

交变电流调制下磁光材料介电常数对螺线管 内部轴向磁场的影响

杨志勇, 蔡伟, 张志利, 邢俊晖, 赵云芳, 姚瑞桥

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, 陕西 西安, 710025

摘要 基于磁光调制的方位测量系统的关键技术是磁光调制技术, 交变电流驱动的含磁光材料螺线管内部轴向磁场的精确表达至关重要, 但是目前关于磁光材料参数特性对磁场的影响研究甚少。以磁光材料 TGG 晶体为例, 研究了 TGG 介电常数变化对螺线管内部轴向交变磁场的影响。首先, 当螺线管内部磁光材料的介电常数不变时, 利用麦克斯韦方程建立正弦波调制下螺线管内部轴向交变磁场模型; 然后根据 TGG 的材料构成, 通过分子模拟软件 VASP 获得 TGG 的介电常数随调制信号频率变化的函数; 最后将此变化函数引入到已经建立的交变磁场模型中, 获得 TGG 介电常数变化对正弦波调制下螺线管内部轴向交变磁场的影响。结果表明: 随着调制信号频率的增加, TGG 晶体的介电常数减小, 造成螺线管内部轴向磁场幅值衰减变缓、磁场相移衰减中的急速衰减阶段提前, 且衰减速率更快。该研究思路与方法为进一步研究磁光材料对螺线管内部磁场、方位失调角测量精度的影响提供了参考。

关键词 物理光学; 磁光调制; 磁场; 磁光材料; 介电常数

中图分类号 TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0426002

Effect of Magneto-Optical Material Dielectric Constant on Internal Axial Magnetic Field of Solenoid Modulated by Alternating Current

Yang Zhiyong, Cai Wei, Zhang Zhili, Xing Junhui, Zhao Yunfang, Yao Ruiqiao

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

Abstract The key technique of azimuth measurement system based on magneto-optical modulation is magneto-optical modulation technique, in which the accurate expression of the internal axial magnetic field of solenoid modulated by alternating current is important, however there is little study on effect of magnetic material's parameter characteristic in magnetic field. Take the magneto-optical material TGG crystal as an example, we study the influence of TGG dielectric constant change on the axial alternating magnetic field of the solenoid. Firstly, we assume that the dielectric constant of magneto-optical material in solenoid is a constant, the model of internal axial magnetic field of solenoid modulated by sine wave signal is established with the Maxwell's equations. Secondly, according to the molecular formula of TGG, the variation function of TGG dielectric constant with modulation signal frequency is acquired by VASP software. At last, the variation function is introduced into the established magnetic field model, and the effect of TGG dielectric constant on the internal axial magnetic field of solenoid modulated by sine wave signal is got. The results shows that when the modulation signal frequency rises, the TGG dielectric constant reduces, which slows the amplitude attenuation trend of internal axial magnetic field of solenoid, and advances the rapid attenuation stage in the magnetic field phase shift attenuation process, and speeds up the attenuation velocity of the rapid attenuation stage. The research method provides a reference for studying the effect of magneto-optical material on internal axial magnetic field of solenoid, and measurement precision of azimuth misalignment angle.

收稿日期: 2017-02-24; 收到修改稿日期: 2017-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(61505254)

作者简介: 杨志勇(1983—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事定位定向与基准传递方面的研究。

E-mail: yangzhiyong121@126.com

Key words physical optics; magneto-optical modulation; magnetic field; magneto-optical material; dielectric constant

OCIS codes 260.5210; 120.4640; 210.3810

1 引 言

基于磁光调制的空间方位失调角测量技术,是指利用光的偏振和法拉第磁致旋光效应测量位于不同水平面上的上下两台无机械连接的设备之间的水平方位失调角^[1],因其具有能够实现无接触式高精度测角的优点,因此该项技术在航天器对接^[2]、武器装备高精度方位测量^[3]、近地浮空器^[4]等军用领域以及生物医药^[5]等领域具有广阔的应用前景。目前关于此技术本身的研究主要集中在:1)磁光调制信号波形对方位测量系统的影响,主要研究磁光调制信号波形分别为正弦波、方波、三角波、锯齿波时,方位测量系统的测量精度、测量范围的差异以及其共有的测量规律的总结归纳^[6-7];2)温度对方位测量系统的影响,从原理样机实验情况来看,系统开机后磁光调制器内存在温升现象,并最终引起失调角信号的漂移^[8],对此问题,文献^[9]初步分析了温度变化与失调角信号漂移之间的关系,Menke等^[10]、Williams等^[11]以及Ulmer^[12]也为抑制磁光调制过程中的温升现象做了一定的研究工作;3)新型磁光材料的研制,比如同等条件下能够产生大偏转角的维尔德常数磁光材料、对温度敏感性弱的磁光材料等^[13]。

