

短相干半导体激光器的射频调制特性及应用

魏超¹, 初凤红¹, 卞正兰^{1*}, 魏芳²

(1. 上海电力大学 电子与信息工程学院, 上海 200135;
2. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 短相干激光光源在进行高精度的干涉测量时, 可以消除被测光学元件前后表面反射形成的杂散光, 是低相干干涉仪的理想光源。针对低相干干涉应用对光源的需求, 依据速率方程和激光调制特性对射频调制下的短相干半导体激光器光谱特性进行了理论研究。搭建了短相干光源系统, 研究了半导体激光器斜率效率 η 、偏置电流 I_b 、射频信号频率 f_m 和幅度 A_m 对其相干长度的影响。实验结果表明, 斜率效率大的半导体激光器更有助于短相干特性的实现, 随着调制信号频率和幅值增加, 工作在阈值附近的激光器相干长度随之降低, 该系统在 $I_b = 1.3I_{th}$ 、 $f_m = 950$ MHz、 $A_m = 19$ dBm的条件下获得了相干长度为 90 μm 的短相干光源。并成功应用于斐索干涉仪上, 获得了对比度 $K = 0.9318$ 的清晰干涉图像, 与现有短相干光源相比, 对比度提高了约 51.1%, 实现了对平行平板玻璃面形的测量。

关键词: 半导体激光器; 短相干光源; 射频调制; 调制频率; 调制深度

中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220553

0 引言

传统干涉仪在测量薄透明物体面形时, 由于激光光源的高相干性, 会使透明物体上下表面反射光形成干涉而产生干扰条纹, 利用短相干光源相干长度短的特性可以有效避免上述问题^[1]。目前, 短相干光源已广泛应用于低相干干涉测量领域, 如光学相干断层扫描^[2-3]、有机材料折射率和厚度测量^[4-5]、光学元件面形检测等^[6-7]。通常用于低相干干涉仪的光源主要为超辐射发光二极管 (SLD)、超短脉冲激光器、发光二极管 (LED) 等宽带光源。但是 SLD 输出光功率较小, 超短脉冲激光器体型大且价格昂贵, LED 光源准直性和光强稳定度较差。半导体激光器 (LD) 以其成本低、结构紧凑、功率相对较高且可用波长范围广等优点, 已成为很多光学测量技术的首选光源^[8]。但是, LD 谱线宽较窄, 相干长度较长, 通过相干性控制技术降低其相干长度的研究具有重要意义。

理论和实验研究表明, 频率调制可以展宽 LD 的

光谱线宽^[9-10]。法布里-珀罗 (FP) 型激光器在高速大正弦信号调制下, 呈现多纵模振荡而满足低相干条件^[11]。使用射频信号对 LD 进行调制使其光谱展宽, 获得短相干光源的方法具有成本低、操作简单、便于调节等优点, 并且有利于设备的微型化、集成化, 是短相干光源未来一段时间发展的主要方向。目前, 使用频率调制实现 LD 短相干特性的研究仍然较少, Lee Ho-Jae 等^[7]在低相干扫描干涉仪应用中使用 80 kHz 的调制信号, 将 LD 相干长度降至 200 μm 。Khomenko 等人^[12]使用频率调制的方法获得了相干长度为 150 μm 的短相干光源, 并应用于透明复合材料的缺陷检测中。中国科学院空天信息创新研究院^[13]、美国 4D Technology 公司^[14]分别研发出了相干长度均为 200 μm 的短相干激光器, 可测量厚度大于 0.2 mm 的平行平板类光学元件。Wada K 等人^[15]研究了频率调制下不同波长的 FP 激光器对于边模的抑制。干涉仪的成像质量会受光源的影响, 合适的参数对于 LD 通过射频调制获取高质量的短相干光源十分重要, 现有的短相

收稿日期: 2022-08-05; 修订日期: 2022-11-01

基金项目: 上海市科委地方院校能力建设项目 (20020500700)

作者简介: 魏超, 男, 硕士生, 主要从事激光器相干控制技术方面的研究。

导师简介: 初凤红, 女, 教授, 博士, 主要从事光纤传感技术、光电检测技术方面的研究。

通讯作者: 卞正兰, 女, 讲师, 博士, 主要从事光纤传感、光电检测与控制方面的研究。

干光源用于大口径干涉仪时干涉图像质量较差。文中使用中心波长为 637 nm 的 FP 激光二极管作为短相干光源,相较于长波长的 FP 激光二极管,调制后的短波长激光器拥有更低的边模/主模抑制比,基于射频调制 LD 的方法获得短相干光源,文中基于 LD 线宽展宽原理,通过实验分析了激光器 PI 曲线斜率效率、偏置电流、射频信号频率和幅值等对 LD 相干长度的影响,并在同一条件下,与现有采用频率调制的短相干光源进行对比,验证其对干涉图像质量的改善效果。

1 LD 线宽展宽原理

LD 的相干长度 Δx 可用激光器中心波长 λ , 谱线宽度 $\Delta\lambda$ 表示为:

$$\Delta x = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

可见,要降低 LD 的相干长度,需要将激光器的线宽展宽。基于射频调制的 LD 线宽展宽方案如图 1 所示。高速大正弦信号加载在恒流驱动上,带有偏置的射频信号对 FP 激光器进行直接调制,输出为多纵模,进而可以实现激光器的线宽展宽。

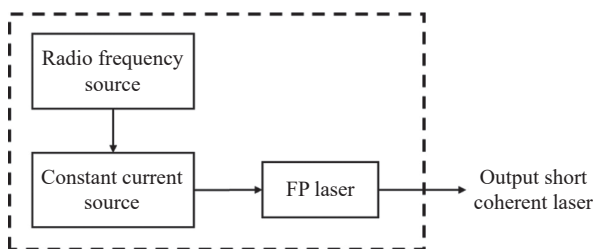


图 1 LD 线宽展宽方案

Fig.1 LD linewidth broadening scheme

1.1 LD 多模速率方程及线宽展宽原理

LD 有源区内电子和光子之间相互的能量交换是由其自发辐射和受激辐射过程所支配的,光子和电子之间能量交换的速率可以用速率方程来描述。基于 FP 腔的 LD 工作在阈值附近时输出的激光光谱一般是多纵模的^[16],其速率方程有如下形式^[17]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{eV} - \frac{N}{\tau_e} - \frac{C}{n} g_m S_m \quad (2)$$

$$\frac{dS_m}{dt} = \frac{\Gamma\gamma N}{\tau_e} + \frac{C}{n} g_m S_m - \frac{S_m}{\tau_p} \quad (3)$$

其中:

$$g_m = g(N-N') \left[1 - \left(\frac{m}{M} \right)^2 \right] \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M \quad (4)$$

式中: N 为注入电子浓度; J 为注入电流密度; e 为电子电荷; V 为有源区体积; τ_e 为载流子寿命; C 为光速; n 为有源区折射率; g_m 为 m 阶模的增益; S_m 为 m 阶模的光子密度; Γ 为限制因子; γ 为自发辐射因子; τ_p 为光子寿命; g 为微分增益系数; N' 为透明载流子浓度; M 为边模数。

令 $\frac{dN}{dt} = 0$ 和 $\frac{dS_m}{dt} = 0$, 得到 m 阶模的光子密度 S_m 的表达式为:

$$S_m = \frac{\frac{N\gamma}{\Gamma}}{\frac{C}{n} g \tau_e (N_{th} - N) \left[1 + \frac{N - N'}{N_{th} - N} \left(\frac{m}{M} \right)^2 \right]} \quad (5)$$

式中: N_{th} 为阈值载流子浓度,其表达式为:

$$N_{th} = N' + \frac{C}{n\tau_p\Gamma g} \quad (6)$$

通常半高宽为 $\Delta\lambda$ 的光谱高斯增益曲线 $G(\lambda, \Delta\lambda)$ 可以表示为:

$$G(\lambda, \Delta\lambda) = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{1}{\Delta\lambda} \exp\left(-\frac{4(\lambda - \lambda_0)^2 \ln 2}{(\Delta\lambda)^2}\right) \quad (7)$$

式中: λ_0 为中心波长,若主模光强下降一半处对应的 q 阶模波长为 λ_q , 则有

$$G(\lambda_q, \Delta\lambda) = S_q \quad (8)$$

FP 激光器线宽 $\Delta\lambda$ 可以表示为:

$$\Delta\lambda = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \left(\frac{C\tau_e\Gamma G}{nN\gamma} M + \frac{n - C\tau_e\tau_p\Gamma G}{nN\gamma\tau_p} \right) \quad (9)$$

式中: G 为受激辐射净增益。从上式可以得 LD 的谱线宽度正比于模式数量,即 $\Delta\lambda \propto M$ 。物理原理为: LD 在高频大信号调制作用下,注入电流的变化使得载流子浓度 N 发生变化,载流子浓度的变化又必然引起折射率的变化,光模的频率发生漂移,从而使更多的模式达到阈值增益,激光器主模的强度下降,而次模的强度相对增加,除主模外的其他边模的光子浓度 S_m 同时出现振荡,因此,FP 激光器输出光谱纵模数增多,导致其谱线越宽。

1.2 LD 直接调制特性

LD 输出功率与注入电流的大小直接相关。为了

获得更高的调制效率,使输出信号不失真,需要在加调制信号电流的同时加上一个偏置电流 I_b ,且通常选择在阈值电流 I_{th} 附近^[18]。注入电流包括直流分量和交流分量,可以表示为:

$$I = I_b + I_m \cos \omega_m t \quad (10)$$

式中: I_b 为偏置电流; I_m 为调制信号的幅度; ω_m 为调制信号的角频率。注入电流对模式功率的直接调制,必然伴随着模式相位和频率的调制^[18],此时,输出激光光波的强度可以表示为:

$$E(t) = E_0 \left(1 + \frac{I_m}{E_0} \cos \omega_m t \right) \cos(\omega_c t + \alpha \sin \omega_m t + \varphi_c) \quad (11)$$

式中: E_0 为激光信号幅度; ω_c 为激光信号角频率; φ_c 为激光信号相位角; α 为调制系数。其表达式为:

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\omega_m} \quad (12)$$

式中: $\Delta\omega$ 为最大角频率调制量,其值与调制信号幅值成正比。利用三角函数公式和贝塞尔函数公式将公式(11)展开为:

$$\begin{aligned} E(t) = & E_0 J_0(\alpha) \cos(\omega_c t + \varphi_c) + \\ & \frac{I_m}{2} J_0(\alpha) \cos((\omega_c + \omega_m)t + \varphi_c) + \\ & \frac{I_m}{2} J_0(\alpha) \cos((\omega_c - \omega_m)t + \varphi_c) + \\ & \left(E_0 + \frac{I_m}{2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\alpha) \{ \cos[(\omega_c + n\omega_m)t + \varphi_c] + \\ & (-1)^n \cos[(\omega_c - n\omega_m)t + \varphi_c] \} \end{aligned} \quad (13)$$

从上式可知电流调制的结果是在基频 ω_c 两侧间隔 ω_m 处产生无穷多对新的频率成分,在光谱中称为边

模,边模强度与调制信号频率和幅度有关。激光器的谱线宽度即半高全宽(Full Width at Half Maxima, FWHM)是边模光强为主模光强一半处两个边模波长之差^[19]。新产生的边模越多、距离主模越远、强度越大谱线展的就会越宽。

2 基于射频调制的短相干 LD 实验

2.1 短相干 LD 实验装置

实验搭建了短相干光源系统,使用光谱仪测量激光器输出光谱线宽,研究了两台不同斜率效率 FP 激光器的短相干特性,并将获得的短相干光源应用于斐索干涉仪,实现对平行平板玻璃面形的检测。基于短相干光源的实验装置如图 2 所示。中心波长为 635 nm 和 637 nm 的 LD 安装在 LDM9LP 激光器底座上,激光器驱动器的最大驱动电流为 1 A,最大温度控制电流为 4.5 A,最大温度控制电压为 3 V,TEC 加热/冷却能力可达 7 W,最大射频输入功率为 500 mW,调制频率可从 200 kHz 到 1 GHz。自制恒流源电路输出电流范围可以任意调节,且加入了延时启动电路和功率保护电路,能够有效保护激光器。WTC3243 温度控制芯片最大驱动电流可达±2.2 A,温度稳定度可达到 0.0009 °C,通过调整控制回路的 P、I 值可以精确控制温度。射频模块采用 HMC830 芯片,该芯片输出频率 25~3 000 MHz,输出幅度经放大器放大后可达 19 dBm,相位噪声低至-110 dBc/Hz。AQ6370D 型光谱仪用来测量 600~1 700 nm 波段的光谱,测量精度可达 0.01 nm。

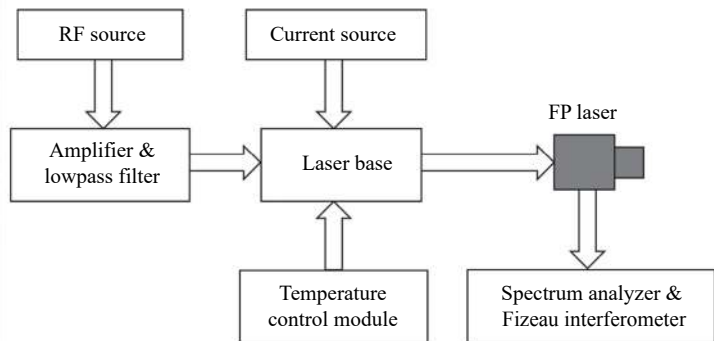
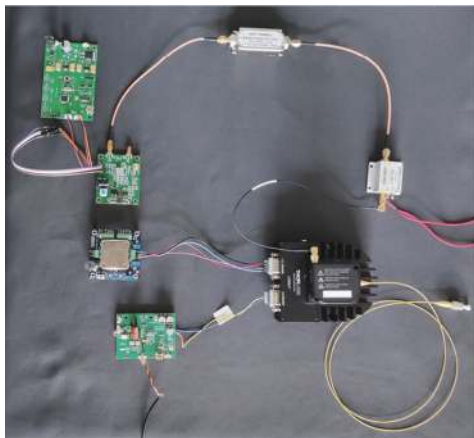


图 2 短相干光源实验装置图

Fig.2 Experimental setup of short coherent light source

2.2 短相干 LD 特性

LD 的 $P-I$ 曲线在阈值以上具有非常好的线性关系, 定义激光器斜率效率 η 表达式为:

$$\eta = \frac{\Delta P}{\Delta I} \quad (14)$$

在相同的调制信号作用下, 斜率效率大的 LD 拥有更大的输出功率变化, 有助于实现好的调制效果。图 3 为实验所测 FP 激光器的 $P-I$ 特性曲线。两台激光器的中心波长分别为 635 nm 和 637 nm, $P-I$ 特性曲线斜率分别为 2.72 W/A 和 5.40 W/A, 阈值电流均为 $I_{th} = 45$ mA, 其工作温度通过温控系统控制在 25 °C。在实验中, 改变偏置电流大小、射频信号频率和幅值, 记录光谱的半高全宽来描述 LD 的相干性。

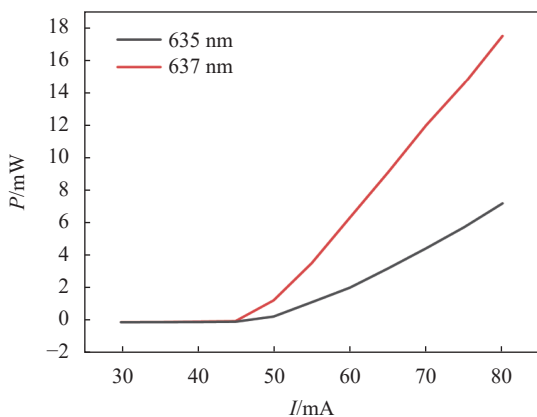


图 3 实验用 FP 激光器 $P-I$ 特性曲线图

Fig.3 $P-I$ characteristic curve of FP laser

2.2.1 偏置电流对 LD 相干长度的影响

根据 LD 直接调制特性理论分析, 在实验中, 设置射频信号频率 $f_m = 950$ MHz, 幅值 $A_m = 19$ dBm, 研究偏置电流变化对 LD 相干长度的影响。实验结果如图 4 所示, 在偏置电流较小时, 激光器的线宽较窄, 这是由于部分射频信号工作在激光器的阈值电流以下, 导致激光器的输出功率异常低, 影响激光器的射频调制性能; 随着偏置电流的增大, 两台激光器的谱线宽度随之增大, 相干长度随之降低, 均在偏置电流 $I_b = 1.3I_{th}$ 时达到最小, 且 637 nm 激光器的相干长度比 635 nm 激光器更短, 相干长度可降低至 89.4 μm ; 随着偏置电流的进一步增大, 光源相干性增强, 此时在其他条件不变的情况下, 激光器的线宽主要受偏置电流的影响, 增大的注入电流加剧了模式竞争, 使 LD 输出纵模数量减少, 谱线宽度变窄。

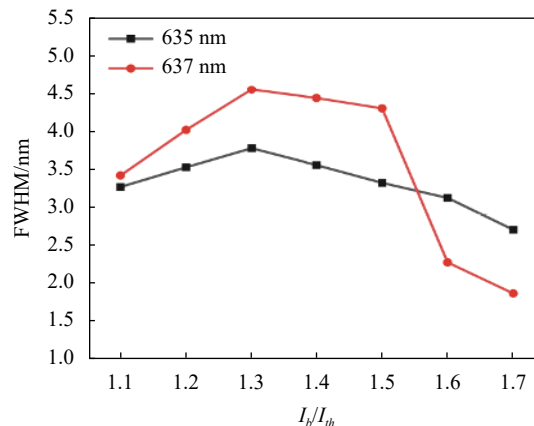


图 4 偏置电流对相干长度的影响

Fig.4 Effect of bias current on coherence length

2.2.2 射频调制信号频率对 LD 相干长度的影响

为减小偏置电流的影响, 设置偏置电流 $I_b = 1.3I_{th}$, 射频信号幅值 $A_m = 19$ dBm, 改变调制信号频率 100~950 MHz, 研究射频调制信号频率对 LD 相干长度的影响。实验结果如图 5 所示, 电流调制使 LD 谐振腔折射率发生变化, 引起更多的模式产生振荡, 在调制信号频率较低时, 由于振荡模式可以响应电流的变化, 射频调制的作用不明显, 激光器的线宽较窄; 随着调制信号频率的增大, 此时模式数目不能响应于高频调制电流的快速变化, LD 发射光谱呈现多纵模输出, 因此两台激光器的线宽逐渐展宽, 相干长度随之减小, 且 637 nm 激光器的相干长度比 635 nm 激光器更短, 当调制频率为 950 MHz 时, 相干长度可降低至 88.6 μm 。

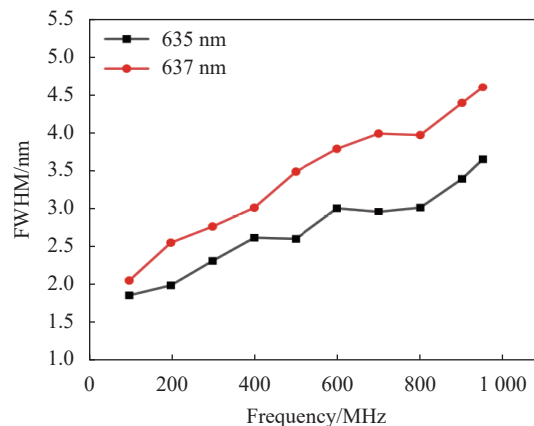


图 5 射频信号频率对相干长度的影响

Fig.5 Effect of RF signal frequency on coherence length

2.2.3 射频调制信号幅度对 LD 相干长度的影响

设置偏置电流 $I_b = 1.3I_{th}$, 射频信号频率 $f_m = 950$ MHz, 改变调制信号幅值 0~19 dBm, 研究射频信号幅值对 LD 相干长度的影响。实验结果如图 6 所示, 随着调制信号幅值的增大, 由于 LD 内振荡模式的增益发生变化, 主模强度下降, 边模强度相对增加, 调制深度的增大使两台激光器的线宽逐渐展宽, 相干长度随之减小, 且 637 nm 激光器的相干长度比 635 nm 激光器更短, 在调制幅值为 19 dBm 时, 相干长度可降低至 89.9 μm 。

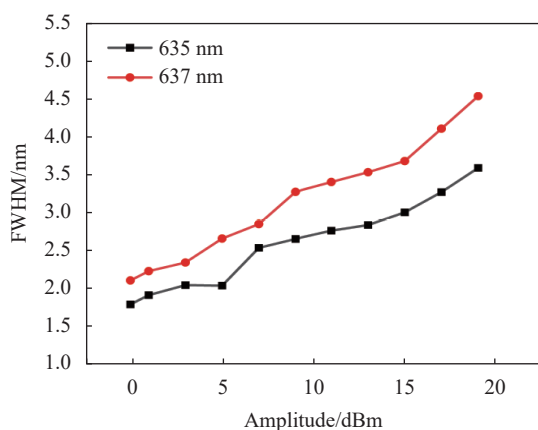


图 6 射频信号幅值对相干长度的影响

Fig.6 Effect of RF signal amplitude on coherence length

综上所述, 在偏置电流 $I_b = 1.3I_{th}$ 、射频信号频率 $f_m = 950$ MHz、射频信号幅值 $A_m = 19$ dBm 时, 光源相干长度最短。因此, 使激光器工作在略大于阈值电流的状态, 提高射频调制信号频率和幅值, 选择斜率效率更大的 FP 激光器, 更有利于短相干特性的实现。

2.3 短相干 LD 在斐索干涉仪上的应用

通过对两台激光器的短相干特性研究, 选用斜率效率更大的 637 nm FP 激光器作为短相干激光器系统光源, 图 7 为光谱仪采集的射频调制前后的光谱图。不加调制时, 工作在阈值附近的 FP 激光器输出光谱线宽较窄为 1.588 nm, 相干长度为 256 μm ; 在偏置电流为 $I_b = 1.3I_{th}$ 和频率 $f_m = 950$ MHz、幅值 $A_m = 19$ dBm 的高速大正弦信号调制下, 模式增益发生改变, 激光器主模的强度下降, 而次模的强度相对增加, 更多模式发生振荡, 形成类高斯的光谱, 这与前述的理论一

致, 展宽后的光谱线宽可以达到 4.456 nm, 此时激光器的相干长度降至 90 μm 。

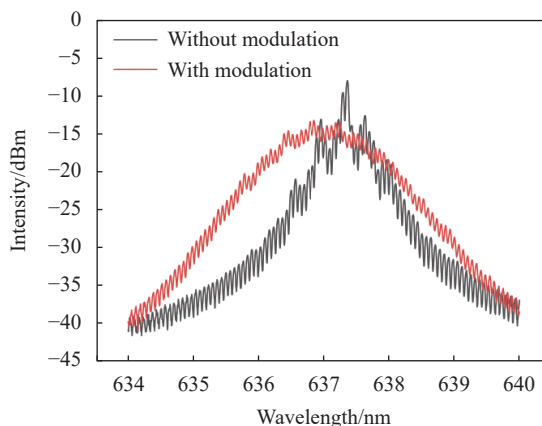


图 7 射频调制前后 LD 输出光谱图

Fig.7 LD output spectrum before and after RF modulation

将该短相干光源应用于斐索干涉仪上, 对厚度为 0.15 mm 的透明平行平板玻璃面形进行测量, 见图 8。

测量原理为: FP 激光器输出的短相干光源发出一束平行细光束, 经分光棱镜 BS1 被分为光束 P1 和 P2。P1 和 P2 分别经平面镜 M1 和平面镜 M2 反射后再次经过 BS1 相遇, 其中平面镜 M1 固定, 平面镜 M2 可移动, 从而会在 P1 和 P2 之间引入 2Δ 的光程差。P1 和 P2 重合后进入光纤, 经扩束镜 L1 和准直物镜 L2 后扩束准直, 分别在参考镜 R 和被测样品 T 上反射, 通过调整 R 和 T 之间的距离为 Δ , 匹配 P1 和 P2 之间的光程差, 由于光源相干长度小于被测样品厚度, 仅有参考镜 R 下表面和被测样品 T 上表面反射的光小于相干长度, 满足干涉条件, 反射的光束经过分光棱镜 BS2 和成像镜头 L3 后通过 CCD 采集、软件处理后输出干涉条纹, 通过干涉条纹的凹凸判断平行平板玻璃面形平整度。

该短相干光源可以有效避免平板玻璃上下表面反射光干涉混叠所引起的背景噪声, 如图 9 所示。未调制时的激光光源由于相干性好, 线宽窄, 相干长度较长, 平板玻璃上下表面的反射光也会形成干涉, 与平板玻璃表面的干涉条纹相互叠加, 对面形信息形成了严重干扰, 如图 9(a) 所示; 经过射频调制的光源相干长度降低, 小于平板玻璃的厚度, 平板玻璃上下表面的反射光不会产生干涉, 因此, CCD 采集到仅有携

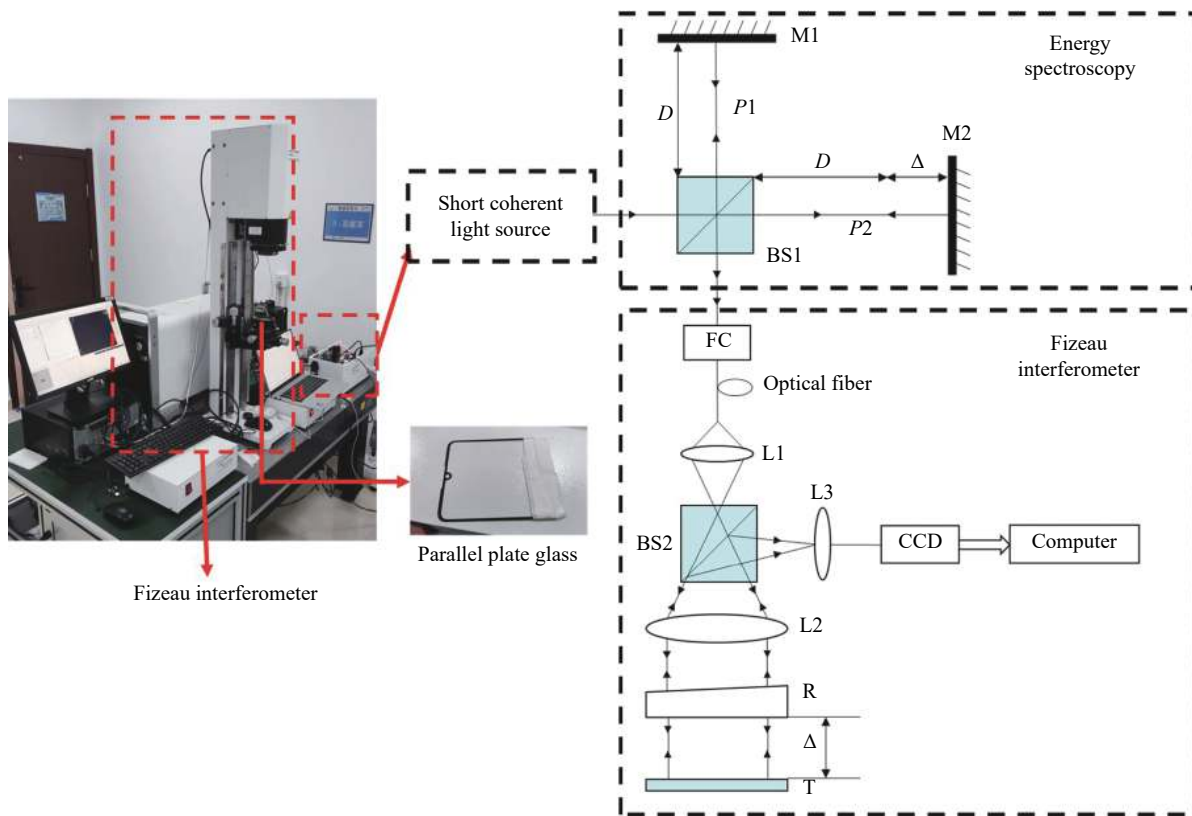


图 8 基于短相干光源的平行平板玻璃干涉测量实验装置图

Fig.8 Experimental setup of parallel plate glass interferometry based on short coherent light source

带平板玻璃面形信息的两束光干涉形成的条纹图, 避免了干扰条纹的产生, 如图 9(b) 所示。

通常干涉图像的质量用干涉条纹的对比度 K 来衡量, 它的定义为:

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (15)$$

式中: I_{\max} 为干涉场中某点附近光强的极大值; I_{\min} 为该点附近光强的极小值。使用文中的参数获得的短相干光源使得干涉图像拥有更高的图像质量, 如图 9(b) 所示, 相比现有的短相干光源^[13], 对比度可达 0.9318, 提升了约 51.1%, 在避免背景噪声的同时, 携带面形信息的干涉条纹显示更加清晰。

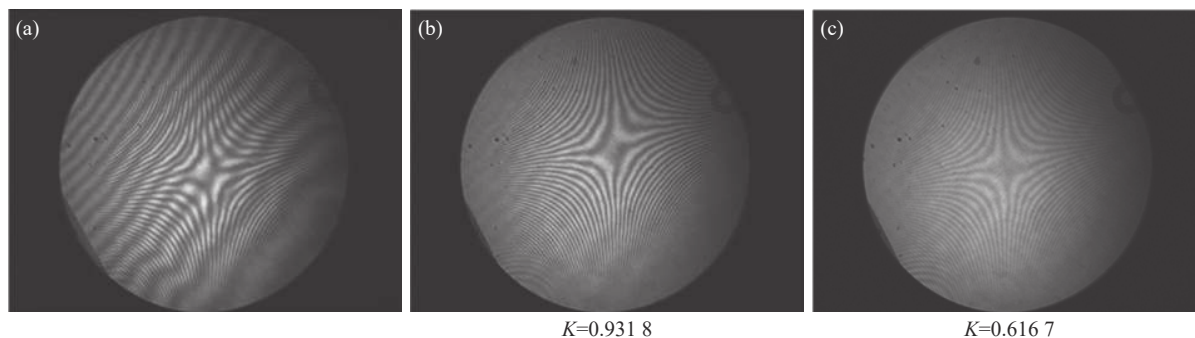


图 9 透明平行平板玻璃表面干涉图像。(a) 未调制的 637 nm 激光光源; (b) 文中 RF 调制的 637 nm 激光光源; (c) 其他短相干激光光源

Fig.9 Interference image of transparent parallel plate glass surface. (a) Unmodulated 637 nm laser source; (b) RF modulated 637 nm laser source in this paper; (c) Other short coherent laser source

3 结 论

文中通过速率方程和LD调制特性对射频调制下的LD光谱特性进行了理论研究,LD线宽与纵模数、射频调制信号频率和幅值呈现正相关的关系。基于理论搭建了短相干光源系统,并通过实验研究了激光器斜率效率、偏置电流、射频信号频率和幅值对LD相干长度的影响。实验结果表明:选用斜率效率更大的LD,在偏置电流 $I_b = 1.3I_{th}$ 条件下,随着调制信号频率和幅值增大,激光器相干长度降低,在射频信号频率 $f_m = 950$ MHz、幅值 $A_m = 19$ dBm时相干长度最短可以达到 $90\ \mu\text{m}$,可用于测量厚度薄至 $0.09\ \text{mm}$ 的透明平行平板类光学元件,得到的干涉图像对比度为 0.9318 ,对比现有短相干光源拥有更高的清晰度。文中的研究提高了短相干光源的性能,在低相干干涉测量领域有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Wang Jun, Chen Lei. Measurement of homogeneity of optical glass with parallel surfaces using low coherence light sources [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(12): 2515-2519. (in Chinese)
- [2] Shibata H, Ozaki N, Yasuda T, et al. Imaging of spectral-domain optical coherence tomography using a superluminescent diode based on InAs quantum dots emitting broadband spectrum with Gaussian-like shape [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2015, 54(4S): 04DG07.
- [3] Yi Ji. Visible light optical coherence tomography in biomedical imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(9): 0902001. (in Chinese)
- [4] Gao Bo, Li Qiang, Liu Ang, et al. Measuring refractive index of transparent plate by low-coherent interference [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0804004. (in Chinese)
- [5] Káčik D, Tatar P, Martinček I. Measurement of PDMS refractive index by low-coherence interferometry[C]//2014 ELEKTRO, IEEE, 2014: 662-665.
- [6] Yang Guang, Chen Lei, Hu Chenhui, et al. Low coherence carrier frequency interference method for measurement of the liquid crystal cell surface [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(2): 108. (in Chinese)
- [7] Sun Qinyuan, Chen Lei, Zheng Donghui, et al. Dynamic Fizeau interferometer using low-coherence light source [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0220001. (in Chinese)
- [8] Lee H J, Joo K N. Coherence function control of a multi-mode laser diode by the frequency modulation and its low coherence interferometric application [J]. *Precision Engineering*, 2014, 38(4): 964-968.
- [9] Wada K, Hirata K, Yoshida M, et al. A gain-switched laser diode as a low-coherence light source [J]. *Optics Communications*, 2003, 228(1-3): 49-54.
- [10] Feng Yong, Zhang Wenxi, Wu Zhou, et al. Short coherent light source based on current modulation in semiconductor lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(6): 1321-1328. (in Chinese)
- [11] Wada K, Kitamura M, Akage Y, et al. Intensity and phase correlation method for determining the linewidth enhancement factor of semiconductor lasers [J]. *Optics Communications*, 1994, 110(3-4): 345-350.
- [12] Khomenko A, Cloud G L, Haq M. Application of low-coherence interferometry for in situ nondestructive evaluation of thin and thick multilayered transparent composites [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(12): 125103.
- [13] 中国科学院院刊. 短相干激光器[EB/OL]. (2020-03-05)[2022-05-21]. <http://www.bulletin.cas.cn/thesisDetails?columnId=35568866&Fpath=home&index=0&lang=zh>.
- [14] 4D Technology. AccuFiz D[EB/OL]. (2020-08-20)[2022-05-21]. <https://4dtechnology.com/products/fizeauinterferometers/accufiz-d-short-coherence-fizeau-interferometer/>.
- [15] Wada K, Sato H, Yoshioka H, et al. Suppression of side fringes in low-coherence interferometric measurements using gain-or loss-modulated multimode laser diodes [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(12R): 8484.
- [16] Gfroerer T, Bergthold M. Laser diode coherence [J]. *American Journal of Physics*, 2020, 88(9): 740-745.
- [17] Chen Qidao. Transient spectra of semiconductor laser [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1989, 10(2): 20-27. (in Chinese)
- [18] Li Jinjun, Sun Shuai, Guo Xiaochuan. Research on high frequency direct modulation of laser light source [J]. *Physica Procedia*, 2011, 19: 442-446.
- [19] 郭长志. 半导体激光器速率方程理论[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

Radio frequency modulation characteristics and application of short coherent semiconductor laser

Wei Chao¹, Chu Fenghong¹, Bian Zhenglan^{1*}, Wei Fang²

(1. College of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200135, China;

2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract:

Objective Short coherent laser light source can eliminate the stray light formed by the reflection of the front and rear surfaces of the optical element to be measured in high-precision interferometry, which is an ideal light source for low-coherence interferometers. There are important applications in optical coherence tomography, refractive index and thickness measurement of organic materials, surface profile detection of optical elements, etc. The imaging quality of the interferometer will be affected by the light source, and the appropriate parameters are very important for the semiconductor laser to obtain high-quality short coherent light source through RF modulation. However, the spectral linewidth of semiconductor lasers¹ is narrow. It is of great significance to reduce coherence length through the coherence control technology.

Methods A short coherent light source was obtained by radio frequency modulation using a Fabry-Perot laser diode with central wavelength of 637 nm. The spectral properties of short coherent semiconductor lasers under RF modulation are theoretically studied based on laser rate equations and modulation characteristics. A short coherent light source system (Fig.2) was built to study the effects of laser slope efficiency, bias current, RF signal frequency and amplitude on the coherence length of semiconductor lasers. Compared with the existing short coherent light source with RF modulation under the same conditions, its improvement effect on the interference image quality was verified.

Results and Discussions The spectral linewidth of laser was measured by spectrometer. The short coherence characteristics of two Fabry-Perot lasers with different slope efficiency were studied and the results show that the semiconductor laser with high slope efficiency has greater output power variation under the same modulation signal, which is helpful to achieve good modulation effect. The coherence length of a semiconductor laser is the smallest when the bias current is slightly larger than the threshold current (Fig.4). When the bias current is small, the linewidth of the laser is narrow. This is because some RF signals work below the threshold current, which leads to the abnormally low output power of the laser and affects the RF modulation performance. When the bias current is too large, the coherence of the light source is enhanced, and the increased injection current intensifies the mode competition, the number of longitudinal modes output by the semiconductor laser is reduced and the spectral line width is narrowed. The coherence length of the semiconductor laser is negatively correlated with the frequency (Fig.5) and amplitude (Fig.6) of the RF modulation signal. With the increase of the frequency and amplitude of the modulation signal, the emission spectrum of the semiconductor laser shows multi-longitudinal mode output, the spectral line width is broadened, and the coherence length decreases. An experimental setup for measuring the surface profile of transparent parallel plate glass was built (Fig.8). The short coherent light source obtained by using the parameters in this paper makes the interference image have higher image quality. Compared

with the existing short coherent light source, the contrast can reach 0.931 8, which is increased by about 51.1%. While avoiding background noise, the interference fringes with surface information are displayed more clearly (Fig.9).

Conclusions Under the condition of bias current $I_b = 1.3I_{th}$, a semiconductor laser with higher slope efficiency is selected. With the increase of modulation signal frequency and amplitude, the coherence length of the laser decreases, and the shortest coherence length can reach 90 μm at RF signal frequency $f_m = 950$ MHz and amplitude $A_m = 19$ dBm. It can be used to measure transparent parallel plate optical elements as thin as 0.09 mm, and the interference image contrast is 0.931 8, which is higher than the existing short coherent light source. The research improves the performance of short coherent light source and has broad application prospects in the field of low coherent interferometry.

Key words: semiconductor lasers; short coherent light source; radio frequency modulation; modulation frequency; modulation depth

Funding projects: Local College Capacity Building Project of Shanghai Municipal Science and Technology Commission (20020500700)