

光电探测器尺度效应对能见度测量不确定度的影响

肖韶荣^{1,2,3*}, 刘博涵^{1,2}, 石刘峰³, 黄彪³

¹激光与红外系统集成技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266237;

²山东大学光学高等研究中心, 山东 青岛 266237;

³南京信息工程大学物理与光电工程学院, 江苏 南京 210044

摘要 为获得抑制能见度测量不确定度的方法,根据光电二极管尺度效应对载流子复合的影响,研究了光电二极管光电转换响应度在敏感面上的分布,通过测定光电转换均匀性,建立了响应度的分布模型,其分布近似为抛物面。两种不同光电二极管的测量结果表明,光电二极管响应度均匀性在敏感面的中心区域最好,不同型号的光电二极管,其尺度效应影响程度差异较大。得出了响应度的分布对能见度测量不确定度的影响规律,光斑在中心附近区域内漂移时影响最小,光斑漂移范围越大对不确定度贡献越大,光电二极管的尺度效应是能见度探测系统不确定度的主要因素之一。采用光斑跟踪技术,使入射光斑中心保持在光电二极管敏感面上的位置在小区域内,可有效控制尺度效应的影响。

关键词 测量; 光电探测器; 尺度效应; 光电响应度; 能见度测量; 不确定度

中图分类号 P415.3+3; TN364+.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1204001

1 引言

随着大气环境的变化和现代交通的发展,人们对大气能见度及其测量日益关注,甚至把它作为空气污染程度的指标之一^[1-3]。能见度值的测量不仅被用于气象部门的天气预报,还被广泛用于航空、航海、高速公路、军事以及环境监测^[4-5]等领域。在能见度观测中,仪器测量方法已取代人工观测,目前比较成熟的能见度测量仪器主要有透射式和散射式两种^[6-7]。为了充分利用光信号能量,这两种能见度测量仪器一般都选择敏感面积较大的光电探测器。最常用的光电探测器是 PIN 光电二极管,它是能见度测量系统信号获取的源头,其性能直接影响着能见度测量的精度和动态测量范围等性能指标。在能见度测量系统的设计中,人们特别注重光电二极管的光谱响应特性、信噪比、线性度和响应时间等^[8]。以往,人们认为对于给定波长的探测光束,光电二极管最重要的参数是光电转换效率。近年来人们开始关注光电二极管响应特性在能见度测量中的应用,例

如,光电二极管动态范围对能见度仪量程的影响以及扩展方法等^[9-10]。就光电探测器而言,多年来,已经有很多人致力于其动态范围^[11]、光谱响应特性^[12-13]、光电转换系数^[14-15]和量子效率^[16]等的研究。但是,光电二极管敏感面的尺度效应对光电转换响应特性的影响未引起人们的重视。本课题组根据能见度测量的特点,研究了光电二极管尺度效应对透射式能见度测量不确定度的影响,并提出了能见度仪设计过程中应采取的相应措施。

2 透射式能见度测量原理及不确定度分析

1924 年,柯西米德(Koschmieder)建立了大气能见度测量的基本理论^[17],从此以后人们开始利用仪器测量能见度。目前,能见度的主要测量方法有透射式、前向散射式、后向散射式及数字摄像式等,这些测量方法的本质都是测定大气的消光系数^[18-19],再根据柯西米德定律计算能见度。图 1 是透射式能见度仪的测量原理图。发射器发射光强为

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-04-15; 录用日期: 2021-05-13

基金项目: 公益性(气象)行业专项(GYHY201203067)、山东省重点研发计划项目(2020CXGC01070)

*E-mail: sr.xiao@163.com

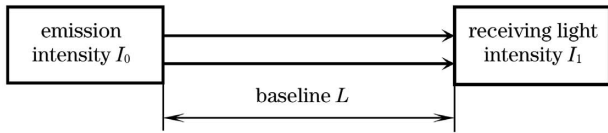


图 1 透射式能见度仪的光学原理

Fig. 1 Optical principle of transmission visibility meter

I_0 的平行光, 光束传输一段距离 L 后, 被接收器接收的光强为 I_1 , 计算接收器检测到的接收光强与发射光强的比值求得消光系数, 然后根据消光系数反演大气能见度值。

对于气象能见度, 视觉阈值 $\epsilon = 0.02$, 能见度 V 为^[5]

$$V = \frac{-\ln(0.02)}{\beta} = \frac{3.912}{\beta}, \quad (1)$$

式中: β 为大气消光系数。

根据 Bouguer-Lambert 定律可得

$$\beta = \frac{1}{L} \ln(I_0/I_1) = \frac{1}{L} (\ln I_0 - \ln I_1), \quad (2)$$

$$\Delta\beta = \frac{1}{L} \left(\frac{\Delta I_0}{I_0} - \frac{\Delta I_1}{I_1} \right), \quad (3)$$

式中: $\Delta\beta$ 是消光系数的误差; ΔI_0 是发射光强 I_0 的测量误差; ΔI_1 是接收光强 I_1 的测量误差, (3) 式忽略了基线变化的影响。(3) 式等号右边第一项是发射光强的相对误差, 第二项是探测系统接收光强的相对误差。对(1)式两边微分, 可以得到能见度测量的相对误差与消光系数相对误差之间的关系为 $\frac{|\Delta V|}{V} = \frac{|\Delta\beta|}{\beta}$, 其中 ΔV 是能见度的误差。由此可知, 当光强测量的相对误差一定时, 大气消光系数越小, 能见度测量的相对误差就越大。例如, 晴好天气时的能见度高, 消光系数小, 能见度测量的相对误差较大。当能见度 V 为 10 km 时, 根据(1)式, 大气消光系数 β 为 $3.912 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ 。若要求能见度测量的相对误差为 10%, 则 $\Delta\beta = 3.912 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$, 在基线为 $L = 70 \text{ m}$ 时, 由式(3)得

$$\left| \frac{\Delta I_0}{I_0} \right| + \left| \frac{\Delta I_1}{I_1} \right| = L \times 3.912 \times 10^{-5} = 2.738 \times 10^{-3}. \quad (4)$$

