

InGaAs PIN 光电探测器的加速老化研究

金露凡^{1,2} 张雅婷^{1,2} 王海艳^{1,2} 王茂榕^{1,2} 宋效先^{1,2} 姚建铨^{1,2}

(¹天津大学精仪学院天津大学激光与光电子研究所, 天津 300072)
(²光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 InGaAs PIN 光电探测器在空间遥感、卫星通讯等方面有着广泛的应用。利用 358 K 恒温加速老化实验研究探测器长时间稳定工作时输出电信号噪声的演化规律,并在此基础上,通过对比老化前后探测器的线性区及其噪声温度特性,讨论了探测器在长期工作过程中的失效情况。结果表明,在连续工作大约 10.8 年后,探测器本底噪声中热噪声增加了约 20%,暗电流噪声增大了约 0.35%。探测器的线性区范围下降了约 10%。得到因长期工作而修正的探测器噪声模型。

关键词 探测器; InGaAs PIN; 加速老化; 噪声; 温度

中图分类号 TN215 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1008002

Acceleration Aging of InGaAs PIN Photoelectric Detectors

Jin Lufan^{1,2} Zhang Yating^{1,2} Wang Haiyan^{1,2} Wang Maorong^{1,2}

Song Xiaoxian^{1,2} Yao Jianquan^{1,2}

¹*Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

²*Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China*

Abstract The InGaAs PIN photoelectric detector has great value in fields of spatial remote sensing and satellite communication. Evolution rules of the output electrical signal noise are studied with the experiment of acceleration aging at constant temperature 358 K when the detector operates stably in a long term. And on this basis, failure analysis of the detector working in long-term is discussed by comparison with the fore-and-aft linear region and temperature property of its noise. The theoretical results indicate that after operating stably in about 10.8 years, thermal noise of the detector's background noise will increase about 20%, and dark current noise about 0.35%. For the linear region of two detectors 13.31% and 9.95% are declined. Furthermore, the output noise model is modified according to the analysis and the results of the experiments.

Key words detectors; InGaAs PIN; acceleration aging; noise; temperature

OCIS codes 040.5160; 040.3060; 120.6780; 160.6000

1 引 言

光电探测器做为光电检测系统的一个关键器件,在天文观测、生物成像、医学医疗、卫星通信、光纤传感、空间遥感^[1-3]等领域有着广泛的应用前景。目前用于 1550 nm 附近波段的光电探测器一般选用 InGaAs PIN^[4]。在一些特殊环境中,探测器一般

需要连续稳定工作数年甚至十几年。因此其性能可靠性在连续工作状态下的演化情况就需予以特别关注。然而,目前关于这方面的研究尚未见报道。对于寿命在几十万小时的电子元器件,无法在短时间内获取其可靠性的变化情况,因此需要用到加速老化实验。通过对比加速老化前、后,光电探测器性能

收稿日期: 2014-04-26; **收到修改稿日期**: 2014-05-04

基金项目: 天津大学自主创新基金(60302070)

作者简介: 金露凡(1990-),男,硕士研究生,主要从事 InGaAs PIN 光电探测器噪声模型等方面的研究。

E-mail: jlfking@tju.edu.cn

导师简介: 张雅婷(1983-),女,博士,讲师,主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: yating@tju.edu.cn

的变化情况来研究探测器可靠性的变化趋势。而光电探测器在正常工作时,在把光信号转换为电信号的同时也附加了额外的噪声。无论这些噪声是来源于光源,还是来源于探测器,都会导致探测信号可靠性降低甚至信号失真。因此,本文系统地研究了加速老化过程中 InGaAs 探测器本底噪声的演化情况,并分析了加速老化后其性能的失效程度,不仅为长期老化模型的修正提供了依据同时也为探测器的实际应用提供参考。

2 理论模型

2.1 阿伦尼斯模型

加速老化实验,就是利用与物理失效规律相关的统计模型对在超出正常应力水平的加速环境下获得的可靠性信息进行转换,得到在额定应力水平下可靠性特征的可复现的数值估计的一种实验方法^[5]。其中,温度是最常见的加速应力之一。阿伦尼斯模型一般被用来描述温度应力对光电探测器可靠性寿命的影响。则暗光条件下,寿命 L_i ^[6]为

$$L_i = \beta \exp\left(\frac{E_a}{k_B T_i}\right), \quad (1)$$

式中 β 为调整系数(大于 0 的常数), E_a 为活化能(eV), k_B 为玻尔兹曼常数(8.617×10^{-5} eV/K), T_i 为加速温度(K)。

