

doi: 10.3788/gzxb20144302.0217001

小麦超弱延迟发光测试系统

吴才章, 王继伟

(河南工业大学 电气工程学院, 郑州 450001)

摘 要:应用一种新型高灵敏度光电倍增管作为传感器,设计一套用于检测小麦超弱发光的光子计数测量系统,实现对储藏小麦超弱发光的定量测量.适当安排 LED 阵列分布,设计适合延迟发光需要的照明系统,通过对白光 LED 光源辐射等效单光子能量和流明效率的计算,建立起光照度与光子数强度之间的联系,实现了光源照射强度与样品延迟发光强度之间的定量比较.对不同光照强度下小麦样品延迟发光的测试和双曲函数拟合,探讨了小麦超弱延迟发光双曲函数拟合参量的变化规律;发现不同照射强度下存在不同的饱和照射时间;小麦超弱延迟发光强度曲线符合双曲衰减规律,超弱延迟发光持续时间达数小时.通过对光照时间和数据采集时间的精确控制,以及在拟合函数中设置延迟时间参量因子,实现了延迟发光测试数据对应时间点的精确标定.

关键词:超弱延迟发光;光子数强度;等效单光子;饱和照射时间;吸收比

中图分类号:Q632

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)02-0217001-6

Testing System of the Ultra-weak Delayed Bioluminescence from Wheat

WU Cai-zhang, WANG Ji-wei

(School of Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A high sensitive single photon counting system with a new photomultiplier tube as a sensor was developed to detect the ultra-weak biophoton emission from wheat, which fulfilled the absolute quantity detection of photon emitted from wheat in the storage condition. An illuminating system for the delayed bioluminescence was designed with a proper LED array. The relation of the illuminating intensity and the intensity of photons was established through calculation of equivalent single photon energy and lumen efficiency for white LED, and the quantity comparison of illumination intensity and delayed bioluminescence intensity was realized. There existed different illuminating saturation time at different illumination. The accurate calibration of time for testing data of the delayed bioluminescence was fulfilled by accurate control of the illuminating time and data acquisition time, and also setting the delayed time parameter in fitting function. The ultra-weak delayed bioluminescence from wheat was detected and analyzed systematically, and the results show that the intensity curves of delayed luminescence from wheat follows a hyperbolic attenuation trend, and the duration of the luminescence lasts for several hours. Subsequently, the hyperbolic function fitting of testing data was carried out and the changing regularity of fitting parameters was discussed.

Key words: Ultra-weak delayed bioluminescence; Photons intensity; Equivalent single photon; Illuminating saturation time; Absorption ratio

OCIS Codes: 250.0040; 120.4640; 170.3650

0 引言

生命体,小至细菌微生物,大到植物、动物甚至人,

都存在超微弱发光,波长范围从 200~800 nm,甚至延伸到红外波段^[1-2].生物超弱发光由其内部相关物质含量和酶共同决定,与生物系统的代谢、生长调控、生化

基金项目:国家自然科学基金(No. 61078070)和河南省高校创新人才支持项目(No. 2011HASTIT018)资助

第一作者:吴才章(1968-),男,教授,博士,主要研究方向为光电检测技术. Email: wucaizhang@haut.edu.cn

收稿日期:2013-07-22;录用日期:2013-09-24

<http://www.photon.ac.cn>

反应等存在内在联系,生物超弱发光可以作为一个灵敏的生理特性指标表征生物体的生长状态和生理活动状态,已经成为研究生物生理状态的一种新型方法^[3-4].一方面,超弱发光在不破坏生命活动的情况下向人们提供了一种快速品质检测方法;另一方面,人们期望通过对超弱发光这种生命体固有光学特性的检测,获得生物体更多的信息特征^[5-6].超弱发光通常包括自发发光和光致发光,自发发光是生物体进行新陈代谢过程中,自发稳定辐射的极微弱光子流,即超弱光子辐射(Ultra-weak biophoton emission),其强度在几百个光子/(s·cm²)以下.光致发光又称超弱延迟发光(Ultra-weak delayed bioluminescence),生物体受到外界光激发,在激发光消失后仍保持微弱的延迟发光,延迟发光比自发光的强度强得多,辐射强度可以达到几万个光子/(s·cm²)以上^[7-8].从应用的角度,基于延迟发光的品质检测将更容易,结果也更准确,所以对生物延迟发光的研究是当前研究的热点.

