

文章编号: 0258-7025(2010)06-1564-05

纳米硅薄膜被动调 Q 的激光二极管抽运 Nd:YAG/LBO 蓝光激光器

王加贤 凌朝东 韩磊

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 在激光二极管端面连续抽运 Nd:YAG 激光器中,采用由射频磁控溅射技术和热处理制备的纳米 Si 镶嵌 SiN_x (nc-Si/SiN_x) 薄膜作为可饱和吸收体,实现了 946 nm 激光的被动调 Q 运转,同时采用三硼酸锂(LBO)晶体对 946 nm 光脉冲进行腔内倍频,获得了 473 nm 蓝光脉冲输出。当抽运功率为 8.5 W 时,输出的蓝光脉冲平均功率为 120 mW,脉冲重复频率为 23.8 kHz,脉冲宽度为 45 ns,峰值功率为 112 W,光-光转换效率为 1.41%。实验还研究了蓝光脉冲平均功率、脉冲重复频率和脉冲宽度随抽运功率的变化。理论分析认为,nc-Si/SiN_x 薄膜对 946 nm 激光的双光子饱和吸收导致了 Nd:YAG 946 nm 激光器的被动调 Q 运转。

关键词 激光技术;蓝光脉冲;纳米硅薄膜;被动调 Q;腔内倍频

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1564

Nanocrystalline Silicon Film Passively Q-Switched Laser Diode Pumped Nd:YAG/LBO Blue Laser

Wang Jiexian Ling Chaodong Han Lei

(College of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)

Abstract A film of nanocrystalline silicon embedded in SiN_x (nc-Si/SiN_x) was prepared by radio-frequency magnetron sputtering technique and thermal annealing. By using the film as a saturate absorber, a 946 nm laser with passive Q-switching was achieved in a laser diode (LD) continual end-pumped Nd:YAG laser and a 473 nm blue laser pulse was generated with intra-cavity frequency doubling of LiB_3O_5 (LBO) crystal. At the pump power of 8.5 W, the Q-switched blue laser pulses with average power of 120 mW, pulse duration of 45 ns, repetition rate of 23.8 kHz and peak power of 112 W were obtained. The conversion efficiency from pump lasers to 473 nm blue laser pulses was 1.41%. The changes of average powers, pulse repetition rates and pulse duration of the blue laser pulses with pump powers were experimentally studied. Theoretical analysis showed that the two-photon saturate absorption at 946 nm laser pulse in nanocrystalline silicon embedded in SiN_x films caused the passive Q-switching of Nd:YAG 946 nm lasers.

Key words laser technique; blue laser pulse; nanocrystalline silicon film; passive Q-switching; in-cavity frequency doubling

1 引 言

蓝光激光在高密度信息存储、激光彩色显示、水下通信、生物学和医学等领域中有重要应用,引起人们的研究兴趣。自 1987 年 Fan 等^[1]首次获得激光二极管(LD)抽运 Nd:YAG 的准三能级 946 nm 激光后,采用非线性晶体对掺 Nd^{3+} 离子晶体发射的 0.9 μm 附近的激光倍频已成为获取高功率蓝光激

光的主要方式,例如对 Nd:YAG 的 946 nm, Nd:YVO₄ 的 914 nm 和 Nd:GdVO₄ 的 912 nm 激光倍频可分别获得 473, 457 和 456 nm 蓝光激光^[2~4]。对 946 nm 激光调 Q 和倍频,可以获得水下通信、遥感遥测和激光光谱学等应用需要的蓝光脉冲。由于 Nd:YAG 的 946 nm 谱线属于准三能级结构,激光器振荡阈值高、腔内激光功率低,所以对其被动调 Q

收稿日期: 2009-09-15; 收到修改稿日期: 2009-10-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60838003)和福建省自然科学基金(2009J01291)资助课题。

