

半导体薄膜实现 Nd:YVO₄ 1064 nm 和 1342 nm 双波长激光被动调 Q

王加贤 王燕飞

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要 采用射频磁控溅射和热退火处理技术制备 SiN_x/Si/SiN_x 多层薄膜,测试了纳米硅晶粒平均尺寸、光学带隙和薄膜对 1064 nm 激光的非线性吸收系数。建立 SiN_x/Si/SiN_x 多层薄膜被动调 Q 的 Nd:YVO₄ 双波长激光器速率方程,得到双波长调 Q 脉冲的数值模拟结果。在激光二极管(LD)端面抽运的三镜复合腔 Nd:YVO₄ 激光器中, SiN_x/Si/SiN_x 多层薄膜作为可饱和吸收体同时实现了双波长激光被动调 Q,获得 20 ns 的 1064 nm 激光脉冲和 19 ns 的 1342 nm 激光脉冲输出。研究表明,薄膜对 1064 nm 和对 1342 nm 的双光子饱和吸收是双波长激光被动调 Q 的直接原因;激光器两个支腔输出损耗的差别和薄膜对两个波长的非线性吸收系数的相对值影响了双波长脉冲的宽度和时间间隔。

关键词 激光器;双波长脉冲;SiN_x/Si/SiN_x 多层薄膜;被动调 Q Nd:YVO₄ 激光器;双光子吸收

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0202008

Semiconductor Film Passively Q-Switching for Dual-Wavelength Lasers at 1064 nm and 1342 nm in Nd:YVO₄ Laser

Wang Jiaxian Wang Yanfei

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract The SiN_x/Si/SiN_x multi-layer film is prepared by radio-frequency magnetron sputtering and thermal annealing. The average grain size of nanocrystalline silicon, the optical band-gap and the nonlinear absorption coefficient at 1064 nm laser are characterized and estimated. The rate-equation theoretical model of the dual-wavelength laser passively Q-switched by SiN_x/Si/SiN_x multi-layer film is established and the dynamics of the dual-wavelength pulse formation is numerically calculated. Simultaneous dual-wavelength passive Q-switching is realized in a laser diode (LD) end-pumped three-mirror compound resonator Nd:YVO₄ laser using SiN_x/Si/SiN_x film as the saturable absorber. Both 1064 nm pulse with 20 ns duration and 1342 nm pulse with 19 ns duration are obtained. The results show that dual-wavelength passive Q-switching mainly results from two-photon saturable absorptions for 1064 nm and 1342 nm lasers, and that the difference of output losses between the two overlapping collinear cavities and the relative nonlinear absorption coefficients for dual-wavelength lasers influence the pulse durations and time separation of dual-wavelength pulses.

Key words lasers; dual-wavelength pulse; SiN_x/Si/SiN_x multi-layer film; passively Q-switched Nd:YVO₄ laser; two-photon absorption

OCIS codes 140.3540; 140.3580; 140.3480

1 引 言

双波长激光由于在精密激光光谱、共振激光干涉、分子多光子分解及光雷达等方面有重要应用而

受到重视。20 世纪 90 年代开始,就有人对钕离子(Nd³⁺)增益介质的 1.06 μm 和 1.3 μm 双波长激光连续运转及其和频的振荡条件和输出特性进行了理

收稿日期: 2011-08-16; 收到修改稿日期: 2011-11-07

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、半导体薄膜材料等方面的研究。

E-mail: wangjx@hqu.edu.cn(中国光学学会会员号:3629213)

