

用于血管性皮肤病治疗的固体激光技术概述

田玉冰 檀慧明 崔锦江 王帆 施燕博 董宁宁

(苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163)

摘要 激光疗法是治疗血管性皮肤病最为便捷和可靠的方案。介绍了激光治疗血管性皮肤病的选择吸收原理及氧合血红蛋白的吸收峰位置,从而确定了激光波长的选择依据,阐述了418、542、577 nm波段医用全固体激光器的相关技术及发展现状,重点阐述了医用577 nm波段的5种激光技术:倍频、和频、受激拉曼散射(SRS)、光参量振荡器(OPO)及光抽运半导体(OPS)技术。指出了各种技术的优缺点及其医用前景。在和频技术中,提出了将薄片结构与端抽运结构相结合的新型医用578 nm黄光激光器的设计方案。

关键词 激光器;全固态激光器;氧合血红蛋白;和频;倍频;光抽运半导体技术

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.030004

Development of All-Solid-State Medical Laser for Skin Vascular Dermatitis

Tian Yubing Tan Huiming Cui Jinjiang Wang Fan Shi Yanbo Dong Ningning

(Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Suzhou, Jiangsu 215163, China)

Abstract The treatment of skin vascular disease with all-solid-state laser is a safe, effective and successful option. We review literatures on the laser technique for treatment of skin vascular disease. The absorption peak of oxyhemoglobin and the selective absorption principle of tissue are introduced. The main techniques for generating 418, 542 and 577 nm laser are discussed. The yellow 577 nm medical laser techniques including frequency doubling, sum frequency mixing, stimulated Raman scattering (SRS), optical parametric oscillator (OPO) and optically pumped semiconductor (OPS) are emphasized. The advantages and the development trend of different ways are pointed out. In the discussion of sum frequency mixing, the new scheme to produce 578 nm laser by employing thin disc and end-pumping configuration is demonstrated.

Key words lasers; all-solid-state laser; oxyhemoglobin; sum frequency mixing; frequency doubling; optically pumped semiconductor

OCIS codes 140.3480; 140.3515; 140.3550; 140.3580

1 引言

血管性皮肤病是整形美容领域最常见的先天畸形之一,目前最为便捷、可靠的治疗途径为激光疗法,其利用的是激光选择吸收原理:当用激光照射病变部位时,其色基氧合血红蛋白(HbO_2)便吸收光能量成为一个热源,此时通过热量的散射和传导,使血红蛋白发生凝固,红细胞被破坏,形成血栓,造成病变部位畸形的血管阻塞,从而达到治疗目的^[1,2]。对于其治疗波长的选取,必须依据 HbO_2 的吸收曲线而定,由相关文献可知,在418、542、577 nm处存在 HbO_2 的最大吸收峰^[3,4],因此在设计治疗血管性皮肤病的激光器时,波长应以这三个峰值为基准,最好能和这三个峰值相重合,以使能量被高效吸收,从而避免使用偏离峰值较大的波长因吸收不充分而给病人带来的不适。

早期,血管性皮肤病多采用染料激光器和气体激光器进行治疗,但染料激光器具有安全性差、染料有毒、易退化、能量消耗高、稳定性差等一系列问题,且体积庞大,设计方案复杂,而气体激光器常存在结构不紧凑

收稿日期: 2011-09-21; **收到修改稿日期**: 2011-10-13; **网络出版日期**: 2011-12-31

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(BK2010235)、苏州市应用基础研究计划项目(SYG201127)和苏州医工所青年引导基金项目(Y052051205)资助课题。

作者简介: 田玉冰(1976—),男,博士,副研究员,主要从事医用全固体激光器设计及非线性频率变换技术等方面的研究。
E-mail: tianyb76@yahoo.com.cn

和冷却效果差等缺点。相比之下,激光二极管(LD)抽运的全固体激光器及近年来新发展起来的光抽运半导体(OPS)激光器具有波长覆盖范围广、体积小、效率高、光束质量好等优点,因此开发相应波段的固体激光器对推动我国的激光医疗产业具有重要的意义。本文将对 418、542、577 nm 激光及其临近波段的激光技术及发展概况进行分析与探讨。

2 418 nm 波段激光器

如图 1 所示,418 nm 处于 HbO₂ 的最大吸收峰上,由于皮肤表皮黑色素在该波段的吸收比 542 nm 和 577 nm 强很多^[5],如图 2 所示,该波长只适用于肤色白皙者(肤色越深,黑色素含量越高),对肤色较深者^[6],可选择波长较长的 542 nm 和 577 nm 进行治疗。目前成熟的激光晶体中还未发现 836nm 这条谱线,因此通过倍频技术还不能实现与 418 nm 谱线完全重合的激光输出。波长与其临近的仅有 416 nm 在文献中有所报道:2004 年,程光华等^[7]用半导体激光抽运的 YLF 倍频激光(527 nm)抽运钛宝石晶体,在抽运功率为 3.8 W 时,获得 610 mW 416 nm 蓝光,且结构紧凑(40 cm×20 cm×20 cm)。由于其与 HbO₂ 吸收峰仅差 2 nm,吸收效率理论上与 418 nm 差距不大,可进行相关临床实验。

