

文章编号 1004-924X(2012)02-0247-09

## 半导体激光鼓膜造孔术的光学系统设计

郝明明<sup>1,2</sup>, 刘云<sup>1\*</sup>, 王彪<sup>1</sup>, 曹军胜<sup>1</sup>,  
彭航宇<sup>1</sup>, 朱洪波<sup>1</sup>, 鄧峰利<sup>3</sup>, 单肖楠<sup>1</sup>, 王立军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 吉林大学 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:**设计并研制了一套可在视频监控和红光指示下实施半导体激光鼓膜造孔术的光学系统。首先,利用光束整形和波长合束技术将半导体激光单管出射的 650 nm 激光和半导体激光阵列出射的 810 nm 激光耦合到芯径为 200  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.22 的光纤中;然后,利用消色差透镜准直光纤出射的双波长激光,再利用另一个消色差透镜将光束聚焦到耳鼓膜上,该聚焦镜可通过机械部件沿光轴方向移动,从而调节鼓膜上光斑的大小;成像部分则直接使用商用视频耳镜;热反射镜用于使激光和成像光同轴。手术时,根据显示器上的红色指示光斑确定造孔位置。测量结果显示:该系统出光孔处的激光功率在 0~13.3 W 间连续可调,造孔直径在 1~3 mm 内连续可调。使用本系统可缩短手术时间,减少并发症;儿童患者手术时无需全身麻醉。另外,该系统还具有整机体积小、重量轻、电光转换效率高等优点。

**关键词:**光纤耦合半导体激光器;激光鼓膜造孔术;红光指示;热反射镜;消色差透镜

**中图分类号:** TN248.4; TH785.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122002.0247

## Design of optical system for diode laser myringotomy

HAO Ming-ming<sup>1,2</sup>, LIU Yun<sup>1\*</sup>, WANG Biao<sup>1</sup>, CAO Jun-sheng<sup>1</sup>,  
PENG Hang-yu<sup>1</sup>, ZHU Hong-bo<sup>1</sup>, GAO Feng-li<sup>3</sup>, SHAN Xiao-nan<sup>1</sup>, WANG Li-jun<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;  
3. College of Electronic Science & Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

\* Corresponding author, E-mail: hs5252@sohu.com

**Abstract:** An optical system to perform the semiconductor laser myringotomy with the help of a video display and a pilot laser was designed and manufactured. First, the 650 nm laser output from a single emitter and the 810 nm laser emitted from a laser diode array were coupled into a fiber with a core diameter of 200  $\mu\text{m}$  and a numerical aperture of 0.22 by using beam shaping and wavelength beam combination technologies. Then, an achromatic lens was used to collimate the dual wavelength laser output from the optical fiber and the other achromatic lens which could move along principal axis and consequently change the spot size was used to focus the dual wavelength laser to the eardrum. Mean-

收稿日期: 2011-06-03; 修订日期: 2011-07-06.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (No. 61006054); 吉林省科技厅科技发展计划资助项目 (No. 20080517; No. 20100352); 吉林大学科学前沿与交叉学科创新项目 (No. 200903089)

while, laser and imaging lights were coupled as coaxial by using a hot mirror and the imaging components from markets. Moreover, the location of myringotomy could be piloted by red light on a computer monitor. According to the results of measurement, the laser power output from the system can be continuously adjusted from 0 to 13.3 W, and the spot size can also be adjusted between 1—3 mm. The system can decrease the operation time and the possibility of surgery side effect; moreover, the myringotomy for children needs not any anesthesia. In addition, the system has the virtues of low volume, light weighted and high wall-plug efficiencies compared with other candidates.

**Key words:** fiber coupled diode laser; diode laser myringotomy; red laser pilot; hot mirror; achromatic lens

## 1 引言

分泌性中耳炎 (Secretory Otitis Media, SOM) 是一种以鼓室积液及听力下降为特征的中耳非化脓性炎症, 是导致传导性耳聋的重要病因<sup>[1]</sup>, 一般采用直视鼓膜切开术和鼓室置管术来治疗。但是, 这两种传统手术存在不可避免的缺点: 一是手术时, 儿童需要全身麻醉, 成人需要表面麻醉<sup>[2]</sup>; 二是耳道狭窄, 手术刀容易挡住视野, 从而对手术者水平要求较高。此外, 传统手术还伴随许多并发症: 如耳漏或中耳感染流脓, 鼓膜穿孔, 继发胆脂瘤等<sup>[3]</sup>。尽管早期应用鼓膜切开放置管术治疗分泌性中耳炎, 短期内可有效提高听力, 但是, 手术仍存在一定的并发症, 有少数患者远期听力恢复欠佳。

