

中红外激光器功率稳定器技术

孙权社, 陈坤峰, 史学舜

(中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

摘要: 针对中红外光电探测器光谱响应度精确测量时, 要求提高中红外激光器功率稳定度这一问题。提出了一种对中红外激光器功率进行稳幅的方法, 基于声光调制器布拉格衍射原理、采用光反馈闭环控制技术实现了对中红外激光器功率的稳定控制。详细介绍了该方案的光路设计、控制电路原理及控制算法, 在此基础上研制了一种中红外激光功率稳定器。采用该功率稳定器对 $3.39\ \mu\text{m}$ He-Ne 激光器的输出光进行了稳幅实验。结果表明, 该装置可将中红外激光器输出功率稳定度从 8% 提高到 0.4%。可很好地满足中红外探测器光谱响应度测试的需要。

关键词: 激光功率稳定器; 光谱响应度; 中红外激光器; 声光调制器; 布拉格衍射;
红外探测器

中图分类号: TN216 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)07-2127-05

Mid infrared laser power stabilizer

Sun Quanshe, Chen Kunfeng, Shi Xueshun

(The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China)

Abstract: In order to accurately measure spectral response rate of mid infrared photoelectric detectors, the power stability of mid infrared laser must be improved. A novel method of stabilizing laser power was proposed using the technique of light feedback based on Bragg diffraction principle of the acousto-optic modulator in this paper. The optical path design, control electrocircuit and arithmetic were discussed particularly, on this basis, a mid infrared laser power stabilizers was fabricated. Using this power stabilizers, the power stability of He-Ne laser at a wavelength of $3.39\ \mu\text{m}$ was compared. The experimental result shows that this method can improve the power stability of the infrared laser from 8% to 0.4%, and meet spectral responsivity of the infrared detector parameters.

Key words: laser power stabilizer; spectral responsivity; mid infrared laser; acousto-optic modulator; Bragg diffraction; infrared detector

收稿日期: 2014-11-05; 修订日期: 2014-12-03

基金项目: 国防技术基础科研项目(J312013A001)

作者简介: 孙权社(1970-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事光电子计量标准研制方面的研究。Email: nsqs@163.com

0 引言

随着光电子技术的发展,光电探测技术从可见光到远红外波段都得到了广泛应用,尤其是在航空航天等军事领域,对红外探测器光谱定量化提出了更高的要求^[1],从而也对红外探测器绝对光谱响应的测量精度提出了更高的要求。在探测器光谱响应度测试中,激光光源是必备的装置之一。但是由于受到供电电源的波动、构成谐振腔的腔镜和腔体支架的形变、激光模式的跳变以及自发辐射等因素的影响,使激光器的输出功率稳定度很难提高,如中红外激光器,出厂的功率稳定度(30 min)一般在 10% 左右^[2]。这种稳定度指标已很难满足中红外探测器光谱响应度高精度测试的需要,因此必须对激光器输出的光功率进行外稳幅。

中国计量科学研究院采用电光调制器和光反馈法使可见光到近红外的激光功率稳定度提高两个数量级^[3]。但是电光晶体的透过率无法覆盖中到中红外波段,因此文中提出了一种基于声光调制器和光反馈控制的中红外激光功率外稳幅技术,解决了中红外激光器功率外稳幅的难题。对该稳定器进行了实验验证。由实验结果可以看出,采用该稳定器可使中红外激光器半小时的稳定度达到 0.4%。该稳定器已成功应用于中红外探测器绝对光谱响应度高精度测试。

1 声光调制器的布拉格衍射原理

锗单晶是制作红外声光调制器最常用的晶体材料,从图 1 可以看出,从 2.5~10.6 μm 波段,锗单晶有着近似平坦的透过率,透过率可达 46%^[4]。因此利用锗单晶制成的声光调制器可用于中红外激光功率稳定器中。

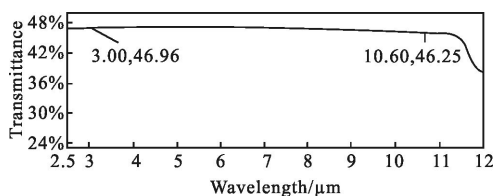


图 1 锗单晶的光谱透过率

Fig.1 Spectrum transmittance of Ge monocrystal

利用锗单晶制成的声光调制器的工作原理框

图如图 2 所示。可以看出,声光调制器是由声光晶体、压电换能器、吸收装置和驱动电源组成的。其中,压-电换能器是利用某些晶体的反压电效应将调制的电功率转换成声波功率的作用。驱动源用于产生调制电信号,施加于电-声换能器的两端电极上,驱动声光调制器工作。当射频信号加到电声换能器上时,换能器将该射频信号转变为超声波信号,可使以布拉格角度通过声光晶体的激光束发生布拉格衍射^[5]。