到目前为止,生物超弱延迟发光的机理仍然处于争论之中,然而这没有影响研究者对其研究的热情,并在理论和实验方面取得了一系列的成果^[9-13].文献[14-18]在植物学、动物学、医学、分子学等领域开展了一些初步的试验研究,进行了一些有益的探索.超弱延迟发光是外界光激发后样品进行的微弱发光,延迟发光与照射光源之间的关系、延迟发光随时间的变化规律等是延迟发光研究的关键,所以延迟发光测量对时间控制的准确度提出了较高的要求.而在大多的延迟发光测量中,自然光或其他光源照射后,通过人工的方法放入暗室,再进行延迟发光的测试,测试数据对应的时间点难以准确确定,只能是一种定性的研究,一些研究者意识到这个问题,在测试系统中对时间进行了精确控制^[8,11,19-21].本文设计一种用于小麦延迟发光测量的测试系统,在对延迟发光精确测试的基础上,深入探讨照射光源对延迟发光的影响,提出饱和照射时间的概念;建立起光源照射强度与样品延迟发光强度之间的定量计算关系;在对光照时间和测试时间精确计量的基础上,进一步在拟合函数中设置延迟时间参量因子,实现对小麦延迟发光时间点的精确标定,在此基础上开展对小麦延迟发光特性的研究.

1 超弱延迟发光测试系统

超弱延迟发光测试系统如图1,主要由恒温恒湿箱、LED光源、样品选择系统、光子计数传感模块、数据采集卡、计算机等四部分组成.光子计数传感模块、样品选择系统和光源置于测试暗箱内,测试暗箱置于恒温恒湿箱内.样品选择系统由暗箱、旋转轴和转盘组成.暗箱由铝合金箱组成,箱内外表面各裱有一层遮光黑布,以保证测试在完全黑暗的环境下进行.旋转轴

下端连有大的旋转盘,旋转盘的侧面刻有四个均匀分布样品槽,样品槽互成直角分布,用于放置待测样品;位于暗箱外面的旋转轴上有定位标志,即保证样品槽与光子计数传感模块测试窗口正对,也可灵活更换测试样品.为了减少背景噪音,样品槽、旋转轴和旋转盘都用黑布覆盖.实验中每次取100 g样品作为测试样品,并保证样品测试表面平坦、样品测试面要比光子计数器的测试窗口大,光源、样品和测试窗口的距离恒定.

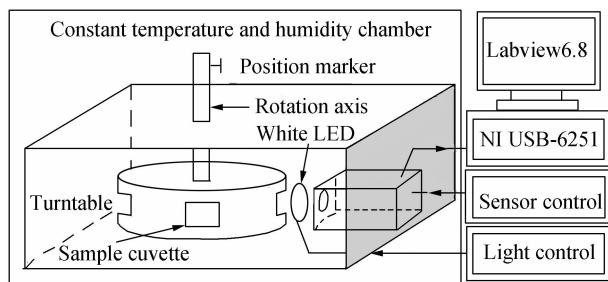


图1 超弱延迟发光测试系统

Fig. 1 Schematic diagram of the ultra-weak delayed bioluminescence measurement system

光源由32个白光二极管组成,二极管直径为4.8 mm.根据测试样品表面大小和传感器的尺寸,设计一个双环形的二极管阵列,适当安排二极管间距和内、外环的距离,以能够在测试样品表面形成均匀照射光为标准.二极管的电源由一个可调恒流源提供,光强通过电流大小调节,光源的控制如图2.

