

微结构气体探测器中紫外激光束的信号和指向精度实验研究

王海云 祁辉荣 刘凌 原之洋 张余炼 温志文 张建 陈元柏 欧阳群

Signal and pointing accuracy of ultraviolet laser in micro-pattern gaseous detector

Wang Hai-Yun Qi Hui-Rong Liu Ling Yuan Zhi-Yang Zhang Yu-Lian Wen Zhi-Wen Zhang Jian
Chen Yuan-Bo Ouyang Qun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 022901 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181613

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181613>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于复合结构的气体电子倍增器增益模拟和实验研究

Measurement and simulation of the hybrid structure gaseous detector gain

物理学报. 2017, 66(14): 142901 <https://doi.org/10.7498/aps.66.142901>

基于超导纳米线单光子探测器深空激光通信模型及误码率研究

Model of bit error rate for laser communication based on superconducting nanowire single photon detector

物理学报. 2017, 66(19): 198501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.198501>

微结构气体探测器中紫外激光束的信号和指向精度实验研究*

王海云¹⁾²⁾³⁾ 祁辉荣^{1)2)†} 刘凌¹⁾²⁾⁴⁾ 原之洋¹⁾²⁾³⁾ 张余炼¹⁾²⁾⁴⁾
温志文¹⁾²⁾⁴⁾ 张建¹⁾²⁾ 陈元柏¹⁾²⁾ 欧阳群¹⁾²⁾

1) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

2) (核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

4) (兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

(2018年8月29日收到; 2018年11月18日收到修改稿)

在气体探测器研究中, 利用 266 nm 紫外激光的双光子电离物理机制使气体电离产生可测量的信号, 是一种重要的标定方法. 随着微结构气体探测器 (MPGD) 的不断发展, 用紫外激光标定来实现较高精度位置分辨率成为了一种研究需求, 对此有两个关键技术问题需要解决: 实验研究激光可测信号大小以及激光指向精度. 分析和模拟计算了紫外光电离信号大小和激光调光误差, 基于微结构气体电子倍增器探测器与 266 nm 波长激光束, 在工作气体 Ar/CO₂(70/30) 中, 测量了不同光斑面积与输出信号的关系; 设计和研制了紫外激光调光系统, 实验测量了紫外光调光偏差. 模拟结果与实验结果对比分析表明: 紫外激光束作用于气体探测器, 探测器增益在 5000, 前放增益为 10 mV/fC 时, 6 mm 读出条宽输出信号幅度约 400 mV; 在探测器内传播距离为 400 mm 时, 较短时间内 (10—20 min) 实验调光指向精度可以保证小于 5', 引入 z 向偏差最大可以达到 0.33 mm, 对应 z 向漂移速度的测量相对误差为 6.4×10^{-4} . 该研究为 MPGD 与紫外激光标定实验设计提供主要的设计参考.

关键词: 微结构气体探测器, 紫外激光, 双光子电离

PACS: 29.40.Cs, 29.40.Gx

DOI: 10.7498/aps.68.20181613

1 引言

微结构气体探测器 (micro pattern gas detector, MPGD) 有效面积内具有二维探测的各向同性, 依据信号特性设计相应的读出像素进行二维数据获取, 不需要进行复杂的数据修正处理方法即可获得准确的二维位置信息. 所得到的位置分辨率 (约为 100 μm 量级)^[1] 满足了高能粒子对撞机径迹测量系统要求的位置分辨率. 这类探测器的最小单元尺度大都在几百微米左右, 被称为 MPGD^[2-4].

它们既有良好的位置分辨率, 也具有较高计数率上限 (可以达到 $10^6 \text{ mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上); 且在高磁场中 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ 效应影响很小. 其中气体电子倍增器 (gaseous electron multiplier, GEM)^[5,6] 和微网结构气体探测器^[7,8] 由于其自身的结构特性而具有一定抑制正离子反馈^[9] 的能力. GEM 探测器可以应用在高计数率、要求严苛的实验条件下, 目前已被广泛用于大型粒子物理实验中, 例如 LHCb 的径迹室^[10] 和 KLOE-2 实验的内径迹室^[11]. 微网结构气体探测器由于同样具有较高的位置分辨率及较好抗辐

* 国家重点研发计划 (批准号: 2016YFA0400400) 和国家自然科学基金 (批准号: 11675197, 11775242) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qjhr@ihep.ac.cn

照性等特点,近年来在国际上得到迅速发展,已被成功应用于高能物理探测领域.比如日本 T2K (Tokai to Kamiokande)^[12],以及欧洲 COMPASS (common muon and proton apparatus for structure and spectroscopy)^[13,14]等大型实验探测装置中.

随着 MPGD 的发展和應用,较高位置分辨率气体探测的研究成为可能.例如,在时间投影室 (time projection chamber, TPC)^[15,16]中,可以采用 MPGD 作为探测器的端盖读出端.当带电粒子穿过 TPC 漂移区时,会使气体电离并在其径迹上产生电子离子对,电子在电场的作用下向读出端漂移,经雪崩放大后由探测器接收并输出具有位置、电荷幅度和漂移时间等信息的信号,实现带电粒子三维径迹重建.气体探测器在实际工作过程中,随电磁场非均匀性、工作温度、探测器结构应力等因素变化,探测器漂移场中漂移速度、扩散系数等参量会发生变化,导致真实径迹与重建径迹产生偏差,使得分辨变差.这种情况下,建立探测器标定系统,对漂移速度、漂移路径的畸变、电离的横向扩散等参数进行标定与刻度,对于提高气体径迹探测器的测量精度十分重要.

