

## 光纤陀螺光源 SLD 启动时波长的变化机理

王夏霄,张宇宁,魏良勇,高洋洋

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

**摘要:** 基于现代化战争武器和惯导系统对光纤陀螺快启动的强烈需求,对光纤陀螺启动最慢的核心器件光源超辐射发光二极管(SLD)启动时波长的变化机理进行了研究。主要包括对 SLD 波长随驱动电流和管芯温度的变化规律进行了理论分析和实验验证,得出了 SLD 的平均波长随驱动电流的增大而减小,变化量约为 0.15 nm/mA,随温度线性增加,变化量大约为 0.5 nm/°C;根据理论分析驱动电流和管芯温度启动时的变化规律建立了 SLD 启动时波长的变化模型;通过实验测试得到的驱动电流和管芯温度启动测试结果推导出了 SLD 启动波长最大变化量达到 18 000 ppm;最后根据分析结果提出实现陀螺快启动的波长补偿方案。

**关键词:** SLD; 光纤陀螺; 启动; 波长

**中图分类号:** TN36 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1220003

## Wavelength change mechanism of light source SLD when starting up in fiber optic gyro

Wang Xiaoxiao, Zhang Yuning, Wei Liangyong, Gao Yangyang

(School of Instrument Science & Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Based on the quick start-up of fiber optic gyro (FOG) requirement is increasing for the inertial navigation system and the modern weapons, the start-up wavelength drift of superluminescent light emitting diodes (SLD) was studied, which is the slowest start-up core device in FOG. The relationship between SLD output wavelength with drive current and temperature was analyzed and verified both in theory and experiment, it was obtained that the wavelength decreases about 0.15 nm/mA with the increase of drive current and increases about 0.5 nm/°C linearly with the increase of the temperature; The start-up model of SLD wavelength change was established by the changing law of the driving current and the core temperature of SLD after starting-up, and it was inferred that the max wavelength change was 18 000 ppm by the measurement of SLD drive current and temperature; Finally, the wavelength compensation solution was proposed to realize the quick start-up of FOG.

**Key words:** SLD; fiber optic gyro; start-up; wavelength

收稿日期:2016-04-21; 修订日期:2016-05-13

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(2016YFF0102400)

作者简介:王夏霄(1977-),男,副教授,博士,主要从事光纤陀螺和光纤传感方面的研究。Email:wangxiaoxiao@buaa.edu.cn

## 0 引言

战术武器的快速反应能力是衡量其作战性能好坏的一项重要指标,而弹上陀螺的启动时间是决定战术导弹反应快慢的一项非常重要的因素<sup>[1]</sup>。光纤陀螺是一种广泛用于导弹制导等领域的全固态惯性仪表,具有高精度、低功耗、大测量范围、长寿命等特点<sup>[2]</sup>,所以文中基于对光纤陀螺快启动的研究,对光纤陀螺光源超辐射发光二极管(SLD)的启动特性进行了重点研究。

SLD 由于有功率大、光谱宽度宽等特性,常作为光纤陀螺的理想光源<sup>[3]</sup>,作为光纤陀螺中唯一的功率有源器件,其启动速度是陀螺所有器件中最慢的<sup>[4]</sup>,因此 SLD 光源的启动特性决定了光纤陀螺的启动性能。在 SLD 启动的过程中,恒流源驱动电路的积分时间决定了驱动电流的上升时间,伴随光源发光放热,管芯温度会偏离理想值,需要在温控系统作用下达到热平衡,而驱动电流和温度的改变将会导致光源的输出波长的变化,光源平均波长的变化会影响标度因数的稳定性<sup>[5-6]</sup>,所以陀螺会有一定的预热时间。文中针对 SLD 启动时出现的不稳定现象,对其产生机理进行研究,得到 SLD 启动过程中影响其启动时间的主要因素,提出实现光纤陀螺快启动的理论方法。因此,对 SLD 启动时波长的变化机理的研究将会对光纤陀螺和其他光纤传感器快启动的工程化具有一定的参考意义。

## 1 SLD 发光光谱机理分析

目前,大部分 SLD 芯片采用量子阱结构的硅基光电子材料<sup>[7]</sup>,P 层和 N 层半导体材料形成 PN 结,作为 SLD 芯片的有源区,在有源区注入电流,载流子复合产生自发辐射放大发光,光波在条形波导的限制下,经前端增透膜输出。SLD 的输出性能主要包括输出功率、光谱和偏振特性等。其中 SLD 输出波长主要受驱动电流控制,而且对温度非常敏感。

### 1.1 波长与驱动电流的关系

SLD 是基于半导体材料导带中的电子与价带中的空穴复合发光的超辐射发光器件,系统处于准热平衡时,导带上能量  $E_c$  和价带上能量  $E_v$  的能级被电子占有的概率  $f_1(E_c)$  和  $f_2(E_v)$  由费米-狄拉克函数给

出为:

$$f_1(E_c) = \left[ \exp\left(\frac{E_c - F_c}{k_b T}\right) + 1 \right]^{-1} \quad (1)$$

$$f_2(E_v) = \left[ \exp\left(\frac{F_v - E_v}{k_b T}\right) + 1 \right]^{-1} \quad (2)$$

式中: $F_c$ 、 $F_v$  分别为导带、价带的准费米能级; $k_b$  为玻耳兹曼常量; $T$  为绝对温度。

因载流子注入而激励的半导体中的电子、空穴浓度  $n$ 、 $p$  为:

$$n = \int \rho_c(E_c) f_1 dE_c \quad (3)$$

$$p = \int \rho_v(E_v) f_2 dE_v \quad (4)$$

式中: $\rho_c$ 、 $\rho_v$  分别为导带与价带的电子状态密度。其中, $\rho_c$ 、 $\rho_v$  分别为:

$$\rho_c(E) = (1/2\pi^2 h^3)(2m_n)^{3/2} \sqrt{E - E_{c1}} \quad (5)$$

$$\rho_v(E) = (1/2\pi^2 h^3)(2m_p)^{3/2} \sqrt{E - E_{v1}} \quad (6)$$

式中: $m_n$ 、 $m_p$  分别为导带电子的有效质量和价带空穴的有效质量; $E_{c1}$ 、 $E_{v1}$  表示导带底和价带顶端的能量,其能量差为带隙能量,即  $E_g = E_{c1} - E_{v1}$ ,带隙能量与载流子密度有关,其表达式为<sup>[8]</sup>:

$$E_g = E_{g0} - K_g n^{1/3} \quad (7)$$

式中: $E_{g0}$  为无载流子注入时的带隙能量; $K_g$  为带隙收缩系数。

在半导体材料中,系统满足电中性条件:

$$n + N_A^- = p + N_D^+ \quad (8)$$

式中: $N_A^-$ 、 $N_D^+$  分别为离化的受主、施主密度,当注入程度很高时  $N_A^-$ 、 $N_D^+ \ll n$ ,所以  $p \approx n$ ,对于给定的载流子密度,即可通过公式(3)、(4)确定准费米能级  $F_c$ 、 $F_v$ ,当载流子浓度为  $n$  时,由焦斯-狄克逊近似式子得<sup>[9]</sup>:

$$(F_c - E_{c1})/k_b T = \ln(n/N_c) + \sum_{i=1}^4 A_i (n/N_c)^i \quad (9)$$

$$(E_{v2} - F_v)/k_b T = \ln(n/N_v) + \sum_{i=1}^4 A_i (n/N_v)^i \quad (10)$$

式中: $N_c = 2(2\pi k_b T/h^2)^{3/2} (m_n)^{3/2}$ ,  $N_v = 2(2\pi k_b T/h^2)^{3/2} (m_p)^{3/2}$ ,  $A_1 = 3.5 \times 10^{-1}$ ,  $A_2 = -4.95 \times 10^{-3}$ ,  $A_3 = 1.48 \times 10^{-4}$ ,  $A_4 = -4.4 \times 10^{-6}$ 。

SLD 发光时,光谱由受激发射增益频谱和自发辐射光谱共同组成。其中,受激发射增益频谱和自发辐射光谱的表达式分别为:

$$g(E) = \int A_0 \rho_c(h\nu) |M_{if}|^2 [f_1(E) + f_2(E - h\nu) - 1] L(E_{cv}) dE \quad (11)$$

$$R_{sp} = \int A_0 \rho_r(h\nu) |M_{ij}|^2 f_1(E) \times f_2(E - h\nu) L(E_{cv}) dE \quad (12)$$

式中： $A_0 = \frac{q^2}{2n_g c \epsilon_0 m_0 v}$ ， $q$  为点电荷电量； $n_g$  为群速度折射率； $c$  为真空中光速； $\epsilon_0$  为真空中介电常数； $m_0$  为电子质量； $\rho_r(h\nu)$  为振子状态密度分； $m_r$  为振子的有效质量； $|M_{ij}|^2$  为跃迁矩阵元平方； $\Delta$  为自旋轨道相互作用能量； $L(E_{cv})$  为线性型函数。

由受激发射增益频谱和自发辐射光谱的表达式可知，SLD 光谱与注入电流密度有关，注入电流越大，光谱的中心波长越低。利用光谱仪对 SLD 平均波长在不同驱动电流作用下的数值进行测试，得到 SLD 输出的平均波长随驱动电流的变化关系如图 1 所示。

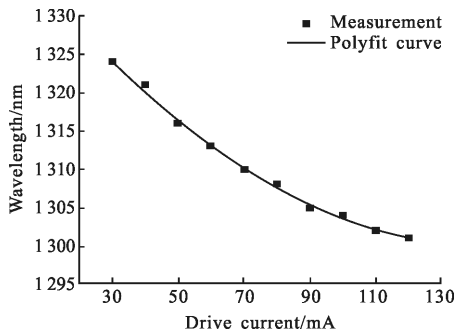


图 1 平均波长随驱动电流变化关系曲线

Fig.1 Mean wavelength measured at various drive current

SLD 的平均波长随驱动电流的增大而减小，在额定工作电流附近变化量约为 0.15 nm/mA。

### 1.2 波长与温度的关系

当 SLD 外加连续的驱动电流时，由于内部的热效应，会引起 SLD 有源区温度升高，导致 SLD 输出波长出现红移现象，SLD 的输出波长随温度的变化可以用下式近似表达<sup>[10]</sup>：

$$\frac{d\lambda}{dT} = -\frac{hc}{E_g^2} \cdot \frac{dE_g}{dT} \quad (13)$$

式中： $h$  为普朗克常量； $c$  为真空中的光速； $E_g$  为 SLD 有源区所用半导体材料的禁带宽度，一般而言， $E_g$  随温度的变化而变化， $E_g = E_g(0) - aT^2/(T + \theta)$ ， $E_g(0)$  为  $T=0$  K 时的禁带宽度， $a$  和  $\theta$  是经验值。对于 GaAs： $E_g(0) = 1.519$  eV， $a = 5.405 \times 10^{-4}$  eV， $\theta = 204$  K。在室温附近，将  $\frac{dE_g}{dT}$  近似为常数。实验得到 1310 nm SLD 波长与温度的关系并进行拟合，具体结果如图 2 所示，可见，SLD 输出波长随温度线性增加，变化量大约为 0.5 nm/°C。

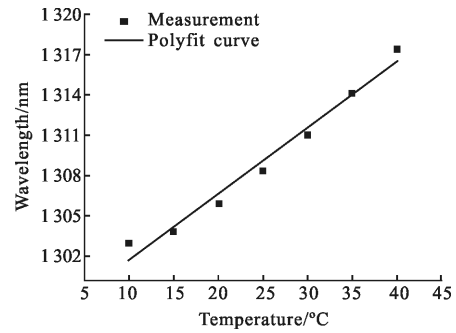


图 2 平均波长随温度的变化曲线

Fig.2 Mean wavelength measured at various temperature

## 2 SLD 启动波长变化规律

在 SLD 启动的过程中，由于驱动电流、管芯温度会发生变化，所以输出波长会发生不稳定变化。其中，SLD 的驱动电流由高精度恒流源电路提供，由于恒流源电路存在积分电路，假设输入阶跃基准电压，恒流源输出电流随积分时间线性增加，因此根据 SLD 输出波长与驱动电流的近线性关系，光源的波长在上电瞬间随积分时间近似线性变化，由于积分时间很短，所以主要对由管芯温度变化引起的启动波长的变化进行研究。

SLD 发光芯片通过热沉安装在 TEC 制冷器上，PID 温控电路通过热敏电阻获取热沉的温度，产生制冷电流保持热沉和管芯温度的稳定。热沉吸收的热量包括 SLD 管芯发光时所释放的热量、TEC 制冷器热端向热沉辐射的热量、由空气对流所传递的热量。制冷量是由 TEC 制冷器提供的，根据 TEC 制冷器的传热模型，制冷量为帕尔贴效应产生的吸热量去掉放热的热端通过半导体材料的热传导传输到 TEC 冷端的热量和制冷电流在制冷器中产生的焦耳热。

SLD 的温度控制电路(ATC)采用比例-积分-微分(PID)的控制方法<sup>[11]</sup>，带入温控电路的制冷电流时间函数，可以求出热沉温度在指定温度工作点附近的变化规律方程为<sup>[12]</sup>：

$$\frac{dT^2(t)}{dt} + 2\gamma \frac{dT(t)}{dt} + \omega^2 T(t) = 0 \quad (14)$$

式中： $\gamma$  为衰减系数； $\omega$  为固有震动频率。其中， $\gamma$  取值 1.5， $\omega$  取值 5.5。

所以，热沉温度  $T(t)$  是二阶微分方程式(14)的解，初始条件为： $T(0) = 25$  °C +  $T'$ ， $\frac{dT(t)}{dt}|_{t=0} = 0$ ，由于热敏电阻传输温度信号存在滞后效应， $T'$  是在 TEC 制

冷器未工作前,由热效应而产生的初始温度偏置量,所以二阶微分方程的解为:

$$T(t)=e^{-\gamma}(c_1\cos\omega't+c_2\sin\omega't)+25\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (15)$$

式中: $\omega'=\sqrt{\omega^2-\gamma^2}$ ;  $c_1=T'$ ;  $c_2=-\gamma/\omega'\cdot c_1$ 。

将 SLD 管芯温度与热沉温度近似相等,SLD 启动时,在 TEC 制冷器工作后,光源管芯的温度变化模型与公式(15)相符,结合 SLD 的输出波长与管芯温度的关系可得管芯温度、由温度引起的波长变化的启动理论模型仿真结果如图 3 所示。震荡时间约 3 s 左右,SLD 平均波长与温度变化趋势相同。

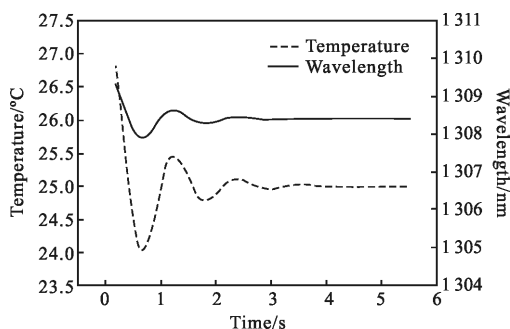


图 3 SLD 启动时温度与波长变化理论模型

Fig.3 Start-up modal of temperature and wavelength of SLD

### 3 SLD 启动波长变化实验推导结果

文中测试了中心波长为 1 310 nm SLD 的启动特性,光源驱动板由北京航空航天大学研制,光源板包括恒流源电路和 PID 温控电路。通过外加精密电阻串联的方式,对驱动电流和光源内部另一热敏电阻的电压信号进行采集。然后对 SLD 内闲置热敏电阻的分压大小进行采集,通过计算热敏电阻分压的大小,可以确定热敏电阻的阻值和变化趋势,阻值与温度的关系曲线如图 4 所示,通过对比热敏电阻的温度电阻对照表即可获得热沉温度的变化情况。

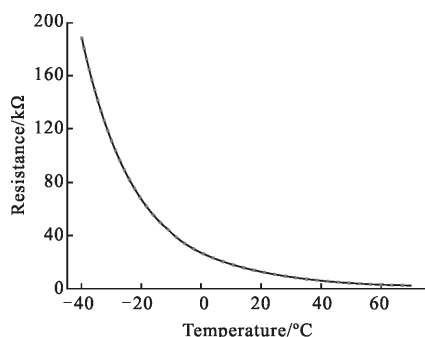


图 4 热敏电阻与温度的拟合曲线图

Fig.4 Polyfit curve of thermistor versus temperature

用多通道高速数据采集卡 HS4 对 SLD 启动特性进行测试,实验得到 SLD 启动时的驱动电流和管芯温度的变化规律如图 5 所示。

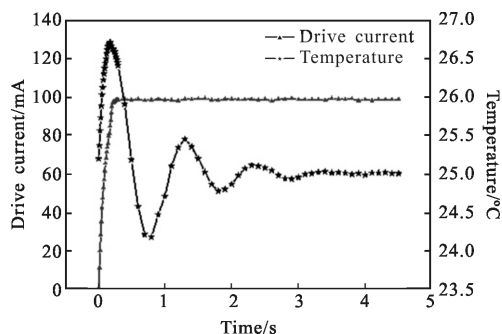


图 5 SLD 驱动电流与温度启动测试结果

Fig.5 Start-up measurement of SLD drive current and temperature

从测试结果可以看出,室温下 SLD 启动时间为 3 s 左右,驱动电流的上升时间约为 0.3 s,SLD 上电后温度由于热效应而升高,热敏电阻传输温度信号后,TEC 制冷器开始工作并使温度稳定到工作点,由于热敏电阻的信号传输滞后效应,在 TEC 制冷器工作前 SLD 管芯存在初始温度偏置量,实验得到热敏电阻的传输滞后时间,初始温度偏置量。

由于 SLD 启动波长测量过程属于瞬态信号的记录测量,光谱仪等波长测量仪器无法实现动态跟踪功能,所以无法通过实验直接测量光源启动光波长变化。根据 SLD 光源输出特性的理论分析可知,SLD 输出功率和波长只和驱动电流和管芯温度有关,所以 SLD 启动波长的变化规律可以根据实验测得的管芯温度变化推导得出,SLD 启动波长的变化结果如图 6 所示,波长变化与温度变化趋势相同,由温度引起的最大波长波动量为 720 ppm。

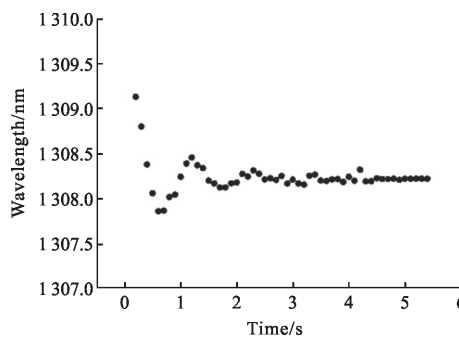


图 6 SLD 启动时波长的变化曲线

Fig.6 Start-up measurement of SLD wavelength change

光纤陀螺要求在苛刻环境下实现快启动,所以对 SLD 在不同环境温度下的启动特性进行测试。由于驱动电流的上升时间很短,对 SLD 启动特性影响较小,所以文中仅针对不同环境温度下,SLD 启动过程中的温度变化以及对波长的影响进行研究讨论,环境温度选取 $-20$ 、 $0$ 、 $50$   $^{\circ}\text{C}$ 三个温度点,将光源放入温箱中,温箱温度设为固定值并保温 2 h 后开始测试。根据 SLD 在不同温度环境下的温度变化测试结果和驱动电流上升规律,可得在不同环境温度启动时的波长变化情况如图 7 所示。由于波长由管芯温度决定,所以环境温度与常温偏差量越大,波长的变化量越大,最大变化量达到 18 000 ppm,最长启动时间达到 8 s,在光纤陀螺的启动应用过程中,光源波长的变化会导致光纤陀螺产生严重的标度因数误差<sup>[13]</sup>,所以 SLD 启动时波长的变化严重影响了光纤陀螺启动时间。

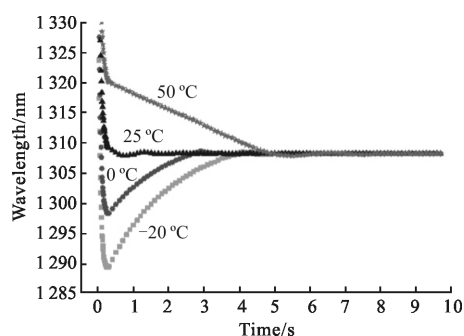


图 7 不同温度下 SLD 启动时波长的变化曲线

Fig.7 Wavelength change measurements at different temperatures

## 4 结论

文中对 SLD 启动时波长的变化机理以及启动特性进行研究,得到 SLD 输出波长受驱动电流和管芯温度的影响情况,同时对 SLD 启动特性进行测试。从 SLD 的启动特性测试结果可知,SLD 启动时波长的变化主要是由 SLD 管芯温度不稳定变化导致的,并且尤其是高低温环境下启动时,输出波长变化量非常大,最大变化量达到 18 000 ppm,在光纤传感器尤其是光纤陀螺中会导致光纤陀螺产生标度因数误差,导致光纤陀螺性能达不到正常工作状态的要求,制约了光纤陀螺的启动时间。由于光源波长的变化是由管芯温度变化引起的,而且标度因数与光源波长存在线性关系,所以下一步可以通过采集管芯温度对波长引起的标度因数误差进行补偿实现陀

螺的快启动。

## 参考文献:

- [1] Li Cuihua, Wang Wei, Zhang Junjie. FOG quick start-up at low temperature [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2007, 15(2): 237-240. (in Chinese)
- [2] Lloyd Seth W, Fan Shanhui. Experimental observation of low noise and low drift in a laser-driven fiber optic gyroscope [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(13): 2079-2085.
- [3] Xie Liangping, Li Rui, Zhang Bin, et al. Influence of single mode fiber bending on fiber optic gyroscope scale factor stability [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0122001.
- [4] Zhang Weixu. *Fiber Optic Gyro and its Application* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [5] Li Yan, Sun Yanfeng, Wang Xu, et al. Er-doped superfluorescent fiber source with enhanced mean-wavelength stability incorporating a fiber filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 244-248.
- [6] Shen Jun, Miao Lingjuan, Wu Junwei, et al. Application and compensation for startup phase of FOG based on RBF neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 119-124. (in Chinese)
- [7] Wang Xingjun, Zhou Zhiping. Research progress of Er silicate compound light source materials and devices for silicon photonics application [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7 (2): 274-280. (in Chinese)
- [8] Michael J. Wide-band steady-state numerical model and parameter extraction of a tensile strained bulk semiconductor optical amplifier[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, 43(1): 47-56.
- [9] Joyce W B, Dixon R W. Thermal resistance of heterostructure lasers[J]. *Appl Phys Lett*, 1977, 31: 354.
- [10] Shidlovski V R, Semenov A T, Lipin M E, et al. Study on temperature dependence of 820nm SLED performance parameters[C]//SPIE, 1999, 3860: 495-500.
- [11] Cao Hui, Yang Yifeng, Liu Shangbo, et al. Temperature control system for SLD optical source of FOCS[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 920-926. (in Chinese)
- [12] Gao Yangyang, Wang Xiaoxiao, Zhou Weining, et al. Start-up model of superluminescent light emitting diodes used in fiber optic gyroscope[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(9): 49-54. (in Chinese)
- [13] Li Jing, Wang Wei, Wang Xuefeng, et al. Scale factor of photonic crystal fiber-optic gyroscope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4082-4087. (in Chinese)