

电光可调谐 1064 nm 单频 Nd:YAG 激光器 设计与实验研究

邢俊红 焦明星 刘 芸

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院精密仪器系, 陕西 西安 710048)

摘要 为了产生 1064 nm 单频可调谐 Nd:YAG 激光输出,设计了一种二极管抽运电光可调谐单频 Nd:YAG 激光器,采用偏振分光棱镜(PBS)和铌酸锂(LN)晶体组成电光双折射滤光片,作为激光单纵模选择元件和频率调谐元件。理论分析了其选模原理及调频原理,实验研究了 1064 nm Nd:YAG 激光单纵模振荡特性和调频特性。实验结果表明:这种 Nd:YAG 激光器能以线偏振单纵模稳定振荡,当改变加在 LN 晶体上的横向电压时,1064 nm 单纵模激光振荡波长调谐量为 0.474 nm,相应的频率调谐量为 142.2 GHz。这种电光可调谐 1064 nm 单频 Nd:YAG 激光器可广泛应用于激光干涉测量、激光雷达探测和激光光谱学等领域。

关键词 激光器;单频 Nd:YAG 激光器;电光效应;双折射滤光片;频率调谐

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0302007

Design and Experimental Study of Electro-Optically Tunable Single Frequency Nd:YAG Laser at 1064 nm

Xing Junhong Jiao Mingxing Liu Yun

(Department of Precision Instruments, School of Mechanical and Instrumental Engineering,
Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract In order to produce the single frequency tunable laser output at 1064 nm, a diode-pumped electro-optically tunable single frequency Nd:YAG laser is designed, which includes an electro-optically birefringent filter (PBS-LN) consisting of both a polarizing beam splitter (PBS) and a lithium niobate (LN) crystal, used as both a single longitudinal mode selector and a frequency tuning element. The principles of mode selection and frequency tuning of the PBS-LN are theoretically analyzed, and the characteristics of single longitudinal mode oscillation and frequency tuning of the Nd:YAG laser at 1064 nm are investigated experimentally. The experimental results have shown that the Nd:YAG laser can steadily oscillate in linearly polarized single longitudinal mode, and by changing the transverse voltages applied to the LN element, the wavelength of single longitudinal mode laser at 1064 nm can be tuned by 0.474 nm, corresponding to the frequency tuning of 142.2 GHz. Such an electro-optically tunable single frequency Nd:YAG laser will find wide applications in the fields of laser interferometry, laser radar detection and laser spectroscopy, etc.

Key words lasers; single frequency Nd:YAG laser; electro-optic effect; birefringent filter; frequency tuning

OCIS codes 140.3460; 140.3480; 140.3530; 140.3570; 140.3600

收稿日期: 2013-09-04; **收到修改稿日期**: 2013-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(51175421, 61205135)、陕西省科技计划(2011K09-14)、陕西省教育厅产业化培育项目(2010JC12)

作者简介: 邢俊红(1978—),女,博士研究生,讲师,主要从事激光技术及器件等方面的研究。

E-mail: xjh3729@xaut.edu.cn

导师简介: 焦明星(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事全固态激光技术及器件、激光传感与测量技术等方面的研究。E-mail: jiaomx@xaut.edu.cn

1 引 言

全固态单频激光器具有稳定性高、能量集中、相干性好等特点,在光谱学、相干通信、激光雷达、光学存储等领域有着广泛的应用^[1]。几十年来,特别是近几年来,国内外研究人员在激光二极管(LD)抽运的全固态单频可调谐激光研究领域开展了卓有成效的研究工作,并取得了一系列重要研究成果,提出了诸如短腔法^[2]、扭转模腔^[3]、环形腔^[4-5]、标准具^[6]和双折射滤光片^[7-8]等实现单频激光输出的方案,一般采用双折射滤光片组来实现激光频率的宽调谐^[9]。而进行激光频率窄调谐的方法主要有压电效应调谐^[10]、温度调谐^[11-12]和旋转标准具调谐^[13]等。另外,电光效应调谐是获取可调谐激光的一种重要手段。早在1991年,Schulz等^[14]在Nd:YAG激光谐振腔内插入钽酸锂晶体,获得了高速激光调谐,调谐灵敏度为12 MHz/V,但最大调谐范围仅为谐振腔的一个自由光谱范围。山西大学采用两块电光晶体作为调谐元件,其中一块加工成标准具,实现频率的宽范围、非连续调谐;通过改变加在另一块晶体上的电压来改变晶体折射率,从而实现频率的连续调谐;受调谐电压的限制,调谐范围为17.2 GHz^[15]。这种频率调谐方法具有调谐方便、易于控制和调谐速度快等优点,但调谐量受谐振腔自由光谱范围的限制。

