

基于法拉第效应的光强自稳定实验装置设计与研究

Design and research of light intensity self-stabilization

experimental device based on Faraday effect

摘要: 基于法拉第效应的旋光特性设计搭建实验光路。其利用光强检测系统及控制电路调节磁场强度以实现接收端光强的实时动态调节,同时解决了光源和传播路径对激光光强的影响。通过研究,设计了对应的控制程序。此外,本装置在调节和稳定光强方面具有响应速度快、造价低、可小型化的优点,不仅可以应用于需要光强稳定的仪器设备,也可以应用于日常生活中的许多设备。

关键词: 法拉第效应; 光强稳定; 激光; 自稳定系统; 单片机

Abstract: Based on the optical rotation characteristics of Faraday effect, an experimental optical path was designed and constructed. It uses the light intensity detection system and control circuit to adjust the magnetic field strength to achieve the real-time dynamic adjustment of the light intensity at the receiving terminal. At the same time, It solves the problems caused by the influence of light source and propagation path on laser light intensity. Through research, the control program corresponding to the optical path was designed. In addition, this device has the advantages of fast response, low cost, and miniaturization in adjusting and stabilizing light intensity. It can be applied not only to research instruments that need light stability, but also to many devices in daily life.

Key words: Faraday effect; Stable light intensity; Laser; Self-stabilizing system; MCU

0 引言

随着激光技术的日益成熟^[1], 各类激光器件深入应用于当今社会的各个领域^[2]。在实际应用中, 接收端激光光强的不稳定性造成的干扰^[3]可能使仪器设备无法正常运行或发生误判, 甚至引发重大故障。因此一个高效的自动化光强稳定系统具有重要的实用价值^[4-6]。接收端光强的波动主要来源于光源的不稳定性和传播路径中的环境干扰等因素^[7]。目前常见的光强稳定手段主要是改善激光光源的运行状态和消除传播路径中的环境干扰^[8-13], 但两者均存在一定弊端和局限性。在光强接收端进行处理也有通过液晶控制^[14-18]等方法来进行光强的稳定调节, 但是该方法调节速度较慢。

为了有效的解决上述技术问题, 我们提出了基于法拉第效应的光强自稳定调节装置。该装置利用法拉第效应的旋光特性, 结合对激光偏振角的检测与分析并通过单片机控制系统计算实现了光强的自动化稳定调节功能。此方案的优势在于直接稳定接收端光强, 同时解决光源和传播路径对激光光强的影响。此外, 得益于该方案所采用的核心原理、电子控制系统以及逻辑判断算法, 该装置在调节和稳定光强方面具有响应速度快等优点。

1 理论及具体实验方法:

1.1 光强控制理论及光路设计

线偏振光通过偏振片后光强会发生改变, 其改变量与偏振片偏振方向和线偏振光的夹角有关, 故通过改变夹角就可以改变输出光光强。例如接收端光强偏大则需要增加夹角, 而增加夹角的方式是通过法拉第磁致旋光效应使偏振光通过通电螺线管中的重火石晶体从而改变线偏振光的偏振方向。通电螺线管中的电流的大小及方向是由单片机控制的。

图 1 是装置的内部结构, 从右往依次为 He-Ne 激光发射器, 偏振片 1, 偏振片 2, 被螺

线管包裹的重火石晶体，偏振片 3，分光镜，光强检测仪，控制系统。偏振片 1 与 2 同时使用的目的是产生线偏振光并使得输入的光照强度可调。偏振片 2 与 3 之间有 50 度的夹角，这样可以利用电流反向的方式增加可调节的范围。分光镜将激光分为光强成比例的两束，读取光强接收仪接收到的光强便可以计算出另一束光，即输出光的光强。控制系统在接收到光强信号后会对该信号做出判断并对螺线管的电流进行修正。