作者简介: 王加贤(1955—),男,博士,教授,主要从事固体激光技术与器件、超短光脉冲等方面的研究。

E-mail: wangjx@hqu.edu.cn

要比对 1064 nm 激光被动调 Q 困难得多,近年来才有这方面的研究报道^[5,6]。2001 年,Spiekerman 等^[7]采用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 对 LD 抽运的 Nd:YAG 的 946 nm 激光被动调 Q,采用周期性极化的 KTiOPO_4 晶体进行腔外倍频,在 7.1 W 抽运功率下,获得平均功率 285 mW,脉冲宽度 19.5 ns 的蓝光脉冲。2003 年,郑权等^[8]报道 LD 抽运, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 的 Nd:YAG /三硼酸锂(LBO)蓝光激光器,在 1.6 W 抽运功率下获得平均功率 9.1 mW,脉冲宽度 14.5 ns,重复频率 4.19 kHz 的 473 nm 蓝光输出。2007 年,Chen 等^[9]采用声光主动调 Q 和 LBO 腔内倍频,在 24 W 抽运功率下,从 Z 型腔 Nd:YAG 激光器中输出平均功率 2.25 W,脉宽 160 ns,重复频率 23 kHz 的蓝光脉冲。本文针对 Nd:YAG 发射的 946 nm 激光谱线阈值高、功率低的特点,采用通过射频磁控溅射技术制备的纳米 Si 镶嵌 SiN_x ($\text{nc-Si}/\text{SiN}_x$) 薄膜作为可饱和吸收体,尽可能降低对 946 nm 激光的线性吸收损耗。在 LD 端面连续抽运 Nd:YAG 激光器中,实现对 946 nm 激光被动调 Q,并采用 LBO 晶体腔内倍频,获得 473 nm 蓝光激光脉冲输出。

2 实验装置和参数选择

纳米 Si 薄膜被动调 Q, LBO 腔内倍频的 Nd:YAG 蓝光激光器实验装置如图 1 所示。其中 C 作为倍频器件的 LBO 晶体, A 作为可饱和吸收体的 $\text{nc-Si}/\text{SiN}_x$ 薄膜。采用光纤耦合的 808 nm 半导体激光器端面连续抽运 Nd:YAG 晶体, LD 最大输出功率为 13 W,耦合光纤芯径为 600 μm ,数值孔径为 0.22,抽运光经整形和聚焦系统后传输效率约为 85%。用恒温水循环装置对 LD 进行温度控制,以保证其发射波长与 Nd:YAG 吸收峰匹配。谐振腔采用结构简单、调整方便、稳定区域大的平凹驻波腔,以避免在 V 型或 Z 型折叠腔中由于折叠角带来的像散和损耗。为了抑制 1064 nm 和 1319 nm 两条谱线振荡和保证 473 nm 蓝光高效输出,采取相应的镀膜措施: Nd:YAG 晶体前端面(靠近 LD)镀 808, 1064, 1319 nm 高透膜和 473, 946 nm 高反膜,作为激光器的全反射腔镜;后端面镀 473, 946 nm 高透膜。平凹镜 M 作为激光器输出镜,凹面曲率半径为 50 mm,镀 946 nm 高反膜和 473 nm 高透膜,平面镀 473 nm 高透膜。输出镜 M 与 Nd:YAG 晶体前端面构成平凹腔,经过实验比较,腔长 25 mm 时既能使损耗较低,又能获得较窄的调 Q 脉冲。

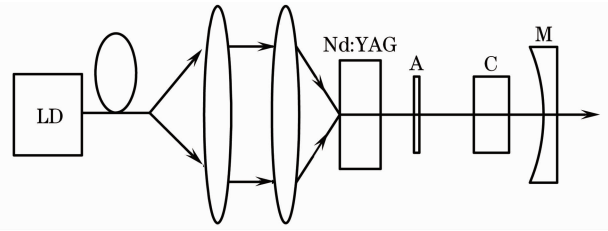


图 1 LD 抽运的 Nd:YAG/LBO 被动调 Q 蓝光激光器
Fig. 1 Passively Q-switched LD pumped Nd:YAG/LBO blue laser