2010年,本研究组报道了一种由偏振分光棱镜(PBS)和半波片组成的双折射滤光片,以其作为激光纵模选择元件,置于LD抽运Nd:YAG激光器谐振腔内,实现了单纵模激光振荡输出,通过改变谐振腔的长度可以调谐激光的谐振频率^[16]。为了方便地实现单频激光频率调谐,根据双折射滤光片的选模原理和电光晶体的线性电光效应,本文采用PBS和钽酸锂(LN)晶体组成电光双折射滤光片(PBS-LN),在此基础上设计了一种电光可调谐单频Nd:YAG激光器。下面依次介绍这种单频可调谐全固态激光器的设计方案、选模和调频原理,以及单频激光振荡特性、偏振特性和调频特性的实验研究结果。

2 方案设计

1064 nm电光可调谐单频Nd:YAG激光器设计方案如图1所示。激光系统采用大功率光纤耦合LD作为抽运源,从LD尾纤(OF)出射的808 nm激光经自聚焦微透镜(SML)会聚到Nd:YAG晶体的

左端面,该面镀有对1064 nm振荡光高反、同时对808 nm抽运光增透的双色介质膜。作为激光谐振腔的后反射镜,Nd:YAG晶体的右端面蒸镀1064 nm增透介质膜;沿SML光轴并在Nd:YAG晶体右侧依次放置偏振分光棱镜、电光晶体(LN)和球面输出耦合镜(OC);LN两个端面均镀有1064 nm增透介质膜;高压电源(HVPS)沿LN光轴方向施加电场。这样Nd:YAG晶体左端面介质膜与输出耦合镜OC构成驻波谐振腔,LN和PBS组成电光双折射滤光片,使1064 nm激光p偏振分量在腔内以单纵模振荡,并通过OC输出1064 nm线偏振单频激光。

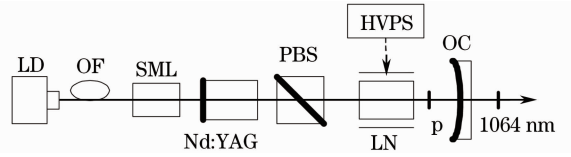


图1 电光可调谐单频Nd:YAG激光器
Fig. 1 Electro-optically tunable single frequency Nd:YAG laser

3 PBS-LN 选模及调频原理

如图1所示,设所有光学元件的通光表面与x轴和y轴组成的面平行,光束沿z轴传输。对于任意一束入射至起偏器PBS的光可表示为E₀:

$$E_0 = A \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中A代表光振幅,E_x、E_y为复数,代表光的偏振态。光线往返通过PBS和LN后可表示为

$$E = AJ_1 J_2 J_1 \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中J₁和J₂分别为PBS和LN的琼斯矩阵。设PBS的透光轴与x轴的夹角为θ,它的琼斯矩阵J₁可表示为

$$J_1 = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \frac{1}{2} \sin 2\theta \\ \frac{1}{2} \sin 2\theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

若取PBS的透光轴与x轴平行(即θ=0),则x方向即为光通过PBS时损耗为零的偏振方向(p偏振方向)。

对于电光晶体LN,它的光轴(x轴)与光束传播方向垂直,其琼斯矩阵J₂为

$$J_2 = R(-\varphi)W_0R(\varphi), \quad (4)$$

式中旋转矩阵R(φ)和无偏角延迟片的琼斯矩阵W₀

分别为：

$$\mathbf{R}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{W}_0 = \exp(-i\Phi) \begin{bmatrix} \exp(-i\delta) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 φ 为 LN 晶体快(慢)轴与 $y(x)$ 轴夹角； δ 为光线

