

LD 泵浦全固态 608.1 nm 和频激光器

付喜宏

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 本文报道了一种全固态腔内和频 608.1 nm 激光器。在激光谐振腔两个分臂中, 两支激光二极管分别泵浦 Nd:YVO₄ 和 Nd:YAG 晶体, 分别选择 1 342 nm 波长(Nd:YVO₄ 晶体的⁴F_{3/2}-⁴I_{13/2} 谱线)与 1 112 nm 波长(Nd:YAG 晶体的⁴F_{3/2}-⁴I_{11/2} 谱线)振荡并进行腔内和频。通过优化谐振腔设计, 腔内两个波长获得了较好的模式匹配。在两个分臂的交叠部分, 利用 LBO I 类相位匹配进行和频, 获得和频 608.1 nm 激光输出。实验表明, 当 Nd:YVO₄ 与 Nd:YAG 晶体泵浦功率分别为 600 和 740 mW 时, 获得了功率为 23.8 mW、波长为 608.1 nm 激光输出, 激光输出稳定、噪声低。利用本文提出的和频结构是获得 608.1 nm 激光输出较为有效的方法。

关键词: LD 泵浦; 和频; 608.1 nm 激光

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20150805.0794

Diode-pumped all-solid-state sum-frequency mixing laser at 608.1 nm

FU Xi-hong

(State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: fuxh@ciomp.ac.cn

Abstract: A compact all-solid-state intracavity sum-frequency mixing laser at 608.1 nm is reported. A Nd:YAG crystal and a Nd:YVO₄ crystal are pumped by two laser diodes respectively in two sub-arms of the laser cavity. In the two arms, laser wavelengths of 1 342 nm from Nd:YVO₄ crystal (corresponding to the ⁴F_{3/2}-⁴I_{13/2} transition) and 1 112 nm from Nd:YAG crystal (corresponding to the ⁴F_{3/2}-⁴I_{11/2} transition) are selected to be mixed into 608.1 nm laser. Through optimization of the cavity design, better matching of the modes for the two wavelengths is obtained. In the overlapping of the two arms, sum-frequency mixing is generated with a type I phase-matching LBO crystal. The experiment result shows that a stable and low noisy output of 23.8 mW at 608.1 nm is obtained at the incident pump power of 740 mW for the Nd:YAG crystal and 600 mW for the Nd:YVO₄ crystal. It is an efficient way to obtain 608.1 nm laser with the sum-frequency mixing structure proposed in this article.

Key words: LD pumped; sum-frequency mixing; 608.1 nm laser

1 引言

半导体激光器泵浦的全固态激光器由于具有结构紧凑、电光效率高、寿命长、光束质量好等优点而成为激光技术领域研究的热点^[1-8]。对于全固态激光器,利用非线性倍频技术可获得新的激光波长,但常用激光晶体仅有有限个数的发射谱线,通过倍频仅可获得与其对应的倍频光输出。这样,实际应用领域需求的某些波段,由于缺少相应的基频光而不能通过倍频方式获得,如580~620 nm波段激光在生物、医疗、显示等领域有着特殊用途。近年来,研究人员开始关注600~610 nm波段激光在皮肤色素性病变治疗中的应用^[9-11]。目前,实际应用的600~610 nm波段激光器主要是染料激光器,它们通常具有体积大、液体处理系统复杂、转换效率较低等缺点。因而,采用全固态激光器实现600~610 nm激光输出引起了人们的广泛关注。

近几年,国内外一些研究小组开始报道利用波长为440~480 nm的蓝光半导体激光器^[12]泵浦掺Pr³⁺晶体实现600~610 nm波段激光输出^[13-17]。2011年,法国研究人员利用444 nm GaN激光二极管泵浦Pr:BYF晶体,获得功率为78 mW、波长为607 nm激光输出^[13]。2014年,中国研究人员利用443.8 nm InGaN激光二极管泵浦Pr:YLF晶体,获得功率为200 mW、波长为607 nm激光输出^[17]。2014年,法国Western Bolaños等人利用479.2 nm光泵半导体蓝光激光器泵浦Pr:YLF晶体,获得功率为150 mW、波长为604 nm激光输出^[15]。然而,上述研究中采用蓝光半导体激光器作为泵浦源,目前直接输出蓝光的半导体激光器输出功率最高仅到瓦级,这使得利用该方法在提升600~610 nm激光输出功率方面受到很大限制。对于全固态激光,实现600~610 nm激光输出的另一种方法是采用非线性和频技术,如利用Nd:YAG晶体与Nd:YVO₄晶体分别获得1 112 nm与1 342 nm激光振荡,之后通过非线性和频实现608.1 nm激光输出。相比于蓝光激光器泵浦方式,非线性和频方式采用目前非常成熟的808 nm半导体激光器作为泵浦源,因而