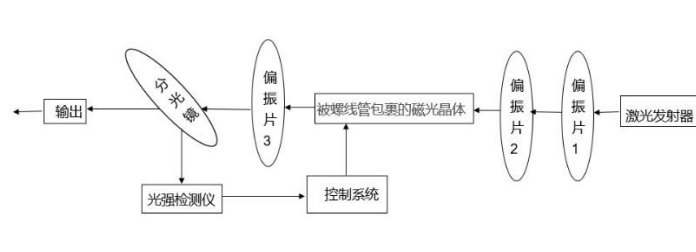


图 1 实验光路与整体流程示意图

1.2 单片机控制系统设计

单片机系统如图 2 所示。控制方面使用光强传感器接收光强信号，通过控制算法运算后控制输出量的变化。针对调节过程中出现的震荡过程，在变化不大时采用连续性微调的方法逼近预定光强，仅在光强变化大于设定阈值时计算入射光和出射光的夹角来算出所需要的电流并按比例进行输出，其详细计算方式如下：

法拉第磁致旋光公式 $\theta = VBL$ 中，费尔德常数 V ，磁光晶体长度 L 均为磁光晶体固有的性质。磁场强度 B 与螺线管的匝数，形状，真空磁导率，电流相关。其中，螺线管匝数，形状，真空磁导率均为仪器固有的性质。由毕奥-萨伐尔定律可知，电流在空间某点 P 处产生的磁感应强度的大小与电流 I 的大小成正比。由此可知，磁致旋光角 θ 仅与电流 I 成线性正比的关系。根据马吕斯定律：

$$C_{e0} = C_e \cos^2 \beta \quad (3)$$

在本仪器中， β 是经过重火石晶体后入射方解石的 e 光振动方向和方解石光轴方向之间的夹角， C_{e0} 为通过方解石后与 o 光会合的线偏振光的光强。 C_e 为入射 e 光的光强。由于两方解石对称放置，显然可以得出， β 与当前的磁致旋光角 θ 相等。

设定光强为 C_s ，传感器测得光强为 C_c ，初始的 e 光光强为 C_e ，分光镜的透射率和反射率比为 λ ，则实际光强可以表示为 λC_c ，实际光强与设定光强之差可以表示为 $(|\lambda C_c - C_s|)$ 。实际光强可以表示为 o 光光强 C_o 与 e 光中与 o 光会合的部分光强 C_{e0} 之和，显然，对于激光， o 光光强 C_o 等于 e 光光强为 C_e ，实际光强即可表示为 $(C_e + C_e \cos^2 \theta)$ ，由于磁致旋光角 θ 仅与电流 I 成线性正比的关系，单片机在得到传感器测得光强 C_c 与电流 I 后，即可确定瞬时的 e 光光强 C_e 。在得到了瞬时的 e 光光强 C_e 后，则可以计算瞬时所需的磁偏角 θ' ，即理论光强 $(C_e + C_e \cos^2 \theta')$ 需要与实际测得光强 λC_c 相等。由此可以计算出所需的电流 I 。

针对于不同的实际光强与设定光强之差，可以采用多种运行模式，例如光强波动范围小于 $0.01C_s$ 时，电流强度保持不变。在实际应用中，磁致旋光角 θ 建议处于 20 度至 70 度之间，在这个范围内，所需偏转角的变化量不大的情况下，可以将偏转角与电流关系近似看为线性关系。因此，在 $(|\lambda C_c - C_s|)$ 位于 $0.01C_s$ 至 $0.03C_s$ 时，可以通过两者的近似线性关系快速计算所需的电流，增加调整的灵敏性。在 $(|\lambda C_c - C_s|)$ 大于 $0.03C_s$ 时，则需要利用原始的公式确定所需电流。

单片机电路设计上，采用了最小系统的设计思路，降低了生产成本。放大电路设计方面，其信号放大电路的作用是将单片机 DAC 模块输出的 0-2V 信号放大并提高带载能力，使其能够给线圈提供足够的电流以改变磁场。首先通过 TI0821D 芯片将 0-2V 信号线性放大为