往返通过 LN 引起的相位延迟； $\exp(-i\Phi)$ 为相位因子，在不考虑干涉效应的情况下可以忽略，即 \mathbf{W}_0 为

$$\mathbf{W}_0 = \begin{bmatrix} \exp(-i\delta) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

将(3)~(5)式和(7)式代入(2)式并化简得：

$$\mathbf{E} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi \exp[-i(\delta/2)] + \sin^2 \varphi \exp[i(\delta/2)] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}. \quad (8)$$

光往返通过 PBS 和 LN 后的透射率 T 为

$$T = \frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{E}_0|} = \left| \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi \exp[-i(\delta/2)] + \sin^2 \varphi \exp[i(\delta/2)] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right|^2 = 1 - \sin^2 2\varphi \sin^2 \frac{\delta}{2}. \quad (9)$$

由(9)式可得：

1) 当 $\varphi = \pi/4$ 时，即 LN 晶体的快(慢)轴与 $y(x)$ 轴夹角为 $\pi/4$ 时，对比度 $D = T_{\max}/T_{\min} = 1/(1 - \sin^2 2\varphi) = \sec^2 2\varphi$ 最大，此时两相邻激光纵模在双折射滤光片透射峰处的损耗差别最大，双折射滤光片对次峰的抑制能力最强。

2) 透射率 T 是 δ 的周期函数，当 δ 为 2π 的整数倍时，透射率 T 最大。

由物理光学可知，对于 LN 晶体，当外加电场平行于光轴，而光波沿垂直于光轴方向往返穿过 LN 时，e 光和 o 光这两个线偏振光之间产生受电场控制的相位差 δ 为

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta n l + \frac{2\pi n_o^3 r^* U}{\lambda} \frac{l}{d}, \quad (10)$$

式中 λ 为振荡激光波长， Δn 为 LN 晶体的双折射率， l 为光传播方向上的晶体长度， d 为电场方向上的晶体厚度， n_o 为 o 光主折射率， r^* 为有效电光系数， U 为沿光轴方向的外加电压。(10)式等号右边第一项和第二项分别是由自然双折射引起的相位延迟量和由外加电场后的感应双折射引起的相位延迟量。

如(9)式所示，只有 δ 为 2π 整数倍时，光波往返两次经过晶体 LN 后的偏振状态才不会发生改变(仍为 p 偏振方向)，这时再通过 PBS 时的透射率最大，受到的损耗最小，可以优先起振。而其他频率成分的光往返两次通过晶体 LN 时偏振状态均发生了改变，在 PBS 处形成较大的损耗而受到抑制，不能起振。因此，由(10)式可以推导出电光双折射滤光片的自由光谱范围(即相邻两透射极大峰的频率间隔) R_{fs} 和损耗调制度(相邻两纵模的相位差)分别为：

$$R_{fs} = \frac{c}{2\Delta n l + n_o^3 r^* U(l/d)}, \quad (11)$$

$$\Delta\delta = \frac{2\pi\Delta n l + \pi n_o^3 r^* U(l/d)}{L}, \quad (12)$$

式中 $\lambda = 1.064 \times 10^{-6}$ m, $\Delta n = 0.076$, $n_o = 2.232$, $r^* = 16.94 \times 10^{-12}$ m/V, $d = l = 3$ mm, 激光谐振腔光学腔长 $L = 25$ mm, 则由(11)式和(12)式可得 $R_{fs} = 658$ GHz, $\Delta\delta = 3.28^\circ$ 。可见，这种电光双折射滤光片的 R_{fs} 远大于激光器的增益带宽 $\Delta\nu_{osc}$ (约 150 GHz)，如图 2(a)~(c)所示，并且两相邻激光纵

