

大口径磁光隔离器隔离度单次测量技术

张攀政¹ 李菁辉^{1*} 冯滔¹ 王利¹
张志祥¹ 曹兆栋² 周申蕾¹ 马伟新² 朱俭²

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率与物理联合实验室, 上海 201800

²中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

摘要 搭建了全光纤化的大口径磁光隔离器隔离度单次测量系统, 体积小且调节灵活方便, 在大口径隔离器的在线测量方面具有独特优势。利用光纤器件在光束传输和耦合方面的优势以及磁光隔离器的工作特点, 采用透过率相对测量法和静动态对比法实现了隔离度的单次测量。实验可测量动态范围达到 33 dB 以上, 且通过调整光纤耦合器分光比可使测量动态范围进一步提高到 50 dB 以上。该方法有效消除了输入信号脉冲功率及偏振态抖动等因素对测量精度的影响, 在输入信号脉冲能量和偏振态随机抖动的情况下, 仍然可实现抖动波峰波谷(PV)值为 2.2% 的测量精度。

关键词 测量; 大口径磁光隔离器; 隔离度; 单次测量; 全光纤化; 在线测量

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1204001

Single-Shot Isolation-Rate Measurement for Large-Aperture Faraday Rotator

Zhang Panzheng¹ Li Jinghui¹ Feng Tao¹ Wang Li¹ Zhang Zhixiang¹
Cao Zhaodong² Zhou Shenlei¹ Ma Weixin² Zhu Jian²

¹National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

Abstract An all-fiber Faraday rotator isolation rate measurement system is designed and realized. The system has tremendous advantage for large aperture Faraday isolator on-line measurement due to its flexible alignment and more compaction. Employing the method of relative transmission measurement and transmissions contrasting between static and operating states, single-shot isolation-rate measurement is achieved. The available measurement range larger than 33 dB is demonstrated experimentally. And the potential to get measurement range larger than 50 dB by adjusting the coupling rate of the fiber couplers is affirmed. Measurement accuracy of 2.2% of PV value is achieved even while keeping the input pulse energy and polarization in random vibration, which illustrates that the influence of the input pulse energy and polarization vibration on the measurement accuracy is eliminated.

Key words measurement; large-aperture Faraday rotator; isolation-rate; single-shot measurement; all-fiber; on-line measurement

OCIS codes 120.7000; 130.5440; 060.2300

1 引言

磁光隔离器是大口径高功率激光系统中避免自激振荡和反向激光破坏的常用隔离器。尤其在大口径激光片状放大链中, 大口径磁光隔离器(LAFR)是避免反向激光引起装置破坏的主要手段, 是系统不可或缺的

收稿日期: 2016-08-22; 收到修改稿日期: 2016-09-23

基金项目: 中国科学院青年创新促进会资助课题

作者简介: 张攀政(1983—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光纤激光器、大口径片状放大器及高功率激光系统集成技术方面的研究。E-mail: nwpuzhangpanzheng@163.com

* 通信联系人。E-mail: lip512@126.com

单元部分^[1-3]。

LAFR 主要由偏振器、法拉第旋转器和线圈供电网络组成。实际在线应用中,要求 LAFR 具有尽可能高的隔离度,最大的正向动态透过率,尽可能阻挡反向激光的同时对正向传输激光产生尽可能小的损耗。研究表明,这两点对隔离器各器件的具体要求是统一的^[4]。除了要求偏振器、磁光介质具有优良的光学属性和合适的安装角度外,对磁场线圈、激磁电流、环境温湿度等也有较高的要求^[5-9]。为了增加通光口径内磁场均匀性,螺旋管线圈往往需要附加线圈并具有一定的长度和口径比,因而具有较大的电感。要想达到满足要求的高达数千安培的激磁电流,需要 10 kV 以上的工作电压。为了避免供电网络过于庞大,供电网络采用 1~2 级电感-电容供电回路,放电脉冲为钟形脉冲^[1,4]。这就需要精确控制隔离器放电时间与系统主激光脉冲之间的相对时间,使主激光正向脉冲在放电脉冲峰值附近的平坦区内通过隔离器。另外,为了得到最佳的隔离度,还需要实际测试并优化隔离器的工作电压。所以,对高功率激光系统中 LAFR 的隔离度进行在线测量并优化是提高整个激光系统输出能力、运行稳定性和可靠性不可或缺的一步。调节方便,能够在线精确测量的 LAFR 隔离度的测量技术就显得尤为重要。传统的测量手段不仅要求法拉第线圈多次放电,且需要对测量光路进行复杂的切换和调节才能完成一次隔离度的测量^[10-11],尤其不利于 LAFR 的在线测量。

本文提出一种全光纤化的能够单次精确测量 LAFR 隔离度的装置并对其进行了实验研究。整个测量装置全部由光纤器件熔接而成,调节灵活,为在线 LAFR 的测量和优化提供很大的方便。该装置采用透过率相对测量法和静动态对比法,同时测量 LAFR 的正向相对透过率和反向相对透过率,线圈单次放电就能实现隔离度的精确测量,且能够克服测量注入信号脉冲能量、偏振态抖动等因素对测量精度的影响。实验结果显示,在测量脉冲能量和偏振态随机抖动的情况下,该测量方案仍可实现波峰波谷(PV)值为 2.2% 的测量精度和 33 dB 以上的隔离度测量动态范围。