方位测量技术能够实现无接触式测角的核心是基于马吕斯定律的磁光调制技术,其中交变电流信号驱动的螺线管产生的磁场对方位失调角的测量至关重要。但是当外界环境、调制信号参数等因素发生变化时,会引起螺线管内磁光材料的参数特性变化,进一步影响含有方位失调角信号的偏振光信号的质量,从而降低方位失调角的测量精度。目前,关于磁光材料的参数特性变化对方位失调角测量精度的影响的研究鲜有报道。现有文献多以超磁致伸缩材料为例研究参数对磁场的影响,如文献^[14]研究了材料相对磁导率对超磁致伸缩材料棒磁场的影响,文献^[15]仅采用仿真软件研究了超磁致伸缩材料相对磁导率对内部磁场的影响,文献^[16]也是采用仿真软件研究导磁材料磁导率对抛光区磁场强度的影响,文献^[17]分析了材料参数对磁场作用下超导圆环的涡旋分布的影响,文献^[18]研究了材料电导率对涡流损耗的影响。可见关于磁光材料的参数特性对磁光调制器内部磁场的影响的研究较少。

本文以磁光材料 TGG 晶体为例,重点研究了 TGG 介电常数变化对螺线管产生的交变磁场的影响。首先,利用麦克斯韦方程建立了正弦波调制下螺线管内部产生的交变磁场模型;其次,根据 TGG 的材料构成通过分子模拟软件 VASP 获得了 TGG 的介电常数随调制信号频率变化的函数;然后,将此函数引入到已经建立的交变磁场模型中,建立了调制信号频率、磁光材料介电常数变化函数、螺线管磁场三者之间的关系模型,得到了 TGG 介电常数变化对正弦波调制下螺线管内部交变磁场的影响。

2 基于磁光调制的方位测量系统简介

图 1 为基于磁光调制的方位失调角测量系统原理图,系统由上仪器和下仪器两部分组成,上仪器中激光器发出的激光经过起偏器成为线偏振光,当线偏振光通过调制器中磁光玻璃时,在正弦激励信号产生的同频交变磁场作用下,产生法拉第磁致旋光效应,实现了偏振光信号的调制。经调制后的线偏振光信号到达下仪器,经检偏、聚焦、光电转换后变为电信号,再经过信号处理电路的处理,即可提取出与失调角密切相关的电压信号,结合一定的算法处理即可得到方位失调角。

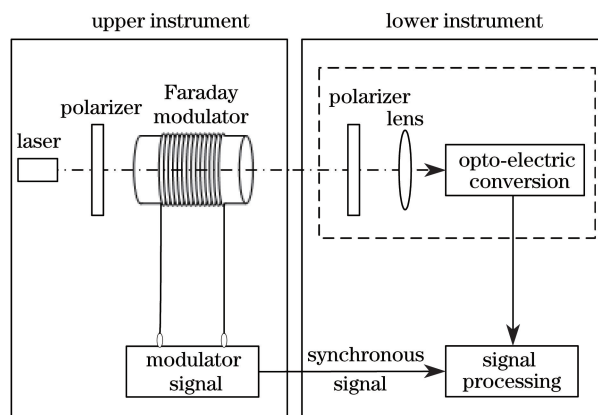


图 1 基于磁光调制的方位失调角测量系统原理

Fig. 1 Principle of azimuth misalignment angle measurement system based on magneto-optical modulation

