

文章编号 1004-924X(2015)03-0760-09

## PLZT 陶瓷在多能场耦合下的光致伸缩效应

黄家瀚, 王新杰\*, 王 灵

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了消除高能光束照射下镧改性锆钛酸铅(PLZT)陶瓷的光致形变与光生电压之间的迟滞现象, 建立了一种多能场耦合下的新型光致伸缩本构方程, 实验研究了影响该迟滞现象的各种因素。首先, 对光照作用下光-电-热-力多能场耦合作用进行理论分析, 建立了光致伸缩效应的本构关系; 然后, 对反常光生伏特效应、光焦热效应、热释电效应、热膨胀效应以及压电效应进行理论推导, 得到了新型的光致伸缩本构方程; 最后, 通过温度屏蔽实验和光致伸缩静态实验验证了提出的本构方程。实验表明: PLZT 陶瓷表面的温升是造成迟滞现象的主要原因; 实验曲线变化趋势与理论结果一致, 显示理论模型合理; 消除温度影响后, 实验所用 PLZT 样品的光致形变达到饱和和所用的时间约为 10 s。结果表明, 降低 PLZT 陶瓷表面的温升能有效消除迟滞现象, 提高光致形变响应速度; 建立的光致伸缩本构方程为 PLZT 陶瓷驱动控制研究提供了理论基础。

**关键词:** PLZT 陶瓷; 多能场耦合; 光致伸缩效应; 本构方程

**中图分类号:** TQ174.758 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152303.0760

## Photostrictive effect of PLZT ceramic at coupling of multiple energy fields

HUANG Jia-han, WANG Xin-jie\*, WANG Jiong

(School of Mechanical Engineering,

Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

\* Corresponding author, E-mail: xjwang@njust.edu.cn

**Abstract:** To eliminate the hysteresis phenomenon between the photodeformation and the photovoltage of PLZT (Lead Lanthanum Zirconate Titanate) under the irradiation of high energy light, a novel photostrictive constitutive equation in multi-energy fields was established and the influence factors of the hysteresis phenomenon were investigated by experiments. Firstly, the light-thermal-electric-elastic coupling mechanisms of the photostrictive effect under a lighting were analyzed theoretically and the constitutive relationship of photostrictive effect was established. After that, a novel constitutive equation was obtained by the derivation of anomalous photovoltaic effect, thermal effect, pyroelectric effect, thermal expansion effect and piezoelectric effect. Finally, the photostrictive constitutive equation was validated through the temperature screening test and photostrictive static experiments. Experimental results indicate that the temperature rise of PLZT ceramic is the main

收稿日期: 2014-07-20; 修订日期: 2014-08-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51205205); 中国博士后基金资助项目(No. 2012M521083); 江苏省科研创新计划资助项目(No. CXZZ13\_0191)

reason of hysteresis phenomenon; and the variation trends of experiment curves are agreed well with the theoretical results, which confirms the reasonability of the theoretical model. Moreover, the photodeformation of the PLZT in the experiment takes about 10 s to reach saturation after eliminating the temperature rise. It shows that reducing the temperature rise effectively eliminates the hysteresis phenomenon and improves the response speed of photodeformation. The novel constitutive equation provides a theoretical basis for driving and controlling of PLZT ceramics.

**Key words:** PLZT ceramic; multiple energy field coupling; photostrictive effect; constitutive equation

## 1 引言

随着光机电一体化技术的迅猛发展,基于光机电一体化技术的光束调节系统被广泛应用于舰载、机载及星载激光武器的光束指向系统<sup>[1-2]</sup>,卫星空间光通信的光束主动对准系统<sup>[3-4]</sup>,高功率激光装置的光束自动准直系统<sup>[5-6]</sup>及激光扫描系统中<sup>[7]</sup>。作为光学系统中光束调节装置的核心部件,反射镜的驱动装置决定了光束调节系统的结构形式、响应频率、负载的尺寸和重量等。光致伸缩材料镧改性锆钛酸铅(PLZT)陶瓷可将光能直接转化为机械能,消除了中间的机械传动误差;无导线连接和电磁激发装置,不易受到电磁干扰,可实现远程光控非接触式驱动。因此,基于PLZT陶瓷的驱动器在光束调节系统中,特别是真空状态下或太空中的激光武器和卫星空间光通信系统中具有较大优势和应用前景。

PLZT陶瓷是Haertling和Land在1970年把La元素掺杂到PZT陶瓷进行热压烧结形成的透明铁电陶瓷。自此以后,众多学者对其反常的光生伏特效应和光致伸缩机理进行了研究。1983年,Brody<sup>[8]</sup>等人用RC充电电路模型来描述PLZT陶瓷极化方向上光电场强度的变化规律,得到了光致伸缩本构方程及响应时间常数。1993年,Fukuda<sup>[9]</sup>等人实验证实了光致伸缩效应涉及光电效应、光焦热效应、热膨胀效应等,但是对各个效应之间的叠加是增强或削弱关系没有进一步论述。2005年,Shih<sup>[10]</sup>等人依照Fukuda等人的实验数据给出了光电热力耦合本构方程,但未考虑热膨胀对电场的影响,且Shih认为热膨胀引起的应变与电场(光生电场与热释电电场)产生的应变相反。2007年,Sun和Tong<sup>[11]</sup>基于Poosanaas等人提出的电压源模型推导出了光致伸缩数学模型,但均不含时间参数,只适于静态分析。2012

