

doi:10.3788/gzxb20144311.1116005

脉冲激光辐照 GaAs 材料热效应研究

周海娇, 孙文军, 刘中洋

(哈尔滨师范大学 物理与电子工程学院光电带隙材料教育部重点实验室
黑龙江省先进功能材料与激发态重点实验室, 哈尔滨 150025)

摘 要: 为了研究脉冲激光辐照 GaAs 材料的热效应, 采用软件 COMSOL Multiphysics 构建了高斯脉冲激光辐照半导体材料的温升物理模型, 分析了 1 064 nm 纳秒级脉冲激光辐照半导体材料 GaAs 的热效应. 通过求解热传导方程计算了不同功率密度激光辐照 GaAs 材料的径向与纵向温度场分布, 讨论了单光子吸收、双光子吸收及自由载流子吸收对辐照材料的温升贡献. 计算结果表明: 当激光功率密度升至 10^{10} W/cm², 自由载流子对材料的温升贡献已超过单光子吸收对材料温升的贡献而占主导地位; 当激光功率密度降至 10^8 W/cm² 以下时, 两种非线性吸收对材料温升的贡献可以忽略. 该结果与相关实验基本相符, 表明了构建的物理模型具有科学性.

关键词: 脉冲激光辐照; 温度场; 损伤阈值; 半导体材料; 单光子吸收; 双光子吸收; 自由载流子吸收

中图分类号: O437

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)11-1116005-5

Research of Nonlinear Absorption Effect of Pulse Laser Irradiation for GaAs

ZHOU Hai-jiao, SUN Wen-jun, LIU Zhong-yang

(Key Laboratory for Photonic and Electronic Bandgap Material (Ministry of Education);
Heilongjiang Key Laboratory for Advanced Functional Materials and Excited State Processes, School of
Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

Abstract: In order to research nonlinear absorption effect of pulse laser irradiation for GaAs, a physical model of Gaussian distribution pulse laser irradiation for semiconductor material was established by software COMSOL Multiphysics. The thermal effects of semiconductor material GaAs was analyzed under irradiation of nanosecond pulse laser with wavelength of 1064nm. The temperature distribution along radial direction and longitudinal direction of semiconductor material GaAs was calculated under irradiation of nanosecond pulse laser with different power density by means of solving the thermal conduction equations. The contribution of one-photon absorption, two-photon absorption and free carrier absorption to temperature of the irradiated material was discussed. The calculation results show that when the pulse laser power density is above 10^{10} W/cm², Free Carrier Absorption played a leading role and is more than that of One-Photon Absorption of material. When the pulse laser power destiny is below 10^8 W/cm², the temperature contribution of two kinds of nonlinear absorption of materials could be ignored. The result is basically consistent with relevant experiments, which shows that physical model constructed is scientific.

Key words: Pulse laser irradiation; Temperature field; Damage threshold; Semiconductor material; One-photon absorption; Two-photon absorption; Free carrier absorption

OCIS Codes: 160.6000; 140.3538; 130.4310; 010.1030; 130.5990

基金项目: 黑龙江省自然科学基金 (No. F201202)、黑龙江省教育厅骨干教师项目 (No. 1251G031) 和黑龙江省研究生创新科研资金项目 (No. YJSCX2011-414HLJ) 资助

第一作者: 周海娇 (1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光与物质的相互作用. Email: zhj8624@126.com

导师 (通讯作者): 孙文军 (1975-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电子技术与半导体光电子学. Email: swjgood0139@sina.com

收稿日期: 2014-04-14; 录用日期: 2014-08-08

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

GaAs 因其具有较高的光电转换率,高电子迁移率,直接跃迁型能带结构,现已成为重要的半导体光电材料.由于半导体材料的热吸收和热传导,激光辐照下 GaAs 材料表面会形成温度梯度引起热变形,从而影响器件的性能甚至损坏器件,并且在激光辐照半导体材料的过程中非线性吸收对温度场有一定的影响,因此探讨并求解激光辐照 GaAs 材料表面的温度场与非线性吸收的关系是很有意义的研究课题.一定边界条件下激光辐照材料的热传导方程求解方法可分为解析求解^[1-2]和数值求解^[3]两种方式.计算过程中考虑了材料热物性参量随温度变化的影响.

