

文章编号: 0253-2239(2008)07-1374-05

基于电子自旋弛豫全光开关中的瞬态特性

蒋 振 王 涛 王 冰 李 刚

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 设计了基于电子自旋弛豫的透射式全光开关模型, 该光开关具有开关时间短、结构简单、光学非线性强等特点。研究在右旋圆偏振光抽运下 GaAs/AlGaAs 半导体多量子阱(MQWs)中以相空间填充(PSF)和库仑屏蔽(CS)为主要因素导致的激子吸收饱和行为, 计算与抽运光同向(探测光与抽运光的圆偏振方向相同)和反向(探测光与抽运光的圆偏振方向相反)的圆偏振探测光吸收系数的变化, 得到两种圆偏振光差分透射率改变量随延迟时间的变化。实验采用飞秒抽运-探测技术, 获得了室温下 GaAs/AlGaAs 多量子阱同向圆偏振探测光的透射曲线, 观察到了明显的饱和吸收现象, 与数值模拟的结果相符。

关键词 全光开关; 激子饱和; 抽运-探测技术; 相空间填充; GaAs

中图分类号 O734+.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082807.1374

Transient Characteristics in All-Optical Switching Using Electron Spin Relaxation

Jiang Zhen Wang Tao Wang Bing Li Gang

(School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract An all-optical transmission switching model based on electron spin relaxation was designed, and this new configuration of optical switch grants the features of short switching time, simple structure, and high optical nonlinearities. The exciton saturation caused by phase-space filling (PSF) and Coulomb screening (CS) in GaAs/AlGaAs multiple quantum well was discussed under the right circularly polarized pump beam. The absorption coefficients variations of the circularly polarized probe beam in the same and opposite polarization direction with the pump beam were calculated. The differential transmission change of both polarization as a function of delay time was obtained. The pump-probe experiment was carried out to measure the change curve in transmission of the same circularly polarized states probe beam at room temperature, and obvious saturation phenomenon is observed which agrees with the numerical result.

Key words all-optical switching; exciton saturation; pump-probe technique; phase-space filling; GaAs

1 引 言

光开关是高速发展的全光网络技术中不可缺少的光器件之一, 在光传送网中各种不同交换原理和实现技术的光开关被广泛提出。如: 电光开关^[1,2]、磁光开关^[3]、热光开关^[4~6]、机械式开关^[7]和有机聚合物全光开关^[8,9]。基于半导体多量子阱结构的全光开关是目前光开关领域研究很热门的一个课题。

这种光开关开关时间短, 结构简单、便于集成、光学非线性强、适合全光转换, 可以作为未来高速全光通信系统, 光信号处理和光计算核心器件。

Tackeuchi 等人实验研究了 GaAs/AlGaAs 和 InGaAs/InP 多量子阱材料中的电子自旋弛豫过程, 并测得了一般阱结构的弛豫时间^[10]。A. Miller 等人详细研究了 GaAs 多量子阱材料中的激子吸收

收稿日期: 2007-11-16; 收到修改稿日期: 2008-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(60477024)和国家 863 计划(2008AA03Z404)资助课题。

作者简介: 蒋 振(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: zhen5241@126.com

导师简介: 王 涛(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信网络技术、光网络有源及无源器件及激光应用等方面的研究。E-mail: wangtao@hust.edu.cn

饱和行为^[11]。Schmitt-Rink 等^[12]理论推导了相空间填充(PSF)效应下载流子饱和和密度的计算公式。综合以上国外学者的论文发现,虽然决定光开关的开关速度的电子自旋弛豫时间和导致激子漂白的机制已经确定,但是量子阱内载流子分布的变化情况还不是很明了。本文设计出基于电子自旋弛豫的透射式全光开关的模型,深入探讨 GaAs/AlGaAs 多量子阱内相空间填充和库仑屏蔽(CS)效应导致的激子吸收饱和行为,并采用飞秒抽运-探测实验装置,测量室温下 GaAs/AlGaAs 多量子阱样品的透射率随延迟时间的变化情况,以研究其光学瞬态特性。

2 理论模型

在半导体多量子阱中,由于载流子的量子限制效应,导带和价带被分裂成一系列子带,价带中轻空穴子带和重空穴子带在布里渊区中心($k=0$)处发生解简并。根据光选择定则,右旋圆偏振抽运光使重空穴带上电子态产生 $\Delta M_j = +1$ 跃迁可使相应的右旋偏振分量的激子态达到饱和,而左旋偏振分量的激子未激发^[11]。如果样品接着被右旋圆偏振光探测,由于吸收饱和作用,辐射到其上的右旋圆偏振探测光的透射率就会增加。随着电子的自旋弛豫过程,右旋偏振分量的激子态向相反的自旋态跳转。在经过一个亚纳秒时间后,右旋圆偏振探测光的透射率恢复到抽运前的大小。