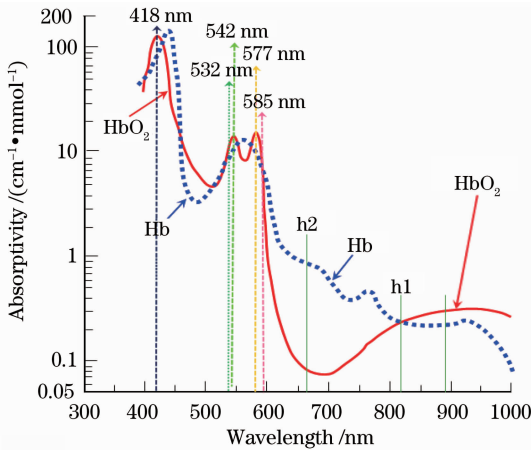


图 1 氧合血红蛋白吸收曲线

Fig. 1 Absorption spectra of oxhemoglobin (HbO₂)

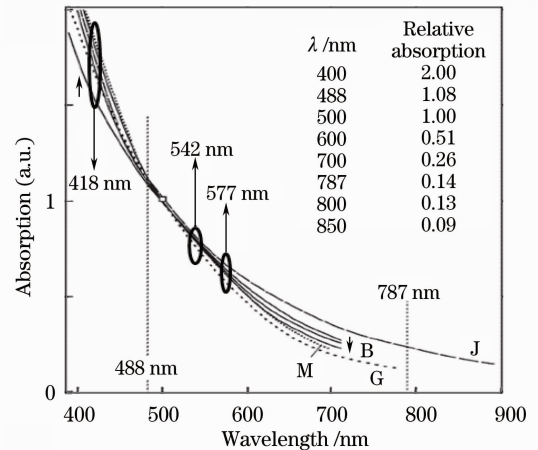


图 2 黑色素吸收曲线

Fig. 2 Absorption spectrum of melanin

3 542 nm 波段激光器

542 nm 为 HbO₂ 的第三大吸收峰,如图 1 所示。由于早期激光技术和镀膜工艺不够成熟,不能实现 542 nm 的有效输出,在该波段,过去多采用 1064 nm 倍频的 532 nm 激光进行临床研究,相关工作在文献中已有大量报道^[8~11],其在治疗血管性皮肤病方面的疗效和可靠性也已得到充分肯定。由此可知,吸收系数较大的 542 nm 波段激光器在该领域的医用前景是毋庸置疑的。2006 年,Zhang 等^[12]首次开展了对 Nd:YVO₄ 晶体 1085.4 nm 谱线进行倍频的实验,获得了 19 mW 542 nm 激光输出。随后,长春新产业光电技术有限公司对该实验不断优化,通过在腔内插入选频元件选频,目前已推出 1.5 W 的 542 nm 激光器产品^[13],稳定性优于 3%。2010 年,李永亮等^[14]使用 Nd:YVO₄ 和磷酸氧钛铷(RTP) 晶体,采用 V 型腔结构,通过腔内倍频 1085.4 nm 谱线,获得了 2.4 W 542.7 nm 激光输出。2011 年,Sun 等^[15]将 Nd:YVO₄ 的 914 nm 和 1342 nm 谱线进行腔内和频,获得了 212 mW 544 nm 激光输出。以上报道的波长相比于 532 nm 穿透深度更深,其疗效将更为显著。但从文献报道可以看出,目前 542 nm 波段激光技术还较单一,仅局限于倍频、和频技术,而且输出功率也有待进一步提高。

4 577 nm 波段激光器

由图 1 可知,577 nm 处于 HbO₂ 的第二大吸收峰上,与 418、542 nm 相比,黑色素对其吸收最弱,因而皮肤穿透深度最深,是治疗血管性皮肤病的最理想光源。由于染料能直接发射这个波段的激光,因而对其临床

研究最早。由相关文献可知,处于 577~595 nm 波段的激光治疗各类血管性皮肤病都是安全可靠的^[16~19]。目前,固体激光器已能实现该波段的大部分波长输出,实现的技术手段主要有以下 5 种(由于 OPS 采用了腔内倍频技术,本文暂将其划分至固体激光技术中讨论)。

4.1 1.1 μm 附近倍频技术

1.1 μm 附近倍频技术主要针对红外色心晶体,目前能获得 577~595 nm 波段输出的仅有少量文献报道^[20~22]。1997 年,McKinnie 等^[20]用调 Q 1064 nm 激光抽运 $\text{Cr}^{4+}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 晶体得到 1180~1340 nm 激光,通过 KTP 腔内倍频得到 590~670 nm 的激光输出,光-光转换效率达到了 7%。2002 年,Gu 等^[21]用氟化锂色心晶体实现了单脉冲能量 0.18 mJ,调谐范围 520~630 nm 的黄-橙激光输出,光-光转换效率达到 4%。2002 年,Giffin 等^[22]用调 Q 1064 nm 激光抽运红外色心晶体 $\text{LiF}:\text{F}_2^-$ 得到 1100~1200 nm 激光,通过 LBO 倍频实现了 550~600 nm 的可调谐黄光脉冲输出,光-光转换效率达到 20%。从文献报道来看,色心晶体还处于研究阶段,短期内还难以开发出高稳定、高效率的医用激光光源。

4.2 和频技术

和频技术分为腔内技术和腔外技术两种结构,在连续的腔外和频过程中,基频光功率密度低,难于提高输出功率^[23],要想达到医用指标,必须进行脉冲和频。文献[24]报道了使用两台注入锁模 Nd:YAG 激光器腔外和频,获得 20 W 589 nm 的实验结果,由于脉冲宽度窄,功率密度高,使得转换效率大大提高,达到了 55%;该研究小组通过进一步优化实验,2005 年将输出功率提高到 50 W^[25],但是该系统体积庞大、结构复杂、成本高昂,不能满足实用性要求,很难将其产品化并在医疗领域推广使用。在国内,中国工程物理研究院也开展了相关研究工作^[26,27],目前 589 nm 输出功率可达 15.5 W,但其采用了侧面抽运结构且需设计复杂的电子学延迟补偿系统,仍面临难于产品化的问题。相比而言,采用腔内技术可以充分利用腔内功率密度高的特点,并简化了结构,使得连续激光的和频效率得以提高,因而相关文献报道较多。腔内和频主要有两种形式。一种形式如图 3 所示,M1 分别与 M2、M3 形成两个独立的谐振腔,使得同一增益介质的两条谱线在两个子腔内同时振荡,通过优化腔长和腔镜的透射率使增益达到匹配,然后通过非线性晶体和频,获得新的波长。Chen 等^[28,29]采用该方案,分别在 2002 年和 2004 年报道了其研究成果,在 593 nm 处的平均输出功率分别为 340 mW 和 610 mW。该方案的缺点是,激光运行时消耗同一上能级的反转粒子数,效率难以大幅提高,同时由于两条谱线发射截面差距较大,难于实现理想的匹配,使得双波长模式竞争影响到激光光束质量,因而输出功率较低,目前还未见到有瓦级输出的实验报道。

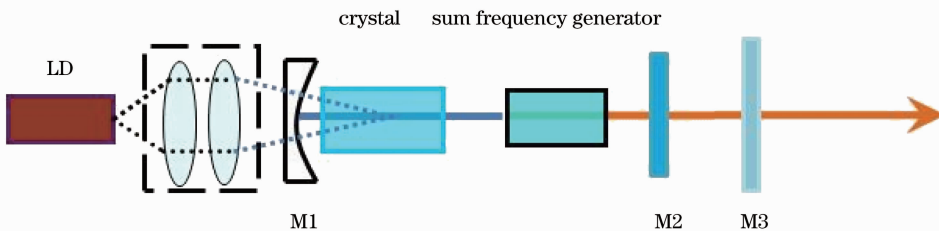


图 3 单一增益介质和频结构示意图

Fig. 3 Schematic of sum frequency mixing laser system with single crystal

腔内和频的另一种形式如图 4 所示,利用两块增益介质,分别利用两台激光器的腔内基频光,使其在公共腔内交叠,通过在交叠区内放入非线性晶体进行腔内和频。这是目前文献报道最多的一种形式,光束质量和效率比单一增益介质有所提高,可实现瓦级输出。2005 年,Saito 等^[30]报道了 1 W 589 nm 连续输出的实验结果。2011 年,Chen 等^[31]报道了平均输出功率达 8 W 的 593 nm 实验结果。该结构是目前可开发医用瓦级和频黄光激光器的唯一可行方案。

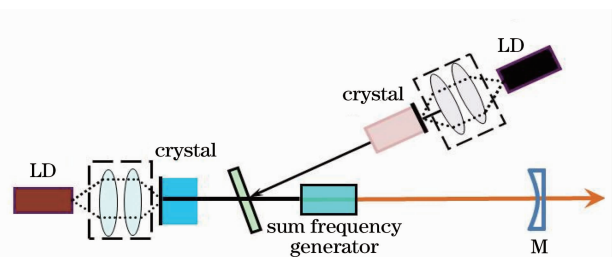


图 4 两块增益介质和频结构示意图

Fig. 4 Schematic of sum frequency mixing laser system with two crystals

现将上面所提及文献及输出在毫瓦量级且处于

577~595 nm 医用波段的和频实验总结如表 1 所示。由表 1 可以看出,目前医用和频输出波长仅局限于 589 nm 和 593 nm。针对这种状况,本课题组提出了一种新的实验方案^[32],其结构如图 5 所示。该方案将薄片式抽运结构和端面抽运结构相结合,利用 Nd:YAG 的 1319 nm 和 Yb:YAG 的 1030 nm 谱线,通过腔内和频实现 578.3 nm 激光输出。该波长与铜蒸气激光器的 578 nm 波长重合,其治疗亚洲女性黄褐斑的临床实验结果在 2010 年已有报道^[19],疗效极其显著。该方案的提出解决了铜蒸气激光器体积庞大的缺点,同时拓宽了医用全固体激光器的可利用波长。

表 1 577 nm 附近全固态和频黄光激光器研究进展

Table 1 Progress in solid-state yellow (around 577 nm) sum-frequency laser research

Sum-frequency configuration	Author, published time	Output wavelength and power	Laser and mixing crystal two oscillated lines	Pump configuration
Extra-cavity sum-frequency	Vance ^[23] , 1998	589 nm, 400 mW single-frequency	Two Nd:YAG crystals, LiNbO ₃ crystal, 1064 and 1319 nm	Two end pumped commercially Nd:YAG lasers
	Chen ^[33] , 2002	593 nm, average power 78 mW	Single Nd:YVO ₄ crystal, PPLN crystal, 1064 and 1342 nm	End pumping
	Bienfang ^[24] , 2003	589 nm, 20 W, single-frequency	Two Nd:YAG crystals, LBO crystal, 1064 and 1319 nm	Two injection locked lasers
	Denman ^[25] , 2005	589 nm, 50 W, single-frequency	Two Nd:YAG crystals, LBO crystal, 1064 and 1319 nm	Two injection locked lasers
	Lu ^[26] , 2010	589 nm, average power 15.5 W	Four Nd:YAG crystals, two LBO crystals, 1064 and 1319 nm	Side pumping
	Zhang ^[27] , 2011	589 nm, average power 6.2 W	Five Nd:YAG crystals, LBO crystal, 1064 and 1319 nm	Side pumping
Intra-cavity sum-frequency	Chen ^[28] , 2002	593 nm, average power 340 mW	Single Nd:YVO ₄ crystal, BBO crystal, 1064 and 1342 nm	End pumping
	Chen ^[29] , 2004	593 nm, average power 610 mW	Single Nd:YVO ₄ crystal, PPKTP crystal, 1064 and 1342 nm	End pumping
	Janousek ^[34] , 2005	593 nm, 750 mW, continuous wave	Two Nd:YVO ₄ crystals, PPKTP crystal, 1064 and 1342 nm	End pumping
	Saito ^[30] , 2005	589 nm, 1 W, continuous wave	Two Nd:YAG crystals, PPKTP crystal, 1064 and 1319nm	End pumping and side pumping
	Bo ^[35] , 2006	589 nm, 4.8 W continuous wave	Four Nd:YAG crystals, KTP crystal, 1064 and 1319nm	Side pumping
	Chen ^[31] , 2011	593 nm, average power 8 W	Two Nd:YAG crystals, KTP crystal, 1338 and 1064 nm	Side pumping

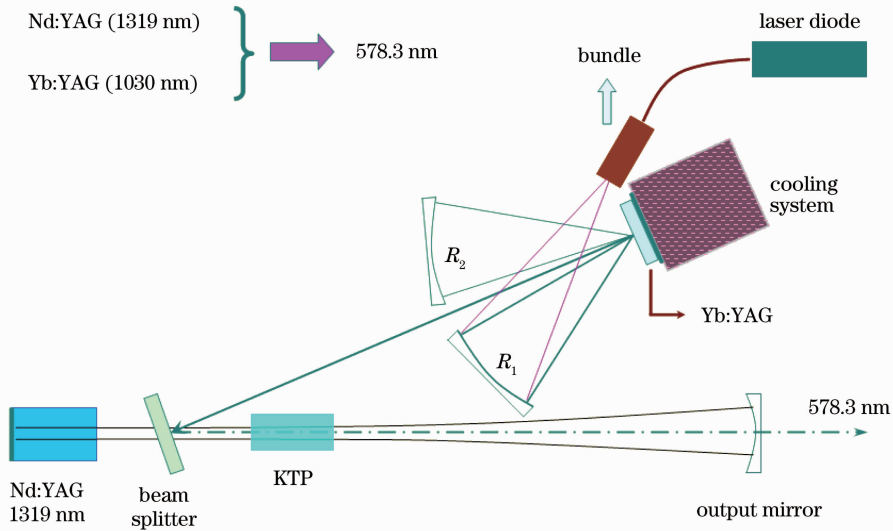


图 5 腔内和频 578 nm 激光器结构示意图

Fig. 5 Schematic of sum frequency mixing laser system with Yb:YAG and Nd:YAG crystals

4.3 拉曼频移技术

受激拉曼散射(SRS)是激光技术中重要的变频手段之一,可分为内腔、外腔和自拉曼三种结构,其示意图分别如图 6(a)~(c)所示,图中 SHG 和 SFG 分别表示倍频与和频。目前文献报道的输出波长处于 577~595 nm 之间的实验结果如表 2 所示。下面按三种结构分别讨论。

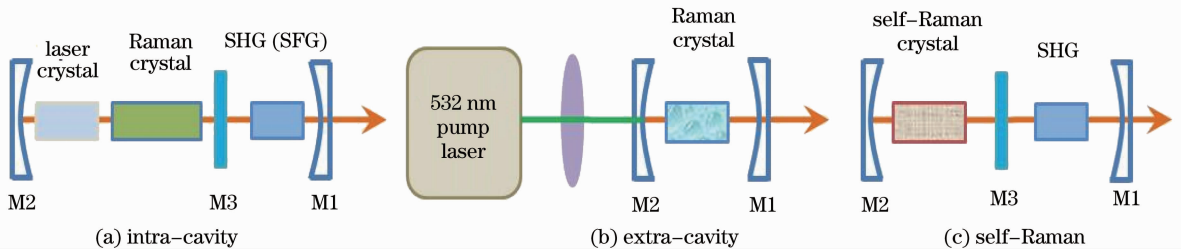


图 6 拉曼激光器结构示意图

Fig. 6 Schematic of different Raman laser systems

内腔式结构将激光晶体、拉曼晶体、倍频或和频晶体置于同一谐振腔内,其特点是阈值较低,但稳定性受热效应影响严重,缺点是腔镜膜系复杂,为防止高阶斯托克斯光起振,腔镜需对基频光和一阶斯托克斯光高反,同时对高阶斯托克斯光增透,这无形中增加了镀膜成本。从表 2 可以看出,内腔拉曼激光输出波长主要集中在 578、579、590 nm 三个波段。1999 年,Pask 等^[36]使用 LD 端面抽运结构、Nd:YAG 晶体、LiIO₃ 拉曼晶体和声光调 Q 装置,首次报道了医用黄光波段的内腔式拉曼激光器,获得了平均功率为 1.2 W 的 578 nm 激光。2005 年,Mildren 等^[37]报道了 579 nm 的实验结果,平均输出功率为 1.8 W。2010 年,Cong 等^[38]报道了输出可达 8.3 W 的 590 nm 激光,这是目前输出最高的准连续黄光拉曼激光器。该波长连续输出的最高纪录为 Lee 等^[39]在 2010 年报道的 2.9 W。

外腔式结构则将拉曼晶体置于独立的拉曼谐振腔内,这样缩短了腔长,降低了损耗,系统的热稳定性好。其输出多为二阶斯托克斯光倍频产生。由表 2 可知,输出波长主要有 583、588、579、589 nm^[40~42],其中 579、588 nm 均可获得瓦级输出。

而自拉曼式结构的激光晶体既是激光增益介质又是拉曼增益介质,由于腔内少了单独的拉曼晶体,插入损耗减小,腔长变短,使得结构更为紧凑、运行更加稳定。2000 年,Findeisen 等^[43]首次报道了该结构的黄光激光器,581 nm 的平均输出功率仅为 1.5 mW。其后随着自拉曼晶体生长工艺的改进,激光转换效率大大

提高,2008年, Lee等^[44]报道了连续输出可达2.51 W的586 nm自拉曼激光器,2009年, Zhu等^[45]报道了输出可达7.93 W的588 nm自拉曼激光器。

表2 577 nm附近全固态拉曼黄光激光器研究进展

Table 2 Progress in solid-state yellow (around 577 nm) Raman laser research

Raman laser configuration	Author, published time	Output wavelength and output power	Laser crystal, Raman-active crystal, frequency-conversion crystal, Q-switch type or pump module	Pump configuration
Intra-cavity Raman laser	Pask ^[36] , 1999	578 nm, average power 1.2 W	Nd:YAG laser crystal, LiIO ₃ Raman-active crystal, LBO crystal, acousto-optic Q switch	End pumping
	Mildren ^[37] , 2005	579 nm, average power 1.8 W	Nd:YAG laser crystal, KGd(WO ₄) ₂ Raman-active crystal, LBO crystal, acousto-optic Q switch	End pumping
	Lee ^[39] , 2010	590 nm, 2.9 W, continuous wave	Nd:GdVO ₄ laser crystal, BaWO ₄ Raman-active crystal, LBO crystal	End pumping
	Li ^[46] , 2007	590 nm, average power 3.14 W	Nd:YAG laser crystal, BaWO ₄ Raman-active crystal, KTP crystal, acousto-optic Q switch	Side pumping
	Cong ^[47] , 2009	590 nm, average power 2.93 W	Nd:YAG ceramic crystal, SrWO ₄ Raman-active crystal, KTP crystal, acousto-optic Q switch	End pumping
	Cong ^[38] , 2010	590 nm, average power 8.3 W	Nd:YAG laser crystal, BaWO ₄ Raman-active crystal, KTP crystal, acousto-optic Q switch	Side pumping
Extra-cavity Raman laser	Zverev ^[40] , 2001	583 nm, (2nd Stokes) 21 mW	BaWO ₄ Raman-active crystal; pump module: Nd ³⁺ :YLiF ₄ 527 nm laser 1 kHz repetition rate and pulse duration as long as 300~450 ns	End pumping
	Mildren ^[41] , 2006	588 nm, 1.5 W 579 nm, (2nd Stokes) 1.22 W	KGd(WO ₄) ₂ Raman-active crystal; pump module: 532 nm laser pulse duration 10 ns and 5 kHz pulse repetition rate	End pumping
	Mildren ^[42] , 2004	589 nm (2nd Stokes) 400 mW	KGd(WO ₄) ₂ Raman-active crystal; pump module: 532 nm laser pulse duration 10 ns and 5 kHz pulse repetition rate	End pumping
Self-Raman laser	Findeisen ^[43] , 2000	581 nm, average power 1.5 mW	Nd:KGd(WO ₄) ₂ self-Raman crystal, LBO crystal, acousto-optic Q switch	Side pumping
	Lee ^[44] , 2008	586 nm, 2.51 W, continuous wave	Nd:GdVO ₄ self-Raman crystal, LBO crystal	End pumping
	Zhu ^[45] , 2009	588 nm, average power 7.93 W	Nd:YVO ₄ self-Raman crystal, LBO crystal, acousto-optic Q switch	End pumping

综上所述可以看出,拉曼激光器最大的特点是设计方案灵活,输出的黄光波长覆盖范围广,目前输出可达8个波长,且三种结构都能实现瓦级输出,因而可根据临床要求,设计相应波长的医用激光器。

4.4 光学参量振荡器技术

利用光学参量振荡器(OPO)中的非线性频率变换技术可获得近红外光源。再通过倍频、和频可实现黄光输出,目前输出波长在577~595 nm波段的报道较少,功率也较低,结构复杂,其研究目的主要是获得低噪声的特定黄光波长输出,用于高分辨率光谱仪和光控量子计算机。2008年, My等^[48]通过对闲频光倍频实现了585~678 nm可调谐输出,其中585 nm输出在50 mW左右。2010年,该课题组实现了几毫瓦的低噪声579 nm激光输出^[49]。2008年, Jensen等^[50]将周期性极化铌酸锂(PPLN)刻上不同的周期,使其既作为中红外OPO非线性晶体,又作为和频晶体(信号光1358 nm和抽运光1030 nm和频)使用,获得了

300 mW 586 nm 激光,转换效率达到了 23%。从目前的文献报道来看,该波段 OPO 技术均采用环形腔结构,其稳定性完全能够满足医用要求,但输出功率仍需大幅提高。

4.5 光抽运半导体技术

OPS 技术的谐振波长大多在近红外,通过腔内倍频可获得可见光输出。2001 年,该技术首次被提出^[51],其后发展很快,目前产品已在低功率应用领域赢得了显著的市场份额。2008 年, Fallahi 等^[52]报道了 1175 nm OPS 激光器,采用 LBO 腔内倍频,通过插入布儒斯特片并改变温度进行调谐,获得了 579~595 nm 波段输出,其中 585~589 nm 输出功率大于 5 W。2008 年,相干公司首次推出 5 W 577 nm 商用激光器^[53],并在治疗眼底病,比如视网膜出血、老年黄斑变性等方面进行应用,结构如图 7 所示,其特点是体积非常小,激光头尺寸仅与 25 美分硬币相当,如图 8 所示^[54],且稳定性很高。该技术是未来医用激光器发展的一个重要方向,但每个目标波长都需对半导体材料进行特殊设计,需要大型设备和长期的技术积累,成本高昂,目前国内还未有相关报道。

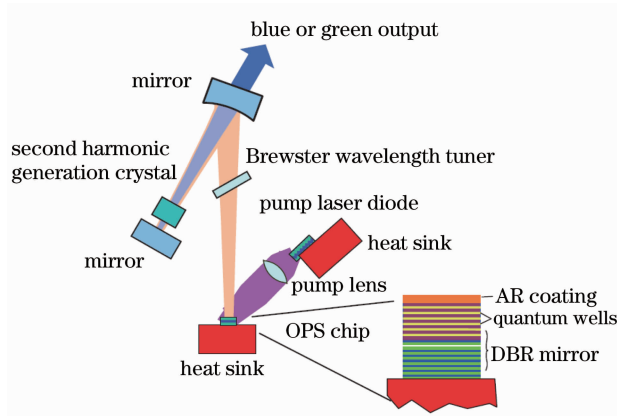


图 7 577 nm OPS 激光器结构示意图

Fig. 7 OPS pump geometry of 577 nm laser

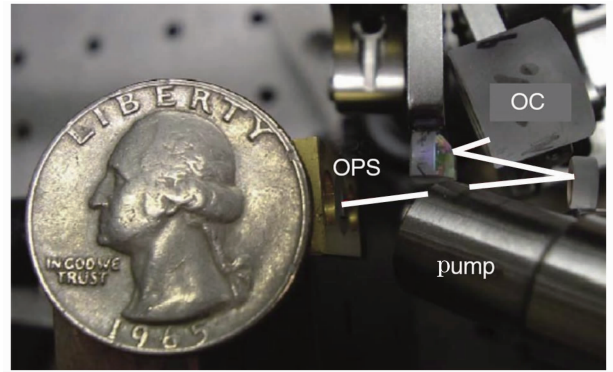


图 8 OPS 激光器内部结构与光路(白线标注)

Fig. 8 Interior configuration and laser beam path of OPS laser

5 结束语

本文介绍了 HbO_2 的吸收峰位置及激光治疗血管性皮肤病的选择吸收原理,进而确定了激光波长的选择依据,对 418、542、577 nm 波段的激光技术及国内外发展状况进行了总结。在和频技术中给出了新型 578 nm 医用激光器的设计方案,该方案进一步丰富了全固体医用激光器的可利用波长。

参 考 文 献

- Zhou Mengyun, Song Weimin. The development of laser treat for hemangioma [J]. *China Medical Abstracts (Dermatology)*, 2009, **26**(4): 218~221
周梦云,宋为民. 激光治疗皮肤血管瘤的研究进展[J]. 中国医学文摘(皮肤科学), 2009, **26**(4): 218~221
- Fu Ping. The development of laser treat for skin disease[J]. *J. Dermatology and Venereology*, 1996, **18**(1): 21~24
傅萍. 激光治疗皮肤病进展[J]. 皮肤病与性病, 1996, **18**(1): 21~24
- Dirk J. Faber, Egbert G. Mik. Light absorption of (oxy-) hemoglobin assessed by spectroscopic optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(16): 1436~1438
- Meghan F. Stier, Sharon A. Glick, Ranella J. Hirsch. Laser treatment of pediatric vascular lesions: port wine stains and hemangiomas[J]. *J. Am. Acad. Dermatology*, 2008, **58**(2): 261~285
- C. N. Keilhauer, F. C. Delori. Near-infrared autofluorescence imaging of the fundus: visualization of ocular melanin[J]. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 2006, **47**(8): 3556~3564
- Ronald G. Wheeland. Copper vapor and dye laser therapy for cutaneous vascular disorders[J]. *The Western J. Medicine*, 1989, **151**(6): 650~651
- Cheng Guanghua, Wang Yishang, Yu Lianjun et al.. High efficient second harmonic at 416 nm and fourth harmonic generation at 208 nm in compacted all-solid-state Ti:sapphire laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 769~772
程光华,王屹山,于连君等. 高效全固化钛宝石腔内倍频蓝光和四倍频紫外激光器的研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(7):

769~772

- 8 Tu Caixia, Guo Wei, Gao Mingyang *et al.*. A study on 631 patients with vascular skin disease by variable pulse width 532 nm laser [J]. *Chinese J. Dermatology*, 2001, **34**(2): 146
涂彩霞, 郭伟, 高明阳等. 可变脉宽倍频 Nd:YAG 532 nm 激光治疗血管性皮肤病 631 例[J]. 中华皮肤科杂志, 2001, **34**(2): 146
- 9 Yang Manli, Wei Ting. Pulsed multifunctional laser system treatment of dermovascular disease [J]. *Chinese J. Laser Medicine & Surgery*, 2006, **15**(2): 115~117
杨曼里, 魏婷. 可变脉宽倍频 532 nm Nd:YAG 激光治疗皮肤血管性疾病[J]. 中国激光医学杂志, 2006, **15**(2): 115~117
- 10 Wang Xiuhong, Tu Caixia, Huang Shengying. A study on treatment of some vascular skin disease with variable pulse width 532 nm laser [J]. *J. Dalian University*, 2000, **21**(6): 85~88
王秀红, 涂彩霞, 黄胜英. Versapulse 532 nm 激光治疗血管性皮肤病的临床观察及实验研究[J]. 大连大学学报, 2000, **21**(6): 85~88
- 11 Li Mei. Observation of therapeutic effect on skin lesion with pigment by Q Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Aesthetic Medicine*, 2002, **11**(1): 23~24
李梅. Q-Nd:YAG 激光治疗色素性皮肤病变疗效观察[J]. 中国美容医学, 2002, **11**(1): 23~24
- 12 Z. Zhang, H. M. Tan, L. L. Gao *et al.*. Intra-cavity second harmonic generation with Nd:YVO₄/BIBO laser at 542 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **267**(2): 487~490
- 13 长春新产业光电技术有限公司. 543 nm 绿光固体激光器 [OL]. http://www.cnilaser.com/C--reen_laser543.htm
- 14 Li Yongliang, Jiang Huilin, Zhang Lizhong. RTP type II critical phase matched 542.7 nm green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1172~1175
李永亮, 姜会林, 张立中. RTP II 类临界相位匹配 542.7 nm 绿光激光器[J]. 中国激光, 2010, **37**(5): 1172~1175
- 15 G. C. Sun, Y. D. Lee, B. Z. Li *et al.*. Diode pumped Nd:YVO₄-LBO laser at 544 nm based on intracavity sum frequency generation [J]. *Laser Phys.*, 2011, **21**(6): 1024~1027
- 16 Mohamed L. Elsaie, Leslie S. Baumann, Lotfy T. Elsaiee. Striae distensae (stretch marks) and different modalities of therapy: an update [J]. *Dermatol. Surg.*, 2009, **35**(4): 563~573
- 17 Vicki J. Levine, Roy G. Geronemus. Adverse effects associated with the 577- and 585-nanometer pulsed dye laser in the treatment of cutaneous vascular lesions; a study of 500 patients [J]. *J. Am. Acad. Dermatology*, 1995, **32**(4): 613~617
- 18 Lü Rong, Pan Fuqiong, Chang Youjun *et al.*. Side effects of 585 nm pulsed dye laser in treatment of the vascular abnormalities [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(6): 362~364
吕蓉, 潘福琼, 常有军等. 585 nm 脉冲染料激光治疗皮肤血管性疾病所致的副作用[J]. 应用激光, 2002, **22**(6): 362~364
- 19 Hye In Lee, Yun Young Liu, Beom Joon Kim *et al.*. Clinicopathologic efficacy of copper bromide plus/yellow laser (578 nm with 511 nm) for treatment of melasma in asian patients [J]. *Dermatol. Surg.*, 2010, **36**(6): 885~893
- 20 Iain T. Mckinnie, Ann Marie L. Oien. Tunable red- yellow laser based on second harmonic generation of Cr:forsterite in KTP [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **141**(3-4): 157~161
- 21 Hongen Gu, Honghai Liu. Transversely pumped yellow-green laser using color centers in the lithium fluoride crystal at room temperature [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **201**(1-3): 113~116
- 22 S. Maile Giffin, Glenn W. Baxter, Iain T. Mckinnie *et al.*. Efficient 550~600 nm tunable laser based on noncritically phase-matched frequency doubling of room-temperature LiF:F₂ in lithium triborate [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(21): 4331~4335
- 23 J. D. Vance, C. Y. She, H. Moosmuller. Continuous-wave, all-solid-state, single-frequency 400 mW source at 589 nm based on doubly resonant sum-frequency mixing in a monolithic lithium niobate resonator [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(21): 4891~4896
- 24 J. C. Bienfang, C. A. Denman, B. W. Grime *et al.*. 20 W of continuous-wave sodium DZ resonance radiation from sum-frequency generation with injection-locked lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(22): 2219~2221
- 25 Craig A. Denman, Paul D. Hillman, Gerald T. Moore. 50-W CW single frequency 589-nm FASOR [C]. *Advanced Solid-State Photonics (ASSP)*, 2005, 698~702
- 26 Lu Yanhua, Zhang Lei, Liu Shengxi *et al.*. 15.5 W all solid-state extra-cavity sum-frequency generation 589 nm yellow laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2419~2423
鲁燕华, 张雷, 刘晟西等. 15.5 W 全固态腔外和频 589 nm 黄光激光器[J]. 中国激光, 2010, **37**(9): 2419~2423

- 27 Zhang Lei, Lu Yanhua, Liu Dong *et al.*. 6.2 W 589 nm yellow laser by extra-cavity sum-frequency[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(6): 1501~1503
张雷, 鲁燕华, 刘东等. 6.2 W 外腔和频 589 nm 黄光激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(6): 1501~1503
- 28 Y. F. Chen. Diode-pumped Q-switched Nd:YVO₄ yellow laser with intracavity sum-frequency mixing[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(6): 397~398
- 29 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
- 30 Norihito Saito, Kazuyuki Akagawa, Yutaka Hayano *et al.*. 1 W 589 nm coherent light-source achieved by quasi-intracavity sum-frequency-generation [C]. *Advanced Solid-State Lasers*, 2005, MB18
- 31 R. Chen, L. Guo, X. Yan *et al.*. An 8-W diode side pumped solid-state 593-nm laser[J]. *Laser Phys.*, 2011, **21**(7): 1189~1193
- 32 Tan Huiming, Tian Yubing, Cui Jinjiang *et al.*. All solid-state medical double resonance intracavity sum frequency yellow light laser [P]. China Patent CN 101820132, 2010-09-01
檀慧明, 田玉冰, 崔锦江等. 全固态医用双共振腔内和频黄光激光器[P]. 中国专利, CN 101820132, 2010-09-01
- 33 Y. F. Chen, S. W. Tsai, S. C. Wang. Efficient generation of continuous-wave yellow light by single-pass sum-frequency mixing of a diode-pumped Nd:YVO₄ dual-wavelength laser with periodically poled lithium niobate[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(20): 1809~1811
- 34 J. Janousek, S. Johansson, P. T. Lichtenberg. Efficient all solid-state continuous-wave yellow-orange light source[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(4): 1188~1192
- 35 Bo Yong, Geng Aicong, Lu Yuanfu *et al.*. A 4.8-W $M^2 = 4.6$ continuous-wave intracavity sum-frequency diode-pumped solid-state yellow laser[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(6): 1494~1497
- 36 H. M. Pask, J. A. Piper. Efficient all-solid-state yellow laser source producing 1.2 W average power [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(21): 1490~1492
- 37 Richard P. Mildren, Helen M. Pask, Hamish Ogilvy *et al.*. Discretely tunable, all-solid-state laser in the green, yellow, and red[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(12): 1500~1502
- 38 Cong Zhenhua, Zhang Xingyu, Wang Qingpu. Theoretical and experimental study on the Nd:YAG/BaWO₄/KTP yellow laser generating 8.3 W output power[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(12): 12111~12118
- 39 Andrew J. Lee, Helen M. Pask, James A. Piper. An intracavity, frequency-doubled BaWO₄ Raman laser generating multi-watt continuouswave, yellow emission [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 5984~5992
- 40 P. Zverev, T. T. Basiev, L. V. Ermakov. BaWO₄ crystal for quasi-CW yellow Raman laser[C]. *Advanced Solid-State Lasers*, 2001, 212~215
- 41 R. P. Mildren, H. M. Pask, J. A. Piper. High-efficiency Raman converter generating 1.5 W of red-orange output [C]. *Advanced Solid-State Lasers*, 2006, MC3
- 42 R. P. Mildren, M. Convery, H. M. Pask. Efficient, all-solid-state, Raman laser in the yellow, orange and red [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(5): 785~790
- 43 J. Findeisen, H. J. Eichler, P. Peuser. Self-stimulating, transversally diode pumped Nd³⁺:KGd(WO₄)₂/Raman laser[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **181**(1-3): 129~133
- 44 A. J. Lee, H. M. Pask, P. Dekker. High efficiency, multi-watt CW yellow emission from an intracavity-doubled self-Raman laser using Nd:GdVO₄ [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(26): 21958~21963
- 45 Haiyong Zhu, Yanmin Duan, Ge Zhang *et al.*. Efficient second harmonic generation of double end diffusion-bonded Nd:YVO₄ self-Raman laser producing 7.9 W yellow light[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(24): 21544~21550
- 46 Shutao Li, Xingyu Zhang, Qingpu Wang *et al.*. Diode-side-pumped intracavity frequency-doubled Nd:YAG/BaWO₄ Raman laser generating average output power of 3.14 W at 590 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(20): 2951~2953
- 47 Zhenhua Cong, Xingyu Zhang, Qingpu Wang. Efficient diode-end-pumped actively Q-switched Nd:YAG/SrWO₄/KTP yellow laser[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(17): 2610~2612
- 48 Thu-Hien My, Cyril Drag, Fabien Bretenaker. Single-frequency and tunable operation of a continuous intracavity-frequency-doubled singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(13): 1455~1457
- 49 Oussama Mhibik, Thu-Hien My, David Paboeuf *et al.*. Frequency stabilization at the kilohertz level of a continuous intracavity frequency-doubled singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(14): 2364~2366
- 50 O. B. Jensen, M. Bruun-Larsen, O. Balle-Petersen *et al.*. Yellow nanosecond sum-frequency generating optical parametric oscillator using periodically poled LiNbO₃ [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **91**(1): 61~63

- 51 Hu Yongsheng. The development and applications of optically pumped semiconductor lasers[J]. *OME Information*, 2010, **27**(5): 1~8
胡永生. 光泵浦半导体激光器的发展及应用[J]. 光机电信息, 2010, **27**(5): 1~8
- 52 Mahmoud Fallahi, Li Fan, Yushi Kaneda *et al.*. 5-W yellow laser by intracavity frequency doubling of high-power vertical-external-cavity surface-emitting laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(20): 1700~1702
- 53 Matthias Schulze. Medical applications of lasers: diversity is key to success [J]. *Laser Technik Journal*, 2010, **7**(6): 32~35
- 54 M. Schulze, A. Masters. Optically pumped semiconductor lasers expand the scope of potential applications[J]. *Laser Focus World*, 2006, **42**(21): 77~80