

文章编号 1004-924X(2014)09-2306-06

日盲紫外滤光片的带外截止深度测试

崔穆涵^{1,2*}, 周 跃¹, 陈 雪¹, 闫 丰^{1*}, 杨怀江¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对全日盲紫外滤光片,建立了以窄带光发射二极管(LED)作为基本光源的超大动态范围滤光片带外截止深度测试系统,并分析了系统的测试误差。该系统主要由 LED 光源,已知衰减系数的标准反射式中性衰减片以及光电倍增管组成。基于替代法,系统测试时将 LED 光源通过衰减片后的输出电流作为参考电流值替代光源的初始电流值,通过对比运算获得滤光片的带外截止深度。针对系统中的反射式衰减片,文中还提出一种组合衰减片方法,以保证光电倍增管始终工作在线性响应范围内,从而实现对滤光片的超大动态范围的截止深度测试。实验结果表明,在 350~800 nm 谱段内,该测试系统可测滤光片的带外截止深度延伸至 11-OD,不确定度小于 2%,相对重复性误差小于 0.2%。该系统结构简单,测试谱段范围宽、可测动态范围大且精度高,可广泛用于滤光片的截止深度测试。

关 键 词:日盲紫外滤光片;带外截止深度测试;动态范围测试;发光二极管;紫外探测

中图分类号:TN23;TH741.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142209.2306

Measurement for cutoff depth of out-band of solar blind UV filters

CUI Mu-han^{1,2*}, ZHOU Yue¹, CHEN Xue¹, YAN Feng^{1*}, YANG Huai-jiang¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail:crystalkaka1209@gmail.com

Abstract: A measuring system for the cutoff depth of out-band of solar blind UV filters with a large dynamic range is proposed by using narrow-band Light Emitting diode(LED) lights as the standard light source. The measuring error of the system is also analyzed. The system consists of LED light sources, the standard reflective neutral attenuators known attenuation coefficients and a photomultiplier. Based on substitution method, the photomultiplier detects the current of the LED through the attenuator as reference to substitute LED initial current, thus the cutoff depth of the out-band of filters is acquired. For the reflective attenuator in the system, an attenuator combination method is presented to insure the photomultiplier working continuously within a linear response range. Experimental results show that the cutoff depth of the out-band of filters is measured to 11-OD in the large spectral range of 350—800 nm. Furthermore, the uncertainty is less than 2% and the

收稿日期:2013-08-12;修订日期:2013-09-22.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA03A707)

relative repeatability error is less than 0.2%. The measuring system has a simpler structure, higher precise, a large spectral range and a wider dynamic range and has been widely used in the measurement of the filter cutoff depth of filters.

Key words: solar blind UV filter; cutoff depth of out-band measurement; dynamic range measurement; light Emitting Diode(LED); UV detection

1 引言

日盲紫外探测系统因工作在日盲区而具有独特的探测优势^[1],它在高压电线电晕检测^[2]、对空间目标的捕获跟踪^[3-4]以及火灾预警等领域发挥了极其重要的作用。日盲紫外探测利用的是日盲区的紫外波段(240~280 nm),原因在于:太阳辐射中波长在 240~280 nm 的光波几乎被臭氧层完全吸收,而在臭氧层以下的大气层中,由于其它大气成份的散射作用以及地表臭氧的吸收作用,日盲区紫外辐射已经变得非常微弱。因此,臭氧层下就存在这样一个空域,该空域内太阳背景中紫外辐射的能量极其有限。当该区域内其他具有紫外辐射的物体或目标产生大量的日盲区紫外辐射时,就能在其微弱的背景下探测出紫外辐射源^[5-7]。

日盲紫外滤光片是日盲紫外探测系统的核心器件^[8],它用于滤除探测环境中其他谱段辐射的干扰,使探测器可以更好地探测日盲区紫外辐射,从而提高探测系统的信噪比,降低虚警率。因此,日盲紫外滤光片带外截止深度的测试极为重要,对其要求也日趋严格。目前,测量滤光片截止深度^[9-11]的仪器主要有分光光度计^[12-13]、DF 透反仪^[14]、声光调制检测系统^[15]等。其中,分光光度计和 DF 透反仪适合测量截止深度低于 2-OD 的滤光片。刘卫国等人于 2009 年提出了声光调制检测系统^[15],该系统利用声光调制器、透射式衰减片、积分球等设备将滤光片截止深度的测量范围扩展到 6-OD,但是,对于带外深度截止、部分谱段可达 10-OD 的日盲紫外滤光片来说,其截止深度的动态测量范围仍然有所不足。

本文针对紫外滤光片大动态范围与高精度的要求,建立了以窄带 LED 灯作为光源的超大动态范围紫外滤光片截止深度测试系统。该系统基于

替代法进行测试,以标准反射式中性衰减片的衰减率作为参考,通过对比计算来获得紫外滤光片的带外截止深度。

2 原理

2.1 系统装置原理

超大动态范围滤光片截止深度测试系统采用窄带 LED 光源照射该装置配备的光电倍增管(Photo Multiplier Tube, PMT),分别将滤光片和已知衰减系数的标准反射式中性衰减片置于 PMT 的光敏面之前,并测量 LED 的输出光电流且将它作为待测电流值和参考电流值,从而间接得到滤光片的截止深度,其原理如图 1 所示。

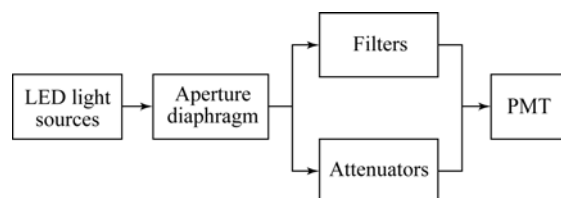


图 1 超大动态范围滤光片截止深度测试系统原理图

Fig. 1 Principle of large dynamic range test system for cutoff depth of filters

采用窄带 LED 作为光源是因为系统中存在滤光片这种对于光源有极低透过率的器件。以带外深截止到 10-OD 的全日盲紫外滤光片为例,经单色仪出射的单色光源由于输出功率较低,会导致衰减 10^{-10} 后的光电流过于微弱,不足以被 PMT 探测到。本系统中 PMT 选用滨松公司的可见-近红外 PMT,其灵敏度在 10^{-16} W 量级。图 2 为系统中 PMT 的线性响应曲线,实验所用 LED 光源的输出功率均在 mW 量级。由图 2 可知,系统光源的输出功率即使衰减 10^{-10} 变为 10^{-13} W,仍在 PMT 的线性响应范围内。

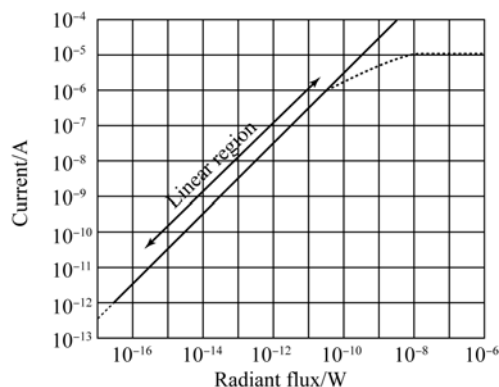


图 2 光电倍增管的线性响应曲线

Fig. 2 Linear response curve of PMT

同时,若 LED 光源与 PMT 之间不加入衰减设备,光源 mW 级的输出功率会使 PMT 出现响应饱和现象。因此在系统中加入衰减片作为参考,基于替代法进行测试。不同于以往实验采用的透射式衰减片^[13],本测试系统采用标准反射式中性衰减片,不仅消除了透射式衰减片的像差影响,而且能更加简便精准地测量衰减片的衰减系数,其衰减系数如图 3 所示。另外,加入的衰减片不能限于 1~2 片,其原因在于 PMT 长时间工作在其线性响应的最大值区域时,极易因探测器疲劳而产生线性响应范围缩小的现象,使测试精度降低。因此本文提出了衰减片组合法,即可根据输出信号的大小成对调节衰减片的片数,始终保持 PMT 工作在安全的线性响应区,装调方式如图 4 所示。同时,由于可根据输出信号成对调节组合衰减片的片数,因此实验可保证所测光源通过衰减片与通过滤光片的光电流为数量级相同的相近值,相互比对的准确性及可靠性更高。

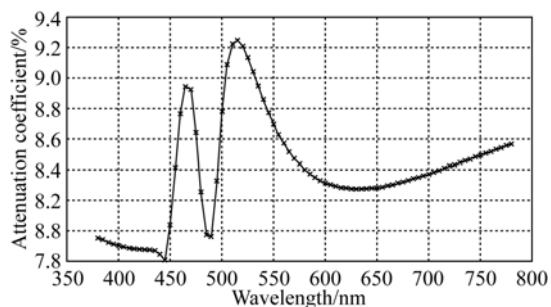


图 3 标准反射式中性衰减片的衰减系数

Fig. 3 Attenuation coefficients of standard reflex center attenuator

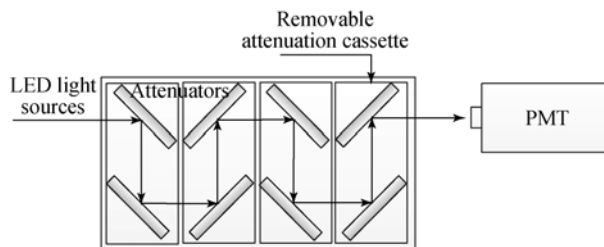


图 4 标准反射式中性衰减片叠加使用装调示意图

Fig. 4 Schematic of standard reflex center attenuators

实验采用一系列单色性良好并加有准直物镜的 LED 作为光源,并按光谱顺序固定成一排。暗箱中的精密位移平台上加载有滤光片及标准反射式中性衰减片,后面放有 PMT,实验装置及其示意图分别如图 5、图 6 所示。

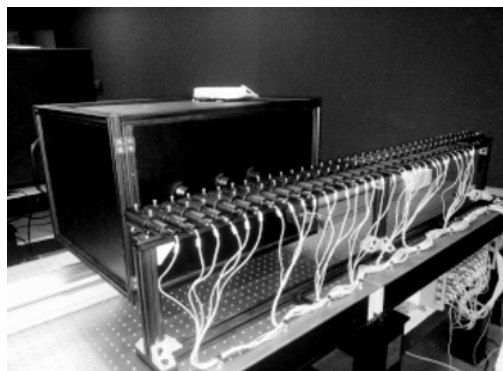


图 5 超大动态范围滤光片截止深度测试系统装置图

Fig. 5 Setups of large dynamic range test system for cutoff depth of filters

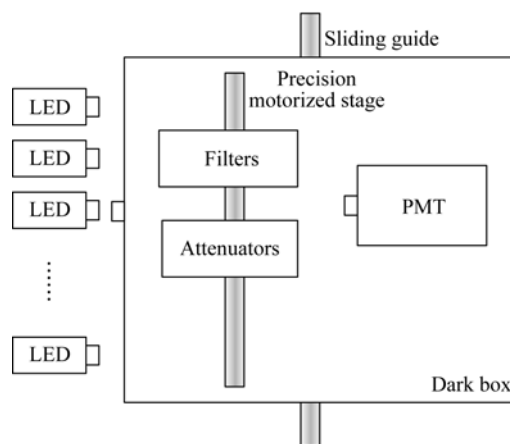


图 6 超大动态范围滤光片截止深度测试系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of large dynamic range test system for cutoff depth of filters

2.2 系统测试原理

滤光片的截止深度为:

$$\tau_t = \frac{\phi_t}{\phi_1} \quad (1)$$

标准反射式中性衰减片的衰减系数为:

$$\tau_s = \frac{\phi_s}{\phi_1} \quad (2)$$

衰减片可成组叠加使用并且其衰减系数已知。假设使用 N 片衰减片,在峰值波长 λ 处单片衰减系数为 k ,则总衰减系数为:

$$\tau_s = k^N \quad (3)$$

因此在已知衰减系数的情况下,滤光片的截止深度为:

$$\tau_t = \frac{\phi_t}{\phi_s} \cdot \tau_s = \frac{I_t/\alpha}{I_s/\alpha} \cdot \tau_s = \frac{I_t}{I_s} \cdot k^N \quad (4)$$

其中: ϕ_t 与 I_t 分别表示加入滤光片后 LED 光源的辐射通量与 PMT 测得的光电流, ϕ_s 与 I_s 分别表示加入衰减片后 LED 光源的辐射通量与光电倍增管输出的光电流, ϕ_1 表示未加滤光片和衰减片的原始辐射通量, α 表示 PMT 的光谱灵敏度。

3 实验

3.1 紫外滤光片截止深度测试

基于上述原理,滤光片截止深度的测试步骤如下:

(1) 首先将 LED 光源调节准直,然后调节 PMT 的光敏面位置使它能够接收到光源出射的所有光,暗箱入光口处放置孔径光阑以避免环境杂散光辐射的影响。

(2) 开启 LED 光源,充分预热使光源稳定,调节暗箱内精密位移平台使光源恰好通过滤光片,测试 PMT 输出的光电流 I_s 。

(3) 调节暗箱内的精密位移平台使光源恰好通过衰减片,根据 I_t 的量级调整衰减片片数,测试此时 PMT 输出的光电流 I_s 。

(4) 关闭孔径光阑使 PMT 光敏面上无光照进入,测试此时的信号输出记为暗电流噪声 I_{dark} ,则净输出电流信号为 $I - I_{\text{dark}}$ 。

(5) 控制暗箱沿导轨行进,入光口依次对准每个 LED 光源,重复步骤(2)和(3),直至测完所有 LED 光源。

(6) 将上述步骤中测得的数据代入式(4)可算得滤光片的带外截止深度 τ_t 。

3.2 紫外滤光片截止深度的测试结果

实验测试了国外购进的 AF Micro-Nikkor 紫外镜头上的全日盲紫外滤光片,所测滤光片的带外截止深度在 4-OD~11-OD 之间,测试结果如图 7 所示,

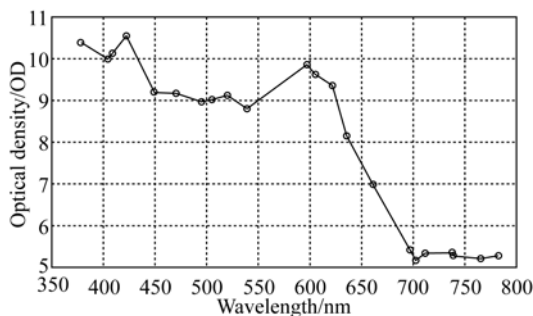


图7 超大动态范围滤光片截止深度测试系统的测试结果

Fig. 7 Results of solar blind filter with large dynamic range test system for cutoff depth of filters

系统所用的 PMT 可探测电流的分辨率为 0.01 pA,实验中输出电流的最小测量值约为 3 pA,远大于 PMT 的探测分辨率,因此系统测试结果精度高,可靠性强。

3.3 误差分析

测试系统的误差分析包括不确定度和重复性分析。

3.3.1 不确定度分析

测量不确定度可分为系统误差和随机误差。系统误差主要来源于衰减片衰减系数的准确性和 PMT 的响应误差;随机误差主要来源于环境杂散光、LED 光源的稳定性以及暗箱内精密位移平台的定位精度。

3.3.1.1 系统误差分析

实验中,由于衰减片衰减系数的偏移所带来的误差 $\Delta A \approx 0.1\%$;由于衰减系数在每只 LED 窄带波长范围内的不平坦所带来的误差 $\Delta R \approx 0.4\%$ 。

PMT 的响应误差包括输出信号偏差及暗电流噪声,实验过程中记录了实时暗电流数据,并在

最终结果中扣除了暗电流噪声,因此 PMT 的响应误差主要为输出信号偏差,为 $\Delta P \approx 1\%$ 。

因此,系统误差为:

$$\sqrt{(\Delta A)^2 + (\Delta R)^2 + (\Delta P)^2} \approx 1\%.$$

3.3.1.2 随机误差分析

由于测量在暗箱内进行,暗箱的入光口与暗箱外的光源之间还放有孔径光阑屏蔽环境杂散光,因此杂散光的干扰已被抑制到可以忽略的程度。

为保证测试的同时性,暗箱入光口定位到 LED 光源时,需移动暗箱内的精密位移平台分别使衰减片和滤光片对准光源,这是一个重复性动作,因此对其定位精度的要求很高。实验中所用的精密位移平台的移动距离为 0~250 mm,定位精度为 ± 0.1 mm。由于测试系统所用的探测器具有超大光敏面,口径近似为光源光斑的二倍;因此即使导轨定位偏差为 0.1 mm,也不影响其对光的完全收集,精密位移平台的定位偏差对测试结果造成的影响可以忽略。

采用 NIST 标定过的光纤光谱仪对装置中的 LED 光源进行长时间的能量测量。测试结果显示,LED 光源能量的稳定性小于 0.1%,对系统测试精度的影响 $\Delta S \approx 1\%$ 。

因此,随机误差约为 1。

综上所述,测量滤光片带外截止深度的不确定度为:

$$\sqrt{(\Delta A)^2 + (\Delta R)^2 + (\Delta P)^2 + (\Delta S)^2} < 2\%.$$

3.3.2 重复性分析

为了评价系统的一致性,针对全日盲紫外滤光片进行了 20 次重复性测试,结果如图 8 所示。

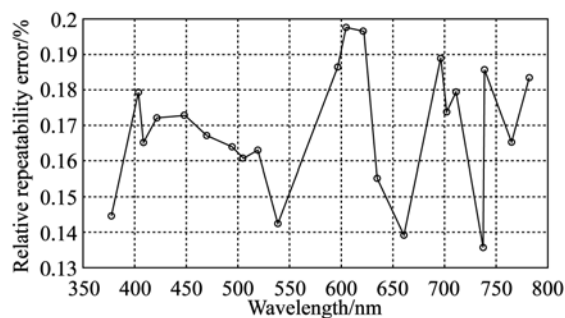


图 8 20 次测试结果的相对重复性误差

Fig. 8 Relative repeatability errors from measurements for 20 times

由图 8 可知,测试系统的相对重复性误差小于 0.2%。

综上,超大动态范围滤光片截止深度测试系统可以保证在相对高的精度标准下准确测量滤光片的带外截止深度。

4 结 论

本文建立了以窄带 LED 灯作为光源的超大动态范围滤光片截止深度测试系统。针对全日盲紫外滤光片的带外截止深度进行了测试,将滤光片截止深度的动态测试范围由 0~6-OD 扩展到 0~11-OD,并分析了系统误差。实验结果表明,在 350~800 nm 大谱段内,滤光片带外截止深度的可测动态范围为 0~11-OD,该测试系统的不确定度小于 2%,相对重复性误差小于 0.2%,满足紫外滤光片带外截止深度的测试要求。另外,该测试系统易于装调,测试涵盖谱段范围宽、动态测量范围大且精度高,可广泛应用于滤光片的截止深度测试。

参考文献:

- [1] 王保华,李妥妥,郑国宪. 日盲紫外探测系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51: 022202.
WANG B H, LI T T, ZHENG G X. Research of solar blind ultraviolet detection system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51: 022202. (in Chinese)
- [2] 戴利波. 紫外成像技术在高压设备带电检测中的应

用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 97-98.

DAI L B. The application of UV imagery technology in the high-tension apparatus detection [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(20): 97-98. (in Chinese)

- [3] 王丽萍,李春,金春水. “日盲”紫外折反射全景光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1503-1509.