年,Luo和Tong<sup>[12]</sup>等人对0~3极化方向PLZT陶瓷进行了实验研究,实验显示PLZT陶瓷产生的光生电场达到顶峰后下降至某一稳定数值,但PLZT的光致形变逐渐达到最大值后趋于饱和,并未出现下降趋势(此现象异于Fukuda等人的实验现象);该现象表明光致形变响应速度远远低于光生电压和光生电流,存在迟滞现象,但他们并未对此迟滞现象进行解释。

虽然众多学者对PLZT陶瓷光致伸缩效应机理及本构方程进行了一定程度的研究,但PLZT陶瓷的光致伸缩机理仍存在多能场耦合关系不清的情况,且光致形变与光生电压/光生电流之间的迟滞现象仍未得到解释。

本文通过对光-电-热-力多能场耦合下PLZT陶瓷的反常光生伏特效应、热释电效应以及压电效应的理论研究,提出了新的光致伸缩效应本构方程,并通过实验进行验证。该方程充分考虑了温升对光致伸缩本构模型的影响,解释了光致形变与光生电压/光生电流之间的迟滞现象,为提高PLZT陶瓷的响应速度提供了理论基础。

## 2 PLZT多能场耦合下光致伸缩机理

PLZT陶瓷属于铁电陶瓷的一种,其与热释电材料和压电材料的关系如图1所示。

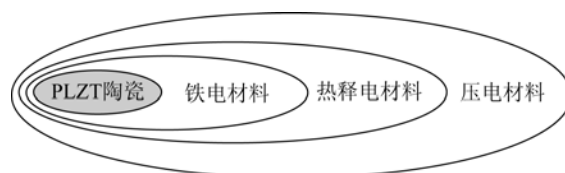


图1 PLZT陶瓷与铁电材料、热释电材料和压电材料的关系

Fig. 1 Interrelationship of PLZT, ferroelectrics, pyroelectrics and piezoelectrics

PLZT 陶瓷同时具有压电材料、热释电材料和铁电材料的特性。然而,未极化的 PLZT 陶瓷是各向同性的多晶体,虽然陶瓷中各晶粒存在自发极化,但其自发极化方向在陶瓷内部处于杂乱无章的排列状态,所以未极化的 PLZT 陶瓷整体不显示极性<sup>[13]</sup>。在 PLZT 陶瓷两端镀上电极,在电场中在居里点温度以上进行极化,电场撤去后,陶瓷中具有很强的剩余极化强度,具有压电效应、热释电效应以及铁电效应。

当高能光束照射在 PLZT 陶瓷表面时,PLZT 陶瓷发生形变,称为光致伸缩效应。PLZT 陶瓷在光束照射下的光致伸缩效应是反常光生伏特效应、光焦热效应、热释电效应以及压电效应等综合作用的结果,其涉及到光-电-热-力等 4 个能场耦合,形成了光致伸缩效应本构关系的物理学基础。PLZT 陶瓷在光束照射下各能场的耦合关系如图 2 所示。

在光束的照射下,PLZT 陶瓷表面的束缚电子吸收光子能量从价带激发到导带变成光生载流子(自由电子),光生载流子在剩余极化电场作用下沿剩余极化电场方向移动,从而形成光电流,并且在垂直于剩余极化方向的两端电极上产生高达数 kV/cm 的光生电压,该电压比晶体电子禁带宽度  $E_g$  大 2~4 个数量级,不受晶体电子禁带宽度  $E_g$  的限制,故称为反常光生伏特效应,其作用过程如图 3 所示<sup>[14]</sup>。

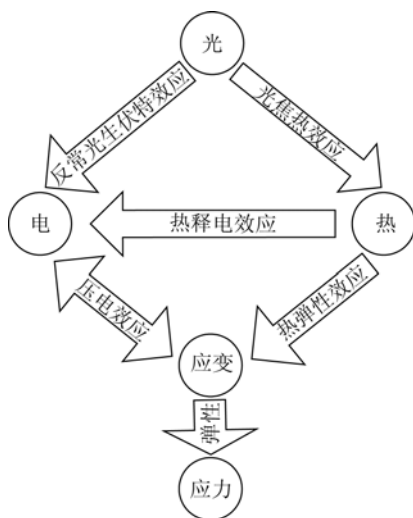


图 2 PLZT 陶瓷在光照作用下光-电-热-力耦合作用关系示意图

Fig. 2 Photostrictive effect with light-electric-thermal-elastic field coupling

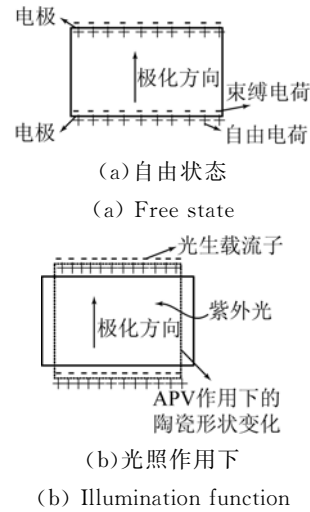
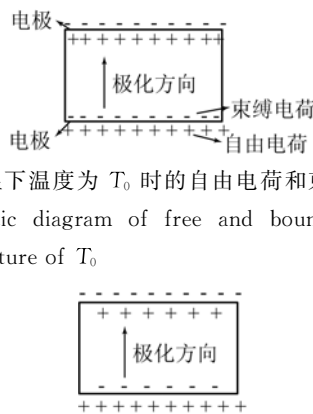