基于激子吸收饱和行为和电子自旋弛豫原理,利用抽运前后多量子阱材料对同向圆偏振光透射率的改变,采用飞秒抽运-探测技术,将一个圆偏振的抽运(控制)光脉冲和一个同向圆偏振的探测(信号)光脉冲先后照射在 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料上,一个光强探测器放在样品的后方用来测量探测光透过材料后的光强,构成一个透射式全光开关。

研究 60 周期的 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 多量子阱结构,以 GaAs 作为阱的材料,阱宽 $L_w = 6$ nm,以 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 作为垒的材料,垒宽 $L_b = 10$ nm。重空穴激子吸收峰在 $0.828 \mu\text{m}$,GaAs 对应的禁带宽度室温下约 1.498 eV,势垒与势阱和衬底晶格匹配。该材料电子自旋弛豫时间为 100 ± 15 ps^[11]。

采用室温下右旋圆偏振抽运光共振激发的方法获得激子,实验观测到室温下激子的电离时间约为 $t_i = 300$ fs^[13]。当抽运光脉冲脉宽可以和电离时间 t_i 相比拟时,载流子跃迁的五能级模型可以用来估算量子阱中载流子密度的变化情况^[11](图 1)。

对上述能级模型,速率方程如下:

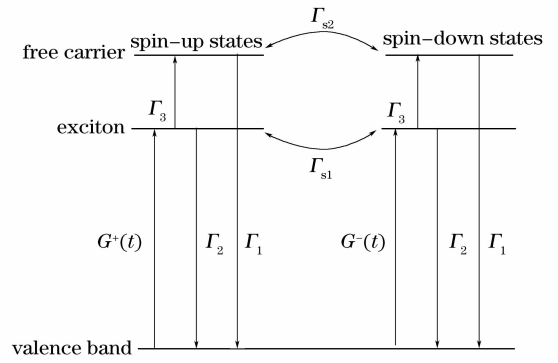


图 1 载流子跃迁的五能级模型,箭头表示粒子流动的方向
Fig.1 Model of the five-level carrier transition, arrows represent the direction of flow of population

$$\begin{aligned} \frac{dN_{\text{ex}}^+}{dt} &= -(\Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_{s1})N_{\text{ex}}^+ + \Gamma_{s1}N_{\text{ex}}^- + G^+(t), \\ \frac{dN_{\text{ex}}^-}{dt} &= +\Gamma_{s1}N_{\text{ex}}^+ - (\Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_{s1})N_{\text{ex}}^- + G^-(t), \\ \frac{dN_{\text{pl}}^+}{dt} &= +\Gamma_3N_{\text{ex}}^+ - (\Gamma_1 + \Gamma_{s2})N_{\text{pl}}^+ + \Gamma_{s2}N_{\text{pl}}^-, \\ \frac{dN_{\text{pl}}^-}{dt} &= +\Gamma_3N_{\text{ex}}^- + \Gamma_{s2}N_{\text{pl}}^+ - (\Gamma_1 + \Gamma_{s2})N_{\text{pl}}^-, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\Gamma_1 = 0.8$ ns, $\Gamma_2 = 0.2$ ns 分别为自由载流子、激子的复合速率, $\Gamma_3 = 300$ fs 为激子的电离速率; $\Gamma_{s1} = \Gamma_{s2} = 100$ ps 分别为激子、自由载流子的自旋弛豫速率^[14]; $G^+(t)$ 和 $G^-(t)$ 分别代表右旋和左旋圆偏振抽运光; N_{ex}^+ 、 N_{ex}^- 分别为自旋向上、自旋向下的激子密度; N_{pl}^+ 、 N_{pl}^- 分别为自旋向上、自旋向下的自由载流子密度。

