

半导体激光器在医疗领域的新应用与进展

李艳华¹, 胡黎明^{2,3}

- (1. 河北工业大学 信息工程学院, 天津 300401;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033;
3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 半导体激光器因其体积小、重量轻、寿命长、转换效率高等优点, 广泛应用于生物医学研究、临床疾病诊断和治疗领域, 几乎覆盖了其它类型激光的应用范围。本文主要综述了近年来半导体激光在临床治疗、美容、整形领域的新应用, 介绍了半导体激光医疗设备的研制状况和发展趋势。随着波长范围的拓展、激光器性能的提高以及价格下降, 半导体激光器在医疗上的应用范围将不断拓展, 市场占有率将不断增加, 有望成为激光医疗的主流, 具有广阔的发展前景。

关键词: 激光技术; 半导体激光器; 激光医疗; 临床应用

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102707.0027

New Application and Progress of Semiconductor Lasers in Medical Field

LI Yan-hua¹, HU Li-ming^{2,3}

- (1. Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
2. Key Lab. of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of sciences, Changchun 130033, China;
3. Graduate school of the Chinese Academy of sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Semiconductor lasers is widely used in the field of biomedical research, clinical disease diagnosis and disease therapy, almost covering other kinds of lasers application range because of its own advantages, such as small body, light weight, long lifetime, high efficiency, etc. In this paper, an overview of the new applications of semiconductor lasers in the field of clinical disease therapy and cosmetic plastic surgery is given, and the status and development trends of the R & D of semiconductor laser medical equipment are introduced. With the widening of wave-

length range, improving of laser performance, as well as falling of price, the applied range of semiconductor laser in the field of medical treatment will be expanded continuously, and the market share will be also increased continuously. Semiconductor lasers is predicted to be the mainstream of medical laser, and it has broad prospects for development.

Keywords: laser technology; semiconductor lasers; laser medicine; clinical application

1 引言

激光技术的发展不仅为生命科学开辟了新的研究途径,而且为临床诊断治疗提供了全新的手段,开辟了一门新兴学科——激光医学。激光医疗作为激光应用的一个重要领域,发展非常迅速,逐步走向成熟。半导体激光器因其具有体积小、重量轻、寿命长、功耗低、波长覆盖范围广等特点,特别适用于医疗设备的制造。据统计,2004–2008年,全球激光医疗设备的年销售量由22.22万台上升到37.24万台,年销售额由10.18亿美元增长到12.11亿美元,其中,半导体激光医疗设备的年销售量由21.01万台增长为35.43万台,年销售额由6.21亿美元增加到

6.63亿美元^[1]。由此可见,半导体激光医疗的市场占有份额在不断增加,应用范围在不断扩大。本文主要阐述了半导体激光在临床领域的新应用以及半导体激光医疗设备的研制状况,并展望了半导体激光医疗的发展前景。

2 半导体激光的临床新应用

半导体激光波长范围广,不同波长的半导体激光照射生物组织会产生不同的生物效应,对应着不同的激光治疗方法,应用于不同疾病的治疗,其大体情况如表1所示^[2]。本文主要就近年来半导体激光在临床治疗、整形、美容等领域的应用新进展进行阐述。

表1 医用半导体激光器的应用状况

波长/nm		功率	运行模式	应用
可见光	532	低功率	连续	常规眼底激光光凝术
	630~670	低功率	连续	癌症的光动力学治疗（PDT）
	650	低功率	连续	各种急慢性鼻炎；穴位照射，活血化瘀，抗炎消肿，杀菌止痛等
红 外 光	780~910	低功率	连续	牙齿、口腔急慢性炎症；血管照射；针灸理疗等
	810, 830, 940, 980	高功率	连续	外科手术中的汽化，激光手术刀
	810	中功率	微脉冲	经巩膜睫状体光凝术；睑下光凝
	800, 810	中功率	脉冲	脱毛
	980	中功率	脉冲	除皱
	1 450	中功率	脉冲	去除粉刺、痤疮等；除皱
	1 470	高功率	连续、脉冲	外科手术中的汽化，激光手术刀
	1 540~1 550	中功率	脉冲	去除粉刺、痤疮等；除皱

