新型Ⅲ族氮化物日盲紫外变像管的研制及导弹逼近告警系统作用距离估算

任彬[1,2]，江兆潭[1]，郭晖[2]，石峰[2]，程宏昌[2]，拜晓锋[2]，
申志辉[3]，杨晓波[3]，周跃[4]，崔穆涵[4]
(1. 北京理工大学 物理学院，北京 100081；2. 微光夜视技术重点实验室，陕西 西安 710065；
3. 重庆光电技术研究所，重庆 400060；4. 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)

摘要： 围绕Ⅲ族氮化物半导体在紫外战术导弹逼近告警系统中的潜在应用前景，设计出一种基于新型Ⅲ族氮化物半导体光电阴极的紫外变像管，确定了影响光电阴极光电发射性能的Al摩尔组分、膜层厚度和P型掺杂水平。利用高分辨率X射线衍射仪和紫外分光光度计，对光电阴极结构和光学日盲特性进行仿真分析和测试。紫外变像管的光谱辐射灵敏度测试结果显示：探测器像管的辐射灵敏度在220～270 nm波段范围内波动较小，在波长266 nm处的辐射灵敏度为39.7 mA/W，光谱响应从波长270 nm之后开始急剧下降，表明其本征具有良好的日盲紫外属性。基于变像管的光谱辐射灵敏度测试结果及信噪比的作用距离模型，采用MODTRAN大气模拟软件包对以此变像管为核心探测器件的导弹逼近告警系统作用距离进行迭代求解。计算结果显示：导弹逼近告警系统的作用距离可达到7.1 km.

关键词： 兵器科学与技术；导弹逼近告警；紫外变像管；光电对抗；Ⅲ族氮化物；作用距离
中图分类号： TN235 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000-1093(2017)05-0924-08
DOI： 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.05.012

Experiment of New Protype Group Ⅲ-nitride UV Image Converter Tube and Evaluation of Detectable Distance of Missile Approach Warning System with It

REN Bin[1,2], JIANG Zhao-tan[1], GUO Hui[2], SHI Feng[2], CHENG Hong-chang[2], BAI Xiao-feng[2],
SHEN Zhi-hui[3], YANG Xiao-bo[3], ZHOU Yue[4], CUI Mu-han[4]
(1. School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, Shaanxi, China;
3. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China;
4. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China)

Abstract: A superior ultraviolet image converter tube made of Ⅲ-nitride semiconductor material was developed for missile approach warning (MAW) system. The Al mole fraction, film thickness and P-type doping level parameters which have the effects on the photoelectric emission performance of photocathode were determined. High resolution X ray diffractometer and ultraviolet spectrometer are used to analyze the

收稿日期： 2016-09-14
基金项目： 武器装备预先研究项目(9140C380502150C38002)
作者简介： 任彬(1981—)，男，高级工程师，博士研究生。E-mail: robinson_cv@163.com
通信作者： 郭晖(1964—)，女，研究员，博士生导师。E-mail: 18991205211@189.cn

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

structural and optical characteristics of photocathode. A relative flat and high quantum efficiency with small fluctuation in the wavelength range from 220 nm to 270 nm is obtained, the radiation sensitivity is 39.7 mA/W at 266 nm wavelength, and the spectral response begins to fall from 270 nm wavelength. According to the spectral radiation sensitivity and detectable distance model based on signal-to-noise ratio, MODTRAN atmosphere transmittance simulation software is used to calculate the operating range of MAW system with image converter tube by means of iteration solution. The calculated result shows that the operating range of MAW system can be up to 7.1 km.

Key words: ordnance science and technology; missile approach warning system; UV image converter tube; electro-optical countermeasure; group Ⅲ-nitride; detectable distance

0　引言

据报道，不受控制或扩散出来的便携式防空导弹系统已有上千套，而且多数流落在非政府组织或恐怖组织中[1]。这就对飞机，特别是民用飞机的安全造成了极大的威胁。机载导弹逼近告警系统(MAWs)作为一种有效的反导手段可以被动式探测来袭的导弹，实时发出警报信息，提示驾驶员或者为自动选择合适时机提供依据，实施有效干扰，采取规避等措施，对抗敌方导弹的攻击[2-4]。在紫外告警系统中作用距离是重要的性能指标之一，也是使用者最为关心的性能指标，针对紫外告警系统设计参数及紫外辐射在大气中的传输特点，估算紫外告警系统的作用距离具有非常重要的现实作战意义[5]。紫外导弹逼近告警系统的核心为日盲紫外探测器，而日盲紫外探测器的核心为日盲紫外光电阴极。目前获得装备的常用阴极材料为 Cs_2Te 和 Rb_2Te，但均并不具有日盲特性。

长久以来，Ⅲ族氮化物一直是发光二极管(LED)、蓝光和紫外激光器(LD)和高频功率晶体管的研究焦点，但缺乏合适的Ⅲ族氮化物外延生长衬底，使得Ⅲ族氮化物薄膜与衬底之间较大的晶格失配。近些年的技术进步可制备出无裂纹、高 Al 组分并实现一定程度欧姆接触的 AlGaN 薄膜，为由AlGaN薄膜制作负电子亲和势(NEA)光电阴极铺平了道路，使之拓展进入高功率真空光电子器件及焦平面显示器件的制备领域。