在采取严格的光强稳定措施后, $\left| \frac{\Delta I_0}{I_0} \right| \ll \left| \frac{\Delta I_1}{I_1} \right|$, 因此(3)、(4)式分别可改写为

$$|\Delta\beta| \approx \frac{1}{L} \left| \frac{\Delta I_1}{I_1} \right|, \quad (5)$$

$$\left| \frac{\Delta I_1}{I_1} \right| \approx 2.738 \times 10^{-3}. \quad (6)$$

由(6)式可知, 若能见度测量允许的相对误差在 10% 以内, 则接收器光强测量的相对不确定度必须精确到 2.738%。光接收器的测量不确定度是制约能见度测量不确定度的主要因素之一。根据世界气象组织多年来对分布在世界各地的透射式能见度仪测量误差的研究, 测量误差的主要来源可总结如下^[5]:

- a) 发射机和接收机的对准不正确;
- b) 发射/接收装置的刚度和稳定性不足(地面冻融、热应力);
- c) 灯具老化和对中不当;
- d) 校准误差(能见度太低或在影响消光系数的不稳定条件下进行了校准);
- e) 系统电子学的不稳定性;
- f) 消光系数作为受电磁场干扰的小电流信号的远程传输(特别是在机场), 此时最好将信号数字化;
- g) 太阳升起或落下引起的干扰, 以及传送器的初始方向不良;
- h) 大气污染了光学系统;
- i) 测试点的大气条件(阵雨、强风、雪会导致消光系数的读数不具有代表性, 雪、冰晶、雨等会使测试条件偏离柯西米德定律)。

其中: a)、b) 和 i) 三者的共同点是探测光束在光电探测器敏感面上的光斑漂移; e) 和 f) 主要是电子学噪声和采样量化误差; g) 是环境光干扰, 可以通过对探测光束采取调制来加以抑制; c)、d) 和 h) 通过维护可以得到较好的改善。光接收器测量的不确定度主要来自光电探测器、前置放大器噪声、信号调理电路噪声以及模/数转换器的量化分辨率等, 采用 16 bit 以上分辨率的模/数转换器即可满足采样量化误差的要求。为了保证发射机和接收机的对准, 常将探测光束聚焦, 使光斑在探测器敏感面内的中心区域附近漂移。

3 光电响应效应分析

为了研究光电探测器对能见度测量的影响, 本文暂不考虑前置放大器噪声、信号调理电路噪声和模/数转换器的量化分辨率等的影响, 即仅考虑光束光斑漂移和光电二极管的性能缺陷对能见度测量不确定度的贡献。

入射到光电二极管的光子进入到耗尽层, 半导体吸收光子产生电子-空穴对, 耗尽区内的电子-空穴对被结区电场分开, 在外电路形成电流。由于缺陷等原因, 光子产生的电子-空穴有一部分复合, 降

低了光的利用率。考虑到电子-空穴的复合后,光电二极管的有效量子效率 η 为

$$\eta = \frac{I_{ph}}{q\Phi_\lambda}, \quad (7)$$

式中: I_{ph} 为光生电流; q 为电子电荷量; Φ_λ 是波长为 λ 的光通量。对于波长为 λ 的光,光电器件的光谱响应度 R_λ 为

$$R_\lambda = \frac{I_{ph}}{P_\lambda} = \frac{\eta q \lambda}{hc}, \quad (8)$$

式中: h 为普朗克常数; c 是真空中光速; P_λ 是入射光功率。

假定波长为 λ 的光的辐射照度分布为

$$I_{ph} = \int \frac{\eta(x, y; x', y') q \lambda}{hc} \{1 - \exp[\alpha_\lambda(x, y; x', y') d]\} E_\lambda(x, y; x', y') ds'. \quad (10)$$

(x', y') 为点 (x, y) 附近光照区域的坐标。由(10)式可以看出,在同样的光照情况下,光电二极管工作区域的不均匀将直接导致光生电流的不同。所以,在给定的光照情况下,入射光投射在光电二极管敏感面不同区域所产生的光生电流也不同,从而导致检测到的入射光的光强存在一定的不确定性。令

$$R_\lambda(x, y) = \frac{q\lambda}{hc} \eta(x, y) \{1 - \exp[\alpha_\lambda(x, y) d]\}, \quad (11)$$

则有

$$I_{ph} = \int R_\lambda(x, y; x', y') E_\lambda(x, y; x', y') ds'. \quad (12)$$

假定光照度均匀分布,则(12)式可以改写为

$$I_{ph} = E_\lambda \int R_\lambda(x, y; x', y') ds'. \quad (13)$$

若光斑投射在光电二极管敏感面上的面积足够小,则在光斑范围内,光电转换响应度 $R(x, y)$ 可视为均匀,则(12)式所示的光生电流公式可以改写为 $I_{ph} = R_\lambda(x, y) \int E_\lambda(x, y; x', y') ds'$ 。

由(9)式得

$$I_{ph} = R_\lambda(x, y) P_\lambda, \quad (14)$$

由(14)可知 $R_\lambda(x, y)$ 即为光电二极管的响应度。在目前的技术水平和工艺条件下,光电二极管材料自身的不均匀性、生产工艺的影响可以忽略,因此,吸收系数 α 分布的不均匀性可以忽略不计。由(11)式可知,光电二极管响应度的不均匀性主要由量子效率 $\eta(x, y)$ 决定。由于光电二极管工作区域(即敏感区)的尺寸总是有限大小,而敏感区的边缘是电

$E_\lambda(x, y)$, 则入射光功率 P_λ 为

$$P_\lambda = \int E_\lambda(x, y) ds. \quad (9)$$

严格地说,工作面积一定的光电二极管,由于材料结构缺陷、应力分布等原因,量子效率存在一定的不均匀性,因此,量子效率应该记为 $\eta(x, y)$ 。光子在进入耗尽层之前必须经过一个厚度为 d 的半导体掺杂区,该半导体层对入射光子存在一定的吸收。吸收系数 α 的均匀性直接影响着光电二极管光电转换特性的均匀性。

设光斑投射在光电二极管敏感面上点 (x, y) 处的小区域内,则光生电流可以表示为

子-空穴复合中心,到复合中心距离不同的区域,复合率不同,即量子效率 $\eta(x, y)$ 不同。敏感区的中心离边缘最远,此处的电子-空穴复合率最小,量子效率 $\eta(x, y)$ 最高。