图 3 反常光生伏特效应示意图<sup>[14]</sup>

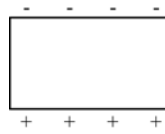
Fig. 3 Schematic diagram of anomalous photovoltaic effect

由于所使用的紫外光源产生的并非完全是 365 nm 波长的紫外光,照射时在产生反常光生伏特效应的同时会使 PLZT 陶瓷表面的温度升高。当 PLZT 陶瓷温度发生变化时,PLZT 陶瓷的自发极化强度也随之发生变化,与极化强度方向垂直的电极面上就会产生热释电电荷,当温度变化比较快,内部或外界的电荷载不及补偿热释电电荷时,在 PLZT 陶瓷的两端电极面上会产生电场,该现象称为热释电效应<sup>[15]</sup>,图 4 所示为 PLZT 陶瓷的表面电荷随温度升高而发生变化的示意图,当 PLZT 陶瓷由于吸收高能光束辐射而使其温度从室温  $T_0$  升高到  $T_0 + \Delta T$  时,自发极化强度变小,导致晶体表面的束缚电荷减少,相当于“释放”了部分自由电荷。



(a) 常温下温度为  $T_0$  时的自由电荷和束缚电荷  
(a) Schematic diagram of free and bound charges at temperature of  $T_0$

(b) 光照作用下温度升高至  $T_0 + \Delta T$  时,束缚电荷减少  
(b) Schematic diagram of decreased bound charges at temperature of  $T_0 + \Delta T$



(c)温升导致的等效结果

(c)Equivalent results of temperature rise

图 4 热释电效应示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pyroelectric effect

高能光束照射带来的温度变化不仅使 PLZT 陶瓷发生热释电效应,同时温度升高也使 PLZT 陶瓷发生热变形,由于压电效应,一部分热变形在两端电极面上产生与极化方向相反的电场。

综上所述,当高能光束照射 PLZT 陶瓷时,在光-电-热-力多能场的耦合作用下,PLZT 内部发生了反常光生伏特效应、热释电效应和压电效应等。其中反常光生伏特效应(光-电转化)与热释电效应(光-热-电转化)在 PLZT 两端的电极面上产生的电场方向与剩余极化方向相同,使 PLZT 陶瓷内部的电场强度增大;由于正压电效应(力-电转化),一部分热变形在两端电极面上产生的电场与极化方向相反,削弱了陶瓷内部的电场强度。在逆压电效应(电-力转化)和热膨胀效应(热-力转化)作用下,PLZT 陶瓷最终实现了力场的转化。因此,光照下 PLZT 陶瓷的光致伸缩效应是光-电-热-力多能场的耦合作用的结果。

### 3 PLZT 陶瓷光致伸缩效应本构方程

根据 PLZT 陶瓷的光致伸缩效应多能场耦合关系分析,在光照下,主要是光-电耦合、光-热耦合和热-电耦合等起作用。

#### 3.1 反常光生伏特效应数学模型

根据反常光生伏特效应,当紫外光源照射 PLZT 陶瓷时,陶瓷两端电极之间产生光生电压。PLZT 陶瓷可以看作恒流源、光电阻  $R_p$  和电容  $C_p$  组成的并联回路<sup>[16]</sup>,如图 5 所示。

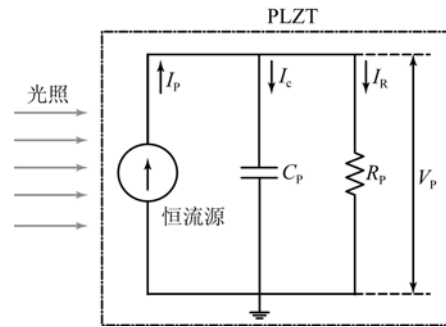


图 5 PLZT 陶瓷等效电学模型

Fig. 5 Equivalent electrical model for PLZT

由图 5 所示电路可得:

$$I_p = I_c + I_R, \quad (1)$$

$$V_p = I_R R_p, \quad (2)$$

$$C_p \frac{dV_p}{dt} = I_c, \quad (3)$$

式中:  $I_p$  为光电流;  $I_c$  为流经电容的电流;  $I_R$  为流经电阻的电流;  $V_p$  为光生电压。

由式(1)和(3)可得:

$$I_p R_p = I_c R_p + I_R R_p = C_p \frac{dV_p}{dt} R_p + V_p. \quad (4)$$

由式(4)可以得光生电压为:

$$V_p = I_p R_p (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) = V_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}), \quad (5)$$

式中:  $V_s$  为饱和光生电压,  $V_s = I_p R_p$ ;  $\tau_1$  为光照时间常数,  $\tau_1 = R_p C_p$ 。