0-16V，再通过三极管组成的放大电路提高带载能力并进行输出。

通过上述控制系统结合旋光系统，最终实现光强的自稳定调节功能。

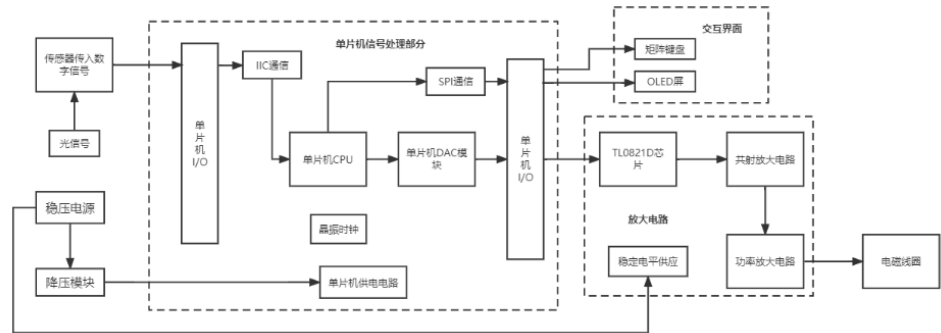


图 2 单片机系统示意图

2 实验过程及结果

实验以验证性实验为主，侧重于验证利用法拉第旋光稳定光强的可行性。

(1) 实验装置的结构

实验装置由激光器，第一偏振片、磁致旋光器、第二偏振片、分光镜、光电检测传感器、单片机和稳流电源构成。磁致旋光器的两端相对设置有入射孔和出射孔，第一偏振片、磁致旋光器、第二偏振片、分光镜依次设在激光器的光路上。

磁致旋光器外部为电磁线圈，中心设有通光孔，通光孔内设有重火石晶体。分光镜倾斜设置，经过分光镜的出射光射向壳体的出光孔，经过分光镜的反射光射向位于壳体一侧的光强传感器。光强传感器与单片机相连，单片机通过放大电路与磁致旋光器的电磁线圈相连。所述的放大电路包括 TI0821D 芯片、共射放大电路、功率放大电路，且三者顺次相连，稳流电源分别通过线路与单片机和放大电路的高电平端相连，提供电能。

(2) 光强稳定实验及结果

1. 在室内日光灯光照条件下打开激光器，读取光强传感器的数值，约为 1500 个单位。将所需光强设定为 1300 个单位并启动装置，观察传感器的光强数值。记录光强设定发生变化前后 1 秒传感器的度数如图所示。本实验验证了该装置可以小范围的改变光强的输出值。

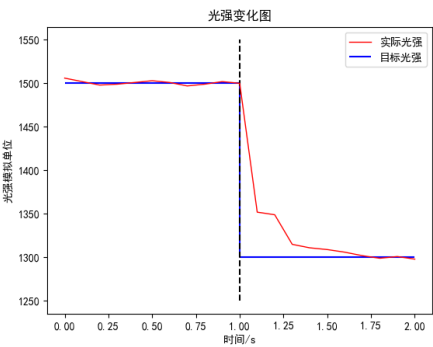


图 3 实验 1 结果图

2. 在室内日光灯光照条件启动计时器，在 1 秒时将所需的光强设置为 800 个单位并启动装置，光强迅速稳定至设定值并且保持稳定。2 秒时开启激光器以模拟传播过程中受到了外界干扰。记录数据如图所示，光强的稳定性相比没有启动装置时有了较大的提升。实验表明，本装置在光强突变的情况下有较高的稳定能力。