近年来, CO<sub>2</sub> 激光作为精确的“手术刀”在耳科领域得到了广泛应用。Goode 首次采用功率为 12 W、持续时间为 0.1 s 的单脉冲 CO<sub>2</sub> 激光治疗成人分泌性中耳炎<sup>[4]</sup>; Hassmann 等选择功率为 15 W、持续时间为 0~2 s 的单脉冲 CO<sub>2</sub> 激光治疗儿童分泌性中耳炎<sup>[5]</sup>。这些研究表明: 利用 CO<sub>2</sub> 激光鼓膜造孔术治疗分泌性中耳炎, 不但操作简便、安全性高、患者痛苦小, 而且, 术后出现鼓膜永久穿孔、中耳感染、继发性胆脂瘤等并发症的可能性也比较小<sup>[6]</sup>。因此, 采用激光鼓膜造孔术治疗分泌性中耳炎得到广泛研究和临床应用。孝感市中心医院采用阳光神琦医用科技有限公司生产的 YG100A 型 Nd: YAG 激光光纤手术器对 118 例患者进行鼓膜造孔术, 其治愈率可达 86.2%、好转率达 8.0%, 总有效率为 94.2%<sup>[7]</sup>。然而, 该激光手术设备整机质量达 60 kg, 体积为

800 mm×360 mm×930 mm(长×宽×高), 功耗为 4 kW, 根据它最大激光功率为 100 W 计算, 插头效率仅为 2.5%。

在外科领域中较常用的有 CO<sub>2</sub> 激光器和 Nd: YAG 激光器, 但是它们的体积大, 不易携带, 而且, CO<sub>2</sub> 激光器还不易用光纤传导。目前, 光纤耦合输出的半导体激光手术刀已逐步进入医疗市场, 半导体激光对组织照射穿透较深, 比较适于切割组织。高功率半导体激光器与性能相同的 CO<sub>2</sub> 及 Nd: YAG 激光器相比, 体积小、价格便宜、转换效率高、工作寿命长、无需水冷, 还可以在门诊使用, 这些优点使其成为新一代的医用激光手术刀。随着高功率半导体激光器波长的不断扩展、输出功率的逐渐提高, 在医疗上的应用日益引人注目, 有取代其他类型激光器成为主流医用激光器的趋势<sup>[8-9]</sup>。

目前, 半导体激光应用于鼓膜造孔术已经进入临床研究阶段。哈尔滨医科大学第一临床医学院报道了 32 例采用耳内窥镜下半导体激光鼓膜打孔治疗分泌性中耳炎的案例, 这些患者均采用鼓室穿刺等保守治疗方法无效; 但经 8~10 W、光斑尺寸在 1~3 mm 的半导体激光鼓膜打孔后, 治愈 17 例(53.1%), 好转 10 例(31.3%), 总有效率为 84.4%, 无效 3 例(9.4%), 复发 2 例(6.3%), 未见并发症。该治疗采用了德国 Stoze 耳用内窥镜(0°和 30°, 直径为 2.7 mm) 和英国 Diomed II 型半导体激光<sup>[10]</sup>。由于耳内窥镜只能用于检查, 因此手术中还需要与内镜鞘配合才能将激光纤维插入, 这样就增加了操作的复杂性, 延长了手术时间, 加大了出现手术并发症的风险; 并且利用光纤头直接进行手术不但容易引起交叉感染而且还难于调节光斑尺寸。基于此, 本实验设计了一套可

以在视频监控下进行半导体激光鼓膜造孔术的光学系统。该系统利用光学透镜将激光聚焦在耳鼓膜上,使光纤出光端远离鼓膜从而避免交叉感染。在红光指示下实施手术,手术者可以在监视器上方便地选择所造孔的位置和大小,因而可以有效地缩短手术时间,降低出现手术并发症的可能性。

## 2 系统组成及功能

本实验设计的半导体激光鼓膜造孔术光学系统如图1所示,它要求由红光来指示手术激光的位置和大小,功率最小在0~10 W可调,所造孔的大小要求在1~3 mm内连续调节。

本系统主要组成部分为:红光指示光纤耦合

半导体激光器、光纤准直镜、激光聚焦镜、热反射镜(Hot mirror)和台湾 Dino-lite 视频耳镜。工作原理为:首先利用合束技术将半导体激光单管出射的 650 nm 激光和 CS 封装半导体激光阵列出射的 810 nm 激光耦合到芯径为 200  $\mu\text{m}$ ,数值孔径  $\text{NA}=0.22$  的光纤中;其次,利用消色差透镜将光纤出射的激光进行准直;再利用另一个消色差透镜将双波长激光聚焦到耳鼓膜上,该透镜可在机械传动装置作用下轴向移动 30 mm,所以光斑尺寸可在 1~3 mm 连续调节;与此同时,利用 Edmund 公司的热反射镜将激光和成像光耦合成为同轴光路(图中实线箭头表示激光传输方向,虚线则表示成像光的传输方向)。

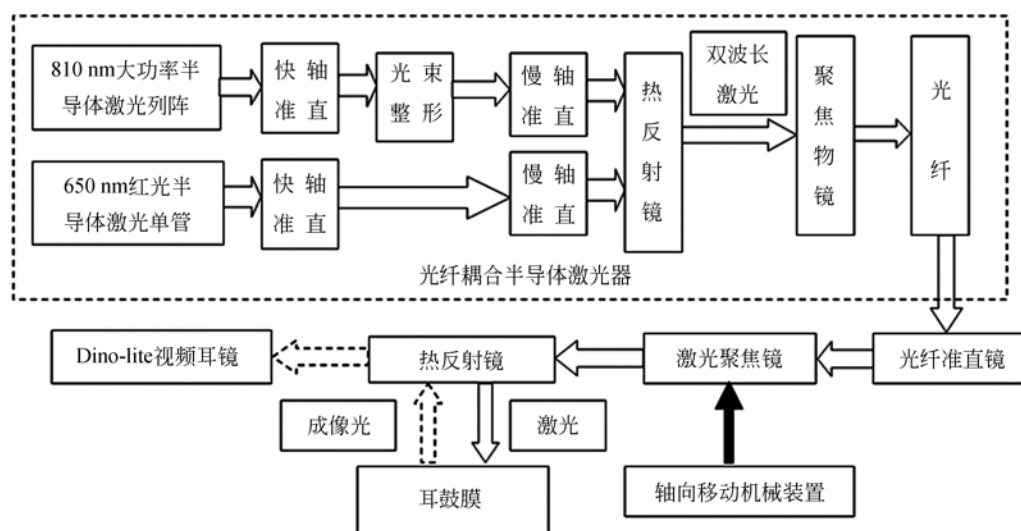


图1 半导体激光鼓膜造孔光学系统

Fig. 1 Block diagram of optical system for diode laser myringotomy

## 3 光学系统设计

### 3.1 带有红光指示的光纤耦合半导体激光器

本系统要求手术激光的功率大于 10 W,为了留有足够余量,选用了出光功率为 20 W 的半导体激光阵列。

首先引入光参数积(BPP)的概念来表征激光光束的特性,其定义为束腰直径一半与远场发散角一半的乘积<sup>[11]</sup>:

$$\text{BPP} = \frac{1}{2} \omega \times \frac{1}{2} \theta. \quad (1)$$

系统要求光纤的参数为:芯径  $\omega_f = 200 \mu\text{m}$ ,  $\text{NA}=0.22$ ,所以它的光束参数乘积为:

$$\text{BPP}_f = \frac{1}{2} \omega_f \times \frac{1}{2} \theta_f = 22 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (2)$$

由于整形后半半导体激光的近场和远场均为矩形分布,所以要求半导体激光快慢轴方向的光参数积最大值为:

$$\text{BPP}_{\text{FA,SA}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \omega_f \times \frac{1}{2\sqrt{2}} \theta_f = 11 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (3)$$

理论上要求半导体激光的  $\text{BPP}_{\text{FA,SA}}$  均小于 11  $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ ,然而半导体激光的光强一般为高

斯分布,所以在实际设计中公式(3)是最高的要求<sup>[12]</sup>。

为了将激光高效地耦合到细芯径光纤中,本实验采用了高光束质量的半导体激光阵列,其具体参数如表 1 所示。根据公式(1)计算出快慢轴方向的光束质量,可知慢轴方向的  $BPP_{SA}$  远大于

公式(3)的要求值,这不仅因为阵列的宽度  $W_{SA}$  比较大,而且有 80% 的不发光区域(死光区);而快轴方向  $BPP_{FA}$  却远小于它的要求。因此,必须进行光束整形,即将半导体激光阵列慢轴  $BPP_{SA}$  减小,同时增大快轴方向  $BPP_{FA}$ 。目前,常用的方法有阶梯镜法、棱镜组整形法等<sup>[11,13]</sup>。

表 1 半导体激光阵列光学参数

Tab. 1 Optical parameters of diode laser array

快轴方向		慢轴方向					
束腰直径	远场发散角	阵列宽度	单元个数	单元条宽	单元间隔	填充因子	慢轴发散角
$\omega_{FA}$	$\theta_{FA}$	$W_{SA}$	$N$	$\omega_{SA}$	$S_b$	FF	$\theta_{SA}$
1 $\mu\text{m}$	70° (95%功率)	10 mm	19	100 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$	20%	12° (95%功率)

本文采用 LIMO 公司生产的光束转换器(BTS)来整形,它具有结构简单、整形时光轴无需偏折的优点。图 2 为 BTS 的外形图。根据 LIMO 产品手册,BTS 是由快轴准直镜 FAC 和 45° 倾斜柱透镜阵列组成的。因为半导体激光快轴的发散角达 70°,所以 FAC 是一个非球面的柱透镜,它可达到衍射极限的准直效果。准直后快轴方向发散角  $\theta_{FAC}'$  和光斑尺寸  $\omega_{FAC}'$  理论上分别为 3.45 mrad 和 0.41 mm。受加工精度、装调误差及 Smile 效应等影响,准直后快轴发散角会变大,在 LIMO 产品手册中准直后  $\theta_{FAC}' \leq 8$  mrad。