论和实验研究^[1-6]。在上述双波长激光的调 Q 方面, Henderson^[7]在 Y 型腔中采用两个声光 Q 开关分别对 Nd:YAG 的 1.06 μm 和 1.32 μm 激光进行调 Q, 并调节两个 Q 开关之间的延迟以达到双波长脉冲输出在时间和空间上的较好重叠; 林文雄等^[8]从理论上提出一种由两个重叠的共线支腔构成的三镜复合腔, 通过调节两个支腔的长度和损耗比, 有可能实现双波长调 Q 脉冲的峰值同步; Chen 等^[9]在 Nd:YVO₄ 激光器中采用一个声光调 Q 器件对 1064 nm 和 1342 nm 激光调 Q, 腔内和频获得 18.5~55.0 ns 的 593 nm 黄光脉冲输出; Huang 等^[10]在激光二极管(LD)抽运的 Nd:YVO₄ 激光器中分别采用 Cr⁴⁺:YAG 和 V³⁺:YAG 对 1064 nm 和 1342 nm 激光进行调 Q, 获得双波长脉冲输出。由于 Nd³⁺ 增益介质的 1.06 μm 和 1.3 μm 波长间隔很大, 至今尚未见到采用可饱和吸收体同时实现这两个波长激光被动调 Q 的报道。

本文采用磁控溅射技术和热退火制备纳米 SiN_x/Si/SiN_x 多层薄膜, 利用薄膜的宽带非线性吸收效应, 同时实现 LD 端面抽运的 Nd:YVO₄ 双波长激光被动调 Q, 获得 20 ns 的 1064 nm 激光脉冲和 19 ns 的 1342 nm 激光脉冲。

2 SiN_x/Si/SiN_x 多层薄膜的制备和特征参数测试

2.1 薄膜制备

采用射频磁控反应溅射在石英衬底上沉积 SiN_x/a-Si/SiN_x 多层薄膜。高纯度 Si 靶作为溅射材料, Ar 作为溅射气体, N₂ 作为反应气体, 溅射室本底真空度为 8.0×10⁻⁴ Pa。制备 SiN_x 层时 Ar 气和 N₂ 气流量比为 80/20; 制备 Si 层时不通 N₂ 气, Ar 气流量为 65 sccm(标准大气压下 65 mL/min)。

实验中射频功率 70 W, 工作气压 P_{SiN_x} = 1 Pa, P_{Si} = 0.8 Pa。薄膜共沉积 6 个周期, 其中 Si 层厚度 12 nm, SiN_x 层厚度 24 nm, 每个周期厚度 36 nm, 总厚度 216 nm。沉积后的样品放在管式炉中, 在氮气保护下以 1200 °C 热退火 30 min, 主要在 Si 层内形成纳米 Si 晶粒。

2.2 特征参数测试

采用德国 Bruker 公司 D8 advance 型 X 射线衍射仪测试退火后的 SiN_x/Si/SiN_x 多层薄膜的 X 射线衍射谱, 由 Scherrer 公式计算得到纳米硅晶粒的平均尺寸约 4.8 nm。采用 UV-2800H 型紫外可见分光光度计测量薄膜在 190~1100 nm 范围内的光吸收谱, 根据 Tauc 公式^[11]进行数据处理和计算, 确定纳米 Si 的光学带隙为 1.70 eV。

SiN_x/Si/SiN_x 多层薄膜的三阶非线性光学效应采用皮秒激光单光束 Z 扫描测试。光源为脉冲宽度 25 ps、重复频率 10 Hz 的锁模 Nd:YAG 激光器。图 1 是开孔和闭孔(孔径因子 S=0.2)两种情况下 Z 扫描测量结果, 图中黑色方块是实验数据, 实线为理论拟合。实验中 1064 nm 光子能量为 1.17 eV, 一个光子能量小于光学带隙, 而两个光子能量超过光学带隙, 所以图 1(a) 曲线在焦点处的吸收峰属于双光子吸收^[12,13]。图 1(b) 曲线先峰后谷, 由 Z-扫描理论可知非线性折射率为负值, 薄膜属于自散焦介质。开孔条件下的归一化透射率公式为^[14]

$$T(z) \approx 1 - \frac{\beta I_0 [1 - \exp(-\alpha_q l_q)]}{2\sqrt{2}(1 + z^2/z_0^2)\alpha_q}, \quad (1)$$

式中 I₀ 为焦点处光强, α_q 为薄膜的线性吸收系数, l_q 为薄膜厚度, z₀ 为光束的瑞利范围。对开孔实验数据进行拟合计算, 可得到薄膜对 1064 nm 光的非线性吸收系数 β=1.09×10⁻⁷ m/W。