目前常用的标定方法主要是宇宙线标定法、放射源标定法和特征物理道法^[17].但由于宇宙线计数率较低且方向具有一定的不确定性,宇宙线标定法需要搭建较大的宇宙线符合系统,并用软件对有效径迹进行筛选,精度受到一定限制;放射源标定法虽然事例率较高,但射线透射率低,若将放射源放置于探测器内部,屏蔽体和支撑架都会带来很大的影响;特征物理道法需要判选、重建特定道的物理事例才能进行在线标定,使用具有一定的局限性.除上述方法之外,另一种有效的标定方法是激光标定^[18,19],激光标定的原理主要是利用双光子电离机制.由于工作气体中会混有少量有机气体杂质成分,有机气体分子的电离能(如 C_7H_8 (8.82 eV), $C_{10}H_{14}$ (8.69 eV)) 低于 2 倍的激光光子能量 9.36 eV (266 nm 紫外激光单光子能量为 4.68 eV).激光与杂质有机气体分子发生双光子电离作用,产生可测量的原初电子,这些电子在气体径迹探测器中漂移、扩散、放大后被 MPGD 读出,重建径迹完成校正和分析漂移速度等参量,适合于流气模式工作的气体探测器.而工作气体电离能一般较高,例如: Ar (15.7 eV), CO_2 (14.4 eV), 高于激光光子能量,激光不足以使探测器内工作气体发生电离.

这种激光标定方法在国际上已应用于一些大

型对撞实验上,但受限于探测器自身精度(如 ALICE 的径迹探测器^[20],位置分辨率为 800—1100 μm),还未能实现更高精度的实验研究.随着 MPGD 的发展和更高精度位置分辨率(约为 100 μm)的提出,需要开展相关的研究工作.本文基于 GEM 探测器,研究 266 nm 波长紫外激光与气体探测器的性能,主要面向以下两个关键技术问题:

1) 气体探测器中的激光电离信号是否具有可测性,激光面积与信号输出幅度具有怎样的关系?本文对此进行了估算,并通过实验测量了 GEM 探测器采用不同尺寸读出时激光的信号大小;

2) 随着 MPGD 位置精度的提高,对于 500 mm 漂移距离,需要探测器 z 向漂移速度相对精度小于 10^{-3} ,激光光路指向位置精度是否满足需求?本文对激光的测量精度展开探讨,设计实验并测量激光光路能够实现的指向位置精度.

2 激光性能模拟计算

2.1 激光电离信号的估算

普通的激光束具有不同横向模式,称为多横模激光,其发散角较大,平行性较差,因此激光器出束模式优选为高斯分布(高斯斑为单横模光斑模式),这种模式仅有基模模式,其平行性好,发散角小,且高斯分布的光斑在气体中发生电离后,可以给出高斯形式的电荷密度分布.本实验选用高斯光斑模式激光器进行实验研究.

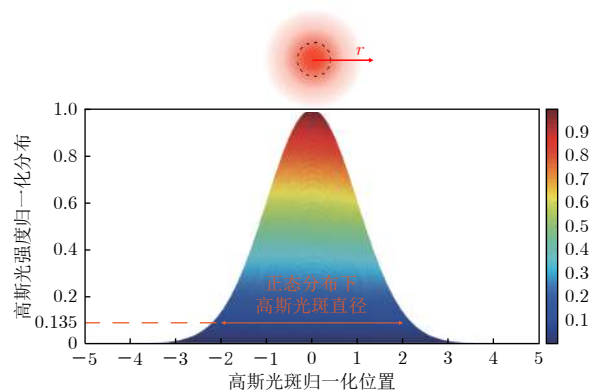


图 1 高斯光束能量分布

Fig. 1. Energy profile of the Gaussian laser beam.

标准正态分布情况下的高斯光束光斑能量分布如图 1 所示,数学上用亥姆霍兹方程的一个近轴近似解来描述高斯光束^[21].该近轴近似解高斯函数形式为

$$E(r, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(\frac{-r^2}{w^2(z)}\right) \times \exp\left[-ikz - ik\frac{r^2}{2R(z)} + i\zeta(z)\right], \quad (1)$$

式中 r 为以光轴中心为参考点的径向坐标; z 为以光轴上光波最狭窄位置为参考点的横向坐标; k 为波数, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; $E_0 = |E(0, 0)|$; $w(z)$ 为电磁场振幅降到轴向 $\frac{1}{e}$ (强度降到 $\frac{1}{e^2}$) 时的半径, $w_0 = w(0)$ 为激光束腰宽度; $R(z)$ 为光波波前曲率半径; $\zeta(z)$ 为轴对称光波的 Gouy 相移, 对高斯光束的相位有影响. (1) 式中默认忽略影响很小的含时项 $e^{i\omega t}$. 笛卡儿坐标系下可求得被称为“厄米-高斯模”的解, 其最低阶描述只含有“基模模式”的高斯光束. 高斯光斑横向平面内通过半径 r 的圆的总能量表达式为

$$P(r) = P_0 \left(1 - e^{-\frac{2r^2}{w^2}}\right), \quad (2)$$

其中 P_0 为激光单次出束总能量; w 为光斑半径, 以最大振幅处为原点, 振幅下降到原点处 $1/e$ 的地方所形成一个圆, 该圆的半径即为光斑半径. 由 (2) 式可以得

$$P(r \rightarrow \infty) = P_0, \quad (3)$$

$$P(r = 0) = 0. \quad (4)$$

激光单位面积上的点能量密度 σ 可以由 (5) 式得到:

$$\sigma = \frac{P(r)'}{2\pi r} = P_0 \frac{2}{\pi w^2} e^{-2r^2/w^2}. \quad (5)$$

因此对于直径为 5 mm 的光斑, $r = 0$ 处的能量密度是 $r = 2.5$ mm 处能量密度的 e^2 倍.