2 实验装置及基本原理

2.1 大口径 LAFR 原理

如图 1 所示,LAFR 主要由起偏器(即入射端偏振片)、磁致旋光玻璃(安装于线圈内部,光学表面垂直于磁场方向)、检偏器(即输出端偏振片)、法拉第线圈(Faraday coil)以及线圈供电系统组成。起偏器和检偏器用以实现偏振相关滤光功能,对 P 偏振方向的信号高效通过,对 S 偏振方向的信号隔离阻挡。起偏器放置的 P 偏振方向与正向入射光的偏振方向相同,检偏器和起偏器的 P 偏振方向成 45° 夹角,且与所在激光系统后续器件的偏振方向保持一致。静态情况下 LAFR 对正反方向传输光束具有相同的透过率。工作时电感-电容供电回路通过法拉第线圈放电,线圈流过高压电脉冲,在内部产生沿轴向的均匀磁场。磁致旋光玻璃在磁场中产生旋光效应,使传输光束的偏振方向发生旋转。旋转方向与磁场方向相关,与光束的传播方向无关。旋转角度与磁场强度、旋光玻璃的厚度和旋光系数相关,与传输光的初始偏振方向无关。在其他条件确定的情况下,通过控制电感-电容供电回路的工作电压和流经线圈的激磁电流方向,可以实现对线圈中磁场强度和方向的控制,使正向传输光通过旋光玻璃到达检偏器时的偏振方向与检偏器 P 偏振方向相同,实现高效通过。此时对应的反向传输光到达起偏器时的偏振方向与起偏器 P 偏振方向垂直,绝大部分能量被起偏器阻挡从而达到隔离的效果^[1]。

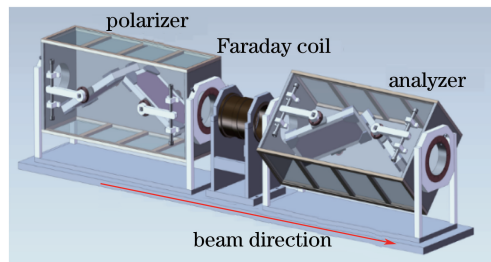


图 1 大口径磁光隔离器结构示意图

Fig. 1 Schematic of large aperture Faraday rotators

2.2 隔离度单次测试实验装置

如图 2 所示,测量设备主要由一个脉冲激光源,三个光纤偏振控制器(PC1,PC2,PC3)、一个光纤隔离器(ISO)、一个光纤在线起偏器(ILP)、一个 1×2 光纤耦合器(coupler1)、两个 2×2 光纤耦合器(coupler2, coupler3)、两个光纤准直透镜(FC)、四个快速光电二极管(PIN)和一台示波器组成。设备中所有光纤器件通过尾纤熔接相互连接。脉冲激光源是从神光 II 前端系统脉冲种子源中经光纤耦合器分光输出,然后经过约 100 m 单模光纤传输到 PC1 中。因为前端脉冲种子源与待测大口径磁光隔离器的放电脉冲之间通过微秒同步机实现了同步控制,所以实验中测量的脉冲信号到达隔离器的时间与法拉第线圈放电脉冲之间具有固定的相对时间延迟,脉冲信号处在放电脉冲峰值附近的平坦区域内。脉冲激光源的传输光纤连接 PC1 的输入端,并依次将 PC1,ISO,ILP,coupler1 首尾相连。coupler1 的两个输出光纤分别连接 coupler2、coupler3 的一个光纤输入端。coupler2、coupler3 各有一个输出端分别依次连接 PC2、FC1 和 PC3、FC2,另外的一个输入端和输出端分别通过 PIN 与示波器的四个测量通道(ch1~ch4)依次连接。

