

·光电系统与amp;设计·

## 高超音速飞行器红外探测预警分析

王忆锋, 陈树勤

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:**当目标飞行速度高于  $5 Ma$  时, 其辐射峰值波长位于短波红外的的工作范围, 并且具有辐射功率大、随时间变化快等显著特征, 最适于被短波红外传感器探测. 短波红外探测器将大气粒子反射的目标的入射光子转换为电信号. 通过监测电信号幅度的变化来判断有无强辐射源趋近, 从而将预警时间提前.

**关键词:**高超音速飞行器; 红外预警; 短波红外; 单光子探测器

中图分类号: V211

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)04-0021-02

## Analysis of Infrared Detection and Early Warning for Hypersonic Vehicle

WANG Yi-feng, CHEN Shu-qin

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** When the flight velocity of a target is more than  $5 Ma$ , its radiation peak wavelength falls within the range of shortwave infrared (SWIR), and with the distinctive characteristics such as stronger in radiated power and varying fast with time, it is easy to be detected by the SWIR sensor. SWIR detector transduces the incident photons of the target reflected by atmospheric particles into electrical signals. Through monitoring the amplitude change of electrical signals, a strong radiation source approaching can be estimated, and then the early warning time can be advanced.

**Key words:** hypersonic vehicle; infrared early warning; shortwave infrared; single photon detector

海洋/天空、天空/地面等构成了高超音速飞行器的背景. 虽然大气辐射理论中有各种理论模型和计算方法<sup>[1,2]</sup>, 但其计算的实用价值并不明显. 基于高超音速飞行器的红外辐射特征, 分析了红外探测预警的概念. 单光子短波红外 (SWIR,  $0.75 \sim 3 \mu\text{m}$ ) 探测器是实现探测预警的关键技术之一.

### 1 高超音速飞行器红外探测预警的概念

相对于 SWIR 探测器来说, 在远距离上高超音速飞行器是一个点源目标, 它向四周辐射能量, 其中经过散射后可能有部分能量落在探测器上. 至于这些能量是否可以被转换为可探测的电信号, 主要取决于 2

个条件, 一个是目标本身的辐射是否足够强; 另一个是探测器的灵敏度是否足够高. 当飞行速度高于  $5 Ma$  时, 飞行器将会碰到“热障”, 即因速度增高而引起飞行器表面加热造成的障碍. 在高超音速状态飞行时, 物体温度会超过  $2400^\circ\text{C}$ . 根据维恩位移定律, 黑体辐射的峰值波长  $\lambda_m$  与温度  $T$  有下列关系

$$\lambda_m = \frac{2898}{T} (\mu\text{m}) \quad (1)$$

以  $T = 2700 \text{ K}$  为例作一个简单估算, 由式(1)可以算出辐射的峰值波长  $\lambda_m = 1.07 \mu\text{m}$ , 处在短波红外波段的覆盖范围, 换言之, 即适宜于使用 SWIR 探测器. 根据半导体能带理论, 截止波长  $\lambda_{\text{cutoff}}$  与半导体材料的禁带宽度  $E_g$  有如下关系

收稿日期: 2010-07-29

作者简介: 王忆锋(1963-), 男, 湖南零陵人, 工学士. 高级工程师. 曾赴美国内布拉斯加大学林肯分校计算机系做国家公派访问学者. 目前主要从事器件仿真研究.

$$\lambda_{\text{cutoff}} = \frac{1.24}{E_g} (\mu\text{m}) \quad (2)$$

一般取  $\lambda_{\text{cutoff}} = (1.1 \sim 1.3) \lambda_m$ , 由此可以确定  $E_g$ , 并进而对 SWIR 探测器的材料选择作出判断。

根据斯忒藩-玻耳兹曼定律, 对于绝对温度为  $T$  的黑体, 其总辐射度为

$$M = \sigma T^4 \quad (3)$$

其中,  $\sigma$  为斯忒藩-玻耳兹曼常数, 即辐射度与热力学温度的四次方成正比, 随着温度的升高, 目标辐射度急剧增大. 一般飞机典型的巡航速度为 0.7 Ma; 当空气温度为 230 K 时, 随着马赫数的增加, 飞机蒙皮温度在 230~550 K 的范围内变化<sup>[3]</sup>. 高超音速飞行器的温度升高足有一个数量级, 导致其辐射能量有 5 个数量级左右的增加; 或许可以估计, 散射到 SWIR 探测器上的能量也会有数量级上的增加。