通过对比正常工作温度下光电探测器寿命,可以估算出其加速系数 τ ,表达式为

$$\tau = \frac{L_0}{L_i} = \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_i}\right)\right], \quad (2)$$

式中 T_0 为正常工作温度(K), L_0 和 L_i 分别为室温下寿命和加速温度下寿命。当温度 T_i 大于正常工作温度 T_0 时,热应力开始影响器件的可靠性。根据经验公式,活化能 E_a 为 0.54 eV,当室温为 298 K 时,加速温度为 308 K,由(2)式可以估算出加速系数 τ 约为 1.9793。也就是说温度每升高 10 K,加速实验就能缩短约一半的时间。因此通过提高加速实验温度,可以将几十万小时的实验时间缩短到几个月,大大节约了实验时间,提高了工作效率。

2.2 探测器噪声模型

InGaAs PIN 输出电信号中包含的噪声源有很多,主要包括^[7]:跨阻热噪声、散粒噪声和相对强度噪声。其中,热噪声是由光电探测器中的电阻内部自由电子或电荷载流子的不规则热运动引起的。由于各个载流子是相互独立运动的,导致其向两个相反方向运动的数量并不完全相同,结果是在导体和

半导体中产生噪声电压^[8]。散粒噪声源自探测器电荷载流子的离散性,即光子转换为电子时,光电子产生的随机性和产生暗电流的电子的随机性^[9]。而相对强度噪声是指光源输出能量的振荡,即宽带光源光谱的各种傅里叶分量之间的随机拍频引起光源的功率涨落^[10]。

考虑到上述三种噪声,设入射到探测器中的光功率为 P ,则探测器的输出噪声表示为^[11]

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{RIN}}^2 + \sigma_{\text{sh}}^2 + \sigma_{\text{th}}^2 = P^2 \frac{\Delta f \lambda^2}{\Delta \lambda c} + 2e\Delta f R^2 (R_D P + I_{\text{dark}}) + 4k_B \Delta f T R, \quad (3)$$

式中 σ_{total}^2 表示探测器输出总噪声, σ_{RIN}^2 为相对强度噪声, σ_{sh}^2 为散粒噪声, σ_{th}^2 为热噪声,噪声单位都为 V^2/Hz , k_B 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, R 为跨阻, Δf 为探测器检测带宽, e 为电子电量, R_D 为探测器的响应度, I_{dark} 为暗电流。(3)式等号右边前两项表明,散粒噪声和相对强度噪声都与探测器输入端光功率 P 有关,散粒噪声与 P 成正比,相对强度噪声与 P^2 成正比,而热噪声与 P 无关。

当无光信号输入($P = 0$)时,散粒噪声 σ_{sh}^2 和相对强度噪声 σ_{RIN}^2 退化为 0。此时,探测器输出的噪声(本底噪声 σ_{bg}^2) 主要包括热噪声 σ_{th}^2 和暗电流噪声 $\sigma_{\text{dark}}^2 = 2e\Delta f R^2 I_{\text{dark}}$ 。则(3)式可以简化为

$$\sigma_{\text{bg}}^2 = 2e\Delta f R^2 I_{\text{dark}} + 4k_B \Delta f T R, \quad (4)$$

(4)式即为探测器的本底噪声,其中本底热噪声即等式右边第二项与温度有关,第一项为本底暗电流噪声,与暗电流大小直接相关。当跨阻不变时,热噪声取决于器件温度,而暗电流噪声与暗电流大小有关,并且暗电流大小也受到温度的影响。当环境温度为 $T = 298$ K, $R = 500$ k Ω , $\Delta f = 10$ MHz, $I_{\text{dark}} = 1.8$ fA,由(4)式可以估算出此时热噪声约为 $10.281 \mu\text{V}^2/\text{Hz}$,而暗电流噪声约为 $0.00144 \mu\text{V}^2/\text{Hz}$ 。估算表明,暗电流噪声比热噪声低了 4 个数量级,暗电流对噪声的贡献远小于热噪声,基本可以忽略。