假设  $H$  为 PLZT 陶瓷电极间距离,则光生电场强度  $E_p(t)$  为:

$$E_p(t) = \frac{V_s}{H} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) = E_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}), \quad (6)$$

式中:  $E_s$  为饱和光生电场强度,  $E_s = \frac{V_s}{H}$ 。

#### 3.2 热释电效应本构方程

在光照下,PLZT 陶瓷表面温度会升高。假设 PLZT 陶瓷在光照强度为  $I$  的高能光束照射下,根据热平衡原理可得:

$$C_T \frac{d(T - T_0)}{dt} + G_T (T - T_0) = AI, \quad (7)$$

式中:  $C_T$  为 PLZT 陶瓷的热容;  $G_T$  为热交换系数;  $T_0$  为 PLZT 陶瓷初始温度,即室温;  $A$  为 PLZT 陶瓷的光照面积。

求解式(7),可得到在光照下温度  $T$  为:

$$T = \Delta T_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}}) + T_0, \quad (8)$$

式中:  $\Delta T_s$  为光照条件下温度最大变化量, 且  $\Delta T_s = \frac{AI}{G_T}$ ;  $\tau_\theta$  为热时间常数, 且  $\tau_\theta = \frac{C_T}{G_T}$ 。

对式(8)求导, 则光照下的温度变化率为:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\Delta T_s}{\tau_\theta} e^{-\frac{t}{\tau_\theta}}. \quad (9)$$

根据热释电效应的定义可得到热释电电流表达式为:

$$i_\theta = AP \frac{dT}{dt} = \frac{AP\Delta T_s}{\tau_\theta} e^{-\frac{t}{\tau_\theta}}, \quad (10)$$

式中:  $P$  为 PLZT 陶瓷的热释电系数, 且  $P = \frac{dP_s}{dT}$ ,  $P_s$  为 PLZT 陶瓷的自发极化强度。

由于 PLZT 陶瓷两端镀有电极, 可看作电容, 则热释电电压为:

$$V_\theta(t) = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{AP\Delta T_s}{C} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_\theta}}), \quad (11)$$

式中:  $C$  为 PLZT 陶瓷的电容,

则温度升高产生的热释电电场为:

$$E_\theta(t) = \frac{V_\theta}{H} = \frac{AP\Delta T_s}{CH} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_\theta}}). \quad (12)$$

$$E(t) = E_p(t) + E_\theta(t) - \beta E_e(t) = E_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + \frac{AP\Delta T_s}{CH} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_\theta}}) - \beta \frac{\lambda}{d_{31} Y_a} \Delta T_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau_\theta}}), \quad (15)$$

式中:  $\beta$  为热膨胀电压耦合系数。

考虑到热膨胀对应变的影响, 则 PLZT 陶瓷在光照下的应变为:

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= d_{31} E(t) + \epsilon_e = d_{31} [E_p(t) + E_\theta(t) - \beta E_e(t)] + \epsilon_e = \\ &E_s d_{31} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + \frac{d_{31} AP\Delta T_s}{CH} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_\theta}}) + (1 - \beta) \frac{\lambda \Delta T_s}{Y_a} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_\theta}}). \end{aligned} \quad (16)$$

## 4 实验验证

为了验证 PLZT 陶瓷在多能场耦合下的电场及应变本构方程的正确性, 对 PLZT 陶瓷在紫外光源照射下的温度、电压以及位移等参数进行了测量。

### 4.1 实验装置

测试所用的 PLZT 陶瓷试件在空气中进行电极化, 极化温度在居里温度以上, 尺寸参数为  $5 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ , 组分为 3/52/48。所用光源为 LED-UV 面光源, 其产生的紫外光波长在  $365 \text{ nm}$  呈正态分布, 其光照强度可利用 UV-A 紫外辐照计进行标定; 实验利用色散共焦位移计对 PLZT 陶瓷试件的形变进行测量; 电压传感器为

### 3.3 热伸缩本构方程

根据热弹性理论可知, 在光电束照射下, 热应变  $\epsilon_e$  为:

$$\epsilon_e = \frac{\lambda}{Y_a} \Delta T = \frac{\lambda}{Y_a} \Delta T_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau_\theta}}), \quad (13)$$

式中:  $\lambda$  为 PLZT 陶瓷的热应力系数;  $Y_a$  为 PLZT 陶瓷的弹性模量。

由于 PLZT 陶瓷具有压电效应, 温度升高产生的热膨胀会产生与剩余极化方向相反的电场  $E_e$ , 根据压电效应可知热膨胀产生的电场强度为:

$$E_e(t) = \frac{\lambda}{d_{31} Y_a} \Delta T_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau_\theta}}), \quad (14)$$

式中:  $d_{31}$  为 PLZT 陶瓷的压电常数。

特别指出的是, 在正压电效应作用下, 热膨胀形变使得 PLZT 陶瓷电极两端产生一定量电场强度, 但存在一定程度效率损失, 其方向与光生电场和热释电电场方向相反。

由以上分析可知, 在光电束照射下, PLZT 陶瓷内部产生的综合电场强度为:

在光照下的应变为:

Trek 公司的高阻抗电压表 Model 821HH; 利用红外温度传感器对光照下的 PLZT 陶瓷的温度进行测量。PLZT 陶瓷的光致伸缩测试实验平台如图 6 所示。在实验中, 利用 LED-UV 面光源分别以  $100, 200, 300$  和  $400 \text{ mW/cm}^2$  的光照强度照射 PLZT 陶瓷片  $150 \text{ s}$ , 分别测得不同光照强度下 PLZT 陶瓷的光电压、形变位移以及温度等参数。

### 4.2 实验结果与讨论

图 7 所示为不同光照强度下 PLZT 陶瓷表面温度随时间变化的曲线, 随着光照强度的增强, PLZT 陶瓷表面温度升高越大, 温度变化率也越大, 且照射一段时间后, 温度逐渐趋于饱和, 温度变化率趋于 0, 温度曲线随时间的变化趋势基本

符合通过热平衡理论推导的温度变化表达式。

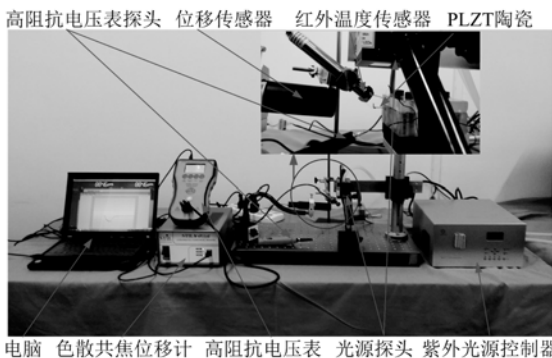


图 6 PLZT 陶瓷多能场耦合实物测试平台

Fig. 6 Testing platform for measuring static photostrictive of PLZT

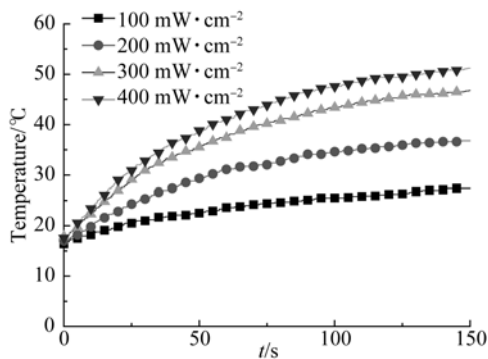


图 7 不同光照强度下 PLZT 试件表面温度随时间变化曲线

Fig. 7 Time history of temperature of PLZT under the irradiation of different intensities

图 8 所示为不同光照强度下 PLZT 陶瓷两电极端电压随时间的变化曲线。测量时间为 300 s, 其中光照和光停时间各 150 s。在 100、200、300 和 400 mW/cm<sup>2</sup> 的光照强度下, PLZT 陶瓷两端电压随着光照强度增强, 响应速度变快, 并且电压的饱和值也越来越大。在光照强度为 100 mW/cm<sup>2</sup> 的紫外光源照射下, 光生电压在 40 s 左右达到 839 V 并基本保持不变, 当在 150 s 时光停止后, 光生电压迅速下降至 210 V 左右; 在光照强度为 200 mW/cm<sup>2</sup> 的紫外光源照射下, 光生电压在 30 s 左右达到最大值 973 V, 然后减小至 880 V 并保持不变, 当在 150 s 时光停止后, 光生电压迅速下降为 0 V 并产生反向电压, 可达到 -162 V; 在光照强度为 300 mW/cm<sup>2</sup> 的紫外光源照射下,

光生电压在 25 s 左右达到最大值 1 203 V, 然后减小至 1 100 V 左右并保持不变, 当在 150 s 时光停止后, 光生电压迅速下降为 0 V 并产生反向电压, 可达 -326 V; 当光照强度为 400 mW/cm<sup>2</sup> 时, 光生电压在 20 s 内达到最大值 1 373 V, 然后下降至 1 250 V 左右保持稳定, 当在 150 s 时刻光停后, 光生电压迅速下降为 0 V 并产生 -376 V 的反向电压, 这一结果与国外的一些实验结果一致<sup>[12]</sup>。由以上实验现象可知, 光强越大, 电压峰值与饱和值越大, 且光停后产生的反向电压越大, 这是由于光强越大导致 PLZT 陶瓷表面温度越高, 引起的热膨胀和热释电效应越显著, 光停后热释电效应产生的反向电压也越大。

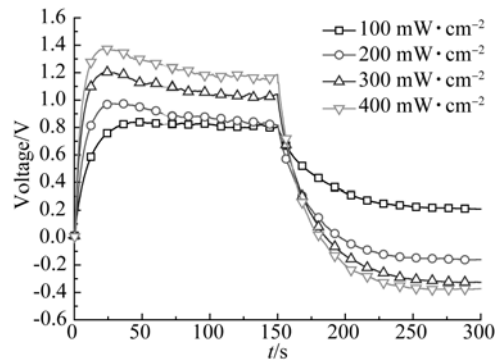


图 8 不同光照强度下 PLZT 陶瓷两端电极面之间的电压随时间变化曲线

Fig. 8 Time history of voltage of PLZT under the irradiation of different intensities