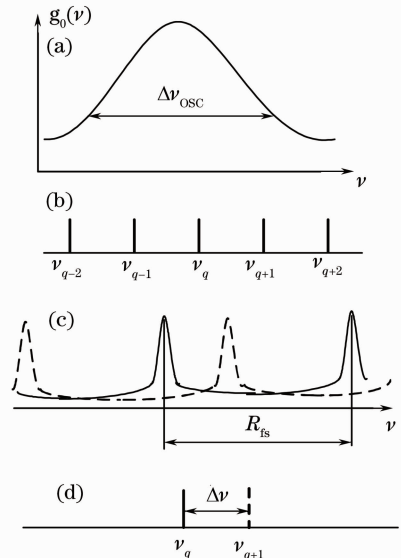


图 2 PBS-LN 选模及调频原理。(a) 增益曲线；(b) 激光腔“频率梳”；(c) 不同电压时 PBS-LN 透射率曲线；(d) 激光振荡模

Fig. 2 Mode selection and frequency tuning principles of PBS-LN. (a) Gain curve; (b) frequency comb of laser cavity; (c) transmission curves of PBS-LN with different voltages; (d) laser oscillating modes

模在双折射滤光片透射峰处的损耗差别 $\Delta\delta$ 足够大,激光器将以单纵模 ν_q 振荡,如图 2(d)所示。

由(11)式可知,电光双折射滤光片的透射峰随加在晶体 LN 横向电压 U 的改变而移动,如图 2(c)所示。因此改变外加电压 U 便可选择不同的振荡模式,从而实现激光频率的调谐,如图 2(d)所示。

对(11)式求导,并化简可得

$$\Delta\nu = -\frac{cn_0^3 r^* / d}{(2\Delta n)^2 l} \Delta U. \quad (13)$$

可见,频率调谐范围 $\Delta\nu$ 与电压变化量 ΔU 成正比。

从以上分析可知,这种 PBS-LN 电光双折射滤光片具有较强的激光纵模选择能力,通过改变加在 LN 晶体上的横向电压,可以方便地在 Nd:YAG 激光器振荡线宽范围内调谐激光频率。

4 激光特性实验研究

建立如图 1 所示激光实验系统,PBS 的透光轴与 LN 晶体光轴(x 轴)平行;LN 晶体的快(慢)轴与 $y(x)$ 轴夹角为 $\pi/4$,外加电场平行于 LN 晶体光轴。LD 的最大出纤功率为 2 W;自聚焦透镜 SML 的尺寸为 $\Phi 2.6 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm}$,数值孔径 $NA = 0.6$;Nd:YAG 晶体的尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ (通光长度为 5 mm);PBS 的尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,p 光透射率为 95%;电光晶体 LN 的尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ (通光长度为 3 mm);OC 的曲率半径为 100 mm,球面镀有 1064 nm 反射介质膜,反射率为 96.4%;谐振腔的光学长度约为 25 mm。高压电源 HVPS 在 0~4000 V 连续可调。

实验测得 LD 抽运 Nd:YAG 激光器的阈值功率为 218 mW,当 Nd:YAG 晶体的端面抽运功率为 832 mW 时,从 OC 输出的 1064 nm 激光功率为 27.6 mW。选用高质量 PBS 和 LN 以降低腔内损耗,并优化输出耦合镜 OC 的透射率,可进一步提高激光器的斜率效率和输出功率。

4.1 横模特性

沿轴向微调 SML 与 Nd:YAG 抽运面的距离,以满足 LD 抽运光模式与振荡激光模式的匹配,可以获得规则的圆形输出激光光斑。在距离输出镜 OC 约 0.5 m 处放置近红外 CCD 相机采集激光光斑图像,经数字图像处理获得的激光光斑三维(3D)能量分布如图 3 所示。可见,输出激光的光束对称性很好,光强按高斯规律分布,可以认为输出激光横模为基横模。

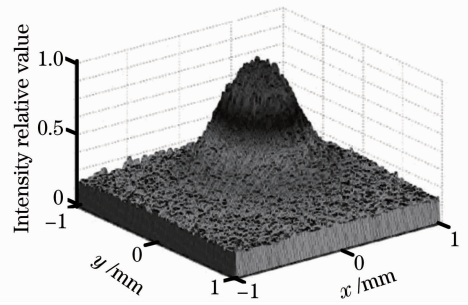


图 3 激光横模光斑 3D 能量分布图

Fig. 3 3D energy distribution of laser transverse mode pattern

4.2 选模及调频特性

实验采用自由光谱范围为 3.75 GHz 的共焦法布里-珀罗(F-P)扫描干涉仪观测 1064 nm 激光输出的模式。由(10)式可知,当 LN 晶体上没有外加电压(即 $U=0$)时,只有 LN 晶体的自然双折射所引起的相位延迟,这时 LN 晶体就是普通的双折射晶体,PBS 和 LN 晶体构成双折射滤光片进行激光纵模选择,实验获得的激光振荡模谱如图 4(a)所示。微调激光腔长,可以实现激光频率调谐,这与文献[16]所报道的频率调谐特性相似。由(12)式可知,当 $U=0$ 时,电光双折射滤光片的损耗调制度 $\Delta\delta_0$ 为

$$\Delta\delta_0 = \frac{2\pi\Delta n l}{L}. \quad (14)$$

由于 LN 晶体的双折射率 Δn 和晶体长度 l 都远大于文献[16]中半波片的双折射率和波片厚度,并且腔长均为 25 mm,因此,本文中电光双折射滤光片的损耗调制度远大于文献[16]中双折射滤光片的损耗调制度,即电光双折射滤光片具有更强的激光纵模选择能力。

从 $U=0$ 开始逐渐增大 HVPS 的输出电压,电压每增大约 50 V,激光模式就发生一次跳变。例如,当 $U=205 \text{ V}$ 和 $U=290 \text{ V}$ 时,实验获得的激光振荡模谱分别如图 4(b)和(c)所示。可见,由 PBS 和 LN 晶体构成的电光双折射滤光片可以选出激光单纵模,并且改变外加电压 U 即可改变 LN 晶体的相位延迟,使得电光双折射滤光片的透射峰在频率轴上移动,以选择不同的激光振荡模式,从而实现对激光器谐振频率的调谐,这与上文中分析的调频原理相符。

为了测量 1064 nm 单纵模激光的波长调谐量(或频率调谐量),将输出激光耦合进光纤,并由 AQ6317C 型光谱分析仪测量其振荡光谱。微调腔长使激光器输出波长最短,在此基础上增大 HVPS

的输出电压,激光器输出波长向长波方向移动。这与(13)式描述相一致,LN 上施加的电压增大时,激

光器输出频率变小,波长变长。图 5 给出了几种典型的单纵模激光振荡光谱。

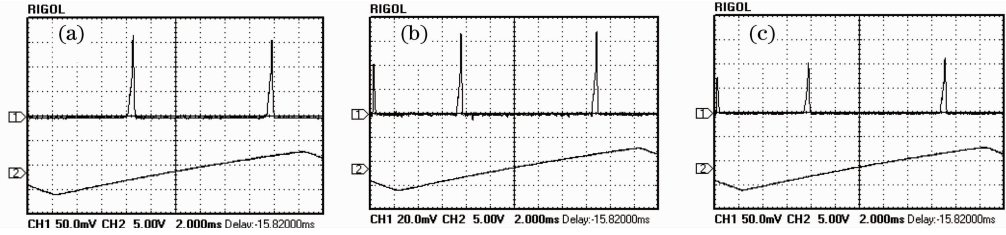


图 4 用共焦 F-P 扫描干涉仪测得的不同电压下 1064 nm 单纵模 Nd:YAG 激光模谱。(a) $U=0$;
(b) $U=205$ V; (c) $U=290$ V

Fig. 4 Single longitudinal mode patterns of Nd:YAG laser at 1064 nm measured by confocal F-P scanning interferometer with different voltages. (a) $U=0$; (b) $U=205$ V; (c) $U=290$ V