GaN 的禁带宽度为 3.4 eV，在 GaN 中掺入 Al，能够得到 $Al_xGa_{1-x}N$，它覆盖了 3.4～6.2 eV 的能量范围。伴随着以 GaN 为代表的第 3 代半导体产业的崛起，大量的研究人员开始研究能够实现高紫外/可见光抑制比的Ⅲ族氮化物日盲紫外光电阴极。Ⅲ族氮化物日盲紫外光电阴极相比传统以 Cs_2Te 为代表的紫外光电阴极有 3 个显著的优点：1) 具有较高的电子逸出几率；2) 具有更高的量子效率；3) 紫外/可见抑制比远高于 Cs_2Te 光电阴极。

1　紫外告警系统工作原理及组成

所谓日盲特性，指日盲紫外传感器的背景成像是全黑的，太阳紫外光子诱导的背景噪声将很小，即便在正中午对准太阳的状态下也等价于没有太阳辐射。由于“日盲区”在天空形成“暗”背景，相衬导弹羽烟的紫外辐射可构成良好的景物对比度，从而容易显现出来[6-8]。具有天然日盲属性的紫外传感器可以消除昂贵的且牺牲巨大量子效率的滤光系统，不仅会带来成本和系统复杂度的降低，而且作用距离的提升意味着有利于更早发现来袭目标，从而也更有利于提升战场环境下人员及武器平台的生还几率[9-10]。

图 1 是采用增强型电荷耦合器件(ICCD)对紫外辐射源成像的原理示意图。成像型紫外告警系统通常采用摄像成像原理，光学系统以大视场、大孔径对空间紫外信息进行接收，紫外探测器将视场内空间特定波长紫外辐射光子(包括目标、背景)进行光电转换以形成可见光图像，再通过光纤面板将图像耦合到电荷耦合器件(CCD)上形成光电子脉冲，放大后由电路传输到信号处理系统；系统对信号进行预处理后送入计算机系统，中央处理器依据目标特

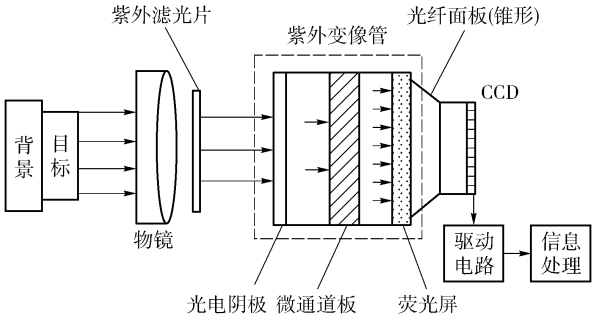


图 1　采用 ICCD 对紫外源成像原理示意图

Fig. 1　Block diagram of an UV imaging system with ICCD

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

征及预定算法对输入信号做出有无导弹威胁的统计判断[11]。

2 Ⅲ族氮化物光电阴极结构设计与表征

2.1 外延层结构参数设计

当前并没有大尺寸的 AlGaN 单晶或高质量的具有相同晶格常数的其他材料单晶衬底，常用的衬底是蓝宝石衬底。异质外延带来的严重后果是：由于Ⅲ族氮化物和衬底的热膨胀系数差异较大，当外延片从 1 100 ℃的生长温度冷却到室温时，会在Ⅲ族氮化物中形成很大的应变从而导致Ⅲ族氮化物出现裂痕。一个重要的技术突破是低温生长 AlN 或 GaN 缓冲层技术，缓冲层可以快速合并 Volmer-Weber 三维(3D)生长模式的小岛，使之转化为 Frank-Van der Merwe 二维(2D)台阶流生长模式，从而带来后续高温生长 AlGaN 质量的提高[12]。尽管如此，15%的晶格失配仍会带来高达 $10^8/cm^2$ 的源自于低温层和蓝宝石界面的线位错密度。Mg 作为 P 型掺杂剂是另一项Ⅲ族氮化物外延生长的重大突破，低能电子束辐照(LEEB)技术使得 Mg 掺杂的Ⅲ族氮化物电阻率大大减小，同时光致发光谱(PL)强度也大大提升[13]。基于上述考虑，Ⅲ族氮化物光电阴极外延层各功能层结构设计如图 2 所示。

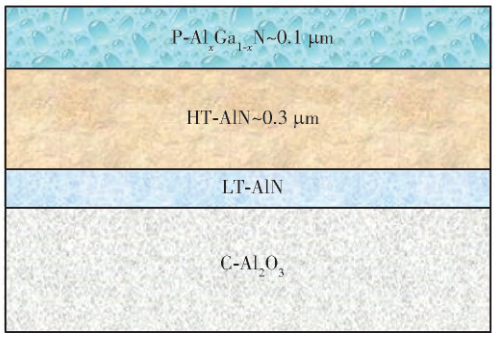


图 2 Ⅲ族氮化物光电阴极外延层结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Ⅲ-nitride photocathode

图 2 中的高温 AlN 功能层不仅仅出自于生长高质量 AlGaN 薄膜的需要，同时也作为窗口层决定了日盲紫外像管的短波截止阈值为 200 nm. 图 2 中最重要的功能层为 P-$Al_xGa_{1-x}N$ 层，其作为少子发射层，同时决定着日盲紫外的长波截止阈值。其参数设计基于以下考虑：理想情况下，日盲紫外探测器对长于 280 nm 的波长无响应，即紫外截止波长与禁带宽度的关系为

$$\lambda_0 = \frac{1\,240}{E_g}, \tag{1}$$

式中：E_g 为 $Al_xGa_{1-x}N$ 导带底和价带顶的带隙，是弯曲参数的 2 次方程式[14]，

$$E_g = 6.13x + 3.42(1-x) - 1.08(1-x). \tag{2}$$

结合(1)式和(2)式，可得出 Al 摩尔组分为 0.45[15].