本文构建了脉冲激光辐照半导体材料的物理模型,利用 COMSOL Multiphysics^[4]求解了高斯分布的脉冲激光辐照 GaAs 材料的热传导方程,综合考虑单光子吸收、双光子吸收及自由载流子吸收对温度场升温的贡献,得出了较为精确的温度场分布.

1 物理模型

构建的物理模型分为轴对称辐照模型与热源模型,其中轴对称辐照模型如图 1 所示,坐标原点位于样品的表面中心,即激光的垂直入射中心,坐标轴 r 与 z 分别为样品的径向和纵向, H 与 b 分别为样品厚度和半径.

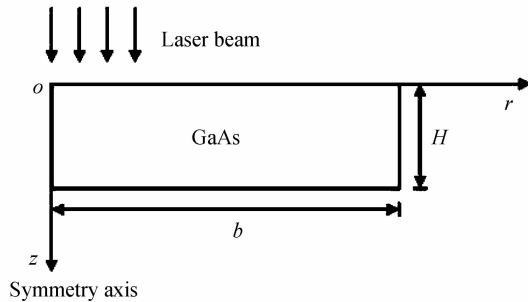


图 1 激光辐照 GaAs 理论模型

Fig. 1 Theoretical model of GaAs irradiated by pulse laser

由于纳秒级脉冲激光的功率密度较大,辐照半导体材料时可以认为材料的透射率为零,此时材料表面反射的能量与材料吸收的能量之和应为入射的总能量.因此构建的热源模型由式(1)~(7)给出.式(1)为热传导方程,其中 q 为热源,由式(2)~(7)给出,式(6)为脉冲激光的时间分布.式(7)为进入材料的激光功率密度.式(2)~(4)分别为只考虑单光子吸收时、只考虑双光子吸收时、只考虑自由载流子吸收时对应的热源.式(5)为同时考虑三种吸收时的热源.

$$\rho c \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right) + q \quad (1)$$

$$q_1 = (1-R) I_0 \alpha e^{-2r^2/a^2} e^{-\alpha z} f(t) \quad (2)$$

$$q_2 = (1-R) I_0 \beta I e^{-2r^2/a^2} e^{-\beta z} f(t) \quad (3)$$

$$q_3 = (1-R) I_0 \sigma' N e^{-2r^2/a^2} e^{-\sigma' N z} f(t) \quad (4)$$

$$q_4 = q_1 + q_2 + q_3 \quad (5)$$

$$f(t) = \begin{cases} 1 & (n-1)\Gamma < t < (n-1)\Gamma + \tau \\ 0 & (n-1)\Gamma + \tau < t < n\Gamma \end{cases} \quad (6)$$

$$(n=1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

$$I = (1-R) I_0 \quad (7)$$

式中 ρ , k 和 c 分别为 GaAs 材料的密度、热传导系数和定压热容, α 为 GaAs 材料对入射激光的单光子吸收系数, β 为 GaAs 材料对入射激光的双光子吸收系数, σ' 为自由载流子的吸收截面, N 自由载流子浓度, R 为表面的反射率, I_0 是入射激光功率密度, τ 为脉冲的宽度, Γ 为脉冲的周期.

令模型中上表面的向内热通量为

$$q = h(T_0 - T) \quad (8)$$

初始条件

$$T|_{t=0} = T_0 = 293.15 \text{ K} \quad (9)$$

材料侧表面绝热满足

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=b} = 0 \quad (10)$$

材料下表面绝热满足

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=H} = 0 \quad (11)$$

材料上表面和空气之间热对流以及材料向周围环境热辐射满足

$$k \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = h(T_0 - T(r, 0, t)) + \epsilon \sigma (T_0 - T(r, 0, t)) \quad (12)$$

式(8)~(12)中: h 为材料表面换热系数, T 为 GaAs 材料的温度, $T_0 = 293.15 \text{ K}$ 为 GaAs 材料周围的环境温度, $\epsilon = 0.1$ 为材料表面的辐射率, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 为斯特潘常量.