如果光照度均匀分布,且覆盖整个敏感面,则(13)式所示的积分是对探测器的整个敏感面进行的,对于确定的探测器而言,这个积分是由探测器内部性能决定的一个常数。这意味着,如果均匀分布的光斑的照度值不变,探测器敏感面在此光斑内移动时,其输出电流就不变。亦即,均匀分布的光斑覆盖探测器敏感面时,光斑漂移对测量不确定度的贡献可以不计。

令光电二极管工作在零偏置模式下,其响应度的线性度较好,暗电流较小。低噪声前置放大器的输出电压幅值大小为 U_{out} , 即

$$U_{out} = R_F I_{ph} =$$

$$R_F \int R_\lambda(x, y; x', y') E_\lambda(x, y; x', y') ds', \quad (15)$$

式中: R_F 是低噪声前置放大器的反馈电阻,实验中用标称值 $100 \text{ k}\Omega \pm 1\%$ 代替。该电阻为低温漂电阻,其温漂为 $75 \times 10^{-6} \Omega/\text{C}$ 。室内温度设定在 24 C , 电阻温漂约为 15Ω , 温漂的影响可以忽略不计。

由于光束光斑的面积较小,在光斑区域内,光电转换响应度 $R(x, y)$ 可视为均匀,则(15)式可写为

$$U_{out} = R_F I_{ph} = R_F R_\lambda(x, y) \int E_\lambda(x, y; x', y') ds'. \quad (16)$$

(16)式积分所得结果就是光束功率,因此有

$$U_{out} = R_F I_{ph} = R_F R_\lambda(x, y) P_\lambda. \quad (17)$$

(17)式表明:光强不变时,光斑位于光电二极管的不同位置处,测得的电压可能不同,根据测得的电压可以推知响应度的分布。

根据以上分析和(12)式可知,探测器的输出电流与光斑分布、探测器响应的均匀性及其相对位移有关。当光斑覆盖探测器敏感面时,如果光斑分布和探测器响应都不均匀,则探测器输出电流不但与覆盖在探测器敏感面上的光斑总功率及其分布有关,还与光斑和探测器敏感面间的相对位移有关,即还与探测器响应不均匀有关;如果光斑分布均匀,而探测器响应不均匀,则探测器输出电流与覆盖在探测器敏感面上的光斑总功率有关,而与光斑和探测器敏感面间的相对位移无关,即与探测器响应不均匀无关;如果光斑分布不均匀,而探测器响应分布均匀,则探测器输出电流与覆盖在探测器敏感面上的光斑总功率有关,而与光斑和探测器敏感面间的相对位移无关。当光斑未覆盖探测器敏感面时,如果光斑分布和探测器响应都不均匀,则探测器输出电流不但与光斑总功率及其分布有关,还与光斑和探测器敏感面间的相对位移有关,即还与探测器响应不均匀有关;如果光斑与敏感面间无相对移动,则探测器输出电流不但与光斑总功率及其分布变化有关,还与探测器响应不均匀有关;如果光斑分布均匀,而探测器响应不均匀,则探测器输出电流不但与探测器敏感面上的光斑总功率有关,还与光斑和探测器敏感面间的相对位移有关,即还与探测器响应不均匀有关;如果光斑分布不均匀,而探测器响应均匀,则探测

器输出电流与探测器敏感面上的光斑总功率有关,而与光斑和探测器敏感面间的相对位移无关;如果光斑足够小,敏感面内的探测器响应可视为均匀,当光斑在敏感面上的小范围内漂移时,探测器输出电流与探测器敏感面上的光斑总功率有关,而光斑和探测器敏感面间的相对位移的影响可忽略不计。

根据以上讨论,用一个较大的均匀分布的光束覆盖整个探测器,就可以有效抑制光束漂移对能见度测量的影响。光束光斑均匀区域的尺寸应根据实际装置中光斑与探测器敏感面相对位移的实测大小以及探测器敏感面的大小确定。

4 尺度效应影响的实验测试

为了测定光电二极管光电响应度的均匀性,设计了如图 2 所示的实验装置。实验时为抑制环境光变化的干扰,用功率函数信号发生器产生的频率为 1 kHz、幅度为 3.5 V 的脉冲方波驱动半导体激光器输出 650 nm 的红光,输出光束经过一定准直并在探测器前限制其直径,使照射在探测器上的光斑直径约为 0.30 mm;衰减片 A 使光强在光电二极管线性检测范围之内;光束经过分光棱镜 T 后分成两束光,其中一束光进入光电二极管实现光电转换,其光生电流由低噪声前置放大器转换为电压信号,用高精度数字万用表读取数据;另一束光进入标准功率计,用标准功率计监测整个光路激光功率的变化情况。实验用光电探测器敏感面是边长为 6.0 mm 的正方形。

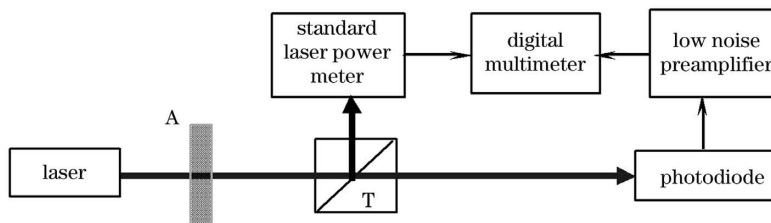


图 2 用于光电二极管性能测试的实验装置

Fig. 2 Experimental device for performance test of photodiodes

把光电二极管固定在可精确移动位置的 TSM-13-1A 移动平台上,调节平移台的千分尺,保持光斑大小不变,使光斑沿着一条近似过光电二极管中心的直线平移,从光斑刚开始进入光电二极管一直到完全离开,每移动 0.25 mm 记录一次输出电压有效值 U 。为了观测移动步长是否对变化趋势有影响,每移动 0.10 mm 进行一次测量。结果表明,小步长更能反映不均匀性的真实性。以输出电压有效值 U 表示输出量,是为了便于数值采样与数据处理,在能

