

# 光电耦合器电流传输比的噪声表征\*

胡 瑾<sup>1,†</sup> 杜 磊<sup>1</sup> 庄奕琪<sup>2</sup> 何 亮<sup>1</sup> 包军林<sup>2</sup> 黄小君<sup>1</sup> 陈春霞<sup>1</sup> 卫 涛<sup>1</sup>

(1 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2 西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

**摘要:** 光电耦合器中可俘获载流子的陷阱密度是影响其电流传输比(CTR)的重要因素,并与器件可靠性有密切关系.在器件内部的多种噪声中,1/f 噪声可有效地表征器件陷阱密度.本文在研究光电耦合器工作原理以及 1/f 噪声理论的基础上,建立了光电耦合器的 CTR 表征模型和 1/f 噪声模型.在输入电流宽范围变化的条件下,测量了器件的电学噪声和 CTR 变化,实验结果验证了以上模型的正确性.将 CTR 模型与噪声模型相结合,得到了 CTR 与 1/f 噪声之间的关系.此关系应用于对光电耦合器辐照实验结果的分析,实验结果与理论得到的结论一致.理论与实验结果表明,噪声幅值越大,电流指数越接近于 2,则器件的可靠性越差,相同工作条件下 CTR 的老化衰减量越大,其失效率显著增大.从而证明噪声可表征光电耦合器的 CTR 并能准确地反映器件的可靠性.

**关键词:** 1/f 噪声; 光电耦合器; 电流传输比; 陷阱

**PACC:** 7270; 5225G; 7960

**中图分类号:** TN4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)04-0597-07

## 1 引言

随着光电混合集成电路技术的发展及生产工艺的日趋成熟,光电耦合器在军用和民用领域都受到普遍青睐.但是,由于光电耦合器自身的结构较一般器件复杂,其质量和可靠性的控制、预测和评估也较一般混合电路困难和复杂.导致光电耦合器性能退化的主要因素是电流传输比(CTR)的降低,而引起 CTR 降低的直接原因是材料中产生能够俘获载流子的陷阱数目增多,致使载流子数目减少.陷阱的来源主要包括材料本身存在的缺陷或杂质,电学应力及环境等因素诱生的缺陷.这些缺陷也是造成产品失效率增大,可靠性降低的主要因素.由于上述原因,可靠性工程中一般用 CTR 作为光电耦合器的可靠性表征参量.具体应用时,根据光电耦合器的实际用途设定 CTR 门限值,采用加速寿命实验和高低温循环实验检测 CTR 变化,当 CTR 低于门限值就认为器件失效.这种评估方法具有破坏性.

近年来,低频噪声作为一种比传统可靠性表征参量更灵敏,且蕴含更为丰富的陷阱信息的评估方法而受到广泛关注<sup>[1,2]</sup>.理论和实验均已证明<sup>[2,3]</sup>,低频噪声通常是由器件中的杂质、陷阱以及晶格不

完整性引起的,如氧化层陷阱、晶格位错等.而这些陷阱也正是引起器件失效的主要因素,所以低频噪声尤其是 1/f 噪声与器件可靠性密切相关.如上所述,陷阱是引起光电耦合器 CTR 降低的主要因素.由此推断低频噪声也有望用于光电耦合器 CTR 降低的表征.基于这一设想,本文在发光二极管可靠性噪声表征模型<sup>[4]</sup>的基础上,研究噪声用于光电耦合器 CTR 表征的方法.

本文首先对器件的内部结构进行了研究,通过建立光电耦合器的 CTR 模型,证明陷阱密度是影响光电耦合器发光效率等性能参数的重要因素,并建立了光电耦合器低频噪声模型,该模型可以有效地表征陷阱密度.其次通过在宽范围输入电流条件下测量器件的电学噪声,并结合其电学特性测量,证明了上述理论模型的正确性.最后应用上述两模型得到噪声与 CTR 之间的关系,从而建立起光电耦合器 CTR 的噪声表征方法.

## 2 模型

光电耦合器是把发光器件和受光(光敏)器件封装在同一壳体内的光电转换器件的总称.通过发光二极管发出光,光敏探测器接收到光照后输出电信

\* 国家自然科学基金(批准号:60276028),国防预研基金(批准号:51411040601DZ014)和国防科技重点实验室基金(批准号:51433030103DZ01)资助项目

† 通信作者,Email:hujin007@eyou.com

2006-09-11 收到,2006-11-24 定稿

号,实现“电信号→光信号→电信号”的转换与传输.本节首先分别讨论器件发光部分和光敏部分的模型,在此基础上,再通过耦合的方式得到整个光电耦合器件模型.