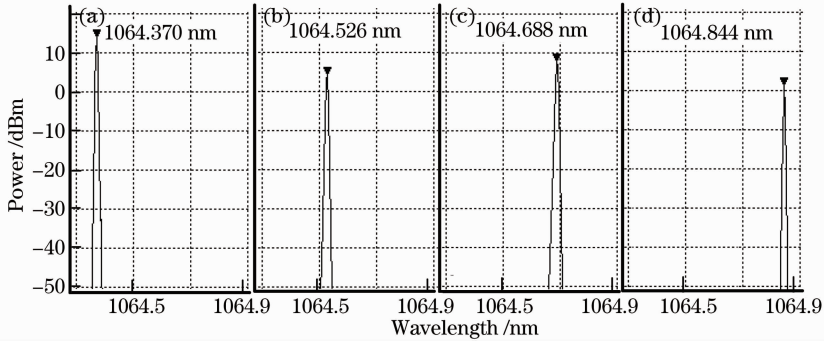


图 5 不同电压下的 1064 nm 单纵模激光光谱。(a) $U=0$; (b) $U=450$ V; (c) $U=1100$ V; (d) $U=1550$ V
Fig. 5 Spectra of the 1064 nm single longitudinal mode laser with different voltages. (a) $U=0$;
(b) $U=450$ V; (c) $U=1100$ V; (d) $U=1550$ V

受光谱仪分辨率的限制,实验观察到的单纵模激光的波长调谐量为 0.474 nm,相应的频率调谐量为 142.2 GHz。可以看出,这已经比较接近 Nd:YAG 晶体的荧光线宽(约 150 GHz)。改变加在 LN 晶体上的电压(在 1550 V 以内),激光振荡波长随直流电压之间的实验关系如图 6 所示,二者基本上成线性关系,与(13)式相一致。但是,由于激光器工作在自由状态,受环境和温度的影响,存在一定的非线性误差。

4.3 偏振特性

偏振态是衡量激光特性的一个重要指标。实验中采用格兰棱镜作为检偏器,1064 nm 单频激光通过格兰棱镜后,用激光功率计测量其输出功率。在垂直于激光光轴的平面内旋转格兰棱镜,每旋转 10° 测量并记录输出功率,可得如图 7 所示的激光透射率随格兰棱镜转角的变化规律。可以看出,输出功率呈正弦曲线变化趋势,变化周期为 180° ,这与马吕斯定律符合得非常好,说明 1064 nm 单频激光是偏振状态良好的线偏振光。

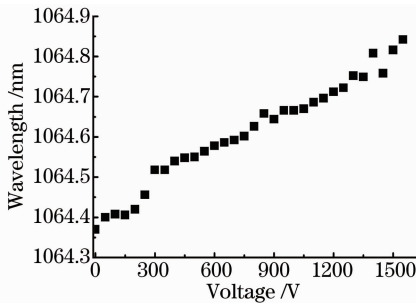


图 6 激光振荡波长与电压之间的关系

Fig. 6 Dependence of laser oscillation wavelength on the voltage

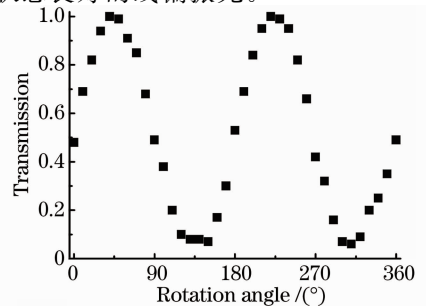


图 7 激光透射率随格兰棱镜转角的关系

Fig. 7 Dependence of transmission of laser on the rotation angle of Glan prism

5 结 论

设计并研究了一种 LD 抽运电光可调谐 1064 nm 单频 Nd:YAG 激光器,采用 PBS 和 LN 晶体组成的电光双折射滤光片作为选模元件和调频元件,实现了 1064 nm 线偏振单纵模激光振荡输出和频率调谐。当在 1550 V 范围内改变加在 LN 晶体上的直流电压时,激光频率的调谐量为 142.2 GHz。这种单频可调谐全固态激光器具有结构简单、调谐方便、易于集成等优点,可广泛应用于激光干涉测量等许多领域。