3 正弦波驱动下含磁光材料的螺线管内磁场模型

根据文献^[19]、^[20]的方法,利用麦克斯韦方程建立交变电流驱动的螺线管内部磁场模型。在螺线管内部建立直角坐标系和柱坐标系,各坐标轴的关系

如图 2 所示,其中 z 轴代表螺线管的中心轴, R 为螺线管半径。在柱坐标系中, r 指目标点与中心轴 z 轴

的距离, ϕ 指目标点与 yOz 平面的夹角。 r 、 ϕ 、 z 分别表示螺线管径向、圆周方向和轴向的矢量方向。

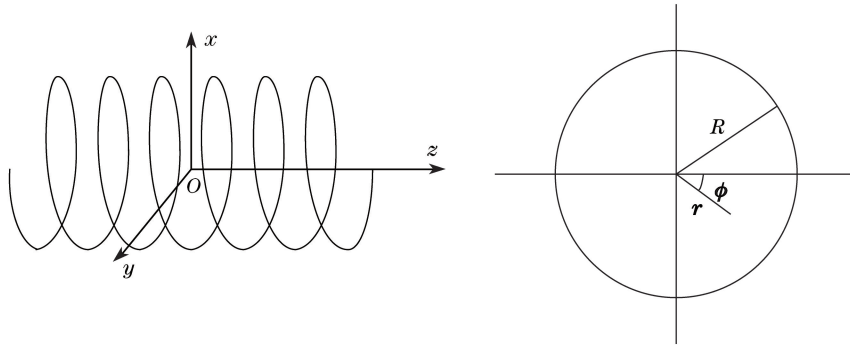


图 2 r 、 ϕ 、 z 的关系

Fig. 2 Relationship of r , ϕ , z

由于螺线管的对称性、均匀性,磁场 B 和电场 E 都没有 r 分量,因此当长螺线管中的驱动电流为正弦波信号 $I_s = I_0 \exp(-j\omega t)$ 时,螺线管的磁场 B 和电场 E 可表示为

$$B(r, t) = B_\phi(r, t)\phi + B_z(r, t)z, \quad (1)$$

$$E(r, t) = E_\phi(r, t)\phi + E_z(r, t)z, \quad (2)$$

式中 I_s 为正弦波交变电流信号, I_0 和 ω 分别为电流信号的幅值和频率; B_ϕ 、 B_z 分别指圆周方向和轴向的磁场强度, E_ϕ 、 E_z 分别指圆周方向和轴向的电场强度, t 为时间变量。

将麦克斯韦方程组应用于上述螺线管模型中,可得到:

$$\frac{\partial E_z}{\partial r} = j\omega B_\phi, \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rB_\phi) = j\mu\epsilon\omega E_z, \quad (4)$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial r} = j\mu\epsilon\omega E_\phi, \quad (5)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rE_\phi) = j\omega B_z, \quad (6)$$

式中 μ 和 ϵ 分别是螺线管内材料的磁导率和介电常数。设 $k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$, 得到

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial B_z}{\partial r} + k^2 B_z = 0, \quad (7)$$

(7) 式为典型的零阶贝塞尔方程,解方程可得内部轴向磁场 B_{zi} 和外部轴向磁场 B_{zo} 的通解分别为

$$B_{zi}(r, t) = A J_0(k_i r) \exp[-j(\omega t + \phi_i)], \quad (8)$$

$$B_{zo}(r, t) = C H_0^1(k_o r) \exp[-j(\omega t + \phi_o)], \quad (9)$$

式中 $B_{zi}(r, t)$ 和 $B_{zo}(r, t)$ 分别指距离中心轴 r 处、时间为 t 时螺线管内部、外部的轴向磁场强度, A 和 C 分别是它们的幅值, ϕ_i 和 ϕ_o 分别是螺线管内部和

外部磁场的相移。 $J_0(k_i r)$ 是第一类零阶贝塞尔函数, $H_0^1(k_o r)$ 是 Hankel 函数, $H_0^1(k_o r) = J_0(k_o r) + jN_0(k_o r)$, $N_0(k_o r)$ 是第二类零阶贝塞尔函数, k_i 、 k_o 为 k 在螺线管内部和外部的取值。

