7) 和 (8) 式中, λ_t 为主导跃迁波长, $E = 4\pi^2 C_t T_C / (g\mu_B ch)$ 和 $A = -4\pi N A_t / c^2$ 为与入射光波长 λ 无关的系数, 且为正值. 通常 $\lambda > \lambda_t$, $T > T_p$, 因此 $V_h < 0$. 基于主导波长跃迁模型的化简, 可使表达式清晰直观, 易于拟合得到 λ_t , E 和 A , 从而更好地分析 Verdet 常数与入射光波长的关系.

综上, 根据波动跃迁性贡献理论, 抗磁性和顺磁性材料的 Verdet 常数可表示为

$$V_{\text{dia}} = V_1^{\text{dia}} + V_h^{\text{dia}} = \frac{q_e \lambda}{2mc} \frac{dn}{d\lambda} - \frac{A \lambda_t^4 \lambda^2}{(\lambda^2 - \lambda_t^2)^2}, \quad (9a)$$

$$V_{\text{par}} = V_1^{\text{par}} + V_h^{\text{par}} = \frac{q_e \lambda}{2mc} \frac{dn}{d\lambda} \cdot \left(1 + v \frac{T_C}{T - T_p}\right) - \frac{\lambda_t^2}{\lambda^2 - \lambda_t^2} \frac{E}{T - T_p}. \quad (9b)$$

(9) 式表明抗磁性和顺磁性材料的 Verdet 常数来源于光的波动性与电子跃迁性贡献之和, 形式是经典理论与量子理论表达式的加和, 但实质上是光的波粒二象性作用的体现. 经典理论所解释的波动性贡献和量子理论所解释的跃迁性贡献分别体现了光的波动性和粒子性, 就像光在传播过程中始终存在波动性质和粒子性质一样, 磁光效应过程中其波动性与跃迁性作用也同时并存, 共同作用于法拉第旋转.

3 理论论证

3.1 抗磁性 Verdet 常数

选取典型抗磁性材料重火石玻璃 ZF1 为对象. ZF1 中重金属 Pb^{2+} 的存在使其具有较高的色散, 其介质色散满足柯西色散公式^[20]: $n(\lambda) = A_1 + B_1/\lambda^2 + C_1/\lambda^4$, 其中 $A_1 = 1.62517$, $B_1 = 7400.5152 \text{ nm}^2$, $C_1 = 3.77 \times 10^8 \text{ nm}^4$.

将系数 A_1 , B_1 , C_1 代入 (5) 式求得 ZF1 的 Verdet 常数中波动性贡献项为

$$V_1^{\text{dia}}(\text{ZF1}) = \frac{q_e \lambda}{2mc} \frac{dn}{d\lambda} = 293.3 \left(\frac{2B_1}{\lambda^2} + \frac{4C_1}{\lambda^4} \right), \quad (10)$$

式中, $q_e/2mc = -293.3 \text{ rad} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

根据经典理论 (10) 式计算 ZF1 的 Verdet 常数中波动性贡献部分 V_1^{dia} , 由波动跃迁性贡献理论 (9a) 式计算跃迁性贡献部分 V_h^{dia} , 计算结果如表 1 所列. 为方便描述, 约定波长单位为 nm, V 值单位为 $\text{rad} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

表 1 中, V 为文献 [21, 22] 中选取的长、中、短三组波长下的实验值, 本文默认其为真值; 根据 (8) 式并利用表 1 中第四列的数据拟合得到 ZF1 跃迁性贡献项的系数: $A = 1.069 \times 10^{15} \text{ rad} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$, $\lambda_t(\text{ZF1}) = 177.7 \text{ nm}$.

将 (10) 式及参数 A , λ_t (ZF1) 代入 (9a) 式得到抗磁性 ZF1 的 Verdet 常数表达式为

$$V(\text{ZF1}) = \frac{4.341 \times 10^6}{\lambda^2} + \frac{4.423 \times 10^{11}}{\lambda^4} - \frac{1.066 \times 10^6 \cdot \lambda^2}{(\lambda^2 - 31577)^2}. \quad (11)$$

ZF1 的 Verdet 常数中各部分的贡献以及与文献 [21] 中 Verdet 常数的对比如图 1 所示.