能见度测量中,最终的信号被转换为有效值信号。

分别对 UV-0**DQ 和 2CU** 两种型号的光电二极管进行了测量,这两种型号的光电二极管敏感面的尺寸都是 6.0 mm × 6.0 mm。测得的前置放大器的输出电压有效值随光斑位置的变化如图 3 所示。

采用最小二乘法,用二次多项式拟合输出电压有效值 U 和响应度 R_λ 随位置的变化。UV-0**DQ 型光电二极管对应的输出电压有效值随光斑位置变

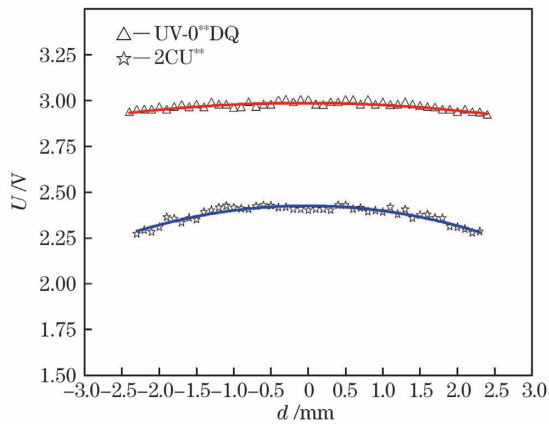


图 3 两种光电探测器输出电压有效值 U 分别与相对于探测器中心位移 d 的关系

Fig. 3 Relationship between effective value of output voltage of two kinds of photodetectors and displacement relative to detector center

化的函数关系为

$$U_{UV} = -0.0099d^2 - 0.0011d + 2.988, \quad (18)$$

2CU**型光电二极管对应的输出电压有效值随光斑位置变化的函数关系为

$$U_{2CU} = -0.0269d^2 - 0.0012d + 2.427. \quad (19)$$

根据测量的输出电压有效值 U 和光功率, 计算得到了两种被测光电二极管的响应度 R_λ 与光斑在敏感面上相对位移之间的关系, 如图 4 所示。

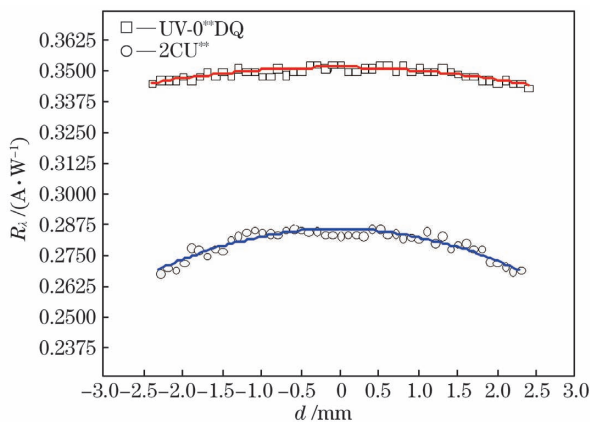


图 4 两种光电探测器的响应度分别与相对于探测器中心位移的关系

Fig. 4 Relationship between responsivity of two kinds of photodetectors and displacement relative to center

从图 4 中可以看出: 光斑在探测器中心区域附近时, 光电响应度 R_λ 基本不随光斑位移而变; 光斑在远离探测器中心的边缘时, 电子-空穴复合率变大, R_λ 随光斑位移的增加而减小。以光斑在中心处的光电响应度 $R_\lambda(0)$ 为参考点, 光斑在不同位置处的响应度 R_λ 的相对偏差分别如图 5 曲线所示。

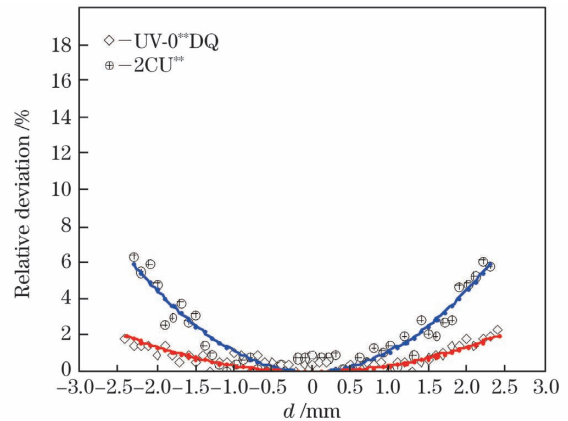


图 5 两种光电探测器响应度分别关于中心响应度的相对偏差与位移的关系

Fig. 5 Relationship between the relative deviation of the responsivity of the two photodetectors with respect to the center responsivity and displacement relative to center

UV-0**DQ 型光电二极管响应度 R_λ 随光斑位置变化的拟合曲线为

$$R_{\lambda UV} = -0.0012d^2 - 0.0003d + 0.3515, \quad (20)$$

2CU**型光电二极管响应度 R_λ 随光斑位置变化的拟合曲线为

$$R_{\lambda 2CU} = -0.0032d^2 - 0.0001d + 0.2855. \quad (21)$$

由图 3 可以看出: 光斑在光电二极管中心区域附近时, 输出电压有效值 U 基本不随光斑位移而变; 光斑在远离光电二极管中心的边缘时, 输出电压有效值 U 随光斑位移快速减小。尽管激光光斑光强呈高斯分布, 但光束形态保持不变, 输出电压有效值随位置而变, 说明光电二极管光电转换响应度存在位置非均匀性。由测量结果和拟合曲线可知, 光电二极管响应度在敏感面上的分布近似呈抛物面形态, 中心处的响应度最大, 边缘附近最小。从图 3 知, 两种光电二极管对应的输出电压有效值均随光斑位置而变, 但 UV-0**DQ 型光电二极管输出电压有效值随光斑位置的变化比 2CU**型光电二极管的变化小很多。从图 4 中的曲线看, 这两种型号光电二极管的响应度随光斑位置的变化更加明显。图 5 表明, 在光斑偏离中心 1 mm 后, 两种光电二极管响应度在不同位置处的相对偏差呈现成倍的差异。尽管这两种光电二极管是随机选取的, 但测试结果说明尺寸相同的不同型号、不同商家的光电二极管, 尺度效应引起的响应度位置非均匀性存在差异, 且有时这种差异还比较大。因此, 探测光束的光斑尺寸和探测器敏感面的比例需要对所选用的探测器的响

