

# 光学学报

## 低相干性激光的研究进展

徐林海<sup>1,3</sup>, 王宇飞<sup>1,2\*\*</sup>, 贾宇飞<sup>1,3</sup>, 郑婉华<sup>1,2,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院半导体研究所固态光电信息技术实验室, 北京 100083;

<sup>2</sup>中国科学院大学未来技术学院, 北京 101408;

<sup>3</sup>中国科学院大学材料科学与光电工程研究中心, 北京 100049;

<sup>4</sup>中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点实验室, 北京 100083

**摘要** 激光因相干性好、方向性好、单色性好等优点得到了广泛的应用,但是,激光的高相干性会带来严重的散斑现象,导致其在显示和成像领域的应用受到限制。通过对激光腔的几何形状和激光振荡反馈机制的创新,对激光的模式数量、模场的空间分布调控发展而来的低相干性激光器正日益受到重视。本综述详述了五种低相干性激光,包括随机激光、简并腔激光、混沌腔半导体激光、近共心腔半导体激光、哑铃形腔半导体激光的发展历史、产生机理及现存的问题,为低相干性激光器的发展方向和应用提供决策参考。

**关键词** 光学器件; 低相干性; 激光器; 散斑; 谐振反馈机制; 激光谐振腔

中图分类号 TN243

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0823008

## Research Progress of Low-Coherence Laser

Xu Linhai<sup>1,3</sup>, Wang Yufei<sup>1,2\*\*</sup>, Jia Yufei<sup>1,3</sup>, Zheng Wanhua<sup>1,2,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Solid State Optoelectronics Information Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

<sup>2</sup>College of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;

<sup>3</sup>Center of Materials Science and Opto-Electronic Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>4</sup>State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

**Abstract** Laser has been widely used because of its high coherence, high directivity, and good monochromaticity. However, the high coherence of laser will cause serious speckle effect, which leads to great resistance to its application in the display and imaging field. By introducing the innovation of laser cavity geometry and laser oscillation feedback mechanism, and controlling the number of lasing modes and modes spatial distribution, high-coherence lasers can be developed into low-coherence lasers, which are gaining more and more attention. In this review, we elaborated on the development history, generation mechanism, and existing problems of five low-coherence lasers including random lasers, degenerate cavity lasers, chaotic cavity semiconductor lasers, near-concentric cavity semiconductor lasers, and dumbbell-shaped cavity semiconductor lasers. This review provides a decision-making reference for the development direction and application of low-coherence lasers.

**Key words** optical devices; low coherence; laser; speckle; oscillation feedback mechanism; laser resonator

**OCIS codes** 230.3120; 030.1640; 030.6140; 140.5960; 140.3410

收稿日期: 2020-11-16; 修回日期: 2020-12-09; 录用日期: 2020-12-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0401804, 2016YFA0301102)、国家自然科学基金(91850206, 62075213)、中国兵器工业集团有限公司激光器件技术重点实验室开放课题(KLLDT202012)

\* E-mail: whzheng@semi.ac.cn; \*\* E-mail: yufeiwang@semi.ac.cn

# 1 引言

激光因具有相干性高、方向性好、亮度高及单色性好的特点得到了广泛的应用和研究<sup>[1-3]</sup>。但是当高相干光源照射到粗糙物体时,由于散射光的干涉会形成颗粒状噪点,这些噪点被称为散斑<sup>[4]</sup>。散斑在无损探测领域有巨大的应用,如测量物体粗糙度、测量晶体的长度变化、检测材料裂纹、研究微血管血流等<sup>[5-8]</sup>。但是在某些应用领域,如激光显示、激光投影、全息成像、生物成像<sup>[9-15]</sup>等,只想利用激光的高方向性和高亮度的特性,而需要避免激光的高相干性,因为高相干性产生的散斑会严重影响图像的显示质量。

Wolf<sup>[16-17]</sup>提出互相干函数和交叉谱密度函数,它们分别描述空间两点在空间-时间域和空间-频率域的相关程度;同时建立了著名的 Wolf 等式,表明互相干函数和交叉谱密度函数满足波动方程,具有光波的一切特性。Wolf 的工作为激光器的相干性调控奠定了理论依据。为了定量研究相干性的变化对散斑效应的影响,人们提出散斑对比度的概念。散斑对比度是一个直观且物理含义明确的物理量,基于误差敏感的评价方法,定义为散斑图像的标准差与平均值的比值<sup>[4]</sup>。散斑对比度分布在 0 到 1 之间,0 代表无散斑,1 代表散斑对比度最大。有研究表明,当散斑对比度为 0.05 以下时,人眼不可见<sup>[18]</sup>。

到目前为止,研究人员在降低散斑对比度的研究上取得了很多的突破。Goodman<sup>[4,19]</sup>从几何光学和统计学的角度详细地分析了散斑现象,并得出散斑本质上是振幅和相位的随机相干叠加的结论,可以通过降低光源的相干性来抑制散斑。且证明当  $M$  幅统计独立、非相干的散斑图像叠加时,散斑对比度由 1 下降为  $M^{-1/2}$ 。他总结前人的成果,整理了 *Speckle phenomena in optics: theory and applications*<sup>[20]</sup> 这本书。书中详细地阐述了 8 种降低散斑的方法,例如抖动的屏幕、激光阵列等,但是这些方法存在机械不稳定、体积庞大、成本高等问题。最直接和彻底的消散斑方法是使用低相干性激光。2018 年,Chriki 等<sup>[21]</sup>从激光器的模式角度出发,分析腔内不同模式对散斑对比度的影响,且在理论和实验上同时证明了激光腔内产生的不同的横模进行叠加时可以有效地降低散斑对比度。Cao 等<sup>[22]</sup>指出当一个激光器的腔不存在明显的光轴时,如随机激光器和混沌腔激光器等,其横模和纵模不存在明显的区分,且模式分布非常复杂,不同模式之

间的空间分布差异较大,所以这类激光的不同模式叠加都能有效地降低散斑对比度。

在过去的 30 年中,低相干性激光取得了巨大的发展,先后涌现出随机激光<sup>[23-31]</sup>、简并腔激光<sup>[11,32-33]</sup>、混沌腔半导体激光<sup>[34-35]</sup>、近共心腔半导体激光<sup>[36]</sup>及哑铃形腔半导体激光<sup>[37]</sup>。本综述按照低相干性激光出现的时间顺序来一一描述 5 类低相干性激光的发展历史、产生机理、激光特性及各自的优缺点。

## 2 低相干性激光

### 2.1 随机激光

1968 年,Letokhov<sup>[38]</sup>提出在随机增益介质中也可能存在激光现象。他指出在不规则排列、杂乱无章的介质中光被散射,从而光子光程增加,假设无序的介质能使通过的光波产生增益效果,那么光波通过该介质时就会被增强放大,直至形成光路闭环产生激光。1994 年,Lawandy 等<sup>[39]</sup>将波长为 530 nm 的激光作为泵浦源,泵浦源激励掺有  $\text{Al}_2\text{O}_3$  外壳的  $\text{TiO}_2$  微粒胶体溶液,通过测量出射光的光谱变化情况,发现当输入的激励能量较低时,只能看到自发辐射现象,当泵浦光能量达到某一特定值时,出射光谱急剧变窄,出射光从自发辐射变为激光,此时激励源的能量称为阈值。进一步研究表明,胶体溶液中的  $\text{TiO}_2$  微粒与光谱出射有密切联系,从而验证了 Letokhov 提出的随机激光现象。

随机激光是最早被研究的低相干性光源,随机激光的产生机理非常特殊甚至是反直觉的。在传统激光理论和应用中,普遍认为散射现象对激光产生是极不利的因素。因为散射中心使光子从激光模式中散射出去,致使激光器的品质因数降低,因此在制作激光器的过程中,研究人员都尽可能地降低散射对激光器的影响。但是,随机激光由多重散射形成,如果不进行特殊的调控,随机激光产生的模式随机、出射方向随机,导致其模式多、相干性低、方向性差。传统激光器和随机激光器的产生机理如图 1 所示<sup>[40]</sup>。

2012 年,Redding 等<sup>[24]</sup>从散斑对比度和光子简并度角度出发,详细地阐述了随机激光的优点(也可以理解为低相干性激光的优点,因为 2012 年时,随机激光是唯一的低相干性激光)。随机激光器的发光本质依然是受激辐射,因此其光子简并度与传统激光器类似,使得随机激光具有高光谱密度的特点;同时,又因为随机激光的空间相干性低到可以与传统热光源、发光二极管相比拟,测得的散斑对比度很低。

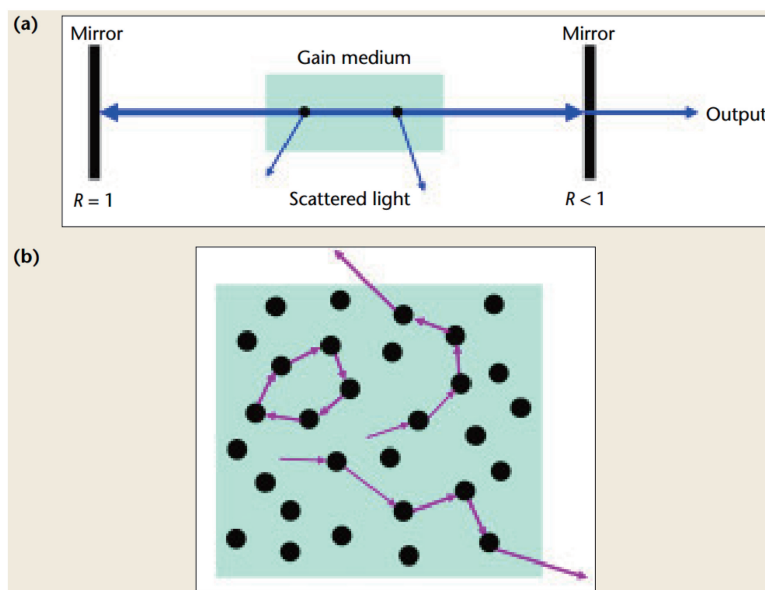


图 1 传统 Fabry-Pérot 激光器和随机激光器的对比<sup>[40]</sup>。(a)由两个反射镜和增益介质组成的 Fabry-Pérot 激光器的示意图,右反射镜是部分反射镜,黑色点代表激光腔内的散射中心;(b)随机激光的产生机理,多重散射增加了光在随机增益介质中的路径

Fig. 1 Comparison of traditional Fabry-Pérot laser and random laser. (a) Schematic of a Fabry-Pérot laser with two mirrors and a gain medium, the right mirror is partially mirror, the black dots represent the scattering center in laser cavity; (b) generation mechanism of random laser, multiple scattering increases the path of light inside the random gain medium

由于随机激光新奇的物理现象和特殊的发光性质,在过去 30 年,粉末、胶体、染料随机激光器,液晶随机激光器,电泵浦随机激光器,光纤随机激光器及光子晶体随机激光器都得到了巨大的发展。Cao 等<sup>[23]</sup>在一个直径约为  $1\ \mu\text{m}$ 、由 ZnO 纳米颗粒组成的团簇球体中,验证了散射光的相干放大增强了干涉效应,有助于光子的空间束缚。Wiersma 等<sup>[41]</sup>将液晶扩散在激光染料中,实现了温度对随机激光阈值和发射带宽的调节,为主动调控随机激光的发光特性指明了方向。Leong 等<sup>[28]</sup>提出电泵浦随机激光器,该激光器摆脱了传统随机激光器依赖高功率脉冲激光作为泵浦源的限制,有利于随机激光器在实际中的应用。Turitsyn 等<sup>[29]</sup>提出了随机分布反馈式光纤激光器,自此,随机光纤激光器引起了广泛的关注。

为了更精确地调控随机激光的光谱,使其更好地应用于激光显示、激光照明等领域,Guo 等<sup>[31]</sup>基于侧向腔光子晶体面发射激光器的平台结构,如图 2 所示,提出并实现了室温连续电注入随机光子晶体激光器,在仅有孔径随机的情况下,实现了光谱展宽  $7\ \text{nm}$ 。

随机激光的产生机理导致方向性差,大大地削弱了其使用价值,对随机激光方向性进行控制是重要的研究方向。Schönhuber 等<sup>[42]</sup>第一次报道了有

方向性的随机激光器,这是随机激光在方向性探索中取得的突破性进展,其器件既实现了具有方向性的光束又保持了随机激光的光谱特性。Wiersma<sup>[43]</sup>对其工作进行了报道。Schönhuber 等<sup>[42]</sup>使用圆形平面波导,且在这种平面波导上刻蚀随机的小孔,如图 3 所示,这种结构具有两个主要优点。首先,这些随机小孔可以使光在平面内随机散射,从而产生随机模式;其次,这些随机小孔使得激光的一小部分光从垂直于平面的方向出射。通过仔细调整诸如波导中随机小孔的密度和分布之类的参数,Schönhuber 等<sup>[42]</sup>实现了最佳的面内光限制,同时确保了足够的平面外发射,接着通过调整激光的偏振和相位,获得了垂直于波导并几乎完全准直的光束。

压缩制备成本、扩展光谱范围可以进一步推进随机激光的实用化。有机材料具有成本低廉、制备简单、可变形等特点。Chang 等<sup>[30]</sup>使用有机染料制备了白光随机激光器。使用 4-(dicyanomethylene)-2-tert-butyl-6-(1,1,7,7-tetramethyljulolidin-4-yl-vinyl)-4H-pyra(DCJTb)有机染料产生红色波段的随机激光,使用 stilbene-420(S420)有机染料产生蓝色波段的随机激光,且通过溶液加工和自组装工艺,这两种染料就能形成适用于产生随机激光的纳米颗粒和纳米盘。绿色波段的随机激光使用 rhodamine

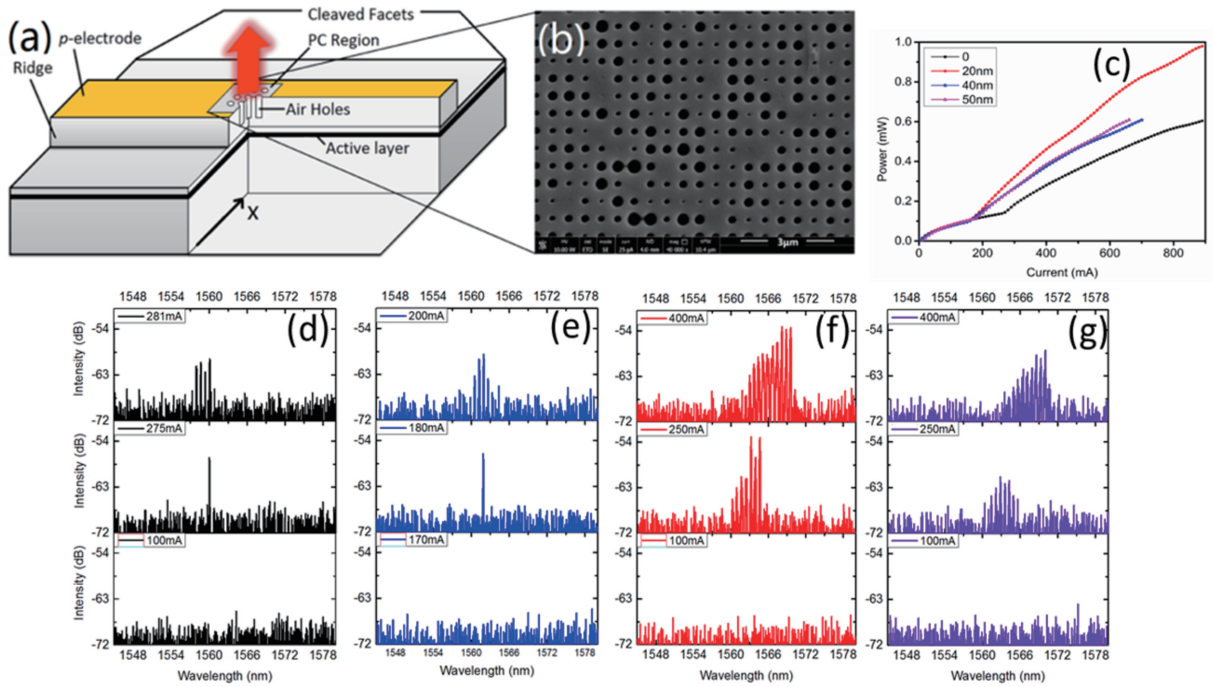


图 2 电注入随机光子晶体激光器<sup>[31]</sup>。(a)侧向腔光子晶体面发射激光器结构示意图;(b)随机光子晶体的扫描电子显微镜 (SEM)图;(c)不同  $V_r$  (高斯分布随机函数的变量)下,随机光子晶体激光器的光功率-电流曲线;(d)  $V_r = 0$  nm 时的激光射光谱;(e)  $V_r = 20$  nm 时的激光射光谱;(f)  $V_r = 40$  nm 时的激光射光谱;(g)  $V_r = 50$  nm 时的激光射光谱

Fig. 2 Electrically-injected random photonic crystal laser<sup>[31]</sup>. (a) Structure schematic of lateral cavity photonic crystal surface emitting laser; (b) SEM image of random photonic crystal; (c) optical power-current curves of random photonic crystal laser under different  $V_r$  (variable of Gaussian distribution random function); (d) emission spectra for  $V_r = 0$  nm; (e) emission spectra for  $V_r = 20$  nm; (f) emission spectra for  $V_r = 40$  nm; (g) emission spectra for  $V_r = 50$  nm

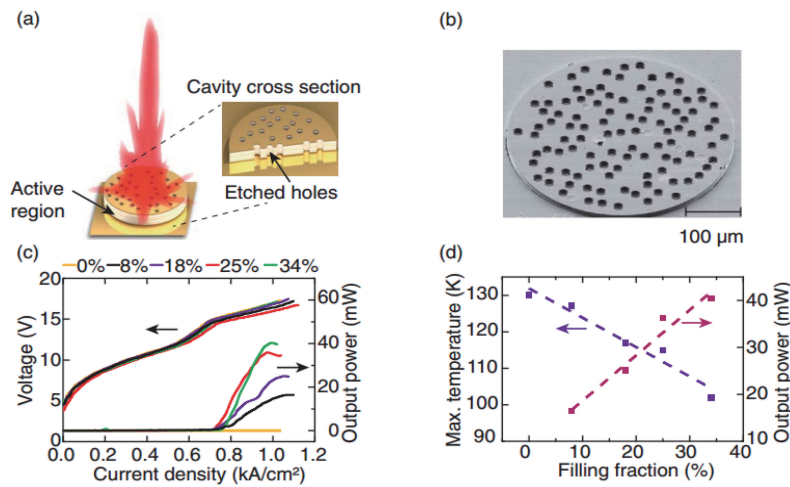


图 3 电泵浦有方向性的随机激光器<sup>[42]</sup>。(a)随机激光器的示意图;(b)具有 25% 的孔洞填充率和总直径为  $500 \mu\text{m}$  的随机激光器的 SEM 图,小孔的直径为  $20 \mu\text{m}$ ;(c)在热沉温度为 5 K 的测试条件下,测量的具有不同填充率的激光器的电流-电压 (IV) 和光功率-电流 (LI) 特性;(d)具有不同填充率的器件的最高工作温度和在表面方向测得的峰值输出功率

Fig. 3 Electrically-pumped random laser with directivity<sup>[42]</sup>. (a) Schematic of the random laser; (b) SEM picture of a random laser with 25% hole-filling fraction and total resonator diameter of  $500 \mu\text{m}$ , the diameter of the holes is  $20 \mu\text{m}$ ; (c) current-voltage (IV) and light power-current (LI) characteristics of devices with various filling fractions, measured at a heat-sink temperature of 5 K; (d) maximum operating temperature and the peak output power measured in the surface direction of the device with different filling fractions

6G(R6G)染料,但是这种染料并不能形成适用于随机激光的天然随机结构,他们通过添加银纳米颗粒作为散射中心来产生绿光随机激光。而后将三种材料制备在一块玻璃衬底上,使用 266 nm 波长的脉冲激光器对其进行整体泵浦,经红绿蓝三种颜色的光混合最终形成白光。

尽管随机激光具有一些独特的性质,但仍具有不足之处。例如随机激光通常具有较高的阈值,需要高峰值功率脉冲激光作为泵浦光源,光光转换效率也较低;绝大多数随机激光器发射方向为四面八方,具有方向性差的缺点,即使用作照明光源,效率也较低;对随机激光光谱进行调谐的手段相对较少,灵活性也较差。这些不足严重阻碍了随机激光的实际应用。

## 2.2 简并腔激光

Arnaud<sup>[44-46]</sup>详细分析了简并腔的理论基础。简并有两重含义,腔内的光线简并且腔内的横模简并。在理想的简并腔中,腔内的光线都属于简并光线,即一次往返后,任意光线会和其自身的路径完全重合。根据光线简并条件,再结合激光的模式理论,通过光线传输方程,针对高斯模式,发现符合简并条件的模式的特征频率里不包含横模和侧模阶数,也

就是说在同一个纵模下,可以有无数横模发生简并,这是简并的深层含义。但是 Arnaud 只是对简并腔进行了理论分析,并没有把简并腔用到低相干性激光上。

2013 年, Nixon 等<sup>[32]</sup>利用 4f 激光系统搭建了简并腔,且通过调节腔内的针孔孔径来实现腔内的模式数量可调,首次利用简并腔产生了低相干性激光。实验装置如图 4 所示,包括虚线方框内的简并腔激光结构和成像装置。简并腔激光器由增益介质、前后平面镜、两个 4f 望远镜配置的透镜组成。其中使用的增益介质为 Nd:YAG,激光的波长为 1064 nm,前后反射镜的反射率分别为 40% 和 90%,泵浦源是重复频率为 1 Hz、脉宽为 100  $\mu$ s 的氙闪光灯。在前后两个反射镜之间插入两个凸透镜,且前后两个反射镜和可变孔径的针孔放置在两个透镜的焦平面上,以实现 4f 系统。此系统内的横向电场在传播一个完整的周期之后成像到其自身,所以 4f 系统满足简并条件。因此,任何横向模式都代表简并腔的本征模。所以这些模式有相同的 Q 值和光程,可以实现多模同时激射。激光模式的数量可以通过改变位于透镜之间焦平面的可变针孔孔径来控制。

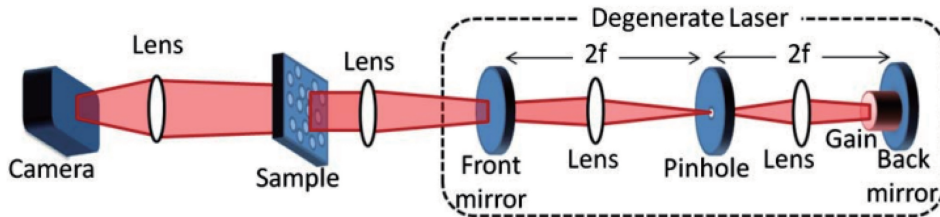


图 4 实验装置<sup>[32]</sup>

Fig. 4 Experimental device<sup>[32]</sup>

图 5 为使用具有尺寸不同的针孔的简并腔激光进行成像得到的 U. S. Air Force Resolution Chart 图样,可以看出,当孔径的大小为 0.12 mm 时,腔内只能产生较少的横模,此时拍摄到的图像的散斑明

显,当孔径的大小为 6 mm 时,腔内能产生大量的简并横模,拍摄到的图像清晰、无散斑。

2016 年, Knitter 等<sup>[11]</sup>把简并腔内的增益介质更换为垂直腔面发射激光器(VCSEL),实现了电泵浦的

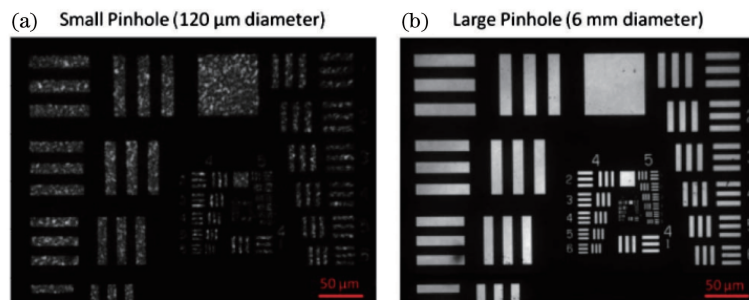


图 5 无散斑全场成像<sup>[32]</sup>。(a)小针孔下的检测图像;(b)大针孔下的检测图像

Fig. 5 Speckle-free full-field imaging<sup>[32]</sup>. (a) Detected image using small pinhole; (b) detected image using large pinhole

简并腔激光器, 波长为 1055 nm 左右, 如图 6 所示。且他第一次把相干性可调光源应用到实际成像中, 如图 7 所示。因为散斑图案可以用来观察微血管血流, 而低相干性激光成的像没有散斑, 所以通过调整简并腔内的模式数量, 利用高相干性的激光对爪蟾胚胎心脏内血液的流动情况进行分析, 利用低相干性激光对爪蟾胚胎心脏进行无散斑成像。图 7(a) 方框内是非洲爪蟾胚胎的心脏区域。图 7(b) 是通过随时间变化的散斑对比度的变化确定的非洲爪蟾心动周期。图 7(c) 为胚胎心脏在高度相干性激光下的成像图。图 7

(d)~(f) 为使用低相干性光源作为照明源拍摄的心跳不同阶段的轮廓图。图 7(g)~(i) 为使用高相干性光源作为照明源拍摄的心跳不同阶段心脏散斑图, 其可以表征相应血管中的血流情况 (20×29 段, 三次插值)。图 7(d)、(g) 中心室充盈 (舒张期,  $t_1 = 0$  ms); 图 7(e)、(h) 中心室排空进入动脉系统 (收缩期,  $t_2 = 150$  ms); 图 7(f)、(i) 为空心室, 血液流入血管 (末梢收缩期,  $t_3 = 430$  ms)。从图 7 可以看出, 随着激光器相干性的调节, 可以记录心脏内的血液流动情况, 又能清晰地观察心脏的轮廓信息。

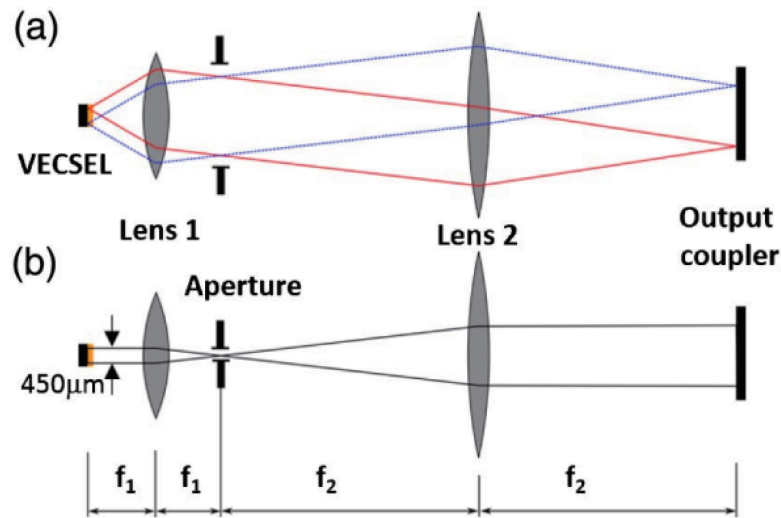


图 6 电泵浦简并腔激光器示意图, 通过调整腔内孔径的大小来控制简并腔的模式数<sup>[11]</sup>。

(a) 大孔径, 低相干性模式; (b) 小孔径, 高相干性模式

Fig. 6 Schematic of electrically-pumped degenerate cavity laser, controlling the number of modes of degenerate cavity by adjusting the size of the aperture<sup>[11]</sup>. (a) Large aperture and low coherence operation; (b) small aperture and high coherence operation

通过调节腔内的针孔孔径, 可以实现简并腔激光器相干性可调的激光输出, 是迄今唯一的相干性大幅度可调的激光器。但是其光路复杂, 且大部分的简并腔激光器属于光泵浦, 导致能量转换效率低。

### 2.3 混沌腔半导体激光

回音壁模式(WGM)光学微腔因具有超高的 Q 值、较小的模式体积, 在过去的 20 年间一直是人们的研究热点<sup>[47-49]</sup>。但是从旋转对称的几何结构可以看出, 它最大的缺陷是腔内的模式是各向同性的, 导致腔内的光很难被高效地导出和收集, 大大限制了其应用。人们提出一种靠微腔和波导耦合实现 WGM 定向输出的方法<sup>[50-51]</sup>, 但是波导与微腔激光器之间的倏逝波耦合需要精密的对准和精确结构空隙的控制, 实验制作的要求较高。1997 年, Nöckel 等<sup>[52]</sup>另辟蹊径, 提出了非对称谐振腔(ARC), 并且最先引入基于光线动力学的方法来研究微腔的性

质, 自此揭开了变形微腔研究的序幕<sup>[35,53-61]</sup>。研究人员引入庞加莱截面(SOS 图)来分析微腔的射线动力学, 分析变形微腔内可能存在的模式和光的出射方向。通过研究发现, 根据微腔内存在模式的特性, 微腔可以分为稳定腔、部分混沌腔和完全混沌腔。

但是变形微腔一直没被用到低相干激光上, 直到 2015 年, Redding 等<sup>[34]</sup>采用完全混沌腔 D 形腔<sup>[62-63]</sup>, 在半导体激光体系上实现了低相干性激光, 第一次把变形微腔思想应用到低相干性激光上, 结构示意图和模拟结果如图 8 所示。通过调整切口与圆心的距离  $r_0$ , 发现当  $r_0 = 0.5R$  时 ( $R$  为圆形腔半径), 腔内模式的光场分布最为混沌, 且通过模拟计算发现, 其无源腔内不同模式的 Q 值比较接近, 有可能会实现多模激射, 达到输出低相干性激光的目的。且他们结合了 steady-state ab initio laser

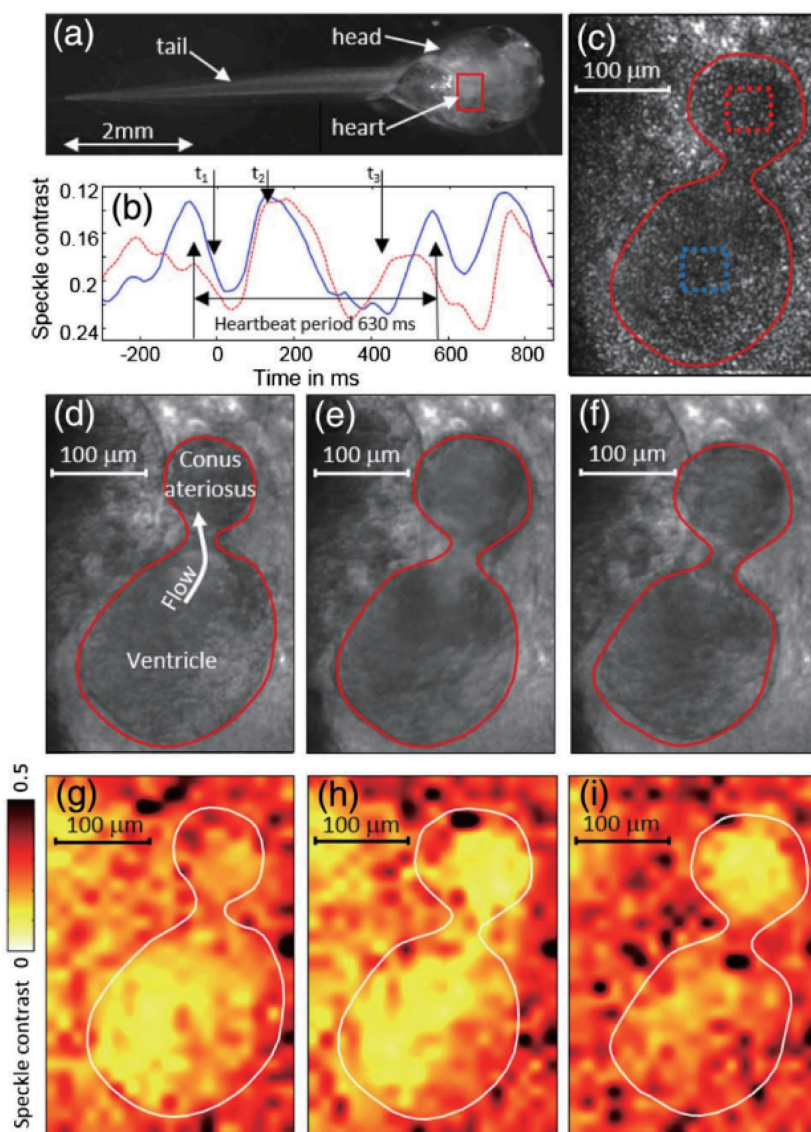


图 7 低相干性光成像得到的爪蟾胚胎心脏的轮廓及高相干性光下观察到的爪蟾胚胎心脏血液流动情况<sup>[11]</sup>。(a)爪蟾胚胎心脏;(b)爪蟾胚胎心脏跳动周期;(c)使用高相干性光源拍摄的心脏示意图;(d)~(f)使用低相干性光源拍摄的不同阶段的心脏轮廓示意图;(g)~(i)使用高相干性光源拍摄的不同阶段的心脏散斑示意图

Fig. 7 Contour of Xenopus embryonic heart obtained by low coherence light imaging and blood flow in heart of Xenopus embryo under high coherence light<sup>[11]</sup>. (a) Xenopus embryo with highlighted heart region; (b) heart beating cycle of Xenopus embryo; (c) embryo heart under high-coherence light source; (d)–(f) schematic of heart contours at different stages taken with low-coherence light source; (g)–(i) speckle imaging at different stages taken with high-coherence light source

(SALT)算法<sup>[64-65]</sup>对D形腔进行有源计算。图8(e)给出了 $r_0 = R$ (圆形),  $0.7R$ ,  $0.5R$ ,  $0.3R$ 四个腔中前10个激光模式的泵浦阈值(以第一个激光模式的阈值进行归一化)。虚线表示非相互作用的阈值,反映了无源腔内不同模式的Q值分布。 $r_0 = 0.5R$ 腔内模式具有最均匀的Q值分布,这对在相对较低的泵浦值下实现多模激光是有利的。实线显示谐振模式和增益材料相互作用的阈值,前5个激光阈值是根据SALT算法计算得出的,并使用单极近似

(SPA)-SALT算法近似外推到第10个激光阈值。模式竞争导致实际阈值比没考虑非相互作用的估算值大,但对 $r_0 = 0.5R$ 腔形状的影响最弱(由于减小了激光模式的局限性)。因此, $r_0 = 0.5R$ 是实现超多模数激光的最佳参数。

图9为实验上Fabry-Pérot(F-P)激光器和D形腔激光器成像得到的散斑对比度图,且用U.S. Air Force Resolution Chart图样对两种激光器进行分辨率测试,可以看出,在同样的测试条件下,当使用F-P

激光器作为成像光源时,图样的散斑对比度为 58%,如图 9(a)所示,U. S. Air Force Resolution Chart 图案分辨率低,有部分图案不可见,如图 9(c)所示;而使用

D 形腔激光器作为显示光源时,图样的散斑对比度仅为 3%,如图 9(b)所示,U. S. Air Force Resolution Chart 图案清晰,分辨率高,如图 9(d)所示。

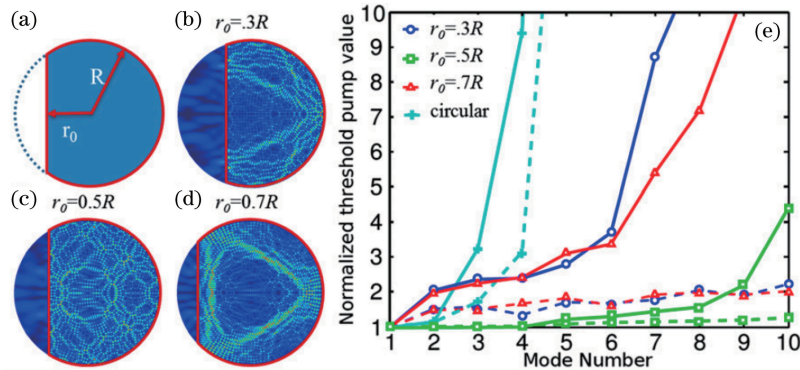


图 8 D 形腔激光器的设计和模拟<sup>[34]</sup>。(a) D 形腔的示意图;(b)~(d)最高 Q 模式的电场分布;(e)前 10 个激光模式的泵浦阈值  
Fig. 8 Design and simulation of D-shaped cavity laser<sup>[34]</sup>. (a) Schematic of the D-shaped cavity; (b)–(d) electric field distributions of the highest Q mode; (e) calculated pump thresholds of the first 10 lasing modes

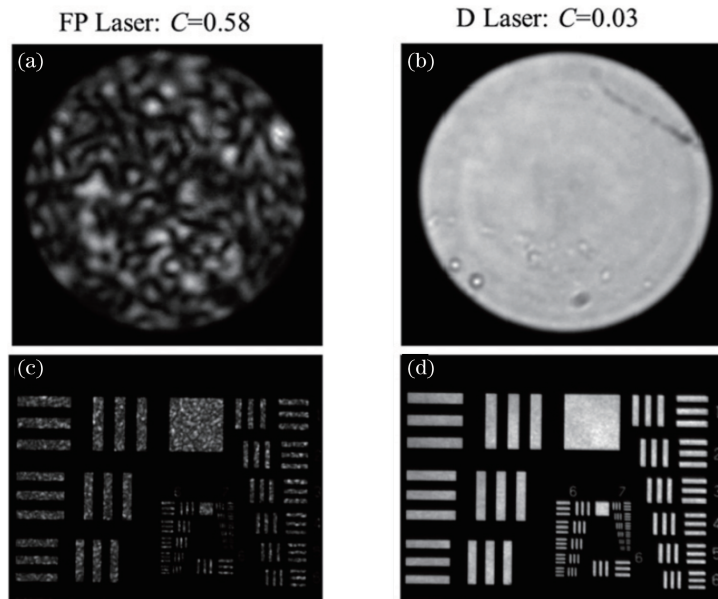


图 9 激光器的空间相干性及其在全场成像中的应用<sup>[34]</sup>。(a)(b) F-P 腔激光器和 D 形腔激光器的散斑对比度;(c)(d) F-P 腔激光器和 D 形腔激光器在透射模式下的空军分辨率测试图

Fig. 9 Spatial coherence of the lasers and application to full-field imaging<sup>[34]</sup>. (a)(b) Speckle contrast of the F-P cavity laser and D-shaped cavity laser; (c)(d) Air Force Resolution Chart of the F-P cavity laser and D-shaped cavity laser in transmission mode

虽然 D 形腔激光器可以实现电泵浦、低相干性输出,但是这种激光器功率低、方向性差的缺点也非常明显。

### 2.4 近共心腔半导体激光

固体激光的谐振腔由反射镜构成,根据反射镜的曲率半径( $R$ )和反射镜之间的距离( $d$ ),定义谐振腔稳定参数  $g_1 = 1 - d/R_1$ ,  $g_2 = 1 - d/R_2$ ,  $g_1$  和  $g_2$  的乘积取值为  $(-1, 1)$ ,根据  $g_1 \times g_2$  不同的取值,可以将激光谐振腔分为稳定腔、介稳腔和非稳

腔<sup>[66]</sup>。以  $g_1$  和  $g_2$  为横和纵坐标轴,画出反比例函数,如图 10 所示,且根据各类腔的定义,可以得出阴影区域为非稳腔,分布在双曲线上的为介稳腔。其中共焦腔分布在坐标原点处,属于稳定腔;共心腔的坐标为  $(-1, -1)$ ,F-P 腔的坐标为  $(1, 1)$ ,都属于介稳腔。这三类谐振腔在固体激光器中有重要的应用,半导体激光器的腔面多由解理形成,是曲率无限大的平面镜,是典型的 F-P 腔。



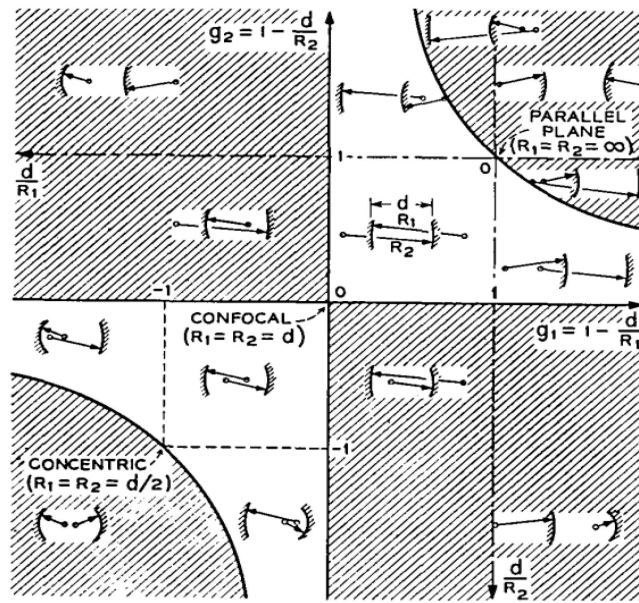


图 10 谐振腔稳定性图,阴影区域为非稳腔<sup>[66]</sup>

Fig. 10 Stability diagram of the resonator, unstable resonator systems lie in shaded regions<sup>[66]</sup>

随着半导体刻蚀工艺(比如电感耦合等离子体刻蚀(ICP)和反应离子刻蚀(RIE))的成熟、共焦腔和共心腔在固体激光器中取得的成功,研究人员开始尝试在半导体激光器体系上制备共心腔和共焦腔。1995年, Biellak 等<sup>[67]</sup>就尝试把固体激光器的腔结构移植到半导体激光器上。随后 Fukushima 等<sup>[68-71]</sup>开始在这方面进行大量的尝试,将固体激光器中的稳定腔、介稳腔和非稳腔都做在了半导体激光器体系上,且考虑侧壁反射对这些腔内的模式分布和远场分布的影响,如图 11 所示,结构参数如表 1 所示,但始终没涉及到低相干性激光器。

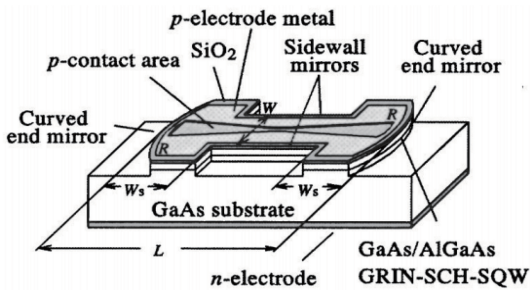


图 11 准操场形半导体激光器示意图<sup>[68]</sup>

Fig. 11 Schematic of the quasi-stadium semiconductor laser<sup>[68]</sup>

表 1 准操场形谐振腔的参数<sup>[68]</sup>

Table 1 Parameters of the quasi-stadium resonator<sup>[68]</sup>

| Resonator Type | $L / \mu\text{m}$ | $R / \mu\text{m}$ | $W / \mu\text{m}$ | $W_s / \mu\text{m}$ |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| Confocal       | 600               | 600               | 60                | 160                 |
| Concentric     | 600               | 300               | 60                | 160                 |
| Unstable       | 700               | 60                | 60                | 185                 |

2019年, Kim 等<sup>[36]</sup>尝试把固体激光器中比较成熟的共心腔和共焦腔移植到半导体激光体系上,通过调整  $g$  (在  $0 \sim -1$  变化),即在稳定腔和非稳腔之间变化,以求找到可能实现多模激射的结构参数。通过模拟计算,发现当  $g = -0.74$  时,此时的腔属于近共心腔,腔内的高阶模式和低阶模式的  $Q$  值变化差别最小,可以实现多模激射,从而减小器件的散斑对比度。图 12 给出了器件的结构示意图。且为了实现有方向性的激射,通过调整腔的宽度  $W$  来抑制诸如图 12(c)所示的非轴向模式,包括菱形模式和长方形模式。在实验中,他们设计的 p 面电极也并不是完全覆盖器件的上表面,在腔的中间区域收缩了电极,确保轴向模式得到足够的增益而激射,同时抑制非轴向模式的形成。

图 13(a)显示了共心腔、共焦腔和近共心腔 ( $g = -0.74$ ) 内不同模式的  $Q$  值变化规律,可以看出,近共心腔的高阶横模相对基横模的  $Q$  值变化比共心腔和共焦腔都小,所以近共心腔相对共心腔和共焦腔更容易实现多模激射。图 13(b)给出了三种腔内的高阶横模的模式分布图和相应的 Husimi 投影。图 13(c)中实线为模拟无源腔得到的腔内可能存在的高  $Q$  模式数随着  $g$  参数变化的分布,虚线为考虑有源情况下,计算得到的激射的模式数随着  $g$  参数变化的分布。可以明显看出,相对于其他参数,  $g = -0.74$  时最有利于实现多模激射。最终实验上制备的近共心腔半导体激光器的散斑对比度为 3%。特别强调低相干性激光的方向性一直是一个

大问题,这篇文章报道的近共心腔半导体激光器的远场发散角为  $70^\circ$  左右,虽然较大,但这是电注入低

相干性边发射半导体激光器往方向性上探索的重要一步。

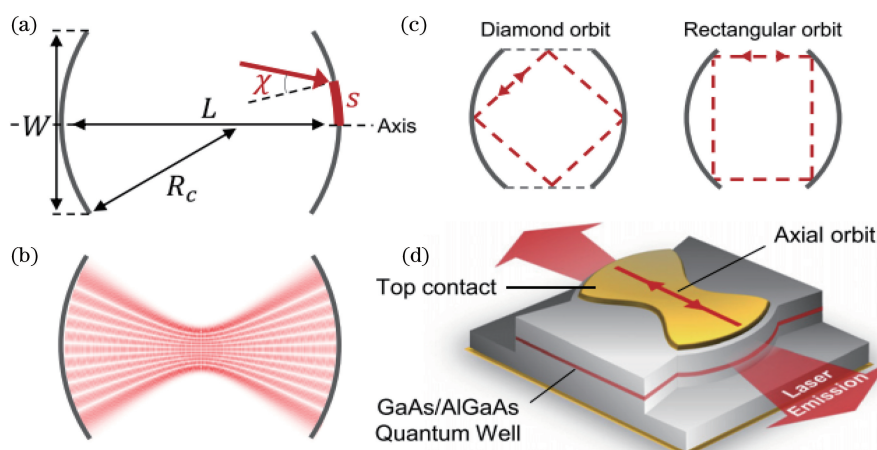


图 12 近共心腔结构示意图<sup>[36]</sup>。(a) 2D 对称稳定腔;(b) 稳定腔中高阶横模的空间强度分布;(c) 非轴向模式;(d) 有方向性发射的稳定腔的三维示意图

Fig. 12 Schematic of the near concentric cavity structure<sup>[36]</sup>. (a) 2D symmetric stable cavity; (b) spatial intensity profile of a high-order transverse mode in a stable cavity; (c) non-axial mode; (d) three-dimensional sketch of the stable cavity with directional emission

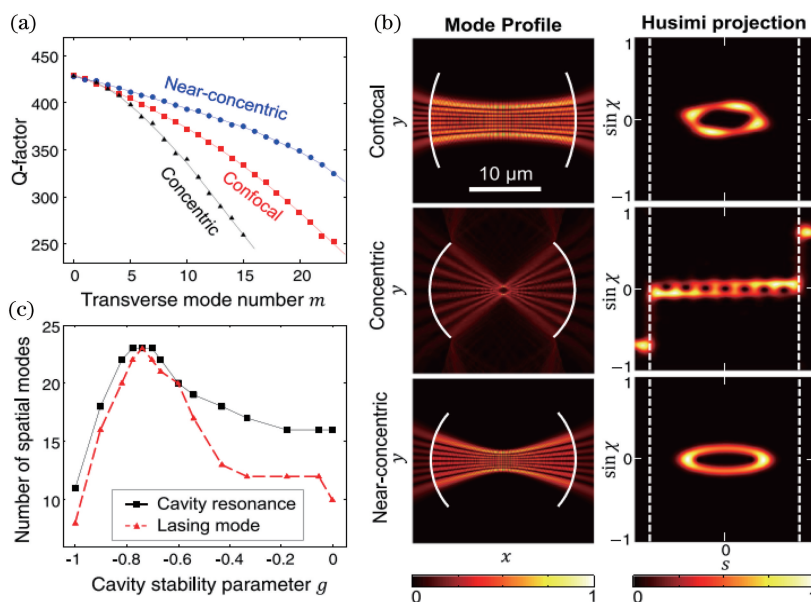


图 13 不同谐振腔的模拟结果<sup>[36]</sup>。(a) 品质因数  $Q$  随横模数  $m$  变化的曲线;(b) 高阶横模( $m=7$ )的场振幅(左)和相应的 Husimi 投影(右)的空间分布;(c) 高  $Q$  腔模数和轴向激射模数随  $g$  参数变化的曲线

Fig. 13 Simulation results of different resonators<sup>[36]</sup>. (a) Dependence of quality factor  $Q$  on number of transverse mode  $m$ ; (b) spatial distributions of field amplitude (left) and corresponding Husimi projections (right) for high-order transverse modes ( $m=7$ ); (c) number of high- $Q$  resonance mode and number of lasing modes as functions of parameter  $g$

## 2.5 哑铃形腔半导体激光

前面所述的随机激光器、混沌腔半导体激光器、近共心腔半导体激光器都能实现低相干性激光,但是方向性差,虽然近共心腔激光是方向性激射,但是其远场分布的半峰全宽仍然有  $70^\circ$ 。简并腔激光器需要复杂的外腔,且大部分仍然属于光泵浦,集成度低。

Xu 等<sup>[37]</sup> 结合前述激光器的优点,寻求一种既有低相干性又有高方向性、电泵浦的大功率半导体激光器。2020 年,他们提出哑铃形腔半导体激光器,如图 14 所示,在哑铃形腔的侧壁添加隔离层和金属层,以防止光在侧壁的泄露及增加侧壁对光的反馈作用<sup>[72-73]</sup>。

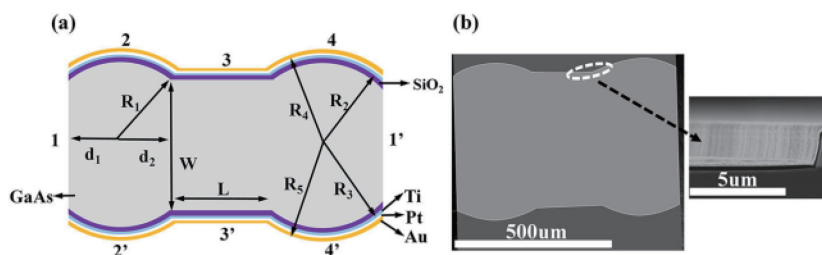


图 14 哑铃形腔示意图<sup>[37]</sup>。(a)具有五层结构的哑铃形腔示意图;(b)哑铃形腔的 SEM 图,虚线圈表示由 SiO<sub>2</sub> 和金属层包裹的腔侧壁

Fig. 14 Schematic of dumbbell-shaped cavity. (a) Schematic of the dumbbell-shaped cavity with five-layer structure; (b) SEM image of the dumbbell-shaped cavity, the virtual coil represents the cavity side wall wrapped by SiO<sub>2</sub> and metal layer

通过对哑铃形腔的模拟,依据 Q 值分布和模场分布,把腔内的模式分为 5 大类。这 5 类模式的模场分布如图 15 所示,可以看出,5 类模式的空间分布差异较大,有利于减小模式竞争以实现多模激射。通过进一步的计算发现,图 15(a)所示腔内的菱形

模式的 Q 值远远大于其他模式,他们通过调整腔的长度和考虑侧壁粗糙度对器件的影响,最终将腔内模式的 Q 值调至接近,并在理论上预测哑铃形腔可以实现多模激射。

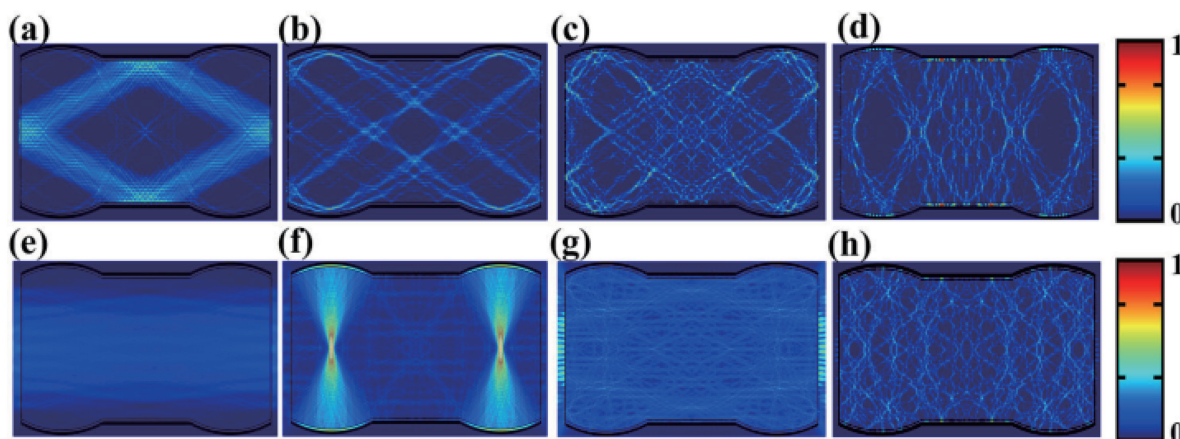


图 15 哑铃形腔中 5 种典型模式的模场分布<sup>[37]</sup>。(a)第一类模式;(b)第二类模式;(c)第三类高 Q 模式;(d)第三类低 Q 模式;(e)F-P 基模;(f)同心腔模式;(g)混合模式;(h)混沌模式

Fig. 15 Mode field distributions of the five types of typical modes in the dumbbell-shaped cavity<sup>[37]</sup>. (a) First type of mode; (b) second type of mode; (c) high-Q mode of the third type of mode; (d) low-Q mode of the third type of mode; (e) fundamental F-P mode; (f) concentric cavity mode; (g) hybrid mode; (h) chaotic mode

实验上他们制备了中心波长为 635 nm 的哑铃形腔半导体激光器,并测试了其激光特性,如图 16 所示。脉冲情况下最大功率为 2.36 W,散斑对比度为 3.7%,远场发散角只有 7.7°,比 Cao 等研究的结果小了近 1/10<sup>[36]</sup>。

哑铃形腔半导体激光器是第一个把复合腔的思想运用到低相干性激光器上的激光器,且得到了较好的性能指标,但是也遇到一些问题,比如连续情况下还不能激射,95%强度处的远场发散角为 54°,所

以哑铃形腔半导体激光器还有优化空间。

### 3 结 论

介绍了 5 类典型的低相干性激光器的原理、设计理念、历史发展,且分析了各个激光器的优缺点。经过多年的发展,低相干性激光器仍处于实验室研究阶段,还存在很多亟待解决的问题,包括方向性差、功率低、连续不激射、相干性调节手段少等。此外,低相干性激光的应用也需要进一步的发掘。

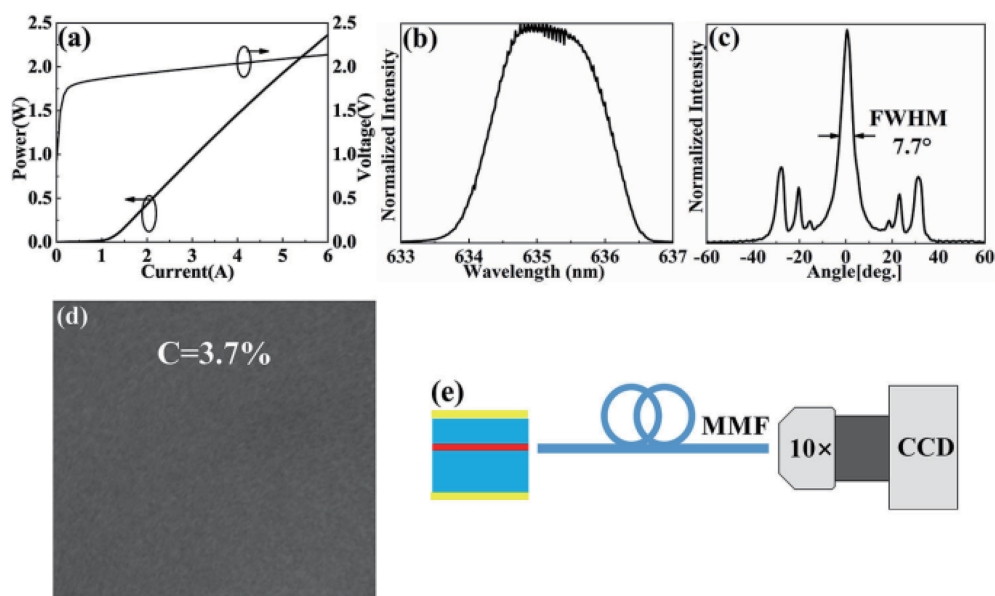


图 16 哑铃形腔半导体激光器实验结果<sup>[37]</sup>。(a)输出功率和电压与注入电流的关系;(b)激光光谱;  
(c)水平远场;(d)散斑图样;(e)测试散斑对比度的实验装置示意图

Fig. 16 Experimental results of the dumbbell-shaped cavity semiconductor laser<sup>[37]</sup>. (a) Output power and voltage as functions of injection current; (b) emission spectrum; (c) horizontal far-field pattern; (d) speckle pattern; (e) schematic of the experimental setup to characterize speckle contrast

### 参 考 文 献

- [1] Bachmann F. Industrial applications of high power diode lasers in materials processing [J]. Applied Surface Science, 2003, 208/209: 125-136.
- [2] Chilla J, Shu Q Z, Zhou H L, et al. Recent advances in optically pumped semiconductor lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6451: 645109.
- [3] Zhao S Y, Qi A Y, Wang M J, et al. High-power high-brightness 980 nm lasers with >50% wall-plug efficiency based on asymmetric super large optical cavity[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 3518-3526.
- [4] Goodman J W. Some fundamental properties of speckle [J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(11): 1145-1150.
- [5] Brown G M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 10-22.
- [6] Creath K. Phase-shifting speckle interferometry[J]. Applied Optics, 1985, 24(18): 3053-3058.
- [7] Leendertz J A. Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1970, 3(3): 214-218.
- [8] Fercher A F, Briers J D. Flow visualization by means of single-exposure speckle photography [J]. Optics Communications, 1981, 37(5): 326-330.
- [9] Chellappan K V, Erden E, Urey H. Laser-based displays: a review [J]. Applied Optics, 2010, 49(25): F79-F98.
- [10] Maycock J, Hennelly B M, McDonald J B, et al. Reduction of speckle in digital holography by discrete Fourier filtering[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 24(6): 1617-1622.
- [11] Knitter S, Liu C G, Redding B, et al. Coherence switching of a degenerate VECSEL for multimodality imaging[J]. Optica, 2016, 3(4): 403-406.
- [12] Edwards C, Bhaduri B, Griffin B G, et al. Epi-illumination diffraction phase microscopy with white light[J]. Optics Letters, 2014, 39(21): 6162-6165.
- [13] Edwards C, Bhaduri B, Nguyen T, et al. Effects of spatial coherence in diffraction phase microscopy[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5133-5146.
- [14] Nguyen T H, Edwards C, Goddard L L, et al. Quantitative phase imaging with partially coherent illumination [J]. Optics Letters, 2014, 39(19): 5511-5514.
- [15] Zhang D L, Lan L, Bai Y R, et al. Bond-selective transient phase imaging via sensing of the infrared photothermal effect [J]. Light, Science & Applications, 2019, 8: 116-127.
- [16] Wolf E. Optics in terms of observable quantities[J]. Il Nuovo Cimento, 1954, 12(6): 884-888.
- [17] Wolf E. A macroscopic theory of interference and diffraction of light from finite sources II. fields with a spectral range of arbitrary width[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical

- and Physical Sciences, 1955, 230(1181): 246-265.
- [18] Roelandt S, Meuret Y, Jacobs A, et al. Human speckle perception threshold for still images from a laser projection system[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 23965-23979.
- [19] Goodman J W. Statistical properties of laser speckle patterns[M]//Dainty J C. *Laser speckle and related phenomena*. Topics in applied physics. Berlin: Springer, 1975, 9: 9-75.
- [20] Goodman J W. *Speckle phenomena in optics: theory and applications*[M]. New York: SPIE, 2007.
- [21] Chriki R, Mahler S, Tradonsky C, et al. Spatiotemporal supermodes: rapid reduction of spatial coherence in highly multimode lasers [J]. *Physical Review A*, 2018, 98(2): 023812.
- [22] Cao H, Chriki R, Bittner S, et al. Complex lasers with controllable coherence [J]. *Nature Reviews Physics*, 2019, 1(2): 156-168.
- [23] Cao H, Xu J Y, Zhang D Z, et al. Spatial confinement of laser light in active random media[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(24): 5584-5587.
- [24] Redding B, Choma M A, Cao H. Speckle-free laser imaging using random laser illumination[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 355-359.
- [25] Cao H, Ling Y, Xu J Y, et al. Lasing with resonant feedback in random media[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2003, 338: 215-218.
- [26] Wiersma D S. The physics and applications of random lasers[J]. *Nature Physics*, 2008, 4(5): 359-367.
- [27] Yu S F. Electrically pumped random lasers [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, 48(48): 483001.
- [28] Leong E S P, Yu S F. UV random lasing action In p-SiC (4H)/i-ZnO-SiO<sub>2</sub> nanocomposite/n-ZnO: Al heterojunction diodes[J]. *Advanced Materials*, 2006, 18(13): 1685-1688.
- [29] Turitsyn S K, Babin S A, Churkin D V, et al. Random distributed feedback fibre lasers[J]. *Physics Reports*, 2014, 542(2): 133-193.
- [30] Chang S W, Liao W C, Liao Y M, et al. A white random laser [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 2720-2729.
- [31] Guo X J, Wang Y F, Jia Y F, et al. Electrically-driven spectrally-broadened random lasing based on disordered photonic crystal structures [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(3): 031113.
- [32] Nixon M, Redding B, Friesem A A, et al. Efficient method for controlling the spatial coherence of a laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19): 3858-3861.
- [33] Liew S F, Knitter S, Weiler S, et al. Intracavity frequency-doubled degenerate laser [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 411-414.
- [34] Redding B, Cerjan A, Huang X, et al. Low spatial coherence electrically pumped semiconductor laser for speckle-free full-field imaging[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(5): 1304-1309.
- [35] Cerjan A, Bittner S, Constantin M, et al. Multimode lasing in wave-chaotic semiconductor microlasers[J]. *Physical Review A*, 2019, 100(6): 063814.
- [36] Kim K, Bittner S, Zeng Y Q, et al. Electrically pumped semiconductor laser with low spatial coherence and directional emission [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(7): 071101.
- [37] Xu L H, Xu L H, Wang Y F, et al. Low-coherence, high-power, high-directional electrically driven dumbbell-shaped cavity semiconductor laser at 635 nm[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(18): 5097-5100.
- [38] Letokhov V. Generation of light by a scattering medium with negative resonance absorption [J]. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1968, 26: 835-840.
- [39] Lawandy N M, Balachandran R M. Laser action in strongly scattering media [J]. *Nature*, 1994, 368(6470): 436-440.
- [40] Cao H. Random lasers: development, features and applications[J]. *Optics and Photonics News*, 2005, 16(1): 24-29.
- [41] Wiersma D S, Cavalieri S. Light emission: a temperature-tunable random laser[J]. *Nature*, 2001, 414(6865): 708-709.
- [42] Schönhuber S, Brandstetter M, Hisch T, et al. Random lasers for broadband directional emission[J]. *Optica*, 2016, 3(10): 1035-1038.
- [43] Wiersma D S. Clear directions for random lasers[J]. *Nature*, 2016, 539(7629): 360-361.
- [44] Arnaud J A. Degenerate optical cavities[J]. *Applied Optics*, 1969, 8(1): 189-196.
- [45] Arnaud J A. Degenerate optical cavities. II: effect of misalignments[J]. *Applied Optics*, 1969, 8(9): 1909-1917.
- [46] Arnaud J A. Degenerate optical cavities. III: effect of aberrations[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(5): 1192-1200.
- [47] Jiang X F, Qavi A J, Huang S H, et al. Whispering gallery microsensors: a review [EB/OL]. (2018-04-30) [2020-11-15]. <https://arxiv.org/abs/1805.00062>.
- [48] He L N, Özdemir Ş K, Yang L. Whispering gallery microcavity lasers [J]. *Laser & Photonics Reviews*,

- 2013, 7(1): 60-82.
- [49] Yang S C, Wang Y, Sun H D. Advances and prospects for whispering gallery mode microcavities [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(9): 1136-1162.
- [50] Hagness S C, Rafizadeh D, Ho S T, et al. FDTD microcavity simulations: design and experimental realization of waveguide-coupled single-mode ring and whispering-gallery-mode disk resonators[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15 (11): 2154-2165.
- [51] Redding B, Ge L, Solomon G S, et al. Directional waveguide coupling from a wavelength-scale deformed microdisk[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100 (6): 061125.
- [52] Nöckel J U, Douglas Stone A. Ray and wave chaos in asymmetric resonant optical cavities [J]. *Nature*, 1997, 385(6611): 45-47.
- [53] Xiao Y F, Zou C L, Li Y, et al. Asymmetric resonant cavities and their applications in optics and photonics: a review[J]. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2010, 3(2): 109-124.
- [54] Jiang X F, Zou C L, Wang L, et al. Whispering-gallery microcavities with unidirectional laser emission[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10 (1): 40-61.
- [55] Cao H, Wiersig J. Dielectric microcavities: model systems for wave chaos and non-Hermitian physics [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(1): 61-111.
- [56] Wang Q J, Yan C, Yu N, et al. Whispering-gallery mode resonators for highly unidirectional laser action [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107 (52): 22407-22412.
- [57] Yan C L, Wang Q J, Diehl L, et al. Directional emission and universal far-field behavior from semiconductor lasers with Limaçon-shaped microcavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94 (25): 251101.
- [58] Wiersig J, Hentschel M. Unidirectional light emission from high-Q modes in optical microcavities [J]. *Physical Review A*, 2006, 73(3): 031802.
- [59] Song Q H, Ge L, Redding B, et al. Channeling chaotic rays into waveguides for efficient collection of microcavity emission [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(24): 243902.
- [60] Lee S B, Yang J, Moon S, et al. Universal output directionality of single modes in a deformed microcavity [J]. *Physical Review A*, 2007, 75: 011802.
- [61] Harayama T, Shinohara S. Two-dimensional microcavity lasers [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(2): 247-271.
- [62] Bunimovich L A. On the ergodic properties of nowhere dispersing billiards [J]. *Communications in Mathematical Physics*, 1979, 65(3): 295-312.
- [63] Ree S, Reichl L E. Classical and quantum chaos in a circular billiard with a straight cut [J]. *Physical Review E*, 1999, 60(2): 1607-1615.
- [64] Ge L, Chong Y D, Stone A D. Steady-state Ab initio laser theory: generalizations and analytic results [J]. *Physical Review A*, 2010, 82(6): 063824.
- [65] Türeci H E, Ge L, Rotter S, et al. Strong interactions in multimode random lasers [J]. *Science*, 2008, 320(5876): 643-646.
- [66] Kogelnik H, Li T. Laser beams and resonators [J]. *Applied Optics*, 1966, 5(10): 1550-1567.
- [67] Biellak S A, Sun Y, Wong S S, et al. Lateral mode behavior of reactive-ion-etched stable-resonator semiconductor lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1995, 78(6): 4294-4296.
- [68] Fukushima T, Harayama T, Miyasaka T, et al. Morphological dependence of lasing modes in two-dimensional quasi-stadium laser diodes [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, 21(5): 935-943.
- [69] Fukushima T, Biellak S A, Sun Y, et al. Lasing characteristics of a quasi-stadium laser diode [C] // *Summaries of Papers Presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 18-23, 1997, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 1997: 227-228.
- [70] Fukushima T, Biellak S, Sun Y, et al. Beam propagation behavior in a quasi-stadium laser diode [J]. *Optics Express*, 1998, 2(2): 21-28.
- [71] Fukushima T. Analysis of resonator eigenmodes in symmetric quasi-stadium laser diodes [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(12): 2208-2216.
- [72] Yao Q F, Huang Y Z, Yang Y D, et al. Analysis of mode characteristics for microcircular resonators confined by different metallic materials [J]. *Journal of Semiconductors*, 2016, 37(12): 124004.
- [73] Yao Q F, Huang Y Z, Lin J D, et al. High-Q modes in defected microcircular resonator confined by metal layer for unidirectional emission [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 2165-2170.