通过半径为 r 的圆的激光平均能量密度表达式为

$$\bar{\sigma}(r) = \frac{P(r)}{\pi r^2} = \frac{P_0}{\pi r^2} \left(1 - e^{-2r^2/w^2}\right). \quad (6)$$

实验中选用的激光器出束光斑直径为 5 mm, 若 5 mm 光斑内激光能量调节至 20 μJ 每脉冲, 此时光斑内的平均能量密度约为 1 $\mu\text{J}/\text{mm}^2$, 使用可调光阑选取 1 mm^2 光斑. 对于一般的工作气体, 1—2 $\mu\text{J}/\text{mm}^2$ 的波长 266 nm 激光所产生的电离至少相当于 1 个最小电离粒子 (1MIP)^[18], 约 10 e^-/mm . 选取 2 mm 的读出条进行信号读出, 当探测器增益为 5000, 前放增益为 10 mV/fC 时, 2 mm 读出条所收集的总电荷量约 16 fC, 经电荷灵敏前置放大器脉冲幅度约为 160 mV; 6 mm 读出条输出幅度约为 480 mV. 若考虑光阑与光斑中

心对位误差、激光电离粒子数的涨落、探测器和电子学本征分辨、激光能量输出波动性 (紫外光基频均方根 RMS $\pm 2\%$ @1064 nm) 以及激光在工作气体中传播时的损失等因素, 实际测量到的激光电离信号幅度会存在一定差异.

3 激光测量精度的估算

激光输出光束具有方向性好的特性, 在实际工作过程中, 随着工作晶体温度升高, 激光束在工作过程中可能会存在微小且缓慢的光束漂移, 这会使激光产生一定程度的指向误差^[22], 激光的指向误差会给探测器的精度引入一定的影响, 需要对所使用激光的指向误差进行评估. 激光器出厂参量中的指向稳定性往往指长时间测量 (连续多小时) 测得的光束漂移量. 实验所用激光器选型为 Litron Lasers 公司的 Nano SG 型号 Nd:YAG 激光器, 激光指向误差 $\Delta\theta < 70 \mu\text{rad}$. 激光束的漂移主要由工作过程中晶体温度的变化引起的, 激光水冷系统可以保证晶体温度随时间缓慢变化, 因此激光器预热稳定后, 短时间内光束指向稳定性变化远小于 70 μrad , 30 min 内光束指向稳定性基本可以保持不变. 另外, 影响激光测量精度的参数是调光时由于工装精度、调光工艺等因素引入的系统误差. 激光光路的调节主要通过平行光管^[23]实现. 图 2 为气体探测器内激光光路调光示意图. 其中 s1 上放置平行光管, s2 为安装基准反射镜面, s3 为调光系统基准面, T 为基准面透镜, s4 为可精细微调反射镜.

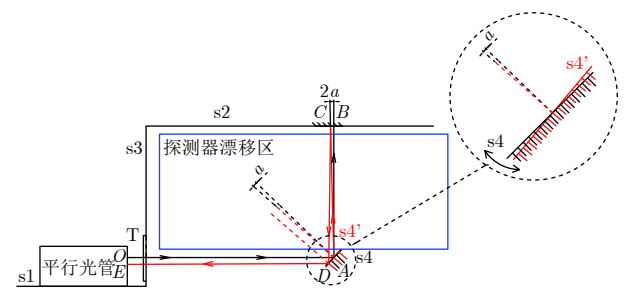


图 2 气体探测器内激光光路调光示意图
Fig. 2. Diagram of laser beam track in gas detector.

调光中所有基准由 s3 系统基准面取得. s1, s2 均以 s3 作为基准, 平行光管与系统基准 s3 进行对位调整, 激光经平行光管光线由 O 点经透镜 T 后入射到 45° 反射镜面 s4 上, 光被反射后, 被 s2 上放置的平面反光镜 (B 点) 反射. 若 s4 为理想状态, 光经过 $O \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow O$ 后回到平行光管

内, 在平行光管内看到的由基准透镜 T 反射光线和镜面 s4 反射光线照出的物像“十字叉丝”完全重合. 但在实际调光过程中, 如果反射镜 s4 的角度偏离理想角度 (如偏离角度 α), 则光线实际路径为 $O \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$, 平行光管的精度可以精确到角秒 (本实验中, 平行光管精度为 $5''$, $1'' = 1/360^\circ$), 光学视野内观察到 OE 在微米量级 (图 2 仅为示意图). 通过精细调节 s4 使得反射光路与入射光路实现重合.