表 1 ZF1 的 Verdet 常数中波动、跃迁贡献分析表
Table 1. Calculation of wave-transition contribution to Verdet constant of ZF1.

λ	V	V_1^{dia}	V_h^{dia}
1060	3.80	4.21	-0.41
589.3	12.18	16.17	-3.99
435.8	27.10	35.12	-8.02

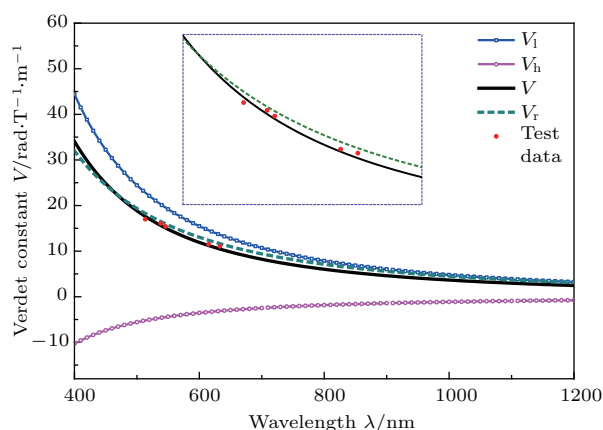


图 1 (网刊彩色) ZF1 的 Verdet 常数的波长依赖性
Fig. 1. (color online) Wavelength dependence of Verdet constant of ZF1.

图 1 中, V_1 , V_h , V 分别是利用表 1 的三组数据计算并拟合得到的波动性贡献 (即未经修正的经典理论计算的结果)、电子的跃迁性贡献以及波动跃迁性贡献模型的理论曲线; V_t 为文献 [21] 拟合得到的曲线; Test data (测试点) 为文献 [21, 22] 中的另外五组真值, 用于验证拟合曲线的合理性. 分别对比计算测试点在 V 和 V_t 两侧的分布情况, 发现测试点均分布于两曲线两侧, 但偏离误差不同, 均方差 $MSE(V) = 0.2266$ 明显小于 $MSE(V_t) = 0.6506$, 说明波动跃迁性贡献理论较经典理论能够更精确地描述 ZF1 的 Verdet 常数真值.

3.2 顺磁性 Verdet 常数

选取典型顺磁性材料 TGG 为对象, 由于 TGG 中稀土离子 Tb^{3+} 存在未配对电子对和极易跃迁的电子层结构, 使得该材料 Verdet 常数很大, 同时也具有较大的温度敏感性. 仍然从介质色散方程出发, 计算 TGG 的 Verdet 常数的波动性贡献, 其折射率满足 Sellmeier 公式^[23]: $n^2(\lambda) = A_2 + B_2/\lambda^2 + C_2/\lambda^4$, 其中 $A_2 = 3.734$, $B_2 = 48210 \text{ nm}^2$, $C_2 = 1.178 \times 10^8 \text{ nm}^4$.

根据 (6) 式及系数 A_2 , B_2 , C_2 求得 TGG 的 Verdet 常数的波动性贡献项:

$$V_1^{\text{par}}(\text{TGG}) = 293.3 \frac{B_2 \lambda^2 + 2C_2}{\lambda^2 \sqrt{A_2 \lambda^4 + B_2 \lambda^2 + C_2}} \times \left(1 + \frac{vT_C}{T - T_p} \right). \quad (12)$$

Löw 等^[24]通过实验计算得到了 TGG 的居里温度 $T_p = -7 \text{ K}$, 实质是在整个温度范围内, 该材料都体现顺磁温度特性, 满足居里-外斯定律. 参照 ZF1 的计算思路, 根据 (12) 和 (9b) 式分别计算 TGG 的 Verdet 常数中波动性贡献部分 V_1^{par} 和跃迁性贡献部分 V_h^{par} , 计算结果如表 2 所列.

表 2 TGG 的 Verdet 常数中波动、跃迁贡献分析表 ($T = 293 \text{ K}$)

Table 2. Calculation of wave-transition contribution to Verdet constant of TGG ($T = 293 \text{ K}$).