图 2 给出了激光辐照模型的网格剖分.表 1 给出了计算过程中 GaAs 材料热物性参量^[5-13].

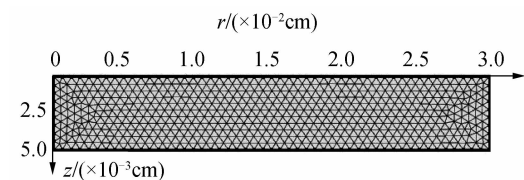


图 2 辐照模型的网格剖分

Fig. 2 Grid of irradiation model

表 1 GaAs 材料的热物性参量

Table 1 Thermal Physical Parameters of GaAs

Parameter	Value or expression
Thermal conductivity $k/$ ($W \cdot cm \cdot K^{-1}$)	$0.425(300/T)^{1.1}$
Density $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	5 316
Heat capacity $c/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$0.307+7.25 \times 10^{-5} T$
Energy gap E_g/eV	$1.575-0.15 \times T/300$
Two-photon absorption coefficient $\beta/(\text{cm} \cdot \text{MW}^{-1})$	0.019
Free carrier absorption cross section σ'/cm^2	$6.2 \times 10^{-17} \times \{1+0.56 \times$ $(T/300)^{-2} \times \exp[-3.5\text{eV}^{-1} \times$ $(1.17\text{eV}-0.43\text{eV})-1]\}$
Free carrier density N/cm^{-3}	$3.46 \times 10^{19} \times (T/300)^{1.5} \times$ $\exp(-30.4 \times 300/T)$
Coefficient of heat transfer $h/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K})$	100
Decomposition temperature T/K	800
Thermal radiation rate ϵ	0.1
Laser radius a/cm	0.04
Initial temperature T_0/K	293.15
Reflectivity R	0.4
Absorption coefficient α/cm^{-1}	$10 \times \exp(1.49 \times (1.17 +$ $1.43 - E_g - 1.38))$

表 1 中自由载流子浓度 $N(T)$ 分布曲线如图 3 所示,可见当温度大于 1 000 K 后,随着温度的升高载流子浓度有明显变化。

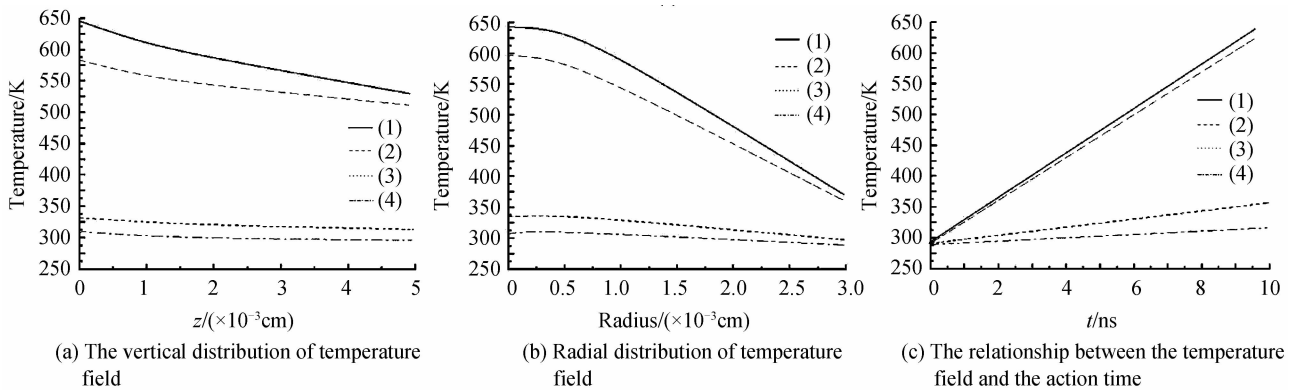


图 4 温度场分布

Fig. 4 Distribution of temperature

图 4(a)为材料纵向温度场分布.图 4(b)为材料径向温度场分布.图 4(c)为材料表面辐照中心温度随时间变化的分布.图 4 中,曲线(1)为三种吸收共同作用的温度场分布;曲线(2)为单光子吸收单独作用的温度场分布;曲线(3)为自由载流子吸收单独作用的温度场分布;曲线(4)为双光子吸收单独作用的温度场分布.