激光测量的角精度 φ 计算式为

$$\varphi \leq \sqrt{(\Delta\theta)^2 + (2\alpha)^2}. \quad (7)$$

在小型原型机设计中, 激光在工作气体内传输距离为 AB . 激光测量角精度受激光指向误差 $\Delta\theta$ 和调光误差 2α 影响, 其中 $\Delta\theta$ 在激光器预热稳定后, 短时间内光束指向稳定性基本保持不变^[22]. 因此需要通过实验设计激光光路系统, 采用高精度 (平行光管精度 $\leq 5''$) 的平行光管完成精细调光, 保证调光误差在允许误差范围内, 这样激光测量的角精度主要由光路的调光精度来决定.

实验上电子漂移速度通过不同漂移距离上位置信息与对应的漂移时间来线性拟合. 实际测量中, 漂移时间可以实现小于纳秒级高精度测量, 漂

移距离的位置信息点则由调光精度决定. 通过模拟不同调光精度 ($5' - 60'$) 引入的位移差, 模拟计算激光调光精度与漂移速度相对精度的关系如图 3 所示. 在高精度的 TPC 探测器中, 对漂移速度相对精度要求需达到 10^{-3} 以上, 此时对应调光精度需要小于 $8'$.

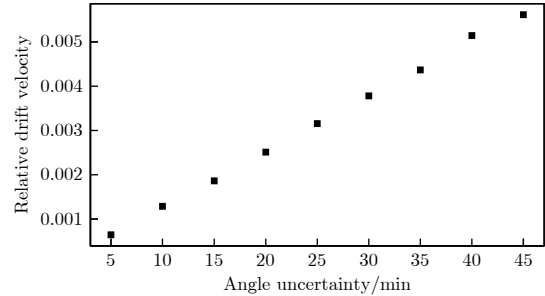


图 3 激光调光精度与漂移速度相对精度的关系
Fig. 3. Angle uncertainty of laser beam with relative accuracy of drift velocity.

4 实验装置

为测试激光性能及激光在标定过程中产生信号情况, 设计制作一个小型气体探测器, 其工作示意图如图 4 所示.

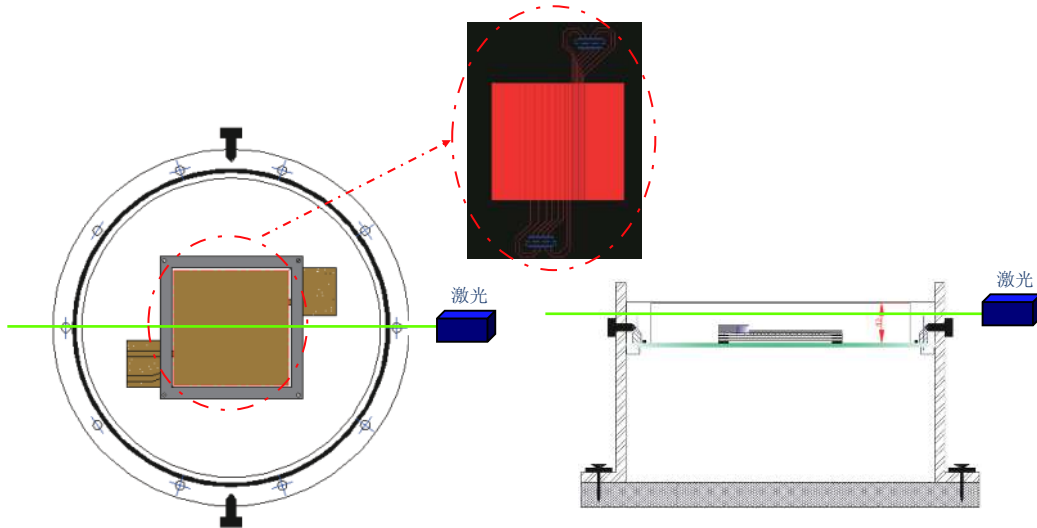


图 4 激光性能测试探测器模块装置示意图

Fig. 4. Diagram of performance test detector module with laser system.

采用镀增透膜石英窗 (透过率 $> 99\%$ @266 nm) 作为激光入射侧窗, 有效面积为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 三级级联 GEM 作为读出探测器. 读出条结构如图 4 红色圈中所示. 设计激光垂直入射读出条, 其中 8 根读出条宽均为 1 mm, 读出条连接 Samtec

公司高密低噪声读出头; 另外一组共 4 种条宽度设计, 分别为 2, 4, 6 和 8 mm, 条间隙均为 0.1 mm. 较宽读出条的设计为保证一定量电荷的收集, 相同宽度的读出条用于保证信号的存在与一致性, 不同宽度读出条用于信号大小的比较. 探测器工作气体

选为 ($\text{Ar}/\text{CO}_2 = 70/30$), 三层 GEM 膜上压差均为 390 V, 漂移区、传输区 1、传输区 2、感应区场强分别为 500, 1500, 1500 和 1500 V/cm.