文献[20]利用安培环路定理和电磁感应定律,且结合时变电磁场的性质获得螺线管半径 R 处的微小空间内外轴向磁场、内外电场存在如下关系:

$$B_{zi}(k_i R) - B_{zo}(k_o R) = \mu_o n I, \quad (10)$$

$$E_{\phi_i}(k_i R) = E_{\phi_o}(k_o R), \quad (11)$$

式中 μ_o 是真空或空气的磁导率, n 为螺线管线圈匝数密度, I 指积分路径内的驱动电流。结合(10)、(11)式获得内部轴向磁场(8)式中的参数如下:

$$\phi_i = \phi_o - \delta, \quad (12)$$

$$\phi_o = \arctan \left[\frac{k_i J_0(k_i R) N_1(k_o R) - k_o J_1(k_i R) N_0(k_o R)}{k_i J_0(k_i R) J_1(k_o R) - k_o J_1(k_i R) J_0(k_o R)} \right], \quad (13)$$

$$\delta = \arctan [N_1(k_o R) / J_1(k_o R)], \quad (14)$$

$$A = \frac{\mu_o n I [J_0(k_o R) \sin(\phi_o) - N_0(k_o R) \cos(\phi_o)]}{J_0(k_i R) [J_0(k_o R) \sin(\delta) - N_0(k_o R) \cos(\delta)]}, \quad (15)$$

式中 J_0 、 J_1 分别为第一类零阶和一阶贝塞尔函数, N_0 、 N_1 分别为第二类零阶和一阶贝塞尔函数, δ 指螺线管内外相移之差。

当正弦波驱动电流幅值为 I_0 时,螺线管磁场幅值为 A , 衰减系数为 $J_0(k_i r)$, 相移为 ϕ_i 。螺线管外部介电常数为空气的介电常数 ϵ_o , 磁导率为 μ_o ; 螺线管内部材料暂时选取介电常数为 $4.1\epsilon_o$ 、磁导率为 μ_o 的磁光玻璃。设定螺线管半径及测量点位置,螺线管内部轴向磁场的相移、幅值与驱动信号频率之间的关系如图 3 中介电常数恒定时的曲线所示。

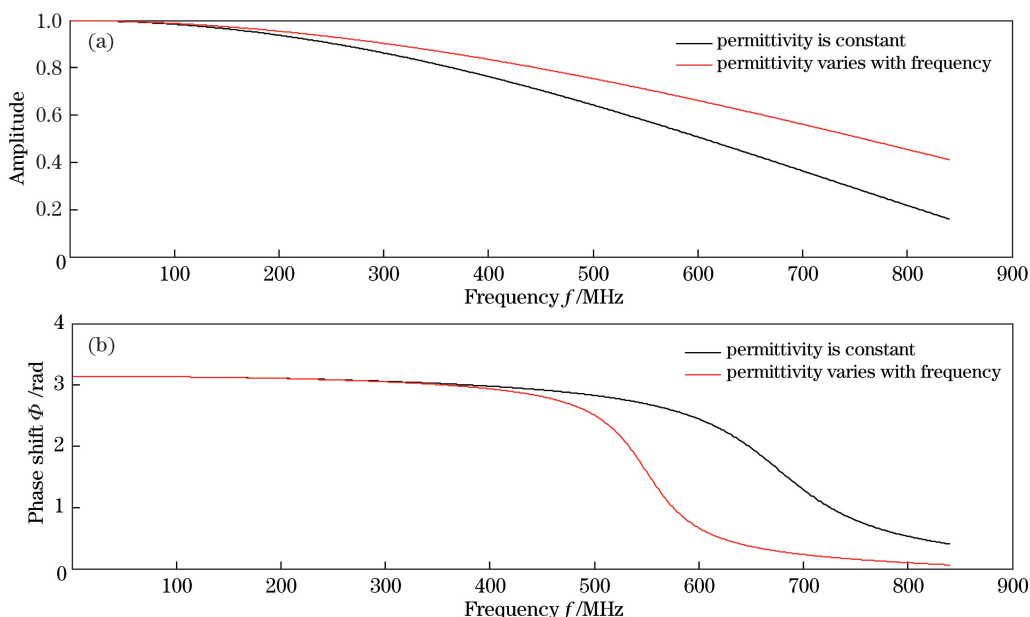


图 3 螺线管内部轴向磁场对比。(a) 轴向磁场的幅值衰减;(b)轴向磁场的相移变化

Fig. 3 Comparison of internal axial magnetic field of solenoid. (a) Amplitude attenuation of axial magnetic field; (b) phase shift variation of axial magnetic field