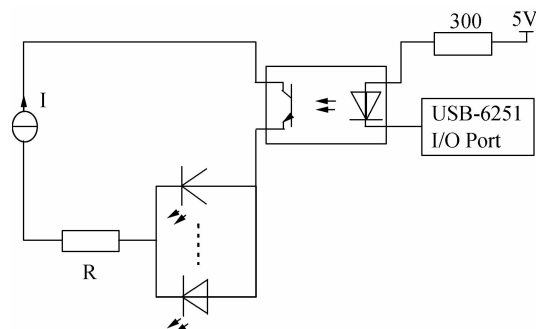


图2 LED光源控制电路

Fig. 2 Control circuit of LED

光子计数传感模块选用德国PerkinElmer公司的MP-1993光子计数模块,测试窗口的直径为15 mm,测量光谱范围为185~750 nm.该模块采用一种新型侧窗型光电倍增管C1993P,C1993P的阳极灵敏度比通用的光电倍增管PMT高一个量级.模块内置高压发生器,具有集成度高、测试准确度高优点.MP-1993模块具有极高的光子探测水平,极低的背景噪音,暗计数仅有几个光子/(秒×传感面积),出厂时模块的光子计数水平进行了严格标定,真正实现了单光子计数^[22].超弱发光的强度是单位面积每秒钟辐射的光子数,光子计数模块测试窗口面积固定(面积为1.766 cm²),为简便表达,光子数强度省略传感面积.

采集模块采用 NI 公司的 USB-6251 数据采集卡,利用 USB-6251 中的 32 位计数器实现 MP-1993 光子计数模块输出数字信号的采集,利用 USB-6251 中的数字 I/O 实现光源的开关控制和传感器工作状态的控制,完成光子计数模块电子快门的功能.基于 LabVIEW8.6 编写了测试软件,光源照射时间、传感器的测试时间都可以通过界面进行任意设定.测试曲线可以通过界面实时显示出来,也可以把测试数据存入相应的文件,便于分析和处理.

2 光照度与光子计数模块光子数强度之间的关系

延迟发光测试中,需要测试两类光的强度,一是照射光源,二是照射后样品的延迟发光.延迟发光是一种微弱光信号,本文采用光子计数模块 MP-1993 测量.该模块的最大输出 10 M/s,只能用于测试 10^8 光子/s·cm² 以下的微弱光信号.照射用光源发射的属于强光,常用测量仪器为光照度计,光照度即通常所说的勒克司度(Lux),表示被摄主体表面单位面积上受到的光通量,1 勒克司相当于 1 流明/平方米.样品的照射光越强,延迟发光就越强,样品延迟发光的强弱并不能反映样品本身的品质属性.而样品延迟发光强度与照射光强度的比值,则能反映样品自身的品质属性.因此建立这两个测量值之间的联系,即光子计数模块的光子数强度和光照度的关系,是样品延迟发光定量测量的基础^[23].

不同波长光子的能量表达式为

$$E_p(\lambda) = h\nu = hc/\lambda \quad (1)$$

白光二极管辐射各种频率的光子,这些光子的能量并不相等.由于二极管辐射光子的数量巨大,为方便计算,采取等效的方法,将二极管辐射的不同频率光子等效为某一特定频率的光子.考虑到白光二极管的光谱范围为 350~800 nm,光电倍增管的光谱反应范围 180~750 nm,白光二极管等效单光子的能量表达式为

$$\bar{E}_p = \frac{\int_{350}^{750} \Phi_w(\lambda) E_p(\lambda) d\lambda}{\int_{350}^{750} \Phi_w(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

式中, Φ_w 为二极管的光谱分布函数, E_p 为光子能量随波长变化的函数.

为了计算白光 LED 等效单光子的能量,必须首先知道白光 LED 的光谱分布.通过 WGD-8A 光栅光谱仪对实验用白光二极管的光谱分布进行实际测试,其归一化的光谱分布曲线如图 3.

将 LED 的光谱分布函数代入式(2),即可获得白光 LED 等效单光子的能量为

$$\bar{E}_p = \frac{\int_{350}^{750} \Phi_w(\lambda) E_p(\lambda) d\lambda}{\int_{350}^{750} \Phi_w(\lambda) d\lambda} = 4.1 \times 10^{-19} \text{ (J)} \quad (3)$$

计算表明,白光二极管照射下,等效单光子的能量为 4.1×10^{-19} J,也就是说白光二极管辐射单个光子的平均能量为 4.1×10^{-19} J.