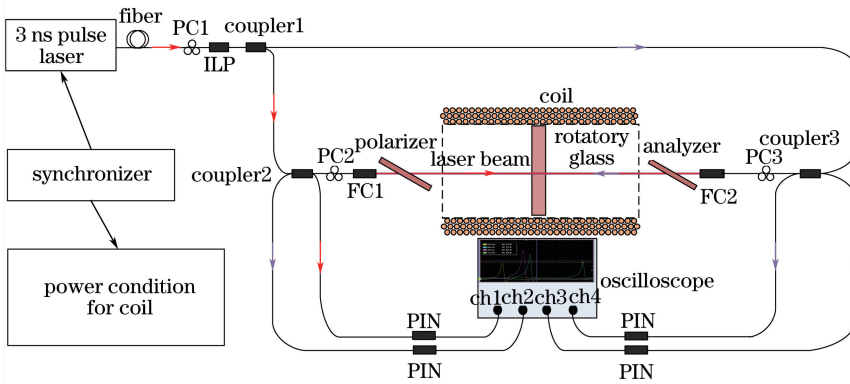


图 2 LAFR 隔离度单次测量实验原理图

Fig. 2 Schematic of the single-shot isolation-ratio measurement of LAFR

输入脉冲信号经过 coupler1 被耦合成分别沿两个输出光纤传输的两路信号光。两路信号光分别进入 coupler2 和 coupler3 的输入端,经过耦合器分光后分别通过 FC1 和 FC2 转化为空间平行光并沿正反两个方向通过待测 LAFR,作为 LAFR 的正向入射光和反向入射光。其中,coupler2 将输入激光脉冲信号耦合成分别沿两个输出光纤传输的部分,其中一路沿传输光纤直接进入 PIN 并与示波器通道 ch1 相连。该信号作为正向通过待测 LAFR 的激光脉冲信号的参考信号。从 coupler2 另一尾纤输出的激光脉冲信号作为待测 LAFR 的正向传输信号,进入 FC1 后被耦合成分空间平行光并沿待测 LAFR 的正入射方向垂直入射。通过待测 LAFR 之后,该激光脉冲信号进入对面的 FC2,再次被耦合成分光纤传输的激光信号。该信号沿 coupler3 的输出端进入,通过 coupler3 时再次被耦合成分两部分,一部分传输到 ISO 时被损耗掉,另一部分进入 coupler3 的另一光纤输入端口,作为待测 LAFR 正向透射光信号,通过 PIN 转化为电信号进入示波器通道 ch3。同理,反向传输脉冲激光的参考信号和透射信号分别由 coupler3 的另一输出端口和 coupler2 的另一个输入光纤端口输出,并分别连接 PIN 转化为电信号进入示波器通道 ch4 和通道 ch2。

ILP 连接在 coupler1 之前,对输入信号光具有偏振选择性滤光作用,即使测量用脉冲信号的偏振状态发生跳动,依然能够保持进入 coupler1 的偏振状态保持不变。消除了信号光偏振态抖动对测量的影响。PC1 为光纤三环式偏振控制器,连接在 ILP 之前调节进入 ILP 的激光信号的偏振态,可实现对透过 ILP 激光信号的能量连续调节,使进入示波器各通道的脉冲幅值达到合适范围。

待测 LAFR 的检偏器和起偏器分别由两块布儒斯特角放置的薄膜偏振片组成。在光纤准直器 FC1 和 FC2 之前各插入一个光纤偏振控制器 PC2 和 PC3,可以实现正反两个方向传输信号偏振态的独立调节,从而实现正反两个方向传输信号进入旋光玻璃时能量的独立调节,可实现更大的隔离度测试动态范围。

2.3 隔离度单次测试原理及分析

在线圈不放电时,旋光介质无旋光作用,待测隔离器无隔离作用。此时正反方向入射光的透过率为静态透过率,与两个偏振片的夹角、旋光玻璃透过率、起偏器和检偏器的偏振隔离特性以及正反方向入射光的偏振

方向相关。

为了更好地说明测量原理,此处假设测量系统各参数如下。

经过 ILP 之后进入 1×2 光纤耦合器 coupler1 的激光脉冲信号的峰值功率为 I 。 1×2 光纤耦合器 coupler1 的耦合比是 $a:1$, a 端作为正向入射信号光进入 2×2 光纤耦合器 coupler2。coupler2 的耦合比是 $b:1$, b 端为正向入射光。 2×2 光纤耦合器 coupler3 的耦合比是 $c:1$, c 端为反向入射光。隔离器本身的正反向静态透过率分别为 T_F 和 T_R 。由起偏器和检偏器对正向和反向光纤准直器输出信号的偏振滤光作用引起的损耗为 η_F 和 η_R 。示波器各通道测得的电信号脉冲峰值大小表示为 C_1, C_2, C_3, C_4 。各通道 PIN 的响应常数为 K_1, K_2, K_3, K_4 ,则在静态情况下示波器测得信号为

$$C_1 = \frac{K_1 I \times a}{(b+1) \times (a+1)}, \quad (1)$$

$$C_2 = \frac{K_2 I \times c \times T_R \times (1 - \eta_R)}{(b+1) \times (c+1) \times (a+1)}, \quad (2)$$

$$C_3 = \frac{K_3 I \times a \times b \times T_F \times (1 - \eta_F)}{(b+1) \times (c+1) \times (a+1)}, \quad (3)$$

$$C_4 = \frac{K_4 I}{(c+1) \times (a+1)}. \quad (4)$$

由于实际使用中正反方向的入射光偏振态分别与起偏器和检偏器的 P 偏振方向相同,且起偏器和检偏器具有相同的偏振隔离特性,所以隔离器自身对正反两个方向的传输光具有相同的静态透过率,即

$$T_F = T_R. \quad (5)$$

法拉第线圈放电,隔离器工作时示波器测得信号为

$$C_1' = \frac{K_1 I' \times a}{(b+1) \times (a+1)}, \quad (6)$$

$$C_2' = \frac{K_2 I' \times c \times T_R' \times (1 - \eta_R)}{(b+1) \times (c+1) \times (a+1)}, \quad (7)$$

$$C_3' = \frac{K_3 I' \times a \times b \times T_F' \times (1 - \eta_F)}{(b+1) \times (c+1) \times (a+1)}, \quad (8)$$

$$C_4' = \frac{K_4 I'}{(c+1) \times (a+1)}. \quad (9)$$

结合(1)~(9)式。则隔离器的隔离度 Q 为

$$Q = \frac{T_F'}{T_R'} = \frac{C_3'}{C_1'} \times \frac{c+1}{b \times (1 - \eta_F)} = \frac{C_3'}{C_1'} \times \frac{C_2}{C_4}, \quad (10)$$

$$= \frac{C_2'}{C_4'} \times \frac{b+1}{c \times (1 - \eta_R)} = \frac{C_2'}{C_4'} \times \frac{C_3}{C_1}$$

