

文章编号: 1002-2082(2008)02-0166-04

背照明电子倍增CCD与景物反射 光谱匹配系数的研究

张灿林, 陈 钱

(南京理工大学 电光学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 根据光谱匹配系数表达式, 计算了2种背照明电子倍增CCD(EMCCD)与暗绿色涂层、粗糙混凝土和绿色草木在晴朗星光和满月光条件下的光谱匹配系数并加以比较。其中具有红色增透膜的EMCCD在晴朗星光下与这些景物反射辐射光谱的匹配系数分别为0.455 5, 0.429 8和0.368 5, 在满月光下为0.729 0, 0.719 4和0.629 4; 具有蓝色增透膜的EMCCD, 匹配系数值相应为0.423 3, 0.391 0, 0.318 0及0.783 2, 0.744 8, 0.581 6。

关键词: EMCCD; 光谱匹配系数; 光谱响应

中图分类号: TN223

文献标志码: A

Matching coefficients for BV-EMCCD and reflective radiation spectra of objects

ZHANG Can-lin, CHEN Qian

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The spectral matching coefficients between two kinds of BV-EMCCDs and dark green paint, rough concrete, green vegetation under clear starlight and full moon were calculated and compared, according to the expression of spectral matching coefficient. The matching coefficients for EMCCD with red-AR and the reflective radiation spectra of these objects are 0.4555, 0.4298 and 0.3685 under clear starlight, and 0.7290, 0.7194 and 0.6294 under full-moon, respectively. For EMCCD with blue-AR, the matching coefficients are 0.4233, 0.3910 and 0.3180, as well as 0.7832, 0.7448 and 0.5816 respectively. These values can be used to estimate the field performance and optimize the design of night vision systems.

Key words: EMCCD; spectral matching coefficient; spectral response

引言

20世纪90年代, 国外军方在第三代微光像增强技术成熟后纷纷开展全固态电子倍增即EMCCD技术的研究。美国德克萨斯仪器公司(简称为TI公司)和英国ANDOR-TECH公司先后申请了自己的专利^[1]。经过将近10年的探索, ANDOR推出商业样机系列CCD60, CCD65等, 商

标名为L3 Vision; TI也推出商业样机系列TC237, TC253等, 商标名为Impactron, 其性能在单光子探测方面很有优势^[2]。该技术的特点是量子效率高、高灵敏度、高信噪比、高空间分辨率、高读出速率、高帧速工作和可变的增益控制, 可用于制造单光子检测的科学级CCD照相机。

光电阴极或光电探测材料与景物反射光谱之

收稿日期: 2007-12-04; 修回日期: 2008-01-20

基金项目: 国防基础科研项目(A2620060242), 中国兵器工业集团公司装备预研项目(4040508011)

作者简介: 张灿林(1976—), 男, 河南洛阳人, 博士研究生, 主要从事微光倍增技术研究工作。E-mail: zhclvip@126.com

间的光谱匹配系数对于夜视仪的对比研究和视距评估是一个很重要的参数^[3-4]。基于高性能的 EMCCD 充分利用了夜天自然光这一特点,本文根据光谱匹配系数的表达式,计算了 2 种背照明 EMCCD 与暗绿色涂层、粗糙混凝土和绿色草木的光谱匹配系数。

1 光谱匹配系数^[5]

光谱匹配系数是表征具有各种光谱响应的 EMCCD 对不同辐射源光谱利用率高低的的基本参数,其定义为

$$\alpha = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda)P(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda)d\lambda} \quad (1)$$

式中: $S(\lambda)$ 表示 EMCCD 的相对光谱响应率,即光谱响应率 S_λ 对其最大值 S_m 的归一化; $P(\lambda)$ 表示景物反射夜天光的相对辐射光谱分布。增大光谱匹配系数,可使微光夜视仪与夜天空的大气窗口光谱响应较好地匹配,从而充分利用夜视下的光能,提高探测目标距离的能力,使观察景物的效果得到改善。

2 EMCCD 与景物反射光谱的匹配系数

CCD 感光面接收的夜天光经过景物反射后的辐射^[6]为

$$P_\lambda = R_\lambda \omega_\lambda \quad (2)$$

式中: P_λ 为景物反射辐射光谱分布; R_λ 为景物的反射系数; ω_λ 为夜天光辐射光谱分布。

下面分别计算 2 种背照明 EMCCD 与暗绿色涂层、粗糙混凝土和绿色草木在晴朗星光和满月光 2 种条件下的光谱匹配系数,积分限取为 300 nm ~ 1 050 nm,其中,EMCCD 的光谱响应数据取自文献^[7],量子效率曲线如图 1 所示。具有红色增透膜的 EMCCD 光谱分布峰值为 700 nm,而蓝色增透膜器件的峰值仅为 400 nm,夜天光光谱分布和 3 种景物的反射系数可通过文献^[8-9]获得。光谱匹配系数的计算结果如图 2~7 所示。图中,曲线 $S_1(\lambda)$ 和 $S_2(\lambda)$ 分别表示蓝膜和红膜 EMCCD 的相对光谱响应率,曲线 $P(\lambda)$ 表示景物在夜天光下的相对反射光谱响应曲线,光谱匹配系数 α 即为相应曲线 $S_i(\lambda)P(\lambda)$ 与横坐标所包围的面积和曲线 $P(\lambda)$ 与横坐标所包围面积相除的结果。

我们将计算的 2 种 EMCCD 对暗绿色涂层、粗

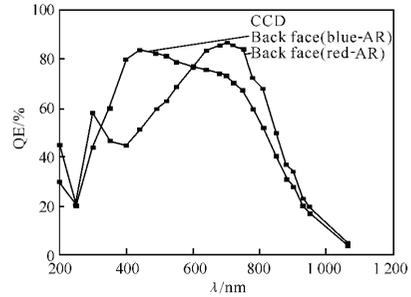


图 1 2 种背照明 EMCCD 的量子效率曲线

Fig. 1 QE curves of two kinds of BV-EMCCDs

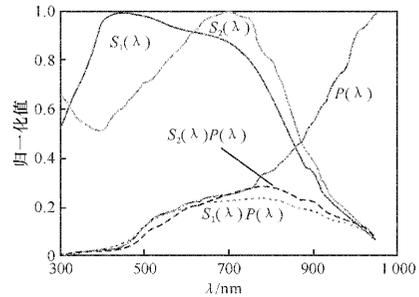


图 2 EMCCDs 在晴朗星光下与暗绿色涂层的光谱匹配

Fig. 2 Spectral matching between EMCCDs and dark green paint in clear starlight

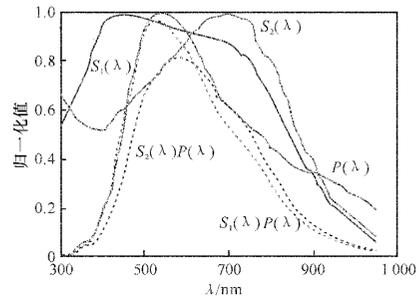


图 3 EMCCDs 在满月光下与暗绿色涂层的光谱匹配

Fig. 3 Spectral matching between EMCCDs and dark green paint in full-moon light

糙混凝土和绿色草木的光谱匹配系数进行综合,并对添加的 S_{251} , S_{252} 以及 GaAs 光电阴极的光谱匹配系数进行比较(数据来自文献^[3]),结果见表 1 所示。通过比较发现:满月光下景物反射光谱峰值波长比晴朗星光下更接近 EMCCD 的光谱响应峰值波长。计算结果表明:峰值波长的接近程度是影响匹配系数的一个重要参数。

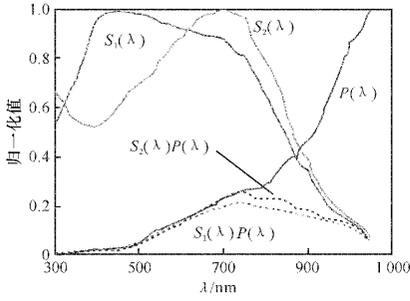


图4 EMCCDs在晴朗星光下与粗糙混凝土的光谱匹配

Fig. 4 Spectral matching between EMCCDs and rough concrete in clear starlight

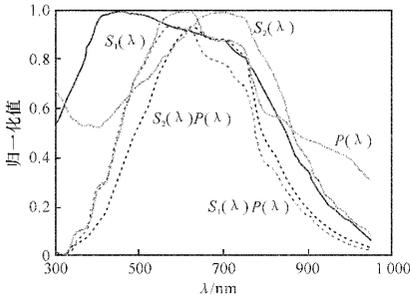


图5 EMCCDs在满月光下与粗糙混凝土的光谱匹配

Fig. 5 Spectral matching between EMCCDs and rough concrete in full-moon light

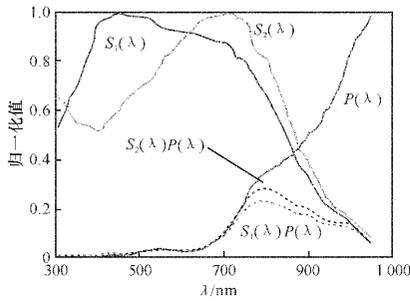


图6 EMCCDs在晴朗星光下与绿色草木的光谱匹配

Fig. 6 Spectral matching between EMCCDs and green vegetation in clear starlight

表1 EMCCD与景物的光谱匹配系数

Table 1 Spectral matching coefficient between EMCCDs and reflective radiation of objects

探测器	峰值波长 /nm	夜空辐射	3种景物的光谱匹配系数α值		
			暗绿色涂层	粗糙混凝土	绿色草木
RedAR	700	满月光	0.729 0	0.719 4	0.629 4
EMCCD		晴朗星光	0.455 5	0.429 8	0.368 5

续表

探测器	峰值波长 /nm	夜空辐射	3种景物的光谱匹配系数α值		
			暗绿色涂层	粗糙混凝土	绿色草木
BlueAR	400	满月光	0.783 2	0.744 8	0.581 6
EMCCD		晴朗星光	0.423 3	0.391 0	0.318 0
GaAs	830	满月光	0.451 9	0.518 4	0.692 7
光电阴极		晴朗星光	0.586 6	0.612 5	0.651 3
S ₂₅₁	480	满月光	0.551 2	0.488 8	0.278 3
		晴朗星光	0.266 2	0.231 8	0.125 5
S ₂₅₂	700	满月光	0.717 4	0.722 4	0.682 0
		晴朗星光	0.574 1	0.563 5	0.484 0

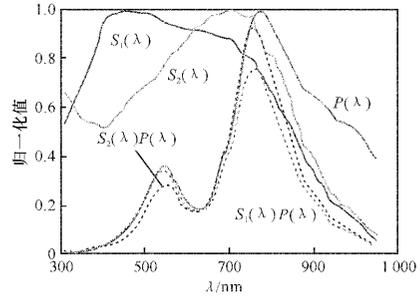


图7 EMCCDs在满月光下与绿色草木的光谱匹配

Fig. 7 Spectral matching between EMCCDs and green vegetation concrete in full-moon light

3 分析与结论

从图表分析中可以得出以下结论:

1) 在满月光下,2种EMCCD与景物反射光谱匹配系数都明显大于晴朗星光下的光谱匹配系数。这是因为景物在晴朗星光下反射辐射光谱的峰值波长接近红外区域,远远大于EMCCD的光谱响应峰值波长;而在满月光下景物反射辐射光谱的峰值波长位于EMCCD光谱响应峰值波长的附近。从一定意义上来讲,典型探测器的峰值位置与景物反射光谱的峰值位置的接近程度直接决定了光谱匹配系数的大小。

2) 在2种光照条件下,2种EMCCD与景物反射辐射光谱匹配的结果均与暗绿色涂层匹配最佳,与绿色草木匹配最差。这是因为3种常见景物中,绿色草木的反射光谱最平坦,峰值也最偏向红外区域。

3) 从图2,图4和图6可以看出,在光照较弱的星光下,光谱匹配系数的大小主要取决于红外波段微光器件的光谱响应。在(900~1 050)nm很窄的范围内,景物反射辐射光谱强度大约增长2.5倍,只要微光器件向红外波段多延伸一些,匹配性能将

有极大的提高。

4) 蓝膜EMCCD的峰值波长接近 S_{251} 光电阴极的峰值波长。在这个前提下,无论在满月光还是晴朗星光下,EMCCD对不同景物的光谱匹配系数均明显大于 S_{251} 光电阴极,而 S_{251} 光电阴极也明显低于 S_{252} 光电阴极,从而导致 S_{251} 光电阴极被淘汰。

5) 红膜EMCCD的峰值波长与 S_{252} 光电阴极相同。在此前提下经比较发现,在满月光下,EMCCD对暗绿色涂层的光谱匹配系数稍大于 S_{252} 光电阴极,其他景物的匹配性能还不如 S_{252} 。这说明EMCCD在特定的应用中才能发挥它的特长,在一般的微光景物观察中可能还不如光电阴极效果好。

6) 红膜EMCCD与峰值波长较大的GaAs光电阴极相比,在满月光下EMCCD对暗绿色涂层和粗糙混凝土的光谱匹配系数更大些;其他情况下均不如GaAs光电阴极,特别是GaAs光电阴极对绿色草木的光谱匹配系数更显优势。

综合以上分析,发现不同器件与景物反射辐射光谱匹配性能的比较要在其光谱响应峰值波长相当的前提下,才具有可比性。

从几种典型常见景物在晴朗星光下反射辐射的完整光谱中可以看出,它们的峰值波长都已经进入红外区域,要实现微光夜视器件对景物的完美匹配,达到理想的视距,就必须使微光器件的光谱响应向红外区域扩展,这有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] DENVIR D J, CONROY E. Electron multiplying CCDs[J]. SPIE,2003,4877:55-68.
[2] SMITH N, COATES C, GILTINAN A J, et al.

- EMCCD technology and its impact on rapid low-light photometry[J]. SPIE, 2004,5499:162-172.
[3] LI Wei, CHANG Ben-kang. Spectral matching factors between GaAs and multialkali photocathodes and reflective radiation of objects [J]. Opt. Eng., 2001,40(5):1-5.
[4] LIU Lei, CHANG Ben-kang. Spectral matching factors between super S25 and New S25 photo cathodes and reflective radiation of objects [J]. Applied Optics, 2004, 43(3): 616-619.
[5] 方如章,刘玉凤.光电器件[M].北京:国防工业出版社,1988.
FANG Ru-zhang, LIU Yu-feng. Optoelectronic devices [M]. Beijing: National Defense Industry Press,1988. (in Chinese)
[6] 李蔚,常本康.夜天光下景物反射光谱特性的研究[J].兵工学报,2000,21(2):177-179.
LI Wei, CHANG Ben-kang. A study on the characteristics of reflection spectrum of field of view under night-sky radiation [J]. Acta Armamentarii, 2000,21(2):177-179(in Chinese)
[7] PAUL J, PETER P, RAY B, et al. The LLLCCD: low light imaging without the need for an intensifier [J]. SPIE, 2001,4306:178-186.
[8] 张鸣平,张敬贤,李玉丹.夜视系统[M].北京:北京理工大学出版社,1993.
ZHANG Ming-ping, ZHANG Jing-xian, LI Yu-dan. Night vision system [M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology,1993. (in Chinese)
[9] RICHARDS E A. Contrast-enhancement in imaging devices by selection of input photosurface spectral response[J]. AEEP, 1969, 28B: 661-675.