$Al_{0.45}Ga_{0.55}N$ 发射层厚度 T 的设计较为复杂，是一个权衡量，可参考文献[16]的计算方法依据(3)式[17]来求解：

$$T = \frac{\ln(\alpha L)}{1 - \frac{1}{\alpha L}} \tag{3}$$

式中：L 为少子扩散长度，文献[18]给出的合理范围在 0.02 ~ 0.2 μm 之间；α 为 $Al_{0.45}Ga_{0.55}N$ 吸收系数，这里采用经验公式 $\alpha^2 = \alpha_0^2(E - E_g)$ 来计算，α_0 取理论计算值 7.32 $\mu m^{-1}\,eV^{-1/2}$[19]。结合计算结果，$Al_{0.45}Ga_{0.55}N$ 发射层厚度 T 暂取 0.1 μm.

此外，异质外延生长后界面上的缺陷是各种位错的主要来源，同时还存在大量的非辐射复合中心。在蓝宝石和发射层 $Al_xGa_{1-x}N$ 中插入宽禁带的 AlN 势垒层，与 AlGaN 形成的异质结可以阻止非平衡载流子向后界面扩散。以 Al 摩尔组分设计值 x = 0.45 为计，利用 $Al_xGa_{1-x}N$ 电子亲和能公式[20]：$\chi = 4.1 - Ax$，A 为不确定性参数，$A \in [1.44, 2.30]$，可以估算出后界面的势垒高度在 0.63 ~ 1.04 eV 范围内，扩散至后界面的非平衡载流子可以有效地被阻挡并被反射。

Mg 的掺杂水平同样是一个需要折中考虑的重要参量，掺杂高会较易形成 NEA，但又带来晶格缺陷的增加，故 Mg 的掺杂水平选取在 5×10^{18} cm^{-3} 至 1×10^{19} cm^{-3} 之间，以有效地防止 Mg 固溶体的出现。

2.2 金属有机气相外延生长

Ⅲ族氮化物光电阴极外延生长在 AIXTRON 200/4-HT 水平流低压金属有机气相外延生长(MOCVD)反应腔室中进行。基于背照式探测原理，衬底选用 2 in 双抛 c 向(0001)蓝宝石基底。Al、Ga 和 N 源分别使用三乙基铝(TMAl)、三甲基镓(TEGa)和氨气(NH3)作为前驱气体，Mg 源使用双环戊二烯基镁(Cp2Mg)作为掺杂剂，氢气作为载气。生长前，蓝宝石衬底在 1 100 ℃的氢气气氛下进行高温热清洗。

按照图 2 中所示的器件结构，首先生长 0.03 μm的 AlN 低温成核层，再接着生长 0.3 μm 的高温 AlN 缓冲层，在缓冲层之上再生长 0.1 μm 的

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$Al_{0.45}Ga_{0.55}N$ 发射层。典型的生长温度和压力分别为 1 120 ℃和 6 000 Pa. 生长 Mg 掺杂 $Al_{0.45}Ga_{0.55}N$ 发射层时，Ⅴ/Ⅲ流量比随 NH_3 的流速而变化，要避免高 Al 组分下 TMAl 和 NH_3 带来的寄生反应而导致生长速率和晶体质量的下降。生长速率控制在 0.5 ~ 0.8 Å/s，生长厚度通过多波长的反射计进行原位监控。生长结束后，外延片在 770 ℃下的氮气气氛下保持 5 min 进行热退火，以提升 Mg 受主的离化率。

2.3　结构特性表征和光学特性表征

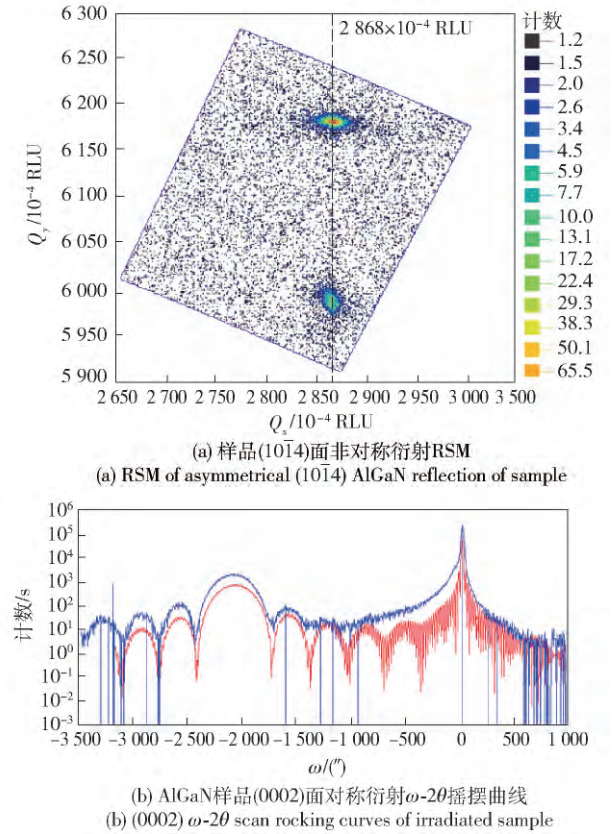
Ⅲ族氮化物日盲紫外探测器的性能受限于外延片结构参数(组分、应变、缺陷等)和光学参数(透射、反射等)，详尽地了解外延片结构和光学性能的研究是十分必要的。

2.3.1　高分辨率 X 射线衍射仪测试

X 射线衍射(XRD)是一种常用的非破坏性手段用来表征薄膜特性和器件结构，它可以提供的信息包括晶格参数、错向、微晶尺寸和微观应变等。所有的 XRD 测试均在荷兰 PANalytical 公司产 X'Pert MRD 衍射仪上进行，Cu $K_{\alpha 1}$ 的波长为 $\lambda = 1.540\ 56$ Å. (0002)面对称和(10$\bar{1}$4)面非对称高分辨率 XRD 仪(HRXRD)测试均使用三轴晶配置的 ω-2θ 扫描，ω 是 X 射线与样品表面的夹角，2θ 是 X 射线与探测器之间的夹角，包括一个 Bartel 型 Ge (220)的单色仪和三回路的 Ge 分析晶体，分别进行(0002)面对称衍射和(10$\bar{1}$4)面非对称衍射测试。

由于异质外延的生长模式，AlGaN 薄膜和衬底热膨胀系数、晶格参数的不匹配造成外延薄膜的双轴晶应变，晶格常数的计算需要基于双轴晶应变考虑：(0002)面内均匀的压应力会导致面外面间距的增加，也缩短了倒空间中(0002)点至原点的距离，因此薄膜面内外的晶格参数受到组分和应变的共同影响，这两种影响必须分离，并分别定量。此外，衍射峰的宽化不仅与外延层的参数相关，同样与仪器的条件相关。有效的处理方法是可以分为两步：1)通过宽化因子的模型卷积来模拟实验数据；2)将模型参数与实验数据进行拟合，面间距和缺陷引起的加宽可以通过倒易空间图(RSM)来得到。

AlGaN 的组分和厚度可以通过 x'pert epitaxy 软件拟合(0002) ω-2θ XRD 数据来得到。软件基于运动学理论，组分和厚度的标准偏差分别为 ±0.01 nm 和 ±1 nm，拟合结果见图 3，整个外延片的厚度非均匀性小于 2 nm，得到的结果也更进一步证实 MOCVD 监控结果。从图 3(a)中可见，AlGaN 的倒易晶格点(RLP)远未落在过 AlN 缓冲层且垂直于 q_x 的垂线上，说明 AlGaN 远非完全应变的，而是接近于完全弛豫。从图 3(b)可以清楚地看到最强的主峰是 AlN 缓冲层的零阶 Bragg 反射，主峰左侧较弱的且较宽的峰是激活层 AlGaN 层的零阶 Bragg 反射，图 3(b)中的 PendellÖsung 衍射消光条纹进一步体现了 AlGaN/AlN 较好的生长质量及陡峭的界面。



(a) 样品(10$\bar{1}$4)面非对称衍射RSM
(a) RSM of asymmetrical (10$\bar{1}$4) AlGaN reflection of sample

(b) AlGaN样品(0002)面对称衍射ω-2θ摇摆曲线
(b) (0002) ω-2θ scan rocking curves of irradiated sample

图 3　紫外变像管阴极外延片 HRXRD 结构特性表征

Fig. 3　HRXRD structural characterization of AlGaN wafer for UV image converter tube

2.3.2　紫外光度计测试

光学特性能够更进一步表征外延材料的质量，见图 4 紫外分光光度计得到的透射率谱。从图 4 中可以看出，透射率曲线在 270 ~ 280 nm 急剧变化，280 nm 以外的长波透射率大于 70%，由此决定了探测器的长波截止阈为 280 nm，可以实现本征的紫外/可见抑制比，有助于减轻甚至消除外部滤波系统的负重。UVB 波段界限分明的干涉条纹再次反映出样品较好的质量和光滑过渡的界面态。

2.4　紫外变像管制备及灵敏度测试

2.4.1　AlGaN 阴极制备

生长好的 2 in 厚衬底利用波长 266 nm 的激光

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

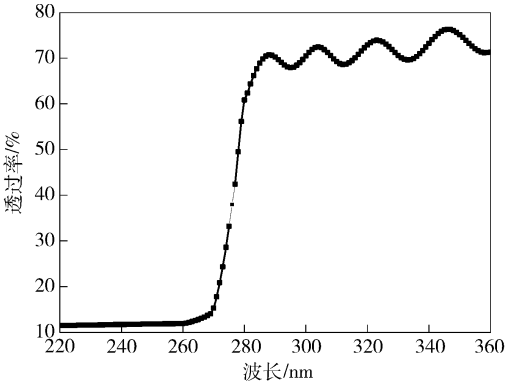


图 4 AlN/AlGaN 异质结光电阴极紫外透射谱

Fig. 4 Transmittance spectrum of AlN/AlGaN heterostructure photocathode

划片-裂片机切割成 ϕ20 mm 的变像管尺寸，边缘再经过金刚石磨抛工序进行修整。切割后的 ϕ20 mm 外延片首先经过质量比 20% 的 NaOH 沸腾溶液中浸泡 1 min，接着用去离子水冲洗 15 min，并用干燥氮气吹干；再通过电子束蒸发的方式在 550 ℃下蒸镀 Ni/Au(50/50 nm) 圆环合金；最后在氮气环境气氛下保持 500 ℃退火 10 min 以形成欧姆接触。为提高 266 nm 处光通量的传输系数，接下来在外延片后端蒸镀一层 $\lambda/4$-MgF_2 的抗反射层。最后利用 0.5 cm高度的透紫玻璃与 ϕ20 mm 的外延片键合成 ϕ20 mm 的阴极组件以提供机械强度支撑。

随后，ϕ20 mm 阴极组件通过真空送样室进入超高真空(UHV)系统，以 2 ℃/s 升温至 850 ℃，在此温度下保持 10 min，随之与 0.5 keV 的氮气离子溅射交替作用 3 个周期。这种处理可以得到原子级洁净、有序的表面，O、C 的污染在 1%/单层以下[21]。激活通过加热 Ni 筒预置的铬酸铯盐和漏阀分别将 Cs、O 导入 UHV 中。表面 Cs、O 覆盖层大大降低电子亲和能而形成有效 NEA，表面能带向下弯曲形成耗尽区，也使得扩散至能带弯曲区的非平衡少子将加速向表面移动，从而毫无阻碍地逸出表面。制备完成的 NEA AlGaN 光电阴极最终与 MCP 荧光屏一起铟封装成为紫外变像管，如图 5 所示[22]。

2.4.2 光谱响应测试

紫外变像管的辐射灵敏度测试系统包含如图 6 所示：以氘灯作为紫外光源，入射光经过相对孔径为 1/7 的光栅单色仪进行分光，入射和出射狭缝缝宽均为 0.4 mm，光栅线色散率为 1 200 L/mm，可提供的光谱分辨率达到 0.1 nm. 出射光经过分光后一部分照射入像管的阴极输入面，另一部分输入光经过分光后照射入商用 Si 光电二极管(日本 Hamamatsu

图 5 封装 AlGaN 光电阴极、MCP 和荧光屏的 ϕ18 mm 紫外变像管

Fig. 5 ϕ18 mm diameter UV image converter tube incorporated with AlGaN photocathode, MCP and phosphor

公司产 S2281-04 型 Si 光电二极管) 作为参考，用来确定输入像管的辐射通量。像管加 200 V 直流偏压用于收集出射光电子，光电流采用美国 Keithley 公司产 6487 型皮安表读出。像管辐射灵敏度利用光电发射电流值与 Si 光电二极管的电流比值计算得到，整个系统采用计算机控制。

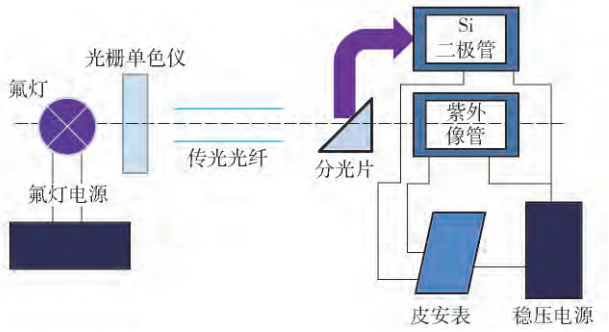


图 6 $Al_xGa_{1-x}N$ 日盲紫外变像管光谱响应测试图

Fig. 6 Test system of spectral responsivity of $Al_xGa_{1-x}N$ solar blind image converter tube

从光谱响应图 7 可以看出，探测器在 220 ~ 270 nm之间较为平坦，从 270 ~ 280 nm 之后开始急剧下降，具有良好的截止特性。由图 7 可以看出，相比二元化合物 GaN 光电阴极，Al 组分的增加，随之带来禁带宽度的增加，使得光谱响应逐渐向短波方向移动，这充分体现出 $Al_xGa_{1-x}N$ 合金材料探测器长波阈值的可调性。图 7 给出辐射灵敏度在245 nm 达到峰值 41.526 mA/W，266 nm 处的辐射灵敏度为 39.751 mA/W，峰值位置并未与设计值 266 nm 重合。不重合的原因经分析可能有以下 3 点：1) 光电阴极发射层厚度太薄，造成 266 nm 处的辐射光功率吸收不够，从图 4 的透过率曲线也可以看出这点；2) 是采用(3) 式进行厚度估算时，光吸收系数值采用经验值不够精确；3) 可能是 Cs、O 激活层的缺陷

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对长波光子的势垒阻挡作用大于短波光子，导致长波光子的逸出几率低于短波光子。后续工作中提高设计吻合度将是探测器性能优化的重要研究方向之一。为进一步分析探测器的日盲紫外特性，将探测器更换至可见光谱响应测试系统上，测试得到 500 nm波长处的辐射灵敏度为 0.016 mA/W. 定义紫外/可见光抑制比为峰值灵敏度与 500 nm 处的辐射灵敏度比值，由此得到此探测器的紫外/可见光抑制比达到 3 个数量级，显示出较好的日盲紫外特性。

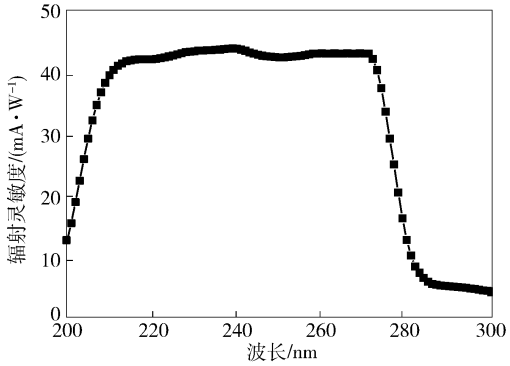


图 7　典型 $Al_{0.45}Ga_{0.55}N$ 日盲紫外变像管光谱响应曲线

Fig. 7　Spectral responsivity of $Al_xGa_{1-x}N$ image converter with $x=0.45$

3　基于信噪比的作用距离模型

现代辐射测量技术的实践证明：随着探测系统灵敏度的提高，其作用距离的增大主要取决于信噪比的提升，而非目标本身亮度的增加[23-24]。因此，对于 MAWs 系统作用距离的估算建立基于探测系统信噪比分析的作用距离模型。假定无目标信号时噪声电压幅值的概率密度函数为瑞利分布，有目标信号时系统输出电压的分布为高斯函数，由系统所给出的虚警概率和探测概率性能指标得到系统满足探测要求的最低信噪比，再通过信噪比计算告警系统的作用距离。建立基于信噪比的作用距离模型时，以光子数为单位，从目标的成像过程出发分别估算 ICCD 系统探测到信号的光子数 N_S 和 ICCD 系统输出的噪声值 N_{ICCD}[25]：

$$N_S=\frac{\pi D^2 I\tau_1\tau_2\tau_3\tau(R)\,\lambda t\eta_C\eta_{MCP}G_{MCP}\eta_p t_{int}\eta_{CCD}}{4R^2hc},\tag{4}$$

$$N_{ICCD}=\sqrt{\frac{\pi D^2 I\tau_1\tau_2\tau_3\tau(R)\,\lambda t\eta_C\eta_{MCP}G_{MCP}^2(3\delta^2-1)\,\eta_p^2 t_{int}\eta_{CCD}}{4R^2hC(\delta^2-\delta)}},\tag{5}$$

式中：R 为目标到系统的作用距离(km)；I 为目标的辐射强度 W/sr；$\tau(R)$ 为目标辐射传输距离为 R 时的大气透过率；G_{MCP}为 MCP 电子增益的平均值；h 为普朗克常数，$h=6.626\times10^{-34}$ J·s；c 为光速，$c=3\times10^8$ m/s；λ 为辐射波长，取紫外滤光片中心波长 266 nm.

由最低信噪比结合虚警概率 P_{fa} 和探测概率 P_d 指标得到告警系统所能探测到的最大作用距离为

$$R=\frac{D\sqrt{\dfrac{\pi I\tau_1\tau_2\tau_3\tau(R)\,\lambda t\eta_C\eta_{MCP}t_{int}\eta_{CCD}(\delta^2-\delta)}{4hc(6\delta^2-2)}}}{\Phi^{-1}(P_d)+\sqrt{-2\ln P_{fa}}},\tag{6}$$

式中：Φ 为标准正态分布；其他参数见表 1 中所示。

表 1　紫外探测系统的相关参数

Tab. 1　Performance parameters of UV detection system

系统组成	性能参数	数值
物镜	透过率 τ_1	0.9
	通光孔径 D/mm	50
紫外滤光片	透过率 τ_2	0.2
紫外变像管	辐射灵敏度(266 nm)/(mA·W^{-1})	39.751
	有效积分时间 t/s	0.1
	MCP 探测效率 η_{MCP}	1
	二次电子倍增系数 δ	3
光纤光锥	透过率 τ_3	0.7
CCD	积分时间 t_{int}/s	0.1
	量子效率 η_{CCD}/%	70

假定目标的辐射强度 I 为 2.0×10^{-2} W/sr，且对于本系统，提出的性能指标探测概率 P_d 为 96%，虚警时间为 1 次/10 h. 虚警概率 P_{fa}用虚警时间 τ_{fa} 表示为

$$P_{fa}=\frac{1}{f_0\tau_{fa}},\tag{7}$$

式中：f_0 为系统的电子通带中心频率，取 50 Hz. 经计算，系统的虚警概率 P_{fa} 为 5.55×10^{-7}，系统满足探测要求的最低信噪比为 7.12.