参 考 文 献

- Zheng Yaohui, Li Fengqin, Zhang Kuanshou, *et al.*. Progress of all-solid-state single-frequency laser[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1635-1642.
郑耀辉,李凤琴,张宽收,等.全固态单频激光器研究进展[J].中国激光,2009,36(7):1635-1642.
- A Owyong, P Esherick. Stress-induced tuning of a diode-laser-excited monolithic Nd:YAG laser[J]. Opt Lett, 1987, 12(12): 999-1001.
- V Evtuhov, A E Siegman. Twisted-mode technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity[J]. Appl Opt, 1965, 4(1): 142-143.
- Zheng Yaohui, Wang Yajun, Peng Kunchi. Single-end pumping, single-frequency Nd:YVO₄/LBO laser with output power of 21.5 W[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602011.
郑耀辉,王雅君,彭堃堃.输出功率为 21.5 W 的单端抽运 Nd:YVO₄/LBO 单频激光器[J].中国激光,2012,39(6):0602011.
- Yang Xiaoping, Wang Chunxiang, Feng Jinxia, *et al.*. 9 W all-solid-state continuous-wave single-frequency 1.34 μm Nd:YVO₄ laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602019.
杨小平,王春香,冯晋霞,等.9 W 全固态连续单频 1.34 μm Nd:YVO₄ 激光器[J].中国激光,2013,40(6):0602019.
- Zhang Jing, Lei Hongxiang, Wang Shaokai, *et al.*. All-solid-state single-frequency and intracavity-frequency-doubled Nd:YVO₄ laser with fold-cavity[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(11): 971-973.
张靖,雷宏香,王少凯,等.可调谐全固态折叠腔单频倍频

- Nd:YVO₄ 激光器[J]. 中国激光, 2001, 28(11): 971-973.
- G L Friel, A J Kemp, T K Lake, *et al.*. Compact and efficient Nd:YVO₄ laser that generates a tunable single-frequency green output[J]. Appl Opt, 2000, 39(24): 4333-4337.
- Zheng Quan, Zhao Ling, Tan Huiming, *et al.*. Single-frequency CW and pulse operation of diode-pumped green lasers[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(9): 769-772.
郑权,赵岭,檀慧明,等.用布氏片实现有效连续和脉冲单频绿光输出[J].中国激光,2002,29(9):769-772.
- Zhao Yonghua, Liu Yupu, Zhang Yinghua. Design of BF for tunable broadband solid-state lasers[J]. Chinese J Lasers, 1995, 22(9): 641-644.
赵永华,刘玉璞,张影华.宽调谐固体激光器的 BF 设计[J].中国激光,1995,22(9):641-644.
- W R Trutna, Jr, D K Donald. Two-piece, piezoelectrically tuned, single-mode Nd:YAG ring laser[J]. Opt Lett, 1990, 15(7): 369-371.
- Lin Yueming, He Huijuan. Frequency tuning characteristics of diode-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. Acta Optica Sinica, 1995, 15(9): 1189-1194.
林岳明,何慧娟.二极管激光泵浦 Nd:YVO₄ 激光器的频率调谐特性研究[J].光学学报,1995,15(9):1189-1194.
- B V Zhdanov, F Kontur, S Phipps, *et al.*. Tunable single-frequency cesium laser[J]. Opt Commun, 2007, 280: 161-164.
- Xie Shiyong, Lu Yuanfu, Bo Yong, *et al.*. High power tunable single-frequency 1064 nm quasi-continuous-wave laser oscillator-amplifier system[J]. Acta Physica Sinica, 58(7): 4659-4663.
谢仕永,鲁远甫,薄勇,等.高功率可调谐 1064 nm 准连续单频激光振荡-放大系统研究[J].物理学报,2009,58(7):4659-4663.
- P A Schulz, S R Henion. Frequency-modulated Nd:YAG laser[J]. Opt Lett, 1991, 16(8): 578-580.
- Y H Zheng, H D Lu, Y M Li, *et al.*. Broadband and rapid tuning of an all-solid-state-stage single-frequency Nd:YVO₄ laser[J]. Appl Phys B, 2008, 90(3-4): 485-488.
- Jiao Mingxing, Xing Junhong, Liu Yun, *et al.*. Design and experimental study of two-cavity dual-frequency all-solid-state laser with large frequency difference[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2784-2789.
焦明星,邢俊红,刘芸,等.双腔大频差双频全固态激光器设计与实验研究[J].中国激光,2010,37(11):2784-2789.

栏目编辑:张 腾