由图 4 可知,材料表面的辐照中心温升最快,即材料的损伤一般是从该处开始的.双光子吸收、自由载流

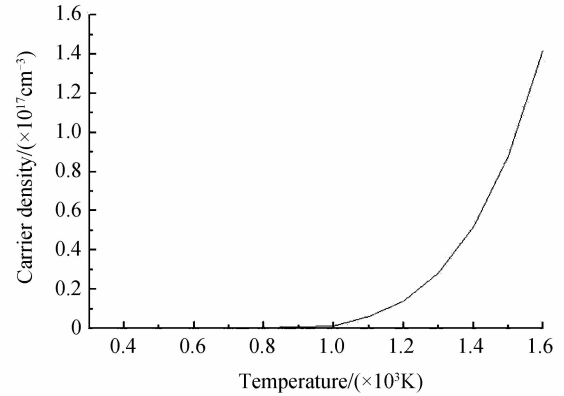


图 3 载流子浓度随温度的变化

Fig. 3 Carrier Density vs Temperature

2 数值模拟结果与讨论

2.1 脉冲激光辐照下的温度场分布

根据上述物理模型,采用软件 COMSOL Multiphysics 计算分析了激光功率密度为 $1 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 时材料的温度场分布,如图 4.计算过程中,入射脉冲激光波长 $\lambda = 1\ 064 \text{ nm}$,脉宽 $\tau = 10 \text{ ns}$,频率 $f = 10 \text{ Hz}$,束腰半径 $a = 0.04 \text{ cm}$.GaAs 材料半径 $r = 0.03 \text{ cm}$,厚度 $H = 0.005 \text{ cm}$.激光与材料的作用时间为 $1 \times 10^{-8} \text{ s}$.

由于半导体材料 GaAs 的禁带宽度为 $E_g = 1.43 \text{ eV}$,入射激光的波长为 $\lambda = 1\ 064 \text{ nm}$,光子能量 $h\nu = 1.17 \text{ eV}$,满足双光子吸收的条件 $h\nu < E_g < 2h\nu$,因此计算过程中考虑了双光子吸收对温度场的贡献.

子吸收对材料的温升有一定的贡献^[14],在该激光功率密度下,两种非线性吸收对材料温升的贡献不可忽略.

单光子吸收对材料温升的贡献最大,说明材料的温升过程中单光子吸收起主要作用.双光子吸收单独贡献的温升最大值是单光子吸收单独贡献的温升最大值的 5% 左右,这一结果与相关实验^[15]基本一致.

2.2 不同激光功率密度下三种吸收对温升的贡献

根据物理模型,分别计算了激光峰率密度为 $1 \times$

10^{10} W/cm², 1×10^9 W/cm², 1×10^8 W/cm² 时三种吸收贡献的温度场分布, 计算过程中其它条件与 2.1 节完全一致.

图 5 与图 6 分别为材料纵向温度场分布和径向温度场分布, 两图中(a)为激光功率密度 1×10^{10} W/cm², 脉宽与作用时间均为 4 ns 时的温度场分布; (b)为激光功率密度 1×10^9 W/cm², 脉宽与作用时间均为 10 ns

时材料的温度场分布; (c)为激光功率密度 1×10^8 W/cm², 脉宽与作用时间均为 16 ns 时材料的温度场分布. 图(a)~(c)中的曲线(1)为三种吸收共同作用的温度场分布, 曲线(2)为只有单光子吸收作用的温度场分布, 曲线(3)为只有自由载流子吸收作用的温度场分布, 曲线(4)为只有双光子吸收作用的温度场分布.