式中 C_3/C_1 和 C_3'/C_1' 分别为静态和线圈放电时的正向传输激光的相对透过率, C_2/C_4 和 C_2'/C_4' 分别为静态和线圈放电时的反向传输激光的相对透过率。所谓透过率相对测量法,是指在测量过程中得到的正、反向相对透过率并非隔离器自身的真实透过率,而是在隔离器自身透过率的基础上同时包括了光纤耦合器耦合比、光纤测量系统的传输损耗、空间耦合损耗、PC2(PC3)状态所决定的起偏器(检偏器)对正(反)向传输激光信号的偏振滤光损耗等测量系统引入的损耗。

在 PC2 和 PC3 状态一定的情况下,测量系统在 coupler1 分光之后对正反向传输激光信号引入的损耗(包括起偏器、检偏器分别对正、反向激光信号的偏振滤光损耗)在静态和线圈放电时保持不变。且隔离器本身对正、反向传输激光的静态透过率 T_F 与 T_R 相等。所以在静态和线圈放电时分别测量正向和反向传输激光的相对透过率,根据(10)式进行对比计算即可得出待测隔离器的隔离度,实现隔离度的单次放电测量。此所谓静动态对比法测量。

透过率相对测量法和静动态对比法相结合,无须对隔离器本身透过率和测量系统损耗分别进行测量,不仅有效避免了注入脉冲能量和光纤耦合器耦合比对测量精度的影响,还可根据待测隔离度的大致范围灵活

选择光纤耦合器的耦合比。同时,ILP的偏振滤波作用隔离了注入脉冲的偏振态抖动,消除了其对测量精度的影响。在注入脉冲能量和偏振态抖动的情况下仍能实现隔离度的精确测量。

3 实验结果

用该装置进行了神光II第9路 $\phi 100$ mm磁光隔离器的隔离度单次测量试验,测试了不同充电电压下的隔离度。实验中光纤耦合器 coupler1的分光比为3:2,coupler2和coupler3的耦合比都为1:1。首先测量静态情况下示波器各通道的脉冲信号大小,然后再对隔离器线圈进行一次放电,测量示波器各通道脉冲信号大小,根据(10)式便可得到被测隔离器的隔离度。测量过程中示波器各通道测得的脉冲波形如图3所示:通道ch1和ch3分别为正向传输激光的参考信号和透过信号,通道ch4和ch2分别为反向传输激光的参考信号和透过信号。如图3(a)所示,静态时正向相对透过率和反向相对透过率的比值约为1.2。造成这一差别的原因在于PC2和PC3的调节状态不同。可见通过调节PC2和PC3可实现对正、反向静态相对透过率的独立控制,从而实现可测量动态范围的连续调节。如图3(b)所示,在线圈放电时,示波器通道ch2的脉冲信号会比较小,所以该通道的量程需要从静态测量时的70 mV/div切换至1 mV/div(该示波器的最小量程)。

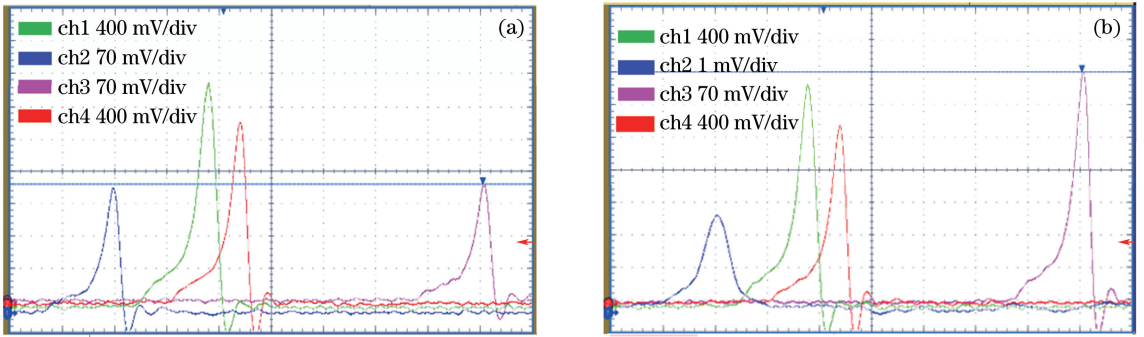


图3 隔离度测量过程中的脉冲波形。(a)静态时的脉冲波形;(b)隔离器线圈放电时的脉冲波形

Fig. 3 Pulses in the isolation-rate measurement. (a) Pulses measured in static state; (b) pulses measured while the coil discharges

图4为被测磁光隔离器放电脉冲时间波形,放电脉冲1/10底宽为18 ms,峰值1%宽度为1.8 ms。峰值附近正负10 μ s范围内,电流变化小于0.1%。隔离器在激光系统中在线应用时,正反向激光脉冲到达隔离器的相对时间延迟一般在2 μ s以内,且两者都处在线圈放电脉冲峰值附近的平坦区域内,对应的线圈瞬时激磁电流的差别远小于0.1%,对隔离器隔离度造成的影响可完全忽略不计。对于测量实验,通过同步控制使正向脉冲信号的通过时间处在线圈放电脉冲的峰值处,对应的反向信号相对延迟时间为7 ns(如图3,此延迟量由测量系统中正、反向传输光纤的长度差别所致),远小于实际在线应用时的2 μ s延迟时间和放电脉冲峰值平坦区20 μ s的宽度,所以实验测量结果能够真实反映隔离器在线应用时的实际隔离度。

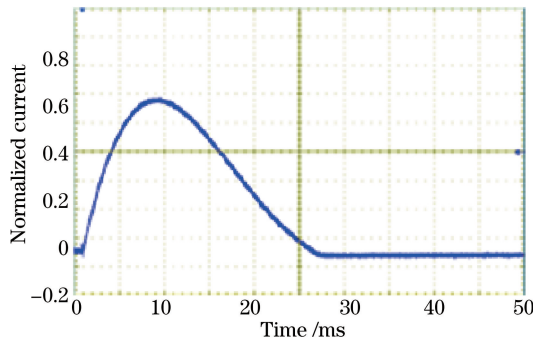


图4 线圈放电脉冲时间波形

Fig. 4 Discharge pulse of the coil

图5所示为神光II第8路 $\phi 100$ mm磁光隔离器不同运行电压下的隔离度测量结果。在充电电压11 kV时,得到31 dB的最佳隔离度。随着工作电压远离最佳电压,隔离度出现明显降低,且呈现出以最佳

电压为中心的对称性。工作电压偏离最佳电压 1 kV,则隔离度降为 22.8 dB。相比之下,用传统在线测量方法测得的隔离度同样表现出以最佳电压为中心的对称性降低的变化趋势^[12]。但由于传统在线测量方法中杂散光或氙灯光引起的噪声为百微焦量级,同等口径能量计的分辨率为焦耳量级,通光口径、增益能力、光学元件损伤阈值等因素也共同决定了注入磁光隔离器的最大脉冲能量为几百焦耳量级,所以传统在线测量方法可精确测量的最大隔离度动态范围一般在 30 dB 以内。根据传统测量方法的结果,在最佳电压处的隔离度为 26.5 dB,工作电压偏离最佳电压 1 kV 则隔离度降为 22.6 dB。这说明由于传统测量方法有限的可测动态范围导致其无法精确测量最佳电压时的隔离度,因而两种方法在最佳电压处测得的隔离度具有明显的差别,传统测量方法可实现的测量动态范围即为最佳电压下测得的最大隔离度,为 26.5 dB。当工作电压偏离最佳电压 1 kV 以后,隔离度进入了传统测量方法的可测动态范围,因此两种测量方法具有很好的匹配度,此时测得的隔离度分别为 22.8 dB 和 22.6 dB。

同样的方法测量了神光 II 第 9 路 $\phi 100$ mm 隔离器的隔离度随着运行电压的变化,如图 6 所示。与第 8 路隔离器相比,也表现出隔离度随着运行电压的不同会产生明显变化的工作特点,进一步从侧面说明了在线精确测量大口径磁光隔离器隔离度并进行优化调试的重要性。由于旋光晶体、偏振片、线圈规格、供电网络等都存在一定差别,所以虽然变化趋势基本相同,但两者的最佳隔离度和对应的最佳电压也存在一定的差别。在 16 kV 的运行电压下,单次测量法测得第 9 路 $\phi 100$ mm 隔离器的隔离度达到最佳状态,为 33 dB。说明当前测量系统可实现至少 33 dB 的测量动态范围。

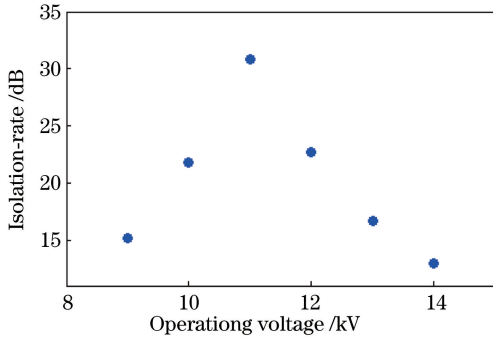


图 5 神光 II 第 8 路 $\phi 100$ mm 磁光隔离器不同运行电压下测量到的隔离度

Fig. 5 Measured isolation-rate with different operational voltages of the $\phi 100$ mm Faraday rotator in SG II 8th beam

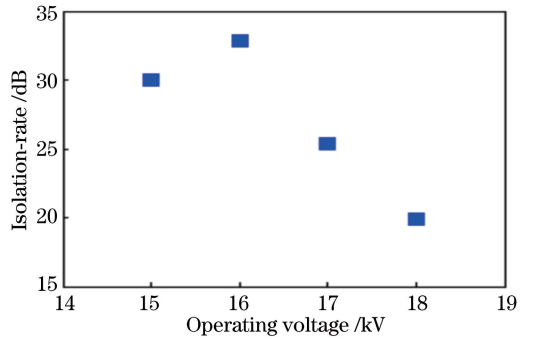


图 6 神光 II 第 9 路 $\phi 100$ mm 磁光隔离器不同运行电压下测量到的隔离度

Fig. 6 Measured isolation-rate with different operational voltages of the $\phi 100$ mm Faraday rotator in SG II 9th beam

该测量系统的测量动态范围主要由以下几方面因素决定:1) 实验用 PIN 管的线性区的最大可测电压和最小可测电压;2) 示波器允许的最大脉冲峰值电压和可以分辨的最小脉冲峰值电压;3) 测量系统各光纤耦合器的耦合比;4) 起偏器和检偏器分别对正、反向入射激光引起的偏振滤光损耗,这一点主要由 PC2 和 PC3 的调节状态决定。该实验中所用 PIN 管的线性区域为 0 V 至 5 V;示波器可分辨的最小脉冲峰值电压约为 1 mV,允许最大脉冲峰值电压为 5 V;所用各光纤耦合器的分光比分别为 3:2、1:1、1:1;正向与反向传输激光的静态传输损耗比值为 0.8。由此可推断实验中测量系统可以达到的测量动态范围为 36 dB。如需进一步增大测量动态范围,则可以通过调节 PC2 和 PC3 或更改光纤耦合器分光比两种途径实现。前者通过独立控制正、反向传输激光的偏振滤光损耗可实现动态范围的连续调节,但受到注入脉冲能量的限制,调节范围有限;后者无法对动态范围进行连续调节,但可调范围大。如将实验中光纤耦合器 coupler1 的分光比由 3:2 换成 1:100,保持其他条件不变,则系统可实现的测量动态范围将达到 56 dB。当然这也远超出了目前隔离器可实现的最大隔离度和激光系统对隔离度的需求。

测量系统的测量精度主要受到以下几方面的影响:1) 实验用 PIN 管的线性度;2) 测量系统导致的正、反向激光透过率的抖动;3) 测量注入脉冲能量和偏振态的抖动。首先,为了保证测量的准确性,对实验用 PIN 管进行了线性度标定,结果如图 7(a)所示。根据标定结果,在测量结果中加入线性度修正因子,则 PIN 管测得的脉冲能量与真实脉冲能量(能量计直接测量)的偏差 PV 值为 0.2%。因为测量实验中共用了 4 个

相同的 PIN 管,则由于 PIN 管引起的测量误差应该在 0.8%左右;其次,测量系统导致的正、反向激光的透过率抖动是指实验中所用的两个单模光纤准直透镜自身耦合效率的抖动。实验测定了该耦合效率的抖动情况(两准直透镜间距 2 m,准直透镜之间无任何光学元件,温度、气流等环境条件与隔离度测试实验保持相同),结果如图 7(b)所示。15 min 测试时间内耦合效率的抖动 PV 值为 1%,且呈现一定的单调变化的趋势。采用隔离度单次测量法完成一次隔离度测量所需的时间约为 3 min,所以由于测量系统导致的正、反向激光透过率的抖动引入的隔离度测量误差应该在 1%以内;

另外,实际测试了测量用脉冲光源自身的能量抖动情况,在 10 min 的测试时间内抖动 PV 值为 2%。在脉冲光源后插入偏振片,10 min 测试时间内透过偏振片的能量抖动 PV 值为 4%,说明由于偏振态抖动引起的脉冲通过偏振片的透过率抖动 PV 值约为 2%。如果采用传统的直接测量法,需要完成光路切换或线圈供电回路的正负极切换,完成一次隔离度测量所需时间约为 30 min,则由于脉冲能量和偏振态抖动引入的隔离度测量误差将大于 4%。而文中的光纤单次测量方法采用了透过率相对测量法,不仅将正、反向入射光分别一分为二作为透射信号和参考信号,而且同时测试正、反两个方向的相对透过率,所以完全克服了脉冲能量抖动对隔离度测量精度的影响。在 coupler1 之前插入在线偏振器 ILP,将脉冲光源的偏振态抖动转化为经 ILP 检偏之后的脉冲能量抖动,而能够保持透过 ILP 之后脉冲信号的偏振状态稳定性。通过合理控制 ILP 到光纤准直透镜 FC1 和 FC2 之间的光纤长度并将光纤合理盘绕固定可以很大程度保持 FC1 和 FC2 输出脉冲的偏振状态稳定性,结合该测量方法可以完全克服脉冲能量抖动影响的特点,可以有效的降低脉冲源偏振态抖动对测量精度的影响。实验中用能量计直接测量得到 FC1 和 FC2 输出空间激光脉冲通过偏振片的相对透过率抖动 PV 值为 0.3%以下,说明该单次测量方法可以将注入脉冲能量和偏振态抖动对测量精度的影响控制在 0.6%以内。

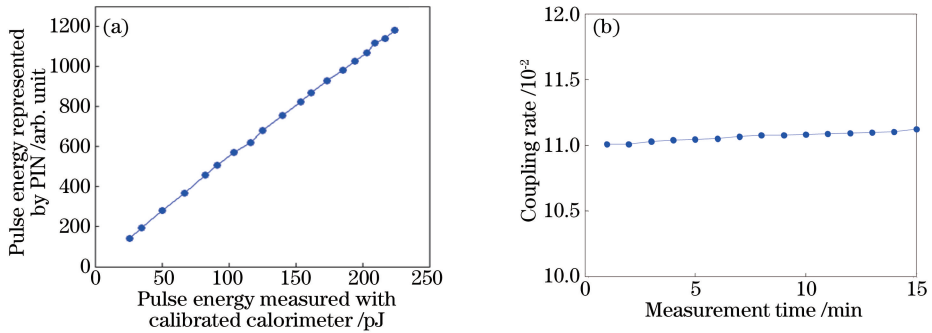


图 7 PIN 管线性度标定及光纤准直透镜耦合效率稳定性测试结果。(a) PIN 管线性度标定;(b)光纤准直透镜耦合效率稳定性

Fig. 7 Results of the PIN calibration and the coupling rate stability of fiber collimating lens.

(a) PIN calibration results; (b) coupling rate stability of fiber collimating lens

以上三种因素对隔离度测量精度的影响都是通过直接或间接影响测量得到的正、反向相对透过率的比值的稳定性来实现的。所以考核正、反向相对透过率测量结果的比值的稳定性可以反映隔离度的测量精度。为了同时考核测量方法的可靠性,给注入脉冲源人为引入能量和偏振态的随机抖动,多次测量了正、反向的相对透过率,结果如图 8 所示;示波器测得各通道脉冲峰值功率的抖动 PV 值相对平均值均为 50%以上,但对应的正向相对透过率、反向相对透过率、正反向相对透过率的比值都非常稳定,抖动 PV 值分别为 1.7%, 1.6%, 2.2%。说明即使在脉冲能量和偏振态抖动引起的透过 ILP 的能量抖动 PV 值高达 50%的情况下,该测量方法依然能实现 PV 值为 2.2%的隔离度测量精度。

为了进一步验证该测量方法的可靠性,在神光 II 第 8 路 $\phi 100$ mm 磁光隔离器上进行了测量精度和可靠性的考核实验。保持隔离器的工作状态不变,输入脉冲能量和偏振态随机抖动,对隔离器的隔离度进行了多次测量并记录了每次测量时对应的正、反向传输激光参考脉冲的峰值功率。如图 9 所示,正、反传输脉冲的峰值功率的变化幅度均高达平均值的 80%,而对应测得的隔离度平均值为 187,抖动 PV 值只有 3.0,占平均值的 1.6%。这一考核测试结果与图 7 中所示抖动 PV 值为 2.2%的测量精度基本吻合,说明该测量方法具有较高的测量可靠性和精度,可以有效抑制测量注入脉冲的能量抖动以及环境变化等因素带来的偏振态抖动对测量精度产生的影响,这一点与前面的理论分析相一致。

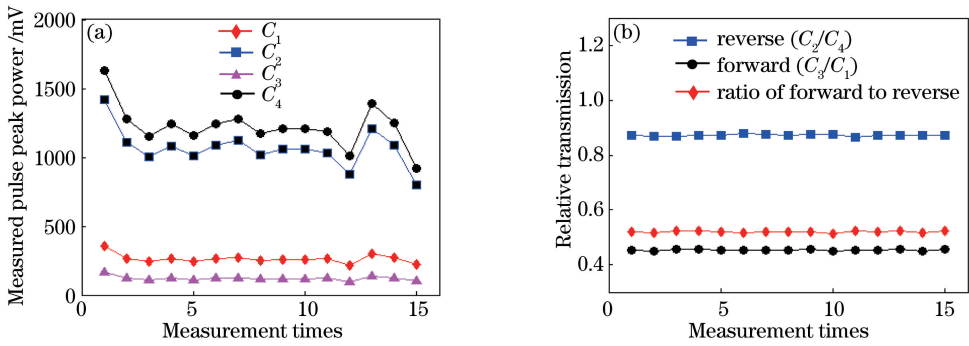


图 8 系统静态相对透射率多次测量结果。(a)示波器各通道测得的脉冲峰值功率；(b)测得的正、反向相对静态透射率及正、反向相对静态透射率的比值

Fig. 8 Results of the static relative transmission measurement. (a) Pulse peak power measured in four oscilloscope channels; (b) measured static relative transmissions for forward direction and reverse direction and the corresponding ratios between them