## 2.1 CTR 表征模型

电流传输比是指输出管的工作电压为规定值时,输出电流和发光二极管正向电流之比,即  $CTR = (I_C/I_{LED}) \times 100\%$ . 在器件的寿命期它不是一个常数,而是随时间变化的,所以引进交流传输比  $\Delta CTR$ . 它表示 CTR 随时间的变化,因而在做老化失效实验时,通常使用  $\Delta CTR$ . 本文表征模型分别针对 CTR 和  $\Delta CTR$  建立.

### 2.1.1 发光二极管

发光二极管(LED)的实质性结构是半导体 pn 结,LED 发光区域主要集中在 p-GaAs 有源区,根据其工作原理<sup>[5]</sup>可知发光二极管就是在 pn 结上加正向电压产生少数载流子注入,通过少数载流子的辐射复合发光产生的光子,而光子密度  $S$  在一定条件下决定了二极管的输出功率  $P_{out}$ ,因此对 LED 而言注入少数载流子通过辐射复合产生的光子数就尤为重要<sup>[4]</sup>. 由于 LED 的发光区主要集中在有源区,所以本文主要分析有源区过剩载流子密度和总光子密度,对其速率方程进行稳态分析可得<sup>[6]</sup>:

$$I_{LED} = R_n(n)qV_{act} + R_r(n)qV_{act} \quad (1)$$

$$S = \tau_{ph}\beta_{sp}R_r(n) \quad (2)$$

其中  $R_r$  为直接辐射净复合率; $R_n$  为复合中心的净复合率; $n$  为有源区过剩载流子密度; $V_{act}$  为有源区体积; $I_{LED}$  为注入到有源区的电流; $S$  为有源区总光子密度; $\beta_{sp}$  为自发发射系数; $\tau_{ph}$  为光子寿命.

根据文献[4]可知,假设  $C_n = C_p = C$ ,且  $n_0 + n = p + p_0$  时, $R_r$  表示为<sup>[6]</sup>:

$$R_r(n) = \frac{2B_r n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0 T}\right)}{CN_{t,LED} + 2B_r n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0 T}\right)} \times \frac{I_{LED}}{qV_{act}} \quad (3)$$

其中  $B_r$  为复合系数; $n_0, p_0$  分别为平衡态电子和空穴密度; $n$  为非平衡载流子密度; $C_n, C_p$  分别为电子和空穴俘获系数; $n_i$  为本征载流子浓度; $N_{t,LED}$  为 LED 界面态陷阱密度.

根据半导体 p-n 结  $I$ - $V$  特性<sup>[7]</sup>,结合对 LED 分析,可推知 LED 的  $I$ - $V$  特性为:

$$I_{LED} = I_D + I_R = \frac{D_n}{L_n} \times \frac{n_i^2 q}{N_A} \exp(qV/kT) + \frac{qn_i dCN_{t,LED}}{2} \exp(qV/2kT) \quad (4)$$

由于器件的发光主要来自于扩散电流,而非辐射复合主要来自于复合电流,则可得:

$$\frac{R_r(n)}{R_n(n)} = \frac{2B_r n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0 T}\right)}{CN_{t,LED}} \equiv \frac{I_D}{I_R} = \frac{2n_i D_n}{L_n N_A d CN_{t,LED}} \exp\left(\frac{qV}{2k_0 T}\right) \quad (5)$$

将(5)式化简,结合半导体理论<sup>[7]</sup>将其及(2),(3)式依次代入有效光功率的原始表达式,则可得输出有效光功率  $P_{out}$  为:

$$P_{out} = \eta A chv \tau_{ph} \beta_{sp} R_r(n) = \eta A chv \tau_{ph} \beta_{sp} \times \frac{2\sqrt{D_n} n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0 T}\right)}{N_A d \sqrt{CN_{t,LED}} + 2\sqrt{D_n} n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0 T}\right)} \times \frac{I_{LED}}{qV_{act}} \quad (6)$$

### 2.1.2 光敏部分表征

光接收系统通过接受光信号并将其转化为电流或是电压,所以探测器性能就尤为重要.入射光照射在探测器上,在探测器内部激发出载流子.但由于响应速度等方面的问题,探测器只能对所吸收的光强或对几个周期内的平均光子数产生响应,所以探测器内光生载流子的产生率  $G$  正比于入射光功率, $G$  可表示为<sup>[8]</sup>:

$$G = \frac{\eta_{in} P_{out}}{h\nu} \quad (7)$$

由于光照产生的每个载流子均以平均漂移速度流过空间电荷层,则所有载流子对外电路瞬时电流的贡献为:

$$\bar{i}_p = \sqrt{2\alpha} G q \Gamma(\omega) = \sqrt{2\alpha} \frac{q \eta_{in} P_{out}}{h\nu} \Gamma(\omega) \quad (8)$$

其中  $\bar{i}_p$  为平均光电流; $G$  为载流子的产生率; $\eta_{in}$  为量子效率(一个光子激发出载流子对的几率); $\alpha$  为调制深度; $\Gamma(\omega)$  是载流子输运因子.