3 实验方案

3.1 检测信号设计

在对 InGaAs PIN 光电探测器外电路设计时,考虑到噪声与探测器输出的交流成分相关而直流成分与光信号的强度相关,因此对其输出电信号的直流(DC)成分与交流(AC)成分做了相互分离的处理。探测器的检测带宽为 10 MHz。跨阻为 500 k Ω 。用数据采集卡采集电信号直流成分,用安捷伦 N9030A PXA 信号分析仪测量探测器输出电信号的交流成

分。信号频率从 3 Hz 到 10 MHz,并对所采集数据进行统计分析,得到探测器输出噪声 σ^2 。为确保测量准确性,每次采集测量 10 组数据,并对每组数据得到的结果取平均得到该情况下的探测器噪声 σ^2 。

3.2 高温加速老化实验方案

将两只同一批次的 InGaAs PIN 光电探测器放入恒温老化箱中,分别记为 Detector 1 和 Detector 2。由上述理论可知温度每升高 10 K,实验所用时间缩短到原来的一半。将温度设置到 358 K,则所用时间降为原来的 1/64。通过控制恒温老化箱内温度一直保持在 358 K,得到探测器在正常工作 62 天(1488 h)过程其输出噪声的演化规律。老化过程中同步采集输出信号的直流(DC)和交流(AC)成分,以待后续分析。图 1 为实验结构示意图,DAQ card 表示数据采集卡。

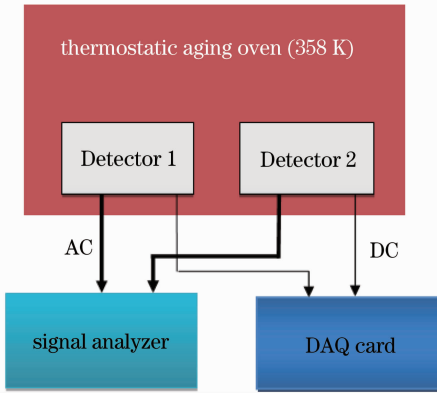


图 1 加速老化实验结构图

Fig. 1 Schematic of the acceleration aging experiment

3.3 老化前、后探测器性能对比实验

在加速老化实验前、后,对同一个探测器输入不

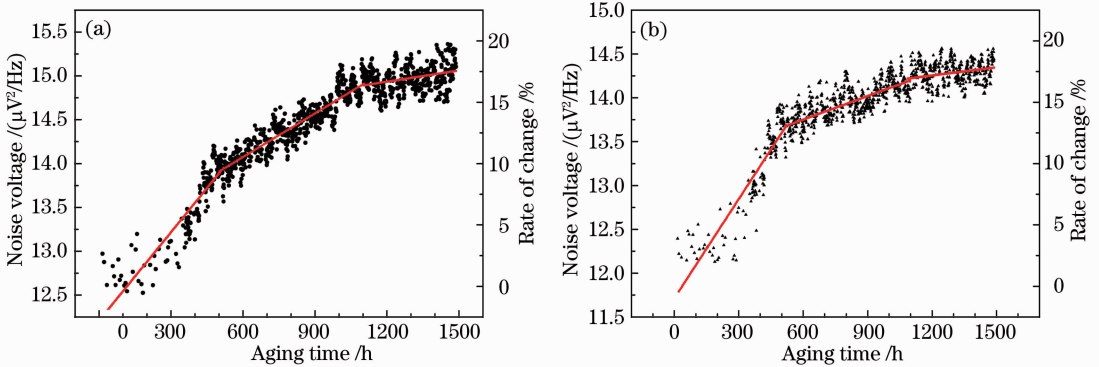


图 2 加速老化实验结果。(a) 探测器 1; (b) 探测器 2

Fig. 2 Results of the acceleration aging experiment. (a) Detector 1; (b) Detector 2