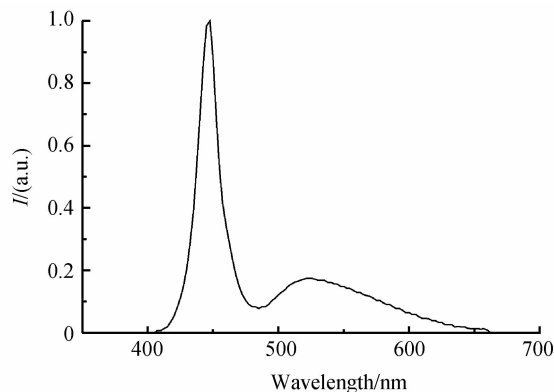


图 3 白光二极管的归一化光谱分布曲线

Fig. 3 The normalized spectrum of the white light LED
白光 LED 辐射每瓦光功率等效的流明效率为

$$\Phi_{lm} = \frac{683 \int_{350}^{750} \Phi_w(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{350}^{750} \Phi_w(\lambda) d\lambda} = 213.74 \text{ (lm/W)} \quad (4)$$

式中, V_λ 为视见函数.从式(4)可以看出,每瓦白光 LED 的辐射功率可以产生 213.74 lm 的光通量.也就是说白光 LED 光功率为 1 W 对应的流明效率为 213.74 lm^[24].

这样就建立起光照度与光子数强度之间的联系.MP1993 模块中光电倍增管的量子效率为 10%,传感器的测试面积 s 为 1.766 cm².光子计数模块光子数强度为 n 时,对应的光照度 I_n 为

$$I_n = \frac{10 \times n \times \bar{E}_p \times \Phi_{lm}}{s} = \frac{10 \times n \times 4.1 \times 10^{-19} \times 213.74}{1.766 \times 10^{-4}} = n \times 1.21 \times 10^{-12} \text{ (lux)} \quad (5)$$

3 小麦超弱延迟发光测试

按照生物光子学理论,生物超弱发光满足^[1,5]

$$I(t) = I_s + I_D(t) \quad (6)$$

式中 I_s 是自发光部分, $I_D(t)$ 为延迟发光部分.

3.1 郑麦 9023 自发光测试

小麦样品超弱发光包含延迟发光和自发光两部分,延迟发光部分具有衰减特性,自发光部分具有稳定特性,据此可以区分延迟发光和自发光.被测小麦样品的含水率保持在 10%,测试环境温度设定在 25℃,相对湿度设为 50%,对郑麦 9 023 品种进行自发光测试,测试结果如图 4.可以看出,小麦样品的自发光并不稳

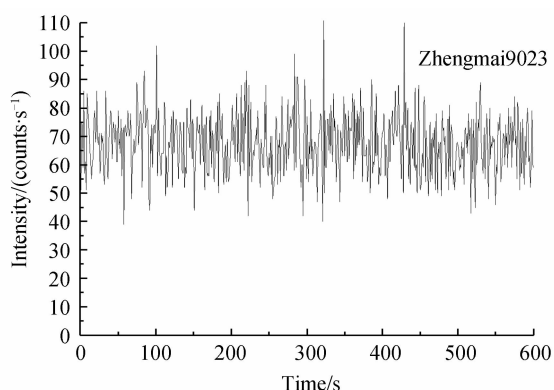


图4 郑麦9023超弱自发光强度曲线

Fig. 4 The intensity curve of the ultra-weak photon emission from Zhengmai-9023

定,但是在足够长的时间内,譬如大于几分钟后,辐射光子数强度的平均值保持稳定.

3.2 郑麦9023超弱延迟发光测试

以特定强度的光源照射被测样品一段时间,关闭光源,然后进行样品延迟发光的测试.但是光源关闭后,样品会存在余辉,余辉并不是真正的延迟发光,而且余辉比较强,会对光电倍增管造成一定的损害.所以实际测试中,二极管光源关闭后,需要等待一段时间,等余辉完全消失后,才能开启光电倍增管进行测试.另一方面,等待时间太长,会错过一定的测试数据,影响测试数据的有效性.经多次比对,实验中选定的等待时间为2 s.

测试中发现,对于特定强度的光源,照射时间太短,样品吸光不足,延迟发光的强度就会不足,随着照射时间的增加,延迟发光逐渐增强,但当照射时间增加到一定值后,样品吸光饱和,即使再增加照射时间,延迟发光也不再增强.这是因为对于一定强度的照射光,小麦样品存在一个对应的饱和照射时间.实验发现,照射强度越低,饱和照射时间越长;照射强度越高,饱和

表1 不同光照强度超弱延迟发光时间特性参量表

Table 1 The parameters of the delayed bioluminescence from Zhengmai-9023 at different illuminating intensity

Current/ mA	Illuminating intensity/Lux	Photons intensity/ (counts/s)	Illuminating saturation time/s
0.5	18.5	1.53×10^{13}	300
1	41.5	3.43×10^{13}	150
2	95.5	7.89×10^{13}	80

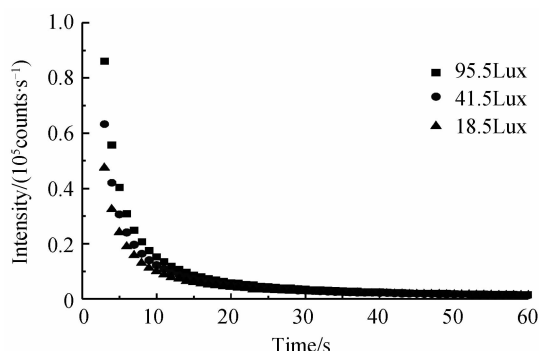
表2 郑麦9023延迟发光不同时间段拟合参量表

Table 2 The parameters of fitting curve about the delayed bioluminescence from Zhengmai-9023 at different time segment

Fitting parameter	First time	Second time	Third time	Fourth time	Fifth time	Sixth time
I_0 /(counts/s)	160 391 333	78 220 346	44 313 310	33 931 643	31 173 594	30 846 064
m	1.382 9	1.287 1	1.211 7	1.175 6	1.169 3	1.161 6
t_0 /s	0.010 4	0.011 0	0.010 9	0.010 7	0.010 9	0.010 8

照射时间越短.调节恒流源的大小以获得不同光照强度.不同光照强度下小麦的饱和照射时间如表1所示,样品表面的光照度值由FLUKE-941光照度计测得,表中同时给出了不同光照度对应的由式(5)计算得出的光子数强度.

三种光强照射下,郑麦9023的延迟发光测试曲线如图5.考虑到光源照射结束要等待2 s,图中测试得到的第一个值对应的时间点为 $t=3$ s.计算机I/O端口的通断以及程序运算需要一定的时间,第一个测试值对应的时间点不会严格对应在 $t=3$ s,必然存在一个微量误差,更精确的时间点标定通过在曲线拟合中设置延迟时间因子实现.

图5 郑麦9023在不同光强照射下超弱延迟发光强度曲线
Fig. 5 The intensity curve of the ultra-weak delayed bioluminescence from Zhengmai-9023 at different illuminating intensity

测试中也发现,尽管光照强度不同,延迟发光持续的时间基本一致,经过1 h,延迟发光强度由上万个光子/s衰减为近百个光子/s,再经过4 h,延迟发光基本衰减为0.可以看出,延迟发光强度越强衰减的越快,延迟发光最初衰减的比较快,随着时间的推移衰减越来越慢,延迟发光强度接近自发光强度后衰减变得非常缓慢.

对小麦延迟发光数据进行双曲函数拟合,结果发现,小麦延迟发光符合双曲衰减函数,即

$$I_D(t) = I_0 / (1 + t/t_0)^m \quad (7)$$

式中, I_0 表示样品延迟发光的初始强度, t_0 表示延迟发光的延迟时间因子, m 表示衰减因子.进一步研究发现,对于同一曲线,不同时间段拟合出来的参量并不恒定,以41.5 Lux光照强度下测试的数据为例,依次对每10个数据进行拟合,拟合结果如表2.

表2表明,延迟发光的拟合参量存在一定的变化规律,随着时间的推移,初始强度 I_0 逐渐减小,衰减因子 m 也逐渐减小,最后都趋近为0.这从理论上解释了同一样品尽管光照强度不同,延迟发光持续时间却基本一致的原因.这个结果也表明,在延迟发光测试中,如果不对测试数据对应的时间点进行精确标定,测试的数据和拟合结果很难上升到量化的测试.

三种光照强度下前10个测试数据双曲函数拟合参量如表3.根据式(5),表3中同时给出了不同光照强度下的样品延迟发光的吸收比,即延迟发光初始强度 I_0 (也就是第一次拟合的 I_0)和样品表面照射光强度的比值.

表3 郑麦9023不同光强照射下超弱延迟发光拟合曲线参量
Table 3 The parameters of fitting curve about the delayed bioluminescence from Zhengmai-9023 at different illuminating intensity

Illuminating intensity/Lux	I_0 (counts/s)	t_0/s	m	Absorption ratio
18.5	71 119 181	0.011 4	1.311 6	4.65×10^{-6}
41.5	160 391 333	0.010 4	1.382 9	4.68×10^{-6}
95.5	348 461 338	0.010 0	1.458 1	4.42×10^{-6}

表3表明,照射光强度增加,样品延迟发光的初始强度 I_0 成比例增加,样品延迟发光强度与照射光强度的比值基本恒定,这进一步验证了小麦的延迟发光符合双曲衰减规律.需要注意的是,样品延迟发光的初始强度 I_0 并不是照射到样品表面的光照强度,照射到样品表面的光只有很少一部分被样品吸收进而转化为样品的延迟发光,转化效率可以用吸收比表征,这与样品本身的品质属性直接相关.

4 结论

应用一种高灵敏度光子计数模块,基于虚拟仪器平台,设计了一套生物超弱发光测试系统.通过对白光LED光源辐射等效单光子能量和流明效率的计算,建立起光照度与光子数强度两种单位之间的联系,实现了光源照射强度与样品延迟发光强度之间的定量比较.通过对不同光照强度下小麦样品延迟发光的测试,发现不同照射光存在不同的饱和照射时间:光源强度越强,小麦样品的饱和照射时间越短;光源越弱,小麦样品的饱和照射时间越长.通过对光照时间和测试时间的精确控制,和在拟合函数中设置延迟时间参量因子,实现了对延迟发光测试数据对应时间点的精确标定.对小麦的超弱延迟发光进行系统测试,结果表明:小麦超弱延迟发光强度曲线符合双曲衰减规律,超弱延迟发光持续时间达数个小时.进一步的拟合结果表明:延迟发光双曲函数拟合参量并不恒定,初始强度和衰减因子随着时间的推移,逐渐减小.这些研究和结论将

为生物超弱延迟发光的准确定量测试奠定坚实基础.