假设抽运光为高斯型右旋圆偏振光,脉冲半宽为 65 fs,有初始条件如下:

$$\begin{aligned} G^+(t) &= g_0^+ \exp\left(-\frac{t^2}{\Delta t_0^2}\right) = \exp\left(-\frac{t^2}{\Delta t_0^2}\right), \\ G^-(t) &= g_0^- \exp\left(-\frac{t^2}{\Delta t_0^2}\right) = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 g_0^+ 和 Δt_0 分别表示抽运光的强度系数和脉冲半宽,对右旋圆偏振抽运光有 $g_0^+ = 1$, $g_0^- = 0$ 。当抽运光功率为 1 mW 时,每个阱内初始激发的载流子密度^[11] N_0 为 $1 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 。则可以计算出多量子阱中载流子密度随延迟时间的变化规律,见图 2,其中 ex+ 和 ex- 分别表示自旋向上和自旋向下的激子,pl+ 和 pl- 分别表示自旋向上和自旋向下的自由载流子。

强抽运光共振激发会导致激子吸收饱和。一般认为有 3 种机制会导致激子吸收饱和^[15,16]: 相位空间填充(PSF),库仑屏蔽(CS)和碰撞展宽(BR)。Schmitt-Rink 计算了 PSF 效应下载流子的饱和密

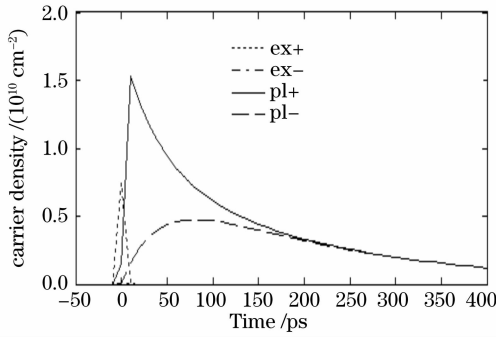


图 2 多量子阱中载流子密度随延迟时间的变化

Fig. 2 Carrier density change as a function of delay time in MQWs

度^[12], Moongoo Choi 计算得到当载流子密度在 $2.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 以下时^[17], PSF 与 CS 的漂白速率为 2:1, 即 PSF 与 CS 效应下载流子的饱和密度之比为 1:2。

考虑 PSF 对多量子阱材料吸收系数的改变时, 根据非线性吸收公式(3), 可以计算吸收系数 α 及抽运前后的吸收系数之差 $\Delta\alpha$ 随载流子密度 N 的变化值:

$$\alpha(N) = \frac{\alpha_0}{1 + N/N_s} \approx \alpha_0 \left(1 - \frac{N}{N_s}\right), \quad (3)$$

$$\Delta\alpha(N) = \alpha(N) - \alpha_0 = -\alpha_0 \frac{N}{N + N_s},$$

其中 α_0 为二维激子的本征吸收系数, $\alpha(N)$ 表示载流子密度为 N 时的激子吸收系数, N_s 为 PSF 效应下载流子的饱和密度。因为激子在 300 fs 后被完全电离, 亚纳米时间尺度的激子吸收饱和过程由激子电离产生的自由载流子主导, 抽运前后吸收系数的差值为

$$\Delta\alpha_{\text{PSF}}^{\pm} = -\alpha_0 \frac{N_{\text{pl}}^{\pm}}{N_{\text{pl}}^{\pm} + N_{s, \text{pl}}/2} - \alpha_0 \frac{N_{\text{ex}}^{\pm}}{N_{\text{ex}}^{\pm} + N_{s, \text{ex}}/2}, \quad (4)$$

式中 $N_{s, \text{pl}}$ 为 PSF 效应下自由载流子的饱和密度, $N_{s, \text{pl}}$ 为 PSF 效应下激子的饱和密度, 其中自由载流子是导致吸收饱和过程主要因素。

再考虑 Moongoo Choi 计算的 CS 作用的影响, 可以得出 PSF 效应和 CS 效应导致的右(左)旋圆偏光吸收系数的改变量随延迟时间的变化曲线, 见图 3, 其中 SCP 为右旋圆偏振探测光, OCP 为左旋圆偏振探测光。

根据吸收系数和样品厚度为 $0.96 \mu\text{m}$ 可以得出归一化透射率随延迟时间的变化规律, 见图 4。

图 4 表明多量子阱材料的饱和吸收现象, 在亚纳米的开关时间内右旋圆偏振光的归一化透射率变

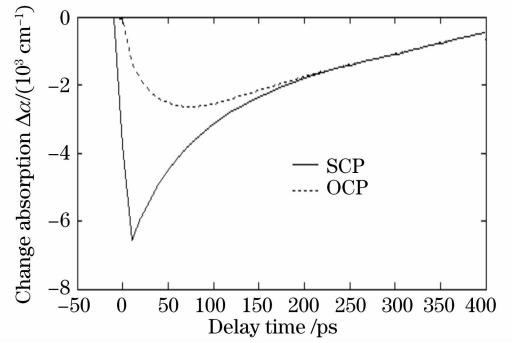


图 3 差分吸收系数随延迟时间的变化

Fig. 3 Change of differential absorption coefficient as a function of delay time

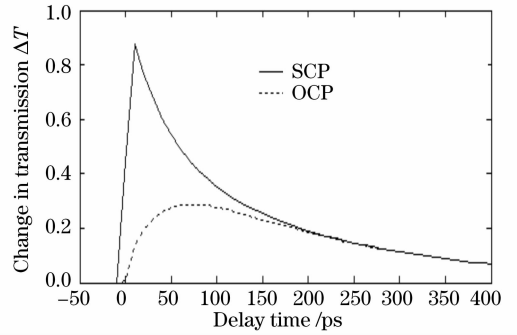


图 4 归一化透射率改变量随延迟时间的变化

Fig. 4 Normalized transmission change as a function of delay time

化明显。但材料的电子自旋弛豫速度较慢, 通过对材料进行掺杂的方式可以提高弛豫速度, 并且可以加快载流子的复合^[19]。

3 实 验

利用 MOCVD 方法生长了 11 周期的 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 多量子阱样品, 其中阱宽 $L_w = 6 \text{ nm}$, 垒宽 $L_b = 10 \text{ nm}$ 。用研磨和化学腐蚀方法除去衬底和缓冲层后, 把样品粘贴于透明的宝石片上。

实验装置原理图如图 5 所示。来自钛宝石自锁模激光器的约 130 fs 脉宽, 中心波长 830 nm, 重复速率 82 MHz 的线偏振激光脉冲序列通过经分束片 BS 后分为两束, 强的反射束两个反射镜 M 组成的可移动延时臂和斩波器 CP 后, 通过 1/4 波片变为右旋圆偏振光, 通过透镜 L 聚焦到多量子阱薄膜样品上。透过 BS 的弱光束经 M 反射后通过 1/4 波片也变为右旋圆偏振光, 再通过 L 聚焦到样品上的激发点。光电探测器输出的电信号输入锁相放大器, 斩波器 CP 输出信号作为锁相放大器的参考信号, 则锁相放大器的输出信号即为圆偏振探测光透射强度的变化量。在总光路上添加了一个连续可调节衰

减器,用来改变抽运光光强,从而达到控制激发载流子浓度的目的。

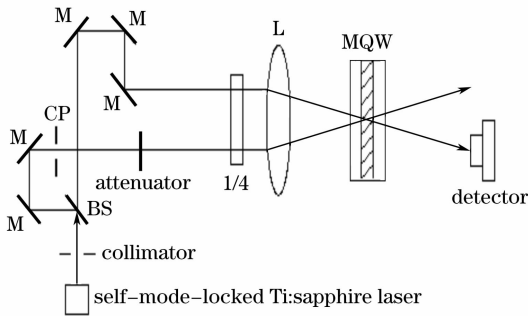


图 5 同向圆偏振抽运-探测实验光路原理图

Fig. 5 Sketch of the codirectional circularly polarized pump-probe experiment

实验结果如图 6,所示为与抽运光同向的右旋圆偏振探测光的透射光强变化。信号的阶跃处为抽运-探测光脉冲的时间重合点,较强的圆偏振抽运光激发起自旋偏振的电子,激子的吸收饱和使右旋圆偏振探测光的透射增强,电子的自旋弛豫机制使其向相反的自旋态跳转,左旋和右旋分量的偏振光逐渐相等,对探测光的吸收逐渐增强,透射减弱。图示信号清晰的表明右旋圆偏振探测光这一变化趋势以及多量子阱材料的饱和吸收现象,同时也表明电子自旋弛豫时间在亚纳秒时间尺度。

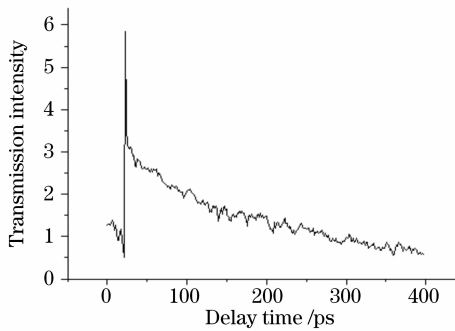


图 6 GaAs/AlGaAs MQWs 的同向圆偏振抽运-探测透射曲线

Fig. 6 Measured transmission curve in pump-probe measurements codirectional circularly polarized in GaAs/AlGaAs MQWs

实验材料结构与组分的变化会对结果产生一定的影响。在半导体多量子阱中,对势阱而言,阱宽 L_w 变窄,振子强度变大,激子结合能也越大,因而会导致弛豫时间变短,同时激子吸收共振峰蓝移量增大^[19]。对势垒而言,在晶格匹配的基础上,势垒越低,量子限制效应越差;垒宽 L_b 过宽,会导致库仑作用(CS)减弱;垒宽 L_b 过窄,激子限制效应减弱,都会使抽运后

探测光的差分透射率减小,开关效果变差。

因实验条件所限,实验样品为 11 周期,其它参量均与理论模型一致。本理论模型中使用 60 周期多量子阱是为了使设计的效果更明显。设计的实验以及实验数据和结论已能初步说明 GaAs/AlGaAs 多量子阱材料全光开关实现的可能性及诱人的应用前景。

4 结 论

通过以上理论与实验研究发现,利用多量子阱材料的激子和电子自旋弛豫过程,以及 PSF 效应和 CS 效应主导的激子吸收饱和效应可以研制基于电子自旋弛豫的透射式全光开关,开关时间为亚纳秒时间尺度。

被抽运激发产生大量激子的 GaAs/AlGaAs 多量子阱具有很强的光学非线性,圆偏振抽运光共振激发的激子密度越高,则 GaAs 多量子阱的激子饱和效应越强,同向圆偏振探测光的透射率改变量越大;在室温下应用飞秒抽运-探测技术测量 GaAs/AlGaAs 多量子阱样品透射率随延迟时间的变化规律,与理论模型相符合。

致谢 感谢中山大学物理系赖天树教授在本课题实验方面提供的帮助。

参 考 文 献

- Ren Haixia, Liu Liren, Song Zhe *et al.*. Double refraction and reflection of sequential interfaces in a crystal and application to integration of $1 \times N$ optical switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 152~157
任海霞,刘立人,宋哲等.晶体的连续双折射双反射及其集成应用: $1 \times N$ 电光开关[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 152~157
- Huang Yonglin, Dong Xingfa, Li Jie *et al.*. Research of optical add-drop multiplexer based on Mach-Zehnder interferometer and fiber Bragg grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(3): 423~426
黄勇林,董兴法,李杰等.基于马赫-曾德尔干涉仪和光纤光栅的光分插复用器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 423~426
- Jia Xiaoling, Gao Fan, Zhang Feng. Design and optimization of a new type 3×3 silicon-on-insulator multimode interference optical switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1208~1213
贾晓玲,高凡,张峰.新型 SOI 基 3×3 多模干涉波导光开关的优化设计[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1208~1213
- Wang Zhangtao, Fan Zhongchao, Xia Jinsong *et al.*. Design and fabrication of thermo-optic 4×4 switching matrix in silicon-on-insulator[J]. *Chin. J. Semiconductors*, 2004, **25**(12): 1573~1575
- Yan Jianyi, Jian Xiaoqing, Yang Fanghui *et al.*. 2×2 total-internal-reflection optical switch using thermo-optic effect of polymer[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(2): 137~140
杨建义,江晓清,杨方辉等. 2×2 有机聚合物的全内反射型热光光开关[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 137~140
- Zhang Xiaokang, Liao Changjun, Liu Peiqiang *et al.*. The test and analysis for thermo-optic effect of silicon resin[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 629~632
张小康,廖常俊,刘沛强等.硅树脂材料热光特性的测试与分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 629~632

- 7 Jintao Liang, Junhua Liu, Xin Li *et al.*. A piezoresistive micro-cantilever for thermal infrared detector[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(3): 128~130
- 8 Shi Juntian, Luo Yangcheng, She Weilong *et al.*. All-optical switching in polymer pumped by a beam with linear-circular double polarization[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(1): 102~106
石俊田, 罗洋城, 余卫龙 等. 线-圆双偏振态光束抽运有机聚合物全光开关[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 102~106
- 9 Duanbin Luo, Weilong She, Shuizhhu Wu *et al.*. All-optical switching effect based on azodye-doped polymer thin films[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(4): 243~245
- 10 A. Tackeuchi. Electron spin flip in III-V semiconductor quantum confined structures[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4992**: 25~32
- 11 A. Miller, P. Riblet, M. J. Mazilu *et al.*. Exciton saturation in GaAs multiple quantum wells at room temperature[J]. *Appl. Phys.*, 1999, **86**(7): 3734~3744
- 12 S. Schmitt-Rink, D. S. Chemla, D. B. A. Miller. Theory of transient excitonic optical nonlinearities in semiconductor quantum-well structures[J]. *Phys. Rev. B*, 1985, **32**(10): 6601~6609
- 13 R. Akahashi, H. Itoh, H. Iwamura. Ultrafast high-contrast all-optical switching using spin polarization in low-temperature-grown multiple quantum wells[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(19): 2958~2960
- 14 P. J. Bishop, M. E. Daniels, B. K. Ridley. Radiative recombination in GaAs/AlGaAs quantum wells[J]. *Phys. Rev. B*, 1991, **45**(12): 6686~6691
- 15 D. Marshall, A. Miller. Carrier transport, ultrafast spin dynamics and polarisation switching in InGaAsP multiple quantum wells [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2001, **33**(7~10): 1019~1034
- 16 D. R. Wake, H. W. Yoon, J. P. Wolfe *et al.*. Response of excitonic absorption spectra to photoexcited carriers in GaAs quantum wells[J]. *Phys. Rev. B*, 1992, **46**(20): 13452~13460
- 17 M. Choi, K. C. Je, S. Y. Yim *et al.*. Relative strength of the screened Coulomb interaction and phase-space filling on exciton bleaching in multiple quantum well structures[J]. *Phys. Rev. B*, 2004, **70**: 085309-1~085309-4
- 18 L. Qian, D. S. Benjamin, P. W. E. Smith. Subpicosecond carrier lifetime in beryllium-doped InGaAsP grown by He-plasma-assisted molecular beam epitaxy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(11): 1513~1515
- 19 D. Hulin, A. Mysyrowicz. Well-size dependence of exciton blue shift in GaAs multiple-quantum-well structures[J]. *Phys. Rev. B*, 1986, **33**(6): 4389~4391

“Code-V”杯光学设计大赛暨论坛

由中科院上海光机所主办的光学设计高级讲习班旨在提升我国光学设计人员的设计思想和理念,培育光学大师,目前安排的课程有光学系统设计、光机系统设计、光学薄膜、光学加工等。该高级讲习班自2004年由王之江院士提议举办以来,已连续成功举办四届。第五届光学设计高级讲习班将在2008年10月举办,同期将举办首届全国光学设计大赛和首届光学设计论坛,《激光与光电子学进展》(核心期刊)也将在论坛期间出版“光学设计”专刊。欢迎广大从事光学设计的人员踊跃参加。

主办单位:

中国科学院上海光学精密机械研究所

冠名单位:

Optical Research Associates

承 办:

光学期刊联合编辑部

组织委员会

共主席:

王之江 院士 上海光学精密机械研究所

薛鸣球 院士 苏州大学

朱健强 研究员 上海光学精密机械研究所

副主席:

徐文东 研究员 中国科学院上海光学精密机械研究所

Robert S. Hilbert 总裁 美国 Optical Research

Associates 公司

王涌天 教授 北京理工大学

范志刚 教授 哈尔滨工业大学

岑兆丰 教授 浙江大学

邢廷文 研究员 成都光电技术研究所

委员:

杜春雷 成都光电技术研究所

孟军和 天津津航技术物理研究所

沈为民 苏州大学

王小鹏 西安应用光学研究所

翁志成 长春光学精密机械与物理研究所

张 新 长春光学精密机械与物理研究所

赵葆常 西安光学精密机械研究所

金 宁 昆明物理研究所

张国瑞 北京空间机电技术研究所

杨长城 华中光电技术研究所

李 林 北京理工大学

曾吉勇 凤凰光学(上海)有限公司

王文鉴 舜宇光学科技(集团)有限公司

日程安排

公布参赛试题: 2008年8月10日

提交参赛作品: 2008年9月10日~10月10日

检验参赛作品: 2008年10月11日~25日

颁奖典礼暨光学设计论坛: 2008年10月29日

奖项设置

奖 项	奖金金额
光学设计第一名	5000 元
光学设计第二名	3000 元
光学设计第三名	2000 元
光学设计第四~第十名	1000 元

所有参赛代表均可免费参加首届光学设计论坛及首届光学设计大赛颁奖典礼,与顶级光学设计专家面对面交流。

详情请咨询(中国光学期刊网www.opticsjournal.net)

中国科学院上海光学精密机械研究所 光学设计高级讲习班筹备组 段家喜 编辑

电话/传真:021-69918426/021-69918098

E-mail: duanjiaxi@siom.ac.cn