由于输入的有效光电流也就是输入的基极电流, $I_b = \bar{i}_p$  则可以得到输出电流符合一般双极型晶体管的性能,选用共射晶体管分析,发现在假定平均光电流恒定的条件下,放大系数  $h_{FE}$  的变化对器件性能的变化最为明显.由于根据晶体管原理  $I_E \propto I_b$ ,且比值为  $h_{FE} + 1$ ,同时  $I_C \propto I_b$  且比值为  $h_{FE}$ ,综合(6)和(8)式可得:

$$I_E = \bar{i}_s (h_{FE} + 1) = \frac{2\sqrt{D_n} n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0 T}\right)}{N_A d \sqrt{CN_{t,LED}} + 2\sqrt{D_n} n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0 T}\right)} \times \eta_1 A chv \tau_{ph} \beta_{sp} \times \frac{I_{LED}}{qV_{act}} \sqrt{2\alpha} \frac{q \eta_{in}}{h\nu} \Gamma(\omega) (h_{FE} + 1) \quad (9)$$

$$I_C = \bar{i}_s h_{FE} = \frac{2\sqrt{D_n} n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0 T}\right)}{N_A d \sqrt{CN_{t,LED}} + 2\sqrt{D_n} n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0 T}\right)} \times \eta_1 A chv \tau_{ph} \beta_{sp} \times \frac{I_{LED}}{qV_{act}} \sqrt{2\alpha} \frac{q \eta_{in}}{h\nu} \Gamma(\omega) h_{FE} \quad (10)$$

根据文献[5]提到的  $\Delta h_{FE}/h_{FE}$  的关系分析可知:

$$\frac{\Delta h_{FE}}{h_{FE}} = -\frac{1}{I_B} \left( \frac{dI_B}{d\mu_s} \times \frac{d\mu_s}{dN_s} \times \frac{dN_s}{dN_{t_b}} \right) kTN_{t_b} \quad (11)$$

式中  $\mu_s = q\varphi_s/kT$  是基区表面势  $\varphi_s$  的归一化表示;  $N_s$  为空间电荷区电荷面密度;  $N_{t_b}$  为光敏三极管的氧化层陷阱密度.

将(11)式代入(10)式,整理后可得(12)式:

$$\Delta I_C = \eta_1 Achv\tau_{ph}\beta_{sp} \frac{2\sqrt{D_n}n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right)}{N_A d \sqrt{CN_{t,LED}} + 2\sqrt{D_n}n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right)} \times \frac{I_{LED}}{qV_{act}} \times \frac{\sqrt{2\alpha}q\eta_{in}\Gamma(\omega)}{h\nu} \left(-\frac{1}{I_B}\right) \left(\frac{dI_B}{d\mu_s} \times \frac{d\mu_s}{dN_s} \times \frac{dN_s}{dN_{t_b}}\right) kTN_{t_b} \quad (12)$$

根据 CTR 和  $\Delta CTR$ <sup>[9]</sup> 的定义,将(10),(12)式分别代入,可以得到光电耦合器的 CTR 和  $\Delta CTR$  的表达式(13),(14)式:

$$CTR = \frac{I_C}{I_{LED}} = \frac{2\sqrt{D_n}n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right)}{N_A d \sqrt{CN_{t,LED}} + 2\sqrt{D_n}n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right)} \times \frac{\eta_1 Achv\tau_{ph}\beta_{sp}}{qV_{act}} \sqrt{2\alpha} \frac{q\eta_{in}\Gamma(\omega)}{h\nu} h_{FE} \times 100\% \quad (13)$$

$$\Delta CTR = \frac{\eta_1 Achv\tau_{ph}\beta_{sp}}{qV_{act}} \times \frac{2\sqrt{D_n}n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right)}{N_A d \sqrt{CN_{t,LED}} + 2\sqrt{D_n}n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right)} \times \sqrt{2\alpha} \frac{q\eta_{in}\Gamma(\omega)}{h\nu} \left(-\frac{1}{I_B}\right) \left(\frac{dI_B}{d\mu_s} \times \frac{d\mu_s}{dN_s} \times \frac{dN_s}{dN_{t_b}}\right) kTN_{t_b} \quad (14)$$

## 2.2 噪声模型

由于低频噪声通常是由器件中的陷阱引起的,  $1/f$  噪声是粒子集体运动中的普遍涨落现象,同时也是系统内部缺陷的一个反映,所以这种噪声携带丰富的信息.这种噪声较  $g-r$  噪声可更好地反映器件的可靠性,故本文主要研究器件  $1/f$  噪声模型.

