

半导体激光器光强光热调制特性的研究*

卢洪斌 王向朝 王学锋 钱 锋 宋 松 陈高庭 方祖捷

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 由光热调制半导体激光器物理模型出发,从理论上推导出半导体激光器结温变化与相关物理量的关系式,并从光热调制实验中得出光强调制同调制频率及半导体激光器偏置电流的关系,为选择半导体激光器恰当的光热调制参数,以降低光强调制干扰,从而实现纳米精度干涉测量提供重要依据。

关键词 光热调制, 半导体激光器, 干涉测量, 光强调制, 热时间常数

1 引 言

半导体激光干涉测量技术在信息、微电子、机器人、机械工程等领域用于位移、振动、表面轮廓等物理量的非接触测量,具有精度和灵敏度高、体积小、结构紧凑简单等优点,对于实现高精度测量和控制有很好的应用前景。其中采用半导体激光正弦相位调制技术已实现纳米精度干涉测量。在这些干涉仪中,位移、面形等的测量是通过对干涉信号的快速傅里叶变换给出的相应频谱分布计算而得到的^[1]。

通常实现正弦相位调制的方法是通过注入电流对半导体激光器(LD)输出光频进行调制,使用波长调制外差干涉测量技术,通过测量干涉信号位相的变化而计算出光程差。但这种方法将同时对输出光强有相对较大的调制,从而造成频谱分布的噪音,产生测量误差,这在高精度测量中需要设法避免。因此降低乃至消除光源光强的扰动对高精度测量来说是非常必要的。C. M. Klimcak 等通过光热调制 LD 波长大幅度地减小了光源输出光强的波动^[2]。他们将 He-Ne 激光器输出光注入到作为干涉光源的 LD 的激活区,实现对激光频率的调制。这种方法最近被用于正弦相位调制干涉测量技术中已取得纳米级的测量精度^[3]。此外,波长的光热调制方法已被用于稳定 LD 的频率^[4]。

光热调制光频实际上是通过半导体结温的调制而实现的,而结温的变化不可避免地对光强产生调制。因此光热光频调制不可能完全消除对光强的调制,有必要对这种光热强度调制机理作深入研究,以期把光热光频调制引起的光强波动降低到最低程度。本文建立了一种基于 LD 结温变化与调制频率关系的热传导物理模型,得到结温与相关物理参数的关系,并从理论和实验两方面分析了光热强度调制与调制频率的关系,为高精度干涉测量中工作条件的选择和参数优化提供重要依据。

* 国家自然科学基金(69978024)、上海市应用材料研究与发展基金资助项目。

收稿日期: 2000-04-10

2 物理模型及计算

图 1 为光热调制 LD 光频的实验装置。LD1 作为光源,其输出光频通过光热效应来调制。LD2 为调制激光器,LD1 因吸收 LD2 输出的能量使其结温发生变化,导致激活区折射率变化

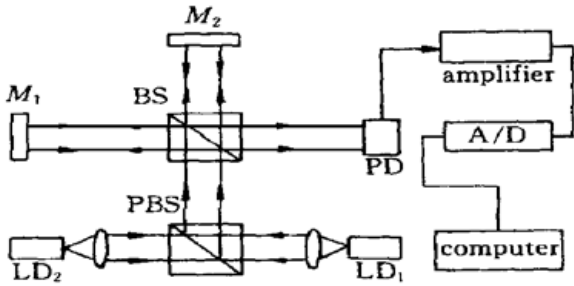


图 1 光热调制干涉实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of laser-diode interferometer with a photothermal modulation

而使 LD1 输出光频随之偏移。实验中由于光斑面积远大于被辐照 LD1 激活区的端面,实际注入激活区内的光子数极少。这从实验中测量的光电流的大小可以估算,从聚焦光斑的几何尺寸与激活区尺寸的比较也可估算。照射在被调制激光器上的光子大部分被激光器的限制层和衬底材料吸收。这些光子都不能转化为激光器激活区中的载流子,而通过自由载流子吸收、光生载流子的非辐射复合以及晶格吸收而转化为热量。这样的物理过程可以用热传导方程来讨论。设 LD1 激活区的热容为 C ,其通过热阻

R_t 与温度为 T_s 的热沉连结,当激活区被光强正弦调制的 LD2 照射时,正弦变化的光强使其温度随之变化。设单位时间光能转化为热能的量值为 S ,并设 LD1 的偏置电流不变,热传导方程则可表示为

$$C \frac{dT}{dt} = S - \frac{1}{R_t}(T - T_s) \quad (1)$$

其中 T 为结温, $S = \alpha P(t)$, α 为比例系数,是单位时间光能转化为热能的比率,与 LD 的材料、结构和光强耦合系数有关。LD2 的光功率输出为 $P(t) = P_0 \sin \omega t$, ω 为调制频率。解方程(1)得

$$T = T_s + \frac{\alpha R_t P_0 \omega \tau}{1 + \tau^2 \omega^2} \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] + \frac{\alpha R_t P_0}{(1 + \tau^2 \omega^2)^{1/2}} \sin(\omega t - \varphi) \quad (2)$$

$\tau = R_t C$ 为热时间常数,相移 $\varphi = \arctan(\tau \omega)$ 。当 $t \gg \tau$ 时,(2) 式可简化为

$$T = T_s + \frac{\alpha R_t P_0}{(1 + \tau^2 \omega^2)^{1/2}} \sin(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

(3) 式中,对于确定的 LD, R_t , τ 是不变的,而 α 对于同样的注入激光波长应为一固定值。结温 T 的

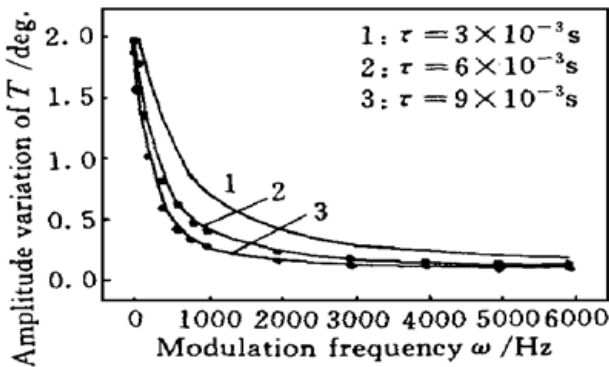


图 2 不同热时间常数下结温变化幅度随调制频率的变化关系

Fig. 2 Relation between amplitude variation of conjunction temperature and modulation frequency at different thermal time constant

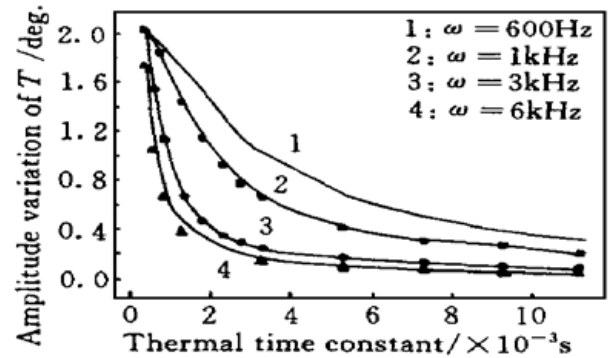


图 3 不同调制频率下结温变化幅度随热时间常数的变化关系

Fig. 3 Relation between amplitude variation of conjunction temperature and thermal time constant at different modulation frequency

变化快慢和幅度取决于调制频率 ω 。不同的调制频率对应于 T 的不同变化周期和位相。结温变化的幅度决定了光频变化范围大小。选取典型的器件参数计算得出的结温变化幅度与调制频率 ω 的关系, 如图 2 所示。幅度随 ω 增加迅速衰减, 这一趋势随热时间常数 τ 的增大而变陡。

热时间常数 τ 对结温调制深度的影响是很明显的。在一定的注入功率下, 热容越大, 结温越难提高, 反之越容易。图 3 为 $\omega = 600 \text{ Hz}, 1 \text{ kHz}, 3 \text{ kHz}, 6 \text{ kHz}$ 时, 计算得到的结温变化幅度与热时间常数 τ 之间的关系。其幅度亦随 τ 的增加而衰减, 频率越高衰减越快, 大的 τ 要达到同样的调制深度必须增加注入功率。

图 2, 图 3 反映了 LD1 的结温变化幅度与调制频率及热时间常数的变化关系。当结温变化时, LD1 的阈值电流和微分量子效率发生变化, 从而导致同样偏置电流情况下 LD1 的输出光强变化。在结温变化幅度很小的情况下, 微分量子效率可视为常量, 光强的变化幅度与结温成正比关系。因此, 结温的变化幅度反映了输出光强变化幅度的大小。

3 实验及结果分析

光热调制干涉测量是用半导体激光器波长调制(调频)技术进行纳米量级微位移或微振动测量的一种技术。图 1 为实验装置图。LD1 为干涉光源, LD2 为调制激光器, LD1, 全反镜 M_1 和 M_2 , 分束器 BS 构成一干涉仪, 信号由光电二极管 PD 接收, 经放大器放大后进入 A/D 转换器。为避免 M_1, M_2 反射光反馈到 LD1, 光路调整时使反射光偏离 LD1 的光轴。偏振分束器 PBS 保证 LD1 的光进入干涉装置, 同时使得 LD2 的光与干涉系统隔离。LD1 的固定偏流大于阈值电流, 通过正弦调制 LD2 的输出光强使 LD1 的结温周期变化, 从而调制 LD1 的输出光频, 实现波长调制外差干涉测量, 使用这一实验装置已得到了纳米量级的测量精度^[3]。在实际测量中发现 LD1 的光强有波动, 虽然很小, 但却直接制约测量精度的进一步提高。为此我们利用此干涉装置研究光热调制中光强波动的规律和特性。

实验中使用的激光器是多量子阱 AlGaAs LD, LD1, LD2 的中心波长分别为 785.31 nm 和 781.22 nm, 阈值电流分别为 41 mA 和 35 mA。LD2 接信号发生器产生正弦调制激光。LD1, LD2 波长有相对较大的差异, 可有效地避免频率的牵引作用。实验中首先得到光热调制下的干涉信号, 然后挡住干涉仪的一臂, 测量光热调制下 LD1 的光强变化。图 4 为不同工作条件下检测到的光强变化幅度与调制频率的关系曲线, 它与上面计算得出的结温变化幅度与调制频率 ω 的关系曲线是一致的, 说明光热调制产生的光强调制效应来源于半导体激活区温度的变化, 结温的波动直接引起输出光强的波动。结温变化幅度大对应的调制频率较低, 相应产生大的光频调制深度, 但将造成大的光强调制度。从图 4 可见, 当 LD1 的直流偏置电流 I_D 增大时, 曲线下降趋势变缓, 在几百赫兹的低频区域, 同样的频率产生更大的结温变化幅度, 与理论计算结果比较可知这是由于结区热容发生变化导致的结果。

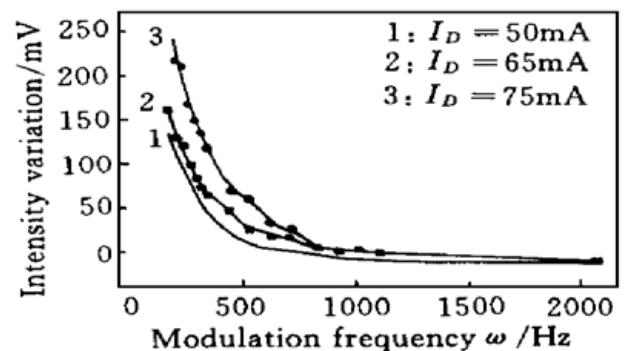


图 4 不同偏置电流下 LD1 的光强波动幅度随调制频率的变化关系

Fig. 4 Relationship between intensity variation and modulation frequency at different injection current I_D

实验中观测到调制频率小于 700 Hz 时,对光频有较大的调制作用。受制于 LD1 的散热不理想,热阻较大,当调制频率大于 700 Hz 时,光频的调制深度越来越小。为得到较高的调制频率,可选择热时间常数小的器件以提高其热响应速度,并适当增加偏置电流,但这是以光强调制度增加为代价的。由相位关系 $\varphi = \arctan(\pi\omega)$,在光热调制中随调制频率的升高相移逐渐增大,当频率到达一定值以后,相移最大接近 $\pi/2$,实验中明显看到光强调制信号滞后于注入光强的现象。

上述实验结果及分析表明,在光热调制纳米精度干涉测量中为减小光强调制的影响,对特定的激光器件应选择合适的调制频率和直流偏置电流,同时兼顾光频调制深度的大小,以最大限度地抑制光强调制造成干涉信号频谱分布的噪音。

4 结 论

1) 光频光热调制同时产生光强调制。光强调制度与调制频率,LD 偏置电流及热时间常数有关。调制频率越小,作为光源的 LD 偏置电流越大则光强调制度就越大,反之越小。

2) 光热调制纳米精度干涉测量中,对特定的 LD 器件,在保证足够的光频调制深度的条件下,应选择较大的调制频率和较小的直流偏置电流,以抑制光强变化对测量精度的影响,在器件的选择上要求尽可能较小的热时间常数以提高热调制频率。

参 考 文 献

- 1 O. Sasaki, K. Takahashi, T. Suzuki. Sinusoidal phase modulating laser diode interferometer with a feedback control system to eliminate external disturbance. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(12): 1511~ 1515
- 2 C. M. Klimcak, J. C. Camparo. Photothermal wavelength modulation of a diode laser. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(2): 211~ 214
- 3 Wang Xuefeng, Wang Xiangzhao, Qian Feng *et al.*. Photothermal modulation of laser diode wavelength: application to sinusoidal phase-modulating interferometer for displacement measurements. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**(8): 559~ 564
- 4 S. Kakuma, K. Mishima, R. Ohba. Frequency control of a laser diode by a photothermal effect and its application to frequency stabilization. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(9): 2992~ 2996

Study on Photothermal Intensity-modulation Characteristics of Laser-diode

Lu Hongbin Wang Xiangzhao Wang Xuefeng Qian Feng

Song Song Chen Gaoting Fang Zujie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract Based on the physical model of a laser diode (LD) modulated utilizing photothermal effect, the relations of the photothermal intensity-modulation depth of the LD with the modulation frequency and injection current are theoretically and verify experimentally deduced. It is useful for determining appropriate modulation frequency and injection current in LD interferometer with a photothermal modulation to reduce the influence of light-intensity modulation and realize nanometer-accuracy interferometer measurement.

Key words photothermal, laser diode, interferometer, intensity modulation, thermal time constant