## 2 对 SWIR 探测器的要求

从概念上说, 高超音速飞行器预警在某种程度上类似于空间目标探测中经常遇到的极微弱光回波的探测问题<sup>[4]</sup>, 例如, 远距离卫星可收到数个至数百个光子的回波, 而月球反射的回波还不到一个光子; 在噪声远远大于信号的情况下探测并分离出可用信息, 需要用到终极的光子传感器——单光子探测器 (single photon detector, SPD)。

SPD 是利用弱光照射下光子探测器输出电信号自然离散的特点, 采用脉冲甄别技术和数字计数技术把极其弱的信号识别并提取出来. 一般而论, 常见的 SPD 有光电倍增管 (PMT)、雪崩光电二极管 (APD)、增强型光电二极管 (IPD)、微通道板 (MCP)、微球板 (MSP) 和真空光电二极管 (VAPD)、超导单光子探测器 (SSPD) 等等<sup>[5,6]</sup>. 对于文中所讨论的特定应用背景, 综合考虑到工作波长、量子效率、功耗、体积、工作电压等因素, 基于 HgCdTe 材料的 SWIR/APD 可能是最具潜力的候选者之一。

APD 是一种具有内部放大增益作用的 pn 结, 工作时加反(向)偏(置)电压. 载流子在被电场扫过空间电荷区时, 不断与半导体晶格发生碰撞. 当反偏电压接近击穿电压时, 碰撞传递的能量足以使一个半导体原子电离化, 引起一个电子从价带跃迁到导带, 从而形成一个电子-空穴对, 这种现象称为碰撞电离. APD 中电子-空穴对的产生以及电流增益可以用碰撞电离率来描述. 设  $\alpha_h$  是空穴碰撞电离率,

$\alpha_e$  是电子碰撞电离率. 通常情况下  $\alpha_h$  和  $\alpha_e$  是不同的. 根据它们的相对大小, 电离系数  $k$  可以定义为

$$k = \begin{cases} \frac{\alpha_h}{\alpha_e}, & \alpha_h < \alpha_e \\ 0, & \text{只有一种载流子} \\ \frac{\alpha_e}{\alpha_h}, & \alpha_e < \alpha_h \end{cases} \quad (4)$$

电离系数  $k$  越小, 噪声越低. 电离系数  $k$  也可以不加区分地写为

$$k = \frac{\alpha_e}{\alpha_h} \quad (5)$$

在这种定义下,  $k$  越大或越小, 则器件的性能越好<sup>[7]</sup>. HgCdTe 材料的能带结构表明, 在禁带宽度  $E_g = 0.90 \text{ eV}$  ( $\lambda_{\text{cutoff}} \approx 1.4 \mu\text{m}$ ,  $x \approx 0.7$ ) 附近, 电子从价带顶激发到导带顶所需的能量, 与电子从分裂价带顶部激发到价带顶部所需的能量相等, 这时出现共振现象. 在共振区域及非共振区域, 均可以获得比 1 小很多的  $k$  值<sup>[8]</sup>. 在共振区域, 空穴放大占主导地位, 可以构成  $\lambda_{\text{cutoff}}$  较小(即 SWIR)的空穴 APD<sup>[9]</sup>.

在特定的反偏电压下, 流过 pn 结的反偏电流会快速增大, 这时的反偏电压称为击穿电压. 简单地说, 以击穿电压为界, APD 可以分为线性模式 APD (反偏电压低于击穿电压, 此时输出光电流与输入光功率成线性关系) 和盖革模式 (Geiger mode) APD (反偏电压高于击穿电压, 此时光子计数是非线性的)<sup>[10]</sup>. 由于受限于既有放大器技术, 线性模式的 APD 不能以足够低的噪声提供满足单光子探测要求的高增益, 故实用中 APD 要工作在盖革模式. 目前, 盖革模式 APD 是较为成熟的技术, 其单光子探测灵敏度的实现是以较高的暗电流和较长的死时间为代价实现的. 近年来, 随着 APD 技术、亚微米 CMOS 技术以及低噪声放大器设计技术的进步, 已使线性模式的单光子计数 APD 成为可能<sup>[11-15]</sup>. 与盖革模式 APD 相比, 线性模式 APD 具有一系列优点, 特别适合于远距离目标的探测预警。

## 3 结束语

从概念分析上说, 通过探测一定空间范围内的短波红外能量信号的异常变化, 有可能实现对高超音速飞行器的视场外红外探测预警. 这种异常变化由于属微弱信号, 故对探测器的灵敏度有很高的要求, 例如可能要求具有接近单光子探测的灵敏度。

(下转第 30 页)

通过调用函数 Write To Measurement File 可以实时将光斑信息数据存储下来,方便以后查看使用。

### ②截取部分显示

这部分的显示原理跟整幅图像的显示相同.区别仅在于输入端输入的不同:这部分输入端输入的是截取的矩形图像,而整幅图像显示框图输入的是采集到的整幅光斑的图像。

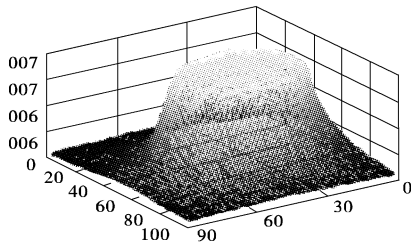


图 7 实例采样

## 3 实例验证

通过实验采集到的光斑照度分布如图 7.可以

发现,光斑照度呈高斯分布,与理论相符<sup>[3]</sup>。

## 4 结束语

该方法基于图形化虚拟仪器集成开发平台 LabVIEW 实现了对激光光斑能量分布的检测,操作起来较简单,而且实验效果较理想,可以获得精确到像素级的光斑信息,可以实时地对光斑进行处理,并能较精确地反映其灰度及照度分布。

### 参考文献

- [1] 缪家鼎,徐文娟,牟同升.光电技术[M].杭州:浙江大学出版社,1994.
- [2] 杨乐平,李海涛,杨磊. LabVIEW 程序设计与应用[M].2版.北京:电子工业出版社,2005.
- [3] 周炳琨,高以智,陈侗嵘,等.激光原理[M].6版.北京:国防工业出版社,2009.
- [4] 秦树人,虚拟仪器[M].北京:中国计量出版社,2004.

(上接第 22 页)

### 参考文献

- [1] 石广玉.大气辐射学[M].北京:科学出版社,2007
- [2] K N Liou. 大气辐射导论[M].2版.郭彩丽,周诗健译.周秀骥,等.北京:气象出版社,2004.
- [3] S B Campana. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook, Volume 5: Passive Electro-Optical Systems [M]. SPIE Optical Engineering Press, 1994.
- [4] 许中园,孙胜利,陆卫.空间目标单光子探测光纤接收方式的研究[J].科学通报,2009,54(17):2467-2471.
- [5] Robert J Collins, Robert H Hadfield, Gerald S Buller. New developments in single photon detection in the short wavelength infrared regime[J]. Journal of Nanophotonics, 2010, 4(4):301.
- [6] G S Buller, R J Collins. Single-photon generation and detection[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(1):1-28.
- [7] F Emami, M Frdosiyani Tehrani. Noise Reduction and Simulation in Avalanche Photodiodes[J]. International Journal of Communications, 2008,2(1):17-26.
- [8] Jeffrey D Beck, Chang-Feng Wan, Michael A Kinch, et al. MWIR HgCdTe avalanche photodiodes[C]//SPIE Proceeding, 2001, 4454:188-197.
- [9] J Beck, C Wan, M Kinch, et al. The HgCdTe Electron Avalanche Photodiode [J]. IEEE LEOS Newsletter, 2006,(10):8-12.
- [10] A S Huntington, M A Compton, G M Williams. Improved breakdown model for estimating dark count rate in avalanche photodiodes with InP and InAlAs multiplication layers[C]// SPIE,2006,6214: 62140R.
- [11] G M Williams, A S Huntington. Probabilistic analysis of Linear Mode vs Geiger Mode APD FPAs for advanced LADAR enabled interceptors[C]// SPIE,2006, 6220:622008.
- [12] A S Huntington, M A Compton, G M Williams. Linear-mode single-photon APD detectors[C]// SPIE, 2007,6771: 67710Q.
- [13] G M Williams, M A Compton, A S Huntington. High-speed photon counting with linear-mode APD receivers[C]// SPIE, 2009,7320:732012.
- [14] G M Williams. GHz-rate single-photon-sensitive linear-mode APD receivers[C]// SPIE, 2009,7222: 72221L.
- [15] G M Williams, M A Compton, A S Huntington. Single-photon-sensitive linear-mode APD lidar receiver developments[C]// SPIE,2008, 6950:69500Q.