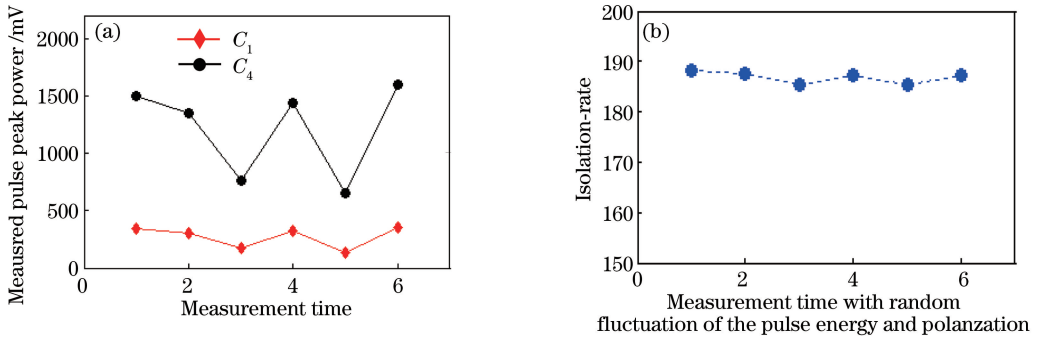


图 9 测量注入脉冲能量及偏振态随机抖动,隔离器 12 kV 工作电压下隔离度的多次测量结果。(a)放电时通道 1 和通道 4 测得的脉冲峰值功率;(b)对应隔离度测量结果

Fig. 9 Measured isolation-rate with the same operational voltage of 12 kV while with random fluctuation of the pulse energy and polarization; (a) Fluctuation of the pulse peak power measured in channel 1 and 4 while discharging; (b) measured isolation-rate

4 结 论

搭建了全光纤化的大口径磁光隔离器隔离度单次测量系统。利用光纤器件在光束传输和耦合方面的优势以及磁光隔离器的工作特点,采用透射率相对测量法和静态对比法实现了隔离度的单次测量。实验可测量动态范围达到 33 dB 以上。根据需求可通过调整光纤耦合器分光比实现 50 dB 以上的测量动态范围。该方法有效消除了输入信号脉冲能量及偏振态抖动对测量精度的影响,在输入信号脉冲能量和偏振态随机抖动的情况下,对同一工作状态下的隔离器隔离度进行测量,测量结果的抖动 PV 值占平均值的 1.4%。该方法的优点在于简单灵活,调节方便,便于大口径磁光隔离器的在线测量,且可实现单次测量,具有较强的抗干扰能力和较高的测量精度。缺点在于如要测量隔离度在全口径内的均匀性,需要分别测量口径内多点的隔离度。后续工作将采用光纤阵列结构,实现大口径磁光隔离器隔离度全口径分布的单次测量。

参 考 文 献

- 1 Eidmann K, Sachsenmaier P, Salzmann H, *et al.* Optical isolators for high-power giant-pulse lasers[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1972, 5(1): 56-58.
- 2 Simmons W W. In pursuit of fusion; argus laser system at livermore[C]. European Conference on Laser Interaction with Ecole Polytechnique, 1976: 1-9.
- 3 Wang Fang, Su Jingqin, Wang Wenyi, *et al.* Parasitic oscillation in high power laser facility with multi-pass-cavity amplification[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(8): 1183-1186.

- 王 方, 粟敬钦, 王文义, 等. 内腔四程放大高功率激光系统寄生振荡[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(8): 1183-1186.
- 4 Fan Dianyuan, Yang Yi, Jiang Zilong. Optimization design of Faraday rotators[J]. Chinese J Lasers, 1983, 10(10): 714-718.
- 范滇元, 杨 义, 姜子龙. 磁光隔离器的最佳化研究[J]. 中国激光, 1983, 10(10): 714-718.
- 5 Jiang Yasi, Zhou Peiming, Wang Biao, *et al.* High performance large aperture paramagnetic Faraday rotatory glass[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3157-3162.
- 蒋亚丝, 周培明, 王 标, 等. 高性能大口径顺磁旋光玻璃[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3157-3162.
- 6 Yin Hairong, Zhang Chunxiang, Liu Liying, *et al.* New progress in research on Faraday magneto-optical glass containing rare-earth[J]. Materials Review, 2008, 22(3): 7-10.
- 殷海荣, 章春香, 刘立营, 等. 稀土法拉第磁光玻璃研究新进展[J]. 材料导报, 2008, 22(3): 7-10.
- 7 Zhou Wei, Liu Nan, Zhang Kun, *et al.* Isolation technique for main-amplifier system of high power solid-state laser facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(10): 2284-2286.
- 周 维, 刘 楠, 张 崑, 等. 高功率固体激光装置主放大系统隔离技术实验[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(10): 2284-2286.
- 8 Wang Jiming, Wu Fuquan, Kong Weijin, *et al.* Analysis of isolation performance of optical isolator consisting of retardation sheets[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(7): 830-834.
- 王吉明, 吴福全, 孔伟金, 等. 波片型光隔离器隔离性能分析[J]. 光子学报, 2004, 33(7): 830-834.
- 9 Zhang Xin, Wen Jing, Hu Dongxia, *et al.* Investigation on isolation capability of multipass amplifier affected by optical coating depolarization[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s131001.
- 张 鑫, 温 静, 胡东霞, 等. 光学薄膜退偏对多程放大系统隔离能力的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s131001.
- 10 Brannon P J, Franklin F R, Hauser G C, *et al.* Faraday rotator using ED4 glass[J]. Applied Optics, 1974, 13(7): 1555-1557.
- 11 Mironov E A, Palashov O V. Faraday isolator based on TSAG crystal for high power lasers[J]. Optics Express, 2014, 22(19): 23226-23230.
- 12 杨 义, 范滇元. 激光 12# 实验装置(LF12)研制工作报告[R]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 1987: 120-150.