在进行 ^{55}Fe 增益刻度之前, 需要首先完成电子学标定, 由脉冲发生器产生幅度为 U , 宽度为 15 ms, 上升时间为 5 ns, 下降时间为 5 ns 的方波信号, 经过 2 pF 的标准电容 C , 输入到前置放大器输入端,

放大信号经过成形放大后由多道分析器采集. 通过改变脉冲发生器输入的方波信号幅度 U (对应线性改变输入电容的电荷量 Q), 由 $Q = N_e e$ 得到电子数 N_e 与多道分析器通道数 (C_H) 的关系如图 5(a) 所示, 根据电子数与通道数线性拟合结果为

$$N_e = 786.12C_H - 26057. \quad (8)$$

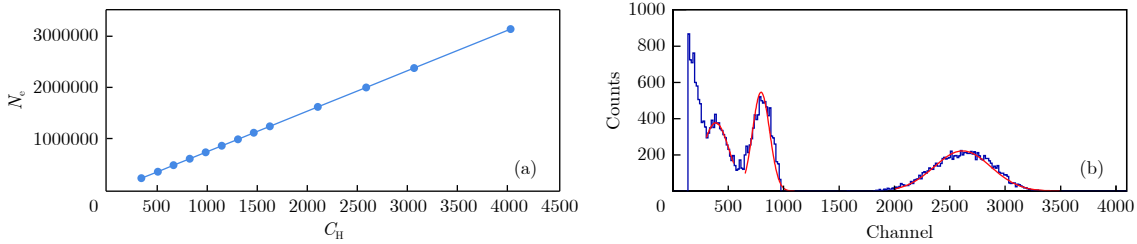


图 5 多道能量刻度曲线 (a) 和 ^{55}Fe /激光源 (266 nm) 能谱图 (b)

Fig. 5. Calibration curves of multiple channel energy (a) and energy spectra of ^{55}Fe /laser (266 nm) sources (b).

使用 ^{55}Fe (5.9 keV) 放射源和一定能量激光源对探测器进行增益刻度, 用多道测量得到 ^{55}Fe 能谱和激光能谱如图 5(b) 所示, 能谱图中左边为 ^{55}Fe 放射源的逃逸峰和全能峰, 图中最右边为激光能量谱. X 射线能量为 5.9 keV 在工作气体为 Ar/CO_2 (70/30) 中原初电子数 N_p 约为 210; 激光对应的原初电子数 N_p 约为 720. 由铁源能谱全能峰峰位计算得到增益约为 2855; 激光能谱计算得到的增益约为 2818, 二者结果基本吻合. 通过调整探测器工作高压, 可以设定实验中需要的特定增益.

实验中激光器波长为 266 nm, 出束频率为 10 Hz, 单脉冲能量为 15 mJ, 出束模式为高斯分布. 图 6 为整个实验系统图, 激光由激光器出射后分别经零级波片、分色镜、1 号分束镜、2 号分束镜、可移动光阑进入探测器入射窗, 经探测器后由后方入射窗射出. 由于 Nd:YAG 激光器是由灯泵发光使其晶体受激发射的特定频率 1064 nm 激光,

后经谐振腔、二倍频、四倍频后得到 266 nm 波段激光, 光路中采用零级波片使出束激光完全 P 偏振; 使用分色镜, 将残余的 532 nm 成分绿光滤除. 光阑为了调节激光光束直径大小. 信号读出前端采用中国科学院高能物理研究所自主研发的板级电荷灵敏前置放大器, 前放增益 10 mV/fC, 成形时间 600 ns, 每块板有 8 个信号通道. 主放采用 ORTEC 572A, 成形时间 0.5 μs . 信号最后由多道分析器 ORTEC ASPES927 采集.

5 实验测量与分析

5.1 激光输出能量的测试

首先对激光器进行能量刻度. 激光器开机预热 30 min, 可保证其激光输出的稳定性. 激光能量和频率可以进行控制. 其可调频率分别为 10, 5, 2, 1 Hz. 激光能量通过一个可调旋钮调节 0—15 mJ 的能量,

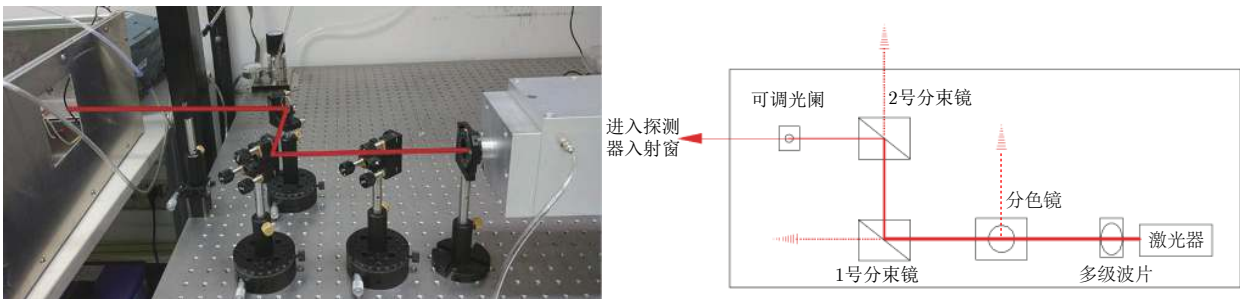


图 6 激光性能测试实验系统实物图和示意图

Fig. 6. Experiment photo and diagram of performance test with laser device.

能量监测采用 Ophir-Spiricon 公司激光能量计, 探头型号 PE50-DIF-C. 图 7 为激光能量随旋钮刻度变化的能量刻度图, 旋钮低于刻度 7 时, 激光能量输出波动较大 (能量输出 RMS > 2%), 因此激光器需要运行在高于此刻度值的条件下. 实验发现高重复频率下 (10 Hz) 的激光性能更加稳定. 为保证激光器在一个相对稳定的条件下工作, 选择将激光器设置在频率为 10 Hz, 旋钮刻度为 10 的条件下工作. 对于较大激光能量, 实验中设计特定的光路, 通过不同透反比的分光镜片实现紫外光能量衰减.