根据 Van der Ziel 和 Harder 等人的低频噪声分析,  $1/f$  噪声主要分为与单电子性质相关的扩散  $1/f$  噪声和与界面态/表面态相关的复合  $1/f$  噪声两类<sup>[10]</sup>. 其中扩散  $1/f$  噪声主要是器件迁移率的涨落造成的少数扩散电流涨落引起的;而复合  $1/f$  噪声主要是由表面氧化层、空间电荷区等处的陷阱中心对载流子的随机俘获与发射,其噪声大小取决于陷阱密度的多少.本文的噪声模型是建立在这两种模型的基础上的.

根据光敏三极管结构和工作原理的研究可知,

光电耦合器的低频噪声主要来自于体区陷阱和空间电荷区附近的表面陷阱对载流子的复合和发射.具体来说,发光二极管的低频噪声主要是基区表面发射结空间电荷区中表面缺陷和位错引起的复合噪声,而光敏三极管的低频噪声主要是从发射区到收集区的少数扩散噪声以及收集区和基区间的复合噪声<sup>[5,11]</sup>.

下面利用已有噪声理论分别建立以上几种噪声光电耦合器的模型.根据胡格公式<sup>[10]</sup>,光敏三极管收集区的少数扩散噪声可以表示为:

$$S_{I_{C-D}}(f) = \frac{\alpha q I_{C-D}}{f\tau} \quad (15)$$

将(10)式代入(15)式,并引入集电极电流中扩散电流的比例系数  $\eta_D$ ,便可得收集区的少数扩散噪声的完整表达式:

$$S_{I_{C-D}}(f) = \frac{\alpha q}{f\tau} \times \frac{2\sqrt{D_n}n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right)}{N_A d \sqrt{CN_{t,LED}} + 2\sqrt{D_n}n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right)} \times \eta_1 Achv\tau_{ph}\beta_{sp} \frac{I_{LED}}{qV_{act}} \sqrt{2\alpha} \frac{q\eta_{in}\Gamma(\omega)}{h\nu} \eta_D h_{FE} \quad (16)$$

与界面态/表面态相关的复合  $1/f$  噪声遵循载流子数涨落理论<sup>[10]</sup>,因此复合电流  $I_R$  的噪声功率谱可以表示为

$$S_{I_R}(f) = \left(\frac{qn_1 A}{I_0}\right)^2 B \frac{kTN_{t_1}^*}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \times \frac{1}{f} I_R^2 \quad (17)$$

将(10)式代入(17)式,可得收集区和基区间的复合噪声完整表达式(18),其中  $N_{t_1}$  为收集区和基区间氧化层陷阱,  $\eta_R$  为集电极电流中复合电流的比例,满足  $\eta_R + \eta_D = 1$ .

$$S_{I_{C-R}}(f) = \left(\frac{qn_1 A}{I_0}\right)^2 B \frac{kTN_{t_1}}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \times \frac{1}{f} \times \left[ \frac{2\sqrt{D_n}n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right)}{N_A d \sqrt{CN_{t,LED}} + 2\sqrt{D_n}n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0T}\right)} \times \eta_1 Achv\tau_{ph}\beta_{sp} \frac{I_{LED}}{qV_{act}} \sqrt{2\alpha} \frac{q\eta_{in}\Gamma(\omega)}{h\nu} \eta_R h_{FE} \right]^2 \quad (18)$$

因为基区电流主要为基区表面空间电荷区的复合电流,所以基区表面发射结空间电荷区中表面陷阱和位错引起的复合噪声可以表示为(19)式,其中  $N_{t_2}$  为发射结和基区间氧化层陷阱,满足  $N_{t_1} + N_{t_2} = N_{t_b}$ .

$$S_{I_b}(f) = \left(\frac{qn_1 A}{I_0}\right)^2 B \frac{kTN_{t_2}}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \times \frac{1}{f} I_b^2 \quad (19)$$

将基极电流公式代入(19)式,最终可得基区复

合噪声表达式为:

$$S_{I_b}(f) = \left(\frac{qn_1 A}{I_0}\right)^2 B \frac{kTN_{t_2}}{\ln(\tau_2/\tau_1)} f \times \left[ \frac{2\sqrt{D_n} n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0 T}\right)}{N_A d \sqrt{CN_{t_1,LED}} + 2\sqrt{D_n} n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0 T}\right)} \times \eta_l A ch v \tau_{ph} \beta_{sp} \frac{I_{LED}}{qV_{act}} \sqrt{2\alpha} \frac{q\eta_{in}}{h\nu} \Gamma(\omega) \right]^2 \quad (20)$$