λ	V	V_1^{par}	V_h^{par}
1064	-40.2	6.64	-46.84
632.8	-134.1	19.73	-153.8
532	-190.0	28.81	-218.8

表 2 中, V 为文献^[25]给出的实验值, 即真值; 根据 (7) 式并利用表 2 中第四列的数据拟合得到 TGG 跃迁性贡献项的系数: $E = 2.3646 \times 10^5 \text{ rad} \cdot \text{K} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, $\lambda_t(\text{TGG}) = 252.2 \text{ nm}$.

将 (12) 式及系数 E , $\lambda_t(\text{TGG})$ 代入 (9b) 式求得顺磁性 TGG 的 Verdet 常数为

$$V(\text{TGG}) = \frac{1.414 \times 10^7 \lambda^2 + 6.91 \times 10^{11}}{\lambda^2 \sqrt{3.734 \lambda^4 + 48210 \lambda^2 + 1.178 \times 10^9}} \cdot \frac{T}{T + 7} - \frac{1.504 \times 10^{10}}{(\lambda^2 - 63605)(T + 7)}. \quad (13)$$

由表 2 计算并拟合得到的 TGG 的 Verdet 常数中各部分的贡献以及与文献^[25]中的理论曲线对比如图 2 所示.

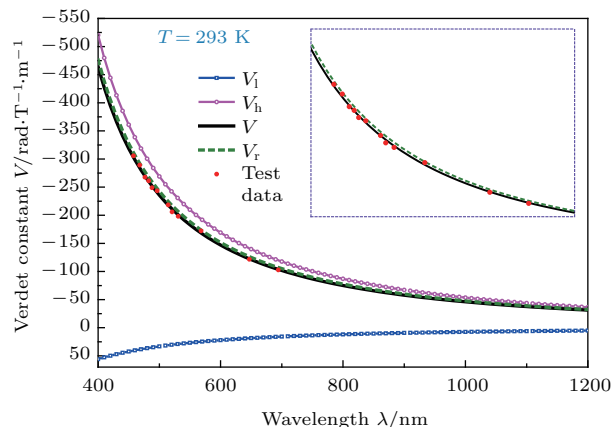


图 2 (网刊彩色) TGG 的 Verdet 常数的波长依赖性 ($T = 293 \text{ K}$)

Fig. 2. (color online) Wavelength dependence of Verdet constant of TGG ($T = 293 \text{ K}$).

图 2 中, V_1 代表波动性贡献, V_h 代表电子跃迁性贡献, V 为波动跃迁性贡献模型的理论曲线. 由图 2 可见, TGG 的 Verdet 常数中的跃迁性贡献 V_h 远大于波动性贡献 V_1 , 且覆盖了波动性部分, 从而使整体表现为负. V_r 为文献^[25]拟合提供的曲线, Test data 为 Villaverde 等^[26]采用不同谱线的激光器测得的实验值. 同样计算和比较测试点偏离 V , V_r 曲线的均方差: $MSE(V) = 3.6192 < MSE(V_r) = 19.901$, 说明波动跃迁性贡献模型具有更好的符合特性, 优于传统量子理论的方法.

选取 6 组特定的波长, 进一步研究 TGG 的 Verdet 常数的温度特性, 如图 3 所示.

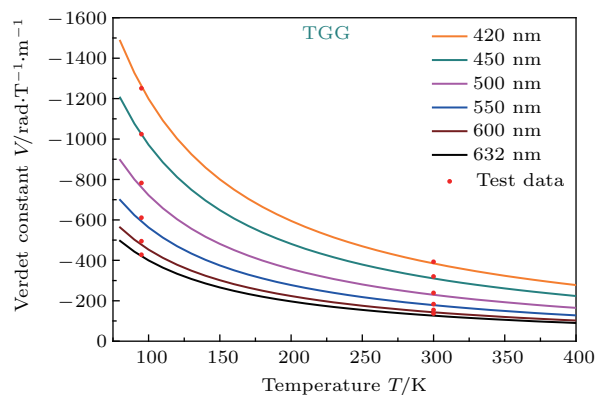


图 3 (网刊彩色) 不同波长下 TGG 的 Verdet 常数的温度特性

Fig. 3. (color online) Temperature dependence of Verdet constant of TGG at different wavelengths.

图3的六条曲线表示TGG的Verdet常数在不同入射波长下随温度变化的情况,数据点Test data是在温度 $T = 95$ 和 300 K时相应波长下测得的值^[27],作为真值.由图3中的六条变化曲线可见,TGG的Verdet常数会随着温度的升高而变小,符合文献^[27]中顺磁性材料的温度特性,说明用波动跃迁性贡献理论也能很好地描述顺磁性材料的温度特性.

4 结 论

本文由磁场中光与物质相互作用的本质出发,分别从宏观和微观两个角度探索法拉第效应,通过分析经典理论、量子理论的优缺点,得出了描述Verdet常数的波动跃迁性贡献理论,理论指出了法拉第旋转是光的波动性和电子的跃迁性共同作用的结果.讨论了两种贡献的正负问题,并根据各自贡献大小阐述了抗磁性材料与顺磁性材料之间Verdet常数差异的根源.选取典型抗磁性材料ZF1和顺磁性材料TGG进行了对比验证,试验结果表明:相比传统理论,波动跃迁性贡献理论在一定程度上能够更精确地描述磁光材料的Verdet常数,有利于探索磁光材料Verdet常数的本质及其与入射光的关系.

参考文献

- [1] Li C S 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 047801 (in Chinese) [李长胜 2015 物理学报 **64** 047801]
- [2] Tian Y, Tan B Z, Yang J, Zhang Y, Gu S H 2015 *Chin. Phys. B* **24** 063302
- [3] Zhang F, Tian Y, Yi Z, Gu S H 2016 *Chin. Phys. B* **25** 094206
- [4] Yan S L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 240505 (in Chinese) [颜森林 2015 物理学报 **64** 240505]
- [5] Liu G Q, Le Z Q, Shen D F 2001 *Magneto-optics* (Shanghai: Science and Technology Press) pp30–34 (in Chinese) [刘公强, 乐志强, 沈德芳 2001 磁光学 (上海: 科学技术出版社) 第30—34页]
- [6] Li Y S, Liu J, Cao L X, Liu Q Z 2016 *Sci. China: Technol. Sci.* **59** 1899
- [7] Liu G Q, Wu B 1988 *Acta Opt. Sin.* **8** 105 (in Chinese) [刘公强, 吴蓓 1988 光学学报 **8** 105]
- [8] Tan C Z, Arndt J 1996 *Physica B* **233** 1
- [9] Robet S 1932 *Phys. Rev.* **41** 489
- [10] Slezak O, Yasuhara R, Lucianetti A, Mocek T 2015 *Opt. Express* **23** 13641
- [11] Xia T, Zhang G Y, Zhang X L, Xue L P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1741 (in Chinese) [夏天, 张国营, 张学龙, 薛刘萍 2007 物理学报 **56** 1741]
- [12] van Vleck J H, Hebb M H 1934 *Phys. Rev.* **46** 17
- [13] Borrelli N F 1964 *J. Chem. Phys.* **41** 3289
- [14] Wang Z P, Ouyang C M, Wang X Z 2006 *J. Harbin Eng. Univ.* **27** 782 (in Chinese) [王政平, 欧阳春梅, 王晓忠 2006 哈尔滨工程大学学报 **27** 782]
- [15] Piazza L, Lummen T T, Quiñonez E, Murooka Y, Reed B W, Barwick B, Carbone F 2015 *Nat. Commun.* **6** 6407
- [16] Di N, Zhao J L, Jiang Y J, Yang D X, Zhang H, Zhou K S, Han Z H, Chen L F 2006 *Acta Photon. Sin.* **35** 1645 (in Chinese) [底楠, 赵建林, 姜亚军, 杨德兴, 张浩, 邹快盛, 韩宗虎, 陈林峰 2006 光子学报 **35** 1645]
- [17] Slezák O, Yasuhara R, Lucianetti A, Mocek T 2016 *Opt. Mater. Express* **6** 3683
- [18] Jiang Y S, Zhou B M, Wang B, Hu L L 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 3157 (in Chinese) [蒋亚丝, 周蓓明, 王标, 胡丽丽 2009 光学学报 **29** 3157]
- [19] Wang S N 2013 *M. S. Thesis* (Xi'an: Shanxi University of Science and Technology) (in Chinese) [王顺逆 2013 硕士学位论文 (西安: 陕西科技大学)]
- [20] Yu S Q, Wang F, Huang X J 2010 *J. Kashgar Teach. Coll.* **31** 44 (in Chinese) [俞胜清, 王峰, 黄晓俊 2010 喀什师范学院学报 **31** 44]
- [21] Pu S L, Yang Y H, M J 2003 *J. Magn. Mater. Dev.* **34** 14 (in Chinese) [卜胜利, 杨瀛海, 马静 2003 磁性材料及器件 **34** 14]
- [22] Ma H Y 2010 *M. S. Thesis* (Changchun: Changchun University of Science and Technology) (in Chinese) [马海云 2010 硕士学位论文 (长春: 长春理工大学)]
- [23] Schlarb U, Sugg B 2010 *Phys. Stat. Sol.* **182** K91
- [24] Löw U, Zvyagin S, Ozerov M, Schaufuss U, Kataev V, Wolf B, Lüthi B 2013 *Eur. Phys. J. B* **86** 1
- [25] Chen Z, Hang Y, Wang X, Hong J Q 2016 *Solid State Commun.* **241** 38
- [26] Villaverde A B, Donatti D A, Bozinis D G 2001 *J. Phys. C: Solid State Phys.* **11** L495
- [27] Valiev U V, Gruber J B, Burdick G W, Ivanov I A, Fu D J, Pelenovich W O, Juraeva N I 2016 *J. Luminescence* **176** 86