此时，(6) 式中的未知参量只剩 R 及大气透过率 $\tau(R)$，是关于作用距离 R 的隐函数方程。在解 R 时，需要反复利用大气透过率软件包 MODTRAN 精确计算 $\tau(R)$，作线性插值和迭代，直到作用距离 R 收敛为止。$\tau(R)$ 是一个随作用距离、告警系统所在的具体气候环境、海拔高度等因素变化较大的变量。计算时假定大气条件为：1976 年美国标准大气，乡

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

村衰减，水平路径，1.5 km 起始海拔，23 km 视见距离，由此得到的大气传输率如图 8 所示。

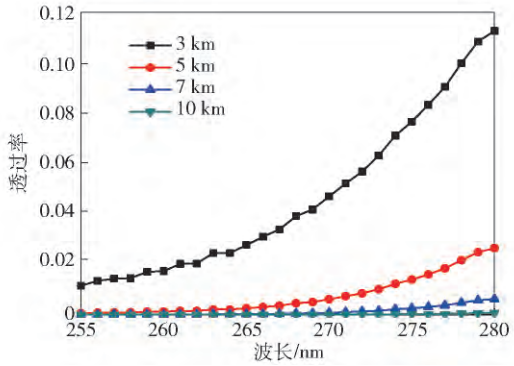


图 8 距离海平面 1.5 km 处的大气传输率

Fig. 8 Atmosphere transmittance at 1.5 km from sea level

综合以上计算可以得出，在满足假定的目标辐射强度下，以此 AlGaN 型日盲紫外变像管为核心探测器件的导弹逼近告警系统作用距离可达到 7.1 km. 一般说来，计算值与测量值有一定的误差，这主要是由 $\tau(R)$ 的近似性以及隐函数方程求解算法本身的不精确性引起。

4 结论

本文围绕战略性先进电子材料Ⅲ族氮化物半导体在紫外导弹逼近告警系统中的潜在应用前景，阐述了一种新型日盲型紫外变像管的研制，并对导弹逼近告警系统中应用此变像管进行了作用距离效能评估。

1) 提出一种基于新型Ⅲ族氮化物半导体光电阴极的紫外变像管，对光电阴极的关键参数设计进行了计算和分析，并结合传统 MOCVD 外延生长工艺对器件结构设计进行了兼容性考虑；利用 HRXRD 和紫外分光光度计对器件结构和光学日盲特性进行分析和确认。

2) 借鉴传统微光像增强器的制备过程完成紫外变像管的制备与封装。制备完成的紫外变像管进行了光谱辐射灵敏度的测试。结果显示：探测器组件在 220 ~ 270 nm 之间较为平坦，从 270 ~ 280 nm 之后开始急剧下降，辐射灵敏度在 245 nm 达到峰值 41.526 mA/W，紫外/可见光抑制比达到 3 个数量级，显示出较好的日盲紫外特性；

3) 基于信噪比的作用距离模型，并利用公认的 MODTRAN 大气模拟软件包对作用距离进行迭代求解。以此 AlGaN 型日盲紫外变像管为核心探测器件的导弹逼近告警系统的作用距离可达到 7.1 km.

然而，在实际战场环境中，地形、气候、战场背景情况复杂多变，还有器件性能的稳定性等等，这些因素均会给 MAW 系统作用距离带来一定的影响。后续工作中将一方面继续优化器件在探测窗口的探测性能，另一方面也将进一步开展以此类器件为紫外 MAW 核心探测器组件的作用距离半实物仿真测试和实弹打靶测试。

参考文献(References)

[1] 李晓峰，赵学峰，陈其钧，等. $K_2Te(Cs)$ 日盲紫外光电阴极研究[J]. 光子学报，2014，43(6)：0625003-1 -0625003-6.
LI Xiao-feng，ZHAO Xue-feng，CHEN Qi-jun，et al. Study on $K_2Te(Cs)$ solar blind ultraviolet cathode[J]. Acta Photonica Sinica，2014，43(6)：0625003-1 -0625003-6.(in Chinese)

[2] 权利，王颖，罗木昌，等. 紫外图像传感器技术研究进展[J]. 半导体光电，2013，34(4)：537 -541.
QUAN Li，WANG Ying，LUO Mu-chang，et al. Advances in UV image sensor technology [J]. Semiconductor Optoelectronics，2013，34(4)：537 -541.(in Chinese)

[3] 国爱燕，白廷柱，韩强，等. 液体火箭发动机羽烟紫外辐射特性分析[J]. 兵工学报，2013，34(4)：418 -424.
GUO Ai-yan，BAI Ting-zhu，HAN Qiang，et al. Analysis of ultraviolet radiation characteristics of liquid propellant rocket motor exhaust plumes[J]. Acta Armamentarii，2013，34(4)：418 -424.(in Chinese)

[4] 邓科，周成康，于殿军，等. 导弹热发射方式增推效能研究[J]. 兵工学报，2016，37(6)：1038 -1043.
DENG Ke，ZHOU Cheng-kang，YU Dian-jun，et al. Research on efficiency of additional thrust of thermal launching [J]. Acta Armamentarii，2016，37(6)：1038 -1043.(in Chinese)

[5] 娄颖，白廷柱，高稚允，等. 紫外告警系统探测距离的估算[J]. 光学技术，2005，31(3)：473 -475.
LOU Ying，BAI Ting-zhu，GAO Zhi-yun，et al. Estimation of detectable distance for ultraviolet warning system [J]. Optical Technique，2005，31(3)：473 -475.(in Chinese)

[6] 郭渭荣，栗苹，陈慧敏，等. 不同角度下散射太阳光对光电探测器的干扰[J]. 探测与控制学报，2009，31(1)：41 -45.
GUO Wei-rong，LI Ping，CHEN Hui-min. Interference from scattered sunlight on photodetector posed in different angles[J]. Journal of Detection & Control，2009，31(1)：41 -45.(in Chinese)

[7] 蓝天，倪国强. 紫外通信的大气传输特性模拟研究[J]. 北京理工大学学报，2003，23(4)：419 -423.
LAN Tian，NI Guo-qiang. Simulation research on ultraviolet atmospheric transmission in UV communication [J]. Transaction of Beijing Institute of Technology，2003，23(4)：419 -423.(in Chinese)

[8] Neele F P，Schleijpen R M. Electro-optical missile plume detection[J]. Proceedings of SPIE，2003，5075：270 -280.

[9] 夏润秋，王霞，金伟其，等. 海面环境中红外偏振成像系统作

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

用距离模型[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0304007-1.
XIA Run-qiu, WANG Xia, JIN Wei-qi, et al. Distance model of infrared polarization imaging system used in sea-surface environment [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(3): 0304007-1. (in Chinese)

[10] 刘松, 金伟其, 李力, 等. 低照度成像组件的最小可分辨率对比度测量及其作用距离模拟[J]. 光子学报, 2016, 45(3): 0312003-1.
LIU Song, JIN Wei-qi, LI Li, et al. Minimum resolvable contrast measurement of low illumination imaging module and simulation of its range [J]. Acta Photonic Sinca, 2016, 45(3): 0312003-1. (in Chinese)

[11] 李炳军. 紫外探测技术在导弹来袭告警系统中的应用[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007: 35 - 38.
LI Bing-jun. Ultraviolet detecting technology and its applications in the missile approaching warning system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007: 35 - 38. (in Chinese)

[12] Lin Z Y, Zhang J C, Zhou H, et al. Influence of double AlN buffer layers on the qualities of GaN films prepared by metal-organic chemical vapour deposition [J]. Chinese Physics B, 2012, 21(12): 403 - 407.

[13] Lester S D, Ponce F A, Craford M G, et al. High dislocation densities in high efficiency GaN-based light-emitting diodes [J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(10): 1249 - 1251.

[14] Ozgur U, Wood G W, Everitt H O, et al. Systematic measurement of AlxGa1-xN refractive indices [J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(25): 4103 - 4105.

[15] Duboz J Y, Grandjean N, Omnes F. Internal photoemission in solar blind AlGaN Schottky barrier photodiodes [J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(6): 063511-1 - 063511-3.

[16] 任彬, 石峰, 郭晖, 等. InP/InGaAs 转移电子光阴极吸收层厚度设计与计算[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3010 - 3014.
REN Bin, SHI Feng, GUO Hui, et al. Design and calculation of absorption layer thickness on InP/InGaAs transferred-electron photocathode [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(10): 3010 - 3014. (in Chinese)

[17] 贾欣志. 半导体光电阴极[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 122.
JIA Xin-zhi. Semiconductor photocathodes [M]. Beijing: Science Press, 2013: 122. (in Chinese)

[18] Uchiyama S, Takagi Y, Niigaki M, et al. GaN-based photocathodes with extremely high quantum efficiency [J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(10): 103511-1 - 103511-3.

[19] Kuek J J, Wong M A, Fisher T A, et al. Modelling AlGaN heterojunction solar-blind photodetectors [C] // Optoelectronic and Microelectronic Materials Devices. Perth, WA, US: IEEE, 1999: 407 - 410.

[20] Ambacher O. Growth and applications of Group Ⅲ-nitrides [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1998, 31(20): 2653 - 2710.

[21] Wu C I, Kahn A. Electronic states and effective negative electron affinity at cesiated p-GaN surfaces [J]. Journal of applied physics, 1999, 86(6): 3209 - 3212.

[22] Bai L F, Zhang Y, Gu G H, et al. Analysis and fusion methods on low light level image and ultraviolet image [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(1): 113 - 117.

[23] 崔穆涵, 易翔宇, 周跃, 等. 近紫外探测系统作用距离分析[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(9): 091012-1 - 091012-5.
CUI Mu-han, YI Xiang-yu, ZHOU Yue, et al. Detection range model of near ultraviolet detection system [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(9): 091012-1 - 091012-5. (in Chinese)

[24] 赵建川, 陈兆兵, 郭劲, 等. 基于信噪比的紫外红外复合告警系统模型[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(3): 195 - 199.
ZHAO Jian-chuan, CHEN Zhao-bing, GUO Jin, et al. UV and IR complex warning system based on signal-to-noise [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(3): 195 - 199. (in Chinese)

[25] 曹慧. 紫外成像告警技术的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
CAO Hui. Ultraviolet imaging alarm technology [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net