2.1 血管外科

血管腔内激光治疗(EVLT)作为一种新型的微

创疗法具有损伤小、血管封闭率高等优点,广泛应用于静脉曲张等静脉疾病治疗。目前,临床上应用的激

光主要是 810, 940, 980 nm 半导体激光以及 1 064 nm Nd:YAG 激光, 以氧合血红蛋白为激光靶子, 诱发的热量促使血液沸腾产生“蒸汽泡”, 间接损伤血管壁以致血管闭塞, 治愈率在 90%~100%之间, 其主要缺点是术后有疼痛和瘀伤等副作用^[3-6]。

德国 Biolitec 公司针对 EVLT 微创手术研发出一种新型半导体激光治疗仪 ELVeS™ PainLess, 输出波长为 1 470 nm, 输出功率 0~15 W, 可在连续或脉冲模式下工作, 仪器尺寸只有 26 cm×22 cm×8 cm。1 470 nm 激光能够很好地被血管壁中的胶原质和水吸收, 使血管壁中的胶原纤维永久性萎缩, 直接损伤血管壁使血管闭塞, 具有很高的血管封闭率。F Pannier 等人^[7]利用 ELVeS™ PainLess 治疗仪对 100 位患者的 134 例隐性静脉进行腔内激光消融手术, 术后血管闭塞率达 100%, 出现轻微并发症的只有 2.2%。83 位患者的 105 例静脉进行为期 1 年的术后观察, 没有发现逆流和复发现象。由此可见, 1 470 nm 半导体激光 EVLT 治疗静脉曲张能够有效缓解近红外激光治疗带来的术后疼痛并发症, 是一种安全、高效的微创疗法。

2.2 泌尿科

良性前列腺增生是一种常见病, 在老年人中的发病率高达 85%。传统的经尿道前列腺切除术 (TURP) 治疗前列腺增生效果良好, 但手术难度大、出血多、术后恢复慢、并发症多。随着激光技术的发展, 各种激光疗法相继应用于临床, 主要分为组织内激光凝固术和激光组织消融术两种类型。

ROLF MUSCHTER^[8]总结了 1996~2000 年间利用半导体激光组织内光凝术治疗前列腺增生的临床效果, 得出结论: 术中出血少、并发症少, 但术后留置尿管时间长、并发症较多, 比如尿潴留、尿路刺激症、逆向射精等, 比较适合于对出血紊乱的高危患者进行介入治疗。

Micheael Seitz^[9]等人对比研究了 1 470 nm 半导体激光与 532 nm KTP 激光的组织移除和光凝止血能力: 离体灌注猪肾实验表明, 50 W 的 1 470 nm 激光

的组织移除能力是 80 W 的 KTP 激光的 1/6, 组织凝固深度是 KTP 激光的 2.7 倍; 活体小猎犬实验表明, 100 W 的 1 470 nm 激光与 80 W 的 KTP 激光的组织切除能力接近。随后, 他们利用 1 470 nm 半导体激光对 10 名尿道口阻塞患者进行前列腺汽化手术, 平均能量为 121 kJ, 术中没有出现严重出血和并发症, 术后 33 h 移除三叉导尿管, 没有患者出现明显血尿症和小便失禁, 只有 2 名患者术后 2 个月内重新进行 TURP 治疗, 其余患者的治疗效果良好。为期 1 年的术后调查表明: 平均最大尿流量 Q_{\max} 由术前的 8.9 ml/s 增加到 22.4 ml/s ($p<0.001$), IPSS 由术前的 16.3 分降低到 5.0 分 ($p<0.001$), 平均 PVR 体积由 243 ml 减小到 26.9 ml ($p<0.001$), QoL 由 3.3 减小到 0.875^[10]。基于此, 德国 Biolitec 公司研制出世界上第一台快速、安全、有效消融前列腺组织的双波长半导体激光治疗仪——EVOLVE™ DUAL, 综合了 1 470 nm 激光与 980 nm 激光分别被水和血红蛋白强烈吸收的特点, 具有良好的组织消融能力和凝固止血能力, 用于激光前列腺组织消融术时具有出血少、术后并发症较少等优点, 而且组织消融速率高, 可广泛用于前列腺增生症、湿疣、尿道肿瘤等疾病治疗, 成为 KTP 绿激光的有力竞争者。