实验装置中 Nd:YAG 晶体长度的选择非常重要。946 nm 谱线属于准三能级结构中 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ 之间的跃迁,激光下能级与最低能级间只有几百个波数的能级裂距,室温时激光下能级粒子数约占基态粒子数的 0.74%,随着温度升高,下能级粒子数增加,下能级粒子对 946 nm 激光存在再吸收损耗^[10]。Nd:YAG 晶体过短,抽运光不能被充分吸收;晶体过长,则会增加对 946 nm 激光的再吸收损耗,因此存在一个最佳晶体长度。由稳态时的速率方程导出的准三能级阈值公式^[11],把晶体和激光器的有关参量代入,可求出 Nd:YAG 晶体长度的最佳理论值为 2.5 mm。实验也表明,采用尺寸 3 mm × 3 mm × 2.5 mm, Nd 离子掺杂原子数分数为 1.0% 的 Nd:YAG 晶体是比较合适的。

常用于 946 nm 激光倍频的非线性晶体有 KNbO_3 , LBO, 偏硼酸钡(BBO)。 KNbO_3 晶体的有效非线性系数大、走离角小,但其允许温度范围及最大接受角均比 LBO 小得多,在实际工艺中控制困难。BBO 的有效非线性系数较大,但相位匹配角度范围窄,走离效应严重,输出激光呈椭圆形。LBO 的有效非线性系数虽然不是很大,但性能稳定、损伤阈值高,作为调 Q 脉冲的倍频器件,基频光脉冲的高峰值功率可以弥补其有效非线性系数较小的缺点。实验中选用尺寸 2 mm × 2 mm × 10 mm, I 类临界相位匹配角 $\theta = 90^\circ$, $\phi = 19.4^\circ$ 的 LBO 晶体作为倍频器件,晶体的通光面均镀有 473 nm 和 946 nm 增透膜,并采取相应的冷却措施。

3 纳米硅薄膜的制备

采用射频磁控溅射法制备 $\text{nc-Si}/\text{SiN}_x$ 薄膜作为 946 nm 激光调 Q 的可饱和吸收体。溅射气体 Ar 和反应气体 N_2 经质量流量计精确控制进入磁控室,溅射靶材为高纯度单晶 Si,选取石英片为衬底。制备薄膜的主要参数为:射频功率为 300 W,工作气压为 1.2 Pa,气体流量比 $R(\text{Ar}/\text{N}_2)$ 为 80/20,

沉积时间为 50 min,膜厚监测仪显示薄膜厚度约为 450 nm,薄膜生成后进行退火处理使之晶化。

采用德国 Bruker 公司 D8 Advance 型 X 射线衍射仪 (XRD) 测量经退火处理的 nc-Si/SiN_x 薄膜的衍射谱,如图 2 所示。把衍射角、衍射峰的半峰全宽 (FWHM) 代入 Scherrer 公式计算,得到纳米晶粒的平均尺寸约为 11 nm。采用 UNICO 公司的 UV-2800H 型紫外-可见分光光度计测量薄膜的透射谱 (扣除石英衬底的吸收) 如图 3 所示,在波长 946 nm 处的透射率约为 87.9%。透射谱出现周期性振荡的原因是,由于薄膜表面有较小的光反射,使得透射光中存在多光束干涉。