当光照强度为 100 mW/cm<sup>2</sup> 时, PLZT 陶瓷表面温度升高较小, 由温升产生的热释电效应和热膨胀效应可忽略, 所以其电压实验曲线没有达到最大值然后下降这一变化趋势, 且在光停后并未由于 PLZT 陶瓷表面温度下降引起热释电效应而产生方向相反的电压。当光照强度为 200~400 mW/cm<sup>2</sup> 时, PLZT 陶瓷表面温度升降不可忽略, 光停后 PLZT 陶瓷表面温度急速下降, 这是由于热释电效应产生较为明显的反向电压。

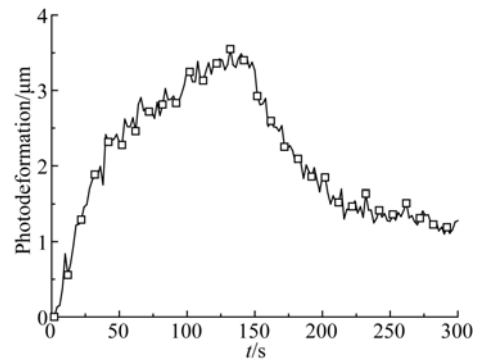
根据以上分析可知, 在高能光束照射下, 当温升达到一定值后就不可忽略, 只有考虑热膨胀效应引起的电压影响, 才可以在理论上解释 PLZT 陶瓷电极两端的电压在 高能光束照射下迅速达到

最大值然后下降保持稳定不变这一实验曲线变化规律,从而验证式(15)所示的电压理论曲线先达到峰值,然后下降至某一数值并保持不变的变化趋势。

图 9 所示为不同光照强度下 PLZT 陶瓷自由端位移随时间的变化趋势。随着光照强度增加,PLZT 陶瓷形变响应速度变快,同时形变饱和值也越来越大;位移曲线没有在光照下迅速达到最大值然后下降到某一稳定值,因此 PLZT 陶瓷的光致应变并不能简单地认为是综合电场强度与压电常数的乘积(基于逆压电效应)。图 9 所示的形变位移实验数据曲线符合所推导的光照下 PLZT 陶瓷形变位移表达式(16),证明 PLZT 陶瓷在光照下形变位移需要考虑热膨胀的影响,如果不考虑热膨胀效应对 PLZT 陶瓷形变的影响,则形变表达式与实验曲线变化趋势不符,证明了所推导的形变理论表达式的合理性。

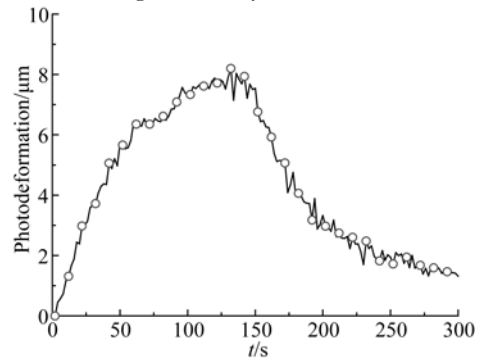
相关文献<sup>[17]</sup>进行了 PLZT 陶瓷的加热实验,利用电炉对 PLZT 陶瓷加热,测量了加热情况下 PLZT 陶瓷的形变随时间变化的情况,其曲线如图 10 所示,温升引起的形变与光照作用下的总形变方向一致,从而证明了式(16)所示的电场应变与热膨胀应变的叠加规律。

由于所采用的紫外光源并非纯净的 365 nm 波长紫外光,为了屏蔽该光源照射 PLZT 陶瓷时所产生的热量,设置了如下实验。将相同的 2 片 PLZT 陶瓷(PLZT\_1 和 PLZT\_2)进行物理并联,如图 11 所示,利用紫外光源以 400 mW 的光照强度照射 PLZT\_1 陶瓷 100 s,测量 PLZT\_2 陶瓷两端的电压及光致形变量。当光源照射 PLZT\_1 时,其产生的光生电压通过导线传给 PLZT\_2,而 PLZT\_1 光照产生的热量并未传给 PLZT\_2,从而屏蔽了光照产生的热量对 PLZT\_2 的影响。所测量 PLZT\_2 的两端的光生电压及其形变量如图 12 所示。由于屏蔽了光生热的影响,PLZT\_2 的光致形变量有所减小,但光致形变的响应速度却大幅提高,光生形变在 10 s 左右已达最大值;光生形变与光生电压的变化趋势基本一致;说明光照 PLZT 陶瓷表面产生的热量是造成光致形变与光生电压之间的迟滞现象的直接原因。