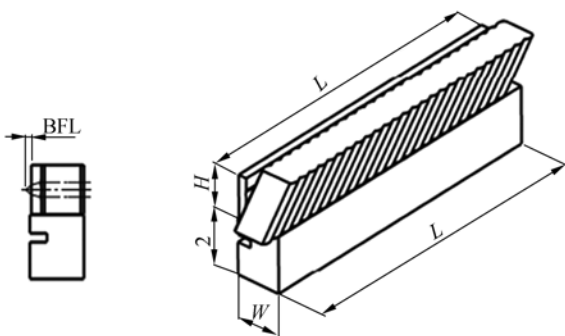


图 2 BTS 的外形图  
Fig. 2 Figuration of BTS

将半导体激光阵列安装在 FAC 的后焦距处,则激光快轴方向发散角被压缩并且每个发光点旋转 90°,此时激光阵列的光参数积为:

$$BPP_{BTSFA} \leq \frac{\omega_{FA}}{2} \times \frac{\theta_{FA}'}{2} = 20 \text{ mm} \cdot \text{mrad}, \quad (4)$$

$$BPP_{BTSSA} \leq \frac{\omega_{SA}}{2} \times \frac{\theta_{SA}}{2} = 5.24 \text{ mm} \cdot \text{mrad}. \quad (5)$$

整形后慢轴方向发散角仍为 12°(95%功率)所以需要准直,焦距  $f_{SA}'$  由下式决定:

$$f_{SA}' = \frac{\omega_{SA}}{2 \tan(\theta_{SA}'/2)}, \quad (6)$$

式中,  $\theta_{SA}'$  为准直后慢轴发散角,为了使聚焦后激光光斑对称,取  $\theta_{SA}' = \theta_{FA}' = 8$  mrad,得  $f_{SA}' = 12.46$  mm。

在与成像光同轴耦合过程中,指示光通过热反射镜时损耗比较大,所以选用连续输出功率为 50 mW 的 650 nm 半导体激光单管,它的快慢轴出光孔径分别为 1  $\mu\text{m}$  和 100  $\mu\text{m}$ ,发散角为 10°和 70°(95%光功率)。这个过程也需要进行快慢轴准直,准直透镜参数确定方法与上述 810 nm 激光相同。

为了将 650 nm 激光和 810 nm 激光合为一束,同时又不增加近红外激光的 BPP,本实验利用 Edmund 公司的热反射镜将它们进行波长合束,图 3 是该公司提供的在 45° 入射反射镜时,光束的透过率和反射率同波长的关系图。从图可知,45° 入射时,650 nm 激光透过率大于 90%,而 810 nm 激光的反射率大于 95%。

波长合束后激光快慢轴方向的光斑尺寸为 10 mm × 2.6 mm,所以光斑对角线尺寸为  $D = 10.33$  mm。激光聚焦镜的  $NA = 0.22$ ,可计算出它的焦距为 24.5 mm。

此时激光特性为双波长、小发散角的光束,因而聚焦时只要求消除球差、正弦差和色差。本实

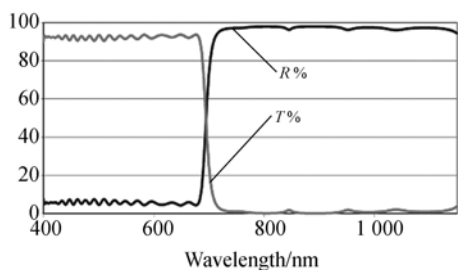


图 3 在 45°入射时,热反射镜反射率和透过率同波长的关系图

Fig. 3 Reflectivity and transmissivity vs. wavelength at 45° incidence angle

验根据初级像差理论,利用 PWC 法,求出了 2 片双胶合透镜组成的激光聚焦镜的初始结构,均为 K9 玻璃在前,ZF<sub>2</sub> 玻璃在后,此时可较好地矫正像差。之后将其导入到 Zemax 序列模式中,利用 Zemax 中默认优化函数并限制焦距为 24.5 mm,很快优化得到了达到衍射极限的结构图 4(a)。图 4(b)为它在 0°角视场和 0.23°(4 mrad)角视场的点列图。可知在视场角为 0°和视场半角为 0.23°时,点列图的几何弥散圆直径均小于艾里斑,达到衍射极限。

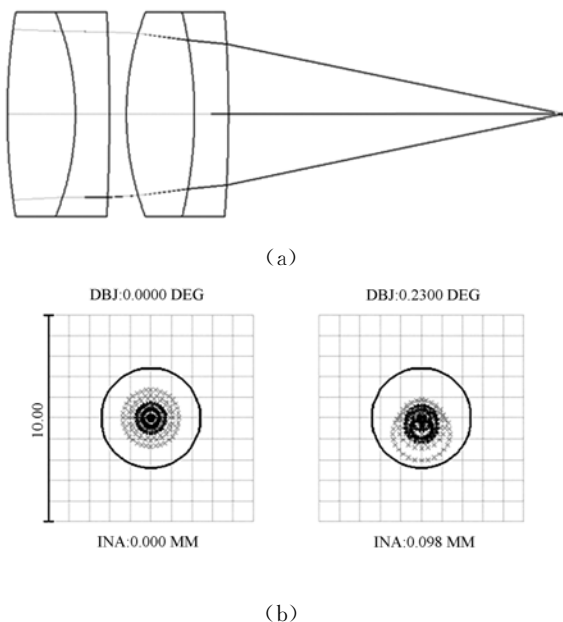


图 4 双波长聚焦镜光路图(a)及其点列图(b)

Fig. 4 Configuration of dual wavelength focusing lens (a) and its spot diagrams (b)

将上述各光学元件导入到 Zemax 非序列模式中,得到图 5 所示的光路图。由于从列阵出射的激光在  $x$  和  $z$  方向传播不对称,又给出了光束

转换过程的侧视图(图 6)。通过 Zemax 光线追迹得出在光纤出光端处 810 nm 激光功率为 16.3 W,650 nm 指示激光功率为 49.95 mW。最终得到了红光指示光纤耦合半导体激光模块。经测量,810 nm 激光功率为 14.5 W,指示激光功率为 41.6 mW。810 nm 激光耦合效率为 72.5%,而红光耦合效率高达 83.2%。耦合效率低于 Zemax 模拟值是因为光学元件加工精度、装调误差、半导体激光的 Smile 效应和所镀膜残余反射率等原因导致的。

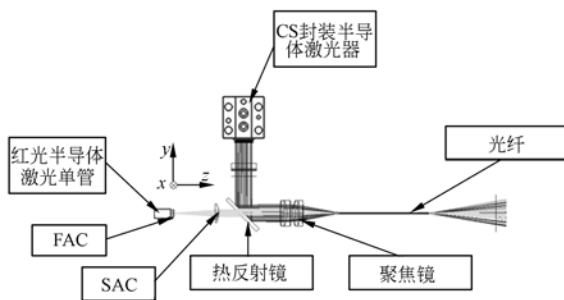


图 5 光纤耦合半导体激光器的 Zemax 模拟  
Fig. 5 Simulation of fiber coupled diode lasers by Zemax software

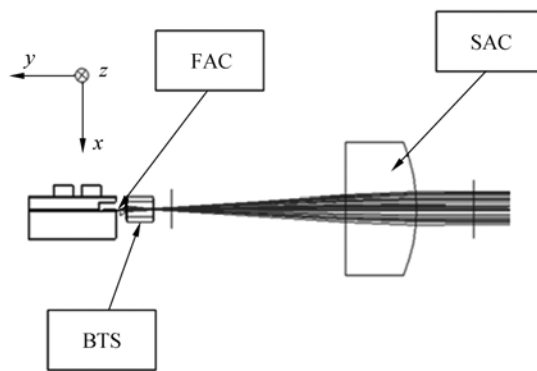


图 6 光束转换过程的侧视图  
Fig. 6 Side elevation of beam transform process

### 3.2 光纤出光的准直和聚焦

图 7 为光纤准直和聚焦的示意图,机械结构决定了聚焦镜的焦距  $f_2' = 100$  mm,通过机械套筒它可以轴向移动,移动幅度为 30 mm。 $L_1$  和  $L_2$  分别表示准直镜和聚焦镜,将光纤出光端固定在准直镜  $L_1$  的物方焦平面上,就可以使激光成为一束准平行的光束,当  $L_2$  移动时耳鼓膜即处于离焦位置从而调节光斑尺寸。在  $L_2$  像方焦平面处的光斑最小,它应该小于系统要求光斑的最小值。

经计算  $L_1$  的焦距应大于 20 mm。当  $L_2$  轴向移动 30 mm 时, 鼓膜上激光光斑尺寸  $D_e$  可在 1~3 mm 调节, 这决定了准直镜的焦距应大于 15.15

mm。由于激光为双波长, 本文设计了  $f_1' = 25$  mm 的双胶合准直镜和  $f_2' = 100$  mm 的双胶合聚焦镜。它们可较好地矫正像差, 满足使用要求。

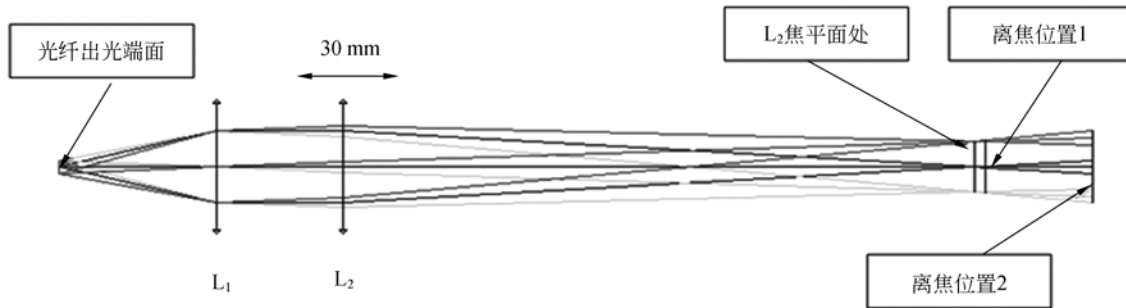


图 7 光纤准直和聚焦示意图

Fig. 7 Sketch map of collimation and focusing for laser output from fiber

### 3.3 激光光路和成像光路的同轴设计

为了能够在显示器上观测到激光光斑在耳鼓膜上的位置和大小, 需要将激光传输光路和成像光路同轴化, 光路图如图 8 所示。本文采用图 8 所示的热反射镜来实现光路同轴。该系统一方面要求高透射率的红光作为成像光, 另一方面要求指示光也具有一定反射。事实上数码耳镜可探测到小于 1 mW 的红光, 但由于巨大的反射损耗, 所以在设计红光指示光纤耦合半导体激光器时, 红光功率应大于 40 mW。

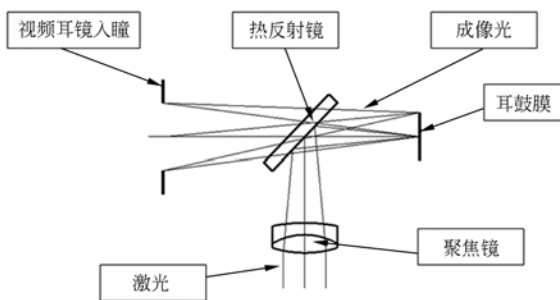


图 8 激光和成像光的耦合

Fig. 8 Coupling of laser and imaging light

如果发现激光光斑不在指定的位置, 通过旋转热反射镜可以调节位置, 由于平行平板的光学特性, 它对成像光路的影响可以忽略。

Dino-lite 数码耳镜是安鹏科技生产的, 它可以利用 LED 为耳鼓膜提供照明, 并且利用显微镜把耳鼓膜成像在 CCD 上, 通过 USB 接口把信号传输到电脑显示器上。

## 4 系统的总体安装与实验

基于以上设计, 本实验进行了相关的光学、机械设计和加工, 进行了整机的装配, 并接通了数码耳镜, 如图 9 所示。如果仅考虑光纤耦合半导体激光器和视频耳镜及套筒, 体积仅为 200 mm × 125 mm × 30 mm, 重量不足 600 g。打开 650 nm 半导体激光和视频成像开关, 并对耳鼓膜拍照, 得到了图 10 所示有红指示光斑的耳鼓膜图像, 可见同时达到了视频成像和激光聚焦的目的。通过旋转套筒调节光斑大小, 并且在坐标纸上进行了打孔实验, 如图 11 所示, 孔的大小可在 1~3 mm 连续调节。

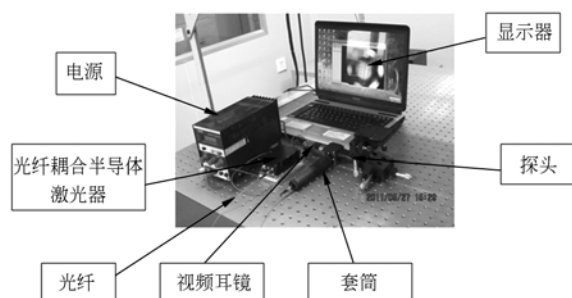


图 9 激光耳镜的实物图

Fig. 9 Photo of diode laser myringotomy system

最后, 利用 OPHIR 激光功率计对光纤出光端和耳镜头处的激光功率进行测量, 并将它绘制

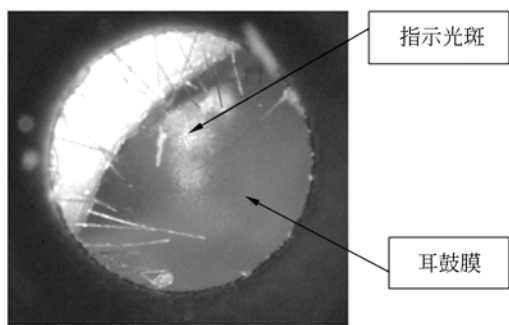


图 10 利用设计的系统拍摄的红光指示下的耳鼓膜照片  
Fig. 10 Tympanum photo shot by optical system with pilot laser

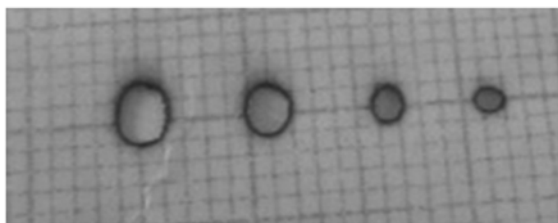


图 11 坐标纸上激光打孔实验  
Fig. 11 Laser drilling experiment on coordinate paper

成如图 12 所示的曲线。通过测量可知,耳镜头的最大出光功率为 13.3 W,是光纤出光的 91.7%。Edmund 公司给出的 810 nm 激光反射率大于 95%,其原因除了激光准直镜和聚焦镜表面反射损耗外,还可能是热反射镜对汇聚激光的反射率

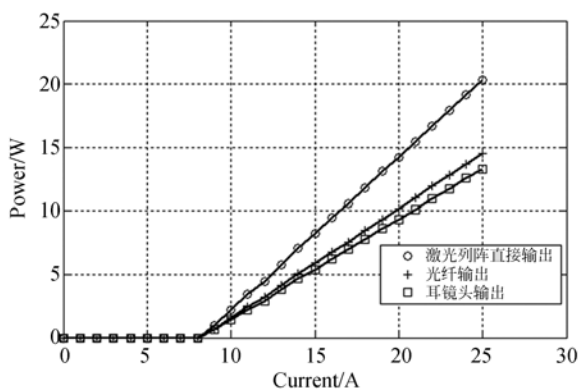


图 12 半导体激光阵列、光纤及耳镜头输出功率  
Fig. 12 Laser power outputs from diode laser array, fiber and specula

较小,而 Edmund 的参数是在 45°入射测得的,偏离 45°入射反射率会降低。激光工作电压为 1.73 V,所以总电光转换效率为 30.7%。

## 5 结 论

利用 BTS 将 810 nm 半导体激光阵列激射的激光进行整形并耦合到 200 μm 光纤中,解决了 LDA 光束质量差的问题。通过波长合束技术将 650 nm 和 810 nm 的激光合为一束激光;再利用热反射镜实现成像光和激光的同轴化,从而实现了可见激光指示下利用红外激光实施手术的目的。通过移动聚焦物镜产生一定的离焦,从而可以连续调节耳鼓膜上激光光斑的大小。

与其它类似功能的产品相比,本系统结构简单。如果只计算光纤耦合半导体激光器、视频耳镜头筒结构和耳镜头,它们的总体积仅为 200 mm×125 mm×30 mm,质量不足 600 g。因此,它具有体积小、重量轻、易于移动、成本低廉和使用方便等优点。测量显示其电光转换效率为 30.7%,远高于其它类型的激光器,具有节约能源的优点,而且还可以用蓄电池供电。接通该系统,可以拍摄到有指示光斑的耳鼓膜图片。在坐标纸上进行了激光打孔实验,得到了 1~3 mm 直径的孔。手术激光功率和脉冲宽度的调节仅需设定激光电源。因此,本系统可成功实施鼓膜造孔术。

本系统的不足之处在于:(1)光纤耦合效率较低,下一步将采用 mini-bar 来进行光纤耦合,该方法无需光束整形,快慢轴准直之后即可实现光纤耦合,所以耦合效率更高;(2)指示激光光斑并不是标准的圆形,而是一个椭圆,其原因在于热反射镜两面平行度不高;(3)由于在原视频耳镜头的显微物镜前插入了热反射镜,相当于增加了物距,导致其放大倍率降低,因此有必要研制视频耳镜头。