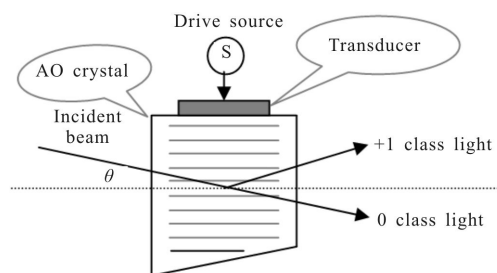


图 2 声光调制器的组成及布拉格衍射示意图

Fig.2 Structure diagram of AOM and Bragg diffraction

2 装置组成及原理

中红外激光功率稳定器主要由声光调制器、分光光路、监测光路及控制电路等组成。激光器发出的光通过声光调制后由于布拉格衍射,光的能量主要集中在零级和一级。将一级光吸收,零级光被分成两路,一路进入到监测光路,一路进入到被测探测器。监测光路被转换成电信号后,根据光功率的波动,计算控制加在压电换能器上的电压控制声光调制器衍射效率从而实现激光功率进行稳幅。

2.1 光路设计

光路原理图如图 3 所示:当中红外激光器的输

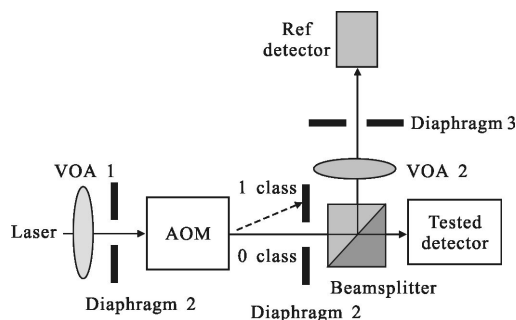


图 3 中红外激光功率稳定器的光路设计原理

Fig.3 Optical design diagram of MIR laser power stabilizer

输出功率大于红外探测器的损伤阈值时必须对激光器输出的光进行衰减。为此笔者在激光器的输出端,即主光路的起始端加了一个可调衰减器,使衰减后的光功率小于被测探测器的损伤阈值。在衰减片后光阑是为了滤掉杂散光。光路中的声光调制器的夹具可设计成旋转式,以便入射光以布拉格衍射角入射。当光通过声光调制器后发生布拉格衍射,光的能量主要集中在零级光和一级衍射光上,选择零级衍射光作为主光路,因此在零级衍射光路上还需要加上一个光阑 2,以便滤除散射光。光通过光阑 2 后,被分光镜分为两束,一束光的传输方向不变,一束光以 90°角方向出射,传输方向不变的光作为测试光路,90°方向出射的光作为监控光路。由于监控光路上的红外探测器损伤阈值比较低,因此在监控光路上通过衰减片 2 将光功率衰减到检测探测器的损伤阈值以内。光阑 3 的目的是保证光斑全部入射到监控探测器的有效面积上。

2.2 控制器电路设计

控制电路包括前置放大电路、A/D 和 D/A 转换电路、CPU 电路以及显示和控制按钮等五个部分,控制器电路的原理框图如图 4 所示。整个控制电路由

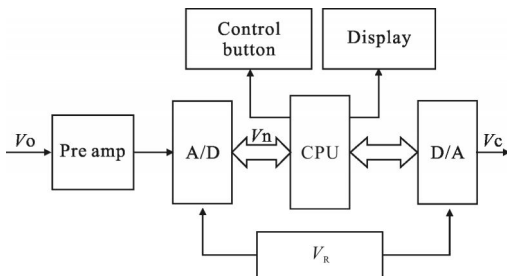


图 4 控制电路原理结构框图

Fig.4 Schematic diagram of control circuit

CPU(单片机)来控制 A/D 的数据采集、运算、控制按钮、显示器,以及 D/A 的转换输出。来自相敏检波电路的信号 V_0 进入前放,经前置放大器整形放大后由 12 位 A/D 转换器转换成数字信号。CPU 对 A/D 采集的数字信号与参考基准电压信号进行比较分析运算,得到需要的调节电压信号并由 12 位的 D/A 转换成模拟信号 V_c ,通过 V_c 控制声光调制器上压电换能器的电压幅度,实现对声光调制器衍射效率的控制。电路中的参考电压源采用了 MAXIM 公司的

MAX6250 高精度 5 V 基准电压源,其输出初始电压准确度可达 0.02%,温度漂移为 $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,可以满足高精度控制的要求。

2.3 控制算法及流程

声光调制器的衍射效率与换能器的载波信号的功率有关,因此通过控制衍射效率的大小实现对通过声光调制器的光信号强度进行控制^[9]。由声光调制器的布拉格衍射原理可知,当入射光强为 I_i 时,布拉格声光衍射的零级和 1 级衍射光的强度分别为:

$$I_0 = I_i \cos^2\left(\frac{v}{2}\right), I_1 = I_i \sin^2\left(\frac{v}{2}\right) \quad (1)$$

式中: v 为光波穿过长度为 L 的超声场所产生的附加相位延迟。

由实验得到了声光调制器的衍射效率与射频调制信号电平的关系,如图 5 所示。

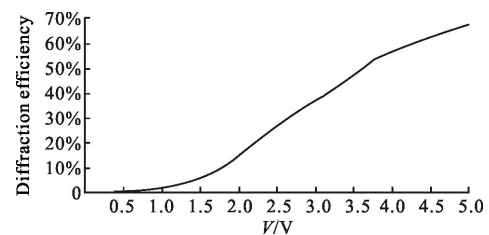


图 5 衍射效率与调制电压的关系

Fig.5 Relation between diffraction efficiency and modulation voltage

从图 5 可以看出:调制电压在 2~4 V 时,声光调制器的衍射效率 η 处于近似线性区域,笔者正是利用这一特点,通过控制声光调制器的驱动电压大小,来改变超声驱动功率 P_s ,从而改变调制器的衍射效率。声光调制器的衍射效率计算公式如公式(2)所示:

$$\eta = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{1}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{L}{H}\right) M_c P_s} \right] \quad (2)$$

式中: M_c 是声光晶体的物理参数组合,是由晶体本身决定的量。由公式(2)可以看出,当换能器的频率和晶体结构确定后,衍射效率仅与超声驱动功率 P_s 的大小有关,在一定的范围内, P_s 改变时,衍射效率也随之改变。因而通过控制加在电声换能器上的电功率,就可以达到控制衍射光功率的目的,实现光功率的外稳幅。而对电功率的控制是通过控制电压来实现的,因此软件控制流程如图 6 所示。

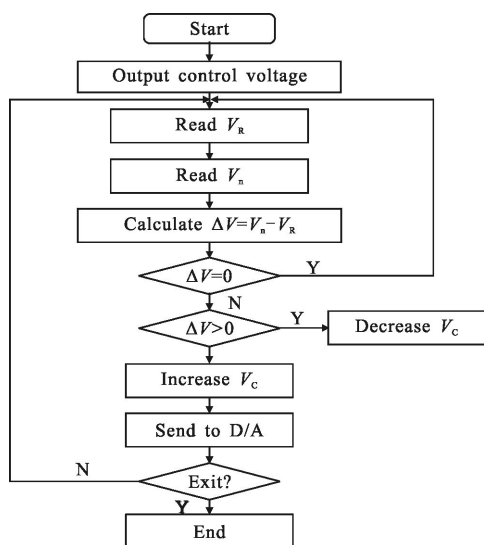


图 6 软件控制流程图
Fig.6 Program flow chart

3 实验

为了验证激光功率稳定器，实验中采用一台国产的 3.39 μm 的 He-Ne 激光器、一个液氮制冷的红外热释电探测器、一台六位半数字电压表，分别对主光路稳幅前后的功率稳定度进行了测试。通过计算机读取数字电压表测出的电压信号，采样时间间隔为 10 s，测量时间为 30 min。激光器的输出功率大约为 10 mW，经激光功率稳定器后，随着控制电压在 2.0~4.0 V 之间的变化，输出功率从 2.7~0.7 mW 之间变化。实验装置原理框图如图 7 所示。

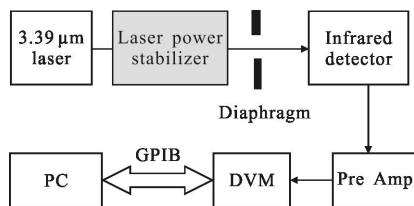


图 7 激光功率稳定度实验装置原理框图
Fig.7 Structure diagram of experiment device to test laser power stability