Contributions to Verdet constant of magneto-optical materials*

Cai Wei¹⁾²⁾ Xing Jun-Hui^{1)†} Yang Zhi-Yong¹⁾

1) (*Armament Launch Theory and Technology Key Discipline Laboratory of China, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China*)

2) (*Science and Technology on Electro-optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China*)

(Received 23 April 2017; revised manuscript received 16 June 2017)

Abstract

Verdet constant is one of the key parameters to characterize the material magneto-optical properties, and dependent on wavelength and temperature. In order to thoroughly analyze the influence mechanisms of the incident wavelength and temperature on the Verdet constant and then uncover its essence, both the advantages and disadvantages of the classical electronic dynamics theory and quantum theory are discussed on account of basic theories and test data. However, neither of the two theories can be separately used to fully explain the Verdet constant and the correlative test data. Therefore, based on the essential property of the magneto-optical effect, the interactions between the incident light and magnetic matter in a magnetic field are studied, and then a hypothesis which suggests that the Faraday effect result from the combination of various factors is proposed. Furthermore, a theory of wave-transition contribution to the Verdet constant is deduced by adopting the theory of wave-particle duality. That is, the Faraday effect is caused by two different contributions simultaneously. One is the wave contribution, which is the interaction between the wave aspect of light and the magneto-optical medium, and the other refers to the transition contribution, which comes from the electronic transition. When the light enters into a deflection angle, the wave contribution is positive while the transition contribution is negative. In a diamagnetic material, since the wave contribution is greater than the transition contribution, the diamagnetic Verdet constant is positive while in a paramagnetic material, on the contrary, the transition contribution is much larger than the wave contribution, so the paramagnetic Verdet constant is negative. According to the above-mentioned theory, the diamagnetic Verdet constant model and the paramagnetic Verdet constant model are proposed by combining the two parts together. Taking the typical diamagnetic material ZF1 and the typical paramagnetic terbium gallium garnet for example, the influences of the incident wavelength and the temperature on the Verdet constant are analyzed, and the deduced theory together with the corresponding models is tested and verified by analyzing the relevant parameters and the test data. Accordingly, the research turns out that the theoretical results correspond to the real values, which proves the rationality of the hypothesis and the authenticity of the deduced theory. Compared with the traditional theories, the wave-transition contribution theory and its model are superior in the sense of precisely describing the material Verdet constant.

Keywords: Verdet constant, Faraday effect, wave-particle duality, quantum theory

PACS: 78.20.Ls, 75.20.-g

DOI: 10.7498/aps.66.187801

* Project supported by the Key Laboratory of Optoelectronic Control Technology and Aviation Science Foundation, China (Grant No. 201551U8008) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61505254).

† Corresponding author. E-mail: 582072026@qq.com