应均匀性进行测量后再作优化。例如,对于 UV-0**DQ 型光电二极管,光斑直径可以确定为在 1.0 mm 以内较为合适;对于 2CU**型光电二极管,光斑直径可以确定为在 0.5 mm 以内较为合适。

以上测量结果表明,由于光电二极管尺度效应导致了响应度的位置不均匀,因此最后表现为光电二极管电信号输出量的位置不均匀。在能见度测量仪中,由于探测光束的光斑发生漂移,因此一般表现为最终输出电压的位置不均匀。由测量实例可知,在工程设计中,在小光斑状态下,如果结构条件许可且在光束调制频率不高的情况下,选择敏感面积适当大一些的光电二极管,有利于抑制光斑漂移对测量不确定度的影响。敏感面的大小应根据光束漂移范围和接收系统的光学结构进行优化选择。

5 光电响应尺度效应对能见度测量的影响

在能见度测量仪中,用电压有效值表示光功率的大小,所以可以用电压的不确定度表征能见度测量的不确定度。由(3)式可得能见度的相对不确定度为

$$\frac{|\Delta V|}{V} = \frac{|\Delta\beta|}{\beta} \leq \frac{1}{\ln U_0 - \ln U} \left(\left| \frac{\Delta U_0}{U_0} \right| + \left| \frac{\Delta U}{U} \right| \right), \quad (22)$$

式中: U_0 为同样的光接收装置在光发射部件的发射窗口测得的光信号对应的电压有效值; ΔU_0 为发射端电压有效值 U_0 的测量误差; ΔU 为接收端电压有效值 U 的测量误差。在发射窗口处,光束光斑可以控制在光电二极管敏感面中心附近,发射部件采取光强稳定措施后,(22)式括号中的第一项远小于第二项,其贡献可以忽略。在远离发射窗口的接收端,由于大气扰动,光束方向存在一定的漂移,表现为探测器敏感面上的光斑位置不确定。因此,一般情况下,(22)式括号中的第二项不可忽略,故(22)式可以改写为

$$\frac{|\Delta V|}{V} = \frac{|\Delta\beta|}{\beta} \approx \frac{1}{\ln U_0 - \ln U} \left| \frac{\Delta U}{U} \right| = \frac{1}{\beta L} \left| \frac{\Delta U}{U} \right|. \quad (23)$$

以光斑位于探测器敏感面中心区域的输出电压有效值为参考,光斑在距光电二极管中心不同距离处的相对偏差为

$$\frac{|\Delta U_i|}{U(0)} = \frac{|U_i - U(0)|}{U(0)}, \quad (24)$$

式中: $U(0)$ 为光斑在探测器中心区域时,前置放大器的输出电压有效值; U_i 为光斑在到光电二极管敏

感面中心距离不同的位置处,前置放大器的输出电压有效值。根据(23)式,光斑漂移在不同位置处产生的能见度的相对不确定度可用下式估计:

$$\frac{|\Delta V|}{V} \approx \frac{1}{\beta L} \left| \frac{U_i - U(0)}{U(0)} \right|. \quad (25)$$

对于实验测试的两个光电二极管,以中心位置处的输出电压有效值为参考,由拟合曲线(18)、(19)可得输出电压相对偏差与位移的关系,如图 6 所示。

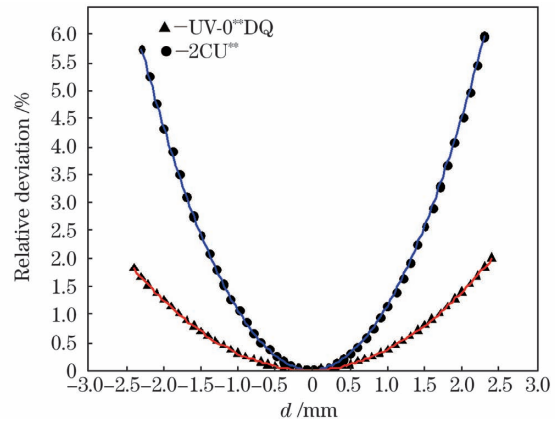


图 6 两种光电探测器输出电压分别关于中心输出电压有效值的相对偏差与位移的关系

Fig. 6 Relationship between relative deviation of output voltage of two photodetectors with respect to effective value of central output voltage and displacement

从图 6 可以看出:对于 UV-0**DQ 型光电二极管,在以其敏感面中心为圆心、直径为 1 mm 的区域内,相对偏差很小,且随位移的变化也很小,最大相对偏差约为 0.10%,平均相对偏差约为 0.05%;在以其敏感面中心为圆心、直径为 2 mm 的区域内,最大相对偏差约为 0.368%。若将接收端的探测光束会聚,使光斑控制在以探测器敏感面中心为圆心、直径为 2.0 mm 的圆内漂移,在不计前置放大器后端各级电子线路及量化误差的情况下,如果使用该光电二极管,在能见度为 2 km 时,大气消光系数 β 为 $1.596 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 。若测量基线为 70 m,则由电压测量偏差估算得此探测器由尺度效应引起的能见度测量的相对不确定度为 3.22%;若基线为 30 m,则此相对误差的贡献为 7.52%。在高能见度时,如能见度为 10 km 时,大气消光系数 β 为 $3.912 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ 。若测量基线为 70 m,则此探测器由尺度效应引起的能见度测量的相对不确定度为 13.15%;若测量基线为 30 m,则此相对不确定度为 30.67%。

由此可知,在能见度测量中,由于光电二极管的尺度效应,光斑允许漂移的范围极小,因此必须选择

光电转换响应度均匀性好的光电二极管。一般情况下,必须采用光束跟踪准直技术,将光斑限制在探测器敏感面的中心附近。

对于该型号的光电二极管,在以敏感面中心为圆心、直径为 2 mm 的区域可以认为是正常工作区。对于一般精度的光电探测系统,在设计和使用过程中,只要使入射光斑在该区域内,光强测量的不确定度就相对较小,能给出较准确的探测结果。但对于能见度测量,要求消光系数测量的不确定度很小,必须确保光束在光电二极管的中心位置附近。因此,本课题组采用了四象限探测器^[20],运用光斑跟踪技术^[21]抑制光束漂移的影响。从另一个角度看,均匀

