

# Nd:YVO<sub>4</sub>双频微片激光器的热致频差调谐实验研究

戴 荣<sup>1</sup>, 胡 淼<sup>1,2</sup>, 蔡美伶<sup>1</sup>, 李齐良<sup>1</sup>, 周雪芳<sup>1</sup>, 魏一振<sup>1</sup>, 卢 畅<sup>1</sup>

<sup>1</sup>杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018;

<sup>2</sup>上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

**摘要** 实验研究了基于 Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的亚太赫兹(sub-THz)双频微片激光器(DFL)的热效应及其对输出激光信号频差的影响。在实验中,通过改变 DFL 的温度,实现了激光信号频差的调谐。实验结果表明,在一定温度范围内,DFL 的激光信号频差随激光器温度的升高呈线性增长,以此可实现频差的温度调谐。

**关键词** 激光器; 频差调谐; 温控; 双频微片激光器; 发射截面

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0101003

## Experimental Study of Thermally Induced Frequency Difference Tuning of Nd:YVO<sub>4</sub> Microchip Dual Frequency Lasers

Dai Rong<sup>1</sup>, Hu Miao<sup>1,2</sup>, Cai Meiling<sup>1</sup>, Li Qiliang<sup>1</sup>,  
Zhou Xuefang<sup>1</sup>, Wei Yizhen<sup>1</sup>, Lu Yang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,  
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** The thermal effect of sub-THz microchip dual frequency lasers (DFL) based on Nd:YVO<sub>4</sub> crystals and its influence on the frequency difference of laser output signals are experimentally studied. In the experiment, the frequency difference tuning of laser signals is realized by tuning the DFL temperature. The experimental results indicate that, within a certain temperature range, the frequency difference of DFL signals linearly increases with the increment of temperature. Based on this point, one can realize the temperature tuning of frequency difference.

**Key words** lasers; frequency difference tuning; temperature control; microchip dual-frequency lasers; emission cross section

**OCIS codes** 140.3410; 140.3600; 140.5560; 140.6810

## 1 引 言

近年来,微蜂窝无线通信技术逐渐成为通信领域的研究热点之一。在无线频谱资源利用方面,当前使用最多的分米波和厘米波频段资源即将被耗尽,研究的焦点逐步转移到频率更高、频段范围更宽的毫米波和亚太赫兹(sub-THz)波段上<sup>[1-3]</sup>。掺杂 Nd<sup>3+</sup>离子双频微片激光器(DFL)的发射截面和吸收截面相对较大,且输出激光信号的相位相关度较高,可有效获得毫米波和 sub-THz 波<sup>[4-6]</sup>。目前,各国研究人员对大频差 DFL 的研究颇多<sup>[7-8]</sup>。Owyong 等<sup>[9]</sup>最早提出了一种基于 Nd:YAG 的垂直模式微片激光器,并通过压电传感器改变施加于介质上的压力,使输出的激光信号频差发生变化,获得了频差为 76.5 GHz 的双频激光信号。Hyodo 团队利用 Nd:YVO<sub>4</sub> 双纵模微片激光器,通过调谐腔长来控制纵模间隔大小,获得了功率为

收稿日期: 2016-09-18; 收到修改稿日期: 2016-10-15

基金项目: 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金(2015GZKF03008)

作者简介: 戴 荣(1992—),男,硕士研究生,主要从事微片激光器方面的研究。E-mail: 635947832@qq.com

导师简介: 胡 淼(1982—),男,博士,副教授,主要从事大功率 LED 技术、激光技术方面的研究。

E-mail: miao\_hu@foxmail.com(通信联系人)

220 mW、频差为 101.56 GHz 的双频激光信号<sup>[10]</sup>。Mckay 等<sup>[11]</sup>将长度为 15 mm、标准大气压下掺杂浓度(原子分数,下同)为 0.9%的 Nd:YAG 陶瓷片,插入到两块 1/4 玻片之间(玻片之间夹角可调),形成垂直模式微片激光器,获得了输出功率为 50 mW、频差范围在 0~100 GHz 之间的双频激光信号。在此基础上,该小组仍采用三明治结构的 Nd:YAG 陶瓷垂直模式微片激光器,将 Nd:YAG 陶瓷片的长度缩短到 0.25 mm、标准大气压下掺杂浓度提高到 4.0%,获得了频差在 150 GHz 内可调谐、功率为 20 mW 的双频激光信号<sup>[12]</sup>。此外,胡森等<sup>[13]</sup>对毫米波频差的双频种子激光进行功率放大,通过温控实现了频谱匹配并获得了频差为 45 GHz、功率为 2.38 W 的双频激光信号。

目前,虽然国内外团队提出了多种双频激光信号频差控制方式,但是关于通过激光器温控实现双频激光信号频差调谐的研究鲜有报道<sup>[14-16]</sup>。本文通过改变 DFL 的温度,研究了温度和激光信号频差的相互关系。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示,其中 OSA 为光谱仪。半导体激光器(LD)尾纤输出中心波长为 808 nm 的激光作为抽运源,尾纤芯径为 400  $\mu\text{m}$ 。尾纤输出的抽运光通过焦距为 100 mm 的非球面透镜,耦合到激光增益介质中心。实验中采用标准大气压下掺杂浓度为 1.0%的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为激光增益介质,尺寸为 3 mm $\times$ 3 mm $\times$ 0.5 mm,通光方向的折射率为 2.165。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体前端面镀有 1064 nm 的全反射膜(反射率 $R>99.8\%$ )和 808 nm 的增透(AR)膜(透射率 $T>96\%$ ),后端面镀有 1064 nm 的部分高反射(HR)膜( $R=96\%$ )和 808 nm 的高反射膜( $R>96\%$ ),形成了腔长为 0.5 mm 的 F-P 谐振腔。为了增加 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体与热沉的热接触,在晶体外部包覆一层 0.1 mm 厚的液态金属,然后采用热沉紧贴晶体的侧面,仅留直径为 1 mm 的通光孔,以实现晶体温度的精确操作。

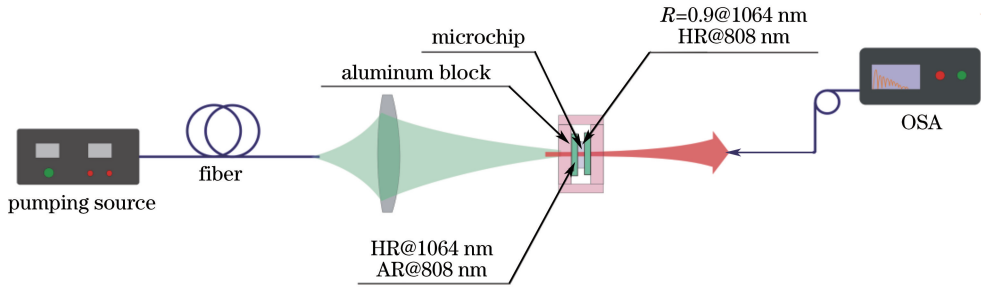


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

在具体实验过程中,控制热沉温度缓慢上升,当晶体在不同热沉温度下达到热平衡后,通过光谱仪(AQ6370B,日本横河电机株式会社,日本)测量激光信号的光谱特性,光谱分析仪的分辨率为 0.02 nm。

## 3 实验结果

固定 LD 抽运电流(14.5 A)为 3 倍抽运阈值,DFL 的温度从 15  $^{\circ}\text{C}$  开始缓慢变化到 65  $^{\circ}\text{C}$ 。当温度每上升 5  $^{\circ}\text{C}$  时,利用光谱分析仪记录输出激光信号的光谱图。图 2(a)是 DFL 温度为 15~65  $^{\circ}\text{C}$  时激光信号的光谱图。从图中看出,随着 DFL 温度的升高,激光信号的左峰中心波长和右峰中心波长都发生了红移。图 2(b)是 LD 抽运电流为 14.5 A、DFL 温度为 60  $^{\circ}\text{C}$  时的输出激光信号光谱图。左峰中心波长为 1064.40 nm,线宽为 0.06 nm,右峰中心波长为 1064.85 nm,线宽为 0.08 nm。左右峰中心波长差为 0.45 nm,计算得出激光信号频差为 120 GHz。

图 3(a)是 DFL 温度和左右峰中心波长的关系。当固定 LD 抽运电流为 14.5 A、温度由 15  $^{\circ}\text{C}$  变化到 65  $^{\circ}\text{C}$  时,输出激光信号的左峰中心波长由 1063.95 nm 红移到 1064.46 nm,红移率为 0.010 nm/ $^{\circ}\text{C}$ ;右峰中心波长由 1064.36 nm 红移到 1064.93 nm,红移率为 0.011 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。左峰中心波长和右峰中心波长与温度拟合后呈线性变化。当 DFL 温度从低温变化到高温时,右峰中心波长红移率大于左峰中心波长红移率,左右峰中心波长差逐渐变大,激光信号频差也变大。

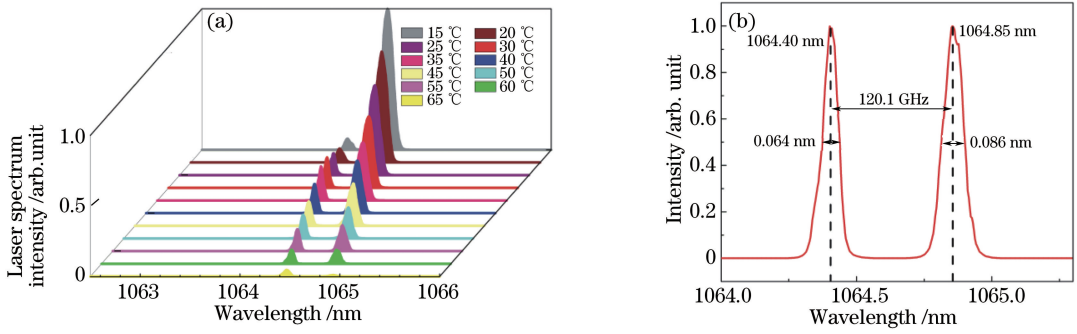


图 2 抽运电流为 14.5 A 时的 DFL 输出频谱图。(a) 15 °C~65 °C; (b) 60 °C  
Fig. 2 DFL output spectra when pump current is 14.5 A. (a) 5 °C-65 °C; (b) 60 °C

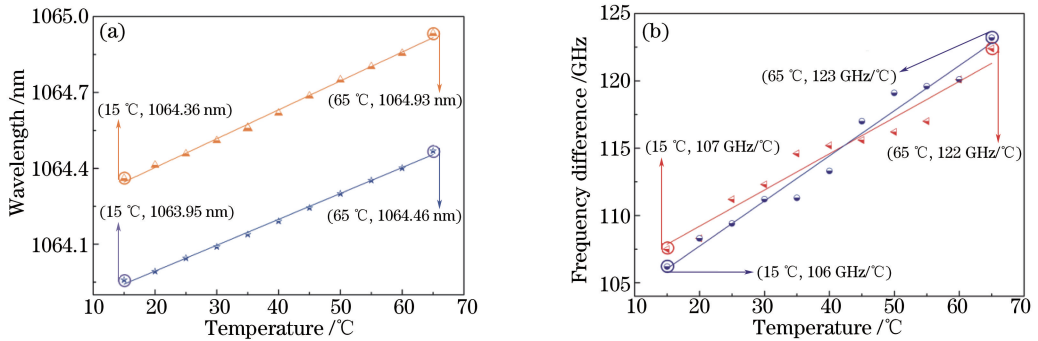


图 3 当抽运电流为 14.5 A 时,左右峰(a)中心波长和(b)频差随温度的变化  
Fig. 3 Variations of (a) center wavelength and (b) frequency difference between left and right peaks with temperature when pump current is 14.5 A

图 3(b) 给出了固定抽运电流条件下,激光信号频差  $\Delta f$  与温度的关系。规定激光信号频差  $\Delta f = c/\lambda_1 - c/\lambda_2$ ,  $c$  为光在真空中的传播速度,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别是激光信号左、右两个频率峰的中心波长。从图中看出,随着晶体温度的升高,双频激光信号频差相应增大。当固定抽运电流为 14.5 A、温度从 15 °C 变化到 65 °C 时,双频激光信号频差由 106 GHz 变化到 123 GHz,上升斜率为 0.34 GHz/°C。激光信号频差和温度呈正相关。为了说明在不同抽运电流(功率)下激光信号频差和温度的关系,在实验中将抽运电流变为 14.0 A (2.5 倍抽运阈值),结果表明,当激光晶体温度从 15 °C 上升到 65 °C 时,双频激光信号频差从 107 GHz 增加到 122 GHz,上升斜率为 0.30 GHz/°C。

根据激光振荡理论可知<sup>[17-18]</sup>,当激光介质增益曲线内的多个模式受激辐射并满足振荡条件时,其纵模间隔为

$$\Delta\nu = c/(2nL), \quad (1)$$

式中  $\Delta\nu$  为相邻纵模之间的频率差,  $n$  为晶体折射率,  $L$  为晶体的谐振腔长。由(1)式可知,腔长为 0.5 mm 的双频 Nd:YVO<sub>4</sub> 微片激光器的理想双模频差  $\Delta\nu$  约为 138.9 GHz,大于实验的测量结果。实验结果比理想双模频差略小的原因是,激光信号的频差不仅取决于理想纵模间隔,还与激光介质的增益谱宽相关,有限的增益谱宽对激光波长线宽具有削减效应,使激光信号频差变窄,如图 4 所示。

考虑到实验采用 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为 DFL 的增益介质,首先需要对该晶体的小信号增益曲线进行分析。图 4(a)是实验测量的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的小信号增益曲线图,可以看出晶体的增益谱随温度的升高发生频谱红移、峰值降低和半峰全宽展开等效应<sup>[19-21]</sup>。通过实验测量可知,随着晶体温度的升高,增益曲线中心波长的红移率为 3.82 pm/°C,增益曲线峰值的减少率为 3.19%/°C,增益谱线宽度的展宽率为 7.86 pm/°C。图 4(b)是输出激光功率随温度的变化曲线图,当微片晶体的温度由 15 °C 变化到 65 °C 时,输出双频微片激光信号功率从 137.1 mW 降低到 5.1 mW,输出的激光信号功率与温度呈负相关关系。图 4(c)是晶体温度为  $T_2$ (较低)时的小信号增益曲线和双频激光光谱示意图。当晶体温度为  $T_2$ (较低)时,增益曲线的谱线宽度较窄;受增益曲线半峰全宽的影响,输出的双频激光光谱产生较强削减效应,左峰中心波长向右偏移,右峰

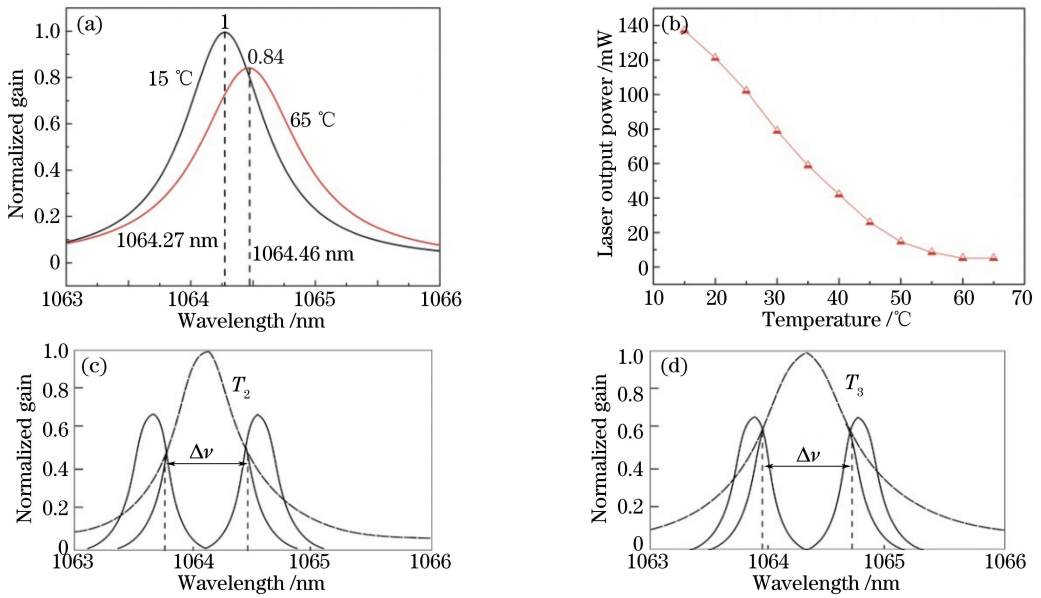


图 4 (a) Nd:YVO<sub>4</sub> 微片晶体小信号增益曲线图; (b) 抽运功率为 14.5 A 时, 激光输出功率随温度的变化; 温度分别为 (c) T<sub>2</sub> 和 (d) T<sub>3</sub> 时的小信号增益曲线和 DFL 光谱示意图  
 Fig. 4 (a) Small signal gain curve of Nd:YVO<sub>4</sub> microchip crystal; (b) variation of laser output power with temperature when pump power is 14.5 A; small signal gain curves and DFL spectra when temperature is (c) T<sub>2</sub> and (d) T<sub>3</sub>, respectively

中心波长向左偏移, 左右两峰中心波长差变小, 实际测量到的双频激光信号的频差小于理想纵模间隔。图 4(d) 是晶体温度为 T<sub>3</sub> (较高) 时, 小信号增益曲线图和双频激光光谱图。此时增益曲线的谱线变宽, 其半峰全宽对激光信号光谱的削减效应减弱, 激光信号频差比温度为 T<sub>2</sub> 时的大, 但是仍然小于理论计算的纵模间隔频差。

## 4 结 论

通过固定 LD 抽运电流来控制双频 Nd:YVO<sub>4</sub> 微腔激光器的温度变化, 实现了对输出双频激光信号频差的调节。当晶体温度较低时, 小信号增益曲线的谱线较窄, 输出双频激光信号的频差被严重削减。实验结果表明, 双频微片激光器温度与激光信号频差存在正相关关系。

## 参 考 文 献

- [1] Pozar D M, Targonski S D, Syrigos H D. Design of millimeter wave microstrip reflectarrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(2): 287-296.
- [2] Huang X, Stintz A, Hains C P, et al. Efficient high-temperature CW lasing operation of oxide-confined long-wavelength InAs quantum dot lasers[J]. Electronics Letters, 2000, 36(1): 41-42.
- [3] Sheen D M, McMakin D L, Hall T E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(9): 1581-1592.
- [4] Notake T, Saito T, Tatematsu Y, et al. Development of a novel high power sub-THz second harmonic gyrotron[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(22): 225002.
- [5] Ford C J B, Simpson P J, Zailer I, et al. Charging and double-frequency Aharonov-Bohm effects in an open system[J]. Physical Review B, 1994, 49(24): 17456-17459.
- [6] Hu Miao, Sun Xiao, Li Qiliang, et al. Investigation of mode competition in dual-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> microchip laser [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0702009.  
 胡 森, 孙 晓, 李齐良, 等. Nd:YVO<sub>4</sub> 双频微片激光器的模式竞争研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0702009.
- [7] Hu Miao, Zhang Hui, Zhang Fei, et al. Thermally induced frequency difference characteristics of dual-frequency microchip laser used optical generation millimeter-wave[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(20): 204205.

- 胡 森, 张 慧, 张 飞, 等. 用于光生毫米波的双频微片激光器热致频差特性研究[J]. 物理学报, 2013, 62(20): 204205.
- [8] Hu M, Zheng Y Y, Cai J, *et al.* CW dual-frequency MOPA laser with frequency separation of 45 GHz[J]. Optics Express, 2015, 23(8): 9881-9889.
- [9] Owyong A, Esherick P. Stress-induced tuning of a diode-laser-excited monolithic Nd:YAG laser[J]. Optics Letters, 1987, 12(12): 999-1001.
- [10] Hyodo M, Tani M, Matsuura S, *et al.* Generation of millimeter-waves radiation using a dual-longitudinal-mode microchip laser[J]. Electronics Letters, 1996, 32(17): 1589-1591.
- [11] McKay A, Dawes J M. Microwave generation using a dual-helicoidally-polarized ceramic microchip laser[C]. 2008 IEEE International Meeting on Microwave Photonics, 2008: 10384670.
- [12] McKay A, Dawes J M. Tunable terahertz signals using a helicoidally polarized ceramic microchip laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(7): 480-482.
- [13] Hu Miao, Zhang Fei, Zhang Xiang, *et al.* Amplification of dual-frequency laser for photonic millimeter-wave signal generation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1114003.  
胡 森, 张 飞, 张 翔, 等. 用于光生毫米波的双频激光放大特性[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1114003.
- [14] Yang Qing, Huo Yujing, Duan Yusheng, *et al.* Double-longitudinal-mode continuous-wave laser with ultra-large frequency difference used for narrowband terahertz-wave generation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0514002.  
杨 清, 霍玉晶, 段玉生, 等. 用于产生窄带太赫兹波的超大频差双纵模连续激光器[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0514002.
- [15] Jiao Mingxing, Zhang Shulian, Liang Jinwen. Birefringent dual-frequency Nd:YAG laser with large frequency-difference[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(2): 100-102.  
焦明星, 张书练, 梁晋文. 大频差双折射双频 Nd:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2001, 28(2): 100-102.
- [16] Hu Miao, Zhang Yu, Gong Xuren, *et al.* The investigation of power equalization in a dual-frequency Nd:YVO<sub>4</sub> microchip laser[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2016, 27(2): 145-149.  
胡 森, 张 瑜, 巩续仁, 等. 双频 Nd:YVO<sub>4</sub> 微片激光器功率均衡研究[J]. 光电子 • 激光, 2016, 27(2): 145-149.
- [17] Liu W S, Jiang M, Chen D R, *et al.* Dual-wavelength single-longitudinal-mode polarization-maintaining fiber laser and its application in microwave generation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(20): 4455-4459.
- [18] Chen X F, Deng Z C, Yao J P. Photonic generation of microwave signal using a dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber ring laser[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(2): 804-809.
- [19] Délen X, Balembois F, Georges P. Temperature dependence of the emission cross section of Nd:YVO<sub>4</sub> around 1064 nm and consequences on laser operation[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2011, 28(5): 972-976.
- [20] Fornasiero L, Kück S, Jensen T, *et al.* Excited state absorption and stimulated emission of Nd<sup>3+</sup> in crystals. Part 2: YVO<sub>4</sub>, GdVO<sub>4</sub>, and Sr<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F[J]. Applied Physics B, 1998, 67(5): 549-553.
- [21] Turri G, Jenssen H P, Cornacchia F, *et al.* Temperature-dependent stimulated emission cross section in Nd<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub> crystals[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(11): 2084-2088.