2.3 口腔科

20 世纪 90 年代中期以来, 半导体激光治疗系统得到了牙科医生的亲睐, 广泛应用于牙周病、牙髓炎等口腔疾病治疗^[11]。临床上应用较多的是 810 nm 和 980 nm 半导体激光, 输出功率在 0~10 W 范围内, 产品主要有美国 Biolas 公司的 LaserSmile、德国 Biolitec 公司的 SmilePro980™、以色列 KaVo 公司的 GENTLEray 980 等系列。为了满足农村诊所以及野外治疗对激光治疗仪多功能、简便快捷等需求, 口腔激光治疗仪向着智能化、小型化方向发展。例如, 德国的 A.R.C 公司推出的一款 FOX 系列小型半导体激光治疗仪, 尺寸只有 12 cm×21 cm×10 cm, 重量只有 1.2 kg, 由充电电池供电, 脉宽最小达 1 ms, 重复频率 1 Hz~0.3 kHz, 最大激光输出功率达 9 W。

此外,基于 915 nm 激光具有切割、凝固止血的特点,意大利 Eufoton 公司开发出 LAS6mar900 激光治疗系统,最大输出功率达 5 W,尺寸为 25 cm×24 cm×8.5 cm,重量只有 3.5 kg,适合于各种口腔疾病治疗。C.FORNAINI^[12]等人利用 LAS6mar900 对露龈笑患者进行激光辅助系带切开术,激光功率 3.5 W,功率密度 4 354 W/cm²,术后 1 周伤口愈合,6 周后得到满意的临床效果。用相同激光参数对严重的舌黏连患者进行治疗,1 周后伤口愈合且没有并发症,1 个月后完全康复。

2.4 肿瘤科

半导体激光在肿瘤治疗领域的临床应用主要有两方面,即肿瘤的激光切割、凝固手术和光动力学疗法(PDT)。国内已广泛将大功率半导体激光应用于肿瘤的激光切割、凝固手术,但其在切割、汽化肿瘤的同时由于非特异性加热会造成正常组织的损伤,因而延长治疗时间。光动力学疗法是国际上近 10 年来在癌症防治方面的最新成果之一,其基本原理是用特定波长的激光照射吸收了光敏剂的癌细胞,通过强氧化反应杀死癌细胞。但是,目前光动力学疗法常用的光源主要集中在 600~700 nm 可见光波段,组织穿透深度较浅,限制其对深层肿瘤的治疗效果。

美国 Oklahoma 大学的 Wei R. Chen 等人^[13-14]提出一种新的肿瘤疗法——激光免疫疗法(Laser immunotherapy),将选择性光热治疗与药物免疫治疗相结合,利用 Indocyanine green (ICG) 辅助近红外激光(805 nm)选择性热破坏瘤体,在免疫辅佐剂(Glycated chitosan)作用下激励和增强主体免疫系统的抗癌响应,达到治疗目的。利用激光免疫疗法对 4 名 IV 级和 2 名 III 级皮肤黑素瘤患者进行临床治疗,结果 2 名 IV 级患者存活,其中 1 名肿瘤完全去除,2 名 III 级患者全部存活且肿瘤去除。由此可见,激光免疫疗法能够产生长期的、系统的抗癌免疫性,将成为肿瘤的有效治疗方法,目前有必要进行更多的临床研究以优化其治疗参数及证实其安全

有效性。

2003 年以来,一种新的激光肿瘤治疗方法受到研究者的广泛关注——选择性光热治疗,利用金纳米壳、金纳米棒、碳纳米管等纳米材料标定肿瘤细胞,促使其选择性吸收近红外激光,产生局部高热破坏肿瘤细胞,避免损伤周边正常组织,从而达到治疗肿瘤的目的^[15-18]。目前,这种治疗方法还处于动物试验阶段,有望近 10 年内应用到临床,成为一种有效的肿瘤治疗方法。

2.5 激光理疗

波长为 800~900 nm 的半导体激光低强度照射可以刺激局部血液循环、促进细胞生长、提高免疫力、缓解疼痛以及促进伤口愈合等,已广泛用于康复与理疗。华南师大的刘颂豪等人^[19]在中医理论基础上提出了光量子中医信息疗法,运用多束仿针灸信息调制的红色激光束(中心波长为 650 nm,功率 10~20 mW)照射口咽部及相关穴位等各种敏感组织,启动神经-体液调节机制和经络调节机制的协同作用,改善机体血液循环和组织供血,促进组织细胞新陈代谢,提高机体抵抗疾病的能力,达到逆转疾病过程和治病、康复的目的,是一种用于治疗心脑血管缺血性疾病的无创光量子体外照射疗法。

2.6 激光美容

在医学美容领域,激光的主要应用之一就是激光脱毛,在欧美发达国家已经发展相当成熟。据统计,2006 年内全球范围内进行的激光脱毛手术达 310 万人次,较 2005 年增长 22%,预计还将以 18% 的年增长率上升。810 nm 半导体激光能够很好地被毛囊内的黑色素吸收,产生热效应,破坏毛囊,是激光脱毛的标准。目前,国际上的激光脱毛仪主要有美国 Lumenis 公司的 Lightsheer 脱毛仪、德国 Asclepion-meditec 激光技术公司的 MeDioStar XT 系列、以色列 Alma 公司的 Soprano[®] XL 系列脱毛仪等。RUBE J. PARDO 等人^[20]利用 LightSheer 对 144 名 II-V 级患者的 250 处部位进行了 800 次的激光脱毛手术,84% 部位在 2 次治疗后效果非常明显,治疗舒适感达

96%以上。

半导体激光在美容领域的另一个重要应用是皮肤重建手术,用于除皱、嫩肤。Candela 公司研发的半导体激光治疗仪 SmoothBeam,激光波长为 1 450 nm,脉宽为 210 ms,能量密度 8~25 J/cm²,激光被真皮胶原组织中的水分吸收,产生热效应,刺激胶原蛋白的再生和重塑,使皮肤变得光滑细嫩,恢复弹性。Dilip Y. Paithankar^[21]等人应用 SmoothBeam 半导体激光治疗仪非消融性祛除皱纹,效果极佳,治疗时结合动力冷却,可以保护表皮组织,减少并发症产生。此外,Syneron Medical 公司提出一种新的非消融性激光嫩肤技术——ELOS 技术,将半导体激光(905 nm±10 nm)与 RF 射频源相结合,半导体激光选择性作用于真皮胶原组织,产生热效应使其阻抗降低,促进射频能量进一步加热胶原组织,产生新的胶原质,抚平皱纹。NEIL S. SADICK 等人^[22]利用 ELOS 技术对 23 名 II-IV 级脸上皱纹患者进行治疗,激光能量密度 30~50 J/cm²,治疗 3 疗程后 50% 的患者皱纹减少 50% 以上,且皮肤光滑度和质地都有明显提高。ELOS 技术较其它非消融性皮肤重建术的优点在于降低激光能量,减少皮肤色素沉着、伤疤等副作用。

粉刺是最常见的一种皮肤疾病,在青少年人群中的发病率达到 80% 以上。Candela 公司研发的 SmoothBeam 激光治疗仪利用 1 450 nm 半导体激光的选择性光热作用改善表皮下皮脂腺结构,配备动力冷却装置保护表皮,对脸、背部粉刺和痤疮愈合疤痕的治疗十分有效^[23]。此外,Anderson 等人^[24]提出,915 nm 的半导体激光能选择性被皮脂腺吸收,产生热量,破坏增大的皮脂腺,有望应用于粉刺的治疗。

2.7 激光整形

半导体激光在医疗整形领域的一项重要应用是激光辅助烧脂。近 10 年来,半导体激光融脂发展非常迅速,各种医疗仪器不断涌现:意大利 DEKA 公司研制的 TriActive 治疗系统集低能 810 nm 半导体激光、接触式冷却、抽吸按摩装置于一体,促进淋巴、血液循环,加速新陈代谢,是美国 FDA 认证的专用

于治疗局部脂肪堆积的仪器;意大利 Eufoton 公司研发的 LAS6mar1500 激光治疗仪,输出波长 1 470 nm 的激光,能够选择性被脂肪组织和水吸收,可在局部麻醉、无切口的条件下快速进行脂肪灼烧手术,保证皮肤的快速回缩;美国 Eleme MEDICAL 公司研制的 SMOOTHSHARPES 治疗仪将双波长激光与机械按摩相结合,其中 915 nm 激光被皮下脂肪组织选择性吸收,温度升高导致脂肪融解,650 nm 低能激光改善细胞膜的渗透性,使融解的脂肪流入细胞间隙当中,在机械按摩的辅助下将其从细胞间隙转移到淋巴系统,从而修复肥大脂肪细胞和僵硬胶原质,减少脂肪堆积。ELLIOT LACH 等人^[25]利用该系统对 74 名患者进行为期 4~6 周的临床治疗,术后 88.9% 的患者对治疗效果满意,其中 31.9% 的患者相当满意。

此外,Jean Pascal Reynaud 等人^[26]利用 980 nm 半导体激光对 334 名患者进行 534 次激光脂解手术,激光能量在 2 200~51 000 J 之间,多数患者的局部形态和皮肤术后立即得到修正和收缩,没有浮肿、伤疤、色素沉着、感染等不良反应。由此可见,980 nm 半导体激光辅助烧脂有望成为瘦身整形的新手段。

2.8 眼科

眼科中最常用的的热源是产生 810 nm 近红外激光的半导体激光器,此波长的激光穿透能力强,屈光间质对其吸收最少,而且光斑可调节的范围较大。国内外许多研究报道表明,低功率 810 nm 半导体激光器可用于治疗各种难治性青光眼、硅油注入术后难治性高眼压,以及视网膜的光凝和固定等。

临床使用表明,使用 810 nm 半导体激光治疗角膜移植术后青光眼,与 Nd:YAG (1 064 nm) 相比,穿透巩膜所需能量较低,能量可更好地被黑色素吸收,不会因屈光间质吸收过多的能量而造成热损伤,时间也较短。

3 半导体激光医疗设备的发展现状与趋势

随着半导体激光技术的发展成熟,激光波长范

围的不断扩大,自身特有的优势不断增大,其在医疗领域的应用也在不断拓展,几乎覆盖了其它激光器的应用范围。它不仅弥补了高能 CO₂ 激光不易光纤传输、操作不便的缺点,而且弥补了灯泵浦固体激光器效率低、散热麻烦的缺点,有望成为医用激光的主流。

在半导体激光医疗设备的研制方面,美国、欧洲、日本等发达国家处于领先地位。激光医疗设备不仅在其国内获得广泛应用,而且大量出口,行销全球各地。在激光治疗设备输出波长方面,基本涵盖了红光至红外光的整个范围,如表2所示。而在仪器类型方面,除了激光手术治疗设备占重要市场份额外,激光美容设备与激光诊断分析仪器所占市场份额不断增加。目前,国内半导体激光医疗设备研发较多地集中在低功率设备方面,主要应用于激光理疗,波段主要有 650,810,830 nm 等。而在高功率半导体激光医疗设备研制方面较为落后,高端产品主要依赖进口,生产高功率半导体激光医疗设备的厂商只有很少

的几家,如武汉凌云、武汉博激世纪等。

归纳起来,半导体激光医疗设备的研发向着智能化、小型化、集成化、多功能、家用化方向发展,体现在以下几个方面:

1. 新波段:为了适应各种疾病的诊断与治疗,不同波段的半导体激光医疗设备不断涌现。

2. 功能完善:随着应用的拓展,半导体激光医疗设备集成度不断提高,功能不断提升和完善,以方便人们使用。例如:智能激光温度控制,自动高低温报警和控制系统,内置激光功率反馈监测系统,自主查询帮助和学习功能,治疗参数评估系统等。

3. 小型化、家用化:为了便于携带和拓展广阔的农村诊所以及家庭应用的市场,半导体激光医疗设备不断朝着小型化、家用化方向发展。

4. 多波长组合激光医疗设备的研发:充分利用各种波长激光优势,得到更好的治疗效果,在临床上做到一机多用。

5. 半导体激光技术与其他先进医疗技术相结合:

表2 国际半导体激光治疗设备研制状况

波长 (nm)	公司	波长 (nm)	公司
630~690	英国Diomed公司 德国Carlzeiss 公司	980	德国Biolitec 公司 以色列KaVo公司 西班牙Inter-medice公司 以色列MSq 公司 意大利Quanta System公司 美国康奥公司 美国Sirona Dental systems GmbH 意大利Lasering公司 意大利EUFOTON MEDICA LASER 公司
810	英国SURGILAS公司 美国BIOLASE公司 美国Lumenis公司 德国Biolitec 公司 意大利Lasering公司 以色列Alma公司 西班牙INTER-MEDIC 德国Asclepion-meditec公司	1 450	美国Candela公司 美国Reliant公司
915	意大利DLMEDICA 公司 美国Eleme Medical公司 韩国Eins Med 公司	1 470	德国Biolitec 公司 西班牙Dornier MedTech 意大利EUFOTON MEDICA LASER 公司
940	西班牙Dornier MedTech 德国 ARC公司 意大利Quanta system公司 美国BIOLASE公司	1 540	意大利Quanta System 美国Reliant公司 法国Quantelmedical公司

随着激光治疗技术和美容技术的发展,医疗设备开始走向激光与射频、聚焦超声、等离子冷喷等多种复合技术相结合,以满足美容等领域的新需求。

4 我国半导体激光医疗的发展前景

我国激光医疗事业起步较西方发达国家要晚,但近几年随着激光医疗技术在我国迅速普及以及政府对医疗基础设施投入的增加,我国激光医疗器械市场增长迅速。据 Sinotes 市场调查统计,2005 年以来我国激光医疗设备市场规模一直以 20% 左右的增长率快速增长,年销售额由 2005 年的 11.1 亿元人民币增长到 2009 年的 24 亿元人民币,如图 1 所示^[27]。我国已成为仅次于美国、日本的世界第三大激光医疗市场,具有很大的发展潜力。

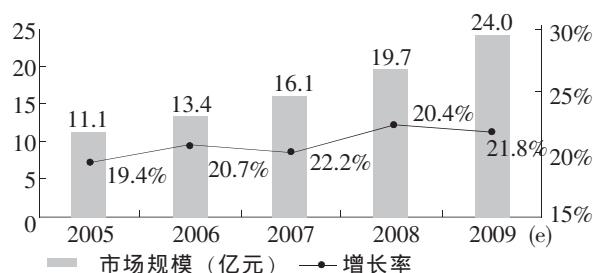


图 1 我国激光医疗市场规模及其增长率

我国半导体激光医疗还处在初始阶段,整体水平与国际发达国家相比还具有很大差距,国内医疗机构设备主要依靠进口。但是,随着我国半导体激光技术的不断发展、各学科工作者的不懈努力以及我国广阔市场的推动,我国高端半导体激光医疗设备的研制水平必将有新的提高,我国的整体激光医疗水平也将步上新台阶。

参考文献

- [1] Dteele R V. Laser marketplace 2008: Diode lasers track long-term trend[EB/OL]. [2008-1]. <http://www.optoiq.com/index/photronics-technologies-applications/lfw-display/lfw-article-display/318564/articles/laser-focus-world/volume-44/issue-2/features/laser-marketplace-2008-diode-lasers-track-long-term-trend.html>.
- [2] 苏华, 李守春, 王立军. 半导体激光器在医疗上的应用及其前景展望[J]. 应用激光, 2006, 26(2): 125-130.
- [3] Min R J, Khilnani N, Zimmet S E, et al. Endovenous laser treatment of saphenous vein reflux: Long-term results[J]. *J Vasc Interv Radiol*, 2003, 14(8): 991-996.
- [4] Van den Bos R R, Kockaert M A, Neumann H A M, et al. Technical review of endovenous laser therapy for varicose veins[J]. *Eur J Vasc Endovasc Surg*, 2008, 35(1): 88-95.
- [5] Oh C K, Jung D S, Jang H S, et al. Endovenous laser surgery of the incompetent greater saphenous vein with a 980 nm diode laser[J]. *Dermatol Surg*, 2003, 29(11): 1135-1140.
- [6] Chang C J, Chua J J. Endovenous laser photocoagulation(EVLP) for varicose veins[J]. *Lasers Surg Med*, 2002, 31(4): 257-262.
- [7] Pannier F, Rabe E, Maurins U. First results with a new 1 470-nm diode laser for endovenous ablation of incompetent saphenous veins[J]. *Phlebology*, 2009, 24: 26-30.
- [8] Muschter R. Current status of laser treatment of BPH[J]. *Med. Laser Appl.*, 2001, 16(1): 5-14.
- [9] Seitz M, Ruszat R, Bayer T, et al. Ex vivo and in vivo investigations of the novel 1 470 nm diode laser for potential treatment of benign prostatic enlargement[J]. *Lasers Med Sci*, 2009, 24(3): 419-424.
- [10] Seitz M, Sroka R, Gratzke C, et al. The diode laser: A novel side-firing approach for laser vaporisation of the human prostate—immediate efficacy and 1-year follow-up[J]. *European Urology*, 2007, 52(6): 1717-1722.
- [11] Pirnat S. Versatility of an 810 nm diode laser in dentistry: An overview [J]. *Journal of Laser and Health Acade-*

- my, 2007(4): 1-9.
- [12] Fornaini C, Rocca J P, Bertrand M F, *et al.* Nd:YAG and diode laser in the surgical management of soft tissues related to orthodontic treatment[J]. *Photomedicine and Laser Surgery*, 2007, 25(5): 381-392.
- [13] Naylor M F, Nordquist R E, Teague T K, *et al.* In situ photoimmunotherapy for melanoma: Preliminary clinical results[J]. *SPIE*, 2006, 6087: 608709-1-7.
- [14] Naylor M F, Nordquist R E, Teague T K, *et al.* In situ photoimmunotherapy for melanoma: An ongoing phase I clinical trial[J]. *SPIE*, 2007, 6438: 643807-1-9.
- [15] Huang X H, El-Sayed I H, Qian W, *et al.* Cancer cell imaging and photothermal therapy in the near-infrared region by using gold nanorods[J]. *J. AM. CHEM. SOC*, 2006, 128(6): 2115-2120.
- [16] Hirsch L R, Stafford R J, Bankson J A, *et al.* Nanoshell-mediated near-infrared thermal therapy of tumors under magnetic resonance guidance[J]. *PNAS*, 2003, 100(23): 13549-13554.
- [17] Zhou F F, Xing D, Ou Z M, *et al.* Cancer photothermal therapy in the near-infrared region by using single-walled carbon nanotubes[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2009, 14(2): 021009-1-7.
- [18] Chen W R, Andrienko K, Bartels K E, *et al.* Laser photothermal therapy in treatment of mouse melanoma[J]. *SPIE*, 2005, 5695: 236-242.
- [19] 刘颂豪, 郭周义, 唐洁媛, 等. 具有中医特色的光量子疗法——光子中医信息疗法[J]. 中国科学 G 辑, 2007, 37(21): 13-20.
- [20] Pardo R J, Fahey J. Use of the lightSheer™ diode laser system for hair reduction: Safety and efficacy in a large series of treatments[EB/OL]. [2001-2]. http://www.aesthetic.lumenis.com/pdf/safety_efficacy.pdf
- [21] Paithankar D Y, Clifford J M, Saleh B A, *et al.* Subsurface skin renewal by treatment with a 1450-nm laser in combination with dynamic cooling[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2003, 8(3): 545-551.
- [22] Sadick N S, Trelles M A. Nonablative wrinkle treatment of the face and neck using a combined diode laser and radiofrequency technology[J]. *Dermatol Surg*, 2005, 31(12): 1695-1699.
- [23] Jih M H, Friedman P M, Goldberg L H, *et al.* The 1 450 nm diode laser for facial inflammatory acne vulgaris: Dose-response and 12-month follow-up study[J]. *J Am Acad Dermatol*, 2006, 55(1): 80-87.
- [24] Anderson R R, Farinelli W, Laubach H, *et al.* Selective photothermolysis of lipid-rich tissues: A free electron laser study[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2006, 38(10): 913-919.
- [25] Lach E. Reduction of subcutaneous fat and improvement in cellulite appearance by dual-wavelength, low-level laser energy combined with vacuum and massage[J]. *Journal of Cosmetic and Laser Therapy*, 2008, 10(4): 202-209.
- [26] Reynaud J P, Skibinski M, Wassmer B, *et al.* Lipolysis using a 980-nm diode laser: A retrospective analysis of 534 procedures[J]. *Aesth Plast Surg*, 2009, 33(1): 28-36.
- [27] Sinoes.Net. 09 年上半年我国激光医疗器械市场规模近 12 亿元[EB/OL]. [2009-11-20]. <http://www.sinotes.net/shownews.asp?id=1200>

作者简介: 李艳华 (1983-), 女, 汉族, 河北衡水人, 在读研究生, 2008年于河北工业大学获得学士学位, 主要从事光电子器件性能与应用方面的研究。E-mail: LIYH_270627677@163.com