

文章编号:1001-9014(2006)01-0033-04

GaAlAs 红外发光二极管功率老化对其 1/f 噪声特性的影响

包军林, 庄奕琪, 杜磊, 马仲发, 李伟华, 李聪

(西安电子科技大学 微电子研究所宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要:在可靠性筛选中检测具有潜在损伤的器件一直是个难题. 对 GaAlAs 红外发光二极管 (IRLED) 功率老化前后低频噪声的测量发现, 1/f 噪声幅值与偏置电流的 γ 次方成正比 (小电流区 $\gamma=1$, 在大电流区 $\gamma\approx 2$), 且老化后 1/f 噪声幅值比老化前增大 2 个数量级. 基于载流子数涨落和迁移率涨落机制建立了一个 GaAlAs IR LED 的 1/f 噪声模型, 分析结果表明 GaAlAs IR LED 的 1/f 噪声在小电流时反映体陷阱特征, 大电流时反映激活区陷阱特征, 1/f 噪声的增加归因于功率老化诱生的界面陷阱和表面陷阱, 1/f 噪声可以用来检测 GaAlAs IR LEDs 的潜在缺陷.

关键词:红外发光二极管; 1/f 噪声; 功率老化; 陷阱

中图分类号: TN386.1 **文献标识码:** A

EFFECTS OF POWER AGING ON 1/f NOISE CHARACTERISTICS FOR GaAlAs IR LED

BAO Jun-Lin, ZHUANG Yi-Qi, DU Lei, MA Zhong-Fa, LI Wei-Hua, LI Cong

(Key Lab of Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Detecting the latent damage of devices by reliability screen is an ever existing difficult problem. 1/f noise in GaAlAs infrared ray LEDs (IR LEDs) was experimentally studied over a wide range of bias currents with special emphasis on power aging. Experimental results demonstrate that the magnitude of 1/f noise increases 2 order of magnitude after aging and it is proportion to the current I_b^γ (at small currents, $\gamma\approx 1$, at large currents, $\gamma\approx 2$). Based on the mechanisms of carrier density and mobility fluctuation, a model for 1/f noise in GaAlAs IR LEDs is developed. It is showed that at small currents, 1/f noise reveals characteristics of bulk defects, while at large current, it reveals active defects. The increase of 1/f noise is due to some new interface traps and surface traps that are induced by power aging. 1/f noise can be used to diagnose latent traps in GaAlAs IR LEDs.

Key words: infrared LED; 1/f noise; power aging; traps

引言

以 GaAlAs 双异质结红外二极管 (IRLED) 为主的短波长发光二极管已经广泛地用于现代通信领域, 其可靠性也越来越受到关注. LED 可靠性筛选的通常方法是采用功率老化^[1], 即选择对器件可靠性和稳定性影响较大的性能参数作为老化前后的考核参数, 然后实施一定周期的老化测试, 该方法周期长、成本高而且对被测器件有一定的损伤. 大量实验表明^[2], 光电子器件低频噪声与其可靠性有着明显的相关性, 可成为一种敏感的无损可靠性表征技术. 但是, 目前的研究均集中在激光二极管 (LD) 和 GaP

发光二极管 (LED), 且实验结果不尽相同^[3]. 关于 GaAlAs 双异质结红外二极管 1/f 噪声特性的研究尚未见报道.

本文在输入电流宽范围变化的条件下, 测试了 GaAlAs 双异质结红外二极管功率老化前后的 1/f 噪声特性. 实验发现, 功率老化前后均有 1/f 噪声幅值与偏置电流的 γ 次方成正比的变化规律, 当偏置电流小于 3mA 时, $\gamma\approx 1$, 在 3mA ~ 5mA 的范围内, 1/f 噪声幅值出现饱和, 当偏置电流大于 5mA 时, $\gamma\approx 2$. 相比老化前, 老化后 1/f 噪声幅值在高电流区增加了 2 个数量级. 不同偏置条件下的 1/f 噪声来自于不同的 1/f 噪声源, 因而也反应了器件内部不

收稿日期: 2005-03-30, 修回日期: 2005-10-13

Received date: 2005-03-30, revised date: 2005-10-13

基金项目: 国家自然科学基金 (60276028), 国防预研基金 (51411040601DZ014), 国防科技重点实验室基金 (51433030103DZ01)

作者简介: 包军林 (1973-), 男, 甘肃天水人, 西安电子科技大学博士. 主要研究从事低频噪声理论及其在电子器件可靠性表征中的应用研究.