光束覆盖探测器敏感面也能抑制光束漂移的影响,减小能见度测量的相对误差。

在上述实验测量中,光斑直径约为 0.3 mm,若在能见度仪设计中,使光斑直径会聚约为 0.3 mm,选择 UV-0**DQ 型光电二极管作为能见度仪光接收系统的探测器,则可以根据测量数据的拟合曲线,即(18)式和(25)式,计算得到光束在探测器敏感面上相对于敏感面中心的漂移对能见度测量的相对不确定度的贡献。表 1 给出了在基线分别为 70 m 和 30 m 时 2 km 能见度及 10 km 能见度两个特例情况下,计算得到的光束在探测器敏感面上相对于敏感面中心的漂移对能见度测量相对不确定度的贡献。

表 1 光束在 UV-0**DQ 型探测器敏感面上相对于敏感面中心的漂移对能见度测量的相对不确定度的贡献
Table 1 Contribution of spot drift on sensitive surface of UV-0**DQ type photodiode to relative uncertainty of visibility measurement

Distance from the center of the light spot /mm	Output voltage /V	Voltage relative deviation /%	Relative deviation of visibility(@V= 2 km, L = 70 m, $\beta = 1.596 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$) /%	Relative deviation of visibility(@V= 2 km, L = 30 m, $\beta = 1.596 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$) /%	Relative deviation of visibility (@V= 10 km, L = 70 m, $\beta = 3.912 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$) /%	Relative deviation of visibility(@V= 10 km, L = 30 m, $\beta = 3.912 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$) /%
0	2.9880					
0.10	2.9878	0.007	0.06	0.15	0.26	0.60
0.20	2.9874	0.021	0.18	0.43	0.75	1.76
0.30	2.9868	0.041	0.37	0.85	1.49	3.48
0.40	2.9860	0.068	0.61	1.41	2.47	5.77
0.50	2.9850	0.101	0.91	2.11	3.70	8.63
0.60	2.9838	0.141	1.27	2.95	5.16	12.05
0.70	2.9824	0.188	1.68	3.93	6.87	16.03
0.80	2.9808	0.241	2.16	5.04	8.82	20.58
0.90	2.9790	0.302	2.70	6.30	11.01	25.69
1.00	2.9770	0.368	3.30	7.69	13.44	31.37
1.10	2.9748	0.441	3.95	9.22	16.12	37.61
1.20	2.9724	0.521	4.67	10.89	19.04	44.42
1.30	2.9698	0.608	5.44	12.69	22.20	51.79
1.40	2.9671	0.701	6.27	14.64	25.60	59.73
1.50	2.9641	0.801	7.17	16.72	29.24	68.23
1.60	2.9609	0.907	8.12	18.95	33.13	77.29
1.70	2.9575	1.020	9.13	21.31	37.25	86.92
1.80	2.9539	1.140	10.20	23.80	41.62	97.12
1.90	2.9502	1.266	11.33	26.44	46.23	107.88
2.00	2.9462	1.399	12.52	29.22	51.09	119.20
2.10	2.9420	1.538	13.77	32.13	56.18	131.09
2.20	2.9377	1.685	15.08	35.18	61.52	143.54
2.30	2.9331	1.837	16.45	38.37	67.10	156.56
2.40	2.9283	1.997	17.87	41.70	72.92	170.14
2.50	2.9234	2.163	19.36	45.17	78.98	184.29

若在能见度仪设计中,使光斑直径会聚约为 0.3 mm,选用 2CU** 型光电二极管作为能见度仪光接收系统的探测器,则根据测量的数据拟合曲线,即(19)式和(25)式,可以计算得到在基线分别

为 70 m 和 30 m 以及能见度分别为 2 km 和 10 km 时,光束在探测器敏感面上相对于敏感面中心的漂移对能见度测量相对不确定度的贡献,如表 2 所示。

表 2 光束在 2CU** 型探测器敏感面上相对于敏感面中心的漂移对能见度测量的相对不确定度的贡献

Table 2 Contribution of spot drift on sensitive surface of 2CU** type photodiode to relative uncertainty of visibility measurement

Distance from the center of the light spot /mm	Output voltage /V	Voltage relative deviation /%	Relative deviation of visibility(@V= 2 km, L = 70 m, $\beta=1.596 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$) /%	Relative deviation of visibility(@V= 2 km, L = 30 m, $\beta=1.596 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$) /%	Relative deviation of visibility (@V= 10 km, L = 70 m, $\beta=3.912 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$) /%	Relative deviation of visibility (@V= 10 km, L = 30 m, $\beta=3.912 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$) /%
0	2.4270					
0.10	2.4266	0.016	0.14	0.33	0.59	1.37
0.20	2.4257	0.054	0.49	1.13	1.98	4.62
0.30	2.4242	0.115	1.03	2.39	4.18	9.76
0.40	2.4222	0.197	1.76	4.12	7.20	16.80
0.50	2.4197	0.302	2.70	6.30	11.02	25.72
0.60	2.4166	0.429	3.84	8.95	15.65	36.53
0.70	2.4130	0.578	5.17	12.07	21.10	49.23
0.80	2.4088	0.749	6.70	15.64	27.35	63.81
0.90	2.4041	0.942	8.43	19.68	34.41	80.29
1.00	2.3989	1.158	10.36	24.18	42.28	98.65
1.10	2.3931	1.396	12.49	29.15	50.96	118.91
1.20	2.3868	1.655	14.82	34.57	60.45	141.05
1.30	2.3800	1.937	17.34	40.46	70.75	165.08
1.40	2.3726	2.242	20.06	46.82	81.86	191.00
1.50	2.3647	2.568	22.99	53.63	93.78	218.81
1.60	2.3562	2.917	26.11	60.91	106.50	248.51
1.70	2.3472	3.287	29.42	68.66	120.04	280.10
1.80	2.3377	3.680	32.94	76.86	134.39	313.57
1.90	2.3276	4.095	36.66	85.53	149.54	348.94
2.00	2.3170	4.532	40.57	94.66	165.51	386.19
2.10	2.3059	4.992	44.68	104.25	182.29	425.33
2.20	2.2942	5.473	48.99	114.31	199.87	466.36
2.30	2.2819	5.977	53.50	124.83	218.26	509.28
2.40	2.2692	6.503	58.21	135.82	237.47	554.09
2.50	2.2559	7.051	63.11	147.26	257.48	600.79