4 实验结果和分析

4.1 实验结果

把 nc-Si/SiN_x 薄膜贴在带孔的热沉板上置于激

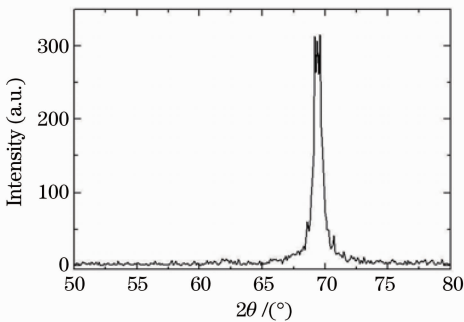


图 2 nc-Si/SiN_x 薄膜的 XRD 谱

Fig. 2 XRD spectrum of nc-Si/SiN_x film

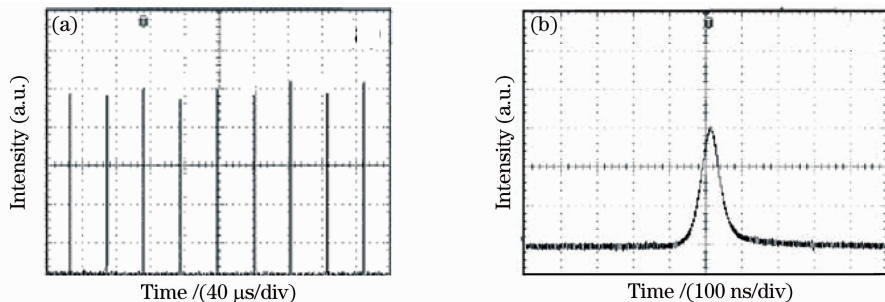


图 4 (a) 蓝光脉冲序列; (b) 单脉冲波形

Fig. 4 (a) Blue laser pulse trains; (b) single pulse shape

在阈值以上随着抽运功率增加,脉冲重复频率增大,脉冲宽度减小,如图 5 所示。分别测量激光器在连续运转 (未插入薄膜) 和调 Q 运转 (插入薄膜) 时输出蓝光平均功率和抽运功率的关系,如图 6 所示。可以看出,当抽运功率超过 9.5 W 时,蓝光功

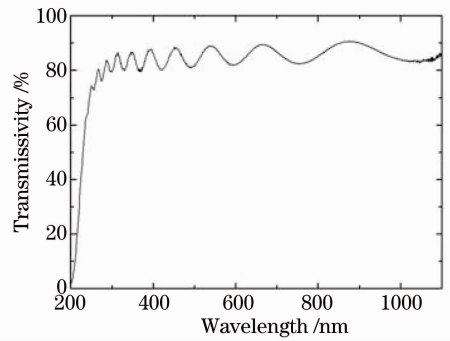


图 3 nc-Si/SiN_x 薄膜的透射谱

Fig. 3 Transmissivity spectrum of nc-Si/SiN_x film

光器腔内靠近 Nd:YAG 处,调整激光器和倍频晶体角度后,出现高重复频率被动调 Q 的蓝光脉冲输出,激光器的阈值抽运功率为 5.3 W。当抽运功率为 8.5 W 时,测量 473 nm 蓝光脉冲的平均功率为 120 mW,抽运光到 473 nm 蓝光脉冲功率的转换效率为 1.41%。用响应时间 1 ns 的 PIN 硅光电二极管接收蓝光,输入到 300 MHz 数字示波器上存储和观察脉冲波形,蓝光脉冲序列和展开后的单脉冲波形如图 4 所示。可以看出,脉冲间隔时间约为 42 μs,即脉冲的重复频率为 23.8 kHz,脉冲的时间宽 [用半峰全宽 (FWHM) 表示] 为 45 ns,可以求得单个脉冲的能量为 5.04 μJ,脉冲峰值功率为 112 W。实验中经较长时间观察,可观察到脉冲幅度和时间间隔的微小抖动,脉冲幅度的抖动小于 8%,脉冲时间间隔的抖动小于 5%。

率下降,这是因为 Nd:YAG 晶体热效应的影响。在抽运功率为 8.5 W 时,Q 开关提取效率 (调 Q 输出功率 120 mW 与连续输出功率 325 mW 之比) 为 37%。

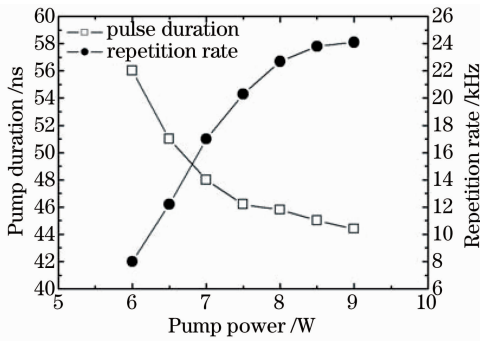


图 5 脉冲宽度和脉冲重复频率与抽运功率的关系

Fig. 5 Pulse duration and repetition rater versus pump power

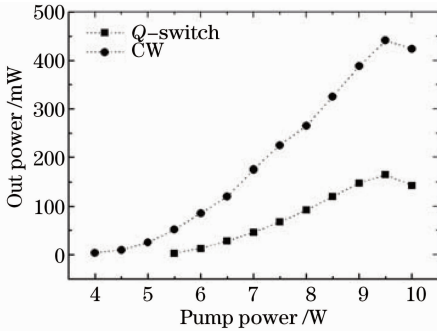


图 6 连续和调 Q 运转时蓝光平均功率与抽运功率的关系

Fig. 6 Blue laser power versus pump power for CW and Q-switched operations

图 7 是采用 Ocean Optics 公司的 USB4000 型光纤光谱仪测量的蓝光光谱,中心波长为 473 nm。图 8 是采用 CCD 器件摄取的蓝光远场光斑,可看出激光器运转在单横模 TE₀₀ 状态。

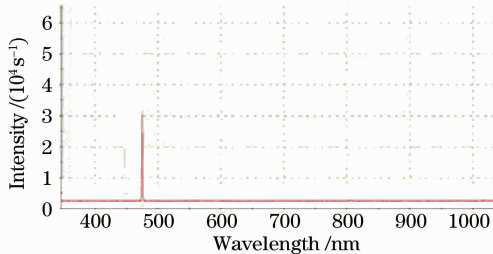


图 7 蓝光光谱

Fig. 7 Blue laser spectrum



图 8 蓝光远场光斑

Fig. 8 Far field spot of blue laser

4.2 纳米 Si 薄膜调 Q 机理分析

硅体材料对 0.4~1.1 μm 激光存在可饱和吸收,可用于 1.06 μm 激光的被动调 Q 和锁模^[12],但未见它用于准三能级谱线 946 nm 激光的被动调 Q 的报道。镶嵌在 SiN_x 中的纳米 Si 有很大的表面-体积比,纳米 Si 与周围介质之间形成较陡的界面,界面原子排列和键组态的无规则性产生大量的存在于禁带中的界面态和缺陷态,其寿命在纳秒量级。马智训等^[13]研究纳米 Si 镶嵌 SiO₂ 薄膜的吸收和发射光谱时发现,在 1.0~1.5 eV 之间存在较弱的次带吸收,它来自纳米 Si 的表面态和(或)缺陷态的跃迁;在 1.5~3.0 eV 之间存在较强的电子直接带间跃迁造成的吸收,吸收系数随着入射光子能量的增加而呈指数增加。nc-Si/SiN_x 薄膜的吸收谱也应有类似的性质。Si 晶粒大小接近其德布罗意波长,在 SiN_x 介质势垒强限域作用下表现出量子尺寸效应,能带中电子占有能级量子化,其三阶光学非线性响应得到极大增强,这种增强的非线性响应应具有可饱和吸收特性^[14]。

由于量子限域效应使得纳米 Si 的带隙大于体硅的带隙,也大于 946 nm 激光的光子能量,所以薄膜对 946 nm 激光的单光子吸收不能产生带间跃迁,只产生较弱的次带吸收。当入射光强较大时,纳米 Si 存在双光子吸收^[15],两个光子的能量超过带隙,价带中的电子吸收两个 946 nm 光子跃迁到导带,同时在价带和导带中的量子化能级上产生大量的光生载流子。当导带能级上的光生载流子大量积累时,薄膜被“漂白”而变得透明,Q 开关打开;而后光生载流子先弛豫到较为稳定的表面态或缺陷态,然后再退激发到价带,Q 开关关闭。经过这样周而复始的过程,实现对连续抽运激光器的高重复频率被动调 Q。

5 结 论

在 LD 端面连续抽运的 Nd:YAG 激光器中,采用自制的 nc-Si/SiN_x 薄膜实现 946 nm 激光的被动调 Q,采用 LBO 晶体对 946 nm 光脉冲进行腔内倍频。当抽运功率为 8.5 W 时,输出的 473 nm 蓝光脉冲平均功率为 120 mW,脉冲重复频率为 23.8 kHz,脉冲宽度为 45 ns,峰值功率为 112 W,光-光转换效率为 1.41%。理论分析认为,由于纳米 Si 的带隙大于 946 nm 光子能量,所以双光子饱和吸收导致了激光器的被动调 Q。实验中制作的薄膜厚度较小,小信号透射率较大,Q 开关打开前后透