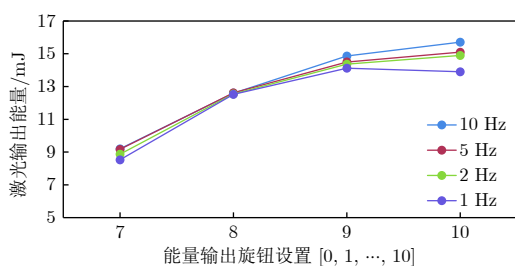


图 7 激光输出能量刻度图

Fig. 7. Calibration diagram of laser output energy.

5.2 激光电离信号随光斑面积的变化关系

为测量激光电离信号大小及信号与光斑面积的关系, 设计实验装置如图 6 所示, 激光器开机预热 30 min 后, 出束光斑直径约为 5 mm, 出束总能量约为 15 mJ, 经零级玻片、分色镜后, 激光能量约为 12 mJ, 经透过率 10% 的 1 号分束镜后, 能量约为 1200 μJ , 再经透过率 15% 的 2 号分束镜后, 能量约为 180 μJ . 改变可调光阑光圈大小来调节能量计探头接收到的光斑面积, 为保证光斑面积具有较大范围的可调性, 在可调光阑之前加入 3 倍扩束镜 (可拆卸), 激光输出控制端保持旋钮刻度不变. 实验测得激光束扩束前总能量为 173 μJ , 调节光圈直径分别为 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0,

4.5, 5.0 mm. 图 8(a) 为入射光斑激光电离信号幅度随光斑面积变化关系曲线. 图 8(a) 红色点为增益 3000 时激光电离信号的测量值, 红色虚线为拟合曲线, 结果表明信号随光斑面积增大而逐渐趋于饱和, 其原因主要是激光光斑为类高斯分布 (主光斑直径 < 5 mm), 随光阑直径的增大, 通过光阑的光斑面积也相应增大, 因为光束边缘能量相对中间区域下降快, 所以信号大小增加越来越缓慢; 当光阑直径大于原光束直径时, 保持入射激光能量不变时输出信号将趋于饱和. 图 8(a) 蓝色点为增益 5000 时激光电离信号测量值, 由于光斑依然是高斯分布, 该曲线同样存在随光阑面积增大, 信号增加逐渐缓慢且最终输出信号趋于饱和的趋势, 拟合得到描述信号逐渐增大趋势的蓝色曲线. 结果表明: 激光束扩束前能量为 170 μJ , 平均能量密度约为 1 $\mu\text{J}/\text{mm}^2$, 探测器增益 5000, 选取激光光斑面积 1 mm^2 , 采用 2 mm 读出条时, 前放信号幅度约 140 mV; 采用 6 mm 读出条时, 前放信号幅度约 400 mV. 将 2 mm 读出条信号结果与 2.1 节中估算值进行对比, 发现稍小于按激光平均能量密度 1 $\mu\text{J}/\text{mm}^2$ 理论值估算得到的信号幅度 160 mV. 主要原因是: 扩束镜会造成一定的能量损失, 实现提高能量密度均匀性同时降低了光斑内的能量密度, 从而降低输出信号幅度, 同时 2.1 节中提到的激光电离信号的涨落、光斑中心对位偏差、探测器及电子学本征分辨等因素均会对信号幅度产生一定的影响. 图 8(b) 为测试过程中示波器获取的一个典型激光电离信号, 电荷灵敏前放输出幅度约 280 mV.

5.3 激光测量精度测试

激光指向误差实验研究中, 采用平行光管进行光路调光, 该平行光管测量精度为 5". 测量装置如图 9(a) 所示. 由于波长 266 nm 激光束为不可见

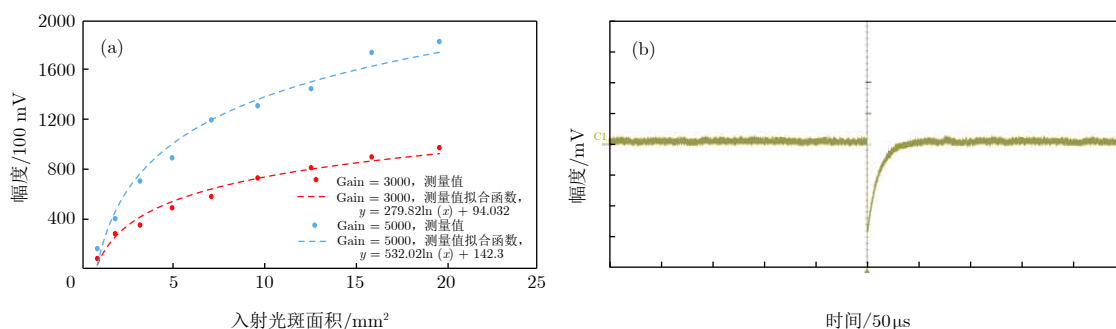


图 8 激光电离信号 (a) 激光电离信号随光斑面积变化; (b) 典型的激光电离信号

Fig. 8. Signal of laser: (a) Variation of laser signals with plot area; (b) typical signal of laser beam.

光, 采用透反射指标性能相同的可见波长 532 nm 紫外光束进行调试 (两种紫外波长激光在工作气体和空气中传输和反射性能无明显区别). 初始光出射平行光管后, 入射在 45°反射镜上, 反射后经过

约 400 mm 距离入射在顶端基准反射镜附近, 基准反射镜直径为 12 mm, 反射镜由基准端面参考放置, 其中基准反射镜加工精度 $\leq 1''$, 基准端面机械精加工精度 $< 10 \mu\text{m}$.