由图 3 中介电常数恒定时的曲线可知:驱动信号频率较低时, 交变磁场幅值几乎没有衰减, 这是因为低频时感生电场激发的附加磁场很微弱, 可以忽略。当驱动信号为高频时, 感生电场激发的磁场不能忽略, 被激发的磁场进一步引起感生电场, 总的磁场是螺线管电流的磁场和一系列附加磁场的叠加之和, 交变磁场的幅值衰减加剧。

4 磁光材料 TGG 晶体介电常数模型

磁光材料 TGG 晶体由于具有较大的维尔德常数和较低的透射率损耗等优良光学性能, 是目前制作法拉第旋光器的最佳磁光材料。此外, TGG 是一种典型电介质, 介电常数对应的物理属性势必会对时变电场产生影响, 而时变的电场和磁场是相互影响的。当介质位于交变电磁场中且调制信号频率发生变化时, 介质的介电常数也将发生变化, 从而进一步影响电磁场的分布。因此, TGG 的介电常数对电磁场的影响不能忽略。利用 VASP 软件对 TGG 的介电常数变化函数进行模拟计算。

1) 前期准备

通过软件 ICSD 查出晶格常数和 α 、 β 、 γ 原子坐标, 用于构建 VASP 结构计算所需的结构文件 POSCAR。由 ICSD 计算得到的 TGG 晶格参数如图 4 所示, 由图 4 可知, $a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。此外 TGG 属于七大晶体系中的立方晶体, 在光学领

域属于各向同性的介质, 因此计算前, 还要准备好 INCAR 文件、POTCAR 文件、KPOINTS 文件。

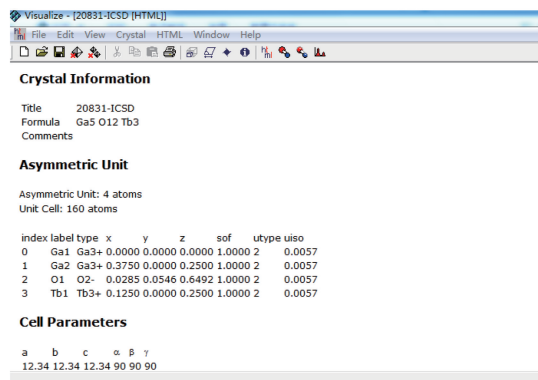


图 4 ICSD 计算得到的 TGG 晶格参数

Fig. 4 Lattice parameters of TGG from ICSD

2) 结构优化

设定关键参数, 包括 IBRION、NSW、ALGO、SIGMA、ISM EAR。为了获得稳定的结构, 令 IBRION=2, NSW=200, 此结构默认对应的温度是 0 K。

为了保证计算过程中不会遇到不收敛或者奇异状态, 设置 ALGO=Normal。

对于磁性体系和在费米面附近态简并度比较高的体系, 设置 SIGMA=0.06, 以保证输出的磁矩和能带图、态密度图足够清晰精确。

一般设置 ISMEAR=0。

3) 总能量计算

在结构优化的基础上,进行总能量计算,且同时输出对应的电荷密度和波函数。

设定关键词: $NSW=0$, $IBRION=-1$ 。其中,指定电荷密度输出至文件 CHGCAR,为后续能带和态密度计算作准备。波函数 WAVECAR 是在特定时刻用来确定费米面附近态的贡献。

4) 能带和态密度计算

准备好 CHGCAR、KPOINTS、INCAR、POTCAR、POSCAR。其中需要更改 INCAR,设置 $ICHARG=11$,目的是从静态计算的 CHGCAR 中读入电荷密度。KPOINTS 是高对称点数,不同单胞和晶系的高对称点不相同,高对称点的具体数量要根据体系的结构来确定。