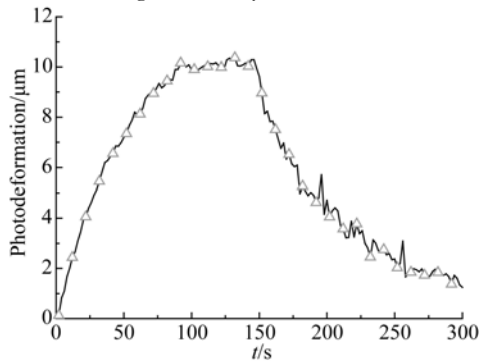
(a) 光强为 100 mW/cm<sup>2</sup>

(a) At light intensity of 100 mW/cm<sup>2</sup>



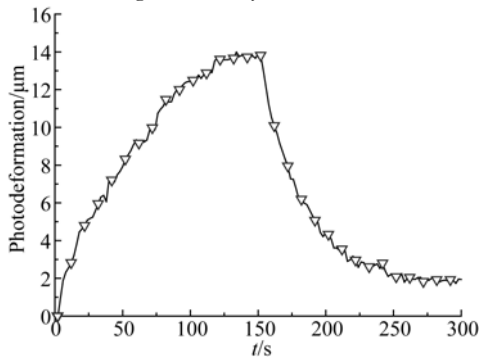
(b) 光强为 200 mW/cm<sup>2</sup>

(b) At light intensity of 200 mW/cm<sup>2</sup>



(c) 光强为 300 mW/cm<sup>2</sup>

(c) At light intensity of 300 mW/cm<sup>2</sup>



(d) 光强为 400 mW/cm<sup>2</sup>

(d) At light intensity of 400 mW/cm<sup>2</sup>

图 9 不同光照强度下 PLZT 陶瓷形变随时间的变化曲线

Fig. 9 Time history of photodeformation of PLZT under the irradiation of different intensities

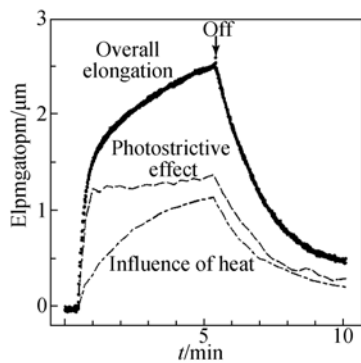


图 10 加热与光照情况下 PLZT 陶瓷形变随时间变化曲线<sup>[17]</sup>

Fig. 10 Time history of deformation of PLZT under the irradiation and heating<sup>[17]</sup>

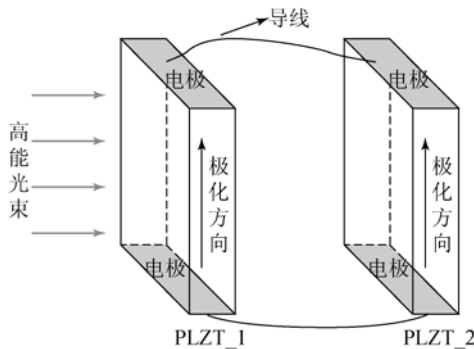


图 11 PLZT<sub>1</sub> 与 PLZT<sub>2</sub> 并联示意图

Fig. 11 Schematic diagram of PLZT<sub>1</sub> and PLZT<sub>2</sub> in parallel

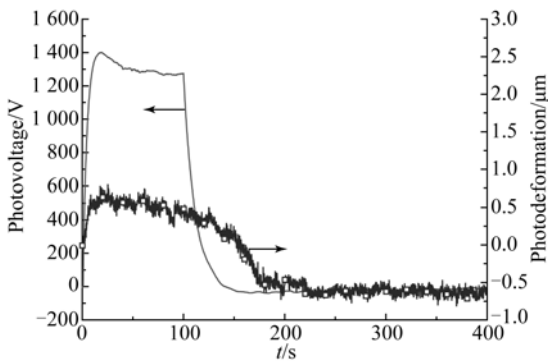


图 12 PLZT<sub>2</sub> 的电压与光致形变随时间变化示意图

Fig. 12 Time history of photovoltage and photodeformation of PLZT<sub>2</sub>

综合以上分析可知,在 高能光束照射下,基于

反常光生伏特效应在 PLZT 陶瓷两端产生电场的速度较快;基于光焦热效应使 PLZT 陶瓷表面温度缓慢升高,由此所诱发热变速度较为缓慢,使得 PLZT 陶瓷形变与光生电压之间存在一定的迟滞效应。可以看出,PLZT 陶瓷表面的温度升高引起的热释电效应和热膨胀效应是造成光致形变与光生电压/光生电流之间迟滞现象的直接原因,也是影响光致形变响应速度的重要因素。为了消除光致形变与光生电压之间的迟滞现象,同时提高光致形变的响应速度,必须使用能够产生足够纯净的 365 nm 波长紫外光的紫外光源,同时进行风冷或液冷等对 PLZT 陶瓷进行物理降温,减弱光照过程中 PLZT 陶瓷表面的温升对光致伸缩效应的影响。

### 5 结 论

本文建立了一种多能场耦合下的新型光致伸缩本构方程,对光致形变与光生电压之间迟滞现象的影响因素进行了实验研究。研究显示:当屏蔽了 PLZT 陶瓷表面温升影响时,PLZT 陶瓷的光致形变达到饱和所用的时间约为 10 s,远远低于受温度影响时达到饱和所用时间。由此可知,高能光束照射下 PLZT 陶瓷表面的温升是导致光致形变与光生电压之间迟滞的主要原因,建立光致伸缩本构模型时必须考虑 PLZT 陶瓷表面温升所带来的影响(即热释电效应,热膨胀效应对 PLZT 陶瓷电压和形变的影响)。在 PLZT 陶瓷作为光驱动器时,需使用足够纯净的 365 nm 波长的紫外光源对 PLZT 陶瓷进行照射,或采用其它物理冷却方法降低 PLZT 表面的温升,从而提高 PLZT 陶瓷形变响应速度。所修正的光致伸缩本构模型为 PLZT 陶瓷驱动器构型和控制研究提供了理论基础。

