

## 紫外告警技术

赵勋杰<sup>1</sup>, 张英远<sup>2</sup>, 高雅允<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 光电工程系, 北京 100081;  
2. 西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 紫外告警是近 20 年发展起来的一种导弹告警技术。介绍了紫外告警技术及其相关技术的发展情况, 包括大气对紫外线的传输特性、目标和背景紫外辐射特性、紫外线探测器件和探测技术等研究发展情况, 最后还介绍了紫外告警的战术应用。

**关键词:** 紫外告警; 紫外线传输特性; 紫外线探测器

**中图分类号:** TN977 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)01-0005-05

## UV warning technology

ZHAO Xun-jie<sup>1</sup>, ZHANG Ying-yuan<sup>2</sup>, GAO Zhi-yun<sup>1</sup>

(1. Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;  
2. School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** UV warning technology developed in the recent twenty years is used for missile approaching warning. The domestic and international research and development of UV warning technology are introduced. The UV transmission in the atmosphere, the UV radiance characteristic of target and background, the UV photoelectric detectors, and the UV detection technology are discussed. In the end, the tactical applications of the UV warning are introduced.

**Keywords:** UV warning; UV transmitting characteristic; UV detector

### 0 引言

紫外告警是一种先进的导弹告警技术, 是光电告警技术的一个重要组成部分。同红外告警相比, 紫外告警设备具有虚警低、不需要制冷、体积小和质量轻等优点。早在 20 世纪 60 年代国外就已经开始了在紫外波段探测洲际弹道导弹发射的研究工作, 对紫外辐射理论进行了大量的研究, 掌握了紫外波段大气传

输特性, 开发了大气传输计算程序。20 世纪 80 年代初, 紫外告警技术的研究取得了突破性进展, 从非成像型到成像型。紫外告警技术在军事需求的牵引下不断发展, 并促进了紫外探测器、紫外材料和相关技术的发展。

紫外告警技术研究的内容包括:

- (1) 紫外线的大气传输特性研究;
- (2) 目标和背景紫外辐射特性研究;

收稿日期: 2002-07-27; 修订日期: 2003-08-09

作者简介: 赵勋杰(1960-), 女, 辽宁朝阳人, 博士生, 研究员, 主要从事光电探测技术方面的研究工作。

- (3) 紫外线探测器件和探测技术研究;  
 (4) 紫外告警设备的评定。

## 1 紫外线在大气中的传输特性

美国在 20 世纪 70 年代中后期开始研究紫外线的低层大气传播特性,奠定了紫外线的大气传输理论基础,建立了与实际较为符合的计算模型和计算软件<sup>[1]</sup>。美国空军地球物理实验室相继编写了 Lowtran6、Lowtran7 等大气辐射传输软件,光谱科学公司编写了 Modtran 大气辐射传输软件。Modtran 软件与 Lowtran 系列软件相比,提高了光谱分辨率,扩大了大气散射分子的范围。使用这些软件可以计算各种典型大气条件下不同海拔高度、沿各种路径、不同能见度条件下的大气对紫外线的透过率,可将其作为紫外传感器设计的参考。

大气对紫外线传输产生影响的主要因素有:氧分子的吸收、臭氧分子的吸收、瑞利散射、气溶胶的吸收和散射。在波长 0.2~0.3  $\mu\text{m}$  的紫外辐射区,氧有很强的吸收带。在 0.25  $\mu\text{m}$  以上,氧的吸收效应同其他衰减效应相比已不明显。臭氧是大气中吸收紫外辐射的重要气体,臭氧主要分布在 10~50 km 高度层,极大值在 20~25 km 高度层。臭氧在 0.253  $\mu\text{m}$  附近有强吸收带。瑞利散射可描述为大气分子和原子对电磁波的弹性散射,发生在粒子的半径比指定波长小得多的情况下。因为单个分子和原子的直径为 0.001~0.01  $\mu\text{m}$  量级,对波长 0.2~0.3  $\mu\text{m}$  波段的紫外辐射,瑞利散射是一种较强的机制。气溶胶是悬浮于大气中的固体或液体粒子,包括水滴、冰晶、灰尘微粒、各种凝结核。气溶胶对紫外的衰减包括吸收和散射两种过程,但吸收比散射弱得多。