## 参考文献:

- [1] 刘利敏,罗军,董明敏. 分泌性中耳炎临床疗效观察[J]. 中华耳科学杂志,2009,7(2):126-129.  
LIU L M, LUO J, DONG M M. Treatment of secretory otitis media: a case review[J]. *Chinese Journal of Otolaryngology*, 2009, 7(2):126-129. (in Chinese)
- [2] 陈杰,高下,王健,等. 耳内窥镜下鼓膜切开置管术 30 例疗效分析[J]. 山东大学基础医学院学报, 2004,18(6):381.  
CHEN J, GAO X, WANG J, *et al.*. Therapeutic effect analyses of thirty patients treated by Myringotomy with tube insertion by using otoscope[J]. *J. Preclin. Med. Coli. Shandong Univ.*, 2004, 18(6):381. (in Chinese)
- [3] 陈良嗣,彭解人,许耀东,等. 儿童鼓膜切开置管术的并发症及其防治[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2001,9(4):224-226.  
CHEN L S, PENG J R, XU Y D, *et al.*. Myringotomy with grommet insertion in children: complications and its prevention[J]. *Journal of Audiology and Speech Pathology*, 2001, 9(4):224-226. (in Chinese)
- [4] GOODE R L. CO<sub>2</sub> laser myringotomy[J]. *Laryngoscope*, 1982, 92(4):420-432.
- [5] HASSMANN E, SKOTNICKA B, BACZEK M, *et al.*. Laser myringotomy in otitis media with effusion: long-term follow-up[J]. *Eur. Arch. Otorhinolaryngol.*, 2004, 261(6):316-320.
- [6] 张小青,许为青. CO<sub>2</sub> 激光在耳科领域的应用[J]. 国际耳鼻喉头颈外科杂志, 2007, 31(5):304-306.  
ZHANG X Q, XU W Q. The application of CO<sub>2</sub> laser in otology fields [J]. *Int. J. Otolaryngol Head Neck Surg.*, 2007, 31(5):304-306. (in Chinese)
- [7] 杨国强,李兆龙,张清元. 鼓膜激光打孔治疗分泌性中耳炎 118 例疗效观察[J]. 实用临床医药杂志, 2008,12(4):39-40.  
YANG G Q, LI ZH L, ZHANG Q Y. Treatment of secretory otitis media by using of laser myringotomy[J]. *Journal of Clinical Medicine in Practice*, 2008, 12(4):39-40. (in Chinese)
- [8] 苏华,李守春. 半导体激光器在医疗上的应用及其前景展望[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2006, 24(5):501-506.  
SU HUA, LI SH CH. Applications and prospect of semiconductor laser in medical fields[J]. *Journal of Jilin University(Information Science Edition)*, 2006, 24(5):501-506. (in Chinese)
- [9] 王德,李学千. 半导体激光器的最新进展及其应用现状[J]. 光学精密工程, 2001, 9(3):279-283.  
WANG D, LI X Q. New progress in semiconductor lasers and their applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(3):279-283. (in Chinese)
- [10] 刘江涛,袁慧君,肖立峰. 耳内窥镜下半导体激光鼓膜打孔治疗分泌性中耳炎 32 例报告[J]. 中国内镜杂志, 2004, 10(7):108.  
LIU J T, YUAN H J, XIAO L F. Report about treatment of 32 secretory otitis media patients by using of diode laser myringotomy with otoscope [J]. *China Journal of Endoscopy*, 2004, 10(7):108. (in Chinese)
- [11] 王祥鹏,梁雪梅,李在全,等. 880 nm 半导体激光器阵列及光纤耦合模块[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5):1021-1027  
WANG X P, LIANG X M, LI Z J, *et al.*. 880 nm semiconductor laser diode arrays and fiber coupling module [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5):1021-1027. (in Chinese)
- [12] WERNER M, WESSLING C, HENGESBACH S. 100 W/100  $\mu\text{m}$  passively cooled, fiber coupled diode laser at 976 nm based on multiple 100  $\mu\text{m}$  single emitters[J]. *SPIE*, 2009, 7198:29.
- [13] WANG ZH J, GHEEN A Z, WANG Y. Optical coupling system for a high-power diode-pumped solid state laser. U S Patent: 6,377,410 B1[P]. 2002-04-23.

## 作者简介:



**郝明明**(1984—),男,内蒙古包头人,博士研究生,2006年于内蒙古大学获得学士学位,主要从事大功率半导体激光列阵的光纤耦合及应用的研究。E-mail: ciomp2007@163.com



**刘云**(1960—),女,吉林长春人,副研究员,硕士生导师,1982年于长春光学精密机械学院获得学士学位,主要从事大功率半导体激光器封装、散热等方面的研究。E-mail: hs5252@sohu.com



**王彪**(1981—),男,吉林松原人,副研究员,2008年于吉林大学获得博士学位,主要从事嵌入式系统软硬件技术的研究。E-mail: wb5996@163.com



**曹军胜**(1978—),男,陕西延川人,副研究员,1996年至2007年就读于吉林大学电子学院并获得学士、硕士、博士学位,主要从事半导体激光器应用及半导体激光器可靠性的研究工作。E-mail: caojs@jlu.edu.cn



**彭航宇**(1983—),男,浙江黄岩人,博士,主要从事半导体激光光束整形等方面的研究。Email: imphy@163.com



**朱洪波**(1984—),男,吉林长春人,博士研究生,2003年于长春理工大学获得学士学位,主要从事大功率半导体激光器光纤耦合的研究。E-mail: zhbciomp@163.com



**郜峰利**(1977—),男,河南沁阳人,讲师,1997年至2008年就读于吉林大学电子学院并获得学士、硕士、博士学位,主要从事专业电路与系统,微弱信号检测与处理、功能光学成像的研究。Email: gaofl@jlu.edu.cn



**单肖楠**(1979—),男,吉林蛟河人,博士后,副研究员,2004年于长春理工大学获得硕士学位,2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大功率半导体激光器封装、光束整形等方面的研究。E-mail: shanxiaon@sina.com

## 导师简介:



**王立军**(1946—),男,吉林舒兰人,研究员,博士生导师,主要从事大功率半导体激光器及其应用方面的研究。E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn