

雪崩光电二极管的光谱响应特性

尹丽菊^{1,2} 陈 钱¹ 张灿林¹

(¹南京理工大学近程高速目标探测技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)
²山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要 在微光成像系统中,为了克服限制微光像增强器和红外成像器件灵敏度提高的技术瓶颈,应用了由探测器输出的光子个数推断出目标特征的光子计数技术。采用雪崩光电二极管作为探测器,将其工作状态设置在盖革模式下。通过分析和计算,雪崩光电二极管可以实现单光子数量级的高灵敏度探测。根据夜天光的光谱分布特点和典型目标的反射特性,仿真得到了在晴朗星光环境下雪崩光电二极管与绿色植被、混凝土和暗绿色涂层的光谱匹配因子分别为:0.4972,0.5021和0.4979。提高了夜天光近红外辐射的利用率,为构建以雪崩光电二极管为核心的夜视系统提供了一定的理论依据。

关键词 光电子学;微光成像系统;光谱匹配;雪崩光电二极管

中图分类号 TN22

OCIS 110.0110 040.1345 120.1880

文献标识码 A

Spectral Response Characterization of Avalanche photodiode

Yin Liju^{1,2} Chen Qian¹ Zhang Canlin¹

(¹Ministerial Key Laboratory of JGMT, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China
²School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology,
Zibo, Shandong 255049, China)

Abstract In order to overcome the technical bottleneck which limits the increase of sensitivity of the low light level (LLL) image intensifier and the infrared imaging device, the photon counting technique is applied to the LLL imaging system, which can deduce the characteristics of the objects according to the number of the photon that the detector outputs. The avalanche photodiode (APD) is used for detector and is operated in Geiger mode. It is proved that APD has high sensitivity in the order of a single photon by analyses and calculations. Under the clear starlight night sky illumination, the spectral response characterization of the APD with green vegetation, concrete, and dark green paint is studied. The spectral matching factors are 0.4972, 0.5021 and 0.4979, respectively. The utilization rate of the infrared radiation highly increases in the night sky. These results can be used to provide the theoretical basis for the night vision system construction based on APD.

Key words optoelectronics; low light level imaging system; spectral matching; avalanche photodiode

1 引 言

战场信息可视化适合于高技术战争作战指挥,是数字化部队作战训练的重要支撑,也是数字化战场建设的重要组成部分。特别是当今的战场随着夜战规模和强度的不断增大,要求军队对夜间的观察能力、机动能力和指挥协同能力空前提高。夜视技术不但可以扩展人眼对微弱光图像的探测能力,而且还可以开拓人眼对不可见辐射的接收能力^[1]。因此,夜视技术在现代战争中具有重要的地位。为了实现在黑夜的低能见度条件下获取军事目标和战场的图像信息,掌握先进的夜视技术对于控制战场形势具有至关重要的意义^[2]。

收稿日期: 2010-04-27; 收到修改稿日期: 2010-06-23

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2008049)、教育部博士点基金(20070288011)和南京理工大学自主科研专项计划(2010ZYTS033)资助课题。

作者简介: 尹丽菊(1972—)女,副教授,博士研究生,主要从事光子探测与成像方面的研究。E-mail: ljyinjl@yahoo.com.cn

导师简介: 陈 钱(1964—)男,教授,博士生导师,主要从事光电探测与成像技术方面的研究。

E-mail: chenq@mail.njust.edu.cn

2 现有夜视成像技术

当今应用比较成熟的夜视技术主要是微光像增强夜视技术和红外夜视技术。采用微光像增强技术的第一代、第二代微光夜视仪的最低工作照度可达 10^{-3} lx, 采用 GaAs 光阴极的第三代产品可在 10^{-4} lx 照度下工作, 经过特殊工艺处理后可达 10^{-6} lx。热成像技术的发展从基于单元器件的热像仪, 发展到配合光机扫描的组件热像仪和具有更高密度的红外焦平面阵列 (IRFPA) 器件成像热像仪。从微光和红外成像技术发展的过程来看, 为了提高夜视仪的性能, 在探测器结构和提高其灵敏度等指标上都进行了新的尝试, 但是其成像的核心机理并没发生很大的改变。

2.1 微光像增强器成像原理

微光像增强器成像的主要过程是光电成像器件对目标的反射辐射通过光学系统之后, 在其敏感的光谱范围内积分的过程^[3],

$$B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) \rho(\lambda) \tau(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中 B 为成像信号, $L(\lambda)$ 为夜晚天空的辐射特性, $\rho(\lambda)$ 为目标的光谱反射系数, $\tau(\lambda)$ 为光学系统透过率, $\eta(\lambda)$ 为成像器件的量子效率, λ_1 和 λ_2 分别为光电阴极敏感范围下限和上限波长。

2.2 红外热成像原理

红外热成像的原理是红外成像系统接收到目标自身的红外线热辐射成像的。它根据目标和背景不同温度和辐射系数的差异而引起的热辐射的微弱变化, 经光学系统成像于光电接收器上。若忽略传输损耗, 成像过程可表示为

$$B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda) \tau(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中 $M(\lambda)$ 为目标辐射的出射度, $\eta(\lambda)$ 是成像器件的转换效率, λ_1 和 λ_2 分别是光电转换器件敏感范围下限波长和上限波长。

2.3 现有夜视成像技术局限性分析

由(1)、(2)式可知, 现有夜视成像技术的核心机理是积分效应, 包括时间积分效应和空间积分效应。光电成像器件的有效感应区域的不同像元在一定的空间面积内吸收到一段时间到达该区域的有效能量粒子, 并利用光电效应将吸收的有效能量粒子转化为电信号输出。输出电信号的强弱由有效能量粒子的数量决定, 即输出电信号是成像器件的有效感应区域对时间和空间积分的最终结果。只有当输出电信号满足一定信噪比的前提下, 该输出电信号可以被后续的信号处理电路识别并最终显示成像。光电成像器件必须满足最小的积分时间和积分空间。积分效应是高灵敏度与高速成像相互矛盾的主要原因。同时, 积分效应也是光电成像器件产生热噪声的主要原因, 即积分时间越长, 积分面积越大, 热噪声越明显。因此, 光电成像器件的输出电信号的信噪比不能随积分效应无限增加。对于更低照度等级的极微弱光情况, 成像系统由于受到像增强器积分时间、热噪声等因素的影响, 得到的光电流信号将被噪声信号淹没, 因而无法满足实际应用。

为了实现在极微弱环境下的成像探测, 光子计数技术被引入到成像探测中。即利用弱光照射下探测器输出电信号自然离散的特点, 记录下一定时间内探测器输出的光子数, 根据光子计数值推算出被测目标的信息。研究高灵敏度、低噪声的探测器, 可以有效地辨别出不同景物的光子数, 从而将目标与背景区分开来。

3 雪崩光电二极管高灵敏度探测原理

雪崩光电二极管 (APD) 是利用内光电效应探测光信号的器件。若雪崩光电二极管工作于盖格模式^[4], 即设置器件的反向偏置电压高于击穿电压, 它对光电流的放大作用是基于强场碰撞电离效应, 如图 1 所示。光子载流子在强电场中获得足够的能量, 能够碰撞晶格原子使其电离, 产生新的电子空穴对。新的电子空穴对在电场作用下被加速并再次与晶格发生碰撞产生更多的电子空穴对, 如此循环过程的连锁反应最终导致光电流的雪崩式放大。

对于波长为 λ 的单光子, 其能量为

$$E_p = h \times \nu = hc/\lambda. \quad (3)$$

式中 h 为普朗克常数, ν 为光子振动频率, c 为光速。

设光照度为 E , 光谱光视效能为 $k(\lambda)$, APD 像元直径为 d , 则光通量为

$$\Phi = E \times \frac{\pi d^2}{4}. \quad (4)$$

光功率为

$$p = \frac{\Phi}{k(\lambda)} = \frac{E\pi d^2}{4k(\lambda)}. \quad (5)$$

根据光子特性, n 个光子的光功率

$$p = n \times E_p. \quad (6)$$

根据(5)、(6)两式, 得到光照度和光子数之间的关系

$$E = \frac{4k(\lambda) \times n}{\pi d^2} \times \frac{hc}{\lambda}. \quad (7)$$

根据光子数与探测效率 E_{PD} 关系曲线图 2 可知, 在 -43°C 条件下单光子探测效率可以达到 35%, 5 个光子组成的光子流探测效率可以达到 60% 以上, 10 个光子组成的光子流探测效率可以达到 90% 以上。根据(7)式并如图 3 考虑人眼的光谱反应, 取 $\lambda = 555 \text{ nm}$, 光谱光视效能 $k(\lambda) = 683 \text{ lm/W}$, 若 APD 像元直径 $d = 20 \mu\text{m}$, 计算结果如下: $n=1$ 时, $E = 7.8 \times 10^{-7} \text{ lx}$; $n=5$ 时, $E = 3.9 \times 10^{-6} \text{ lx}$; $n=10$ 时, $E = 7.8 \times 10^{-6} \text{ lx}$ 。

由此可见, 在照度为 10^{-7} lx 的情况下, 探测器单元为 $20 \mu\text{m}$ 雪崩光电二极管也能实现目标探测。所以可以利用雪崩光电二极管实现在极微弱光线下对目标的被动探测^[5], 这为提高成像系统的灵敏度奠定了良好的基础。

4 雪崩光电二极管的光谱特性

4.1 夜天光谱分布特点与典型目标的反射特性

夜天空的辐射是由月光、星光、大气辉光等各种自然辐射源的辐射综合形成的。这些夜间自然光统称为夜天光。在夜间不同条件下其光谱分布也不相同, 从物体辐射理论可知, 太阳到达地球的辐射主要集中在近红外波段的辐射。而夜天空辐射中, 晴朗星空的近红外辐射急剧增加^[6], 比可见光强的多。根据文献[7]可估算出 $0.5 \sim 1.9 \mu\text{m}$ 光谱内光子数约有 $3.18 \times 10^{10}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s})$, 而 $0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 范围内光子数只有 $5.1 \times 10^8/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s})$, 占总数的 1.6%。 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 范围内光子数则有 $2.63 \times 10^{10}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s})$, 占总数的 83%。近红外辐射占整个晴朗夜空全部辐射的 90% 以上。如图 4 所示。

夜视系统能够将人造目标和自然景物区分开来, 是因为两者之间的反射能力存在显著差异。根据实验表明, 以典型的混凝土结构(人造物体)和绿色草木(自然界生长植物)为例, 混凝土反射系数如图 5 所示: 约为

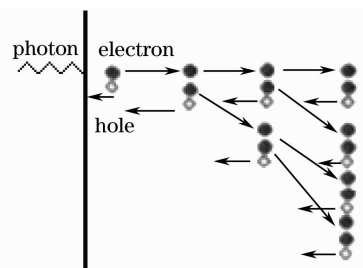


图 1 雪崩光电二极管的雪崩倍增过程
Fig. 1 Avalanche process of APD

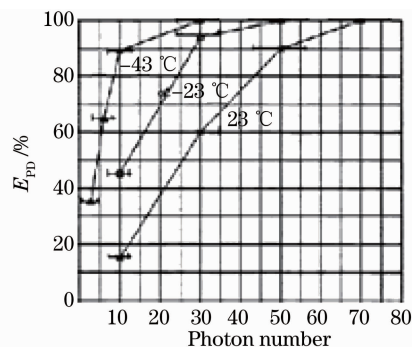


图 2 光子数与探测效率关系曲线图
Fig. 2 Relation of photon number versus photon detection efficiency

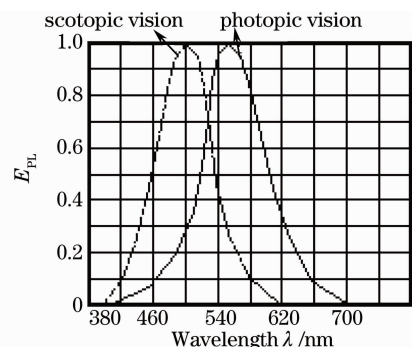


图 3 光谱光视效率
Fig. 3 Photopic luminous efficiency

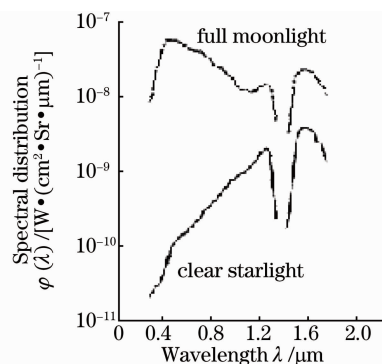


图 4 夜天光的光谱分布
Fig. 4 Spectral distribution of night sky radiation

40%，其反射系数除在 0.7 μm 和 1.0 μm 附近有微小峰值外，在整个波长范围内分布较为平坦。而绿色草木反射系数成抛物线分布，在波长 0.6 μm 以外迅速增加，在 0.8~1.1 μm 之间达到最大值，之后又迅速减小。暗绿色涂层的反射系数较低，约为 10%。充分利用反射系数的差距可以显著提高探测器对目标和伪装的识别能力。