大气对紫外辐射透过率曲线,是用 Lowtran7 软件计算的,结果如图 1 所示。选用的条件是:中纬度夏季,大气能见距离 15 km,5 km 高空,沿水平路径传输 5 km。由图 1 可以看出,由于大气的吸收和散射,大气对 0.2~0.3  $\mu\text{m}$  波段的透过率很低。因此在低层大气中,形成了所谓日盲区。对于军事紫外探测设备而言,若工作在 0.2~0.3  $\mu\text{m}$  的日盲波段,由于军事目标(如飞机和火箭的尾焰)的紫外辐射强度高于太阳的紫外辐射,则目标会在背景上形成亮点,因此 0.2~0.3  $\mu\text{m}$  紫外波段是用于紫外侦察告警的重要波段。

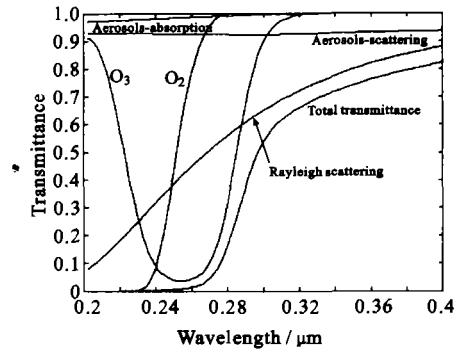


图 1 大气对紫外辐射透过率与波长的关系

Fig. 1 Relationship between UV transmittance and wavelength

## 2 目标和背景紫外辐射特性

### 2.1 导弹尾焰的紫外辐射特性

在固体或液体燃料的导弹尾焰中,产生紫外辐射的主要原因有:温度辐射、化学发光、探照辐射、粒子辐射、分子电辐射,其中最主要的贡献是温度辐射和化学发光。图 2 是美国 AFGL 实验室测得的导弹尾焰光谱<sup>[2]</sup>,在 0.263  $\mu\text{m}$  附近出现的吸收峰是由于 ALCL 的吸收产生的。

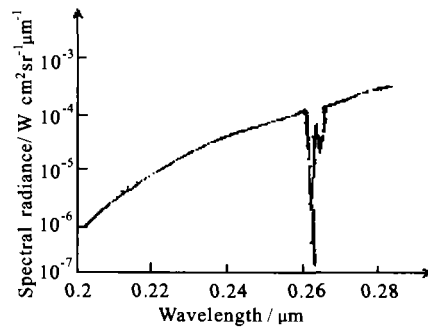


图 2 导弹尾焰辐射光谱

Fig. 2 Radiate spectrum of missile flame

美国的研究人员在观测和假设的基础上对导弹尾焰建立了数学模型<sup>[3]</sup>。此模型把气体分为空气和导弹尾焰喷射气流,将粒子按大小划分为 5 种类型,并对每种粒子的辐射进行计算。根据这些模型计算出 4 个时间点的流场,再计算出由流场中的粒子产生的辐射信号,而把流场模型与辐射模型相结合,就可以得到导弹在不同高度、不同速度下的辐射强度。

### 2.2 天空背景紫外辐射特性

天空中大气辉光覆盖了从 0.1~0.39  $\mu\text{m}$  整个

紫外频谱。大气辉光主要是由于不能到达地面的太阳紫外辐射在高层大气中激发原子并与分子发生低几率碰撞产生的。大气辉光由钠原子、氧原子、氧分子、氢氧根离子以及其他连续发射谱组成。图 3 为天空背景的紫外辐射谱。

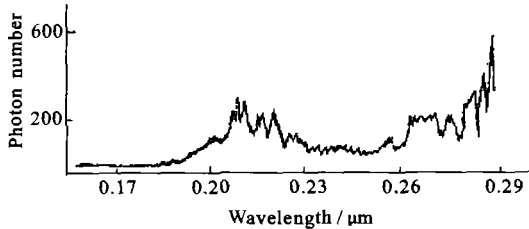


图 3 天空背景的紫外辐射谱  
Fig. 3 Ultraviolet radiant spectrum of the sky

### 3 紫外探测器件

#### 3.1 真空器件

真空型紫外器件既是发展历史最久,又是应用最为广泛的一类紫外探测器件。日盲型紫外光电倍增管与一般光电倍增管的不同点在于紫外光电倍增管光窗透紫外线,并且其光阴极对可见光不敏感。常用的光电阴极有  $Rb_2Te$ 、 $Cs_2Te$  或  $KBrCsI$ 。通常光窗采用石英和  $MgF$  材料。

自 20 世纪 80 年代以来,随着微通道板(MCP)技术的发展,带有 MCP 结构的光电倍增管(MCP-PMT)和带有 MCP 结构的近贴的聚焦型紫外像管相继出现。与传统的打拿极结构相比,MCP 具有响应快、抗强光、分辨率高、体积小等优点,而且还可得到信号的二维图像,实现高分辨率成像探测。

MCP-PMT 与传统的紫外光电倍增管的基本功能没有多大差别,只是用 MCP 代替了原来的光电倍增器,图 4 是 MCP-PMT 的电原理图。

国外在 20 世纪 80 年代就已形成了实用的 MCP-PMT 产品系列。我国在这方面起步较晚,但目前南京电子管厂已开发出 GDB-601 型日盲 MCP-PMT,该 PMT 采用增强型日盲紫外光阴极,近贴聚焦结构,体积比传统的 PMT 减小了一半以上。

带有 MCP 结构的近贴的聚焦型紫外像管可以很方便地直接耦合到固体摄像器件上来进行电视观察及后续图像存储和处理,图 5 是采用这种像管对紫外辐射源成像的原理示意图。辐射源发出的光经物镜会聚在像管的光阴极上(光阴极前加紫外滤光片,滤

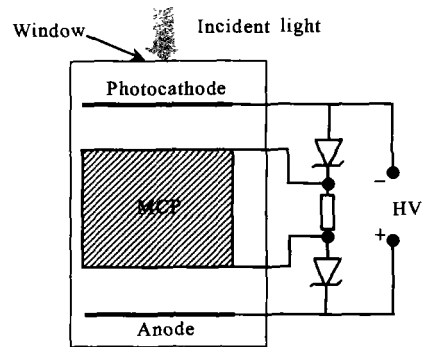


图 4 MCP 光电倍增管电原理图  
Fig. 4 Schematic of MCP

掉工作波段以外的光),紫外线照射光阴极产生电子,电子通过微通道板放大后轰击荧光粉产生可见光图像,可见光图像经中继光学系统(透镜或光锥)耦合到普通 CCD 光敏面上,最后经驱动电路输出视频信号。

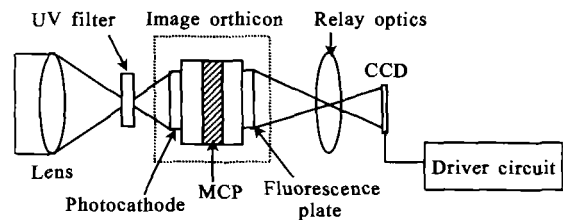


图 5 采用普通 CCD 器件对紫外源成像原理示意图  
Fig. 5 Block diagram of an UV imaging system

应用到紫外探测器件上的又一新技术是多阳极阵列技术。多阳极结构 MCP 器件的原理如图 6 所示。紫外线照射到光阴极上,通过 MCP 放大后形成电子束,电子束成像到阳极阵列上后经过特殊的解码电路形成视频信号。

采用阳极结构的 MCP 器件,具有很高的量子效率和动态响应能力。它根据不同的阳极结构可分为:连续编码机制和离散编码机制。连续编码机制的 MCP 器件又包含有楔状和带状阳极结构、螺旋阳极结构以及延时阳极结构。离散编码机制的 MCP 器件包含多阳极微通道阵列(MAMA)器件。

紫外电子轰击型 CCD(UV-EBCCD)是一种灵敏度极高的探测器件,UV-EBCCD 工作原理如图 7 所示。紫外线照射到紫外光阴极上产生光电发射,光电子通过电场磁场的聚焦和加速,以高能量轰击 CCD 器件,经 CCD 控制电路输出视频信号。

#### 3.2 固体紫外探测器件

固体紫外探测器件是一种新研制的紫外探测器

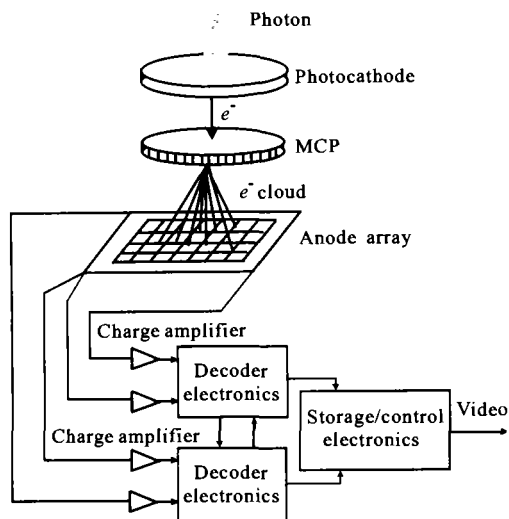


图 6 采用阳极结构的 MCP 器件工作原理示意图

Fig. 6 Block diagram of multi-anode microchannel array detectors

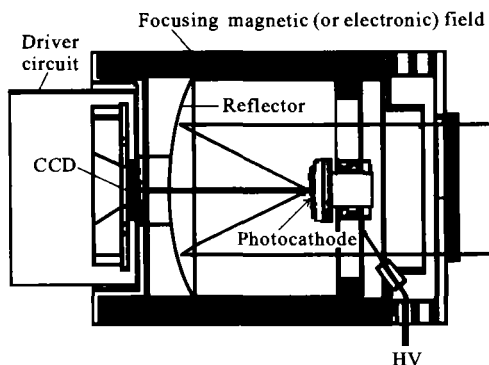


图 7 EBCCD 的工作原理示意图

Fig. 7 Schematic of EBCCD

件。该类器件有：紫外增强型硅光电二极管，紫外雪崩二极管，GaAsP 和 GaP 加膜紫外光电二极管，GaN 单晶紫外光电二极管，GaN 和 GaAlN 探测器，紫外 CCD 等。固体探测器件在实际应用中具有许多优点，如体积小、耐劣环境、工作电路简单等。

紫外增强型硅光电二极管是最早出现的固体紫外器件，这类器件是把普通的 0.32 μm 波段的截止型硅光电二极管的不透紫外的窗口材料替换为石英材料，如国产的 UV-1~3 系列，美国的 VTB-UV 系列以及日本滨松公司生产的 GaAsP 二极管和 GaP 二极管。美国 APA 光学公司研制的 GaN 单晶光电二极管，是在蓝宝石衬底上加镀 GaN 薄膜阴极而制成的，其工作波段为 0.2~0.365 μm，且光谱响应曲线在 0.375 μm 处有一很陡的下降，所以这一产品可

以称为纯紫外探测器件。

Advance Photonix 公司生产了一种经加膜处理的、短波限达 0.15 μm 的紫外雪崩二极管。常规的 APD 在紫外区量子效率是很低的，但这种器件在制造时把一种磷酸材料作为荧光膜加镀在硅类光电感光面的表面，外界紫外照射使荧光膜层发射 0.525 μm 左右的荧光，硅光电材料对其灵敏度远高于对紫外光本身的响应灵敏度，这样就使 APD 在紫外波段有较好灵敏度。

目前可用于紫外成像的固体 CCD 器件有两种：一种是对普通 CCD 光敏元表面加膜 CCD (UV-CCD)，另一种是薄型背照式 CCD (BT-CCD)。CCD 都是由半导体硅材料制成的，光谱响应范围为 0.1~1.1 μm。UV-CCD 是通过在 CCD 表面覆盖一薄层荧光材料，荧光膜层先吸收紫外光再发射出可见光，完成紫外到可见光的光谱转换。其光谱曲线见图 8。

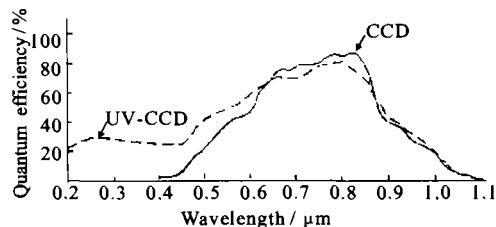


图 8 紫外 CCD 光谱响应曲线

Fig. 8 Spectral response of UV-CCD

随着半导体工艺的发展，研制出了量子效率很高的 BT-CCD。由于紫外光波长较短，穿透能力较差，多晶硅电极将吸收几乎所有的紫外光，所以通常前照明 CCD (FI-CCD) 对紫外光灵敏度很底。BT-CCD 通过减薄方法去除 CCD 基片的大部分硅材料，仅保留含有电路器件结构的硅薄层，使成像光子从 CCD 背面无需通过多晶硅门电极，即可进入 CCD 进行光电转换和电荷积累，克服了通常前照式 CCD 的性能限制。BT-CCD 除在可见光谱区域有极高的量子效率外，在紫外光谱区也有很高的量子效率。图 9 是美国 Hamamatsu 公司新产品 S9060 型 CCD (1 044 × 256) 的光谱响应曲线。