由表 1 和表 2 可知,在同样的能见度下,选择不同的基线时,光斑漂移(即光电二极管的尺度效应)对能见度测量相对不确定度的贡献不同,即基线越长,贡献越小;在同一基线、同一能见度下,光斑漂离开敏感面中心越远,对能见度测量相对不确定度的贡献越大;在同样的基线下,光电二极管的尺度效应对能见度测量相对不确定度的贡献也不同,能见度越高,贡献越大,这与世界气象组织^[5]给出的高能

能见度时测量相对误差大的观测结果一致。因此,可以认为光电二极管的尺度效应是能见度测量相对不确定度的主要贡献之一。

比较表 1 和表 2 知,同尺寸规格、不同制造商、不同型号的光电二极管的尺度效应对能见度测量相对不确定度的贡献不同,且有些相差很大。综上所述,在透射式能见度仪设计中,测定光电二极管响应度的非均匀性,对关键器件的选择以及对了解能见

度仪的相对不确定度和相对不确定度的分配具有重要的参考意义。

6 结 论

由于光电二极管敏感面积的尺度总是有限大小,其边缘为光生载流子复合中心。离边缘越近,载流子复合概率越大,光电转换量子效率最低,而敏感面中心处载流子的复合概率最小,量子效率最高,从而导致光电二极管敏感面上不同区域的光电转换响应度不同,其分布形态近似抛物面状。光电二极管的光电转换均匀性在中心区域最好。

对于精度要求不高的探测系统,只要使光斑在光电二极管正常工作中心区以内,就可以得到比较准确的测量结果。对于能见度测量仪,光电二极管尺度效应将产生显著的不确定度。在能见度仪这样的高精度探测系统中,必须选择尺度效应小的光电二极管,并使光斑中心一直保持在敏感面中心位置附近的小区域内,或者用均匀光束覆盖探测器敏感面,以便有效抑制尺度效应对测量不确定度的贡献。

参 考 文 献

- [1] Li Z G, Xu N, Yuan J. New evidence on trade-environment linkage via air visibility[J]. *Economics Letters*, 2015, 128: 72-74.
- [2] Camino C, Cuevas E, Basart S, et al. An empirical equation to estimate mineral dust concentrations from visibility observations in Northern Africa[J]. *Aeolian Research*, 2015, 16: 55-68.
- [3] Zhang Q, Quan J N, Tie X X, et al. Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 502: 578-584.
- [4] Wu D, Deng X J. Environmental meteorology and special weather forecast [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001.
吴兑, 邓雪娇. 环境气象学与特种气象预报[M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [5] World Meteorological Organization. Guide to meteorological instruments and methods of observation[M]. 7th ed. Geneva: WMO Publish, 2008: 12-13.
- [6] Zeng S E, Wang G L. Observation and instrument of visibility [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1999, 10(2): 207-212.
曾书儿, 王改利. 能见度的观测及其仪器[J]. *应用气象学报*, 1999, 10(2): 207-212.
- [7] Xing X N, Cui Y M, Zhang F G, et al. Summary of present situation and development trend of visibility measurement technology [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2010, 30(5): 15-20.
- [8] 邢向楠, 崔岩梅, 张富根, 等. 能见度测量技术现状及发展趋势综述[J]. *计测技术*, 2010, 30(5): 15-20.
- [8] Li M L, Duan F J, Ouyang T, et al. Research on the forward scattering visibility detection [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(7): 1281-1285.
李孟麟, 段发阶, 欧阳涛, 等. 前向散射式能见度测量技术研究[J]. *传感技术学报*, 2008, 21(7): 1281-1285.
- [9] Xiao S R, Shi L F, Huang B. Effect of photodetector reverse bias voltage on visibility measurement uncertainty[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 071206.
肖韶荣, 石刘峰, 黄彪. 光电探测器反向偏置电压对能见度测量不确定度的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 071206.
- [10] Xiao S R, Wu Q Y, Zhou J, et al. Method to extend dynamic range of transmittance meter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(4): 574-579.
肖韶荣, 吴群勇, 周佳, 等. 透射式能见度仪动态范围扩展方法[J]. *应用光学*, 2014, 35(4): 574-579.
- [11] Nemecek A, Zach G, Swoboda R, et al. Integrated BiCMOS p-i-n photodetectors with high bandwidth and high responsivity[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(6): 1469-1475.
- [12] Xu L J, Zhang X H, Cai H X, et al. Research on spectral responsivity of detector under irradiation by infrared laser[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(11): 1166-1169.
徐立君, 张喜和, 蔡红星, 等. 红外激光辐照下光电探测器光谱响应度的研究[J]. *激光与红外*, 2009, 39(11): 1166-1169.
- [13] Yu H Y, Ren S, Jung W S, et al. High-efficiency p-i-n photodetectors on selective-area-grown Ge for monolithic integration [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2009, 30(11): 1161-1163.
- [14] Li C, Zhang D L, Xue C L, et al. Progress in the study of Si-based group IV optoelectronic devices (II): photodetectors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 110002.
李冲, 张东亮, 薛春来, 等. 硅基 IV 族光电器件研究进展(二): 光电探测器[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(11): 110002.
- [15] Lin Y D, Lü L, Bai S. Determination of spectral quantum efficiency of silicon photodetector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1212005.