射率变化量不大,所以调 Q 脉冲还比较宽。如果能提高腔内 946 nm 激光功率密度,同时适当增加薄膜厚度,有望进一步压缩脉冲。

参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan, R. L. Byer. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946-nm Nd:YAG laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(5): 605~612
- 2 P. Zeller, P. Peuser. Efficient multiwatt continuous-wave laser operation on the $^4F_{3/2}$ — $^4I_{9/2}$ transitions of Nd:YVO₄ and Nd:YAG[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 34~36
- 3 Pingxue Li, Dehua Li, Zhiguo Zhang *et al.*. Diode-pumped high-power cw blue laser at 473 nm with a compact three-element cavity[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **215**(1): 159~162
- 4 Li Yimin, Tan Huiming, Fu Xihong *et al.*. Characteristics of intracavity-frequency-doubled Nd³⁺:GdVO₄/LBO deep blue 456 nm laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1308~1312
李义民,檀慧明,付喜宏等.腔内倍频 Nd³⁺:GdVO₄/LBO 深蓝 456 nm 激光器的工作特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1308~1312
- 5 T. Kellner, F. Heine, G. Huber *et al.*. Passive Q switching of a diode-pumped 946 nm Nd:YAG laser with 1.6 W average output power[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(30): 7076~7079
- 6 O. Kimmelma, M. Kaivola, I. Tittonen *et al.*. Short pulse, high peak power, diode pumped, passively Q-switched 946 nm Nd:YAG laser[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **273**(2): 496~499
- 7 S. Spiekerman, H. Karlsson, F. Laurell. Efficient frequency conversion of a passively Q-switched Nd:YAG laser at 946 nm in periodically poled KTiOPO₄ [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(12): 1979~1982
- 8 Zheng Quan, Zhao Ling, Shao Yonghong *et al.*. Cr:YAG passively Q-switched all-solid-state blue laser at 473 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 673~676
郑 权,赵 岭,邵永红等. Cr:YAG 被动调 Q 全固态 473 nm 蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 673~676
- 9 Yahui Chen, Wei Hou, Haibo Peng *et al.*. Intracavity frequency doubling of an active Q-switched Nd:YAG laser with 2.25 W output power at 473 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **270**(1): 58~62
- 10 N. P. Barnes, B. M. Walsh, R. L. Hutcheson *et al.*. Pulsed $^4F_{3/2}$ to $^4I_{9/2}$ operation of Nd:YAG lasers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(12): 2169~2177
- 11 R. J. Beach. CW theory of quasi-three level end-pumped laser oscillators[J]. *Opt. Commun.*, 1996, **123**(1-3): 385~393
- 12 Renzhong Hua, Liejia Qian, Tingting Zhi *et al.*. Short pulse generation in an Nd:YAG laser by silicon [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **143**(1): 47~52
- 13 Ma Zhixun, Liao Xianbo, Kong Guanglin *et al.*. Optical properties of nanocrystalline silicon embedded in SiO₂ [J]. *Science in China (Series A)*, 1999, **42**(9): 995~1002
- 14 Yao Weiguo, Yue Lanping, Qi Zhenzhong *et al.*. Visible photoluminescence of Ge nanocrystallites embedded in SiO₂ thin film [J]. *J. Functional Material*, 1997, **28**(5): 477~488
姚伟国,岳兰平,戚震中等. 镶嵌在 SiO₂ 薄膜中的锗纳米晶粒的光致发光[J]. *功能材料*, 1997, **28**(5): 477~488
- 15 Guo Hengqun, Lin Shangxin, Wang Qiming. Photoluminescence and application of nonlinear optical property of nc-Si-SiO₂ films [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2006, **27**(2): 345~349
郭亨群,林赏心,王启明. 纳米 Si 镶嵌 SiO₂ 薄膜的发光与非线性光学特性的应用[J]. *半导体学报*, 2006, **27**(2): 345~349