三代微光像增强器 GaAs 光电阴极的量子效率(E_Q)如图 6 所示,将其作用于图 4 中,在 0.5~2 μm 的晴朗夜间天空辐射中的利用率 η 仅为 1%。

$$\eta = \int_{0.5}^{0.9} \varphi_{\lambda} E_Q d\lambda / \left(\int_{0.5}^{2} \varphi_{\lambda} d\lambda \right) \approx 1\%, \quad (8)$$

式中 φ_{λ} 为晴朗星空夜间辐射光谱。

所以,为了提高成像系统的探测灵敏度,获得较高质量的微光夜视图像,可以从提高夜天空的光谱利用率入手。这就需要提高成像系统中探测器的光谱响应,使它的光谱响应曲线尽量覆盖夜天空辐射能量的近红外波长范围。

4.2 雪崩光电二极管与典型目标的光谱匹配

雪崩光电二极管在近红外波段内具有高灵敏度,低噪声响应特性^[8]。如图 7 所示,雪崩光电二极管的探测效率在 1100~1650 nm 波段大于 2%,而且在 1550 nm 处达到 10%。

雪崩光电二极管与典型目标的光谱利用率可以通过光谱匹配因子来体现。光谱匹配因子是微光夜视系统的重要参数,它对夜视系统的视距评估起着重要作用^[9]。光谱匹配因子越大,表示器件在一定环境条件下与目标的光谱匹配效果越好,微光夜视系统获得的图像质量就越高。光谱匹配因子越小,则匹配性越差,从而观测效果也越差^[10],光谱匹配因子 α 定义为

$$\alpha = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s_{\lambda} p_{\lambda} d\lambda / \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} p_{\lambda} d\lambda \right), \quad (9)$$

式中 s_{λ} 和 p_{λ} 分别为雪崩光电二极管归一化的光谱灵敏度和景物反射辐射光谱分布。通过计算得到在

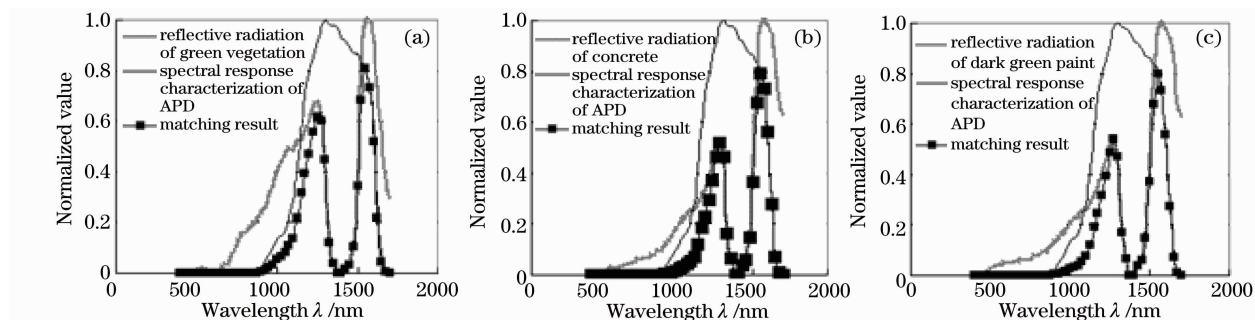


图 8 晴朗星空下雪崩光电二极管与绿色植被(a),混凝土(b)和暗绿色涂层(c)的光谱匹配结果

Fig. 8 Spectral matching result between APD and green vegetation (a), concrete (b) and dark green paint (c) in clear starlight

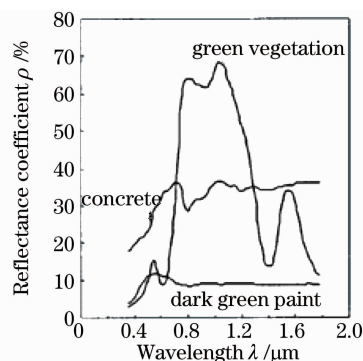


图 5 典型目标的反射系数

Fig. 5 Reflectance coefficient of some common materials

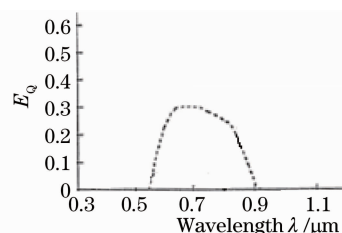


图 6 GaAs 三代光电阴极量子效率

Fig. 6 Quantum efficiency of Gen-III photocathode

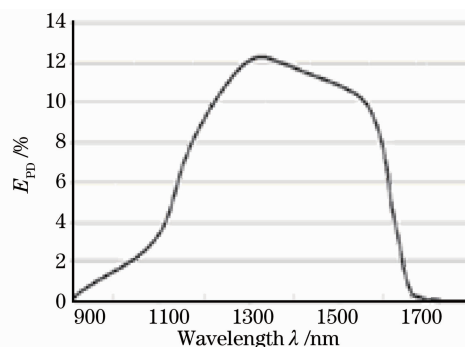


图 7 雪崩光电二极管探测效率

Fig. 7 Photon detect efficiency of APD

晴朗星空条件下雪崩光电二极管与绿色植被、混凝土和暗绿色涂层的匹配结果。

光谱匹配因子反映了景物对夜天光反射辐射与器件光谱响应的匹配程度。它与器件的光谱敏感度、夜天光辐射的光谱分布和景物的反射系数有关。通过图 8 可以看出,雪崩光电二极管的光谱灵敏度曲线在景物的反射辐射波长范围内几乎都有响应,两者在图形上具有较好的吻合性。雪崩光电二极管与绿色植被、混凝土和暗绿色涂层的光谱匹配因子分别为 0.4972,0.5021 和 0.4979,它们之间具有良好的匹配效果,大大提高了夜天光近红外波段光谱的利用率。因此雪崩光电二极管可以有效地响应目标的近红外辐射,实现在极微弱光线下对目标的被动探测。

5 结 论

雪崩光电二极管具有单光子探测灵敏度,并且在近红外光谱范围内具有较高的光谱响应度。它与绿色植被、混凝土和暗绿色涂层的光谱匹配度均大约为 50%。如果将雪崩光电二极管应用到微光成像系统中,这无疑为夜视系统增添了一种高灵敏信息探测手段,使战场感知能力得到增强。积极开展雪崩光电二极管成像技术的研究,对进一步提高夜视技术水平具有重要的理论与现实意义。

参 考 文 献

- Zhang Jingxian, Li Yudan, Jin Weiqi. Low Light Level and Infrared Imaging Technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995
张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995
- Jin Weiqi, Liu Guangrong, Bai Tingzhu *et al.*. Some technological progresses and their analysis in night vision[J]. *Optical technique*, 2005, **31**(3): 405~409
金伟其, 刘广荣, 白廷柱 等. 夜视领域几个热点技术的进展及分析[J]. 光学技术, 2005, **31**(3): 405~409
- Zhu Yongjian, Chen Qian, Wang Xiaoxuan. Modeling and simulation of LLL imaging based on ICCD[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2007, **31**(1): 101~104
祝永坚, 陈 钱, 王晓璇. 基于 ICCD 的微光成像建模与仿真[J]. 南京理工大学学报, 2007, **31**(1): 101~104
- G. L. William, S. Christopher, L. A. Frank *et al.*. Single photon detection using Geiger mode CMOS avalanche photodiodes[C]. *SPIE*, 2005, **6013**: 73~81
- H. D. Vinit, G. Georgiy, G. Dmitri *et al.*. Single photon counting module based on large area APD and novel logic circuit for quench and reset pulse generation[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, 2007, **13**(4): 926~932
- Zhu Yongjian, Chen Qian, Wang Xiaoxuan. Study on comparison of ground reflective characteristics between day and night [J]. *Acta Armamentar*, 2007, **28**(4): 436~439
祝永坚, 陈 钱, 王晓璇. 白天与夜间地面反射特性的对比研究[J]. 兵工学报, 2007, **28**(4): 436~439
- L. J. Kozlowski, W. E. Tennant, M. Zandian *et al.*. SWIR staring FPA performance at room temperature[C]. *SPIE*, 1996, **2746**: 93~100
- Liu Wei, Yang Fuhua, Wu Meng. A new method to investigate InGaAsP single-photon avalanche diodes using a digital sampling oscilloscope[J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2006, **27**(10): 1711~1716
- Liu Wei, Fu Jiangtao, Chang Benkang. Analysis on spectrum response and visual range of low light level night vision system under laser illuminate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 312~315
刘 伟, 付江涛, 常本康. 激光助视下微光夜视仪光谱响应和视距分析[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 312~315
- Di Huige, Qian Yunsheng, Zhao Shuang. Research for visual range of low light level imaging system under the laser aids [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1357~1360
狄慧鸽, 钱芸生, 赵 爽. 微光夜视系统在激光助视下的视距研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(10): 1357~1360