参考文献

- [1] POPP F A, BELOUSSOV L. Biophotons [M]. London, Kluwer Academic Publishers, 2003, 1-40, 307-324.
- [2] DEVARAJ B, USA M, INABA H. Biophotons; ultraweak light emission from living systems[J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 1997, **2**(2): 188-193.
- [3] NIGGLI H J, SCALETTA C, YU Y, et al. Ultraweak photon emission in assessing bone growth factor efficiency using fibroblastic differentiation [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2001, **64**(1): 62-68.
- [4] HO M W, MUSUMECI F, SCORDINO A, et al. Delay luminescence from bovine Achilles' tendon and its dependence on collagen structure [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2002, **66**(2): 165-170.
- [5] TRIGLIA A, GRASSO F, MUSUMECI F, et al. Temperature dependence of the ultraweak spontaneous photon emission from soya seeds [J]. *Nuovo Cimento D*, 1993, **15**(11): 1360-1370.
- [6] MUSUMECI F, APPELEGATE L A, PRIVITERA G, et al. Spectral analysis of laser-induced ultraweak delayed luminescence in cultured normal and tumor human cells: temperature dependence [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2005, **79**(2): 93-99.
- [7] YU Y, POPP F A, SIBYLLE S, et al. Further analysis of delayed luminescence of plants [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2005, **78**(3): 235-244.
- [8] 顾樵.生物光子学[M]. 2版.北京:科学出版社, 2012, 1-10, 273-310.
- [9] BAJPAI R P. Biophoton emission in a squeezed state from a sample of *parmelia tinctorum* [J]. *Physics Letters A* 2004, **322**: 131-136.
- [10] POPP F A, YU Y. Delayed luminescence of biological systems in terms of coherent states [J]. *Physics Letters* 2002, **293**(2): 93-97.
- [11] POPP F A, CHANG J J, HERZOG A Z, et al. Evidence of non-classical (squeezed) light in biological systems [J]. *Physics Letters* 2002, **293**(2): 98-102.
- [12] SEO D, M LAAGER F, YOUNG K, et al. Ultra-weak photon emission during wrist curl and cycling exercises in trained healthy men [J]. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 2012, **31**(2): 122-131.
- [13] PETERSEN A B, PHILIPSEN P A, WULF H C. An explorative study of non-invasive ultra-weak photon emission and the anti-oxidative influence of oral zinc sulphate in light-sensitive patients with erythropoietic protoporphyria [J]. *Skin Research and Technology*, 2012, **18**(4): 405-412.
- [14] XI Gang, LIU Kai, XU Yong-kui, et al. Application of ultra weak photon emission in evaluation of egg freshness [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(3): 263-268.
习岗,刘锴,徐永奎,等.生物超弱光子辐射在禽蛋新鲜度评价中的应用. [J]. *农业工程学报*, 2012, **28**(3): 263-268.
- [15] XI Gang, LIU Kai, YANG Yun-Jing, et al. Effect of extremely low frequency high-voltage pulsed electric field on ultra-weak luminescence of corns during germination [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(6): 705-709.
习岗,刘锴,杨运经,等.极低频高压脉冲电场对萌发玉米种子超弱发光的影响 [J]. *光子学报*, 2013, **42**(6): 705-709.
- [16] LI Guang, JIAO Xiao-xue, LIU Pin, et al. Spectral feature of delayed luminescence of plant leaf [J]. *Acta Laser Biology*

- Sinica, 2007, **16**(6): 679-683.
- 李光, 焦小雪, 刘品, 等. 植物叶片延迟发光的光谱特性[J]. 激光生物学报, 2007, **16**(6): 679-683.
- [17] GU Fang, GUO Kang-quan, DU Feng-tao. Study on delayed bioluminescence characteristic of strawberry[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009, **31**(5): 177-179.
- 谷芳, 郭康权, 杜峰涛. 草莓的延迟发光衰减特性研究[J]. 农机化研究, 2009, **31**(5): 177-179.
- [18] CHEN Jiang-li, LU Zhi-guo. Garlic delayed luminescence [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 1999, **10**(4): 365-367.
- 陈江丽, 陆治国. 蒜的延迟发光[J]. 光电子 • 激光, 1999, **10**(4): 365-367.
- [19] ZHANG Xiao-hui, YU Ning-mei, LIU Kai. Measurement system for delayed luminescence based on the LED [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, **31**(8): 1878-1883.
- 张晓辉, 余宁梅, 刘锴. 基于LED的生物延迟发光检测系统[J]. 仪器仪表学报, 2010, **31**(8): 1878-1883.
- [20] SUN Xiao-jie. Design and application of the ultra-weak bioluminescence detecting system [J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2010, **30**(3): 41-44.
- 孙晓捷. 一种生物超弱发光探测系统的设计与应用[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2010, **30**(3): 41-44.
- [21] BERTOGNA E, SANTOS S R, PATERNIANI J E S, *et al.* Automatic set-up for ultra-weak photon emission measurements in organisms [J]. SBMO/IEEE MTT-S International [J]. *Microwave and Optoelectronics Conference Proceedings*, 2011, 449-452.
- [22] <http://www.perkinelmer.com>
- [23] SUN Jin-hui, XIA Qi-lin, ZHANG Ding-jin, *et al.* Skylight luminometer of twilight and weak light detection [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 1995, **10**(s): 117-119.
- 孙金辉, 夏其林, 张定金, 等. 曙暮光天光光度计及弱光检测 [J]. 数据采集与处理, 1995, **10**(s): 117-119.
- [24] CHU Ming-hui, WU Qing, WANG Jian, *et al.* Calculation of theoretical limitation of lumen efficiency for white LED [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2009, **30**(1): 77-80.
- 褚明辉, 吴庆, 王建等. 白光LED极限流明效率的计算 [J]. 发光学报, 2009, **30**(1): 77-80.