#### 4 紫外告警设备

自 20 世纪 80 年代美国推出第一台紫外告警设备 AN/AAR-47 以来，已先后有以色列、南非、俄罗

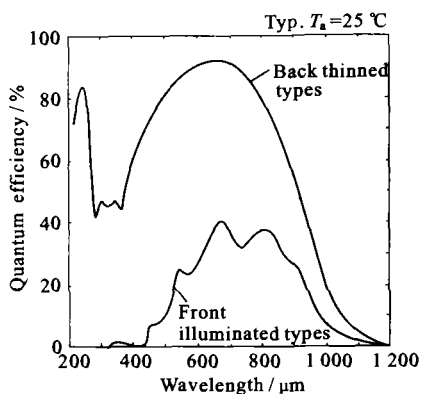


图9 前照式 CCD 和背照式 CCD 光谱响应曲线

Fig. 9 Spectral response of FI-CCD and BT-CCD

斯、德国、法国等十几家公司投入该领域,研制出十几个型号的设备,紫外告警体制已经历了三代革新。

#### 4.1 第一代紫外告警设备

第一代紫外告警设备大多是以日盲型光电倍增管为探测器,概略探测紫外辐射源方向。该类告警设备探测灵敏度和角分辨率低、虚警率高。通常由4个传感器实现360°的方位覆盖,角分辨率为90°。属于这类体制的告警设备有:美国Loral公司的AAR-47,以色列Lafal公司的吉它-300、吉它-320,南非的MAW,其中以AAR-47为典型代表。

#### 4.2 第二代紫外告警设备

第二代紫外告警设备以位敏器件为探测器。与第一代紫外告警设备相比角分辨率、探测能力、目标识别能力都明显提高。属于这类告警设备有美国西屋公司的AN/AAR-54(V)和Loral公司的AN/AAR-47A和AN/AAR-47B。

#### 4.3 第三代紫外告警设备

第三代紫外告警设备使用20世纪80年代后期发展起来的成像型紫外探测器。成像型探测器具体可分为普通CCD器件、采用阳极结构的MCP器件、EBCCD和UV-CCD、BT-CCD等类型。成像型紫外告警设备具有定向精度高、识别能力强、探测灵敏度高和虚警率低的优点,并具有态势估计能力。定向精度优于1°。属于该体制的告警设备有美国Litton公司的AMAMS、法国MATRA公司和德国的宇航动力公司联合研制的MILDS-2,以及以色列Lafal公司的Guitar-350型紫外告警设备等。

### 5 紫外告警设备的战术应用

在低空突防、空中格斗、近距支援、对地攻击、起

飞着陆等状态,作战飞机易受到短程红外制导的空一空导弹和便携式地一空导弹的攻击。导弹威胁告警在战场上是极其重要的。

紫外告警设备能实时进行导弹威胁告警。根据导弹的不同,告警距离通常为3~6 km。在应用时告警设备一般由4~6个传感器和处理器组成。装备直升机时通常安装4个传感器,实现360°方位的警戒。装备大型固定翼飞机时,通常用6个传感器完成全空域的警戒。第三代成像型紫外告警设备具有多目标探测能力,并能对导弹的威胁等级进行排序,精确给出威胁目标的方向。紫外告警设备可以与定向红外干扰机或红外弹投放器一起组成导弹对抗系统。红外弹的投放只需知道来袭目标的概略方向即可,所以第一代紫外告警就能完成引导红外弹投放的任务。定向红外干扰机是将红外能量会聚成窄光束,指向来袭导弹的导引头,使导引头不能正常工作而丢失目标。定向干扰机的光束角通常约为3°,因此需要角分辨率有较高的导弹告警设备引导。第二代和第三代紫外告警设备角分辨率较高,可以承担引导定向红外干扰机的任务。

### 6 结束语

综上所述,随着新材料和新器件的出现,紫外探测器件的性能不断提高,紫外告警设备的性能也随之提高。告警设备的角分辨率的提高、探测距离的增大和虚警率的降低使其应用平台不断扩展。从最初只装备直升机、低速固定翼飞机,到装备高速固定翼飞机、坦克装甲车等。随着科学技术的发展,紫外告警设备的性能将会有更大的提高。

#### 参考文献:

- [1] 张忠廉,刘榴娣. 紫外线技术在军事上的应用研究[J]. 光学技术, 2000, 26(4): 289-293.
- [2] 许强. 国外紫外告警技术发展综述[A]. 电子对抗学会第9届年会论文集(下)[C]. 1995. 398-402.
- [3] 张建勇,钟生东. 紫外线技术在军事工程技术中的应用[J]. 光学技术, 2000, 26(4): 308-312.