根据噪声的线性理论将以上噪声叠加,就可以得到光电耦合器的总噪声功率谱  $S_{I_c}(f)$  为:

$$S_{I_c}(f) = S_{I_b}(f) + S_{I_{LED}}(f) (CTR/h_{FE})^2 + S_{I_c}(f) \quad (21)$$

其中 LED 的噪声可表示为<sup>[4]</sup>:

$$S_{I_{LED}}(f) = \frac{\alpha q}{f\tau} \eta_0 I_{LED} + \left(\frac{qn_1 A}{I_0}\right)^2 B \frac{kTN_{t_1,LED}}{\ln(\tau_2/\tau_1)} \times \frac{1}{f} [(1 - \eta_0) I_{LED}]^2 \quad (22)$$

其中相关参量  $\eta_0$  可表示为  $\eta_0 = 2B_r n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0 T}\right) / CN_{t_1,LED} + 2B_r n_i \exp\left(\frac{qV}{2k_0 T}\right)$ .

将(16), (18)~(20)以及(22)式一起代入(21)式,便可得  $S_{I_c}(f)$  完整表达式. 由于本次实验使用的是后端固定电阻采样方式,所以输出噪声电压  $S_V(f)$  也可表示为:

$$S_V(f) = R_{采样}^2 S_{I_c}(f) \quad (23)$$

### 3 实验与结果分析

实验样品为国产 GH3201Z-4 型光电耦合器,噪声测量采用西安电子科技大学噪声及无损检测实验室自主研发的基于虚拟仪器的电子器件低频噪声测试仪系统. 电子器件的低频噪声通常包括白噪声、 $1/f$  噪声和  $g-r$  噪声,其功率谱密度<sup>[10]</sup>可表示为:

$$S(f) = A + \frac{B}{f^\gamma} + \frac{C}{1 + (f/f_0)^2} \quad (24)$$

其中  $A$  为白噪声的幅度; $B$  和  $\gamma$  分别为  $1/f$  噪声的幅度和频率指数因子; $C$  和  $f_0$  分别为  $g-r$  噪声的幅度和特征频率. 提取噪声参数在输入电流很宽的范围内均呈现出明显的  $1/f$  噪声特性,即在双对数坐标中功率谱和频率成反比,如图 1 所示. 随着输入电流增大,导致发光二极管的工作电流增加. 它会使得耦合到光敏三极管的光子数增加,增加的光子会在光敏三极管的光敏区附近产生更多的载流子,相当于基电流增大. 这样光敏三极管的低频噪声会增大,同时 LED 自身的电流噪声也随之增大. 光电耦

合器的低频噪声来源于光敏三极管的低频噪声和耦合的发光二极管的低频噪声. 故可知随着输入电流的增加,光电耦合器  $1/f$  噪声增大. 从图 1 中也可以看出,随着输入电流的增加, $1/f$  噪声增大,同时随电流的增大, $1/f$  噪声的增大幅值明显变大,故实验结果证明理论的正确性.

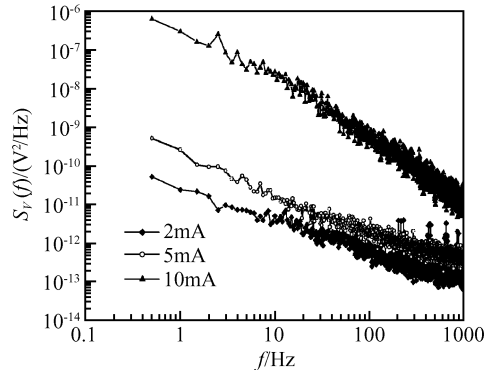


图 1 不同偏置电流下的  $1/f$  噪声频谱图

Fig. 1 Low frequency noise spectra at various bias currents

通过提取输入电流在 2~10mA 之间变化时的电压  $1/f$  噪声幅值发现,在不同的输入电流范围内  $1/f$  噪声幅值表现出不同的变化规律:在 5mA 以下,电压  $1/f$  噪声幅值接近与输入电流成正比;当输入电流大于 5mA 时,电压  $1/f$  噪声幅值继续增加,且接近与输入电流的平方成正比,如图 2 所示. 在大注入的条件下,结附近两种材料晶格常数的失配使得在界面处存在大量的悬挂键和弱键. 在一定的应力作用下,这些悬挂键可以失去一个未成对电子或获得一个配位电子而形成界面态,弱键也会断裂形成新的界面态,结区表面原有的一些悬挂键和弱键也会以相同的方式形成新的表面态. 尽管在某种情