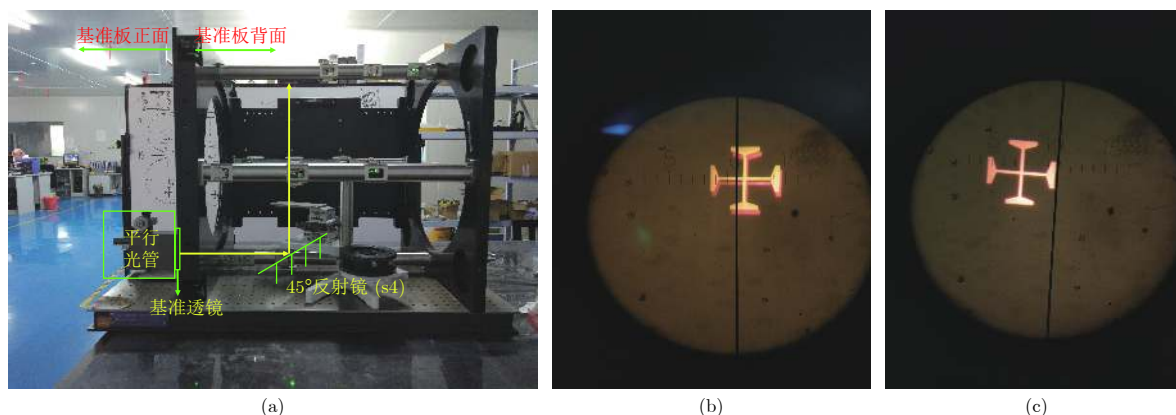


图 9 激光调光系统装置图与调光示意图 (a) 调光系统; (b) 45°反射镜 s4 粗调时平行光管内图像; (c) 45°反射镜细调后平行光管内反射图像

Fig. 9. Installation photos of laser dimming system and diagram of dimming: (a) Dimming system; (b) image in 45° collimator when s4 is adjusted rough; (c) image in 45° collimator when s4 is adjusted fine).

实验调光时, 首先调试平行光管与基准端面板的位置, 调试方法为在基准面正面放置基准透镜、背面放置反射镜, 调整平行光管位置, 使得基准透镜反射光和反射镜反射光光路重合. 然后拆掉反射镜, 使光经平行光管和基准透镜后射到后方 45°反射镜上, 通过调节光路上 45°反射镜角度来调整光路. 粗调 45°反射镜 s4 时, 在平行光管中观察到的基准图像和反射图像如图 9(b) 所示, 图 9(b) 为光路粗调时观察到的未完全重合图像, 图 9(c) 显示光路细调后在平行光管内观察到反射图像和基准图像完全重合的结果.

如第 3 节所讨论, 实际测量中, 由于激光指向稳定性是随时间和温度缓慢变化的参数, 短时间内激光指向位置不产生明显变化, 如在 10—20 min 内完成测试, 由激光自身指向稳定性引入的误差可忽略不计; 结合目前的光学工艺及允许的调光误差, 实验上通过调试平行光管最终实现调光精度小于 5', 由此引入的 z 向偏差最大可以达到约 0.33 mm, z 向漂移速度的测量相对误差在 6.4×10^{-4} . 标定实验仅需要在短时间内完成, 因此紫外激光调试光路指向位置稳定性可以满足 MPGD 的位置标定设计需求.

6 结 论

本文主要讨论 MPGD 中, 激光可测信号大小

以及激光指向位置精度两个关键技术问题. 通过模拟计算, 对气体探测器与紫外激光电离信号的大小进行了评估, 分析了信号大小和波形等参量的关系, 以及激光自身指向波动和调光精度 (约 5') 带来的指向位置影响. 设计相应的实验方案, 选用 Nano SG 型号 266 nm 激光器, GEM 探测器在工作气体 Ar/CO₂ (70/30) 中, 完成了对不同激光有效面积大小和输出信号的测量, 并将实验结果与模拟结果进行了对比分析. 进而设计和研制了紫外激光调光系统, 实验测量了紫外光调光偏差, 分析了激光指向误差范围, 结果表明紫外激光可以设计满足 MPGD 的物理需求, 该研究为本实验组 MPGD 与紫外激光标定系统实验设计提供了主要的设计参考.

非常感谢清华大学李玉兰教授, 中国科学院高能物理研究所李金研究员以及清华大学蔡一鸣博士在实验过程中的探讨.

参考文献

- [1] Leonard A 2015 *Ph. D. Dissertation* (Bruxelles: Université Libre de Bruxelles)
- [2] Delbart A, de Oliveira R, Derre J, Giomataris Y, Jeanneau F, Papadopoulos Y, Rebourgeard Ph 2001 *Nucl. Instrum. Methods A* **461** 84
- [3] Zibell A 2014 *J. Instrum.* **9** C08013
- [4] Sauli F 2002 *Nucl. Instrum. Methods A* **477** 1

- [5] Sauli F 1997 *Nucl. Instrum. Methods A* **386** 531
- [6] Chernyshova M, Czarski T, Dominik W, Jakubowska K, Rzakiewicz J, Scholz M, Pozniak K, Kasprowicz G, Zabolotny W 2014 *J. Instrum.* **9** C03003
- [7] Giomataris I, Oliveira R D, Andriamonje S, Aune S, Charpak G, Colas P, Fanourakis G, Ferrer E, Giganon A, Rebourgeard Ph, Salin P 2006 *Nucl. Instrum. Methods A* **560** 405
- [8] Giomataris, Y 1998 *Nucl. Instrum. Methods A* **419** 239
- [9] Colas P, Giomataris I, Lepeltier V 2004 *Nucl. Instrum. Methods A* **535** 226
- [10] The LHCb collaboration 2015 *Int. J. Mod. Phys. A* **30** 1530022
- [11] Balla A, Bencivenni G, Branchini P, Ciambone P, Czerwinski E, de Lucia E, Cicco A, Di Domenici D, Felici G, Morello G 2017 *Nucl. Instrum. Methods A* **845** 266
- [12] Dørheim S 2012 *J. Instrum.* **7** C03011
- [13] Adinoff B, Kramer G L, Petty F 2007 *Nucl. Instrum. Methods A* **577** 455
- [14] Ketzner B, Weitzel Q, Paul S, Sauli F, Ropelewski L 2004 *Nucl. Instrum. Methods A* **535** 314
- [15] Hilke H J 2010 *Rep. Prog. Phys.* **73** 116201
- [16] Attie D 2009 *Nucl. Instrum. Methods A* **598** 89
- [17] Kane S, May J, Miyamoto J, Shipsey I 2003 *Nucl. Instrum. Methods A* **505** 215
- [18] Hilke H J 1986 *Nucl. Instrum. Methods A* **252** 169
- [19] Renault G, Nielsen B S, Westergaard J, Gaardhoje J J 2005 *Czech. J. Phys.* **55** 1671
- [20] Antończyk D, Baechler J, Bramm R, Campagnolo R, Christiansen P, Frankenfeld U, Gonzalez Gutierrez C, Ivanov M, Kowalski M, Musa L, Przybyla A 2006 *Nucl. Instrum. Methods A* **565** 551
- [21] Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_beam [2018-08-30]
- [22] Qi J G, Li C J 2007 *Physics Experimentation* **27** 34 (in Chinese) [祁金刚, 李春杰 2007 *物理实验* **27** 34]
- [23] Wang X H, Wang S Y, Zhou H, Zhang Y B 2006 *Chinese Journal of Scientific Instrument* **27** 980 (in Chinese) [王小胡, 王守印, 周虎, 张余彬 2006 *仪器仪表学报* **27** 980]

Signal and pointing accuracy of ultraviolet laser in micro-pattern gaseous detector*

Wang Hai-Yun¹⁾²⁾³⁾ Qi Hui-Rong^{1)2)†} Liu Ling¹⁾²⁾⁴⁾ Yuan Zhi-Yang¹⁾²⁾³⁾
Zhang Yu-Lian¹⁾²⁾⁴⁾ Wen Zhi-Wen¹⁾²⁾⁴⁾ Zhang Jian¹⁾²⁾
Chen Yuan-Bo¹⁾²⁾ Ouyang Qun¹⁾²⁾

1) (*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

2) (*State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

4) (*School of Nuclear Science and Technology, University of Lanzhou, Lanzhou 730000, China*)

(Received 29 August 2018; revised manuscript received 18 November 2018)

Abstract

In the study of the gas detectors, it is an important calibration method to use the ultraviolet (UV) laser with two-photon ionization mechanism for producing ionized signal. In the last decades, micro pattern gas detector, especially gaseous electron multiplier and micromesh gaseous detector, has been widely used in high energy experiments. These kinds of gaseous detectors have the advantages of higher ion backflow suppression ability, smaller $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ effect and good radiation resistance under the relatively higher count rate environment. To obtain a higher spatial resolution with a UV laser calibration system in gaseous electron multiplier detector, two critical technical issues remain to be resolved: the measurability of the laser signal and the accuracy of the laser beam position. In this paper, the studies in simulation and experiment are conducted to discuss these two critical questions. In the simulation section, the simulation results provide an estimation of signal in the gaseous electron multiplier detector with UV laser of 266 nm wavelength in the mixture working gases of Ar/CO₂ (70/30), and give an evaluation of the laser pointing accuracy and the possible relative error of the electron drift velocity. In the experiment section, a UV laser calibration prototype is designed and developed. A pulsed laser of 266 nm wavelength is used as a signal source, which has a Gaussian-like cross section with a frequency of 10 Hz. The experimental results indicate that the signal of the UV laser in a triple gaseous electron multiplier detector reaches 400 mV for a readout strip width of 6 mm, a gain of detector of 5000, and a gain of amplifier of 10 mV/fC. For the calibration laser, the angle accuracy is discussed and tested. The angle uncertainty of the laser can be kept under 5', and the accuracy of the drift velocity can reach 6.4×10^{-4} with a shift of 0.33 mm in the z direction when the laser beam transmits a distance of 400 mm in the gas chamber. All of these results show that the laser beam specific parameters are the main reference for designing the prototype detector. According to the optimal parameters, a gaseous prototype detector will be tested in the next study.

Keywords: micro pattern gaseous detector, ultraviolet laser, two-photon ionization

PACS: 29.40.Cs, 29.40.Gx

DOI: 10.7498/aps.68.20181613

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFA0400400) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11675197, 11775242).

† Corresponding author. E-mail: qilr@ihep.ac.cn