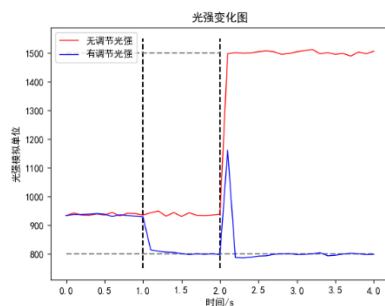


图 4 实验 2 结果图

3 结语

综上所述,通过自行设计的稳定装置分别在改变设定光强,稳定光强突变应用场景下进行实验,验证了利用法拉第旋光效应稳定光强的可行性。此方案的优势在于直接稳定接收端光强,同时解决光源和传播路径对激光光强的影响。此外,得益于该方案所采用的核心原理、电子控制系统以及逻辑判断算法,该装置在调节和稳定光强方面具有响应速度快,光损耗低等特点。本实验的实验现象明显,使用方法简便且应用前景广泛,可以作为大学物理设计性实验,在实验室中开放,它不仅可以激发学生对物理学习的热情,也可以培养学生理论与实践相结合的综合科研能力

4 参考文献

- [1]熊克明,黄祥金.激光光强稳定装置[J].应用激光,1981,(1):21-22+20
- [2]凌六一,林攀攀,黄友锐,谢品华.基于光谱稳定 LED 光源的长光程 DOAS 的大气 NO₂ 探测[J].光子·激光,2015,第 26 卷(9):1712-1718
- [3]高芬,李兵.激光器不稳定对多步相移算法相位提取精度的影响[J].西安工业大学学报,2015,(9):698-704
- [4]李惠珊.在金兹堡朗道耗散系统中产生稳定光学涡旋簇的研究[D].广东技术师范学院,2018
- [5]金辉.高稳定度星上紫外 LED 定标电路及控制技术研究[D].中国科学院研究生院(上海技术物理研究所),2016
- [6]李淳飞,陈历学.光学双稳性的静态稳定性和光强稳定器[J].光学学报,1984,(10):907-913
- [7]金恩培,张立彬.由 ZF-6 玻璃磁光旋转子构成的激光光强稳定器[J].仪器仪表学报,1996,第 17 卷(3):323-327
- [8]孙玉洋.近红外光源稳定控制系统及应用研究[D].吉林大学,2015
- [9]张帅.基于 PGC 解调算法消除光强扰动的光纤传感器研究[D].天津理工大学,2016
- [10]郑宇进,允自强,高新,刘秀美.光学双稳态激光光强稳定器的实验研究[J].重庆大学学报(自然科学版),1992,第 15 卷(5):107-111
- [11]田振国,张立,张书练.He-Ne 双折射塞曼双频激光器的等光强稳频研究[J].红外与激光工程,2016,第 45 卷(5):53-58
- [12]王浩,杨照华.原子磁强计检测光闭环稳定系统设计[J].传感器与微系统,2014,(3):82-84,88
- [13]张敬斌,赵明山,李国华.利用无布氏窗 He-Ne 激光器获得光强稳定的线偏光的实验研究[J].激光技术,1995,第 19 卷(3):179-181
- [14]叶红安,陈九江,吕厚均,姜宗胜,姜作宏,葛春风.高稳定度光强稳定器[J].中国激光,1995,(2):129-132
- [15]秦玉倩,段发阶,傅晓,黄婷婷.热阴极低压汞灯驱动及光强稳定方法[J].重庆大学学报,2021,第 44 卷(5):87-94

- [16] 陈昱衡. 室内半导体照明通信中的光强稳定技术[J]. 数字化用户, 2017, 第 23 卷(47)
- [17] 邱选兵, 李宁, 孙冬远, 李传亮, 蒋利军, 魏计林, 王高. 小型化高稳定半导体激光驱动电路研究[J]. 激光与红外, 2018, 第 48 卷(4): 469-475
- [18] 方韩韩, 刘智, 刘丹, 陈曦, 赵海丽, 王林林, 张冰川. 液晶光强稳定技术研究[J]. 光通信技术, 2014, 第 38 卷(9): 39-41