暗电压随老化时间的演化曲线及其拟合结果如图 3 所示。无光输入时,两只探测器的暗电压均为负值,随着老化过程的进行,其暗电压在不断增大。

同的光功率,测量探测器的直流电压输出与光功率的关系,得到其线性区范围。再将探测器放入变温装置中对其进行变温,温度范围从 298 K 到 358 K,每次增加 10 K,待温度稳定后,测量其本底噪声。在此过程中输入相同功率 P 的光信号,得到有光条件下输出噪声的温度特性。

4 结果与讨论

4.1 老化中探测器本底噪声的演化情况

加速老化实验结果如图 2 所示,图 2(a)和(b)分别表示探测器 1 和 2 的本底噪声随时间的演化情况。从图中可以看出,随着老化时间的增加,两个探测器的本底噪声都在不断增大。由 2.2 节中的探测器噪声模型可知,热噪声是本底噪声的主要来源,因此可以推断在 358 K 加速过程中探测器的热噪声是在不断增加的。并且两个探测器的噪声演化有着统一的变化趋势。在 450~1000 h 内,增加趋势有所变缓。最后一段时间内探测器本底噪声增幅变得更加平缓。用线性分段函数进行拟合^[12],可以很明显看到三条线的斜率在不断变小,即探测器输出本底噪声随时间的增幅程度在降低。在整个加速老化期间两个探测器的本底噪声增大了 20%。由阿伦尼斯模型可知,在 358 K 下所需加速老化时间降为原来的 1/64,则可以推算出探测器在室温持续工作约 10.8 年(接近 10^5 h)后其本底噪声将增加 20%。在探测器加速老化实验中两个探测器彼此间有类似的变化趋势及增幅程度,故可以表明对于在 1550 nm 附近波段的 InGaAs PIN 光电探测器的加速老化结果具有普遍意义。

对实验结果进行分析,可以得到两只探测器的暗电压值均增加了约 0.35%,其增加幅度远远小于热噪声的变化量(20%)。

探测器内跨阻热噪声是由于导体内载流子无规则热运动而产生的噪声,包括半导体器件内载流子发射的随机性引起的涨落电压起伏和电路中两点电位差起伏^[13]。因此温度升高会加剧无规则热运动,其结果是导致热噪声在不断增大。根据热噪声随老化时间的演化情况,可以将其分为三个阶段:第一阶段,由于高温加剧无规则热运动,使得热噪声迅速增大;第二阶段,温度引起的载流子无规则运动开始变缓,而电路中电阻阻值随温度仍然在不断增大,导致热噪声仍然在增大,增幅有所变缓;第三阶段,由于无规则热运动接近极值,热噪声的增大主要由电阻阻值增大引起的,相比热运动引起的噪声而言相对较小,故总的热噪声缓慢增加。

0.0056),而 t 为实验时间, t_0 和 V_0 分别为实验总时间和最后一次实验结果。通过(5)式可以推算出老化过程中某一时刻探测器暗电压的变化程度。可以推断,探测器在室温正常工作约 10.8 年后,其暗电流噪声相应增大 0.35%。综上所述,经过加速老化实验后,探测器本底噪声中热噪声和暗电流噪声不再遵循(4)式的变化趋势,需要进行修正。修正公式在后续分析中给出。

4.2 老化前、后探测器线性区的变换情况

探测器线性区是指探测器的输出光电压与输入光功率成比例的一个范围。在这个范围内,探测器的响应度是一个常数。只有输入光功率落在这个范围内探测器对输入光的响应才是准确的。因此测量探测器在老化前后线性区的变化是完全必要的。实验结果如下图 4(a)和(b)所示。很明显可以看出,两只探测器的线性区范围都在不断缩小的,其中探测器 1 的线性区从 $6.16 \mu\text{W}$ 降为 $5.34 \mu\text{W}$,而探测器 2 的线性区从 $6.73 \mu\text{W}$ 降为 $6.06 \mu\text{W}$,即两只探测器对光的响应能力都在变弱。然而探测器的响应度即光电压与输入光功率之间的关系,也可以称为积分灵敏度 R_u ,却是由原来的探测器 1 中的 $0.53 \text{ V}/\mu\text{W}$ 提高到 $0.61 \text{ V}/\mu\text{W}$,探测器 2 中的 $0.42 \text{ V}/\mu\text{W}$ 提高到 $0.48 \text{ V}/\mu\text{W}$ 。因此,探测器经过加速老化后其线性区范围下降了 13.31%和 9.95%,对光信号的积分灵敏度却分别提高了 15.1%和 14.3%。

