

# 激光入射角度对薄膜热场分布影响的数值分析<sup>\*</sup>

王 颖<sup>†</sup> 刘 旭 章岳光 顾培夫 厉以宇 李明宇

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2006 年 3 月 17 收到 2006 年 11 月 1 日收到修改稿)

在多层介质薄膜中, 激光的入射方式是影响薄膜抗损伤能力的关键因素之一. 提出了一种模拟锥角高斯光入射多层介质薄膜后电场和热场分布的方法. 该方法能够分析薄膜中高斯光各个角谱分量叠加形成的电场分布, 进而得到由于薄膜本征吸收产生的热量沉积以及薄膜内部的温度场分布. 针对中心波长为 4.3  $\mu\text{m}$  的中红外高反膜进行了分析, 给出了高反膜系的温升峰值随激光入射角度和偏振态的变化. 结果表明: 对于 s 偏振光, 斜入射时膜系的最高温升峰值高于垂直入射峰值, 而 p 光的结果则相反. 此种模拟方法克服了原有方法对激光入射角度的限制, 较好地反映出斜入射情况下激光偏振态对薄膜损伤的影响.

关键词: 多层介质薄膜, 高斯光, 热过程, 数值分析

PACC: 6860, 4255R, 0720

## 1. 引 言

激光对薄膜的损伤是多种作用下的复杂过程, 影响因素众多, 其中激光本身的特点和薄膜对激光能量的吸收是影响薄膜抗损伤能力的重要因素<sup>[1-3]</sup>. 对于红外薄膜, 当入射光为较宽脉冲宽度(纳秒级)的激光时, 热过程是损伤发生的基本过程<sup>[2]</sup>, 光通过本征吸收和杂质吸收转化为热, 由热应力耦合最终导致薄膜损伤<sup>[3]</sup>. 探索激光的入射条件与薄膜损伤的关系, 提高薄膜的抗损伤能力, 对强激光薄膜的研究有重要意义. 在激光照射下, 薄膜的吸收损耗将部分激光能量转化成热沉积, 引起薄膜内部的局部升温, 导致薄膜性能降低甚至结构破坏. 在红外波段, 薄膜材料的吸收较可见波段更为显著. 人们对于光学薄膜的光热过程进行了深入的研究<sup>[4-6]</sup>, 提出了光学薄膜的温度场设计理论. 但是原有的理论都是将激光的电磁场简化为垂直膜面入射的平面波形式, 不考虑高斯光的各个角谱成分和偏振态. 这种方法只能分析激光垂直入射时的光热场分布, 无法分析激光入射的角度对薄膜热场的影响, 所得的电场和热场分布与实际相差较远. 本文在模拟中将激光理解为由不同角谱组成的锥角高斯

光<sup>[7]</sup>, 分析不同入射角度的锥光束进入介质膜层后的电磁场分布以及薄膜本征吸收产生的热沉积, 之后根据含热源的二维瞬态热传导模型, 求解得到二维温度场的数值解. 本文采用上述方法分析了中心波长为 4.3  $\mu\text{m}$  的高反膜的光热场分布, 对比了不同偏振态的激光从不同角度入射时, 膜层中温升峰值的变化. 结果表明, s 偏振态下激光斜入射的膜系温升峰值明显高于垂直入射的情况, 而 p 偏振时温升峰值随入射角的增加而减小.

## 2. 原 理

### 2.1. 电磁场计算

如图 1 所示, 有  $n$  层薄膜沉积于基底  $N = n + 1$  的表面,  $t = 0$  时刻激光从空气中沿  $\theta_i$  角方向入射, 那么入射高斯光的磁场(p 偏振)可以表示为

$$H_{iy} = \int_{-\infty}^{+\infty} dk_x \exp[i(k_x x + k_{0z} z)] \varphi(k_x), \quad (1)$$

其中

$$\varphi(k_x) = \frac{r_0}{2\sqrt{\pi}} \exp\{-[r_0^2(k_x - k_{ix})^2/4]\}. \quad (2)$$

这里  $r_0$  是薄膜与空气界面处激光光强下降到中心处能量的  $1/e$  时薄膜切线方向的位置, 入射光中心

<sup>\*</sup> 固体激光技术国家级重点实验室基金资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: cookyw\_2006@hotmail.com

光矢可以表示为

$$k_i = \hat{x}k_0 \sin\theta_i + \hat{z}k_0 \cos\theta_i.$$

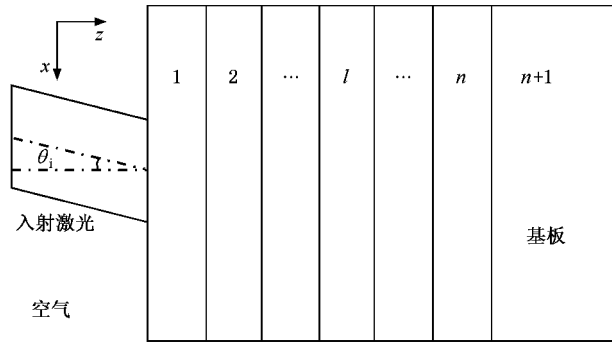


图1 激光照射多层介质薄膜的示意图

根据麦克斯韦方程及多层薄膜的边界条件可以解出第  $l$  层介质内的电场和磁场强度<sup>[7]</sup>

$$H_{ly} = \int_{-\infty}^{+\infty} dk_x \varphi(k_x) [A_l e^{ik_l z} + B_l e^{-ik_l z}] e^{ik_x x}, \quad (3)$$

$$E_{lx} = \int_{-\infty}^{+\infty} dk_x \varphi(k_x) \frac{k_{lz}}{\omega \epsilon_l} (A_l e^{ik_l z} - B_l e^{-ik_l z}) e^{ik_x x} \quad (4)$$

$$E_{lz} = \int_{-\infty}^{+\infty} dk_x \varphi(k_x) \frac{-k_x}{\omega \epsilon_l} (A_l e^{ik_l z} + B_l e^{-ik_l z}) e^{ik_x x} \quad (5)$$

式中  $l = 1, 2, 3, \dots, n+1$  表示各层介质, 系数  $A_l, B_l$  可根据切向电场磁场的边界条件解出<sup>[8]</sup>, 膜层内的平均能流密度可表示为

$$|S_l| = \frac{1}{2} \sqrt{[\operatorname{Re}(H_y E_z^*)] + [\operatorname{Re}(H_z E_y^*)]}. \quad (6)$$

$s$  偏振态电场和磁场强度的计算方法与(1)~(5)式相似, 只要将边界连续条件和表达式形式做相应的改变即可, 详见文献[8].

## 2.2. 热场计算

激光照射膜层后, 膜层吸收激光能量并将其转化为热能, 引起膜层内温度升高. 吸收光能产生的焦耳热可以写为<sup>[9]</sup>

$$Q_j = \frac{i\omega}{4} [(\epsilon^* - \epsilon) \epsilon_0 E \cdot E^* + (\mu^* - \mu) \mu_0 H \cdot H^*] \\ = \frac{\omega}{2} [\epsilon'' \epsilon_0 |E|^2 + \mu'' \mu_0 |H|^2], \quad (7)$$

式中  $E^*$  和  $H^*$  分别为电场  $E$  和磁场  $H$  的共轭,  $\epsilon_0$  是真空中介电常数,  $\epsilon^*$  是材料的相对介电常数的

共轭,  $\epsilon''$  是相对介电常数的虚部,  $\mu$  和  $\mu^*$  分别是真空中的磁导率和材料的相对磁导率的共轭,  $\mu''$  是相对磁导率的虚部. 在光频段  $\mu''$  可以忽略, 因此(7)式中只考虑电场对热吸收的影响.

输出功率为  $P_0$  的激光入射在薄膜表面, 膜层吸收光能后产生焦耳热, 使得膜层内温度升高, 薄膜温度分布是热沉积与热扩散平衡后的结果, 升温的过程遵循下列热传导方程的形式:

$$C_l \frac{\partial T(x, z, t)}{\partial t} \\ = \kappa_l \left( \frac{\partial^2 T(x, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, z, t)}{\partial z^2} \right) + Q(x, z, t), \quad (8)$$

$$(\partial/\partial z)T(x, z=0, t) = \gamma T(x, z=0, t). \quad (9)$$

方程(8)(9)中  $C_l$  为第  $l$  层比热容,  $\kappa_l$  为第  $l$  层导热系数,  $\gamma$  为薄膜表面与周围环境的表面热交换系数,  $Q$  为热量, 即膜层中任一处单位时间和单位体积内薄膜吸收引起的焦耳热量. 将激光作为热源引入, 由(7)式得到不同入射角度下薄膜吸收激光能量产生的热量分布.

采用离散数值方法, 解出方程(8)(9). 本文通过交替隐算法<sup>[10,11]</sup>, 求得薄膜内二维温度场的数值解.

## 3. 结果及分析

采用上述方法对中心波长为  $4.3 \mu\text{m}$  的高反膜的温度分布进行了分析模拟. 膜系为典型的高反膜结构:  $A|G(HL)H|G$ , 其中  $A$  为入射介质空气,  $H$  和  $L$  分别代表光学厚度为  $\lambda/4$  的高折射率和低折射率材料,  $G$  代表 BK7 玻璃基板. 针对中红外波段的应用, 高折射率和低折射率材料分别采用 ZnS 和 YF3, 这两种材料在中红外区具有吸收小、透过率高的特点, 并且能够在玻璃基板上制备出牢固的膜系. 材料的光热参数见表 1. 图 2 给出了激光垂直入射时, 该膜系对中心波长 ( $4.3 \mu\text{m}$ ) 的反射率, 图 3 是薄膜反射率随入射角的变化 ( $s$  偏振光和  $p$  偏振光). 从图 3 可以看出, 在  $0^\circ$ — $45^\circ$  范围内, 薄膜对  $s$  偏振  $4.3 \mu\text{m}$  激光有 99.9% 以上的反射,  $p$  偏振光虽有明显下降, 但也处于高反带中, 基本满足高反的要求.

表 1 光学薄膜的光热参数

介质	折射率 $n$	消光系数 $k/10^{-5}$	比热容 $C/J \cdot \text{cm}^{-3} \text{K}^{-1}$	导热系数 $\kappa/J \cdot \text{cm}^{-1} \text{K}^{-1} \text{s}^{-1}$	厚度 $z/\text{nm}$
YF <sub>3</sub>	1.48	10	3.28	0.0075	726.35
ZnS	2.20	4	1.99	0.0010	488.64
基板	1.50	0	2.00	0.0150	$\infty$

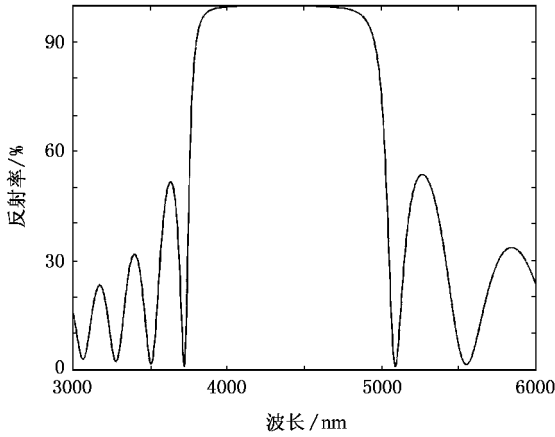


图 2 激光垂直入射时薄膜的反射率

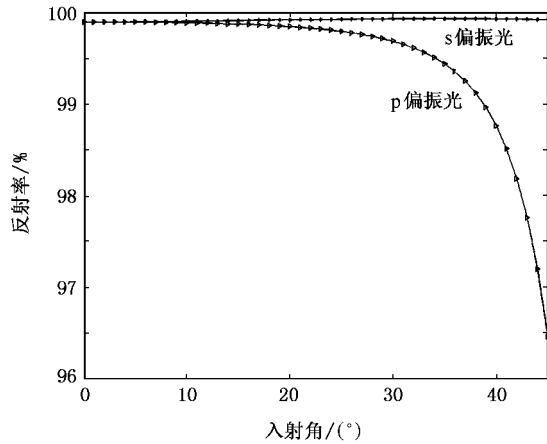


图 3 薄膜中心波长的反射率随入射角的变化

根据以上介绍的算法,首先计算出激光入射后薄膜内的场强分布.该方法能够得到不同偏振态激光从不同角度入射时膜层内外的电磁场分布,不受入射角度的限制.为直观地反映该算法得到的高斯光入射薄膜时光强分布的情况,图 4 给出了入射角为 45°时平均能流密度的分布(s 偏振光).高斯光从图左侧空气中进入,右侧为基板,图中灰度代表能流密度的相对值.为了方便计算,入射激光脉冲波形简化为方波,具体参数见表 2.

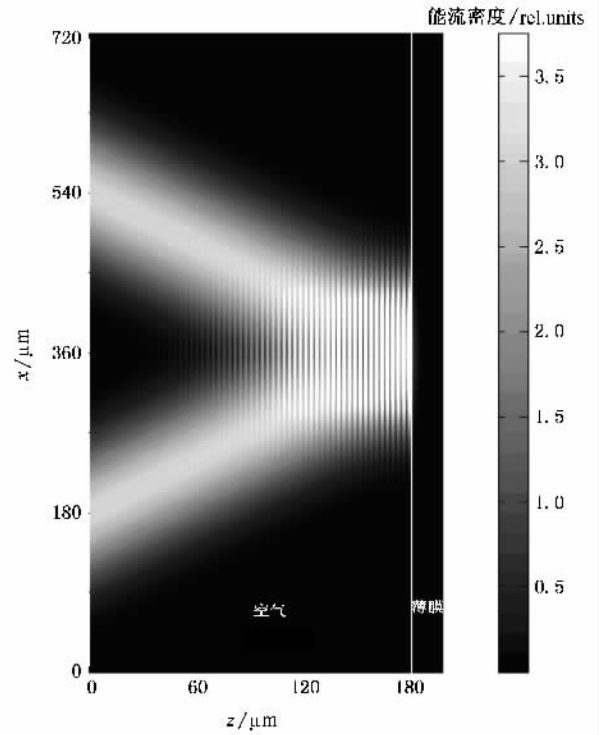


图 4 激光入射角为 45°时平均能流密度分布

表 2 激光参数

波长/nm	光斑直径/μm	入射角(°)	功率/10 <sup>5</sup> W	脉冲宽度/ns
4300	100	0—45	4.0	5

将电场  $E$  的值代入(7)式,经计算得到薄膜吸收的焦耳热量,再采用交替隐行算法得到(8)式的数值解,即膜层内吸收激光能量引起的温升分布.图 5 和图 6 分别为激光垂直照射下高反膜内二维温升分布和入射光中心处膜内纵向温度分布.

从图 5 和图 6 可以看出,激光入射膜层后温升的极大值从入射侧向基板方向递减,在高折射率材

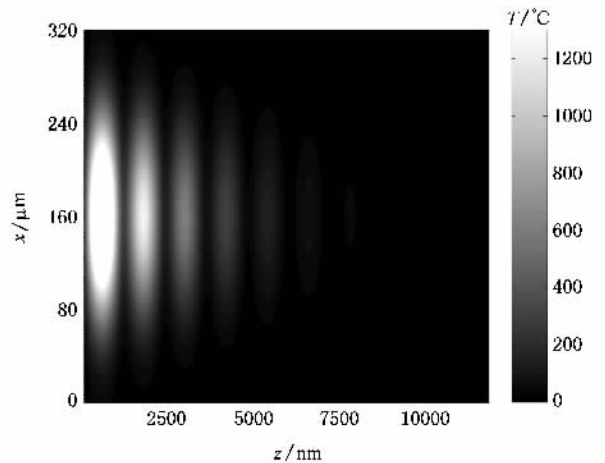


图 5 激光垂直入射时膜层内的温升分布

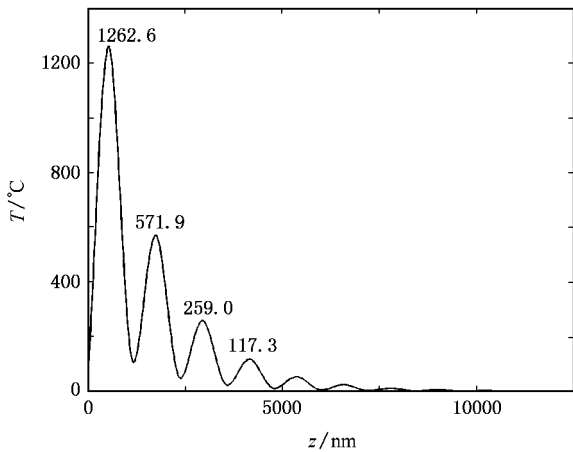


图 6 激光垂直入射时膜层纵向温升峰值分布

料与低折射率材料的界面附近出现峰值,其中空气侧第一个高折射率材料与低折射率材料的界面附近温升最大.这与电场分布的结果相似,因为温升的大小与膜层吸收光场能量产生的焦耳热相关,不考虑非线性吸收的情况下,电场越强,薄膜吸收光能产生的焦耳热量沉积也越多,使得温升越高.此结果与文献 [12] 相符.

当激光从不同角度入射时,温升峰值的位置发生了变化.从图 7 可以看出,s 偏振态下,当入射角分别为 0°、20°、45°时,随着入射角的增大,温升峰值的位置向最外层空气侧移动,激光为 p 偏振态时也符合这一规律.这是由于入射角越大,光在膜层内走过的相对光程越长,电场的峰值出现的位置越靠近空气侧,使得温升的峰值也逐渐远离第一个膜层界面.同时,峰值温升的大小也与入射角密不可分,图 8 模拟了它们之间的量化关系.从图 8 可以看出,对于 s 光,随着入射角增大,膜层内峰值温升先升高,

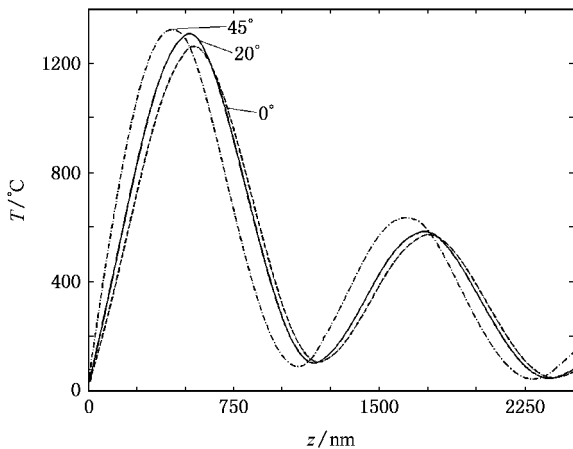


图 7 激光以 0°、20°和 45°入射时温升峰值分布图(s 偏振光)

在 35°时达到最大值,之后有所下降.总体上,斜入射时膜层内的温升峰值明显高于垂直入射的峰值.而对于 p 偏振光,温升峰值随着入射角的增大而降低,与 s 光结果完全相反.这一现象与膜层内场的干涉强度变化有关,角度变化使得不同偏振态的激光在膜层内光场的干涉发生变化,能量分布随之改变,使得峰值能量更为集中或者分散,从而引起温升峰值的变化.

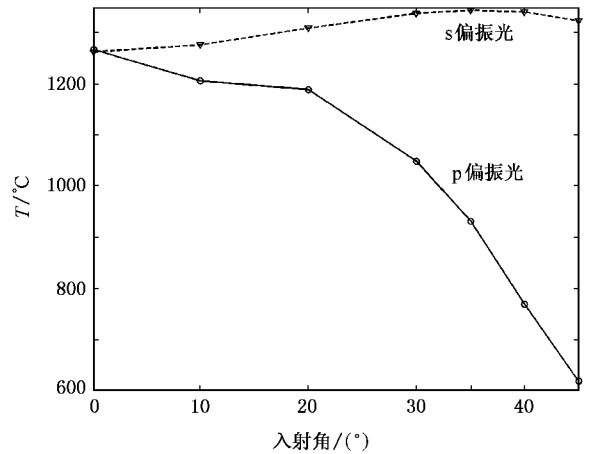


图 8 膜层内峰值温升随入射角度的变化

从以上结果可以看出,膜层内温升的峰值位置和大小都与入射角度和偏振态有着密切的关系,具体的变化趋势有待进行进一步的研究.文献 [12] 提到薄膜的温升峰值处形成了强烈的热量累积,容易导致热应力耦合,致使损伤发生.从上述结果看,入射角度变化后温升峰值的位置和大小也发生了相应的变化,这会直接影响薄膜中损伤发生的位置和概率.这一结果为今后研究红外薄膜的设计和应用范围提供了参考依据.

### 4. 结 论

本文将入射光理解为锥形高光谱形式,从而得到了中红外激光薄膜在不同入射角和偏振态的激光照射下的温升分布.结果表明,温度场的分布与膜层内电场的分布相似,温升的峰值出现在高折射率材料与低折射率材料的界面附近.温升峰值的位置随着激光入射角度的变化而变化,在 0°—45°范围内,入射角越大,最高的温升峰值就越靠近空气侧.温升峰值的大小也与激光入射角度和偏振态密切相关.对于 s 光,温升峰值大小随着入射角增大先是增大,在 35°处达到最大值,之后略有下降.总体上激光

斜入射时的膜层内温升峰值明显高于垂直入射的情况. 对于 p 偏振态, 温升峰值随入射角度的增大而降低, 垂直入射时温升峰值最大. 这一结果直接影响膜层热沉积形成的位置和大小, 从而关系到热应力耦

合形成损伤的概率. 本文的研究为中红外激光薄膜的设计和制备提供参考依据. 我们将根据此模型进一步分析在中红外波段不同膜系结构和应用场合对温度场的影响.

- 
- [ 1 ] Carr C W , Radousky H B , Demos S G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 127402
- [ 2 ] Stuart B C , Feit M D , Herman S *et al* 1996 *Phys. Rev. B* **53** 1749
- [ 3 ] Hu H Y , Zheng X F 2001 *Appl. Opt.* **40** 1950
- [ 4 ] Fan Z X , Tang X F 1995 *Acta Opt. Sin.* **15** 463 ( in Chinese ) [ 范正修、汤雪飞 1995 光学学报 **15** 463 ]
- [ 5 ] Zhao Q , Fan Z X , Wang Z J 1999 *Acta Opt. Sin.* **19** 1019 ( in Chinese ) [ 赵 强、范正修、王之江 1999 光学学报 **19** 1019 ]
- [ 6 ] Yan C C , Xue G G , Liu C *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3058 ( in Chinese ) [ 闫长春、薛国刚、刘 诚等 2005 物理学报 **54** 3058 ]
- [ 7 ] Jin A K , Wu B L , Zhang Y 2002 *Microwave Opt. Techn. Lett.* **33** 136
- [ 8 ] Jin A K 2002 *Electromagnetic Wave Theory* ( Beijing : Higher Education Press )
- [ 9 ] Landau L D , Lifshitz E M 1984 *Electrodynamics of Continuous Media* ( Oxford : Pergamon )
- [ 10 ] Mansuripur M , Connell G A N , Goodman J W 1982 *Appl. Opt.* **21** 1106
- [ 11 ] Yu C M 1982 *Heat Transfer and Numerical Analysis* ( Beijing : Tsinghua University Press ) ( in Chinese ) [ 俞昌铭 1982 热传导及其数值分析 ( 北京 : 清华大学出版社 ) ]
- [ 12 ] He H B , Hu H Y , Tang Z P *et al* 2005 *Appl. Surf. Sci.* **241** 442

# Numerical analysis of thermal response of mid-infrared high reflectance coating under different laser irradiation angles \*

Wang Ying<sup>†</sup> Liu Xu Zhang Yue-Guang Gu Pei-Fu Li Yi-Yu Li Ming-Yu

( State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation , Zhejiang University , Hangzhou 310027 , China )

( Received 17 March 2006 ; revised manuscript received 1 November 2006 )

## Abstract

Thermal response of mid-infrared high reflectance coating exposed to laser beam of wavelength of  $4.3 \mu\text{m}$  at different incident angles was studied by numerical method. In this paper , the incident beam was modeled as a tapered wave with a Gaussian spectrum. Joule loss due to absorption in the absorptive layers was calculated analytically and temperature profile in the multilayer was presented. The temperature distributions of high reflectance coating with different incident angles of transverse electric ( TE ) mode and transverse magnetic ( TM ) mode laser beams were compared. For the TE mode laser , the highest temperature peak appears at the incident angle of  $35^\circ$  , for the TM mode , the magnitude of the temperature peak decreases with increasing incident angle.

**Keywords** : dielectric multi-layer optical thin films , Gaussian beam , thermal process , numerical analysis

**PACC** : 6860 , 4255R , 0720

\* Project supported by the State Key Laboratory of Solid State Laser Engineering , China.

<sup>†</sup> E-mail : cookyw\_2006@hotmail.com