同类型的缺陷信息. 基于载流子数涨落和迁移率涨落机制, 建立了一个 GaAlAs IR LED 1/f 噪声的简单模型, 基于该模型的分析结果表明, 小电流区的 1/f 噪声特性反映了 GaAlAs IR LED 体区陷阱特征, 大电流区的 1/f 噪声反映了激活区陷阱特征. 老化后 1/f 噪声幅值的增加归因于功率老化诱生的 GaAlAs IR LED 界面陷阱和表面陷阱. 因而, 1/f 噪声可用来探测功率老化对 GaAlAs IR LED 器件不同区域的损伤, 本文的研究结果为其提供了实验和理论基础.

1 实验

被测器件为北京瑞普公司的 GaAlAs 双异质结红外二极管, 老化条件为: 温度 $T = 300\text{k}$ 、偏置电流 $I_F = 10\text{mA}$, 老化时间 $t = 168\text{h}$. 低频噪声测试采用西安电子科技大学微电子研究所研制的基于虚拟仪器的电子器件低频噪声测试系统^[4]. 噪声测量电路如图 1 所示, 电源采用干电池组, 改变 1k 的串连电阻可调节 IRED 的偏置电流. 经过 PARC113 低噪声前置放大器的放大, 被测器件两端的电噪声进入计算机控制的高速实时采集系统, 分析后提取噪声参数.

2 实验结果

为了反映功率老化对被测器件性能的影响, 分

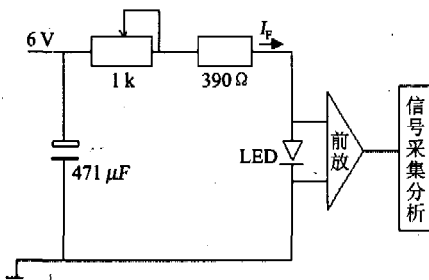


图 1 噪声测量偏置电路
Fig. 1 Bias circuit for noise measurements

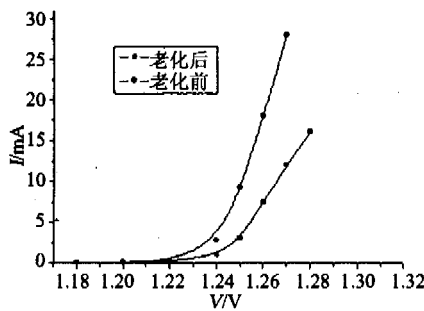


图 2 老化前后的 I-V 特性
Fig. 2 I-V Characteristics before and after power aging

别测试了老化前后 GaAlAs IR LED 的 I-V 特性, 如图 2 所示. 该图表明, 功率老化使得 LED 的动态电阻增加, 开启性能恶化. 图 3 给出了被测器件在偏置电流 I_F 分别为 1mA、5mA 和 10mA 时, 老化前后的电压噪声功率谱密度与频率的关系, 在双对数坐标中呈现明显的 1/f 噪声特性, 且随着偏置电流的增加, 老化前后功率谱密度的相对变化量也呈现不同的增加趋势. 通过提取 1/f 电流噪声幅值 B 发现, 老化前后的 B 均与 I_F 成正比, 但在不同的输入电流范围, 指数 γ 有着不同的值, 如图 4 所示. 当偏置电流 I_F 在 3mA 以下时, $\gamma \approx 1$; 随着 I_F 的增加, B 值趋于饱和, $\gamma \approx 0$; 当 I_F 大于 5mA 时, B 值急剧增加, $\gamma \approx 2$. 同时, 该图也表明在低电流区老化前后的 1/f 噪声幅值没有明显的增加, 只有当偏置电流 I_F 大于 6mA 以后, 1/f 噪声幅值才急剧增大, 且相对老化前增大了 2 个数量级.

3 分析与讨论

双异质结 IRLED 通常由一个同型异质结和一个异型异质结组成. 根据半导体理论^[8], 异质结中载流子输运主要有四种机制: 扩散、界面复合、隧道复合和表面复合, 因而, 通过结区的总电流 I_F 包含扩散电流、界面复合电流、隧穿复合电流和表面复合电流. 这四种电流均与结两端的电压成指数关系^[5], 因而总电流可以表示为:

$$I_F = I_0 \exp(qV/\beta kT) \quad (1)$$

其中 I_0 为反向扩散饱和电流, V 为结电压, k 为玻耳兹曼常数, T 为绝对温度, β 为电流理想因子 (对于扩散电流, $\beta = 1$, 对于复合电流, $\beta = 2$).

载流子的不同输运方式对应了该器件不同的 1/f 噪声产生机制: 与体陷阱相关的扩散 1/f 噪声和与界面态/表面态相关的 1/f 噪声. 对于扩散电流而言, 异质结界面处能带断续使得结区两边的势垒高度不同, 载流子扩散以宽带一侧为主^[5]. 根据迁移率涨落机制^[2], 扩散 1/f 噪声的功率谱密度与输入电流有如下的关系:

$$S_D(f) = \alpha q I_F / f \tau \quad (2)$$

其中 $S_D(f)$ 为扩散 1/f 噪声功率谱, α 为 Hooge 常数, q 为电子电量, I_F 为偏置电流, τ 为少流子寿命, f 为频率.

根据半导体理论^[5]和载流子数涨落理论^[2], 通过表面态/界面态复合的电流 I_R 及其复合速率 G_R 涨落的功率谱 $S_{GR}(f)$ 可分别表示为

$$I_R = I_{R0} \exp(qV_a/kT) G_R \quad (3)$$

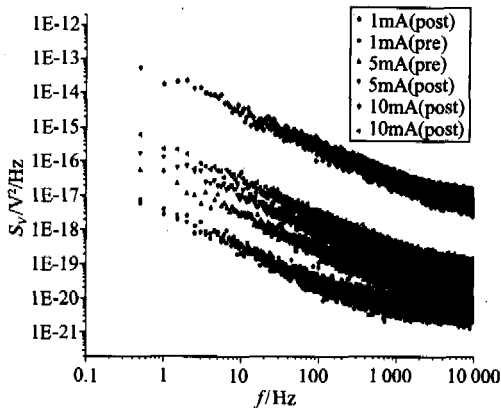


图3 不同偏置电流下的低频噪声频谱图
Fig.3 Low frequency noise spectra vs frequency at various bias currents

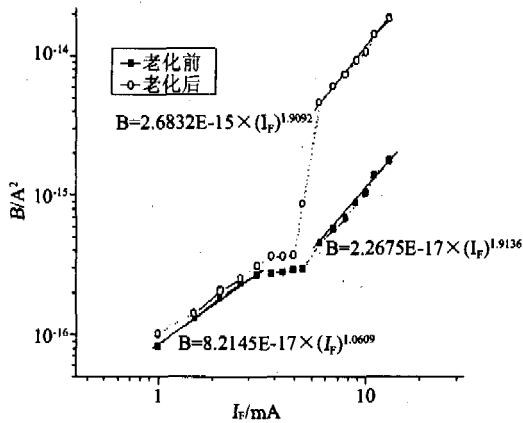


图4 B 与 I_F 的关系 (散点为测量值, 曲线为拟和线)
Fig.4 The magnitudes of 1/f noise (B) vs. various bias currents (I_F) (scatter dots are measured, curves are fitted)

$$S_{G_R}(f) = CG_R/f, \quad (4)$$

其中 V_a 为空间电荷区两种载流子浓度相等处的电压, G_R 为复合速率, C 为常数. 由式(3)和式(4)可得 I_R 的功率谱为

$$S_{I_R}(f) = (I_{R0})^2 \frac{CG_R}{f} \left(\frac{I_F}{I_0} \right)^{\frac{2qV_a}{V}}, \quad (5)$$

在外加电压较小、界面态和表面态较少时, 载流子分别在异质结界面两侧积累, 并以扩散为主的方式输运. 异质结界面处能的带断续使得结区两边的势垒高度不同, 宽带一侧的载流子扩散起主导作用, 总电流也与宽带一侧的电压成指数关系. 此时的 1/f 噪声主要是扩散 1/f 噪声, 电流理想因子 $\beta=1$, 由式(2)可知, 1/f 噪声幅值与电流成正比. 图 4 给出老化前的实验数据的拟和结果为 $\gamma=1.0609$, 老化后也没有明显得改变. 随着外加正向偏压的增加, 异质结势垒高度将进一步降低, 载流子与结区附近的界

面态和表面态复合作用加强, 通过界面态复合载流子形成界面复合电流, 载流子通过界面态的隧穿形成隧道复合电流. 文献[5]中用 DLTS 测出的界面态数据计算结果表明, 虽然界面复合电流理想因子 $\beta=2$, 但是比实际测量的总电流小两个数量级. 文献[5]的进一步研究显示, 与异质结平面垂直的界面上含有大量的表面复合中心, 通过这些表面陷阱的复合电流是构成总电流的一个主要成份. 和界面复合电流一样, 表面复合电流的理想因子也为 2. 由式(5)可知, 对于对称结和表面分量 (对称结 $V_a=0.5V$, 极不对称结 $V_a=0.75V$), 其 1/f 噪声幅值和输入电流的平方成正比, 这与图 4 的实验结果完全一致 (老化前 $\gamma=1.9136$, 老化后 $\gamma=1.9092$).