首先不启动激光功率稳定装置，对主光路的稳定度进行测试，30 min 的测量结果为 8% (厂家技术指标：1 h 的稳定度为 10%)。

然后再启动激光功率稳定装置，对主光路的激光功率稳定度进行测量，在保持测量状态不变的情况下，共测量了 8 组数据，每组测量时间为 30 min，

采样时间间隔为 10 s，测量结果如表 1 所示。

表 1 稳定度测量结果

Tab.1 Test value of stability

Test value of stability				
No.	1	2	3	4
Stability	0.40%	0.41%	0.37%	0.42%
No.	5	6	7	8
Stability	0.38%	0.40%	0.41%	0.39%
Average: 0.40%				

稳定度的计算公式如下：

$$S = (X_{\max} - X_{\min}) / \bar{X} \quad (3)$$

式中： X_{\max} 为同一组测量数据中的最大值； X_{\min} 为同一组测量数据中的最小值； \bar{X} 为同一组测量数据的平均值；用贝塞尔公式得到测量重复性：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \approx 4.5 \times 10^{-4} \quad (4)$$

稳功率装置启动和关闭情况下测量出的激光功率稳定度的曲线比较如图 8 所示。

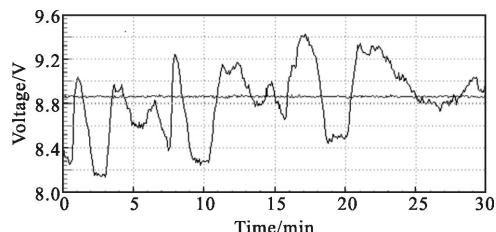


图 8 稳幅前后激光功率稳定度曲线的比较

Fig.8 Comparison of laser power stability before and after stabilizing amplitude

波动比较大的曲线是没有启动稳功率装置前的测量结果；波动比较小的(接近水平的)曲线是启动稳功率装置后的测量结果。图 9 是经激光功率稳定器后测量曲线的放大图。

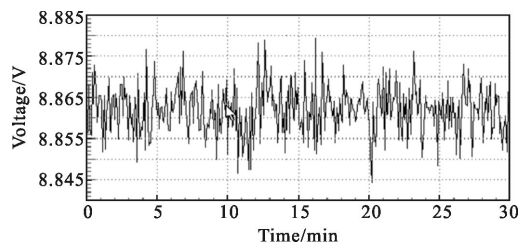


图 9 启动功率稳定装置后的测量结果放大图

Fig.9 Enlarged drawing of test result after starting power stabilizer

4 结束语

从测量数据和曲线比较可以看出:利用该激光功率稳定装置,可以将 $3.39\ \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器输出光的功率 30 min 内的稳定度达到 0.4%, 由于锗单晶在 $2.5\sim 10.6\ \mu\text{m}$ 波段有着近似平摊的光谱透过率, 只要有激光光源的波长在这一区域, 利用此技术就可提高光源功率的稳定度。因此该激光功率稳定技术不仅可以满足中红外波段探测器绝对光谱响应参数的准确测试。而且对算法和控制电路进一步完善后, 也可对远红外激光器($10.6\ \mu\text{m}$ 波段)进行外稳幅, 但是远红外激光器的功率通常较大, 容易对光学器件造成损伤^[7], 因此需要对光输入到声光调制器之前的光功率进行衰减, 否则就会对声光调制器造成损伤。

参考文献:

- [1] Gong Haimei, Shao Xiumei. Advanced technology and application of spaceborne infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3129-3140.
- [2] Zhao Xinyu, Qiao Yanfeng. Method of near-and far-field measurement and application for mid-infrared laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 49-52.
- [3] Yao Hejun, Lu Zhen, Li Zaiqing. Study on high precision laser beam power stabilizer [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2000, 21(3): 161-166.
- [4] Feng Deshen, Su Xiaoping. Growth and properties of $\phi 300\text{mm}$ Germanium monocrystal [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2006, 30(5): 692-694.
- [5] Li Juan, Yang Zhiwen. Use of acousto-optic modulator for simulated of reliability of laser range finder [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(6): 535-536.
- [6] Zong Derong, Sun Zuhong. 10.6 micrometer high efficiency acousto-optic modulator [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2004, 31(12): 27-29.
- [7] Palmer J R. Continuous wave laser damage on optical componets[J]. *Opt Eng*, 1983, 22(4): 435-447.

[1] Gong Haimei, Shao Xiumei. Advanced technology and