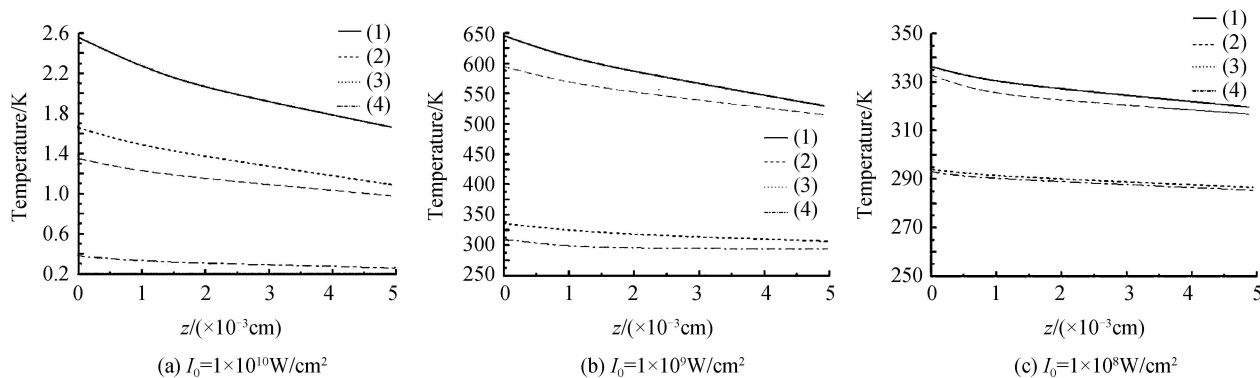


图 5 纵向温度场分布

Fig. 5 Temperature distribution along longitudinal direction

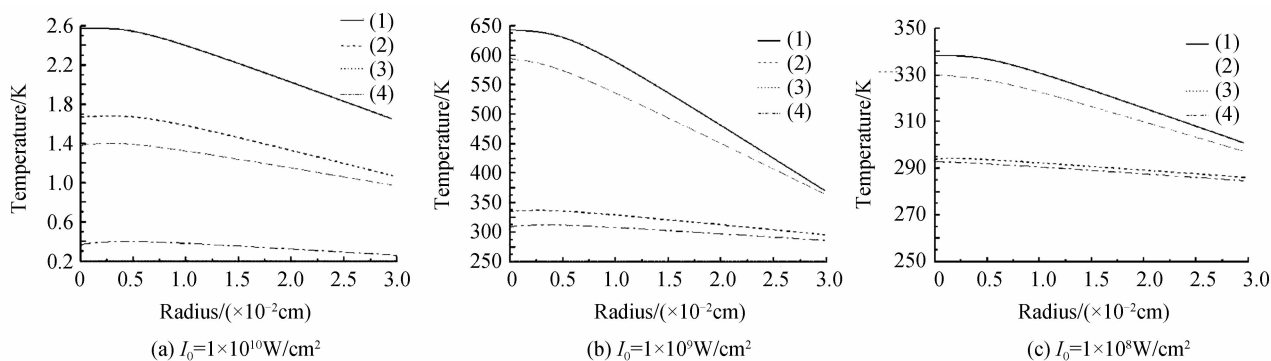


图 6 径向温度场分布

Fig. 6 Temperature distribution along radial direction

由图 5 与图 6 可知, 三种吸收对材料的温升都有贡献, 随着激光功率密度的增加, 三种吸收的温升值都在增加. 当激光功率密度升至 10^{10} W/cm², 自由载流子对材料的温升贡献已超过单光子吸收对材料温升的贡献, 当激光功率密度降至 10^8 W/cm² 以下时, 两种非线性吸收对材料的温升贡献可以忽略.

3 结论

构建了高斯脉冲激光辐照半导体材料的轴对称辐照模型和热源模型, 计算了不同功率密度的脉冲激光辐照 GaAs 半导体材料的温度场分布. 详细讨论了不同功率密度的脉冲激光辐照下单光子吸收、双光子吸收和自由载流子吸收对 GaAs 温升的贡献. 计算结果与相关实验结果基本相符, 证实了所建物理模型的科学性, 同时该模型也适用于纳秒级脉冲激光辐照其它半导体材料的热效应研究.