- 林延东, 吕亮, 白山. 硅光电探测器光谱量子效率的测定[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1212005.
- [16] Yin W H, Han Q, Yang X H. The progress of semiconductor photoelectric devices based on graphene[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(24): 248502.
- 尹伟红, 韩勤, 杨晓红. 基于石墨烯的半导体光电器件研究进展[J]. 物理学报, 2012, 61(24): 248502.
- [17] Koschmieder H. Theorie der horizontalen sichtweite [J]. Beiträge zur Physik der Freien Atmosphäre, 1924, 12: 33-53.
- [18] Mao J T, Li C C. Observation study of aerosol radiative properties over China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(5): 622-635.
- 毛节泰, 李成才. 气溶胶辐射特性的观测研究[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 622-635.
- [19] Han Y, Xie C B, Rao R Z, et al. Comparison and analysis of two visibility detecting methods based on optical scatter technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2): 173-176.
- 韩永, 谢晨波, 饶瑞中, 等. 基于光散射技术的两种能见度探测方法的比较分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 173-176.
- [20] Xiao S R, Xue M F, Xia J T. Transmission type visibility measuring device and measuring method: CN201382898Y[P]. 2010-01-13.
- 肖韶荣, 薛鸣方, 夏江涛. 透射式能见度测量装置与方法: CN 201382898Y[P]. 2010-01-13.
- [21] Xiao S R, Zhou J, Zhao J, et al. Effect of temperature on uncertainty of laser spot tracking [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 605-610.
- 肖韶荣, 周洁, 赵静, 等. 温度对激光光斑跟踪不确定度的影响[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 605-610.

Influence of Scale Effect of Photodetector on Visibility Measurement Uncertainty

Xiao Shaorong^{1,2,3*}, Liu Bohan^{1,2}, Shi Liufeng³, Huang Biao³

¹Key Laboratory of Laser & Infrared System (Shandong University), Ministry of Education, Qingdao, Shandong 266237, China;

²Center for Optics Research and Engineering (CORE), Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China;

³School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract

Objective Visibility measurement is not only used for weather forecasting but also widely used in aviation, voyage, highway, military, and environmental monitoring. In the visibility observation, the instrument measurement replaces manual observation. Currently, the mature visibility measuring instruments have transmission-and scattering-types. Advantage of the transmission type is that it can detect atmospheric transmittance without any assumptions about the atmospheric conditions. Owing to the large sampling volume and high accuracy, the transmission visibility meter is widely used in airports. Since several years, the World Meteorological Organization has been conducting a tracking study on measurement errors of visibility meters distributed globally. The results showed that the main reason for measurement uncertainties is the incorrect alignment of the transmitter and receiver. Errors caused by this incorrect alignment can be attributed to spot drift, which is projected by the detection beam on the sensitive area of the detector. In this paper, the influences of photodiode on the uncertainty of the visibility measurement were reported, law of the influence of spot drift on transmission visibility measurement uncertainty was found, and strategies to suppress the effects of beam drift were presented.

Methods The photodiode spectral response distribution equation was derived based on the quantum conversion efficiency. In transmission visibility meters, photodiodes with large sensitive areas are the most general choice because of their full energy utilization. However, the size of a sensitive area has its limitations; the spectral response on the sensitive area is not distributed uniformly because the edge of the sensitive area is the recombination center of photogenerated carriers, which implies that the output current of the photodiode is different when light spot with the same power beam drifts at different positions. An experimental visibility receiver setup for verification was constructed, and two photodiodes made by different manufacturers were selected. Their nominal sensitive surface

area was $6.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$, and diameter of the light spot projected on the sensitive surface was approximately 0.3 mm . A micrometer was used to determine the position of the light spot on the sensitive area, and a low-noise I/V circuit was proposed to detect the output current of the photodiodes. The I/V circuit output voltage could be acquired by a high-precision digital voltmeter. To reduce the influence of the laser output changes, a standard laser power meter was used to monitor the laser output power during the experiment. In the experiment, the light spot was always located in a sensitive area. The spectral response distributions of the two photodiodes were measured separately, and the contribution of voltage offset error to the uncertainty of visibility measurement was derived according to Koschmieder's law.

Results and Discussions Two types of photodiodes, UV-0**DQ and 2CU**, were measured. Center of the detector's sensitive area is taken as the reference point, and the effective value of the output voltage of the preamplifier is varied with the position of the light spot (Fig. 3). The diameter of the spot was $1/20$ of the side length of the sensitive area, which satisfied the condition that the light spot is small enough (Eq. 14). According to the measured effective value of output voltage U and laser power, the spectral responsivity R_λ distribution of two photodiodes was calculated (Fig. 4), and the relationship between relative deviation of the two photodetectors relative to the center responsivity and displacement of the light spot was obtained (Fig. 5). The least-squares method was used to fit the changes of the output voltage and responsivity with the displacement using a quadratic polynomial. Based on the fitting equation, the relative deviation of the voltage relative to the voltage of the spot at the center was calculated when the spot drift left the center position (Fig. 6). When the visibility was 2 and 10 km and baseline was 70 and 30 m, the contribution of the spot drift of the beam on the sensitive area, which is relative to the center of the detector, to the relative uncertainty of the visibility measurement was obtained (Tables 1 and 2). Measurements and calculations showed that the center of the sensitive area has the highest spectral responsivity, and the farther away from the center, the smaller the spectral responsivity acquired. Within a certain range of the center region, the spectral responsivity is relatively uniform. Therefore, when the spot drift of the beam is limited to this region, the contribution of the scale effect of photodiodes to the measurement uncertainty of visibility can be ignored.

Conclusions Owing to the limitations of the sensitive area of the photodiode, the edge of the sensitive area is the recombination center of the photogenerated carriers. The region closer to the edge has a greater probability of carriers' recombination, and the quantum efficiency near the edge is minimized. Although the probability of the carriers' recombination in the center of the sensitive area is the least, the quantum efficiency in this area is the highest. Consequently, the responsivity of photoelectric conversion in different sensitive areas varies, and its distribution curve is approximately parabolic. The uniformity of photodiode photoelectric conversion has the optimal value in the center area. Therefore, for the detection system that does not require high accuracy, more accurate measurements can be achieved provided the light spot is located at the center area of the photodiode. For the visibility meter, the scale effect of photodiode has a significant impact on the uncertainty of the measurement. When designing a transmission-type visibility detection system, it is necessary to select a photodiode with a minimized scale effect. It is equally important to optimize the optical parameters of the receiver to ensure that the light spot projected on the sensitive area is small enough and center of the light spot is always located in a small area near the center of the sensitive area. A uniform beam can also be used to overlay the sensitive area of a detector to effectively suppress the contribution of the scale effect to the measurement uncertainty.

Key words measurement; photodetector; scale effect; photoelectric responsivity; visibility measurement; uncertainty

OCIS codes 010.7295; 010.1320; 040.5160