态密度计算。设置 $ICHARG=11$,从静态计算的 CHGCAR 中读入电荷密度。若是三维或者二维体系,通常设置 $ISMear=-5$ 。

5) 体系光学性质的计算

计算光学性质的本质实际上就是计算体系的介电常数。这是最关键的一步,需要设定如下参数: $LOPTICS=TRUE$, $NBANDS=704$, $NEDOS=36000$, $NPAR=48$ 。一个典型光学性质计算的 OPTCTR 如图 5 所示。

```
OPTCTR (default setting)
OMMIN = 0
OMMAX = 20
NEDOS = 4000
NBCON_USE = 0.85*NBCON
ISYMM = 1
LJDOS = .TRUE.
LDOS = .TRUE.
LKRAMERS = .TRUE.
LEXTERNAL = .FALSE.
GAMMA = 0.002
```

图 5 VASP 计算中 OPTCTR 的设定

Fig. 5 Setting of OPTCTR in VASP

最后,输出的 OUTCAR 文件里包含了需要的介电常数变化函数。

6) 数据处理

在最终用 VASP 计算得到的一系列输出文件中,介电常数保存在名为 OUTCAR 的文件里。晶体的介电常数张量是一个对称张量,它只有 6 个独立的分量,经主轴变换以后,晶体的介电常数张量中只有 3 个非零的对角元素。计算得到的 TGG 介电常数部分结果如图 6 所示,图中给出的 TGG 介电常数张量有 6 个独立分量,且经主轴变换后只有

3 个非零对角元素。

frequency dependent effects)	REAL DIELECTRIC FUNCTION (RPA, no local field effects)					
E(ev)	X	Y	Z	XY	YZ	ZX
0.000000	4.050598	4.050613	4.050796	0.000086	0.000161	
0.000137						
0.077818	4.050903	4.050921	4.051102	0.000086	0.000161	
0.000137						
0.155637	4.051822	4.051838	4.052015	0.000086	0.000161	
0.000137						
0.233455	4.053352	4.053363	4.053550	0.000086	0.000161	
0.000138						
0.311274	4.055500	4.055511	4.055691	0.000086	0.000161	
0.000138						
0.389092	4.058272	4.058279	4.058469	0.000086	0.000161	
0.000138						
0.466911	4.061671	4.061678	4.061867	0.000087	0.000162	
0.000138						
0.544729	4.065699	4.065713	4.065905	0.000087	0.000162	
0.000138						
0.622547	4.070380	4.070389	4.070579	0.000087	0.000163	
0.000139						

图 6 VASP 计算得到的 TGG 介电常数部分结果

Fig. 6 Partial dielectric constants of TGG by VASP

由于 TGG 属于各向同性的立方晶体,因此它

$$\text{的介电张量可表示为} \begin{bmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_1 \end{bmatrix}.$$

将计算得到的介电常数与调制信号频率一一对应,最终得到 TGG 介电常数变化函数与调制信号频率之间的关系,如图 7 所示。

5 TGG 介电常数对磁场的影响分析

在第 3 节中,假设介电常数是恒定不变的。但是根据第 4 节内容可知,磁光材料 TGG 的介电常数随着调制信号频率的变化而变化,因此需要在第 3 节建立的磁场模型基础上,引入变化的介电常数函数,细化螺线管内部的轴向磁场模型。

用幅值为 I_0 的正弦电流驱动时,螺线管磁场幅值为 1 T,衰减系数为 $J_0(k_i r)$,相移为 ϕ_i 。将第 3 节中的磁光材料更换为 TGG 晶体,相应的材料的介电常数由 $4.1\epsilon_0$ 更改为图 7 中随频率变化的介电常数变化函数,相应材料的磁导率为 μ_0 ,螺线管外部环境参数以及其他参数均不变。Matlab 计算得到的螺线管内部轴向磁场的幅值衰减、相移随驱动电流频率的变化情况如图 3 中介电常数随频率变化时的曲线所示。

由图 3 可知,与介电常数恒定时的曲线相比,TGG 晶体的介电常数随频率变化时,螺线管内部轴向磁场幅值衰减的总趋势不变,但是随着调制信号频率的增加,磁场幅值的衰减程度变弱。这主要是由于 TGG 的介电常数会随着频率的增加而减小,磁光材料对于原电场的削弱能力变小,在能量守恒

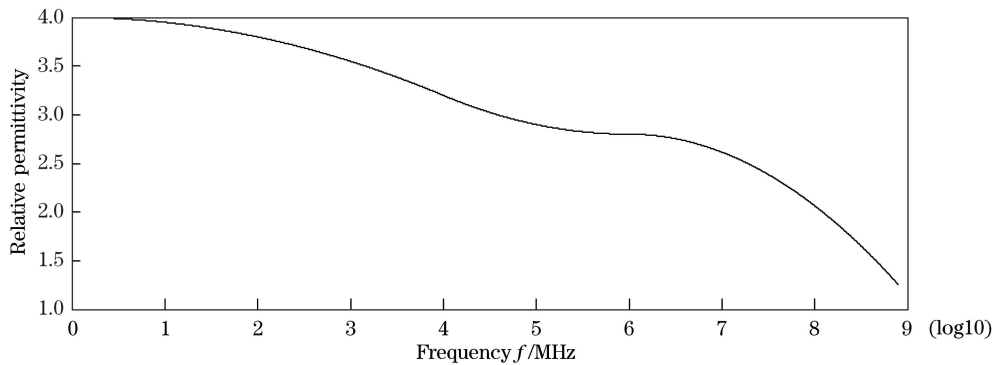


图 7 TGG 介电常数随调制信号频率变化的曲线

Fig. 7 Dielectric constant curve of TGG with modulation signal frequency

的条件下,磁场的能量就会相应地大一些,因而随着调制信号频率增加,磁场强度的衰减程度会逐渐减弱。

6 结 论

利用麦克斯韦方程、分子模拟软件 VASP 研究了正弦波调制下内含磁光材料 TGG 晶体的螺线管内部轴向磁场的分布问题,建立了调制信号频率、TGG 晶体介电常数、螺线管内部轴向磁场之间的关系模型,明确了介电常数变化对磁场的影响情况,得出如下结论:

1) 磁光材料介电常数不变时,随着调制信号频率增高,螺线管内部磁场幅值呈衰减趋势;磁场的相移也会减小,且中间有急速衰减阶段,相移衰减总体趋势为缓慢衰减、急剧衰减、缓慢衰减。

2) 当把 TGG 晶体放入螺线管内时,随着调制信号频率增高,螺线管内部磁场幅值仍然呈衰减趋势,但是衰减速率变慢;磁场的相移仍然会减小,总体衰减趋势不变,但是急速衰减阶段提前,且此阶段的衰减速率更快。

本文的研究思路与方法可以为进一步研究磁光材料参数对螺线管内部磁场、方位失调角测量精度的影响提供参考。

参 考 文 献

- [1] Dong X N, Gao L M, Shen X J, *et al.* Passing azimuth vertically with the technic of magneto-optic modulation[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(11): 1389-1391.
董晓娜, 高立民, 申小军, 等. 利用磁光调制实现方位角垂直传递[J]. 光子学报, 2001, 30(11): 1389-1391.
- [2] Yang Z Y, Huang X X, Zhou Z F, *et al.* Application of square wave magneto-optic modulation in spacecraft docking[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(8): 1732-1739.
杨志勇, 黄先祥, 周召发, 等. 方波磁光调制测量在航天器对接中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(8): 1732-1739.
- [3] Yang Z Y, Huang X X, Zhou Z F, *et al.* New high-precision method of measuring spatial azimuth based on magneto-optic modulation polarized light[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1112008.
杨志勇, 黄先祥, 周召发, 等. 基于磁光调制偏振光的空间方位失调角高精度测量新方法[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1112008.
- [4] Yang Y C, Luo H. Laser transmission design on the three-dimension attitude calibration of subaerial aerostat[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 634-638.
杨雨川, 罗晖. 近地浮空器三维姿态校准的激光传递设计[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 634-638.
- [5] Shen X, Qian C, Liang Z C. Research on the technology of measuring the concentration of the two-component solution based on magneto-optical modulation[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2010, 21(7): 1044-1047.
沈晓, 钱晨, 梁忠诚. 基于磁光调制的二元溶液浓度检测技术研究[J]. 光电子·激光, 2010, 21(7): 1044-1047.
- [6] Meng T T, Fu Z S, Liu H, *et al.* Modeling and experimental study on a high precision polarization measurement based on magneto-optical modulation[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2011, 41(6): 964-968.
孟甜甜, 符照森, 刘辉, 等. 基于磁光调制原理的高精度偏振角测量方法模拟与实验研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2011, 41(6): 964-968.
- [7] Yang Z Y, Huang X X, Zhou Z F, *et al.* The application rule of simple symmetrical wave signal magneto-optical modulation in spatial azimuth measurement[J]. Optik, 2014, 125(3): 1042-1048.
- [8] Dong X N. The research on technique of passing azimuth angle vertically[D]. Xi'an: Xi'an Institute of

- Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2001: 17-18.
- 董晓娜. 方位垂直传递技术的研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2001: 17-18.
- [9] Zheng H Z, Ma C W, Wu Y M, *et al.* Temperature adaptability of magneto-optic modulation in a disconnect mechanically azimuth measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(5): 638-640.
- 郑宏志, 马彩文, 吴易明, 等. 无机械连接方位角测量系统中磁光调制的温度适应性研究[J]. *光子学报*, 2004, 33(5): 638-640.
- [10] Menke P, Bosselmann T. Temperature compensation in magneto-optic AC current sensors using an intelligent AC-DC signal evaluation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(7): 1362-1370.
- [11] Williams P A, Day G W, Rose A H. Compensation for temperature dependence of Faraday effect in diamagnetic materials: application to optical fibre sensors[J]. *Electronics Letters*, 1991, 27(13): 1131-1132.
- [12] Ulmer E A, Jr. High accuracy Faraday rotation measurements[C]//*Optical Fiber Sensors*, Optical Society of America, 1998: 288-291.
- [13] Li Y A. Study on polarization and magneto-optical properties in conventional optical fibers and photonic crystal fibers[D]. Xi'an: Northwest University, 2007.
- 李永安. 传统光纤及光子晶体光纤偏振与磁光特性研究[D]. 西安: 西北大学, 2007.
- [14] Wang X Y, Yao X Y, Sun H X, *et al.* Finite element model of giant magnetostrictive actuator and its magnetic field analysis[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(s2): 172-176.
- 王修勇, 姚响宇, 孙洪鑫, 等. 超磁致伸缩作动器有限元建模与磁场分析[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(s2): 172-176.
- [15] Yuan H Q, Sun H G. Inner magnetic field characteristic of giant magnetostrictive materials and effects of the materials parameters on the characteristic[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(30): 119-124.
- 袁惠群, 孙华刚. 超磁致伸缩材料内部磁场特性及材料参数对其影响分析[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(30): 119-124.
- [16] Zheng Y C, Huang W, He J G. Influence of circuit structure and material parameters on the magnetic field in magneto-rheological finishing (MRF) area[J]. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2015, 46(6): 50-53.
- 郑永成, 黄文, 何建国. 磁路结构及材料参数对磁流变抛光区磁场的影响[J]. *磁性材料及器件*, 2015, 46(6): 50-53.
- [17] Shi L M, Zhou M J, Zhu R Y. Evolution of vortex configuration for superconducting ring in the presence of an externally applied field[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(24): 247501.
- 史良马, 周明健, 朱仁义. 磁场作用下超导圆环的涡旋演化[J]. *物理学报*, 2014, 63(24): 247501.
- [18] Sun H G, Yuan H Q. Theoretical analysis of magnetic field and eddy current loss within giant magnetostrictive material[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2008, 29(3): 371-374.
- 孙华刚, 袁惠群. 超磁致伸缩材料内部磁场与涡流损耗理论分析[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(3): 371-374.
- [19] Cai W, Wu F C, Yang Z Y. Magnetic field of long solenoid driven by square wave[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 092601.
- 蔡伟, 伍樊成, 杨志勇. 方波信号驱动的长螺线管磁场分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 092601.
- [20] Cai W, Wu F C, Yang Z Y, *et al.* Analysis of solenoid magnetic field based on Maxwell equation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(12): 123201.
- 蔡伟, 伍樊成, 杨志勇, 等. 基于麦克斯韦方程的交变电流长螺线管磁场[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(12): 123201.