由于在长期高温老化过程中,探测器内跨阻发生不可逆变化,高温使得电阻阻值缓慢增加,当温度恢复到室温时,电阻不能恢复到原值^[14]。并且温度升高会增加 PIN 中 I 区(耗尽区)宽度,吸收光子数量会变大,产生的光电流也相应增大^[15]。因此老化后相同入射光功率下,光电探测器所产生的光电流

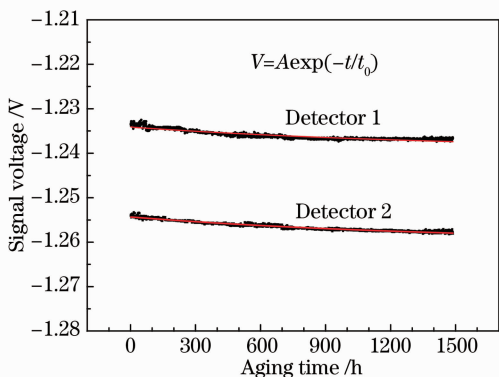


图 3 两只探测器暗电压随老化时间的变化曲线(黑色为实验数据;红色为拟合曲线)

Fig. 3 Degradation of dark voltage of two detectors with aging time (the dark is the experimental results; the red is the fitted curve)

用指数衰减模型^[14]对暗电压测量结果进行拟合,得到

$$V = A \exp(-t/t_0) + V_0, \quad (5)$$

式中 A 是与温度相关的系数为 $A = 2/T$ (约为

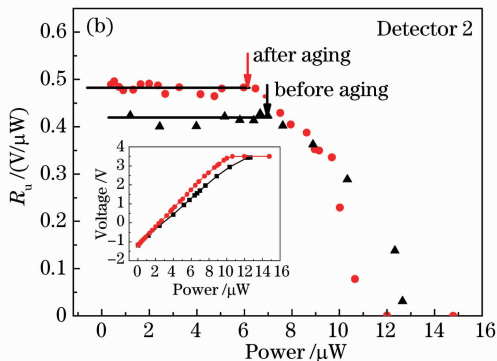
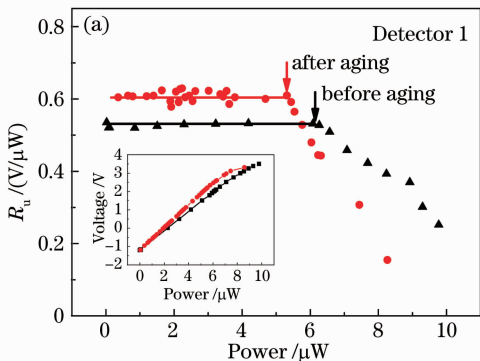


图 4 室温探测器 1 和 2 在老化前后的线性区范围变化情况(黑色为老化前结果,红色为老化后结果)

Fig. 4 Degradation of the linear region of two detectors before and after aging (the black are the results before aging; the red are the results after aging)

或者光电压会增大, 即其积分响应度会提高。然而积分响应度的改变会造成真实的输出电压略小于探测器输出电压, 其结果是导致输出信号的失真, 会给后续测量应用带来很大的误差。

4.3 老化前、后探测器噪声的温度特性

由(4)式可知, 在跨阻不变时, 探测器输出热噪声与温度成正比。因此在加速老化实验前后对同一只探测器进行变温实验, 在不同温度下及输入光信号 $P=0, 0.5 \mu\text{W}$ 下测量其噪声。实验结果如图 5 所示。

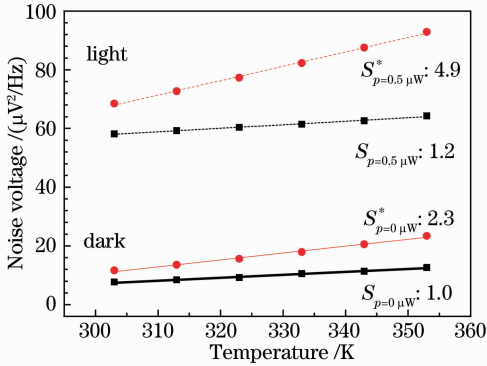


图 5 老化前后不同光功率下探测器噪声的温度特性(黑点和红点分别为老化前后实验结果; 直线和点线分别为无光和无光条件下拟合曲线)

Fig. 5 Temperature property of the detector noise with different optical power before and after aging (the black and red dot are the experiment results before and after aging; the straight and dot line are the fitted curve in bright and dull)

老化前, 探测器本底噪声 σ_{bg}^2 与温度 T 之间关系满足(4)式, 其斜率约为 $S_{p=0, \mu\text{W}} = 1.0 \mu\text{V}^2 / (\text{Hz} \cdot \text{K})$ 与理论公式的计算结果 $4k_{\text{B}}\Delta fR = 2.76 \mu\text{V}^2 / (\text{Hz} \cdot \text{K})$ 基本符合; 而入射光功率为 $0.5 \mu\text{W}$ 时, 探测器输出的总噪声 σ_{total}^2 包含光信号噪声 ($\sigma_{\text{light}}^2 = \sigma_{\text{RIN}}^2 + \sigma_{\text{sh}}^2$) 和探测器本底噪声 σ_{bg}^2 , 而总噪声 σ_{total}^2 与温度 T 依然保持正比关系, 其斜率 $S_{p=0.5, \mu\text{W}} = 1.2 \mu\text{V}^2 / (\text{Hz} \cdot \text{K})$ 。由(3)式可知光信号噪声 σ_{light}^2 与光功率 P 有关, 在恒定光功率 P 下, 探测器输出总噪声中光噪声 σ_{light}^2 理论上应保持不变, 并且与温度无关。在有无光输入的情况下, 两噪声对温度的斜率保持不变, 即 $S_{p=0, \mu\text{W}} = S_{p=0.5, \mu\text{W}}$ 成立。所以, 老化之前理论模型能够很好地应用于探测器噪声的实验结果。

老化之后, 探测器本底噪声 σ_{bg}^2 与温度 T 之间关系满足(4)式, 其斜率为 $S_{p=0, \mu\text{W}}^* = 2.3 \mu\text{V}^2 / (\text{Hz} \cdot \text{K})$, 与老化之前相比增加了近 1 倍; 当 $p=0.5 \mu\text{W}$ 的光输入到探测器时, 其输出的总噪声 σ_{total}^2 包括光信号

噪声 ($\sigma_{\text{light}}^2 = \sigma_{\text{RIN}}^2 + \sigma_{\text{sh}}^2$) 和探测器本底噪声 σ_{bg}^2 两个部分, 虽然总噪声 σ_{total}^2 与温度 T 依然保持正比关系, 然而其斜率 $S_{p=0.5, \mu\text{W}}^* = 4.9 \mu\text{V}^2 / (\text{Hz} \cdot \text{K})$, 该值约为 $S_{p=0, \mu\text{W}}^*$ 的 2 倍。所以, 老化后有无光时的探测器噪声不满足噪声理论模型描述, 需要在对模型修正。修正公式分别为

$$\sigma_{\text{bg}}^{\prime 2} = 2e\Delta fR^2 I_{\text{dark}} + \sigma_{\text{extra}}^2 + \alpha \cdot 4k_{\text{B}}\Delta fRT, \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{total}}^{\prime 2} = P^2 \frac{\Delta f\lambda^2}{\Delta\lambda c} + 2e\Delta fR^2 R_{\text{D}}P + 2e\Delta fR^2 I_{\text{dark}} + \sigma_{\text{extra}}^2 + \alpha(\chi P)4k_{\text{B}}\Delta fTR, \quad (7)$$

式中 $\alpha = 2, \sigma_{\text{extra}}^2 = 0.23 \mu\text{V}^2 / \text{Hz}, \chi = 2 \mu\text{W}^{-1}$ 。在由温度升高引起噪声增大之外, 总噪声中除了光噪声和探测器本底噪声外, 额外附加了一定的噪声, 同时光信号功率 P 和温度 T 与探测器噪声的关系不再是(3)式所描述的。

5 结 论

在理论上, 利用 358 K 恒温加速老化研究 InGaAs PIN 光电探测器在长时间正常工作过程中其输出电信号噪声的演化规律, 实验结果表明经过加速老化后, 探测器输出热噪声增大了 20%, 暗电流噪声增大了 0.35%, 也就是说在探测器正常工作约 10.8 年后, 其本底噪声会增大约 20%。探测器的线性区范围分别缩短了约 10%。以实验结果为基础对经长期老化后的探测器输出噪声模型公式进行了修正。本文实验研究结果对进一步修正探测器噪声模型和 InGaAs 光电探测器的实践中失效情况研究提供实验基础, 也对研制性能更好的光电探测器及其在实践应用上提供了一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Yue Zhengan. Xenics InGaAs SWIR detector is part of Proba-V space mission[J]. Infrared, 2013, 34(7): 19.
- 2 岳桢干. 比利时 Xenics 公司研制 Proba-V 卫星载 InGaAs 短波红外探测器[J]. 红外, 2013, 34(7): 19.
- 3 H Dave, C Dewan, S Paul. AWIFS camera for resource sat[C]. SPIE, 2006, 6405: 64050X.
- 4 Liu Shaoqing, Han Qin, Yang Xiaohong, et al.. Fabrication and characterization of high-speed and high-efficiency photodetector [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(2): 022301.
- 5 刘少卿, 韩勤, 杨晓红, 等. 高速高效光电探测器的制备、测试及特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(2): 022301.
- 6 Huang Jianhua, Wu Guang, Zeng Heping. Study of 1.5 GHz harmonics ultrashort pulse gated InGaAs/InP avalanche photodiode single-photon detection[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0204001.
- 7 黄建华, 吴光, 曾和平. 基于 1.5 GHz 多次谐波超短脉冲门控 InGaAs/InP 雪崩光电二极管的近红外单光子探测技术研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0204001.
- 8 F Bayle, A Mettas. Temperature acceleration models in

- reliability predictions: justification & improvements [C]. Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2010. 1-6.
- 6 R C Rabelo, R T de Carvalho, J Blake. SNR enhancement of intensity noise-limited FOGs[J]. J Lightwave Technol, 2000, 18(12): 2146-2150.
- 7 Jiang Xianshen, Han Yan. Analysis of noises and method of reducing the noises in optoelectronic detectors [J]. Modern Electronics Technique, 2005, 28(4): 3-4.
姜先申, 韩 焱. 光电探测器噪声分析及降低噪声的方法[J]. 现代电子技术, 2005, 28(4): 3-4.
- 8 W K Burns, R P Moeller, A Dandridge. Excess noise in fiber gyroscope sources[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1990, 2(8): 606-608.
- 9 Desurvire Emmanuel. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications[M]. New York: Wiley, 1994. 156-158.
- 10 P R Morkel, R I Laming, D N Payne, *et al.*. Noise characteristics of high-power doped-fibre superluminescent sources[J]. Electron Lett, 1990, 26(2): 96-98.
- 11 W Q Meeker, A Luis. Escobar. Statistical Methods for Reliability Data[M]. Canada: Wiley-Interscience Publication, 1998. 700-701.
- 12 Xie Guangyong. Noise analysis of optoelectronic detector[J]. Information Technology, 2009, 32(8): 8-10.
解光勇. 光电探测器噪声特性分析[J]. 信息技术, 2009, 32(8): 8-10.
- 13 Sun Mengxiang, Tan Manqing, Wang Lufeng. Lifetime tests of 1300 nm superluminescent diodes[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(10): 1994-1997.
孙孟相, 谭满清, 王鲁峰. 1300 nm 超辐射发光二极管寿命测试[J]. 光学学报, 2008, 28(10): 1994-1997.
- 14 Liu Shuying, Zhou Dongxiang, Kang Jian, *et al.*. Analysis on high-temperature-resistant characteristics of composite electroceramics [J]. Journal of Inorganic Materials, 1997, 2(12): 242-246.
- 15 Wang Bo, Huang Kama. Effect of temperature on power response of PIN diode limiter[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(4): 645-648.
王 波, 黄卡玛. 温度对 PIN 二极管限幅器功率响应特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(4): 645-648.

栏目编辑: 何卓铭