晶格常数的失配通常使得异质结界面处存在大量的悬挂键和弱键, 在一定的应力作用下, 譬如大电流、长时间的功率老化, 这些悬挂键会失去或获得一个或几个未成对电子而形成界面态, 这些弱键也会在应力的作用下通过裂键形成界面态. 另外, 结区表面的原有的一些悬挂键和弱键也会以相同的方式形成了新的表面态^[6]. 当有外加电压时, 界面态的电荷变化会影响外加电压在界面两侧的分配, 从而影响 I-V 特性. 文献[5]的计算结果表明, 界面态与势垒两侧载流子交换不平衡, 界面态密度越大, 这种不平衡越严重, 致使 I-V 特性曲线右移, 这与图 2 的实验结果完全吻合. 同时, 老化后界面态和表面态的增加使得载流子通过这两种陷阱的复合过程增加, 根据式(5), 表面 1/f 噪声的幅值也相应增加 (如图 4 所示).

在中等偏置的条件下, 起初载流子以扩散的方式为主. 随着偏置电流的增加, 更多的载流子被注入到结区, 减小体区载流子浓度梯度, 扩散过程逐渐减弱, 通过势垒的隧穿过程和通过结区陷阱的复合过程相对增加^[5], 两者的共同作用使得此时电流涨落基本不随输入电流的增加而变化, 对应于图 4 中 I_F 在 3mA ~ 5mA 的区域.

由此可知, 对 GaAlAs IR LED 而言, 不同偏置条件下的 1/f 噪声来此于不同的 1/f 噪声源, 也反应了器件内部不同位置的缺陷信息, 低电流时的 1/f 噪声特性反映了体区陷阱特征, 高电流时的 1/f 噪声反映了激活区陷阱特征. 功率老化前后 1/f 噪声幅值有 100 倍的变化, 因而可以用来检测功率老化对该器件不同区域的损伤.

4 结论

可靠性筛选对被测器件有一定程度的损伤, 尽

管此时电参数尚未发生明显变化,但其 $1/f$ 噪声幅值已增加了几个数量级. 本文在输入电流宽范围变化的条件下,测量了该器件的 $1/f$ 噪声,实验发现,功率老化前后均有 $1/f$ 噪声幅值与偏置电流的 γ 次访成正比的变化规律,当偏置电流小于 3mA 时, $\gamma \approx 1$,在 $3\text{mA} \sim 5\text{mA}$ 的范围内, $1/f$ 噪声幅值出现饱和,当偏置电流大于 5mA 时, $\gamma \approx 2$. 相比老化前,老化后 $1/f$ 噪声幅值在低电流区没有明显的增加,但是,在高电流区, $1/f$ 噪声幅值增加两个数量. 不同偏置条件下的 $1/f$ 噪声来此于不同的 $1/f$ 噪声源,因而也反映了器件内部不同位置的缺陷信息. 基于载流子数涨落机制建立了一个 GaAlAs IR LED $1/f$ 噪声简单模型,该模型的分析结果表明:低电流区的 $1/f$ 噪声特性反映了体区陷阱特征,高电流区的 $1/f$ 噪声反映了激活区陷阱特征; $1/f$ 噪声的增加归因于功率老化诱生的界面陷阱和表面陷阱. 因而, $1/f$ 噪声可用来探测功率老化对该类器件不同区域的损伤.

REFERENCES

- [1] Doru Ursutiu, Brian K Jones. Low-frequency noise used as a lifetime test of LEDs[J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 1996, 42(11):1133—1136.
- [2] ZHUANG Yi-Qi, QING Sun. *Noise and its Minimizing Technology in Semiconductor Devices*[M]. Beijing: National Defence Industry Press (庄奕琪,孙青. 半导体器件中的噪声及其低噪声化技术. 北京:国防出版社), 1993:160—187.
- [3] Chen X Y, Pedersen A, Helleso O G, et al. Electrical noise of laser diodes measured over a wide range of bias currents [J]. *Microelectronics Reliability*, 2000, 40 (6): 1925—1928.
- [4] BAO Jun-Lin, ZHUANG Yi-Qi, DU Lei, et al. Noise testing and analyzing system of electronic device based on virtual instrumentation[J]. *Journal of Apparatus and Instrument*(包军林,庄奕琪,杜磊等. 基于虚拟仪器的电子器件低频噪声测试分析系统, 仪器与仪表学报), 2004, 3 (supplement): 257—261.
- [5] YU Li-Sheng. *Semiconductor Heterojunction Physics* [M], Beijing: Scientific & Technical Press(虞丽生. 半导体异质结物理. 北京:科学技术出版社), 1990, 97—110.
- [6] WANG Da-Jun, ZHANG Pei, LUAN Feng, et al. InGaAlP quantum wells light emitting devices with periodic microstructures[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(王大军,章蓓,栾峰,等. 带有周期性微结构的 InGaAlP 量子阱发光二极管, 红外与毫米波学报), 2002, 21(1): 87—90.
- [1] Doru Ursutiu, Brian K Jones. Low-frequency noise used as