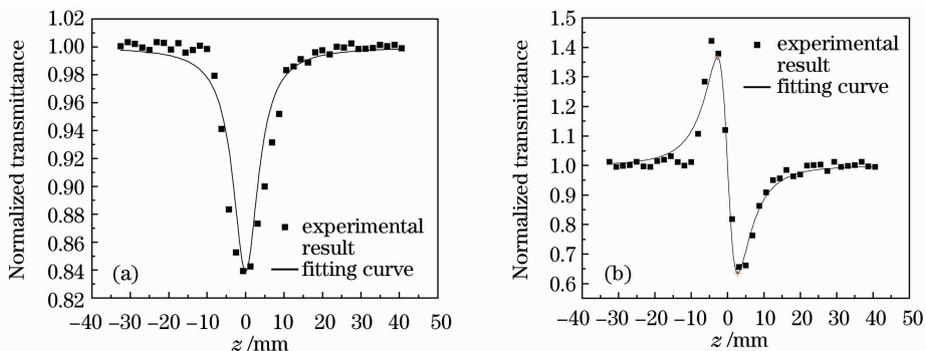


图 1 薄膜的 Z 扫描曲线。(a) 开孔; (b) 闭孔

Fig. 1 Z-scan curves for the film. (a) Opened aperture; (b) closed aperture

3 双波长被动调 Q 激光器的速率方程及其数值解

双波长被动调 Q Nd:YVO₄ 激光器采用图 2 所示的两个重叠的共线支腔构成的三镜复合腔。输入镜 M₁ 是曲率半径 R = 100 cm 的凹面镜, 对 1064 nm、1342 nm 高反和对 808 nm 高透; 平面镜 M₂ 对 1342 nm 透射率为 T₁, 对 1064 nm 高透, 与 M₁ 镜构成腔长 L₁ 的 1342 nm 支腔(支腔 1); 平面镜 M₃ 对 1064 nm 透射率 T₂, 对 1342 nm 高透, 与 M₁ 镜构成腔长 L₂ 的 1064 nm 支腔(支腔 2)。SA 为 SiN_x/Si/SiN_x 多层薄膜。Nd:YVO₄ 激活离子的 ⁴F_{3/2} → ⁴I_{13/2} 和 ⁴F_{3/2} → ⁴I_{11/2} 跃迁对应的波长分别为 1342 nm 和 1064 nm, 它们具有共同激光上能级, 在双波长运转时必然出现竞争。设激光上能级粒子数密度为 N, 腔内 1342 nm 和 1064 nm 的光子数密度分别为 φ₁ 和 φ₂, 忽略 Q 开关打开时的自发辐射, 可得到双波长调 Q 速率方程为

$$\frac{dN}{dt} = W_p - \frac{N}{\tau_F} - Nc \left(\sigma_1 \phi_1 \frac{l}{L_1} + \sigma_2 \phi_2 \frac{l}{L_2} \right), \quad (2)$$

$$\frac{d\phi_1}{dt} = \frac{1}{t_{r1}} \left[2\sigma_1 N l \phi_1 - 2\alpha_1 l_q \phi_1 - \ln \left(\frac{1}{1-T_1} \right) \phi_1 - G_1 \phi_1 - B_1 \phi_1^2 \right], \quad (3)$$

$$\frac{d\phi_2}{dt} = \frac{1}{t_{r2}} \left[2\sigma_2 N l \phi_2 - 2\alpha_2 l_q \phi_2 - \ln \left(\frac{1}{1-T_2} \right) \phi_2 - G_2 \phi_2 - B_2 \phi_2^2 \right]. \quad (4)$$

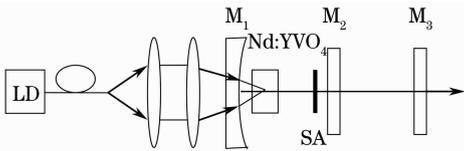


图 2 双波长被动调 Q Nd:YVO₄ 激光器

Fig. 2 Passively Q-switched Nd:YVO₄ dual wavelength laser

(3)、(4)两式右边最后一项 B_iφ_i² 体现薄膜的双光子吸收, 耦合系数 B_i 与非线性吸收系数 β_i 的关系为^[15]

$$B_i = 6\beta_i h\nu_i c l_q (\omega_i / \omega_{qi})^2 \quad (i = 1, 2) \quad (5)$$

式中下标 i = 1, 2 分别对应 1342 nm 和 1064 nm, (2)~(5)式中各参数意义及计算时选取的数值为: Nd:YVO₄ 晶体的受激发射截面^[16] σ₁ = 6 × 10⁻¹⁹ cm², σ₂ = 12 × 10⁻¹⁹ cm², 激光上能级的荧光寿命 τ_F = 90 μs, 晶体长度 l = 8 mm; 根据林文雄等^[8]的分析, 为了使双波长脉冲较好重叠, 应使 L₁/L₂ =

σ₁/σ₂ = 0.5, 所以选取两个支腔腔长 L₁ = 4.5 cm, L₂ = 9 cm, 以此求出光在腔内往返时间 t_{r1} = 0.3 ns, t_{r2} = 0.6 ns; 两个支腔透射率根据实验情况选取 T₁ = 8%, T₂ = 25%, 输出以外的其他损耗设定 G₁ = 0.09, G₂ = 0.12; 薄膜厚度 l_q = 216 nm, 线性吸收系数为 α₁ ≈ α₂ = 75 cm⁻¹; ω_i、ω_{qi} 为增益介质和薄膜内的光束半径, 其比值分别为 ω₁/ω_{q1} = 1.017, ω₂/ω_{q2} = 1.025。

对于 LD 端面连续抽运固体激光器, 单位体积抽运速率 W_p 不随时间变化, 可表示为

$$W_p = \frac{\eta_p \eta_a P_{in}}{h\nu_p} \frac{1}{\pi \bar{\omega}_p^2 l}, \quad (6)$$

式中 P_{in} 为入射到增益介质表面的抽运光功率, η_p = 0.8 为激活粒子转移到激光上能级的量子效率, 增益介质对抽运光的吸收效率 η_a = 1 - exp(-α · l), α = 31.4 cm⁻¹ 为吸收系数, hν_p 为抽运光的光子能量, $\bar{\omega}_p = 0.038$ cm 是增益介质内抽运光束的平均半径。

采用四阶 Rung-Kutta 法对 (2)~(6) 式进行数值求解, 把有关参数及 Si/SiN_x 薄膜对 1064 nm 的非线性吸收系数 β₂ = 1.09 × 10⁻⁷ m/W 代入, 由于缺乏 1342 nm 皮秒激光器测量薄膜对 1342 nm 的非线性吸收系数 β₁, 所以选择如图 3 所示, (a) β₁ = 0.8 × 10⁻⁷ m/W, (b) β₁ = 0.9 × 10⁻⁷ m/W, (c) β₁ = 1.0 × 10⁻⁷ m/W 3 个数值进行计算, 得到腔内光子数密度 φ 随时间的变化。

可以看出: β₁ 较小时 [图 3(a)], 1064 nm 激光优先于 1342 nm 激光振荡, 脉冲峰值时间间隔约 65 ns, 1064 nm 和 1342 nm 脉冲宽度分别为 25 ns 和 23 ns; β₁ 增大时 [图 3(b)], 脉冲峰值时间间隔 17 ns, 1342 nm 脉冲强度超过 1064 nm 脉冲, 1064 nm 和 1342 nm 脉冲宽度分别为 26 ns 和 19 ns; β₁ 接近于 β₂ 时 [图 3(c)], 1342 nm 激光优先于 1064 nm 激光振荡, 两脉冲峰值时间间隔约 13 ns, 1064 nm 和 1342 nm 脉冲宽度分别为 27 ns 和 15 ns。对比 3 种情况可知, 薄膜对两个波长非线性吸收系数的相对值影响了双波长脉冲的时间间隔和脉冲宽度; 在合适的 β₁ 情况下, 有可能实现双脉冲较好地重叠。

4 双波长激光被动调 Q 的实验研究

4.1 实验结果

采用图 1 所示的实验装置, 抽运源为光纤耦合 808 nm 半导体激光器, 输出功率 12 W。Nd:YVO₄

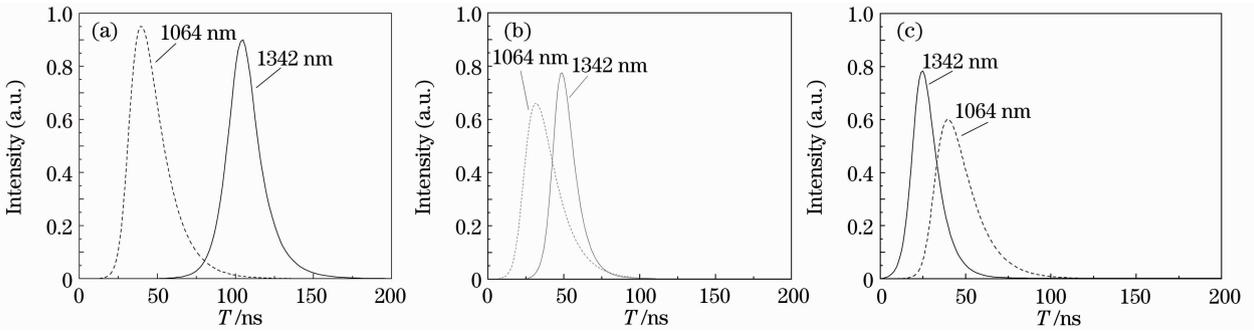


图3 双波长调Q脉冲的数值模拟。(a) $\beta_1=0.8 \times 10^{-7}$ m/W; (b) $\beta_1=0.9 \times 10^{-7}$ m/W; (c) $\beta_1=1.0 \times 10^{-7}$ m/W

Fig.3 Computed Q-switched dual-wavelength pulses. (a) $\beta_1=0.8 \times 10^{-7}$ m/W;
(b) $\beta_1=0.9 \times 10^{-7}$ m/W; (c) $\beta_1=1.0 \times 10^{-7}$ m/W

晶体a轴切割,尺寸为4 mm×4 mm×8 mm,Nd离子掺杂原子数分数为0.5%,两个端面镀808 nm、1064 nm和1342 nm高透膜,晶体用铝箔包裹并用半导体制冷器(TEC)冷却。SiN_x/Si/SiN_x多层薄膜靠近M₂镜放置。

固定支腔1的透射率T₁=8%,选取支腔2的透射率T₂分别为20%和25%进行实验。示波器上显示的双波长调Q脉冲波形如图4所示,1064 nm激光均优先于1342 nm激光振荡。T₂=20%时,1064 nm和1342 nm脉冲宽度分别为26 ns和18 ns,脉冲峰值的时间间隔为42 ns[见图4(a)],测得1064 nm和1342 nm激光输出功率分别为0.42 W和0.48 W;T₂=25%时,1064 nm和1342 nm脉冲宽度分别为20 ns和19 ns,脉冲峰值的时间间隔为22 ns[见图4(b)],测得1064 nm和1342 nm激光输出功率分别为0.34 W和0.39 W。可以看出,改变支腔2的输

出透射率对双波长脉冲宽度、脉冲峰值的时间间隔有一定影响。在本实验条件下,继续增大支腔2的输出透射率,双脉冲峰值的时间间隔反而增大,1064 nm激光功率降低。在三镜复合腔激光器中,由于双波长谱线竞争,两个支腔的透射率必须最佳匹配才能使双波长脉冲较好重叠。林文雄等^[8]的计算结果也表明,在1342 nm支腔透射率固定情况下,1064 nm支腔透射率小于和大于最佳匹配值,双波长脉冲重叠度都要下降。这是因为当1064 nm支腔透射率T₂较小时,1064 nm损耗低,竞争力强,首先起振,1342 nm脉冲滞后。当T₂大于最佳匹配值时,随着T₂继续增大,1064 nm损耗增大,竞争力变差,1342 nm激光首先振荡,1064 nm脉冲滞后,而且T₂越大,滞后越多,所以双波长脉冲峰值的时间间隔增大;同时由于1342 nm激光消耗较多的反转粒子数,所以1064 nm脉冲强度较低,输出功率下降。

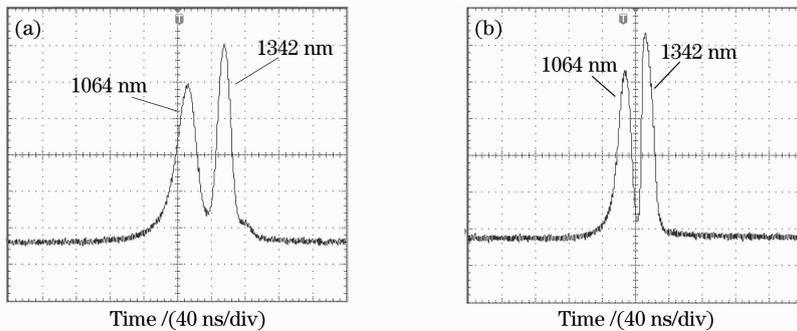


图4 双波长调Q脉冲。(a) T₂=20%;(b) T₂=25%

Fig.4 Q-switched dual wavelength pulses. (a) T₂=20%;(b) T₂=25%

4.2 实验结果分析

对SiN_x/Si/SiN_x薄膜实现双波长激光被动调Q的机理可做如下分析:薄膜的结构检测表明,退火后薄膜内形成了纳米Si晶粒。纳米Si晶粒与周围介质的晶格失配以及表面极化导致的电子-空穴对在纳米Si晶粒表面的自陷,使得禁带间存在由于纳

米Si晶粒表面状态形成的表面态和陷阱能级^[17]。它们的存在,不但形成较弱的次带吸收,而且从导带弛豫下来的大量光生载流子容易填满表面和缺陷的空隙电子态^[18]。纳米Si的光学带隙(1.7 eV)大于1064 nm光子能量(1.17 eV)和1342 nm光子能量(0.93 eV),所以吸收1064 nm或1342 nm的单光

子能量只能产生价带到表面态和缺陷态的较弱跃迁。然而,在 SiN_x/Si/SiN_x 形成的势阱中纳米 Si 中载流子相应的波函数在空间受到约束,体现出较强的量子限制效应,价带和导带成为准分裂能级,动量守恒的要求被弱化,大大提高了价带到导带跃迁的非线性吸收系数^[19]。双光子吸收使电子从价带跃迁到导带量子化能级上,由于零维材料态密度比体材料小,容易造成薄膜的吸收饱和,具有较强的非线性吸收系数^[20]。纳米 Si 中相应子能级对 1064 nm 具有较强的非线性吸收系数,容易造成薄膜的吸收饱和。因此,纳米 Si 对 1064 nm 和对 1342 nm 双光子的非线性饱和吸收是产生双波长调 Q 的直接原因。

实验结果还表明,由于 SiN_x/Si/SiN_x 多层薄膜对两个波长的非线性吸收系数没有达到最佳匹配,导致 Q 开关打开时间不同步,仅仅控制两个支腔的线性损耗比,无法实现被动调 Q 双波长脉冲的精确重叠。结合前面数值模拟结果可以认为,如果能够生长出具有合适的非线性吸收系数 β_1 和 β_2 的半导体薄膜,则有可能实现双波长脉冲的较好重叠。

5 结 论

采用射频磁控溅射和热退火处理技术制备 SiN_x/Si/SiN_x 多层薄膜,测试了纳米 Si 晶粒尺寸、光学带隙和非线性吸收系数。薄膜作为可饱和吸收体实现 LD 抽运 Nd:YVO₄ 激光器的双波长激光同时被动调 Q,获得 20 ns 的 1064 nm 脉冲和 19 ns 的 1342 nm 脉冲输出。研究表明,SiN_x/Si/SiN_x 多层薄膜对 1064 nm 和对 1342 nm 的双光子饱和吸收是导致双波长激光被动调 Q 的直接原因;进一步优化薄膜对两个波长的非线性吸收系数有望改善双波长脉冲的时间特性。

参 考 文 献

- 1 H. Y. Shen, R. R. Zeng, Y. P. Zhou *et al.*. Comparison of simultaneous multiple wavelength lasing in various neodymium host crystals at transitions from $^4F_{3/2-4}I_{11/2}$ and $^4F_{3/2-4}I_{13/2}$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(20): 1937~1938
- 2 Y.-F. Chen. CW dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**(4): 475~478
- 3 Zhang Qiang, Yao Jianquan, Wen Wuqi *et al.*. High power laser diode pumped Nd:YAG continuous wave dual-wavelength laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 577~581
张 强, 姚建焱, 温伍麒等. 高功率激光二极管抽运 Nd:YAG 连续双波长激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 577~581
- 4 Zhang Juncheng, Wang Jiaxian, Su Peilin *et al.*. Theoretical and experimental study of LD pumped Nd:YVO₄ yellow laser with sum-frequency mixing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2365~2369

- 张峻诚, 王加贤, 苏培林等. 激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 和频黄光激光器的理论及实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2365~2369
- 5 Yang Tan, Yuechen Jia, Feng Chen *et al.*. Simultaneous dual-wavelength lasers at 1064 nm and 1342 nm in femtosecond-laser-written Nd:YVO₄ channel waveguides[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, **28**(7): 1607~1610
- 6 X. P. Hu, G. Zhao, Z. Yan *et al.*. High-power red-green-blue laser light source based on intermittent oscillating dual-wavelength Nd:YAG laser with a cascaded LiTaO₃ superlattice[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 408~410
- 7 G. A. Henderson. A computational model of a dual-wavelength solid-state laser[J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(11): 5451~5454
- 8 Lin Wenxiong, Shen Hongyuan. A new configuration of the laser cavity for simultaneous dual wavelength Q-switched pulsed Nd:YAlO₃ laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 1999, **48**(4): 667~672
林文雄, 沈鸿元. 一种新型结构的 Nd:YAlO₃ 双波长调 Q 脉冲激光器[J]. *物理学报*, 1999, **48**(4): 667~672
- 9 Y. F. Chen, Y. S. Chen, S. W. Tsai. Diode-pumped Q-switched laser with intracavity sum frequency mixing in periodically poled KTP[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(2): 207~210
- 10 H. T. Huang, J. L. He, B. T. Zhang *et al.*. Intermittent oscillation of 1064 nm and 1342 nm obtained in a diode-pumped doubly passively Q-switched Nd:YVO₄ laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **96**(4): 815~820
- 11 S. Furukawa, T. Miyasato. Quantum size effects on the optical band gap of microcrystalline Si:H[J]. *Phys. Rev. B*, 1988, **33**(8): 5726~5729
- 12 G. V. Prakash, M. Cazzanelli, Z. Gaburro *et al.*. Linear and nonlinear optical properties of plasma-enhanced chemical-vapour deposition grown silicon nanocrystals[J]. *J. Mod. Opt.*, 2002, **49**(5/6): 719~730
- 13 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
- 14 M. Sheik-Bahae, A. A. Said, T. H. Wei *et al.*. Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(4): 760~769
- 15 T. T. Kajava, A. L. Gaeta. Intra-cavity frequency-doubling of a Nd:YAG laser passively Q-switched with GaAs[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **137**(1-3): 93~97
- 16 A. W. Tucker, M. Birnbaum, C. L. Fincher *et al.*. Stimulated-emission cross section at 1064 and 1342 nm in Nd:YVO₄[J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(12): 4907~4911
- 17 L. Banyai, P. Gilliot, Y. Z. Hu *et al.*. Surface-polarization instabilities of electron-hole pairs in semiconductor quantum dots[J]. *Phys. Rev. B*, 1992, **45**(24): 14136~14142
- 18 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
- 19 Liu Ningning, Sun Jiaming, Pan Shaohua *et al.*. Nonlinear optical property of a-Si/SiO₂ superlattice structure[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(22): 2383~2387
刘宁宁, 孙甲明, 潘少华等. a-Si/SiO₂ 超晶格结构的非线性光学性质[J]. *科学通报*, 2000, **45**(22): 2383~2387
- 20 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