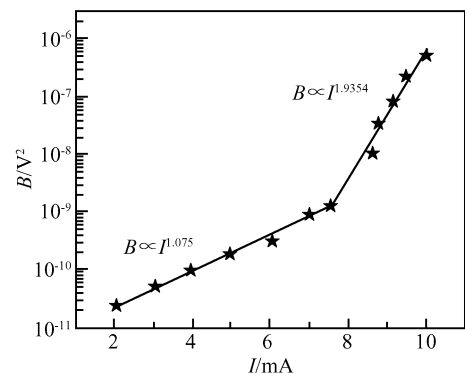


图 2 噪声幅值与输入电流的关系

Fig. 2 Magnitudes of  $1/f$  noise versus various bias currents

况下界面态本身并不参与载流子输运,但是当有外加电压时,结平面垂直的解离面上含有大量的表面复合中心,通过界面态复合参与载流子输运,使有效陷阱数增加<sup>[12]</sup>.在大注入条件下复合电流的比例大幅增加,构成了总电流的主要成分.所以在在大电流时,光敏三极管的低频噪声和耦合的发光二极管低频噪声都主要为复合  $1/f$  噪声,其中  $\beta_{I_E}$  接近于 2,而小注入工作区低频噪声都主要为扩散  $1/f$  噪声,其中  $\beta_{I_E}$  接近于 1. 故可以证明理论与实验的一致性.

从噪声模型(22)式可以得到,当 LED 处在低电流正向工作区时,  $S_{I_{LED}}(f)$  的电流指数  $\beta_{I_{LED}}(f)$  都应略大于 1<sup>[4]</sup>. 光敏三极管处在放大区时,在小注入条件下  $\eta_D$  近似等于 1,光敏三极管噪声主要为(16)式表示的扩散噪声. 由于基区表面、发射结空间电荷区尚存在少量复合电流,所以产生的复合噪声谱如(20),(18)式. 综合以上分析,根据(21)式就可得到小注入条件下  $S_{I_E}(f)$  的电流指数  $\beta_{I_E}$  都应略大于 1. 同理分析 LED 处在注入条件下,由于  $\beta_{I_{LED}}(f)$  小于 2,  $\eta_R$  近似等于 1,得到  $S_{I_E}(f)$  相对  $I_{LED}$  的电流指数  $\beta_{I_E}$  应接近于 2 但又略小于 2. 根据以上器件理论和模型的分析以及对实验结果的讨论可知:小注入时  $1/f$  噪声电流指数略大于 1;大注入时电压  $1/f$  噪声电流指数略小于 2. 理论模型与实验结论是相符合的,证明了噪声模型的正确性.

器件的 CTR 测试结果如图 3 中辐照前曲线所示,从图中可以发现,在 LED 输入电流小于 10mA 时,器件 CTR 随电流增大而增大,随后器件 CTR 随输入电流增大而减小. 根据模型(13)和(14)式可以明确地得到 CTR 随  $N_{t,LED}$  和  $N_{t_b}$  的增大而减小,同时也受输入电压范围的影响. 而之前说明了小注入工作区诱生界面态等陷阱尚未产生,由(13)式得到此条件下随输入电压的增大,输入电流中发光部分所占的分电流比例增加,造成 CTR 随之增大.

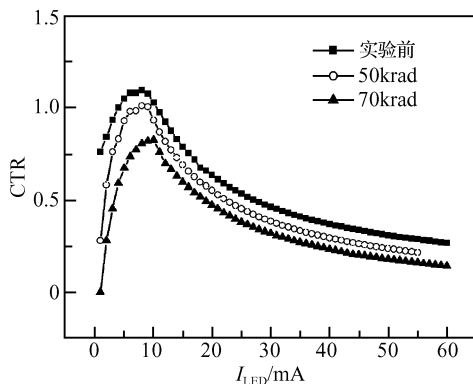


图3 辐照损伤造成 CTR 衰减与输入电流的关系

Fig.3 CTR versus bias current at various total doses

反之当工作电压进入大注入区后,随输入电压的增大诱生界面态等陷阱产生量增大,由(13)和(14)式得到发光部分所占的分电流比例将随之减小,同时  $h_{FE}$  也会减小,故可得到此范围 CTR 随输入电流电压的增大而减少的结果. 此理论分析和模型推论与图 3 所示的实验结果一致,证明了 CTR 模型的正确性.