在激光输出功率及性能提升方面具有更大的优势。

本文首次报道了采用非线性和频技术实现608.1 nm激光输出。激光谐振腔由两个分臂构成,在谐振腔的两个分臂中,激光二极管分别泵浦Nd:YAG晶体及Nd:YVO₄晶体,产生1 112 nm与1 342 nm激光振荡,在谐振腔的交叠区域,利用LBO进行腔内和频。通过谐振腔的优化设计,在泵浦功率分别为600 mW(泵浦Nd:YVO₄晶体)与740 mW(泵浦Nd:YAG晶体)时,获得了功率为23.8 mW、波长为608.1 nm激光输出。激光输出光束质量好,噪声低。

2 实验装置

实验装置如图1所示,1 112 nm激光谐振腔由Nd:YAG晶体、平面镜M₁、平凹镜M₂及M₃组成;1 342 nm激光谐振腔由Nd:YVO₄晶体、平凹镜M₂及M₃组成。两个谐振腔通过M₁实现光路重合,在光路重合部分加入非线性晶体进行和频。Nd:YAG晶体(尺寸3 mm×3 mm×4 mm,Nd³⁺掺杂浓度:1.0at.%) ,泵浦光吸收系数:7.1 cm⁻¹,一端镀膜使其对1 112 nm高反、808 nm增透、1 064 nm增透,作为1 112 nm谐振腔的一个腔镜;另一端镀1 112 nm增透膜以减少1 112 nm谱线的腔内损耗。Nd:YVO₄晶体(尺寸3 mm×3 mm×2 mm,Nd³⁺掺杂浓度:1.0at.%) ,泵浦光吸收系数:31.2 cm⁻¹,左端镀膜使其对1 342 nm高反、808 nm增透、1 064 nm增透,作为1 342 nm谐振腔的一个腔镜,右端镀膜使其对1 342 nm增透以减少1 342 nm谱线在腔内的损耗。两支808 nm激光二极管(LD)作为泵浦源,LD出射的光经整形耦合系统^[18]聚焦为半径约为110 μm的泵浦光入射到晶体中。平面镜M₁右端面镀膜使其对15°入射p偏振1 112 nm高反($R > 99.9\%$)、p偏振1 342 nm增透($T > 99\%$);左端面镀膜使其对15°入射1 342 nm增透($T > 99\%$);平凹镜M₂曲率半径为50 mm,凹面镀膜使其对1 112 nm/1 342 nm两波长高反($R > 99.9\%$)、608 nm增透($T > 95\%$),平面镀膜使其对608 nm增透($T > 95\%$),作为和频光输出镜。平凹镜M₃曲率半径为

100 mm,凹面镀膜使其对 1 112 nm/1 342 nm/608 nm三个波长高反。为减少色散带来的影响,折叠臂的折叠角尽量小($<10^\circ$)。由于 Nd:YAG 晶体的 1 112、1 116、1 123 nm 三条谱线间隔较小,很难通过镀膜抑制 1 116 及 1 123 nm 谱线振荡。实验中,采用插入 0.7 mm 厚熔石英标准具并精密调节其偏转角度来获得单一 1 112 nm 激光振荡^[19]。

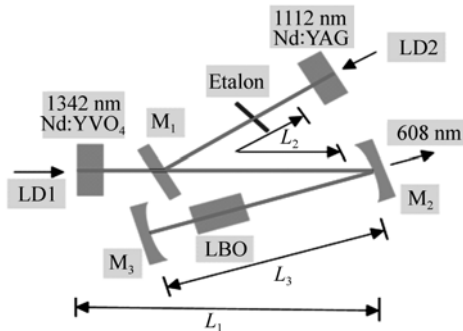


图1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

采用上述结构,参与和频的两基频光分别在两个谐振腔中振荡,避免了参与和频的两束光相互影响。同时,采用折叠腔结构,在谐振腔内可获得 2 个束腰,分别放置激光晶体与非线性和频晶体,可提高泵浦效率及和频转换效率。采用这种结构,和频光从折叠镜输出,不再经过激光晶体,也避免了激光晶体对和频光的吸收。

谐振腔中各部分长度通过 ABCD 矩阵计算确定,计算中兼顾泵浦光及振荡光的模式匹配。通过计算,取 $L_1 = 37$ cm、 $L_2 = 47$ cm、 $L_3 = 32$ cm。此时,两激光晶体中,1 112 与 1 342 nm 的束腰分别为 113 与 119 μm ,略大于泵浦光斑半径,满足模式匹配条件^[20]。图 2 为折叠臂($M_2 \sim M_3$ 部分)中

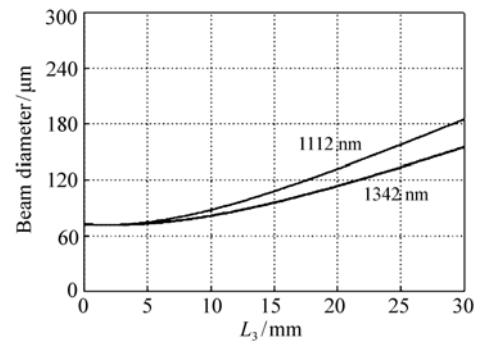


图2 折叠臂中光斑直径变化(以 M_3 镜为起点)

Fig. 2 Variation of beam diameters in the folded arm (from M_3)

两光束光斑直径的变化情况(以腔镜 M_3 为起点),可见,通过腔参数的选择,在和频晶体内(即束腰位置)两基频光实现了较好的交叠。

3 实验结果及讨论

实验选用 2 mm \times 2 mm \times 10 mm LBO (LiB_3O_5 , 三硼酸锂)作为和频晶体。LBO 晶体是一种性能优异的非线性光学晶体,透光波段范围宽(160 ~ 2 600 nm)、光学均匀性好、损伤阈值高(1.3 ns 脉宽的 1 053 nm 激光可达 10 GW/cm^2)、接收角度宽,离散角度小,用于非线性频率变换时,可获得高的倍频及和频转换效率。利用 SNLO 软件计算获得的 LBO 晶体在 1 342 与 1 112 nm 两波长和频时的各项参数列于表 1,表中也给出了目前较为常用的 KTP (KTiOPO_4 , 磷酸钛氧钾)及 LIBO (LiB_3O_5 , 硼酸锂)晶体相应的和频参数。将表中数据对比可以看出:KTP 晶体有效非线性系数(d_{eff})最大,但其走离角(Walkoff angle)也最大,输出光斑质量较差;LIBO 晶体的

表1 BIBO, LBO 和 KTP 在 1 112 和 1 342 nm 和频时的参量
Tab. 1 Parameters of BIBO, LBO and KTP for SFM at 1 112 nm and 1 342 nm

Crystals	BIBO	LBO	KTP
Phase matching	1 342(o) + 1 112(o) = 608.1(e)	1 342(e) + 1 112(e) = 608.1(o)	1342(e) + 1112(o) = 608.1(o)
$(\theta, \varphi)/\text{deg.}$	4.7, 0	87.8, 0.0	72.1, 0
$d_{\text{eff}}/(\text{pm} \cdot \text{V}^{-1})$	2.23	0.833	3.55
Walkoff angle/mrad	0, 0, 13.77	1.93, 1.97, 0	29.75, 0, 0
Angle tolerance/(mrad \cdot cm)	4.53	35.11	2.49

有效非线性系数较大, 走离角是 KTP 晶体的 1/2, 但其接受角较窄。相比之下, LBO 晶体虽然有效非线性系数较小, 但其走离角小, 接受角宽, 在使用较长长度进行非线性和频时, 可以在保证较好的光斑质量下同样获得较高的和频转换效率。

对于非线性和频 ($\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$) 过程, 满足相位匹配情况下, 和频光功率 P_3 :

$$P_3 = \gamma_{\text{SFM}} P_1 P_2, \quad (1)$$

式中, γ_{SFM} 为和频参量, 取决于材料的非线性性质、参与和频的两束激光的频率以及腔内光束参数。如果确定了谐振腔结构, γ_{SFM} 是一个定值, 所以, 当参与和频的一束激光的功率 P_1 固定, 而另一束激光功率 P_2 改变, 所产生的和频光功率将随 P_2 线性变化。

对于 1 112 与 1 342 nm 激光和频产生 608.1 nm 激光的和频过程, 1 个 1 112 nm 光子与 1 个 1 342 nm 光子作用产生 1 个 608.1 nm 光子。因此, 高效率的和频要求谐振腔内 1 112 与 1 342 nm 的光子数密度之比达到 1:1。本实验中, Nd:YAG 晶体及 Nd:YVO₄ 晶体分别由两个 LD 泵浦, 通过调节 LD 的电流可实现对 1 112 及 1 342 nm 激光增益的单独调节, 使腔内光子数密度之比达到 1:1, 提高和频转换效率。

实验中, 首先在注入泵浦功率较小且不加 LBO 晶体时, 调节好谐振腔; 之后加入 LBO 晶体, 通过仔细调节, 可得到 608.1 nm 橙黄光输出。图 3 为 608.1 nm 激光输出功率随注入到两块晶体上的泵浦功率的变化曲线。当两块晶体上的泵浦功率分别为 600 和 740 mW 时, 获得了功率为 23.8 mW、波长为 608.1 nm 和频光输出。图 3 中, 曲线 1 是当 Nd:YAG 晶体的泵浦功率 ($P_{\text{Nd:YAG}}$) 为 740 mW 时, 波长为 608.1 nm 激光输出功率随 Nd:YVO₄ 晶体泵浦功率的变化; 曲线 2 是当 Nd:YVO₄ 晶体的泵浦功率 ($P_{\text{Nd:YVO}_4}$) 为 600 mW 时, 波长为 608.1 nm 激光输出功率随 Nd:YAG 晶体泵浦功率的变化。可以看出, 输出曲线整体比较平缓, 接近线性。值得注意的是, 固定 Nd:YVO₄ 晶体的泵浦功率为 600 mW, 当 Nd:YAG 晶体的泵浦功率增大到 740 mW 时, 608.1 nm 输出功率为 23.8 mW。继续增大泵浦功率, 608.1 nm 输出功率不再有明显增加, 呈现饱和甚

至功率下降的趋势。出现上述情况的主要原因是当 Nd:YVO₄ 晶体的泵浦功率一定时, 谐振腔内振荡的 1 342 nm 的光子数密度保持一定数量; 当 Nd:YAG 晶体的泵浦功率增加时, 腔内 1 112 nm 的光子数密度不断增加, 由于非线性和频的过程, 腔内的 1 342 nm 光子被不断消耗; 当 Nd:YAG 晶体的泵浦功率增加到 740 mW 时, 和频过程使谐振腔内 1 342 nm 激光的光子被最大限度利用; 进一步增大 Nd:YAG 晶体的泵浦功率时, 虽然谐振腔内的 1 112 nm 光子增加, 但由于缺少 1 342 nm 光子, 和频过程无法进行, 608.1 nm 和频光输出功率不再增加, 同时, 在非线性晶体 LBO 内, 新增的 1 112 nm 光子会与 608.1 nm 和频光光子相互作用进行差频过程 ($\omega_{608.1} - \omega_{1112} = \omega_{1342}$), 导致和频 608.1 nm 激光输出功率降低。此时, 若想提高 608.1 nm 和频光的输出功率, 须同时增大 Nd:YVO₄ 晶体的泵浦功率。

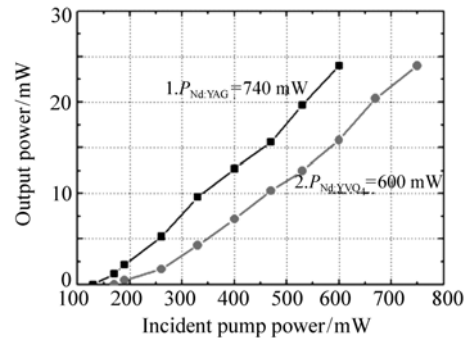


图 3 608.1 nm 和频光功率随泵浦功率的变化
Fig. 3 Output power of sum-frequency laser as a function of the pump power at 608.1 nm

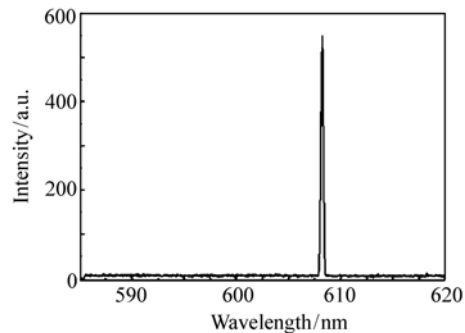


图 4 和频光光谱
Fig. 4 Spectrum of the sum-frequency light

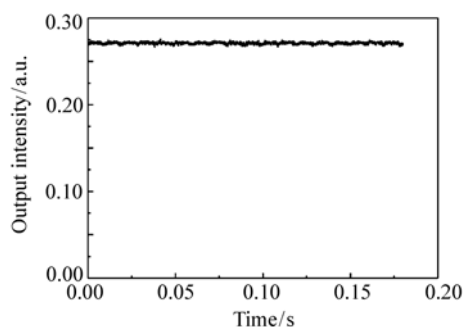


图5 608.1 nm 输出的噪声情况

Fig.5 Characteristic of the output noise at 608.1 nm

采用 Ocean Optics 公司光谱仪对输出和频激光光谱进行测量,光谱如图4所示,输出激光中心

波长为 608.1 nm。

采用快速硅光电二极管接收,并送入高速示波器观察,608.1 nm 激光噪声情况如图5所示。经计算,输出的 RMS 噪声为 0.75%。

4 结 论

本文采用腔内和频方式获得608.1 nm激光输出。当泵浦功率为 600 mW (对 Nd:YVO₄ 晶体) 及 740 mW (对 Nd:YAG 晶体) 时,获得了功率为 23.8 mW、波长为 608.1 nm 激光输出。输出激光光束质量好,噪声低。结果表明,采取腔内和频是有效获得 608.1 nm 激光输出的实用方法。

参考文献:

- [1] 王立军,宁永强,秦莉,等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. 发光学报,2015,36(1):1-19.
WANG L J, NINE Y Q, QIN L, *et al.* Development of high power diode laser[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2015, 36(1): 1-19. (in Chinese)
- [2] 高清松,马毅,庞毓,等. 高功率全固态绿光激光技术研究进展[J]. 强激光与粒子束,2011,23(9):2373-2376.
GAO Q S, MA Y, PANG Y, *et al.* Research progress in all-solid-state high power green laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(9): 2373-2376. (in Chinese)
- [3] 王鑫,王翠鸾,吴霞,等. GaAs 基高功率半导体激光器单管耦合研究[J]. 发光学报,2015,36(9):1018-1021.
WANG X, WANG C L, WU X, *et al.* Coupling research of high power single GaAs based semiconductor laser[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2015, 36(9): 1018-1021. (in Chinese)
- [4] 周泽鹏,薄报学,高欣,等. 基于 ZEMAX 高功率半导体激光器光纤耦合设计[J]. 发光学报,2013,34(9):1208-1212.
ZHOU Z P, BO B X, GAO X, *et al.* Fiber coupling design of high power semiconductor laser based on ZEMAX[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2013, 34(9): 1208-1212. (in Chinese)
- [5] 张志军,刘云,缪国庆,等. 2 kW 半导体激光加工光源[J]. 发光学报,2013,34(3):334-339.
ZHANG ZH J, LIU Y, MIAO G Q, *et al.* The 2 kW semiconductor laser processing light[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2013, 34(3): 334-339. (in Chinese)
- [6] 田金荣,刘京徽,宋晏蓉,等. 双波长光参量振荡器的研究进展及应用[J]. 中国光学,2014,7(5):723-730.
TIAN J R, LIU J H, SONG Y R, *et al.* Advances and applications of dual-wavelength optical parametric oscillators[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 723-730. (in Chinese)
- [7] 王治昊,余锦,樊仲维,等. 全固态被动调 Q 皮秒激光技术研究进展[J]. 发光学报,2013,34(7):900-910.
WANG ZH H, YU J, FAN ZH W, *et al.* Research progress of all-solid-state passively Q-switched picosecond laser technology[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2013, 34(7): 900-910. (in Chinese)
- [8] 苏宁,张茂,任钢,等. 3~5 μm 光学参量振荡器研究进展及其应用[J]. 光学技术,2013,39(4):359-364.
SU N, ZHANG M, REN G, *et al.* Progress and applications of 3~5 μm optical parametric oscillator[J]. *Optical Technique*, 2013, 39(4): 359-364. (in Chinese)
- [9] BERNSTEIN E F, BHAWALKAR J, CLIFFORD J, *et al.* Laser treatment of dyschromia with a novel 607 nm pulsed-dye laser[J]. *J. Drugs in Dermatology*, 2011, 10(4): 388.
- [10] CHERN P L, DOMANKEVITZ Y, ROSS E V. Pulsed dye laser treatment of pigmented lesions: a randomized clinical pilot

- study comparison of 607 and 595 nm wavelength lasers[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*,2010,42(10):865-869.
- [11] BERNSTEIN E,BHAWALKAR J,CLIFFORD J,*et al.*. Laser treatment of pigmented lesions with a 605 nm laser[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*,2010;45-45.
- [12] 洪国彬,杨钧杰,卢廷昌. 蓝紫光氮化镓光子晶体面射型激光器[J]. 中国光学,2014,7(4):559-571.
HONG K B,YANG CH CH,LU T CH. Blue violet GaN-based photonic crystal surface emitting lasers[J]. *Chinese Optics*,2014,7(4):559-571. (in Chinese)
- [13] PABOEUFD,MHIBIKO,BRETENAKERF,*et al.*. Diode-pumped Pr:BaY₂F₈ continuous-wave orange laser[J]. *Optics Letters*,2011,36(2):280-282.
- [14] XU B,LIU Z,XU A H,*et al.*. Highly efficient InGaN-LD-pumped bulk Pr:YLF orange laser at 607 nm[J]. *Optics Communications*,2013,305:96-99.
- [15] BOLAÑOSW,BRASSEG,STARECKIF,*et al.* Green, orange, and red Pr³⁺:YLiF₄ epitaxial waveguide lasers[J]. *Optics Letters*,2014,39(15):4450-4452.
- [16] SOTTILE A,PARISI D,TONELLI M. Multiple polarization orange and red laser emissions with Pr:BaY₂F₈[J]. *Optics Express*,2014,22(11):13784-13791.
- [17] CHENG Y J,XU B,QU B,*et al.*. Comparative study on diode-pumped continuous wave laser at 607 nm using differently doped Pr³⁺:LiYF₄ crystals and wavelength tuning to 604 nm[J]. *Applied Optics*,2014,53(33):7898-7902.
- [18] 史光辉. 半导体激光耦合新方法[J]. 中国光学,2013,6(3):343-352.
SHI G H. Improved method for semiconductor laser coupling[J]. *Chinese Optics*,2013,6(3):343-352. (in Chinese)
- [19] LI C Y,WANG Z C,XU Y T,*et al.*. 93.7 W 1112 nm diode-side-pumped CW Nd:YAG laser[J]. *Laser Physics*,2010,20(7):1572-1576.
- [20] LAPORTA P,BRUSSARD M. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers[J]. *IEEE J. Quantum. Electron.*,1991,27(10):2319-2326.

作者简介:



付喜宏(1980—),男,内蒙古人,博士,副研究员,硕士生导师,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事激光技术方面的研究。E-mail:fuxh@ciomp.ac.cn