WANG L P, LI CH, JIN CH SH. Design of

- catadioptric omnidirectional imaging system in solar blind UV [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1503-1509. (in Chinese)
- [4] 周伟,马妮,吴晗平. 近地层紫外探测作用距离及其影响因素研究[J]. *红外技术*, 2011, 33(6): 357-371.
ZHOU W, MA N, WU H P. Operating rang of ultraviolet detection system in the surface layer and the study of its influence factors [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(6): 357-371. (in Chinese)
- [5] 刘晓科,马君,唐辉,等. 一种日盲区紫外信号探测系统前端[J]. *探测与控制学报*, 2007, 29(6): 41-44.
LIU X K, MA J, TANG H, *et al.*. A front-end of ultraviolet signal detection system based on solar-blind region [J]. *Journal of Detection & Control*, 2007, 29(6): 41-44. (in Chinese)
- [6] 吴礼刚,何文荣,胡晋荪,等. 日盲紫外-可见光双光谱照相机系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7): 1529-1534.
WU L G, HE W R, HU J S, *et al.*. Solar blind UV and visible dual-spectral camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1529-1534. (in Chinese)
- [7] 陈健,王伟国,高慧斌,等. 紫外探测器的辐射定标及标准传递[J]. *中国光学*, 2012, 5(4): 423-429.
CHEN J, WANG W G, GAO H B, *et al.*. Radiation calibration for UV detectors and standard transferring [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 423-429. (in Chinese)
- [8] 王正凤,付秀华,张静,等. 日盲紫外告警系统中成像滤光片的研制[J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1207002.
WANG ZH F, FU X H, ZHANG J, *et al.*. Research of imaging filter in solar blind ultraviolet alarm system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(12): 1207002. (in Chinese)
- [9] LAIHO K, CHRIST A, CASSEMIRO K N, *et al.*. Testing spectral filters as Gaussian quantum optical channels [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(8): 1476-1478.
- [10] DAVID A, COMPTON C, JOHN D, *et al.*. Accurate infrared transmittance measurements on optical filters using an FT-IR spectrometer [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(19): 2908-2912.
- [11] 曲艺. 真空紫外波段光栅二级衍射效率测量装置[J]. *中国光学*, 2010, 3(6): 566-571.
QU Y. Measuring instrument for second-order diffraction efficiency of grating in vacuum ultraviolet [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2010, 3(6): 566-571. (in Chinese)
- [12] 王锐,王淑荣,郭劲,等. 高精度紫外标准探测器的定标[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1696-1703.
WANG R, WANG SH R, GUO J, *et al.*. Calibration of high accuracy UV standard detector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1696-1703. (in Chinese)
- [13] 汪舰,魏建平,杨波,等. 高透明液体透射率的测定[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 624-629.
WANG J, WEI J P, YANG B, *et al.*. Measurement of transmittance for highly transparent liquid [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 624-629. (in Chinese)
- [14] 陈栋,黄云,张斌,等. 透反射率自动化测量系统设计[J]. *光学技术*, 2007, 33: 210-213.
CHEN D, HUANG Y, ZHANG B, *et al.*. Design of transmissivity and reflectivity automatic measuring system [J]. *Optical Technique*, 2007, 33: 210-213. (in Chinese)
- [15] 刘卫国,孙鑫,高爱华,等. 线性渐变滤光片透过率实时测量系统[J]. *西安工业大学学报*, 2009, 29(6): 515-518.
LIU W G, SUN X, GAO A H, *et al.*. The development of a real-time transmittance measuring system for linear variable neutral density filters [J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2009, 29(6): 515-518. (in Chinese)

作者简介:



崔穆涵(1988—),女,吉林长春人,博士研究生,2011年于吉林大学获得学士学位,主要从事滤光片研制、测试与辐射定标的研究。E-mail: crystalkaka1209@gmail.com

通讯作者:



闫丰(1975—),男,吉林长春人,助理研究员,2008年于长春光机所博士后出站,主要从事光电探测器件应用研究。E-Mail: yan.feng@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)