参考文献

- [1] LIU Ming-qiang, LI Bin-cheng. Analysis of temperature and deformation fields in an optical coating sample [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(6): 3402-3409.
刘明强, 李斌成. 光学薄膜样品的温度场和形变场分析[J]. *物理学报*, 2008, **57**(6): 3402-3409.
- [2] CHEN Xiao-xiao, LI Bin-cheng, YANG Ya-pei. Theory of surface thermal lens signal in optical coating with CW modulated top-hat beam excitation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(9): 4673-4677.
陈潇潇, 李斌成, 杨亚培. 光学薄膜测量时平顶光束激励的表面热透镜理论模型[J]. *物理学报*, 2006, **55**(9): 4673-4677.
- [3] GUO Shao-feng, LU Qi-sheng, CHENG Xiang-ai, et al. Rotation effects of intensive laser window [J]. *Chinese Journal Lasers*, 2004, **31**(2): 145-148.
郭少锋, 陆启生, 程湘爱, 等. 激光器窗口的旋转效应[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 145-148.
- [4] BAO Mei-fang, QIAN Zhi-yu, LI Wei-Tao, et al. Biological tissue's temperature field during the laser-induced interstitial thermotherapy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(5): 718-721.
包美芳, 钱志余, 李魁韬, 等. 激光诱导间质热疗中生物组织

- 的温度场研究[J]. 光子学报,2011,**40**(5):718-721.
- [5] QI Hai-feng, WANG Qing-pu, ZHANG Xing-yu, *et al.* Investigation on damage process of GaAs induced by 1064nm continuous laser and nanoscale pulse laser[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, **103**(3): 1063.
- [6] LI Juan, SUN Wen-jun, SUN Jing-nan, *et al.* Numerical analysis of CW laser damage in GaAs[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 571-574.
李娟,孙文军,孙京南,等. 连续激光辐照 GaAs 材料热损伤数值模拟计算研究[J]. 光子学报,2012,**41**(5):571-574.
- [7] GARG A, KAPAOOR A, TRIPATHI K N. Laser-induced damage studies in GaAs[J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, **35**(1): 21-24.
- [8] ZHAO Yuan-an, WANG Tao, ZAHNG Dong-ping, *et al.* Pulsed laser induced damage model of optical coatings with absorbing inclusion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1372-1375.
赵元安,王涛,张东平,等. 脉冲激光辐照光学薄膜的缺陷损伤模型[J]. 光子学报,2005,**34**(9):1372-1375.
- [9] LI Yong-fu, QI Hai-feng, WANG Qing-pu, *et al.* 532nmCW laser induced damage of GaAs material[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2007, **24**(5): 625-629.
李永福,祁海峰,王青圃,等. 532nm 连续激光对砷化镓材料损伤的研究[J]. 量子电子学报,2007,**24**(5):625-629.
- [10] ZHOU Hai-jiao, SUN Wen-jun, MENG Zhong, *et al.* Numerical analysis of pulse laser deformation on GaAs[C]. ICOM, 2013, 101-104.
- [11] TSOTSIS P, ELDRIDGE P S, GAO T, *et al.* Lasing threshold doubling at the crossover from strong to weak coupling regime in GaAs Microcavity[J]. *New Journal of Physics*, 2012, **14**(2): 023060.
- [12] BI Juan, JIN Guang-yong, NI Xiao-wu, *et al.* Analysis of 532nm long pulse laser-induced thermal decomposition damage to GaAs by semi-analytical method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(24): 244209-244209.
毕娟,金光勇,倪晓武,等. 532nm 长脉冲激光致 GaAs 热分解损伤的半解析法分析[J]. 物理学报,2012,**61**(24):244209-244209.
- [13] JIANG T, ZHENG X, CHENG X A, *et al.* Effects of thermally generated carrier and temperature dependence mobility in insb photoconductive detector under CW 10.6 μm laser irradiation[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2012, **27**(1): 015020.
- [14] NEMTANU M, CRACIUN G, MANAILA E, *et al.* One- and two-temperature models in solids under laser pulse irradiation which effectively present as two-photon absorption coefficient anisotropy[J]. *Lasers in Engineering*, 2012, **22**(1): 13-23.
- [15] PENG Yu-feng, SHENG Zhao-xia, ZHANG Hu, *et al.* Theoretical analyses of temperature distributions of solid materials irradiated by high power laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(10): 1225-1228.
彭玉峰,盛朝霞,张虎,等. 激光辐照下固体材料的温度分布论研究[J]. 强激光与粒子束,2004, **16**(10): 1225-1228.