### 参考文献:

[1] 王恒坤,张国玉,郭立红,等.高精度动载体激光发射系统光束控制反射镜[J].光学精密工程,2013,21(2):336-341.  
WANG H K, ZHANG G Y, GUO L H, et al.. High performance fast-steering mirror for beam control of ve-

hicular high energy laser system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 336-341. (in Chinese)  
[2] 高明辉,郑玉权,王志宏.天基激光武器系统的发展[J].中国光学,2013,6(6):810-817.  
GAO M H, ZHENG Y Q, WANG ZH H. Development of space-based laser weapon systems [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 810-817. (in Chinese)  
[3] 徐科华,马晶,谭立英.深空光通信中光束瞄准技术

- 研究 [J]. 光学 精密工程, 2006, 14(1): 16-21.
- XU K H, MA J, TAN L Y. Research on beam pointing in deep space optical communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 16-21. (in Chinese)
- [4] 邵兵, 孙立宁, 曲东升, 等. 自由空间光通信 ATP 系统中精瞄偏转镜的设计 [J]. 光学 精密工程, 2006, 14(1): 43-47.
- SHAO B, SUN L N, QU D SH, *et al.*. Design of fine pointing tip/tilt mirror of ATP system for free space optical communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 43-47. (in Chinese)
- [5] 李红, 王东方, 邹伟, 等. 高功率激光装置光束自动准直系统设计 [J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002003.
- LI H, WANG D F, ZOU W, *et al.*. Design of high power laser beam automatic alignment system [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1002003. (in Chinese)
- [6] 朱明智, 王美聪, 陈晓娟, 等. 惯性约束聚变装置总体布局和结构设计 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21(3): 701-708.
- ZHU M ZH, WANG M C, CHEN X J, *et al.*. General layout and structure design of ICF facility [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 701-708. (in Chinese)
- [7] 郑猛, 冯其波, 邵双运, 等. CR 扫描仪激光扫描光学系统的设计 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(1): 21-28.
- ZHENG M, FENG Q B, SHAO SH Y, *et al.*. Design and analysis of laser scanning optical system for computed radiography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 21-28. (in Chinese)
- [8] BRODY P S. Optomechanical bimorph actuator [J]. *Ferroelectrics*, 1983, 50: 27-32.
- [9] FUKUDA T, HATTORI S, ARAI F, *et al.*. Characteristics of optical actuator-servomechanisms using bimorph optical piezoelectric actuator [J]. *Proceedings of IEEE Robotics and Automation conference*, 1993: 618-623.
- [10] SHIH H R, TZOU H S, SAYPURI M. Structure vibration control using spatially configured opto-electromechanical actuators optomechanical bimorph actuator [J]. *Journal of sound and vibration*, 2005, 284: 361-378.
- [11] SUN T, TONG L Y. Modeling of wireless remote shape control for beams using nonlinear photostrictive actuators [J]. *International journal of Solids and Structures*, 2007, 44: 672-684.
- [12] LUO Q T, TONG L Y. Multifunctional behaviors of an indium tin oxide/PbLa(ZrTi)O<sub>3</sub>/indium tin oxide wafer illuminated by ultraviolet light [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2012, (1): 1-10.
- [13] 王永龄. 功能陶瓷性能与应用 [M]. 北京: 北京科学技术出版社, 2003: 23-28.
- WANG Y L. *Performance and Application of Functional Ceramics* [M]. Beijing: Beijing Science Press, 2003: 23-28. (in Chinese)
- [14] 梁磊, 王少萍, 曹锋. PLZT 陶瓷双晶片的能量传输特性 [J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(12): 1432-1435.
- LIANG L, WANG SH P, CAO F. Energy transmission characteristic of PLZT bimorph [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, 33(12): 1432-1435. (in Chinese)
- [15] 邵式平. 热释电效应及其应用 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1994: 109-110.
- SHAO SH P. *Pyroelectric Effect and Its Application* [M]. Beijing: Ordnance Ind. Press, 1994: 109-110. (in Chinese)
- [16] NAKADA T, CAO D H, MORIKAWA Y. Study on optical servo system (Estimation of dynamic characteristics of bimorph-type optical actuator using PLZT elements) [J]. *The Japan Society of Mechanical Engineers*, 1993, 59(564): 206-211.
- [17] SAITOH S, MICHIKO N. *Photostrictive device controller and control method*. United States: 5774259[P], 1998.

#### 作者简介:



黄家瀚(1989—),男,河南信阳人,博士生,2011年于河南理工大学获得学士学位,主要从事智能材料应用及微纳机械系统等方面的研究。E-mail: jiahao1989@126.com



王新杰(1982—),男,河南平顶山人,博士,讲师,2004年于哈尔滨工程大学获得学士学位,2006、2011年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事智能材料、结构及其控制以及基于光致形变材料的微驱动与控制等方面的研究。E-mail: xjwang@njust.edu.cn