## 4 光电耦合器 CTR 的噪声表征

CTR 的衰减是光电耦合器失效的主要表现,在以上建立并已验证的电学模型和噪声模型的基础上,可以研究光电耦合器性能表征参量 CTR 与低频  $1/f$  噪声之间关系. 从光电耦合器的电学模型发现,(6)和(11)两式表明器件中发光部分陷阱  $N_{t,LED}$  和光敏部分陷阱  $N_{t_b}$  分别导致 LED 有源区的无效复合量的增加与光敏三极管放大倍数的衰减,最终在(13)和(14)式中表现为致使 CTR 老化衰减. 应用噪声模型进行分析,通过分析(18),(20)及(22)三式可以发现  $N_{t_b}$  中的两个分量  $N_{t_1}$ ,  $N_{t_2}$  以及  $N_{t,LED}$  影响  $1/f$  噪声的功率谱值;陷阱同时可以使得器件总电流中复合电流的比例增加,造成总噪声(21)式中复合噪声比例的增加,可得上述陷阱越多,则从总噪声谱中提取的  $\beta_{I_E}$  越接近于 2. 将以上分析结果综合在一起可以得到  $N_{t,LED}$  和  $N_{t_b}$  越多则器件 CTR 老化衰减越严重,而  $1/f$  噪声的功率谱值越大,  $\beta_{I_E}$  越接近于 2 则说明器件中含陷阱越多,证实  $1/f$  噪声功率谱增大与器件 CTR 衰减之间存在相关性.

通过对光电耦合器在辐射环境中失效机理的研究,以及在加速寿命实验等环境失效实验中发现:辐照剂量、老化实验时间、老化实验条件都是影响 CTR 衰减量的因素,而这些实验均会随应力强度的增加导致器件表面态陷阱、悬挂键陷阱、氧化层陷阱等缺陷增加. 图 3 为器件在辐照实验中造成的 CTR 衰减情况,从图中可知由于辐照剂量增加导致陷阱数增加使得 CTR 随之减小. 由于此类实验产生陷阱增加同样会使噪声功率谱值增大,实验结果表明随辐照剂量增加噪声谱值也随之增大(见图 4);同时通过对图 2 分析表明,复合  $1/f$  噪声比例随陷阱数量的增加而增大,致使  $\beta_{I_E}$  越接近于 2. 文献[12~14]有关光电耦合器噪声理论及辐照实验的结论与本文结果一致,也可作为本文理论结果正确性的佐证之一.

下面对辐照实验中 CTR 与噪声幅值变化做定量比较. 从图 3 和图 4 的实验数据可以发现,随辐照剂量的增加,辐射导致发光部分和光敏部分表面态陷阱、悬挂键陷阱、氧化层陷阱等增加,因而 CTR 和噪声幅值都在增加. 例如,总剂量为 50krad 时,

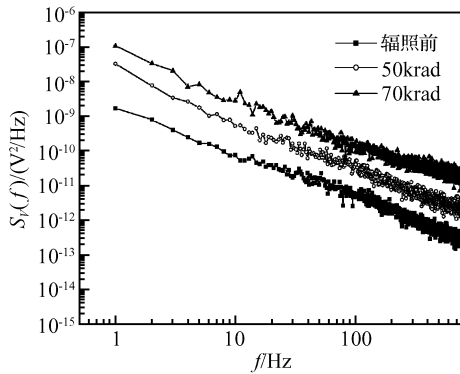


图 4 不同辐照条件下低频噪声功率谱图

Fig. 4 Low frequency noise spectra at various total doses

CTR 衰减量为 10% 左右, 当辐照总剂量为 70krad 时, CTR 衰减量为 30% 左右. 与此同时, 噪声的功率谱幅值增大一个数量级到接近两个数量级. 另外考察器件老化前后噪声谱幅值与电流的关系, 可以发现老化前后噪声均随电流的增大而增大, 且老化后噪声幅值增大七倍左右<sup>[12]</sup>. 文献[9, 13, 14]中的老化实验也得到类似结果. 因此, 可以得到以下结论: 噪声比 CTR 对陷阱数量变化更敏感, 在相同应力损伤条件下前者变化更显著.

## 5 结论

本文通过对器件内部结构的研究, 建立了光电耦合器 CTR 表征的物理模型. 通过对该模型的分析发现, 随陷阱数增多, 将造成 LED 发光效率、光敏三极管放大倍数等性能参数下降, 以至 CTR 的衰减量显著增大. 辐照前后 CTR 的衰减规律的实验结果证实了模型推导的正确性. 其次, 本文建立了光电耦合器噪声模型, 该模型表明低频噪声与俘获载流子陷阱数量是相关的. 噪声幅值比 CTR 参数对于陷阱变化更为敏感, 而电流噪声指数的取值范围也可反映扩散电流比例. 噪声幅值越大,  $\beta_{FE}$  越接近于 2, 器件可靠性也就越差, 同时 CTR 老化衰减量越大, 继而影响器件可靠性, 造成失效率显著增大.

## 参考文献

- [1] Dai Yisong, Xu Jiansheng. The noise analysis and noise reliability indicators of optoelectron coupled devices. *Solid-State Electron*, 2000, 44(12): 1495
- [2] Jevtic M M. Noise as a diagnostic and predication tool in reliability physics. *Microelectron Reliab*, 1995, 35(3): 1925
- [3] Ursutiu D, Jones B K. Low-frequency noise used as a lifetime test of LEDs. *Semicond Sci Technol*, 1996, 24(11): 1133
- [4] Hu Jin, Du Lei, Zhuang Yiqi. Noise as a representation for reliability of light emitting diode. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(3): 1384 (in Chinese) [胡瑾, 杜磊, 庄奕琪. 发光二极管的可靠性表征. *物理学报*, 2006, 55(3): 1384]
- [5] Zhuang Yiqi, Sun Qing. Correlation between  $1/f$  noise  $h_{FE}$  long-term instability in bipolar devices. *IEEE Trans Electron Devices*, 1991, 38: 2540
- [6] Chen W Y, Yang S R, Liu S Y. 2001 Opto-electronic devices circuit model and the circuit-level simulation of OEIC. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 45 (in Chinese) [陈维友, 杨树人, 刘式塘. 光电子器件模型与 OEIC 模拟. 北京: 国防工业出版社, 2001: 45]
- [7] Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng. Semiconductor physics. Beijing: National Defense Industry Press, 1994: 116 (in Chinese) [刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学. 北京: 国防工业出版社, 1994: 116]
- [8] Zhuang Yiqi, Sun Qing. Correlation between  $1/f$  noise  $h_{FE}$  long-term instability in bipolar devices. *IEEE Trans Electron Devices*, 1991, 38(11): 2540
- [9] Bajenescio T I. Ageing problem of optocouplers. *Proceedings of Electrotechnical Conference*, 1994, 2(4): 571
- [10] Zhuang Yiqi, Sun Qing. Noise and its minimizing technology in semiconductor devices. Beijing: National Defense Industry Press, 1993: 172 (in Chinese) [庄奕琪, 孙青. 半导体器件中的噪声及其低噪声化技术. 北京: 国防工业出版社, 1993: 172]
- [11] Simoen E, Decoutere S. Impact of polysilicon emitter interfacial layer engineering on the noise of bipolar transistors. *IEEE Trans Electron Devices*, 1996, 43(12): 2261
- [12] Bao Junlin, Zhuang Yiqi, Du Lei. A model for  $1/f$  noise in optoelectronic coupled devices. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(9): 1359 (in Chinese) [包军林, 庄奕琪, 杜磊. 光电耦合器件闪烁噪声模型. *光子学报*, 2005, 34(9): 1359]
- [13] Lischka H, Henschel H, Köhn O, et al. Radiation effect in light emitting diodes. *Proceeding of Laser Diodes, Photodiodes and Optocouplers*, 1993: 226
- [14] Rax B G, Lee C I. Total dose and proton damage in optocouplers. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1996, 43(6): 3145

## Noise as a Representation for CTR of Optoelectronic Coupled Devices<sup>\*</sup>

Hu Jin<sup>1,†</sup>, Du Lei<sup>1</sup>, Zhuang Yiqi<sup>2</sup>, He Liang<sup>1</sup>, Bao Junlin<sup>2</sup>, Huang Xiaojun<sup>1</sup>,  
Chen Chunxia<sup>1</sup>, and Wei Tao<sup>1</sup>

(1 *School of Technology Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

(2 *Microelectronic Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

**Abstract:** Based on study of the principle of OCDs and the theory of  $1/f$  noise, we present a CTR model and  $1/f$  noise model of OCDs. The electric noise and CTR of OCDs are measured over a wide range of currents, and the experimental results agree well with the proposed models. By integrating the CTR model and  $1/f$  noise model, a relationship between CTR degradation and  $1/f$  noise is further studied. The relationship is used to analyze irradiation experiments, and results agree precisely with the theoretical model. This proves by theory and experiment that the larger the noise magnitude, the closer the current exponent is to 2, leading to the degradation of device reliability and significant degradation of the CTR. Consequently, it is shown that noise can represent not only the CTR of OCDs but also the reliability of the device.

**Key words:**  $1/f$  noise; OCDs; CTR; traps

**PACC:** 7270; 5225G; 7960

**Article ID:** 0253-4177(2007)04-0597-07

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60276028), the National Defense Pre-Research Foundation of China (No. 51411040601DZ014), and the Key Laboratory Foundation of National Defense Science and Technology (No. 51433030103DZ01)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: hujin007@eyou.com

Received 11 September 2006, revised manuscript received 24 November 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics